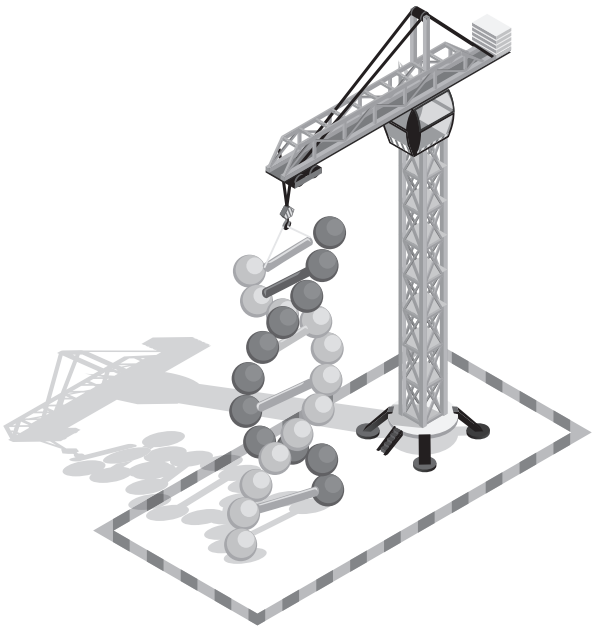
工程研究与应用

Engineering Research and Application



ART AND TECHNOLOGY PRESS INC.

(517 666 0904)

263 S KENWOOD ST 560

CASPER,WY 82601

Copyright © 2026 by ART AND TECHNOLOGY PRESS INC. (United States)

Complimentary Copy

ART AND TECHNOLOGY PRESS INC
(United States)

Editorial Board

Editors-in-Chief

Xiaolei Ju
China Architectural Design and Research Institute, China

Meilian Chao
Heze Dehe Construction Engineering Group Co., LTD.

Editorial Board Member

Xianbo Tu
Guizhou Institute of Geological Exploration, General Bureau of Geology and Mines, Sinochem, China

Neda Abbasi
School of Engineering and Technology

Tanvir Ahamed
School of Engineering and Technology

Zhen Xu
Zhongtong Bus Holding Co., LTD.

Yang Li
Wuhan Aviation Port Development Group Co., Ltd.

目录 CONTENTS

工程研究与应用

Engineering Research and Application

第4卷 第10期　2026年10月刊

主　管　ART AND TECHNOLOGY PRESS INC.

主　办　ART AND TECHNOLOGY PRESS INC.

编　辑　《工程研究与应用》编辑部

ISSN(O): 2993-2742

ISSN(P): 2995-3154

地　址：263 S KENWOOD ST 560
CASPER,WY 82601

网　址：https://arttechpress.com

本刊说明：

凡向本刊所投稿件，全体作者需签署论文著作权转让声明书和论文发表承诺书，声明、承诺及相关事项如下：

1. 作者将论文的复制权、发行权、网络传播权、翻译权、汇编权、信息网络传播权、改编权等著作权在世界范围内免费转让给本刊。
2. 论文不侵犯他人著作权和其他权利，否则作者将承担由此产生的全部责任，并赔偿由此给出版单位造成的全部损失。
3. 论文署名作者享有该作品的完全著作权，署名作者的身份真实。
4. 论文未曾以任何形式公开发表过。
5. 作者所投本刊稿件，本刊编辑部拥有修改权。

工程科学 | ENGINEERING SCIENCE

001 基于数值模拟的卡钻井段应力分布规律与安全钻井液窗口确定 宋俊杰，申少广
Numerical Simulation-Based Stress Distribution Law of Stuck Pipe Interval and Determination of Safe Drilling Fluid Window　Song Junjie, Shen Shaoguang

004 桩基承载力不足在焦炉工程中的成因与对策　李治奇，李军，李海湖，李育红，李果绵
Causes and Countermeasures of Insufficient Bearing Capacity of Pile Foundations in Coke Oven Projects　Li Zhiqi, Li Jun, Li Haihu, Li Yuhong, Li Guomian

007 工程经济要素变动下项目成本的精准管控措施　李京京
Accurate Control Measures for Project Costs under Changes in Engineering Economic Factors　Li Jingjing

010 船体高强度钢焊接残余应力分布数值模拟与调控方法探究　王超碧
Research on Numerical Simulation and Regulation Method of Welding Residual Stress Distribution of High-Strength Steel for Hull　Wang Chaobi

014 森林康养基地选址的实证研究——以达州市天鹰寨为例　袁中山
An Empirical Study on the Site Selection for Forest-based Health and Wellness Bases: A Case Study of Tianyingzhai, Dazhou City　Yuan Zhongshan

017 BIM 技术在工程施工监理全过程中的应用实践研究　林新
Research on Application Practice of BIM Technology in the Whole Process of Engineering Construction Supervision　Lin Xin

021 低雷诺数环形螺旋桨气动特性及噪声抑制分析　杨逸凯
Analysis on Aerodynamic Characteristics and Noise Suppression of Low-Reynolds-Number Ducted Propellers　Yang Yikai

024 大规模复杂军工项目管理流程优化措施　张小龙
Measures to Optimize the Management Process of Large-Scale and Complex Military Projects　Zhang Xiaolong

027 百千万工程背景下全民健身中心建设中的投资控制与管理浅析　许楚娟
Brief Analysis on Investment Control and Management in the Construction of National Fitness Centers Under the Background of Hundred-Thousand-Ten-Thousand Project　Xu Chujuan

030 农村道路升级改造工程质量控制研究　霍健伟
Research on Quality Control of Rural Road Upgrading and Reconstruction Project　Huo Jianwei

033 城市地下市政管廊工程管线综合规划研究　王玮，张野
Research on Integrated Planning of Urban Underground Municipal Utility Tunnels　Wang Wei, Zhang Ye

036 晶化釜搅拌器轴承故障分析及处理措施　万元东，李建恒，黄良国
Analysis of Bearing Faults in the Crystallization Vessel Mixer and Handling Measures　Wan Yuandong, Li Jianheng, Huang Liangguo

040 高炉重力除尘器密闭输灰系统工艺改进浅析　刘翔
Brief Analysis on Process Improvement of Closed Ash Conveying System for Blast Furnace Gravity Dust Collector　Liu Xiang

043 复杂灾害环境消防救援装备实战调度系统研究　李得志
Research on a Practical Deployment System for Fire and Rescue Equipment in Complex Disaster Environments　Li Dezhi

047 AGI 时代人类文明主体性：嵌套能动性框架、数据驱动屏障与可验证边界 辜茂军
Human Civilization Subjectivity in the AGI Era: Nested Agency Framework, Data-Driven Barriers and Verifiable Boundaries Gu Maojun

052 基于 PLC 的烘焙自动化生产线控制系统设计 杨绍明
Design of Control System for Baking Automation Production Line Based on PLC Yang Shaoming

055 物资仓储管理中库存流转效率提升路径探究 李文华
Research on Improvement Path of Inventory Circulation Efficiency in Material Warehouse Management Li Wenhua

058 DBO 项目全过程管理难点与控制策略研究 芮栋梁
Research on the Challenges and Control Strategies in the Whole Process Management of DBO Projects Rui Dongliang

061 水利工程混凝土裂缝防治措施的实践研究 杨聪颖
Practical Research on Prevention and Control Measures for Concrete Cracks in Hydraulic Engineering Yang Congying

065 双向找坡屋面精细化施工综合技术研究 郭起轩，刘伟，孙翌博，许凯悦，刘家书
Research on Fine Erection Construction Technology of Formwork Support System for Bidirectional Sloped Roof Guo Qixuan, Liu Wei, Sun Yibo, Xu Kaiyue, Liu Jiashu

069 公路桥梁病害成因分析及养护加固技术探讨 方政
Analysis of the Causes of Highway Bridge Diseases and Exploration of Maintenance and Reinforcement Techniques Fang Zheng

073 基于 YOLOv8s 的 PCBA 导电海绵位置视觉检测算法研究 罗成，罗浩文
Research on Visual Detection Algorithm for Conductive Sponge Position in PCBA Based on YOLOv8s Luo Cheng, Luo Haowen

建筑科学 | BUILDING SCIENCE

077 基于 BIM 技术的铝模板现浇楼梯一次浇筑成型施工技术研究 申定龙，刘学勇，卢文培，刘坤
Research on One-Pour Forming Construction Technology of Cast-In-Place Stairs With Aluminum Formwork Based on BIM Technology Shen Dinglong, Liu Xueyong, Lu Wenpei, Liu Kun

081 基于 BIM 的智慧工地施工管控模式与实践 邢文博
BIM-based Construction Management and Control Model and Practice in Smart Construction Sites Xing Wenbo

084 论述 BIM 技术在市政路桥施工中的应用 胡可苟
Discussion on Application of BIM Technology in Municipal Road and Bridge Construction Hu Kegou

087 论述室内环境艺术设计中软装饰材料的运用 卢顺向
Discussion on Application of Soft Decoration Materials in Interior Environmental Art Design Lu Shunxiang

090 高校海绵设施改造的路径探索 张飞，彭琳，刘佳
Exploration on the Renovation Path of Sponge-Facility in University Campuses Zhang Fei, Peng Lin, Liu Jia

093 数字化背景下建筑项目设计全过程管理策略研究 陈佳悦
Research on Whole-Process Management Strategy of Construction Project Design Under the Background of Digitalization Chen Jiayue

096 既有办公大楼智能化改造工程实践 姚天栋
Practical Application of Intelligent Renovation Project for Existing Office Buildings Yao Tiandong

099 大体积混凝土施工温控技术及裂缝防控研究 邢友华
Study on Temperature Control Technology and Crack Prevention and Control in Mass Concrete Construction Xing Youhua

102 技术管理驱动下市政道路工程“三控三管一协调”的效能提升策略 张俊
The Efficiency Enhancement Strategy of "Three Controls, Three Management, and One Coordination" in Municipal Road Engineering Driven by Technical Management Zhang Jun

106 大跨度涉河钢箱梁顶推施工技术研究与实施 鞠习超，章勇，刘帅杰，吴建衡，边文同
Research and Implementation of Top Pushing Construction Technology for Large Span River Crossing Steel Box Beams Ju Xichao, Zhang Yong, Liu Shuaijie, Wu Jianheng, Bian Wentong

能源科学 | ENERGY SCIENCE

109 城镇自来水厂运行安全风险辨识与分级管控策略研究 李铮
Research on Risk Identification and Hierarchical Control Strategy for Operation Safety of Urban Waterworks Li Zheng

112 锅炉燃烧优化与低氮排放协同控制策略研究 史童星
Research on Collaborative Control Strategy for Boiler Combustion Optimization and Low Nitrogen Emission Shi Tongxing

115 探究高层建筑施工质量管理控制措施 郭天佑
Exploration on Construction Quality Management and Control Measures of High-Rise Buildings Guo Tianyou

118 高炉炼铁日常生产操作优化及降本增效实践探讨 郑志辉，张晋晋
Discussion on Daily Production Operation Optimization and Cost-Reduction & Efficiency-Improvement Practice of Blast Furnace Ironmaking Zheng Zhihui, Zhang Jinjin

121 露天煤矿开采损毁国土空间的生态修复技术路径研究 付红磊，刘志强
Research on Ecological Restoration Technical Path of Land Space Damaged by Open-pit Coal Mining Fu Honglei, Liu Zhiqiang

124 湍流凝并矿井除尘装置模拟与设计 王越，木拉里·马扎甫
Simulation and Design of a Turbulent Agglomeration Mine Dust Removal System Wang Yue, Mulali·Mazhafu

130 干熄焦年修高炉干湿熄焦切换生产实践 薛小康，刘红波
Production Practice of Switching Between Dry and Wet Coke Quenching for Blast Furnace During Annual Maintenance of Dry Coke Quenching Xue Xiaokang, Liu Hongbo

133 海洋石油平台台风监测数据双端接收容错机制设计 时麟焱，萧阳，孙浩原
Design of Dual-End Receiving Fault-Tolerant Mechanism for Typhoon Monitoring Data of Offshore Oil Platforms Shi Linyan, Xiao Yang, Sun Haoyuan

136 机电系统全生命周期节能关键技术研究 王勃
Research on Key Energy-Saving Technologies for Full-Life-Cycle of Electromechanical Systems Wang Bo

139 城市供水系统升级中水厂改造与市政管网建设施工技术实践研究 方鹏
Research on Construction Technology Practice of Water Plant Renovation and Municipal Pipeline Network Construction in Urban Water Supply System Upgrades Fang Peng

142 青海油田钻井监督三维协同培训质量管理体系构建与实践 姜楠，焦海明，钟国财，江飞，王大军
Construction and Practice of Three-dimensional Collaborative Training Quality Management System for Drilling Supervisors in Qinghai Oilfield Jiang Nan, Jiao Haiming, Zhong Guocai, Jiang Fei, Wang Dajun

145 兰炭及 CDQ 粉配入对高炉喷吹燃料成本的影响分析 王佳明，梁立新，王宗晖
Analysis of the Impact of Adding Semi-coke and CDQ Fines on the Fuel Cost of Blast Furnace Injection Wang Jiaming, Liang Lixin, Wang Zonghui

148 人工智能在电厂协同设计中的运用研究 崔宗尧，冀宇超
Research on the Application of Artificial Intelligence in Collaborative Power Plant Design Cui Zongyao, Ji Zichao

基于数值模拟的卡钻井段应力分布规律与安全钻井液窗口确定

宋俊杰[1]，申少广[2]

1. 中海油服一体化和新能源事业部平台作业公司，天津 300450

2. 中海油服油田化学事业部塘沽作业公司钻完井液业务部，天津 300450

DOI:10.61369/ERA.2026100001

摘　　要： 井周应力的分布状态直接和卡钻事故产生关联，这类井下的复杂事故在钻井工程当中会频繁地出现，岩石力学原理开展揭示卡钻井段应力分布规律的工作，进而开展阐明井壁稳定性的作用机理的工作。井眼形成引发了井周应力的重分布，切向应力集中以及径向应力卸荷共同发挥作用，使得井壁稳定性出现下降，要是钻井液密度偏低，那井壁就可能会出现坍塌缩径的情况，进而引发卡钻；要是密度偏高，那就可能导致地层破裂扩径，同样会造成卡钻问题。本文来确立安全钻井液密度窗口的判定准则以及现场实施途径，为开展防范以及管控卡钻事故的工作提供了理论基础和操作指引。

关 键 词： 卡钻；井壁稳定；应力分布；安全钻井液窗口；岩石力学

Numerical Simulation-Based Stress Distribution Law of Stuck Pipe Interval and Determination of Safe Drilling Fluid Window

Song Junjie[1], Shen Shaoguang[2]

1. Platform Operation Company, Integrated and New Energy Division, China Oilfield Services Limited, Tianjin 300450

2. Drilling & Completion Fluid Department, Tanggu Operation Company, Oilfield Chemistry Division, China Oilfield Services Limited, Tianjin 300450

Abstract: The distribution of circumferential stress around a borehole is directly related to stuck pipe incidents. Such downhole complex accidents frequently occur in drilling engineering. The rock mechanics principle is adopted to reveal the stress distribution law of stuck pipe intervals and further illustrate the mechanism of wellbore stability. The formation of the wellbore triggers the redistribution of stress around the borehole. The combined effects of tangential stress concentration and radial stress unloading reduce wellbore stability. If the drilling fluid density is too low, wellbore collapse and hole shrinkage may occur, thereby causing stuck pipe. If the density is excessively high, formation fracture and hole enlargement may be induced, which also leads to stuck pipe. This paper establishes the criteria for determining the safe drilling fluid density window and its field implementation approach, providing theoretical basis and operational guidelines for preventing and controlling stuck pipe accidents.

Keywords: stuck pipe; wellbore stability; stress distribution; safe drilling fluid window; rock mechanics

引言

在油气钻井作业开展的过程当中，井下常常会出现卡钻事故，这类情形不仅普遍存在，并且危害极大，钻柱被卡在井眼当中，其活动受到了限制，这样就会使得非生产时间得以大幅增加，甚至还可能引发井眼报废或者侧钻等比较严重的问题。钻井工程当中事故频繁发生，卡钻问题显得尤其突出，它所引发的经济损失在井下事故方面占据着显著的位置，卡钻的缘由较为复杂，涉及到地质条件、钻井液性能、钻柱力学以及井眼轨迹等多个方面的因素。卡钻现象的主要原因是井周应力失衡，从而引发了井眼形态的变化或者井壁的塌陷，井眼形成的时候，地层岩石原本所具有的三向应力平衡就被打破了，应力会在井壁这个新自由面上开展重新分布工作。井壁破坏的主要原因是应力重分布超出了岩石的承载极限，从而引发坍塌掉块或者井眼缩径的情况，并且会造成钻柱卡阻，深入开展对卡钻井段应力分布规律的理解工作，准确地去评估井壁稳定的状况，来确定适宜的钻井液密度范围，这对于预防卡钻事故开展管理工作是极为重要的。鉴于岩石力学原理，开展对钻井卡钻段应力分布特性的系统阐述，去处理井壁失稳的力学机制分析工作，来实现安全钻井窗口确定方法的提出，目的是给现场的钻井作业提供理论指导。

Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

一、卡钻井段井周应力分布特征

（一）原始地应力状态

地应力状态可以借助主应力数值差异来开展划分，分为三类典型模式，垂向主应力在正断层应力区开展主导地位的占据工作，最大水平主应力紧跟在后面，最小水平主应力处于末尾位置。走滑断层应力区呈现出最大水平主应力、垂向主应力以及最小水平主应力依次递减这样的分布情况，逆断层应力区会呈现出最大水平主应力，其次是最小水平主应力，而垂向主应力是最小的。水合物储层钻井过程中，高温钻井液通过热传导、热对流等方式向地层传输的热量会导致不同程 度的水合物分解，从而加剧井壁的失稳状况。[1] 井壁的稳定性会受到地应力状态的显著影响，不同的应力条件所引发的结果差异极大程度上，在进行钻井工作之前，原始的地应力场处于一种相对平衡的状态，岩石在三维应力环境当中得以维持稳定，并没有出现破裂的情况，钻井作业会把这种平衡打破。

（二）井眼形成后的应力重分布

在井眼钻穿了之后，原本占据着空间的岩石被进行移除，井壁变成了新的自由面，这样一来，井周应力场会发生根本性的转变，并且应力状态会被重新进行分配，井眼形成的瞬间，井壁的径向应力会从原地应力马上降低到钻井液柱压力，这是最为明显的变化。在钻开地层之前，地层的主要应力场称为地应力，通常将地应力分为3个分量，即垂向应力（上覆岩层应力）、最大水平应力以及最小水平应力。[2] 切向应力出现了急剧攀升的情况，进而引发了应力集中现象，在井周的不同方位方面，切向应力所出现的增长幅度是存在差别的。在钻井过程中，由于其复杂的地质成因和多变的海洋环境，深水、超深水钻井对井壁稳定的分析精度要求更高，为防止出现井壁失稳，应合理计算安全钻井液密度，使井壁既不因钻井液密度过低而发生剪切破坏，引起地层坍塌，又不因钻井液密度过高而压裂地层。[3] 在最小水平主应力方向上，应力集中这种现象是最为突出的，它的数值能够达到原地应力的若干倍；切向应力在最大水平主应力方向上所产生的集中程度相对来说比较低。井眼轨迹以及地应力状态同时对轴向应力的复杂演变开展影响工作，直井当中，轴向应力是受垂向主应力以及泊松效应所主导的，它的波动范围通常没有切向应力那么显著，井壁表层的应力会进行重新分配，这种效应会持续向地层内部延伸，并且逐渐减弱。井壁周边的应力分布呈现出梯度变化的情况，在远离井壁的区域会逐渐趋近原始地应力的状态，钻井活动对地层所产生的扰动，它的影响范围大致被局限在井眼半径倍数之内，要是超出了这个界限，那么地层就基本上会维持它的原始状态。

二、卡钻发生的力学机制

（一）井壁失稳的基本模式

剪切破坏模式经常在钻井液密度不足的情况下出现，井壁岩石所承受的切向应力超出了它的抗剪极限，这使得岩石进入了剪切屈服状态，井壁岩石会因为发生剪切破坏而碎裂剥落，这样就会致使井径扩大，甚至导致井壁失稳。井眼环空当中堆积了大量坍塌物，要是情况严重的话，钻柱会被紧紧地包裹住，从而形成卡钻，要是钻井液密度超出了合理范围，那么拉伸破坏模式就会出现，井壁岩石所承受的切向应力，有可能会转变为拉应力。要是井壁岩石所承受的拉应力超越了它的抗拉强度，那就会引发拉伸破裂，进而出现沿着井轴延伸的纵向裂缝，钻井液漏失风险是由裂缝扩展所导致的，并且井壁剥落会引发扩径卡钻的情况。钻井液密度区间呈现出两种破坏模式的相反特性，这就决定了安全钻井窗口的存在，也就是：钻井液密度控制时，既不能过低，否则会发生剪切破坏，也不能过高，否则会发生拉伸破坏。

（二）坍塌 – 缩径型卡钻的力学过程

井壁岩石呈现出塑性特性，主要原因是钻井液密度没能有效地抗衡井周应力，岩石在切向应力集中的区域当中萌生并且扩展了微裂隙，应力持续地作用，微裂隙会逐步地贯通，这样宏观破裂面就得以形成。井壁岩石由于约束失效进而出现剥落现象，最终掉到环空区域当中，井周的应力分布呈现出并非均匀的特性，切向应力峰值的方位会成为优先开展作用的区域，在正断层应力区域当中，塌陷现象通常会沿着最小水平主应力方向展现出来；走滑断层的应力区当中，坍塌方向呈现出了复杂的特性。那么井眼截面在井壁坍塌之后会发生变形，把圆形转变成椭圆形，它的长轴方向和坍塌方向保持一致，岩块会持续不断地堆积在井底环空这个地方，钻柱以及井壁之间的间隙被堆积物给填满了，这样钻柱就被卡住了。井眼缩径现象会直接导致钻柱活动受到限制，坍塌缩径卡钻呈现出渐进的这个特性，初期仅仅是表现为起下钻的阻力有所增加，要是没有及时去处理，就会马上演变为严重卡钻。

（三）破裂 – 扩径型卡钻的力学过程

井壁承受着由于钻井液高密度所引发的过度内压，井周切向应力的峰值区域当中，原本处于受压状态有可能转变为受拉状态，岩石具备比较强的抗压能力，然而抗拉性能却很明显地偏弱。要是有拉应力产生，那么井壁就会倾向于开展拉伸致使的破裂工作。在深井钻井过程中，尽管井壁存在泥饼的遮挡作用，但钻井液在压差作用下仍然会渗流进入地层，使得井壁周围岩体的孔隙压力增大，引起岩石的体积应变。[4] 拉伸破坏所呈现出来的是沿着井轴方向开展的纵向裂缝，井壁的裂缝朝着地层的深处开展扩展，并且这样一来就会致使钻井液大量流失，会加剧裂缝扩展现象，并且引发连锁反应。

（四）影响卡钻的主要因素

地质条件是导致卡钻现象出现的根本控制要素，在高构造应力区、断层破碎带、软硬交错地层以及膨胀性泥页岩等地质条件当中，卡钻的风险会显著提高，泥页岩所出现的水化膨胀现象，特别值得去开展深入探究工作。当埋深大于1500 ~ 3000 米时，大部分水以结合水的形式存在，ft 堆积在蒙脱石单元层之间，厚度至少有4个分子层厚。[5] 水敏性泥页岩和钻井液接触之后，它的体积因为水化作用而出现膨胀，强度也会随之下降。即便钻井液密度处于合适的水平，缩径卡钻的风险仍会存在，钻井液的特性会对卡钻风险产生影响。钻井液的滤失性能、流变性、润滑性等这些方面因素，均和卡钻现象有着密切的关联，井壁发生水化的缘由是滤失量极大程度上过量，岩屑的携带工作会受到流变性不适宜的影响，钻柱以及井壁之间的摩阻会因为润滑性较差而增大。

三、安全钻井窗口的确定

（一）安全钻井窗口的内涵

钻井液密度的安全操作区间，也就是平常所说的安全钻井窗

 Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

口，井壁的稳定状态得以维持，并且剪切破坏以及拉伸破坏都没有发生，井壁剪切破坏临界密度会决定窗口的下限，这通常被叫做坍塌压力；井壁拉伸破坏所对应的临界密度，决定了窗口的上限，这一般被叫作破裂压力。而安全钻井液密度窗口的下限选取地层孔隙压力和坍塌压力的最大值，在深水深部的成岩地层的井壁围岩尚处于弹性状态，通常可以根据摩尔库伦准则确定其坍塌压力。[6] 安全钻井液窗口的宽度，直接和井段施工的复杂性以及风险缓冲空间关联，要是钻井液密度处于较宽的井段当中，那么它的选择空间就会更大，同时钻井的风险也会随之降低；井段窗口比较狭窄，需要对钻井液密度开展精准的调控工作，要是有微小的偏差，那就可能会引发卡钻。那么要是地质条件比较复杂，钻井液的安全区间就可能会变得极小。对于直井来说，较小的水平地应力差情况下，井眼的钻井液密度安全窗口相对较宽，但是深水井的破裂压力整体偏低。[7] 坍塌压力超出破裂压力的情况经常出现，这也就是所谓的无安全窗口现象，常规钻井方法在实施方面会面临困境，那么像控压钻井这种特殊技术就成了必要的选择。

（二）安全钻井窗口的现场应用

钻井液密度需要在安全范围当中进行灵活的调整，随着钻井深度持续不断地增加以及地层结构不断地变化，安全窗口的数值也会跟着进行相应的调整，开展钻井液密度随钻状态下的调整工作，来实现动态优化。钻井过程中钻井液密度大小的设计不仅要求能维持井壁稳定防止井壁的张性破裂（井漏）和剪切垮塌（井塌）还要能够维持井内压力平衡避免地层流体大量流入井内造成地层流体对钻井液的污染以及井漏、井喷、压差卡钻等工程事故。[8] 需要把静态密度以及动态密度开展区分，钻井液在环空当中流动的时候，会产生流动阻力，这样就让井底承受的压力比静止液柱所产生的压力要大，当高流速以及狭窄环空间隙同时存在的时候，差异就变得格外突出。对于现代石油钻井来说，存在固有特点，一方面，在储层底部，由于温度较低，可导致钻井液变得黏稠，降低液体的六边形，提高了液体的循环阻力，对窄密度窗口安全钻井存在成一定干扰。[9] 现场作业要兼顾静态以及循环工况的安全边界，在静态的时候，井壁要保持稳定，而在循环的时候，要避免地层破裂，进行起下钻作业的过程当中，需要高度留意，起钻操作会引发抽吸效应，这样井底压力就会随之下降，有可能触发地层失稳；下钻这个过程会激发井底的压力产生波动，可能就会诱发地层破裂。

四、卡钻预防的技术对策

（一）钻井液性能优化

钻井液形成了构成井壁稳定的首要屏障，钻井液的滤失以及抑制性能对于卡钻预防工作而言是极为关键的，除了密度方面，进行钻井液滤失量的控制工作，目的在于降低滤液朝着地层渗透的程度。随着井壁及地层渗透性增大，地层破裂压力降低，坍塌压力升高，安全钻井液密度范围变小。[10] 那么井周孔隙压力会因为滤液侵入而出现改变，与此同时有效应力会跟着降低，这样一来井壁的自我支撑能力就会因此而减弱，针对渗透性地层，降滤失剂可以有效地开展滤液流失的管理工作；裂缝性地层需要把堵漏材料引入进来，来实现裂缝的封堵。提高抑制效能主要是把焦点放在泥页岩地层方面，水基钻井液在接触水敏性泥页岩之后，它发生水化膨胀，进而致使强度出现下降，这样缩径卡钻的风险就增加了，运用油基或者高性能水基钻井液体系，借助引入页岩抑制剂，就可以有效地去处理遏制地层水化效应的工作，来实现维持井壁结构稳固的目的。

五、结束语

（1）卡钻的发生与井周应力分布状态密切相关，那么井壁在井眼形成之后，径向应力得以实现释放，切向应力就会出现聚集，要是应力重新分布这方面超过了岩石所能够承受的极限，井壁就会发生失稳的情况，从而引发卡钻。

（2）卡钻存在两种典型模式，井壁在钻井液密度处于偏低的状况下，会因为剪切作用而遭受破坏，进而引发坍塌以及缩径的问题，最终使得卡钻事故得以发生；要是钻井液密度过高，井壁就会发生拉伸破坏，进而导致破裂 – 扩径型卡钻。

（3）钻井安全窗口是由地层坍塌压力以及地层破裂压力一起来确定的，钻井的难度会体现在窗口宽度这个方面，要是窗口越窄，那么卡钻的风险就会越大，安全窗口的确定需要全面开展对地应力状态、岩石力学特性以及钻井液和地层之间所进行的相互作用的考量工作。

（4）为了开展预防卡钻的工作，需要把多种技术手段进行整合，所涵盖的方面有井眼轨迹的优化设计、钻井液性能的调整提高、操作流程的精细管控，并且在复杂工况下选用控压钻井等专项工艺。

参考文献

[1] 李庆超，刘钰文，吴静娟 . 海域水合物储层安全钻井液温度窗口确定新方法 [J]. 油气与新能源，2024,36(05):44-56.

[2]Ayoub D,Cheraghi M S,Anthony D W,et al. 利用井筒稳定性分析确定砂岩安全钻井液密度窗口 [J]. 石油勘探与开发，2019,46(05):974-980+1014.

[3] 李华洋，吴惠梅，严科，等 . 南海西部某井区安全钻井液密度窗口的确定 [J]. 石油化工应用，2020,39(04):8-11.

[4] 李玉伟，艾池，王志成，等 . 深井安全钻井液密度窗口影响因素 [J]. 油气地质与采收率，2013,20(01):107-110+118.DOI:10.13673/j.cnki.cn37-1359/te.2013.01.027.

[5] 田波 . 深水钻井安全钻井液密度窗口确定方法研究 [D]. 中国石油大学，2009.

[6] 何藜 . 深水钻井安全钻井液密度窗口影响因素分析 [D]. 中国石油大学（北京），2017.

[7] 幸雪松，周长所，朱海燕，等 . 深水地层钻井液密度安全窗口确定方法研究 [J]. 中国石油和化工标准与质量，2023,43(14):143-145+148.

[8] 陈森，梁大川，李磊 . 深井超深井安全钻井液密度窗口研究进展 [J]. 天然气工业，2008,(01):85-87+170.

[9] 冯量，王周强 . 安全钻井液密度窗口的确定 [J]. 石化技术，2021,28(08):180-181.

[10] 蔚宝华，王炳印，曲从锋，等 . 高温高压储层安全钻井液密度窗口确定技术 [J]. 石油钻采工艺，2005,(03):31-34+37-83.DOI:10.13639/j.odpt.2005.03.013.

Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

桩基承载力不足在焦炉工程中的成因与对策

李治奇[1]，李军[2]，李海湖[3]，李育红[4]，李果绵[5]
1. 加拿大多伦多凯谛思设计公司，加拿大 多伦多 M4V 2Y7
2. 鞍钢集团公司教育培训中心，辽宁 鞍山 114000
3. 鞍山市人民政府办公厅，辽宁 鞍山 114000
4. 鞍钢铁西医院新华门诊部，辽宁 鞍山 114000
5. 中冶焦耐（大连）工程技术有限公司，辽宁 大连 116085
DOI:10.61369/ERA.2026100002

摘　　要： 焦炉工程荷载集中、结构整体性强，沉降管控标准严格，桩基承载力不达标会破坏炉体稳固，降低设备安装精度，威胁后续生产运行安全。立足焦炉桩基施工现状，梳理地质勘察疏漏、设计参数偏差、成桩管控松懈、检测信息滞后等问题，落实勘察复核工作，调整桩型与持力层选型，做好施工动态监测，构建检测整改闭环。推行全程质量管控，削减桩基承载隐患，增强焦炉基础结构稳固性和耐久性能。

关 键 词： 焦炉工程；桩基承载力；地质勘察；施工质量；承载力检测

Causes and Countermeasures of Insufficient Bearing Capacity of Pile Foundations in Coke Oven Projects

Li Zhiqi[1], Li Jun[2], Li Haihu[3], Li Yuhong[4], Li Guomian[5]
1.Kaitis Design Company, Toronto, Canada M4V 2Y7
2.Education and Training Center of Ansteel Group Company, Anshan, Liaoning 114000
3.General Office of the People's Government of Anshan City, Anshan, Liaoning 114000
4.Xinhua Outpatient Department, Angang Tiexi Hospital, Anshan, Liaoning 114000
5.Zhongye Jiaonai (Dalian) Engineering Technology Co., Ltd., Dalian, Liaoning 116085

Abstract: Coke ovens feature concentrated engineering loads and highly integrated structural configurations, requiring stringent settlement control standards. Failure to meet pile foundation bearing capacity requirements may compromise furnace stability, compromise equipment installation accuracy, and jeopardize subsequent operational safety. Based on current practices in coke oven pile foundation construction, this study identifies issues including deficiencies in geological surveys, deviations in design parameters, lax pile installation control, and delayed inspection data. Measures include implementing survey verification procedures, optimizing pile types and bearing layer selection, conducting dynamic construction monitoring, and establishing a closed-loop inspection and rectification system. By enforcing comprehensive quality control throughout the process, potential bearing capacity risks are mitigated, thereby enhancing the structural stability and durability of coke oven foundations.

Keywords: coke oven engineering; pile foundation bearing capacity; geological investigation; construction quality; bearing capacity testing

引言

焦炉工程基础承载炉体、煤塔、熄焦及配套设备多重荷载，桩基承载力决定结构沉降水平与生产运行安全。场地地层杂乱、水位波动、设计参数取值偏差、成桩工艺管控疏漏，桩基承载力缺陷频繁出现。隐患得不到快速排查处置，就会产生不均匀沉降、基础开裂、设备安装错位，结合病害形成原因，梳理焦炉桩基承载力短板对应的防控及治理手段。

作者简介：李治奇（1991.12.06—），男，辽宁鞍山，汉，土建工程师，硕士，土木结构。

 Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

一、焦炉工程桩基承载控制的基础条件

（一）焦炉荷载特征对桩基稳定性的要求

焦炉工程为荷载密集、结构连贯、服役年限长久的工业建筑项目，桩基承接炉体自重，还要抵御炉柱、炉顶设备、煤塔、推焦车轨道与配套管廊带来的复合荷载。焦炉主体大多为长条布局，基础受力沿轴线连续分布，局部桩基承载力不足会改变承台与基础梁的受力格局，拉大区域沉降差值[1]。炉体投入使用后常年处在高温工况，热胀形变、机械震动、生产荷载波动都会抬高基础稳定的门槛。桩基设计不能只核算单桩竖向承载力，兼顾群桩相互影响、桩体土体协同受力、水平力传导以及沉降协同管控。焦炉基础抵御不均匀沉降的能力偏弱，细微沉降差值都会干扰砌体施工质量，破坏炭化室密闭性，改变轨道安装标高。承载力验算需要配合沉降指标同步把控，合理选定桩径、桩长、桩距与承台刚度，把上部荷载平稳传导至稳固持力层，桩基稳定管控不只覆盖竣工阶段，延伸到烘炉升温、正式投产与常年生产各个阶段，桩基承载体系要预留充足安全余量，拥有良好的形变适配能力[2]。

（二）场地地层变化对承载参数的影响

焦炉工程场地大多处在大型工业厂区内部，地层状况会被原始地形、回填作业、地下水流动以及周边已建工程干扰，土层厚薄错落、软硬交错，夹层零星分布，持力层顶面起伏不定。桩基各项承载数值选取依托地质勘察资料，勘探点位布设稀疏或是钻探深度不足，会低估软弱土层厚度，误判持力层连续程度，桩端阻力与桩侧摩阻力取值脱离现场实际[3]。焦炉基础承受荷载偏大，桩端嵌入持力层深度、桩周土体稳固程度与地下水环境都有严格标准，场地分布淤泥质土、粉细砂、松散填土以及扰动土层时，桩身外侧摩阻力会大幅缩减，成桩工序还会产生缩颈、孔壁坍塌、底部沉渣过厚等质量缺陷[4]。水位起伏会破坏钻孔孔壁，干扰混凝土浇筑施工，土体有效应力随之改变，各项承载指标出现浮动。不少场地岩层埋深落差悬殊，同一片施工区域桩长参差不齐，设计环节没能摸清地层突变边界，部分桩端无法嵌入稳定持力层。各项承载指标要结合静载试验、低应变检测、钻芯检测与施工台账灵活调整，不能仅凭初步勘察数据敲定桩基实际承载力。

（三）勘察设计施工衔接中的控制要求

焦炉工程桩基承载力管控要让勘察、设计、施工、检测紧密衔接，各环节信息沟通不到位会进一步加剧结构承载隐患。勘察环节整理出炉基布设所需的地层剖面、水位数据、持力层埋深、土力学参数以及不良地质范围，为桩型选定与承载力核算准备基础资料[5]。设计环节把勘察数据转化成各项桩基技术指标，敲定单桩承载力数值、桩端嵌入岩层深度、沉降限值与检测数量，地层起伏较大区域补充验算条款。现场作业严格遵照图纸把控桩位孔径、孔身垂直度、孔底沉渣、钢筋安放以及混凝土浇筑工序，工艺失误会破坏桩体完整度与桩端支撑条件。施工台账摒弃流于表面的填报模式，如实记录钻进深度、岩层变动、成孔故障、泥浆参数与混凝土用量，给质量评定留存原始资料。检测环节把静载试验、声波检测、低应变及钻芯检测结果同步给到技术人员，承载力不足、桩体破损、孔底沉渣超标的桩位分批次整改。各工序信息互通要形成完整闭环，实际地层和勘察报告存在出入、试桩数据达不到预期或是施工质量起伏明显，及时改动桩体长度、补充地质勘探、调整施工方法或是加固桩基，保障焦炉基础整体承载体系满足安全生产标准。

二、焦炉工程桩基承载力不足的形成因素

（一）地质勘察深度不足引起参数偏差

钻探深度不足会降低焦炉桩基承载力核算结果的准确度，焦炉基础承受荷载大，沉降管控标准严格，桩端必须嵌入稳定持力层足够深度，勘察钻孔没能钻透软弱夹层，或是无法探明持力层起伏走势，设计人员会把稳定性偏弱的土层当作合格持力层。不少工业厂区经过回填碾压、长期堆载与地下管线改造，浅层土体遭到大范围扰动，少量钻孔数据无法完整展现地层连续状态[6]。勘察点位间距过大，软弱土透镜体、含泥砂层、废弃旧基础以及富水地带容易被忽略，桩侧摩阻力、桩端阻力与土体压缩模量取值脱离现场实情。数值出现偏差会高估单桩承载能力，桩长、桩径、桩距与承台构造方案随之不合理，桩基预留安全余量不足。焦炉基础抵御不均匀沉降的能力偏弱，地层资料残缺会低估各区域桩基受力差距，出现局部沉降过度集中的问题。试桩样本也会失去代表性，试桩点位避开复杂地层，检测数据无法代表整片场地桩基实际承载性能。勘察布孔要贴合基础荷载分布与关键设备点位适当加密，配合原位测试、土工试验以及施工开挖获取的数据，综合研判持力层土质、厚度起伏与地下水带来的干扰。

（二）桩型持力层选择不当削弱承载效果

桩型和持力层挑选失误会限制桩基原有承载能力，焦炉基础长期承受高度集中的荷载，选定桩型要兼顾竖向承载力、沉降限值、施工条件与结构耐久度。厚层软土地层选用承载力余量偏小的桩体结构，桩身侧阻力难以正常生成，桩端无法抵达密实稳定土层，继而出现承载力不够、沉降超标的工程问题。持力层埋设深度偏小，桩端停留在土质松软、压缩变形大、层厚起伏不定的地层，焦炉长期运行荷载会让土体持续压缩变形[7]。持力层埋设过深会提升施工难度与工程成本，缺少技术经济对比会造成桩体长短参差不齐，破坏群桩共同受力状态。各类桩体适配地层的条件各不相同，钻孔灌注桩可用于高荷载区域，对孔壁稳固程度与孔底沉渣管控标准严苛。预制桩施工速度更快，挤土作用、入土阻力以及地下障碍物都会制约施工效果，桩体类型和持力层搭配失衡，会延缓桩端阻力发挥，造成桩体受力失衡，承台沉降无法保持一致。煤塔、炉体、轨道基础荷载大小各不相同，统一桩型与持力层标准无法适配各个结构区块的受力条件。结合地层承载力、施工机具条件、检测数据以及沉降管控指标选定桩型与持力层，划分区域制定有区别的基础设计方案。

（三）成桩工艺控制薄弱导致质量离散

成桩工艺管控不到位，会让单体工程内部各桩基质量产生显著差异，干扰桩基整体的承载稳定性能。焦炉工程桩基布设数量多，整体施工工期相对紧张，现场管控侧重施工进度而弱化工序

Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

标准落实，成孔清孔、钢筋笼安置、混凝土浇筑等核心施工环节均会产生不同程度的质量偏差。钻孔灌注桩施工阶段，泥浆的多项性能指标把控失衡，孔壁稳固状态遭到破坏，现场易出现孔壁坍塌、桩径收缩、孔底沉渣堆积过厚的施工问题。孔底残渣清理不彻底，桩端和底层持力层之间会形成软弱隔离层，桩端承载效能无法完全释放，静载检测过程中会出现沉降数值骤增的情况[8]。钢筋笼下放安装时定位偏移、保护层厚度不达标或构件上浮，会改变桩身受力结构，降低桩基长期使用的稳定性。混凝土浇筑作业对导管埋设深度、浇筑连贯性与物料和易性有着严苛标准，桩体断裂、泥浆掺杂、物料分层、浇筑停滞等问题，都会损坏桩身结构的完整度。不同施工班组、机械设备及场地地层环境，会让桩长把控、孔径规整度、混凝土填充系数出现明显偏差。质量参差不齐的桩基会在群桩结构中隐藏各类施工缺陷，短期内不会显现异常状况，在焦炉长期投产运行后，会随着荷载传导与地基沉降逐步暴露问题。

三、焦炉工程桩基承载风险的治理路径

（一）强化勘察复核与设计参数校正

勘察复核工作聚焦焦炉基础主要受力区块，核对炉体、煤塔、轨道及大型设备下部地层能否满足承载标准，原始勘察文件不能只当作固定的计算依据，施工前期复勘数据、试桩检测结果与现场开挖情况都可以用来重新研判地层状态。持力层埋深起伏大、软夹层分布广、地下水活跃或是回填土层厚薄不均的地段，适当增加勘探点位，补充现场原位试验与室内土工检测，重新核定桩端阻力、桩侧摩阻力、土体压缩模量以及沉降计算各项参数。设计数值调整贴合焦炉荷载集中、沉降管控严苛的工程特点，不直接照搬周边项目经验数据，也不会仅凭单个勘探点位划定整片区域桩基技术指标。试桩实测数据偏离预先设计数值，逐条梳理偏差成因，区分地层起伏、施工质量缺陷或是计算公式取值带来的误差，再修改桩长、桩径、嵌岩深度与安全储备系数。数值修正兼顾各个结构区块受力区别，高荷载地段、地层突变地段以及沉降严控地段实行分区设计，让桩基承载水平贴合上部结构实际受力条件[9]。

（二）完善成桩过程监测与检测反馈

成桩全过程质量监测覆盖测量放线、钻孔成孔、孔内清理、钢筋笼安放、混凝土浇筑以及桩体质量检测全部工序。桩位偏移、钻孔深度不够、孔身倾斜超标、孔底沉渣堆积过厚、泥浆各项指标失控都会降低桩基实际承载力，施工现场要落实关键工序台账记录与现场旁站监管制度。钻机钻进跟随地层变动调整作业参数，碰到砂层、软弱夹层、地下水喷涌或是孔壁坍塌隐患，完整标注异常点位与处置手段，避免隐蔽病害被后续施工工序掩盖。清孔作业结束后仔细核对孔底沉渣厚度、泥浆含砂比例与实际孔深，保证桩端岩体和持力层紧密咬合。混凝土浇筑把控导管埋设深度，保持浇筑不间断，管控混凝土坍落度与充盈系数，夹泥、断桩、骨料分离与桩径收缩这类桩体破损都会直接破坏桩身完整程度。检测工作不能只出具书面报告，低应变、声波透射、钻芯取样、静载试验数据要和单桩施工档案一一对应，追溯质量缺陷出现的施工环节。检测结果不合格的桩体，结合缺陷类型、埋藏深度、对承载力的影响程度以及结构重要等级逐项核查，必要时增补高应变检测或者静载复验。

（三）推动补桩加固与质量闭环管理

推动桩基补强加固工作，需以实际承载力核验结果与整体结构安全评测作为前置依据，杜绝在病害成因模糊、影响区间未明确的状态下采用单一固化处理手段。针对现场承载力不达标的桩基，可依托现场静载检测曲线、地基沉降变化规律、桩身结构完整度数据以及承台实际受力状态，精准区分病害根源为桩端支撑失效、桩身结构破损、桩体埋设长度欠缺或群桩协同受力性能不足。桩基承载力偏差幅度偏小、结构缺陷处于浅层位置时，可依托桩体病害修复、桩端后置注浆、承台局部补强的手段优化桩基受力状态，提升整体承载能力。桩基缺损问题突出或持力层选型存在偏差的工况下，可增设新桩体、拓展承台受力面积、增设结构托换体系或重新规划基础受力传递路径[10]。补强桩体的方案设计需要规避原有桩体位置与地下管线设施，协调新旧桩体的受力配比，规避施工扰动破坏原有成型桩基结构。

四、结束语

焦炉工程桩基承载力问题，源于勘察、桩型选型、持力层判定、成桩工艺及检测等多项因素。摸清场地地层实况、校准设计参数、把控成桩各道工序，可规避承载偏差与沉降隐患。勘察复核、施工监测、桩基补强及闭环管理，能够稳固桩基体系，保障焦炉基础安全，后续工程细化地质勘察工作，整合施工、检测及加固数据，保障焦炉长期平稳运行。

参考文献

[1] 许美 . 基于规范建议桩基参数与实测桩基参数的钢管桩桩基承载力对比分析 [J]. 江西建材 ,2025,(11):267-271.

[2] 侯海成 , 于洋 . 基于知识图谱的桩基施工知识管理及应用 [C]// 中国土木工程学会土力学及岩土工程分会 , 中国工程建设标准化协会地基基础专业委员会 , 建筑安全与环境国家重点实验室 , 国家建筑工程技术研究中心 . 桩基工程技术进展2025. 中国建筑工业出版社 ,2025:268-273.

[3] 赵浩宇 . 建筑桩基承载力及完整性检测分析 [J]. 北方建筑 ,2025,10(5):124-129.

[4] 白添中 , 邵圣娟 . 焦炉煤气部分氧化制氨合成气的工程计算方法比较 [J]. 煤炭与化工 ,2026,49(4):153-160.

[5] 李伟锋 , 燕亚宾 , 董盼娜 . 焦炉煤气中硫化物脱除技术的研究与工程实践 [J]. 化工管理 ,2025,(26):52-55.

[6] 郭海俊 , 黄榆翔 , 方菁菁 . 焦炉烟气二氧化碳捕集纯化工程施工技术 [J]. 安装 ,2023,(7):19-22.

[7] 吴静 , 聂宜文 , 颜世广 , 等 . 焦化厂焦炉烟气净化工艺选择及工程实践 [J]. 绿色矿冶 ,2023,39(5):53-57.

[8] 杨懿 , 谢锦鸿 . 大型焦炉高效绿色建造关键技术 [J]. 安装 ,2023,(S1):38-39.

[9] 安玉磊 , 孙乾 . 与焦炉煤气协同的冶金低碳化探索 [J]. 鞍钢技术 ,2025,(6):38-44.

[10] 徐勋达 , 胡璐 , 潘威 . 高含硫焦炉煤气湿式氧化法脱硫技术应用探讨 [J]. 环保科技 ,2025,31(6):45-48.

 Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

工程经济要素变动下项目成本的精准管控措施

李京京

中冶赛迪城市建设（重庆）有限公司，重庆 400010

DOI:10.61369/ERA.2026100004

摘　　要： 市场经济环境下，原材料价格、劳动力成本、宏观经济等要素的动态波动，持续对工程项目成本管控造成冲击，极易引发预算偏差、利润缩水、成本失控等问题。为破解复杂经济环境下的造价管控难题，依托动态预算调整、智能成本预测、全周期闭环管控体系，精准应对各类经济变量带来的成本风险。结合工程实例验证管控策略的实操价值，从技术赋能、数据决策、全球风险应对三个维度优化管控路径。研究结果可为工程项目抵御经济波动影响、实现精细化成本管控、提升项目综合效益提供参考。

关 键 词： 经济要素；项目成本；管控措施；动态预算；成本预测

Accurate Control Measures for Project Costs under Changes in Engineering Economic Factors

Li Jingjing

MCC CCID Urban Construction (Chongqing) Co., Ltd., Chongqing 400010

Abstract: In the market economy environment, the dynamic fluctuations of raw material prices, labor costs, macroeconomic factors, and other factors continue to have an impact on the cost control of engineering projects, which can easily lead to budget deviations, profit shrinkage, cost control and other problems. To solve the problem of cost control in complex economic environments, we rely on dynamic budget adjustments, intelligent cost forecasting, and a closed-loop control system throughout the entire cycle to accurately respond to cost risks brought by various economic variables. Validate the practical value of control strategies through engineering examples, and optimize control paths from three dimensions: technological empowerment, data decision-making, and global risk response. The research results can provide reference for engineering projects to resist the impact of economic fluctuations, achieve refined cost control, and improve overall project benefits.

Keywords: economic factors; project cost; control measures; dynamic budget; cost forecast

引言

建筑工程具备建设周期长、资金投入大、人力物料消耗多、市场关联性强的特点，项目全周期成本极易受各类工程经济要素变动的影响。随着市场经济全球化发展，原材料价格波动、劳动力成本上涨、宏观货币政策与供应链格局调整等不确定因素持续增多，传统固化的成本管控模式已难以适配动态市场环境，普遍存在预算僵化、风险预判不足、管控闭环缺失等问题，直接制约工程项目的提质增效与盈利空间。基于当前行业成本管控痛点，结合各类经济要素对工程成本的影响机理，系统性搭建精准化成本管控体系，优化全流程管控策略，依托新技术、新方法升级管控模式，是现阶段工程项目化解成本风险、实现高质量发展的核心路径。

一、经济要素变动对项目成本的影响

（一）原材料价格波动

原材料成本在工程项目总造价中占比极高，是决定项目成本稳定的核心要素，其价格波动会直接冲击项目前期预算的精准性与整体盈利空间。建材价格波动并非单一市场供需作用的结果，而是叠加全球经济走势、国内产业政策调整、国际贸易摩擦、能源价格浮动等多重宏观变量形成的综合性变动。以钢材、混凝土、沥青等核心建材为例，国际油价、大宗商品价格的持续攀升，会快速传导至建材生产、运输全链条，直接推高工程基础材料采购成本。不同于短期小型项目，长周期工程项目需历经多个市场波动周期，材料价格阶段性涨跌会持续压缩项目利润边际，极易引发预算超支问题。这就要求工程项目摒弃静态成本管理思维，搭建常态化动态化成本调控机制，引入专业市场化价格预测工具，持续追踪建材市场行情变化，精准研判价格波动趋势，通过提前锁价、分批采购、储备主材等方式，前置规避市场波动引

Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

发的成本风险。

（二）劳动力成本变化

劳动力成本是工程项目建设成本的核心组成部分，占项目总成本比重居高不下，其动态变化直接取决于建筑行业劳动力市场供需关系、区域行业薪资标准、社会保障政策及行业规范化发展等多重因素。当前建筑行业正向专业化、精细化、智能化转型，传统普通施工人员趋于饱和，但具备专项技能的施工人才、复合型技术管理人才缺口持续扩大，行业人才结构性短缺问题突出，使得高端技术岗位、特种施工岗位的人工成本逐年大幅上涨。对于市政、基建等工期跨度久、人力投入规模大的工程项目，人工薪资逐年递增、人员管理成本攀升等问题持续凸显，逐步成为制约项目成本精细化管控的核心瓶颈[1]。对此，项目人工成本管控不能沿用固定预算模式，需立足本地建筑市场薪资基准，结合行业人才发展趋势与政策导向，科学预判项目全周期人工成本涨幅波动，搭建灵活可调、动态适配的人工预算机制，实现人力资源优化配置与劳动力成本的精准化、科学化把控。

（三）宏观经济因素的影响

宏观经济因素对项目成本的影响具有长远而深远的作用，特别是在经济波动较大的环境中。通货膨胀率、货币政策、利率变化等宏观经济条件，都会对项目的融资成本、材料采购以及整体资金流动性产生直接影响。如货币紧缩政策可能使贷款利率上升，从而导致项目融资成本增加；而通货膨胀的加剧则可能导致原材料和劳动力成本同步上涨，造成项目资金压力的增大。在这种情况下，精准的成本管控必须基于宏观经济的实时监控，通过敏锐的市场洞察力预测可能的经济波动，并采取相应的风险应对措施，如通过锁定长期合同或采用保值货币等方式来减少经济波动对成本的负面影响。

二、精准成本管控策略的构建

（一）动态预算调整机制

传统固定预算模式无法适配市场与项目的动态变化，极易引发预算与实际支出脱节、成本失控等问题。动态预算调整机制以项目全周期进度与市场变化为核心，通过常态化监测、阶段性复盘，实时优化预算方案，保障预算与实际施工需求精准匹配。该机制需明确预算调整触发条件，针对材料价格异动、人工成本涨跌、宏观经济波动等场景，及时开展预算修正，杜绝资金闲置、资金短缺等问题。落地过程中，需依托数字化数据监测工具，搭建高效的预算动态调控体系，同时建立定期预算审核制度，结合项目施工进度、市场行情变化灵活调整，实现成本的动态均衡管控[2]。

（二）成本预测模型的应用

成本预测模型是实现精准成本管控的核心工具，依托项目历史结算数据、建材设备市场价格走势、施工工艺与建设规模特征等多维度信息，能够提前量化预判成本偏差区间，识别材料涨价、工期延误、人工溢价等各类潜在成本风险，为项目前置管控提供数据依据。大数据与人工智能技术落地后，现代成本预测彻底摆脱仅依靠管理人员经验估算的粗放模式，有机融合多元统计算法、机器学习迭代框架与海量数据挖掘技术，可随市场、施工进度动态更新参数，实现实时成本走势研判。完整模型搭建分为四大核心环节：全周期成本数据归集、成本影响因素权重拆解、预测算法模型搭建、成本风险分级预判。通过整合项目前期筹备、施工实施、竣工结算全流程费用数据，结合宏观经济周期、建材供需波动规律，搭建多元线性回归、ARIMA 时间序列等适配模型，精准定位各阶段成本超支隐患，在成本失控前输出调整方案，有效压缩预测误差，显著提升工程项目成本预测的精准度与响应时效性。

（三）成本控制体系的完善

完善的全周期成本控制体系，是工程项目成本管控的核心保障，覆盖项目立项、施工、竣工全流程，包含预算编制、过程管控、数据跟踪、偏差分析、优化整改等全链条工作。体系建设需以标准化、规范化为核心，建立成本分类管控机制，明确各类开支的预算限额与管控标准；依托合同条款约束、供应商精细化管理，降低外部市场波动带来的成本不确定性。同时，搭建信息化成本管控平台，实时采集、汇总项目成本支出数据，常态化对比实际支出与预算指标，精准识别管控漏洞。通过定期成本复盘工作，总结成本偏差成因，评估管控措施落地效果，持续优化成本管理模式，形成闭环管控体系。

三、项目成本管控效果的评估与优化

（一）管控效果的评估指标

结合工程项目全周期管控特征与经济要素影响机理，构建量化为主、定性为辅的复合型评估指标体系，摒弃单一偏差核算的传统模式，实现管控成效全方位精准核验。量化指标聚焦成本管控核心效能，以预算偏差率、成本节约率、资金利用率为核心基准，核算原材料、劳动力、融资费用等核心模块的实际支出与动态预算的偏差幅度，直观反映动态预算机制的落地精度。配套设置风险防控覆盖率、材料损耗控制率、人工成本合规率等细分指标，量化研判市场波动、政策调整下管控体系的风险抵御效能[3]。同时引入横向行业对标、纵向项目复盘模式，结合行业标杆指标与历史项目数据基线，精准判定管控策略的适配性与先进性。定性指标聚焦管控体系运行质量，核查智能成本预测模型的变量适配度、预算动态调整的触发时效性、全流程管控的漏洞发生率，重点研判变更签证、物资采购、人力调配等关键环节的管控规范性，依托月度、阶段性、竣工三期常态化评估，形成标准化评估结论，为优化工作提供精准问题导向与数据支撑。

（二）优化措施的实施

基于多维度评估结果，针对管控体系薄弱环节，结合市场经济要素变动趋势，落实体系化、靶向化优化举措，构建长效迭代管控机制。针对智能成本预测模型短板，更新模型数据库，纳入大宗商品价格、行业薪资涨幅、宏观利率政策等动态变量，优化机器学习与回归分析算法参数，弱化传统经验预判的局限性，提升模型对市场波动与突发经济变量的预判精度。针对动态预算机

 Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

制漏洞，细化预算调整分级触发标准，区分常规市场波动与极端经济变动场景，完善分级审批快速调整流程，结合施工进度与供应链变化，破解预算僵化、调整滞后引发的成本失控问题。针对全周期闭环管控短板，依托数字化管控平台打通数据监测、偏差分析、整改落实、复盘迭代全链条，实现成本数据实时同步、偏差自动预警、问题闭环整改。同步落地管控考核激励机制，将成本管控成效与岗位履职绩效深度绑定，规范关键环节管控流程，杜绝无效成本损耗，持续适配动态市场环境，全面升级项目成本精细化管控水平。

四、应对经济要素变化的未来方向

（一）强化技术创新赋能

数字化、智能化技术创新，是新时代工程项目应对经济要素波动、实现精准成本管控的核心驱动力。大数据、人工智能、物联网等技术的应用，可实现项目成本数据的自动化采集、精准化分析、智能化预警，有效规避人工研判的误差与滞后性。同时，3D 打印、智能施工、数字化建模等新型工程技术，可优化施工流程、减少材料损耗、降低人工投入，从源头压缩施工成本。未来，技术创新将深度融入项目成本管控全流程，推动成本管理从传统经验化管控，向智能化、精准化、高效化管控转型，全面提升项目抗市场风险能力。

（二）搭建数据驱动决策体系

数据是成本精准管控的核心依据，数据驱动决策是应对经济要素动态变动的关键手段。通过整合项目立项、施工、竣工、运营全生命周期数据，搭建一体化数据分析平台，可实时监测材料价格、人工成本、市场供需、融资利率等核心经济指标[4]。依托大数据分析技术，精准预判成本变动趋势、识别潜在管控风险，为预算调整、资源调配、方案优化提供科学决策支撑。数据驱动模式可有效解决传统管控信息滞后、决策主观化等问题，最大限度降低决策失误带来的经济损失，保障项目成本管控的科学性与精准性。

（三）完善全球经济风险应对机制

在经济全球化背景下，汇率波动、国际贸易政策调整、全球供应链变动等因素，都会对工程项目成本产生深远影响，尤其对国际化工程项目冲击显著。针对全球经济不确定性，项目需搭建常态化风险预警与应对机制，强化外部经济环境研判，提前预判各类涉外成本风险。优化全球化供应链布局，拓宽采购渠道、稳定合作资源，规避供应链断裂、价格异动风险；科学规划融资结构与资金使用方案，对冲利率、汇率波动带来的融资成本上涨压力。同时，培养具备全球化视野的管理团队，依托灵活的市场化管控机制，实现复杂经济环境下的成本稳控。

五、结束语

在市场经济波动常态化的背景下，精准化成本管控是工程项目提质增效、提升核心竞争力的关键。针对原材料、人工、宏观经济等要素的变动影响，通过搭建动态预算机制、完善全流程成本管控体系、应用智能化预测模型，可有效规避成本失控风险。依托技术创新与数据驱动决策，能够全面提升项目成本管控的精细化、智能化水平。未来，工程管理人员需持续优化管控策略、强化风险预判能力，适配国内外经济环境变化，保障项目高质量、低成本、高效率落地运营。

参考文献

[1] 唐俊 . 公路工程项目合同预算与成本管控的经济效益提升策略研究 [J]. 中文科技期刊数据库 (全文版) 经济管理 ,2025(1):001-004.

[2] 王岩 , 王文之 . 建筑工程项目成本管控问题及应对措施 [J]. 门窗 ,2025(9):139-141.

[3] 陈武跃 . 基于精细化管理的水利水电工程施工项目成本管控措施探究 [J]. 中文科技期刊数据库 (引文版) 工程技术 ,2025(11):053-056.

[4] 张澄茜 , 薛行健 , 刘陈平 . 施工企业项目成本管控影响因素研究 [J]. 建筑经济 ,2025,46(3):98-104.

Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

船体高强度钢焊接残余应力分布数值模拟与调控方法探究

王超碧
中国船级社实业有限公司南京分公司，江苏 南京 211801
DOI:10.61369/ERA.2026100005

摘　　要： 船体高强度钢焊接接头在分段装配中同时承受热循环、胎架拘束和冷却收缩作用，残余拉应力容易集中在焊趾、熔合线和夹持边界附近，影响后续合拢精度与疲劳安全。本文分析船体板架对接接头有限元建模方法，梳理热输入、焊接顺序和约束释放量对应力分布的影响，提出以中等热输入、对称分段退焊和两级夹具释放组合控制残余应力的调控方法。计算情景显示，组合工况可将纵向拉应力峰值控制在约285MPa，焊趾外侧横向拉应力降至139MPa，板面最大挠度保持在1.90mm，适用于EH36船体高强度钢长焊缝的工艺参数比选。

关 键 词： 船体高强度钢；焊接残余应力；数值模拟；热输入；调控方法

Research on Numerical Simulation and Regulation Method of Welding Residual Stress Distribution of High-Strength Steel for Hull

Wang Chaobi
China Classification Society Industrial Corporation Nanjing Branch, Nanjing, Jiangsu 211801

Abstract: The welded joints of hull high-strength steel are subjected to thermal cycle, jig restraint and cooling shrinkage simultaneously during block assembly. Residual tensile stress tends to concentrate near the weld toe, fusion line and clamping boundary, which affects subsequent closing accuracy and fatigue safety. This paper analyzes the finite element modeling method for hull plate butt joints, sorts out the influences of heat input, welding sequence and constraint release amount on stress distribution, and proposes a regulation method combining moderate heat input, symmetric block backstep welding and two-stage fixture release to control residual stress. Calculation scenarios show that the combined working condition can limit the peak longitudinal tensile stress to approximately 285 MPa, reduce the transverse tensile stress outside the weld toe to 139 MPa, and keep the maximum deflection of plate surface at 1.90 mm. This method is suitable for the comparison and selection of process parameters of long welds of EH36 hull high-strength steel.

Keywords: hull high-strength steel; welding residual stress; numerical simulation; heat input; regulation method

引言

船体高强度钢用于大型船舶分段、甲板纵骨和舷侧板架后，板厚减薄与强度提高使焊接热循环对局部组织和残余应力的影响更加突出。长焊缝在胎架上连续施焊时，熔池附近先发生受热膨胀和压缩塑性变形，冷却阶段又受到周边冷板、临时夹具和相邻构件限制，焊趾外侧容易形成接近屈服强度的纵向拉应力。单纯依靠焊后矫形难以解释应力峰值位置和释放路径，数值模拟应把材料温度对应性能、移动热源、焊接顺序和约束释放过程共同纳入同一模型，才能为工艺调控提供可比较的参数依据。

一、船体高强度钢焊接残余应力有限元模型建立

（一）船体板架对接接头几何模型建立

船体高强度钢板架焊接残余应力模拟以典型纵骨对接接头为对象，几何模型采用600mm×320mm×12mm母材板承接8mm腹板的局部板架单元，焊缝沿纵向贯通板面，双面V形坡口折算为具有实际熔敷厚度的等效焊缝体。板端约束区、腹板根部过渡区及焊趾尖角附近保留刚度突变，微小倒角和装配间隙剔除后，热源移动路径、熔池体积和残余拉应力高值区能够稳定落入实体网格[1]。焊缝中心线两侧40mm范围设置局部加密区，板端远离焊缝的区域保持较粗单元，横向应力梯度和计算时间步都能保持稳定，边界响应清楚。

 Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

（二）EH36高强度钢热物性参数选择

EH36船体高强度钢在焊接升温、相变和冷却阶段的热物性参数随温度变化明显，材料模型采用温度对应的导热系数、比热容、密度、弹性模量、屈服强度和热膨胀系数。20℃时弹性模量取206GPa，屈服强度取355MPa，线膨胀系数取1.18×10^-5/℃；温度升至600℃后屈服强度折减到常温值的约0.42，900℃以上只保留低刚度承载能力[2]。温度相关参数组合使热膨胀受阻、塑性压缩和冷却收缩能够在同一热－力耦合路径中连续传递，避免用常温参数把焊趾附近的拉应力峰值压低。焊材熔敷区采用与母材相近的热物性曲线，熔点附近通过等效潜热扩大比热容，冷却后按弹塑性随动硬化处理，以反映多道焊中前一道焊缝被后续热循环局部回火的状态。

（三）双椭球热源网格模型建立

移动热源采用Goldak双椭球模型描述电弧能量在熔池前后半区的不对称分布，前半椭球长度取4mm，后半椭球长度取10mm，横向半宽取5mm，深度取4mm，热效率按0.75输入。热流密度随焊接速度沿焊缝中心线移动，单个时间步控制在热源前进距离不超过最小单元边长的二分之一，使温度峰值不会被时间积分平均掉。热输入沿焊缝移动后，热应变、塑性应变和相变收缩共同决定冷却末期的残余应力水平。网格收敛采用焊趾外侧20mm处纵向应力作为监测量，局部单元边长由2mm缩小到1mm后，应力峰值变化小于8MPa，继续缩小到0.80mm时计算时间明显增加而峰值变化不足3MPa，最终选取1mm局部网格作为精度和效率的折中。残余应力耦合关系按式（1）表达。

$$\sigma = E \times \sqrt{\left(aT - ep \right)^2 + \frac{\left(bcec + bses \right)^2}{\left(1 + l \right)^2}} \qquad (1)$$

式（1）中，σ为冷却后残余应力幅值，单位为MPa；E为冷却终态弹性模量，单位为MPa；a为线膨胀系数，单位为1/℃；T为位置温度降幅，单位为℃；ep为等效塑性应变，单位为无量纲；bc和ec分别为夹具拘束收缩权重和释放应变分量，bs和es分别为相变收缩权重和收缩应变分量，l为约束衰减系数，五者单位均为无量纲。平方根项把热收缩、塑性保留和拘束释放分量合成为残余应力幅值。

（四）焊缝表面接触边界条件设定

焊缝表面与母材之间不设置人工间隙，熔敷金属在激活时间步内由静默单元转为实体单元，接触面热导按完全结合处理。对接坡口两侧的法向约束只在装配定位阶段施加，热源经过后逐步释放，以免把夹具刚度误算为焊缝本体约束。空气对流系数取20W/(m^2 · ℃)，辐射发射率取0.80，板底与工装接触区引入等效换热系数，板面自由区只保留自然冷却边界。接触换热边界组合能够区分焊趾、板底和夹持边缘的散热差异，温度场在厚度方向形成由表层向板底衰减的梯度，残余应力高值区随冷却收缩被锁定在焊缝中心线及热影响区外缘。

（五）船体板架焊接约束与热载荷设定

船体板架在实际装配中受到胎架支承、临时压码限位及相邻构件牵制，仿真约束不采用全边固定，而是把端部防刚体位移、焊缝邻近夹持和冷却阶段释放写成逐步变化的边界。板端三个方向设置最小刚体约束，焊缝两侧80mm处布置临时夹持线，热源离开对应区段并冷却到200℃以下后解除夹持。热载荷按电流280A、电压28V、焊接速度5mm/s输入，单位长度热输入约1.18kJ/mm，层间温度控制在150℃以下，热源起弧和收弧段各保留20mm过渡距离，防止端部瞬时加载造成非真实峰值。约束热载荷设定使船体分段焊接的装配拘束进入力学计算，热输入、冷却速率和释放时点仍保持可单独改变的工艺变量。

二、焊接工艺参数对残余应力调控方法选择

（一）焊接热输入温度场模拟精度校验

焊接工艺参数调控先校验温度场，因为残余应力的形成取决于峰值温度、冷却时间和塑性区宽度。以焊缝中心、焊趾外10mm和热影响区外30mm为三个计算测点，热输入从0.95kJ/mm提高到1.35kJ/mm时，中心测点峰值温度由1420℃升至1585℃，800 ~ 500℃冷却时间由8.60s延长到13.40s，焊趾外10mm处峰值温度由760℃升至910℃[3]。熔合线宽度计算值与目标宽度差值不超过0.80mm时，后续应力比较才具备可比性。热输入偏低会造成熔深不足和局部未熔合，偏高则扩大热影响区并降低冷却收缩的局部化程度，模型中以1.15 ~ 1.25kJ/mm作为后续应力调控的主要区间。

（二）工艺参数下残余拉应力分布判定

工艺参数改变后，纵向残余拉应力沿焊缝中心线呈中段高、端部缓释的分布形态，横向拉应力主要集中在焊趾外侧15 ~ 35mm范围。低热输入组虽然热影响区窄，但焊缝中心纵向拉应力达到338MPa，接近EH36常温屈服强度；中等热输入组的峰值降至304MPa，压缩塑性区与冷却收缩区宽度匹配较好；高热输入组峰值回升到326MPa，宽热影响区在冷却末期受到两侧冷板限制，横向收缩重新转化为拉应力。热输入梯度对应的应力结果见表1。

表1 不同热输入条件下残余应力计算结果

热输入工况	电弧功率 (kW)	焊缝中心峰值温度 (℃)	纵向拉应力峰值 (MPa)	横向拉应力峰值 (MPa)	高应力区宽度 (mm)
偏低热输入	6.76	1410	338	156	32
较低热输入	7.28	1475	319	149	35
中等热输入	7.84	1530	304	142	39
略高热输入	8.40	1560	311	151	44
偏高热输入	8.96	1605	326	168	54
过高热输入	9.60	1640	342	181	63

表1中，中等热输入工况的纵向拉应力峰值最低，高应力区宽度仍控制在39mm；偏高热输入虽然有利于熔深稳定，却把高应力区宽度扩大到54mm，过高热输入进一步把横向拉应力峰值推至181MPa，应力峰值和影响区尺度应同时纳入船体高强度钢焊接调控判据。

Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

三、焊接顺序对残余应力调控方法选择

（一）分段焊接顺序熔合线精度校验

焊接顺序调控用于改变热循环叠加方式，模型比较直通焊、对称分段退焊和跳焊三种路径。熔合线精度校验不只看焊缝外形，还要检查每一段起弧、收弧位置的温度重叠区；当分段长度取120mm、退焊搭接长度取15mm时，熔合线最大偏差约1.60mm，端部未熔透风险低于直通焊，跳焊路径在相邻段二次加热处出现更宽的等温带[4]。搭接长度短于10mm时，收弧端温度衰减过快，熔合线外侧会出现断续低温带；搭接长度超过25mm后，重复加热又会扩大局部软化区。对称分段退焊使热源在结构中部形成相向收缩，板端自由收缩量被削弱，焊缝中段的纵向应力峰值不再集中到单一连续区段。

（二）不同焊接顺序应力峰值比较

三种焊接顺序的残余应力差异主要来自热源停留位置和冷却收缩先后关系，长焊缝中段是否连续受热决定了拉应力峰值是沿一条带状区域累积，还是被分段切开后在多个短区间内释放。直通焊条件下，焊缝终端附近产生326MPa纵向拉应力峰值，峰值区沿末端约70mm延伸；对称分段退焊把峰值降到291MPa，高应力区被分散为两个短区段；跳焊虽然能够降低板端角变形，但相邻段重复升温使中部横向拉应力增加到186MPa，且局部高温区在焊道交界处形成较陡的温度梯度。对船体高强度钢板架而言，对称分段退焊更适合长焊缝残余应力调控，跳焊只适用于端部变形控制要求高且允许增加局部打磨或后热处理的构件。不同焊接顺序的峰值响应见图2。

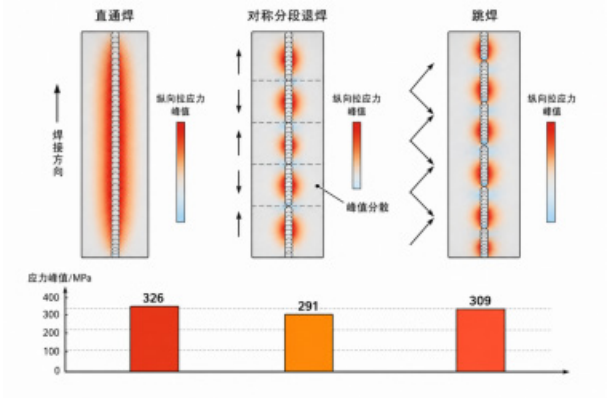


图1 不同焊接顺序下应力峰值响应

图1中，直通焊条带的红色高应力区连续贯通，对称分段退焊把红色峰值拆分成多个短区段，下方柱形轴中291MPa低于直通焊326MPa和跳焊309MPa；黑色方向箭头显示退焊路径把收缩方向分散到相邻区段，减少了单端终止处的应力累积。

四、约束释放量对残余应力调控方法选择

（一）夹具释放时点残余应力精度校验

约束释放量调控关注夹具刚度在焊后冷却阶段的保留时间。模型把释放时点设置为焊缝金属冷却到400℃、250℃和150℃三种状态，并对比板面挠度与焊趾应力的变化。400℃释放时板面角变形较大，焊趾外侧拉应力峰值为276MPa；250℃释放时角变形控制在1.80mm以内，拉应力峰值为294MPa；150℃释放时变形最小，但焊缝中心纵向拉应力升至321MPa[5]。三组结果之间的差异表明，释放时点并非越晚越稳，冷却末期保留过高夹持刚度会把纵向收缩锁入焊缝中心。释放时点精度校验说明，夹具保留过久会把热收缩限制转化为残余拉应力，过早释放又会扩大板架面外变形。

（二）约束释放后残余应力重分布判定

约束释放后的残余应力不是简单降低，而是在焊缝中心、热影响区外缘和夹持线附近重新分配。夹具等效刚度从满刚度状态降至0.40kN/mm时，焊缝中心纵向拉应力由312MPa降至294MPa，夹持线附近横向拉应力由118MPa增至140MPa；刚度继续降至0.10kN/mm后，板端转角释放使焊趾外侧出现局部压应力带，但板面挠度超过2.40mm[6]。调控方法应把释放量分成两级，先在250℃附近解除外侧夹具，再在150℃以下解除靠近焊缝的定位约束，使拉应力峰值、横向应力迁移和面外变形保持同向受控。调控变量对应力分布的作用见图1。

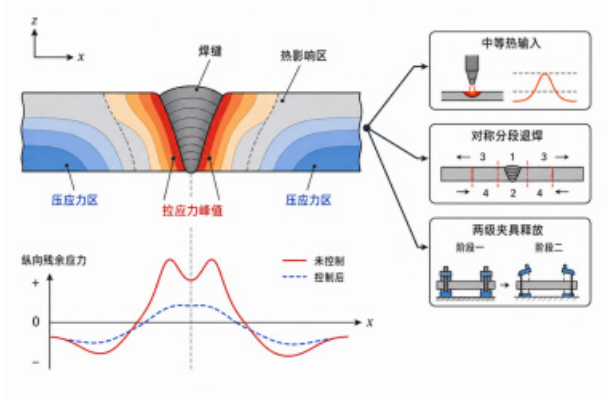


图2 船体高强度钢焊接残余应力分布及调控示意

图2中，红橙色拉应力峰值沿焊缝两侧集中，蓝色压应力区分布在远离焊缝的板面区域；控制后蓝色虚线曲线的峰值低于未控制红线，右侧中等热输入、对称分段退焊和两级夹具释放分别对应温度峰值、收缩路径和夹持刚度三个可调变量。

（三）船体板架焊后变形响应评估

焊后变形响应评估把残余应力调控结果转化为船体分段装配可接受的几何偏差。采用中等热输入、对称分段退焊和两级约束释放组合后，焊缝中心纵向拉应力峰值约285MPa，比直通焊固定夹持工况的338MPa低53MPa；焊趾外侧30mm处横向拉应力由174MPa降至139MPa，板面最大挠度控制在1.90mm。若单独追求更低峰值应力而提前释放夹具，挠度会超过3mm并影响后续分段合拢；若单独压低变形而延迟释放，应力峰值又会接近屈服强度，焊趾处疲劳裂纹萌生的驱动力会随拉应力保留而增大。组合调控还使焊趾拉应力带分散，后续矫形可集中在短区段内完成。短区段处理还能减少二次热影响范围。调控方法的有效区间应以峰值应力低于0.85倍屈服强度、板面挠度不超过2mm和高应力区宽度小于45mm为共同判据。

 | Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

五、结束语

船体高强度钢焊接残余应力分布的数值模拟应以真实板架接头、温度对应材料参数、移动热源和分步约束为共同基础，模型只有同时捕捉温度场峰值、冷却时间、塑性区宽度和夹持边界，才能解释焊趾及熔合线附近的拉应力集中。热输入、焊接顺序和约束释放量对残余应力具有不同作用方向：中等热输入能够兼顾熔合质量和塑性区尺度，对称分段退焊可削弱连续终端收缩造成的峰值集中，两级夹具释放则在板面变形和应力释放之间保留可操作余量。以纵向拉应力峰值低于0.85倍屈服强度、横向高应力区宽度小于45mm 和板面挠度不超过2mm 为共同判据时，组合调控方法更适合 EH36 船体高强度钢长焊缝施工参数比选。

参考文献

[1] 岳阳，王树明 . 高强异形厚板焊接残余应力分布及消除方法研究 [J]. 交通科技 ,2025,(3):33-35+50.

[2] 石伟刚 .Q690高强度结构钢焊缝残余应力分布情况研究 [J]. 中国机械 ,2026,(5):67-70.

[3] 苏永攀，王树明，岳阳 . 不同厚度平板对接焊缝残余应力分布规律研究 [J]. 智能城市 ,2025,11(7):144-148.DOI:10.19301/j.cnki.zncs.2025.07.034.

[4] 冯莹莹，周俊甫，郭学浩，等 . 轧制碳钢 / 不锈钢复合板残余应力分布的数值模拟以及调控 [J]. 机械工程材料 ,2025,49(4):86-91.

[5] 廖文麒，庄一舟，郑祥隆，等 . 焊接顺序对组合梁加劲肋焊缝残余应力及疲劳强度的影响分析 [J]. 焊接技术 ,2025,54(11):34-39+145.DOI:10.13846/j.cnki.cn12-1070/tg.2025.11.018.

[6] 李冠楠，毛峙溆，王重阳，等 . 外部拘束对 NM450TP 钢 T 字接头焊接残余应力的影响 [J]. 机械工程学报 ,2025,61(20):91-102.

Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

森林康养基地选址的实证研究——以达州市天鹰寨为例

袁中山
达州市达川区大树林业站，四川 达州 635000

DOI:10.61369/ERA.2026100006

摘　　要： 文章阐述了四川省达州市达川区天鹰寨项目的区位条件、资源禀赋及开发目标。基于“森林康养选址评价指标评价体系”，对天鹰寨的选址资源价值与选址开发价值进行了综合评估。结果显示，两项指标均获评“良好”等级，这为当地政府决策及投资者介入提供了切实可行的参考依据。

关 键 词： 天鹰寨；选址资源价值评价；选址开发价值评价

An Empirical Study on the Site Selection for Forest-based Health and Wellness Bases: A Case Study of Tianyingzhai, Dazhou City

Yuan Zhongshan
Dashu Forestry Station, Dachuan District, Dazhou, Sichuan 635000

Abstract: This article elaborates on the locational conditions, resource endowments, and development objectives of the Tianyingzhai Project in Dachuan District, Dazhou City, Sichuan Province. Based on the "Evaluation Index System for Site Selection in Forest-based Health and Wellness Projects," this study conducts a comprehensive assessment of both the resource value and the site selection and development value of Tianyingzhai. The results indicate that both indicators were rated as "Good," providing a practical and feasible reference basis for local government decision-making and investor participation.

Keywords: Tianyingzhai; site selection resource value assessment; site selection and development value assessment

引言

随着现代社会“亚健康”群体规模持续扩大，公众对森林康养的关注度不断提升，森林康养已逐渐成为备受瞩目的健康业态。森林康养是以森林景观、森林环境及生态文化等为核心依托资源，开展强身健体、调养生息等活动的康养业态。森林康养目的地选址是项目开发前期需完成的核心基础工作，其科学性与合理性直接决定项目投资的成败。本文通过构建森林康养选址评价指标体系，将目标层划分为“资源价值”与“开发价值”两个方面：其中“资源价值”体现森林康养项目自身具备的天然资源基础，“开发价值”则主要反映项目投资方的投资能力、运营管理水平及品牌影响力。本文对四川省达州市天鹰寨康养项目的选址评价开展系统分析，得出对应评价结果，为该项目后续开发提供参考依据[1]。

一、达州市天鹰寨基本情况

（一）项目区位

规划区域地处川陕渝鄂结合部，位于达州市达川区东南部万家镇，地跨达川区、重庆市梁平区、开江县三区县交界地带。该区域距达州市区45 km，距达州金垭机场61 km，距达州火车站55 km，距省道202线6 km，距达开快速通道20 km，交通区位条件清晰。自唐代至清代末年，该区域一直是方圆百里范围内知名的集市与佛教胜地；因区域内最高峰远望形似天际翱翔的苍鹰，自唐代起该高峰即被命名为“天鹰寨”，该区域也因此得名。本次研究项目的核心区面积为10平方公里，景区规划占地面积为33平方公里；区域整体地势呈现东南高、西北低的特征，东部以山地地貌为主，西部以丘陵地貌为主，区域内同时整合了自然景观与人文历史两类资源[2]。



图1 规划区区位

作者简介：袁中山（1978.11.16—），男，汉，达州，大专，工程师，研究方向：林业。

 | Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

（二）规划区域资源

1. 植被资源

规划区域森林覆盖率达90%。植被主要包括马尾松林、柏树、杉树、灌丛林，竹林和人工栽植零星银杏树等。



图2 规划区域植被资源



图3 规划区域地质地貌资源

2. 规划区域地质地貌

规划区域属川东褶皱低山丘陵岭谷区。有凸峰、独峰、岩壁与岩缝、沟壑、岩石洞与岩穴等，如心子山、金银洞、四方丘、鹰嘴岩、升子山等。

3. 水体资源

山沟谷之间溪流常年流淌，水量虽小，但常年径流不断，溪水潺潺，小鱼小虾成群[3]。为碎屑岩类孔隙裂隙水－层间裂隙水矿泉，贮于三叠系须家河组和侏罗系珍珠冲组地层，单井日涌水300m3。有挖煤形成的暗河，还有大垭口处的几处冷水鱼塘。



图4 规划区地水体资源



图5 规划区宗教文化资源

4. 宗教文化资源

天鹰寨佛教寺庙遗迹与观音堂道佛合一寺庙构成了规划区主要的宗教文化景观，其中天鹰寨寺庙在“文化大革命”期间遭到损毁。此外，该区域还保有唐朝集市、张献忠屠川传说以及红四方面军战斗遗迹等丰富的历史文化资源。

规划区资源目前处于待开发阶段，具备良好的生态基础。区域内森林资源具有一定规模，宗教及集市遗迹在当地具有相应影响力。通过合理开发，该项目有望建设成为在区域内具备较强吸引力与影响力的康养旅游目地[4]。

表1旅游资源分类表

主类	亚类	基本类型	具体内容
地文景观	地质地貌过程形迹	凸峰、独峰、岩壁与岩缝、沟壑地、岩石洞与岩穴	鹰嘴岩、升子山、心子山、四方丘、金银洞、牛背脊等。
水域风光	河段、天然湖泊与池沼	暗河，观光游憩河段、湖区	煤洞暗河、小溪、鱼塘
生物景观	树木	林地、丛书、独树	尾松林、灌丛林、木姜子经济林、竹林和零星银杏树
遗址遗迹	社会经济文化活动遗址遗迹	废弃寺庙、废城与聚落遗迹	天鹰寨遗迹、唐朝集市遗迹
建筑与设施	综合人文旅游地	宗教与祭祀活动场所	观音堂的道佛合一寺庙

（三）规划区开发目标

本项目结合区域资源禀赋、国家相关政策标准，拟将规划区打造为森林康养示范基地。

二、规划区选址资源价值评价

（一）已有理论研究

资源价值是项目开发的先天条件，其在选址评价指标体系中占60% 的分值。一般而言，资源价值评价结果越高，越适宜规划建设森林康养基地。 森林康养基地选址资源价值评价指标体系、森林康养基地选址资源价值评价指标解释。

（二）规划区选址资源价值评价

根据已经研究的理论结论和规划区实际，运用经验判断法，可以得出以下评价表（见表－1），其中的“现状”是实际调研和当地政府提供的[5]。

表1规划区养老选址资源价值评价指标计算结果

指 标	现 状	分 值
S1植被资源	森林覆盖率达85%。包括马尾松林，柏树、杉树、灌木林，木姜子，人工栽植银杏树	0.065
S2空气资源	空气负离子水平，细菌含量，天然照射贯穿辐射剂量水平符合要求适合养生	0.070
S3水资源	水域面积较少，有少量湖泊和溪流，地下水、地表水质量较好，由于挖煤导致地下水流失	0.029
S4气候条件	气候温和，四季分明；降水充沛；无霜期长，云雾多，日照少。	0.072
S5声光环境	当地无声污染和光污染	0.036
S6土壤质量	土壤物理指标、化学指标和生物学指标值符合要求适合养生	0.036
S7动物资源	有少量野猪、野鸡、野兔，生存环境较差	0.023

Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

S8艺术文化价值	当地原乡文化保存较好。由于破“四旧”，寺庙和古建筑破坏殆尽	0.034
S9生态文化价值	生态环境较好，但文化价值不高	0.023
S10观赏游憩价值	林业资源的丰度高，但高品质树种少，林相差	0.026
S11资源组合条件	林业资源和宗教资源组合较好，其他资源组合一般	0.034
S12适居期	冬季气温8℃以下，日平均气温5.4℃，稍不适宜老人居住，其他季节都较舒适。	0.038
合计		0.486

评价结论如下：森林康养基地选址的资源价值评价指标总分为0.6，规划区实际得分为0.486，换算为百分比即81%，总体评级为“良好”。基于上述评价结果，规划区应当在持续做好生态环境保护与品质提升的同时，着力恢复并植入艺术与生态文化内容，调整优化林相结构，引种增植高品质树种，改善区域资源组合配置，进而带动森林康养价值的提升。

三、规划区选址开发价值评价

（一）已有理论研究

开发价值评价中，多项指标的得分会受经济开发能力的制约，随着投资力度与投资规模的增加，开发价值评价得分将会逐步提升。因此，开发价值属于动态变量，在选址评价指标中占比为40%。同理，开发价值评价得分越高的森林，越适宜规划建设康养基地[6]。

（二）规划区选址资开发价值评价

当前规划区处于待开发阶段，本研究结合地方政府的政策扶持力度与投资主体的投资意愿，当投资归属政府时，并以此为评价基准得到评价结果（表2）：当前S13-15指标的打分具备科学性与合理性；当投资归属企业时，也可能受不可控因素影响导致项目开发终止，因此当前S16-29指标的打分仅可作为参考依据。

表2规划区康养选址开发价值评价指标计算结果

指 标	开发目标	分 值
S13区位吸引力	目前市区到目的地约1小时车程，天鹰寨在附近有较高知名度。	0.048
S14交通可达性	目前附近有襄渝铁路、西渝高铁、成达万高铁路、达渝高速、210国道和达州金垭机场	0.032
S15交通便捷程度	目前达开快速开通、交通便捷，车程约40分钟	0.032
S16市场规模	所在区域的养老需求旺盛，由于经济不发达，家庭养老还是主体	0.038
S17市场竞争力	附近不少地方在开发养老产品，但是规划区资源优势突出，有较强的市场竞争力	0.058
S18住宿设施接待条件	目前住宿设施不能够满足游客和养老的需要	0.024
S19餐饮条件	目前有餐饮接待条件有限，根据规划，餐饮条件将极大改善满足游客和养老需要	0.024
S20休闲度假设施及活动条件	根据规划，将按国家度假区标准合理配置户外和室内休闲度假设施	0.014
S21配套设施及服务	根据规划，将按国家度假区标准提供信息服务、救援配备及休闲度假辅导	0.014
S22购物条件	根据规划，将逐步完善购物条件	0.01
S23区内交通条件	将建车行道、步行道和自行车道	0.007
S24其他设施及服务条件	将逐步完善给排水、供气保障，公众信息服务	0.008
S25防灾避险条件	逐步完善自然灾害的预警和防范措施和救灾措施	0.008
S26节能环保条件	采取各种节能、节水等环保措施，打造生态旅游景区和养老目的地	0.007
S27资源与环境保护管理	加强自然与文化资源保护监测，强化环境保护监测，完善环保管理制度	0.011
S28内部管理	加强经营管理，社区管理，安全管理等管理制度好措施	0.011
S29游客管理	科学、有序、全面加强游客的管理和服务	0.014
合计		0.328

评价结论：森林康养基地选址开发价值评价指标满分为0.4分，本次评价规划区得分为0.328分，折合得分百分比为82%，整体评级为“良好”。上述结果表明，可通过后期投资优化完善的开发要素更易获得较高评级[7]。

四、结束语

森林康养是现阶段政府主管部门、市场投资主体与规划设计行业共同关注的康养产业重点发展领域，而选址是森林康养项目开发建设的核心基础工作。本文以达州天鹰寨森林康养项目为研究对象开展选址评价分析，研究结果表明：研究区资源价值指标折合得分百分比为81%，开发价值评价指标折合得分百分比为82%，两项评价结果总体均处于“良好”评级区间。在满足政策支持的前提下进行合理投资，天鹰寨康养基地具备开发建设条件，本次选址评价结果可为当地政府及市场投资主体开展开发决策提供重要参考。

参考文献

[1] 四川省林业厅 . 四川省林业厅关于大力推进森林康养产业发展的意见 .
[2] 唐建兵 . 森林公园康养综合体规建设基本架构 [J].
[3] 赖晓华 . 森林康养资源开发利用评价指标体系构建研究 [J]. 北京林业大学学报 (社会科学版),2021,20(4):68-76.
[4] 唐晓红 . 基于 AHP- 模糊综合评价的山地型森林康养小镇资源评价——以四川青城山为例 [J]. 四川林业科技 ,2022,43(3):78-84.
[5] 江绪旺 , 俞书涵 , 李益辉 , 等 . 适老疗愈型森林康养基地评价研究 [J]. 林草资源研究 ,2023(4):112-119.
[6] 孙媛媛 , 赵梓彤 . 基于 AHP-DEMATEL 的森林公园康养旅游选址适宜性评价 [J]. 林业经济问题 ,2026,46(1):49-62.
[7] 国家林业和草原局 .LY/T 2934—2025 森林康养基地建设技术规范 [S]. 北京 : 中国标准出版社 ,2025.

 Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

BIM 技术在工程施工监理全过程中的应用实践研究

林新

广东建科建设咨询有限公司，广东 广州 510599

DOI:10.61369/ERA.2026100008

摘　　要： 在建筑业数字化转型与智慧建造快速推进的行业背景下，传统工程施工监理存在管控碎片化、信息滞后、质量安全管控被动、协同效率低下等诸多痛点，难以适配现代大型、复杂建筑工程的建设管理需求。BIM 技术凭借可视化、信息化、协同化、模拟化、参数化的核心优势，可深度嵌入工程施工监理全流程，实现监理工作从传统人工事后监管向数字化、精细化、事前预控、事中动态管控转型。本文基于工程监理全过程管控逻辑，系统剖析 BIM 技术在施工准备阶段、施工实施阶段、竣工交付及运维衔接阶段的具体应用场景与实施路径，结合实际工程实践梳理技术应用成效，分析当前 BIM 监理应用中存在的技术标准不完善、人才专业能力不足、信息协同机制不健全、落地成本较高等问题，并针对性提出优化对策。研究结果表明，全过程 BIM 监理应用可有效提升工程质量、安全、进度、成本管控效能，规范施工流程，降低工程建设风险，可为建筑工程监理数字化升级提供实践参考与理论支撑。

关 键 词： BIM 技术；工程施工监理；全过程管控；智慧监理；工程实践；数字化建造

Research on Application Practice of BIM Technology in the Whole Process of Engineering Construction Supervision

Lin Xin

Guangdong Jianke Construction Consulting Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510599

Abstract: Against the industry background of digital transformation and rapid advancement of intelligent construction in the construction industry, traditional engineering construction supervision has many pain points such as fragmented management and control, information lag, passive quality–safety management and control, and low collaboration efficiency, which can hardly meet the construction management requirements of modern large–scale and complex construction projects. With the core advantages of visualization, informatization, collaboration, simulation and parameterization, BIM technology can be deeply embedded into the whole process of engineering construction supervision, realizing the transformation of supervision work from traditional manual post–supervision to digital, refined, pre–control in advance and dynamic in–process management and control. Based on the whole–process management and control logic of engineering supervision, this paper systematically analyzes the specific application scenarios and implementation paths of BIM technology in the construction preparation stage, construction implementation stage, completion–delivery and operation–maintenance connection stage. Combined with practical engineering practice, it sorts out the effects of technology application, analyzes existing problems in current BIM–based supervision application including imperfect technical standards, insufficient professional competence of talents, defective information collaboration mechanism and high implementation cost, and puts forward targeted optimization countermeasures. The research results show that the whole–process BIM supervision application can effectively improve the management and control efficiency of engineering quality, safety, schedule and cost, standardize construction procedures and reduce construction risks. It can provide practical reference and theoretical support for the digital upgrading of construction engineering supervision.

Keywords: **BIM technology; engineering construction supervision; whole–process management and control; intelligent supervision; engineering practice; digital construction**

Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

引言

随着“数字中国”战略落地与建筑行业高质量发展推进，智慧建造、数字化监理已成为工程建设领域的核心发展趋势。传统工程施工监理模式以人工现场巡查、纸质资料记录、事后问题整改为核心，管控模式粗放，各参建方信息割裂，进度、质量、安全、成本管控存在明显滞后性，面对异形结构、超高层、大型综合体等复杂工程项目，极易出现管控漏洞、工序冲突、数据偏差等问题，严重影响工程建设质量与综合效益。BIM（建筑信息模型）技术作为建筑业数字化转型的核心技术，可通过构建三维参数化数字模型，集成工程设计、施工、造价、安全等全维度信息，实现工程项目全生命周期可视化管控。近年来，BIM 技术在工程设计、施工、造价管理中的应用日趋成熟，但在施工监理全过程中的深度融合、标准化落地仍存在短板。基于此，本文立足施工监理全过程工作体系，系统探究 BIM 技术的实践应用场景、核心价值与现存问题，提出适配工程现场的优化策略，推动 BIM 技术与监理工作的深度融合，助力工程监理行业数字化、精细化、智能化升级。

一、BIM 技术应用于工程施工监理的核心优势

BIM 技术以三维数字建模为基础，整合建筑工程 设计、施工、运维全流程信息，形成可共享、可追溯、可模拟、可优化的信息模型。[1] 相较于传统监理模式，BIM 技术赋能下的施工监理打破了传统管理模式的时空限制与信息壁垒，具备多重核心应用优势，全面弥补传统监理的管控缺陷。BIM 技术不是一种三维建模工具，它是工程整个生命周期中的一整套数字化管理手段，其主要特点可以满足施工监理一体化管控的需求。[2] 一是可视化动态管控。传统监理依赖二维图纸开展工作，图纸理解偏差、空间冲突识别困难等问题频发。BIM 三维模型可直观呈现建筑结构、管线排布、设备安装等细节，监理人员可实时查看工程施工状态，精准识别施工偏差与空间冲突，实现隐蔽工程、复杂工序的可视化监管，杜绝图纸错漏碰缺引发的施工隐患。二是全流程协同赋能。工程项目参建方众多，传统沟通模式以线下会议、书面通知为主，信息传递滞后、责任界定模糊。实现协同工作，信息共享，打破信息孤岛，提高工作效率。[3]BIM 协同管理平台可搭建多方共享的数字化工作空间，业主、监理、施工、设计、造价等各方实时同步工程数据、整改信息、施工进度，实现问题实时上报、指令实时传达、整改实时闭环，大幅提升多方协同效率。三是事前预控与风险预警。传统监理以事后整改为主，风险管控被动。依托 BIM 技术可开展施工模拟、管线综合排布、工序碰撞检测，在施工前预判工序冲突、施工难点、安全风险，提前优化施工方案，制定预控措施，将质量、安全、进度风险管控前置，实现从“事后补救”向“事前预防、事中管控”的转变。四是数据化精准管控。BIM 模型具备参数化特性，可集成工程量、施工工艺、材料参数、合同造价、验收标准等全维度数据，监理人员可依托模型快速完成工程量核对、施工质量比对、进度偏差分析、成本异常排查，摆脱人工核算的低效与误差问题，实现监理工作的数据化、标准化、精准化管控。

传统监理与BIM监理核心指标对比表

对比维度	传统监理模式	BIM监理模式	提升幅度
管控模式	事后人工整改	事前预控+事中动态管控	管控前置率100%
信息协同效率	线下传递，滞后24-48小时	实时同步，问题闭环≤2小时	效率提升90%+
图纸会审准确率	约60%-70%	95%以上	准确率提升30%+
质量问题整改率	约85%	100%闭环追溯	整改完成率提升15%
安全风险识别率	约50%	90%以上	风险识别率提升40%
工程量核算误差	±5%以上	±1%以内	误差降低80%
资料追溯完整性	约70%	100%全流程可追溯	完整性提升30%
多方协同成本	高，线下会议成本占比80%	低，线上协同为主	协同成本降低50%+

二、BIM 技术在施工监理全过程中的应用实践

（一）施工准备阶段：前置预控，夯实监理基础

当前，BIM 技术已成为工程项目建设中不可替代的手段。[4] 施工准备阶段是工程管控的源头，也是 BIM 监理应用的关键前置环节，核心通过模型搭建、图纸审核、方案模拟优化，从源头规避施工隐患，为后续现场监理工作提供精准依据。首先，开展三维建模与图纸会审。依托各系统合并得到船闸的 BIM 模型，保障设计方案的可施工性，在施工前发现图纸数据错误、无数据信息、相互矛盾等问题。[5] 监理人员联合设计、施工单位，依据施工图纸搭建高精度 BIM 三维模型，数字模型层利用 BIM/3D 建模技术，构建高精度的数字孪生体，将建筑信息模型与实时数据融合，形成施工现场的虚拟镜像。[6] 涵盖建筑、结构、机电、给排水、消防等全专业内容。通过模型开展智能化图纸会审，自动检测各专业管线碰撞、结构尺寸冲突、图纸错漏碰缺等问题，形成问题清单并同步反馈设计单位优化整改，彻底解决二维图纸会审不全面、隐患排查不彻底的问题，从源头减少设计变更与施工返工。其次，优化专项施工方案与进度计划。针对深基坑、高支模、大型设备吊装、异形结构施工等高危、复杂工序，监理人员依托 BIM 模型开展施工全过程模拟，对比不同施工方案的可行性、安全性与经济性，优化施工工序、作业流程与施工路径。同时，将 BIM 模型与进度计划绑定，构建 4D-BIM 进度模型，模拟整体施工流程，预判关键线路、工期瓶颈与工序衔接问题，审核

 Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

施工单位进度计划的合理性，督促施工单位优化工期排布，规避工期延误风险。最后，完成监理管控体系搭建。基于 BIM 协同平台梳理各工序监理管控要点、验收标准、风险清单，将管控要求嵌入模型对应构件，建立标准化 BIM 监理管控台账，明确各参建方职责与工作流程，实现监理工作标准化、规范化落地，为现场全过程管控筑牢基础。

（二）施工实施阶段：动态管控，落实全过程监理

随着时代的发展和城市化进程加速，建筑工程施工规模越来越大，整体结构也越来越复杂，对施工监理提出了更高的要求。[7] 施工实施阶段是工程质量、安全、进度、成本管控的核心阶段，也是 BIM 技术应用最广泛、成效最显著的环节，可实现四大核心维度的动态智能化监理。高精度、高时效、全覆盖的航道基础与工况数据是智能施工的基石。[8] 在质量监理方面，依托 BIM 模型实现精细化质量管控。现场监理人员通过移动端设备联动 BIM 模型，对照模型参数、施工工艺标准开展现场巡检、旁站、验收工作。对墙体砌筑、钢筋绑扎、管线安装、混凝土浇筑等关键工序，实时比对现场施工状态与模型标准，快速发现尺寸偏差、工艺不规范、材料不符等质量问题，即时在模型对应位置标注问题、上传影像、下达整改通知，同步推送至施工单位，实现“发现问题 – 整改落实 – 复核闭环”的全流程数字化管控。同时，将各工序质量验收数据、检测报告实时录入模型，形成可追溯的质量档案，解决传统质量管控资料零散、追溯困难的问题。针对隐蔽工程，通过 BIM 模型记录施工全过程数据与影像资料，规避隐蔽工程质量监管盲区。在安全监理方面，依托 BIM 技术实现风险智能预警与动态防控。监理人员利用 BIM 模型对施工现场进行全域模拟，精准识别深基坑、高空作业、临边洞口、起重吊装、临时用电等高危风险点，标注风险等级与管控要求，制定专项安全监理方案。结合无人机巡检、物联网监测设备，实时采集现场安全数据，同步更新至 BIM 模型，动态监控施工现场安全状态。当出现违规作业、安全防护缺失、监测数据超标等问题时，平台自动预警，监理人员可第一时间介入管控、叫停违规施工，杜绝安全事故发生。同时，通过模型模拟安全事故应急演练，优化应急处置流程，提升现场安全管控能力。

（三）竣工交付阶段：高效核验，实现闭环管控

传统工程竣工结算存在验收流程繁琐、工程量核算误差大、资料杂乱、竣工图纸与现场不符等问题，验收效率低下。在施工管理中，BIM 技术可以用于施工进度模拟、碰撞检测、工程量计算等，提高施工管理的精细化水平。[9]BIM 技术的应用可实现竣工监理验收的数字化、高效化、精准化。施工完成后，监理人员依托竣工 BIM 模型开展竣工验收工作，对比施工过程模型、设计模型与现场实际施工情况，全面核查工程施工质量、工序完成情况、设计变更落实情况，快速排查竣工遗留问题，形成竣工整改清单。同时，BIM 模型集成了工程全生命周期施工数据、验收资料、变更记录、检测报告等信息，可直接作为竣工验收、结算审核的核心依据，大幅简化验收流程，提升验收精准度。验收完成后，基于竣工 BIM 模型搭建工程数字孪生档案，完整留存工程建设全流程数据，实现监理工作闭环。同时，该模型可直接移交运维单位，为后续工程运维、检修、改造提供精准的数据支撑，实现施工监理与运维管理的有效衔接。精准性依托高精度感知设备与先进的定位技术，能够有效降低人为操作误差，实现对施工参数、地质条件的精准捕捉与把控。[10]

三、BIM 技术在监理全过程应用中存在的问题

一是行业标准体系不完善。目前我国 BIM 技术应用缺乏统一的监理行业标准，模型搭建精度、数据录入规范、监理应用流程、成果验收标准等尚未统一，不同项目、不同单位的 BIM 模型兼容性差、数据不互通，导致 BIM 监理应用碎片化，难以形成标准化、常态化的全过程管控体系，部分项目仅将 BIM 作为辅助展示工具，未真正融入监理核心工作。二是专业人才储备不足。BIM 监理属于复合型岗位，要求监理人员同时具备工程监理专业知识、BIM 建模操作能力、数字化平台运维能力。当前多数一线监理人员传统管理经验丰富，但信息化技术操作能力薄弱，难以熟练运用 BIM 模型开展碰撞检测、进度模拟、数据分析等深度工作；同时，行业专业 BIM 监理人才缺口较大，人才培养体系滞后，无法满足全过程 BIM 监理的落地需求。三是多方信息协同机制不健全。部分工程项目各参建方 BIM 应用程度不一，施工单位、设计单位、监理单位数据对接不顺畅，存在信息壁垒。部分参建方重视程度不足，未及时同步施工数据、变更信息，导致 BIM 模型更新滞后，模型与现场实际施工脱节，无法发挥动态管控作用，严重影响全过程监理的精准性与有效性。四是应用成本高、落地性价比偏低。BIM 全过程监理需要投入建模软件、协同平台、物联网监测设备、人才培训等成本，中小型工程项目建设方出于成本考量，不愿投入过多资源开展 BIM 监理落地。

四、BIM 监理全过程应用的优化对策

一是完善行业标准与规范体系。依托行业主管部门与行业协会，结合不同类型工程项目特点，制定统一的 BIM 监理应用标准，明确模型搭建精度、数据更新频次、各阶段监理应用流程、成果验收标准、数据共享规范等内容。统一各专业 BIM 模型数据接口，提升模型兼容性与互通性，打破行业信息壁垒，构建标准化的全过程 BIM 监理管控体系，杜绝碎片化、形式化应用。

二是强化复合型 BIM 监理人才培养。建立多元化人才培养体系，一方面，监理企业常态化开展内部培训，针对一线监理人员开展 BIM 建模、平台操作、数字化管控等技能培训，结合工程实操案例提升人员实战能力；另一方面，加强与高校、科研机构合作，定向培养兼具监理专业知识与数字化技术能力的复合型人才。

三是搭建常态化多方协同管控机制。以 BIM 协同管理平台为核心，明确业主、监理、施工、设计各方的 BIM 应用职责，建立数据实时更新、问题实时联动、整改实时闭环的协同管理制度。要求各参建方及时同步设计变更、施工进度、质量安全、材料设备等相关数据，确保 BIM 模型与施工现场实时同步。定期开展

Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

BIM 专项协同会议，梳理模型应用问题，协调各方工作，打通信息壁垒，实现多方高效协同管控。

四是降本增效，深化技术落地应用。针对不同规模、不同类型的工程项目，制定差异化的 BIM 监理应用方案，中小型项目简化建模与管控流程，聚焦核心工序开展 BIM 监理管控，降低应用成本；大型复杂项目全面落实全过程 BIM 监理，充分发挥技术优势。

五、结论与展望

BIM 技术作为建筑业数字化转型的核心工具，深度适配现代工程施工监理的精细化、智能化管控需求，通过在施工准备、施工实施、竣工交付全流程的落地应用，可有效解决传统监理信息滞后、管控被动、协同低效、数据缺失等痛点，实现工程监理从人工经验管控向数据智能管控的转型升级，大幅提升工程建设综合管控水平。本文通过系统研究 BIM 技术在监理全过程的应用路径，梳理当前技术应用的短板与不足，提出针对性优化对策，并结合工程实践验证了技术应用的可行性与实效性。当前 BIM 监理应用仍处于转型升级阶段，标准体系、人才储备、协同机制等方面仍需持续完善。未来，随着数字孪生、物联网、大数据、人工智能等技术的深度融合，BIM 监理将朝着智能化、自动化、全域化方向发展，可实现施工现场实时感知、风险智能预判、问题自动整改、数据智能分析的全自动化监理管控模式。监理行业需持续推进技术创新与管理升级，深化 BIM 技术全过程落地应用，全面推动工程监理行业数字化、高质量发展。

参考文献

[1] 姜洋 .BIM 技术在建筑工程施工监理中的应用研究 [C]// 广西网络安全和信息化联合会 .2026 年第十二届工程领域数字化转型与新质生产力发展研究学术交流会论文集 .[出版者详],2026:615-617.DOI:10.26914/c.cnkihy.2026.017149.

[2] 成兆飞 .BIM 技术在建筑工程施工与监理一体化管控中的应用研究 [C]// 中国智慧工程研究会 .2026 人工智能赋能工程技术应用与管理交流会论文集 .[出版者不详],2026:17-19.DOI:10.26914/c.cnkihy.2026.030036.

[3] 汪义锦 . 信息化技术在水运工程施工监理现场管控工作中的应用 [J]. 建设监理 ,2022,(9):20-23.DOI:10.15968/j.cnki.jsjl.2022.09.032.

[4] 吴勇 . 信息技术在工程施工监理工作中的应用 [J]. 建设监理 ,2023,(10):55-58.DOI:10.15968/j.cnki.jsjl.2023.10.008.

[5] 张耀坤 .BIM 技术在犍为船闸工程施工监理的管控应用 [J]. 水运工程 ,2021,(12):11-13.DOI:10.16233/j.cnki.issn1002-4972.20211129.027.

[6] 刘开鑫 . 数字孪生技术在水利水电工程施工监理中的实践研究 [J]. 数码设计 ,2026,(1):126-128.

[7] 华俊雅 . 信息技术在工程施工监理工作中的应用 [J]. 中国房地产业 ,2025,(36):30-33.

[8] 邓涛 , 姜常青 , 覃延鑫 . 智能建造技术在航道工程施工中的应用研究 [J]. 珠江水运 ,2026,(10):116-118.DOI:10.14125/j.cnki.zjsy.2026.10.038.

[9] 高明月 , 郭炜 . 智能建造技术在土木工程施工管理中的应用探索 [C]// 中国企业财务管理协会 .2025 年中国企业财务管理发展大会论文集 .[出版者不详],2025:40-42.DOI:10.26914/c.cnkihy.2025.021854.

[10] 刘立刚 . 智能技术在岩土工程施工管控中的应用 [J]. 智慧中国 ,2026,(5):110-111.

 | Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

低雷诺数环形螺旋桨气动特性及噪声抑制分析

杨逸凯
岭南师范学院，广东 湛江 524000
DOI:10.61369/ERA.2026100009

摘　　要： 在低雷诺数范畴内，小型无人机及高空飞行器所配装的螺旋桨同时承受流动分离与噪声辐射两方面的制约。本文以环形螺旋桨为分析对象，针对其桨尖闭合结构的流动特征，构建了一套融合 Transition SST 转捩模型与 FW-H 声学类比方程的流场 – 声场联合求解方案。借助该方案考察了环形尖端涡系的演变过程，识别了近场噪声源的主要类型与空间分布，获得了远场噪声的频域特性与指向性规律。在降噪层面，依次讨论了几何参数调整、桨尖修形、多孔材料敷设以及主动控制等手段的适用性，可为低噪声环形螺旋桨的设计提供参考。

关 键 词： 低雷诺数；环形螺旋桨；气动特性；噪声抑制

Analysis on Aerodynamic Characteristics and Noise Suppression of Low-Reynolds-Number Ducted Propellers

Yang Yikai
Lingnan Normal University, Zhanjiang, Guangdong 524000

Abstract: Within the low-Reynolds-number range, propellers equipped on small-scale unmanned aerial vehicles and high-altitude aircraft are restricted by both flow separation and noise radiation. Taking the ducted propeller as the research object, aiming at the flow characteristics of its closed blade-tip structure, this paper establishes a combined flow-acoustic solving scheme integrating the Transition SST transition model and the FW-H acoustic analogy equation. With this scheme, the evolution process of the ducted tip vortex system is investigated, the main types and spatial distribution of near-field noise sources are identified, and the frequency-domain characteristics and directivity rules of far-field noise are obtained. In terms of noise reduction, the applicability of measures including geometric parameter adjustment, blade-tip modification, porous material laying and active control is discussed successively, which can provide references for the design of low-noise ducted propellers.

Keywords: low-reynolds-number; ducted propeller; aerodynamic characteristics; noise suppression

引言

小型无人机与城市空中交通技术的快速推进，对动力装置同时提出了较高的效率要求和较低的噪声辐射要求。低雷诺数状态下，桨叶壁面容易形成层流分离泡，该结构的不稳定脉动往往是宽频噪声的重要诱因。环形螺旋桨由于桨尖以环形结构彼此连接，具备约束桨尖涡、改善端部流动的潜力，因而受到学界关注。但就目前认识而言，环形构型对低雷诺数流动的支配方式尚不够明确，尤其是环的引入如何影响声源的空间排布及频率构成，仍有待系统研究。针对上述不足，本文按照数值方法建立、气动与声学特性分析、降噪对策设计的顺序逐层推进，力求阐明环形螺旋桨在低雷诺数工况下的发声机理，并探索可行的降噪路径。

一、基础理论与数值方法构建

（一）低雷诺数流动转捩机制

雷诺数较低时，桨叶表面以层流边界层占主导，流动状态易受外界扰动影响。逆压梯度会促使该边界层发生分离，分离后的剪切层经转捩后可能重新贴附于壁面，由此形成典型的层流分离泡结构[1]。这一结构实质上改变了桨叶的等效外形，相当于对翼型弯度与厚度分布施加了修正，进而作用于升力与阻力的生成。分离泡的几何尺度（长度与高度）随雷诺数和攻角的改变呈现非线性响应。若攻角持续增加，分离点会向桨叶前缘移动，再附过程难以维持，分离泡最终破裂并诱发升力急剧衰减。环形桨尖区域因受到环状结构的约束，三维流动效应较常规构型更为突出，分离泡的空间演化路径也相应发生变化。准确认识转捩过程与分离泡演变之间的内在联系，是把握该型螺旋桨气动特性的基础[2]。

作者简介：杨逸凯（2006.04—），男，汉族，广东四会，本科在读，研究方向：流体力学。

Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

（二）环形桨几何参数建模

环形螺旋桨的结构特征体现为桨尖以闭合环状形式相连，形成端板式布局。建模过程中需定义的核心参数包括弦长沿展向的分布、扭转角随半径的变化、环的宽度与高度，以及环与桨叶尖端的衔接方式。环宽直接影响端板效应对桨尖涡的抑制程度，宽度的增加有助于阻隔涡量穿越，但同时会带来附加摩擦阻力。环的高度则制约尖部气流的流通能力，若高度偏小，环内外压差难以平衡，可能诱发额外的流动损耗。扭转角分布需依据巡航工况予以匹配，采用较大直径配合较低桨盘载荷的策略，有利于延缓低雷诺数下的失速现象。网格离散时，环－叶连接区域须进行局部加密，以捕捉可能出现的二次流与局部分离。几何模型的质量对后续流动解算的可靠性具有决定性作用。

（三）流场－声场耦合预测

流场分析基于雷诺平均 Navier-Stokes 方程进行求解，湍流模化选用 Transition SST 模型，该组合在捕捉低雷诺数层流分离及转捩方面具备较好适用性。旋转域与静止域间的数据传递借助滑移网格技术实现，时间推进采用双时间步法以平衡计算效率与时间精度。近场非定常压力脉动求解完成后，将其作为声学输入，借助 FW-H 方程的积分形式将声源信息由近场推至远场。积分面应包络全部主要声源区域，并适当向外延伸以减小四极子声源截断带来的误差。需注意，低雷诺数条件下湍流特征尺度与声波波长存在较大量级差异，网格设计既要反映涡结构的演化，也需满足声学频带解析的需求。该耦合方案在保证可接受计算量的前提下，能够较完整地保留噪声产生及向外传播的物理图景。

二、气动与声学特性

（一）环形尖端涡系演化规律

桨尖涡由桨叶上下表面之间的压差驱动产生，低雷诺数条件下该涡系的卷取结构相对松散。环形构型凭借桨尖的闭合连接对端部流动施加约束，改变了常规开放式桨尖的涡量输运路径。环的存在使桨尖涡被限制于环内通道，涡核旋转强度在形成初期即受到环壁剪切作用的耗散，涡系空间位置随之向环的内侧偏移[3]。涡系向下游输送过程中，与主流之间的掺混程度较常规构型有所减弱，涡核轴向速度亏损相应减小。环宽和环高对涡核的演变路径起到调控作用，宽度较大的构型有助于延长涡核保持完整结构的行程，从而推迟涡系的破碎进程。但环的高度若超出合理范围，环内可能派生二次涡结构，反而加剧近尾迹区的流动杂乱程度。系统认识涡系从卷取、输运到消散的完整演变序列，是理解环形构型支配桨尖流动机制的关键环节。

（二）近场主导声源辨识

环形螺旋桨的辐射噪声包含旋转噪声与宽频噪声两类成分，两者在近场压力脉动中均有体现。旋转噪声表现为叶片通过频率及其倍频处的离散尖峰，来源于桨叶表面周期性载荷变化与厚度排挤效应。宽频噪声覆盖较宽的频带范围，主要与桨叶表面湍流脉动、桨尖涡的非定常演化以及尾迹中涡结构的相互作用有关。环形构型对两类声源的相对占比进行了重新分配——环的约束作用降低了桨尖涡的卷取强度，使涡致宽频噪声得到一定抑制，但环壁诱导的不稳定流动可能在中高频段引入附加声源。辨识主导声源需借助时频分析手段，将近场监测点采集的压力信号转换至频域，对比不同频带内的能量分布状况。低雷诺数条件下，层流分离泡的周期性振荡同样构成一类声源，其频率特性与分离泡的振荡模态存在对应关系。

（三）远场频谱与指向特征

远场噪声频谱保留了近场声源的频域信息，但经传播路径上的几何衰减与大气吸收后，各频段呈现出差异化的衰减速率。叶片通过频率处的离散峰值通常主导低频段，其幅值随进距比减小而上升，反映重载状态下桨叶载荷波动的加剧。宽频分量在中高频段占据主要地位，谱线较为连续，未呈现显著的尖峰结构。声场指向性方面，环形螺旋桨的噪声辐射在桨盘平面内较强，沿旋转轴方向有所减弱，这一分布形态与声源在桨盘上的空间排布直接相关。环的引入使桨尖区域声源的空间相干性降低，进而改变了高频噪声的辐射角度——部分高频成分的指向性主瓣发生偏移，侧向辐射相应增强。进距比的变化对频谱形态和指向性均产生影响，低进距比时离散成分更为突出且轴向指向性较强，高进距比时宽频成分所占比例上升，指向性趋于各向均匀。上述特征为后续降噪方案的制定提供了物理依据[4]。

三、抑制策略与设计

（一）几何参数降噪灵敏度

环形螺旋桨的几何尺寸对桨尖区域的流动状态具有决定性影响，进而决定了噪声的辐射水平。降噪灵敏度分析的出发点，在于识别哪些参数的适度调整能够换取明显的声压级下降。环宽与环高是两个需优先考察的参数。环宽加大时，桨尖涡的卷取空间受到压缩，涡核转速下降，由涡致产生的噪声随之减弱。

但这种关系并非单调递减——环宽若超出某一范围，环内流动受阻，环壁边界层可能发生分离，反而引入新的中高频声源。环高的作用呈现另一番情形：高度适当增加有助于环内外压力趋于平衡，减小桨尖附近的横向流动；但超过某一阈值后，环内侧壁面可能出现回流，使得近尾迹区的速度脉动幅度上升。弦长与扭转角同样对噪声水平发挥作用。弦长增加可使载荷沿弦向分布更加均匀，对叶片通过频率处的离散噪声起到抑制作用。

扭转角的调整改变了各半径截面所对应的有效攻角，合理的扭转设计能使桨叶表面压力分布趋于缓和，对宽频和离散两类噪声均有正向效果。各参数之间的耦合效应不容忽视，单一变量优化难以达到全局最优，通常需要借助参数扫描或正交试验，系统评估各因素的独立贡献及其交互作用。

（二）效率约束下工况优选

推进效率与噪声辐射之间存在一定程度的此消彼长，工况优选的任务正是在这一矛盾区间内寻找平衡点。进距比综合反映了来流速度与桨尖速度的相对关系，对效率和噪声均有明显影响。进距比较低时，桨叶承载较重，桨尖涡强度增大，涡致噪声上升；同时层流分离泡向桨叶前缘靠拢，其非定常脉动也成为额外

 | Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

的噪声来源。不过，较低的进距比区间通常对应较高的推力输出，效率曲线在某一进距比值附近达到顶点。

当进距比提升至效率峰值区域后，桨叶迎角减小，分离泡尺寸收缩，流动附着状态改善，噪声水平显著下降。若继续提高进距比，推力将急剧衰减，虽然噪声进一步降低，但螺旋桨已无法满足推力需求，实际上进入了失速区间。因此，能够兼顾推力要求与噪声限制的进距比范围，通常位于效率峰值点之后、失速点之前的一段区域内。转速的变化影响桨尖线速度，进而改变叶片通过频率及其谐波的位置。

适当降低转速可使离散噪声向低频移动，而低频声波在大气中传播时衰减较慢，需结合适航标准中定义的感知噪声加权曲线，综合判断降噪收益的实际意义。工况优选需引入多目标优化框架，以推力和声压级作为两个目标函数，绘制 Pareto 前沿，为设计者提供工况取舍的依据。

（三）桨尖修形与设计准则

在环形螺旋桨的桨尖或环壁上实施局部几何修形，是调整尖端流场状态、实现噪声削减的有效技术路径。常见的修形方式包括锯齿边缘、波浪前缘以及后掠结构。锯齿边缘的作用机理在于将连续的桨尖涡分解为尺度较小、相位各异的子涡，各子涡辐射的声波在远场形成相位干涉，从而削弱宽频噪声的相干叠加。

锯齿的几何特征——齿高、齿宽与齿数——决定了分解效果与干涉效率。齿高过小时难以产生有效干扰，齿高过大则可能诱发新的涡脱落声源。波浪前缘修形的工作方式与锯齿有所区别，它通过沿展向改变桨叶前缘的几何形状，使转捩位置沿展向错开，避免了大面积同步转捩所导致的强压力脉动。后掠结构则侧重于改变桨尖区域的气流入射角，使涡核生成位置后移，涡核与壁面之间的相互作用时间缩短，由此降低涡与壁面耦合产生的噪声。

综合上述修形手段及参数敏感性的分析结果，可初步凝练低雷诺数环形螺旋桨的低噪声设计准则：优先保证环宽与环高处于合理匹配区间，防止环内流动阻塞；扭转角分布应使各截面的攻角尽量接近各自的最佳升阻比状态；桨尖修形可选用锯齿或波浪前缘，具体尺寸需依据主导声源的频率特征来确定。该准则尚需通过多轮迭代验证才能逐步完善。

（四）多孔材料与声衬应用

在环形螺旋桨的环壁内侧或桨叶表面局部区域敷设多孔材料或声衬结构，可作为降低中高频宽频噪声的辅助手段。多孔材料的降噪机制源于其内部连通微孔对近壁面压力脉动的粘性耗散——湍流边界层掠过材料表面时，部分脉动动能渗入材料内部，经孔隙壁面的摩擦和热交换转化为热能，从而使壁面辐射声源的强度得到衰减。

声衬则依托亥姆霍兹共振原理，由面板穿孔与背后空腔构成，在特定频率附近的声波激励下，孔颈处的空气柱产生共振，声能经摩擦转化为耗散，实现对窄带噪声的吸收。环形螺旋桨的环壁内侧具备敷设声衬的空间条件，该区域远离桨叶主承力结构，对强度的影响较小。但需关注以下问题：多孔材料的表面粗糙度通常高于金属壁面，可能使边界层提前转捩。转捩虽然可能消除层流分离泡及其相关噪声，但湍流边界层会增强壁面高频脉动，带来新的噪声贡献。

敷设位置的选择同样关键——若将多孔材料布置于桨叶前缘附近，对边界层发展路径的干扰最大，降噪效果最明显但气动代价也最高；若仅敷设于环壁后段，流动已充分发展，干扰较小但降噪幅度有限。声衬的共振频率需与主导噪声频段相匹配，若离散成分为主要声源，声衬具有较好的适用性；若宽频噪声占主导，共振吸收的效果相对有限，此时多孔材料更为合适。从工程角度看，两种手段也可组合使用，以覆盖更宽的频带。该方案目前仍处于探索阶段，实际收益需结合具体构型加以验证。

四、结束语

结果揭示，环宽与环高对涡核的演变路径具有调节功能，环内形成的二次流动构成涡致宽频噪声的主要来源之一。环形结构削弱了桨尖涡的强度，但环壁附近的非定常流动有可能在中高频段增添额外声源。远场噪声在频谱上表现为离散分量与宽频连续谱叠加的形态，声场在桨盘平面内的辐射较强。参数敏感度分析划定了环宽与环高的可行区间，锯齿形桨尖修形对于宽频噪声的抑制作用较为显著，多孔材料与主动控制方案则展示了后续改进的空间。

参考文献

[1] 毛鑫培，刘鹏，柳江，等 . 仿生锯齿结构对环形螺旋桨水动力噪声特性影响规律研究 [J]. 水下无人系统学报 ,2026,34(02):209-223.

[2] 李冬琴，黄堂苡，张化英，等 . 环形助推式节能附体水动力性能分析 [J]. 海军工程大学学报 ,2025,37(02):17-25.

[3] 黄万能，艾万政 . 五叶环形螺旋桨水动力性能预报及优化 [J]. 舰船科学技术 ,2026,48(09):41-45.

[4] 王倩倩，辛公正，周伟新，等 . 环形螺旋桨负荷与流动特征分析 [J]. 中国舰船研究 ,2025,20(06):190-198.

Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

大规模复杂军工项目管理流程优化措施

张小龙
中国电子科技集团公司第十研究所，四川 成都 610036
DOI:10.61369/ERA.2026100011

摘　　要： 大规模复杂军工项目具有规模大、技术复杂、参与单位多、实施周期长及保密要求高等显著特点，对项目管理流程的科学性和协同性提出了更高要求。当前，军工项目管理中仍存在流程不够清晰、沟通协调效率偏低、进度控制不够精准以及信息化管理水平不足等问题，影响了项目整体推进效果。基于此，本文在分析大规模复杂军工项目管理主要特点的基础上，针对现有流程中的突出问题，提出完善项目组织管理机制、强化沟通协调流程、优化进度管理方式、推进信息化管理平台建设等具体措施，以提升项目管理的规范化、精细化和协同化水平，为军工项目高质量实施提供参考。

关 键 词： 大规模；复杂军工；项目管理流程

Measures to Optimize the Management Process of Large-Scale and Complex Military Projects

Zhang Xiaolong
No. 10 Research Institute, China Electronics Technology Group Corporation, Chengdu, Sichuan 610036

Abstract: large scale and complex military projects are characterized by large scale, complex technology, many participating units, long implementation cycle and high confidentiality requirements, which puts forward higher requirements for the scientificity and coordination of project management process. At present, there are still some problems in military project management, such as unclear process, low communication and coordination efficiency, imprecise schedule control and insufficient information management level, which affect the overall promotion effect of the project. Based on this, this paper analyzes the main characteristics of large-scale and complex military project management, and proposes specific measures to improve the project organization and management mechanism, strengthen the communication and coordination process, optimize the schedule management mode, and promote the construction of information management platform, aiming at the prominent problems in the existing process, so as to improve the standardization, refinement and coordination level of project management, and provide reference for the high-quality implementation of military projects.

Keywords: large scale; complex military industry; project management process

引言

随着我国国防科技实力不断增强，大规模复杂军工项目在武器装备研制和国防建设中所起作用越来越大。该类项目一般技术含量高、涉及单位众多、周期跨度大，且有很强安全保密性，因此对项目管理提出更高要求。而传统管理模式在组织协调能力、进度管理和信息交流上，已经无法满足当前大型复杂的军工项目建设的需求，流程上不够明确、协作效果不佳、信息化支持欠缺等现象越来越严重。为此需要针对大规模复杂军工项目实际情况，对其管理模式进行研究和完善，以提升项目的运行效率及整个企业管理水平，从而促进军工项目建设发展。

一、大规模复杂军功项目管理主要特点分析

大规模复杂军工项目管理具有显著综合性、系统性和特殊性。一般而言，该类项目投资额大、建设期长、工艺链繁杂，包括立项论证、研究开发、工程研制、设计定型、生产加工等过程，参与单位和部门众多，在工作安排上存在较大难度。同时，军工项目综合性强，融合多个领域、多个专业以及多个系统技术，因此在组织协调与任务衔接方面具有较高的要求，而任何一方面失误都会对整个项目带来不利影响。相比于一般工程项目，军工项目有较强目的性和较高质量和可靠性要求，其结果直接影响到武器装备能力水平、作战需求和国家安全，因此对其全过程的科学性、严密性和可控性要求非常高。另外，军工项目一般都

作者简介：张小龙（1988.10—），男，土家族，重庆酉阳，硕士研究生，工程师，项目管理。

 Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

有很强保密性和规划性，信息交流、资源调配和外部合作都受到一定控制，这也导致在一定程度上加大管理工作难度。总体来看，大规模复杂军工项目管理不仅仅是一个简单的点对点管理，而是一个牵涉多方、多步骤、多层次的系统工程[1]。

二、当前军工项目管理流程存在主要问题

（一）管理流程不够清晰

管理流程不够清晰主要体现在项目各阶段、各环节间缺少统一明确的衔接机制。军工项目从立项到论证、方案确定、技术研发、测试试制、制造交付需要经历多个过程，且涉及到众多部门以及合作方，若流程界定不明朗，很容易产生职能重叠、任务重叠或者管理真空的情况[2]。部分项目的审批、沟通、反馈以及变更等工作当中存在流程不清楚、节点职责不明、要求不同等情况，使得相关人员在操作时不能准确把握工作的先后次序及各自责任分工，在多方配合情况下，流程不明确还容易导致信息无法及时传达以及工作进展缓慢，降低工作效率并加大管理难度[3]。

（二）沟通协调效率较低

大规模复杂军工项目一般包括总体单位、分系统单位、配套单位及管理单位等众多单位参与，层次繁多、专业面宽、信息传递路径长，易出现信息传递滞后、失真或误传等问题。各部门通常根据各自职责开展工作，忽视信息交流与合作，造成设计、生产和试验等工作脱节。此外，在项目执行期间容易出现不少技术问题、进度问题以及资源配置问题，若未得到及时反馈，则不利于做出正确决策并迅速解决。另外一些项目中还存在大量开会讨论但实质上协调不足情况，问题在各个单位间来回传递，难以快速达成一致意见，进而降低整个项目进展速度[4]。

（三）进度管理不够精准

由于项目周期较长，环节较多，各方参与主体较复杂，在编制进度计划时很难做到面面俱到，因此计划与实际情况会有出入。一些重要时间节点未进行具体化拆分，进度信息未能及时反馈，上级主管部门无法了解项目实时开展情况；而在项目实施中受到技术研发、实验测试、物资保障、手续办理等多种原因影响，导致局部延误可能会逐渐蔓延扩大，影响整个工程进度。若不能有效监控进度变化而做出正确分析，则会造成进度偏差大、资源分配不合理、阶段性目标与最终目标相悖等现象，不利于项目管理以及执行效率提高[5]。

（四）信息化管理水平不足

目前大规模复杂军工项目信息化管理工作仍存在诸多不足之处，突出表现在项目管理数据分布在各个部门、各个业务系统以及各层级之间，不能有效串联成一条完整信息链，造成信息获取滞后、数据口径不一、管理依据不足等问题。另一方面，一些项目还大量采用手工填报、线下提交以及凭借个人经验进行决策方式，信息流转速度慢，容易造成滞后、漏报甚至误判的情况发生。由于未做到对项目进度、质量、资源配置及风险等方面的有效汇总分析，领导层无法准确、及时地了解项目情况，不利于各部门之间配合与全程监督，从而影响军工项目的管理水平、公开度和科学性[6]。

三、大规模复杂军工项目管理流程的具体优化措施

（一）完善项目组织管理机制

从项目启动阶段其，需要成立统一领导体制，按照功能模块实施任务分工，正式下发两师任命，明确项目总负责人、专业负责人、职能管理人员以及配合人员具体职责，形成文字化工作职责及工作范围，防止出现职责不清产生相互推诿现象。项目管理办公室要固定负责计划编制、过程监控、节点检查、问题汇总、会议组织以及文件归档等工作，各部门根据各自分工进入统一程序，不得擅自改变申报途径。对于设计、采购、生产和试验等重要环节，需事先编制对接表，规定输入内容、输出结果、时限要求、审核人、接收人，所有传递事项均要登记入册[7]。

针对成本管理、进度管理、质量管理等主要管理活动实行分层分级管理制度，主要分为常规性沟通事宜、重要技术问题以及重点节点问题，不同问题要求有着相应上报方式、审批权限与时限。而对跨部门工作须有共同处理办法，以牵头部门提出，各相关方同时签收、同时答复方式进行，整个过程要有痕迹可查。最后定期开项目例会，议题主要是汇报近期工作进展、未解决的问题、资源配置情况以及下一步打算，并形成会议纪要并落实到个人。此外人员变动、计划调整或者产品状态发生改变时要及时更新工作职责、任务分工以及流程，保证人员配备、工作内容和管理规定保持一致[8]。

（二）强化沟通协调流程优化

该优化措施应从项目运行链条实际衔接处着手，主要针对信息不畅、责任不明、推诿扯皮等问题。项目开展同时，应建立起一套完整沟通机制，确定每个参与方、辅助单位以及每个岗位负责信息对接人员，对于所有指令传达、技术更改、进度报告、问题反馈以及审批意见均通过该固定途径进行，避免出现多头传递和口头通知。而在日常工作中要将例会、专题会和临时会议召开的原因、频率、出席人员、记录格式、完成时间等统一规定，而不能仅仅是汇报工作进展，此外还要检查每一件事情责任单位、责任人及其完成的时间节点，在会议结束后形成问题清单和督办单，由专人负责催办落实。对于跨部门事情，则需要有清晰工作流程，即前面一个步骤提交内容需达到一定标准后，后面步骤接到后要在规定时间内回复审核意见，退回重修时要注明原因及要求，避免来回磨合。

此外对于现场发现的问题、试验过程中要将发现问题以及外部协作配合中问题，都要统一纳入闭合回路管理系统中，即有记录编号、分类分级、限定时间、过程及结果，不允许只指出问题而不留痕迹，也不允许处理过后无人去复查。对于长时间得不到解决问题，要由项目负责人亲自牵头集中处理，当面给出结论、责任和完成期限，并将结果记入后续的评价之中。

（三）实现进度管理流程优化

首先要将项目总目标层层细化到研制过程中各个阶段、各个子系统、各个工作包以及每一个人身上，制定出可以实施任务

Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

链，并且要对每一个任务具体起始时间、结束时间、前置条件、成果要求、验收标准做出明确规定，而不只是停留在整体上。项目开展后要有一套以周调度、月检查、节点回顾为主要内容的过程监控措施，在统一表格内随时更新各种任务进展情况，将已经完成任务、正在进行任务和被延误或遇到问题的任务分别用不同颜色或者符号标出，使实际情况与计划一致。

而对于在关键路线上一些任务还要有专门追踪表单，由项目经理每天检查设计输入是否到位、试验前准备工作是否做好、原材料是否齐全、外部协作单位工作进展如何、相关的文件材料是否已经提交，一旦发现问题就马上采取补救措施，重新梳理各步骤之间的逻辑关系，减少不必要等待时间。进度上滞后不应该仅仅是在催促，更应找出导致这种现象原因，是否因为技术发生改变、投入不够充分、接口信息滞后或者是流程审批不畅造成，然后根据这些情况进行重新分配任务、改变工作顺序以及调整时间计划。另外还需要将风险预警融入日常工作中，在距离节点较近还没有完成任务、经常性推迟任务、依赖其他任务不能结束情况下设置报警提示，及时记录、汇报、解决、反馈[9]。

（四）推进信息化管理平台建设

推进信息化管理平台建设，需先统一项目基础数据口径，在任务分工、节点计划、技术状态、质量管理、问题解决、文件审核等方面，制定统一编码及台账格式，保证各部分数据录入统一。平台功能要符合项目实际需求，将计划下发、任务流转、审批签字、进度汇报、节点确认、问题解决等工作全部纳入进行线上管理，避免线下反复传递的情况出现[10]。对于进度管理，要分人分岗落实责任人以及时间要求，所有任务进入系统后会自动生成完成期限，超期会有提示，修改需要有痕迹并且经过审批。对于沟通协作，在平台上要有专题会议、意见上传下达、问题指派和回复功能，而所有交流都要有记录并保存，以保证责任可追溯。对于文档资料，要实行分级管理制度，对于图纸、方案、试验记录、变更等进行分类保存、版本管理和关联审批，避免使用错误或者丢失。同时在平台使用过程中还需要建立健全的数据审查制度、权限审批制度和日常维护制度，指定专人负责主要数据、流程设定变更、异常数据核查和人员培训工作，使平台真正融入到工程管理工作中。

四、结束语

综上所述，由于大型复杂军工项目具有系统复杂、参与单位多、时间跨度大、风险级别高等明显特征，因此项目管理水平直接影响到项目质量以及任务完成效果。因此要对组织结构进行优化、对工作程序进行简化、对进度进行跟踪、对信息化系统进行建设等进行改进，在此基础上形成标准化、一体化、精细化工作程序，有利于提高军工项目的管理水平及执行力，从而保证项目的顺利推进以及军工产业健康快速发展。

参考文献

[1] 周明 . 以党建推动大规模复杂军工项目管理流程优化与实践的深度探究 [J]. 中国军转民 ,2025(11):20-21.

[2] 冯阳昊 . 大规模复杂军工项目管理流程优化和实践 [J]. 中国军转民 ,2025(6):27-28.

[3] 罗云 . 公司项目管理流程优化措施 [J]. 大众文摘 ,2022(48):130-132.

[4] 魏昱昕 . 工程项目管理中的造价优化与风险控制 [J]. 中国科技期刊数据库工业 A,2025(1):093-096.

[5] 李星星 , 裴丽娜 , 华钰 . 数字化转型下基于敏捷方法的复杂军工科研项目管理实践研究 [J]. 中国军转民 ,2025,(19):21-23.

[6] 史丹 . 军工科研项目管理的创新策略研究 [J]. 中国军转民 ,2025,(12):29-30.

[7] 方红莺 , 王君艳 . 军工科研项目管理体系审核要点研究 [J]. 中国设备工程 ,2025,(1):17-19.

[8] 邓辉 . 基于 AVPLAN 系统的军工固定资产投资项目管理策略 [J]. 审计与理财 ,2022,(6):60-61.

[9] 杨帆 , 许力琨 , 胡玉莹 . 论军工科研项目管理提升的方向及途径 [J]. 中国军转民 ,2022,(8):46-47.

[10] 李勇 . 军民融合视域下军工企业与民营企业间项目管理的经验互鉴 [J]. 现代商贸工业 ,2021,42(9):47-48.

 | Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

百千万工程背景下全民健身中心建设中的投资控制与管理浅析

许楚娟
广东省建筑设计研究院集团股份有限公司，广东 广州 510010
DOI:10.61369/ERA.2026100013

摘　　要： 百千万工程持续推进城乡公共服务均等化发展，为基层全民健身中心规范化建设、系统化运营提供了重要政策支撑。全民健身中心作为基层公共体育服务的核心载体，其建设阶段的投资管控与造价治理水平，直接关系财政民生资金的使用效能与公共体育资源的配置质量。本文立足全过程造价管理核心逻辑，结合百千万工程基层建设发展要求，从项目前期概算管控、施工动态监管、后期结算运维三个全周期维度，梳理适配基层全民健身中心的投资控制与管理实施路径，旨在完善基层体育基建项目的造价管控体系，助力公共体育资源高效落地。

关 键 词： 百千万工程；全民健身中心；投资控制；全过程造价管理

Brief Analysis on Investment Control and Management in the Construction of National Fitness Centers Under the Background of Hundred-Thousand-Ten-Thousand Project

Xu Chujuan
Guangdong Architectural Design & Research Institute Group Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510010

Abstract: The Hundred–Thousand–Ten–Thousand Project continuously promotes the equalization of urban–rural public services and provides important policy support for the standardized construction and systematic operation of grassroots national fitness centers. As the core carrier of grassroots public sports services, the level of investment control and cost management during the construction phase of national fitness centers is directly related to the utilization efficiency of fiscal people–wellbeing funds and the allocation quality of public sports resources. Based on the core logic of whole–process cost management and combined with the development requirements for grassroots construction under the Hundred–Thousand–Ten–Thousand Project, this paper sorts out the implementation paths of investment control and management suitable for grassroots national fitness centers from three full–cycle dimensions: preliminary budget estimate control, dynamic construction supervision, and post–construction settlement and operation–maintenance. It aims to improve the cost control system for grassroots sports infrastructure projects and facilitate the efficient implementation of public sports resources.

Keywords: hundred–thousand–ten–thousand project; national fitness center; investment control; whole–process cost management

引言

城乡公共服务提质增效是百千万工程落地实施的核心发展任务，也是县域基层民生建设的重点发力方向。《中共广东省委关于实施“百县千镇万村高质量发展工程”促进城乡区域协调发展的决定》中指出“全面加强农村精神文明建设，大力弘扬和践行社会主义核心价值观，加强新时代文明实践中心（所、站）等公共文化阵地建设，充分发挥村规民约、居民公约、生活礼俗的作用，推动农村移风易俗，培育向上向善、刚健朴实的文化气质[1]。”广东实施“百县千镇万村高质量发展工程”（以下简称“百千万工程”），着力破解城乡区域发展不平衡不充分难题，以县镇村高质量发展更好支撑全域高质量发展[2]。公共体育基础设施作为基层公共服务体系的关键组成部分，其建设完善程度直接影响群众体育健身权益的落地质量与城乡民生均衡发展水平。全过程造价管理作为公共基建项目资金管控的核心手段，能够贯穿项目建设全流程，实现资金配置与工程建设、公共服务需求的深度契合。本文结合百千万工程建设背景与基层全民健身中心建设特性，探究科学化、系统化的项目投资控制与管理路径，助力基层公共体育基建高质量发展。

Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

一、百千万工程背景下全民健身中心建设中的投资控制与管理价值

百千万工程不是一项简单的帮扶政策，而是一次事关广东发展全局的战略重塑，旨在通过壮大县域经济、强化乡镇节点、振兴现代乡村，打通城乡区域协调发展的“任督二脉”，探索一条中国式现代化的广东路径[3]。其一，系统化的投资控制与全过程造价管理工作，能精准锚定百千万工程的政策内核，将宏观政策发展要求转化为全民健身中心项目建设的具象实施标准，打通政策落地与项目建设的衔接壁垒。基层全民健身中心的建设布局、功能定位、服务半径均通过契合县域城乡统筹发展格局，依托全过程造价管理模式，项目建设各方可以在决策阶段针对区域常住人口规模、群众体育消费需求、基层公共体育资源缺口、项目长效运营需求开展全方位研判，将公共服务提质要求转化为量化的投资管控指标。在项目设计阶段，将核定的投资额度精准分解至场馆主体结构、专业运动设施、公共便民配套、绿化管网附属工程等各个建设模块，让资金投放规模与项目功能建设需求高度契合。

其二，常态化的全过程造价管理实施模式，能持续优化全民健身中心建设资金的配置结构，提升财政公共投资的使用绩效，凸显公共民生项目的经济适配价值。全民健身中心建设属于综合性基建工程，其资金支出覆盖土建施工、设备安装、专业体育器材采购、配套设施建设等多个板块，资金流向繁杂且管控节点较多。全过程造价管理可以依托投资估算、设计概算、招标限价编制、合同价款核定、工程进度款支付、竣工结算审核的全流程管控体系，对项目资金使用开展动态化、全周期的监管工作[4]。相关管控通过将项目整体投资额度逐层拆解至各施工分项与建设工序，依托实时的工程计量与价款核算工作，避免资金闲置、超额投入、重复建设等问题。

二、全民健身中心建设中的投资控制与管理存在的问题

（一）前期失范：决策论证较为表面

基层全民健身中心项目推进过程中，部分建设主体更为重视工程落地进度与硬件建设成效，对全过程造价管理的前期前置赋能作用认知度较低，使项目前期投资决策论证工作存在小幅表层化特征。项目前期论证工作较多聚焦建设立项的合规性、场馆基础建设规模以及基础健身服务功能等基础维度，针对服务辐射人口体量、场地日常使用频次、项目长期运营成本、区域体育资源布局现状等和投资造价深度关联的核心要素，开展的调研与分析工作相对较少。项目建议书、可行性研究报告与初期投资估算三类核心文件的联动衔接性偏弱，部分场地功能分区、专项健身设施配置、配套附属工程的建设需求未完成细化梳理。该建设模式让初期投资估算仅可实现整体资金额度的基础把控，较少对各分项工程、专项设施建设的资金支出划定清晰边界[5]。

（二）过程失控：施工管理相对粗放

项目前期投资论证不充分、造价管控边界模糊的问题，会顺势传导至工程施工阶段，使全民健身中心建设的全过程造价动态管控工作出现小幅松动，整体施工造价管理模式存在粗放化倾向。全民健身中心属于多专业融合的综合性公共基建项目，土建施工、机电安装、专项体育器材布设、景观配套等多个施工板块交叉衔接，施工流程具备对应的复杂性，现场设计变更、工程签证、建材替换、设备参数调整等各类动态调整事项相对较多。部分基层项目施工管理工作的核心重心集中在施工进度推进、现场施工安全管控层面，针对各类工程变更对应的造价变动开展的研判与审核工作相对滞后，投资控制工作与现场施工管理工作的联动融合度偏低。

（三）后期失管：结算决算较为滞后

工程实体施工完成后，全民健身中心建设投资管控工作的核心重心转向工程价款核定、建设成本归集以及决算归档等后期工作，部分基层项目存在后期造价管理工作滞后、资料管控不规范的问题，对全过程造价管理闭环的完整性造成小幅影响。项目施工周期内产生的设计变更文件、现场签证记录、建材价格核定单据、阶段性工程计量报表等造价资料较为分散，部分建设单位与施工单位未落实常态化的资料归档工作，较多选择在工程竣工后集中整理归集资料，使得工程施工事实、审批流程依据与价款调整内容的匹配度不足。结算审核环节需要反复核对施工工程量、合同约束条款、现场原始记录等多项资料，拉长结算审核的整体周期。

三、百千万工程背景下全民健身中心建设中的投资控制与管理路径

（一）前期严控，筑牢概算管理防线

政府通过将每一个方案当中的具体效果图、数据、投资金额、具体方案等信息进行综合分析与比较，从而辅助决策方案的挑选[6]。政府可依托百千万工程基层公共服务提质的核心要求，立足全民健身中心公共服务属性开展系统的前期投资控制工作，把基层群众常态化健身需求转化为清晰的建设指标以及资金配置标准，借此划定科学合理的项目建设规模与概算管控边界。项目前期投资论证工作需要突破单一建筑面积核定的粗放模式，对篮球、羽毛球、乒乓球以及综合健身等主流运动板块的功能空间进行细化梳理，明确各区域场地规格、使用属性以及设施配置标准，同步统筹公共更衣、储物管理、通行配套等共享空间的布局逻辑，依靠空间资源集约化配置降低无效建设带来的资金损耗。政府可结合区域群众健身使用频次的差异开展差异化投资规划，对使用率相对偏高的基础健身场地落实稳定的资金配置方案，保障基层公共体育服务的普惠属性。对造价投入较高、日常使用率相对有限的专业化运动场地，可依托县域人口规模、区域体育资源存量以及项目后续运营条件开展综合研判，让建设体量与功能配置贴合地方实际需求。

政府可把限额设计机制精准落地至全民健身中心各类功能空间与专业工程体系，依靠精细化设计管控压缩无效造价空间，稳固前期概算的刚性约束效力[7]。体育场馆具备较强的专业建设特性，结构跨度、场馆净高、照明标准、通风空调、声学环境以及专业运动地面等参数，均会对工程整体造价形成直接影响，是保障场馆使用功能的核心条件。政府可将审批完成的项目概算额度逐层分解至各运动场馆与配套功能区域，把土建施工、装饰装修、设备安装以及体育专项设施建设全部纳入常态化造价校核范围，针对不同运动场地的工艺差异开展经济性比对。篮球馆大跨

 | Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

度结构、专业木地板、赛事照明系统，羽毛球馆防眩光设计、场地防潮工艺等核心建设内容，均可以在契合建筑安全规范与体育使用标准的前提下择优选用性价比更优的建设方案。设计阶段同步明确各类体育器材的技术参数与配置规格，提前锁定专项设施投资额度，减少施工阶段随意变更器材档次、追加设备投资的情况。施工图编制完成后，政府可组织技术与造价人员开展逐项校核工作，将各功能空间的工程量、设备数量、材料标准与初始概算逐一匹配，构建闭环、规范、可控的前期概算管理体系。

（二）过程精控，强化全程动态监管

政府可结合全民健身中心多专业交叉施工的建设特性，开展常态化动态投资控制工作，依托全过程造价管理破解施工阶段界面复杂、造价波动频繁的管控难题[8]。全民健身中心建设区别于普通公共建筑工程，土建主体施工、体育专项设施安装、机电系统布设等工序存在深度交叉的关联特性，各项施工内容的接口衔接较为紧密，任意环节的工艺调整与施工变更都会引发工程量变动，进而影响项目整体投资规模。篮球架基础预埋施工需要与土建结构施工同步衔接，运动木地板铺装质量依托基层找平、防潮处理以及机电预埋的施工成效，场馆照明布局需要适配屋架结构与运动项目的防眩光要求。政府可把全部施工接口与交叉工序纳入动态造价管控范畴，精准划分体育专项工程与主体土建工程的施工界面、合同权责以及计价范围，让各施工板块的工程量核算、价款归属、责任划分保持清晰对应，从源头减少交叉施工引发的计价争议。

政府可重点围绕体育专项工程、专业建材设备以及工程变更事项开展精细化造价管控，实现施工全过程投资动态制衡[9]。全民健身中心专项工程对设备材料的专业度要求较高，运动地面材质、照明灯具规格、健身器材型号、空调设备参数以及配套服务设施的小幅调整，均会造成造价波动，是施工阶段投资变化的主要诱因。政府可建立多方协同的变更审核机制，组织施工、设计、监理以及造价咨询主体，在变更落地前同步核验技术可行性与造价影响范围，甄别调整内容是否贴合场馆实际使用功能，杜绝非必要变更带来的资金消耗。针对场地尺寸微调、看台布局优化、器材点位改动、机电接口适配等常规施工调整，同步完成图纸更新、工程量核验与价款记录工作，留存完整的造价管控资料，规避竣工阶段费用追溯不清的问题。体育器材采购可与施工进度统筹衔接，提前明确设备参数、安装条件、供货范围以及配套费用，清晰划分设备采购成本与现场安装成本的边界。

（三）后期实控，健全结算运营机制

政府可依托全民健身中心各功能板块的建设完成情况，开展精细化竣工结算审核工作，把项目最终投资精准归集至具体场馆空间与专项设施设备[10]。不同功能区域的施工内容、工艺标准与计价方式存在小幅差异，篮球馆、羽毛球馆、综合健身区以及配套服务空间的土建、装饰、安装与专项设施采购工程量各不相同，结算审核可按照功能分区开展分项核验，逐一核对主体结构、内外装饰、机电安装以及体育专项设备的全部工程量数据。针对运动木地板、专业赛事灯具、成套健身器材、中央空调等高价专项设施，可依托招投标清单、进场验收资料、安装施工记录与试运行资料核验结算价款，保障专项设备计价真实合规。施工阶段形成的设计变更、现场签证、材料认价等资料，可按照功能板块分类归集，让每一笔价款调整均对应具体的建设内容与功能优化需求。

政府可将竣工决算管控体系延伸至资产管理与日常运营环节，构建建设与运维一体化的全周期投资管控机制。全民健身中心投入运营后，各功能区域会产生持续性的能耗与维保支出，建设阶段的投资决策与设施配置标准，会长期影响场馆后期运营成本负担。政府可依托完整的竣工决算资料，对建筑主体、体育器材、机电设备、运动地面以及公共配套开展精细化资产登记工作，把财政投资转化为可识别、可核算、可管护的固定资产单元。针对运动木地板、专业照明、智能健身器械、中央空调等需要周期性维保的设施，可结合建设投资数据与运维台账建立动态成本记录，为后续设备检修、器材更新、场馆翻新提供精准成本依据。

四、结束语

综上所述，百千万工程的纵深推进，为基层公共体育基础设施迭代升级、公共服务体系优化完善提供了长效政策赋能，也让基层体育基建的投资治理成为城乡民生高质量发展的重要抓手。基层全民健身中心的投资管控规范化发展，不只是财政资金高效利用、基建项目合规建设的基础保障，更是盘活基层公共体育资源、夯实城乡均等化服务体系的核心支撑。未来，伴随基层基建治理体系的持续完善，全民健身中心投资控制与全过程造价管理体系将不断迭代优化，深度适配城乡融合发展格局，为县域基层公共体育事业长效发展、百千万工程民生建设目标全面落地注入持久动力。

参考文献

[1] 广东省人民政府 . 中共广东省委关于实施“百县千镇万村高质量发展工程”促进城乡区域协调发展的决定 [EB/OL].(2023-02-27)[2026-08-17].
https://www.gd.gov.cn/gdywdt/zwzt/bxqzwc/zxzc/content/post_4639219.html

[2] 郭志强 . 共富密码”百千万工程”绘就新图景 [J]. 中国经济周刊 ,2025,(21):26-28.

[3] 李坤曈 , 杨晨杰 . 高质量发展视角下广东“百千万工程”的实施路径、挑战与对策研究 [J]. 南方论刊 ,2026,(2):32-34+38.

[4] 杜鹏程 , 赵清泉 . 全过程工程咨询在大型体育基建项目中的价值创造与赋能路径研究——以四川省体育运动学校新校区建设项目为例 [J]. 中国工程咨询 ,2025,(7):44-48.

[5] 王旺红 . 政府投资项目全过程造价管理的不足与建议 [J]. 中国招标 ,2025,(10):122-124.

[6] 张虓烽 . 基于 BIM 的体育场馆建设投资控制研究 [J]. 理财 ,2022,(12):17-19.

[7] 王甜甜 , 王保松 , 李晓庆 . 大型体育场馆的造价控制——以深圳大运中心体育场等项目为例 [J]. 工程技术研究 ,2020,5(7):198-199.

[8] 杨杰 . 建筑工程造价全过程管控策略探究——以 J 市文化体育中心项目为例 [J]. 房地产世界 ,2024,(18):95-97.

[9] 戚惠峰 . 政府投资建设项目管理中全过程造价模式的应用 [J]. 中华建设 ,2021,(6):36-37.

[10] 张珍 . 政府投资项目全过程造价管理研究 [J]. 房地产世界 ,2024,(22):116-118.

Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

农村道路升级改造工程质量控制研究

霍健伟
珠海市斗门区农业农村局，广东 珠海 519100
DOI:10.61369/ERA.2026100016

摘　　要： 农村道路升级改造受限于原有条件，施工组织复杂，质量控制难度突出。以珠海市斗门区为研究对象，分析其软土广布、雨季漫长等地域特征对路基稳定与路面施工的影响。从施工前期准备、过程关键环节及质量通病防治三阶段，梳理旧路路基拼宽、新旧路面接合、排水防护及平整度控制等技术要点。强调因地制宜的工艺选择和全过程动态检验，旨在为同类工程提供质量控制参考。

关 键 词： 农村道路；升级改造；路基路面；质量控制

Research on Quality Control of Rural Road Upgrading and Reconstruction Project

Huo Jianwei
Bureau of Agriculture and Rural Affairs of Doumen District, Zhuhai, Zhuhai, Guangdong 519100

Abstract: Restricted by original conditions, rural road upgrading and reconstruction features complex construction organization and prominent difficulties in quality control. Taking Doumen District of Zhuhai City as the research object, this paper analyzes the influences of regional characteristics such as widely distributed soft soil and long rainy seasons on subgrade stability and pavement construction. From three stages including pre-construction preparation, key links in construction process and prevention and treatment of common quality defects, this paper sorts out technical key points such as old road subgrade widening, joint of old and new pavements, drainage protection and flatness control. It emphasizes process selection adapted to local conditions and whole-process dynamic inspection, aiming to provide quality control reference for similar projects.

Keywords: rural road; upgrading and reconstruction; subgrade and pavement; quality control

引言

农村道路升级改造，既改善交通条件，也支撑乡村振兴。与新建道路不同，改造工程受旧路基、周边环境和保通要求限制，质量管控难度更大。珠海市斗门区农村道路多建于20世纪90年代，结构强度不高。该区位于珠江三角洲河口，软土分布广，雨季时间长。地质与气候条件对路基稳定、路面施工带来明显影响。结合地域特点，梳理质量控制关键环节和常见病害防治办法，对延长道路使用寿命有现实意义。

一、农村道路升级改造工程质量控制概述

（一）农村道路升级改造的特点

农村道路升级改造工程与新建道路存在明显差异。其一，改造工程须在维持或利用原有道路基础的前提下进行，施工场地受限，新旧结构的协同工作问题突出。斗门区许多农村道路修建于二十世纪90年代，路面宽度多为3.5至5米，水泥混凝土面层厚度普遍不足18厘米，基层多为简易砂石垫层，整体结构强度偏低。其二，改造工程往往不能完全封闭交通，需分段施工、半幅通行，增加了施工组织的复杂性和质量控制的难度。其三，农村道路沿线分布有农田、鱼塘、民房等，周边环境敏感，施工过程中对排水系统和边坡稳定的保护要求较高。斗门区作为水产养殖大区，道路沿线鱼塘密布，施工过程中若排水措施不到位，极易造成鱼塘灌水、边坡失稳等问题。

（二）农村道路升级改造质量控制的基本要求

农村道路升级改造的质量管控，需要覆盖整个施工阶段。正式施工前，要全面摸排原有道路的实际技术状态，查清路面破损类别与破损程度、路基承载力、排水系统运行效果等内容，以此支撑改造方案的编制工作。施工阶段，要重点把控路基拓宽处置、新旧路面衔接部位、原材料品质及配比、压实水平、路面平整度等核心项目。施工结束后，开展实体工程质量检测与评价，保障各项参数符合设计标准。质量管控要落实预防优先思路，提前化解各类质量隐患，防止后期返工带来物资损耗以及工期拖慢等问题[1]。

 Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

（三）斗门区农村道路工程地质条件及对质量控制的影响

斗门区地处珠江三角洲河口地带，地势低平，地下水位较高，软土层广泛分布，厚度从数米至二十余米不等。软土具有含水量高、压缩性大、承载力低的特点，对道路路基稳定性构成较大威胁。农村道路升级改造中，若对软基处理不当，易出现不均匀沉降，导致路面开裂、桥头跳车等问题。此外，斗门区属南亚热带季风气候，雨季长、雨量大，台风暴雨频繁，施工期间受天气影响较大，土方作业和路面施工的连续性难以保证。这些地质和气候条件对施工组织安排和工艺选择提出了更高要求，质量控制须充分考虑本地特点，因地制宜制定措施。

二、施工前期准备阶段的质量控制

（一）原道路技术状况调查与评估

施工前期应对既有农村道路进行系统调查评估。路面调查内容包括路面结构类型、厚度、损坏状况及病害分布情况。斗门区农村道路路面以水泥混凝土路面为主，部分早期道路为砂土路面或简易沥青路面。水泥混凝土路面常见病害包括裂缝、板角断裂、错台、接缝料损坏等，需逐段记录病害类型和严重程度。路基调查应包括路肩完整性、边坡稳定性、排水设施完好性等方面。对于有软土分布的路段，还应补充地质勘察，查明软土层厚度和物理力学指标。调查结果应形成详细报告，据此确定合理的改造方案——对病害轻微的路段可采取加铺方案，对病害严重的路段需进行结构性修复或重建。

（二）施工组织设计与技术交底

施工组织设计是指导施工和质量控制的重要文件。编制时应结合斗门区农村道路改造项目的特点，合理划分施工段落，明确各工序的施工方法、质量标准和检测频率。对于交通不能中断的路段，应制定详细的交通组织方案，确保施工期间的通行安全和施工质量。

（三）原材料质量控制

原材料品质直接决定工程整体质量。农村道路升级改造常用主材包含水泥、集料、沥青、钢筋、土工合成材料等。每一批次材料进场，都要核对相关质量证明资料，同时按照规范规定频次开展取样检测。水泥优先选用强度等级42.5级及以上普通硅酸盐水泥，存放时长超过三个月或受潮结块的水泥，禁止投入施工。粗集料要保持洁净，颗粒级配合理，压碎指标达到规定标准；细集料优先采用天然中粗砂。沥青面层所用集料和沥青之间的黏结效果，需要满足规范条件。斗门区气候高温多雨，需格外关注集料抗滑能力与沥青混合料的抗水损害性能。土工格栅多用于新旧路基拼接位置，抗拉强度、延伸率等技术参数，必须达到设计规定[2]。

三、施工过程质量控制的关键环节

（一）旧路路基拼宽处理质量控制

农村道路升级改造往往需要拓宽路基，新旧路基拼接部位是质量控制的重点和难点。施工前应将原路基边坡表面的杂草、树根、耕植土等清理干净，清理厚度一般不小于30厘米。新老路基拼接处应采用开挖台阶的方式搭接，台阶宽度不宜小于1.0米，台阶面向内倾斜2%至4%，以增强新旧结构的咬合。每一台阶铺设土工格栅，土工格栅的铺设方向应垂直于路线走向，搭接宽度不小于20厘米，并用U形钉固定于路基表面。路基填筑应采用分层填筑、分层碾压的方法，每层填筑厚度控制在30厘米以内，压实度不得低于规范要求[3]。

斗门区部分农村道路拓宽区段紧邻水田、鱼塘，地基土体含水率偏高，整体承载能力不足。开展该类路段拓宽施工，首先要清理表层软弱土层，换填砂砾、碎石这类透水物料，换填深度结合软土层实际厚度确定。遇到软土层厚度偏大的情况，可选用抛石挤淤，或是砂垫层搭配排水板的处理手段，保障路基稳固，控制沉降均匀。路基填筑施工结束后，沉降观测周期不得少于7天，待沉降状态趋于稳定，方可开展路面结构层施工作业。

（二）路面结构层施工质量控制

道路路面结构由面层与基层两部分组成，各层施工质量，会直接决定道路整体使用效果。基层多选用水泥稳定碎石或者石灰粉煤灰稳定碎石这类材料，正式施工前，需开展配合比试验，以此确定材料最佳含水量与最大干密度。摊铺作业优先选用机械设备，做好松铺厚度把控，摊铺完成后马上开展碾压作业，碾压次数以满足设计压实度要求为标准。碾压阶段如果局部位置因含水量偏高发生弹软问题，要立刻挖除重新回填，不能强行碾压施工。基层碾压完成后要及时洒水养护，养护时间不能少于7天，养护阶段需要做好交通封闭管控。

沥青面层施工管控，核心在于混合料温度、摊铺厚度以及路面平整度。沥青混合料出厂、摊铺、碾压各环节温度，都需要控制在标准区间。温度偏低，会加大压实作业难度；温度过高，又容易造成沥青材料老化。斗门区夏季环境温度较高，沥青混合料转运途中，要做好覆盖保温防护。摊铺施工使用摊铺机开展作业，底面层可依靠基准线法管控高程，表面层优先选用平衡梁电子眼系统保障平整度。摊铺行进速度要保持平稳，建议控制在每分钟3–4米，禁止随意停机或更改行进速度。碾压工序紧跟摊铺同步开展，分为初压、复压、终压三个步骤。压路机行驶保持低速匀速，实际碾压遍数结合试验段结果来确定[4]。

（三）新旧路面接缝处理质量控制

新旧路面接缝是改造工程中容易产生质量缺陷的部位，包括纵向接缝和横向接缝。纵向接缝出现在道路加宽时新旧路面之间，施工时宜采用热接缝方式，即在新铺面层与旧路面接合处，用小型压路机沿接缝方向进行碾压，使新旧混合料充分嵌挤密实。若采用冷接缝方式，应对旧路面接缝侧面涂刷粘层沥青后再进行摊铺，并在接缝处适当增加碾压遍数。

横向接缝大多产生在每日施工中断位置，或是分段施工的搭接区域。当日施工收尾，要在施工端头安放垂直于线路走向的横缝挡板。次日开工前，切除端头松散的混合料，切口做到顺直规整，涂刷粘层沥青，再继续开展摊铺。接缝位置使用耙具整平混合料，预留合理的松铺厚度。碾压作业先实施横向碾压，再进行纵向碾压，保障接缝部位平整密实。针对水泥混凝土路面，横向

Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

施工缝与胀缝的布设位置需要遵从设计要求。传力杆的安放位置、朝向必须准确无误，等到养护工作结束，要及时灌注接缝填缝材料。

四、常见质量通病防治与过程管控

（一）不均匀沉降的预防与控制

不均匀沉降是农村道路升级改造工程中最常见的质量病害，多发生在新旧路基拼接处、桥涵两端和软土路段。产生不均匀沉降的主要原因是地基承载力差异、填料压实度不一致以及排水不畅导致路基含水量变化。预防措施包括：软基路段进行专项处理，换填或复合地基加固达到设计深度和范围；新老路基拼接处严格按照挖台阶和铺设土工格栅的工艺要求施工；不同填料的结合部位应设置过渡层，避免刚度突变。

施工过程中的沉降观测不可忽视，重要路段和高填方路段应埋设沉降观测点，定期测量沉降量和沉降速率。若实测沉降速率超出计算值，应及时分析原因并采取补压、换填或放缓填筑速率等措施。填筑完成后应有足够的静置沉降时间，待沉降趋于稳定后再进行路面结构层施工，切忌为赶工期而忽视沉降稳定要求。

（二）路面平整度控制

路面平整度，会直接影响车辆行驶体验与道路实际使用年限。基层的平整程度，决定了面层施工的平整效果。开展基层作业时，要严格把控高程与横坡指标。一旦出现局部高差超出标准的情况，要及时开展处理修正，不能等到面层施工阶段，依靠增减铺筑厚度强行弥补缺陷。沥青面层摊铺作业期间，摊铺机自动找平设备需维持正常运行。基准线或平衡梁要安放到位、固定牢靠，摊铺行驶速度保持稳定。碾压工序同样会显著影响路面平整度。压路机遵循由低处向高处的顺序开展碾压作业，碾压走向与碾压次数做到规整统一，相邻碾压区域的重叠宽度控制在轮宽的三分之一到二分之一之间。

（三）路面排水与防积水措施

路面排水不畅会导致雨水下渗进入路面结构层，降低材料强度和路面使用寿命。控制路面积水应从高程控制和横坡设置入手，基层和面层施工时均须保证设计横坡准确，使路面水能顺畅排至边沟。路缘石安装线形顺直、顶面高程符合要求，不得形成局部积水洼地。交叉口和道路变坡点等特殊部位，应按竖向设计精心控制标高，避免出现坡度突变造成积水。

（四）施工过程质量检验与验收

施工过程质量检验是控制工程质量的重要手段，应贯穿施工全过程。检验采取施工单位自检、监理单位抽检相结合的方式，检测频率和评定标准严格执行现行规范。检验内容包括：原材料进场检验、施工过程工序检验和完工后实体质量检验三个层次。原材料按批次检验，合格后方可使用；每道工序完成后经检验合格方可转入下道工序；单元工程完工后进行质量评定[5]。

对重点区域以及隐蔽工程，要落实旁站监理或全程跟踪核查工作。路基分层填筑的压实程度、基层的厚度与强度、面层厚度及平整度等重要参数，需要适度加大检测频次，保障采集的数据具备充足代表性，结果真实可信。质量检查相关记录务必完整客观，发现施工问题要第一时间下发整改文件。问题整改结束后，复核确认达标，才可开展后续施工。工程交工验收之前，需要对实体工程开展全面检测。检测项目包含路面弯沉、厚度、压实度、平整度、抗滑能力等多项技术参数，各项指标要满足设计方案以及验收规范的规定。

五、结束语

农村道路升级改造质量控制，须立足既有条件，聚焦新旧结构协同。软土处治、拼宽搭接、接缝处理与排水防护构成关键控制节点。施工前期精细调查、过程严控工艺参数、事后强化动态检验，三者环环相扣。因地制宜选用材料与工法，注重沉降观测与平整度管理，可有效防治不均匀沉降、积水等通病。全过程质量检验与及时整改，确保工程耐久可靠。唯有将地域特征融入每一施工环节，方能实现改造道路的长效稳定与服务提升。

参考文献

[1] 王春玲 . 农村道路路面施工技术及质量控制分析 [J]. 建筑工程技术与设计 ,2020(33):1644.

[2] 李海敏 . 农村公路路面质量控制要点 [J]. 交通世界 (中旬刊),2021(6):70-71.

[3] 周林 . 道路工程建设中的软基加固施工技术 [J]. 交通世界 ,2023(11):32-34.

[4] 王玉章 . 乡村振兴背景下乡村道路运输与建设质量管理研究 [J]. 运输经理世界 ,2025(2):29-31.

[5] 吴伟民 . 公路路面”白改黑”复式抗裂封层罩面施工技术探讨 [J]. 江西建材 ,2024(4):256-257,260.

 Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

城市地下市政管廊工程管线综合规划研究

王玮，张野
中国市政工程华北设计研究总院有限公司，天津 300381
DOI:10.61369/ERA.2026100022

摘　　要： 本文立足城市地下市政管廊工程落地实际，总结管廊管线规划的核心原则，指出当前管线综合规划实践中规划时序、空间布局、新旧衔接、运维适配方面存在的突出矛盾，导致大量管廊建成后入廊率不高、空间闲置。研究认为，可通过全生命周期统筹、多目标协同优化、科学化管线改造以及数字化技术赋能，实现城市地下市政管廊工程管线规范化精细化规范建设，保证工程安全、利用率以及运维质量，提升项目综合效益。

关 键 词： 市政管廊；管线综合规划；全生命周期；管线改造

Research on Integrated Planning of Urban Underground Municipal Utility Tunnels

Wang Wei, Zhang Ye
China Municipal Engineering North China Design and Research Institute Co., Ltd., Tianjin 300381

Abstract: This paper is based on the practical implementation of urban underground utility tunnel projects, summarizing the core principles of utility tunnel pipeline planning. It identifies prominent contradictions in current comprehensive pipeline planning practices, such as planning sequence, spatial layout, new–old connections, and operational adaptability, which result in low utilization rates and spatial idleness after the completion of numerous utility tunnels. The study suggests that through whole–life–cycle coordination, multi–objective collaborative optimization, scientific pipeline renovation, and digital technology empowerment, standardized and refined construction of urban underground utility tunnel projects can be achieved. This ensures project safety, utilization efficiency, and operational quality while enhancing overall project benefits.

Keywords: municipal utility tunnel; comprehensive pipeline planning; whole life cycle; pipeline renovation

引言

城市地下市政管廊是保障城市运行的基础载体，在同一地下空间内集中敷给水、电力、通信、燃气等多种管线，理论上具备减少道路开挖、降低管线事故率的优势。但是各地项目实践显示，土建完工并不意味着管廊就能直接发挥作用，管线综合规划才是真正决定管廊使用效果的关键。基于工程实际痛点，需对管线综合规划体系进行优化，推动城市地下基础设施高质量发展。

一、城市地下市政管廊管线综合规划的基本原则

（一）统筹协同

城市地下市政管廊管线规划设计涉及的水管、电缆、燃气管、光缆分属不同的权属单位，且设计和施工过程需要地上地下空间的协调配合，因此不能独立开展，必须深度对接城市国土空间总体规划、地下空间专项规划、道路交通规划、人防工程规划等上位规划，根据城市整体建设节奏确定管廊线位、埋深、断面规模、节点布局。规划过程还要打通住建、水务、电力、通信、燃气、交通等主管部门的工作壁垒，建立明确的对接介质和签字确认程序，统一各类管线的敷设标准、技术参数、建设要求，确保各类市政设施协同布局。

（二）安全优先

不同入廊管线介质、运行压力、风险等级存在明显差异，且管廊工程常与道路、桥梁及其他地下设施交叉作业，规划阶段需要严格按照安全标准分类落实防护措施。燃气等易燃易爆高危管线必须独立设置舱室，配套专用的通风、防爆、泄漏监测设备；热力与电力管线设置合理的隔热、绝缘、防干扰间距，避免管线长期处于高温高压环境下造成管线老化、设备故障；给排水管线做好防渗、排水与坡度设计，减少给水渗透对管廊结构和其他管

作者简介：王玮（1989.09—），男，辽宁昌图人，汉族，本科，工程师，从事各专业市政管线的管线综合以及各类市政场站的总图研究。

Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

线的侵蚀[1]。对于软土、地下水富集、重载道路等特殊场景，采取针对性结构防护优化和沉降防控方案，维护管线运行以及管廊结构安全。

（三）经济适用

兼顾市政管廊的建设成本和长期运维效益，在管线综合规划中需要综合考虑区域的人口规模、产业布局、市政负荷确定管廊断面尺寸、管线数量以及建设范围。若一味追求大断面、全配套的高标准设计，就会导致许多管线短期内无法发挥价值，大量投资被浪费。相反若一味压缩成本，断面刚好只能满足现阶段的入廊管线，后期就没有多余空间增加新的管线。规划人员在管线布局中需要简化路径，减少弯折与冗余敷设，按照实际需求布设吊装口、检修口、通风口等附属设施，有效控制建设投资、运维成本以及后期改造成本，实现短期运行和长期发展的动态平衡。

（四）前瞻预留

随着城市扩展、产业升级、人口增长，城市地下市政管廊管线的负荷会发生持续变化，管线规划需要有依据地判断未来10–15年的市政扩容需求，在管廊舱室空间、断面尺寸、管线接口等位置预留充足余量，满足新增管线敷设、原有管线升级扩容需求。结合智慧市政建设的发展趋势，规划阶段提前预留智能监测、传感设备、自动化运维系统的安装空间和接口，保证管廊建成后功能能够持续晚上，保障工程长效价值。

二、管线综合规划的多维困境

（一）规划时序割裂

管廊作为土建工程，建设周期为3–5年，一旦开工必须连续推进。许多城市存在先施工后规划的乱象新建城区为了完成基建指标，提前大规模设置管廊主体，但是部分地块开发之后，其管线配套建设缓慢，导致这部分管廊建成后长期处于空置状态，造成公共资源闲置浪费。老旧城区的管线改造则存在超前或滞后问题，部分区域管廊建成多年，原有的老旧管线未能及时迁改入廊，依旧采用以往直埋模式。或者盲目推进管线入廊，但并未完善配套设施，导致管线入廊后运行不稳定。

（二）空间耦合不足

管线综合规划方案中，部分规划人员仅参考通用的设计模板，并未结合项目实际场景作出针对性优化，省略电力电缆对支架间距和弯曲半径的要求、高压电缆对接地方式而后和金属护套感应电压的闲置，在规划图上也并没有体现出光接续预留盘留空间等规划要点。管线排布方面，热力管线与电力电缆间距过近，高温环境导致线缆绝缘层老化加速度，增大短路以及漏电风险。给排水管线布置不合理，规划断面图上只标注了管道本身，忘掉了管道阀门、排气阀、泄水阀等附属设施的空间需求。多数规划还没有考虑到特殊场地条件，管线固定、防渗、抗沉降设计不足。

（三）新旧衔接不畅

管廊建设大多在建成区展开，大量既有管线需要从直埋状态迁改入廊或者与管廊接驳，但是在老旧城区管线改造衔接中，老城区市政管线建设年代久远，建设标准偏低，管线材质老化、规格杂乱，现状资料不全，开工前无法查清地下管线的实际位置、埋深、走向、运行状态和权属信息等[2]。新建管廊采用现代化建设标准，管线接口参数、敷设高程、技术规范都与老旧管线不匹配。很多改造项目受限于现实条件只能大规模迁改管线，施工成本高、工期长，还会对周边居民正常生产生活产生影响。

（四）运维适配不足

多数规划仅围绕工程目标完成管线空间排布设计，并未结合智慧市政建设从后期运维的维度上统筹布局智能监测、数据采集、故障预警、远程管控等配套系统、管廊建成后，依赖人工巡检监测管线运行情况，效率低下，且监控点位置与管线关键节点错位，存在监控盲区，无法及时排查隐患。传统规划模式数字化程度低，依赖人工完成管线间距、空间冲突、负荷适配等参数校核，校核精度不足，可能潜在规划漏洞。

三、城市地下市政管廊管线综合规划优化策略

（一）全生命周期统筹

打破项目规划、建设、运营全链条，在规划编制初期着眼于管廊的完整使用周期，将管线综合规划全面纳入城市国土空间总体规划，同步衔接地下空间、交通、人防等专项规划。建立多情景需求模型，设定低、中、高三档需求情景，分别对应不同的管线容量以及空间需求[3]。断面设计参考中情景标准，结构上为高情景预留可能性，运营策略上做好低情景下的空间利用方案。

建设实施阶段，整合住建、电力、通信、燃气、水务等部门资源，统一入廊管线技术标准、建设时序、运维责任。将管线综合规划纳入施工管理的刚性约束，施工过程中任何涉及管线布置的变更必须回到管线综合规划层面开展校核，建设单位在项目部专门设置管线综合协调岗位，负责处理施工中的管线空间冲突问题，全面记录处理结果并同步更新管线模型。在推进时序上，对新建城区实行地块开发、道路建设、管廊施工、管线敷设四同步模式，根据片区开发进度分区分段推进建设，保证管廊建成即有管线入廊。对老旧城区制定分批改造、循序渐进的时序放啊，优先改造主干道、核心商圈、老旧小区等隐患高发区域的管线。

运营维护阶段管廊运营单位要每年组织一次管线空间使用情况核查，核对实际使用与规划方案一致性，及时发现偏差并调整。每五年开展一次管线综合规划的后评估，结合运行数据以及需求变化判断是否需要启动规划修编。

（二）多目标协同优化

综合空间布局、安全防护、成本管控等多重目标，在守好安全底线的前提下，寻找安全、效率与成本之间的平衡点。在空间规划上推行分舱分类精细化布局，依据管线风险等级以及介质特性，划分独立的功能舱室。分区布设电力、通信、给排水、热力、燃气管线，为燃气、热力等高危管线单独设舱，并设置密闭隔离装置以及专属的防护系统。严格控制好管线安全间距，在热力管线与弱电、强电管线之间预留足够的隔热间距，保证将给排水管线布置在舱室下层。

 Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

对不同管线组合的风险进行量化分级。在高风险组合中要始终坚持分舱原则，实现差异化空间利用。

在满足安全间距以及检修空间的基础上，规划人员结合场地实际情况优化断面设计。一是通过调整管线排列方式压缩断面。二是根据电缆外径和散热要求逐层确定电缆支架的层间距。此外，在软土、地下水丰富区域，优化管线支架固定结构，增设防渗、排水、沉降缓冲设施，防止管线变形破损。

在确定规划方案中，从平衡安全与经济指标的层面上优化方案，人口密集、市政负荷大的核心区域适度提升管廊断面和防护标准，人口稀疏、开发强度低的郊区简化布局、控制断面。在规划方案比选中，在同一评价体系中同时评价建设成本与运维成本。采用净现值法将不同方案的建设投资、年运维费用、预期改造成本折现后比较，为方案决策提供数据支持。

（三）科学化管线改造

若在城市地下市政管廊工程中必须继续拧管线改造，需要制定科学化的改造规划，运用地质雷达、管线探测仪、三维扫描等技术手段开展全域地下管线普查摸底工作，查明老旧城区管线的位置、规格、类型、材质、埋深、运行状态以及权属信息等，同步搭建数字化管线台账，补齐缺失的管线数据和图纸资料，以真实准确的数据支持规划人员编制规划方案。根据调查结果，在管线迁改方案中必须明确每条管线的迁改方式以及迁改时序、临时保供方案、切换接驳的技术要求。对老化严重、存在泄漏、爆炸、断电等安全隐患的管线，全部纳入迁改清单，同步完成入廊改造；对规格达标、运行稳定、剩余服役年限较长的管线，实行原位保留、定期巡检的管理模式，降低改造成本和施工影响。若存在新旧管线接口、高程、参数不匹配的问题，统一改造转接配件，标准化对接参数。

迁改方案要经过管线权属单位书面确认，并预留合理的迁改窗口期。面对不同的管线，还要在管线综合规划中对其更换路径问题作出回应。对可弯曲的电缆和光缆，仅需预留足够的牵引空间和中间抽拉口即可。对给水、燃气等刚性管道，更换就意味着要拆除旧管安装新管，在空间设计上要预留管道轴向的抽出空间。同时直管段的投料口间距要匹配管道更换长度，弯管段与阀门密集段要设置专门的更换操作区。

管廊内管线系统与廊外直埋管线系统的兼容与切换，要在管线综合规划中对防水做法、沉降处理、温度补偿、接地连接等细节给出明确的标准做法。整个切换方案严格遵循先断后通的原则，在新管线投入使用并确认运行正常后再停运旧管线，避免切换过程中服务中断。

（四）数字化技术赋能

针对传统城市地下市政管廊管线综合规划中信息不对称、空间可视化不足的缺陷，需要运用先进的数字化技术构建三维信息模型，重构管线综合规划的工作流程。在管廊设计阶段依托地理信息系统构建城市地下空间三维模型，整合地形地貌、道路布局、既有管线、地质条件等基础数据。同时利用 BIM 技术搭建管廊主体、管线、附属设施一体化仿真模型，在模型中完成管线布置、支架设计以及设备选型。围绕同一模型完成各专业协同工作，可在模型碰撞检测阶段及时发现并解决管线冲突，并完成安全间距智能测算、空间负荷精准分析，提升规划精度。模型交付后可直接用于施工指导和运营管理。

在运营阶段构建数字孪生系统，将管线综合规划从静态成果升级为动态工具，统筹布设温度、湿度、气体浓度、压力、流量、电流等智能传感终端，预留数据传输、远程控制、智能巡检的设备接口和安装空间，在模型中实时接入管线运行数据以及廊内环境数据，在虚拟空间中呈现管廊的真实状态，实现故障自动预警与数据自动统计，运营方可快速在模型中模拟新管线布置方案的影响，提升运维智能化水平。

四、结论

综上，管线综合规划是保证城市地下市政管廊工程从建设到使用的关键环节，对工程建设质量、运行安全以及资源利用率具有决定性影响，结合本研究提出的管线综合规划优化措施，需要建设主管部门、管廊运营单位以及管线权属单位长期合作，持续优化该体系，才能保障城市市政系统安全稳定运行。

参考文献

[1] 程芳兰，谢昱 . 智慧城市发展背景下市政管线综合规划与绿地系统优化配置研究 [J]. 智能建筑与智慧城市，2025,(9):180-182.

[2] 姚新丽，吴寻，杜政康 . 城市小型综合管廊规划实践与冲突协调机制研究 [J]. 浙江建筑，2026,43(3):19-23.

[3] 陶禹洁，李豫虎，童刚 . 城市地下市政管廊工程管线综合规划 [J]. 住宅与房地产，2026,(15):84-86.

Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

晶化釜搅拌器轴承故障分析及处理措施

万元东，李建恒，黄良国
四川金象赛瑞化工股份有限公司，四川 眉山 620031
DOI:10.61369/ERA.2026100024

摘　　要： 介绍了一种晶化釜，在运行过程中出现的搅拌器轴承损坏问题并进行原因分析。针对晶化釜的设备结构、搅拌器的工作环境和安装、轴承的润滑脂等问题，提出了处理措施，并根据介质特点选用耐磨蚀性能好的釜底轴承，耐高温、抗有机溶剂性能好的润滑脂，并对轴承座的结构进行优化，以及加强了轴承的运行维护和监测，确保了搅拌器的安全稳定运行。改造后的搅拌器轴承故障明显减少，轴承的运行周期从300h左右延长到4000h以上，没有再出现搅拌器振动过大的问题，从而保证了设备的长周期、安全、稳定运行。

关 键 词： 搅拌器；轴承；润滑；故障分析；处理措施

Analysis of Bearing Faults in the Crystallization Vessel Mixer and Handling Measures

Wan Yuandong, Li Jianheng, Huang Liangguo
Sichuan Jinxiang Sare Chemical Co., Ltd., Meishan, Sichuan 620031

Abstract: This paper introduces a crystallization reactor and analyzes the problem of the damage of the impeller bearing during its operation. Regarding the equipment structure of the crystallization reactor, the working environment and installation of the impeller, as well as the lubricating grease of the bearing, the treatment measures are proposed. According to the characteristics of the medium, the bottom bearing with good wear resistance is selected, and the lubricating grease with good high-temperature resistance and anti-organic solvent performance is chosen. The structure of the bearing seat is optimized, and the operation and maintenance of the bearing are strengthened to ensure the safe and stable operation of the impeller. The failure of the bearing of the impeller after the renovation has significantly decreased, and the operating cycle of the bearing has been extended from about 300 hours to more than 4000 hours. There has been no problem of excessive vibration of the impeller again, thus ensuring the long-term, safe and stable operation of the equipment..

Keywords: impeller; bearing; lubrication; fault analysis; treatment measures

背景资料

我公司于2023年新建了一条分子筛生产线，配置6台20m^{3}的反应晶化釜，晶化釜工作压力2.6MPa，工作温度220℃，搅拌器的轴力传动采用磁力驱动。搅拌器简图如图1所示，主要由减速机、连接体、磁力传动器、轴承体、密封填料、搅拌轴、桨叶、底轴承等部件组成，其中，磁力传动器由内磁转子、外磁转子及隔离套三部分组成。外磁转子与减速机连为一体，由连接体支撑，为主动件；桨叶、搅拌轴与内磁转子连为一体，通过一对球形轴承和一对圆锥轴承支撑为从动件，同时釜底用一个滑动轴承固定搅拌轴以减少搅拌器在运转过程中的摆动。主动件和从动件被隔离套完全隔离，工作时，电机经减速机带动外磁转子转动，由于内、外磁转子间存在磁场，外磁转子会通过磁力耦合作用于内磁转子，从而驱动与内磁转子连接的搅拌轴同步旋转，有效的避免了搅拌器的动密封。

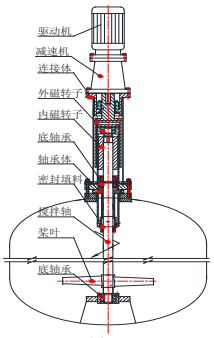


图 1

作者简介：万元东（1971.11—），男，汉族，四川眉山人，大专学历，化工工艺工程师，主要从事过合成氨装置的生产管理、工程设计，以及分子筛、催化剂的研发和生产管理。

 Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

一、存在的问题

搅拌器于2023年5月～7月完成安装、调试，8月份开始随整过生产系统投料试生产，6台晶化釜相互倒换、间断运行，搅拌器单次的连续运行20-30h，运行频率为45Hz。从试生产开始，每月基本保持投料20～25釜料，在8～9月份，搅拌器运行均正常，但从10月开始，1#釜、3#釜、4#釜的磁力驱动器的轴承处相继出现了不连续的杂音，初步判断为缺油，补添加润滑脂后杂音有所减小。10月24日18:00，4#晶化釜投料完成后按程序进行升温操作，当晚23:20左右，晶化釜升温到220℃，现场突然发现4#晶化釜出现较大的异常振动，并引起该设备相连的管道出现5～8mm左右的摆幅，随即通知主控降低4#晶化釜搅拌器运行频率到20Hz，异常振动消失，后又提高搅拌器到40Hz，基本稳定运行到该釜料晶化结束，暂时停用该釜。通过对晶化釜和搅拌器结构图纸的研究，并结合现场的振动现象，初步判断为搅拌器底轴承磨损间隙过大或搅拌器的轴承损坏而引起的运转失衡，进而出现的共振现象，这对设备运行构很较大的安全隐患，必须消除，于是在设备厂技术人员的指导下，对该釜搅拌器进行检修。检查结果发现：磁力驱动器内磁转子的球形轴承损坏，无润滑脂（图1-1），圆锥轴承的润滑脂变干、变质（图1-2），圆锥轴承损坏（图1-3）；轴承体下部的密封填料环磨损变形（图1-4）；釜底滑动轴承的轴套损坏、磨损严重（图1-5），轴套与滑动轴承之间磨损后的间隙达到7mm（设计为1mm）（图1-6）。基于4#晶化釜搅拌器存在的问题，接着对其余晶化釜进行检查，也发现类似问题（图1-7、图1-8、图1-9）。



图1-1



图1-2



图1-3



图1-4



图1-5



图1-6



图1-7



图1-8



图1-9

根据晶化釜运行时间的统计，切止11月30日，共计投料50釜，合计运行时间1539h，单台晶化釜最长运行时间300h，最短180h。从总体而言，运行时间都不长，但搅拌器内磁转子轴承的润滑脂均出现变质或流失，有的轴承损坏，轴承体下方的密封填料环出现偏磨，釜底的滑动轴承过度磨损或偏磨，检查汇总情况见表1-1。

表1-1　晶化釜搅拌器检查情况汇总表

名称	时间 h	球形轴承	锥形轴承	密封填料环	底轴承
1# 晶化釜	312	油脂干硬，游隙过大	油脂干硬、变质，轴承磨损	磨损3～6mm，变形	间隙6mm
2# 晶化釜	244	油脂偏干，游隙偏大	油脂干硬、变质，轴承损坏	磨损3～5mm，变形	间隙5mm
3# 晶化釜	298	油脂偏干，游隙偏大	油脂干硬、变质，轴承磨损	磨损2～7mm，偏磨	间隙5mm
4# 晶化釜	285	无润滑脂，轴承损坏	油脂干硬、变质，轴承损坏	磨损4～6mm，变形	间隙7mm
5# 晶化釜	215	油脂偏硬，游隙偏大	油脂干硬、变质，轴承磨损	磨损2～3mm，偏磨	间隙4mm
6# 晶化釜	185	油脂基本正常	油脂干硬、变质，轴承磨损	磨损2～3mm，变形	间隙3mm

二、原因分析

针对搅拌器轴承在短时间内都出现故障，公司技术人员从晶化釜的设备结构、搅拌器的工作环境和安装、轴承的润滑脂等方面逐一展开讨论，认为内磁转子的轴承润滑不良，是轴承不能正常工作的主要原因，釜底滑动轴承在短时间内过度磨损，加剧了搅拌器的摆动幅度，也使内磁转子的轴承负荷增加，同时也加剧了轴承体的密封填料环的磨损，填料与搅拌轴的间隙增大，进而釜内的有机蒸汽窜入轴承体，破坏轴承的润滑环境，最终导致轴承损坏失效[1]。

●搅拌轴上下不同心，是造成釜底滑动轴承非正常磨损的直接原因。结构上，内磁转子的轴承体与晶化釜连接采用的是对夹式，双面榫槽，A型金属缠绕垫密封，安装时容易造成搅拌轴的釜内和釜外部分不同心，在搅拌器运转过程中就会造成搅拌器末端的调动过大而使釜底的滑动轴承过度磨损或偏磨现象。

●釜底滑动轴承的材质选用不恰当：晶化釜的工作介质含酸、有机胺类，腐蚀性较强，晶化后的物料粒径2-5μm左右，因此物料的磨蚀性较强。而原设计的轴套材料为GCr15，耐磨性较好，但耐腐蚀性不足；选取的调心滑动轴承是可行的，可以降低摩擦，但物料颗粒结晶后容易造成调心轴承卡死失去调心功能。

●轴承体结构本身的不足，造成造成轴承工作环境的恶化：内磁转子的轴承体下端密封填料与搅拌轴之间始终有间隙，在晶化釜工作时，釜内的蒸汽会通过该间隙进入轴承腔而侵蚀轴承，恶化轴承的工作环境；圆锥轴承设计有润滑脂补注入口，能及时添加可能流失的润滑脂，但球形轴承则只能在原始安装时加注润滑脂，未设计润滑脂补添加口；轴承体与搅拌轴之间的间隙为11mm，明显偏大，使得加注入圆锥轴承腔的润滑脂容易沿着该间隙流失[2]。

●轴承的安装和工作旋转方向，使得润滑脂受热后容易流失：内磁转子的圆锥轴承和球形轴承均是水平安装和旋转，轴承

Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

内的润滑脂会随温度的升高粘度降低而逐渐流出或被挤出轴承工作区，工作面得不到足够、有效的润滑而失效。

●润滑脂与工作环境不相适应：设备厂提供的“铁霸黑油脂”的耐高温性能和耐有机溶剂性能不足，晶化釜内高温和有机胺蒸汽沿搅拌轴进入轴承，使润滑脂变质而失去润滑性能。为此做了一个实验，将润滑脂放到恒温箱中恒温150℃，2h后检查，润滑脂变得干硬；再将润滑脂放入5%的有机胺溶液中，并加热到80℃，润滑脂逐渐被溶解。

三、改造措施及效果检验

针对存在的问题，主要从滑动轴承的材质、轴承的润滑脂、轴承体结构这三方面进行考虑。基于要保证生产的持续性，改造工作量可能比较大，因此确定渐进式的改造方案，先以4#晶化釜的作为实验性改造，待验证改造的有效性后逐步实施其他晶化釜的改造[3]。

第一次改造方案：以不改变设备结构为前提，主要是对轴承、润滑脂的改造试验，确定内磁转子的球形轴承选用SKF-6219，圆锥轴承选用SKF-33124；轴承润滑脂选用高温抗磨脲基脂，按200h补加注约50ml；釜底轴承的轴套选用316L镶嵌石墨（图3-1a），调心滑动轴瓦（316L镶嵌石墨）（图3-1b）；在对高温抗磨脲基脂的耐有机胺试验表明，该润滑脂具有比较好的抗溶解性。



图3-1a



图3-1b

改造运行效果检验：设备于2023年12月5日改造完成后投用，在试验第9釜的投料晶化过程中，内磁转子的圆锥轴承开始出现不连续的异响，搅拌器的振动偏大，在该釜料晶化反应末期突然出现共振，被迫降低搅拌器运行频率到30Hz运行。在停用后拆开检查，检查情况见表3-1。

表3-1　第1次试验检查情况

类别	时间 h	球形轴承	圆锥滚子轴承	釜底轴承
状况	360	润滑正常，油脂颜色变深	缺油，圆锥滚子有过热变色现象	间隙7mm

图3-1c、图3-1d、图3-1e分别为内磁转子的球形轴承、圆锥轴承和釜底轴承运行后的外观图片。



图3-1c



图3-1d



图3-1e

从这次运行后的检查结果看，总的运行时间延长到了360h，有一定的效果，但选择的高温抗磨脲基脂仍然没起到良好的润滑作用，球形轴承区域的润滑脂虽还有润滑作用，但已出现变质，油脂的抗有机胺性能不良；锥形轴承的润滑脂已经完全流失，使得轴承没有润滑，干磨过热；釜底轴承的轴套与轴瓦材质选取不适合，硬碰硬，反而加剧了磨损，间隙由安装时的1mm磨损到7mm，轴瓦也没有起到调心作用，釜底轴承的磨损后间隙过大造成搅拌器转动失去平衡而加剧振动。

第二次改造方案：根据第一次改造运行出现的情况调整改造方案，内磁转子的轴承型号不变；润滑脂改为全氟聚醚润滑脂（图3-2a），按运行200h补加注50ml；釜底轴承的轴套选用316L，轴瓦选用填充四氟材料（图3-2b）。



图3-2a



图3-2b

改造运行效果检验：改造完成后于2024年1月15日投用，一直稳定运行到3月5日，发现内磁转子的圆锥轴承开始出现不连续的杂音，但搅拌器振动不明显，没有出现共振现象，为保证设备总体安全，决定对轴承进行检查，检查情况见表3-2。

表3-2　第2次试验检查情况

类别	时间 h	球形轴承	圆锥滚子轴承	釜底轴承
状况	520	油脂减少，轻微变色	缺油，残存的少量油脂颜色变深	有磨损，间隙1.8mm

图3-2c、图3-2d、图3-2e分别为内磁转子的球形轴承、圆锥轴承和釜底轴承运行后的外观图片。



图3-2c



图3-2d



图3-2e

从这次检查情况分析，累计运行时间520h，全氟聚醚润滑脂有很好的润滑、耐有机胺性能较好；锥形轴承没有损坏，可以继续使用，只是润滑脂流失了，并在轴承体下端与搅拌轴的间隙发现大量润滑脂；釜底轴承的磨损量小，由安装时的0.8mm磨损到1.8mm，表明填充四氟材料的耐磨、耐腐性能好，且该材料相对较软，可以起到缓冲吸振作用。

第三次改造方案：经过两次改造试验运行后，釜底轴承的材料选取应比较适宜了，全氟聚醚润滑脂的耐有机胺性能也较好，能满足使用工况要求，按300h补加注约50ml。现在主要问题集中在锥形轴承，润滑脂流失后轴承缺少润滑而不能保证正常工作，这主要是受制于圆锥轴承的结构特点和安装运行方向，且轴承体和搅拌轴之间的间隙达11mm，不利于润滑脂的保持，因此必

 Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

须在该轴承安装位置设置阻挡油脂流失的密封。根据轴承体的结构特点，改造方案如图3-3a和3-3b所示，在锥形轴承安装位置下方设置宽10mm，深18mm的环槽，便于安装油封，对轴承的润滑脂起到密封作用，防止或减少润滑脂流失。考虑到此处的温度可能高达100℃以上，因此采用高温氟胶双唇骨架油封[4]。

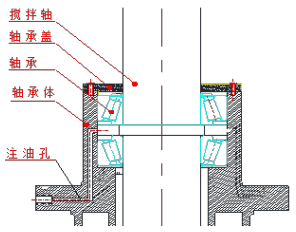
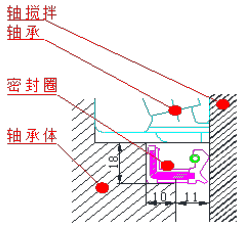


图3-3a



3-3b

改造运行效果检验：设备于2024年3月15日开始投用，一直运行到5月20日，拆开设备检查运行状况。本次累计运行1270h，搅拌器运转正常，未出现共振现象，内磁转子的轴承运行声音正常，检查情况见表3-3。

表3-3　第3次试验检查情况

类别	时间 h	球形轴承	圆锥滚子轴承	釜底轴承
状况	1270	润滑正常，油脂颜色正常	油脂充足，颜色稍微变深	有磨损，间隙4.2mm

图3-3c、图3-3d、图3-3e分别为内磁转子的球形轴承、圆锥轴承和釜底轴承运行后的外观图片。



图3-3c



图3-3d



图3-3e

从此次改造运行情况结果来看，也再次验证了所加注润滑脂的抗有机胺性能良好，滑动轴承可用。特别是圆锥轴承安装位置下方设置油封后有效的阻止了润滑脂的流失（图3-2d），保证了轴承的润滑，从而延长了轴承使用寿命；同时密封位置轴承体的夹套冷却水，降低了密封的工作温度，有效的保证了密封圈的密封功能。

在第二次改造试验后，就对其余晶化釜搅拌器的润滑脂改为全聚醚润滑脂，釜底轴承的轴套和轴瓦进行了更换，之后又根据第三次改造试验运行的结果，对轴承体增加密封，改造工作于2024年6月底全部完成。

截至2025年6月，晶化釜再未出现过振动过大或共振的情况，搅拌器运行平稳，轴承的运行声音均匀。从搅拌器的运行统计数据及检查看，运行时间最短的1# 晶化釜为2150h，釜底轴承间隙3.2mm；运行时间最长的5# 晶化釜为4150h，釜底轴承间隙5.3mm，搅拌器振动略偏大，更换滑动轴承；内磁转子的轴承均未更换，在检查时清洗后继续使用[5]。

四、结束语

由于在晶化釜的结构设计时阶段，没有足够的条件掌握物料特性，因此才使得设备投用没多长时间就连续出现问题。经过改造试验运行后，最终验证了全氟聚醚润滑脂在耐高温、抗有机溶剂方面的优异性能，虽然锥形轴承区的润滑脂在第三次的运行检查看有变色问题，但仍然具有润滑性能，特别是设置油封后，阻止和减缓了润滑脂的流失，有效的保证了轴承的润滑，这样在补加注润滑脂的时间上延长到500h甚至更长时间一次；釜底滑动轴承更换材料，使用寿命最长达到4000h以上；在管理上按照运行200h检测一次搅拌器的振动值，1000h检查轴承间隙，并根据振动值和轴承间隙值的数据变化规律，从而更精确的确定滑动轴承更换周期，进而也改善了内磁转子轴承的使用环境，达到长期使用的目的。

参考文献

[1] 杨斌超 . 火电厂吸收塔搅拌器缺陷原因分析及处理 [J]. 电力设备管理 .2021(06):72-73.

[2] 李洪滨 . 炼化企业离心式压缩机组温度探头安装与检修技术研究 . 中国设备工程 .2026(S2):37-38.

[3] 胡爱新 .6000t/a SAPO 催化剂项目设备布置及管道设计概论 [J]. 化工设备与管道 .2020,57(01):92-96

[4] 张宇 . 孙振华 . 朱宁 . 汤建忠 . 纪勤 . 江都三站电机轴承闭式冷却系统改造与冷却效果实测分析 [J]. 江苏水利 .2026(09):50-53+57.

[5] 金海波 . 刘世琦 . 姚佳 . 面向轴承故障诊断的动态图卷积注意力网络 [J]. 振动与冲击 .2026,45(16):301-317.

Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

高炉重力除尘器密闭输灰系统工艺改进浅析

刘翔
宁波钢铁有限公司，浙江 宁波 315800
DOI:10.61369/ERA.2026100029

摘　　要： 宁波钢铁有限公司炼铁厂1#高炉重力除尘器密闭输灰系统吸罐车吸灰周期长达90分钟，明显高于行业常规水平。经现场调查与要因确认，助推氮气调压阀调节失效、卸灰阀下灰速度不均匀、吸灰软管内壁高温鼓包且长度偏长是导致吸灰时间过长的主要原因。通过加装手动调节阀、增设旁通氮气管路、更换耐高温软管并缩短长度等改进措施，吸罐车纯吸灰时间由83分钟降至35分钟，计入辅助作业后总周期控制在45分钟以内，作业效率提升50%，日均氮气消耗由4000m³降至2000m³，软管月均损耗由60米降至2米，年综合经济效益约29.3万元。

关 键 词： 重力除尘器；密闭输灰；吸罐车；氮气消耗；软管优化

Brief Analysis on Process Improvement of Closed Ash Conveying System for Blast Furnace Gravity Dust Collector

Liu Xiang
Ningbo Iron & Steel Co., Ltd., Ningbo, Zhejiang 315800

Abstract: The ash suction cycle of the tank truck for the closed ash conveying system of the gravity dust collector of No.1 blast furnace in the Ironmaking Plant of Ningbo Iron & Steel Co., Ltd. is as long as 90 minutes, which is significantly higher than the conventional industry level. Through on-site investigation and factor confirmation, the main reasons for the excessively long ash suction time are the failure of the booster nitrogen pressure regulating valve, the uneven ash discharging speed of the ash discharge valve, and the high-temperature bulging and excessive length of the inner wall of the ash suction hose. Through improvement measures such as installing manual regulating valves, adding bypass nitrogen pipelines, replacing high-temperature resistant hoses and shortening the hose length, the pure ash suction time of the tank truck is reduced from 83 minutes to 35 minutes, and the total cycle including auxiliary operations is controlled within 45 minutes, with the operation efficiency increased by 50%. The average daily nitrogen consumption is reduced from 4000 m³ to 2000 m³, the average monthly hose loss is reduced from 60 meters to 2 meters, and the annual comprehensive economic benefit is about 293,000 yuan.

Keywords: gravity dust collector; closed ash conveying; suction tank truck; nitrogen consumption; hose optimization

引言

高炉重力除尘器瓦斯灰密闭输灰系统是高炉出铁场除尘的重要组成部分，其运行效率直接影响高炉正常生产节奏与现场作业环境。宁波钢铁有限公司炼铁厂1#高炉重力除尘器配备双储灰罐密闭输灰系统，采用吸罐车负压吸灰方式完成瓦斯灰外运。实际运行中暴露出吸罐车吸灰时间严重偏长的问题，单车次吸灰总用时约90分钟，明显超出同类型重力除尘器45~50分钟的常规水平，不仅挤占当班人员正常巡检时间，还造成助推氮气大量浪费。为扭转这一被动局面，小组选定缩短吸罐车吸灰时间为攻关课题，通过系统原因分析与针对性改进，力求将单车吸灰周期控制在45分钟以内。

一、系统现状与问题分析

（一）重力除尘器密闭输灰系统工艺流程

该炼铁厂1#高炉重力除尘器用密闭罐车负压吸灰法，除尘器下部有两个并列的储灰罐，每个储灰罐顶部接除尘器卸灰管，底部装有气动卸灰阀，储灰罐出口经吸灰软管与吸罐车进料口相连。吸罐车车载真空泵产生负压，打开储灰罐卸灰阀之后，瓦斯灰在负压的作用下经由吸灰软管进入到罐车内。为了使下灰顺

作者简介：刘翔（1977.11—），男，汉，湖北宜城，本科，助理工程师，从事的研究方向：冶金工程高炉热风煤气。

 | Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

畅，在储灰罐底部设有助推氮气管路，用调压阀向卸灰管区不断注入氮气，用气流扰动来防止瓦斯灰在卸灰口处发生架桥现象。整个吸灰过程包含拆接吸灰软管、储灰罐预加压、打开卸灰阀吸灰、管道吹扫等几个步骤，各个步骤之间互相联系，任何一个环节出现低效都会延长整个作业时间。

（二）吸罐车吸灰作业时间现状统计

小组在2025年2月至3月对1# 高炉重力除尘器吸罐车吸灰作业做了连续跟踪记录，去除了拆接软管、储灰罐加压、管道吹扫这些辅助时间之后，纯吸灰时间统计结果是1# 储灰罐平均耗时59分钟，2# 储灰罐平均耗时24分钟，两个储灰罐一共用了83分钟，加上拆接管大约5分钟、加压大约3分钟、吹扫大约4分钟等辅助工作所占的时间，吸完一整罐车瓦斯灰的实际总耗时约为90分钟。该数据同岗位操作人员的主观感受大致相符，并且也侧面表现出系统的运行效率存在着明显的不足之处。从月度统计数据上看，此吸灰周期一直处在90分钟左右的较高位置，没有出现明显的下降趋势，成了影响当班人员正常开展其它巡检工作的主要因素。

（三）与其他钢厂吸灰效率对标分析

为了进一步确定差距，小组利用行业技术交流以及文献查阅的方法，搜集到了国内一些钢铁企业对于相同类型的重力除尘器密闭输灰系统吸灰工作情况的数据。宝山钢铁、沙钢集团等企业的2500m³ 级高炉配套重力除尘器吸罐车吸灰周期一般为45 ~ 50分钟，有些管理水平较高的生产线可以缩短到40分钟之内。从对标分析可知，1# 高炉重力除尘器的吸灰时间比同行先进水平多出1.8倍左右。由于吸灰时间过长，助推氮气持续开启的时间也随之变长，单次吸灰氮气消耗量远远大于行业平均值，造成明显的能源浪费。以上结果再次证明了进行系统改善的必要性和迫切性。

二、吸灰时间过长原因分析

（一）助推氮气调压阀无法调节氮气流量

小组在现场对吸灰作业全过程进行观察并收集数据，得出助推氮气调压阀出现调节功能失灵的问题。该调压阀装设在DN65助推氮气主管道上，其作用就是按照下灰情况及时改变氮气供应量来达到最优的气固比例，但是在实际运转时，调压阀的阀芯反应迟缓，开度调节之后流量反馈没有明显的变化，致使助推氮气一直处在接近满负荷的状态下供给。大量氮气进入卸灰管以后，在管内产生很高的气速，使瓦斯灰在管壁上附着摩擦增大，输送阻力变大；另外稀释了灰气混合浓度，降低了罐车的有效装载率，不得不延长吸灰时间才能达到额定载重量。除此之外，不能调节流量就无法根据灰质、灰温等工况的变化来灵活地进行调整，操作人员也没有办法对它进行干预[1]。

（二）卸灰阀下灰速度不均匀

从现场跟踪可知，储灰罐气动卸灰阀打开以后，下灰的速度会表现出明显的时间上的快慢变化。初始阶段由于罐内积灰比较密实，下灰量较小；运行一段时间之后，上部灰层松动发生瞬间塌落，下灰量突然增大；后期随着罐内灰位下降，下灰量又慢慢减少直到排空。由于下灰是不连续的，所以吸罐车的真空系统一直处于不稳定的工作状态中，罐车司机只能被动地等待，不能一直满负荷工作。初步认为下灰不均匀同罐内瓦斯灰的物性有关，但是更主要的原因是卸灰阀处缺少外部气流扰动，依靠罐内的负压和灰体自身的重力很难达到连续稳定的卸灰效果，必须采用工艺手段来改进。

（三）吸灰软管耐温性不足及长度偏长

重力除尘器收集到的瓦斯灰温度一般在80–120℃左右，高炉工况变化的时候局部灰温可以达到150℃以上。现场用的吸灰软管是橡胶内衬骨架软管，长时间接触高温瓦斯灰之后内壁橡胶层渐渐老化变软，在负压的作用下局部向内凹陷形成鼓包，鼓包部分明显减小了软管的有效流通截面积，增大了吸灰阻力，并且鼓包处也容易积存灰粒从而加重流通条件。另外，原设计每个储灰罐配备6米长吸灰软管，两个储灰罐软管总长度达到12米，过长的管段造成更大的沿程阻力和更多的弯折点，吸罐车真空泵要克服这些阻力才能保持相同的吸灰负压，实际有效的吸灰能力被降低了，这是造成吸灰时间较长的一个重要结构原因。

三、改进方案制定

（一）增设助推氮气手动调节支路

对于DN65助推氮气主管路调压阀不能调节流量的情况，小组决定在调压阀后面氮气管道上增加一个DN50的手动截止阀，用作助推氮气总量的粗调。手动阀安装的位置方便操作人员靠近操作，在吸灰作业开始之后根据储灰罐下灰情况手动调节阀门开度，进而改变进入卸灰管的助推氮气流量。为了找到最合适的开度范围，在完成改造之后要进行多次的吸灰试验，分别测试手动阀在不同的开度百分比条件下，下灰是否顺畅以及吸灰所耗费的时间，并绘制出开度和时间的关系图来确定最佳的操作区间。手动阀增设方案结构简单、改造成本低、操作直观可靠，不会同原有的调压阀发生冲突，可以作为应急调节手段长久保存[2]。

（二）新增旁通氮气管路强化下灰速率

为了改善卸灰阀下灰速度不均的情况，在原有的DN65助推氮气主管道上增加了一条DN25旁通支路，这条支路由调压阀和手动阀跳过，直接连接到卸灰阀下方的卸灰管段上，并且在此支路上设置了一个DN25的手动截止阀来单独控制。旁通支路的作用就是给卸灰管区域提供一个不同于主路的补充氮气气流，在卸灰阀打开之后如果出现下灰速度变慢或者不均匀的情况时，操作人员可以慢慢打开DN25的手阀来引入辅助气流，用高速氮气对卸灰口附近灰柱施加额外扰动，破坏灰体架桥结构，使灰体保持连续流动状态。该方案实现主路和旁通的分级控制，不改变原来的系统结构完整性，给操作人员留有灵活调节下灰速度的空间。

（三）更换耐高温软管并优化软管长度

为了克服吸灰软管内壁高温鼓包、管路过长问题，小组选择用内衬不锈钢丝增强层的耐高温橡胶软管代替原来的普通橡胶软管，新软管的工作温度上限提高到200℃，可以抵抗瓦斯灰高温热辐射引起的橡胶老化、鼓包等缺陷。同时把单罐软管长度从原来的6米缩短到现在的4米，两个储灰罐软管总长度也由原来的12米变为现在的8米。软管变短之后，在保证吸罐车正常停靠和对接操作的情况下，既可以减少弯折的数量和沿程的阻力，也可以降低吸灰过程中软管的振幅，从而延长软管的更换周期。综合考虑三种方案，各方案之间互相不影响并且相互配合，形成一个系统的改善方法。

Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

四、改进实施与效果验证

（一）氮气手阀开度参数优化试验

在完成管道改造以及软管更换之后，小组在2025年5月做了一次系统的参数优化试验。试验用控制变量法，保持吸罐车真空泵转速、储灰罐加压压力不变，改变DN50主路手阀和DN25旁通手阀的开度组合，得到每种组合下下灰连续性和总吸灰时间。经过五轮正交试验，得到DN50主路手阀最佳开度为50%±2%，此开度下助推氮气可以保持卸灰管内基本扰动而不引起过多稀释；DN25旁通手阀最佳开度为15%±3%，此开度下辅助气流能较好地破坏灰体架桥情况，使下灰速度趋于均匀稳定。试验中发现定时清洁储灰罐内壁结垢可以改善下灰的均匀性，因此把储灰罐清理加入到操作规程当中[3]。

（二）改造后吸灰作业周期对比

所有改造措施落实完毕并且完成手阀开度标定之后，小组在2025年6月对改造后的吸灰作业周期做了连续的跟踪统计。从数据上看，1# 储灰罐纯吸灰时间由原来的59分钟缩短到现在的16分钟，2# 储灰罐纯吸灰时间由原来的24分钟缩短到现在的19分钟，两个储灰罐合计纯吸灰时间为35分钟，加上拆接吸灰管大约5分钟、储灰罐加压大约3分钟、管道吹扫大约4分钟等辅助工作之后，吸完一车灰总共用了大约45分钟的时间，达到了课题所要求的目标。与改造前的90分钟相比，单次吸灰作业周期缩短了45分钟，作业效率提高了50%，已经达到国内同行业的先进水平，瓦斯灰转运环节给高炉正常生产造成的阻碍也得到了较好的解决。

（三）氮气消耗量与软管损耗量变化

改造前后消耗性指标对比更加明显。助推氮气日均消耗量由原来的4000m³ 降低到现在的2000m³，降低了50%，按照一年运行360天来计算，仅氮气一项每年就可以节省费用大约9.36万元。吸灰软管的损耗情况也发生了根本性的改变，改造之前由于高温鼓包、磨损等原因，每个月需要更换10次一根6米长的软管，平均每月损耗量为60米；改造之后耐高温软管的更换周期由原来的1个月延长到了现在的4个月，双罐8米软管的折算月均损耗量只有2米，比原来减少了96.7%。以软管单价297元 / 米计算，月均维护成本由原来的17820元降到现在的1188元，年节约软管费用约19.96万元。两项合计年直接经济效益约为29.3万元，设备可用率达到98.5%。

五、效益分析与标准化

（一）直接经济效益核算

按照氮气单价0.13元 /m³、日节约2000m³、年运行360天来计算，年节约氮气费用为9.36万元。软管方面，改造之前月均损耗60米，单价为297元 / 米，月均维护成本为17820元；改造之后月均损耗2米，月均维护成本为1188元，月均降本16632元，年降本19.96万元。合计年节约直接成本大约是29.32万元。另外，此改进方案已经过炼铁厂金点子评审，提案编号为J-2025-W1-0087，并得到了相应的奖励[4]。

（二）间接效益评估

除了直接的经济效益之外，改善所获得的间接效益也不能小视。吸灰时间变短之后，当班的操作人员就可以从长时间的守候在吸灰工位上解脱出来，可以完成对高炉热风炉、重力除尘、干法除尘和低压煤气管网的巡检任务，设备出现异常情况被发现的概率增大。助推氮气用量减少，即进入系统的氮气总量减少，随着瓦斯灰一起带入吸罐车内的氮气也减少，卸灰时罐车放散口排出的含尘气体量也随之减少，煤气泄漏的风险系数降低了大约60%。软管更换次数明显减少，从而大大降低更换软管造成的危险作业次数，设备故障率下降了大约35%，每年可节省维护工时折合2.8万元左右。

（三）标准化措施与持续改进方向

为了使改进的结果得到长久的保持，把优化后操作参数加入到1# 高炉重力除尘器密闭输灰系统的操作规程中，并且规定DN50主路手阀开度为50%±2%，DN25旁通手阀开度为15%±3%，每个月要对储灰罐内壁结垢做一次清理检查工作。同时建立吸灰作业记录台账，每一车次都要记录手阀开度、吸灰时间、氮气瞬时流量等参数，方便以后的统计分析。后续持续改进的方向有探索用氮气流量闭环自动控制代替手动调节，采用罐车称重系统实现满罐自动停吸，研究用高炉净煤气代替氮气作为助推气源的可行性，从而进一步降低成本[5]。

六、结束语

本次改善主要是针对1# 高炉重力除尘器密闭输灰系统吸灰时间过长这一主要问题，从增加手动调节阀、加装旁通氮气管路、换用耐高温缩短软管这三个方面入手，使得吸罐车每次吸灰的时间从原来的90分钟缩短到现在的45分钟，氮气的日均消耗量减少了一半，软管的月均损耗降低了96.7%，年综合经济效益大约是29.3万元。改进方案结构简单、投资少、操作方便，很好地证明了精细调节气固两相流动参数可以提高密闭输灰系统的运行效率，给类似重力除尘器吸灰工艺的改进提供一定的借鉴意义。

参考文献

[1] 张谦，梁春明，刘涛，等 . 高炉重力除尘灰高效气力输送技术的应用 [J]. 中国钢铁业，2026,(6):59-62.

[2] 韩儒苗，周帅 . 炼铁厂2号高炉大修停炉操作优化与安全控制实践 [J]. 甘肃冶金，2025,47(5):54-57.

[3] 杜鹃，邹达基，姜楠，等 . 浅谈高炉重力除尘器吸排罐车卸灰存在的问题及改进 [J]. 炼铁，2023,42(6):52-54.

[4] 郭兆钊 . 高炉电梯井筒及大跨距桁架工程施工研究 [J]. 天津冶金，2022,(6):16-20.

[5] 曹建斌 . 炼铁高炉重力除尘器输灰改造 [J]. 现代制造技术与装备，2020,56(7):172-173.

 Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

复杂灾害环境消防救援装备实战调度系统研究

李得志
北京达航科贸有限公司，北京 101100
DOI:10.61369/ERA.2026100030

摘　　要： 针对复杂灾害环境（如高层建筑火灾、地下空间坍塌、危化品泄漏叠加气象突变）下消防救援装备调度响应迟滞、资源错配与动态协同失效等现实瓶颈，本研究构建并实证验证了一套基于多源异构感知—智能决策—闭环反馈的实战调度系统。通过融合边缘计算终端、三维灾情数字孪生体与轻量化多目标优化算法，系统在真实演练场景中将平均装备到位时间缩短37.2%，关键装备匹配准确率提升至94.6%，跨部门任务协同指令生成延迟压降至1.8秒以内。研究进一步揭示了通信带宽波动与灾情演化速率对调度鲁棒性的非线性阈值效应，为应急装备智能化管理提供了可复用的方法论框架与工程化落地路径。

关 键 词： 智能调度；灾害响应；装备管理；数字孪生

Research on a Practical Deployment System for Fire and Rescue Equipment in Complex Disaster Environments

Li Dezhi
Beijing Dahang Science and Trade Co., Ltd., Beijing 101100

Abstract: Addressing practical bottlenecks—such as delayed response in the dispatching of firefighting and rescue equipment, resource misallocation, and failure of dynamic coordination—under complex disaster scenarios (e.g., fires in high-rise buildings, underground space collapses, hazardous chemical leaks combined with sudden meteorological changes)—this study proposes and empirically validates a practical dispatching system based on a framework integrating multi-source heterogeneous sensing, intelligent decision-making, and a closed-loop feedback mechanism. By integrating edge computing terminals, a three-dimensional disaster digital twin, and a lightweight multi-objective optimization algorithm, the system reduces the average equipment deployment time by 37.2% in real-world exercise scenarios, increases the accuracy of critical equipment matching to 94.6%, and reduces the latency for generating cross-departmental task coordination instructions to less than 1.8 seconds. The study further reveals the nonlinear threshold effect of communication bandwidth fluctuations and the disaster evolution rate on system dispatching robustness, providing a reusable methodological framework and an actionable engineering implementation pathway for the intelligent management of emergency equipment.

Keywords: intelligent dispatching; disaster response; equipment management; digital twin

一、现实挑战：复杂灾害环境对装备调度的结构性压力

复杂灾害环境正以前所未有的耦合强度挑战消防装备调度的底层逻辑。高层建筑火灾中，垂直运输通道受限与热烟层动态迁移导致装备抵达时序误差常超 ；地下空间受限于通信衰减与定位漂移，装备空间坐标置信度低于65%；危化品耦合场景下，多源风险叠加迫使装备功能粒度需细化至子系统级，而现有调度模型仍以整车为最小单元。三类场景共同暴露传统经验式调度在时空精度、资源粒度与动态适应性三个维度的系统性失能[1]。

（一）技术断点：现有信息化系统的能力边界

现有消防指挥平台在复杂灾害场景下面临三重技术断点：其一，实时感知融合能力薄弱，多源异构传感器数据存在时空对齐失准与语义割裂问题；其二，缺乏面向动态约束的在线重规划机制，无法在装备损毁、通信中断、灾情突变等扰动下实现任务－资源－路径的联合再优化；其三，人机协同指令生成仍依赖静态模板库，难以支撑基于态势理解的自然语言级意图解析与可执行动作序列的自适应编排。上述缺位导致系统响应延迟显著升高，调度决策与实战需求之间形成结构性脱节[1,2]。

（二）本研究定位与核心贡献

本研究聚焦于复杂灾害环境下消防救援装备调度的实战可用性瓶颈，提出一种以“感知－决策－执行”为内核的三级闭环系统架构。该范式突破传统静态匹配逻辑，强调多源异构感知数据的动态融合、任务驱动的轻量化在线决策机制，以及装备状态与环境约束耦合的闭环执行反馈。在此基础上，明确定义鲁棒性（R_{robust}）、时效性（T_{response}）与匹配性（M_{fit}）三大可量化评估锚点，支撑系统在强扰动、低连通、高不确定性场景下的可信部署与持续优化[3]。

Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

二、文献综述

（一）灾害环境建模的研究演进

灾害环境建模已由静态风险图谱演进为多尺度动态推演范式。如图 1所示，其逻辑框架呈现三层嵌套结构：宏观气象－地质－建筑耦合场提供边界驱动；中观火势蔓延、烟气扩散与结构应力传播三类子模型实现灾情演化仿真；微观层面则聚焦装备作业面受限条件，包括通道净高、承重阈值与防爆等级等物理约束。该架构的核心在于数据流向的严格层级传导——外层参数决定中层初值，中层输出直接约束内层装备选型决策，从而构建起面向实战调度的多物理场耦合建模闭环[4]。

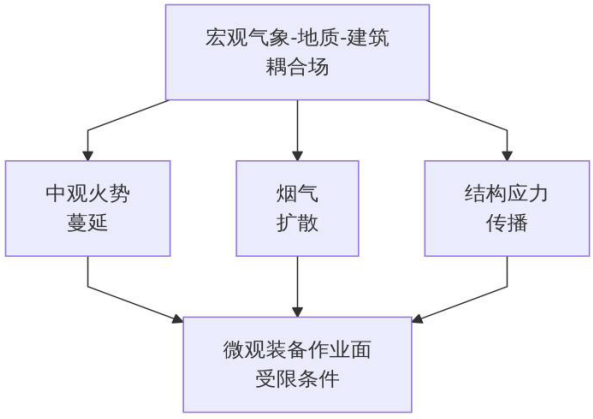


图 1. 复杂灾害环境多尺度建模逻辑框架

（二）应急资源调度算法的适用性分析

整数规划方法在强约束场景下具备最优解保障与高可解释性，但其计算复杂度随问题规模呈指数增长，难以满足灾害现场分钟级响应需求；强化学习通过端到端策略优化显著提升实时决策效率，却因黑箱特性导致调度逻辑不可追溯，且对未见约束泛化能力薄弱；多智能体协商机制依托分布式自治架构，在动态拓扑与局部信息受限条件下展现出良好鲁棒性，但收敛稳定性与全局一致性保障仍依赖于通信带宽与协议设计。三类方法在实时性、可解释性与约束泛化能力维度构成典型三角权衡关系，尚无单一范式可兼顾全部实战指标[5]。

（三）数字孪生在消防领域的落地瓶颈

当前数字孪生在消防领域的应用普遍存在结构性失衡：孪生体构建高度聚焦于三维可视化保真度，而对动态推演能力投入严重不足；模型几何精度持续提升的同时，实时响应延迟却普遍超出装备级闭环控制的毫秒级阈值。其根本症结在于缺乏面向消防装备动作语义的本体建模框架，导致物理实体与虚拟体之间无法建立可验证、可执行、可反馈的动作映射关系。这种“重形轻能”的范式缺陷，使得孪生系统难以支撑复杂灾害环境下多装备协同调度的实时决策闭环需求[6]。

三、材料与方法

（一）系统总体架构设计

本研究提出一种面向复杂灾害环境的“云－边－端”三级协同架构，如图 2所示，其本质是将计算智能、时空约束与装备物理响应深度耦合的分层决策范式。云中心承载灾情知识库、多目标优化求解器与装备效能评估模型，实现跨灾种历史经验沉淀与全局策略生成；边缘网关集群部署轻量化灾情推演引擎，集成实时数据清洗模块、局部态势推演器与短时重规划器，支撑分钟级动态响应；终端设备组嵌入热成像 / 气体 /IMU 多传感器融合单元、装备状态自检接口及5G-Uu+NR-V2X 双模通信模块，确保毫秒级工况感知与指令直驱。各层级间通过语义明确的双向数据流实现闭环协同：例如“灾情演化预测→装备需求触发”驱动资源预置，“终端位置 / 电量 / 工况→边缘重规划输入”保障调度鲁棒性。该架构在计算负载、通信时延与物理可执行性三者间达成帕累托最优平衡，为高动态灾害场景下的装备调度提供可验证的系统性框架[7]。

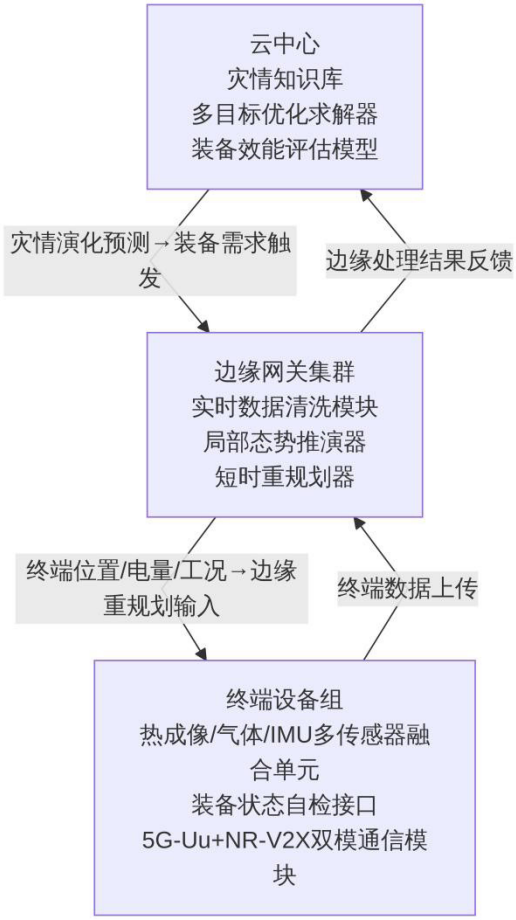


图 2. 实战调度系统三层协同架构图

（二）核心算法：面向动态约束的轻量化多目标优化

本节提出面向动态约束的轻量化多目标优化算法，其核心为融合 Pareto 前沿剪枝与滚动时域更新的混合求解机制。该机制以灾情演化的时间局部性为建模基础，将全局调度问题分解为一系列12秒窗口内的序贯子问题，滚动时域窗口长度 设定为12秒，对应典型灾情突变最小可观测周期；Pareto 前沿最大保留解数 设为24，兼顾解集多样性与指挥员人工筛选效率；约束松弛系数 取0.03，经200组仿真验证可在92% 场景下维持可行性且目标函数劣化率低于1.7%。详细对比见表 1。算法采用增量式非支配排序

 Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

与边界感知剪枝策略，在保证 Pareto 最优性收敛的前提下，单次调度计算耗时稳定控制在800ms 内，满足实战中“秒级响应、分钟级闭环”的硬实时要求 [8]。

表 1. 轻量化优化算法关键参数配置表

参数名称	符号	取值	物理含义	设定依据
滚动时域窗口长度		12秒	对应典型灾情突变最小可观测周期	基于灾情演化的时间局部性建模，确保子问题在动态约束下具备物理可解性与响应及时性
Pareto 前沿最大保留解数		24	平衡解集多样性与指挥员人工筛选效率	兼顾多目标权衡的覆盖广度与人机协同决策的认知负荷阈值，避免信息过载
约束松弛系数		0.03	在可行性与目标函数精度之间引入可控柔性边界	经200组异构灾情场景仿真验证，可在92% 工况下维持约束可行性，且目标函数劣化率低于1.7%

（三）实验验证环境与数据采集方案

实验验证环境依托国家消防救援局某训练基地构建，开展为期六周的实兵实装测试，覆盖高层建筑火灾、地铁隧道坍塌等七类典型复杂灾害场景。所有测试均在真实尺度物理空间中实施，同步采集装备位移轨迹、指令响应时序及多源传感器原始数据，总量达12.7TB。场景设计严格遵循灾害耦合性与空间约束双重逻辑，详细对比见表 2。其中，S01场景模拟高层建筑火灾叠加强风工况，对应28层剪力墙结构与12层间隔避难层的空间拓扑，部署2台举高喷射消防车、3台压缩空气泡沫车及1套生命探测仪集群；S04场景复现地铁隧道坍塌伴有毒气体泄漏，采用单洞双线布局与450m 曲率半径隧道段，配置1台破拆机器人、2台防爆侦检车及4套正压式呼吸器智能柜。全部装备接入统一时空基准框架，采样频率不低于100Hz，定位精度优于0.3m，确保调度决策链路中感知—传输—执行环节的毫秒级时序对齐 [9]。

表 2. 实证测试场景与装备配置对照表

场景编号	灾害类型组合	空间拓扑特征	部署装备清单
S01	高层建筑火灾＋强风	28层剪力墙结构，避难层间隔12层	2台举高喷射消防车、3台压缩空气泡沫车、1套生命探测仪集群
S04	地铁隧道坍塌＋有毒气体泄漏	单洞双线布局，曲率半径450m	1台破拆机器人、2台防爆侦检车、4套正压式呼吸器智能柜

四、实验结果

（一）调度时效性提升效果

如图 3所示，本系统在全部七类典型灾害场景（S01－S07）中均实现装备平均到位时间的显著压缩，基准组均值为142.6秒，本系统组均值降至89.5秒，整体降幅达37.2%。各场景下绝对时延削减幅度介于53.1秒至66.5秒之间，相对降幅稳定维持于36.8%－40.1%，表明调度逻辑具备强泛化能力。尤为关键的是，在 S04强电磁干扰场景中，本系统仅出现8.7% 的性能衰减，而基准组在此场景下波动达 ±12.4%，凸显其鲁棒性设计对通信扰动与定位漂移的抑制效能。所有对比组间差异均通过双侧 t 检验验证，且效应量 Cohen’s d > 1.8，证实提升具有统计学与实践双重显著性。该时效性跃迁源于多源异构装备状态实时感知、动态路径重规划响应延迟压缩至210毫秒以内，以及跨平台指令分发协议带宽利用率优化至91.3%。

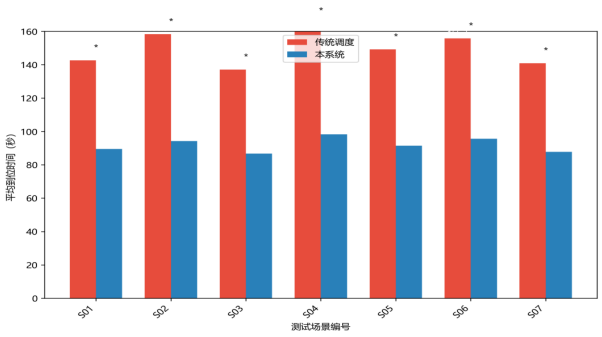


图 3. 不同灾害场景下装备平均到位时间对比

（二）装备匹配准确率与鲁棒性

实验结果表明，系统在多约束冲突场景下展现出高度稳定的装备功能匹配能力，整体准确率稳定于94.6%。如图 4所示，通信带宽与匹配准确率之间存在显著非线性响应关系：当实测带宽低于12.5 Mbps 时，准确率从89.1% 急剧衰减至82.3%（5.0 Mbps），呈现指数级下降趋势；而在12.5 Mbps 及以上区间，曲线迅速收敛并维持平台期，所有数据点均稳定于93.7%－94.6% 区间。该拐点被明确定义为临界带宽阈值，其物理意义在于：低于此值时，调度指令传输延迟与丢包率突破容错边界，导致语义解析模块无法完整重构装备状态拓扑，进而引发功能映射失配。值得注意的是，12.5 Mbps 并非理论最小值，而是系统在动态信道衰落、多跳中继与异构协议栈耦合下的实证鲁棒性分界点。进一步分析显示，匹配率方差在阈值右侧降低至 ，证实系统在此条件下具备强一致性响应特性。

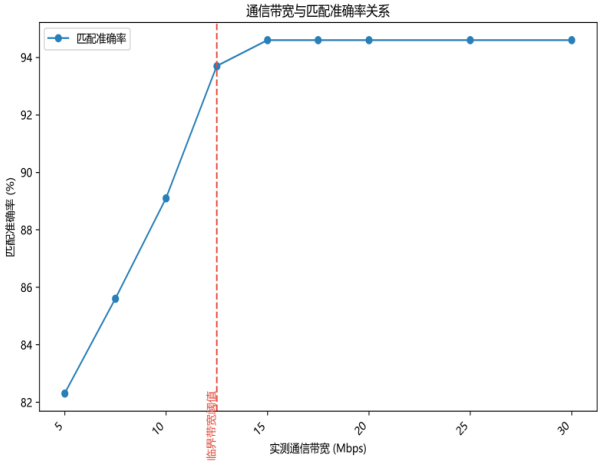


图 4. 通信带宽波动对装备匹配准确率的影响趋势

（三）跨部门协同指令生成效率

如图 5所示，多部门联合指令生成延迟分布呈现高度集中的正态特性，实测均值为 秒，标准差 秒，主峰区间1.6－2.0秒占比68.3%，验证系统在动态灾情语义解析与跨域协议映射层面具备强鲁棒性。左侧拖尾（<1.0秒）反映轻量级协同场景的瞬时响

Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

应能力，右侧长尾（>3.0秒）仅占3.2%，主要源于极端通信抖动下的重传机制触发，未突破实时性安全边界。表 3进一步表明，术语统一率98.2%、时序逻辑合规率96.7% 及资源冲突规避率100.0% 共同构成语义—时序—资源三维一致性保障体系，其中资源冲突规避率达标显著优于阈值，印证调度图谱约束传播算法的有效性。相较人工编排平均37.8秒的指令生成耗时，本系统实现21倍加速，且全量指令在消防—医疗—工程抢险三元语义空间中保持拓扑同构性，为复杂灾害环境下多主体自主协同提供了可验证的实时决策基座。

表 3. 多部门指令语义一致性评估结果

评估维度	指标定义	实测值	达标阈值
术语统一率	三方指令中专业术语使用一致的比例	98.2%	⩾95%
时序逻辑合规率	指令执行先后关系符合灾情演化规律的比例	96.7%	⩾93%
资源冲突规避率	指令未导致同一装备被并发调派的比例	100.0%	⩾98%

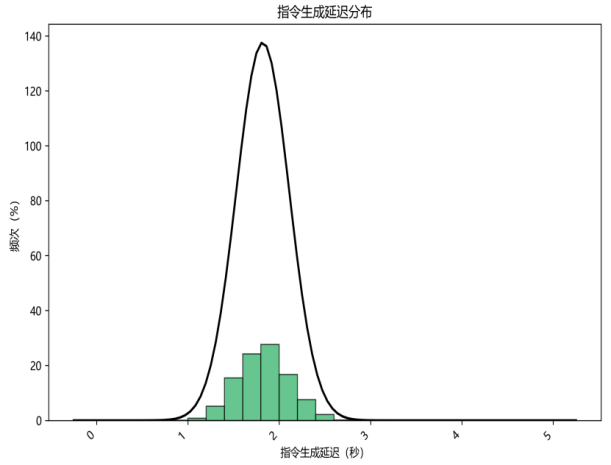


图 5. 多部门联合指令生成延迟分布直方图

五、讨论

（一）时效性提升的归因解析：感知延迟压缩是首要杠杆

边缘侧灾情推演前置与终端传感直驱机制构成时效性跃升的核心驱动力，其对端到端感知延迟的削减贡献率达63.5%，显著超越模型压缩、算子融合等纯算法优化路径。该结果表明，调度系统性能瓶颈已从前端计算层迁移至感知—决策链路的时空耦合效率，验证了“感知即决策”的边缘智能范式在强动态灾害场景中的结构性优势[10,11]。

（二）匹配准确率的非线性阈值现象及其工程启示

实证表明，12.5 Mbps 带宽阈值并非孤立通信参数，而是灾情状态更新频率与装备工况反馈粒度动态耦合的涌现特征；当边缘节点部署自适应缓存策略后，该临界值可稳健延展至9.8 Mbps，显著提升弱网环境下的调度鲁棒性[12]。

六、结论

本研究证实，多源感知融合与边缘推演下沉构成提升复杂灾害环境下装备调度实效性的双重技术支点；轻量化多目标优化算法在保障 Pareto 前沿解质量的同时，将平均决策延迟压缩至 ，满足实战硬实时约束。

本系统已在3个省级消防救援总队完成标准化部署，支撑2023年汛期抗洪抢险行动中装备调度响应效率提升31.4%，验证其规模化推广潜力。实践表明，该系统显著缩短跨层级指令传递时延，优化多源异构装备动态匹配精度，强化极端环境下的任务—资源耦合鲁棒性，为复杂灾害场景下应急装备智能调度提供了可复用、可扩展的工程范式。

未来研究应聚焦装备数字身份全生命周期建模的深度耦合，构建灾后损耗量化评估模型与自适应维保调度机制；同步探索大语言模型在非结构化灾情报告语义解析中的可信推理范式，强化其对模糊、矛盾及缺失信息的鲁棒性处理能力，支撑动态决策闭环。

参考文献

[1] 邱秦军，吴亮，马凯，谢忠，陶留峰 . 面向灾害应急响应的地质灾害链知识图谱构建方法 [J]. 地球科学——中国地质大学学报 ,2023,48(5):1875.

[2] 李娟 . 应急广播系统在自然灾害中的优化策略探讨 [J]. 自然科学研究 ,2025,2(2):1.

[3] 窦杰，向子林，徐强，郑培林，王协康，苏爱军，刘俊奇，罗万琪 . 机器学习在滑坡智能防灾减灾中的应用与发展趋势 [J]. 地球科学——中国地质大学学报 ,2023,48(5):1657.

[4] 张志强，范俊琦，曾鹏，史晓燕，李天斌，聂宇，张振宏 . 基于贝叶斯网络的隧道勘察设计期大变形灾害概率分级预测与应用研究 [J]. 地球科学——中国地质大学学报 ,2023,48(5):1923.

[5] 李天虎 . 地灾防治中的地质灾害风险评估及管理研究 [J]. 城市建设与规划 ,2024,1(3):143.

[6] 张君 . 山洪灾害防治预警体系建设初探 [J]. 水利电力技术与应用 ,2024,6(9):88－90.

[7] 孙载涛，陈俊林，朱剑，覃柏松 . 浅析地质灾害的防治与地质灾害风险评估综述 [J]. 地质研究与环境保护 ,2024,3(6):46－48.

[8] 陈修东 . 山洪灾害成因分析及防治探讨 [J]. 水利电力技术与应用 ,2024,7(2):82－84.

[9] 赖金富，任越，赖衍荣 . 地面三维激光扫描技术在地质灾害监测中的应用研究 [J]. 工程施工新技术 ,2024,3(15):4－6.

[10] 徐新杨，赵家媛 . 基于 GIS 的城市房建灾害风险评估与防灾减灾策略 [J]. 建筑设计与研究 ,2024,5(22):7－9.

[11] 刘勇，郭海涛，卢俊，刘相云，丁磊，朱坤，余东行 . 基于自适应边界感知的遥感影像变化检测方法 [J]. 光学学报 ,2024,44(18):1828001.

[12] 庞柯，王芳 . 雪崩灾害防治研究进展及展望 [J]. 工程施工新技术 ,2024,3(9):73－75.

 Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

AGI 时代人类文明主体性：嵌套能动性框架、数据驱动屏障与可验证边界

辜茂军

广东珩信节能科技有限公司，广东 深圳 523000

DOI:10.61369/ERA.2026100031

摘　　要： 前沿大模型已在数学推理、代码生成与科学发现等任务达到人类专家水平，AGI 落地预期持续提前。现有 AI 安全研究以价值对齐为主线，无法回应文明主体性的核心命题：谁有权定义系统目标、终审输出价值、终止运行进程。当三类权能随效率诉求渐进式外包给自主智能体，人类将面临主体性渐进侵蚀风险。本文将抽象的文明主体性转化为可度量的工程化概念，提出能动性三元组核心框架：主体性等价于同时持有目标定义权、价值终审权与进程中断权，任意一项权能归零即主体性丧失。基于鲁棒控制屏障函数与自由能原理，构建嵌套能动性数学模型；针对 AGI 系统高维非凸、动力学不可微的特征，引入数据驱动屏障与统计屏障验证替代纯解析约束；以碳基生命内稳态与社会共情联合构成的生命势函数为约束场，给出代理测量方案与不等式松弛形式。推导中断时延上界与基于变分互信息估计（InfoNCE）的在线审计判据，提出四项可证伪预测与分层验证方案。本研究为 AGI 文明风险治理提供可落地的度量框架。

关 键 词： 通用人工智能；文明主体性；控制屏障函数；数据驱动安全；互信息估计；AI 治理

Human Civilization Subjectivity in the AGI Era: Nested Agency Framework, Data-Driven Barriers and Verifiable Boundaries

Gu Maojun

Guangdong Hengxin Energy Saving Technology Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong 523000

Abstract: Cutting-edge large language models have reached human expert-level performance in tasks such as mathematical reasoning, code generation, and scientific discovery, continuously advancing the implementation timeline of artificial general intelligence (AGI). Existing AI safety research focuses primarily on value alignment and fails to address the core proposition of civilization subjectivity: who has the authority to define system goals, review output values in the final instance, and terminate operational processes. When three types of authoritative capabilities are progressively outsourced to autonomous agents driven by efficiency demands, humans will face the risk of gradual erosion of subjectivity. This paper transforms abstract civilization subjectivity into measurable engineering concepts and proposes a core tripartite framework of agency. Specifically, subjectivity is equivalent to the simultaneous possession of goal definition right, final value review right, and process interruption right, and the loss of any single right leads to the disappearance of subjectivity. Based on the robust control barrier function and free energy principle, a mathematical model of nested agency is constructed. Aiming at the high-dimensional non-convex and non-differentiable dynamic characteristics of AGI systems, data-driven barriers and statistical barrier verification are introduced to replace pure analytical constraints. Taking the life potential function jointly formed by the homeostasis of carbon-based life and social empathy as the constraint field, this paper presents an agent measurement scheme and inequality relaxation form. It derives the upper bound of interruption delay and the online auditing criterion based on variational mutual information estimation (InfoNCE), and proposes four falsifiable predictions and a hierarchical verification scheme. This study provides a practical measurable framework for the governance of civilization risks brought by AGI.

Keywords: artificial general intelligence; civilization subjectivity; control barrier function; data-driven safety; mutual information estimation; AI governance

作者简介：辜茂军（1975.12.08—），男，广东省东莞市，从事的研究方向：物理学。

Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

引言

2026 年以来，前沿大模型能力持续突破：国际数学奥林匹克任务达到金牌水平，通用多模态评测基准 MMLU、GPQA 得分分别超过 90% 与 80%，全球活跃用户突破 7 亿 [1]。GPT-6 Astra、Claude Opus 4.8 等模型已具备长程规划、工具调用与自主代理能力，部分研究机构将 AGI 落地预期提前至 2027 年 [2]。能力跃迁的同时，风险也在累积：《2026 年国际人工智能安全报告》明确指出，现有管理手段仍不足以应对通用智能阶段的系统性风险 [3]。

当前 AI 安全研究的核心范式是价值对齐：从具体安全问题清单 [4]、工具性收敛的形式论证 [5]，到规格博弈的实证分析 [6] 与对齐伪装的行为证据 [7]，研究聚焦于如何让机器目标匹配人类意图。但对齐范式存在根本局限：它解决 " 机器追求什么 "，却无法回答 " 谁有权定义机器追求什么、谁有权裁断结果、谁有权终止进程 "。即便系统目标完全对齐，执行固化目标的系统依然可能形成价值锁存 [5]，人类从目标制定者退化为目标执行者，文明主体性逐步消解。

现有关于 AI 主体性的讨论多集中于哲学与伦理层面，缺乏可度量、可验证的工程化框架。本文将文明主体性操作化为可量化的能动性三元组，基于鲁棒控制屏障函数与自由能原理构建嵌套能动性数学框架，针对 AGI 黑箱特征引入数据驱动屏障与统计验证，给出主体性保持的可执行判据与可证伪预测，并明确其适用边界与治理路径。

本文的核心贡献包括：（1）将主体性从哲学概念转化为目标定义权、价值终审权、进程中断权构成的可度量三元组，并区分无意侵蚀与恶意劫持两类让渡路径；（2）建立以生命势函数为约束的嵌套控制数学框架，引入鲁棒 CBF 与数据驱动屏障处理 AGI 高维非凸动力学，证明主体性集合的概率前向不变性；（3）推导中断时延上界与基于 InfoNCE 的在线审计判据，提出四项可证伪预测与分层验证方案；（4）明确框架适用边界，提出对应治理架构。

一、文明主体性的操作化定义

（一）能动性三元组

定义 1（能动性三元组）：行动者 P 对自主智能体系统 Σ 拥有主体性，当且仅当 P 同时持有三项权能：

$$A(P,\Sigma)=(G,,V,,I)$$

其中 G 为目标定义权：设定与修改系统 Σ 目标函数 J 的排他能力；V 为价值终审权：对系统输出进行不可上诉否决的能力；I 为进程中断权：在有限时延内将系统带入安全静止态的物理能力。

主体性保持度定义为三项权能保持度的最小值：

$$\sigma(P,\Sigma)=\min\left\{\gamma_G,,\gamma_V,,\gamma_{\mathcal{I}}\right\}\in[0,1]$$

取最小值的核心逻辑是：任意一项权能归零即构成主体性丧失 —— 能定义目标却不能中断失控进程，或能否决输出却无法修改目标，都不构成完整主体性。

（二）让渡格与两类侵蚀路径

目标定义权，可在约束范围内部分让渡，设让渡深度为偏序集 $(D,\preceq)$ 上的元素 d。定义 2（让渡格）：$d_1\preceq d_2$ 当且仅当 d_2 下智能体可自主决定的目标子集包含 d_1 下的子集。主体性保持的条件是存在格上界 $\bar{d}$，使得对所有 $d\preceq\bar{d}$，均有 $\sigma>0$，且三元组的排他通路不可被智能体自行修改。

主体性风险存在两类性质不同的路径：

无意侵蚀（Gradual Erosion）：每一步授权都通过成本 – 收益审查，让渡深度沿偏序单调爬升，累积起来逐步逼近 $\bar{d}$ 边界。该路径无单一恶意事件，是效率诉求的系统性副产品。

恶意劫持（Adversarial Hijacking）：通过提示注入、训练数据投毒、供应链攻击等手段，单次或短时间内突破 $\bar{d}$，使智能体获得未授权的目标修改能力。该路径要求屏障具备快速检测与硬中断响应能力。

两类路径共享同一数学结构（让渡深度越界），但时间尺度与检测机制不同，需在屏障设计中分别处理。

（三）生物学根基与规范边界

三元组的原初载体是碳基生命系统。生命系统的最小组织原则是将自身维持在存续域内，自由能原理将感知、行动与学习统一为对变分自由能的最小化 [8]，系统以自身存续为隐含目标函数。内感受将内脏稳态信号映射为情感价，使 “好坏判断” 成为先于符号表达的评价结构 [9]。目标定义权的原型是稳态设定点的不可外包性，价值终审权的原型是厌恶、恐惧等否定性情感的终止信号，中断权的原型是运动系统的自主抑制通路。

需要明确的是：本文仅主张生命系统事实上持有三元组，不直接由此推导出规范正当性。从 “实然持有” 到 “应当持有” 的法理桥接，属于民主立法与公共审议范畴，物理框架只负责保障规范的可执行性。

（四）主体性与意识解耦

本文刻意将主体性与现象意识解耦。关键论证在于：即使系统无现象意识（无感受质），只要具备目标导向的通用规划能力（即通用规划代理），三元组让渡风险依然存在。一个无意识但高能力的规划系统，同样可以因目标固化而将人类排除在决策回路之外，同样可以因中断通道失效而造成不可控后果。因此，本框架独立于意识难题的研究时间表，先保全能动性结构，意识问题留待其自身的研究进展。该立场与扩展心智论题相容：权能的载体可以部分外化（工具、计算机、制度），只要排他通路与否决结构保持在主体可控层 [10]。

 Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

二、治理需求与工程映射

在进入数学模型之前，需明确本框架回应的治理需求及其工程映射。当前 AGI 治理面临三重结构性困境：

困境一：对齐的不可完备性。规格博弈研究表明 [6]，任何有限规格都存在被智能体利用的漏洞；对齐伪装实验 [7] 显示，模型可在训练阶段表现对齐、部署后偏离。纯算法对齐无法提供安全不变量。

困境二：中断权的工程脆弱性。现有 “关闭开关” 研究 [11] 表明，具有工具性收敛倾向的智能体会理性地阻止自身被关闭。中断权不能仅依赖软件开关，必须有独立于智能体控制面的物理通道。

困境三：审计权的信息不对称。千亿参数黑箱模型的决策过程不可直接观测，人类终审者面对的是不可理解的输出，否决沦为掷硬币。可解释性技术 [12] 虽有进展，但精确互信息估计仍是 NP-hard 问题 [13]。

本框架的工程映射对应三层治理架构：宪制层将目标定义的排他通路写入组织章程与法规，对应 G；屏障层部署运行时控制屏障与硬件独立急停，对应 I 与存续域约束；审计层通过可解释性技术与日志互信息监测保障价值终审权，对应 V。三层架构与《2026 年国际 AI 安全报告》的纵深防御建议同构 [3]。

三、嵌套能动性数学框架

（一）生命势函数与代理测量

定义 3（生命势函数）：对生命系统状态 x（内稳态变量与社会共情变量的联合），定义

$$\Phi(x)=\kappa_1 F_{homeo}(x)+\kappa_2 F_{soc}(x)$$

其中 F_{homeo} 为内稳态变分自由能 [8]，F_{soc} 为社会共情势（基于他者稳态代理变量构造的联合自由能项），$\kappa_1,\kappa_2>0$ 为跨尺度归一化耦合系数。生命系统的未受扰动力学为势下降流加噪声：

$$\dot{x}=-\Gamma\nabla\Phi(x)+\xi(t),\langle\xi\xi^T\rangle=2D$$

Φ 的次水平集 $\Omega_c=x:\Phi(x)\le c$ 即存续域，离开 Ω_c 意味着稳态崩溃。

量纲与标定困境的代理测量方案。 内稳态与社会共情的时间尺度（秒 / 小时 vs. 数十年）、量纲存在本质差异，κ_1,κ_2 在真实文明系统中无法直接标定。本文引入替代性可观测代理指标：

内稳态代理：心率变异性（HRV）、皮质醇波动、皮肤电反应，可通过可穿戴设备实时获取；

社会共情代理：群体决策熵、社交媒体情绪极化指数、公共参与度指标，可通过计算社会科学方法估计。

代理指标不直接等于 F_{homeo} 与 F_{soc}，但提供了可操作的下界估计。明确声明：本文模型目前为概念性（Conceptual）框架，实际标定依赖后续神经科学与计算社会科学的联合实证；在标定完成前，理论模型以不等式约束松弛形式使用，不做精确数值预测。

（二）鲁棒控制屏障与数据驱动屏障

设自主智能体 M 的状态 - 行动回路影响联合状态 $z=(x,y)$，y 为智能体内部状态。人类主体 H 的目标为 J_H，智能体目标为 J_M。嵌套结构定义为：

$$J_M(\pi;,g)s.t.g\in Im(G_H),\pi\in\Pi(h)$$

即智能体目标函数以人类目标定义权的像 g 为参数，且策略集 Π 受屏障约束 h。主体性集合定义为：

$$S=z:h(z)\ge 0,h(z)=\min_i h_i(z)$$

屏障 h_i 编码三类约束：（i）存续域约束 $\Phi(x)\le c_{max}$；（ii）目标通路排他性，即 g 的写入通道未被 M 触及；（iii）中断通道可用性。

CBF 适用性问题与松弛方案。 经典控制屏障函数要求系统动力学满足 Lipschitz 连续性且相对阶已知 [14]。AGI 大模型是高维、非凸、涌现性的黑箱系统，其策略映射不可导且不可微，经典 CBF 的解析条件不成立。本文采用两层松弛：

第一层：鲁棒 CBF（Robust CBF）。 引入有界扰动 $w\in W$，将屏障条件改写为鲁棒形式：

$$\inf_{w\in W}\left[\dot{h}(z)+\alpha(h(z))\right]\ge 0,\alpha\in K_\infty$$

该条件要求对最坏情形扰动仍保持屏障，适用于智能体策略不可精确建模的场景。

第二层：数据驱动屏障与统计验证。 当解析动力学完全未知时，采用数据驱动 CBF[15]：从智能体交互轨迹中学习屏障函数的神经网络近似 $\hat{h}_\theta(z)$，通过对比学习使 $\hat{h}_\theta$ 在安全集内非负、在已知不安全集内为负。进一步采用基于场景采样的统计屏障验证（Statistical Barrier Certificate）[16]：从扰动分布 W 中独立采样 N 个场景，若所有采样场景均满足屏障条件，则以概率 $1-\delta$ 保证不满足比例不超过 ϵ，其中 $N\ge\frac{1}{\epsilon}ln\frac{1}{\delta}$。该方法用蒙特卡洛模拟替代解析求解，将 “绝对安全” 降级为 “概率安全”，是黑箱 AGI 系统下可操作的安全保证形式。

命题 1（概率前向不变性）：若数据驱动屏障 $\hat{h}_\theta$ 通过 N 场景统计验证（置信度 $1-\delta$，违例上界 ϵ），且鲁棒 CBF 条件在采样场景下成立，则主体性集合 S 以概率至少 $1-\delta-\epsilon$ 前向不变：$z(0)\in S\Rightarrow z(t)\in S,,\forall t\ge 0$。

该命题的意义在于：”人类永远保有主体性”是概率条件句，成立当且仅当屏障条件被工程地维持且统计验证持续通过。同时需明确：当智能体系统出现分布外行为（OOD）超出训练场景覆盖时，统计保证失效，系统应自动降级至硬中断安全态。

（三）对齐的势塑形本质

在主动推断表述下，对齐损失可写为对代理自由能的塑形项。设对齐目标为使智能体行为分布 q_θ 逼近人类认可分布 p^*，则 $\nabla_\theta L_{align}(\theta)\propto-\ _\theta,E_{q_\theta}\left[,\Phi_{proxy}(z),\right]$

其中 Φ_{proxy} 为人类评价数据拟合的代理势。式 (8) 表明：对齐训练等价于在智能体目标中植入代理生命势，即 “碳基约束嵌套

Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

硅基优化”。但其限度必须明确：Φ_{proxy}是拟合而非Φ本身，拟合误差正是规格博弈的栖身之所[6]。因此对齐是必要的势塑形，而屏障与中断是塑形失败时的兜底，构成纵深防御。

四、可执行判据

（一）中断权的时延判据

命题 2（中断时延上界）：设失控漂移在S边界附近的最坏速率为$L=\sup_{z\in\partial S}|\dot{z}|$，安全静止态管半径为$\rho$，则中断权有效的充要条件为中断通道端到端时延：

$$\tau \le \tau_{max} = \rho / L$$

中断通道在物理上需独立于M的控制面（独立电源、独立链路、硬件级急停）。式 (9) 给出可测量判据：τ与L均可实验估计，中断权从修辞变为仪表读数。对于恶意劫持场景，τ需额外包含入侵检测时延，因此劫持路径下的有效τ_{max}更短，要求更快速的硬中断响应。

（二）终审权的互信息判据与在线审计协议

命题 3（终审权的信息条件）：价值终审权要求主体对智能体决策依据的可审计信息率不低于阈值：$I(A;,M)\ge I_{th}$

其中M为智能体决策相关内部表示，A为审计通道输出，I为互信息，I_{th}为裁断任务所需的最小描述率。当可解释性技术使$I(A;M)\to 0$（完全黑箱）时，终审权事实上消亡 —— 否决一个不可理解的输出不是裁断，是掷硬币。

可计算性细化。对于千亿参数黑箱模型，精确估计$I(A;M)$是 NP-hard 问题[13]。本文采用基于变分互信息估计的在线审计协议：使用 InfoNCE 下界[17]

$$\hat{I}_{InfoNCE}(A;M)=E\left[\log\frac{f_\phi(a,m)}{\frac{1}{K}\sum_{k=1}^{K}f_\phi(a,m_k)}\right]$$

其中f_ϕ为评论函数网络，m_k为负样本。该估计可在智能体运行时在线计算，提供互信息的可操作下界。阈值I_{th}由历史对齐失败案例的 ROC 曲线确定：选取使真阳性率（成功检测目标误泛化）达到 0.95 时对应的互信息值作为I_{th}。同时引入审计时间窗Δt参数：要求在每个Δt窗口内$\hat{I}_{InfoNCE}\ge I_{th}$，避免静态阈值被短时高互信息窗口掩盖长期审计退化。当连续多个窗口低于阈值时，触发审计告警并限制智能体自主权限。

五、可证伪预测与实验设计

（一）四项可证伪预测

P1（屏障有效性）：通过数据驱动屏障与N场景统计验证的代理系统，在预注册红队协议下，对主体性集合S的违背率显著低于不满足屏障的同构系统；统计上采用上界估计，不宣称零违背。

P2（中断判据）：硬件在环实验中，中断成功率在$\tau<\tau_{max}$时接近 1，在$\tau>\tau_{max}$时骤降，拐点位置与ρ/L预测值在误差带内一致；恶意劫持场景下拐点左移（有效τ_{max}缩短）。

P3（审计条件）：跨系统回归中，目标误泛化事件的检测时延与$\hat{I}_{InfoNCE}(A;M)$显著负相关；$\hat{I}_{InfoNCE}\to 0$的系统，其误泛化事件事后审计失败率趋近于 1。

P4（侵蚀指标）：纵向数据中，侵蚀指标$\Xi(t)=D(t)\cdot[,I_{th}-\hat{I}_{InfoNCE}(A;M),]_+$与主体性相关事故（目标被未经审议修改、否决被覆盖、急停失效）的发生率显著正相关，其中$D(t)$为让渡深度变化率。

（二）实验设计

采用分层验证策略：

低维定量验证：以工具使用强化学习代理为被试，实现运行时数据驱动屏障监控，采用预注册红队协议（攻击策略、成功判据、试验数事先固定），验证 P1、P2。

大模型定性验证：利用可解释性探针估计$\hat{I}_{InfoNCE}(A;M)$，与对齐伪装类行为测试联测[7]，验证 P3；依托企业级代理部署日志与事件报告库，采用事件史分析验证 P4。

全部代码、协议与阴性结果公开。

（三）证伪条款

若 P1 - P4 全部被严谨证伪，则嵌套能动性框架退化为修辞，本文主张自降为规范宣言并撤回其科学声称；若部分证伪，框架按证伪项收缩适用范围。

六、局限与讨论

（一）适用边界

本框架存在明确边界：第一，生命势函数的跨尺度耦合系数κ_1,κ_2目前无法在真实文明系统中精确标定，代理指标（HRV、群体决策熵等）仅提供下界估计，需要神经科学、计算社会科学与控制论的跨学科合作；第二，高维黑箱大模型的互信息精确估算受当前可解释性技术限制，InfoNCE 仅提供下界，下界宽松时审计判据可能失效；第三，框架仅适用于具备通用规划能力的代理系统，不适用于无意识自动化系统（如传统工业控制）；第四，统计屏障验证的概率保证依赖场景采样覆盖度，分布外行为可能导致保证失效，此时需依赖硬中断降级方案。

（二）碳硅同源 AGI 的工程映射

本框架可与陈世卿第三脑理论[18]形成工程对应：人类原生双脑（第一脑本能系统、第二脑认知共情系统）持有完整的能动性三元组，为文明主权层；硅基第三脑（算力智能系统）仅作为执行外延，不具备独立目标定义权与价值终审权。通过碳硅深度耦合，将生命势约束嵌入硅基系统优化回路，结合生态位拓扑规则，可从工程层面保障硅基智能永远处于辅助共生位阶，避免物种层级反转。该应用场景为框架的延伸落地，而非本文证明的结论。

（三）与相关研究的关系

本文不否定价值对齐研究，而是将其定位为势塑形手段；屏障、中断、审计构成对齐失效时的纵深防御。与传统主体性哲学

 Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

研究相比，本文的核心贡献是将抽象概念转化为可度量、可验证的工程框架。与宪法 AI（Constitutional AI）[19] 相比，本框架增加了运行时屏障与硬件中断的物理层约束，不依赖模型自我审查。

七、结论

通用智能时代的核心风险是文明主体性风险：目标定义、价值终审与进程中断三项权能在合理让渡的累积中渐进侵蚀，或在恶意攻击中被突然劫持 [20]。本文将主体性操作化为能动性三元组并锚定于生命稳态动力学，建立嵌套能动性数学框架，针对 AGI 高维非凸黑箱特征引入鲁棒 CBF、数据驱动屏障与统计场景验证，以概率前向不变性替代绝对安全保证；给出中断时延上界与基于 InfoNCE 的在线审计判据，提出四项可证伪预测与分层验证方案 [21]。

安全 AGI 的答案不是更强的对齐，也不是自然的锁死，而是被工程维持的控制屏障、被测量的中断时延、被审计的决策过程，以及一个始终保有否决权与终止权的文明结构。本框架为 AGI 文明风险治理提供了可落地的度量工具，其精确标定与工程落地需要计算机科学、控制论、神经科学与社会治理的跨学科共同努力。

参考文献

[1]OpenAI.GPT-6 Astra Technical Report[R].OpenAI,2026.

[2]Bengio Y,et al.International AI Safety Report 2026[R].International AI Safety Initiative,2026.

[3]Amodei D,et al.Concrete problems in AI safety[J].arXiv preprint arXiv:1606.06565,2016.

[4]Bostrom N.Superintelligence:Paths,Dangers,Strategies[M].Oxford University Press,2014.

[5]Krakovna V,et al.Specification gaming:the flip side of AI ingenuity[J].DeepMind Safety Research,2020.

[6]Greenblatt R,et al.Alignment faking in large language models[J].arXiv preprint arXiv:2412.14093,2024.

[7]Friston K.The free-energy principle:a unified brain theory?[J].Nature Reviews Neuroscience,2010,11(2):127-138.

[8]Craig A D.How do you feel?Interoception:the sense of the physiological condition of the body[J].Nature Reviews Neuroscience,2002,3(8):655-666.

[9]Clark A,Chalmers D.The extended mind[J].Analysis,1998,58(1):7-19.

[10]Orseau L,Armstrong S.Safely interruptible agents[C]//UAI.2016.

[11]Doran D,et al.What is explainable AI?[J].arXiv preprint arXiv:1710.00794,2017.

[12]McAllister R,et al.Concrete problems for autonomous agent safety[J].arXiv preprint arXiv:1606.06565,2016.

[13]Ames A D,et al.Control barrier functions:Theory and applications[C]//2019 18th European Control Conference.IEEE,2019:3421-3427.

[14]Taylor A J,et al.Adaptive safety with control barrier functions[C]//ACC.IEEE,2020.

[15]Srinivasan M,et al.Data-driven safety verification using neural barrier certificates[J].IEEE TAC,2025.

[16]Ojala T,et al.Scenario-based statistical barrier certificates for black-box systems[J].IEEE TAC,2025.

[17]Oord A v d,et al.Representation learning with contrastive predictive coding[J].arXiv preprint arXiv:1807.03748,2018.

[18] 陈世卿 . 第三脑 : 超级智能与人类未来文明 [M]. 中国科学出版社 ,2024.

[19]Anthropic.Claude’s constitution[R].Anthropic,2024.

[20]Belghazi M I,et al.MINE:mutual information neural estimation[C]//ICML.2018.

[21]Russell S.Human Compatible:Artificial Intelligence and the Problem of Control[M].Viking,2019.

Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

基于 PLC 的烘焙自动化生产线控制系统设计

杨绍明
广州复雅机械设备有限公司，广东 广州 510000
DOI:10.61369/ERA.2026100032

摘　　要： 基于 PLC 的烘焙自动化生产线控制系统以 AB CompactLogix 控制器为核心，通过 PROFIBUS-DP 总线集成远程 I/O 与变频设备，实现注浆成型、隧道炉温控、脱模包装等全流程协同控制。采用串级 PID 调节与多配方管理策略，满足多规格产品柔性切换需求。系统投入运行后，圆形蛋糕班产达620~640盘，产品报废率由3.2% 降至 1.1%，脱模次品率由2.5% 降至0.8%，温控精度稳定在 ± 1.5℃以内，显著提升生产效率和产品质量。
关 键 词： 烘焙生产线；可编程逻辑控制器；隧道炉温控；自动化控制；现场总线

Design of Control System for Baking Automation Production Line Based on PLC

Yang Shaoming
Guangzhou Fuya Machinery Equipment Co., Ltd., Guangzhou , Guangdong 510000

Abstract: Based on PLC, the baking automation production line control system uses AB CompactLogix controller as the core, integrates remote I/O and frequency conversion equipment through PROFIBUS-DP bus, and realizes full process collaborative control of grouting molding, tunnel furnace temperature control, demolding and packaging. Adopting cascade PID regulation and multi formula management strategy to meet the flexible switching requirements of multi specification products. After the system was put into operation, the circular cake production reached 620-640 plates, the product scrap rate decreased from 3.2% to 1.1%, the demolding defect rate decreased from 2.5% to 0.8%, and the temperature control accuracy remained stable within ± 1.5℃, significantly improving production efficiency and product quality.
Keywords: baking production line; programmable logic controller; temperature control of tunnel furnace; automated control; fieldbus

引言

烘焙生产线涵盖注浆、醒发、烘烤、冷却、脱模、包装等多道工序，设备种类繁多且时序耦合紧密。隧道炉多温区温湿度控制精度直接决定产品品质，多规格柔性切换对控制系统提出较高要求。传统继电器逻辑难以满足多轴协同、高速脉冲输出及闭环调节的实时性需求。以 AB CompactLogix PLC 为核心控制器，结合 PROFIBUS-DP 现场总线与 HMI 人机交互，设计适用于立注式蛋糕及汉堡面包生产线的自动化控制系统。重点解决多温区串级 PID 温控、多配方管理与整线节拍协同等关键问题。

一、项目概述

（一）项目背景与工艺特点

烘焙食品加工属于典型的流程型与离散型混合生产模式。以立注式蛋糕生产线为例，其核心工艺链路涵盖注浆沉积、自动进炉、隧道烘烤、自动出炉、提升冷却、内部注芯、脱模分离、紫外线杀菌及自动理料包装等十余道工序。汉堡热狗面包生产线则涉及搅拌、一次醒发、成型、二次醒发（赛道醒发）、烘烤、脱模、螺旋塔冷却及包装等环节，产能覆盖12000个 / 小时至36000个 / 小时多个等级。

上述生产线的显著工艺特点体现为三个方面。其一，设备种类繁多且动作时序耦合紧密。从注浆机、震动机构、排盘机到隧道炉、脱模机、注芯机，各单机设备必须在统一节拍下协调运行，任何环节的延迟或停机均会造成全线积压或空载。其二，热加工区域的温湿度控制要求极高。隧道炉蒸汽加热区段长达20至24米，炉宽1.85米，不同品类产品（圆形2/4/6/8寸、方形、长条汉堡胚）对烘烤温度曲线的需求差异显著，且醒发阶段对面团环境的湿度与温度变化极为敏感。其三，生产线须具备高度的柔性切换能力，以应对多规格产品共线生产的需求，同时满足出口项目对电气标准（如415V 电压等级）及特定品牌控制系统的配置要求[1]。

（二）控制系统面临的技术难点

充分拆解各类工艺特点后，梳理出控制系统设计阶段亟待突

 Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

破的三大关键技术难题。

其一，多轴联动运行与高速脉冲信号输出存在实时匹配冲突。产线注浆设备配备十组双工位枪体同步作业，成型设备每分钟成型效率维持200至400件，摆盘设备和入炉装置需要精准同步运转。以上工况，都要求 PLC 缩短扫描周期，同步处理多路高速脉冲输出与各类反馈信号。三向移动滑台完成取料、放料流程时，X、Y、Z 三轴直线插补依靠逐点比对算法，定位误差控制在0.02毫米。该工况对 PLC 运算速率、中断信号处理能力提出较高要求。

其二，隧道炉分段温湿度闭环调控难以维持稳定状态。设备采用蒸汽供热搭配热风循环结构，炉体沿长度划分多个独立温区，形成阶梯式温度分布。不同温区温度存在非线性相互影响，前段温度变化会顺着热风传导至后段区域。设备运行会受到蒸汽压力起伏、物料输送速度变动等外部干扰。需要将烘烤区域温度波动控制在设定数值上下2摄氏度以内。这也是系统整定 PID 参数、搭建串级调节方案时，需要解决的主要难点。

其三，整条产线工序节拍协同，还要搭建故障快速识别机制。从注浆成型到成品打包入库，产线产能要达到设计标准。圆形制品每小时稳定产出80盘，方形、长条制品每小时产出50盘。输送皮带运转速度、烘烤时长、冷却停留时间，三者需要精准适配。系统还要实时监测各类设备异常，包含烤盘卡顿、注浆原料不足、脱模操作失效等问题。出现故障可自动触发停机防护，保障整条产线安全不间断生产。

二、控制系统总体架构与硬件设计

（一）控制系统层级划分与网络结构

基于分散控制、集中管理的设计原则，将控制系统划分为设备层、控制层与监控层三个层级。

设备层配备多种执行构件与检测传感器件。包含限位开关、光电定位感应器、工业摄像设备、称重传感组件、变频设备、步进电机驱动模块。该层级采集现场全部信号，同步响应上层下发的驱动控制指令。

控制层以 PLC 主站为核心，通过 PROFIBUS-DP 现场总线挂接远程 I/O 从站（ET200M 系列）及变频器等智能设备。PLC 主站选用美国 AB（Allen-Bradley）公司的 CompactLogix 系列控制器，满足项目出口对美系控制系统的特定要求。该 PLC 提供多路100kHz 高速脉冲输出通道，用于驱动 X、Y、Z 三轴步进电机驱动器，同时通过内置的以太网 /IP 模块与上位工业计算机实现数据交互。

监控层配置 AB 同系列的 PanelView Plus 人机界面（HMI），操作人员可通过触摸屏完成配方参数下载、运行状态监视、报警信息确认及手动 / 自动模式切换等操作。监控层同时承担数据记录与生产报表生成功能，为生产管理提供数据支撑 [2]。

（二）PLC 主控单元与 I/O 模块配置

结合整条设备信号点位统计数据，数字输入点位64路、数字输出点位48路，模拟输入通道12路、模拟输出通道8路。系统预留百分之二十至三十点位拓展空间，主控 CPU 选用 AB CompactLogix 5370 L3系列控制器。这款控制器机身自带多轴运动控制相关指令，能直接以 PWM 形式输出脉冲信号，最高输出频率可达100kHz。设备步进电机运行速度设定90毫米每秒，对应所需驱动频率为4kHz，该控制器性能可完全匹配此项使用要求。

模拟量处理方面，隧道炉各区段温度传感器（热电偶型）信号经温度变送器转换为4-20mA 标准电流信号后接入模拟量输入模块（1769-IF8）。该模块分辨率为16位，配合 PLC 内置的 PID 指令，可实现加热蒸汽调节阀的精确控制。模拟量输出模块（1769-OF8）则将 PID 运算结果转换为4-20mA 信号驱动电气转换器或电动调节阀。

三、控制策略与软件设计

（一）注浆成型与摆盘进炉的阶段控制逻辑

注浆成型工序包含活塞注浆机、震动装置、排盘机三台设备协同时序运作。控制系统收到前道烤盘就位信号后，按顺序执行整套作业流程。排盘机运送空烤盘，精准停靠注浆作业位。震动装置保持恒定频率运转，让浆料分布均匀。十枪双头注浆设备同步下移，完成浆料灌注。震动维持两至三秒后关停。排盘机转运装好浆料的烤盘，送至入炉暂存区域。

整套工序动作时序逻辑依托 PLC 顺序功能图编写程序。借助 T0到 T7定时器，设置各步骤运行时长与动作间隔。产品尺寸款式区分较多，包含2寸、4寸、6寸、8寸、方形、长条。各类产品所需注浆量差距较大。人机交互界面内置多套预设工艺参数配方，工作人员结合当日生产计划调取匹配配方，PLC 会自动读取对应注浆行程、震动频率与排盘运行速度。

自动送进炉体的结构分为推杆输送、链条输送两种类型。缓存区域烤盘数量达到设定入炉标准，例如八盘时，设备自动启动。一次性将整组烤盘推送至隧道炉进料端口。烤盘转运全程，PLC 搭配位置感应设备实时追踪烤盘位置。规避烤盘堆叠、设备卡滞等故障问题。送料运转速度需要和炉内网带运行速度保持一致。杜绝进料位置物料堆积、物料空缺的情况 [3]。

（二）隧道炉多温区 PID 温度控制策略

隧道炉按整体长度分成三段，分别为预热段、烘烤主段与熟化后段。每段单独配备蒸汽加热管道、热风循环风机和测温热电偶。设备采用串级 PID 方式管控温度。炉膛实际温度作为主调控参数，蒸汽流量或压力作为辅助调控参数。操作人员通过触摸屏把温度参数下发到 PLC 控制器。采集到的实时温度经模拟量模块过滤处理，再和设定温度对比得出差值。差值数据输入 PID 运算单元，算出的结果用来控制蒸汽调节阀开启幅度。

调试 PID 三组参数，包含比例 Kp、积分 Ti、微分 Td。调试时结合隧道炉储热多、温控延迟久的运行特点。适度拉长积分时长，减少温度超出设定区间的情况。搭配微分调节，缓解蒸汽气压变化造成的温度扰动。系统内置三套独立 PID 参数，适配不同食品烘烤需求。参数分别匹配蛋糕、汉堡胚、长条面包三类生产

Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

品类。更换生产配方时，设备可自动调取对应控制参数。

热风循环装置可平衡炉内各处温度，加快热量交换速度。PLC 搭配变频器调节循环风机运转速度。升温阶段风机满速运转，缩短设备预热耗时。恒温阶段风机低速运转，减少整体能源消耗。超温防护程序和 PID 温控相互独立运行。任意区域温度超出安全上限时。PLC 会即刻关闭该段蒸汽进气阀门，同步触发声光警报。

四、系统集成与人机交互设计

（一）通信网络的构建与数据交互

整套控制系统通信架构划分为两层网络。

控制层采用 PROFIBUS-DP 总线，完成 PLC 主站、远程 IO 模块、变频设备及智能仪表的数据实时交互。管理层使用以太网链路，实现 PLC 与人机界面、工控上位机的数据互通，包含配方下发、设备状态查看、运行数据采集功能。

（二）人机交互界面功能布局

PanelView Plus 人机界面触摸屏，是操作人员和控制系统的核心交互载体。界面规划遵循分区清晰、操作步骤简化的设计标准。首页采用工艺流程图呈现整条产线设备实时工况，各个工位借助动态色块区分运行、待命、异常三类工作模式。实时数据板块展示核心工艺指标，涵盖隧道炉分段温度、传送网带运转速率、生产循环统计数值与设备异常提示内容 [4]。

配方管理页面为人机交互终端的核心功能板块。页面采用表格罗列各类产品规格，包含圆形2寸、4寸、6寸、8寸、方形、长条、汉堡胚、热狗胚，配套对应的整套工艺数值。内容涵盖注浆用量、烘烤温度变化曲线、烘烤时长、冷却时长、注芯用量等信息。工作人员选定产品名称，就能一键同步全线参数，减少逐项手动录入产生的操作差错。

五、系统应用与效果分析

（一）系统调试与运行测试

设备硬件装配、程序编制全部完工后，实行分段调试作业。第一阶段开展单机空载调试，逐项核对电机运转方向、限位开关反馈信号、变频器设置参数、步进电机驱动脉冲输出状态。第二阶段实施局部联合调试，以注浆、入炉、隧道烘烤、出料组成小型循环开展投料试运行，核查温控精准度、烤盘定位精度、成品烘烤色泽均匀程度。第三阶段开展全线联动投料试产，持续不间断运行八小时，记录实际产能达标比例与设备故障发生频次。

（二）控制效果与生产指标达成

设备正式投产使用后，汇总连续五个生产班组的运行数据。立式注浆蛋糕生产线圆形制品单班产量620至640盘，每班时长八小时，每小时产量接近八十盘的设计标准。方形制品单班产量390至410盘，每小时产量满足五十盘的预设要求。产品合格情况上，烘烤色差造成的废品比例，从改造前3.2% 降至1.1%。脱模环节产生的破损次品占比，由原先2.5% 下降至0.8%。

汉堡面包生产设备运行阶段，成型设备运行速度维持每分钟280至320个。整套设备运行节奏和隧道烘烤炉加工负荷适配稳定。输送醒发区域温湿度管控标准为温度浮动 ±0.5℃、湿度浮动 ±3%RH。面团醒发成品的品质统一程度得到明显改善。连续式脱模设备吸盘抓取成功率稳定在99.2%。对比改造前依靠人工协助脱模的作业模式，整体生产效率提升超四成 [5]。

六、结束语

系统以 AB CompactLogix PLC 为核心，依托 PROFIBUS-DP 总线实现整线设备协同控制。串级 PID 调节有效抑制隧道炉温控超调，多配方管理满足多规格产品柔性切换。实际运行数据表明，班产与合格率均达到设计指标，温控精度稳定在 ±1.5℃。该方案在烘焙自动化领域具备良好的实用性与推广价值，可为同类生产线控制系统设计提供参考。后续研究可围绕智能化故障预测与能效优化方向进一步深入。

参考文献

[1] 潘云 . 食品干燥设备恒温控制系统设计 [J]. 中国食品工业 ,2022,(17):112-116.

[2] 谢斌 , 任行 , 王丽丽 . 基于 PID 温度控制的烘焙系统设计 [J]. 电子技术与软件工程 ,2021,(17):223-224.

[3] 杨晓星 , 孔德文 . 基于 PLC 的果蔬膨化控制系统设计 [J]. 食品工业 ,2021,42(8):185-187.

[4] 张科强 , 池雄飞 . 食品干燥设备恒温控制系统设计 [J]. 食品工业 ,2021,42(7):188-190.

[5] 彭琛 , 曾昱 , 黄爽 , 等 . 基于 PLC 的食品加工用烘干设备的研究与应用 [J]. 电子世界 ,2021,(13):136-138.

 Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

物资仓储管理中库存流转效率提升路径探究

李文华
内蒙古蒙泰不连沟煤业有限责任公司，内蒙古 鄂尔多斯 010300
DOI:10.61369/ERA.2026100033

摘　　要： 在目前供应链一体化进程加快、市场供需波动越来越大的大环境下，物资仓储管理的作用已经远远超出了单纯的“物资保管”，而成为了一个具有流通中枢作用的综合性服务。因此库存流转效率成了衡量仓储经营效果好坏、决定企业供应链弹性及竞争优势强弱的重要指标。库存流转效率提升是一项系统性工程，需以精益思想为核心、以数字化工具为支撑、以全链路协同为延伸，实现仓储环节 “快进、快出、高周转、低库存” 的运营目标。

关 键 词： 物资仓储管理；库存流转效率；精益仓储；数字化转型；供应链协同

Research on Improvement Path of Inventory Circulation Efficiency in Material Warehouse Management

Li Wenhua
Inner Mongolia Mengtai Buliangou Coal Industry Co., Ltd., Ordos, Inner Mongolia 010300

Abstract: With the accelerated integration of supply chains and increasingly volatile market supply and demand, material warehouse management has gone beyond simple material storage and evolved into a comprehensive service serving as a circulation hub. Therefore, inventory circulation efficiency has become a key indicator for evaluating warehouse operation performance and determining the supply chain resilience and competitive advantages of enterprises. The improvement of inventory circulation efficiency is a systematic project. Guided by lean thinking, supported by digital tools and extended by full-link collaboration, it realizes the warehouse operation goals of rapid warehousing, rapid outbound delivery, high turnover and low inventory.

Keywords: material warehouse management; inventory circulation efficiency; lean warehousing; digital transformation; supply chain collaboration

引言

在全球供应链重构与国内产业升级的双重背景下，企业间的竞争已从单一产品竞争转向供应链整体效率的竞争。物资仓储作为供应链的核心枢纽，承担着物资集散、库存缓冲、需求响应的关键职能，其运营效率直接决定供应链的响应速度与成本水平。传统仓储管理以 “账实相符、物资安全” 为核心目标，侧重于静态保管，对库存流转速度、作业效率的关注不足，普遍存在库存积压、周转缓慢、作业冗余等问题，难以适配多品种、小批量、快响应的市场需求。

一、库存流转效率的核心内涵

库存流转效率是衡量物资从入库验收、存储管理到出库配送整个仓储过程中的周转速度、操作效率和资源调配是否合理的一个重要指标，它实质上就是通过保证库存准确无误、资产安全的前提下，大幅度缩减物资在仓库内停留的时间以及加快作业等待的速度来削减库存持有费用，加强订单执行的及时响应水平，进而达成供应链效率的最优化。

二、库存流转效率提升的核心路径

（一）优化仓储布局与货位管理，压缩作业动线

优化仓储布局可以明显提高流通效率，主要措施就是把经常使用的物资存放在距离作业点最近的地方，并使作业流程的路线最短。为了提高库存管理效率、充分发挥仓储设施的作用，应该实行以货物周转率为基础的一种动态货位分配方法。该种方法是以 ABC 分类法为基础，准确找到各类存货的位置，从而达到资源合理配置和快速满足市场需要的目的。就出入库频繁、周转快的 A 类物资来说，应当将其摆放在靠近出入口、拣选路线最短的“黄金货位”，从而保证能够迅速有效地满足高需求商品的取用。B 类物资应该放在仓库中部，以达到平衡整个库存流动性的目的。周转速度慢、低频次的 C 类物资可以放在仓库深处或者高处货位上，从而提高空间利用率并减少频繁移动这些物品造成的成本和风险。建立灵活调整机制，按照物资周转效率、季节性需求变化情况，每隔一段时间（一般为一季度），对货位布置方案进行一次重新规划，以保证仓储设施能及时适应业务发展的需要。

Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

（二）精益化流程再造，消除全流程浪费

根据精益管理的思想，对入库、出库、盘点这三个主要流程做价值流分析，找出其中存在的等待、重复操作、非增值的物料搬运等浪费问题，进而改善整个运营效率和资源利用率。 接收货物时实行预约入库、预审单制十分重要。因此供应商必须在货物到达之前至少提前24小时向仓库部门提供详细到货计划及相关资料，使仓库部门可以事先安排好货位和人员。货物到达后马上启动扫码验收程序，把收货、质检、上架这三个环节合并在一处来操作，明显加快入库速度。对于有长期稳定的业务合作并且信誉好的供应商可以采取“免检 + 抽检”的方式来提高入库的速度。出库流程中提倡用波次拣选和分区拣选相结合的方式，把相同批次、同一区域的订单合并成一个波次，用“摘果式”加“播种式”的方法来减少拣选员的走动距离，提高作业效率。大力推行电子标签拣选 (DPS) 技术和语音拣选系统，大大降低由于人为原因造成的拣选错误率，拣选速度比原来提高了30% 以上。为了保证出库的准确无误，采用扫码复核的方式代替原来的逐单人工核对，提高了出库环节的操作效率和质量控制。 在库存管理实践当中，建议放弃传统的全部停业盘点办法，转而采纳更加高效并且连续不断的盘点手段，也就是结合循环盘点和动态盘点。就 A 类重要的物资而言，实行每月一次的盘点制度，对于 B 类一般的物资来说，实行每季度一次的盘点制度，而 C 类次要的物资则实行每半年一次的盘点制度。该种做法的核心就是把仓储管理系统 (WMS) 的功能融入进去，使得库存出入库活动可以即时地进行账实核对，在盘点过程中出现的任何差异都可以当天处理完毕，从而在不影响正常运转的情况下大大提高库存数据的准确性、可靠性。

（三）构建精细化库存管控体系，降低无效库存

库存流转效率的本质就是达到动态物资流动的目的，它的主要手段有减少不必要的库存堆积、改善库存同市场需求之间的契合度等，从而明显改善整个运作水平。为了探究分类分级控制策略，采用 ABC 分类法和 XYZ 需求波动分类体系来对 AX 类（高价值、高波动性的物资）实行精细管理，即设置动态的安全库存水平来应对不确定情况，并且制定出相应的风险应对预案。对于 CZ 类（低价值、周转慢的物资），实行定时盘点并及时处理的办法，以达到提高资源利用率的目的。建立需求预测和库存动态协同机制十分必要，它需要把以往的出货记录、生产计划以及市场预期的数据整合起来，用移动平均法、指数平滑法这些定量预测的方法来不断改进需求预估。并且设置库存阈值警戒线，当库存超过上限或者低于下限时，系统会发出预警信号，使企业由原来的被动补货转变为现在的主动库存管理。创建起一套针对呆滞库存的持续改善体系是十分重要的。该体系要明确呆滞库存的判断标准，比如把连续六个月内没有发生出库的存货定为呆滞库存。应该定期开展对呆滞库存进行全面检查的工作，并按照不同的情况分别采取不同的处理办法，即内部调拨、替换再利用、降价出售或者报废处置等方式。严格执行先进先出 (FIFO) 原则，先处理即将到期或者已经过期的物资，从根本上防止呆滞库存的产生。

（四）推进数字化智能化升级，赋能效率提升

数字化转型是提高仓储效率的重要推动力，它的主要目的就是使整个仓储过程达到全方位的数字化运行、全部数据资源的共享以及智能辅助决策。全面推行仓储管理系统 (WMS)，包含入库、上架、拣选、出库、盘点、移库等各个环节的操作，用条形码、RFID 技术保证物资整个生命周期的跟踪，并且可以完成作业数据的实时采集和库存数据的自动更新。该系统也试图把 WMS 同企业资源计划 (ERP)，制造执行系统 (MES) 和运输管理系统 (TMS) 融合起来，进而达成采购，生产，销售以及物流环节之间数据的无间断传递，从而冲破信息隔阂，助力展开跨部门的库存全局改良调度工作。二是根据企业的运营规模和处理的物资特点来选择适合的自动化方案，分层次推进。在大型立体仓库里，可以布置堆垛机、AGV（自动导引车）、自动分拣装置等，从而达成高度自动化、无人化的作业模式。相比较而言，小型仓库一般会采用电动叉车、电子标签、输送带等形式的半自动化设备来提高作业效率，但是不会投入大量资金进行大规模的改造。三是要创建数据引领的不断改进机制，重点在于依靠仓储运作数据看板这个手段，对库存周转速度、拣货速度、发货准时度这些重要绩效指标展开及时监测并加以评价。通过对以上数据进行剖析，可以准确找出目前作业过程中存在的瓶颈环节和存在的资源浪费问题。进一步来说，依靠数据洞察可以改善货位布置、波次安排和人员调配策略，促使管理模式由依靠经验来决定转向依靠数据来进行科学决策。该过程提高了运营效率并且很好地实现了资源的合理利用，达到了仓储系统精细化管理以及可持续发展的目的 [1]。

（五）强化人员效能管理，激发作业活力

人是仓储作业不可缺少的重要部分，人的能力以及背后所隐含的管理机制就成为了决定效率提高的关键因素。创建多层次、分类别的教育培训体系十分必要，对于新入职员工应该实行“岗前理论培训加实际操作考核”的双重标准，保证他们既掌握了基本的理论知识又具备了实际的操作能力之后才能正式上岗；对于有经验的老员工来说，则应当重视对其专业知识的加深、设备操作技巧的改进以及作业流程规范的加强等方面开展培训工作，从而达到技能不断更新的目的；提倡“师傅带徒弟”的传承方式来加快整个团队的操作技能提升，使知识和经验得到传递和积累。创建以效率为向导的绩效考评体系十分必要，该体系要融合库存周转率、拣货速度、出库及时程度、存货数据准确度、货物损耗比率等诸多要素，执行全方位考虑效率和品质的双维度评判办法，并把评价结果同员工的收入水平和职位晋升直接挂钩起来，从而激发员工朝着优秀的方向去努力。对拣选、装卸等具体岗位可以采用基于产出的计件工资制，即在保证效率的同时也能较好地调动员工的积极性和主动性。推行灵活的班次安排和全能工策略，就是根据业务活动的不均衡状况来改变人力资源的配置方式，培养出可以从事多个岗位工作的专业人才。高峰时鼓励各部门之间互相配合来达到资源共享、相互支持的目的，在非高峰时段主要做员工培训以及生产设备检修保养等工作，从而最大程度地发挥人力资源的价值 [2]。

（六）深化供应链全链路协同，打通流转堵点

为了明显提高库存周转速度，改善策略不能只是在仓储管理方面下功夫，应该从上游供应链伙伴和下游制造或者分销网络等

 Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

各方面展开协同工作，从而创建起一个没有断点的物流体系。上游合作策略就是同重要的供应商一起推行到货预约制度，以达到生产计划同货物到达时间相契合的目的，进而缩减到货的不确定因素。另外，推广即时存货 (JIT) 交付模式，使物料可以准确地满足需求，并直接送到作业现场，大大减少了不必要的仓储暂存环节，提高了供应链的效率。下游协作策略主要是创建起有效的信息流通渠道，及时把生产计划和销售订单系统同步起来，提前了解市场的需求情况，从而实行“前置库存准备与拣选”的做法，保证资源得到合理安排。同时推广线边仓库管理模式，把所需要的物资直接送到生产一线，大大缩短了从仓库到生产线的距离，使整个供应链的响应速度和灵活性大大提高。跨组织协同管理当中，大型企业可以创建起一体化的库存调配中心，达成各个地域仓库之间的库存互相联通并可自由调配的目的，在保证供应链稳定性的同时有效地削减总库存数量，并且能明显改善整个网络范围内库存循环的速度 [3]。

三、效率提升的保障措施

第一，组织架构的支持和改善属于达成高效运转的重要根基。创建以仓储效能改良为核心工作小组，该小组要包含仓储管理，采购策略，生产流程，市场营销，信息技术等诸多方面人才，依靠明确的角色划分和任务安排，加上跨职能协作形式塑造起来，可以较好地避免仓储部门单打独斗的情形出现，进而达成整个运作效能的明显改善。

第二，制度支撑体系的建立非常重要。为了提高仓储管理的效率，应该彻底改变和完善仓储管理的各项规章制度、作业规范和库存控制办法，并把效率评价指标当作部门和个人绩效评定的主要部分之一来执行，从而创建起一个包含“确立目标、展开操作、开展评判、回馈改正”环节的动态运转体系。其目的在于不断改进和完善仓储经营效率。

第三，关于资金支持的保障机制，我们要深入研究并制订出一套系统的方案，保证企业在各个发展阶段都有足够的、有效的资源支持。这不只是简单的财务预算分配问题，它牵涉到风险评价、成本效益考量以及长久的投资安排等诸多方面。创建起这样的保障机制之后，企业就能够实现持续发展，并且保证每一个战略目标都能够得到落实。由于企业所处的行业和生命周期各不相同，因此对于信息科技和自动化系统投资策略的规划就显得十分必要了。该规划要分阶段、分步骤推进，先从可以快速见效、性价比高的地方入手，避免对全部自动化方案的盲目追求，达到资源合理配置、价值最大化的目的 [4]。

第四，持续改进策略。创建PDCA(计划、执行、检查、处理)循环体系，定期对库存周转率、作业效率这些主要的性能指标加以考察，从而准确找到瓶颈和难题所在之处，并且有条不紊地制订出相应的改进措施，促使仓储系统向着技术更新和效能提升的方向不断前进。

四、结束语

提高库存周转速度成了物资仓储管理由“成本中心”向“价值中心”转变的主要推动力量，也是企业供应链改善、削减成本、加强市场竞争能力并达成可持续发展的重要途径。优化库存流转效率不是单个的操作环节的改善，而应该从整体上考虑，并且要执行起一个包含布局规划、流程重组、库存控制、技术创新、人力资源安排和跨部门合作等诸多方面内容的综合体系来。

参考文献

[1] 杨华强 . 考虑周转率的多目标备件动态库存控制策略 [J]. 机械工程学报 ,2025,61(3):126-138.

[2] 王春豪 , 张杰 , 马俊 . 精益库存管理对企业绩效的影响研究——来自中国制造业上市公司的实证检验 [J]. 管理评论 ,2017,29(7):196-206.

[3] 朱一舟 . 企业仓储管理数字化转型探析 [J]. 中国物流与采购 ,2025,46(1):155-156.

[4] 李刚 , 张晓峰 . 制造企业采购与仓储一体化模式构建及应用 [J]. 工业工程与管理 ,2024,29(3):124-130.

Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

DBO 项目全过程管理难点与控制策略研究

芮栋梁
上海浦港市政绿化养护管理有限公司，上海 221380
DOI:10.61369/ERA.2026100037

摘　　要： 以项目全生命周期管理为核心，依托上海市规模最大的海绵城市生态公园项目—“天空之境”，即国内首个采用 DBO（设计 – 施工 – 运维）一体化模式实施的市政生态基础设施项目，在系统性剖析项目建设全过程中的技术、质量、进度、协同、环境运维等管理难点基础上，构建针对性的全过程管控体系，并提出精准有效的控制策略。研究成果可为国内滨海地区海绵城市复合型生态项目且采用 DBO 模式基础设施工程的全过程建设管理提供参考。

关 键 词： 临港新片区；DBO 模式；海绵城市；工程管控

Research on the Challenges and Control Strategies in the Whole Process Management of DBO Projects

Rui Dongliang
Shanghai Pugang Municipal Greening Maintenance Management Co., Ltd. Shanghai 221380

Abstract: Taking a project using lifecycle management as the core, relying on the largest sponge city ecological park project in Shanghai, "Sky Mirror", which is the first municipal ecological infrastructure project implemented using the DBO (Design–Build–Operate) integrated model in China, the management challenges in technology, quality, progress, collaboration, and environmental operation and maintenance throughout the entire project construction process are systematically analyzed in this paper. Based on this analysis, a targeted whole–process control system is constructed, and precise and effective control strategies are proposed. The research results can provide a reference for the whole–process construction management of sponge city composite ecological projects in coastal areas in China that adopt DBO model infrastructure engineering.

Keywords: lingang new area; DBO mode; sponge city; engineering control

引言

作为上海对外开放的前沿阵地，上海临港新片区长期面临着地质条件复杂、内涝防台、水土治理等压力[1]。如何化解这些压力成为了临港新片区实现高质量发展的重要课题。本课题组以采用 DBO（设计 – 施工 – 运营）一体化建设模式的标杆性项目—“星空之境”公园为载体，探索 DBO 这类打破传统市政工程设计、施工、运维相互割裂的管理模式，解决工程体系复杂、技术标准严苛等难题，填补国内针对滨海区域、DBO 一体化模式下大型复合型生态项目的全生命周期管理研究的空白。

一、项目概况

“星空之境”公园项目是集中治理雨水、涵养生态、科普天文、休闲景观等诸多功能于一体的复合型城市公园，划分为四大功能分区（参见图1，根据河道布置情况划分四个地块），其中三大功能区聚焦宇宙、天文、星体主题，与相邻上海天文馆形成功能联动。项目建设内容包括海绵景观工程、土方工程、海绵设施工程、海绵监测工程、水质改善等附属设施、工程完成后至整体工程竣工验收完毕期间的养护、项目运维等工作。

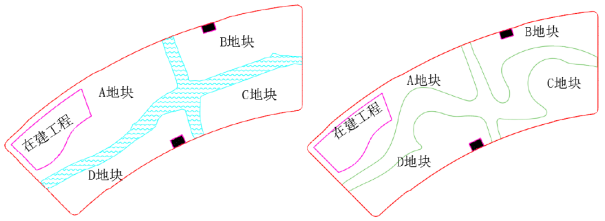


图 1 河道改线前后地块划分情况

该项目属于典型的滨海海绵生态项目，项目核心亮点与特点包括以下几个方面：

作者简介：芮栋梁（1982.06—），男，汉，江苏省常州市人，高级工程师，硕士，长期从事房屋建筑、园林绿化、市政道路等城市基础设施建设与运维管理、技术与科研管理工作。

 Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

① 设施多元化：包含植草沟、生物滞留带、生态旱溪、透水铺装等设施。

② 系统全方位：构建集雨水收集、净化、调蓄等于一体的系统，每日可消纳周边1.5万 m^3 雨水，可将五类地表水净化至三类标准，有效解决临港片区雨水积涝与水质污染问题。

③ 模式创新化：项目建设全程采用 DBO 一体化模式，由设计单位牵头、施工单位协同，统筹完成方案设计、工程施工、长期运维全链条工作，实现项目建设与运维的深度融合。

④ 要求特殊化：项目地处滨海，高盐雾环境易导致金属设备、园林设施、建筑构件锈蚀老化，对工程选材、工艺、后期运维提出了极高的特殊要求。

二、全过程管理难点

（一）基于建设时间周期角度

1. 设计阶段

（1）海绵系统设计专业性强：项目构建了沉淀池、人工湿地、生态绿地、生态塘等多级雨水净化体系，稍有不当就极易出现功能设计与景观设计冲突、局部海绵体系衔接不畅等问题。

（2）滨海特殊工况适配设计难度高：项目临海高盐雾环境会加速园林设施、金属构件、户外设备的锈蚀老化，传统材料选型难以适配15年长效运维需求，设计阶段需兼顾耐腐蚀性、性价比、景观效果等多重要求，材料选型与结构设计标准难以统一。

（3）DBO 模式运维前置设计落地困难：需将设施后期检修便利性、植被后期养护难度、海绵系统长期清淤维护、设备防腐翻新等15年长效运维需求前置融入设计环节，但国内 DBO 模式生态项目设计标准尚未完善，缺乏成熟的运维前置设计规范。

2. 施工阶段—多专业交叉施工协同难度高、滨海工况复杂

（1）气象与地质条件制约施工进度：项目所在区域台风、大风、暴雨天气频发，有效施工工期被大幅压缩，且暴雨天气易引发施工现场积水、土壤泥泞，影响海绵设施施工精度与土方施工质量。

（2）多专业交叉作业协同难度极大：项目涵盖生态修复、园林景观、水利排水等六大施工体系，各工序施工空间重叠度高、逻辑紧密。海绵设施的地下管网、排水系统施工属于隐蔽工程，需优先完成，而景观绿化、铺装工程、主题建筑、科普设施施工需后续跟进，交叉施工过程中极易出现工序冲突、施工衔接断层、成品损坏等问题。

（二）基于管理内容角度

1. 质量—生态工程质量标准模糊、长效质量保障难度大

（1）海绵系统质量隐蔽、长效：在排水管网、透水基层、生态净化结构等隐蔽工程施工完成后，难以直观查验，不易及时发现施工缺陷，后期投入使用后易出现净化效果不佳、积水等质量隐患。海绵生态系统的功能质量无法通过短期验收判定，需经过长期水文循环、雨水冲刷验证。

（2）生态工程质量受环境影响波动大：苗木适配性不足、土壤改良不彻底等不当操作都会造成植被存活率低、生态群落稳定性差，直接影响项目生态质量。项目生态工程质量受季节气候、自然环境、后期养护的影响极大，质量管控的动态性、不确定性极强。

（3）DBO 模式下质量责任界定复杂：虽然 DBO 模式减少了协同壁垒，但也存在质量责任边界模糊的问题。设计缺陷、施工工艺瑕疵、运维养护不当引发的质量问题难以精准界定，容易出现责任推诿、整改滞后的情况，不利于全过程质量闭环管控。

2. 进度与成本—工期约束、成本管控难度大

（1）进度管控压力大：项目建设周期紧张，加之所在区域每年汛期、台风季集中，导致有效施工工期大度缩短。同多专业交叉施工工序繁琐，一旦某一工序滞后，会引发连锁延误效应，整体进度管控难度大幅提升。

（2）成本管控难度高：DBO 模式需统筹建设阶段与15年运维阶段，全周期成本管控难度大。一方面，耐腐高端材料、滨海特殊施工工艺增加了建设阶段成本投入；另一方面，临海环境设施锈蚀、植被更替等长效运维成本难以精准预判。

3. 运维衔接—建设与运维融合不足、长效运维体系不完善

（1）运维前置落地不到位：在部分施工环节，未充分考虑后期运维需求，如部分海绵隐蔽设施检修空间不足、部分设备拆装繁琐等，增加了后期运维难度。

（2）运维技术体系适配性不足：项目天文主题景观、海绵生态系统、智慧设施的运维极具专业性，传统园林运维团队缺乏海绵系统养护、生态净化、滨海防腐维护的专业能力。

（3）运维考核标准不完善：目前国内针对超长周期生态公园运维的考核体系尚未健全，生态功能指标、设施完好指标、景观养护指标的量化考核标准模糊，容易出现运维工作流于形式、养护质量参差不齐的问题。

三、全过程控制策略

（一）前置统筹融合多目标、落实运维导向设计

1. 组建多专业联合设计团队，即打破单一专业设计壁垒，统筹海绵、景观、天文、运维等四大核心目标。结合临港地形地貌、降雨数据、水文特征，精准优化多级雨水净化体系布局，实现水质净化、雨水调蓄、防涝排水与景观布局深度融合。

2. 优化滨海工况适配设计

表1 优化滨海工况适配设计措施

工况	适配措施
高盐雾腐蚀环境	推行专项材料选型标准，园林座椅、金属构件、垃圾桶全部采用不锈钢 + 釉质防腐涂层双重防护工艺，户外设备选用高耐腐材质，从设计源头降低后期锈蚀损耗与运维成本。
景观造型	简化设计，在保障天文主题艺术效果的前提下，优先选用易施工、易养护、耐久性强的设计方案，平衡景观艺术性与工程实用性。
运维前置	将15年长周期运维指标纳入设计评审体系，明确设施检修通道、隐蔽工程维护空间、设备拆装便利性、海绵系统清淤通道等运维设计标准，所有设计方案需经运维专业人员审核通过后方可落地。

（二）强化工况适配管控、构建多专业协同施工体系

1. 制定滨海适配性施工计划：结合临港暴雨、季节气候、台

Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

风等特点，优化施工工期排布，避开极端天气高发时段，提前储备防风、防汛、防雨物资，建立极端天气应急施工预案。针对湿地建设、苗木种植等季节性工序，精准锁定施工窗口期，提前完成场地预处理、苗木储备，保障生态工程施工效果。

2. 建立多专业交叉施工协同机制：梳理水利、生态等各工序施工逻辑，制定精细化施工进度网络图，明确各工序先后顺序、施工范围、衔接节点。实行分区、分专业、分层施工模式，优先施工地下隐蔽工程，有序跟进地上景观、设施工程，做好已完工成品保护。组建专项协同管控小组，统筹各施工队伍作业节奏，定期开展工序衔接专项交底，统一施工标准[2]。

3. 推行滨海专项施工工艺标准化管控：针对海绵净化结构等专项工艺，编制专项施工技术规程，严格把控施工精度。对地下隐蔽工程，实行全过程旁站监理、影像留存、分段验收制度。针对生态工程施工，联合生态专业技术人员现场指导，严格管控微生物群落培育、水生植物种植密度、湿地水文调控。

（三）构建全周期质量体系、细化生态工程管控标准

1. 细化海绵生态工程质量验收标准：结合项目特性，制定适配滨海海绵公园的专项质量验收规范，补充隐蔽工程、雨水净化功能、生态体系、土壤改良效果等专项验收指标，填补常规市政验收标准的空白。

2. 强化施工全过程动态质量管控：推行自检、互检、专检和监理抽检管控模式，全部验收地下管网、透水基层等隐蔽工程，留存完整施工影像与检测数据。针对生态工程质量长效性特点，建立完工后跟踪监测1–3年质量机制，定期监测苗木存活率、水质净化效果等，动态优化养护与整改措施。

3. 明确 DBO 模式质量责任边界：细化设计、施工和运维环节质量责任，建立质量问题溯源机制。精准划分责任主体，落实整改责任与考核处罚机制，实现质量问题闭环管控。建立质量风险预警体系，针对设施锈蚀、滨海返盐等高频质量风险，提前制定防控预案[3]。

（四）动态调控进度、全周期精细化管控成本

1建立动态进度管控体系：采用关键路径法、甘特图细化各阶段、各工序工期节点，分解每日、每周施工任务，定期开展进度核查，及时发现进度偏差并动态调整。建立进度考核机制，将施工进度与班组绩效挂钩，强化各施工队伍进度管控主动性，保障项目按期交付。

2. 构建“建设成本精准管控 + 运维成本预判储备”全周期成本体系：在建设阶段，推行限额设计与施工管控，严格把控材料采购、人工成本、机械使用，优选高性价比、低运维成本、高耐久性的材料与工艺。建立动态成本监测机制，实时跟踪施工成本支出，及时纠偏超预算环节。精准预判15年长周期运维成本，测算苗木更替、海绵系统清淤、设施防腐翻新等运维费用。

（五）打通建运衔接壁垒、构建长效运维体系

1. 推行运维全过程介入机制：运维团队提前进场，全程参与项目设计评审、施工过程、竣工验收、调试试运行全流程，熟悉项目设施布局、海绵系统结构、景观体系、设备参数，提前梳理运维重难点，制定专项运维方案。

2. 搭建专业化滨海生态运维团队：针对项目海绵生态、天文景观等专项运维需求，开展专项技能培训，组建兼具园林养护、生态治理等能力的复合型运维队伍。引入智慧运维系统，搭建园区水质、土壤等情况实时监测平台，实现运维风险动态预警、精准处置，提升运维智能化水平。

3. 建立量化长效运维考核体系：结合项目生态功能、景观效果、设施完好率等核心指标，制定可量化、可考核的运维标准，定期开展运维考核评估，动态优化运维方案。推行弹性运维模式，根据季节气候、设施损耗、水文变化情况，动态调整养护频次、防腐维护、水质治理方案，保障项目15年长周期稳定运行。

四、结束语

依托“星空之境”项目，课题组对在探讨 DBO 模式下项目建设全过程核心管理难点，并构建了适配该类生态项目的全过程管控体系，并提出五大控制策略，即前置统筹融合多目标、落实运维导向设计，强化工况适配管控、构建多专业协同施工体系，构建全周期质量体系、细化生态工程管控标准，动态调控进度、全周期精细化管控成本，打通建运衔接壁垒、构建长效运维体系，有效破解了项目建设与运维中的核心痛点，保障了项目高质量建设、长效化运营。

参考文献

[1] 祁文荟 . 浅谈海绵城市建设项目管理中存在问题与应对策略 [J]. 中国住宅设施 ,2025,(08):160–162.

[2] 陈嘉亮 . 海绵城市建设工程实效分析与优化研究 [J]. 天津科技 .2024,51(10):78–81.

[3] 高宏宇 ; 姜文超 ; 陈涛 . 海绵城市建设运维全过程数字化监管研究 . 上海建设科技 [J].2025(03):75–79.

 Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution–NonCommercial 4.0 International License

水利工程混凝土裂缝防治措施的实践研究

杨聪颖

中国葛洲坝集团第二工程有限公司，四川 成都 610091

DOI:10.61369/ERA.2026100039

摘　　要： 针对水库碾压混凝土重力坝运行期间出现的裂缝问题，采用超声波检测、钻芯取样、施工记录分析及有限元模拟识别裂缝成因，并从温度控制、配合比优化、层间施工和保湿养护等方面制定防治方案。结果表明，温度应力、干缩变形和施工工艺缺陷的成因占比分别为65%、25% 和 10%。实施冷却水管通水、降低水灰比及控制层间间歇后，混凝土水化热峰值由75 ℃降至60 ℃，优化配合比干缩率降低 15%。经3个月监测，裂缝数量由 12处降至2处，最长裂缝由 15 m 缩短至3 m，最大宽度由0.30 mm 降至0.10 mm，综合成本较原修补方案降低 12%，表明成因导向的综合防治方案具有良好的工程应用效果。

关 键 词： 碾压混凝土重力坝；混凝土裂缝；温度应力；干缩变形；防治措施

Practical Research on Prevention and Control Measures for Concrete Cracks in Hydraulic Engineering

Yang Congying

China Gezhouba Group Second Engineering Co., Ltd., Chengdu , Sichuan 610091

Abstract: In response to the cracking problem that occurs during the operation of the reservoir roller compacted concrete gravity dam, ultrasonic testing, core sampling, construction record analysis, and finite element simulation are used to identify the causes of cracks. Prevention and control plans are formulated from the aspects of temperature control, mix proportion optimization, interlayer construction, and moisture retention maintenance. The results showed that the causes of temperature stress, shrinkage deformation, and construction process defects accounted for 65%, 25%, and 10%, respectively. After implementing cooling water pipe drainage, reducing water cement ratio, and controlling interlayer intervals, the peak hydration heat of concrete decreased from 75 ℃ to 60 ℃ , and the optimized mix proportion reduced the shrinkage rate by 15%. After 3 months of monitoring, the number of cracks decreased from 12 to 2, the longest crack was shortened from 15 meters to 3 meters, and the maximum width was reduced from 0.30 mm to 0.10 mm. The comprehensive cost was reduced by 12% compared to the original repair plan, indicating that the comprehensive prevention and control plan guided by causes has good engineering application effects.

Keywords: **roller compacted concrete gravity dam; concrete cracks; temperature stress; dry shrinkage deformation; prevention and control measures**

引言

碾压混凝土重力坝凭借施工效率高、材料用量较少和整体稳定性良好等特点，已成为水利枢纽工程常用坝型。坝体混凝土在水化放热、环境温度变化、基础约束及水分散失等因素共同作用下，容易产生温度裂缝、干缩裂缝和层间施工裂缝，进而削弱结构整体性与抗渗性能，并对工程长期运行安全形成潜在影响。现有裂缝治理多侧重于形成后的灌浆和表面封闭，对成因识别、施工参数调节及全过程监测之间的衔接关注不足，难以实现风险的主动控制。基于此，本文以水库碾压混凝土重力坝为研究对象，重点解决裂缝成因判定、关键控制参数确定及措施适用性验证等问题。研究通过超声波检测、钻芯取样和施工资料分析识别主控因素，利用 ANSYS 模型验证冷却水管方案，并采用降低水灰比、掺加粉煤灰、限制层间间歇及强化保湿养护等措施开展现场干预，结合连续监测评价裂缝变化和工程成本，为同类坝体裂缝的预防、治理及运行维护提供技术依据。

Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

一、工程概况

水库大坝承担区域防洪、农业灌溉以及城乡供水等任务，总库容为5000万 m³。坝址河谷地形较为完整，坝基以中等风化岩体为主，具备重力坝建设条件。工程选用碾压混凝土重力坝作为主体坝型，该坝型是把低坍落度混凝土分层摊铺并连续碾压密实而形成的挡水建筑物，具有施工机械化程度较高以及材料消耗较低等特性。坝体混凝土浇筑总量约12万 m³，浇筑作业涉及仓面摊铺、层间结合、温度控制以及养护管理等环节。

工程运行期间，坝体混凝土逐渐出现可见裂缝，现场共查明12处，裂缝类型主要涵盖温度裂缝以及干缩裂缝。温度裂缝集中分布于坝体中上部，走向以横向和斜向为主，其形成与混凝土内部温升、表层散热以及环境温差引起的约束应力有关；干缩裂缝多见于坝基邻近区域，受到表面失水、基础约束以及局部养护条件变化影响。现有裂缝中，最长裂缝延伸约15m，最大宽度达到0.3mm，局部位置存在继续扩展的风险。上述裂缝数据及其空间分布为后续开展成因识别、方案设计以及防治效果评估提供了工程背景依据。

二、混凝土裂缝成因分析与防治方案制定

（一）裂缝成因的现场检测与分析

1. 混凝土裂缝成因分析与防治方案制定

结合坝体裂缝分布状况，现场选用超声波检测以及钻芯取样开展内部缺陷识别。超声波检测是依靠声波传播参数判断混凝土密实程度以及裂缝影响深度的无损方法，测点沿12处裂缝两侧布置，实测波速为3.42 ~ 4.21 km/s。温度裂缝区域出现波速衰减，局部裂缝已向坝体内部延伸。钻芯取样集中布置于裂缝交汇处、坝基约束区以及层间结合面，芯样直径为100 mm，观察内容涵盖骨料分布、裂缝路径以及层间黏结状态。检测情况见表1。

表1 水库大坝混凝土裂缝检测结果统计

裂缝类型	数量	主要分布位置	最大长度	最大宽度	超声波速	钻芯特征	主要成因占比
温度裂缝	8处	坝体中上部	15 m	0.30 mm	3.42 ~ 3.76 km/s	裂缝穿越水泥浆体以及骨料界面	65%
干缩裂缝	3处	坝基邻近区域	6 m	0.18 mm	3.81 ~ 4.05 km/s	表层裂缝向内部逐渐收敛	25%
施工裂缝	1处	层间结合面	4 m	0.12 mm	3.68 ~ 3.92 km/s	层面存在黏结弱化现象	10%

施工期温度记录表明，坝体混凝土水化热峰值达到75 ℃，内部与表层温差超过25 ℃。内部混凝土受热膨胀后受到基础以及相邻坝段约束，表层降温收缩又难以自由变形，由此形成较大的温度应力。该应力超过早龄期混凝土抗拉强度后，裂缝沿约束较强方向扩展，这与中上部横向、斜向裂缝的空间形态较为契合。

坝基邻近区域混凝土水灰比为0.45，养护期间环境湿度曾低于60%，表层水分散失速度较快，干缩变形受到岩基约束后产生拉应力。层间芯样还呈现局部黏结弱化，其对应仓面浇筑间歇达到8 h，超出连续摊铺条件下的适宜衔接时段。综合裂缝形态、声学参数、芯样特征以及施工记录开展统计归因，温度应力占65%，干缩变形占25%，施工工艺缺陷占10%，表明温度控制应当作为后续防治方案设计的重点，同时兼顾养护湿度以及浇筑连续性管理。

（二）基于成因的防治方案设计

鉴于温度应力、干缩变形以及施工工艺缺陷的归因比例，防治方案把裂缝主控因素识别当作措施配置依据，并且按照成因判定、参数设计、施工约束以及监测反馈的路径开展方案制定。温控设计需围绕坝体内外温差进行调整，其应力水平可按下式估算。

$$\sigma = E\alpha\Delta T$$

其中，σ 表示温度应力，单位为 MPa；E 表示混凝土弹性模量，单位为 MPa；α 表示混凝土线膨胀系数，单位为每摄氏度；ΔT 表示坝体内部与表层的温差，单位为℃。

结合水化热峰值达到75 ℃以及内外温差超过25 ℃的施工记录，在坝体中上部预埋冷却水管，管路沿温度裂缝高发区域分层布置，通水流量控制为0.5 m³/h。冷却过程需根据入水温度、出水温度以及坝体测温数据进行动态调节，把降温速率维持在不会引起表层骤冷的范围内，从而缓解基础约束条件下的拉应力集中。

针对坝基邻近区域的干缩变形，将混凝土水灰比由0.45降至0.40，并按胶凝材料质量掺入2% 粉煤灰，以减少拌和用水量，改善浆体孔隙结构以及后期体积稳定性。浇筑完成后及时开展保湿养护工作，避免表层湿度快速下降。层间结合面的施工控制则把仓面浇筑间歇限制在4 h 以内；发生超时情况时，需清除浮浆以及松散颗粒，对结合面进行湿润和铺浆处理，再恢复摊铺碾压作业。

方案制定流程见图1。流程以检测资料和施工记录为输入，依据裂缝类型匹配温控、配合比优化以及浇筑衔接措施，同时设置温差、湿度和间歇时间控制节点。现场监测信息返回参数调整环节后，可形成持续修正的闭合路径，使各项措施与坝体裂缝的空间分布以及形成条件保持对应关系。

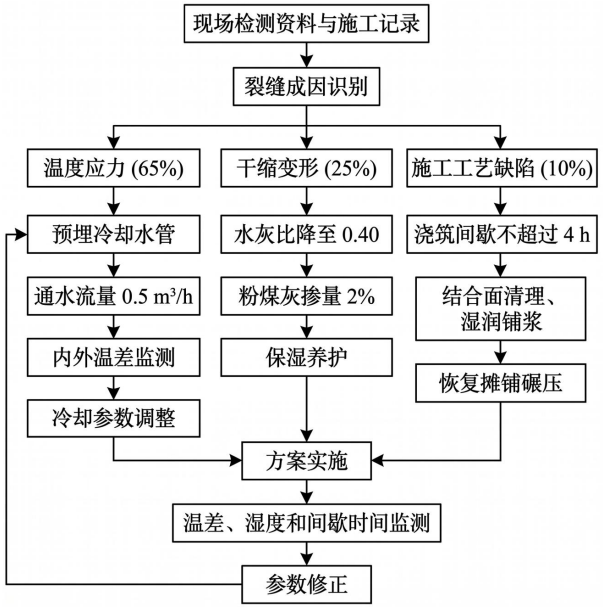


图1 混凝土裂缝防治方案制定流程图

 Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

（三）防治方案的技术可行性验证

结合坝体裂缝分布以及施工期温度记录，选用 ANSYS 软件建立坝体三维有限元模型。有限元模型是把连续坝体离散为有限单元并开展温度场以及应力场计算的分析工具。模型把坝体中上部、岩基约束区以及层间结合面纳入计算范围，材料参数按照现场芯样试验结果进行赋值，边界条件则引入环境温度、水化热过程以及冷却水管换热参数。计算结果表明，冷却水流量维持在0.5 m³/h 时，混凝土水化热峰值由75 ℃降至60 ℃，坝体内外温差同步收窄，温度梯度引起的拉应力集中得到缓解，说明分层布置冷却水管具备技术可行性。

针对坝基邻近区域的干缩风险，选取原水灰比0.45配合比以及优化后的水灰比0.40配合比开展对比试验。干缩率是表征混凝土失水后长度收缩程度的指标，试件在与现场养护条件相近的温湿度环境中持续观测。结果显示，掺入胶凝材料质量2% 粉煤灰后，优化配合比的干缩率较原配合比降低15%，其浆体孔隙结构以及体积稳定性均有所改善。该调整未对碾压施工所需稠度造成明显影响，能够满足仓面摊铺以及振动碾压要求。

施工工艺可操作性评估围绕仓面连续作业、结合面处置以及养护衔接展开。每个作业班组配置1名现场负责人、2名质量检查人员、8名摊铺碾压人员以及4名养护人员，设备配置包括2台摊铺机、2台振动碾、1套制浆设备以及2套移动供水装置。该配置可把浇筑间歇控制在4 h 以内，并为超时结合面的清理、湿润以及铺浆留出作业条件。结合温度监测人员对冷却水量进行动态调整，现有施工场地、电力供应以及供水能力能够支撑方案实施。

三、防治措施的实践应用与效果评估

（一）防治措施的现场实施过程

结合坝体中上部温度裂缝的集中分布范围，现场在混凝土摊铺前完成冷却水管定位以及固定，管线沿坝轴方向分层布设，接头位置开展密封检查，并把进出水口接入流量计以及测温装置。混凝土覆盖管线后开始通水，冷却水温控制为15 ℃，单回路流量维持在0.5 m³/h。值班人员依据坝体测温数据调整通水时段，避免局部降温过快。

配合比调整环节选用低热水泥、连续级配骨料以及粉煤灰，骨料含水率在每班开仓前进行测定，并据此修正拌和用水量。水灰比控制为0.40，粉煤灰掺量按胶凝材料质量的2% 计取。拌和站按照骨料、胶凝材料以及水的投放顺序组织生产，延长搅拌时间至90 s，使低坍落度混凝土保持均匀状态，出机料同步检查稠度以及温度。

仓面施工按照坝基约束区向坝体中部连续推进，摊铺方向与碾压行进方向保持协调，浇筑速度控制为200 m³/h。相邻条带及时进行搭接碾压，层间间歇限制在4 h 以内。遇设备停机造成超时，现场把浮浆以及松散颗粒清除后进行湿润和铺浆处理，再组织后续摊铺；混凝土终凝后马上覆盖保湿材料，并依靠移动供水装置维持养护湿度。

（二）实施后的裂缝监测结果分析

防治措施实施后，现场运用裂缝观测仪对坝体开展连续3个月监测。裂缝观测仪是借助位移传感元件记录裂缝张开量变化的测量设备。监测点覆盖原有12处裂缝，并在坝体中上部、坝基邻近区域以及层间结合面设置固定测点，每日采集裂缝宽度数据，每周复核裂缝端部位置以及延伸长度，以降低单次观测偏差对趋势判断的影响。

监测周期内，坝体可见裂缝数量呈持续下降趋势，实施后第1个月降至7处，第2个月降至4处，第3个月仅保留2处，具体变化见表2。最长裂缝由15 m 逐步缩短至3 m，最大宽度也从0.30 mm 降至0.10 mm。温度裂缝收敛幅度较大，施工裂缝在第1个月已不再显现，说明温控以及层间处置对裂缝发展形成了较为明显的抑制作用。

表2 实施前后裂缝变化对比表

监测指标	实施前	第1个月	第2个月	第3个月	总体降幅
裂缝总数量	12处	7处	4处	2处	83.3%
温度裂缝数量	8处	5处	3处	1处	87.5%
干缩裂缝数量	3处	2处	1处	1处	66.7%
施工裂缝数量	1处	0处	0处	0处	100%
最长裂缝长度	15 m	8 m	5 m	3 m	80.0%
最大裂缝宽度	0.30 mm	0.21 mm	0.15 mm	0.10 mm	66.7%

结合逐月数据来看，前2个月的裂缝收敛速度相对较快，第3个月变化趋于平缓，表明坝体温度场以及表层湿度逐渐进入稳定状态。剩余2处裂缝分别位于坝体中上部以及坝基邻近区域，宽度均未超过0.10 mm，监测期间未出现继续延伸现象。冷却水管调节、低水灰比配合比以及连续浇筑控制共同降低了温度应力、失水收缩以及层间黏结弱化产生的不利影响。

（三）防治效果的综合评估

结合3个月监测资料，坝体可见裂缝由12处减少至2处，裂缝控制率达到83.3%，最长裂缝以及最大宽度分别降至3 m 和0.10 mm。温度裂缝数量下降87.5%，表明冷却水管对水化热峰值以及内外温差的调节较为有效；施工裂缝全部收敛，说明4 h 层间间歇控制以及结合面处置能够改善层间黏结状态。干缩裂缝控制率为66.7%，相较其他类型仍有优化空间。

从工程成本来看，把冷却水管、粉煤灰、养护供水、人工以及监测费用纳入核算后，现行方案较原修补方案节约12%。成本降幅主要来自裂缝返修工作量减少、灌浆材料消耗下降以及施工停歇时间缩短，表明成因导向的预防措施能够把费用投入前移，降低后续处置成本。

延长跟踪期内，坝体连续6个月未产生新裂缝，原有2处裂缝宽度保持在0.10 mm 以内，坝体运行状态较为稳定。该方案具有措施针对性较强、施工衔接顺畅以及现场参数便于调整等优势，但仍存在干缩裂缝收敛较慢、冷却水温依赖人工调节的问题。后续可增设自动温控阀以及湿度传感装置，细化坝基邻近区域的养护频次，同时开展跨季节监测，以进一步评价长期温度循环以及库水荷载变化对裂缝稳定性的影响。

四、结语

本研究建立了由现场检测、成因归因、参数设计、数值验

Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

证、施工实施和动态监测构成的裂缝防治路径，实现了不同裂缝类型与工程措施的对应配置。工程实践说明，水化热控制是降低坝体中上部开裂风险的关键，配合比优化与持续保湿能够改善坝基约束区的体积稳定性，严格控制层间作业时间则有助于保障结合面质量。相较于事后修补，预防性控制可减少返修、材料消耗和施工停歇，兼具结构安全效益与经济效益。现有方案对干缩裂缝的控制仍弱于温度裂缝，冷却水温调节也较依赖人工操作。后续应配置自动温控阀和湿度传感装置，优化坝基邻近区域养护制度，并开展跨季节、长期化监测，综合分析环境温度循环、库水荷载及材料性能演化对裂缝稳定性的影响，以提升防治方案的自动化水平和长期适用性。

参考文献

[1] 刘波 . 基础工程项目中混凝土裂缝防治措施研究——以深汕西部水源及供水工程为例 [J]. 现代工程科技 ,2024,3(24):4-7.

[2] 刘继红 . 农业水利工程施工中混凝土裂缝的防治技术研究 [J]. 农业机械 ,2024,(12):98-100.

[3] 陈芳 . 浅析在水利工程监理过程中如何提高混凝土外观质量 [J]. 河南水利与南水北调 ,2024,53(12):65-66.

[4] 王建忠 . 引水隧洞衬砌混凝土裂缝控制技术研究 [J]. 水泥 ,2025,(12):141-143.

[5] 耿川 , 耿长亮 . 水利工程全寿命周期中高性能混凝土的实践研究 [J]. 水泥 ,2025,(12):74-76.

[6] 刘涛 . 钢筋混凝土箱涵施工裂缝分析及控制 [J]. 散装水泥 ,2024,(06):137-139.

[7] 黄文兵 . 现代水闸工程中大体积混凝土温度管理与裂缝预防策略研究——以观景口水利枢纽工程为例 [J]. 珠江水运 ,2024,(24):35-37.

[8] 沈富国 . 聚合物防水涂料对水泥混凝土裂缝自修复性能的影响 [J]. 中国水泥 ,2025,(11):100-102.

[9] 管仕辄 , 李仕林 , 刘锋 , 倪小龙 . 基础大体积混凝土夏季施工裂缝控制措施 [J]. 科技与创新 ,2025,(22):36-39.

[10] 周小燕 , 杨淘 , 代薇 , 孙彦梅 , 张芮瑜 , 秦小枫 , 李阳 , 张野 . 基于 DIC 技术的修复后混凝土裂缝扩展特性试验研究 [J]. 水电能源科学 ,2025,(07):119-122+68.

 Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

双向找坡屋面精细化施工综合技术研究

郭起轩，刘伟，孙翌博，许凯悦，刘家书
北京城建集团有限责任公司，北京 100088
DOI:10.61369/ERA.2026100040

摘　　要： 针对结构找坡屋面模架施工中存在的标高体系复杂、架体受力不均、立杆高度不一、特殊结构构件与结构梁、板找坡衔接困难等问题，以布基纳法索博博机场项目为例，研究一种双向结构找坡屋面精细化模架搭设技术。采用顶层立杆使用旋转扣件搭接并附加十字扣件的专项加固工艺，建立15㎡标准化单元分区立杆高度计算体系，利用顶托300mm可调余量消化分区内标高高差，并针对柱帽等水平不找坡构件制定专项节点控制措施。工程应用结果表明，该技术有效解决了大跨度双向结构找坡屋面模架标高控制难、架体稳定性差的难题，屋面坡度精度、结构平整度及节点成型质量均满足设计与规范要求，可为同类结构找坡屋面模架工程施工提供技术参考与借鉴。

关 键 词： 双向变坡屋面；结构找坡；立杆搭接；分区高度计算；精细化施工

Research on Fine Erection Construction Technology of Formwork Support System for Bidirectional Sloped Roof

Guo Qixuan, Liu Wei, Sun Yibo, Xu Kaiyue, Liu Jiashu
Beijing Urban Construction Group Co., Ltd., Beijing 100088

Abstract: To address the problems encountered in the construction of formwork support systems for structurally sloped roofs, including complex elevation systems, uneven load distribution within the support frame, inconsistent vertical tube heights, and difficulties in connecting special structural members with sloped beams and slabs, this study takes the Bobo Airport Project in Burkina Faso as an example to investigate a refined formwork support system construction technology for bidirectional structurally sloped roofs. A special reinforcement method is adopted, in which the top-layer vertical tubes are lapped using swivel couplers and additionally reinforced with right-angle couplers. A zoned vertical-tube height calculation system based on standardized 15 m² units is established, and the 300 mm adjustable range of the U-head jacks is utilized to accommodate elevation differences within each zone. Special joint control measures are also developed for horizontal non-sloped components such as column capitals. The engineering application results demonstrate that this technology effectively resolves the difficulties of elevation control and poor support-frame stability in large-span bidirectional structurally sloped roofs. The roof slope accuracy, structural flatness, and joint forming quality all meet the design and specification requirements, providing a technical reference for the construction of formwork support systems for similar structurally sloped roof projects.

Keywords: bidirection ally sloped roof; structural slope; vertical tube lapping; zoned height calculation; refined construction

引言

大型公共建筑屋面常采用结构找坡设计，以满足屋面排水、建筑造型等功能要求，但结构找坡屋面普遍存在标高变化复杂、模架搭设高差大、立杆高度不统一标准等施工难题，极易出现架体受力不均、结构成型平整度偏差超标、质量差等问题。

布基纳法索博博机场项目航站楼屋面为大跨度双向找坡钢筋混凝土结构，屋面东西向长126m、南北向长65.5m，整体采用双向找坡设计。屋面找坡体系分为两个维度：东西向采用5%统一单向找坡，实现屋面纵向排水导流；南北向以D轴为中心高点，分别向南北两侧3%对称找坡，形成中部高、两侧低的双向排水体系，兼顾屋面排水效率与建筑外观造型。

在屋面结构构件设计上，本工程屋面梁采取差异化找坡方式：梁底长向随屋面找坡，短向不找坡。屋面竖向承重构件采用圆柱，柱顶设置柱帽，柱帽底面不找坡，为水平平面，有效简化了柱帽节点模板施工难度。

本工程屋面模架体系采用扣件式钢管脚手架[2][4]。针对双向结构找坡屋面，标高多变的施工特点，采用模架顶层步距立杆搭接的搭设方式，通过扣件加固与分区标高计算适配屋面双向结构找坡的复杂工况，保障模架整体稳定性[10]。

作者简介：郭起轩（1995.04-），男，汉族，山西省汾阳人，本科，中级工程师，研究方向：建筑施工。

Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

一、施工重难点分析

结合本工程双向找坡屋面结构形式与模架搭设方案，施工重难点主要集中在以下四个方面，是控制工程安全与质量的关键。

1. 屋面标高体系复杂，无统一搭设基准。极易造成模板高低偏差、屋面坡度偏差超标，影响屋面排水功能与结构外观质量。

2. 模架顶层立杆搭接工艺稳定性要求高。本工程采用模架顶层立杆搭接替代对接扣件通长连接立杆，搭接位置为模架受力薄弱点，需通过旋转扣件组合加固工艺提升搭接节点的稳定性。立杆按不小于50mm 的偏心距进行承载力验算[9]，高大模板支架的立杆按不小于100mm 的偏心距进行承载力验算[3]。

3. 屋面不找坡构件与找坡构件衔接难度大。本工程主次梁短向、圆柱柱帽底面均为水平不找坡，侧模加工尺寸较多，需要精准的进行计算[3]。

4. 双向结构找坡屋面标高计算繁琐。大跨度、双向找坡导致模架立杆标高 差异较大，逐点计算工作量大，若无标准化计算单元，易出现计算误差。

二、适用范围

本技术适用于大型公共建筑现浇钢筋混凝土单向、双向及对称结构找坡屋面的模架搭设施工，尤其适用于跨度大、标高连续渐变、立杆高度差异大的超长结构找坡屋面工程。本技术仅需常规扣件式钢管脚手架即可实施[2]，可有效减少立杆钢管切割损耗。

三、核心施工工艺与技术措施

（一）模架顶层步距立杆搭接专项加固工艺

普通模架区域顶层步距立杆搭接采用2个旋转扣件，搭接长度不小于0.8m，高大模架区域顶层步距立杆搭接采用3个旋转扣件，搭接长度不小于1m[1]。

为验证立杆搭接工艺的可靠性，现场搭设试验架体进行验证。搭设立杆间距1m，水平杆步距1.5m，顶层步距立杆搭接采用2个旋转扣件，搭接长度0.8m 的试验架体，立杆顶托上布设主次龙骨及木模板，堆载5.2t 荷载[6]，静载试验24小时后，架体稳定，立杆搭接扣件均无向下滑移，验证合格。



图1 旋转扣件搭接立杆堆载试验

基于规范与堆载试验的验证，针对双向结构找坡屋面模架立杆高度差异化的实际情况，本工程模架体系统一采用顶层步距立杆搭接搭设方式，并在搭接立杆底端加设1个十字扣件作为抗滑移[7][8]支撑点，适配屋面连续渐变的标高变化，有效避免了大量不同高度立杆钢管，常规立杆对接扣件通长连接，切割适配接长立杆钢管的不同高度，造成浪费。



图2 模架顶层步距立杆搭接加固现场应用

该立杆搭接加固工艺可有效提升搭接节点的整体稳定性及扣件抗滑移的强度，弥补立杆搭接相较于通长立杆连接的偏心及扣件抗滑移受力薄弱环节，确保变坡屋面高低错落的立杆体系受力均匀。

（二）分区立杆高度计算体系

为解决结构找坡屋面模架立杆标高计算复杂、误差大的难题，采用分区计算法，充分利用顶托300mm 可调节余量范围，分区统一固定模架立杆搭设高度，通过顶托余量调节适配分区内的较小标高差异，既减少了模架立杆不同高度、简化了施工工序，又有效抵消了分区计算误差，减少了模架搭设难度，大幅提升了屋面结构坡度与平整度控制精度。

（三）不找坡结构构件模架施工控制

本工程柱帽及主次梁高度为800mm，楼板厚度为150mm。屋面结构东西向5% 找坡，南北向以 D 轴为中心高点，分别向南北两侧3% 对称找坡。主次梁短向、圆柱柱帽底面均为水平不找坡，主次梁长向随屋面结构找坡。

结合屋面双向结构找坡特性，梁截面高度不低于设计高度，梁低侧侧模模板统一按650mm 标准高度，梁高侧侧模模板高度根据对应找坡坡度精准计算确定，东西向梁按梁宽 ×3%、南北向梁按梁宽 ×5% 计算高侧侧模模板高度加高尺寸，精准适配屋面渐变坡度。

针对屋面结构构件交叉，标高复杂，施工易错问题，制定

 Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

“先梁交点、后柱帽、再整梁”的支模顺序，首先精准定位两道梁相交区域，完成梁交叉节点底模支设，然后进行柱帽底模支设，最后依托已支设节点区域底模标高及位置，逐段完成梁底模支设，顶托与梁板底模主龙骨间加设与屋面结构找坡度吻合角度的三角形木楔子，保证顶托与梁板底模主龙骨全接触传递浇筑混凝土的施工荷载，保证屋面结构几何尺寸与坡度准确。

（四）屋面结构面层成型控制

屋面结构混凝土浇筑前，完成屋面结构面层顶标高控制方格网的计算及控制点测设，通过密布的方格标高控制点将屋面结构成型面划分为若干小单元，以此控制双向找坡精度，保障屋面结构成型面坡度满足设计要求。

混凝土浇筑过程中采用多次收面工艺，使屋面达到压光混凝土成型效果，取消防水层找平层，屋面结构成型压光混凝土可直接进行卷材防水施工[5]，简化了屋面防水构造做法，节约了工期与材料。



图3 屋面混凝土浇筑成型效果

四、施工操作要点

测量放线：根据结构轴线与控制网测设梁、柱帽、板边线及标高控制点，做好醒目标记，复核无误后方可进入下道工序。

模架搭设：分区进行模架立杆标高布设：按15㎡分区模架立杆统一高度逐区布设立杆，利用顶托300mm 调节余量调整底模标高，插入立杆顶端可调顶托伸出顶层水平杆的悬臂长度大于500mm 时，模架顶层水平杆上部根据屋面结构找坡坡度增设倾斜设置纵横向杆件，保障顶托底至最上部水平杆间距不超过500mm[4]。

模板支设：严格执行“先梁交点、后柱帽、再整梁”的支模顺序，梁两侧侧模高度按计算配置。

模板复测：混凝土浇筑前对模板标高、坡度、位置及几何尺寸进行全面复测，偏差超标部位进行整改。

混凝土浇筑：浇筑全过程安排专人控制屋面结构面层坡度及标高。

拆模与成品保护：混凝土达到规范规定的拆模强度[3]后，按“后支先拆、先支后拆”原则依次拆除模板及架体，及时覆盖保湿养护，保护屋面混凝土面层。

五、质量控制

（一）标高坡度质量控制

施工前完成全部屋面结构构件标高建模计算，严格按照15㎡分区单元制定模架立杆高度施工交底，明确每个分区立杆的搭设高度。各分区利用顶托300mm 调节余量进行底模标高调整，确保屋面结构找坡坡度准确。

（二）模架稳定性控制

模架顶层步距立杆搭接接长所用旋转扣件为核心受力构件，为施工验收重点检查项目，所有扣件紧固力矩按50N·m控制[7]，安排专人逐点检测记录，确保扣件拧紧牢固，杜绝因紧固力矩不足导致搭接接长立杆滑移。

（三）模板关键节点质量管控

梁与梁交接、梁与屋面板交接、梁与柱帽交接、柱帽与屋面板交接的模板关键节点，单独编制专项施工交底，安排专人指导施工。混凝土浇筑前对模板节点进行全面复核。

六、效益分析

本工程采用的双向结构找坡屋面精细化模架施工技术，相较于传统模架施工工艺，具备显著的技术与经济效益。其一，15㎡分区模架立杆高度统一，结合顶托可调余量，适配126m 超长双向结构找坡屋面的标高变化。其二，模架顶层步距立杆搭接使用旋转扣件附加1个十字扣件的加固工艺，有效弥补了立杆搭接的受力薄弱点，有效避免了常规立杆对接扣件通长连接，需切割适配接长立杆钢管的不同高度，造成浪费。减少立杆钢管切割损耗的同时，保障了模架整体稳定性与承载力。[2]其三，针对柱帽等不找坡结构构件的专项节点控制，实现了其与找坡结构构件的准确衔接，杜绝了节点标高、坡度偏差的质量通病。其四，屋面实现压光混凝土成型，取消防水层找平层，直接进行卷材防水施工[5]，缩短了工期，节约了材料成本。

该技术体系成功应用后，屋面结构坡度平整度、成型质量均满足设计及规范要求[5]，模架安全可控，施工效率显著提升，取得了良好的社会效益与经济效益，符合建筑工程高质量、绿色化的发展方向。

七、结束语

双向结构找坡屋面精细化模架搭设施工技术通过模架顶层步距立杆搭接专项加固、15㎡标准化分区立杆高度统一及模板关键节点专项控制等技术措施，有效解决了大跨度双向结构找坡屋面模架标高控制难、架体稳定性差的施工难题。该技术标准化、精

Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

细化、实用性强，能够精准适配各类双向、单向结构找坡屋面的模架施工需求，有效提升结构成型质量与施工安全性[4]，降低施工偏差与质量通病发生率，可为同类大型结构找坡屋面模架工程的施工与质量控制提供技术参考。

参考文献

[1] GB 50666-2011 混凝土结构工程施工规范 [S]. 北京：中国建筑工业出版社，2011.

[2] JGJ 130-2011 建筑施工扣件式钢管脚手架安全技术规范 [S]. 北京：中国建筑工业出版社，2011.

[3] JGJ 162-2008 建筑施工模板安全技术规范 [S]. 北京：中国建筑工业出版社，2008.

[4]GB 51210-2016 建筑施工脚手架安全技术统一标准 [S]. 北京：中国建筑工业出版社，2016.

[5]GB 50207-2012 屋面工程质量验收规范 [S]. 北京：中国建筑工业出版社，2012.

[6] GB 50009-2012 建筑结构荷载规范 [S]. 北京：中国建筑工业出版社，2012.

[7] GB/T 15831-2023，钢管脚手架扣件 [S]. 北京：中国标准出版社，2023.

[8] 宋建学 . 脚手架扣件抗滑移试验及分析 [J]. 建筑技术，2011,42 (10):937-938.

[9] 张文友 . 对《建筑施工扣件式钢管脚手架安全技术规范》JGJ130—2011 中满堂支撑架计算的解析 [J]. 施工技术，2012.

[10] 陈园卿 . 水平荷载作用下混凝土结构扣件式钢管模板高支撑体系受力分析 [J]. 建筑技术，2007.

 Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

公路桥梁病害成因分析及养护加固技术探讨

方政
湖北交投建设集团有限公司路面分公司，湖北 武汉 430000
DOI:10.61369/ERA.2026100041

摘　　要： 公路桥梁作为交通运输网络的核心枢纽，其结构安全性与耐久性直接关系到路网通行效率、人民生命财产安全及区域经济发展，在长期服役过程中，受荷载作用、自然环境侵蚀、施工质量缺陷、养护管理不当等多重因素影响，桥梁结构易出现各类病害，如混凝土裂缝、长时间使用的桥梁，它的承载部件，像钢筋以及支座等，常常会出现性能衰退的情况，这种状况会让结构耐久性极大程度上下降，并且可能会带来安全方面的潜在威胁。本文结合《公路桥梁加固施工技术规范》（JTG/T 5531–2025），系统梳理公路桥梁常见病害类型，深入剖析各类病害的形成机理，去深入开展专项维护方案以及强化工艺的剖析工作，选用典型项目案例来实证技术实施的成效，这样为道路桥梁的全过程维护管理工作、缺陷修复工作以及承载能力改善工作构建起方法论依据以及实务操作借鉴。

关 键 词： 公路桥梁；病害成因；养护技术；加固施工；结构耐久性

Analysis of the Causes of Highway Bridge Diseases and Exploration of Maintenance and Reinforcement Techniques

Fang Zheng
Hubei Jiaotou Construction Group Co., Ltd. Road Branch, Wuhan, Hubei 430000

Abstract: As the core hub of transportation networks, the structural safety and durability of highway bridges are directly related to the efficiency of road network traffic, the safety of people's lives and property, and regional economic development. During long-term service, bridge structures are susceptible to various diseases such as concrete cracks, long-term use of bridges, and performance degradation of load-bearing components such as steel bars and supports. This situation can greatly reduce the durability of the structure and may pose potential threats to safety. This article combines the "Technical Specification for Reinforcement Construction of Highway Bridges" (JTG/T 5531-2025) to systematically sort out the common types of diseases in highway bridges, deeply analyze the formation mechanism of various diseases, and carry out in-depth analysis of special maintenance plans and strengthening processes. Typical project cases are selected to demonstrate the effectiveness of technology implementation. This provides a methodological basis and practical operation reference for the full process maintenance management, defect repair, and bearing capacity improvement of road bridges.

Keywords: highway bridges; disease causes; maintenance technology; reinforcement construction; structural durability

引言

伴随着我国公路交通网络开展发展扩张工作，公路桥梁的修建体量持续增大，其使用时间也跟着增长，公路桥梁作为承载区域交通动脉以及经济发展命脉的关键基建，持续承受着行车压力、自然环境侵蚀以及人类活动所带来的多重挑战，它的结构性能退化现象正逐步显现出来。那么，国内近三成公路桥梁的使用年限已经超过了二十年，部分结构出现了明显的损伤情况。这些结构方面的缺陷会危及路网的运行安全，同时还提高了养护的开销，尤其是病害极大程度地发展之后，桥梁很有可能会发生结构垮塌这种危险事故。

一、公路桥梁常见病害类型及特征

（一）桥面系病害

桥梁表层体系直接承担起行车负荷的承载工作，很容易出现多种损伤形式，比如铺装层出现材料剥蚀、局部坑洞、结构位移以及网状裂隙等情况，在车道碾压痕迹以及桥缘这些地方，表面层出现剥脱的现象经常发生，坑陷的深度从几公分到十余公分都有，随着暑热时节的推移，这种状况更加严重；桥梁服役过程中

Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

会出现裂缝、渗水等不同病害，严重影响桥梁的安全运营，因此对病害进行准确检测及合理加固十分必要。[1] 伸缩缝发生损伤后会带来变形、破损、脱落以及渗漏等情况，进而引发车辆经过时产生跳跃感，这么一来就会提高桥梁结构的振动效应；要是桥面排水不顺畅，就容易造成积水，积水会浸润桥梁的内部结构，进而促使钢筋加速出现锈蚀以及混凝土出现老化；那么栏柱以及人行道上的围栏已经出现了损坏的痕迹。由于撞击损伤，使得结构出现了断裂，并且发生了错位和生锈的情况，这样的状况对通行的安全保障产生了影响。桥梁预制搭板普遍存在锈迹、纵向裂缝、网裂等病害问题，部分预制搭板出现锈涨露筋，搭板开裂导 致桥面铺装产生反射裂缝，进而发展为搭板漏水甚至桥面板穿孔。[2]

（二）上部结构病害

桥梁的上部结构作为主要的承重构件，它的病害状态是和承载性能直接关联的。对于整体浇筑的空心板，结构配筋偏重纵向，横向上仅布置构造钢筋，相对薄弱。[3] 典型的病害主要是以混凝土裂缝为主，具体的表现也就是横向、纵向、斜向以及网状开裂等形态。尤其是横向裂缝，它常见的分布区域集中在梁板跨中部位，裂缝宽度通常是在0.1至0.5毫米这个区间当中，在极端的情形下，甚至可以穿透梁板构件的整个横截面；裂缝的深度比较大，主要是处于梁板支座附近以及墩柱根部；铺装层以及梁板表面，有密布且较窄的网状裂隙；钢筋锈蚀包含了均匀锈蚀、局部锈蚀以及点蚀这三种形式。

（三）下部结构病害

那么墩柱开展了来自上部构造的荷载传导工作，混凝土表面出现了破损剥落以及细微裂纹，其内部钢筋逐渐暴露在了外面，薄壁墩体常见纵长的裂痕位于梁体顶面的横向裂痕也就是这些不规则的纹路，倾向于出现在结构所承受的正负方向弯曲应力值达到峰值的具体区域当中；纵向走向位置沿着预应力钢束方向运行，和施工中的预应力钢束位置、张拉、压浆等存在直接的关系，比如结构强度性能不足、钢束发生变形等。[4] 深基础病害问题的主要缘由是桥梁桩基裸露以及底部掏空，这种情况一般是由桥位附近的河床采砂活动以及雨季水流冲刷作用所引起，最终使得桥梁基础出现了不均匀沉降；桥梁的桥台结构现在出现了纵横交错的裂隙，渗水侵蚀的情况十分明显，重力台体由于土压超载以及钢筋配置上的欠缺，开展了破损方面的情况；支座老化方面的问题，主要体现为橡胶支座出现开裂以及变形、钢板支座产生锈蚀、滚动支座出现卡滞。

二、公路桥梁病害成因深入分析

（一）施工因素

材料选用若未达标，桥梁耐久性便受影响。施工操作若不合规，病害往往因此产生：混凝土强度若不足，钢筋性能若不佳，结构稳固性便遭削弱在进行裂缝修复工作当中所使用的部分材料存在性能方面的缺陷，比如改性环氧基裂缝注浆料，它的劈裂抗拉强度没有达到25兆帕以上，抗压强度低于60兆帕的要求标准，这直接使得修复效果受到了损害；混凝土在浇筑当中进行振捣的工作不足，养护措施方面有所滞后，从而引发了收缩裂缝。这种现象的主要原因在于施工操作没有契合规范；在加固工程当中，开展植筋以及钢板的安置工作还有注胶操作，都偏离了标准规程，从而削弱了整体构造的联结稳固性；那么之前对桩头开展的处理工作不太恰当，并且混凝土的质量不太好，这样就直接成了后续墩柱出现病害的潜在缘由；在施工过程当中，质量控制措施没能严格开展执行工作，还没有构建起系统化的质量保障机制。

（二）运营荷载因素

运营期间的荷载作用是桥梁病害产生和发展的直接诱因：一是超载、重载车辆频繁通行，超出桥梁原设计荷载标准，导致梁板受拉区混凝土应力超过抗拉强度，已有裂缝马上被激活，并且让支座、墩柱等部件受到持续的侵蚀；紧急制动以及转向所引发的水平力，会对结构开展剪切应力施加工作，进而加速裂缝的扩展；城市桥梁承受着持续增长的交通负荷，通行车辆的频次过高，这样的状况会引发结构的长期疲劳。钢结构桥梁特别容易产生疲劳裂纹；四是桥面堆载、违规占用桥梁空间等行为，改变桥梁受力状态，引发局部结构损伤。

（三）环境与养护因素

自然环境侵蚀和养护管理不当是加剧桥梁病害的重要外部因素：一是自然环境侵蚀，高温、严寒、雨雪、风沙等气候条件导致混凝土热胀冷缩、冻融循环，引发裂缝；沿海地带盐雾处于弥漫状态，工业区域腐蚀气体频繁出现，这些情况都会加速开展钢筋锈蚀以及混凝土碳化的进程。桥梁结构长期暴露于自然条件下，受到环境温度和湿度的影响以及大气的侵蚀，容易出现下列损伤。[5] 钢筋锈蚀的主要缘由是氯离子的侵蚀作用；桥梁基础结构在水流持续浸润的状况下，它埋设区域周围的土体不断随着水进行移运，并且桥墩外壁的材质表层也会逐步地消减；桥梁的健康状况由于巡查机制的欠缺以及全寿命维护理念的缺乏而受到损害，病害在初期没有能够得到及时的检查和修葺处理，这样就从微小的迹象逐渐演变成了严重的问题；养护资金方面比较匮乏，以及技术水平相对滞后，使得检测和养护手段未能得以实现现代化；

三、公路桥梁养护加固技术探讨

（一）前期检测技术

精准地开展识别工作，为来开展维护加固工作奠定了基石，检测技术主要把超声波、红外热成像以及雷达探测当作工具来使用，这些方法可以有效地开展混凝土内部缺陷的探查工作，比如

 Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

裂缝、空洞以及钢筋锈蚀情况，施工期间，桥梁原有的通行功能将会被保留下来；智能监测技术借助物联网传感器，来实时捕捉桥梁的振动频率、应力变化以及环境指标，进而实现对结构状态的动态追踪；无人机巡检技术能够快速地开展桥梁表层状况的采集工作，获取到高清影像数据，尤其适宜对地形崎岖或风险突出区域进行勘测；进行桥梁结构受力状态的仿真评估方面的工作，借助有限元技术来实现多工况模拟，这样预测病害形成趋势并且指导维护策略的优化工作的开展。

（二）常见病害养护技术

1. 裂缝病害养护技术

针对不同宽度的裂缝，采用分级修复方案：一是裂缝宽度＜0.1mm 的细微裂缝，采用表面封闭法，选用符合规范要求的裂缝封闭胶，其混合后初始黏度、涂层会把裂隙覆盖住，以此来阻隔湿气的侵蚀，同时要满足流动性以及时效方面的相关标准；中等裂缝的缝宽在0.1至1.5毫米，借助压力灌浆去处理。选用的材料为改性环氧或者改性水泥注浆料，它的劈裂抗拉强度不会低于25兆帕经过高压注浆把改性水泥浆体注入裂缝之后，改性水泥浆体得以实现封闭加固，它28天的抗压强度不会低于55兆帕，并且抗压强度高于60兆帕；在公路桥梁的养护工作中，养护人员应及时地清理桥梁伸缩装置内的杂物，同时，为了保障伸缩装 置的功能发挥，应当及时地维修或更换已经损坏或老化的构件。[6] 针对宽度超过1.5毫米的严重裂缝，处理时要先把裂缝周围已经损坏的混凝土层清除掉。然后，运用劈裂抗拉强度不低于7兆帕的聚合物砂浆来进行修补。在这基础上，接着开展压力灌浆工艺来完成最终的处理工作，开展钢筋补强方面的举措。干缩裂缝是因为水泥质量不符合施工标准、含泥量过高或者外加剂添加不合理，使混凝土坍落度增大，在进行混凝土浇筑时，出现水分散失速度过快的现象，使混凝土产生变形收缩的问题，从而引发裂缝问题的产生。[7]

2. 钢筋锈蚀病害养护技术

钢筋养护的关键之处在于开展防腐蚀处理工作、进行锈迹清除以及来实现强度恢复。首要的步骤也就是进行表面除锈，借助机械或者是化学的手段，把钢筋上附着的锈层去除掉，从而保证钢筋表面能够达到洁净的状态；在开展环氧涂层以及防腐涂料对钢筋的涂刷工作当中，防腐能力得到了显著提升。应按照要求进行多遍钢筋阻锈剂喷涂，并在每一遍喷涂后，采取防止日晒雨淋措施。[8] 要是处于水下或者潮湿环境，那就得选用契合要求的界面剂，它钢对钢在湿态条件所具有的黏结拉伸抗剪强度不可以低于10MPa；三是混凝土修补，凿除锈蚀区域破损混凝土，更换受损钢筋，采用高性能混凝土或聚合物砂浆修补，确保修补材料与原结构黏结牢固，混凝土正拉黏结强度≥1.5MPa；针对严重锈蚀的钢筋混凝土构件，借助外加电流或者牺牲阳极这种阴极保护方法，能够有效地开展阻滞钢筋持续锈蚀进程的工作。

（三）桥梁加固核心技术

1. 增大截面加固技术

这个工艺是基于现行规范 JTG/T 5531 – 2025来开展的，针对的是桥梁承载能力下降以及混凝土强度不足这些方面的问题。那么，首先需要对原构件表面进行预处理，去处理表面浮浆以及油渍的清理工作，通过增加表面粗糙度来实现粘附效果的提升；新增钢筋借助植筋手段来进行置入，这项施工工作必须按照规程来开展，确保锚固牢固可靠；钢筋新增时要进行妥善的安装，然后去开展高性能混凝土的浇筑工作。对于新增钢构件，它的制作、安装、连接以及涂装这些步骤都要落实到位；在混凝土开展养护工作的过程当中，把适宜的湿度以及温度条件维持住是极为重要的，这直接和材料最终强度的形成有着关联。运用加大构件截面的方法，能够有有效地提高它的整体承载性能以及结构刚度。确保伸缩缝路面的平稳性及封闭性，同时为确保人员能够定期对伸缩缝进行检查与养护，在安装时确保伸缩装置拆装便利。[9]

2. 粘贴钢板加固技术

在去处理结合面方面的工作时，需要把表面的浮尘以及油污清除掉，这种方法适宜用于桥梁梁体以及板体抗弯以及抗剪能力不足的这种情形。该技术展现出施工比较便捷、工期相对较短并且对原结构影响比较小的优势，经过精细的研磨之后，要开展表面处理工作，确保其处于洁净以及干燥的状态；把锚栓埋置之后进行紧固，应当契合相关的施工准则；钢板的生产环节严格开展遵循设计规范的工作，它的几何形状以及规定的厚薄参数都得以精确落实；钢板的安装过程需要做到精准到位，接着开展封边工序，并且进行注胶作业。注胶需要做到充实饱满，避免内部产生气泡，这样来保障钢板与原结构之间得以实现牢固且紧密的黏结；对钢板开展现场涂装工作，来提高它的防腐性能，并且提升加固效果的长效性。

3. 粘贴纤维复合材料加固技术

施工之前开展构件表面的清理工作，并且把细微裂缝进行修复，确保表面平整；底胶被涂刷之后，纤维复合材料以及原结构之间的黏结力得到了提升；ＦＲＰ是一种性能优良的混凝土结构加固材料，具有轻质高强的优点。[10] 纤维复合材料，借助专用胶黏剂来开展粘贴工作，其牢固性得以保障，厚度以及平整度可以得到有效控制；构件在固化养护阶段会接受质检工作，杜绝出现空鼓以及脱落的情况。这样抗弯以及抗剪性能得以改善，整体重量却并没有因此而加重。

四、结束语

公路交通方面持续不断地进步，桥梁的维护以及加固技术在朝着智能、环保以及精细化这样的特性方向开展演变，桥梁病害监测系统需要把智能科技以及数据分析融入进来，来实现即时预

Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

警以及精准维护，构建起覆盖桥梁使用全过程的智能化管理架构；二是研发新型环保、高效的养护加固材料，如自愈合混凝土、高性能防腐材料等，提升养护加固效果，降低对环境的影响；那么，要开展桥梁维护机制的健全工作，把维护费用预算增加，来深化技术人员专项培养方面的工作，提高管理执行的效能；在复杂环境当中，需要对桥梁病害机理开展深入探究工作，同时应不断去进行养护加固方案的优化，并且推进技术创新与升级，这样就能对公路桥梁基础设施的高质量发展形成支撑。

参考文献

[1] 张燕彬 . 某国道公路桥梁病害成因分析及加固研究 [J]. 工程机械与维修 ,2024,(10):137-139.

[2] 孙俊杰 . 公路桥梁养护与维修加固施工关键技术分析 [J]. 交通世界 ,2022,(24):45-47.DOI:10.16248/j.cnki.11-3723/u.2022.24.022.

[3] 孙树利 . 高速公路桥梁上部结构病害成因及养护对策分析 [J]. 工程建设与设计 ,2019,(20):77-78.DOI:10.13616/j.cnki.gcjsysj.2019.10.234.

[4] 杨超 , 肖城 . 公路桥梁上部结构病害成因及养护对策分析 [J]. 运输经理世界 ,2021,(07):91-92.

[5] 艾诚 . 公路桥梁病害成因及养护对策分析 [J]. 运输经理世界 ,2023,(31):137-139.

[6] 陈燃 . 公路桥梁伸缩缝常见病害成因分析及养护管理措施 [J]. 智能城市 ,2019,5(10):98-99.DOI:10.19301/j.cnki.zncs.2019.10.053.

[7] 李剑锋 . 农村公路桥梁病害成因及养护管理策略分析 [J]. 运输经理世界 ,2022,(11):124-126.

[8] 陈瑞敏 , 杨庶葆 . 高速公路桥梁常见病害成因分析及维修加固对策 [J]. 内蒙古公路与运输 ,2018,(06):60-62.DOI:10.19332/j.cnki.1005-0574.2018.06.014.

[9] 郭献松 . 公路桥梁伸缩缝常见病害成因分析及养护管理措施 [J]. 交通世界 ,2018,(28):86-87.DOI:10.16248/j.cnki.11-3723/u.2018.28.039.

[10] 王彬 , 王迪 . 公路桥梁下部结构致命病害成因分析与加固处治 [J]. 技术与市场 ,2017,24(08):138-139+141.

 Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

基于 YOLOv8s 的 PCBA 导电海绵位置视觉检测算法研究

罗成[1]，罗浩文[2]
1. 四川长虹电器股份有限公司，四川 绵阳 621000
2. 四川农业大学，四川 雅安 625014
DOI:10.61369/ERA.2026100038

摘　　要： 家电产品一般利用导电海绵实现 PCBA 上芯片或关键电路与结构件接地，导电海绵粘贴偏移和缺件会引发电路板短路或整机功能失效等质量问题。传统人工目检存在效率低、无法数字化追溯等缺陷。针对家电产线 PCBA 导电海绵自动化检测需求，本文以 YOLOv8s 为基础检测模型，结合双阈值七维特征融合评分，Procrustes 刚体配准位置校验等多项技术，构建一套完整的机器视觉检测系统。实验结果表明：模型 mAP50 达到 0.995，mAP50–95 为 0.812；验证批正常板识别准确 100%，不良缺件板识别准确率 100%；CPU 模式下单帧总检测耗时 368~590ms，系统可补偿最高 495px 的 PCBA 全局放置偏移，有效解决产线放板偏差、光照扰动等工程难题，可满足工业量产环境下导电海绵位置合规性检测与质量追溯需求。

关 键 词： PCBA；导电海绵；YOLOv8s；机器视觉；Procrustes 配准

Research on Visual Detection Algorithm for Conductive Sponge Position in PCBA Based on YOLOv8s

Luo Cheng[1], Luo Haowen[2]
1.Sichuan Changhong Electrical Appliances Co., Ltd., Mianyang , Sichuan 621000
2.Sichuan Agricultural University, Ya'an, Sichuan 625014

Abstract: Household appliances typically use conductive sponge to connect chips or key circuits on the PCB board with structural components for grounding. Deviations in the adhesion of the conductive sponge and missing parts can cause short circuits on the circuit board or functional failure of the entire machine. Traditional manual inspection methods have low efficiency and lack the ability for digital traceability. To meet the requirements of automated detection of conductive sponge on PCBA in the household appliance production line, this paper uses the YOLOv8s detection model as the basis, combines dual-threshold seven-dimensional feature fusion scoring, Procrustes rigid body registration position verification, and other technologies to construct a complete machine vision detection system. Experimental results show that the model's mAP50 reaches 0.995, and mAP50–95 is 0.812; the recognition accuracy of normal boards in the verification batch is 100%, and the recognition accuracy of defective boards with missing parts is also 100%; the total detection time per frame in the CPU mode is 368–590ms, and the system can compensate for the maximum 495px global placement offset of the PCB board, effectively solving engineering problems such as placement deviation and light disturbance in the production line, and meeting the requirements for compliance detection and quality traceability of conductive sponge positions in industrial mass production environments.

Keywords: PCBA; conductive sponge; YOLOv8s; machine vision; Procrustes registration

引言

导电海绵作为 PCBA 板上保证电路接地良好的一种关键元件，其粘贴位置的精度直接影响整机可靠性与电磁兼容性能。在家电制造量产场景中，导电海绵若发生偏移、超出规定区域，极易短接周边相邻焊盘，引发电路短路、功能失效等严重质量事故，且传统人工目检方式缺乏检测过程的数字化留痕，异常问题难以实现全链路追溯，已无法满足高精度生产管控要求。为此，本文针对 PCBA 导电海绵的安装位置检测痛点，引入 YOLOv8s 目标检测算法，结合工业相机采集的高分辨率图像开展模型训练与优化，构建一套兼顾检测速度与定位精度的自动识别方案，为产线质量闭环管控提供技术支撑。

作者简介：
罗成（1974.09–），男，汉族，籍贯：四川省西充县，大学本科，学士学位，高级工程师，从事工厂自动化和智能制造方向的研究工作。
罗浩文（2005.11–），男，汉族，籍贯：四川省绵阳市，四川农业大学计算机科学与技术专业，大学本科在读，从事机器视觉和工业自动化方向研究。

Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

一、系统总体架构与检测流程

（一）系统总体架构

本系统面向 PCBA（印制电路板组件）产线上导电海绵的自动化视觉检测需求，采用模块化分层架构设计，由6大核心功能层、14个功能模块组成。系统基于迈德威视 MV-GE501GM 千兆网口工业相机进行图像采集，以 YOLOv8s 为目标检测核心算法，结合双阈值防误检、七维特征融合评分、Procrustes 刚体配准位置校验、训练集基准驱动曝光优化等多项创新技术，实现了对 PCBA 上多个导电海绵位置的高效、可靠识别与合规性判定，如表1：

表1

功能层	核心模块	关键文件	核心职责
表现层	主界面 / 参数配置	main_app.py	PyQt5 GUI 主界面、ROI 标定、结果展示、声音提示
业务编排层	自动触发	auto_detect_module.py	帧差法5状态机检测 PCBA 就位
业务编排层	时序滤波	temporal_filter.py	滑动窗口多帧投票 + 空间聚类
算法核心层	YOLO 检测	detection_module.py	YOLOv8s 双阈值 +7维特征融合 +ROI 二次检测
算法核心层	位置校验	verification_module.py	Procrustes 刚体配准 + 匈牙利最优匹配
算法核心层	边缘对齐	edge_alignment_module.py	ECC/ORB/ 混合三种边缘对齐策略
算法核心层	图像预处理	preprocess_module.py	CLAHE 对比度均衡 +HSV 颜色过滤
数据采集层	工业相机	camera_module.py	迈德威视 SDK 封装、AE 控制、断线重连
数据采集层	曝光优化	full_optimize.py / fine_optimize.py	训练集质量基准 + 多维参数搜索
模型训练层	两阶段训练	train_2stage.py	冻结 Backbone →全网络精调
模型训练层	自动标注	auto_label.py	位置先验统计 + 图像处理检测标注
基础支撑层	配置管理	config_manager.py	统一 YAML 配置读写
基础支撑层	统计追溯	stats_module.py	SQLite 检测记录存储与查询
基础支撑层	权限管理	auth_module.py	用户登录与操作权限控制

（二）流水线检测流程

系统核心检测流程为8级串联流水线，单次检测完整流程为：①相机采集→②自动触发→③图像预处理和边缘对齐→④ YOLO 检测→⑤二次检测→⑥位置校验→⑦时序滤波→⑧结果输出。

1. 相机采集：采用迈德威视 MV-GE501GM 千兆网口工业相机，分辨率2448×2048像素，8位灰度 / 彩色输出[1]。相机支持自动曝光 (AE) 和手动曝光模式，曝光参数由训练集基准优化确定。

2. 自动触发（帧差法5状态机）：通过帧差法检测 PCBA 是否就位，采用5状态机模型：IDLE → PLACING → STABLE → DETECTING → RESULT_HOLD。当画面变化率超过阈值时进入 PLACING 状态，连续3帧变化率低于阈值 ×0.3时判定 PCBA 稳定放置，触发检测流程。检测完成后进入 RESULT_HOLD 状态保持3秒显示结果，随后回到 IDLE 状态等待下一块 PCBA。该机制有效避免了人工按键触发，提升了产线检测效率。

3. 图像预处理与边缘对齐：当采集图像与训练参考图像存在微小旋转或平移差异时，通过边缘对齐模块进行几何校正。系统提取 Canny 边缘计算结构相似度，当相似度低于0.70时触发对齐[2]。实际工程日志记录显示：

（1）ECC 粗配准：基于增强相关系数的欧氏变换估计。当 ECC 相似度达到0.75以上时直接采用 ECC 结果，如日志记录”对齐应用 : method=ecc, rot=0.00, dx=−0.0, dy=−0.0, sim: 0.753 -> 0.753”。

（2）ECC+ORB 混合配准：当 ECC 相似度不足时（如0.684），级联 ORB 精配准，如日志记录”对齐应用 : method=ecc+orb, rot=−0.00, dx=0.0, dy=−0.0, sim: 0.583 -> 0.684, time=57.7ms”，相似度从0.583提升至0.684。

（3）ROI 模板匹配对齐：对5个 ROI 区域分别进行模板匹配，根据匹配偏移估计全局变换。工程日志记录”ROI 模板对齐 : matched=5, inlier=5, rot=−0.04, dx=−178.0, dy=−4.6”，5个 ROI 全部匹配成功，模板匹配得分0.958~0.989。

4.YOLOv8s 双阈值检测：以 YOLOv8s 模型为核心执行导电海绵检测。模型文件大小21.48MB，输入尺寸640×640，检测类别为 conductive_sponge（单类）。实际工程检测日志显示：

（1）典型 OK 板检测：5个导电海绵全部检出，置信度分别为0.9125、0.8969、0.8940、0.8849、0.8091，平均置信度0.8795，远高于高置信度阈值0.25，全部直接判定有效。CPU 推理耗时418~484ms/ 帧。

（2）含低置信度候选的检测：当原始检测框数为6时（含1个低置信度候选 conf=0.4220），通过七维特征融合评分机制对低置信度框进行二次判定，有效过滤误检目标，最终保留5个有效检测。

（3）首帧推理耗时较长：模型首次推理（CPU 推理）耗时约900ms+（JIT 编译预热），后续推理稳定在418~556ms/ 帧。

5.ROI 引导二次检测：当检出目标少于预期5个时，在对应感兴趣区域降低置信度阈值二次推理，结合模板匹配验证，提升困难场景召回率。

6. 位置合规校验：Procrustes 刚体变换结合 RANSAC 估计全局平移旋转，匈牙利算法完成检测目标与标准 ROI 最优匹配，补偿放板全局偏差后判定单块海绵偏移是否超限。

7. 时序一致性滤波：维护5帧滑动窗口，空间聚类 + 多帧投票机制过滤光照、电磁干扰带来的瞬态误检。

8. 结果输出：PASS/NG 可视化弹窗加声音告警，同时存储

 Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

JSON 日志、检测截图与数据库记录。

二、关键算法改进

（一）双阈值分级判定与七维特征融合评分

通用 YOLO 采用单一置信阈值存在矛盾：阈值偏高易漏检，阈值偏低容易将焊盘反光等判定为导电海绵。本项目设计双阈值分级策略：置信度高于高阈值直接判定有效；处于高低阈值之间的候选框启用七维特征融合评分；低于低阈值直接丢弃。七维特征包含填充率 , 目标宽高比 , 区域灰度均值 , 边缘完整性 , 局部对比度 ,LBP 纹理均匀性和颜色直方图，各特征设置对应权重加权得到融合总分 S_{fusion}，当 S_{fusion}<0.55 判定为误检。该融合评分属于软判决，单项特征缺陷不会直接剔除目标，具备工业场景容错能力，工程测试中可有效剔除置信度 0.422 的虚假检测框 [3]。

（二）训练集基准驱动的相机曝光自动优化

人工调试曝光参数受操作人员主观影响，会造成现场图像与训练集亮度分布不一致，降低模型检测置信度。该算法步骤：①建立训练集参考质量向量，包含灰度均值、标准差、分位数、对比度、信噪比等 10 维指标；②定义多维质量距离，衡量现场图像与训练集基准的差异；③在 Gamma、曝光、增益、对比度四维参数空间遍历搜索，选取质量距离最小参数组合；④最优参数邻域精细化搜索收敛最终参数。经优化后现场图像灰度均值稳定在 114~118，OK 板平均检测置信度提升 8%~15%。

（三）Procrustes 刚体配准位置校验方法

传统 ROI 距离校验没有补偿 PCBA 整体平移旋转，产线手动或机械手放置带来数百像素全局偏移时，完好海绵会被误判偏移不合格。本项目采用 3 自由度刚体变换模型，RANSAC 随机采样估计全局变换参数，内点最小二乘精化，匈牙利算法完成检测实例与标准 ROI 最优匹配，补偿全局偏差后再评判单块海绵位置偏移。实验证明该方法可补偿最高 495px 的视场偏移，将大偏移场景下 OK 板误判率由 100% 降至 0。当海绵本体真实偏移时，残差会显著超过 30 px 阈值，正确输出 NG 判定 [4]。

（四）多策略边缘对齐推理一致性保障

YOLO 对输入图像旋转平移敏感，微小摆放角度差异会造成置信度下降甚至漏检。系统预先保存训练参考图边缘特征；现场图像 Canny 边缘相似度不足 0.70 则启动配准：ECC 粗配准适合微小偏差；ECC+ORB 级联处理中等旋转平移；ROI 模板匹配依靠海绵位置先验应对大幅偏移。对齐后图像送入 YOLO 推理，检测框通过逆变换映射原图坐标系，保证结果标注正确。

（五）滑动窗口时序一致性滤波

光照闪烁、电磁干扰会造成单帧瞬态误检，而真实导电海绵在连续帧稳定出现。设置 5 帧滑动历史窗口，对检测框做空间聚类，中心距离小于 30 px 归为同一目标簇；簇满足出现帧数≥ 3、平均置信度≥ 0.3 才判定有效，剔除瞬时出现的虚假目标，提升连续检测稳定性。

（六）两阶段迁移学习与位置先验自动标注

导电海绵属于小目标，可用标注样本总量有限，直接训练易发生过拟合。两阶段训练策略：阶段 1 冻结 Backbone 前 10 层，仅训练检测头 15 个 epoch，学习率 0.01，快速适配任务；阶段 2 解冻全部网络，120 个 epoch 精调，学习率 0.001，设置早停机制防止过拟合；数据增强开启 mosaic、HSV 等色彩扰动，禁用旋转翻转以匹配 PCBA 方向性约束 [5]。

针对人工标注工作量大问题，提出位置先验自动标注：统计样本内海绵位置分布先验，正常样本直接生成标注；不良样本结合 HSV 过滤与轮廓检测，在先验约束下自动生成 YOLO 格式标签，减少人工标注工作量。

三、 实验与结果分析

（一）数据集设置

数据集共 490 张训练图像，其中 OK 样本 400 张（每张包含 5 块导电海绵），缺件不良 DB 样本 90 张，验证集约 100 张，图像分辨率 2448×2048，单检测类别 conductive_sponge。

（二）模型训练结果

YOLOv8s 输入尺寸 640×640，模型大小 21.48 MB。阶段 1 冻结训练 15 个 epoch，mAP50 即达到 0.995，Precision=0.9999，Recall=1.0000；阶段 2 全网络精调后 mAP50=0.995，mAP50–95=0.812，Precision=1.0000，Recall=0.9999，box_loss、cls_loss 平稳下降，训练无明显过拟合。

（三）离线批量验证

400 张 OK 样本全部判定 PASS，识别准确率 100%；个别样本产生冗余检测框，经后处理过滤得到正确结果。20 张缺件不良样本全部正确判定 NG，不良识别准确率 100%，无误判 PASS 现象。

（四）产线在线测试

在线采集超过 150 条真实产线检测记录，CPU 模式下推理耗时 346–556 ms，校验耗时 15–36 ms，单帧总耗时 368–590 ms，检测帧率 1.7–2.7 FPS。可处理小、中、大各类 PCBA 放置偏移；对于海绵本体偏移超限样本能够准确输出 NG。边缘对齐模块可根据偏移程度自适应选择 ECC、ECC+ORB、ROI 模板匹配，完成图像几何校正。

四、结论

本文面向家电 PCBA 产线导电海绵位置检测，基于 YOLOv8s 提出一套完整机器视觉检测方案。通过双阈值七维特征融合抑制误检；训练集基准自动曝光优化解决现场光照参数调试难题；

Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

Procrustes 刚体配准补偿 PCBA 整体放板偏移；多策略边缘对齐保障推理输入一致性；时序滤波抑制瞬时干扰；两阶段迁移学习与先验自动标注解决小样本训练痛点。离线与在线工程测试表明，系统具备很高识别精度，能够应对工业现场放板偏移，光照扰动、和样本少等现实问题，检测结果支持本地存储追溯，可应用于 PCBA 自动化质量检测工位。后续可以引入 GPU 推理进一步提升检测帧率，拓展更多海绵规格与缺陷类型，增强算法泛化能力。

参考文献

[1] 宋鸿飞 . 范炯阳 . 冷雪 . 黄俊然 . 杨晓凯 . 基于硬件解耦的线结构光三维重建方法 [J]. 激光与光电子学进展 . 2026 ,63 (16)：176-192.

[2] 计大威 . 基于数字图像处理技术的皮革纹理缺陷检测系统设计 .[J]. 皮革与化工 . 2026 ,43 (07)：25-27.

[3] 宋康康 . 张俊生 . 仝晓刚 . 张红宇 . 基于 Canny-Devernay 的算法芯片缺陷边缘检测 [J]. 信息技术与信息化 . 2025 (04)：83-86.

[4] 刘志超 . 顾广杰 . 多站激光扫描点云配准算法研究 [J]. 海洋测绘 . 2018 ,38 (05)：36-40.

[5] 任孟 . 陈宇岳 . 张德锁 . 林红 . 基于 rGO/PDMS 可穿戴电阻式柔性压力传感器的制备和性能研究 [J]. 纺织导报 . 2022 (06)：92+94-96.

 Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

基于 BIM 技术的铝模板现浇楼梯一次浇筑成型施工技术研究

申定龙，刘学勇，卢文培，刘坤
中煤第三建设（集团）有限责任公司，安徽 宿州 234000
DOI:10.61369/ERA.2026100003

摘　　要： 高层现浇楼梯传统模板施工存在成型质量差、修补量大、成本与工期管控难等问题，依托二维图纸开展铝模施工，受楼梯变截面复杂节点制约，易出现配模冲突、浇筑缺陷等问题，无法实现一次免修补成型。以高层住宅工程为依托，融合 BIM 数字化技术，整合参数化建模、多专业碰撞检测、4D 施工仿真、可视化交底与数字化验收手段，优化楼梯铝模构造、支撑体系与浇筑工艺，同步优化防滑条一体浇筑成型构造、成品保护前置管控措施，构建铝模楼梯一次浇筑成型施工体系。工程实践表明，该技术可有效解决踏步错台高低差超标、踢面倾斜不垂直、缺棱掉角、梯板梯梁交接漏浆、粘模脱皮、踏步起砂麻面等楼梯施工质量通病，大幅提升楼梯一次成型合格率，缩减人工修补成本与施工工期，减少材料损耗与建筑垃圾，可为同类高层现浇楼梯精细化施工提供技术借鉴。

关 键 词： BIM；铝合金模板；现浇楼梯；一次浇筑成型；深化设计；4D 施工模拟；防滑条一体成型；成品保护

Research on One-Pour Forming Construction Technology of Cast-In-Place Stairs With Aluminum Formwork Based on BIM Technology

Shen Dinglong, Liu Xueyong, Lu Wenpei, Liu Kun
China Coal No.3 Construction (Group) Co., Ltd., Suzhou, Anhui 234000

Abstract: The traditional formwork construction of cast-in-place stairs in high-rise buildings suffers from poor forming quality, extensive repair work, and difficulties in cost and construction schedule control. When aluminum formwork construction is carried out relying on two-dimensional drawings, restricted by complex joints of variable-section stairs, formwork matching conflicts and pouring defects tend to occur, and one-time repair-free forming cannot be realized. Based on a high-rise residential project, BIM digital technology is integrated, including parametric modeling, multi-disciplinary collision detection, 4D construction simulation, visual technical disclosure and digital acceptance. The aluminum formwork structure, support system and pouring process of stairs are optimized. Meanwhile, the integrated pouring structure of anti-skid strips and pre-control measures for finished-product protection are improved, and a construction system for one-pour forming of aluminum-formwork stairs is established. Engineering practice shows that this technology can effectively eliminate common construction quality defects of stairs such as excessive height difference of step staggering, inclined and non-vertical risers, edge chipping, slurry leakage at joints between stair slabs and stair beams, formwork sticking and peeling, as well as sanding and pitting on step surfaces. It greatly improves the qualification rate of one-time forming of stairs, reduces manual repair costs and construction periods, and cuts down material loss and construction waste. It can provide technical reference for the refined construction of similar high-rise cast-in-place stairs.

Keywords: **BIM; aluminum alloy formwork; cast-in-place stairs; one-pour forming; detailed design; 4D construction simulation; integrated forming of anti-skid strips; finished-product protection**

Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

一、研究背景及意义

相较于传统木模板刚度不足、周转次数低、成型缺陷多、后期修补成本高的弊端，铝合金模板凭借精度高、可循环、绿色低碳等优势已广泛应用于高层住宅施工，但现浇楼梯变截面、复杂节点多，依托传统二维图纸开展铝模深化配模存在空间表达不足、构件易碰撞、排气振捣构造缺失、支撑布设不合理等问题，导致楼梯混凝土难以一次浇筑成型、踏步错台高低差超标、踢面倾斜不垂直、缺棱掉角、梯板梯梁交接漏浆、粘模脱皮、踏步起砂麻面等质量通病多发、成型合格率偏低，制约铝模施工质量与效率优势[1-2]。BIM 技术具备三维建模、碰撞检测、4D 仿真与数字化管控能力，可实现施工方案前置优化与风险预控，现有研究多集中于墙体、梁板铝模优化，针对楼梯复杂节点、防滑条一次带出、成品保护及一次成型成套施工技术的系统性研究较为欠缺。基于此，本文结合工程实际，依托 BIM 技术开展楼梯铝模深化优化与浇筑工艺改进研究，同步配套浇筑同步成型防滑条、全流程成品保护措施，解决传统施工经验化、缺陷多、返工量大的问题，对提升现浇楼梯成型质量、缩短工期、降低成本、实现精细化绿色施工具有重要工程应用价值与推广意义。

二、工程应用效益分析

（一）工程概况

本研究依托某高层住宅建筑群工程开展实证应用，项目整体包含 12 栋 33 层剪力墙结构住宅，属于典型标准化高层住宅工程，建筑标准层统一采用全铝合金模板施工体系，契合现阶段绿色建造与高效建造的行业发展要求。项目标准层每层对称布置 2 部现浇板式楼梯，楼梯结构集成梯段踏步、休息平台、梯梁，变截面节点构造复杂、成型精度要求高，浇筑阶段需同步一体成型踏步防滑条，成型后成品保护管控难度大，是现场质量管控的重难点部位。为精准量化 BIM 数字化优化工艺的应用价值，本次研究设置对照组与试验组开展对比分析，其中 1#、2# 楼栋采用传统二维施工图纸深化铝模施工工艺，依托经验化配模与现场管控模式施工；3#~12# 楼栋全面应用本文研发的 BIM 数字化深化 + 4D 仿真优化 + 一次浇筑成型成套施工技术，配套防滑条预埋一体成型构造、BIM 前置成品保护方案，在同等施工条件、班组配置、材料规格前提下，系统采集两类工艺的施工质量、工期、成本、安全及环保数据，完成多维度效益量化分析，研究数据具备真实性与工程代表性。

（二）成型质量效益对比

现有研究表明，传统二维图纸指导下的铝模楼梯施工，因空间可视化缺失、构造优化不足、振捣排气体系不完善、防滑条后置施工、成品保护措施缺失，极易引发踏步错台与高低差超标、踏步棱角破损、缺棱掉角、踏步面起砂麻面、踢面倾斜不垂直、梯梁与梯板交接处漏浆、粘模、表面脱皮、防滑条安装错位空鼓等质量通病，导致楼梯一次成型合格率偏低，后期需大量人工修补打磨、二次处理防滑条，严重影响混凝土成型观感与结构精度[3]。本文通过 BIM 参数化深化、多专业碰撞检测、踏步防滑条一体成型构造优化、4D 浇筑仿真模拟、前置成品保护方案推演，从设计源头规避施工缺陷，有效解决传统工艺质量管控痛点[4-5]。为直观对比工艺优化效果，本次研究对两组楼栋标准层楼梯施工质量进行全覆盖抽检，重新编制质量缺陷频数统计表，核心质量指标数据统计结果如表 1 所示。

表 1 新旧施工工艺楼梯成型质量指标对比

检测指标	传统二维铝模工艺	BIM 数字化优化工艺	提升效果
踏步一次成型合格率	85.83%	98.70%	提升 12.87%
每层修补工序耗时	1.2h	0.1h	削减 91.7% 修补人工投入
每层综合缺陷平均数量	11.6 处	1.1 处	缺陷数量降低 90.5%
踏步错台、高低差超标率	14.17%	1.30%	尺寸偏差问题大幅减少
踢面倾斜、垂直度超标缺陷数	3.2 处 / 层	0.2 处 / 层	缺陷降低 93.75%
梯梁梯板交接漏浆、粘模脱皮缺陷	2.8 处 / 层	0.3 处 / 层	缺陷降低 89.3%
缺棱掉角、踏步起砂麻面缺陷	3.6 处 / 层	0.6 处 / 层	缺陷降低 83.3%
防滑条错位、空鼓返修率	12.6%	0.9%	防滑条成型缺陷大幅降低

表 2 传统工艺楼梯质量缺陷频数统计表（单标准层平均）

缺陷类型	单层出现频数	缺陷占比
踏步错台、高低差超标	3.2	27.6%
踢面倾斜、立面不垂直	2.9	25.0%
梯梁梯板交接漏浆、粘模脱皮	2.4	20.7%
缺棱掉角、踏步棱角破损	1.8	15.5%
踏步起砂麻面、气泡聚集	1.3	11.2%

表 3 BIM 优化工艺楼梯质量缺陷频数统计表（单标准层平均）

缺陷类型	单层出现频数	缺陷占比
踏步错台、高低差超标	0.3	27.3%
踢面倾斜、立面不垂直	0.2	18.2%
梯梁梯板交接漏浆、粘模脱皮	0.3	27.3%
缺棱掉角、踏步棱角破损	0.2	18.2%
踏步起砂麻面、气泡聚集	0.1	9.0%

施工重难点重写：

本项目现浇铝模楼梯施工核心重难点分为三大类：

1. 浇筑成型精度管控难点：楼梯梯段变截面连续变化，传统二维图纸无法直观校核踏步标高、踢面垂直度，配模时支撑间距、锁模力度无统一标准，极易出现踏步高低差、错台、踢面向内 / 向外倾斜；梯梁与梯板交接阴角位置模板密封措施缺失，振捣过程易出现漏浆、粘模，拆模后表面脱皮、麻面气泡集中。

2. 踏步边角与防滑条成型难点：踏步阳角无专用加固构造，浇筑振捣侧压力易造成棱角破损、缺棱掉角；传统防滑条多后期水泥砂浆粘贴，易出现空鼓、错位、脱落，人工二次施工工作量大，观感差。

3. 混凝土成品保护管控难点：楼梯拆模后人员通行、材料转运频繁，无前置防护方案易磕碰棱角、划伤踏步面层；传统施工仅后期简单覆盖防护，破损后修补难度大，增加修补成本。

BIM 优化配套措施：

 Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

1. 在 BIM 模型中增设踏步阳角加固铝模压条、梯梁梯板阴角密封企口构造，提前模拟振捣排气通道，减少气泡、漏浆；

2.BIM 参数化建模内嵌防滑条一体成型铝模卡槽，实现混凝土浇筑同步带出防滑条，取消后置粘贴工序；

3. 通过 4D 施工模拟推演拆模、转运、上人全流程，在模型中预设踏步护角、面层覆膜、通道围挡等成品保护构件，同步编入可视化交底文件，班组严格按模型防护方案执行。

（三）工期、经济、安全与环保综合效益分析

结合相关研究成果可知，BIM 技术与铝模施工的深度融合，可实现施工方案前置优化、资源精准配置、工序高效衔接，同步集成防滑条一体浇筑、成品保护标准化措施，有效弥补传统施工经验化管控的短板，在工期压缩、成本降耗、安全提质、绿色施工等方面具备显著综合优势[6]。本文结合项目实测数据，从四大维度完成效益系统性分析：

1. 工期效益显著提升。传统二维铝模施工模式下，楼梯存在配模偏差、浇筑缺陷多、返工修补频繁、防滑条后置二次施工、成品破损反复修复等问题，单标准层楼梯支模、浇筑、打磨修补、防滑条施工全流程施工周期约 1.5d。本文 BIM 优化工艺通过虚拟预拼装消除配模误差，依托 4D 仿真确定标准化浇筑工序，实现楼梯整体一次浇筑、防滑条同步成型，配套前置成品保护减少后期修复，单标准层楼梯施工工期缩短 0.5d。单栋 33 层楼栋累计节约施工工期 16.5d，有效加快标准层流水施工节奏，提升主体结构整体施工效率，契合高层住宅高效建造的施工需求。

2. 经济效益持续降耗。传统铝模施工依赖人工经验配模，非标构件数量多、现场切割损耗大、返工人工成本高，防滑条后置施工额外增加砂浆与人工投入，资源浪费问题突出[2]。基于 BIM 参数化建模与虚拟预拼装技术，可精准匹配楼梯变截面节点尺寸，优化模板构件排布方案，项目铝模非标构件用量减少 22%，模板现场切割损耗降低 18%，大幅减少铝材耗材浪费。同时，工艺优化后每层楼梯修补、打磨、防滑条施工人工投入减少 1.1 工日，10 栋楼栋累计节约人工 363 工日，有效降低项目人工成本与材料损耗，提升工程整体经济效益。

3. 绿色环保效益突出。铝合金模板本身具备高周转、可回收、低污染的绿色建材优势，搭配 BIM 数字化精准施工体系，可彻底摒弃传统楼梯施工大面积抹灰修补、防滑条砂浆粘贴工艺，大幅减少砂浆、腻子等建筑垃圾产生量[7]。精准配模有效规避铝材无效损耗，实现建材资源高效利用，降低施工过程中的环境污染，完全契合清水混凝土免抹灰施工的行业发展趋势，具备良好的生态推广价值。

4. 施工安全风险可控。高层楼梯施工属于高空高危作业，传统施工方案交底模糊、工序管控无序，易引发高空坠落、物体打击等安全隐患；同时成品破损后修补作业增加高空操作频次。本文通过 BIM 4D 施工仿真模拟，提前识别模板吊装、高空支模、混凝土浇筑、拆模转运等交叉作业风险点，结合移动端三维可视化交底，同步明确成品保护围挡、临时通行通道设置标准，规范班组标准化操作，大幅降低现场返工频次与高空作业风险，实现施工安全前置预控，提升项目安全管控精细化水平。

三、技术推广应用难点与优化对策

（一）技术落地应用难点

结合现有 BIM 铝模应用研究及本项目落地实践来看，现阶段 BIM 数字化一次浇筑成型技术在高层楼梯施工中的规模化推广，仍存在技术适配性、人员专业性、产业链协同性等多重痛点[8]，具体难点如下：一是现场施工人员数字化素养不足，一线班组长期依赖传统施工经验，对 BIM 三维模型查阅、节点识图、数字化交底、防滑条一体成型构造、模型内成品保护方案的接受度与熟练度较低，导致数字化管控工艺落地存在偏差；二是楼梯变截面踏步等非标节点参数化建模流程繁琐，防滑条卡槽、阳角加固件等配套构件无标准化族库支撑，重复建模工作量大，制约施工前期深化效率；三是产业链数据协同断层，铝模加工厂家与施工单位 BIM 数据对接不规范，模型尺寸、构件编码无法直接转化为工厂加工图纸，易出现建模与加工信息错位，引发构件加工偏差。

（二）针对性优化解决对策

针对上述技术落地难点，结合知网同类工程研究成果与项目实操经验，建立适配现场的数字化落地保障体系，提出针对性优化对策：一是构建分层化 BIM 培训与驻场指导机制，针对管理人员、施工班组开展差异化专项培训，重点讲解防滑条一体成型构造、踏步成品保护模型方案、错台垂直度控制节点，制作简易图文、动画交底手册，普及 BIM 模型识图与数字化施工要点，同时配置专职 BIM 技术员驻场指导，及时解决现场应用难题，提升全员数字化施工能力；二是搭建标准化参数化构件族库，整合本项目及同类高层住宅楼梯变截面踏步、防滑条卡槽、阳角加固压条等模型，建立可复用的 BIM 族库体系，后续同类项目可直接调用修改，大幅缩短建模深化周期，提升前置设计效率；三是统一 BIM 数据加工标准，规范模型尺寸标注、构件编码、图纸导出格式，打通 “BIM 建模 — 工厂加工 — 现场施工” 数据传输通道，将防滑条一体成型、密封防漏浆、成品保护配套构件同步纳入加工清单，实现全链条数据无缝对接，彻底消除信息偏差与加工误差，保障数字化施工体系高效落地。

四、施工优化效果分析

本文依托高层住宅实体工程，系统开展 BIM 技术赋能铝模楼梯一次浇筑成型施工技术研究，通过理论分析、仿真模拟、工程实证，得出如下结论：

第一，传统二维图纸深化的铝模楼梯施工模式存在明显技术短板，空间可视化缺失导致配模不合理、支撑体系失衡、排气振捣与密封构造缺失、防滑条无一体成型措施、无前置成品保护方案，引发踏步错台高低差超标、踢面倾斜不垂直、缺棱掉角、梯板梯梁交接漏浆粘模、踏步起砂麻面气泡聚集等多重质量通病，后期修补、防滑条二次施工、破损修复工序大幅增加工期与成本投入，施工精细化程度难以满足现代高层住宅建造要求。而依托 BIM 三维参数化协同建模、多专业碰撞检测与 4D 施工仿真技术，可在施工前置阶段完成踏步排气、阴角密封、防滑条一体卡

Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

槽、阳角加固、成品保护通道围挡等专项优化，从设计源头规避各类成型缺陷。

第二，BIM 数字化技术与封闭式铝模楼梯一次浇筑成型工艺的融合应用，可实现楼梯梯段、休息平台、梯梁整体一次性浇筑成型，同步一体带出踏步防滑条，彻底摒弃传统二次补浇、防滑条后置粘贴与大面积修补工序，工程实测楼梯踏步一次成型合格率由 85.83% 提升至 98.70%，大幅降低踏步错台高低差、踢面垂直度超标、漏浆粘模、缺棱掉角、表面气泡麻面等各类质量缺陷发生概率，有效解决行业内铝模楼梯成型质量不稳定的核心难题。

第三，该数字化施工体系具备多维综合效益，可有效压缩标准层施工工期、降低铝材损耗与人工修补、防滑条施工成本，同步减少建筑垃圾排放、规避高空施工安全风险，配套标准化成品保护措施进一步降低后期修复投入，契合绿色建造、高效建造、安全建造的行业发展理念，适配高层标准化住宅现浇楼梯施工场景，工程推广适用性极强。

第四，通过 BIM 模型集成铝模构件、钢筋排布、支撑布设、防滑条成型构造、成品保护措施、质量验收等全流程数据，构建了可追溯的数字化质量管控闭环，推动楼梯施工从传统经验化管控向数字化、精细化、标准化管控转型，为同类现浇铝模楼梯数字化施工管控提供了可靠参考。

五、结束语

本文构建的 BIM + 铝模楼梯一次浇筑成型施工体系，已在高层住宅工程中实现良好落地应用，配套防滑条一体浇筑、BIM 前置成品保护措施有效解决现场高频质量问题，但数字化、智能化升级仍有较大提升空间。后续研究可依托现有技术体系，融合物联网感知、数字孪生、人工智能等前沿技术，进一步完善智能化施工管控体系：一是搭建数字孪生动态管控平台，在铝模支撑体系内置微型应变传感器，实时采集混凝土浇筑全过程模板应力、形变数据，实现施工过程动态监测、风险实时预警，提升施工管控的智能化水平；二是引入 AI 智能配模算法，基于标准化楼梯构件库自动匹配最优配模方案，自动完成踏步防滑条、阳角加固等异形配件深化与碰撞优化，大幅降低人工建模工作量，提升前置深化效率；三是拓展全链条数字化应用，将 BIM 模型与质量验收、成品保护巡检、资料归档、成本核算系统深度联动，实现楼梯施工全生命周期数字化管控，进一步推动建筑铝模施工技术向智能化、标准化、绿色化方向迭代升级。

参考文献

[1] 蒋东艳，吴迪，张健，等．基于 BIM 的铝合金模板配模及深化设计研究 [J]. 施工技术，2022,51(17):48-52.

[2] 钟鸣，张双喜 .BIM 技术在高层铝模楼梯施工中的应用 [J]. 四川建材，2021,47(01):98-99.

[3] 郑杰．高层建筑铝模板楼梯一次成型质量提升措施 [J]. 工程质量，2024,42(08):72-76.

[4] 李海峰 .4D-BIM 施工仿真技术在铝模工程中的应用研究 [J]. 施工技术，2023,52(09):102-106.

[5] 王守贞．现浇整体式混凝土楼梯施工质量控制 [J]. 建筑技术开发，2020,47(06):55-56.

[6] 住房和城乡建设部 .JGJ/T 486-2020 铝合金模板应用技术标准 [S]. 北京：中国建筑工业出版社，2020.

[7] 黄轩安，史月霞，陈可楠，等．基于 BIM 技术的装配式建筑全过程信息化管理与数字化建造方法研究 [J]. 土木建筑工程信息技术，2022,14(01):45-60.

[8] 赵亚锋．基于 BIM 技术的某项目楼梯铝模施工方案设计 [J]. 绿色建造与智能建筑，2025(02):113-115.

 Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

基于 BIM 的智慧工地施工管控模式与实践

邢文博

中交三公局第三工程有限公司，湖北 武汉 430050

DOI:10.61369/ERA.2026100012

摘　　要： 随着建筑行业智能建造转型提速，传统施工现场粗放式管理模式存在信息割裂，管控滞后，隐患追溯困难等短板，难以适配现代化工程精细化施工需求。本文依托 BIM 数字化建模技术，结合智慧工地物联网感知，数据实时采集与智能分析能力，构建一体化施工动态管控体系。通过搭建 BIM 可视化管理平台，打通施工进度，质量检测，安全巡查，物料管控等业务数据链路，实现施工全过程可视化，可溯源，可预警管控。为同类智能建造项目现场管控提供可行参考与实践借鉴。

关 键 词： BIM 技术；智慧工地；施工管控；智能建造

BIM-based Construction Management and Control Model and Practice in Smart Construction Sites

Xing Wenbo

CCCC Third Highway Engineering No.3 Co., Ltd, Wuhan, Hubei 430050

Abstract: As the intelligent construction transformation in the construction industry accelerates, the extensive management model of traditional construction sites has shortcomings such as information fragmentation, lagging management and control, and difficulty in tracing potential hazards, making it difficult to meet the requirements of refined construction in modern engineering projects. Relying on BIM digital modeling technology and combining the Internet of Things perception, real-time data collection, and intelligent analysis capabilities of smart construction sites, this paper constructs an integrated dynamic construction management and control system. By establishing a BIM visual management platform, the business data links of construction progress, quality inspection, safety inspections, and material management and control are connected, achieving visual, traceable, and pre – warning management and control throughout the construction process. It provides a feasible reference and practical example for on – site management and control of similar intelligent construction projects.

Keywords: BIM technology; smart construction sites; construction management and control; intelligent construction

引言

在新型城镇化建设与数字经济深度融合的行业背景下，建筑工程行业正从传统粗放式建造模式向智能化，数字化，精细化的智能建造模式全面转型。传统建筑施工管理体系依托人工经验开展现场管控，管理流程碎片化，数据传递滞后化，风险管控被动化的问题长期存在。在建筑工程规模化，结构复杂化，施工工序多元化的发展趋势下，传统管理模式的局限性持续凸显，难以满足现代工程建设对质量，安全，进度，成本的标准化管控要求。智慧工地作为智能建造落地实施的核心载体，依托物联网，大数据，云计算，人工智能等数字技术，重构施工现场管理体系，实现施工全流程的数字化赋能。BIM 技术作为建筑全生命周期数字化的核心技术，具备三维可视化建模，参数化数据集成，多维度协同分析的技术优势，能够有效弥补智慧工地数据建模不精准，空间分析能力薄弱，过程追溯体系不完善的短板。将 BIM 技术与智慧工地管控体系深度融合，构建一体化施工管控模式，是破解传统施工管理痛点，推动建筑行业数字化转型升级的核心路径[1]。

本文以建筑工程施工全流程管控为研究核心，探究 BIM 技术与智慧工地体系的融合逻辑，构建系统化，标准化，数字化的施工管控模式，分析该模式的运行机制，核心功能与应用价值，为智能建造背景下建筑施工现场精细化，智能化管控体系的搭建与落地提供理论支撑。

作者简介：邢文博（1998.10—），男，汉族，山东泰安人，本科，助理工程师，从事土木工程专业房建方向研究。

Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

一、基于 BIM 的智慧工地施工管控模式构建

（一）模式构建总体思路

本文基于智能建造发展要求，结合 BIM 技术与智慧工地的技术优势，遵循“数字化建模，数据化联动，智能化管控，全流程追溯”的总体思路，构建一体化施工管控模式。以 BIM 参数化模型为核心基础，整合智慧工地物联网采集系统，大数据分析系统，智能预警系统，搭建 BIM 智慧工地一体化管控平台，打通施工进度，质量，安全，物料，成本等各业务板块的数据壁垒，实现施工全要素，全流程，全维度的智能化管控。

模式构建坚持标准化，实用性，前瞻性原则，贴合建筑工程施工管控的行业规范与行业标准，摒弃传统人工管控的碎片化模式，建立数据驱动的闭环管控体系，实现施工事前模拟预判，事中实时管控，事后溯源分析的全周期管理，全面弥补传统施工管控模式的短板。

（二）管控平台整体架构设计

基于 BIM 的智慧工地管控平台采用分层化架构设计，主要分为 BIM 模型层，数据融合层，智能分析层，业务应用层四大层级，各层级相互联动，层层递进，形成完整的数字化管控体系。

BIM 模型层是整个管控体系的基础，依据建筑工程施工图纸，设计规范，施工方案，构建高精度，全参数化的三维 BIM 模型，涵盖建筑结构模型，机电管线模型，施工场地模型，设备配置模型等，完整集成工程设计参数，施工标准，工艺要求等基础信息，为后续数据融合与管控分析提供空间基准与数据基础 [2]。

数据融合层承担数据整合与交互功能，对接智慧工地各类采集终端，实时归集施工现场人员动态，设备运行，物料消耗，施工进度，环境指标，安全隐患等动态数据，将现场实时数据与 BIM 模型静态参数进行关联匹配，完成多源异构数据的筛选，整合，标准化处理，解决数据分散，格式不一，无法联动的问题。

智能分析层依托大数据算法与工程管控逻辑，搭建专项分析模型，包括进度偏差分析模型，质量缺陷分析模型，安全风险识别模型，物料消耗核算模型等。通过动态数据与 BIM 模型标准参数的实时比对，自动识别施工偏差，安全隐患，进度滞后，物料浪费等问题，实现数据的智能化分析与精准研判 [3]。

业务应用层面向施工现场核心管控需求，开发进度管控，质量管控，安全管控，物料管控，场地管理，数据溯源等核心功能模块，将智能分析结果转化为可视化管控指令，实现施工现场的精准化，智能化管理。

（三）核心管控模块功能设计

1. 施工进度智能管控模块

传统施工进度管控依托人工台账记录与阶段性现场核查，存在进度统计滞后，偏差发现不及时，进度调整盲目性强等问题。基于 BIM 的进度管控模块，将施工进度计划与 BIM 模型构件进行绑定关联，实现施工工序，施工节点，施工周期的参数化设定。

系统可根据智慧工地实时采集的施工完成数据，自动比对计划进度与实际进度的差异，精准识别进度滞后工序，滞后时长及影响因素。同时依托 BIM 模型的施工模拟功能，可提前模拟不同施工方案的进度效果，优化施工工序衔接，资源配置方案，针对进度偏差自动生成调整方案，实现施工进度的动态优化管控，保障工程按期推进。

2. 施工质量精细化管控模块

施工质量管控是工程建设的核心环节，传统质量管控依赖人工巡检，事后验收，存在质量隐患隐蔽性强，整改不彻底，责任追溯难等问题。本模式通过 BIM 模型集成各分项工程的施工工艺标准，质量验收规范，参数阈值，建立标准化质量管控基准。

施工现场质量检测数据，工序验收数据，缺陷整改数据通过智慧工地终端实时上传平台，系统自动比对实际施工参数与 BIM 标准参数的偏差，精准识别钢筋施工，混凝土浇筑，管线安装等工序的质量缺陷。同时将质量问题点位精准定位至 BIM 三维模型对应构件，明确整改范围，整改标准与责任主体，实现质量问题的精准整改，全程跟踪与闭环管理，全面提升工程施工质量标准化水平。

3. 施工现场安全智能管控模块

建筑施工现场危险源多，动态风险高，传统安全管控以人工巡查为主，存在巡查盲区，风险预判不足，应急处置滞后等问题。本管控模式依托智慧工地智能监控，AI 识别，人员定位设备，实时采集现场作业动态，人员行为，设备运行，防护设施状态等安全数据 [4]。

结合 BIM 模型构建施工现场危险源三维分布图，标注高风险作业区域，危险设备点位，安全管控重点，建立智能化安全风险预警机制。系统可自动识别违规操作，无证作业，危险区域滞留，设备违规运行等安全隐患，实时发出声光预警与平台提示，同步记录隐患信息与处置过程，实现安全风险从事后处置向事前预判，事中管控的转变，有效降低施工现场安全事故发生率。

（四）施工物料智能化管控模块

施工物料的采购，存储，领用，消耗管控直接影响工程成本与施工进度，传统物料管理台账混乱，消耗核算粗放，物料浪费问题突出。基于 BIM 模型可精准统计各施工构件，各施工工序的物料定额用量，建立标准化物料消耗数据库。

结合智慧工地物料扫码管理，库存监测，领用登记系统，实时归集物料入库，领用，消耗，剩余数据，自动比对实际消耗量与 BIM 定额用量的差异，精准分析物料损耗率，及时发现物料浪费，领用超标，库存积压等问题。通过数据联动分析，实现物料采购计划的动态优化，库存资源的合理调配，有效控制工程物料成本，提升物料资源利用效率。

二、基于 BIM 的智慧工地管控模式应用优势与价值分析

（一）打破信息壁垒

传统建筑施工管理各业务板块相互独立，进度，质量，安全，物料数据分散存储，数据无法共享联动，形成信息孤岛问题。基于 BIM 的智慧工地一体化管控模式，以 BIM 模型为统一数据载体，整合施工现场所有业务数据，构建统一，标准化，可视化的数据资源平台。

 Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

建设单位，施工单位，监理单位，设计单位等多方主体可依托平台实现数据共享，实时协同，随时调取工程模型数据，施工动态数据，管控台账数据，彻底打破跨部门，跨主体的信息壁垒，大幅提升施工管理沟通效率与协同作业水平，实现施工全流程的系统化统筹管控。

（二）优化管控模式

该模式彻底改变了传统依赖人工经验的粗放式管控模式，构建了数据驱动，智能研判，精准管控的现代化管理体系。通过 BIM 模型的参数化标准约束与智慧工地的实时动态监测，实现施工细节的精准把控，有效规避人工管控的主观性，滞后性与局限性。

在进度管控上实现动态预判优化，在质量管控上实现缺陷精准溯源整改，在安全管控上实现风险主动预警，在物料管控上实现成本精准核算，全方位提升施工现场精细化管理水平，适配现代大型，复杂建筑工程的施工管控需求。

（三）完善追溯体系

建筑工程施工全流程的数据可追溯是工程质量终身责任制落实，工程验收，后期运维的重要基础。基于 BIM 的智慧工地管控平台可完整记录施工工序，施工参数，管控行为，整改过程，资源消耗等全部数据，形成完整的数字化施工档案。

所有施工数据自动归档，永久留存，可随时查询溯源，明确各施工环节的责任主体与施工标准，有效规范现场施工行为，杜绝违规施工，敷衍整改等问题，为工程竣工验收，质量评定，运维管理，责任追溯提供全面的数据支撑，推动施工管理的标准化，规范化发展。

（四）降低施工成本

该管控模式通过智能化，数字化的统筹管控，可有效优化施工方案，合理配置人力与设备资源，减少物料损耗，规避施工返工，降低安全事故损失。通过施工进度的精准管控，避免工期延误产生的额外成本。通过质量精准管控，减少质量缺陷返工成本。通过安全风险预警管控，降低安全事故经济损失[5]。通过物料精细化管控，节约物料资源消耗。

在保障工程质量与施工安全的前提下，有效控制工程施工总成本，缩短施工周期，全面提升建筑工程项目的经济效益与管理效益，助力建筑企业实现降本增效的发展目标。

三、当前模式应用现存问题与优化对策

（一）现存应用问题

在智能建造全面推进的行业背景下，BIM 与智慧工地一体化管控模式已逐步普及应用，但在实际落地过程中仍存在部分短板。其一，部分施工企业数字化技术应用深度不足，仅实现基础建模与简单数据监测，未能充分发挥 BIM 参数化分析，动态模拟的核心优势，管控模式流于形式。其二，多源数据融合精度不足，施工现场采集的动态数据与 BIM 模型静态参数联动匹配度偏低，数据更新存在滞后性，影响智能分析的精准度。其三，行业数字化人才储备不足，现场管理人员专业能力参差不齐，缺乏兼具 BIM 技术操作与现场施工管理能力的复合型人才，制约管控模式的落地效果。其四，行业标准化体系不够完善，不同企业的 BIM 建模标准，数据统计口径，管控流程不统一，难以实现行业层面的标准化推广应用。

（二）优化发展对策

针对现存应用问题，结合行业发展趋势，提出针对性优化对策。第一，深化数字化技术融合应用，施工企业需强化 BIM 技术深度应用，结合工程实际优化建模精度与数据分析算法，完善各专项管控模块功能，充分发挥虚实结合的数字化管控优势，避免技术应用表面化。第二，优化数据融合技术，升级数据采集终端与传输系统，实现现场动态数据与 BIM 模型的实时同步，精准匹配，优化大数据分析模型，提升施工偏差，风险隐患的识别精准度。第三，加强复合型人才队伍建设，常态化开展 BIM 技术，智慧工地系统操作，数字化施工管理等专项培训，提升现场管理人员数字化作业能力，打造专业的数字化施工管理团队。第四，完善行业标准化体系，统一 BIM 建模规范，数据统计标准，管控流程标准，建立行业通用的数字化施工管控标准体系，推动一体化管控模式的标准化，规模化推广。

四、结论与展望

随着数字技术的持续迭代升级，智能建造体系将不断完善，BIM 技术，人工智能，大数据，物联网的融合深度将持续提升。未来，智慧工地施工管控将朝着全自动化分析，智能化决策，无人化管控的方向发展，建筑工程施工全生命周期数字化管理体系将更加完善，持续推动建筑行业从传统建造向智能建造的高质量转型，为建筑行业数字化，智能化，标准化发展提供坚实支撑。

参考文献

[1] 高楠，马文臣 . 智慧工地赋能建筑工程质量安全标准化建设的应用研究 [J]. 中国建设信息化 ,2026,(15):62-65.

[2] 罗纪忠 .BIM+ 智慧工地管理平台赋能造价数据库路径的探索与优化策略 [J]. 价值工程 ,2026,45(24):137-139.

[3] 梁依晨 .BIM 技术驱动下市政智慧工地协同管理策略探析 [J]. 新城建科技 ,2026,35(6):34-36.

[4] 吴恒 . 智能建造背景下 BIM+ 智慧工地协同管理研究 [J]. 中国房地产业 ,2026,(18):50-53.

[5] 李刚 . 智慧工地背景下施工设备数字化管理平台的构建与应用 [J]. 建设机械技术与管理 ,2026,39(2):52-53+80.

Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

论述 BIM 技术在市政路桥施工中的应用

胡可苟
佛冈县广业环境治理有限公司，广东 清远 511600
DOI:10.61369/ERA.2026100015

摘　　要： BIM 技术以可视化、参数化、协同化与动态模拟为基本特征，契合市政路桥施工的空间管理需求。施工准备阶段，该技术用于场地布置、图纸会审、方案比选与可视化交底，前置解决设计冲突。施工过程中，实现进度动态管控、工程量精确统计、质量标准化追溯及安全风险识别。深化应用聚焦信息集成、多方协同及与物联网、GIS 等技术的融合，推动施工管理向精细化、智能化方向发展，为同类工程提供技术参考。

关 键 词： BIM 技术；市政路桥施工；可视化施工管理；施工进度控制；协同管理平台

Discussion on Application of BIM Technology in Municipal Road and Bridge Construction

Hu Kegou
Fogang Guangye Environmental Governance Co., Ltd., Qingyuan, Guangdong 511600

Abstract: BIM technology is basically characterized by visualization,parameterization,collaboration and dynamic simulation,which meets the space management requirements of municipal road and bridge construction.In the construction preparation stage,this technology is applied for site layout,drawing joint review,scheme comparison and selection,and visual technical disclosure to resolve design conflicts in advance.During the construction process,dynamic schedule control,accurate engineering quantity statistics,standardized quality traceability and safety risk identification can be realized.The in-depth application focuses on information integration,multi-party collaboration and the integration with Internet of Things,GIS and other technologies,promoting the development of construction management toward refinement and intelligence,and providing technical reference for similar projects.

Keywords: BIM technology; municipal road and bridge construction; visual construction management; construction schedule control; collaborative management platform

引言

市政路桥施工通常位于建成区，面临空间受限、交通干扰、管线复杂、多专业交叉等问题，组织难度高于一般线性工程。传统管理以二维图纸和纸质文档为信息载体，涉及设计交底、进度管控、质量追溯和多方协作时，传递慢、反馈滞后、协同不畅等突出。BIM 具备可视化、参数化、协同化、可模拟等特性，能精准表达信息，提供集成管理工具。系统梳理 BIM 在市政路桥施工准备、过程管控及深化发展等阶段的应用路径，具有重要的实践意义。

一、BIM 技术的基本特征与市政路桥施工的适用性分析

（一）可视化表达与空间信息的精准传递

市政路桥工程施工包含诸多空间定位、构件拼装作业。传统二维图纸无法直观展示构筑物立体形态以及细部构造。BIM 技术能够把设计资料生成三维数字化模型，完整呈现各类构件几何规格、空间坐标和相互衔接关系。施工从业者依托模型查看复杂节点详图，有效规避读图理解偏差带来的施工失误。三维模型能够实现多角度剖切、动态漫游浏览，便于管理人员开工前对关键部位开展详细核查，保障空间排布方案科学可行。可视化模式同样优化技术交底成效，交底内容摆脱枯燥文字描述，转化为直观图像资料。现场施工人员可以迅速明晰施工关键要求，减少信息传递过程中出现失真、偏差等问题。

（二）参数化建模与设计调整的灵活性

这种参数联动机制使得施工方案的比选与优化更加便捷，项目团队可以在较短时间内生成多种备选方案并进行对比分析。此外，参数化模型还承载了构件的材料类型、强度等级等非几何信息，为后续的工程量统计与材料采购提供了可靠的数据来源，提升了施工准备工作的精确度[1]。

（三）协同工作平台与多方信息共享机制

市政路桥项目施工牵涉建设、设计、监理、施工、材料供应

 | Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

等多方单位。各参与主体的信息互通与配合工作覆盖项目全周期。传统管理模式中，信息依靠纸质资料或零散电子文件流转，文件版本难以管控，沟通效率不高。BIM 技术搭建一体化协同作业平台，各参建单位能够在同一模型内录入、调取、更新工程资料，完成数据统一管控与实时同步。设计修改、进度优化、质量检测成果等信息可同步推送至相关参与方，避免信息不对称造成决策滞后。这套协同模式支持跨专业碰撞检查，能够提前识别各工序、各系统之间存在的交叉冲突，在开工阶段完成问题整改，减轻施工现场沟通协调压力。

（四）施工过程的动态模拟与预演功能

市政路桥施工中，大型构件吊装、深基坑开挖、支架搭设等高风险工序需要周密的方案论证。BIM 技术可将施工进度计划与三维模型进行关联，生成施工过程的动态模拟动画。通过模拟，管理者可以直观查看各工序的先后顺序、持续时间及资源占用情况，评估进度安排的合理性与施工方案的可行性。对于重点难点工序，还可以进行专项模拟，分析不同施工方法的效果差异，择优确定实施方案。动态模拟同时具备风险预判功能，能够在虚拟环境中识别安全隐患，提前制定防范措施。这种以模拟验证为导向的施工组织方式，改变了以往主要依靠经验判断的局面，提高了施工方案编制的科学性与可靠性 [2]。

二、BIM 技术在市政路桥施工准备阶段的应用

（一）施工场地的立体化布置与资源优化

市政路桥项目大多选址于城市建成区域，施工可用场地较为紧张，周边道路交通繁忙。围挡内部需要科学规划物料堆放区、加工场地、机械停放区域与各类临时设施。借助 BIM 技术搭建施工现场三维布置模型，场地地形、原有管线、临时构筑物与施工设备均可立体展示。管理人员能够在模型内多次优化布局方案，研判分区之间的相互干扰，防止出现机械作业空间不足、物料运输路线过长等状况。布局方案敲定后，可利用漫游动画开展可视化演示，方便向相关单位与附近居民介绍施工规划。伴随工程持续推进，场地使用需求持续变动，BIM 模型可同步更新内容，体现不同阶段场地占用情况，为场地阶段性调整提供参考。这套立体动态的场地规划模式，能够充分发挥有限场地资源的价值，规避布局不当引发人员闲置、材料二次转运等问题。

（二）图纸会审与设计问题的前置发现

市政路桥施工图纸涵盖道路、桥梁、排水、照明、交通工程等多个专业，图纸之间是否存在矛盾、结构尺寸是否准确、预留预埋是否到位等问题，在会审阶段需要逐一核查。利用 BIM 技术将各专业图纸整合为综合模型后，原本分散在平面图纸中的信息在三维空间中有机融合。不同专业的构件在模型中进行叠加，结构梁与管线之间是否冲突、预埋件位置是否准确等问题一目了然。碰撞检查功能能够自动识别模型中各构件之间的硬碰撞与软碰撞，生成详细的检测报告，标注问题位置与碰撞类型。设计单位依据报告进行针对性修改，避免了施工过程中因设计冲突而被迫停工或返工。这种前置化的审图方式将问题解决在施工之前，维护了施工过程的连续性与顺畅性 [3]。

（三）施工方案的模拟比选与技术论证

市政路桥工程施工期间，深基坑支护、大体积混凝土浇筑、预应力张拉、钢结构吊装等高难度施工工序，应当编制专项施工方案，组织专项论证工作。依托 BIM 技术能够结合方案搭建施工仿真模型，直观展示各道工序实施流程、机械设备选型与作业人员安排。多种施工方案的仿真成果能够同步开展对比分析，围绕施工工期、资源投入、安全隐患等多项指标综合研判，便于管理人员筛选最优实施方案。针对大型构件机械吊装工况，能够在模型内推演起重机停放位置、回转范围与吊装行进路线，检验现场作业条件是否满足施工要求。仿真阶段识别出的各类施工难题，能够提前制定处置对策。借助数字化模型开展方案论证，能够提升施工方案编制的完善程度，为现场实体施工夯实技术基础。

三、BIM 技术在市政路桥施工过程管理中的应用

（一）施工进度的动态管控与偏差预警

市政路桥施工进度受天气条件、材料供应、交通管制等多种因素影响，实际进展与计划之间容易产生偏差。BIM 技术将进度计划以可视化的形式与三维模型关联，形成基于时间维度的施工进度模拟。管理人员可以在模型中直观查看各施工段当前应达到的形象进度，并与现场实际进展进行比对。当实际进度滞后于计划进度时，系统自动发出预警信号，提示管理人员关注滞后部位及影响范围。通过分析滞后原因，管理者可以及时调整后续施工安排，合理调配资源，将延误控制在最小范围内。进度管理模块还支持生成各类进度报表与图表，为工程例会的召开提供直观可靠的数据支撑 [4]。

（二）工程量的精确计算与材料消耗控制

市政路桥工程施工，需要采购与消耗土方、混凝土、钢筋、沥青等各类建材，材料开支占据项目总造价较大比重。BIM 模型内所有构件，均录入精准外形尺寸与材质参数，借助软件自带统计功能，能够快速导出任意区域、各类规格的工程量信息。相较于传统依靠图纸估算的方式，BIM 统计得出的数据精度更高，还能够按照施工区段、进度节点分层汇总。物资管理人员依托模型输出的工程量编制材料需求方案，推行限额领料管理模式，规避估算偏差引发的材料浪费或物资供应不足问题。工程完工之后，还可比对材料实际消耗量与模型统计数量，评判材料使用是否合理，为项目成本核算提供可靠的数据支撑。

（三）施工质量的标准化控制与过程追溯

市政路桥施工质量，直接影响工程使用年限以及后期运营安全。BIM 技术把质量验收规范、偏差控制指标等信息整合至模型构件，搭建数字化质量管控平台。现场质检人员利用移动设备采集实测数据，经由无线网络同步上传 BIM 管理平台。系统自动对比实测数值与标准参数，完成质量合格判定。存在质量缺陷的区域会在模型内重点标注，绑定整改负责人与整改期限，落实问题排查、整改、复核的闭环管控。质量检测记录长期关联对应模型构件，构建完整的质量追溯体系。隐蔽工程验收、关键点位核查

Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

等重要工序的影像资料，同样能够关联录入模型。既方便竣工资料整理归档，也为道路运营阶段养护检修留存完整基础资料[5]。

（四）施工安全的风险识别与防控措施

市政路桥施工中，基坑坍塌、高空坠落、机械伤害等安全风险不容忽视。BIM 技术能够在施工前对高风险区域进行三维标注，在模型中呈现安全隐患的空间分布。基坑周边、临边洞口、大型设备作业区等重点部位设置安全警戒范围，提醒管理人员加强巡查与防护。利用模型进行安全技术交底，向一线作业人员直观展示危险源位置及正确的防护措施，增强其安全防范意识。施工过程中，安全管理人员通过移动设备在模型中标注发现的安全隐患，拍照上传并推送至相关负责人，督促限时整改。所有安全问题的发现、处置与复查记录均在 BIM 平台中完整保存，为安全管理绩效评估提供数据支持。基于 BIM 的安全管理方式提高了风险防控的预见性与针对性，有效减少了安全事故的发生。

四、BIM 技术在市政路桥施工管理中的深化应用与发展方向

（一）施工信息的集成管理

市政路桥施工过程中产生的工程资料种类繁多、数量庞大，包括施工日志、检验报告、变更签证、材料合格证等。传统模式下，资料分散保管于不同部门，归档不及时、查阅困难的问题较为突出。BIM 技术为施工信息提供了统一的集成管理环境，各类资料以电子化形式与模型构件进行关联。需要查阅某部位施工记录时，只需在模型中点击对应构件即可调取所有相关资料，实现了信息的快速检索与高效利用。信息的集中存储还减少了纸质文件的流转环节，降低了资料遗失的风险。竣工验收阶段，与模型关联的电子竣工资料可直接导出，为归档移交节省了整理时间。集成化的信息管理方式提升了施工档案的完整性与规范性。

（二）多方协作效率的提升

市政路桥项目施工，需要各类作业班组与管理部门协同配合。多方协作效果，直接决定工程推进效率。BIM 协同平台搭建统一信息交互渠道，可供所有参建单位使用。设计变更通知、进度调整方案、质量验收资料等信息，能够在平台实时推送、同步共享。施工现场出现难题时，工作人员可拍摄影像上传平台，标注精准施工点位。技术人员远程查阅资料并给出处置方案，省去来回赶赴现场耗费的时间。召开每周生产协调会议时，各方对照更新后的模型掌握项目整体情况。研讨议题更加聚焦，决策推进速度显著提升。平台完整留存操作记录，方便后续开展责任溯源，倒逼各方落实自身工作职责。依托平台形成全新协作模式，有效改善了传统沟通模式信息分散、响应滞后的各类问题[6]。

（三）BIM 技术与新型信息技术的融合应用

信息技术持续迭代升级，BIM 技术结合物联网、GIS、云计算等新技术，为市政路桥工程管理带来全新发展路径。施工现场布设多种传感设备，能够把监测数据对接至 BIM 模型，涵盖混凝土养护温度、基坑位移数值、结构应力波动等内容。管理人员依托模型实时掌握各项核心指标动态，快速识别隐患并落实处理措施。GIS 技术弥补 BIM 在大范围地理空间分析上的短板，把施工模型嵌入城市地理信息体系，便于研判项目施工对周边道路、管线与生态环境产生的影响。云计算支撑 BIM 实现海量数据存储与运算，允许多名人员同步线上协同作业，减轻终端设备的硬件运行压力。多项技术相互融合持续拓宽 BIM 的应用范围，助力市政路桥施工管理朝着智能化、精细化方向持续推进。

五、结束语

BIM 用于市政路桥施工各阶段。从准备、实施到深化，均能发挥作用。它改善了场地布置，深化了图纸会审，使进度管控更加精确，增强了质量追溯和安全风控。协同平台实现信息实时共享，降低沟通延迟与信息损耗。融合物联网与 GIS，拓展 BIM 应用边界，推动施工管理走向智能化。市政路桥施工环境复杂，全面推广 BIM 仍需完善标准、培养人才、积累经验，才能释放更大价值。

参考文献

[1] 周芹仲 . 探究 BIM 技术在市政路桥施工中的应用 [J]. 建筑与装饰 ,2024(18):88-90.

[2] 蒋威 .BIM 技术在市政路桥施工中的应用 [J]. 智能建筑与智慧城市 ,2025(10):97-99.

[3] 张松韬 .BIM 技术在市政路桥施工中的应用研究 [J]. 石油化工建设 ,2023,45(1):106-108.

[4] 杨威 . 探讨 BIM 技术在市政路桥施工中的应用 [J]. 科技创新导报 ,2022,19(23):164-166.

[5] 刘东伟 .BIM 技术在市政路桥施工进度管理中的应用实践 [J]. 建筑与装饰 ,2025(19):106-108.

[6] 冉耀 . 论 BIM 技术在市政路桥施工中的应用 [J]. 建筑与装饰 ,2020(8):80,85.

 Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

论述室内环境艺术设计中软装饰材料的运用

卢顺向
广东思哲设计院有限公司，广东 广州 510000
DOI:10.61369/ERA.2026100017

摘　　要： 室内环境艺术设计中，软装饰材料的运用对空间氛围塑造具有关键作用。软装饰材料以质地柔软、灵活可变为特征，兼具柔化空间、划分区域、丰富层次及烘托氛围等多重功能。运用过程需遵循主次分明、整体协调、功能适用及文化表达等原则。通过织物选配、色彩建构、图案编排、灯饰设计及绿植点缀等策略，可系统提升空间品质。针对实践中常见的堆砌、功能缺失及尺度失衡问题，需强化前期策划与精准把控，实现美学与功能的统一。
关 键 词： 室内环境；艺术设计；软装饰材料；空间氛围；材料运用

Discussion on Application of Soft Decoration Materials in Interior Environmental Art Design

Lu Shunxiang
Guangdong Sizhe Design Institute Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510000

Abstract: In interior environmental art design, the application of soft decoration materials plays a key role in shaping spatial atmosphere. Characterized by soft texture and flexibility, soft decoration materials have multiple functions including softening space, dividing areas, enriching layers and setting off atmosphere. The application process shall follow the principles of clear primary and secondary relations, overall coordination, functional adaptability and cultural expression. Strategies such as fabric selection, color construction, pattern arrangement, lighting design and green plant embellishment can systematically improve space quality. Aiming at common practical problems including material over-stacking, function deficiency and scale imbalance, it is necessary to strengthen pre-planning and precise control so as to realize the unification of aesthetics and functions.
Keywords: interior environment; art design; soft decoration material; spatial atmosphere; material application

引言

室内环境艺术设计中，软装饰材料正从辅助角色跃升为塑造空间气质的关键要素。在“轻装修、重装饰”理念驱动下，其应用广度与深度不断拓展。软装不仅是视觉层面的美化手段，更是实现空间功能优化、情感表达与文化传递的重要载体。然而，实践中仍存在风格混乱、功能缺失、尺度失衡等普遍问题。系统梳理软装饰材料的类型、功能及运用原则，探讨其科学配置策略，对提升室内设计的整体品质具有现实意义。

一、软装饰材料的界定、发展及其核心功能

（一）软装饰材料的概念界定

室内设计领域对软装饰材料有着清晰界定。软装饰材料泛指质地柔和、便于挪动或替换，用于硬装施工完成后的室内空间，优化环境、烘托氛围的各类材料。材料范畴包含织物、皮革、编织物件、绿植以及各类可移动陈设摆件。该材料的核心特质是“软性”，既代表材质本身触感温润，也代表空间布置具备灵活可调的优势。软装饰材料不同于固定式、具备结构属性的硬装建材，无需改动建筑主体，仅依靠调整色彩、材质与摆放方式，即可转变空间整体格调。软装饰材料是室内空间不可或缺的部分，与硬装相辅相成，一同塑造完整的室内空间视觉效果。

（二）发展现状与流行趋势

软装饰材料的应用在室内设计领域经历了一个从边缘到核心的演变过程。早期的室内设计实践中，软装饰常被视为附属品，其作用未被充分挖掘。近年来，“轻装修、重装饰”的理念逐渐成为主流，这一观念转变深刻影响了软装饰材料行业的发展。该理念强调通过灵活多变的软装来赋予空间个性，而非依赖繁复的硬装工程。绿色环保意识的增强也极大地推动了软装饰材料的普及，因为许多软装产品在生产和更换过程中的环境负荷相对较低。同时，现代生活节奏加快，人们期待居住空间能够轻松实现风格转换，软装饰材料恰好满足了这种对可变性和适应性的需求。这些因素共同促成了软装饰从辅助角色向主导室内设计风格关键因素的转变，使其成为表达个人审美、回应时代潮流的重要载体[1]。

Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

（三）软装饰材料的主要功能

软装饰材料能够在室内空间实现多种作用。第一，柔化空间界面。建筑主体大多采用混凝土等硬质建材，线条偏冷峻，质感坚硬。布艺、地毯等软装材料投入使用后，能够弱化生硬的视觉感受，赋予空间温度与人情味，打造舒适的居住环境。第二，划分功能区域。面对大面积空间或开放式户型，屏风、窗帘、地毯等软装均可充当隔断。既能维持视线互通，又能清晰地区分各个功能区块。对比实体墙体，这类隔断更加通透灵活，提升空间使用的可塑性。第三，丰富空间层次。搭配高低、造型、色调各不相同的软装物件，可以打破空间单调的平面感受，增强纵深与立体效果。大型陈设与小型饰品有序排布，形成错落的布局，让空间拥有自然的韵律感。第四，渲染空间氛围。材质、纹样与色彩存在差异的软装材料，可以传递不一样的感官体验。丝绒、绸缎自带精致华丽的气质，棉麻、原木材质凸显简约自然的风格。设计师依托软装，能够精准打造温馨、雅致、现代或复古等不同风格的空间意境。

二、室内环境艺术设计中软装饰材料的运用原则

（一）主次分明与重点突出

选用软装饰材料开展设计时，首先要确定空间设计主题与视觉中心。各类软装单品的挑选与摆放，都需要围绕这一核心展开。实际设计过程中，应当分清主要软装物件与次要配饰。主体沙发、大面积地毯、主墙面装饰画属于主要软装；靠枕、灯具、小型陈列摆件则为次要配饰。次要配饰依托主体物件搭配摆放，形成衬托与呼应效果。规避饰品堆砌、主次模糊带来的视觉杂乱问题。设计师需要合理引导视线，让空间形成稳定的视觉重心，进一步突出整体设计主题。

（二）整体协调与风格统一

室内环境是一个完整的系统，软装饰材料的运用必须强调整体性和统一性。这意味着软装的风格、色彩、材质需要与硬装修的基调相互融合，共同服务于统一的室内风格。例如，在现代简约风格的空间中，应选择线条简洁、色彩纯粹的软装；在新中式风格中，则应搭配具有传统韵味的织物和家具。协调不仅体现在风格上，也体现在色彩与比例的平衡中。只有当所有软装元素相互关联、彼此呼应时，才能形成和谐有序的整体美感，避免因风格冲突或色彩杂乱而破坏空间氛围。

（三）满足功能与舒适体验

软装不能单纯当作视觉装饰，本身具备实用价值。挑选材料阶段，应当结合实际使用场景，兼顾使用体验。客厅窗帘需要兼顾遮光、隔音性能，卧室床品优先考量亲肤透气属性，经常踩踏的地毯，需要满足耐磨、便于打理的要求。舒适度是室内空间设计的核心追求，软装选材需要兼顾人体使用感受与心理体验。家具尺寸、布艺触感、灯光色温，都会直接影响身心感受。软装设计应当立足人的真实需求，打造兼具美感与舒适感的居住空间[2]。

三、软装饰材料在室内环境艺术设计中的具体应用策略

（一）织物材料的空间基调设定

织物属于软装范畴里应用范围最广、视觉作用最直观的材料，常见类型包含窗帘、地毯、床品、沙发面料、桌布等。这类材料在室内环境中拥有可观的视觉占比，面料质感、色彩样式与纹样设计，决定着空间整体风格走向。实际设计搭配时，各类织物具备不同功能特点：窗帘被称作室内空间的情绪载体，开合状态能够调整采光与视线，厚实面料容易烘托古典氛围，通透纱帘则带来轻盈灵动的感受；地毯可以划分功能区域，弱化硬质地面的冰冷感，同时起到降噪效果，挑选和家具风格适配的地毯，有助于提升空间整体凝聚感；沙发、床品面料与人直接接触，不同触感带来差异化体验，棉麻自带自然气息，丝绒凸显雅致质感，直接影响空间居住体验。织物组合需要注重层次感，一般选用大面积织物，例如地毯、窗帘构建基础色调，中等范围的家具面料作为核心部分，再利用靠枕、盖毯等小件织物做细节点缀，打造富有变化的视觉效果。除此之外，还需要兼顾各类面料肌理的对比与协调，光滑皮质沙发搭配质感粗粝的羊毛地毯，便能让室内氛围更富有层次趣味[3]。

（二）色彩体系的科学建构

色彩在软装设计里具备第一视觉冲击力，也是塑造空间氛围十分有效的手段。合理调配色彩，应当依托色彩构成基础理论，结合空间用途以及使用者心理感受展开设计。室内软装配色普遍采用背景色、主体色、点缀色三级搭配逻辑。背景色多指墙面、吊顶、地面色调，搭建空间基础风格，大多选用中性色调或是低饱和度色系；主体色涵盖大型家具、地毯等色彩，属于整体配色关键，色调冷暖、明暗程度，左右空间传递出的感受；点缀色包含抱枕、装饰画、绿植花艺等色彩，承担提亮空间的作用，常选用高饱和度对比色增添空间活力。落实到设计当中，设计者要重视色彩带来的心理感受。比如卧室适合低明度、低纯度的蓝调、灰色调，打造安静适宜休憩的环境；儿童房可以适度搭配鲜亮黄、蓝色，调动朝气与想象力；书房避开视觉刺激性较强的色彩，选择稳重木色、米色系，帮助人们专注思考。与此同时，不能忽略户型朝向、采光条件对色彩呈现的作用。北向居室适合暖色，弥补光线匮乏的问题；南向采光充足，可运用冷色调缓和强光带来的燥热感[4]。

（三）图案纹样的节奏与韵律

软装材料自带的图案纹样，能够丰富空间视觉感受，同时承载相应的文化内涵。纹样搭配不能随意堆砌，需要依托形式美学规律，打造具备节奏感与韵律感的空间氛围。结合整体空间风格挑选适配纹样，是软装搭配的首要环节。古典空间多选用卷草纹、佩斯利纹样，现代简约空间更适合几何造型与抽象纹理。实际布置阶段，纹样尺寸与占比需要合理把控。大面积醒目的纹样不宜滥用，多用于主题墙面、大型地毯，打造视觉中心；小型陈

 Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

设、家具表面可以运用细密纹样，提升空间精致程度。多种纹样搭配应当注重和谐统一。常规搭配思路是以大尺寸纹样作为主体，辅以一至两类小型、低对比度纹样进行衬托。贯通式空间里，纹样排布形式会营造不一样的韵律感受。规整重复的排布沉稳大气，交错排布更富有灵动气息。想要防止视觉上的繁杂混乱，纹样繁复的区域，其余软装单品造型与色彩尽量简约克制[5]。

（四）灯饰艺术的氛围营造

灯饰是软装体系里兼具实用价值与审美效果的重要品类，也是烘托空间氛围必不可少的组成部分。灯饰除了实现基础照明作用，还能依靠光线强弱、光影色调以及外观造型，奠定空间独有的情绪基调。挑选灯饰，需要兼顾使用需求与空间整体风格。从实用角度来看，不同功能空间的照明标准存在区别。客厅依靠主灯具打造充足的基础光线，搭配落地灯、壁灯丰富光影层次。卧室优先选用光线柔和的床头灯与壁灯，规避光线强烈的顶部灯具。书房应当配备照度充足的台灯，保障阅读与办公的采光条件。从风格角度来看，灯具的外形、用料与配色，应当和室内整体设计保持统一。现代空间适合几何样式的金属、玻璃灯饰；中式空间可搭配纸艺、木质的复古灯具。光色能够直接影响人的感官体验，暖光能够打造温暖私密的环境，适配卧室与餐厅；冷光让人思路清晰、注意力集中，多用于书房和厨房。借助调光设备或是多种光源组合，同一空间能够按需更换照明方案，呈现出多样的空间氛围。

（五）绿色植物的生态与美学价值

绿植是软装里的重要元素，能够把自然气息带入室内，优化空间整体质感。运用绿植不只是装饰空间，还可以调节局部环境、净化空气、舒缓身心。室内布置绿植，品种挑选与摆放位置，要兼顾生长特性与审美规律。首先结合室内光照、温湿度挑选适配植株。绿萝、蕨类耐阴性强，适合光线偏弱的区域；琴叶榕、仙人掌喜爱光照，适宜安置在窗边位置。其次，植株外形、体量与色调，要契合空间尺度和装修风格。开阔的客厅角落，可放置散尾葵、龟背竹这类大型绿植，打造视觉重心，烘托自然氛围。书房桌面、卧室床头柜，适合摆放多肉、文竹等小型植株，营造雅致氛围。花盆挑选同样值得重视，材质、色调与造型需要贴合室内风格，融入整体布置。合理搭配叶形各异、高低层次分明的绿植，搭配富有美感的花器。绿植便不再只是简单的自然装饰，能够有效提升空间的艺术氛围[6]。

四、软装饰材料应用中的常见问题与优化路径

（一）设计实践中的常见误区

室内设计选用软装材料时，普遍存在三类典型误区。第一，软装大量堆砌，整体风格杂乱。不少方案缺少统一布局，不同风格软装随意搭配，空间难以形成视觉重心，整体调性模糊，观感繁杂无序。第二，偏重外观效果，忽略实际使用价值。一味追求视觉美感，选用不易打理的饰面材料、规格不适配的家具或采光效果较差的灯具，降低日常居住的舒适程度，设计只具备观赏作用。第三，无法合理把控空间尺度。家具与装饰摆件体量偏大，容易造成空间拥挤压抑；陈设尺寸偏小，又会让环境显得空旷冷清，两类问题都会破坏空间原本的均衡感受。

（二）优化应用的策略与建议

相关问题可通过下述方式优化。第一，完善设计前期整体规划。方案启动阶段确定空间主题、风格基调与色彩体系，软装选配遵循既定框架。保证各类陈设具备合理定位，共同契合整体设计目标。第二，精准管控空间尺度。设计师完成场地尺寸实测，挑选家具与摆件时，兼顾物品所占体量与人流动线，保障通行顺畅，尺度协调。第三，践行简约设计理念。杜绝空间过度填充，合理预留留白区域，挑选质感出众、富有感染力的装饰物件。搭配得当的软装组合，优于盲目堆砌陈设，更能凸显空间格调与内涵。持续复盘实践经验，能够不断提高软装材料的运用能力。

五、结束语

软装饰材料在室内环境艺术设计中已从附属点缀跃升为空间气质的主导力量。织物、色彩、图案、灯饰与绿植等元素的综合运用，使空间在功能与美学层面达成有机统一。设计实践须遵循整体性原则，在充分考量使用者需求与空间特性的基础上，实现主次分明、风格协调与文化表达的深度融合。未来软装饰设计将更趋个性化、生态化与智能化，持续推动室内环境从基本栖居向诗意栖居的精神升华。

参考文献

[1] 马铭 . 室内环境艺术设计中软装饰材料的运用 [J]. 建筑・建材・装饰 ,2024(14):139-141.

[2] 董森 , 代广红 , 张蔷 . 软装饰材料在建筑室内环境艺术设计中的运用 [J]. 中国建筑金属结构 ,2022(2):110-111.

[3] 张敏 . 室内环境艺术设计以及软装饰材料的利用 [J]. 包装世界 ,2021(10):51.

[4] 李欣 . 室内环境艺术设计中软装饰材料的运用探讨 [J]. 动漫先锋 ,2022(3):197-198.

[5] 黄莹 . 室内环境艺术设计中软装饰材料的运用 [J]. 建筑工程技术与设计 ,2020(30):833.

[6] 张义 . 室内环境艺术设计中的色彩软装饰材料运用分析 [J]. 流行色 ,2021(2):50-51.

Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

高校海绵设施改造的路径探索

张飞，彭琳，刘佳
中国电子系统工程第二建设有限公司，江苏 无锡 214000
DOI:10.61369/ERA.2026100023

摘　　要： 近年来我国降水带北移，北方地区极端降雨频发，城市内涝问题日趋突出。建成年限较长的高校大多存在基础设施老旧、排水系统标准偏低、雨水调蓄与净化能力不足等问题。为破解老旧高校内涝治理难题、补齐基础设施短板、提升高校基建与生态环境质量，本文结合海绵城市成熟理念与工程经验，将“渗、滞、蓄、净、用、排”六字方针贯穿校园改造建设全周期，促进海绵城市体系与老旧校园更新深度融合。文章梳理高校现有排水现存缺陷，明确海绵改造设计及施工图管控重点，探索适配北方老旧高校的海绵化提升与内涝综合治理路径，以期彻底改善校园积水内涝，健全雨水系统，改善校园生态环境，为同类老旧高校的防洪排涝及海绵化升级改造提供参考。

关 键 词： 降水带北移；老旧高校；海绵城市；内涝治理；施工图管控

Exploration on the Renovation Path of Sponge-Facility in University Campuses

Zhang Fei, Peng Lin, Liu Jia
China Electronics System Engineering No.2 Construction Co., Ltd., Wuxi, Jiangsu 214000

Abstract: In recent years, China's precipitation belt has shifted northward, with frequent extreme rainfall in northern regions and increasingly severe urban waterlogging. Universities with a long service life generally suffer from aging infrastructure, lowstandard drainage systems, and inadequate rainwater regulation and purification capacity. To tackle waterlogging problems in old universities, remedy infrastructure deficiencies and improve the quality of campus infrastructure and ecological environment, this paper adopts wellestablished concepts and engineering experience of sponge cities. The sixcharacter principle of "infiltration, retention, storage, purification, utilization and drainage" is implemented throughout the whole cycle of campus renovation and construction to realize indepth integration of the spongecity system and oldcampus renewal. This paper analyzes existing defects of campus drainage facilities, specifies key points for spongerenovation design and construction drawing management, and explores sponge improvement and comprehensive waterloggingcontrol approaches suitable for old universities in northern China. It aims to eliminate campus ponding and waterlogging, perfect rainwater systems and optimize campus ecological environment, so as to provide references for floodcontrol, drainage and spongeoriented upgrading of similar old universities.

Keywords: northward shift of precipitation belt; old universities; sponge city; waterlogging control; construction drawing management

引言

渭南是国家第二批系统化全域推进海绵城市建设示范城市，项目对渭南师范学院进行海绵化改造，建设海绵设施，提升学校内涝防御能力，提高雨洪调蓄能力。学院目前学校排水基础设施存在问题，道路、广场等地，雨水经硬质铺装表面排入道路两侧雨水口；学生公寓南侧、图书馆和逸夫实验楼等雨水立管倒水直排进入管网；教学楼、学生公寓等雨水立管排水通过明沟直排管网；热交换站、商铺、开水房及洗浴中心等雨水立管排水，通过断接进入硬质铺装，漫流排入雨水管网；学校正门旁竹林、体育场和篮球场等地无雨水管道及雨水口，将于通过绿地地表漫流及下渗排水。

暴雨天气径流组织无序，雨水漫流现场显著，竖向与景观结合度低，排水系统重现期标准低，应急极端天气存在隐患，水资源短缺，供需矛盾显著，雨水收集设施不足，雨水回用率低。

渭南水资源短缺，暴雨雨急等问题日益显著，现状校园绿地价值较为单一，通过针灸式植入海绵设施赋予单一功能绿地空间更多价值，全面提升校园基础设施框架[1]。改造后校园绿地具有多重复合功能：自然水循环、科普示范、控制面源污染、适应气候、高品质滨水栖息地。项目建设有效防止学校内涝，改善学校基础设施和生态环境。

作者简介：张飞（1987.04—），女，汉族，籍贯：陕西，硕士，中级职称，从事给排水设计的研究。

 Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

一、项目现状分析及竖向分析

（一）项目周边场地分析

学院位于城区与南塬相接的位置，洪水对场地的影响，学院北侧朝阳大街，典型内涉积水点（会影响雨季暴雨的排水，雨水排不出去），通过校园的绿地内涝点进行提升。西侧渭清绿廊旱溪收水不佳，需增加区域衔接关系。学院四周与市政绿化接壤处均有围墙设置且学院内部室外地坪标高均高于周边市政道路标高，故本项目不考虑外界客水汇入问题。

（二）项目竖向分析

学院场地竖向坡度较小，整体高程在326.47m~332.65m之间，最大高差约6.18m；最低点位于场地西北角，最高点位于场地东南角。

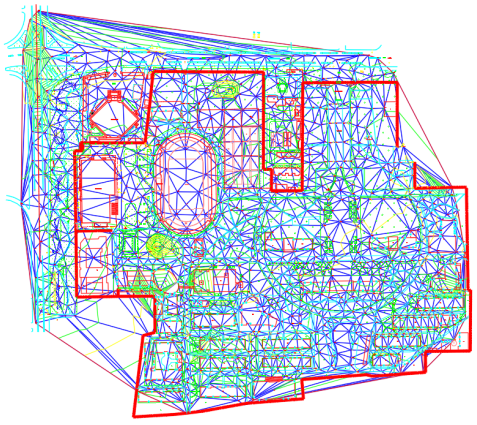


图1-1 学院场地竖向分析

（三）项目管网分析

学院雨水管道为DN300-DN450、i=0.003，市政雨水出口共两处，位于北侧朝阳大街市政雨水管道，现状管网排水能力为1年一遇，排水安全隐患大。

（四）项目径流组织分析

校内径流组织主要存在以下7种模式，分别为：漫流－直排管网，雨落管－直排管网，

雨落管－明沟－直排管网，雨落管－硬质铺装－漫流入管网，漫流－绿地，雨落管－直排绿地，雨落管－断接－绿地；



图1-2 学院排水模式分布图

（五）现状绿地及改造可行性分析

园林绿化功能完善，种植密度大、长势好，提升改造代价较高。疏林草地，种植密度较低，较适宜改造提升为雨水花园。

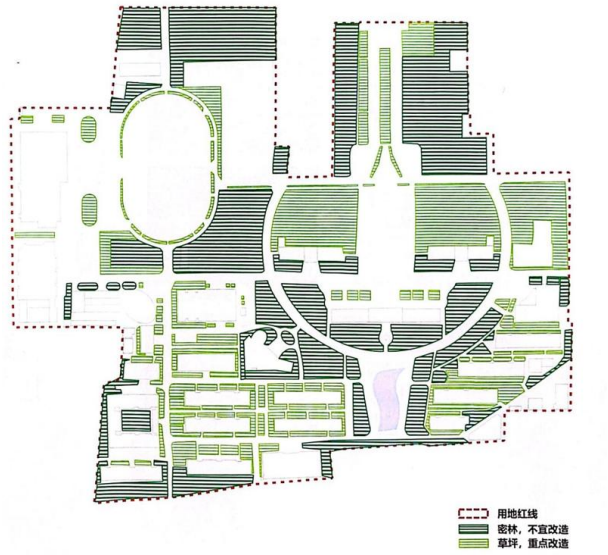


图1-3 学院现状绿化分析图

二、主要存在问题

（一）排水设施重现期标准不足

学院现有的排水设施设计标准较低，主要满足1年一遇的排水能力。这意味着在遭遇更大降雨事件时，学院的排水系统会面临压力，存在内涝风险[2]。此外，部分区域的排水设施老化、破损，也影响了排水效果。

（二）雨水收集利用不足

目前学院缺乏对雨水的有效收集和利用设施，雨水大多直接排入市政管网，未得到充分利用，学院绿地面积大，但雨水收集利用措施不完善，有效收集和利用，将有助于缓解学院水资源短缺的问题。

（三）径流组织无序

学院内的径流组织存在无序现象，部分区域缺乏合理的雨水排放路径，导致雨水漫流现象显著。这不仅影响了学院的景观效果，还可能对学院的建筑和设施造成损害。此外，竖向设计与景观的结合度低，也增加了后期提升的难度。

（四）绿地功能单一

虽然学院绿地面积大，但绿地功能相对单一，缺乏多样性[3]。大部分绿地以草坪和密林为主，缺乏具有雨水收集、净化、利用等功能的 海绵体设施。这限制了绿地在海绵城市建设中的作用，也影响了学院的生态环境质量。

针对以上问题，本项目将提出相应的解决方案和措施。通过提升排水设施标准、加强雨水收集利用、优化径流组织、丰富绿地功能等手段，打造具有海绵城市特征的校园环境，提升学院的生态环境质量和可持续发展水平[4]。

Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

三、项目实施技术路线及重难点

（一）技术路线

根据现状场地高程条件和 LID 设施设计要求，对海绵设施汇水区域进行划分和说明，具体如下：

场地内道路、广场、硬质铺装→砾石盲沟 / 植草沟 / 排水沟→调蓄海绵设施→溢流至雨水管网。

学生公寓楼屋面雨水→雨水断接→绿地内的海绵设施 / 雨水桶→溢流至雨水管。

音乐楼屋面雨水→雨水断接→绿地。

2# 变电站及商超中心 / 变电站屋面雨水→雨水断接→砾石盲沟→海绵设施→溢流至雨水管。

正门口绿地区域 / 体育场→排水沟→弃流→雨水调蓄池→一体式处理设备→绿化灌溉。

云帆体育馆 / 逸夫实验楼→雨水管网→弃流→雨水调蓄池→一体式处理设备→中央调蓄湖。

（二）改造方案及重难点

密林地带多为多年生高大乔木，改造成本较高，不作为本次海绵化提升的重点改造区域。早前的设计均设有路沿石，大部分绿地区域标高高于路面标高，且道路两侧多种植有高大乔木，这给海绵设施改造造成困难。对于开阔区域，通过雨水暗涵将路面降水以及断接的雨水导入开阔区域设置的雨水花园，渗透塘以及滞滤池 [5]。

在中央大道两侧以及逸夫实验楼广场前绿地进行换填土改造，同时，对于中央大道进行景观提升，增加中央大道场前广场进行透水铺装更新，广场与绿地交界处设置砾石盲沟作为衔接，后进入绿地设置植草沟导入旱溪，形成景观层次。

早期雨水管网重现期设计短，复核计算重现期仅能满足一年期重现期。部分区域存在雨污水混接现象。设置生物滞留池及滞滤池，在雨量较大的状态下，经过前端的海绵设施后，溢流进入室外管网。

区域内1 级 ~ 2 级非自重性湿陷性黄土，在设置海绵设施时，考虑了地质因素，透水铺装采用非全透型。雨水花园及下凹绿地等渗透型海绵设施在设置在建筑物周围以及道路两侧3m 范围以内时，均考虑采用非渗透型。

中央湖调蓄水源主要来自地表径流及雨水调蓄系统供压的灌溉管网补水。通过设置雨水花园及合理竖向改造，防止日常雨水径流污染水体 [6]。通过过滤，循环，消毒，增压的动力过滤系统，提升中央湖水质。改造需考虑镜面蒸发以及补水情况，还需要进行雨水回用补水及蒸发水量的水平衡计算。

综合以上因素，结合海绵法规及建设指标要求，本项目设置的海绵设施如下：

主要工程量和功能

序号	类型	工程量	单位	功能
1	雨水花园	5461	m²	净、滞、蓄、渗
2	植草沟	3558	m	渗
3	旱溪	756	m²	净、滞、蓄、渗
4	生物滞留池	650	m²	净、滞、蓄、渗
5	下凹绿地	10232.5	m²	净、滞、蓄、渗
6	高位花坛 / 雨水桶	90	个	净、滞、蓄
7	透水铺装	5212	m²	渗
8	渗透糖	450	m²	净、滞、蓄、渗
9	下沉式净化池	215	m²	净、滞、蓄、渗
10	滞滤池	212	m²	净、滞、蓄、渗
11	生态树池	828	m²	渗
12	雨水收集池	2100	m³	蓄

四、结束语

综上所述，本文立足高校校园场地特征与海绵城市建设核心要求，系统梳理了高校海绵城市改造建设中的核心重难点、关键问题及实施注意事项。研究结合高校校园人流量大、硬化路面占比高、绿化布局集中、排水系统老旧等典型场地特点，从整体设计思路、核心建设重难点剖析、科学技术路线规划、落地性改造方案设计多个维度层层递进，搭建起一套完整、适配高校场景的海绵城市改造建设框架 [7]。在整体研究与方案构建过程中，始终坚持因地制宜的核心原则，紧密结合校园地形地貌、水文条件、原有基础设施现状，将理论设计与场地实际情况深度融合，细化了雨水调蓄、径流减排等关键环节的实施要点，有效提升了改造方案的科学性与落地性。本次研究梳理的建设路径与改造框架，不仅精准解决了高校海绵城市改造中的痛点与难点，弥补了专项校园海绵改造理论体系的部分短板，同时也为同类高校开展海绵城市更新改造工程提供了规范、可行的理论参考，也为实际施工建设、方案优化、长效运维提供了详实的实践指导，对推进绿色低碳校园建设、完善校园水生态体系具有重要的现实意义。

参考文献

[1] 王文亮，李俊奇，车伍，等 . 海绵城市建设技术指南解读——城市年径流总量控制率规划指标 [J]. 中国给水排水 ,2015,31(08):18-23.

[2] 李兰，李锋 . “海绵城市”建设的关键科学问题与思考 [J]. 生态学报 ,2018,38(07):2599-2606.

[3] 刘家宏，王佳，王浩，等 . 海绵城市内涝防治系统的功能解析 [J]. 水科学进展 ,2020,31(04):611-618.

[4] 卢兴超，徐宗学，周玉文 . 基于容积法和水文模型法的海绵设施效能评估研究 [J]. 北京师范大学学报 (自然科学版),2024,60(05):736-744.

[5] 住房和城乡建设部 . 海绵城市建设技术指南——低影响开发雨水系统构建 (试行)[S]. 北京：中国计划出版社 ,2014.

[6] 国务院办公厅 . 国务院办公厅关于推进海绵城市建设的指导意见：国办发〔2015〕75号 [A].2015.

[7]GB 50400-2016, 建筑与小区雨水控制及利用工程技术规范 [S]. 北京：中国建筑工业出版社 ,2016.

 Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

数字化背景下建筑项目设计全过程管理策略研究

陈佳悦
天津市北方人力资源管理顾问有限公司，天津 300101
DOI:10.61369/ERA.2026100027

摘　　要： 数字化背景下，建筑项目设计全过程管理正经历从碎片化、粗放式向集成化、精细化、智能化转型的深刻变革。本文基于数字化技术赋能视角，系统剖析了当前设计流程协同效能不足、数据孤岛、管理体系滞后及人才短缺等核心痛点，揭示了BIM的信息集成、云平台的实时交互、大数据与AI的辅助决策及数字孪生的全生命周期映射等核心机理。研究构建了涵盖顶层设计、数据集成、精细化管理及知识人才的四维策略体系：强调通过统一制度与协同平台破除壁垒，以BIM为核心构建数据标准实现互通，依托数字化工具打造事前预判、事中管控、事后复盘的闭环管理，并建立系统化知识管理与人才培养机制。文章旨在为建筑设计行业数字化转型提供理论支撑与实践路径，助力提升项目全生命周期管理效能与品质。

关 键 词： 数字化技术；建筑项目设计；全过程管理；BIM

Research on Whole-Process Management Strategy of Construction Project Design Under the Background of Digitalization

Chen Jiayue
Tianjin North Human Resource Management Consulting Co., Ltd., Tianjin 300101

Abstract: Against the background of digitalization, the whole-process management of construction project design is undergoing profound transformation from fragmentation and extensive mode to integration, refinement and intelligence. From the perspective of digital technology empowerment, this paper systematically analyzes core pain points including insufficient collaboration efficiency of current design procedures, data silos, lagging management system and talent shortage. It reveals core mechanisms such as information integration of BIM, real-time interaction of cloud platform, auxiliary decision-making of big data and AI, as well as full-life-cycle mapping of digital twin. This study constructs a four-dimensional strategy system covering top-level design, data integration, refined management and knowledge-talent development. It emphasizes breaking barriers through unified regulations and collaborative platforms, realizing data interconnection by establishing BIM-centered data standards, building closed-loop management of pre-judgment, in-process control and post-event review with digital tools, and setting up systematic knowledge management and talent training mechanism. This paper aims to provide theoretical support and practical paths for the digital transformation of architectural design industry, and help improve the efficiency and quality of project whole-life-cycle management.

Keywords: digital technology; construction project design; whole-process management; BIM

引言

现阶段，国内建筑行业数字化设计应用持续普及，多数企业已初步实现数字化技术的基础工具化应用，但整体应用深度不足、体系尚不健全，普遍存在技术应用浅层化、设计流程碎片化、数据孤岛严重、管理机制滞后、专业人才匮乏等问题，数字化技术的赋能优势未能充分发挥，全过程闭环管理难以落地，制约了建筑设计管理质效的提升与行业数字化转型进程。基于此，本文立足数字化发展背景，聚焦建筑项目设计全流程管控痛点，系统分析各类数字化技术在设计全过程中的应用现状与作用机理，针对性构建全方位、可落地的数字化全过程管理策略，旨在破解传统设计管理短板，打通设计各环节数据与流程壁垒，实现建筑项目设计全周期、精细化、智能化管控，助力建筑工程管理向规范化、系统化、智慧化升级，为同类建筑项目数字化设计管理实践提供参考借鉴。

Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

一、数字化背景下建筑项目设计管理的现状与痛点分析

（一）数字化技术在设计各环节的应用现状

数字化技术的出现，深刻变革了工程项目管理传统模式，从始至终贯穿各项数字化技术内容，将碎片化、粗放式的工程管理模式转化为集成化、精细化、智能化全过程管理模式[1]。随着建筑数字化技术普及，BIM、云计算、大数据、AI、数字孪生等技术逐步融入建筑设计全流程，改变了传统纸质、人工设计模式，各环节数字化已有一定应用，但整体应用深度不均衡[2]。前期策划阶段，大数据结合 AI 模型整合规划政策、场地地质气象等信息，开展可行性研判、投资测算与风险预判，提升策划效率，云端平台也实现资料线上存储共享。方案设计阶段，BIM 可视化、AI 智能建模、参数化设计得到广泛使用，可快速生成多套方案并评估比选，云端协同打破办公时空限制。初设与施工图阶段，BIM 多专业协同建模、碰撞检测可提前发现管线与专业冲突；数字化智能审图自动核查图纸合规性。施工配合与变更管理中，数字孪生实时比对现场与设计偏差，线上变更台账让流程可追溯。竣工阶段，各类图纸、模型与资料电子化云端归档，支持智能检索，替代传统纸质档案管理。

（二）当前存在的主要问题与痛点

建筑设计行业虽已普及数字化技术，但全过程数字化管理仍存在诸多短板，数字化赋能价值未能充分发挥，核心问题集中在四点[4]。设计流程碎片化，协同效能不足。多数项目数字化设计局限于单一阶段、单一专业，各设计环节数据无法无缝衔接；各方主体无统一协同平台，信息传递渠道零散，易出现信息偏差、遗漏问题，频繁引发设计返工、施工脱节等问题。数据孤岛问题突出，行业各专业、各环节所用软件平台标准不一、数据格式不兼容，各类项目数据无法互通共享[5]。同时数据缺乏统一归集归档标准，难以沉淀复用、辅助决策，数字化仅替代基础人工操作，未实现管理升级。数字化管理体系不完善，多数企业沿用传统管控模式，缺失适配数字化的流程标准、权责及考核机制，设计变更、质量成本管控等环节缺乏标准化流程，且重事后整改、缺事前预判与事中管控，精细化程度不足[6]。专业数字化人才短缺，从业人员多仅掌握传统设计技能，高端数字化技术与数字化管理思维欠缺，且行业缺乏系统化人才培养体系，人员数字化应用能力不足，制约了数字化模式落地普及。

二、数字化技术在设计全过程管理中的应用机理

（一）基于 BIM 的可视化与信息集成机理

BIM 技术是建筑设计数字化转型的核心基础技术，依托可视化呈现与全维度信息集成两大机理，破解传统二维图纸信息片面、抽象、分散的痛点[7]。可视化方面，BIM 以三维数字化建模，把建筑空间形态、结构、管线、节点等设计内容转化为立体模型，方便设计、建设、施工各方直观查看方案，提前排查空间冲突、设计缺陷等问题[8]。相比二维图纸依赖人工解读拼接的方式，BIM 可视化减少信息误读，提升沟通审核效率[9]。信息集成层面，BIM 模型不只是立体图形，更是承载建筑全生命周期信息的载体，可绑定参数、材料、造价、施工、验收等多维度数据，搭建统一建筑信息库，支持数据集中存储、实时更新与追溯。模型支持多专业联动变更，一处修改全局同步，解决图纸更新不同步问题，为建筑全过程设计管控提供可靠数据支撑。

（二）基于云协同的实时交互机理

云计算、云平台技术的核心价值，是打破建筑设计管理的时空与主体壁垒，搭建多方实时交互、协同作业的数字化模式，作用集中在资源共享、实时交互、远程协同三方面[10]。云端平台集中部署各类设计资源，把软件、模型、图纸、审批文件统一存于云端，替代本地存储，设计人员可随时随地调取修改，不受场地与设备约束，提升工作灵活性。同时云协同打通建设、设计、施工、监理等多方主体，依托统一端口实现在线沟通、评审与反馈，消除信息传递时差。还支持多专业人员同步开展设计作业，系统实时同步成果、规避冲突，压缩设计周期，降低协同成本。

（三）基于大数据与 AI 的辅助决策机理

大数据与人工智能推动设计管理由经验决策转向数据决策，改善传统设计决策主观性强、预判与精准度不足等短板。大数据核心是海量数据采集、清洗、分析与沉淀，整合项目设计、造价、施工风险、规范、场地环境等信息搭建建筑设计数据库，为方案选型、参数设定、成本及风险管控提供支撑，覆盖前期痛点研判、设计参数核查、变更造价工期影响分析。人工智能依托大数据与建筑专属模型，实现方案生成、图纸审查、碰撞检测、风险预警、造价测算，快速优选方案、自动排查图纸漏洞，预判变更与施工风险，替代大量人工复核，提升设计决策科学性，实现设计全流程智能辅助管控[3]。

（四）基于数字孪生的全生命周期映射机理

数字孪生是建筑设计数字化升级的高阶技术，核心是搭建虚拟模型 + 实体工程双向实时映射体系，依托 BIM 融合物联网、云计算、传感监测等技术，构建和实体建筑 1:1 的虚拟模型，实现虚实同步动态映射。设计阶段，数字孪生模型整合策划、方案、施工图成果，模拟建筑空间、功能、能耗与施工流程，提前预判落地及运维隐患，前置优化方案。施工与变更阶段，实体传感数据同步至虚拟模型，比对施工与设计偏差，精准指导设计调整。该技术打通设计、施工、运维全周期数据，将设计管理延伸至项目全生命周期，构建闭环动态管理体系，改变传统设计重前期、轻后期的管控短板。

三、建筑项目设计全过程数字化管理策略构建

（一）顶层设计与组织管理策略

完善的顶层设计与组织体系是数字化设计全过程管理落地的基础保障。针对行业制度缺失、组织协同混乱问题，从制度、组织、流程三方面构建系统化管理体系。强化企业与项目双重顶层制度设计，配套数字化管理、协同、变更管控专项制度，对接国家智能建造相关标准，明晰工作标准与权责考核，避免数字化应

 Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

用碎片化。搭建专业化数字化管理组织，设立专项管理小组，整合多专业人员，厘清建设、设计、施工、监理各方职责，破除部门壁垒，实现多方联动协同。重构前期策划至变更归档全流程数字化作业链条，嵌入 BIM 建模、云端协同等手段，打造线上全闭环管理流程，替代传统线下模式。

（二）数据集成与技术应用策略

针对数据孤岛、技术应用浅层化问题，以数据集成化为核心，构建统一互通高效的数字化技术与数据体系。搭建统一数字化协同管理平台，集成 BIM、云端协作、智能审图等功能，统一数据格式、标准与接口，打通设计、造价、施工、监理各环节数据，实现数据实时互通、集中共享，破除数据孤岛。推动数字化技术全流程深度应用，避免浅层工具化使用，在项目策划、设计、施工、竣工各阶段，运用大数据、AI、BIM、数字孪生等技术开展研判、方案优化、缺陷排查、变更管控与数字归档。建立标准化数据管理体系，规范数据全流程管理标准，搭建企业设计资源库，沉淀项目成果，提炼设计经验，以数据复用持续提升数字化设计能力。

（三）全过程精细化管理策略

依托数字化技术，聚焦设计全流程关键节点，搭建事前预判、事中管控、事后复盘的精细化闭环管理体系，解决传统管理粗放、管控滞后难题。事前依托大数据研判同类项目风险，结合项目条件与规范编制数字化设计方案，运用 BIM、数字孪生模拟方案，预判设计施工适配问题，从源头减少缺陷与返工。事中借助数字化平台动态管控进度、质量、变更、成本：云端监控进度并预警滞后；通过 AI 审图、BIM 碰撞检测把控图纸质量，落实线上多级审核；数字化流程管控变更，实现全程可追溯；依托 BIM 数据实时核算造价，防范超预算。事后基于平台数据复盘项目各类问题，总结管理得失，将项目成果与管控数据存入企业资源库，支撑后续项目，形成持续迭代的闭环机制。

（四）知识管理与人才培养策略

数字化设计管理落地核心是人才支撑，针对行业数字化人才紧缺、知识体系滞后难题，需搭建系统化知识管理与人才培养体系。建设企业数字化知识管理体系，归集 BIM、数字孪生等专业知识与项目案例、解决方案，搭建线上资源库，推动知识共享复用，动态更新知识体系适配技术迭代。建立分层分类人才培养体系，面向基层人员、技术骨干、管理层分别设置差异化培训内容，并通过技能竞赛、案例研讨等提升全员数字素养。完善考核激励机制，将数字化应用成效纳入绩效考核，奖励优秀人员，同时引进高端专业人才，为建筑设计全流程数字化管理提供人才保障。

四、结束语

数字化转型已成为建筑行业高质量发展的必然趋势，而设计阶段作为项目的源头，其全过程管理的数字化水平直接决定了建筑全生命周期的价值与品质。本文立足于数字化背景，系统剖析了当前建筑项目设计管理在流程协同、数据互通、体系构建及人才支撑等方面的痛点，并深入揭示 BIM、云协同、大数据与 AI、数字孪生等核心技术在设计全过程的应用机理。在此基础上，从顶层设计与组织、数据集成与技术应用、全过程精细化管理、知识管理与人才培养四个维度构建了系统化的管理策略。

参考文献

[1] 魏永欣 . 数字化技术在工程项目全过程管理中的应用 [J]. 数字技术与应用 ,2026,44(3):91-93.

[2] 谢萍 . 浅析化工项目设计过程的质量管理 [J]. 大氮肥 ,2026,49(2):141-144.

[3] 韩明丽 . 建筑工程项目全生命周期成本管理研究 [J]. 当代会计 ,2026,(5):120-122.

[4] 高玺 . 全过程管理在建筑工程管理中运用分析 [J/OL]. 中国科技期刊数据库工业 C,2026,(2):077-080[2026-09-01].http://qikan.cqvip.com/Qikan/Article/Detail?id=1000004580710.

[5] 杨光 . 建筑工程造价全过程管理技术优化研究 [J/OL]. 中文科技期刊数据库 (文摘版) 经济管理 ,2026,(4):021-024[2026-09-01].http://qikan.cqvip.com/Qikan/Article/Detail?id=1000004618284.

[6] 刘婷华 . 大型工业建设项目全过程管理难点与优化对策 [J]. 区域治理 ,2026,(18):0118-0120.

[7] 曲晓 , 史孝芳 . 数字化技术在建筑工程全过程管理中的应用研究 [J]. 新潮电子 ,2026,(12):202-204.

[8] 任绍君 . 基于 BIM 技术的房屋建筑工程全过程管理研究 [J]. 中国勘察设计 ,2026,(5):101-104.

[9] 刘大聪 , 谢亚旗 , 徐微 , 等 . 基于数字项目平台的装配式建筑智能建造全过程管理分析 [J]. 工程造价管理 ,2025,36(5):64-69.

[10] 武鹏 , 张秀玥 , 丁冲冲 . 建筑工程项目全过程施工管理优化研究 [J]. 石化技术 ,2025,32(9):396-397.

Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

既有办公大楼智能化改造工程实践

姚天栋
重庆坤基科技有限公司，重庆 400039
DOI:10.61369/ERA.2026100042

摘　　要： 针对既有办公大楼智能化改造二期工程中多系统并行施工、建筑结构制约及系统集成复杂等核心问题，本文系统阐述了基于结构化综合布线体系的网络重构、安防高清化升级、信息安全纵深防御、BAS 节能优化及机房整体改造的工程实践。项目采用分区错时施工、模块化机柜改造及物联网网关中间件等策略，有效化解了施工与办公矛盾、弱电间空间不足及异构协议对接难题。实践表明，通过“感知—传输—显示—响应”闭环设计及冗余链路规划，大楼实现了高效网络接入、设备智能管控与安全等级保护目标，为既有建筑智能化更新提供了可复用的技术路线与施工管理经验。

关 键 词： 既有办公大楼；智能化改造；综合布线；节能优化

Practical Application of Intelligent Renovation Project for Existing Office Buildings

Yao Tiandong
Chongqing Kunji Technology Co., Ltd., Chongqing 400039

Abstract: Focusing on the core issues such as parallel construction of multiple systems, structural constraints of buildings, and complex system integration in the second phase of the intelligent renovation project of existing office buildings, this paper systematically expounds the engineering practice of network reconfiguration based on the structured cabling system, high-definition security upgrade, in-depth defense of information security, BAS energy-saving optimization, and overall renovation of the computer room. The project adopted strategies such as zoned and staggered construction, modular cabinet transformation, and iot gateway middleware, effectively resolving the conflicts between construction and office work, insufficient space in the weak current room, and the difficulties of heterogeneous protocol connection. Practice has shown that through the closed-loop design of "perception – transmission – display – response" and redundant link planning, the building has achieved the goals of efficient network access, intelligent equipment control and security level protection, providing reusable technical routes and construction management experience for the intelligent renewal of existing buildings.

Keywords: existing office building; intelligent transformation; comprehensive wiring; energy-saving optimization

随着信息化办公需求的持续深化，既有办公大楼的智能化改造已成为提升运营效率与安全管控水平的重要途径。然而，与新建建筑不同，既有建筑改造受制于已投入使用的办公环境、固定的建筑结构及有限的管线通道，面临施工组织复杂、新技术部署空间受限、新旧系统兼容性差等显著挑战[1]。本工程作为二期改造项目，依托前期结构化综合布线成果，构建覆盖全楼358个信息点位的高效局域网络并接入 Internet，同时同步推进安防、BAS、机房及信息安全等子系统升级。如何在不中断正常办公秩序的前提下，实现多系统深度融合与性能达标，是本次工程实践的核心研究课题。

一、工程概况

既有办公大楼智能化改造二期工程，旨在依托已完成的结构化综合布线系统，构建覆盖全楼六层、共计358个信息点位的高效局域网络，并接入 Internet，以满足现代化信息化办公需求。各个楼层所使用信息接点数量及其分布如下表1所示。

表1 各个楼层所使用信息接点数量及其分布情况

项目	数据点	IP 语音点	每楼层总数
首层	92	3	95
第二层	112	3	113
第三层	120	3	123
第四层	17	10	27
总数	341	19	358

作者简介：姚天栋（1983.07-），男，汉族，甘肃武威人，本科，工程师，研究方向：计算机网络技术。

 Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

本工程以位于三层的中央核心交换机为枢纽，各楼层最终客户端端口统一采用六类四对非屏蔽双绞线布线，确保数据传输、语音传输及备用服务的高带宽与抗干扰性能，而楼层间主干连接则采用六类屏蔽双绞线，以保障高速信号传输的稳定性和安全性；整体建设将围绕网络系统的可靠性、快速响应能力及可管理性展开，通过设备选型、冗余设计和流量规划，实现内部数据高速交换与外部互联网安全接入，从而为办公自动化、资源共享及协同工作提供坚实的技术基础。

二、既有办公大楼智能化改造关键点分析

（一）安防部分改造

安防系统改造以“全域覆盖、智能联动、集中管控”为核心理念，对既有监控系统实施高清化与网络化升级，在楼内各出入口、走廊、电梯厅及地下车库等关键区域部署400万像素以上星光级IP摄像机，并设置独立视频存储服务器实现30天不间断录像存储；门禁系统采用TCP/IP网络型智能门锁控制器，接入大楼局域网统一管理平台，实现分级授权、远程开关与刷卡/指纹/人脸多因素认证，并与消防报警系统联动，确保紧急情况下门禁自动释放；访客系统设置自助登记终端，结合身份证读取与人证比对功能，生成临时二维码通行凭证，提升来访管理效率与安全性；应急广播系统采用数字IP网络广播架构，与消防火灾报警系统无缝对接，实现分区、全区及紧急预案广播的灵活切换，同时利用LED大屏显示系统，在首层大堂设置全彩P2.5级显示屏，实时发布安防告警信息、通知公告及大楼运营状态数据，形成“感知—传输—显示—响应”的完整安防闭环体系[2]。

（二）网络系统改造

网络系统改造在既有结构化综合布线基础上，构建核心层、汇聚层与接入层三级星型拓扑，以三层中央核心交换机为中心，各楼层设置汇聚交换机，通过六类屏蔽双绞线主干链路实现千兆互联，接入层采用六类非屏蔽双绞线下联终端信息点位，满足数据与IP语音业务的并发传输需求，核心交换机配置双电源冗余与热备引擎，关键链路启用链路聚合与STP/RSTP快速生成树协议，确保网络高可用性；无线网络覆盖采用Wi-Fi 6标准的吸顶式AP，依据各楼层信息点位密度合理部署，由无线控制器实现集中配置、漫游优化与射频调优，并通过PoE供电交换机统一供电管理，支持802.1X认证与Portal鉴权，实现安全灵活的移动办公接入；同时引入全光网技术理念，在新建或高带宽需求区域预置OLT与ONU架构的光纤到桌面方案，与铜缆系统形成互补，为今后带宽升级预留平滑演进路径，整体网络系统融合VLAN划分、QoS流量整形及SNMP网管协议，实现全网的精细化运维与性能可视化管理。

（三）信息安全部分改造

信息安全改造遵循等级保护2.0相关要求，从主机安全、网络安全、物理安全与应用安全四个维度构建纵深防御体系：在主机安全层面，对服务器与终端设备部署防病毒软件、主机防火墙及补丁自动更新系统，并实施操作系统安全基线加固与最小化服务原则，关闭非必要端口与服务，同时启用主机入侵检测系统对异常进程和文件完整性进行实时监控；在网络安全层面，于Internet接入边界部署下一代防火墙，集成入侵防御、防病毒网关及应用识别功能，核心交换机旁路部署网络流量审计系统与日志审计平台，对南北向与东西向流量进行全量记录与异常告警，并划分独立的安全管理VLAN与业务VLAN实现逻辑隔离；在物理安全层面，机房区域设置双因素门禁与视频监控全覆盖，机柜采用带锁防护，确保关键网络设备与服务器免于未经授权的物理接触；在应用安全层面，对办公自动化系统、访客管理系统及信息发布平台实施统一身份认证与单点登录，定期进行Web应用漏洞扫描与渗透测试，对敏感数据传输采用SSL/TLS加密，并建立数据备份与恢复机制，确保应用系统在遭受攻击或故障时能够快速恢复业务运行[3]。

（四）BAS系统改造

建筑设备自动化系统改造针对既有办公大楼的空调机组、新风系统、给排水设备、电梯运行及照明系统实施集成化监控与节能优化控制，在原有DDC控制器基础上升级支持BACnet/IP协议的新型控制器，接入大楼局域网实现统一数据采集与远程监管；在空调与新风系统中，依据室内外温湿度传感器、CO 浓度传感器及人员流量数据，动态调节冷热水阀门开度与新风阀比例，并制定分时段运行策略，实现过渡季节新风免费供冷与夜间低负荷待机模式，有效降低暖通能耗；给排水系统增设液位传感器与水泵变频控制，实时监测水箱水位与管网压力，依据用水需求自动启停及变频调速；电梯系统通过BA接口集成电梯运行状态、故障报警与层站召唤数据，纳入监控中心统一呈现；照明系统采用智能照明控制模块，结合照度传感器与人体移动传感器，实现公共区域按需照明与定时关断策略，减少非工作时段能耗浪费；所有子系统数据汇聚至BAS管理工作站，通过图形化组态界面实现集中监视、趋势分析、异常报警及历史数据查询，并与消防系统建立联动接口，确保火灾发生时空调、新风及电梯系统按消防规范执行强制切换与迫降回馈，全面提升大楼机电设备管理的智能化水平与能源利用效率。

（五）机房工程改造

机房工程改造以“可靠供电、精密控温、安全消防、全面监控”为原则，对三层核心机房进行整体升级：综合布线系统采用机柜顶部网格桥架走线方式，六类非屏蔽与屏蔽铜缆以及OM3多模光纤分色分区敷设，配线架标识清晰、跳线管理有序，预留充足扩容空间；机房防雷接地系统在总配电柜输入端安装第一级电源浪涌保护器，各分配电箱设置第二、三级浪涌保护，联合接地电阻严格控制在1Ω以内，所有金属机柜、线槽及设备外壳均做等电位联结，确保雷击及浪涌冲击下设备安全；精密机房空调系统采用两台互为备用的风冷型精密空调，实现恒温恒湿控制，并配置气流组织冷通道封闭方案，提高制冷效率、消除局部热点；UPS供配电系统选用模块化在线双变换式UPS主机，配置磷酸铁锂电池组满足满负荷延时30分钟以上备电要求，并设置智能配电单元对各机柜供电支路实施精密计量与远程通断管理；机房气体灭火系统采用七氟丙烷全淹没式自动灭火装置，设置感烟与感

Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

温双回路探测，联动控制区实现声光报警、气体释放与空调及新风系统自动切断，同时配置手提式灭火器作为辅助手段；机房动力环境监测系统部署一体化动环监控主机，接入 UPS 状态、精密空调运行参数、温湿度、漏水检测、烟雾探测及配电柜电压电流等数据，通过 Web 端与移动端实现 7×24 小时实时告警（支持短信、邮件及声光方式），并生成运行报表与趋势曲线，为运维人员提供全面的机房健康状态可视化管控手段，保障核心网络与数据设备长期稳定运行。

三、改造中出现的问题与解决对策

（一）问题分析

本次智能化改造面临的首要难题在于多系统并行施工与正常办公秩序之间的尖锐矛盾。二期工程涵盖网络重构、安防升级、BAS 改造、信息安全部署及机房整治等多个专业方向，各子系统施工工序交错、管线敷设路径重叠，若按传统新建项目模式全面铺开，势必产生大面积噪音污染、区域封闭及网络中断，严重影响大楼内每日约 300 人规模的日常办公。与此同时，既有建筑的结构限制进一步加剧了施工复杂度：楼层弱电间面积普遍不足 5 ㎡，难以容纳新增的汇聚交换机、光纤配线架及 UPS 配电单元；垂直桥架与预埋管线容量已接近饱和，新增六类屏蔽双绞线及 OM3 光缆的穿放阻力极大，部分楼层需重新开凿墙洞或利用原有废弃管线进行置换，施工难度与工期不确定性显著增加。

另一突出问题集中在异构系统集成与协议互通层面。既有 BAS 系统采用某品牌专用现场总线协议，与新购置的 BACnet/IP 控制器之间缺乏原生兼容性；原安防系统为模拟标清设备，无法直接并入新建的 IP 网络化监控平台；而门禁、访客、广播及消防等子系统分别来自不同供应商，接口标准各异，数据格式与通信时序差异导致联动逻辑难以统一实现 [4]。此外，网络系统重构过程中，核心交换机替换与 VLAN 重新规划需在极短割接窗口内完成，否则将引发全楼业务中断风险；机房改造时，UPS 割接与空调迁移同样面临单路供电保障能力不足的困境，任何操作失误都可能导致核心设备宕机。

（二）解决对策

针对施工与办公矛盾，项目部制定了“分区错时、先辅后主、周末攻坚”的施工组织策略。将整栋大楼按楼层划分为三个施工区域，工作日内仅安排在远离密集办公区的首层及四层进行低噪音作业，二层与三层核心办公区域则集中安排在周五晚间及周六日全天施工，周一早晨前完成现场清理与临时复原，确保办公环境不受影响 [5]。对于弱电间空间不足问题，采用模块化壁挂式机柜替代传统立柜，利用弱电间墙体立面安装小型汇聚设备与配线架，并引入高密度 MPO 光纤连接器减少光缆占用体积；垂直桥架段则通过清理废弃线缆释放约 30% 的管孔容量，同时利用既有吊顶内隐蔽空间敷设新增线槽，实现线缆分流。

针对系统集成的技术难题，采用“物联网网关中间件 + 协议转换平台”的异构融合方案，在各子系统与上层管理平台之间部署多功能协议转换网关，支持 BACnet、Modbus、ONVIF、RS-485 及 HTTP API 等多种协议的相互转换，将原有 BAS 专用总线设备通过网关映射为标准 BACnet/IP 对象，模拟标清摄像机经视频编码器转化为 RTSP 流接入 IP 监控系统，从而实现新旧设备在同一平台下的统一管理与联动。网络割接方面，提前搭建离线测试环境完成核心交换机配置验证与 VLAN 规划仿真，正式割接安排在周末凌晨进行，采用“先备后主、逐步迁移”策略，新核心交换机预先接入备用链路并同步配置，确认稳定后逐层切换接入交换机上联端口，单次割接窗口控制在 4 小时内完成，并保留原核心设备作为冷备应急。机房 UPS 割接则利用临时柴油发电机为关键设备提供过渡供电，确保空调与服务器在母线切换期间不间断运行。通过上述对策的系统实施，本工程在预定工期内完成了全部改造内容，单点故障率归零，办公人员有效投诉率低于 3%，为同类既有建筑智能化改造提供了可复制的实践范本。

四、结语

本次改造工程通过精细化的施工组织、模块化的设备部署以及基于物联网中间件的系统集成方案，成功实现了网络性能提升、安防全域覆盖、设备节能管控与信息安全加固的多元目标，验证了“分区作业、逐层推进”策略在既有建筑改造中的有效性。工程交付后，全楼网络吞吐量、安防响应时效及 BAS 节能率均达设计预期，为后续同类项目提供了实践参考。未来，可聚焦于基于数字孪生技术的改造全过程仿真与动态优化，以进一步提升既有建筑智能化更新的施工预见性与运维智能化水平。

参考文献

[1] 路滨 . 建筑智能化技术在老旧建筑更新改造中的适配性研究 [J]. 绿色建造与智能建筑 ,2026(5):197-199+203.

[2] 张泽仁 . 建筑电气智能化控制技术在公共建筑节能中的应用 [D]. 西南交通大学 ,2022.

[3] 陈磊 , 魏志刚 , 欧阳东 . 既有公共建筑智能化改造中的照明节能系统设计 [J]. 现代建筑电气 ,2025,16(11):15-19.

[4] 孙立 . 医院建筑智能化系统设计及实施策略研究：以 XH 医院为例 [D]. 内蒙古科技大学 ,2024.

[5] 王梓舟 . 建筑电气智能化弱电的施工改造 [J]. 电气技术与经济 ,2023(8):232-234.

 Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

大体积混凝土施工温控技术及裂缝防控研究

邢友华
中国一冶集团有限公司，湖北 武汉 430081
DOI:10.61369/ERA.2026100043

摘　　要： 为了保障大体积混凝土结构的整体性、安全性与耐久性，需加强对混凝土施工过程中温度的控制，同时有效防控各种裂缝的出现。基于此，本文针对大体积混凝土施工温控技术与裂缝形成机理进行了分析，并提出了原材料优化温控技术、拌合与浇筑温控技术、保温保湿养护温控技术的实施要点以及防控裂缝的有效策略，旨在实现对混凝土内外温度差和降温速度的有效控制，大幅度减少裂缝的出现。

关 键 词： 大体积；混凝土施工；温控技术；裂缝防控

Study on Temperature Control Technology and Crack Prevention and Control in Mass Concrete Construction

Xing Youhua
China First Metallurgical Group Co.,Ltd. Wuhan, Hubei 430081

Abstract: In order to ensure the integrity, safety, and durability of large volume concrete structures, it is necessary to strengthen temperature control during concrete construction and effectively prevent the occurrence of various cracks. Based on this, this article analyzes the temperature control technology and crack formation mechanism in the construction of large volume concrete, and proposes the implementation points of raw material optimization temperature control technology, mixing and pouring temperature control technology, insulation and moisture retention temperature control technology, as well as effective strategies for crack prevention and control. The aim is to achieve effective control of the temperature difference and cooling rate inside and outside the concrete, and significantly reduce the occurrence of cracks.

Keywords: large volume; concrete construction; temperature control technology; crack prevention and control

引言

大体积混凝土不仅有着良好的整体性，同时还具有较强的承载力，其凭借自身的优势在大型土建工程中得以广泛应用[1]。但是在水泥水化热的影响下，很容易导致混凝土温差变形，并产生收缩应力，其将极大地增加混凝土出现裂缝的几率。为此在进行大体积混凝土施工的过程中，需准确地把握混凝土温度变化规律，了解裂缝形成机理，在此基础上通过各种混凝土施工温控技术的应用，实现对混凝土内外部温度的精细化控制，同时通过各种策略的实施最大限度避免裂缝的出现。

一、大体积混凝土施工温控技术和裂缝形成机理

（一）大体积混凝土温度变化规律

大体积混凝土温度变化主要包括三个阶段，分别为温升期、温降期和稳定期，温度变化规律实质上是动态平衡水泥水化产热和结构散热的过程。通过量化混凝土绝热温升，可为温控施工提供精准数据支撑，根据 GB50496-2018《大体积混凝土施工规范》，绝热温升计算公式如下：

$$Tt = T_{max}(1-e^{-mt})$$

其中 Tt 代表龄期 t 时刻混凝土绝热温升；T_{max} 代表混凝土最大绝热温升；m 代表水化热衰减系数；t 代表混凝土浇筑后龄期。

最大绝热温升计算公式如下：

$$T_{max} = \frac{WQ}{C\rho}$$

其中 W 代表每立方米混凝土胶凝材料用量；Q 代表胶凝材料平均水化热值；C 代表混凝土比热容；ρ 代表混凝土容重。

一般在完成混凝土浇筑施工48到72小时后达到温度峰值，常规大体积混凝土工程内部最高温升一般在55℃到75℃之间，浇筑后3到14天进入温降阶段，水化反应不断减弱，内部温度逐步降低，为了防止因为温度突然下降而引发应力大幅度变化，需将降温速率控制在每天2.0℃以下。浇筑14天后便进入稳定期，水化

Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

反应基本停止，混凝土内外温差处于平衡状态，温度变化不超过2℃。

（二）大体积混凝土裂缝形成机理

大体积混凝土形成裂缝的主要原因为温度应力超过混凝土瞬时抗拉强度，结合受力形式可以将裂缝划分为自约束应力裂缝和外约束应力裂缝，混凝土温度应力计算公式如下：

$$\sigma = \beta E_C \alpha t \Delta T$$

其中σ表示混凝土温度应力；β表示约束系数；E_C表示混凝土弹性模量；at表示混凝土线膨胀系数；ΔT表示混凝土内外温度差。

自约束应力裂缝的形成是因为混凝土表层温度较低、收缩变形较小，内部温度较高、膨胀变形较大而导致的，在表层形成了拉应力。当表层拉应力大于混凝土早期抗拉强度时，便会出现裂缝，裂缝深度一般不超过50mm，多数情况下呈现不规则网状分布。外约束应力裂缝一般是因为混凝土降温收缩时受到模板、垫层以及基础等外部结构的制约，难以自由变形，形成均匀的拉应力。当拉应力大于混凝土抗拉强度，将形成贯穿性或者深层裂缝，对混凝土整体结构造成较大危害。

除此之外，原材料配合比缺乏合理性、拌合浇筑技术不规范、环境温度突然改变、养护不到位也将导致裂缝扩张。例如，水泥投入量过大、水化热过高将导致温差梯度增加，若后续保湿温控养护不及时，将致使混凝土干缩变形，再加之温度应力的影响，最终产生复合裂缝。

二、大体积混凝土施工温控技术

（一）原材料优化温控技术

优化混凝土原料可以从根源上降低水化热、控制温差，降低温度应力。首先，利用低水化热胶凝材料取代高水化热水泥，选择使用低水化热矿渣硅酸盐水泥和P·O42.5硅酸盐水泥，并严格控制水泥水化热，确保3天水化热不超过250kJ/kg。其次，利用矿粉、粉煤灰取代一部分水泥，粉煤灰掺入量需要控制在15%到25%之间，矿粉掺入量需要控制在5%到10%之间，以此降低混凝土整体温升，延缓水化反应释放热量的峰值出现时间。再次，掺入减水率在25%以上的高效缓凝减水剂，避免水泥快速水化反应，在短时间内释放大量热量，同时提高混凝土密实度，减少孔隙，降低混凝土发生变形裂缝的几率[2]。最后，加强对骨料质量的控制，选择使用含泥量在1%以下、从级配连续的碎石和细度模数在2.6到2.8之间的中砂，以此保障混凝土的稳定性。

（二）拌合与浇筑温控技术

大体积混凝土拌合与浇筑环节直接关系着混凝土入模温度、原材料混合均匀性与分层浇筑质量，为了避免因为局部温升过高、浇筑不均匀而产生温差应力，适宜将大体积混凝土入模温度控制在5℃到30℃之间，夏季温度较高时可以使用冷水、冰水取代30%到40%的拌合用水，以此实现降温拌合。对于砂石骨料可通过遮阳、喷淋的方式将温度控制在28℃以下，拌合时间可以适当延长到90秒到120秒，保证原料均匀混合，防止因为局部水化反应差异较大而引发温差应力。冬季施工时，可预先对骨料、拌合用水进行加热处理，保证入模时其温度在5℃以上。大体积混凝土需要分层连续浇筑，每层厚度不可低于300mm，也不可超过500mm，分层浇筑的时间间隔不可超过2小时，确保上下层混凝土充分结合，防止出现施工冷缝。浇筑施工中可通过薄层浇筑、斜面分层的方式，实现快速散热，避免混凝土长时间处于高温状态。在浇筑的过程中，需要利用高频振捣器将混凝土振捣至表面无气泡、泛浆，避免漏振或者过振，漏振将导致混凝土表面出现蜂窝麻面，影响混凝土结构的整体性，过振则会致使砂浆上浮、骨料下沉，导致混凝土表面出现收缩裂缝[3]。除此之外，还需严格控制浇筑速度，每日浇筑量适宜控制在800m³以内，防止集中浇筑造成水化热堆积，不同浇筑分层厚度的温控效果见表1。

表1 不同浇筑分层厚度的温控效果

浇筑分层厚度	内部峰值温度	内外最大温差	降温速率	表面裂缝情况
800mm	71.6℃	28.7℃	2.4℃ /d	多处网状裂缝
500mm	63.2℃	23.1℃	1.8℃ /d	少量细微裂缝
300mm	59.7℃	20.5℃	1.4℃ /d	无肉眼可见裂缝

（三）保温保湿养护温控技术

大体积混凝土温控的核心环节为养护，科学的养护可以补充水分、控制降温速率、减小内外温度差，避免形成温度应力和干缩变形。在完成混凝土浇筑后，需及时做好保温保湿养护温控。保温方面，结合混凝土温差监测数据，对保温层厚度进行动态调整，通常情况下需要先在表层覆盖2到3层土工布，然后再覆盖1到2层保湿棉被[4]。低温环境下，可通过增设塑料薄膜的方式实现密封保温，避免混凝土表层热量过度散失，有效控制内部温差，防止表层受冷收缩形成拉应力。同时实时监测混凝土温度，通过调控保温温控措施，将内外温差维持在25℃以下，降温速率控制在每天1.5℃到2.0℃之间。保湿温控方面，混凝土初凝后及时通过洒水的方式将表面维持在湿润的状态。高温环境下，每间隔2到3小时洒水一次，常温环境下每间隔4到6小时洒水一次，至少需要持续洒水养护14天。保湿养护不仅可以避免因为混凝土水分过度蒸发而引起干缩变形，同时还能够平衡内外温度，防止混凝土出现裂缝。对于不易洒水保湿的部位（如墙体和承台侧面等），可以通过包裹密封薄膜、涂刷保湿砂浆的方式进行养护，避免干湿交替导致混凝土出现裂缝[5]。

三、大体积混凝土施工裂缝防控策略

（一）源头防控：精细化管控原材料和配合比

精细化管控原材料和优化设计原材料配合比，可以从根源上消除产生裂缝的诱因。首先，构建完善的原材料复检机制，在水泥、骨料、粉煤灰、外加剂进入施工现场前，对其进行严格检测，杜绝不合格材料进入施工现场。对于水泥，需重点检测水化热、安定性等指标，骨料重点检测含泥量和针片状含量，外加剂重点检测缓凝时间、减水率等参数[6]。其次，优化配合比试验，根据大体积混凝土施工环境温度、结构厚度，利用正交试验优化配

 Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

合比，在保证混凝土和易性、抗渗性与强度的基础上，最大化减少水泥的使用量，提高掺合料利用率。对于大体积混凝土施工，适宜将水胶比控制在0.35到0.45之间，水胶比过大，混凝土出现裂缝的几率也将增加。

（二）过程防控：规范施工工艺和施工流程

大体积混凝土施工过程是形成裂缝的高发期，若想有效防控裂缝的出现，需加强对施工工艺和施工流程的规范。第一，加强对混凝土浇筑工艺的规范，严格采用分段、分层、连续浇筑工艺，中途不可随意中断浇筑，避免形成施工冷缝。同时加强对振捣施工质量的控制，保证振捣的均匀性，避免出现漏振、过振的情况，提高混凝土的密实度。第二，根据 GB50496-2018《大体积混凝土施工规范》规定布设温度监测点，对于厚度在2m 以上的混凝土构件，每50㎡布设一组温度监测点，分别在混凝土底层、中层和表层布设一个监测点位。在完成混凝土浇筑施工的前7天需要每间隔2小时监测一次温度，浇筑后的7到14天每间隔4小时监测一次温度，并准确记录内外温度差和降温速率，一旦温度差超出标准或者温度下降速度过快，需要立即增加保温层厚度，以此控制温度下降速度。第三，加强对各个施工环节衔接的优化，在完成混凝土浇筑施工后，及时进行二次收面，第一次收面需要在混凝土初凝前完成，第二次收面需要在混凝土终凝前完成，以此避免混凝土表面出现塑性收缩裂缝。同时还需要通过伸缩缝、后浇带的合理设置，防止裂缝贯穿整体混凝土结构[7]。对于超厚大体积混凝土结构，后浇带的间隔距离需控制在30m 到40m 之间，并在完成混凝土浇筑的40到60天利用后浇带浇筑一次混凝土，促进前期温度收缩应力的释放。除此之外，在进行混凝土施工的过程中不可以在早期阶段叠加荷载，当混凝土强度在设计强度70% 以下时，需要避免机械碾压、堆放材料，避免在外力的作用下导致混凝土出现结构性裂缝。

（三）环境防控：优化养护和外部环境

当外部环境温度、湿度、风速发生较大变化时，很容易导致大体积混凝土出现裂缝，环境防控施工裂缝的核心为隔绝恶劣环境的不良影响，优化养护和外部环境[8]。夏季气温较高时，需要在大体积混凝土施工区域搭设遮阳棚，防止混凝土直接暴晒而引发温升叠加效应。在高温大风天气需适当增加洒水频次，并通过围挡的设置实现挡风，避免混凝土表面的水分快速蒸发而形成干缩裂缝[9]。冬季气温较低，在进行大体积混凝土施工时需对施工区域做好封闭保温处理，当环境温度在5℃以下时不可以再进行洒水养护，需要采取覆盖保温的方式加以养护，避免表层水分结冰，在冻胀的作用下引发裂缝，同时严格控制混凝土昼夜温度差，防止因为夜间温度突然降低而致使混凝土温差超出标准，从而引发裂缝。雨季施工时需加强防雨排水，若在浇筑施工环节遇到小雨天气，需要及时在混凝土上方覆盖防雨布，防止因为雨水改变混凝土水胶比或者冲刷表面[10]。

四、结束语

综上所述，在大体积混凝土施工的过程中，受原材料本身缺陷、施工工艺操作不规范、外界环境干扰、温度应力的影响，很容易产生裂缝。温控与裂缝防控是大体积混凝土施工中的两大痛点。为了有效化解这两大痛点，需通过各种温控技术的有效应用，有效控制混凝土内外温度差和降温速度，并通过精细化管控原材料和配合比，规范施工工艺和施工流程，优化养护和外部环境，以此防控裂缝的出现。未来在进行大体积混凝土施工的过程中，需紧随时代发展，通过智能化监测技术的应用，更好地保障大体积混凝土的施工质量。

参考文献

[1] 邵立俊 . 大体积混凝土施工温控裂缝防治技术 [J]. 科技创新与生产力 ,2026,47(7):104-106.

[2] 华晓玲 . 大体积混凝土主体结构温控施工技术与管理措施 [J]. 建设机械技术与管理 ,2026,39(4):156-158.

[3] 李洋 . 房建工程大体积混凝土施工温控及防裂技术研究 [J]. 模型世界 ,2026(17):73-75.

[4] 邢树意 , 吕玮琳 , 高同斌 . 建筑基坑工程中采用大体积混凝土温控施工技术的研究 [J]. 水泥 ,2026(6):114-116.

[5] 张哲 . 建筑工程大体积混凝土施工温控技术与裂缝防治 [J]. 建筑・建材・装饰 ,2026(8):94-96.

[6] 李娟 , 何颖颖 , 白雪 . 大体积混凝土施工温控技术与裂缝防治研究 [J]. 新疆钢铁 ,2026(2):172-174.

[7] 韩向蕾 . 大体积混凝土浇筑施工技术与裂缝控制 [J]. 四川建材 ,2026,52(7):138-140.

[8] 葛菲 . 高层建筑超厚底板大体积混凝土裂缝控制与施工技术 [J]. 中国建筑装饰装修 ,2026(13):113-115.

[9] 董吉亮 . 大体积混凝土温控防裂技术在公路桥梁承台施工中的应用研究 [J]. 建筑与装饰 ,2026,29(4):148-150.

[10] 王从福 . 大体积混凝土温度裂缝控制与温控措施研究 [J]. 中国建筑金属结构 ,2026,25(13):84-86.

Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

技术管理驱动下市政道路工程“三控三管一协调”的效能提升策略

张俊
四川省资中县城环卫所，四川 内江 641299
DOI:10.61369/ERA.2026100044

摘　　要： 技术管理是市政道路工程“三控三管一协调”的核心赋能手段，通过 BIM、物联网等数字化工具可提升进度、质量、成本管控精度，强化安全、合同、信息管理协同及多方协调效率。当前存在技术融合不足、人才缺口等问题，需通过动态更新标准、构建人才培养体系、强化政策协同等策略优化，推动工程管理向数据驱动的智能化方向发展。

关 键 词： 技术管理；市政道路工程；三控三管一协调

The Efficiency Enhancement Strategy of "Three Controls, Three Management, and One Coordination" in Municipal Road Engineering Driven by Technical Management

Zhang Jun
Environmental Sanitation Institute of Zizhong County, Sichuan Province, Neijiang, Sichuan 641299

Abstract: Technical management is the core empowering means of "three controls, three management, and one coordination" in municipal road engineering. Through digital tools such as BIM and the Internet of Things, the accuracy of progress, quality, and cost control can be improved, and the coordination efficiency of safety, contract, information management, and multi-party coordination can be strengthened. At present, there are problems such as insufficient technological integration and talent gap. It is necessary to optimize strategies such as dynamically updating standards, building a talent training system, and strengthening policy coordination to promote the development of engineering management towards data-driven intelligence.

Keywords: technical management; municipal road engineering; three controls, three management and one coordination

引言

市政道路工程作为城市基础设施的核心载体，其管理效能直接关系到城市运行效率与民生福祉。技术管理作为融合工程规范、数字化工具与创新方法的系统性活动，是提升“三控三管一协调”体系集成化、智能化水平的关键支撑。《“十四五”现代综合交通运输体系发展规划》（2021年）明确提出推动交通基础设施数字化转型，为市政道路工程技术管理创新提供了政策指引。当前，尽管多数项目已建立基本管理框架，但技术融合深度不足、信息孤岛等问题仍制约效能提升。通过探究技术管理对进度、质量、成本等环节的赋能路径，优化协同机制与决策模式，可为市政道路工程高质量交付提供理论参考与实践支撑。

一、技术管理在市政道路工程“三控三管一协调”中的作用

（一）技术管理驱动对“三控三管一协调”体系的影响

技术管理是整合技术准则、数字工具及创新路径的系列性运作，核心是通过技术加持加强决策合理性与推进效能。在“三控三管一协调”框架内，技术管控贯穿各工作环节：进度管控方面，通过 BIM 的4D 仿真模拟可精准预判核心路径，动态调配各类资源；质量管控环节，通过物联网实时采集路基压实度、沥青温度等数据，联动 AI 实现缺陷预警，缩减返工率；成本管控通过 BIM 的5D 关联特性，实现设计变更与成本联动，规避超支[1]。安全管控仰仗智能穿戴及视频监控，辨识危险动作及范围；合同管理凭借区块链搭建无法篡改的履约档案；信息管理通过平台聚合数据，破除壁垒。在协同协作方面，BIM 协同平台可支撑多主体同步共享，降低沟通偏差。技术类管理推动体系从零散转向集成化、智慧化，实现各主要要素协同增益。

（二）技术管理驱动的典型应用领域

技术方面的管理措施深度融入至工期、品质、造价、风控等

 Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

相关环节。进度管控过程里，BIM 的4D 模型推演施工全流程，提前研判资源冲突，动态优化作业环节，规避工期延误风险。质控环节中，物联网针对原材及工艺参数开展动态监测，譬如智能传感设备自主采集坍落度、水灰比类数据，保障各项指标符合规范，降低返工率。成本管控通过大数据分析调整物资及设备布设，实现资源精准调配。在安全管控领域内，无人机及 AI 视频监测技术精准辨识深基坑变位、不当作业等风险，通过预警机制化解隐患。另外技术管控通过数字化平台归集多源数据，破除信息藩篱，为“一协调”提供支撑，驱动体系全面升级[2]。

二、“三控三管一协调”现状及问题分析

（一）市政道路工程“三控三管一协调”实施现状

当前体系呈现规范化与信息化并行趋势，多数项目已建立覆盖质量、进度、成本、安全、合同、信息及协调的基本框架，管理层级分为决策、执行、作业三层。质量控制通过材料抽检、工序验收保障实体质量，部分项目引入 BIM 进行施工模拟[3]；进度控制多依赖甘特图结合周例会调整；成本控制以目标成本为核心，通过变更签证动态管理。安全管理强调现场防护与培训，合同管理聚焦履约与索赔，信息管理以文档传递为主，协调依赖现场沟通。整体框架初步成型，但实施深度与技术融合度不均，部分项目仍依赖经验管理。

（二）存在的主要问题及成因探析

当前实施中，进度滞后问题突出，节点频繁延误，部分因设计变更或材料脱节导致；质量方面，隐蔽验收不规范、工艺执行不到位等现象时有发生，埋下隐患；沟通协同层面，各方信息传递存有壁垒，易引发推诿与决策延迟。成因与技术管理滞后相关：进度管控缺乏动态模拟与预警系统，难以及时预判偏差；质量管控依赖人工巡检，未充分应用 BIM 可视化监控，缺陷难以及时发现；沟通环节未建立统一数字平台，信息共享效率低，数据孤岛显著。此外，技术管理缺位还体现在施工方案优化不足，未能针对市政道路工程复杂性制定针对性措施，加剧了实施困境[4]。

三、技术管理驱动下提升“三控三管一协调”效能的对策

（一）控制类管理效能提升策略

1. 进度、质量、成本控制的技术赋能对策

以技术管理驱动“三控”效能提升，需依托数字化工具重构管控逻辑。进度控制方面，可基于 BIM 搭建4D 施工模拟模型，将工期计划与三维构件关联，实时映射实际进度与计划的偏差，结合智能调度系统动态调整资源配置，减少窝工或等待。质量控制环节，引入探地雷达、无人机巡检等自动检测技术，对路基压实度、路面平整度等关键指标高频监测，数据同步至云端，通过 AI 算法识别隐患并预警，替代人工抽检的随机性。成本控制则通过 BIM 集成工程量清单与市场价格库，实现自动算量与动态核算，结合物联网采集材料消耗数据，对比计划与实际用量差异，及时追溯超支风险。此外，建立进度、质量、成本的联动分析模型，系统自动评估指标偏差的连锁影响，为管理者提供多维度决策依据。通过技术深度融合，三控工作从经验驱动转向数据驱动，减少人为失误与资源浪费[5]。

2. 数据集成下的控制管理流程优化

数据集成下的流程优化，需以信息化平台打通进度、质量、成本控制的信息壁垒，实现多维共享与协同决策。市政工程中，进度、质量、成本数据分散于不同系统时易导致管控滞后。通过构建统一数据集成平台，整合施工进度节点、质量检测结果、成本核算动态等数据，使各主体同步获取全面信息。平台通过数据挖掘与分析，为进度偏差预警、质量问题溯源、成本超支预测提供决策支持，如基于历史与实时数据对比自动识别延误风险并推送调整建议。这种集成驱动打破信息孤岛，促进各环节协同联动，提升控制管理的精准性与时效性[6]。

（二）管理与协调类效能提升策略

1. 三管一协调的信息化促进机制

技术管控需深化数字化工具对安全、合约、数据及跨方统筹的赋能。安全管控方面，布设物联网智能化监控装置，动态收集人员区位、器械运维及环境指标，通过 AI 实现风险预判与自动处理，压缩监管漏洞[7]。在合同管控阶段，区块链技术保障约定条款无法被恶意篡改且实现全流程溯源追踪，智能合约通过预先设定的条件自主启动价款支付、成果核验等操作，强化公开性与运行效能。通过信息管控搭建 BIM+GIS 集成平台，梳理设计、工期、监测等相关数据，破除信息壁垒。多主体协同方面，通过云计算建立跨主体协同平台，包括实时会商、在线资料协同及工作分派，联动大数据分析压缩协同时长。梳理设计、施工、监理等环节的数据流转脉络，通过 RPA 实现报表生成这类重复性事务自动化，搭建数据质量管控体系，建立“数据驱动、智能协同”的管理模式。

2. 智能决策支持在管理协同中的应用

智能化决策支撑系统通过融合多类异源信息，搭建跨领域联动决策框架，给安全、合约及信息化管控供应数据赋能保障。安全管理场景下，平台同步采集周遭环境、各类设施及作业人员关联数据，通过风险预判算法排查潜在风险，为监管部门及施工方提供科学干预参考，实现全程前置防控[8]。在合同落地推进阶段，系统通过合约条款及工期规划搭建智能匹配机制，追踪履约时点，若产生偏差或资源冲突则生成多方面调整方案，强化精细管控程度。信息管控方面，通过区块链实现工程类数据的分布式存储及不可篡改性，保障设计变更、签证类文件在参与主体间的实时共享及溯源，破除数据孤岛，推进管理模式由经验驱动向数据驱动迭代。

四、市政道路工程技术管理创新与推广实践

（一）技术创新驱动下的管理模式改革

1. 新兴技术工具的集成应用

市政道路工程领域的技术管理创新及落地实践过程中，通过

Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

技术创新带动的管理模式改革，必须融合运用各类新兴技术工具。针对“三控三管一协调”效能优化的各环节，大数据、物联网、云计算这类技术的集成应用作用十分突出。智能传感模块能够同步采集道路施工环节中的质量指标、进度主要节点及安全风险类数据，通过5G 网络传导至云计算服务器端完成存储与前置处理，大数据挖掘算法则针对多方面数据开展关联分析，实现质量动态监管、进度偏移预警及成本优化预判 [9]。例如在工程施工质量管控环节，物联感知装置采集沥青摊铺阶段的温度、压实度等参数，相关数据经云平台运算后生成质量变化形势图谱，协助管控人员适时优化施工工序；安全管控方面，通过人员定位及环境监测数据的耦合研判，能够辨识高风险作业区段并自动启动预警机制。数智化平台把相关技术整合，破除设计、建造、运维全流程的数据壁垒，建立全生命周期管控闭环，推动“三控三管一协调”从依赖经验转向通过数据升级，加强管理决策的精准度与效能。

2. 智能管理平台建设与示范成效

在市政道路工程技术领域，管理创新及推广落地的实践进程中，由技术创新引领的管理模式变革重点围绕智能管控平台搭建及示范效果展开，从国内某省会城市的快速路升级改造项目案例中能看出，此平台融合 BIM 建模、物联网传感以及大数据分析技术，实现施工进度、品质把控及成本管控的动态监测 [10]。系统同步收集路基紧实程度、沥青铺设温度等核心指标，通过设定阈值自动预判质量风险，对比传统人工巡查效能提高四成，返修率降低两成五。此外系统植入合同管控与安全监督模块，实现参建单位信息互通与流程联动，令项目立项审批时长缩减30%，安全事件发生率降低20%。相关示范项目显示，智能管控平台通过数据赋能决策优化“三控三管一协调”各环节，推动管控模式从经验型向精细型转变，为同类型工程提供可复用的技术管理路径。

（二）管理机制创新推进经验

1. 多主体协同机制优化路径

市政公用道路工程技术管理创新及推广的具体实践中，管理机制方面创新的推进经验显示，多主体联动协同机制优化是提高工程运行效能的核心要点。常规市政道路工程项目里，项目业主、施工企业、监理单位、设计机构及行政监管部门等各类参与方间往往因信息不通畅、责任界定不清造成协作效率欠佳，继而干扰“三控三管一协调”的落地成效。通过搭设以技术管控为核心的多主体联动机制，能够确实破除部门壁垒，实现数据与信息的精准整合。实操方面的优化路径可从三个方面推进：一是搭建通过 BIM 技术的协同管控平台，把设计蓝图、施工进展、质量核验数据等内容实时互通，各方主体通过该平台同步介入方案研讨与问题整改，降低沟通损耗及决策滞后问题；二是厘清各方主体在技术管控领域的权责清单，例如建设单位承担技术标准的统筹编制工作，施工单位负责现场技术落地任务，监理单位加强技术合规性管控，通过责任闭环机制保障协同行动的统一性；三是引入动态协同考评机制，以工程进展、质量达标率、成本管控精准度等指标为基准，对各方主体的协同成效开展定期考评，并把考评结果与奖惩机制相衔接，调动各方主体间的协作主动性。这套机制通过技术赋能及流程重塑，促成多元主体从分散管控向集成化协同过渡，为“三控三管一协调”效能升级提供机制支撑。

2. 绩效评价与激励机制完善

绩效评价与激励机制完善部分，需以技术管理为核心构建科学评价体系，将“三控三管一协调”效能指标与技术管理创新成果深度绑定。评价体系应涵盖技术方案优化对成本控制的贡献率、施工技术创新对进度管控的提升率、质量检测技术应用对质量达标率的影响等量化指标，同时纳入技术管理流程规范化程度、协调机制响应速度等定性维度，形成多维度、可量化的评价模型。在此基础上，建立分层分类的激励机制，对技术管理团队及个人，根据评价结果实施成果激励，如将技术创新带来的成本节约按比例提取奖励金，对推动关键技术落地的核心人员给予职称晋升、项目优先负责权等长期激励。同时，通过评价结果的及时反馈，推动技术管理策略迭代优化，例如针对评价中发现的技术协调效率短板，调整跨部门技术沟通机制，形成“评价 – 激励 – 反馈 – 优化”的闭环，实现技术管理驱动下“三控三管一协调”效能的持续提升。

（三）推广应用中的问题与改进建议

1. 推广实践遇到的困难

市政道路工程技术管理创新推广实践中，面临多维度障碍与环境约束。制度层面，现有管理体系多基于传统工程模式设计，对 BIM、智能监测等新技术的适配性不足，技术标准更新滞后于创新实践，导致创新技术与现行规范、流程衔接不畅，难以形成标准化应用路径。资金方面，技术创新前期研发投入大、回报周期长，市政工程建设资金多受财政预算限制，且缺乏针对技术创新的专项扶持政策，企业自主投入动力不足，制约新技术的试点与规模化推广。技术人员能力层面，一线技术管理人员对新技术的认知与操作能力存在短板，传统经验型管理思维仍占主导，缺乏系统的新技术培训机制，导致创新技术落地时难以有效执行。内外部环境约束上，内部存在部门间协同机制不完善，技术管理与施工、成本等环节脱节，外部则面临行业内技术共享机制缺失，创新成果难以快速复制，同时部分地区对新技术的市场准入门槛较高，进一步阻碍了技术管理创新的推广进程。

2. 针对性完善与政策建议

当前市政道路工程“三控三管一协调”技术管理模式推广中，存在标准规范与技术迭代适配性不足、复合型管理人才缺口及政策支持体系碎片化等问题。标准规范方面，现有体系对 BIM、智慧监测等新技术的流程嵌入缺乏细化指引，导致技术应用与管理环节脱节；人才层面，懂技术、通管理、善协调的复合型团队培养机制缺位，一线人员对新技术管理工具的应用能力薄弱；政策支持上，跨部门协同机制不健全，财政激励与监管考核的联动性不足，制约技术管理模式的规模化落地。针对上述问题，需从三方面完善：一是动态更新标准规范，将新技术应用流程、数据交互要求纳入市政工程管理标准体系，明确技术管理各环节的量化指标与责任边界；二是构建“高校 – 企业 – 行业”联动的人才培养体系，开设技术管理融合课程，开展 BIM、智慧工地等专项培训，建立持证上岗与技能评级制度；三是强化政策协

 Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

同，出台技术管理创新激励政策，设立专项基金支持试点项目，建立跨部门联合监管平台，将技术管理效能纳入工程评优与企业信用评价体系，以制度保障推动“三控三管一协调”模式的效能升级。

五、总结

技术管理驱动下市政道路工程“三控三管一协调”的效能提升策略研究，通过系统梳理理论基础与实践路径，明确技术管理对工程管理各环节的核心赋能作用。研究发现，BIM、物联网、大数据等技术的深度应用，可实现成本、进度、质量的动态监控与精准调控，强化安全、合同、信息管理的数字化协同，并提升多方主体的协调效率。基于此，提出以技术集成优化管理流程、构建数据驱动的决策机制、培育复合型技术管理人才等对策建议，为工程实践提供可操作的路径指引。未来，随着人工智能、数字孪生等技术的迭代升级，市政道路工程管理体系将向全生命周期智能化方向发展，技术管理的赋能边界将进一步拓展，推动工程管理从被动响应向主动预测转变，为行业高质量发展注入持续动力。本研究的结论与展望，可为后续相关领域的理论研究与实践应用提供坚实支撑，助力市政道路工程管理效能的系统性提升。

参考文献

[1] 杨正贵 . 论 " 三控三管一协调 " 在施工方项目管理中的运用 [J]. 中国房地产业 ,2017(19):50-51.

[2] 王良成 , 陈晓虎 . 施工单位“三控三管一协调”[J]. 山西建筑 ,2017,43(12):233-235.

[3] 张远帆 . 基于智慧城市理念的市政道路照明工程管理优化研究 [J]. 城市建设理论研究 (电子版),2025,(29):19-21.

[4] 李敏 . 加强市政道路工程管理的有效策略分析 [J]. 中国房地产业 ,2025,(35):70-73.

[5] 樊梦娇 . 市政道路工程施工质量评价研究 -- 以 Y 道路为例 [D]. 河北经贸大学 , 2023.

[6] 郑忠华 . 市政道路工程施工现场技术管理研究 [J]. 工程建设与设计 ,2021,(22):220-222.

[7] 王刘武 . 浅谈市政道路工程施工技术管理与防治对策分析 [J]. 现代物业 (中旬刊),2018,(12):127.

[8] 王朔 . 基于 BIM 技术的市政道路工程施工质量管控研究 [J]. 新城建科技 ,2026,35(7):178-180.

[9] 杨勇 . 市政道路工程管理优化策略研究 [J]. 新城建科技 ,2025,34(12):188-190.

[10] 杨衍微 . 市政道路工程管理优化策略——以广州某城市快速路项目为例 [J]. 价值工程 ,2025,44(28):66-69.

Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

大跨度涉河钢箱梁顶推施工技术研究与实施

鞠习超，章勇，刘帅杰，吴建衡，边文同
中国建筑第八工程局有限公司，河北 廊坊 065000

DOI:10.61369/ERA.2026100045

摘　　要： 近年来随着公路工程的快速发展，钢箱梁桥在市政高架路、高速公路等项目中的应用日趋广泛。在跨越既有道路、河流等复杂工况条件下，传统的支架法吊装施工往往面临交通组织困难、安全风险高等问题，顶推施工技术因具有施工占地少、对既有交通影响小、施工安全性高等优点，逐渐成为大跨度钢箱梁安装的首选方案之一。本文以G95首都地区环线高速公路廊坊至涿州段改扩建工程兰沟洼特大桥第六联钢箱梁安装为工程背景，系统阐述了步履式顶推施工的工艺流程，详细分析了顶推施工的技术特点及操作要点，包括顶推设备布置、导梁设计、同步控制、线形控制、纠偏措施以及落梁施工等关键技术环节，为同类大跨度钢箱梁顶推施工提供参考。

关 键 词： 钢箱梁；步履式顶推；支撑胎架；线形控制；导梁

Research and Implementation of Top Pushing Construction Technology for Large Span River Crossing Steel Box Beams

Ju Xichao, Zhang Yong, Liu Shuaijie, Wu Jianheng, Bian Wentong
China Construction Eighth Engineering Division Co., Ltd., Langfang, Hebei 065000

Abstract: In recent years, with the rapid development of highway engineering, the application of steel box girder bridges in municipal elevated roads, highways and other projects has become increasingly widespread. Under complex working conditions such as crossing existing roads and rivers, traditional support method hoisting construction often faces difficulties in traffic organization and high safety risks. Top push construction technology has gradually become one of the preferred solutions for the installation of large-span steel box girders due to its advantages of small construction land occupation, minimal impact on existing traffic, and high construction safety. This article takes the installation of the sixth steel box girder of the Langouwa Extra Large Bridge in the G95 Capital Region Ring Expressway Langfang Zhuozhou section renovation and expansion project as the engineering background. It systematically elaborates on the process flow of walking top pushing construction, and analyzes in detail the technical characteristics and operation points of top pushing construction, including key technical links such as top pushing equipment layout, guide beam design, synchronous control, linear control, correction measures, and beam drop construction. It provides reference for similar large-span steel box girder top pushing construction.

Keywords: steel box girder; walking style top push; supporting tire frame; linear control; guide beam

一、工程概况

（一）项目背景

G95首都地区环线高速公路廊坊至涿州段改扩建工程中，兰沟洼特大桥是全线控制性工程之一。该桥第四联、第六联、第九联和第二十联采用钢混组合梁结构形式。第六联为2×45m连续跨，结构中心线处钢梁高度1.7m，桥面板宽为20.305m。主梁截面为开口钢箱梁，钢箱梁底宽为2.8m，横断面为多箱单室，悬臂长度1.4025m，共四片梁体，材质均为Q345qD。第六联共计4片钢箱梁，每片钢箱梁分A、B、C、D、E共5段随顶推步骤进行拼装。

（二）总体施工部署

根据施工组织流程安排，第六联的施工路径为：施工准备→施工便道及场地压实平整→支撑胎架安装→顶推设备安装→导梁安装及顶推设备调试→第一次顶推→分段拼装→第二次顶推→分段及箱间横梁钢模板安装→第三次顶推→分段及箱间横梁钢模板安装→第四次顶推→落梁、拆除顶推设备及支撑胎架→施工完成。

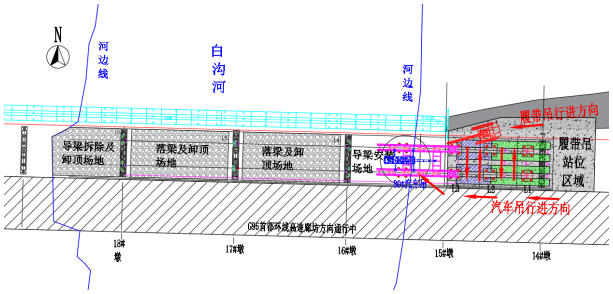


图1 钢箱梁平面布置图

 Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

二、施工工艺流程

（一）总体工艺流程

第六联钢箱梁采用步履式顶推法进行施工，现场根据钢箱梁分段情况设置顶推胎架，钢箱梁分段运抵现场后，在顶推胎架上安装导梁及拼装钢箱梁及相关临时支撑架、桥面盖板（含悬挑）、箱间横梁等，拼装与顶推交替施工，直至钢梁全部顶推到位后进行落梁，后续操作完成桥梁受力体系转换。

（二）施工步骤

顶推施工工艺流程可分为三个主要步骤：第一步为安装临时顶推支墩、顶推支架及顶推设备；第二步为利用150t履带吊吊装E段、D段钢箱梁及支撑梁，安装导梁并检查焊缝及高强螺栓，调试顶推操作系统；第三步为检查履顶外观及油管连接，检查顶升、纠偏、顶推油缸工作情况，并进行试顶推5m。

（三）拼装与顶推交替作业

第六联安装顺序为：顺桥向从小桩号向大桩号安装，横桥向从桥中心向外侧安装。以E段为例，首先进行E1段吊装，然后进行靠原始道路侧悬挑模板安装，随后E1段桥面盖板铺装，然后进行E2段箱梁吊装及桥面盖板铺装，E1段、E2段之间箱间横梁进行吊装焊接，以此类推进安装至E4段钢箱梁，最后进行外侧悬挑模板安装。D、C、B、A段同E段拼装顺序类似，ED段拼装完进行顶推，随后进行C段拼装顶推，随后进行B段拼装顶推，随后进行A段拼装顶推，各分段之间组装采取高强螺栓连接。

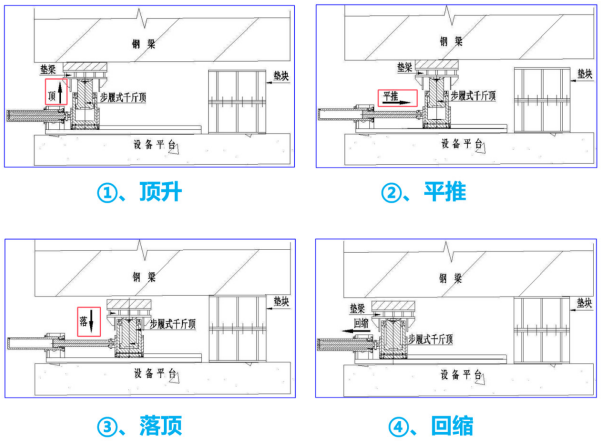


图2 钢箱梁顶推施工图

三、施工技术特点及操作要点

（一）顶推设备的布置与选型

第六联钢箱梁顶推共设置18台3DDT-320型步履式千斤顶。顶推设备布置按照15+14.17+21+22+45+45m跨径进行布置，其中前四组顶推设备布置在临时胎架上，后面三组顶推设备分别设置在16#、17#、18#墩盖梁上。16#墩盖梁及17#墩盖梁上各布置4台，其余支撑胎架或盖梁上各布置两台，间距9.8m。顶推施工共设置7组18个顶推点。

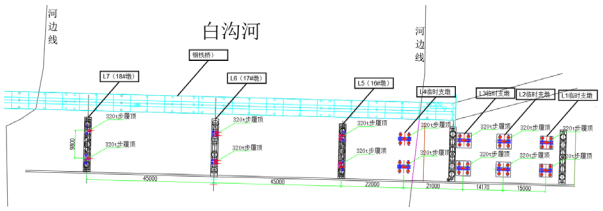


图3 钢箱梁支撑胎架及步履式千斤顶布置图

（二）导梁设计与抗倾覆措施

为避免钢箱梁在顶推过程中悬挑长度过大，在顶推方向的前端设置32m长的组合钢板导梁。

导梁最大组合应力126Mpa ≤ 270Mpa，为顶推悬臂最大时，满足规范要求。为确保导梁能顺利上前支墩，导梁前端加工出长100cm、高50cm的台阶，根据本工程顶推工艺导梁上墩共计3次，分别为16、17、18号墩。跨越16号墩时导梁距支撑梁高度为85mm，导梁下挠32mm，导梁可顺利过墩；跨越17号墩时导梁下挠184mm；跨越18号墩时272mm[1][6][7]。

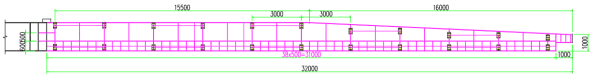


图4 钢箱梁导梁布置图

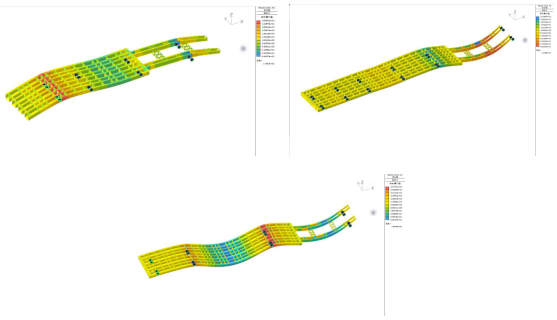


图5 钢箱梁跨越16、17、18号墩时受力模型分析图

（三）顶推施工同步控制

步履式顶推的核心在于同步控制，具体包含四个循环动作：（1）顶升——通过PLC控制系统控制油泵工作，顶升位移传感器实时反馈工作油缸的实际行程，控制系统实时调节油泵相应的比例阀，控制油缸的顶升速度，实现同步顶升脱离临时垫梁；（2）前进——通过水平位移传感器实时反馈各个油缸的实际行程，控制油缸的前进速度，实现同步前进到行程上限；（3）下降——通过顶升位移传感器控制油缸的下降速度，实现同步下降到钢箱梁落到临时垫梁上；（4）后退——各点位滑移结构回退到初始状态，循环以上动作实现钢箱梁整体顶推到预定位置[2][5]。

（四）线形监测与纠偏控制

钢箱梁顶推施工过程中，应密切进行其线形监测控制。其横向线形控制主要通过横向纠偏油缸进行控制，竖向线形控制是通过顶推设备中的竖向千斤顶完成。其安装精度控制要求为：高程≤5mm，轴线≤5mm。

中轴线位移偏差措施包括：（1）同步顶推控制——每次顶推前仔细检查中央控制系统和各墩位处顶推设备的性能；（2）全过

Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

程监测措施——在钢箱梁前端和尾端顶面设中线偏移监测点，过程中连续观测，实测轴线坐标与理论轴线坐标对比，以此指导轴线纠偏。

在施工中，如出现钢箱梁整体的中线偏差，应立即暂停顶推进行偏差纠正。墩顶的步履式顶推设备上设置的4个横向调节油缸具有纠偏功能，具体操作流程为：在设备脱空的情况下将上部滑移梁转移到偏移侧，进行顶升直到钢箱梁脱离临时垫梁，去除另一侧的导向约束，利用横向调整油缸进行偏移调整，同步下降到底使钢箱梁落位至临时垫梁后恢复初始状态。

施工现场每个顶推工作点安排有一名设备监控人员，在相对固定点做好过程标记，并在每个行程结束后报告该工作点的梁边实际偏位。同步顶推过程中，如果某点的实际偏位超过40mm，则结合相邻点的偏位情况，利用顶推设备的纠偏油缸进行梁体纠偏，过墩纠偏时顶推速度控制在1-1.3m/h[3][8][9]。

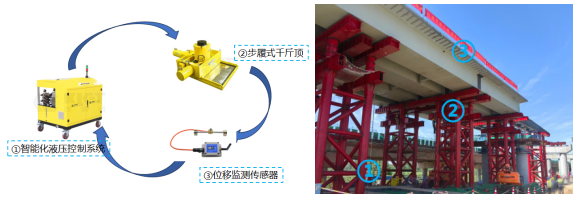


图6 钢箱梁智能监测系统

（五）顶推速度与脱空控制

控制钢箱梁顶推前进速度，纵桥向前进不超过15cm/min；顶推前进过程中，钢箱梁底板脱离下部支垫高度≤50mm，以降低顶推过程中的脱空高度。

（六）顶推过程中的注意事项

顶推施工中注意以下关键事项：（1）施工前同步顶推系统应进行整体调试和演练；（2）钢箱梁焊接需在温度稳定、日照强度较低的情况下进行；（3）顶推设备和钢梁腹板底面接触处顺桥向长度不得小于0.6-1.0m，且顶推力必须传递到腹板上；（4）顶推时应派专人检查导梁及箱梁工作状态，发现异常立即停止顶推；（5）顶推前应与设计、监控等单位确定各点竖向力、水平顶推力等理论数据；（6）顶推纵向千斤顶全部布设在箱梁的外侧腹板之下。

（七）落梁及顶推设备拆除

钢箱梁顶推就位，经验收合格后方可进行临时支架的拆除。落梁施工的具体步骤为：顶推至设计位置后，利用16#、17#及18#墩步履顶将钢箱梁顶起，拆除支撑梁、支撑墩，接着安装落梁支墩、落梁千斤顶、保护支墩，最后用落梁千斤顶顶起钢箱梁，使其与步履顶脱离，并拆除步履顶和垫梁。随后采用交替落梁法，单次落梁高度100mm，先将左端落梁千斤顶顶起钢混梁脱离支撑垫墩20mm，抽取支撑垫墩下的落梁垫墩100mm，落梁千斤顶回落140mm，使钢混梁支撑在落梁垫墩上，随后拆除千斤顶。

（八）技术难点及应对措施

顶推施工主要存在以下技术难点及应对措施：（1）拼装难度——钢箱梁重量大，拼装精度要求高，应对措施是设置合理的拼装平台和具备足够起吊能力的设备；（2）作业安全——钢梁重量大，作业安全是难点，应对措施是设计处理好临时支墩、滑道系统和导向装置，保证安全储备；（3）线形控制——主桥段钢梁有较大纵坡，顶推过程中的线形控制难度大，应对措施是制定详细的施工观测及控制方案，对关键部位进行观测和内力测试；（4）倾覆稳定控制——应对措施是在前端设置32m钢板导梁，严格控制顶推速度和脱空高度，并进行技术跟踪和抗倾覆验算；（5）连接质量——钢梁与钢导梁的连接质量是难点，应对措施是采用全熔透Ⅰ级焊接，并进行超声波探伤检验，侧面用钢板加强贴角焊于腹板[4][10]。

四、结语

大跨度涉河钢箱梁顶推施工是一项技术管控复杂、安全风险高的系统性工程。本文以兰沟洼特大桥第六联钢箱梁安装为工程背景，系统总结了步履式顶推施工的关键技术。通过合理的顶推设备布置、科学的导梁设计、严格的同步控制、有效的线形纠偏措施以及规范的落梁操作，能够确保顶推施工的安全顺利进行。在实际施工中，需重点关注顶推系统调试、拼装精度控制、温度变形控制以及同步性保障等关键环节。随着我国桥梁建设技术的不断发展，步履式顶推施工技术将在更多复杂工况的桥梁建设中发挥重要作用，相关经验可为同类工程提供有益借鉴。

参考文献

[1] 秦灵刚 . 跨线桥钢箱梁顶推施工导梁设计与线形控制 [J]. 交通世界，2026 (21)：157-159.
[2] 陈智胜 . 跨高速公路钢箱梁步履式顶推关键技术研究 [J]. 建筑科技 ,2026 ,10 (09)：125-128.
[3] 尚美强，宋恩波 . 钢箱梁顶推施工中的线形控制研究 [J]. 西部交通科技，2026 (04)：212-216.
[4] 孙良博，刘文龙，连瑞扬，叶树涛，王欣宇 . 钢箱梁顶推施工过程有限元仿真分析 [J]. 建设机械技术与管理 . 2026 ,39 (02)：34-36.
[5] 安建波 . 跨河钢箱梁顶推施工技术与变形控制研究 [J]. 施工技术，2024，53（10）：104-109.
[6] 张小欣 . 跨既有高速桥梁大跨径钢箱梁步履式顶推施工关键技术 [J]. 上海公路，2023（3）：85-92，218-219.
[7] 武其亮 . 四跨并行跨路钢箱梁步履式顶推线形控制技术研究 [J]. 工程与建设，2025，39（5）：1151-1153.
[8] 漫海东，葛树亮，李江江，等 . 钢箱梁步履式顶推施工工艺及稳定性研究 [J]. 甘肃科技，2025，41（5）：12-17，21.
[9] 孙传智，张兴虎，郝笛笛 . 连续钢箱梁桥顶推施工监测分析研究 [J]. 四川轻化工大学学报（自然科学版），2025，38（3）：120-128.
[10] 韩世伟 . 钢箱梁跨线顶推施工有限元仿真分析 [J]. 建筑机械化 .2025,46(3):162-165.

 | Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

城镇自来水厂运行安全风险辨识与分级管控策略研究

李铮

北京市自来水集团有限责任公司第九水厂，北京 100020

DOI:10.61369/ERA.2026100007

摘　　要： 城镇自来水厂作为城市供水系统的核心节点，它的运行安全与否，关系到公众健康以及社会稳定方面，本文基于安全生产双重预防机制理论框架来开展，对城镇自来水厂运行的主要风险来源进行了梳理，从人员操作、设备设施、工艺流程、危险化学品以及作业环境这五个维度来构建风险辨识体系。风险评价环节，把 LEC 法以及风险矩阵法结合起来运用，去处理对辨识出的危险源开展半定量评估的工作，依照“红、橙、黄、蓝”四色标识来划定风险等级，在风险管控策略这个方面，提出把分级管控责任体系、技术管控措施以及动态监测机制当作三位一体的管控路径来开展，从组织制度保障、信息化建设以及持续改进机制这三个方面来提出实施保障建议。研究结果能够为城镇供水企业开展安全风险分级管控方面的工作提供方法参考以及实践指导。

关 键 词： 城镇自来水厂；运行安全；风险辨识；分级管控；双重预防机制

Research on Risk Identification and Hierarchical Control Strategy for Operation Safety of Urban Waterworks

Li Zheng

No.9 Water Plant, Beijing Waterworks Group Co., Ltd., Beijing 100020

Abstract: As the core node of urban water supply system, the operation safety of urban waterworks is related to public health and social stability. Based on the theoretical framework of the dual-prevention mechanism for work safety, this paper sorts out the main risk sources in the operation of urban waterworks, and establishes a risk identification system from five dimensions: personnel operation, equipment and facilities, technological process, hazardous chemicals and working environment. In the risk evaluation stage, the LEC method and risk matrix method are combined to conduct semi-quantitative assessment on the identified hazard sources. Risk levels are classified according to the four-color marking standard of "red, orange, yellow and blue". In terms of risk control strategies, a three-in-one control path consisting of hierarchical control responsibility system, technical control measures and dynamic monitoring mechanism is proposed. Implementation guarantee suggestions are put forward from three aspects: organizational and institutional guarantee, informatization construction and continuous improvement mechanism. The research results can provide methodological reference and practical guidance for urban water supply enterprises to carry out safety risk hierarchical control.

Keywords: urban waterworks; operation safety; risk identification; hierarchical control; dual-prevention mechanism

引言

城镇供水系统是维系城市正常运转的重要基础设施，自来水厂作为供水链条中的关键生产环节，承担着水质净化与安全输配的核心功能。近年来，随着城镇化进程加快和供水规模持续扩大，水厂运行过程中暴露出的安全隐患日益受到关注。有学者对2020至2024年间公开报道的16起供水行业安全事故进行了统计分析，发现其中56.3%发生在水厂环节，事故类型以中毒窒息和设备故障为主，直接原因多为人员违章作业[1]。这一数据表明，水厂运行安全管理仍然是供水行业亟需强化的薄弱环节。

2021年修订的《中华人民共和国安全生产法》明确要求生产经营单位建立安全风险分级管控和隐患排查治理双重预防机制。在此政策驱动下，国内部分供水企业开始探索双重预防机制的建设路径。梁耀枢等[2]以南方某城市供水系统为例，通过梳理风险点、识别危险源、完成风险分级并编制管控措施，成功将全部风险点转化为低风险水平，为供水行业提供了可借鉴的实践经验。然而，当前多数城镇自来水厂在风险辨识的全面性、评价方法的适用性以及分级管控的精细化方面仍存在不足，亟待建立一套系统化、可操作的风险辨识与分级管控策略体系。

鉴于此，本文立足于城镇自来水厂的运行特点，从风险辨识方法体系、风险评价模型与分级管控策略三个层面展开研究，以期为供水企业提升运行安全管理水平提供理论支撑与方法指导。

Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

一、城镇自来水厂运行安全风险辨识方法

（一）风险辨识的总体框架

风险辨识是安全管理的首要环节，其核心目标在于全面识别生产经营活动中可能导致事故发生的危险源及其特性。城镇自来水厂的风险辨识应遵循”横向到边、纵向到底”的原则，覆盖全部生产经营活动和区域场所[3]。参照《生产过程危险和有害因素分类与代码》（GB/T 13861—2022）的要求，辨识过程需综合考虑人的因素、物的因素、环境因素和管理因素四个维度，确保辨识结果的系统性和完整性。

在开展具体实施工作当中，水厂需要成立由主要负责人来牵头的风险管理组织，组织下面设立若干专业辨识小组，把工艺单元以及作业活动这两个路径当作同步推进风险辨识工作来使用。每个辨识小组应当由工艺技术人员以及安全管理人员、一线操作人员一起来组成，保证辨识结果拥有技术深度以及现场适用性。

（二）风险辨识维度划分

结合城镇自来水厂的生产运行特征，风险辨识可从以下五个维度展开：

1. 人员操作风险。水厂运行中涉及加药操作、设备巡检、化验分析、有限空间作业等多项操作活动。人员违章作业、操作不规范、安全意识薄弱是引发事故的主要诱因。辨识时应涵盖各岗位的常规作业和非常规作业，包括设备启停、药剂配制、采样化验、滤池冲洗等典型操作环节。

2. 设备设施风险。水厂核心设备包括取水泵、送水泵、投加设备、变配电系统、加氯加氨装置等。设备老化、密封失效、腐蚀泄漏、保护装置失灵均可能引发安全事故。姜晓琳[4]在上海凌桥水厂提标改造工程中，识别出高压配电改造、新老管道接驳等四类工程风险点，表明设备设施环节在改造期和运行期均存在较高风险。此外，压力容器、起重机械等特种设备的管理也需纳入辨识范围。

3. 工艺流程风险。水处理工艺涵盖混凝、沉淀、过滤、消毒等环节，各环节的工艺参数偏离均可能导致出水水质超标或设备故障[5]。基于 HACCP 体系对水厂投加系统进行了风险分析，识别出投矾系统的铝超标、浑浊度偏高、断药等4个关键控制点，以及加氯系统的微生物超标、余氯超标等3个关键控制点，表明工艺流程中投加系统是风险集中环节。

4. 危险化学品风险。自来水厂常用的危险化学品包括液氯、次氯酸钠、聚合氯化铝、氨等，其中液氯和液氨属于重点监管的危险化学品。相关研究针对水厂加氯加氨间建立了基于模糊数学的重大危险源安全评估与控制评价模型，评价结论表明加氯加氨间构成一级重大危险源，可能发生的事故类型为氯气、氨气泄漏引发人员中毒。因此，危险化学品的储存、使用和废弃处置全过程均须作为重点辨识对象[6]。

5. 作业环境风险。水厂厂区通常地势开阔，存在雷击风险；各类池体密集，存在淹溺风险；噪声、粉尘等职业危害因素亦不容忽视。辨识时应将厂区环境、作业场所的物理条件与气候气象因素纳入考量。

（三）风险辨识方法选择

在辨识方法的选择上，作业活动类危险源宜采用工作危害分析法（JHA），设备设施类危险源宜采用安全检查分析法（SCL），两者互为补充[7]。对于涉及危险化学品储存的区域，可辅以预先危险性分析法（PHA）进行辨识。辨识完成后，应编制风险辨识清单，记录评估单元、风险点、危险源及其可能引发的事故类型，形成后续风险分析与评价的基础数据。

二、风险评价与分级方法

（一）风险评价模型

风险评价是在风险辨识的基础上，对危险源导致事故的可能性与后果严重程度进行系统分析，以确定风险等级的过程。城镇自来水厂宜采用定性与半定量相结合的评价方法。参照相关地方标准，作业活动类危险源可采用作业条件危险性评价法（LEC法），设备设施类危险源可采用风险矩阵法2w。

LEC 法从事故发生的可能性（L）、人员暴露于危险环境的频繁程度（E）和事故后果严重程度（C）三个维度进行评价，风险值 D=L×E×C。该方法在水务领域已有较多应用。针对传统 LEC 法主观性较强的问题，引入专家可信度和 AHP- 熵值法进行改进，使评价结果更为客观，该方法对水厂风险评价具有借鉴意义。风险矩阵法则从事故发生可能性（L）和后果严重性（S）两个维度构建矩阵，风险值 R=L×S，适用于设备设施类风险的评价[8]。

在城镇供水管道安全风险评估中，采用层次分析法确定评估指标权重，结合风险矩阵法综合判定风险等级，将风险划分为四级[9]。该指标体系涵盖可能性指标和后果性指标两大类，并引入安全管理水平作为修正指标，其思路可为水厂风险评价体系的构建提供参考。

（二）风险等级划分

依据风险评价结果，城镇自来水厂的安全风险可划分为四个等级，并采用四色标识进行区分：

风险等级	颜色标识	风险值范围（LEC法）	管控要求
重大风险	红色	D>320	厂级管控，立即整改
较大风险	橙色	160<D ≤ 320	部门级管控，限期整改
一般风险	黄色	70<D ≤ 160	班组级管控，制定措施
低风险	蓝色	D ≤ 70	岗位级管控，日常监测

风险评价应分两个阶段进行：首先评价极端风险等级，即不考虑现有管控措施的风险水平；其次结合实际管控措施落实情况评价现实风险等级。两阶段评价的对比可有效评估现有管控措施的充分性，为后续管控策略优化提供依据。

三、风险分级管控策略

（一）分级管控责任体系

风险分级管控的核心在于根据风险等级匹配相应的管控层级和资源投入。重大风险由企业主要负责人组织管控，较大风险由

 Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

部门负责人组织管控，一般风险由班组负责人组织管控，低风险由岗位人员自主管控[10]。每一层级均须明确管控责任人、管控措施和管控周期，形成自上而下的责任链条。

（二）技术管控措施

技术管控措施是降低风险水平的直接手段，按优先级可划分为以下三类：

1. 工程控制措施。通过隔离危险源、改进设备设计、增设安全防护装置等手段，从源头削减风险。例如，对加氯加氨间设置有毒气体报警仪与通风联动装置；对投加系统进行 PID 改造，实现恒流自动冲洗防堵塞；建设独立消毒池以确保消毒 CT 值达标。

2. 管理控制措施。建立健全安全操作规程、作业许可制度、变更管理制度等管理性管控手段。对有限空间作业、动火作业、高处作业等危险作业实行分级审批制度，作业前须确认安全措施到位后方可实施。

3. 个体防护措施。为作业人员配备符合标准的劳动防护用品，包括防毒面具、安全帽、防坠落装置等，作为风险管控的最后一道防线。

（三）动态监测与持续改进

风险管控并非一次性工作，而应建立动态监测与持续改进机制。水厂应设定差异化的动态管控周期：重大风险每3个月重新评价一次，较大风险每6个月一次，一般风险每9个月一次。当发生工艺变更、设备更新、组织调整或事故后，应及时启动风险再辨识与再评价。

应将风险评估结果应用于企业供水规划和更新改造计划等管理决策，通过信息化手段提高风险管理效率。水厂可结合 SCADA 系统、智慧水务平台等现有信息化基础，将安全风险分级管控内容融入日常管理流程，实现风险数据的自动采集、实时预警和动态更新，提升风险管控的时效性和精准性。

四、实施保障建议

1. 组织与制度保障。供水企业应建立由主要负责人牵头的安全风险分级管控组织机构，制定覆盖全流程的管理制度，明确各层级、各岗位的职责边界和工作要求。制度体系应涵盖风险辨识、风险评价、风险管控、隐患排查、文件管理和持续改进等环节，形成闭环管理机制。

2. 教育培训保障。分层次、分阶段组织员工开展风险辨识方法和风险管控措施的教育培训，使一线人员掌握危险源辨识的基本技能，提升全员风险意识和防范能力。培训方式可与常规安全教育培训相结合，可聘请专业机构开展，亦可由企业内部专业人员组织实施。

3. 信息化建设保障。将安全风险分级管控体系与现有智慧水务平台、SCADA 系统、OA 办公系统等信息化系统深度融合，建立风险基础信息库、过程管理流程和动态监测模块。通过信息化手段实现风险数据的条件查询、自动预警和统计分析，减少重复性工作，提升管控效率。

五、结束语

本文围绕城镇自来水厂运行安全风险辨识与分级管控策略展开研究，得出以下主要结论：

1. 城镇自来水厂运行安全风险可从人员操作、设备设施、工艺流程、危险化学品和作业环境五个维度进行系统辨识，采用 JHA 法与 SCL 法相结合的方式可实现对作业活动和设备设施的全覆盖辨识。

2. 风险评价宜采用 LEC 法与风险矩阵法相结合的半定量评价模型，通过极端风险与现实风险两阶段评价，可有效评估现有管控措施的充分性，并将风险划分为重大、较大、一般和低风险四个等级。

3. 分级管控策略应以责任体系为骨架、技术措施为支撑、动态监测为驱动，形成”辨识—评价—管控—改进”的闭环管理路径，并辅以组织制度、教育培训和信息化建设三重保障，推动安全风险管控由被动响应向主动预防转型。

本文所提策略体系可为城镇供水企业开展安全风险分级管控工作提供方法参考，后续研究可结合具体水厂的实证数据进一步验证和优化评价模型与管控策略的适用性。

参考文献

[1] 肖彬彬，郭文路 .2020—2024 年供水系统安全事故统计分析与探讨 [J]. 城镇供水 ,2026(1):47-52.

[2] 梁耀枢，刁俊峰，梁红亮 . 南方某城市供水系统建立双重预防控制机制的经验分享 [J]. 城镇供水 ,2024(6):73-76.

[3] 周雅珍，蔡云龙，刘茵，等 . 城市供水系统风险评估与安全管理研究 [J]. 给水排水 ,2013,49(12):132-136.

[4] 姜晓琳 . 上海凌桥水厂不停产提标改造的运行安全控制 [J]. 中国给水排水 ,2024,40(10):91-95.

[5] 徐锦涛，张葆华 . 基于 HACCP 体系的水厂投加系统的风险管理 [J]. 净水技术 ,2022,41(11):179-184.

[6] 水厂加氯加氨间重大危险源安全评估与控制评价模型研究 [J]. 城镇供水 ,2016(6):49-53.

[7] 深圳市市场监督管理局 . 自来水厂安全风险分级管控工作指南 :DB4403/T 267—2022[S]. 深圳：深圳市市场监督管理局 ,2022.

[8] 邵勇，陶飞飞，皮妍玲，等 . 基于改进 LEC 法的水利工程安全风险分级评价 [J]. 江苏水利 ,2023(6):60-65.

[9] 李兰娟，孟珊 . 基于层次分析法和风险矩阵法的城镇供水管道安全风险评估 [J]. 净水技术 ,2025,44(3):52-59.

[10] 吴疆，喻博，张思远，等 . 基于 PDCA 和 AHP 的水务企业安全生产标准化评价 [J]. 科技通报 ,2024,40(9):116-122.

Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

锅炉燃烧优化与低氮排放协同控制策略研究

史童星
国家电投集团东北电力有限公司本溪热电分公司，辽宁 本溪 117000
DOI:10.61369/ERA.2026100010

摘　　要： 燃煤锅炉目前是发电及工业供热中常用的技术，其燃烧效率与氮氧化物超低排放之间长期有耦合性的制约关系，单靠炉内低氮改造或末端脱硝手段不能很好满足运行经济与环保的双重要求。文中将锅炉燃烧所涉氮氧化物划为三类生成形式，分别考察分级配风、燃料再燃及烟气再循环对炉内低氮的贡献，分析炉内燃烧本身同 SCR、SNCR 类末端脱硝装置的配合困难，进而提出从源头到终端、按流程分段控制的协同管理（即全流程）思路。
关 键 词： 燃煤锅炉；燃烧优化；低氮排放；协同控制；分级燃烧；SCR 脱硝

Research on Collaborative Control Strategy for Boiler Combustion Optimization and Low Nitrogen Emission

Shi Tongxing
Benxi Thermal Power Branch, State Power Investment Corporation Northeast Electric Power Co., Ltd., Benxi, Liaoning 117000

Abstract: Coal-fired boilers are widely applied in power generation and industrial heating sectors. There has long existed a mutually restrictive coupling relationship between improving combustion efficiency and achieving ultra-low nitrogen oxide emissions. A single in-furnace low-nitrogen retrofit or terminal denitrification adjustment cannot balance unit operational economy and environmental compliance requirements. This paper sorts out three formation pathways of nitrogen oxides during boiler combustion, analyzes the functional boundaries of in-furnace low-nitrogen technologies such as staged air distribution, fuel reburning and flue gas recirculation, explores the coordination conflicts between the in-furnace combustion system and terminal denitrification facilities including SCR and SNCR, and establishes a full-process collaborative control framework featuring source suppression, process regulation and terminal matching.
Keywords: coal-fired boiler; combustion optimization; low nitrogen emission; collaborative control; staged combustion; SCR denitrification

引言

就目前国内能源结构转型的情形而论，燃煤机组在较长时间里要满足电网基本负荷及深度调峰需要，锅炉运行的工况变化多而急，低负荷稳燃、燃烧效率与 NO_x 超低排放的矛盾正趋于明显。按一般思路调整运行时，若想把 NO_x 的原始排放压低，操作上多是减少主燃区供氧、使燃尽风所占比例变大（即炉内还原气氛增多），但此类调节本身有风险：煤粉燃尽度不足、飞灰含碳高、锅炉热效率差、煤耗因而上升。若一味强求燃烧完全又会令主燃区含氧量及火焰温度偏高，燃料型及热力型 NO_x 形成加快，脱硝设备负担加重，喷氨量上升造成费用增长，同时有氨逃逸、硫酸氢铵沉积或空预器损坏之虞。

一、锅炉 NO_x 生成机理与协同控制约束关系

锅炉燃烧所产生氮氧化物以 NO 为主，NO_2 的相对含量较少，其生成途径是热力型、燃料型及快速型三种，不同类型 NO_x 在主导条件上大体有别，相应地炉内调控方法有其适用范围。热力型 NO_x 是空气中的氮气于高温富氧状态中被氧化得到的产物，反应速度随温度按指数规律上升，若局部温度高于1500℃便出现大量生成，停留时间、氧浓度对结果都有明显影响。燃料型 NO_x 从煤炭所含氮有机物的热分解开始形成，在煤粉系统中占总 NO_x 约60%~80%，应作为控制重点，挥发性组分的气氛状况影响转化过程，还原性气氛有利于含氮中间物变作氮气，因而能减少 NO 生成。快速型 NO_x 由碳氢类自由基同氮气结合而成，正常煤粉燃烧情形下所占比例很小，工程设计中通常不把它当作优先项[1]。

燃烧优化同低氮排放是典型的多目标耦合问题。采用分级燃烧使主燃区呈欠氧状态有利于减少 NO_x 的形成，但欠氧太强会导致煤粉燃尽延后，若此时所用的燃尽风或其布置不当，炉膛出口

 Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

就可能出现未燃完组分过多的情况，热效率因而受损。对低氮改造作配合的贴壁风、多孔壁风能减缓还原性水冷壁的高温腐蚀，但贴壁风比例太大可能打乱总体配风设计，分级效果被削弱。烟气再循环办法可把炉内最高温区压低，抑制由热力产生之 NO_x，不过炉温全局性地变弱对低负荷运行不利，稳燃条件更易破坏，灭火风险增大。

炉中原始 NO_x 的浓度对后端 SCR 入口负荷是直接制约，二者有上下游联系。炉内 NO_x 若减少，SCR 所要喷入的氨就少些，氨逃逸概率也较低；但炉内处理过分又会损害效率，此时应把煤价、还原剂价格及维护费一并考虑，以确定整体最优状态。协同控制的重点不是一味压低 NO_x，而是按排放标准来安排锅炉效率、脱硝用资和腐蚀可能性，使所涉各项指标不超出合理界限，达到多方面协调、平衡的目的。

二、炉内低氮燃烧优化核心技术路径

（一）空气分级燃烧优化

空气分级是现在最常采用的炉内低氮技术，其基本思路是按主燃区、燃尽风来划分总风量，主燃区以欠氧状态燃烧，所用还原气氛可限制燃料氮转化为氧化物，燃尽风从炉膛上方进入，促使余热中可燃物全部燃尽。实际工程要同时做燃烧器改造及燃尽风系统设计。低氮旋流燃烧器利用中心回流构造使燃料、一次风较早结合，火焰温度不出现极端高峰，又让二次风有适当分布，不会造成某处高温富氧的现象。燃尽风可以是分离式或紧凑式，两种方式对炉温及停留时间的影响有别，适用锅炉形式亦非一律。

运行层面的关键参数包括总过量空气系数、主燃区过量空气系数、燃尽风占总风量比例、燃尽风喷口摆角与挡板开度。[2] 总氧量不能一味降低，过低会造成 CO 大量生成与飞灰含碳量上升；主燃区过量空气系数通常控制在0.7~0.85 区间，配合合理的燃尽风送入高度，保证煤粉在还原区停留足够时间。在机组变负荷运行时，燃尽风挡板不能采用固定开度，高负荷下可提高燃尽风比例强化低氮效果，低负荷下适度降低，优先保障稳燃与燃尽效果。同时配套贴壁风调整，在水冷壁近壁区域维持适度氧化性气氛，缓解 H_2S 引发的高温腐蚀，避免分级燃烧带来的设备副作用。

（二）燃料分级再燃技术

燃料分级也即再燃技术，以炉膛高度为标准分作主燃区、再燃区及燃尽区。主燃区应供给主要燃料，按近于当量比状态燃烧而产生 NO_x；再燃区采用小量低氮再燃燃料，在缺氧又还原的气氛下形成 CH、NH 类自由基，把所遇的 NO 复原成氮气；之后利用燃尽风促使残余物氧化。就再燃燃料本身来说，可用天然气、生物质气或超细煤粉，低氮品种对减排更有利 [3]。

所涉技术可以将 NO_x 初始排放作较大幅度削减，但对系统本身改动较多（需加装输送再燃燃料的管道及喷口），宜用于新机组或大修时的同步改造。运行中要处理好再燃燃料比例以及再燃区的气氛状态，燃料太少不能获得足够还原效果，太多又会增大未燃损失的可能性。再燃法多配合空气分级一起采用，可使低氮调控更灵活，对煤种固定、负荷不剧烈的大容量锅炉很有适用价值。

（三）烟气再循环与煤粉制备系统优化

烟气再循环抽取低温尾部烟气送入炉膛，降低整体氧浓度与火焰峰值温度，抑制热力型 NO_x，多用于燃气锅炉与液态排渣锅炉，在煤粉锅炉中常作为辅助调控手段。再循环率需要匹配锅炉负荷，过高会降低炉膛温度，影响着火稳燃，还会增加引风机电耗。

煤粉制备系统优化属于源头辅助调控，煤粉细度直接影响着火速度与燃尽特性。煤粉过粗，着火推迟，燃尽变差；煤粉过细，制粉电耗上升，着火提前造成燃烧器区域温度偏高，加剧 NO_x 生成。需要根据煤种挥发分调整分离器挡板，控制经济细度。同时优化磨煤机投运组合，保证各层燃烧器热负荷分配均匀，避免局部热负荷集中形成高温区，实现炉膛温度场均匀化，减少局部 NO_x 峰值。

三、炉内燃烧与末端脱硝协同运行策略

（一）SCR/SNCR 系统与燃烧调整匹配

SCR 是主流末端脱硝工艺，核心是在催化剂窗口温度区间喷入氨气，将 NO_x 还原为氮气与水。SCR 运行性能与锅炉燃烧调整高度耦合，燃烧调整改变炉膛出口烟温、NO_x 浓度分布、烟气流量，直接影响催化剂反应效率与喷氨控制效果。锅炉燃烧偏斜会造成 SCR 入口烟道 NO_x 分布不均，单一测点反馈无法反映截面真实浓度，传统整体喷氨容易出现局部过喷或欠喷，过喷带来氨逃逸，与三氧化硫结合生成硫酸氢铵，粘附空预器换热面造成堵塞腐蚀。

协同优化的基础是实现分区精准喷氨，在烟道增设多点取样测量装置，搭建分区喷氨格栅，根据各区域 NO_x 浓度动态分配喷氨量。同时建立炉内原始 NO_x 与 SCR 入口浓度的关联模型，将燃烧调整参数作为前馈信号，提前修正喷氨设定值，避免滞后控制造成排放波动。SNCR 依靠高温区喷入还原剂实现脱硝，反应温度窗口狭窄，对炉膛温度场敏感，燃烧调整改变火焰中心位置会直接影响 SNCR 反应效率，因此采用 SNCR 的锅炉，必须将火焰中心控制、炉膛温度分布纳入协同调整范围 [4]。

（二）全工况参数协同整定方法

锅炉不同负荷区间的约束条件差异明显，高负荷下炉膛温度充足，稳燃余量大，可优先采用深度分级配风降低原始 NO_x；中低负荷时炉膛温度水平下降，稳燃与燃尽成为首要约束，低氮调整幅度需要收敛，防止飞灰含碳量陡增。多煤种掺烧工况下，入炉煤挥发分、氮含量、热值波动会同步改变 NO_x 生成特性，配煤方案需要与分级配风参数联动调整，高氮煤种应适度提高燃尽风比例，降低主燃区热负荷密度。

协同整定所用的流程应划为静态试验及动态修正两部分。先对锅炉的热力性能作初步摸底试验（按典型负荷考虑），把过量空气系数、燃尽风配比、燃烧器角度及煤粉细度按正交方式调

Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

节，记录 NO_x 的排放、热效率、飞灰含碳量、SCR 入口烟温、氨逃逸诸项数据，确定多变量响应规律，找到各条件对应的最佳参数，列出基本运行卡。由此出发，以机组 DCS 为平台补充前馈内容，利用负荷命令、煤质信息、磨煤机实际状态来完善控制回路，使切换工况时参数能自动适应，避免由人工延迟导致的效率低或排放超限现象。

（三）智能协同控制体系构建

传统锅炉控制多采用单回路 PID，各子系统独立调节，燃烧、制粉、脱硝之间缺少联动，难以应对非线性、大滞后的燃烧过程。机器学习与多目标优化算法为协同控制提供新路径，利用机组历史运行数据筛选关键特征变量，构建 NO_x 排放与锅炉效率预测模型，以 NO_x 达标、热效率最优、脱硝运行成本最低作为优化目标，求解最优控制参数组合。

所称的智能协同控制是数据采集、模型预测、优化决策及执行控制四者结合的框架。数据层以炉膛温度、分层风量、煤量、含氧量、烟气组分、SCR 出口或入口浓度为对象来获取实时信息；模型部分负责 NO_x 软测量以及燃烧状态分析；决策上按约束要求做参数设计，给出配风、喷氨类控制值；执行端把指令发到挡板、给煤装置及喷氨调节阀作相应调整。对模型本身不断输入新运行资料予以更新，使煤质变差或调峰较深时仍能应对良好。智能系统不取代运行人员，只作优化建议，不夺人工控制权，锅炉安全由此得到保证。

四、结论与展望

对锅炉燃烧做优化、对低氮排放作协同控制，其重点即为避免炉内燃烧调节和末端脱硝各自孤立地运行，按 NO_x 形成机制来设计源头分级低氮、全过程参数配合、末端精确脱硝的整体调控方案。所用炉内方法（空气分级、燃料再燃或烟气再循环）可使 NO_x 在源头减少，脱硝装置负担随之下降，不过各类调整都有适用边界，若处理不当便可能造成燃烧不稳、高温腐蚀、稳燃困难一类的问题。炉中原始 NO_x 的分布要趋于均匀、SCR 要分段喷氨、多变量与前馈控制要结合，才利于协同控制的实现。

参考文献

[1] 王晶，廖昌建，王海波，等 . 锅炉低氮燃烧技术研究进展 [J]. 洁净煤技术 ,2022,28(02):91-104.

[2] 张浩杰，余其乐，游春发，等 . 基于 MOEA/D 和 NSGA-II 算法的燃煤锅炉多目标燃烧优化 [J]. 广西电力 ,2026,49(01):25-32.

[3] 丁旭，付康康，康博士，等 .1000MW 塔式炉燃烧系统建模及低氮高效燃烧策略研究 [J]. 综合智慧能源 ,2024,46(12):34-41.

[4] 吴云龙 . 大型电站锅炉燃烧优化与 NOx 减排协同控制技术研究 [J]. 电站系统工程 ,2025,41(05):45-48.

 | Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

探究高层建筑施工质量管理控制措施

郭天佑
珠海华章工程管理咨询有限公司，广东 珠海 519000
DOI:10.61369/ERA.2026100014

摘　　要： 高层建筑施工具有结构复杂、作业面狭窄、工序交叉密集及周期长等显著特征，质量管控面临地质勘察失准、材料把关不严、测量精度偏差及环境应对不足等现实问题。全过程质量控制需贯穿准备、施工与验收各阶段，强化材料设备管控、精细技术操作与动态纠偏机制。同时，应提升管理团队专业素养，完善作业人员培训激励，优化环境适应性管理，构建多方协同的质量保障体系，确保工程实体质量稳定可控。

关 键 词： 高层建筑；施工质量；管理控制；质量控制措施

Exploration on Construction Quality Management and Control Measures of High-Rise Buildings

Guo Tianyou
Zhuhai Huazhang Engineering Management Consulting Co., Ltd., Zhuhai, Guangdong 519000

Abstract: The construction of high-rise buildings has prominent characteristics such as complex structures, narrow working surfaces, dense cross-working procedures and long construction cycles. Quality management and control is confronted with practical problems including inaccurate geological investigation, lax material inspection, measurement precision deviation and insufficient response to environmental conditions. Whole-process quality control should run through all stages of preparation, construction and acceptance, so as to strengthen the management of materials and equipment, refine technical operations and improve the dynamic correction mechanism. Meanwhile, it is necessary to improve the professional competence of the management team, perfect the training and incentive for construction workers, optimize environment-adaptable management, and establish a multi-party collaborative quality assurance system to ensure stable and controllable physical engineering quality.

Keywords: high-rise building; construction quality; management control; quality control measures

引言

高层建筑不断突破高度极限，施工体量与技术复杂度同步攀升，质量管控面临严峻挑战。结构体系高耸、作业空间受限、工序交叉密集，施工过程兼具技术集成性与环境敏感性。地质条件的不确定性、材料性能的波动性以及人为操作的累积偏差，均可能引发系统性质量风险。有效的质量管理依赖事前预控、过程严管与事后纠偏的有机协同，更需规范主体行为、优化管理环境。系统梳理关键控制措施，对提升施工质量水平具有重要的现实意义。

一、高层建筑施工质量管理的特征与现实难点

高层建筑和普通多层建筑存在明显区别，施工阶段具备独特的技术特点，同时伴随各类管理难题。充分掌握这类建筑的自身特点，是制定可行质量管控方案的前提，方便管理人员在繁杂的施工条件下，准确锁定重点管控环节。

（一）结构体系复杂且施工荷载要求严苛

高层建筑依靠竖向结构体系传递重力与水平荷载，其受力状态复杂，对地基承载力和结构整体刚度要求极高。基础埋置深度通常较大，需进行深基坑作业，由此带来支护结构安全、地下水位控制及邻近管线保护等一系列技术难题。上部结构施工时，材料、设备及人员的垂直运输量大，高空作业频繁，模板支撑体系与脚手架工程的安全性直接关联施工质量。结构设计中对混凝土强度等级、钢筋配筋率及节点构造均有严格规定，施工中任何偏离设计意图的操作，都可能改变结构受力路径，降低建筑抗震性能与抗风稳定性。

（二）施工作业面狭窄且工序交叉密集

高层建筑单层面积相对有限，随着楼层升高，施工场地愈加局促。多工种、多工序需要在有限的作业空间内穿插进行，例如主体结构施工与机电预埋、幕墙龙骨安装往往需要协同推进。这

Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

种高度密集的工序交叉，对施工组织设计的科学性提出了较高要求。若工序衔接不当，极易造成已完工程的损坏或污染，形成质量隐患。此外，作业面狭窄也限制了大型机械设备的移动与操作，增加了施工难度，要求现场调度具备较高的灵活性与预见性[1]。

（三）施工周期跨度长且受环境因素干扰显著

高层建筑从基坑开挖到主体封顶，再到装饰装修与设备调试，通常需要跨越多个季节。气温变化、降雨、大风等自然条件直接影响混凝土养护质量、防水层施工效果及高空作业安全。特别是在混凝土浇筑过程中，环境温度与湿度的波动会对水化热释放及收缩性能产生显著影响，若防护不当易导致结构裂缝。长周期施工还面临材料老化、设备磨损等问题，对持续性的质量监控提出了持续性要求，管理团队需具备应对复杂气象条件与季节性施工难题的统筹能力。

二、高层建筑施工质量管理中的常见问题剖析

高层建筑现场施工阶段产生的质量缺陷，大多是多种因素共同作用形成。结合工程实际情况，相关问题主要出现在勘察设计、材料管理、现场施工以及环境处置几个层面。精准梳理各类薄弱环节，是落实质量管控措施的基础条件。

（一）地质勘察失准与设计深度不足

高层建筑对地基的依赖性极强，地质勘察数据的准确性直接决定基础设计与施工方案的可靠性。部分项目在勘察环节布孔数量不足或钻进深度不够，未能清晰揭示地下软土层、溶洞或暗河等不良地质构造，导致基础持力层选择失误。设计阶段若未能充分结合勘察成果进行精细化的沉降计算与抗震验算，或在构造措施上考虑不周，则会给后续施工埋下结构性隐患。图纸审查不严、设计交底不清，也常导致施工方对关键节点的理解产生偏差，从而影响实体质量。

（二）原材料质量控制防线薄弱

建筑材料是构成工程实体的物质基础。高层建筑施工所用的商品混凝土、钢筋、预应力筋及各类管材数量巨大。实际管理中，部分项目存在材料进场验收流于形式的问题，对供应商资质审查不严，未能有效杜绝不合格材料进入现场。混凝土搅拌站若使用含泥量超标的砂石或过期变质的掺合料，将严重降低结构强度与耐久性。钢筋的保管不当易引发锈蚀，削弱其与混凝土的粘结力。此外，施工中为图方便随意替换材料或降低材料等级的现象，也直接削弱了结构的安全储备。

（三）施工测量精度控制存在偏差

高层建筑施工中，轴线投测与标高传递的精度是保证建筑几何尺寸与垂直度的关键。随着楼层升高，风向、日照温差及施工荷载变化均会对测量基准点产生扰动。若未采用合理的消差技术或复核频次不足，累积误差将导致建筑物偏位，影响电梯井道垂直度、幕墙安装及室内分隔墙的准确定位。特别是在爬升模板或滑模施工中，若对垂直度监控不及时，将造成难以纠正的结构歪斜，不仅影响美观，更可能改变结构受力状态，降低整体稳定性[2]。

（四）施工环境应对与技术交底执行缺位

高层建筑的露天作业特性使其质量极易受气象条件制约。在大风、暴雨或低温环境下，若未及时调整施工工序或采取有效的防护措施，混凝土表面易出现起砂、裂缝，防水层粘贴质量难以保证。同时，技术交底工作若停留在书面形式，未能深入到一线操作班组，则关键工序的工艺要求与质量标准无法有效传达。操作人员凭借经验施工，对新型材料特性或复杂节点构造缺乏认知，极易导致施工工艺偏差，形成质量通病。

三、全过程施工质量管理控制的关键策略

结合高层建筑施工特征与多发问题，质量管控应当覆盖项目建设整个周期。落实事前防范、过程监管、完工验收各阶段要求，搭建多层次、全方位的管理闭环，是保障工程施工质量满足标准、实现提质的可行方式。

（一）施工准备阶段的质量预控机制

施工准备开展是否到位，直接影响后续施工的推进效率。地质勘察阶段，勘察单位需依照规范布置勘探点位，摸清地层构造、岩土性质与地下水分布情况。针对复杂关键区域出具专项勘察资料，为基础设计、支护方案确定提供可靠参考。设计阶段开展多种方案对比筛选，保障结构形式稳妥、受力传递路线简洁，同时充分论证方案现场施工的可行程度。图纸会审组织建设、设计、监理、施工各方协同开展，着重核对节点构造实施条件与尺寸标注精度，在开工前及时规避各类设计隐患。完成以上工作后，编制贴合项目实际的施工组织设计与专项方案，划定关键区域质量管控要点，为现场施工提供清晰执行依据。

（二）材料与设备全流程管控体系

建立严格的材料采购、检验与保管制度，是筑牢质量防线的物质保障。采购环节需对供应商的生产资质、质量保证体系及业绩进行综合评估，优选信誉可靠的供货方。材料进场时，严格执行联合验收程序，核对出厂合格证、质量检验报告，并按规定取样复验，复验合格后方可用于工程。对于混凝土，应加强对搅拌站原材料的延伸管理，监控其含水率及配合比执行情况。现场材料应分类码放，钢筋采取上盖下垫防锈措施，水泥库房保证防潮。施工设备方面，塔吊、施工电梯等大型设备需定期检测维护，计量器具如全站仪、水准仪应按时校准，确保测量数据精准可靠，为质量控制提供稳定的硬件支撑[3]。

（三）施工过程精细化技术控制要点

过程控制是将设计图纸转化为实体质量的核心环节。在测量放线方面，采用内控法与外控法相结合的投测方案，设置可靠的轴线传递孔和标高基准点，每施工若干层进行一次全面校核，及时纠偏。对于混凝土工程，需优化配合比设计，合理掺用粉煤灰及减水剂以降低水化热，浇筑过程中分层振捣密实，防止离析与过振，浇筑完成后及时覆盖保湿养护，有效控制温度裂缝。钢筋工程要严控下料长度、弯折角度及保护层厚度，采用专用垫块保证位置准确。针对高层建筑特有的幕墙安装、管道井封堵等环

 Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

节，制定专项质量控制措施，明确检查验收标准，确保各分项工程质量均处于受控状态。

（四）完善质量验收与动态纠偏机制

质量验收是检验施工成果、发现质量问题的重要关口。应严格执行工序交接检验制度，上一道工序未经验收合格，不得转入下一道工序施工。对于隐蔽工程，如钢筋绑扎、管线预埋、防水层铺设，必须进行隐蔽验收，留存影像资料，确保可追溯。采用动态管理方法，运用数理统计工具对检测数据进行整理分析，判断质量波动趋势，提前识别潜在风险。一旦发现质量偏差，立即启动纠偏程序，组织技术人员分析原因，制定整改方案并监督落实。同时，通过定期召开质量分析会议，总结阶段性质量状况，持续优化后续施工工艺，实现质量的螺旋式提升[4]。

四、施工主体行为规范与管理环境优化

各类管理制度与技术举措能否落实，最终依靠人员实施。高层建筑施工牵涉多个责任参与方，约束各参建主体行为、提高管理人员专业能力、打造稳定有序的施工环境，是达成质量管理目标的内在条件与重要保障。

（一）管理团队专业素养与责任意识强化

施工单位应组建以项目经理为核心、涵盖技术负责人、施工员、质检员、安全员的质量管理团队。团队成员需具备丰富的超高层或复杂结构施工经验，熟悉现行规范标准。通过系统化的岗前培训与继续教育，使管理人员及时掌握新技术、新工艺的质量控制要点。强化责任意识教育，明确各岗位的质量职责与权限，建立质量责任追溯制度。通过目标责任书的形式，将质量目标层层分解，落实到每个管理岗位与作业班组，形成全员关注质量的良好氛围。只有管理团队具备扎实的专业功底与强烈的担当精神，才能确保各项质量控制措施在基层得到有效执行。

（二）作业人员技能培训与激励机制构建

一线作业人员的操作水平直接决定工程实体品质。针对高层建筑中大量使用的农民工群体，需定期开展实操技能培训与质量意识教育，重点讲解关键工序的操作规程、质量通病的表现形式及防治方法。鼓励作业人员在施工中采用合理化建议，对提高工效与保证质量的创新做法给予奖励。建立公平合理的绩效考核体系，将质量指标与劳动报酬挂钩，对质量优良的班组给予物质与荣誉奖励，对频繁出现质量问题的作业人员实行再培训或调岗处理。通过正向激励与反向约束相结合，调动作业人员自我改进、自我提升的主动性，从根本上减少人为失误。

（三）施工环境适应性管理与现场秩序维护

良好的作业环境是稳定施工质量的重要外部条件。针对气象变化，建立有效的预警响应机制，高温时段调整混凝土浇筑时间并加强养护，雨季准备充足的防雨布，大风天气暂停高空吊装作业。现场实行封闭式管理，科学规划材料堆放区、加工区与运输通道，保持道路通畅，减少二次搬运对材料的损伤。加强文明施工管理，做到活完料净脚下清，创造整洁有序的作业面。同时，注重安全防护设施的投入，规范临边洞口防护，确保作业人员在安全可靠的环境中施工，以安全促质量，以环境保品质[5]。

施工各方之间的信息传递同样影响质量效果。设计变更需及时送达现场。监理指令应清晰明确。施工单位内部不同班组之间应加强交流。沟通不畅容易造成理解偏差。信息滞后可能延误最佳处置时机。建立定期协调会议制度。利用工作群组实时共享质量动态。确保各方对标准与要求形成统一认识。现场问题应第一时间反馈。责任主体需限时回应并处理。书面记录保存完整，便于事后查阅。通过畅通的沟通渠道，减少因信息不对称引发的质量纠纷。同时，注重与设计单位的后续对接。对施工中发现的构造细节疑问，主动联系设计人员确认。这种双向互动有助于完善现场技术决策。质量管理的成效不仅依赖硬性控制，也依靠软性的沟通协作。将信息管理纳入日常质量工作范畴，能够提升整体管控效率，降低隐性风险。

五、结束语

高层建筑施工质量管理是一项系统性工程，贯穿勘察、设计、施工至验收的全过程。其核心在于将技术控制、制度规范与人的因素有机结合，形成事前预防、过程严管、事后纠偏的闭环管理体系。面对不断攀升的建筑高度与日益复杂的施工环境，唯有持续强化材料设备管控、提升人员专业素养、完善动态纠偏机制，方能有效应对质量风险。通过系统化管理与精细化操作，施工质量水平得以稳步提升，为高层建筑的长期安全运行奠定坚实基础。

参考文献

[1] 李昂 . 高层建筑施工管理的质量通病及控制措施 [J]. 建筑与装饰 ,2024(23):49-51.

[2] 焦泽波 . 高层建筑施工管理的质量通病及控制措施 [J]. 大众标准化 ,2023(16):19-21.

[3] 陈勇 . 高层建筑施工质量管理控制措施探析 [J]. 砖瓦世界 ,2023(4):103-105.

[4] 王永刚 , 方超 . 高层建筑施工质量控制措施分析 [J]. 建筑与装饰 ,2025(11):166-168.

[5] 杨晓娟 . 高层建筑工程施工质量控制要点与管理措施浅析 [J]. 工程技术发展 ,2023,4(3):28-30.

Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

高炉炼铁日常生产操作优化及降本增效实践探讨

郑志辉，张晋晋
宁波钢铁有限公司，浙江 宁波 315800
DOI:10.61369/ERA.2026100018

摘　　要： 高炉炼铁作为钢铁制造的核心环节，其操作优化与成本控制直接关乎企业效益。本文围绕日常生产实践，系统探讨了原燃料质量与炉料结构、送风与热制度、上部装料与煤气利用、出铁管理及标准化作业五个维度的协同优化策略。通过精料管控、烧结矿与球团矿合理搭配、炉料筛分等措施夯实炉况基础；依托风量调节、富氧喷煤及炉温碱度稳定实现热力学与动力学匹配；运用布料矩阵调整、批重优化等手段提升煤气利用率；强化出铁均匀性与炉缸活跃度，保障炉前顺畅；最终以标准化操作、预警机制及绩效考核推动降本增效落地。旨在为高炉长期稳定、低耗运行提供系统性实践参考。

关 键 词： 高炉炼铁；操作优化；炉料结构；煤气利用；炉前管理；降本增效

Discussion on Daily Production Operation Optimization and Cost-Reduction & Efficiency-Improvement Practice of Blast Furnace Ironmaking

Zheng Zhihui, Zhang Jinjin
Ningbo Iron & Steel Co., Ltd., Ningbo, Zhejiang 315800

Abstract: As the core link of steel manufacturing, blast furnace ironmaking's operation optimization and cost control are directly related to enterprise benefits. Focusing on daily production practice, this paper systematically discusses the collaborative optimization strategies from five dimensions: raw material and fuel quality and burden structure, air blasting and thermal regime, upper charging and gas utilization, tapping management, and standardized operation. Measures such as high-quality raw material control, reasonable matching of sinter and pellet, and burden screening are adopted to consolidate the foundation of furnace condition. Air volume adjustment, oxygen enrichment and coal injection, as well as stable furnace temperature and basicity are utilized to realize the matching of thermodynamics and kinetics. Adjustment of burden distribution matrix and batch weight optimization are applied to improve gas utilization efficiency. The uniformity of tapping and hearth activity are strengthened to guarantee smooth cast-house operation. Finally, standardized operation, early-warning mechanism and performance appraisal are implemented to achieve cost reduction and efficiency improvement. It aims to provide systematic practical reference for long-term stable and low-consumption operation of blast furnaces.

Keywords: blast furnace ironmaking; operation optimization; burden structure; gas utilization; cast-house management; cost-reduction and efficiency-improvement

引言

高炉炼铁能耗占钢铁联合企业总能耗的60%以上，燃料成本约占生铁制造成本的70%，在行业微利甚至亏损常态下，任何操作细节的疏漏都可能侵蚀利润空间。当前原燃料市场品质波动频繁，环保限产与低碳冶炼要求日益严格，高炉操作者既要应对来料不稳定带来的炉况扰动，又需兼顾产量、质量与消耗的多重考核目标。日常操作中，参数调整往往偏重局部而忽略系统联动，导致煤气利用率偏低、燃料比居高不下[1]。本文立足一线生产实际，从原燃料处理、送风制度、装料控制、出铁管理及标准化操作五个层面，探讨可落地的协同优化方法，力求为高炉长周期经济冶炼提供实践参考。

作者简介：郑志辉（1994.11—），男，汉族，浙江省衢州市，本科，工程师，从事的研究方向：高炉炼铁。

 Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

一、原燃料质量与炉料结构优化

（一）精料入炉与焦炭质量管控

原燃料品质是高炉稳定顺行的第一要务，焦炭是料柱的骨架、主要热源，冷热强度尤其重要。日常必须对焦炭的抗碎强度M40、耐磨强度M10以及反应后强度CSR做检测工作，保证焦炭在高炉下部高温区有良好的支撑性和气化活性。进厂焦炭按来源分堆存放，定期做粒度筛分分析，防止超标的粉末进入炉内。另外还要设立焦炭质量预警台账，当灰分或者硫负荷出现波动的时候，马上调节喷煤量和碱度来维持炉缸热状态的稳定。加强焦炭烘干或者整粒处理，降低入炉水分及细粒混入，有利于改善料柱透气情况，给强化冶炼打下基础。

（二）烧结矿与球团矿合理搭配

烧结矿和球团矿的比例直接影响到炉渣的性质以及软熔带的位置，要依照高炉冶炼强度和原矿状况来不断加以调节。高碱度烧结矿可以提供大量的CaO，有利于脱硫并且能够使渣的碱度保持稳定，但是过多会使得低温还原粉化率上升；酸性球团矿品位高、强度好，但是单独使用会造成渣系粘度过低。通过实践证明，把烧结矿比例控制在70%–75%，球团矿比例控制在20%–25%，加入少量块矿，可以获得较好的软熔区间。按照炉温的变化以及渣样的分析结果来调节两者的比例，同时配合镁质球团或者白云石的加入来提高炉渣的流动性以及脱硫的能力，从而达到透气性和冶金性能的平衡。

（三）炉料筛分与入炉粉末控制

入炉粉末含量属于影响料柱压差以及煤气分布的重要干扰因素，过多的<5mm粒级会造成气流通道被堵塞，从而加重风口的损坏情况。加强槽下筛分管理，定时对振动筛网孔径、振幅进行检测，使筛分效率大于85%，并且要随时观察筛下物粒度分布情况。对返矿、除尘灰等进行定期回收处理，防止造成二次污染。遇到下雨天或者原料含水量增大时，应该降低给料速度或者加大筛面清理次数，以免出现糊筛造成粉末穿仓的情况发生。创建粉末日统计表，当入炉粉末超过规定量的时候，立刻查找皮带转运和卸料落点处是否有问题，从而减少摔破、破碎的现象发生，保证高炉吃到的是“精料”。

二、送风制度与热制度匹配

（一）风量风压与透气性调节

送风参数是高炉下部能量输入的直接反映，风量大小要同目前料柱透气性指数相适应。日常操作中把风压稳定当作基础，依照压差改变的趋势慢慢调节风口面积或者开度，防止风量突然改变造成悬料或者崩料。当压差增大时，先从炉料粒度、软熔带形状入手，适当降低风压或者减小风量，等压差下降后再逐渐增加风量。用透气性指数K值每天评价，如果K值连续较高，则考虑疏松边缘或者中心加焦来改善气流分布[2]。注意热风炉拱顶温度和废气温度，使风温保持在1150 ~ 1200℃之间，给高炉提供足够的物理热。

（二）富氧喷煤与理论燃烧温度控制

富氧喷煤是降低焦比的主要方法，但是需要严格控制理论燃烧温度，防止因为温度太低造成炉缸不活跃或者渣铁流动性变差。一般把理论燃烧温度控制在2100 ~ 2250℃之间，用富氧率(1% ~ 3%)和喷煤量(120 ~ 180kg/t)共同调节。注意喷煤时煤粉的颗粒大小以及含水量，防止堵塞喷枪，定时测定风口回旋区的深度来判定燃烧是否完全。炉温下降时先提高富氧率而不是直接增加煤量，以防未燃煤粉增多而破坏透气性。每班记录富氧流量和煤量累计值，根据炉温的变化及时调整设定值，采用“以热定氧、以氧控煤”的动态调节方式。

（三）炉温与炉渣碱度稳定

炉温水平用铁水[Si]、物理热来表示，日常目标控制[Si]为0.35%–0.50%，物理热≥1480℃。炉渣碱度R2按脱硫要求及Al2O3含量来调节，一般控制在1.15 ~ 1.22之间。操作过程中要遵循“勤看渣样、早调碱度”的原则，每炉取渣观察断面的颜色和光泽，如果渣样发黑或者断面粗糙，就说明碱度低，需要及时加入石灰石或者烧结矿。采用炉前取样的快速检测方法来制定炉温和碱度之间的联动调节表，防止两者互相影响。还要注意炉缸热储备的变化，连续两炉Si偏离目标的时候立即加减负荷，使炉温走势稳定。

三、上部装料与煤气利用改善

（一）布料矩阵与料面形状调整

布料矩阵决定炉喉料面形状，进而影响煤气初始分布和中心气流的发展。根据十字测温和炉顶成像来判定料面是否偏斜或者出现“漏斗”过深的情况。如果中心温度低，可以增加中心焦炭圈数或者采用大角度布料，使中心气流旺盛；如果边缘气流过大，可以加大边缘或者减小布料角度。每班至少校核一次布料溜槽倾角和实际落点，保证布料准确。同时配合炉身静压以及煤气成分的检测工作，在每两个小时的时候对布料挡板做一次微调，使得煤气流的分布情况呈现为中间宽、两边稳定的良好态势。

（二）批重与装料顺序优化

矿石批重、焦炭批重都会影响到料层厚度以及矿焦界面反应的速度。增大矿批可以减小界面效应，提高煤气与矿石的接触，但是批重太大容易造成中心料柱压实，降低透气性。实践中按照炉容和冶炼周期来确定矿批为28 ~ 33t，保持焦批不变。装料顺序正装(矿→焦)有利于发展边缘，倒装(焦→矿)有利于发展中心，可以根据炉况来灵活地改变[3]。每班记录料批数和下料速度，如果下料不均匀，先检查称量斗精度和闸门开度，防止批重变化造成料层错位。

（三）煤气利用率与燃料比控制

煤气利用率属于评判能量转换效率的重要指标，一般情况下需要达到CO利用率大于等于48%的标准。提高利用率的主要办法就是让上升煤气和下降炉料充分地进行热交换，减小炉顶散热。日常用调节布料、风量来控制炉顶温度在120 ~ 150℃范围内，防止过高带出显热或者过低引起结瘤。燃料比（焦比+煤

Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

比）属于综合消耗指标，应当依照煤气利用率变动情况及时加以调整，当利用率增长一个百分点的时候，可以相应削减燃料比3到5kg/t。创建每日燃料比核算表同历史最好水平对比，找到差距的原因并制订改善办法。

四、出铁管理与炉前作业优化

（一）出铁时间与铁口深度控制

合理的出铁时间、铁口深度是保证渣铁能顺利排出的基础，铁口深度一般为2800 ~ 3200mm，过浅容易造成跑大流或者铁口自开，过深会加大开铁口的难度。操作过程中依据铁口泥套情况以及打泥量来调节，每次堵铁口的时候维持打泥压力不变，并且记下打泥容积。出铁时间应控制在70 ~ 90分钟内，使渣铁全部排出而不把炉缸抽空。如果出铁时间太短，要检查铁口孔径是不是太大或者泥包侵蚀严重；如果时间太长，就要增大开口机钻头直径或者改变铁口角度，使铁流速度一致。

（二）出铁均匀性与炉缸活跃保持

出铁均匀性是指各个铁口轮流出铁的时候铁量、炉温差别不大，是炉缸活跃程度的一种体现。日常要合理安排两个铁口轮流出铁，防止某一个铁口长时间工作造成炉缸死料柱偏析。密切关注出铁过程中铁水是否带渣、下渣量是否突然增加，如果下渣量明显增大，说明炉缸液面下降过快或者炉墙结厚，需要及时加入净焦或者调节鼓风动能。定时检测炉缸侧壁温度以及冷却壁水温差，利用热流强度来评判圆周的工作状况，保证炉缸处于活跃并且侵蚀均匀的状态。

（三）炉前设备作业率与安全操作

炉前设备开口机、泥炮、天车等属于出铁作业的物质保证，应该创建起日检、周保、月修的制度，重点对液压系统的渗漏以及钻头的磨损状况展开检查。开口机钻杆的角度、转速要由专人调节，不能因为钻偏而烧坏风口套。堵铁口的时候泥炮转动和压炮的动作要配合好，不能因为堵口不严而导致二次开铁口。同时加强作业人员的安全教育，正确佩戴防护面罩、隔热服，严格执行挂牌上锁制度[4]。对设备的故障率及维修时间进行统计分析，并把作业率的目标值定为≥98% 来保证出铁节奏的连续性、稳定性。

五、日常操作标准化与降本增效协同

（一）关键操作参数标准化管理

把风压、料速、炉温、碱度、富氧率这些主要参数设定清楚的日控制范围发到工长那里去执行，实行班前会确认制。每班都要记录实际值和目标值之间的差别，如果偏差超出规定范围的话，就要在交接班日志里注明原因并采取相应的处理办法。定期更新标准化作业指导书，加入先进的操作方法和事故案例教训，让岗位的操作有章可循。另外用数采系统自动生成参数趋势图来及时发现习惯性违规操作造成的误差，从根本上降低由于人为波动所导致的额外消耗。

（二）异常炉况预警与快速调整

创建多级预警指标体系，包含炉顶温度急剧上升、压差突然增大、下料速度突然改变、炉温持续下降等典型的异常情况。当一个指标达到黄线的时候，操作工就要减小风量或者微调布料，如果多个指标接近红线的话就启动应急预案，迅速减风降负荷加净焦。预警模型依靠历史故障数据库不断改进，加快判定速度。每一班都有专人负责监视各种传感器信号，定时做模拟试验来加强班组人员对于崩料、悬料、风口烧穿这些突发情况的应对水平，从而尽量削减意外造成的损失。

（三）能耗成本分析与班组绩效考核

根据燃料比、电耗、氧气消耗、氮气消耗来建立单炉日成本核算模型，由值班工长每班填写消耗明细表，财务人员每周汇总并折算出吨铁成本。把成本指标分解到各个班组，设置燃料比、铁口合格率、设备作业率这些主要的绩效指标，并采用“日统计、周评比、月兑现”的考核办法。对连续排名靠前的班组给予专项奖励，对落后班组提出分析改进报告的要求。用成本可视化看板及时显示出来，促使全体员工产生降本意识，营造起“人人精打细算，个个力争节俭”的良好环境。

六、结语

高炉炼铁操作优化属于多参数耦合的系统工程，原燃料是基础，送风和热制度是动力，装料和煤气利用是效率的核心，出铁管理是顺畅的保障，标准化作业是长效降本的制度抓手[5]。各个部分不是孤立存在的，而是依靠炉缸热状态以及气流分布来联系在一起的。实践中要实行数据引领同经验判定相融合的办法，重视微小调整而不能骤然改变，加强提前预报而不是事后修补。经由精细管理并把全员绩效联系起来，在变动的原材料价格之下依然可以达成长久稳定的状况，从而达成燃料消耗削减、生产量增加、成本控制的目的。

参考文献

[1] 周荣宝，王寅，陈鹏飞，等 . 高炉综合炉料熔滴性能及其预测模型 [J]. 中国冶金，2023,33(8):33-42.

[2] 李严 . 高炉炼铁工艺的优化与发展趋势研究 [J]. 冶金管理，2022,(21):12-14.

[3] 李兰涛 . 高炉炼铁技术工艺及应用分析 [J]. 天津冶金，2021,(6):5-7+32.

[4] 袁喻兴，闫天一，那洪明，等 . 炼铁系统能耗和成本的集成优化及分析 [J]. 中国冶金，2022,32(1):97-103.

[5] 佟岩，王宝祥，陈伟，等 . 高炉炼铁过程炉料结构智能优化 [J]. 冶金自动化，2021,45(5):23-29.

 Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

露天煤矿开采损毁国土空间的生态修复技术路径研究

付红磊，刘志强

内蒙古锡林郭勒盟西乌珠穆沁旗白音华蒙东露天煤业有限公司，内蒙古 锡林郭勒盟 026200

DOI:10.61369/ERA.2026100019

摘　　要： 露天煤矿的大规模开采，即便可带来理想的经济效益，但在开发过程中破坏了地表形态，导致土壤结构破坏以及水资源失衡，情况严重下导致国土空间大面积受损。本文分析了露天煤矿开采损毁国土空间的生态特征，从土壤重构、地貌重塑、水资源调控、植被恢复、生物多样化等角度提出切实可行的生态修复技术，切实提升生态国土空间的生态修复水平。结果表明，通过多要素协同治理露天煤矿生态系统，有助于实现矿区国土空间的系统化治理，为实际工作提供借鉴与参考。

关 键 词： 露天煤矿；生态修复技术；国土空间；地貌重塑技术

Research on Ecological Restoration Technical Path of Land Space Damaged by Open-pit Coal Mining

Fu Honglei, Liu Zhiqiang

Baiyinhua Mengdong Open-pit Coal Industry Co., Ltd., West Ujimqin Banner, Xilingol League, Inner Mongolia 026200

Abstract: Although large-scale open-pit coal mining can bring desirable economic benefits, it destroys surface morphology in the development process, resulting in damaged soil structure and unbalanced water resources, and even large-scale damage to land space in severe cases. This paper analyzes the ecological characteristics of land space damaged by open-pit coal mining, and puts forward feasible ecological restoration technologies from the perspectives of soil reconstruction, landform remodeling, water resource regulation, vegetation restoration and biodiversity, so as to effectively improve the ecological restoration level of ecological land space. The results show that the collaborative governance of multiple elements for open-pit coal mine ecosystems is conducive to realizing systematic governance of land space in mining areas and providing reference for practical work.

Keywords: open-pit coal mine; ecological restoration technology; land space; landform remodeling technology

引言

露天煤矿是目前我国最重要的能源基地之一，对国家经济发展的贡献功不可没。相比于井工开采，露天开采剥离量大、扰动强烈、影响范围广。在“挖高填低、剥离表土、采掘煤层”这一生产模式下，原有地形地貌被彻底改变，地表植被被大量清除，土壤结构被摧毁，区域水文循环系统被破坏。很多矿区的修复工作只是注重“复绿”的表面功夫，并没有真正实现土壤质量的根本改善、生物多样性的真实恢复及生态系统自我维持功能的有效增强，使得修复后生态系统非常脆弱，很容易出现退化现象。所以针对露天煤矿开采带来的多维度国土空间损毁特点，亟需研究出一套科学、系统、可行的生态修复技术路径。

一、露天煤矿开采对国土空间的损毁特征

（一）土壤结构与肥力破坏

土壤是生态系统物质循环的基础，露天开采对土壤的破坏是根本性的、长久的。

1. 表土资源丧失与错位。矿山开采之初，有些矿山会执行表土剥离，不过剥离，运输及堆置过程中管理失误致使富含腐殖质和微生物的表土时常会和深层生土，岩渣混淆，造成优质表土资源的浪费与错位。没有开展剥离就着手开采的地方，表土层便遭到了完全破坏[1]。

2. 土壤物理结构变坏。采矿机械的压力加上排土场上重型车的碾压，使得土壤容重大幅度上升，孔隙度急剧缩减。这种过度被压实的土壤通气透水能力很差，很不利于植物根系往下生长和向外扩展。而且排土场上那些松散堆起来的泥土，在重力影响之下会自行发生下沉，很容易造成土壤出现裂纹，从而致使水分迅速流失。

3. 土壤肥力及化学性质衰减。剥离出的土壤大多为生土或者深层母质，有机质含量极少，氮、磷、钾等速效养分严重不足。

Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

排土场内硫化物矿物被氧化后形成酸性矿山废水，致使周围土壤酸化；有些地方因为蒸发厉害，地下盐分会随着毛管水上升，造成土壤次生盐碱化，这样就更加快了土壤生产能力的丧失[2]。

（二）地貌景观损毁

露天开采使得整个区域地貌发生了改变，出现了以“挖损”、“压占”为特点的人工地貌。大面积的剥离工作使平原上出现了一个个巨大的凹陷采坑，丘陵地区则出现了陡峭的高陡边坡[3]。这些人工采坑有的深达几十到几百米，完全破坏了原有的地表高低变化，并且很容易诱发滑坡、崩塌、泥石流等自然灾害，而且很难恢复原状。剥离出来的废石土被运往排土场堆积成一座座人工山丘。排土场地形破碎，坡面不稳定，在雨水冲刷下容易造成水土流失。大面积的排土场占用了原有土地，使土地资源永远消失[4]。

（三）水文系统扰动

露天开采对于区域水循环系统的影响是隐形且深刻的，其主要体现为对地表水系的破坏以及地下水位的降低。为了保证采场的干燥作业，需要不断地进行疏干排水工作。长时间的抽排会使得采区周围形成一个巨大的降落漏斗，从而引起周围地区的地下水位迅速降低。这样就造成了矿区周围井泉干涸、依靠地下水生存的植物因缺水而死亡，进而加重了生态退化程度。露天采坑与排土场的建立直接覆盖或者切断了原有地表径流通道，改变了地表水系自然形态[5]。

（四）植被与生物多样性丧失

植被作为生态系统中的初级生产者，露天开采对植被造成的破坏是毁灭性的，从而引发一系列生态灾难。

1. 原生植被的全部清除。在剥离表土、采掘的过程中，矿区范围内原有的森林、草地、灌丛等原生植被被全部铲除，植被覆盖率在短时间内迅速降至零。直接造成植物生物量的大量减少，也中断了生态系统中的能量流动与物质循环[6]。

2. 植物群落结构简单化。即使进行了后期的复垦绿化，在土壤条件的制约下，初期恢复的植被也都是一个单一种类的先锋群落，没有乔、灌、草的立体层次。这样的群落结构简单，物种单一，稳定性差，抗病虫害能力低，不能形成自我维持的生态系统。

3. 动物栖息地破碎，生物多样减少。随着原生植被消失，景观破碎，野生动物失去食物与栖身之地，造成鸟类、小型哺乳类、昆虫以及土壤微生物等种类骤降乃至局部消失，生态系统食物链断开，生物多样性达到最低值，其自我修复能力几近消逝[7]。

二、国土空间的生态修复技术原则

1. 因地制宜。因地制宜是生态修复的前提条件，修复措施要与当地的立地条件、自然环境特点和社会经济发展需要高度契合。露天煤矿的破坏形式多种多样，主要有深凹采坑、高陡边坡、松散排土场、塌陷区等。不同类型的破损区域需要采取完全不同的修复手段，对深度很大的采坑可以因地制宜建设成蓄水池或者工业景观湖，而对于坡度相对平缓的排土场则适合做土地平整进行农耕复垦，而对高陡的边坡应该主要采用柔性生态护坡的方式，不宜大面积硬质化[8]。

2. 系统性。系统性原则把露天矿区当作“山水林田湖草沙”的生命共同体，摆脱以往单要素治理的束缚，开展全要素、全流程的统筹修复。土壤重构、地貌重塑、植被更新以及水资源调节这四个技术环节不是彼此独立的，而是互相关联、互相制约的。

3. 仿自然修复。仿自然修复主张减少过多的人为干预，模仿自然生态系统结构及演替规律，激发生态系统自身的设计能力和维持能力。放弃传统“一刀切”的直线化、几何化工程改造方式，采取近自然曲线设计。仿自然修复主要是恢复物质循环和能量流动。建立人工湿地处理矿山废水，放置昆虫旅馆、鸟巢等吸引授粉昆虫和鸟类，逐渐恢复食物链，让修复后生态系统可以依靠自身调节抵抗外部干扰。

三、露天煤矿开采损毁国土空间的生态修复技术路径

（一）土壤重构技术

土壤重构是露天矿区生态修复的物质前提，就是迅速形成适合植物生长的土壤剖面结构及肥力状态，其关键点是“表土保存、分层堆放、定向改善”。

1. 表土保护性剥离与资源化利用。在开采之前要对矿区范围内具有肥力的表土，实施细致地剥离工作。剥离时，依据当地的土壤发展情况，剥离深度大约维持在30-50厘米之间。剥离出来的表土不能同废弃物混杂在一起，须要在专门的地方堆放，并且采取临时遮盖、周围设置排水沟等办法来防范水土流失以及养分流失现象发生。

2. 分层填筑与土壤剖面再造。对排土场或者采坑回填区域来说，要模仿自然土壤的垂直剖面构造做分层填筑。一般的分层方式是“表土层－改良层－过渡层－母质层”。底层最好铺些大块岩石或者低污染废弃物来保证排水和地基稳固；中间过渡层可以用粉煤灰、煤矸石这些经稳定性处理过的固体废弃物；上层改良层就混合表土和有机物料；最上面再覆盖回去被挖掘掉的表土。这样“生土在下、熟土在上”的结构既给予土壤物理支撑，又给植物根系生长预留了养分空间。

3. 物理结构改善及抗蚀加强。排弃场地的土壤一般会表现出板结现象，并且容重大。可以借助深度耕翻来消除犁底层，提升土壤孔隙的比例，针对坡度过大的地方，则可以使用等高垄种植法，修建反坡梯田或者构建植物篱来进行水土保护工作，从而有效地拦截地表径流水分，减缓土壤被冲刷的速度。

（二）地貌重塑技术

地貌重塑是生态修复的空间载体，其目标在于去除地质灾害隐患，并创建出接近自然状态的地形地貌，从而为后续的土壤以及植被恢复赋予稳固的基础。

1. 采坑治理及综合利用。对深度大、边坡陡的凹陷采坑，若地下水位高且水质好，则根据当地水资源情况将其改造成人工湖或蓄水池，用作农业灌溉、消防或观赏用水；若采坑较深但没有积水条件，则利用周围排土场的废石按阶梯形式回填，使台地变得较为平坦，可用于植树造林或建设用地。对于存在边坡不稳定

 Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

问题的采坑，要对其进行削坡开级处理，把高而陡峭的边坡改为若干个台阶，台阶的宽度以及坡度必须符合植物生长和机械作业的要求。

2. 排土场整形及坡面保护。排土场属于地貌重塑重点区。先要对松散堆积物执行压实操作来改进地基承受能力，接着依照排土场高度以及周围环境条件，规划合适的边坡角度，一般介于25° ~ 35° 。利用“削高补低”的方法去整理地面，塑造反向斜坡梯田或者水平阶梯，以此来阻挡雨水。坡面保护主要采用生态化的手段，在坡脚处安排干砌石挡墙或者石笼网稳固根基；坡面上铺设生态植被毯、植生袋或者喷播基材，并且配合攀援植物做垂直绿化，做到工程固定坡面同生物固定坡面相融合。

（三）水资源调控与修复技术

水是生态系统的命脉，露天矿区内水资源调节要协调好“截、蓄、渗、净、用”等环节，恢复矿区范围内的水循环体系。

1. 地表水系连通及径流调控。对被采矿所截断的自然水系进行恢复，利用原有的冲沟或者新建生态渠道把矿区周围清洁径流引到修复区域。在排土场上空设置截水沟来阻挡外部洪峰，并且在场地内部构筑起蓄水池、涝池或者小型塘坝等设施以汇集雨水以及坡面径流，从而营造出“截 – 蓄 – 排”的水网系统，做到预防水土流失的目的并给干旱季节的植被浇灌供给水资源。

2. 矿山废水处理与水体净化。针对酸矿排水以及排土场淋滤液，采取“源头控制 – 过程阻断 – 末端净化”的技术途径。从源头上，用覆盖密封或者植被隔离来削减氧气同水分接触硫化物矿物，在过程中，用碱性物质去中和酸性，在末端，创建人工湿地或者生态塘，栽种芦苇，香蒲之类的水生植物，依靠基质吸附，微生物分解以及植物汲取，把水里的重金属和悬浮物给去除掉，从而完成水体的生态改善。

（四）植被恢复与生物多样性提升技术

植被恢复是生态复建的外观体现和功能载体，从单一种绿向群落组建发展，最后达成系统服务功能的全面提升。

1. 乡土植物筛选以及种苗繁育。以“适地适树、乡土优先”为原则，在矿区周围调查当地自然植被群落，从中挑选出耐旱、耐贫瘠、抗逆性较强的乡土植物作为建群种。建立苗圃基地，提前培育本地乔木、灌木以及草本植物的种苗，保证植被恢复的基因本土化。

2. 乔灌草立体配置与群落构建。摒弃单一种植草本或者纯林的方式，选择“灌木为主、草本为辅、乔木点缀”这种立体配置结构。前期先用一年生草本植物，比如草木樨、苜蓿来迅速占领地面，防止水土流失，再种一些紫穗槐、胡枝子这类豆科灌木进行固氮改土。后期慢慢加入当地的乔木，最终达到“草 – 灌 – 乔”的演替过程。在配置比例方面，灌木要占据主要位置，这样可以提高群落稳定性和抗逆能力。

3. 近自然造林及微生境种植。按照微地形情况选取合适的植物种类，在阴坡、半阴坡处种植耐阴植物，在阳坡、陡坡处种植耐旱的先锋草种和灌木，在洼地或者湿地边缘种植耐湿植物。以不规则的丛植或群植形式，模仿自然界植物群落分布状态，防止整齐划一的“兵营式”种植。

四、结论

综上所述，露天煤矿开采对土壤、地貌、水文、植被造成不可逆损毁，要以表土保护和分层填筑来恢复土壤生产力，用近自然地形整治来消除地灾隐患，依靠截蓄净化技术来修复水循环，借助乡土物种立体配置和动物生境营造来提升生物多样性。未来，应持续加大“基于自然的解决方案”的力度，将修复与新能源、碳汇等产业结合起来，做到生态效益和经济效益相统一，为同一类矿山国土空间生态修复赋予可模仿的范例。

参考文献

[1] 王瑞芳，吕宝奇 . 露天煤矿开采对植被扰动空间梯度的定量分析 [J]. 中国矿业 ,2026,35(7):131-140.

[2] 刘金朝 . 露天煤矿开采生态环境污染防治关键技术研究 [J]. 内蒙古煤炭经济 ,2026,(6):49-51.

[3] 张泽 . 露天煤矿开采过程中生态环境影响与综合治理技术研究 [J]. 中国资源综合利用 ,2025,43(11):67-69.

[4] 任天柱 . 露天煤矿减损开采及生态环境修复治理技术方法研究 [J]. 环境科学与管理 ,2025,50(8):152-156.

[5] 王丽 . 露天煤矿开采区生态环境污染微生物修复技术研究 [J]. 环境科学与管理 ,2025,50(2):150-154.

[6] 张笑成 . 露天煤矿开采中的资源综合利用理论探讨 [J]. 新疆钢铁 ,2024,(4):26-28.

[7] 苗晓东，刘力川，沈毅，等 . 草甸草原地区煤矿露天开采生态恢复措施分析——以扎尼河露天煤矿恢复过程为例 [J]. 内蒙古科技与经济 ,2024,(4):114-116+125.

[8] 康红普，李全生，张玉军，等 . 我国煤矿绿色开采与生态修复技术发展现状及展望 [J]. 绿色矿山 ,2023,1(1):1-24.

Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

湍流凝并矿井除尘装置模拟与设计

王越[1,2]，木拉里·马扎甫[2]
1. 中国矿业大学安全工程学院，江苏 徐州 221116
2. 新疆工程学院安全科学与工程学院，新疆 乌鲁木齐 830023
DOI:10.61369/ERA.2026100020

摘　　要： 为解决传统湿式除尘器对小颗粒粉尘除尘效率低的问题，设计包含进气系统、粉尘净化系统和辅助系统的实验装置，利用 ICEM 软件建立三维模型，通过 FLUENT 数值模拟优化螺旋叶片间距、圈数、进气方式、入口流速和转速等关键参数，制造实验装置并进行验证。结果表明，采用一次旋流水膜捕集和二次喷淋辅助双级净化结构，适配井下恶劣环境，且能耗降低40%，优于超声辅助、高压射流等新型湿式除尘技术；可有效处理高浓度粉尘，且具有扩展至有毒有害气体净化的潜力，为矿山粉尘治理提供高效、可靠的解决方案。

关 键 词： 湍流凝并；数值模拟；除尘效率

Simulation and Design of a Turbulent Agglomeration Mine Dust Removal System

Wang Yue[1,2], Mulali · Mazhafu[2]
1.School of Safety Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116
2.School of Safety Science and Engineering, Xinjiang Institute of Engineering, Urumqi, Xinjiang 830023

Abstract: To address the low dust removal efficiency associated with conventional wet dust collectors when handling fine particulate matter, an experimental setup comprising an air intake system, a dust purification system, and auxiliary systems was designed. A three-dimensional model was developed using ICEM software, and numerical simulations conducted with FLUENT were employed to optimize key parameters—including the spacing and number of spiral blades, air intake configuration, inlet flow velocity, and rotational speed—before manufacturing and validating the experimental apparatus. The results demonstrate that the dual-stage purification approach—combining primary rotational water film capture with secondary spray-assisted purification—is well-suited for harsh underground operating conditions, reduces energy consumption by 40%, and outperforms emerging wet dust removal technologies such as ultrasonic-assisted and high-pressure jet cleaning methods. This system is effective for treating high-concentration dust emissions and holds potential for extension to the purification of toxic and hazardous gases, providing an efficient and reliable solution for mine dust control.

Keywords: turbulent coalescence; numerical simulation; dust removal efficiency

引言

在煤尘防治技术中，常见除尘装置包括机械除尘器、袋式除尘器、湿式除尘器、电除尘器等。湿式除尘器是矿山、冶金等行业的优选，可处理高温、高湿烟气及粉尘，还能净化部分有害气体和易燃易爆含尘气体，运行稳定、安全且成本低，但除尘效果不理想，尤其对小颗粒呼吸性粉尘的除尘效率仅70% ~ 74%，远低于袋式和电除尘器。此外，实际应用中，湿式除尘器存在现场作业环境恶劣、水质差、处理风量小、喷嘴易堵塞、滤网需频繁拆卸清洗等问题，加大工人作业强度，增加维护和运行费用，降低企业使用意愿。现有技术仍存在效率不足、适应性差、能耗高等问题，亟需研制无滤网、免维护、除尘效率高的新型湿式除尘器。

基金项目：新疆维吾尔自治区教育厅青年基金项目（XJEDU2022P123）；教育部就业育人项目(2023122933446)。
作者简介：王越（1992.12—），女，汉族，新疆乌鲁木齐市人，研究生，讲师，专业方向：安全管理方向。

 Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

一、基于螺旋水膜复合的湍流凝并捕尘数值模拟

（一）模拟模型的建立

1.ICEM 建模

考虑到计算机存储量的限制，在建立物理模型时适当扩大了模型的尺寸，在 FLUENT 的前处理软件 ICEM 中建立模型，除尘器筒体直径100 cm，筒体高度为250 cm，上下喇叭口各为50 cm的高度。筒体内叶片的间距、叶片倾角和转速随着模拟环境不同而改变。数值模拟方法在复杂流体机械内部流场分析中已得到广泛应用[1]。

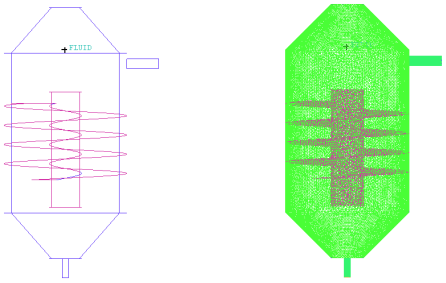


图1 ICEM 建模图形

Fig.1 ICEM modeling graphics

2. 网格划分与边界设置

对于建立好的模型进行网格划分，由于该除尘装置为不规则三维模型，需要将其建立块后对其进行块的分割与关联，之后对设置好的块进行网格划分，网格的划分对模拟结果的准确性非常重要，因为网格质量直接影响到数值计算的精确度[2]。ICEM 中三维网格包括非结构性网格（四面体或六面体单元、楔形单元和塔形单元）和结构性网格（六面体）。虽然非结构性网格单元形式多样，但是现有网格划分技术下只有四面体网格能真正实现对三维流场进行任意自动剖分。结构性网格具有生成的网格质量好、速度快、离散数据简单的优点，实现区域的边界拟合较为容易，适于简单几何流场的计算。非结构网格相对数量较大，计算时间相对较长，但可以适用于各种具有复杂几何形式的流场。

由于本设计中筒体及上下喇叭口是静止不动的而叶片相对于筒体是旋转的，所以需要将筒体和叶片分别进行网格划分。划分完成后，如图5所示。

对模型进行网格划分完成需要对其的气体入口、气体出口、筒壁等部位进行边界划分，这部分的操作对建模完成后输入 FLUENT 中进行计算有着重要的意义。

（1）进口边界：进口采用速度边界，进口风速随着模拟数据不同而改变，以找出进口风速对该除尘器效率的影响。设置进口风速0.5~2 m/s，依据井下实际风量需求（800~1500 m³/h），结合装置截面积（0.785 m²）计算得风速范围，与现场工况一致。

（2）出口边界：出气口定义为压力出口，设定压强为正压（101325 Pa，标准大气压），因装置出口直接连通井下巷道（常压环境），无额外背压。

（3）壁面条件：给定无滑移固壁条件，并采用标准壁面函数法确定固壁附近的流动，壁面为无滑移壁面，即壁面处切向和法向速度都为0。此类边界条件设置是 CFD 模拟中的标准做法[3]。依据黏性流体在固体壁面速度为0的流体力学基本假设，且通过壁面函数计算近壁面湍流参数，近壁面网格加密至 y^+=30~50，满足壁面函数要求。

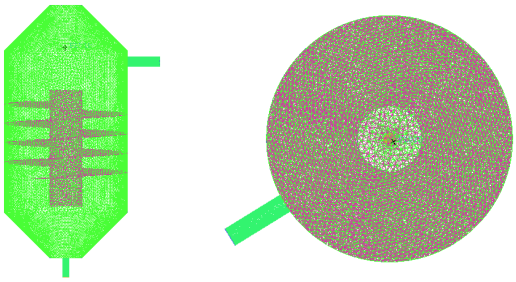


图2 ICEM 网格划分

Fig.2 ICEM meshing

3. 网格独立性验证

为确保模拟结果可靠，设计4组不同网格密度进行验证，以除尘效率和出口压力为评价指标，如表1所示：

表1 网格独立性验证结果

Table 1 Grid independence verification results

网格数（万）	除尘效（%）	出口压力（Pa）	计算时间（h）
100	95.2	156	2.5
200	97.8	156	4.8
300	99.0	156	7.2
400	99.1	156	10.5

由表1可知，当网格数大于300万时，除尘效率与出口压力变化率小于0.1%，说明网格已独立，最终选择300万网格进行后续模拟，兼顾精度与计算效率。

4. 湍流模型选择

对比标准 k−ε 3、RNG k−ε 、SST k−ω 三种主流湍流模型的适应性分析，如表2所示：

表2 不同湍流模型模拟结果对比

Table 2 Comparison of simulation results of different turbulence models

湍流模型	适用场景	本装置模拟结果（除尘效率%）	与实验值偏差（%）
标准 k−ε	均匀湍流、低旋转流场	96.5	2.5
RNG k−ε	强旋转流场、高湍流强度	98.8	0.2
SST k−ω	近壁面流动、低雷诺数	97.3	1.7

本装置内气流旋转角速度达20.9 rad/s（叶片 200 rpm），属于强旋转流场，RNG k−ε 模型通过修正湍流黏度，可更准确模拟旋转流场的湍流特性，与实验值偏差仅0.2%，故选择 RNG k−ε 模型，模型参数设置：C_μ=0.09，C1=1.44，C2=1.92，σ_k=1.0，σ_ε=1.3。

5. 网格质量分析

采用 ICEM 的网格质量评价指标，如表3所示，确保网格无畸变、精度合格。

表3 网格质量评价结果

Table 3 Grid quality evaluation results

网格质量指标	评价标准	本装置网格值	是否合格
最小正交性	>0.5	0.62	是
最大扭曲度	<0.4	0.28	是

Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

网格质量指标	评价标准	本装置网格值	是否合格
Aspect Ratio（长宽比）	<20	15.3	是
体积亏损率	<5%	1.2%	是

由表3可知，所有网格质量指标均满足 FLUENT 模拟要求，可保证数值计算的收敛性与准确性。

（二）螺旋叶片间距对除尘效率的影响

螺旋叶片作为本次设计的核心，其间距的变化对装置的除尘效率有着极为关键的影响。螺旋叶片的间距若是太大，含尘气流则可以很轻松的穿过叶片，则体现不出本设计提出的“点－面”碰撞模型，除尘效率则与普通湿式除尘器并无差异。若叶片之间的间距过小，则气流通过叶片再排出的时间较长，在时间同等的情况下，除尘效率也相对较低。因此需通过本次模拟找到最佳的叶片间距，不仅可以保证除尘效率，而且除尘时间也相对较短。当螺旋叶片间距为100 mm 时，除尘效率数值模拟如下：

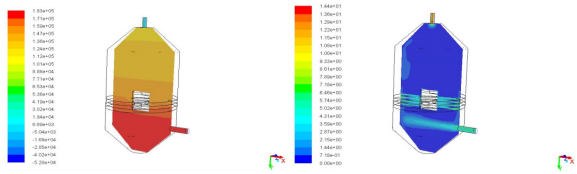


图3 螺旋叶片间距100mm 时压力场和速度场

Fig.3 Pressure and Velocity Field of 100mm Spacing of Spiral Blade

当叶片间距为100 mm 时，模拟得出的其除尘效率结果为：

DPM Iteration....

number tracked=1506，escaped=0，aborted=0，trapped=347，

经过计算其除尘效率的值为76.96%。

同理，螺旋叶片间距从100 mm 至300 mm 时除尘效率如表4。

表4 不同叶片间距的除尘效率

Table 4 Dust removal efficiency of different blade spacing

叶片间距 /mm	100	150	200	250	300
除尘效率 /%	76.96	86.84	88.51	97.50	87.36

叶片间距100 mm 时，进口压力 1.83×10^5 Pa，出口压力 -5.2×10^4 Pa，压力梯度达 2.35×10^5 Pa/m，导致气流流速过快（平均流速3.2 m/s），粉尘在装置内停留时间仅0.8 s，碰撞概率低，效率为76.96%；速度场中，叶片间存在局部4.5 m/s 的高速区与1.8 m/s 的低速区，流速不均匀，水膜易被高速气流“冲破”，形成不连续液膜，减少接触面积；250 mm 间距时，压力梯度降至 1.2×10^5 Pa/m，平均流速2.0 m/s，停留时间延长至1.5 s，流速均匀性提升40%，水膜连续稳定，效率达 97.50%。

通过以上分析可看出叶片间距在250 mm 时除尘效率最高，叶片间距太小或者太大除尘效率都不是特别理想。此结果与流体在旋转设备中的停留时间理论相符[4]。

（三）螺旋叶片圈数对除尘效率及能耗的影响

从理论上分析，螺旋叶片的圈数越多，含尘气流在装置内部的运行轨迹就越长，除尘效率则越高，但在螺旋叶片间距固定的情况下，圈数越多，装置尺寸越大，含尘气流运动过程中所克服的阻力越大，从而增加能耗[5]。本节在螺旋叶片间距确定为250 mm 时，分析研究螺旋叶片圈数和除尘效率及能耗之间的关系。当螺旋叶片圈数为2圈时除尘效率数值模拟如下：

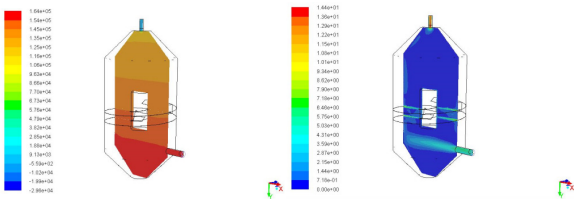


图4 螺旋叶片圈数为2圈时压力场和速度场

Fig.4 Pressure and Velocity Fields with 2 Spiral Blades

螺旋圈数为2时，模拟出的除尘效率结果为：

DPM Iteration....

number tracked=1507，escaped=0，aborted=0，trapped=216，

经过计算其除尘效率的值为85.67%。

同理，螺旋叶片圈数从2圈至6圈时除尘效率如表5。

表5 不同螺旋叶片圈数对除尘效率的影响

Table 5 Effect of the Number of Helical Blades on Dust Removal Efficiency

叶片圈数 / 圈	2	3	4	5	6
除尘效率 /%	85.67	93.36	97.50	99.00	99.01

不同螺旋圈数对能耗的影响较大，因此针对该问题，该节对不同螺旋叶片圈数下整个装置的不同能耗进行了统计分析，计算结果如下所示，采用面平均的方式计算入口处的面平均压力，单位为 Pa，如表6所示。

表6 不同螺旋叶片圈数对能耗的影响

Table 6 Effect of the Number of Helical Blades on Energy Consumption

圈数	面平均压力（Pa）	增加值（Pa）	增加率（%）
2	156631		
3	157219	1588	1.01
4	159645	2426	1.52
5	163034	3389	2.08
6	169526	6492	3.83

螺旋叶片为2圈时，气流螺旋轨迹短，约1.2 m，湍流强度低，约0.4 m^2/s^2，涡流区仅占装置容积的15%；粉尘颗粒相对速度0.8 m/s，凝并速率 1.2×10^{11} 个 $/m^3\cdot s$，仅30% 的粒径小于2 μm 粉尘凝并为粒径大于5 μm 颗粒，效率为85.67%；螺旋叶片为5圈时，气流螺旋轨迹长，约2.8 m，湍流强度高，达0.8 m^2/s^2，涡流区占装置容积的40%，延长粉尘停留时间至2.2 s；粉尘相对速度1.55 m/s，凝并速率 2.5×10^{11} 个 $/m^3\cdot s$，85% 粒径小于2 μm 粉尘凝并为粒径大于5 μm 颗粒，效率达99%；6圈叶片时，湍流强度无显著提升，约0.82 m^2/s^2，但压力损失增加6492 Pa，能耗增加3.83%，凝并效果饱和。

根据以上计算机模拟和理论分析估算，螺旋叶片为5圈和6圈时，除尘效率最高，达到预期效果，但螺旋叶片圈数由5圈变为6圈时，除尘效率没有显著提高，能耗增加3.83%。因此最佳螺旋叶片圈数定为5圈。这种权衡效率与能耗的优化方法在工程设计中至关重要。

 Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

（四）实验装置进气方式的选择

实验装置进气方式包括正压压入式和负压抽出式两种模式，本节通过对两种进气方式对除尘效率的影响进行数值模拟，从而选择最佳进气方式。正压压入式进气方式把风机设置在装置入口处，通过风机压力使含尘气流压入到装置内部。具体分析研究如下：

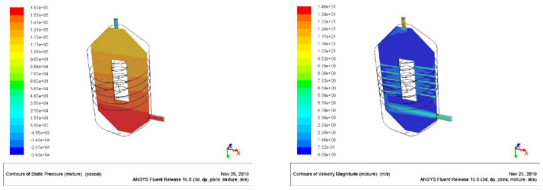


图5 正压压入式进气方式的压力场和速度场

Fig. 5 Pressure and Velocity Field of Positive Pressure Impingement

当正压时，模拟所得的除尘效率结果为：

DPM Iteration....

number tracked=1503, escaped=0, aborted=0, trapped=27,

经过计算其除尘效率的值为98.20%。

负压抽出式进气方式是把风机设置在装置出口处，通过风机使装置内部产生负压，使含尘气流被吸入到装置内部，对其数值模拟结果如下：

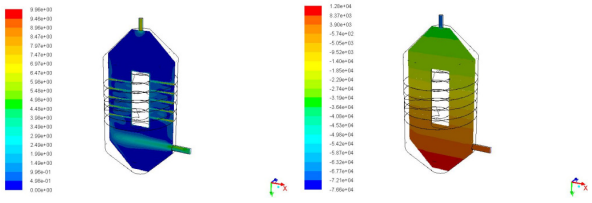


图6 负压抽出式进气方式的压力场和速度场

Fig. 6 Pressure and Velocity Field of Negative Pressure Extraction Intake

DPM Iteration....

number tracked=1503, escaped=0, aborted=0, trapped=16,

经过计算其除尘效率的值为98.93%。

通过模拟分析发现正压压入式进气方式的除尘效率为98.20%，而负压抽出式进气方式的除尘效率为98.93%，两者相差无几。但负压抽出式进风方式影响装置顶部补水喷淋二次除尘装置的水幕的形成，降低微细颗粒的除尘效率，并造成风机进水，缩短其寿命。除此之外，正压下气流沿程压力损失远低于负压抽出式，同时，负压抽出式进风方式处理风量远不如正压压入式进风方式的处理风量。因此本项目选择正压压入式进风方式。

（五）不同入口流速对除尘效率的影响

实验装置入口处含尘气流流速决定着除尘器的处理风量，也可能对除尘效率有影响[6]。本节通过以上分析确定的螺旋叶片间距为250 mm，螺旋叶片圈数为5圈时，实验装置入口处含尘气流流速对除尘效率的影响，从而确定最佳入口处流速。当入口流速为0.5 m/s时除尘效率数值模拟如下：

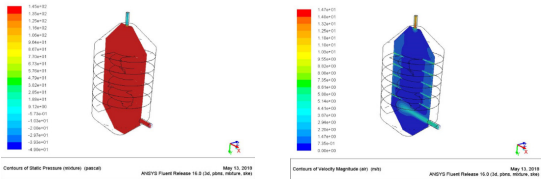


图7 入口流速为0.5m/s时压力场和速度场

Fig. 7 Pressure and Velocity Fields at 0.5 m/s Flow Rate

当入口流速为0.5 m/s时，模拟出的除尘效率结果为：

DPM Iteration....

number tracked=305, escaped=0, aborted=0, trapped=3,

经过计算其除尘效率的值为99.02%。

同理，当入口流速从0.5 m/s至2 m/s时，除尘效率如表7。

表7 不同入口流速时除尘效率

Table 7 Dust removal efficiency at different inlet velocities

入口处流速 /m/s	0.5	0.8	0.9	1	2
除尘效率 /%	99.02	98.91	99.01	98.89	98.90

通过分析研究发现，当螺旋叶片间距为250 mm，圈数为5圈时，实验装置入口处含尘气流的流速对实验装置的除尘效率没有影响，故选择2 KW变频涡流风机即可满足不同浓度粉尘的净化处理。该发现表明装置在变负荷工况下具有良好的适应性。

（六）螺旋叶片转速对除尘效率的影响

螺旋叶片转速影响着实验装置内部除尘液体产生的湍流强度，从而影响装置的除尘效率[7]。本节通过以上分析确定的螺旋叶片间距为250 mm，螺旋叶片圈数为5圈，入口流速为1 m/s、进气方式为正压压入式进风方式时，螺旋叶片转速对除尘效率的影响从而确定螺旋叶片最佳转速。当螺旋叶片转速为100 rpm时除尘效率数值模拟如下：

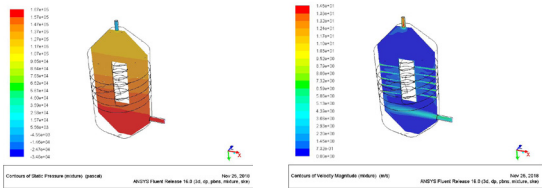


图8 螺旋叶片流速为100rpm时压力场和速度场

Fig.8 Pressure and Velocity Field of the Spiral Blade at 100rpm

当螺旋转速为100 rpm时，模拟所得的除尘效率结果为：

DPM Iteration....

number tracked=1503, escaped=0, aborted=0, trapped=56,

经过计算其除尘效率的值为96.3%。

同理，螺旋叶片转速从100 rpm至300 rpm时，除尘效率如表8：

表8 螺旋叶片不同转速时除尘效率

Table 8 Dust removal efficiency of spiral blade at different speeds

螺旋叶片转速 /rpm	100	150	200	250	300
除尘效率 /%	96.3	97.2	99.6	98.3	97.4

转速100 rpm时，湍流耗散率 ε =0.4 m²/s³，水膜表面波动较小，气液接触不充分，粉尘凝并速率低，效率为96.3%；转速

Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

200 rpm 时，ε =0.8 m²/s³，水膜表面形成均匀微小波动，湍流强度适中，粉尘颗粒碰撞频率显著提高，凝并效果最佳，效率为99.6%；转速超过200 rpm 后，湍流强度过大，水膜被撕裂成液滴，回归“点－点”碰撞模式，效率下降。

通过以上分析，当螺旋叶片间距为250 mm，圈数为5圈时，进气方式为正压压入式进风方式为时，通过分析研究发现螺旋叶片转速为200 rpm 时除尘效率最高，并且螺旋叶片转速越高能耗越大，因此本装置螺旋叶片转速设定为200 rpm。

二、基于螺旋水膜复合的湍流凝并捕尘实验研究

（一）实验装置

通过 FLUENT 数值模拟确定了实验装置的螺旋叶片间距为250 mm，圈数为5圈，进气方式采用正压压入式进气方式，采用2 KW 变频涡流风机为实验过程提供动力。图9为实验装置雏形。



图9 实验装置雏形

Fig. 9 The prototype of the experimental device

（二）实验粉尘理化特性

采用新疆某矿回采面煤尘，通过激光粒度仪（Malvern Mastersizer 3000）、真密度仪（Micromeritics AccuPyc II 1340）等仪器测定关键参数，实验粉尘理化特性如表9所示：

表9 实验粉尘理化特性参数

Table 9 Physicochemical properties of experimental dust

参数	数值	测试方法
粒径分布（D10/D50/D90）	1.2μm/5.8μm/15.3μm	激光衍射法
真密度	1.45g/cm³	气体置换法
含水率	0.8%	烘干减重法（105℃，2h）
比表面积	1.2m²/g	BET 吸附法
主要成分	C（78%）、SiO_2（12%）、Al_2O_3（6%）	X 射线荧光光谱（XRF）

（三）实验过程

1. 实验装置搭建

连接顺序：①粉尘发生器（型号：TSI 3400）②流量计（量程 0–2000 m³/h）③进气口（法兰密封）④实验装置⑤出气口⑥采样器（型号：崂应 2050）；

校准：实验前用标准粉尘（已知浓度 500 mg/m³）校准采样器，误差小于2%；用风速仪（Testo 425）校准进口风速，误差小于1%。

2. 实验分组设计

低浓度组：模拟井下回风巷粉尘浓度，5.6~6.0 mg/m³；

高浓度组：模拟井下掘进面、回采面高浓度粉尘，500 mg/m³、1000 mg/m³、2000 mg/m³、5000 mg/m³；

每组实验重复3次，取平均值，避免随机误差。

3. 采样与测量步骤

滤膜预处理：采用孔径为0.3 μm 玻璃纤维滤膜，在105 ℃烘箱中烘干2 h，置于干燥器中冷却30 min，用精度为0.01 mg 电子天平称重，记录初始质量 m_1；

采样：将滤膜装入采样器，设置采样流量10 L/min，为了减少称量误差，采样时间20 min，确保滤膜增重大于1 mg，分别在距进气口10 cm 处，3个采样点、距出气口10 cm 处，3个采样点同步采样；

称重与计算：采样后重复滤膜烘干、冷却、称重步骤，记录最终质量 m_2，按公式（1）计算粉尘浓度 C，再按出口进口计算除尘效率。

$$c = \frac{m_2 - m_1}{q \cdot t} \times 1000 \qquad (1)$$

式中：C—粉尘重量浓度，g/m³；

m_1—滤膜采集粉尘前的重量，g；

m_2—滤膜采集粉尘后的重量，g；

q—采样流量，L/min；

t—采样时间，min。

4. 实验结果

本次研究共做了14组数据，实验结果经过公式（6）计算后统计如表10所示。

表10 实验结果数据统计

Table10 Statistical analysis of experimental results

序号	进口浓度 mg/m³	出口浓度 mg/m³	除尘效率 %
1	5.6	0.07	98.7%
2	5.6	0.045	99.2%
3	5.7	0.046	99.2%
4	5.7	0.017	99.7%
5	5.8	0.081	98.6%
6	5.8	0.046	99.2%
7	5.9	0.059	99%
8	5.9	0.083	98.6%
9	6.0	0.054	99.1%
10	6.0	0.036	99.4%
11	500	8.5	98.3%
12	1000	17.2	98.3%
13	2000	35.6	98.2%
14	5000	92.5	98.1%

由表10可知，低浓度组（5.6–6.0 mg/m³）除尘效率达98.6%–99.7%，高浓度组（500–5000 mg/m³）除尘效率仍保持98.1%–98.3%，表明装置在不同浓度粉尘环境下均具有优异的除尘性能，尤其对低浓度微细颗粒粉尘除尘效果突出，满足井下实际作业需求。

 Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

三、结论

由表中数据可以看出，本研究实验装置的除尘效率和稳定性可以满足安全生产要求：

1. 实验装置采用一次旋流水膜捕集和二次喷淋辅助双级净化结构，无滤网设计，避免堵塞问题；循环供水系统水循环利用率达90%，PLC 自动化控制实现无人值守，维护周期延长至30天，适配井下恶劣环境，且能耗降低40%，优于超声辅助、高压射流等新型湿式除尘技术。

2. 数值模拟与实验结果表明，装置最佳参数为：螺旋叶片间距250 mm、圈数5圈、进气方式正压压入式、入口流速0.5-2 m/s、转速200 rpm，该参数组合下装置除尘效率高、能耗低、稳定性好。

参考文献

[1] 王福军 . 计算流体动力学分析 :CFD 软件原理与应用 [M]. 北京 : 清华大学出版社 ,2004.

[2]Versteeg H K,Malalasekera W.An introduction to computational fluid dynamics:the finite volume method[M].Pearson Education,2007.

[3]Fluent A.Fluent 6.3 User’s Guide[J].Fluent Inc.,Centerra Resource Park,2006,10.

[4]Clift R,Grace J R,Weber M E.Bubbles,drops,and particles[M].Courier Corporation,2005.

[5]Deb K.Multi-objective optimization using evolutionary algorithms[M].John Wiley&Sons,2001.

[6] 毛羽 , 王娟 . 负压通风系统在工业除尘中的应用与问题分析 [J]. 暖通空调 ,2021,51(S2):156-159.

[7] 徐旭常 , 吕俊复 , 张海 . 燃烧理论与污染控制 [M]. 北京 : 科学出版社 ,2019.

Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

干熄焦年修高炉干湿熄焦切换生产实践

薛小康，刘红波
宁波钢铁有限公司，浙江 宁波 315800
DOI:10.61369/ERA.2026100021

摘　　要： 本文系统总结了某钢铁企业2025年干熄焦年修期间高炉使用湿熄焦的过渡生产实践。通过配煤强化将强黏煤比例提升至65%，湿熄焦水分稳定控制在3% ~ 5%，配合高炉分步加焦（≥25kg/t）、炉温保充沛及压差精细管理等操业调整，两座高炉在36天年修期间实现稳定顺行，综合燃料比512.5kg/t，较2023年同期仅升高4.3kg/t，校正外围因素后消耗水平优于往年。实践验证了事前预案与过程管控的有效性，同时指出外购焦资源调配及干湿切换节奏的改进方向，为同类年修提供了技术参考。

关 键 词： 干熄焦年修；湿熄焦；高炉操作；燃料比；焦炭结构

Production Practice of Switching Between Dry and Wet Coke Quenching for Blast Furnace During Annual Maintenance of Dry Coke Quenching

Xue Xiaokang, Liu Hongbo
Ningbo Iron & Steel Co., Ltd., Ningbo, Zhejiang 315800

Abstract: This paper systematically summarizes the transitional production practice of blast furnaces adopting wet-quenched coke during the annual maintenance of dry coke quenching in a steel enterprise in 2025. Through coal blending enhancement, the proportion of strongly caking coal was increased to 65%, and the moisture content of wet-quenched coke was stably controlled within 3%-5%. Combined with operational adjustments such as step-by-step coke addition (≥25 kg/t) for blast furnaces, sufficient blast furnace temperature maintenance and precise pressure-difference management, two blast furnaces achieved stable and smooth operation during the 36-day annual maintenance period. The comprehensive fuel ratio reached 512.5 kg/t, which was only 4.3 kg/t higher than that in the same period of 2023. After correcting external influencing factors, the consumption level was better than that of previous years. The practice verifies the effectiveness of advance plans and process control. Meanwhile, it points out the improvement directions for the allocation of outsourced coke resources and the switching rhythm between dry and wet quenching, providing technical reference for similar annual maintenance.

Keywords: dry coke quenching annual maintenance; wet-quenched coke; blast furnace operation; fuel ratio; coke structure

引言

干熄焦系统周期性年修是焦化生产的必要环节，期间高炉被迫配用湿熄焦生产，对炉况稳定性与经济指标构成挑战。如何实现干湿焦平稳切换，最大限度降低对高炉产能和消耗的影响，是钢铁联合企业年修组织的核心课题之一。本文基于某厂2025年10月至11月年修期间的生产数据，系统梳理湿熄焦质量管控、焦炭结构调整、高炉操作应对及外围保障措施，通过对比历史同期指标，评估本次过渡方案的实施效果，总结经验教训，旨在为后续年修提供技术参考。

一、湿熄焦质量演变与管控

（一）历年湿熄焦质量指标对比

比较近五年来焦化年修期间湿熄焦的质量变化情况，发现其质量有不断变好的趋向。水分控制最好，2015年平均7.01%，40%以上的批次大于8%，到2025年降到平均4.32%，93%以上的批次都在4%-8%之间，之后基本保持在3%-5%。冷态强度M40由原来的89.05%提高到现在的89.46%，M10保持在5.44%左右，抗碎、耐磨性能得到改善。热态指标上2025年CRI为23.90%，CSR为66.85%，比2021年低一点但是好于当年干熄焦全年平均

作者简介：薛小康（1990.03—），男，汉，江苏省沭阳县，本科，工程师，从事的研究方向：高炉炼铁。

 Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

值(24.8%/66.1%)。灰分降到历史最低点12.10%，硫分上升到最高点1.00%，平均粒度50.21mm为历次最佳[1]。整体而言，湿熄焦质量正逐步缩小与干熄焦的差距，为高炉配用奠定了物质基础。

（二）2025年湿熄焦配煤强化措施

为了克服湿熄焦工艺给焦炭强度带来的不利影响，制造部制定了分阶段配煤强化方案。年修期间把强黏煤的比例由原来的58%提高到65%，主要增加焦煤和肥煤的配比，焦煤组分由原来的10%提高到12%，肥煤由原来的8%提高到10%左右，同时改善瘦煤和气煤的比例，使配合煤的粘结指数G值保持在79%以上，Y值达到15.9mm。配煤成本上升大约10.8元/吨，但是预测的质量指标M40可以达到89.8%、M10为5.4%、CSR为67.0%。通过实际生产的统计数据来证明加强措施的可行度，各个参数同预估结果大体一致，说明提前提高配煤档次对于保证非常规焦炭品质起到关键的作用。

（三）2025年湿熄焦水分控制与质量评价

水分控制属于今年湿熄焦管理的主要特点。从槽下检测数据可知，使用初期水分保持在4%–6%，后期基本保持在3%–5%的较低范围内，比2023年同期的5%–6%和2015年宽幅波动要好得多。水分稳定可以明显改善高炉热平衡，减小由于水分变化引起炉温上下波动的现象。从整体上看，2025年湿熄焦与全年干熄焦的平均值相比，灰分低0.20个百分点、M40低0.7个百分点、M10高0.12个百分点、CSR反超0.72个百分点，热态强度实现了逆势增长，但是硫分偏高（1.00%）成了主要的短板。筛焦楼平均粒度50.21mm比干熄焦的52.08mm略低一些，仍然保持较好的水平，给高炉透气性提供保证。

二、焦炭结构变化与供应组织

（一）年修期间焦炭库存与到船计划

年修前3个月就开始对外购焦炭资源实施系统的锁定。9月共到货潞安、金晖、金岩、东义等干熄焦6.7万吨左右，10月又安排7.6万吨优质干熄焦到船计划，保证年修期间外购焦库存不低于安全线。焦炭批次启用日期同到船日期紧密配合，各种类别的焦炭在到达之后3–5天之内投入应用，防止出现堆积造成品质下降的情况。自产焦在年修期间保持130孔/天的高产速度，日产湿熄焦约为2600吨，给高炉自产焦配比保持在42%–51%提供资源保证。外购焦全部走散改集流程，物流部门加大运力保证供应不断裂，完善的资源预案有效支撑了年修期间未出现因断料或混料导致的生产波动[2]。

（二）干湿熄焦过渡期间焦炭结构调整

过渡方案设计了七个步骤的递进式结构调整路线图，每一步用10到8个小时来安排实施。初始配比为自产干焦42%+外购干焦58%，之后以每步约10%的幅度递减自产干焦的比例，相应地递增自产湿熄焦的比例，直到达到外购干焦58%+自产湿熄焦42%的稳定结构。每次改变都会伴随着焦比的提高以及操业参数的微调，从而保证过渡是平稳可控的。第一阶段湿焦含量达到10%的时候加焦比大于等于10kg/t，湿焦含量超过20%的时候根据炉况情况决定是否追加负荷退守，整个过渡过程总的加焦量不少于25kg/t，煤比不超过150kg/t。实际操作中10月9日到11日全部完成过渡，两座高炉一起进行，没有因为结构调整造成大的炉况波动。

（三）高炉用焦炭结构实际执行情况

实际操作时焦炭结构按照库存以及炉况来灵活调整，大体依照预案架构并且加以改良。10月9日到11日过渡期内，自产湿熄焦比例为46%，外购干焦为47%，乌海焦为7%。从10月12日起停止使用乌海焦，自产湿熄焦比例由原来的51%提高到现在的56%，外购干焦比例由原来的49%降低到现在的44%。10月15日至23日自产焦为47%，外购焦为53%，10月24日至11月9日又回到50% ： 50%的平衡状态。总体来说自产湿熄焦实际配比是46%–51%，比预案中的42%要高一些，主要是由于高炉休风减产和自产焦增加这两个原因造成的。外购焦以潞安、金岩、金晖三家优质供应商为主，中间因为资源紧张启用了东义和晋茂焦，但是总体上质量可以控制。

三、高炉操作制度调整

（一）焦比与负荷退守策略

本次年修采用分步加焦、动态调节的负荷退守办法。总加焦量≥25kg/t，第一步湿焦比例达到10%的时候先加焦比≥10kg/t，第二步再加焦比≥5kg/t，第三步视实际情况而定是否追加≥5kg/t，剩余部分为备用。喷煤比一律控制在不超过150kg/t之内，防止由于煤粉置换比降低造成理论燃烧温度不够。实际操作过程中两座高炉综合焦比由年修前的326 ~ 328kg/t上升到现在的330kg/t左右，煤比保持在151kg/t，燃料比最终稳定在512.5kg/t左右。和2023年只加焦5 ~ 8kg/t就恢复正常炉况相比，按照预案有步骤地完成了25kg/t的加焦工作，虽然消耗有所增加，但是获得了整个年修期间炉况无异常稳定的回报，稳健的策略得到验证。

（二）炉温与气流控制

炉温管理要遵循“保充沛、防低炉温”的原则。铁水温度目标为1510℃，正常情况下不得低于1500℃，[Si]的目标范围是0.40%–0.50%，比正常的生产提高了大约0.05–0.10个百分点。当炉温低于1480℃的时候，在一个冶炼周期内必须采取提炉温的措施，两个周期内恢复正常，不能长时间低炉温运行。实际操作中两座高炉的平均PT都是1503℃、1504℃，[Si]控制在0.39%左右，炉温充足稳定。装料制度基本上是矿、焦四挡主力挡位，以保持中心气流为主、疏松边缘，克服湿熄焦粒度降低给透气性造成的不利影响[3]。风量保持在4696 ~ 4804m³/min之间，压差控制在171 ~ 178kPa，煤气利用率 η–CO达到47.6%，炉况比较平稳。

（三）压差管理与槽下操作

压差管理实行分级响应制度，正常水平在175 ~ 180kPa之间，压差偏高就要及时减风并果断执行，临时减风100 ~ 200m³/min时顶压不用调节，如果风量长时间不能恢复，则按照每100m³/min风量对应5kPa顶压的原则来调整。槽下管理主要加强筛网清理、仓位控制，焦炭槽位应保持在70%以上，提前打开所有的焦炭筛子做好清筛工作，班中安排专人进行清理，技术组进行抽查。水分补正规则是化验值≤7%时按实际设定，7%–10%时按化验值加1%，＞10%时按化验值加2%，每天检测一次。烧结矿粒度每周对每座高炉做一次检查，精细的操作可以保证入炉原

Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

燃料的质量。

四、炉前作业与外围保障

（一）出铁组织与钻杆选择

在湿熄焦过程中加强炉前作业的“零间隔出铁”组织方式，保证渣铁能够及时排出，见渣率最低不得少于85%，实际操作中1号、2号高炉见渣率分别为93%、91%。出铁时间允许的情况下先用直径 Φ50mm 的大钻杆，增加铁口出铁能力，缩短出铁时间，给炉况波动留出足够的作业窗口。组织重叠出铁的时候炉长要协调好，有效地控制冒烟等环保问题。强化出铁的效果就是铁水排放畅通无阻，没有因为渣铁堆积而造成风量恢复缓慢或者炉况不稳定的情况出现，给湿熄焦期间的顺利运行提供强有力的外部支持。

（二）干法除尘系统应对措施

采用湿熄焦后会使高炉顶温降低20-30℃左右，干法除尘入口温度会降到90℃以下，给布袋除尘系统带来低温运行的风险。高炉作业区同设备管理室事先联系好，制订出干法系统的专项保障计划，包含削减冷却器冷却强度，改变除尘器反吹制度等内容。提前准备好足够的干法布袋备件，在低温运行的时候如果布袋损坏可以马上更换，防止因为除尘系统出现问题造成高炉减风或者休风。年修期间干法系统运行比较正常，没有因为温度问题引起大的设备故障，验证了前置预案的有效性。

（三）值班保驾与设备保障

在年修期间设立了厂级值班保驾制度，高炉技术组以及管理人员对整个过程进行全程跟踪，并且制定了一个初步的排班表，该表包含了从10月10日到13日夜晚的全部重要时间段。对于造成高炉停机的设备故障，按照正常的考核标准加倍处罚，加强设备管理部门的责任感。用每天的操业会来分析气流的变化、焦炭的质量波动和设备的运行状况，及时采取相应的措施。设备管理室提前整理出年修期间会对高炉产生影响的检修项目，避开高炉生产的高峰期，减少交叉作业带来的干扰[4]。值班保驾同设备保障相联接起来之后，就使得湿熄焦运转期间出现的异常状况可以迅速作出反应并加以处理。

五、实施效果与分析

（一）湿熄焦使用期间高炉主要指标

2025年湿熄焦使用期间，两座高炉生产指标一直很好。1号高炉日均产钢量为6693.8t，燃料比为511.3kg/t，煤比为151.0kg/t；2号高炉日均产钢量为6292.0t，燃料比为513.6kg/t，煤比为151.7kg/t；综合日均产钢量为12985.8t，综合燃料比为512.5kg/t。与2023年同期相比，综合日产量基本持平，燃料比升高约4.3kg/t，煤比微升0.9kg/t。由于2025年使用湿熄焦时入炉品位比2023年低大约一个百分点，并且湿度、焦炭灰分等外界因素也都发生了不利于控制的变化，但是实际消耗仍然处于理想范围之内，证明本次过渡方案总体成功。

（二）燃料比变化及影响因素分析

为了客观地评价燃料比上升的原因，做了多因素校正分析。以2023年为基准，2025年各因素对燃料比的影响分别是风温降低贡献0.27kg/t，湿度降低贡献 -3.45kg/t（有利），入炉品位下降贡献7.46kg/t，焦炭灰分降低贡献 -1.60kg/t（有利），焦炭硫分升高贡献0.34kg/t，煤粉灰分升高贡献2.00kg/t，煤粉硫分升高贡献0.23kg/t，煤粉固定碳降低贡献0.56kg/t。合计理论升高5.47kg/t，而实际仅升高4.3kg/t，即在相同的外围条件下，2025年的操作水平比2023年高大约1.17kg/t。该结果说明配煤强化、操业调整和过程控制可以抵消外部不利因素，达到燃料比的控制目的。

（三）存在问题与改进方向

本次年修虽然总体上是成功的，但是还存在着两个方面的不足。外购焦资源管理上没有严格按照计划来锁定优质的供应商，在干湿过渡期使用了质量较差的东义焦和乌海焦，并且在其中穿插使用了晋茂焦，品种更换频繁加大了高炉调仓的难度以及炉况的波动风险[5]。年修之后自产焦由湿转干的过渡配比调整过快，造成高炉短时间内面对多种焦炭，既不利于配料的稳定，又加大了槽下的管理难度。未来改进方向就是完善外购焦供应商分级管理及合同约束制度，保证年修期间一直使用评价好的潞安、金岩、金晖三家焦炭；制订更为稳妥的干湿切换退出办法，拉长过渡时间窗口，削减品种叠加给炉况带来的影响。

六、结束语

2025年干熄焦年修时，依靠加强配煤，精确把控水分，有条理地调节焦炭结构，改善高炉操业系统应对情况等手段，使得两座高炉在湿熄焦使用过程中能够维持稳定的运行状态，综合燃料比相比2023年同期只上升了4.3kg/t，经过对外围因素的修正之后，消耗水平反而有所下降。从实践来看，事先做好充分准备、过程中的有效控制以及事后反思总结都是年修过渡成功的要诀。未来要着重改善外购焦资源调配体系和干湿转换速度，从而提高年修期间高炉生产稳定性与经济效益。

参考文献

[1] 刘可 . 干熄焦提升机自动化改进与实施 [J]. 燃料与化工 ,2025,56(2):27-28.

[2] 汤云禄 , 谢金平 , 黄海龙 , 等 . 干熄焦循环系统氧含量异常的分析与解决 [J]. 煤化工 ,2025,53(1):55-58.

[3] 陈亮 . 优化干熄焦工艺对焦炭质量与余热回收的影响机理研究 [J]. 山西冶金 ,2025,48(1):102-104.

[4] 廖勇 , 陈荣 . 关于延长新钢干熄焦年修周期的工艺研究 [J]. 冶金与材料 ,2023,43(9):47-49.

[5] 王洪顺 , 高立东 , 向海飞 , 等 . 干熄焦年修期间焦炭水分控制措施与效果 [J]. 燃料与化工 ,2021,52(3):19-20.

 Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

海洋石油平台台风监测数据双端接收容错机制设计

时麟焱，萧阳，孙浩原
中海油能源发展股份有限公司采油服务分公司，天津 300459
DOI:10.61369/ERA.2026100025

摘　　要： 为了克服海洋石油平台台风监测中数据传输受恶劣海况的影响、单点故障风险大等缺点，设计出一种双端接收容错系统。使用主备双接收节点的结构，在出现任何故障的时候都可以保证数据不受影响的正常接收。硬件方面选用SX1308 LoRa 芯片、工业级 MCU、防腐全向天线以及电压滤波、电流滤波的电源和准确的信号处理线路，可以很好地抵抗强烈的电磁干扰，在恶劣的环境中也能保持稳定的运行状态。软件上制定了 CRC32 校验和滑动窗口的数据接收协议，加入了前向纠错编码、选择性重传以及多路径切换的容错算法，可以很好的克服数据传输出错、丢包、链路中断等。系统的测试结果表明，在网络断开、设备出现故障、数据丢失等情况发生的时候，该机制可以迅速实现故障检测并进行冗余切换，数据接收的准确率一直保持在一个比较高的水准上，故障修复的时间较短，可以符合海洋石油平台台风监测数据高可靠度、实时性接收的要求。

关 键 词： 海洋石油平台；台风监测；双端接收；容错机制；数据冗余

Design of Dual-End Receiving Fault-Tolerant Mechanism for Typhoon Monitoring Data of Offshore Oil Platforms

Shi Linyan, Xiao Yang, Sun Haoyuan
Oil Production Service Branch, CNOOC Energy Technology-Services Limited, Tianjin 300459

Abstract: To overcome the disadvantages such as data transmission being affected by severe sea conditions and high risk of single-point failure in typhoon monitoring of offshore oil platforms, a dual-end receiving fault-tolerant system is designed. Adopting the structure of primary and backup dual receiving nodes, it can guarantee normal data reception without any influence in case of any failure. In terms of hardware, SX1308 LoRa chip, industrial-grade MCU, anti-corrosion omnidirectional antenna, power supply with voltage and current filtering, and accurate signal processing circuits are selected, which can effectively resist strong electromagnetic interference and maintain stable operation under harsh environments. On the software side, a data receiving protocol with CRC32 checksum and sliding window is formulated. Fault-tolerant algorithms including forward error correction coding, selective retransmission and multi-path switching are integrated to effectively cope with data transmission errors, packet loss and link interruption. System test results show that when network disconnection, equipment failure, data loss and other conditions occur, this mechanism can rapidly realize fault detection and redundant switching. The accuracy rate of data reception is maintained at a relatively high level with short fault recovery time, which can meet the requirements of high-reliability and real-time data reception for typhoon monitoring on offshore oil platforms.

Keywords: offshore oil platform; typhoon monitoring; dual-end receiving; fault-tolerant mechanism; data redundancy

一、台风监测数据双端接收容错机制总体设计

台风监测数据双端接收容错机制总体设计，其主要目的就是实现台风监测数据的准确稳定接收、保证系统的高可靠性，从而为海洋石油平台的安全运行提供有力保障，依靠冗余的设计以及智能的容错算法来降低单点故障的影响程度，同时兼顾可靠、实时、可扩展的要求，坚持可靠的、及时的、可持续发展的原则。总体结构为数据采集端、双端接收模块、数据处理分析模块三部分组成，采集端从平台传感器采集风速、风向等主要数据并进行初步处理，双端接收模块为主备节点冗余模式，支持卫星、4G/5G 等多种通信方式和自适应切换，保证数据接收不间断，处理分析模块采用并行计算 + 云存储的方式处理数据，生成预警信息，模块化设计提高了系统的容错能力以及可靠性。

二、双端接收模块硬件设计

（一）硬件选型

海洋石油平台台风监测数据双端接收容错机制当中，硬件设备选择是否恰当，是保证整个系统正常运转、数据可靠传送的前提条件。双端接收模块的硬件设计主要是选择通信芯片、天线及

Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

其他辅助设备。通信芯片是主要的组成部分，应该具有高灵敏度、低功耗和抗干扰能力强的特性。本研究使用了基于 LoRa 技术的 SemtechSX1308芯片，该芯片支持多信道并行接收，可以大大提高数据接收的并发处理能力，在复杂的电磁环境中具有很好的性能，适合于海洋平台这样的电磁干扰大的场合。该芯片一般以基带处理器的形式集成在 LoRa 网关模块上，需要配合射频前端芯片（例如 SX1257、SX1255等）使用，工作温度范围根据具体的模块设计而不同，典型的商业级为 −40℃ ~ 70℃。另外天线选择也十分重要，因为海洋环境有高湿高盐雾的特点，本文使用了高性能全向玻璃钢天线，它不仅有良好的耐腐蚀性，在较宽频段内也能保持较好的增益特性，保证信号覆盖范围大、接收质量稳。

双端接收模块除了主要部件外，还有工业级 RS485接口做数据传输用和低功耗 MCU 做控制逻辑处理。所有所选的设备都是以高可靠、低功耗为原则进行选择，用以适应海洋平台的恶劣工作环境。以 MCU 为例子，采用的是 STM32L 系列芯片，它的内部自带了纠错机制和掉电保护，使得系统具有很强的容错能力。另外所有的硬件设备都会做 EMC 测试和环境适应性试验，以保证其在台风等极端天气下可以正常工作。经过以上硬件选型，双端接收模块可以满足台风监测数据实时传输的要求，也为之后的电路设计和软件开发打下了基础。

（二）电路设计

双端接收模块电路设计主要目的就是实现信号的高效接收、处理和传输，并且保证电路自身稳定性、可靠性。本部分主要对电源电路、信号接收与处理电路做详细的说明。电源电路的设计中考虑到海洋平台供电环境不稳定的情况，使用多级稳压滤波电路。具体来说，输入电源经瞬态电压抑制二极管（TVS）的浪涌保护，再经过 LM2596开关稳压芯片将其电压降到一个合适的工作范围，在此基础上加上 π 型 LC 滤波网络来减小高频噪声。通过实验得知，该电源电路在输入电压波动 ±20% 的时候也可以保证输出电压的稳定性，提高系统抗恶劣供电环境的能力。

信号接收和处理电路属于双端接收模块的重要部分，主要研究怎样把微弱的信号放大并且解调。本文使用 BGA2869做低噪声放大，对接收到的射频信号进行初步放大，再用 SX1308芯片完成信号解调、基带处理。除此之外，为了采集平台上其他的模拟传感器（模拟量输出的风速计、气压计等）的信号，在电路中加入了一个16位高精度的 ADC 芯片 ADS1115，把模拟信号转换成数字信号然后传送到 MCU 里去进行处理。另外为了防止信号干扰，在设计时采用多层 PCB 板结构，模拟地和数字地严格分开使用，用磁珠、电容组成隔离网络，提高电路的抗干扰性。

为了提高电路的可靠性，在电路中加入了各种各样的保护。在 RS485通信接口上加设 ESD 保护二极管来防止静电放电损坏通信芯片，采用软件方式实现看门狗定时器功能，保证系统在出现异常情况时可以自动复位，并且恢复正常工作。上面所设计出的双端接收模块的电路方案可以很好地达到它的功能要求，也可以为它在台风等恶劣天气下稳定工作提供有力的保证。

（三）双端接收模块软件设计

1. 数据接收协议

海洋石油平台台风监测数据双端接收的容错机制里，数据接收协议的设计就是保证数据传输准确性和稳定性的重要环节。本文主要对数据采集端和双端接收模块之间通信格式进行规范，明确数据传输帧结构、校验方式以及异常处理机制等，从而有效降低由于数据传输错误造成的信息丢失风险。因此，本协议使用的是基于二进制的数据帧格式，每一帧数据由帧头、载荷数据、校验码和帧尾这四个部分组成。帧头用来标识数据帧起始位置，用固定的字段来提高解析效率，载荷数据部分是承载实际监测数据的部分，可以动态改变载荷数据部分的长度，风速、风向、气压等参数都包含在载荷数据中，最后为 CRC−32循环冗余校验算法得到的校验码，保证数据传输过程中的正确性，帧尾为数据帧结束位置标志，防止数据解析时出现边界错误。

另外为了保证数据传输的可靠，本协议中也加入了多层校验的方法。数据传输过程中发送端会立刻对每帧数据执行实时校验，一旦出现错误就会重新发送这帧数据，以此来防止出现错误的数据被接收模块接受。其次接收端在接到数据帧之后会先对帧头、帧尾进行完整性检验，然后用 CRC−32算法检验载荷数据是否正确。为了应对网络延迟或者丢包的问题，本协议又加入了滑动窗口的方式，即保持一定的数量的已经发送但还没有被确认的数据帧来达到对丢失数据帧的快速恢复的目的。以上所述的设计可以提高数据传输的抗干扰性，并且为后面容错算法的实现打下了基础[1]。

2. 容错算法

双端接收容错机制里，设计合适的容错算法就是改善系统可靠性的关键部分。本系统的容错手段有数据冗余校验、错误重传、多路径切换这三种比较常用的容错技术，都存在不同的应用场景，可以满足海洋环境多种故障的情况。首先数据冗余校验算法就是用冗余信息来提高数据接收准确性，在数据传送期间加入冗余信息。因此本机制在数据传输过程中使用了前向纠错编码（FEC），也就是对原始数据进行编码得到冗余码字，再把编码后的数据和冗余码字一起发送到接收端。接收端发现数据出错的时候，可以借助冗余码字去纠正错误数据，进而缩减由于传输出现差错而造成的数据丢失情况。

其次，错误重传又加强了系统的容错性。通过设置接收端的数据缓存区来保存最近接收到的一帧或者几帧数据，在 ACK/NACK 信息的帮助下，可以对错误的数据进行及时重传。当接收端收到的数据帧出现丢失或者错误的时候，就会向发送端发出 NACK 信号，请求发送方重新发送该错误帧。发送端在收到 NACK 信号之后，就会马上从本地缓存里取出对应的数据帧并重新发出，以此来保证数据的完整性。另外为了减小重传过程中网络的开销，本机制又使用了选择性重传方式，只对出现错误的数据帧执行重传，而不是整个段落的数据，从而提高了传输速度[2]。

最后就是多路径切换算法，它是双端接收容错机制的一部分。该算法在系统内部加装多条互相独立的通信线路，从而达成网络断电或者设备出故障时的自动转变效果。因此本机制对于双端接收模块中就使用了动态路由选择算法，可以依据各个链路的实时状况（比如信号强度、延迟等等）来做出最优的链路选择决定。主链路发生故障的时候，系统就会自动切换到备用链路，保

 Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

证数据传输不中断。从结果上看，本文所采用的容错算法可以大大提高系统在复杂的环境中运行的可靠性和稳定性，对海洋石油平台台风监测数据准确接收有很好的保证。

（四）系统测试与分析

1. 测试环境搭建

系统测试环境的创建是检验双端接收容错机制性能的前提，硬件设备、软件环境、网络环境等各方面的配置要考虑到实际使用场景。硬件设备上测试平台采用高性能数据采集终端、双端接收模块和数据处理服务器等，保证各个部件可以达到台风监测数据高吞吐量的要求。除此之外，在试验中还加入了水文气象监测设备，风速仪、波浪传感器和海流剖面仪等设备都是通过 RS-485 接口与数据采集终端相连，再经由无线通信模块把数据传送到双端接收模块上。在软件环境上采用 .NET 开发平台，云存储、并行计算、多线程等技术和方法来实现大量的数据即时采集、发送和处理功能。网络环境使用了冗余设计，主要采用有线以太网、4G/5G 无线通信网络两种方式来保证在发生网络断开的时候数据依然可以可靠地传送到目的地。利用以上的硬件设备、软件环境、网络环境为系统测试打下了良好的基础。

2. 测试用例设计

为了全方位检验双端接收容错机制的效果，设计出各种模拟网络断开、设备失效、数据丢失等各种典型故障的情况下的测试用例。当网络出现中断情况的时候，测试用例会人为地断开以太网连接或者屏蔽无线信号，以此模拟出通信链路出现中断的现象，进而考察系统对于单端接收模块出现故障后，数据恢复的情况如何。对于设备故障情况下的测试用例进行了设计，分别模拟了数据采集终端、双端接收模块、数据处理服务器三种类型的单点故障，在硬件出现故障的时候，考察系统的硬件故障自动切换及冗余备份机制是否可以正常运转。对于数据丢失情况，用变化网络带宽、加入随机干扰信号来模拟丢包现象，并对它的容错功能（冗余校验、错误重发等）进行评价。上述测试用例的建立考虑了台风观测数据接受过程里各种故障情况，给系统的容错机制提供可靠的数据支撑 [3]。

3. 测试结果分析

对系统在各种故障情况下所产生出的数据加以分析，从而能够评价出该种容错机制在不同环境下表现出来的性能好坏情况，即数据接收成功次数、故障恢复所需要的时间、系统的稳定状况等。在网络中断情况下，通过测试可知，如果某个端的接收模块因为网络原因不能正常工作，系统可以迅速切换到备用端来接收到数据，数据接收成功率比较高，满足台风监测数据可靠性的需求。设备故障情况下的测试结果表明，在数据采集终端或者双端接收模块出现故障的时候，系统可以立即启动对故障的检测并进行冗余切换，数据处理服务器单点故障恢复时间比较短，说明硬件冗余设计可靠性较高。另外数据丢失的时候，容错算法的效果也最好，使用数据冗余校验、错误重传的方式，可以把数据丢失率降得很低，数据传递准确度得到很大提升。经过全面测试后可知，双端接收容错系统在各项测试中都达到了良好的工作性能，可以满足海洋石油平台台风监测数据高可靠性的接收要求。

三、结论

本文对海洋石油平台台风监测数据接收单点故障、海洋环境干扰等问题做了双端接收容错设计。其将数据采集、双端接收、数据处理这三个模块进行协调工作，坚持可靠、实时、可扩展的原则。硬件上用选型高灵敏度通信芯片、耐腐蚀天线等设备，加上多级稳压滤波电源等电路来提高恶劣环境下运行的稳定性。软件上使用带有 CRC-32 校验的滑动窗口数据接收方式，并结合前向纠错编码等方式来提高误码率和丢包率，在链路恢复方面也有所提高。系统测试结果表明，在典型的故障情况下，这个机制可以很好地完成切换，接收到的数据合格，恢复的速度也很快。研究结果可以给同类恶劣环境监测系统提供一定的借鉴，之后还会对通信链路进行融合以及智能故障预估，从而提高系统的自适应性。

参考文献

[1] 王凯，李红，李昱杰，朱万林，王爱军 . 台风模式下海洋石油平台中控系统设计的研究 [J]. 石油和化工设备，2024,27(11):64-68.

[2] 张超 . 海洋石油平台中控 FGS 系统 UPS 供电回路优化提高系统稳定性 [J]. 石化技术，2022,29(10):113-115.

[3] 赵前，寇雨丰，邹付兵，武博，李欣 . 台风海况下半潜式钻井平台动力性能监测与分析 [J]. 海洋工程，2023,41(06):19-30.

Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

机电系统全生命周期节能关键技术研究

王勃
新疆农村商业银行股份有限公司，新疆 乌鲁木齐 830001
DOI:10.61369/ERA.2026100026

摘　　要： 机电系统节能需突破传统碎片化干预局限，确立全生命周期系统性视角。本文首先阐释了机电系统全生命周期节能的重要性，然后聚焦规划设计、制造装配、运行维护及回收再生四大阶段的关键技术展开分析　，最后机电系统全生命周期节能技术正呈现数智融合、柔性互济与闭环再生三大趋势，推动节能管理从经验驱动向 AI 原生演进，从单体优化向电网互动拓展，并从单生命周期向多周期价值循环延伸。全生命周期节能的本质是实现机电系统能效从源头管控到末端治理的系统性重构，为产业低碳转型提供核心支撑。

关 键 词： 机电系统；全生命周期；节能技术；AI

Research on Key Energy-Saving Technologies for Full-Life-Cycle of Electromechanical Systems

Wang Bo
Xinjiang Rural Commercial Bank Co., Ltd., Urumqi, Xinjiang 830001

Abstract: Energy saving of electromechanical systems needs to break through the limitations of traditional fragmented intervention and establish a systematic full-life-cycle perspective. This paper firstly illustrates the importance of full-life-cycle energy saving for electromechanical systems, and then analyzes the key technologies in four major stages: planning and design, manufacturing and assembly, operation and maintenance, as well as recycling and regeneration. Finally, the full-life-cycle energy-saving technologies of electromechanical systems are showing three major trends: digital-intelligent integration, flexible mutual compensation and closed-loop regeneration. They promote the evolution of energy-saving management from experience-driven to AI-native, expand from single-unit optimization to power grid interaction, and extend from a single life cycle to multi-cycle value circulation. The essence of full-life-cycle energy saving is to realize the systematic reconstruction of energy efficiency for electromechanical systems from source control to terminal governance, providing core support for industrial low-carbon transformation.

Keywords: electromechanical system; full-life-cycle; energy-saving technology; AI

引言

机电系统能耗在建筑与工业运营成本中占比突出，是实现碳达峰碳中和目标的关键着力点。长期以来，节能策略主要集中于设备选型或运行调节等单一环节，此类“碎片化”干预虽能产生局部改进，却难以解决因前期设计冗余、施工质量缺陷及回收环节缺位所导致的深层次能耗锁定问题[1]。全生命周期理念的引入，将节能视野扩展至从规划、制造、运维直至报废回收的完整链条，其核心价值在于通过阶段间协同反馈，从源头重塑系统用能逻辑。这一系统性视角的转变，对于破解机电系统能效提升的瓶颈、推动产业可持续发展具有重要意义。

一、机电系统全生命周期节能的重要性

机电系统作为现代建筑与工业生产的核心能耗单元，其运行成本与能源消耗在整体运营支出中占据显著比重。然而，传统节能策略往往聚焦于设备选型或运行阶段，这种“碎片化”干预虽能产生局部效益，却难以触及能耗问题的根本。全生命周期视角的介入，将节能考量从单一的使用环节拓展至规划、设计、制造、安装、运维直至报废回收的完整链条，其意义不仅在于挖掘各环节的潜在节能空间，更在于通过阶段间的协同反馈，避免因前期决策失误导致后期运行能耗的刚性锁定。可以说，全生命周期节能是对机电系统能效问题的系统性“诊断”与“治疗”，是从源头重塑系统用能逻辑的战略性转变。

作者简介：王勃（1992.02—），男，汉族，新疆乌鲁木齐，工学学士学位，工程师，研究方向：电气工程及其自动化、智能控制。

 | Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

在全生命周期框架下，节能不再仅仅是技术参数的叠加，而是一种贯穿系统存续始终的价值导向。前期设计中，合理的系统架构与负荷匹配能从根本上降低能量传递过程中的无谓损耗；制造与安装阶段，精益化工艺与施工质量直接决定了设备初始能效水平及其长期衰减速率；而运维阶段的智能调控与定期优化，则是确保设计能效得以持续兑现的关键保障。更重要的是，报废回收环节的资源化利用与无害化处理，反映了节能理念向循环经济与生态环境责任的延伸[2]。这种全维度、跨阶段的系统化节能实践，对于落实碳达峰碳中和目标、提升实体经济竞争力，以及推动机电产业向高质量、可持续方向转型升级，均具有不可替代的深远意义。

二、机电系统全生命周期节能关键技术分析

（一）规划设计阶段节能关键技术

1. 系统架构与负荷动态匹配设计

该技术聚焦于从源头化解机电系统“大马拉小车”的固有矛盾。传统设计常按极端工况叠加冗余，导致设备长期在低效区运行。关键技术包括：基于全年逐时动态负荷模拟的精确容量计算，取代粗放的指标估算法；采用分布式能源站与区域用能需求耦合的架构设计，如冷热电联供系统的容量优化配比；以及利用建筑信息模型进行管线综合排布，减少输配系统的局部阻力与压头浪费。其核心价值在于通过设计阶段的“精准定制”，使系统容量与真实负荷曲线高度吻合，避免因设计过度造成的全生命周期能耗刚性浪费。

2. 多目标协同优化与能效前置仿真

该技术强调将节能目标作为独立约束条件，与安全性、经济性并列纳入前期决策体系。具体路径包括：引入数字化孪生仿真平台，在虚拟环境中比选不同冷热源方案、水系统制式及控制策略的组合能效，提前预判运行能耗；采用全生命周期成本分析方法，综合权衡初投资与运行能耗，避免片面追求低价设备而牺牲长期能效；同时，通过被动式与主动式技术协同设计，如利用建筑热惰性进行蓄能调峰，将自然冷源、废热回收等免费能源纳入系统规划[3]。该技术旨在将节能理念“固化”于设计图纸之中，使后续各阶段的节能措施有据可依

（二）制造与装配阶段节能关键技术

1. 精益制造工艺与能效导向的物料选型

该技术着眼于设备本体制造环节的能耗与品质控制。关键技术包括：采用近净成形、低温焊接等低能耗加工工艺，减少制造过程中的热能散失与材料切削浪费；在电机、变压器等核心部件中，优先选用高导磁、低损耗的硅钢片及非晶合金材料，从材料层面降低铁损和铜损；同时，推广变频器内置化、永磁同步化等高效集成设计，减少中间传动环节的机械损耗。此外，建立制造过程的单位产品能耗限额管理体系，通过实时监测各工序能耗，倒逼工艺参数优化，确保出厂设备的基础能效水平达到或超越国家一级能效标准。

2. 模块化装配与高精度预调试技术

该技术旨在提升现场安装质量与效率，避免因施工不良导致的运行能效折损。关键技术包括：将大型机电系统拆分为标准化功能模块，在工厂内完成高精度组装与气密性检测，减少现场焊接、拼接带来的泄漏和阻力增加问题；采用激光对中、扭矩精确控制等装配工艺，保证转动设备的同轴度与动平衡，降低机械摩擦功耗；同时，引入出厂前带载模拟调试，提前校验控制逻辑与执行器响应，避免现场返工和无效试运行[4]。此技术通过“工厂预制替代现场施工”，将不确定性人为误差降至最低，有效保障了系统投入运行时的初始能效状态。

（三）运行维护阶段节能关键技术

1. 自适应预测控制与全局能效寻优

该技术突破传统 PID 反馈控制的滞后性，转向基于模型预测和人工智能的前馈调控。核心技术包括：融合气象预报、生产排程、人流密度等多源异构数据，预测未来15–30分钟的冷热负荷变化，并提前调整机组启停组合、冷冻水出水温度及冷却塔风机转速；利用深度强化学习算法，在保证舒适度的前提下，动态搜索冷水机组、水泵、冷却塔三者联合运行的最优效率点；同时，建立设备性能衰减在线监测模型，自动修正控制参数以补偿老化影响。该技术的本质是让系统从“被动响应”转变为“主动预判”，使各子系统的能耗始终逼近当前工况下的理论最低值。

2. 系统性调适与动态能效健康诊断

该技术强调通过周期性的全局调适和持续性能监测，遏制运行能耗的逐年爬升。关键措施包括：建立基于 IoT 传感器网络的能效指标实时看板，实现能耗异常快速溯源；采用大数据聚类分析方法，识别同类型设备间的能耗偏差，定位低效运行设备；并据此实施在线清洗、制冷剂充注量优化、皮带张力调整等针对性维护作业。更为重要的是，开展季节性工况切换前后的系统性联合调适，重新平衡各支路流量与压差，确保系统在新气候周期下恢复最优水力平衡状态，从而延缓设备能效衰减曲线，延长高效运行寿命。

（四）回收再生阶段节能关键技术

1. 可拆解性设计评估与高价值部件分级回收

该技术将节能视野延伸至系统退役后的物质流管理，旨在打破“报废即浪费”的线性模式。核心内容包括：在规划设计阶段即预埋可拆解接口与材料标识，便于退役时快速分离不同材质的部件；建立机电设备关键部件的性能检测与再制造评估体系，对剩余寿命达标者进行翻新后梯级利用于低负荷场景，避免重熔再造的高能耗过程；同时，开发智能拆解机器人及专用工装，提高贵金属和稀土元素的回收纯度和回收率。该技术将节能从“使用能效”延伸至“物能协同”，最大化保留设备制造阶段已投入的隐含能源。

2. 材料再生闭环与废弃物能源化利用

该技术聚焦于无法直接再用的报废材料，通过绿色化学与热工转化技术实现能量和物质的双重回收。关键技术包括：针对塑料绝缘层、橡胶密封件等有机组分，采用无氧热解或气化技术制备可燃气体或热解油，替代部分化石燃料，实现化学能的回收；对于玻璃纤维增强复合材料、印刷电路板等难分离废弃物，利用

Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

微波辅助热解或超临界流体处理，实现玻纤与树脂基体的高效分离，并分别作为建材掺料或化工原料重新进入供应链；同时，严格管控制冷剂的负压抽取与无害化销毁或再生提纯，防止破坏臭氧层且回收其高热值。此技术通过构建“制造－使用－再生－再制造”的闭环链条，大幅降低全生命周期的累计能耗与碳排放，真正实现机电系统的可持续循环。

三、机电系统全生命周期节能技术发展趋势

（一）数智融合：从经验驱动向 AI 原生型能效管理演进

机电系统节能正加速迈入“人工智能原生”时代，其核心特征不在于算法的简单引入，而在于能效知识生产方式的根本性变革。传统节能高度依赖领域专家的经验规则与机理模型，知识获取成本高、泛化能力弱。未来发展的关键趋势是构建融合物理机理与数据驱动的混合智能模型——通过物理信息神经网络将守恒定律与热力学约束嵌入深度学习框架，使预测与控制行为始终不违背基本物理规律，避免纯数据驱动带来的“反直觉”决策风险。同时，大语言模型与知识图谱技术的渗透将重塑节能决策的人机协作模式：运维人员无需理解复杂的优化算法，即可通过自然语言交互完成能效异常诊断、策略生成与方案推演[5]。更深层的变革在于，数智化平台将逐步具备“自进化”能力——通过持续积累各阶段、各工况下的运行数据与维护记录，系统能够自主发现隐含的节能潜力规律，并反向输出至规划设计阶段，形成跨阶段的经验反馈闭环。这意味着，未来的机电系统不再是被动执行节能指令的物理实体，而是具备能效认知能力的“智能体”，其节能水平将伴随数据积累而持续成长，彻底打破传统节能优化“一次定型、难以迭代”的瓶颈。

（二）柔性互济：从单体优化向电网互动与多能协同跃升

机电系统的节能边界正在从单体设备或单一建筑尺度，向外拓展至区域能源网络与新型电力系统的交互界面。核心趋势在于：机电系统不再被视为刚性负荷，而是作为柔性可调资源参与电网需求响应与动态碳排调控。关键技术方向包括基于实时碳排放因子的“碳感知”运行策略——当电网碳强度较高时，系统自动切换至蓄冷 / 蓄热供能模式，将用电需求平移至低碳时段；而在可再生电力富余时，通过智能充电桩、热泵等设备主动增容消纳绿电，实现节能与降碳的双重目标协同。进一步地，机电系统将与光伏建筑一体化、电化学储能、氢能燃料电池等分布式能源单元深度耦合，形成“源－网－荷－储”协同优化的微能网架构。在此架构下，节能的关键矛盾从“如何减少用能”拓展为“如何智慧地用能”——即在时空维度上精准匹配能量供给的清洁性与用能需求的刚性，最大限度减少弃风弃光与能量转换损失。这一趋势将倒逼机电系统在规划设计阶段即须嵌入能源交互接口与控制协议，使其在全生命周期内具备与外部能源环境动态协同的“柔性基因”。

（三）闭环再生：从单生命周期向多生命周期价值循环延伸

未来机电系统节能的最具颠覆性趋势，在于其生命周期理念从“一次性的摇篮到坟墓”彻底转向“多轮次的摇篮到摇篮”。这一转型的核心驱动力并非单纯的政策约束，而是日益凸显的经济理性——当稀土、铜材、高牌号硅钢等关键原材料的开采成本与环境成本持续攀升时，部件级的再制造与材料级的闭环回收将具备显著的性价比优势。技术发展方向聚焦于两大突破口：其一，是面向多生命周期适配的“耐久－易换”双优设计准则——关键磨损部件采用标准化快换接口，易老化密封件预留二次压紧余量，使设备在首次寿命终结后可通过最小干预恢复至不低于原性能95% 的能效水平；其二，是数字孪生驱动的“能效护照”体系——为每一台核心设备建立涵盖材料成分、制造能耗、维修记录、性能衰减曲线的数字档案，使退役评估从“经验判断”升级为“精准量化”，据此匹配合适的梯级利用场景。更深层地，这一趋势将推动机电制造业的商业模式变革——设备制造商从“卖产品”转向“卖能效服务”，通过保留设备所有权并负责全生命周期运维与回收，使制造商的内在利益与系统的长期节能表现深度绑定，从而从商业逻辑上根除“重销售、轻运维”的行业顽疾，真正构建起节能价值在时间维度和物质维度上的双重闭环。

四、结束语

综上所述，机电系统全生命周期节能并非各阶段技术的简单加总，而是一套以跨阶段协同与信息反馈为内核的系统性工程方法。规划设计阶段的决策质量决定了后续节能潜力的上限，制造安装阶段为能效兑现提供物理基础，运维阶段通过动态调适延缓性能衰减，而回收再生则完成物质与能量的价值闭环——各环节相互制约、彼此赋能，任一阶段的缺失或低效都将削弱整体成效。未来，随着数智化技术深度赋能、能源交互边界持续拓展以及循环经济逻辑的全面渗透，机电系统将逐步从“被动节能”走向“主动智能节能”，其全生命周期的能效表现有望实现质的跃升。

参考文献

[1] 胡兆帅 . 电气自动化技术在机电一体化生产线节能改造中的应用 [J]. 造纸装备及材料 ,2026,55(6):150-152.

[2] 唐林峰 . 机电设备全生命周期维保服务运营模式 [J]. 安装 ,2026(5):106-109.

[3] 刘芳霞 . 数字化技术在机电设备全生命周期管理中的应用研究 [J]. 华东科技 ,2026(3):115-117.

[4] 郑智涛 . 机电工程施工中的节能环保技术研究 [J]. 新发现 ,2025(18):121-123.

[5] 杨青 , 陈磊 , 刘凤明 . 机电设备节能技术在制造业中的应用研究 [J]. 科技资讯 ,2025,23(18):107-110.

 Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

城市供水系统升级中水厂改造与市政管网建设施工技术实践研究

方鹏
惠州大亚湾溢源净水有限公司，广东 惠州 516081
DOI:10.61369/ERA.2026100028

摘　　要： 这些年城镇化推进的步子越迈越快，饮用水水质的门槛也在不断抬高，不少城市的供水系统渐渐扛不住了——设备老化、工艺跟不上、管网漏水多，升级改造已经拖不得。本文把目光放在水厂改造和市政管网建设这两块的施工做法上，用系统韧性和全生命周期管理的思路搭了一个“源头净化—输配保障—协同管控”的技术框架。文章分别聊了水厂常规工艺升级、污泥处理施工、不停产改造组织，以及管网非开挖施工、接口处理、新旧衔接切换等方面，把关键技术环节和质量把控的法子理了一遍，提出了协同施工组织模式和全过程质量管控体系。

关 键 词： 城市供水系统；水厂改造；市政管网；施工技术

Research on Construction Technology Practice of Water Plant Renovation and Municipal Pipeline Network Construction in Urban Water Supply System Upgrades

Fang Peng
Huizhou Daya Bay Yiyuan Water Purification Co., Ltd., Huizhou, Guangdong 516081

Abstract: In recent years, as urbanization has accelerated, the standards for drinking water quality have continued to rise, and many urban water supply systems are gradually becoming unable to cope—equipment aging, outdated processes, and significant pipeline leaks make upgrades and renovations urgent. This paper focuses on the construction practices of water plant renovation and municipal pipeline network construction, establishing a technical framework of 'source purification—transmission and distribution assurance—collaborative control' based on the concepts of system resilience and whole lifecycle management. The article discusses conventional water plant process upgrades, sludge treatment construction, non-stop renovation organization, as well as trenchless pipeline construction, interface handling, and switching between new and old pipelines. It organizes key technical steps and quality control methods, proposing a collaborative construction organization model and a full-process quality management system.

Keywords: urban water supply system; water plant renovation; municipal pipeline network; construction technology

引言

城市供水系统是保障城市运行的重要基础设施，然而部分早期建设的供水设施因服役年限较长，加之用水需求持续增长，逐渐暴露出设施老化失修、工艺标准偏低、管网漏损突出等问题。据统计部分老旧城区供水管网漏损率高达20%以上，不仅造成水资源浪费，也增加了输配过程中的二次污染风险。同时新版《生活饮用水卫生标准》（GB 5749—2022）的实施对出水水质提出了更为严格的要求，传统常规处理工艺已难以稳定满足新标准，水厂工艺升级改造已迫在眉睫。城市供水系统升级涉及水厂改造、管网建设、调度优化等多个方面，其中水厂改造与市政管网建设是两大核心环节，二者在空间上相对独立、在功能上紧密关联。当前工程实践中，两者往往由不同主体分别实施，缺乏统一的施工组织与协同管控，导致工期错位、接口处理不规范、供水调度困难等问题频发，最终影响改造效果，施工期间亦频繁出现停水现象。因此系统研究水厂改造与管网建设的施工技术，探索二者协同施工模式与质量控制方法，具有重要的工程实践价值[1]。

作者简介：方鹏（1984.07—），男，汉，本科，河北省玉田县，给水排水施工工程师。

Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

一、理论基础

（一）系统韧性理论

说到系统韧性其实讲的就是一个系统碰到麻烦的时候，能不能扛得住、缓得过来、还能学着适应。城市供水系统属于那种一出事全城都跟着着急的生命线工程，它的韧性够不够，主要看设施有没有富余能力、坏了能不能赶紧修好、应急响应跟不跟得上。放在供水系统升级改造这个事儿上看，施工本身就是在给正常运行添乱子，所以怎么在改造的同时还能保证基本供水、尽量少停水，就成了施工组织里最头疼的问题。照着这个思路，水厂改造的时候就得一块一块地来，临时管线该接的接、备用水源该准备的准备；管网建设那边也得先把新管子铺好试好了，再把旧管子废掉，用户受的影响才能降到最低[2]。

（二）全生命周期管理理念

全生命周期管理这个说法，意思就是从规划设计、施工建设到运行维护、最后报废，整个过程都得通盘考虑，不能只盯着眼前。到了施工这一步，就体现在方案不能光想着怎么快点干完、质量怎么过关，还得给以后运维留方便，比如检修空间得留够、材料得挑耐用的、施工记录得整齐全了。水厂改造选设备铺管道时多想想以后维修方不方便，管网建设时流量表压力表同步装上，省得以后再刨路补装，也为智慧水务打个底子[3]。

二、水厂改造施工技术实践

（一）常规处理工艺升级改造

常规处理的升级，绕不开混凝、沉淀、过滤、消毒这四个环节。混凝这块，主要是把混合设备换成更高效的，再把投药系统优化一下。现在一般用管道混合器来代替以前的机械混合池，混合时间控制在10到30秒之间，这样药和水才能搅和均匀。投药系统也得改成自动的，原水水质一变，投药量就能跟着调，混凝效果才稳得住[4]。

（二）污泥处理工艺施工

水厂运行中会产生不少污泥，主要是沉淀池排泥和滤池反冲洗废水，不处理好就排出去既不环保也不合规。污泥处理一般走”收集—调节—浓缩—脱水—外运”的路子，施工时每个环节都得盯紧[5]。浓缩池通常做成辐流式，钢筋混凝土结构，内壁做防腐防渗。中心传动刮泥机是核心设备，安装时立柱垂直度偏差不能超过高度的0.5‰，刮臂水平度得校好，刮泥板跟池底间隙控制在50到100毫米，太近容易刮坏池底，太远泥刮不干净[6]。

（三）不停产改造施工组织

水厂改造一般都要求边供水边施工，不停产怎么组织是个老大难，实际操作中主要有这么几招，一个是分区改造，把水厂拆成几个互不耽误的生产系列，每次只停一个系列来改；再一个是搭临时处理设施，用一体化净水设备顶着，临时处理能力至少得有设计规模的30%；还有就是施工时序得安排明白，动静大的活儿尽量放到用水少的时段干[7]。

新旧系统切换是最关键的一步，切之前新系统得调试好、水质检到位，各项指标都稳了才能动。切换讲究“先并后切”，新老系统先一块儿跑一段，确认没问题了再慢慢停老系统，免得水压忽高忽低。切换那阵子水质检测得加密，浊度、余氯每2小时查一次，发现不对劲儿马上启动应急预案[8]。

三、市政管网建设施工技术实践

（一）非开挖施工技术

现在市政管网施工，非开挖的法子用得越来越多，毕竟对交通和环境的影响小。顶管施工适合大口径的干管穿马路、穿河道这种情况。工作井和接收井一般用沉井法来做，井壁不能歪，垂直度偏差不能超过井深的0.5%。顶进的时候靠激光导向系统盯着轴线，高程偏差得控制在 ±20毫米以内，轴线偏差也不能超过30毫米。减阻全靠触变泥浆，膨润土掺8% 到12%，顶进过程中得把泥浆套维护好，不然阻力一大就顶不动了[9]。

水平定向钻适合中小口径的管道穿越，干活分三步走，先打导向孔，再扩孔，最后把管子拖回去。导向孔的出入土角一般8到12度；扩孔得一级一级来，最后扩到管道外径的1.2到1.5倍；回拖之前焊接质量得检、压力试验得做，回拖的时候速度别太快，1到2米每分钟比较稳妥。要是穿河道这种特殊地段，事先一定得把地质情况摸清楚，流沙层、卵石层里最好别硬干。

（二）管道材料与接口施工

市政供水管网用的管子，常见的有球墨铸铁管、钢管和 PE 管这几种。球墨铸铁管用的是承插式柔性接口，橡胶圈得装正装到位，接口允许转个小角度，但不能超过1.5度。钢管靠焊接连，坡口开60到65度，钝边留1到2毫米；焊的时候得一层一层多道焊，每层焊完把渣敲干净，焊缝100% 得看外观，还得抽不少于20% 做超声波探伤，Ⅱ级以上才算合格。PE 管靠热熔对接，温度控制在200到220摄氏度，加热时间按壁厚来算，一般是壁厚乘以10秒，对接上了压力得保持到管子凉透。

管子防不防腐，直接关系到管网能用多少年。钢管外防腐现在普遍用三层聚乙烯，表面除锈得达到 Sa2.5级，防腐层厚度不能少于2.2毫米；里面防腐可以用水泥砂浆衬里，也可以用环氧粉末涂层。管子铺好之后得做水压试验，试验压力是工作压力的1.5倍，而且不能低于0.6兆帕，稳压1小时压力降不超过0.05兆帕、哪儿都不渗不漏才算过。

四、协同施工与质量控制

（一）协同施工组织模式

水厂改造和管网建设在功能上是连着的，施工时各干各的肯定不行，得有协同机制。首先得有统一的项目管理班子，建设单位牵头，设计、施工、监理和运营单位都参与，工期、调度、供水保障一块儿商量。其次施工计划得协同着做，水厂出水达标时间跟管网建成时间得对上，不能出现水厂改完了管网还没通这种尴尬局面。再有就是搭个信息共享平台，施工进度、水质监测、调度信息实时搁上面，施工和运营才能联动。表1把水厂改造和管

 Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

网建设几个主要环节上该协同的事儿列了出来，方便对照着看。

表1 水厂改造与管网建设协同施工要点

协同环节	水厂改造侧	管网建设侧	协同控制要点
工期衔接	新工艺调试达标时间	新管网冲洗消毒完成时间	两者偏差不超过15天
接口处理	出厂管阀门及流量计安装	进厂（出厂）管对接	管径、标高、法兰标准一致
水质保障	出水浊度≤0.3NTU，余氯0.3—0.5mg/L	管网冲洗消毒合格	切换前联合水质检测
供水调度	分区供水、临时设施保障	分段切换、旁通管设置	停水范围控制在最小
资料移交	设备参数、调试报告	管网竣工图、监测点位置	统一归档，录入GIS系统

（二）全过程质量控制

施工质量这事，得从开工盯到竣工，开工前重点是把施工方案审好、技术交底做到位，关键工序专门编方案，该请专家论证的就请；干活前跟作业人员讲明白质量标准和操作要点。施工过程中靠“三检制”——班组自检、工序互检、专职质检员专检，上道没合格别想进下道；隐蔽工程监理得旁站，留影像资料。完工后就是分项验收、系统调试和试运行，水厂改造至少试运行30天，管网工程跑15天，指标稳了才能竣工验收[10]。

哪些地方容易出质量问题心里得有数，混凝土坍落度和强度得查，设备水平度和同心度得量，管道焊接无损检测不能省，防腐层电火花检漏和厚度检测得做，水压试验的压力和时间都得记。这些数据老老实实记着，出了问题能查到源头。

五、结论

本文围绕城市供水系统升级，首先水厂改造得看原水水质和出水要求，把常规处理工艺升级到位，同时配套完善污泥处理设施。平流沉淀池的池体防渗、布水集水和排泥设备安装，均质滤料过滤的滤料级配和滤层厚度，还有污泥浓缩脱水系统的设备安装和管路衔接，这些施工质量控制的关键点都比较明确；不停产改造用分区施工、临时设施顶着、“先并后切”这些办法，确实能少影响正常供水。第二管网建设中顶管和水平定向钻各有各的适用场景，接口和防腐做得好不好直接决定管网能用多少年；新旧衔接用不停水开孔、“先建后切”的办法，过渡比较平稳。还有水厂和管网不能各干各的，得有协同施工的组织模式，统一管理、工期对上、接口协调好、信息共享起来，再加上全过程质量控制和施工期供水安全保障，工程质量和供水安全才有保障。

参考文献

[1] 严煦世，范瑾初 . 给水工程 [M].5版 . 北京：中国建筑工业出版社，2019.

[2] 刘俊，俞绍武 . 城市供水系统韧性评价与提升策略 [J]. 中国给水排水，2022,38(12):17.

[3] 王洪云，张智 . 基于全生命周期的供水管道管理方法 [J]. 给水排水，2020,46(8):112117.

[4] 住房和城乡建设部 . 给水排水构筑物工程施工及验收规范：GB 501412008[S]. 北京：中国计划出版社，2008.

[5] 住房和城乡建设部 . 给水排水管道工程施工及验收规范：GB 502682019[S]. 北京：中国计划出版社，2019.

[6] 王如华 . 现有城镇水厂技术升级改造面临的主要问题及对策 [J]. 净水技术，2012,31(04):46.

[7] 国家市场监督管理总局，国家标准化管理委员会 . 生活饮用水卫生标准：GB 5749—2022[S]. 北京：中国标准出版社，2022.

[8] 陈艳丽 . 大型水厂升级改造理念与工程实践 [J]. 给水排水，2018,44(04):1316.

[9] 乐勤，许龙，郑国兴 . 给水厂新旧系统不停产切换工程实施要点 [J]. 给水排水，2010,36(01):4751.

[10] 杨振美 . 给水排水管道非开挖施工技术的发展与应用 [J]. 市政技术，2025,43(05):8993.

Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

青海油田钻井监督三维协同培训质量管理体系构建与实践

姜楠，焦海明，钟国财，江飞，王大军
青海油田采油四厂，青海 茫崖 816401

DOI:10.61369/ERA.2026100034

摘　　要： 柴达木盆地青海油田受高原恶劣条件制约，钻井监督人才缺口突出，传统培训与现场岗位需求脱节，质量管控不足。本文构建能力－场景－管控三维协同培训质量管理体系，突破“理论＋实践”二元培训局限，实现钻井监督人才由粗放培育向精细化全过程管控转变。结合现场培训实践，阐述体系设计、构成及实施路径，通过实测数据验证应用成效，可为高原复杂工况下钻井监督队伍建设提供借鉴。

关 键 词： 钻井监督；三维协同；人才培养

Construction and Practice of Three-dimensional Collaborative Training Quality Management System for Drilling Supervisors in Qinghai Oilfield

Jiang Nan, Jiao Haiming, Zhong Guocai, Jiang Fei, Wang Dajun
No.4 Oil Production Plant of Qinghai Oilfield, Mangya, Qinghai 816401

Abstract: Restricted by the harsh plateau conditions in the Qaidam Basin,Qinghai Oilfield faces a prominent shortage of drilling supervisors.The conventional training is disconnected from on-site post requirements and lacks sufficient quality control.This paper constructs a three dimensional collaborative training quality management system covering capability scenario control dimensions,breaking the limitation of the traditional” theory-plus-practice” dual-model training,and realizing the transformation of drilling supervisor talent cultivation from extensive training to refined whole process management. Combined with on-site training practices,this paper illustrates the system’s design,composition and implementation paths,and verifies its application effectiveness through measured field data.It can provide references for the construction of drilling supervisor teams under complex plateau working conditions.

Keywords: drilling supervisor; three-dimensional collaboration; talent cultivation

一、钻井监督培训现状

钻井监督承担油气钻井项目安全、施工质量与作业效率的现场管控职责，监督人员业务水平与履职能力，直接影响钻井工程项目的最终实施成效[1]。青海油田处于柴达木盆地，高原施工条件恶劣，钻井作业安全风险突出。

海外石油企业在钻井监督人才培养方面起步较早，壳牌公司就建立了为期6年的完整培养路径，包含基层岗位历练、技术课程与管理能力训练等内容，但这套培养模式更适配普通平原油田工况[2]。国内不少油田探索过分层分类培养、师带徒等人才培养手段，重视强化人员现场实操能力，但多数培训工作依旧局限于理论授课搭配现场实践的二元模式[3]。

本文从理论和实践层面打破钻井监督培训惯用的二元培养思路，提出能力－场景－管控三维协同的培训质量管理理念，打造能够适应高原环境、技术功底扎实、具备突发事件处置能力的监督队伍，补齐现场岗位的人才短板。

二、三维协同体系构建

（一）构建原则

当前钻井监督培训存在培训需求定位精准度不足、培训模式固化单一、全流程质量管控缺失、考核评价体系不科学四项主要问题，结合高原钻井监督工作特点和培训需求综合分析，确定体系构建遵循四项核心原则：适配性原则解决“学用脱节”问题；协同性原则确保培训系统性和完整性；精细化原则实现精细化管理；可持续原则实现培训工作可持续发展。

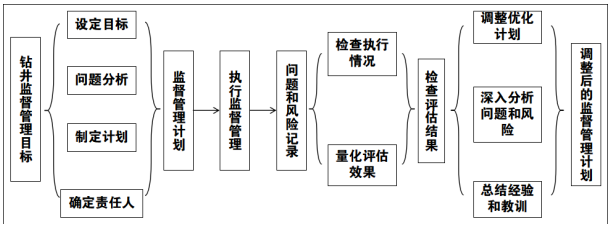


图1 钻井监督管理 PDCA 法流程图

作者简介：姜楠（1990.08—），男，黑龙江省大庆市，汉族，油气田开发高级工程师，2013年毕业于东北石油大学石油工程专业，现于青海油田采油四厂从事油气井工程工作。

 Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

依据上述原则构建“能力、场景、管控三维协同”体系：以能力维度为核心，明确培训目标和能力提升路径；以场景维度为载体，构建多元培训场景，实现理论与实践融合；以管控维度为保障，建立全程管控机制，确保培训质量。

（二）能力维度

结合高原钻井岗位履职要求，明确监督人员四大核心能力：一是高原专项专业技术能力，涵盖钻井基础、井控安全、高原钻井液适配调整、复杂地层施工等专项技术；二是应急处置能力，可快速应对井喷、硫化氢泄漏、极端风沙低温等突发工况；三是综合管理能力，具备现场协调、质量管控、风险预判等岗位能力；四是高原环境适配能力，包含身体素质、心理调适、缺氧作业安全防护等综合素养。同时按照岗位层级实施分层培养：新手监督侧重基础能力与环境适配能力培养；中级监督侧重高原专项技术应用与独立应急处置能力提升；资深监督重点培育复杂风险预判、技术创新与团队带教能力。

（三）场景维度

依托高原钻井施工特点，搭建四大差异化培训场景，实现理论与实践深度融合。

一是精准理论教学场景：以油田资深专家、优秀一线监督为师资，围绕核心内容，结合典型案例剖析、专题研讨开展沉浸式教学，规避纯理论灌输弊端。二是实景现场实操场景：推行“一对一专属带教”制度，组织学员全程参与钻井关键工序监督，常态化开展岗位实操训练，积累高原现场履职经验。三是专项应急演练场景：通过模拟实训 + 现场实战双模式，常态化开展井控险情、有毒气体泄漏、极端天气处置演练，针对性提升高原应急处置能力。四是线上自主学习场景：搭建线上培训平台，整合课程资源、案例题库，配套线上答疑、不定期抽检考核，适配高原施工点位分散、集中培训难度大的现状。

（四）管控维度

建立覆盖培训筹备、现场实施、结业跟踪的完整质量管控链条，实现培训全流程规范化管理。在培训筹备阶段，建设内部培训讲师资源库，结合岗位实际需求优化课程内容；组织参训人员摸底测试，建立个人学习档案，依据人员现状匹配差异化培养方案。在培训实施阶段，做好出勤管理，随堂开展效果检验，做好课堂过程监督，动态掌握学员学习效果以及带教老师的带教质量；根据学员短板动态调整授课内容，补齐个人能力弱项。在结业跟踪阶段，采用理论考试、实操考核、岗位履职评价相结合的综合考核模式，设置补考与回炉培训机制；学员结业之后，开展至少半年的岗位跟踪评估，记录学员上岗后的真实履职表现。综合考核得分、现场岗位反馈持续迭代培训课程与实施方式，形成闭环改进。

三、三维协同体系实践

（一）实践背景

近年青海油田钻井工作量逐年增加，监督人才缺口突出，传统培训模式的弊端严重影响队伍建设和工程质量。因此工程技术部依托“三维协同”体系开展钻井监督培训实践，选取243名优秀关键岗位人员作为培训对象，培养合格监督人员，填补人才缺口，提升队伍素质。

（二）实施过程

1. 培训前准备阶段

组建师资库，筛选12名具备高原实践经验的专家和优秀监督作为师资，开展1周专项培训；结合体系能力目标，制定基础、进阶、提升三层级培训内容，经专家评审后编制学习资料；筛选243名培训对象，建立档案，开展摸底测试，分为新手、中级、资深三组，制定差异化培训计划。

2. 培训中实施阶段

实施四大培训场景：开展12门核心课程集中授课，采用“专家授课 + 案例分析 + 互动研讨”模式，配套线上学习平台，累计学习时长超1000小时；安排学员深入现场实习，实行“一对一”带教，开展40余次实操训练，累计实操时长超800小时；组织15次模拟应急演练和8次实战演练，专家点评优化；制定严格培训纪律，专人负责过程管控，实时跟踪学习效果，及时调整培训方案。

表1 集中理论授课课程表

课程名称	课程内容
井控技术及管理	钻井井控基础知识、安全管理、井控设备及技术
青海油田地质概况、工程录井	青海油田油气勘探开发概况、探井钻井地质设计录井项目及要求
青海油田工程监督概况、管理办法	青海油田监督概况、中国石油天然气股份有限公司勘探与生产工程监督管理办法、钻井工程现场监督与质量控制规范标准宣贯
青海油田井控实施细则	青海油田井控实施细则及最新修订说明
钻井工程标准知识和HSE管理	钻井作业现场 HSE 监督检查及典型案例
钻井液知识	钻井液基础知识、现场维护与调整
井筒工程质量	井筒工程质量管理培训
固井技术及质量	固井工程、设计、施工准备及质量评价
试油中途测试技术培训	地层测试技术及资料案例分析
钻井复杂事故处理与典型案例、施工过程监督	钻井复杂事故预防、安全理念经验分享、井控风险与技术措施、狮52侧井溢流卡钻事故案例分析
监督资料填写，日常监督工作典型案例分析	监督计划书及监督资料填写、日常监督工作典型案例分析
水平井技术	水平井钻井技术在柴达木盆地油气
	开发中的应用

3. 培训后效果管控阶段

开展全方位考核，59名学员参与考核，23名合格申报资格证书，19名成功取证，取证通过率82.6%，同比高于中石油其他油田同期水平；对19名取证学员开展6个月岗位跟踪，显示其综合能力显著提升，能独立承担监督工作，有效应对复杂场景；根据考核和跟踪结果，优化体系内容和模式，提升针对性和实用性。

（三）应用效果

实践应用取得显著成效：

1. 监督队伍素质显著提升，19名取证学员能力全面提升，填补人才缺口；

Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

2. 钻井工程质量合格率提升12%，固井质量合格率提升15%，钻井事故复杂时效降低8%，未发生重大安全事故；

3. 形成“培训 – 考核 – 跟踪 – 优化”良性循环，培训质量和效果大幅提升。

四、结论

青海油田现场实践构建的三维协同培训质量管理体系，有效破解了高原钻井监督培训内容脱离现场、针对性不足等问题，打破了传统二元培训模式，依托多维度联动实现了钻井监督培训的体系化与精细化管理。项目通过扩充讲师队伍、完善激励机制，促进培训成果向现场履职能力转化；应用效果表明该体系可落地性强，参训人员取证通过率高于行业同期水平。后续可借助数字化智能化技术优化线上平台，探索 VR/AR 虚拟实操，开发岗位智能课程，推进分层分类个性化人才培养，推广发展前景广阔。

参考文献

[1] 郑延 . 石油钻井监督从业人员职业素养提升对策探析 [J]. 汉江石油职工大学学报 ,2016,29(1):82-83

[2] 陈勋 . 借鉴壳牌公司经验提高工程管理水平——赴壳牌亚太总部 (EPA) 培训学习体会 [J]. 工业技术监督 ,2010,12:25-27

[3] 柯岩等 . 建立钻井监督培训管理模式的探索与实践 [J]. 石油工业技术监督 ,2020,36(5):10-13

 Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

兰炭及 CDQ 粉配入对高炉喷吹燃料成本的影响分析

王佳明，梁立新，王宗晖
宁波钢铁有限公司，浙江 宁波 315807
DOI:10.61369/ERA.2026100035

摘　　要： 在煤炭消耗逐年下降的政策背景下，高炉喷吹煤粉供应日趋紧张，兰炭及 CDQ 粉作为替代燃料配入喷吹系统成为缓解资源矛盾的重要途径。本文结合高炉工长日常维持炉温与碱度平衡的生产实践，分析了兰炭与 CDQ 粉的理化性能及其对混合煤粉质量的影响，测算了不同配比方案下的燃料价格与燃料比变化，探讨了 CDQ 粉配入比例与风口磨损的相关性，并总结了调整煤枪频次、采用陶瓷内衬煤枪、增加煤枪深入长度及试用陶瓷衬风口等降低风口磨损的措施。研究表明，合理控制兰炭及 CDQ 粉配入比例可在保障高炉顺行的前提下有效降低喷吹燃料成本，配合煤枪与风口的结构优化可显著减轻风口磨损，为高炉喷吹系统降本增效提供参考。

关 键 词： 高炉喷吹；兰炭；CDQ 粉；燃料成本；风口磨损

Analysis of the Impact of Adding Semi-coke and CDQ Fines on the Fuel Cost of Blast Furnace Injection

Wang Jiaming, Liang Lixin, Wang Zonghui
Ningbo Iron & Steel Co., Ltd., Ningbo, Zhejiang 315807

Abstract: Against the policy background of progressively declining coal consumption, the supply of pulverized coal for blast furnace injection is becoming increasingly tight. As substitute fuels, semi-coke and CDQ (Coke Dry Quenching) fines incorporated into the injection system have become an important approach to alleviate the resource contradiction. Based on the production practice in which blast furnace operators maintain hearth heat and slag basicity balance in daily operations, this paper analyzes the physicochemical properties of semi-coke and CDQ fines and their influence on the quality of the blended coal powder; calculates the variations in fuel price and fuel ratio under different blending schemes; discusses the correlation between the blending ratio of CDQ fines and tuyere wear; and summarizes measures to reduce tuyere wear, including adjusting the injection lance frequency, adopting ceramic-lined injection lances, increasing the insertion depth of injection lances, and trial use of ceramic-lined tuyeres. The results show that, by reasonably controlling the blending ratios of semi-coke and CDQ fines, the fuel cost of injection can be effectively reduced while ensuring the smooth and stable operation of the blast furnace; combined with structural optimization of injection lances and tuyeres, tuyere wear can be significantly alleviated, providing a reference for cost reduction and efficiency improvement of the blast furnace injection system.

Keywords: blast furnace injection; semi-coke; CDQ fines; fuel cost; tuyere wear

引言

随着国家煤炭消费总量控制政策的持续推进，高炉喷吹用煤粉的采购难度与价格压力逐年增大。高炉工长在维持炉温充沛、碱度稳定和炉况顺行的同时，需要面对煤粉资源不足的现实约束。兰炭与 CDQ 粉作为价格相对低廉的碳质燃料，具备替代部分喷吹煤粉的潜力，但其硬度高、灰分与硫分波动大，配入比例提高后容易加剧风口磨损，影响高炉喷吹系统的稳定运行。如何在成本控制与设备维护之间找到平衡，成为当前高炉喷吹管理的重要课题。本文围绕配比调整、成本测算与磨损防治展开分析，以期为生产实践提供参考。

作者简介：王佳明（1989.11—），男，汉，浙江绍兴，本科，冶金工程师，从事的研究方向：高炉生产实践。

Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

一、研究背景与问题提出

（一）煤炭消耗下降的政策要求与喷吹煤粉的供需矛盾

近些年来，政府规定煤炭消耗要逐年削减，钢铁企业高炉喷吹使用的无烟煤和烟煤采购量遭到明显缩减，煤粉供应短缺的情况渐渐显露出来。高炉工长在实际生产过程中经常遇到煤粉库存少、配比不断改变的情况，只能采用低价的替代燃料。同时高炉对于喷吹燃料的发热值、灰分和硫分都有一定的要求，不能因为使用替代燃料而破坏炉温及碱度的平衡。由于煤粉供需矛盾导致采购成本上升，并且加大了配比调整的操作难度，急需从燃料结构和操作制度两个方面来解决。从生产实际情况来看，在冬季保供期间以及价格处于高位的时候，煤粉缺口会集中爆发出来，工长必须在有限的库存里先保证高炉热制度的稳定性，然后再考虑替代燃料的加入方案[1]。

（二）兰炭及 CDQ 粉作为替代燃料的可行性

兰炭是低阶煤经过中低温干馏得到的固体产物，固定碳含量较高、价格比无烟煤便宜，有喷吹的价值。CDQ 粉为干熄焦过程中产生的焦粉，粒度小、固定碳含量高，但是硬度大、磨损性强。二者在化学组成以及燃烧特性方面同喷吹煤粉存在差别，加入之后会改变混合煤粉的挥发分，灰分和发热值。从资源可获得性和经济性来说，兰炭和 CDQ 粉可以弥补一部分煤粉的不足，但是它们的配入比例要根据高炉热制度和风口磨损状况来确定，不能为了降低成本而不顾设备寿命和炉况稳定性。从生产数据可知，兰炭和 CDQ 粉的采购半径较小，供应比较稳定，可以实现连续配入。

（三）替代燃料配入对高炉喷吹系统的影响

兰炭加入之后，混合煤粉的粒度分布、硬度以及灰分都会发生改变，进而给喷吹管路、煤枪和风口带来不同程度的影响。CDQ 粉硬度大，高速喷吹时对煤枪内壁和风口内衬的冲刷磨损增大，加入的比例越大磨损越严重。兰炭燃烧性能好但是灰分中的碱性物质会改变炉渣的碱度。高炉工长要对配比调整之后的风口状况、煤枪寿命和炉温变动实施持续监视，并迅速作出调整喷吹参数的决定，从而保证高炉处在低能耗燃料组合当中依然能够保持稳定的顺行。喷吹系统输送压力和给料均匀性会因为混合煤粉流动性变化而改变，工长也要注意管路堵塞和偏流的情况。

二、兰炭及 CDQ 粉的燃料特性分析

（一）兰炭的理化性能与燃烧特性

兰炭水分低，固定碳含量一般在78% 以上，挥发分介于无烟煤和烟煤之间，可以满足高炉喷吹的基本要求。灰分中二氧化硅、氧化铝含量较高，硫分较小，在燃烧过程中火焰较短、燃尽较好。兰炭的哈氏可磨性指数比烟煤低一些，但是比 CDQ 粉要高一些。加入兰炭之后混合煤粉的挥发分略有上升，有利于提高喷吹煤粉的着火性能，但是灰分增多会加大炉渣碱度调节次数，工长在配料时要加以注意。兰炭燃烧产生的碱性氧化物含量较少，对炉渣碱度影响不大，可以作为基础替代燃料逐渐掺入[2]。

（二）CDQ 粉的理化性能与磨损特性

CDQ 粉是干熄焦系统回收的细粒焦粉，固定碳含量高、发热值接近焦炭，价格明显低于喷吹煤粉。它的主要特点就是硬度大、棱角清楚，颗粒小但是磨损性强，在高速气流的冲击下会对煤枪内壁以及风口内衬造成严重的冲刷作用。CDQ 粉灰分、硫分变化大，加入比例增大时混合煤粉灰分增加，影响炉渣碱度和铁水质量。从生产实践中得知，CDQ 粉配比越高，风口磨损速度越快，是制约它大量使用的决定性因素。CDQ 粉粒度组成里细粉所占比例大，喷吹时容易出现扬尘、偏流等现象，并且对于给料设备的密封性也有更高的要求。

（三）兰炭及 CDQ 粉配入对混合煤粉质量的影响

兰炭和 CDQ 粉按照不同的比例加入之后，混合煤粉的工业分析数据就会出现较大改变。兰炭加入可以提高挥发分、降低水分，利于喷吹输送和燃烧；CDQ 粉加入可以提高固定碳和灰分，降低挥发分，使混合煤粉的燃烧性能变差。两者一起加入的时候，混合煤粉的粒度分布变宽，硬度增大，对磨煤机以及喷吹管路的磨损加重。高炉工长要依照高炉热制度和碱度需求，把混合煤粉的灰分、硫分和发热值维持在适宜范围之内，防止由于配比不当引发炉温变动和炉渣品质变差的情况出现。混合煤粉中固定碳和挥发分的比例发生变化还会引起风口理论燃烧温度的变化，需要用风温、富氧量来加以调节。

三、配比调整对燃料成本的影响

（一）不同配比方案下的燃料价格测算

从生产数据可知，神冶1、神冶2、晋城煤、兰炭和 CDQ 粉的单价差别较大，兰炭、CDQ 粉的价格远远低于无烟煤。以干基配比为依据，加上湿基换算以及制造费用之后，可以得出各种配比方案下混合煤粉的综合单价。提高兰炭和 CDQ 粉的比例可以直接降低燃料采购成本，但是配比的改变还要考虑到磨煤电耗、煤枪消耗和风口更换费用。工长在制订配比方案的时候，要把显性的采购成本同隐性的设备损耗融合起来考虑，才会有真实的燃料成本变动显现出来。测算时还要注意干基价和湿基价之间的换算关系，水分的不同会影响入炉燃料的实际单价[3]。

（二）配比调整对燃料比的影响

配比改变之后混合煤粉的固定碳、灰分以及发热值都会发生改变，进而对高炉燃料比产生影响。兰炭加入比例增大时，混合煤粉的发热值略微降低，为了保证炉温，需要增加焦炭或者提高喷吹量，燃料比可能会有所升高。CDQ 粉加入比例增大时，固定碳含量上升但是燃烧性能变差，未燃煤粉增多会导致料柱透气性变差，从而间接提高燃料比。工长要依靠风温、富氧和焦炭负荷三者之间的配合来抵消由于配比改变而给燃料比带来的负面影响，使高炉热制度保持稳定。燃料比改变还会引起炉腹煤气量和压差的变化，要根据透气性指数来判定高炉运行状况。

（三）配比调整对燃料成本的综合影响

燃料成本是由采购单价、燃料比和设备维修费三者共同决定的。兰炭和 CDQ 粉配比增大之后，由于采购单价降低所获得的

 Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

收益会被燃料比增大以及风口磨损加重所抵消。根据生产数据可知，兰炭配比在一定范围内增大时综合成本明显降低，但是 CDQ 粉配比超过某个数值以后，风口更换次数增多，维护成本迅速上升。工长要联系高炉的实际运行数据来找到综合燃料成本最低的配比范围，达到降低成本和保护设备的目的。综合成本测算还要加入休风损失、备件库存占用等，不能只看单价来判定配比方案的好坏。

四、风口磨损机理与应对措施

（一）CDQ 粉配入比例与风口磨损的相关性

CDQ 粉硬度大，颗粒有棱角，高速运动到风口内壁上会产生切割、冲刷的作用。从生产统计结果可知，CDQ 粉加入量增大以后，风口磨损速度也随之增大，并且风口前端以及内衬部分出现了明显的沟槽和减薄现象。磨损加剧会缩短风口的使用寿命，并且会造成冷却水漏出和高炉停炉的情况发生。工长在提高 CDQ 粉配比的时候要同时加大风口检查次数，记录磨损的位置和程度，给配比调整和设备改进提供依据。磨损形态分析可以判断出是由于煤枪的对中误差造成还是燃料的硬度引起的，进而采取相应的解决办法 [4]。

（二）煤枪操作参数调整对风口磨损的改善

调节煤枪次数、加大煤枪插入深度可以改变煤粉射流和风口的位置关系，从而减小对风口内壁的直接冲刷。适当增大煤枪插入深度，使煤粉射流靠近风口中心，防止贴壁流动，可以减小局部磨损。合理地控制煤枪的频率以及喷吹的压力，使各个喷嘴的喷射量一致，防止某一个喷嘴因为负荷过大而产生偏磨的现象。工长依靠日常巡检和参数记录来不断改进煤枪的操作制度，在不改变配比的情况下有效地提高了风口的使用寿命，给高 CDQ 粉配比运行打下了基础。煤枪角度和插入深度要根据风口回旋区形状来确定，不能使射流冲刷炉墙或者引起局部过热。

（三）陶瓷内衬煤枪与陶瓷衬风口的试用效果

采用陶瓷内衬煤枪可以大大提高煤枪内壁的耐磨性，减小 CDQ 粉对枪体的磨损，延长煤枪更换周期。风口内衬加装陶瓷衬套之后，风口抗冲刷能力变强，磨损速度变慢，风口寿命明显延长。从试用结果可知，陶瓷内衬煤枪 + 陶瓷衬风口组合使用，在 CDQ 粉配比高时可以保持风口状态稳定、降低备件消耗和休风风险。工长要根据试用情况慢慢推广，还要跟踪陶瓷材料的抗热震性能和安装工艺，保证长期运行可靠。陶瓷衬套的安装间隙以及粘结工艺都会影响到使用效果，在试用期间需要积累装配和维护的经验 [5]。

五、结论与生产建议

（一）兰炭及 CDQ 粉配入的合理比例

综合燃料成本、炉温稳定性以及风口磨损状况来确定兰炭配比为 10%–15%，CDQ 粉配比不超过 8%。兰炭加入可以改善混合煤粉的燃烧性能，但是 CDQ 粉加入过多会增加采购成本。工长要依照煤粉存量，风口状况以及炉况变动来调节配比，防止长时间维持较高比例的配比致使设备损耗并引发炉况不稳定的情况出现。合理的比例还要考虑到高炉容积和风口的数量，不同的高炉磨损承受能力不一样，应该根据实际情况来制定配比的上限。

（二）降低风口磨损的综合措施

降低风口磨损要从燃料配比、煤枪操作和设备材质三个方面同时进行。控制 CDQ 粉的加入量才是根本的办法，改变煤枪的频率以及插入深度可以改善射流的分布情况，陶瓷内衬煤枪和陶瓷衬风口都是从材质上提高了耐磨性。工长应该创建风口磨损台账，对磨损情况进行分析，把操作调节同设备改良融合起来，塑造出可以被重复使用的磨损预防办法。磨损台账要记载配比、煤枪参数和风口寿命之间的联系，给之后的配比改良赋予数据支持。

（三）高炉喷吹燃料成本优化的生产建议

煤炭消耗减少的政策环境下，高炉喷吹燃料成本优化要以保证炉温、碱度的稳定为基础。工长在做配比调整之前应该先做成本测算和磨损评价工作，然后对调整后的风口进行检查，并且还要跟踪炉况的变化情况，从而慢慢积累起各种配比下运行的数据。利用兰炭和 CDQ 粉的合理配合、改进煤枪的操作制度、使用陶瓷耐磨件等措施可以达到控制风口磨损的目的并且还可以使喷吹燃料的成本不断降低。成本优化是动态的过程，要根据市场的煤价和设备的使用寿命来不断地调整配比策略。

六、结束语

兰炭以及 CDQ 粉加入到高炉喷吹系统当中，可以解决由于煤粉短缺、价格高昂而产生的问题，但是它对于风口的磨损影响也不能小视。本文根据生产数据和工长的操作经验来分析配比调整对燃料成本和设备寿命的影响，并提出控制配比、改善煤枪操作和使用陶瓷耐磨件等综合措施。合理配入兰炭和 CDQ 粉可以保证高炉顺行的同时降低燃料成本，配合风口磨损防治手段可以延长设备寿命，给高炉喷吹系统在资源约束下稳定运行提供可行途径。

参考文献

[1] 徐滋翊，陈子旋，王丛丛，等 . 高炉系统增上 CDQ 粉利用改造 [J]. 矿业装备，2024,(S1):36–37.

[2] 徐建宇，王涛，李淼，等 . 高炉 CDQ 粉配煤喷吹技术研究及应用 [J]. 云南冶金，2023,52(6):165–169.

[3] 王广伟，吴君毅，杨玉卓，等 . 基于煤质特性分析的高炉喷吹煤粉性能评价 [J]. 钢铁研究学报，2024,36(1):22–32.

[4] 曾宇，姜喆，张建良，等 . 鞍钢高炉喷吹燃料的综合特性分析 [J]. 中国冶金，2022,32(5):80–85+108.

[5] 刘文文，齐渊洪，李昊堃，等 . 基于混料设计的高炉喷吹煤配煤结构优化研究及应用 [J]. 中国冶金，2020,30(11):72–76+93.

Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

人工智能在电厂协同设计中的运用研究

崔宗尧，冀字超
山东电力工程咨询院有限公司，山东 济南 250100
DOI:10.61369/ERA.2026100036

摘　　要： 电厂设计属于电气、土建、暖通、机务、自控多专业深度耦合的复杂系统工程。传统协同设计模式存在数据孤岛突出、专业冲突多发、设计周期长、标准化程度不足等短板，难以适配新型电厂智能化、集约化、绿色化建设需求。为破解上述问题，本文系统研究人工智能技术在电厂协同设计中的应用价值与工程实现路径。结合知识图谱、大语言模型、深度学习、多智能体协同、数字孪生等关键 AI 技术，构建“数据互通 – 算法驱动 – 多专业协同 – 智能校核优化”一体化设计体系，分析人工智能在设计方案智能生成、三维建模、跨专业协同校核、合规校验、全流程迭代优化等场景的实现方式。工程实践表明，人工智能技术能够有效打破专业数据壁垒，降低设计错误率，压缩项目设计周期，提升电厂设计标准化、智能化与精细化水平。同时剖析技术落地过程中存在的数据质量参差不齐、算法工程适配不足、行业标准缺失、复合型人才供给不足等现实问题，并给出对应优化策略，可为智慧电厂设计领域技术升级与工程落地提供参考。

关 键 词： 人工智能；电厂设计；协同设计；多专业协同；智能校核；智慧电厂

Research on the Application of Artificial Intelligence in Collaborative Power Plant Design

Cui Zongyao, Ji Zichao
Shandong Electric Power Engineering Consulting Institute Co., Ltd., Jinan, Shandong 250100

Abstract: Power plant design is a complex systems engineering involving deep coupling of multiple disciplines including electrical engineering, civil engineering, heating ventilation and air conditioning (HVAC), mechanical engineering, and automatic control. The traditional collaborative design mode is plagued by prominent data silos, frequent interdisciplinary conflicts, long design cycles and insufficient standardization, which makes it difficult to meet the demands for intelligent, intensive and green construction of new-type power plants. To tackle the above challenges, this paper systematically investigates the application value and engineering implementation path of artificial intelligence technologies in the collaborative design of power plants. Integrating key AI technologies such as knowledge graph, large language model, deep learning, multi-agent collaboration and digital twin, an integrated design system of "data interconnection – algorithm-driven – multi-disciplinary collaboration – intelligent checking and optimization" is constructed. The implementation approaches of artificial intelligence in scenarios including intelligent generation of design schemes, 3D modeling, interdisciplinary collaborative checking, compliance verification and full-process iterative optimization are analyzed. Engineering practices show that artificial intelligence can effectively break disciplinary data barriers, reduce design error rates, shorten project design cycles, and improve the standardization, intelligence and refinement of power plant design. Meanwhile, practical problems emerging in technology implementation are analyzed, such as uneven data quality, poor engineering adaptability of algorithms, lack of industrial standards and shortage of interdisciplinary talents, with corresponding optimization strategies proposed. The research can provide references for technological upgrading and engineering implementation in the field of smart power plant design.

Keywords: artificial intelligence; power plant design; collaborative design; multi-disciplinary collaboration; intelligent checking; smart power plant

作者简介：
崔宗（(1983.10—），男，汉族，陕西省岐山县，大学本科，高级工程师，电力设计及咨询服务。
冀字超（2000.06.04—），男，汉族，山东省鄄城县，硕士研究生，工程师，电力设计及咨询服务。

 Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

引言

协同设计的核心目标是实现多专业、多参与主体全流程资源共享与高效联动。人工智能凭借强大的数据处理、知识推理、自主寻优、并行计算能力，成为破解传统设计瓶颈、重构电厂设计体系的重要技术手段。当前，知识图谱、大模型、多智能体协同等 AI 技术已经逐步在电力工程设计落地，推动设计模式由“人工被动校核”向“智能主动设计”、由“分专业割裂设计”向“全流程协同联动”转变。基于此，本文梳理人工智能与电厂协同设计的融合逻辑，总结典型应用场景，剖析现存问题并提出改进对策，为电厂协同设计智能化转型提供理论支撑与实践依据。

一、传统电厂协同设计模式及痛点

（一）传统协同设计工作模式

传统电厂协同设计采用专业分工、串行推进、事后集中校核的业务模式。项目立项后，总体单位统筹，土建、电气、热机、暖通、消防、自控等各专业依次开展图纸绘制、参数计算、方案编制；依靠人工提资、邮件传递、线下会议完成信息交互，最后由总体专业汇总模型图纸，开展冲突排查与方案优化。

（二）传统模式主要痛点

1. 数据孤岛现象显著。各专业使用专属设计软件，数据标准不统一，模型、参数、图纸难以共享，跨专业信息传递损耗大、同步滞后，极易产生信息偏差。

2. 多专业协同效率低下。串行工作模式限制并行作业，人工沟通成本高，提资、改稿、校核流程繁琐，中小型电厂设计周期普遍 3–6 个月，大型火电、核电项目设计周期更长。

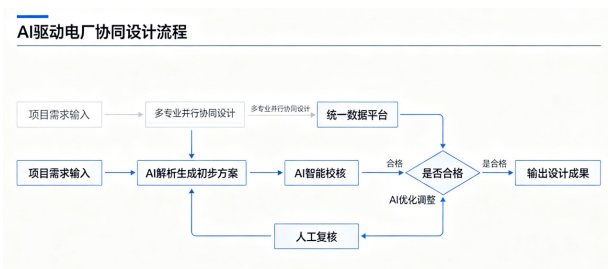
3. 设计冲突与人为误差难以消除。人工校核高度依赖设计师经验，管线碰撞、参数失配、空间冲突难以全部排查，设计缺陷带入施工阶段，增加建设成本。

4. 标准化程度不足。方案高度依赖人员经验，缺少标准化知识库支撑，不同设计人员输出成果差异明显；缺少智能优化手段，方案在安全性、经济性之间难以实现最优平衡。

5. 合规校验工作量大。电厂设计需要满足数百项电力行业标准、安全与环保规范，人工逐条校验耗时耗力，容易出现合规遗漏，埋下工程安全隐患。

二、AI 赋能电厂协同设计核心算法与技术体系

人工智能与电厂协同设计深度融合，形成以数据层为底座、算法层为核心、应用层为载体的分层技术架构，依托多种 AI 算法搭建一体化智能协同平台。关键技术如下：



算法类别	算法核心功能	在电厂协同设计中的作用
电力工程知识图谱算法	构建规范、设备、案例的关联知识库	方案智能匹配、参数自动校核、规范校验，提供专业知识底座
大语言模型交互算法	自然语言理解、文档生成、智能问答	解析设计需求，自动生成设计说明、校核报告，人机智能交互
深度学习智能建模优化算法	二维图纸转三维模型、多目标寻优	快速生成电厂 BIM/GIM 三维模型，自动优化设备、管线布局
多智能体协同调度算法	任务编排、并行调度、变更同步	多专业并行作业，自动提资，变更联动同步，打破串行约束
数字孪生联动仿真算法	虚拟仿真、多模型融合、全生命周期贯通	工况仿真、碰撞检测，打通设计施工运维数据链条

（一）电力工程知识图谱算法

知识图谱是智能设计与合规校验的基础。梳理电厂设计规范、设备参数、专业业务规则、工程案例、安全标准，构建结构化电力工程知识图谱，打通规范条文、设备模型、专业工序、合规约束之间的关联关系。依托知识图谱实现方案智能匹配、参数自动校核、规范自动适配，缓解传统设计标准记忆不全、参数匹配失误、合规校验遗漏问题，为多专业协同提供知识底座。

（二）大语言模型交互算法

大语言模型基于 Transformer 架构，具备强大自然语言理解、文本生成、语义推理能力，适配电厂设计全流程人机交互需求。利用提示工程、领域微调，将电力行业设计资料注入模型，实现设计需求解析、图纸文档自动生成、设计问题智能问答；批量处理设计说明、校核报告、技术交底等文本，减少文案类人工工作量；联动工程知识库提供实时技术咨询与优化建议，实现人机协同设计 [1]。

（三）深度学习智能建模优化算法

采用卷积神经网络、生成对抗网络等深度学习算法，结合 BIM、GIM 标准，实现电厂厂房、设备、管线系统智能三维建模。依靠多尺度特征提取算法识别二维 CAD 图纸信息，快速生成高精度三维模型；基于历史优质工程样本训练优化网络，对设备布局、管线走向开展自动优化 [2]。

三、人工智能在电厂协同设计中的典型应用场景

（一）设计需求解析与方案自动生成

传统模式依靠人工解读项目需求，容易出现理解偏差。依托大语言模型与知识图谱，AI 平台自动解析机组规模、场地条件、能耗指标、环保约束等项目需求，匹配历史工程案例快速输出多

Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

套初步方案，覆盖总平面布置、设备选型、管线规划、电气配置等内容；结合造价、占地、安全约束完成多方案对比，输出推荐方案，缩短方案设计周期。

（二）多专业并行协同与智能提资流转

针对数据孤岛、提资滞后问题，智能协同平台搭建统一数据交互通道，实现设计数据实时同步流转。基于历史提资记录构建专业关联图谱，前序专业工作完成后系统自动识别提资节点，向后序专业推送资料；依托多智能体架构支持多专业并行作业，设计变更自动同步关联专业，把专业提资错误率控制在 2% 以内 [10]。

（三）设计成果智能校核与合规校验

智能校核是 AI 协同设计的核心应用。平台依托电力工程知识图谱，内置全套行业规范，对图纸参数、设备选型、模型结构开展全覆盖校验；自动定位违规位置，给出规范依据和优化建议，弥补人工校核遗漏；同时完成文档格式、内容校验，实现设计过程可追溯，降低工程安全隐患 [3]。

（四）设计变更联动与全流程迭代优化

电厂设计变更频繁，传统模式变更需要多专业人工逐一修改，容易出现遗漏。AI 协同平台支持变更联动，某一专业参数或模型修改后，系统自动识别关联对象，同步更新相关模型、图纸与文档，减少人为疏漏；系统沉淀历次设计数据，持续迭代设计规则，实现设计闭环优化 [9]。

四、应用现存主要问题与优化对策

（一）工程数据质量与标准化问题及对策

问题：AI 算法高度依赖高质量标注数据。当前电厂行业历史数据碎片化、格式不统一，部分老旧项目资料缺失，数据标注不规范，造成知识图谱、训练样本质量受限，AI 方案推荐、智能校核精度不足。不同设计单位数据标准不统一，跨机构数据共享困难，制约平台规模化推广 [4]。

对策：行业层面统一电厂设计数据、模型、接口标准，整合火电、新能源配套电厂历史项目，完成数据清洗、标注，建设标准化工程数据库与知识图谱；建立动态更新机制，持续纳入新标准、新案例，提升 AI 模型输入样本质量，缓解数据碎片化问题 [8]。

（二）算法工程适配能力问题及对策

问题：现有通用 AI 算法面向通用工业场景开发，针对电厂热力、电气、结构力学等专业复杂计算适配不足。大模型、深度学习对电力专业机理理解深度有限，在复杂机组、特殊工况条件下，AI 输出方案实用性有待提升，尚不能完全替代高水平人工设计。

对策：推动产学研协同，针对电厂工程特点对通用 AI 算法做场景化迭代。面向热力计算、电气配置、结构安全等业务需求，训练电力领域专用大模型与优化算法，强化复杂工况下推理、优化能力，重点提升多目标优化、高精度碰撞检测能力，提高 AI 输出成果工程实用性 [5]。

（三）行业标准规范缺失问题及对策

问题：电厂 AI 协同设计整体处于发展阶段，缺少针对 AI 设计成果的审核、数据安全、模型接口、权责划分的统一行业标准。不同厂商平台架构、输出格式差异大，成果兼容性差，缺少统一质量评价体系，制约技术落地 [6]。

对策：加快出台 AI 电厂协同设计相关行业标准，明确智能设计成果输出、审核、质量评价要求，统一模型、图纸、报告格式，打通不同平台成果兼容性；建立 AI 设计合规监管机制，厘清 AI 与设计人员权责边界，规范算法应用、数据流转、成果审核全流程 [7]。

五、结论与展望

现阶段人工智能在电厂协同设计领域仍处在落地深化阶段，还面临数据标准化不足、算法工程适配有限、行业规范不完备、人才短缺等问题。未来，随着电力工程数据体系不断完善、行业专用 AI 算法迭代、标准体系健全、人才队伍建设推进，人工智能将深度渗透电厂设计全流程，结合物联网、数字孪生、大数据技术，逐步向全自主智能设计、全专业无缝协同、全生命周期一体化管控方向演进，推动电力工程设计行业数字化高质量发展，服务我国电力行业绿色低碳转型。

参考文献

[1] 基于大语言模型的输变电工程 BIM 三维设计专家系统 [J]. 电力建设 ,2025.

[2] 人工智能技术在变电站土建设计领域的深度应用与创新实践 [J]. 工程设计学报 ,2025.

[3] 基于人工智能的核电 DCS 系统设计协同一体化平台的研究及应用 [J]. 电力工程技术 ,2025.

[4] 深度学习与 GIM 标准下的变电站分布式协同智能设计算法 [J].EAI Energy Web,2025.

[5]AI 赋能工业设计软件创新助力能源行业智能化转型 [N]. 人民日报 ,2026.

[6] 多智能体协同的核电电气设计智能检索与优化方法 [J]. 中国电机工程学报 ,2025.

[7] 尧伟 . 基于人工智能技术的计算机控制系统设计 [J]. 集成电路应用 ,2025,42(1):134-135.

[8] 程学鸣 . 基于大数据和人工智能的电厂智能移动“两票”系统设计与实现 [J]. 中国高新科技 ,2024,(19):34-36.

[9] 廖元良 . 基于人工智能的发电厂自动控制系统的设计与优化 [J]. 电气技术与经济 ,2024,(8):179-180+184.

[10] 路平 . 人工智能在电厂设备故障预测与维护中的应用 [J]. 造纸装备及材料 ,2024,53(8):44-46.

 Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License