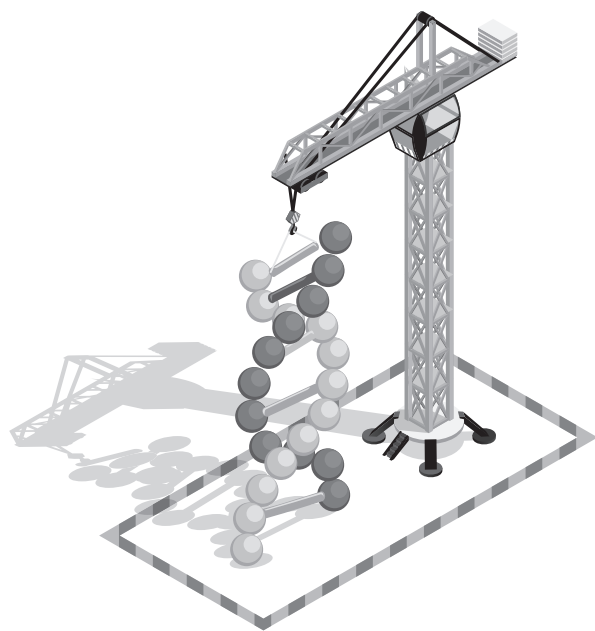


工程 研究与应用

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



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.

工程研究与应用

Engineering Research and Application

第4卷 第8期 2026年8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:

- 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。
- 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。
- 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。
- 论文未曾以任何形式公开发表过。
- 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 | 河道治理工程施工管理与质量控制研究
Research on Construction Management and Quality Control of River Regulation Projects | 胡新刚, 董明明
Hu Xingang, Dong Mingming |
| 004 | 温度应力对金刚砂耐磨地坪平整度影响及施工对策
The Impact of Temperature Stress on the Flatness of Emery Wear-Resistant Flooring and Construction Countermeasures | 闫虎成, 任华卫
Yan Hucheng, Ren Huawei |
| 007 | 工业机械设备设施防腐涂装工艺优化及防护效果研究
Research on Optimization of Anti corrosion Coating Process and Protection Effect for Industrial Machinery and Equipment Facilities | 杨海
Yang Hai |
| 010 | 数字孪生技术在泵站运行管理中的应用分析
Application Analysis of Digital Twin Technology in Pump Station Operation Management | 张烨栋, 毕敏
Zhang Yedong, Bi Min |
| 013 | 基于模糊PID与AI融合的自动化设备精度控制研究
Research on Precision Control of Automation Equipment Based on Fuzzy PID and AI Fusion | 马信为
Ma Jiwei |
| 016 | 架空齿轨游乐设施的齿轮啮合降噪优化研究
Optimization Research on Gear Meshing Noise Reduction of Overhead Gear Track Amusement Facilities | 吴兴旺
Wu Xingwang |
| 020 | 新时代化工企业过程安全管理体系化建设短板与优化策略
Shortcomings and Optimization Strategies for the Process Safety Management System Construction of Chemical Enterprises in the New Era | 邵传波, 孟琦
Shao Chuanbo, Meng Qi |
| 023 | 生产型企业重大伤亡事故的三维防御体系
Three-dimensional Defense System for Major Casualty Accidents in Production Enterprises | 唐洪峰, 李功龙
Tang Hongfeng, Li Gonglong |
| 026 | 预应力管桩预制方桩超长送桩施工技术研究
Research on Construction Technology of Precast Square Pile with Super-Long Pile Delivery for Prestressed Pipe Pile | 彭根, 刘磊, 谢德才
Peng Gen, Liu Lei, Xie Decai |
| 029 | 基于红外感应的廊道空调智能启停控制系统设计与实现
Design and Implementation of Intelligent Start Stop Control System for Corridor Air Conditioning Based on Infrared Sensing | 罗徐成
Luo Yucheng |
| 032 | 列车车底部件自动化检修装置关键技术研究
Research on Key Technologies of Automated Inspection Equipment for Train Underframe Components | 刘琛宝, 潘微微
Liu Chenbao, Pan Weiwei |
| 035 | 断层破碎带围岩稳定性分析及支护方案优化
Stability Analysis of Surrounding Rock in Fault Fracture Zone and Optimization of Support Scheme | 王文坤, 张娟
Wang Wenkun, Zhang Juan |
| 038 | 包银高铁风沙高寒地段联调联试关键技术研究
Research on Key Technologies for Joint Debugging and Testing of Baoyin High speed Railway in Wind blown and Cold Regions | 王建强
Wang Jianqiang |
| 041 | 大型机场不停航施工过程的应急管理研究
Research on Emergency Management During Non-Stop Construction of Large Airports | 何怡甫, 郜佳琳
He Yifu, Gao Jialin |

045	新基建背景下高速公路改扩建工程监理协同管理机制创新研究 Research on Innovation of Collaborative Management Mechanism for Supervision of Expressway Reconstruction and Expansion Projects under the Background of New Infrastructure Construction	许小刚 Xu Xiaogang
049	温泉给水管材性能对比与选型研究——以惠州黄沙洞某五星级酒店为例 Performance Comparison and Selection Study of Hot Spring Water Supply Pipes: A Case Study of A Five Star Hotel in Huangshadong, Huizhou	徐燕波 Xu Yanbo
052	基于 TMM 与混合整数遗传算法的 PDMS 辐射冷却多层膜仿真设计与参数优化 Simulation Design and Parameter Optimization of PDMS-Based Radiative Cooling Multilayer Films Based on TMM and Mixed-Integer Genetic Algorithm	苑孟理想, 赵娜娜, 吴嘉润, 刘文娜, 郭紫晗, 刘新红 Yuan Menglixiang, Zhao Nana, Wu Jiarun, Liu Wenna, Guo Zihan, Liu Xinhong
057	低碳施工标准调整装饰装修概预算计价规则与成本造价分析 Adjustments to Low-Carbon Construction Standards Have Influenced the Pricing Rules for Decoration and Renovation Estimates, As Well As Cost Analysis Methodologies	高玲仙 Gao Lingxian
060	柔性防护结构破坏机理与设计对策 Failure Mechanism and Design Countermeasures of Flexible Protective Structures	吴嘉焕, 方思婷, 吴雨阳, 邓芊芊, 柳春 Wu Jiahuan, Fang Siting, Wu Yuyang, Deng Qianqian, Liu Chun
064	《土木工程结构检测鉴定与加固改造》课程思政融合实践教学路径探究 Exploration of the Practical Teaching Path of Ideological and Political Integration in the Course of "Civil Engineering Structure Inspection, Appraisal and Reinforcement Transformation"	马俊 Ma Jun
067	商用冷柜推拉门限位装置的结构设计与优化 Structural Design and Optimization of Limit Device for Sliding Door of Commercial Refrigerator	邓善卓 Deng Shanzhuo
070	商用冷柜智能节能照明系统设计与实现 Design and Implementation of Intelligent Energy saving Lighting System for Commercial Refrigerators	黄海桦 Huang Haihua
073	智能留样柜管理平台的数据采集与远程监控系统研究 Research on Data Collection and Remote Monitoring System of Intelligent Sample Cabinet Management Platform	谭志乐 Tan Zhile
076	内燃机运输途中突发故障的应急指挥流程与快速响应机制研究 Research on Emergency Command Process and Rapid Response Mechanism for Sudden Faults in Internal Combustion Engine Transportation	南庆山, 付勇 Nan Qingshan, Fu Yong
079	煤沥青衍生碳基复合材料催化 CO₂ 还原性能分析 Analysis of the Catalytic Performance of Coal Tar Pitch Derived Carbon Based Composite Materials for CO ₂ Reduction	张博 Zhang Bo

建筑科学 | BUILDING SCIENCE

083	新形势下建筑工程施工现场质量管理优化研究 Research on Optimization of Quality Management in Construction Project Sites under New Circumstances	邹强, 于月琴 Zou Qiang, Yu Yueqin
086	建筑给水 PPR 管道热熔虚焊缺陷成因及预防研究 Research on the Causes and Prevention of Hot-Melt Poor Welding Defects in PPR Pipes for Building Water Supply Systems	王博宇 Wang Boyu
089	山西应县木塔木结构受力分析初探 An Initial Investigation of the Load-bearing Analysis of the Wooden Structure of the Wooden Pagoda in Yingxian, Shanxi Province	李治奇, 李海燕, 王琛, 李育红, 李果绵 Li Zhiqi, Li Haiyan, Wang Chen, Li Yuhong, Li Guomian
092	第四代住宅跃层结构施工及安全技术措施研究 Research on the Construction and Safety Technical Measures of Fourth Generation Residential Leapfrog Structures	杨东 Yang Dong
095	装配式建筑工程造价影响因素与精细化管理 Factors Affecting the Cost of Prefabricated Construction Projects and Refined Management	于佳欣, 张哲 Yu Jiaxin, Zhang Zhe
099	基于 CiteSpace 的建筑工程智能运维研究现状及发展趋势分析 Analysis of Research Status and Development Trends in Intelligent Operation and Maintenance of Construction Engineering Based on CiteSpace	李懿峰, 隋丽辉 Li Yifeng, Sui Lihui
104	高层建筑消防施工管理的核心要点及实践探讨 Core Points and Practical Exploration of Fire Protection Construction Management in High rise Buildings	钟胜 Zhong Sheng
107	基于 PLC 的大型公共建筑电气智能化系统设计 Design of Large Public Building Electrical Intelligent System Based on PLC	陈小礼 Chen Xiaoli
110	城市综合体地下室防火分隔设计方法研究 Research on the Design Method of Fire Separation in Urban Complex Basements	陈岩松 Chen Yansong
114	具身疗愈视域下海派面塑数智适老体验空间设计研究 Research on the Design of Smart and Elderly Friendly Experiential Spaces for Shanghai Dough Sculptures under the Embodied Healing Perspective	陈凯澍 Chen Kaiyi
118	建筑工程施工现场精细化管理提升策略 Strategies for Improving Fine Management of Construction Sites in Construction Projects	张鹤龄 Zhang Heling

能源科学 | ENERGY SCIENCE

121	乡村振兴背景下小型水利水电工程规划布局研究 Research on the Planning and Layout of Small scale Water Conservancy and Hydropower Projects under the Background of Rural Revitalization	李银刚, 李燕娟 Li Yingang, Li Yanjuan
125	水利水电工程施工现场安全管理风险防控探析 Analysis of Risk Prevention and Control in Safety Management of Water Conservancy and Hydropower Engineering Construction Sites	韩志勇 Han Zhiyong

128	“一牵五”导引绳展放方式在500kV输变电线路的应用 Application of the "One-Trait-Five" Guidance Rope Deployment Method in 500 kV Transmission and Transformation Lines	毛伟, 张韬 Mao Wei, Zhang Tao
131	基于 BIM 技术的水利工程项目管理模式创新研究 Research on Innovative Management Mode of Water Conservancy Engineering Projects Based on BIM Technology	吴壮壮, 倪一品, 殷海平, 贺欣文, 张宇衡 Wu Zhuangzhuang, Ni Yipin, Yin Haiping, He Xinwen, Zhang Yuheng
134	探析 RTG 改造核心电气设备配置 Exploring the Configuration of Core Electrical Equipment in RTG Renovation	罗柏林 Luo Bolin
137	宽带低插损限幅电路拓扑结构与性能优化 Topology Design and Performance Optimization of Broadband Low Insertion Loss Limiting Circuit	孙永茂 Sun Yongmao
141	绿色低碳理念下环保型钻井工艺技术优化研究 Research on Optimization of Environmentally Friendly Drilling Technology under the Green and Low Carbon Concept	刘显良 Liu Xianliang

河道治理工程施工管理与质量控制研究

胡新刚，董明明

江苏淮阴水利建设有限公司，江苏 淮安 223001

DOI:10.61369/ERA.2026080001

摘 要：河道整治工程是水利工程必不可少的一部分，包含施工管理和质量管理等各方面的问题。在施工管理方面存在很多问题，需要新的施工方法和技术来进行施工和管理才能保证施工质量和进度；对质量管理框架的设计也应当注重设计、施工技术、资源组织、人力管理四个方面相互配合，同时环境保护和安全生产是对工程建设进行持续发展的保障。良好的协同创新方式把环境与安全结合到一起，使工程项目达到更好的建设水平和生态环境效益。综合运用好管理技术和措施才能促进河道整治工程顺利完成并长久稳定工作运转。

关 键 词：河道治理；施工管理；质量控制；环境保护；项目管理

Research on Construction Management and Quality Control of River Regulation Projects

Hu Xingang, Dong Mingming

Jiangsu Huaiyin Water Conservancy Construction Co., Ltd., Huai'an, Jiangsu 223001

Abstract： River channel rehabilitation projects constitute an essential component of hydraulic engineering, encompassing multifaceted challenges including construction management and quality control. Numerous issues persist in construction management, necessitating innovative methodologies and technologies to ensure both quality and schedule compliance. The design of quality management frameworks should emphasize coordinated efforts across four key dimensions: project planning, construction techniques, resource allocation, and workforce management. Concurrently, environmental protection and occupational safety serve as critical safeguards for sustainable project development. Effective collaborative innovation approaches that integrate environmental considerations with safety protocols enable engineering projects to achieve superior construction standards and ecological benefits. Comprehensive application of management technologies and measures is essential to ensure successful completion of river rehabilitation projects and their long-term stable operation.

Keywords： river channel management; construction management; quality control; environmental protection; project management

引言

伴随着城市化进程的加快以及水环境污染越来越突出的情况下，河道整治工程作为保护生态、改善水资源利用率的有效措施，但是传统的河道整治工程施工缺乏有效的管理、质量把控以及工程中对环境、安全重视不足的问题，良好的施工组织管理及质量把控是保证工程质量的基础，更是关系着生态环境能否修复以及河道整治工程是否持久稳定。因此，在施工前进行合理规划、制定新的质量监管方案、强化现场的安全管理等都是提高河道整治效果的重要方式。采用新技术、新工艺、新管理等方法，寻求符合时代需求的新模式对河道整治工程来说是大势所趋，不仅可以提升工程质量，也可以达到节约资源、环保的效果。

一、河道治理施工管理的现状分析

（一）当前河道治理施工管理中存在的主要问题

河道治理工程项目建设管理中存在的问题主要表现为：项目管理混乱、施工技术落后、质量管理欠缺等方面。很多工程项目没有完善的管理制度，项目经理管理水平较低造成工期拖延、资金浪费的现象；施工技术水平比较落后，缺乏新的技术和方法的

应用，工作效率低下，有一定的危险性。并且在质量监管方面不够严谨，在源头上把控不住就使得个别项目建设出现了质量缺陷情况，比如水土保持措施不足、防洪堤结构不稳定等等，这些都会影响到整个项目的质量和使用寿命。

（二）施工管理流程中的关键环节分析

河道整治工程施工管理的重点在于：规划设计、施工组织、物资配备和质量管理的四个方面。其中规划设计是最基础的部分，

合理的规划设计可以有效地指导施工过程并减少不必要的劳动量以及节省成本；施工组织合理与否会直接影响到整个施工项目的施工进度及质量和工作效率，如果安排不周全则会导致工期拖延或者材料浪费，加大管理工作难度。而物资分配是否得当也是关系到工程的整体运转状况的关键因素，适当的物资分配能够使整个工程施工顺利地展开下去并且节约开支。最后则是质量把控问题尤其是对于施工中后期的质量检查更为重要，它直接关系到整个工程项目的成败与否，忽略质量把握和细节管理很有可能造成之后维修不便甚至是出现严重的事故给工程带来长久的影响以及安全上的隐患^[1]。

（三）施工管理技术的创新与发展趋势

科学技术的进步使河道治理工程施工管理技术不断创新，信息化和智能化正在成为一种发展趋势，信息化管理系统的应用提升了施工信息收集、处理以及传递的速度。管理者可以及时了解进度情况、资源配置和质量状态，做出更加合理有效的判断并且快速反应；智能化施工机器的应用提高了工作效率及精确度，在对水流调控以及河道整治等方面大大降低了人力工作量，提高了工程质量；大数据让大量的施工数据得到留存和分析，能够给予工程质量监督更好的参考，未来随着人工智能和物联网等相关科技的发展，施工管理技术也会朝着智能化、绿色化和可持续化的道路上前进，提高河道治理工程建设管理能力。

二、河道治理工程质量控制体系的构建

（一）质量控制的核心要素与原则

河岸整治工程质量控制主要依靠几个重要因素即设计、施工、材料、设备及人员等。首先，合理的设计方案才是保证工程质量的前提条件，在设计过程中任何一个决定都将影响之后的施工质量和以后工程的安全运行。其次，在施工方面的技术标准、施工工艺以及安全措施也同样重要，每一步的施工均应符合设计方案的要求，以防出现错误，最后，材料和设备的质量也决定了工程的安全性和使用年限，用料错误或设备损坏往往会出现质量问题。人的素质及管理水平是质量管理的一部分，在专业化的施工队伍以及严密的管理下可以更好地对工程质量进行把控^[2]。

（二）质量控制体系的建设与实施策略

完善质量保障体系就要从制度、技术和管理三个方面入手；首先，从制度上来看，要建立详细的工程质量管理规章，对每一个阶段的质量监管要求做出规定并要求所有参建单位严格执行；其次，在技术上来说，应用科学有效的监控方法及质量检测器材开展动态监控，做到发现问题及时处理，解决问题不留死角，在水保、土壤调理等重要工序上利用先进仪器仪表开展检验工作保证各项指标满足要求，最后，强化全过程的质量跟踪考评措施，经常性的组织质量验收和考评活动，发现问题立即整改，规避工程质量风险。最后在管理上项目管理团队要加强管理沟通，让各方面都能有效的相互配合，建立一个有力的质量保证系统。

（三）河道治理项目质量控制中常见的问题与解决对策

河流整治工程质量管理工作中存在的主要问题是施工现场管理

不到位、管理者技术水平低下以及质量监督不到位。实际施工作业中，对于如堤岸建造、水位调节等等重要工艺环节，如果忽略细节，就会使得最后的工程建设无法达到预期的效果；为此，要严格把好施工工序上的每道关卡；管理者由于自身经验浅薄或是专业技术水平不足而使整个工程的质量处于失控状态，必须对所有的管理者开展相关的技能培训来提升他们的业务素质和技术能力；质量监督不到位，尤其是在事后审查没有及时发现问题从而造成一些隐患问题的存在，所以必须要做到从前期到后期的全面监督；同时还要邀请独立的质量检测单位来进行协助监测，保证每一个施工步骤都达到验收要求。采用以上办法可以大大提高对河道建设项目的整体质量水平，保证其顺利实施并且能够长期稳定的工作运转^[3]。如图1所示。

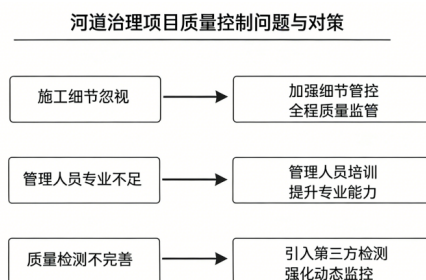


图1 河道治理项目质量控制问题与对策

三、施工过程中的关键技术与施工方案优化

（一）河道治理施工技术的现状与挑战

河道综合治理工程建设技术已经由单纯的土建发展成为以生态修复、水质净化、护坡结构为一体的综合性工程，在现有技术中包括清淤、护岸、植被修复以及生态流量控制等内容，注重生态保护与综合治理之间的平衡。虽然很多技术已经运用到实际项目建设当中去，但却存在很大的困难。一方面是传统的硬质护坡结构虽然耐磨损强但是往往会对原有生态系统造成破坏，不利于生物的生活空间，不能够满足现阶段对于河道治理对于提供生态服务的要求；另一方面，生态修复技术的应用对于不同的水流条件来讲适应程度以及稳定状况有待提高来保证治理效果能够长久。另外，工程施工过程中土方安排、机械投入以及工序安排等方面还存在着效率与质量把控之间的冲突，给工程管理带来更大难度，面对这些问题需要采用新技术和新方法来提高河道治理工程项目总体水平^[4]。

（二）工程施工方案的优化与创新策略

施工方案优化需从技术选型、人力物力配置以及工序安排等多个层面进行思考。在技术选型中可以优先考虑低影响开发（LID）、生态护坡和植物滞洪区等功能性技术的应用，在满足防治洪水的同时又对河道生态环境有所贡献；在人财物的配置上要注重机械设备、检测仪器以及材料等方面的有效调配，做到合理使用，最大限度地节约成本；工序流程上要从合理的时间节点上入手，将开挖、护坡、种草植树等各个流程井然有序地进行下去，杜绝出现交叉作业而影响整体工程进度的情况。而对施工方

案改进还应该根据动态环境监测信息及时对施工进度以及技术运用的效果作出相应的改变，形成“施工—监控—调整”闭合回路，使施工方案更加贴合实际并有效实施下去^[5]。

（三）施工技术与管理结合的案例分析

下面选择贵阳南明河水资源管理工程项目为案例，该工程施工技术和管理相结合具有典型意义。工程对南明河流域采取“浅层好氧生态河道治理技术”，以生态技术与施工管理相结合的方式开展系统治理工作取得了良好的治理成效；在工程建设过程中兼顾污水排放和生态环境修复两个目的，对整个流域建立起了湿地型生态河道体系，做到南明河水体达标至地表Ⅳ类水质，逐渐恢复河流的生态功能。截至目前为止，在南明河干流城市段沉水植物覆盖率已达到80%以上，生物种类也大大增加，底泥长达十年不用去疏浚，证明该治理措施具有长效可行的效果及技术合理性^[6]。如表1所示。

表1 贵阳南明河治理项目关键指标

指标类别	实施前	实施后（2023）
河流水质	黑臭水体	全流域达地表Ⅳ类
植被覆盖率	约10%	80%
底泥清淤周期	不定期	10年未清淤
生物多样性	物种较少	29种鱼类、58属浮游植物等

四、河道治理工程的环境保护与安全管理

（一）环境保护对河道治理施工的影响

生态环境的保护在进行河道整治工程建设的过程中起到的作用非常重要，关系到整个工程能否做到可持续发展以及生态效益问题。河道整治并不是仅仅针对水文水利方面的情况改善，更重要的是对于生态系统的一种恢复及保护行为。在施工时如果不注重环保，会引发一些水污染、生态破坏以及栖息地的丧失等问题的发生，比如在进行清淤和护岸工程当中，产生的未经处理过的废水、泥浆可能会进入水中，造成水质恶化，使水生动物受到影响；因此必须要做好环境管理工作，比如做好废水的处理及排放管理、做好工地噪声及扬尘等管理、做好植被恢复以及栖息地保护等方面的工作等。而且，在环境保护措施落实的过程中也需要在项目的前期阶段就做好准备，尽量使建设项目过程中的各类活动不会对环境造成不良影响^[7]。

（二）安全管理在施工过程中的重要性

施工期间的安全管理是保证工程建设顺利开展的前提，在河道治理这样一项复杂的治水工程当中对安全管理更是有着极高的要求。河道治理作业环境极其复杂，水量波动极大，在河岸附近容易引发滑坡、坠落以及溺水等事故的发生，所以必须要针对实际情况制定相应的安全管理预案，施工人员必须佩戴相应的防护用品并且做好相关的安全教育工作，在整个施工过程中都要符合相应安全标准，还要加大对现场的安全管理和应急处置力度，使施工过程中一旦出现问题可及时做出处理。全面的安全管理不仅可以保护好施工单位工作人员的人身安全还能够极大地减少工程施工事故的发生几率，提升工程项目的综合施工水平及进度^[8]。

（三）环境与安全管理的协同创新模式

环境保护和安全管理虽然各有侧重，在工程项目建设中密不可分而且相辅相成，协同创新的理念就是要将环境保护和安全管理工作中的资源配置和方法结合起来建立起一套完整的体系。如在河道整治工程中可以采取“环境与安全双控”机制，利用实时监测系统对水体状况实行及时的数据收集以及反馈来调节施工计划；在施工现场可以设置环境及安全观测站，随时掌握水质、空气质量和噪声水平的变化情况，杜绝施工活动对环境造成的破坏同时也保证了施工人员的生命健康。另外还要把环保安全作为项目绩效考核的一部分，明确各自的责任分工，实现不同方面的相互协作。在该方式下，提高了工程施工作业安全性的同时也提高了环保施工的目标达成率，从而达到工程的可持续发展目的。

五、结语

河道治理工程建设过程中的质量管理与控制是非常重要的，涉及到创新技术开发、环保及安全等众多环节。做好施工方案设计工作，完善质量管理体系，加强环境管理、安全管理协调性的工作都能提升河道治理工程的质量，并能够促进其长期稳定的发展。随着科学技术与管理手段的发展，未来的河道治理会越来越重视生态保护以及对水资源进行科学合理的运用，从而对水环境的维护起到更大的作用。

参考文献

[1] 武郭盛. 基于水生态学的河道疏浚施工技术优化 [J]. 科技创新与应用, 2025, 15 (28) : 189-192.
[2] 吴兴北, 缪秋香. 生态岸坡防护技术在河道生态综合治理工程的应用 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2025, (21) : 94-96.
[3] 缪秋香, 吴兴北. 水利工程河道治理的护岸防护施工措施 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2025, (18) : 211-213.
[4] 周坤峰, 李翔晖. 水利工程中河道治理施工技术及其优化措施研究 [J]. 水上安全, 2025, (11) : 176-178.
[5] 徐一尧. 疏浚底泥的原位生态护岸技术在河道治理中的应用研究 [J]. 城市道桥与防洪, 2025, (05): 192-196.
[6] 朱田伟. 河道水环境综合治理存在问题和改进措施 [J]. 河北水利, 2025, (04) : 39-40.
[7] 马克春. 河道治理工程施工中疏浚及护坡工程施工先进技术研究 [J]. 水上安全, 2025, (05): 91-93.
[8] 张雪莹. 神树村生活污水处理工程质量管理项目方案改进的研究 [D]. 哈尔滨理工大学, 2025.

温度应力对金刚砂耐磨地坪平整度影响及施工对策

闫虎成, 任华卫

中国化学工程重型机械化有限公司, 北京 102600

DOI:10.61369/ERA.2026080003

摘 要 : 金刚砂耐磨地坪因其高硬度、耐磨损的特性被广泛应用于工业厂房、仓储物流及公共建筑地面工程中, 但温度应力引发的平整度劣化问题在实际工程中较为突出。本文从温度应力与金刚砂耐磨层的作用机理入手, 分析温度变形、温度裂缝及应力累积对地坪平整度的具体影响, 并结合工程实践提出配合比优化、分仓缝设置及养护工艺等施工对策, 最后通过典型案例对施工质量控制要点进行归纳总结, 以期同类工程提供参考。

关 键 词 : 金刚砂耐磨地坪; 温度应力; 平整度; 裂缝控制; 施工对策

The Impact of Temperature Stress on the Flatness of Emery Wear-Resistant Flooring and Construction Countermeasures

Yan Hucheng, Ren Huawei

China National Chemical Engineering Heavy Machinery Corporation, Beijing 102600

Abstract : Emery wear-resistant flooring is widely used in industrial plants, warehousing logistics, and public building ground projects due to its high hardness and wear resistance. However, the issue of flatness deterioration caused by temperature stress is prominent in practical engineering. This article starts with the mechanism of temperature stress and emery wear-resistant layer, analyzes the specific impacts of temperature deformation, temperature cracks, and stress accumulation on floor flatness, and proposes construction countermeasures such as mix proportion optimization, setting of expansion joints, and curing process based on engineering practice. Finally, through typical cases, the key points of construction quality control are summarized, aiming to provide reference for similar projects.

Keywords : emery wear-resistant flooring; temperature stress; flatness; crack control; construction countermeasures

引言

金刚砂耐磨地坪在浇筑成型后, 受环境温差、水泥水化热及混凝土收缩等多重因素叠加影响, 内部极易产生不均匀温度应力, 进而导致地面翘曲、开裂乃至表层剥落, 严重影响地坪的使用功能和观感质量。与普通混凝土地面相比, 金刚砂耐磨层厚度薄、刚度大, 对温度变形的敏感性更强, 一旦温度应力超过材料抗拉极限, 平整度便难以保证。目前施工现场普遍存在对温度应力重视不足、养护不到位、分缝设置随意等问题, 是导致地坪质量缺陷频发的主要原因。因此, 系统研究温度应力对金刚砂耐磨地坪平整度的影响机制, 并制定切实可行的施工对策, 具有较强的工程实用价值。

一、温度应力与金刚砂耐磨地坪的关联机理

金刚砂耐磨地坪由基层混凝土与表面耐磨骨料层复合构成, 两者弹性模量、线膨胀系数存在一定差异, 在温度变化条件下变形不协调, 界面处随之产生剪切应力。混凝土浇筑初期, 水泥水化放热使内部温度急剧升高, 峰值过后随散热降温, 温降幅度往往达 20 ~ 40℃, 由此产生的收缩受到地基摩擦约束, 拉应力在板内持续积聚。金刚砂耐磨层因厚度仅 3 ~ 5mm、刚度较大, 对基层变形的跟随性较差, 当基层产生微小翘曲或错动时, 耐磨层率先承受集中拉应力。此外, 昼夜及季节温差形成周期性热胀冷

缩, 温度应力反复作用下材料疲劳损伤逐步累积, 加之金刚砂骨料与水泥基体的界面本身存在微缺陷, 裂缝萌生门槛相对较低, 这是金刚砂耐磨地坪在温度作用下易出现质量问题的根本原因^[1]。

二、温度应力对金刚砂耐磨地坪平整度的影响分析

(一) 温度变形引起的翘曲与起拱问题

混凝土板在厚度方向存在温度梯度时, 上下表面热膨胀量不一致, 板体被迫产生弯曲变形, 这一现象在大面积薄板结构中尤为突出。对金刚砂耐磨地坪而言, 白天太阳辐射或厂房内供暖散

热使板面温度高于板底，热膨胀差导致板角和板边向上翘起，脱离基层形成悬空；夜间降温工况下板面收缩快于板底，则表现为板中部微微隆起。翘曲变形量与板块尺寸的平方成正比，分仓间距越大，翘曲量越显著，这也是大间距分仓条件下板角破坏最为集中的根本原因。起拱则多发生在连续高温天气或室内持续供热阶段，板体膨胀受到相邻板块挤压约束，压应力积聚超过地基摩擦阻力时，板块沿薄弱截面整体隆起，轻则形成高低错台，重则出现板块崩碎^[2]。需要指出的是，翘曲和起拱往往交替出现，白天升温起拱、夜间降温翘曲，反复循环使板边角部位承受持续的疲劳应力，混凝土与金刚砂耐磨层之间的界面粘结强度逐渐削弱，一旦脱层，后续即便温度趋于稳定，平整度也难以自行恢复。工程检测中，板角翘曲引起的局部高差通常是最先被发现的外观缺陷，2m 靠尺测量偏差超出规范限值时，往往同步伴随空鼓和表层松散，说明翘曲变形已对结构整体性造成实质性损伤，单纯的表面修补难以解决根本问题。

（二）温度裂缝的形成规律及其对平整度的破坏

温度裂缝的形成具有明显的阶段性规律，大致可分为早期塑性开裂、硬化期收缩开裂和长期使用开裂三个阶段，各阶段成因不同，对平整度的破坏方式也有所差异。早期塑性阶段发生在浇筑后数小时内，此时混凝土尚未硬化，表面水分蒸发速率过快形成负压，叠加水化热升温导致的体积变化，极易在表面产生浅而密的发状裂缝，这类裂缝深度有限，初期对平整度影响不大，但会成为后续水分和有害物质侵入的通道，加速劣化进程。硬化期收缩开裂通常发生在浇筑后 24 ~ 72h，混凝土强度仍处于快速增长阶段，温降收缩产生的拉应力已超过材料当时的抗拉强度，裂缝在约束最弱处贯通，走向多垂直于板块长边或沿柱边、墙角呈放射状分布。这类裂缝一旦贯通全截面，两侧板块即形成独立受力单元，在荷载作用下发生差异沉降，直接造成可见高差，是影响平整度最主要的裂缝类型。长期使用阶段的开裂则源于温度应力的持续累积，既有微裂缝在反复温度循环中缓慢扩展，新的裂缝也可能在应力集中部位萌生。裂缝边缘在叉车、重型设备反复碾压下动态受力，骨料逐渐松动脱落，缝口扩大并伴随边缘破碎，形成肉眼可见的凹槽和高低差。实测数据表明，未经有效处理的贯通裂缝两侧，竖向错台在投入使用后一年内可从不足 1mm 扩展至 3mm 以上，在高频叉车作业区域甚至超过 5mm，已严重影响运营安全和地坪寿命。

（三）温度应力累积效应与地坪长期平整度退化

温度应力的累积效应是一个被工程界长期低估的问题，其危害往往在地坪使用数年后才集中显现。每次温度循环对混凝土内部微结构造成的损伤量极小，但年复一年的反复作用使损伤持续叠加，材料力学性能逐渐退化，具体表现为骨料与水泥石界面过渡区微裂缝密度增加、混凝土弹性模量下降、抗拉强度降低^[3]。对金刚砂耐磨层而言，其与基层混凝土的界面是整个地坪系统中最薄弱的环节，界面粘结强度随温度循环次数的增加呈非线性下降趋势，初期每次循环造成的强度损失微乎其微，但当累积损伤超过某一临界值后，粘结失效速率明显加快，空鼓面积迅速扩大。北方地区年均有效温度循环次数多，夏季高温与冬季严寒之间的

温差可达 60℃ 以上，地坪平整度退化速率显著高于气候温和地区；工业厂房内因冶炼、焊接、烘干等工艺产生局部持续高温，温度梯度在平面内分布极不均匀，高温区附近累积损伤尤为集中，往往成为地坪最先出现大面积损坏的区域。从工程寿命周期角度来看，缺乏有效温控措施的金钢砂地坪，在使用满三个完整冬夏周期后，平整度检测不合格率普遍超过 30%，修补频率与维护费用随使用年限呈指数级增长。因此，在工程设计和施工阶段对温度应力累积效应进行前瞻性预控，其全生命周期经济效益远优于依赖后期反复修补的被动应对策略。

三、温度应力影响下金刚砂耐磨地坪的施工对策

（一）材料配合比优化与温度应力的调控

从源头控制温度应力，关键在于降低混凝土水化热峰值并提高材料自身的变形协调能力。配合比设计上，宜采用低水化热的矿渣硅酸盐水泥或复合水泥，掺量控制在适宜范围，同时以粉煤灰或矿粉等掺合料替代部分水泥，可有效延缓水化放热速率、降低温峰；水胶比建议控制在 0.40 以下，减少多余自由水蒸发引起的收缩。骨料级配上，适当增大粗骨料粒径、减少细骨料用量，有助于降低浆体体积、减小收缩量。金刚砂耐磨骨料的撒布量与撒布时机同样影响温度应力传递路径，过早撒布会随基层混凝土大幅收缩而产生内应力集中，宜待基层混凝土初凝前后、表面泌水基本消失时分次撒布并压实，使耐磨层与基层形成良好咬合，增强界面协同变形能力。此外，在混凝土中掺加聚丙烯纤维或钢纤维，可有效提升材料抗裂韧性，延缓温度裂缝的扩展速度。

（二）分仓缝与伸缩缝的合理设置

分仓缝的本质是人为设置的应力释放通道，通过预先引导裂缝在设定位置形成，避免无序开裂对平整度和使用功能造成损害。分仓间距的确定需综合考虑板厚、混凝土强度、地区温差及地面荷载等因素：普通室内工业地坪，板厚 100 ~ 120mm 时，分仓间距一般控制在 5m × 6m 以内；昼夜温差超过 15℃ 的北方地区或有局部热源的厂房，建议缩减至 4m × 4m ~ 4m × 5m；对平整度要求较高的精密仓储或洁净厂房，可进一步压缩至 3m × 4m。分仓缝宜采用无齿锯切割，切割深度为板厚的 1/3 ~ 1/2，最小不低于 30mm；切割时机是关键控制点，一般在混凝土抗压强度达到 8 ~ 10MPa（约浇筑后 24 ~ 48h，具体视气温而定）时进行，过早切割锯缝边缘易崩边，过晚则自然裂缝已先行形成，切缝失去预控意义^[4]。切缝完成后应及时清理缝内锯末和灰尘，待地坪养护结束并完全干燥后再进行填缝处理，填缝材料应选用硬度适中的聚氨酯或环氧改性弹性嵌缝胶，既具备一定承压能力以传递荷载，又能允许缝两侧板块在温度变化时产生微小相对位移而不破坏密封性。伸缩缝设置位置应与结构伸缩缝、沉降缝重合，并在柱边 200mm 范围内、墙边 100mm 范围内设置分离缝，缝宽 10 ~ 20mm，防止结构变形传递至地坪造成集中开裂。平面布局上，应避免出现尖角板块和非矩形板块，锐角处在温度应力集中时最先破损，一旦发现布局不合理，宁可调整施工流水段划分，也不应迁就施工便利而留下隐患。

（三）养护工艺对温度应力控制的关键作用

养护是控制温度应力最直接、成本最低的手段，却常被施工现场忽视。金刚砂耐磨地坪收面完成后，应在12h内覆盖塑料薄膜或湿麻袋进行保湿养护，防止表面水分过快蒸发与内部温差叠加造成早期开裂。养护时间不得少于7d，在干燥、大风或高温环境下应延长至14d。冬季施工时，基层混凝土入模温度不宜低于5℃，浇筑后须覆盖保温材料，使内外温差控制在25℃以内，避免因骤冷引发温度冲击裂缝；夏季高温施工则应选择气温较低的早晨或傍晚浇筑，必要时对骨料和拌合水进行预冷处理，将入模温度控制在30℃以下。养护期间严禁在地坪上行车或堆载，防止早期荷载与温度应力叠加造成不可逆损伤。对于大面积地坪，有条件时可采用蓄水养护，利用水的热容量均衡表面温度波动，效果优于单纯覆盖养护。

四、工程实践与质量控制要点

（一）典型工程案例分析与平整度检测评价

某北方物流仓储项目，建筑面积约2万m²，采用金刚砂耐磨地坪，施工时值夏末秋初，昼夜温差约18℃。初期因分仓间距设置为8m×8m、养护覆盖不及时，地坪完工后约10d出现大量不规则裂缝，板角翘曲明显，2m靠尺检测最大偏差达6mm，远超规范4mm限值，局部区域叉车行驶时产生明显颠簸。问题确认后，施工单位对裂缝进行环氧灌缝处理，并对翘曲板角采用切割重新灌浆压平，同时补切分仓缝将间距缩减至5m×5m。整改后平整度检测合格率由不足60%提升至91%，但修补痕迹影响观感，部分区域仍存在轻微色差^[5]。该案例说明，分仓间距过大和养护滞后是温度裂缝与翘曲的直接诱因，事后补救代价远大于前期预防投入，也证明平整度检测应作为过程控制手段而非竣工验收的终点，建议在养护结束后、正式交付前分批检测，发现偏差及时处置。

（二）施工质量控制标准与验收要点

金刚砂耐磨地坪的质量控制应覆盖原材料进场、配合比确认、浇筑成型、养护及验收全过程。原材料方面，金刚砂骨料须提供出厂检验报告，莫氏硬度不低于7级，含泥量不超过1%；水泥应附水化热检测数据，进场后抽样复验。浇筑过程中，每工作班应至少留置一组标准养护试块和一组同条件试块，用于跟踪强度发展情况，指导分仓缝切割时机。平整度验收采用2m靠尺和楔形塞尺检测，普通厂房地面允许偏差不超过4mm，有精密设备或高标准物流要求的场所应控制在2mm以内；地坪表面不得有空鼓，用250g钢锤轻击检查，空鼓面积超过400cm²或位于板角、缝边者须返工处理。验收时还应检查分仓缝的切割深度、填缝质量及耐磨层厚度，厚度偏差不超过±1mm。交付后建议在使用满一个冬夏循环后进行一次复查，重点排查温度应力累积引发的新增缺陷，及时封缝处理，以延长地坪整体使用寿命。

五、结论

温度应力是影响金刚砂耐磨地坪平整度的核心不利因素，其作用贯穿施工期与使用全周期。从机理层面看，水化热温降、环境温差及耐磨层与基层的变形不协调共同构成温度应力的来源；从表现层面看，翘曲起拱、温度裂缝及长期累积损伤是平整度劣化的三种主要形式。针对上述问题，施工阶段应从材料配合比优化、合理分仓缝设置和精细化养护三方面协同介入，将温度应力控制在材料承受范围之内；工程实践表明，分仓间距控制在5m×6m以内、养护时间不少于7d、切缝时机准确，可大幅降低裂缝发生率，平整度合格率显著提升。质量控制须贯穿全过程，验收标准应结合使用功能合理选取，并在交付后定期复查，做到早发现、早处置，从而有效保障金刚砂耐磨地坪的长期使用质量。

参考文献

- [1] 徐浩, 伍佳明. 金刚砂耐磨地坪施工及控制要点[J]. 四川建材, 2026, 52(2): 165-168.
- [2] 夏海鹏. 超大面积金刚砂耐磨地坪施工技术研究[J]. 陕西建筑, 2025(9): 95-101.
- [3] 丁华柱, 金建杰, 尹建明, 等. 金刚砂耐磨地坪施工要点及常见质量问题预防[J]. 四川建材, 2024, 50(7): 116-118.
- [4] 傅成伟. 金刚砂耐磨地坪施工与养护技术探讨[J]. 四川水泥, 2024(4): 150-152.
- [5] 陈大伟. 大面积金刚砂耐磨地坪面层施工工艺及质量控制分析[J]. 中国建筑装饰装修, 2023(12): 162-164.

工业机械设备设施防腐涂装工艺优化及防护效果研究

杨海

天津滨海概念人力信息科技有限公司, 天津 300450

DOI:10.61369/ERA.2026080006

摘 要 : 工业机械设备设施的腐蚀问题严重影响其服役寿命、运行安全性及生产成本,防腐涂装是最经济有效的防护手段之一。本文针对现有工业机械设备防腐涂装工艺中存在的涂装前处理不规范、涂料体系选型与配套性差、施工过程控制不严及质量检测体系不完善等问题,从涂装前处理、涂料体系与涂层结构、施工与固化参数、质量检测与过程控制四个核心环节,设计了系统性的工艺优化方案。通过以 Q235 碳钢为基体的对比实验,采用中性盐雾试验、物理力学性能测试、电化学性能测试及微观形貌分析等方法,对优化前后的涂装防护效果进行验证。实验结果表明,优化后的防腐涂装工艺可显著提升涂层的耐腐蚀性、附着力、硬度及耐磨性,降低腐蚀电流密度、提高涂层致密性,1000h 中性盐雾试验后涂层腐蚀面积占比不足 5%,防护效果大幅优于传统工艺。本文研究可为工业机械设备设施防腐涂装工艺的工程应用与优化升级提供理论依据和实践参考。

关 键 词 : 工业机械设备;防腐涂装;工艺优化;涂装前处理

Research on Optimization of Anti corrosion Coating Process and Protection Effect for Industrial Machinery and Equipment Facilities

Yang Hai

Tianjin Binhai Concept Human Resources Information Technology Co., Ltd., Tianjin 300450

Abstract : The corrosion problem of industrial machinery and equipment facilities seriously affects their service life, operational safety, and production costs. Anti corrosion coating is one of the most economical and effective protective measures. This article addresses the problems of non-standard pre-treatment, poor selection and compatibility of coating systems, lax construction process control, and incomplete quality inspection systems in the existing anti-corrosion coating process for industrial machinery and equipment. A systematic process optimization plan is designed from four core links: pre-treatment, coating system and structure, construction and curing parameters, quality inspection and process control. Through comparative experiments using Q235 carbon steel as the substrate, neutral salt spray test, physical and mechanical performance testing, electrochemical performance testing, and microstructure analysis were used to verify the coating protection effect before and after optimization. The experimental results show that the optimized anti-corrosion coating process can significantly improve the corrosion resistance, adhesion, hardness, and wear resistance of the coating, reduce the corrosion current density, and improve the coating density. After 1000 hours of neutral salt spray test, the corrosion area of the coating accounted for less than 5%, and the protective effect was significantly better than traditional processes. This study can provide theoretical basis and practical reference for the engineering application and optimization upgrade of anti-corrosion coating technology for industrial machinery and equipment facilities.

Keywords : industrial machinery and equipment; anti corrosion coating; process optimization; pretreatment before painting

引言

多数工业机械设备长期服役于复杂恶劣的环境中,面临着大气、水汽、酸碱盐介质、机械摩擦等多重因素的侵蚀,金属基体易发生腐蚀失效,表现为表面锈蚀、涂层脱落、结构破损等现象,不仅会缩短设备服役寿命、增加设备维修与更换成本,严重时还会引发设备故障、生产中断,甚至造成安全事故,带来巨大的经济损失和安全隐患。近年来,国内外学者针对工业防腐涂装技术开展了大量研究,在新型防腐涂料研发、涂装工艺改进等方面取得了一定进展,但现有研究多侧重于单一环节的优化或实验室层面的性能验证,缺乏结合

工业生产实际工况，对涂装全流程（前处理、涂料选型、施工、固化、检测）的系统性优化研究，且对优化工艺的实际防护效果缺乏全面、系统的实验验证，导致研究成果难以有效转化为工程应用，无法从根本上解决工业机械设备的腐蚀难题。基于此，本文针对现有工业机械设备防腐涂装工艺存在的核心问题，结合工业生产实际工况，开展防腐涂装工艺的系统性优化研究，设计科学合理的优化方案，涵盖涂装前处理、涂料体系与涂层结构、施工与固化参数、质量检测与过程控制四个核心环节。通过实验室对比实验，从耐腐蚀性、物理力学性能、电化学性能等方面，全面评价优化工艺的防护效果，验证优化方案的有效性和可行性，旨在解决传统涂装工艺存在的痛点，提升工业机械设备防腐涂装质量和防护水平，延长设备服役寿命，降低生产成本，为工业机械设备设施防腐涂装工艺的工程应用与优化升级提供理论依据和实践参考。

一、现有防腐涂装工艺问题剖析

（一）涂装前处理工艺存在的问题

现有大部分的防腐涂料侧重实验室研制，重视材料的性能，未注重与工程实际情况和现场施工的适应性^[1]。涂装前处理是防腐涂装的基础，核心是去除设备基体表面油污、铁锈等杂质，形成洁净粗糙表面，其质量直接决定涂层附着力和防护效果^[2]。当前多数企业前处理工艺存在诸多不规范问题，除油不彻底，传统除油方式易留油污或除油剂，导致涂层起泡、脱落，破坏涂层连续性；除锈不达标，人工打磨效率低、质量不均，喷砂除锈参数不当，影响涂层与基体结合强度；钝化处理缺失或不规范，部分企业省略该环节或工艺参数不合理，钝化膜防护效果差，且工件前处理后放置过久易再次氧化，导致前处理失效，影响涂层质量。

（二）涂料体系选择与配套性问题

涂料体系的选择及配套性是防腐涂装效果的核心，不同工况的机械设备对涂料耐腐蚀性、耐磨性、耐高温性等要求不同，选型不合理或配套性差会降低涂层防护性能、缩短使用寿命^[3]。当前主要存在三大问题，涂料选型与工况不匹配，部分企业未充分考虑设备服役环境（如腐蚀介质、温湿度、机械载荷等），盲目选用通用型涂料，无法满足实际需求，如化工设备用普通醇酸涂料会快速老化脱落，高温设备用不耐温涂料会软化粉化。涂料配套性差，多涂层体系中，企业为降本选用不同厂家、类型涂料，或底漆与面漆干燥、固化条件不匹配，导致层间附着力差、剥离、开裂、起泡^[4]。涂料质量参差不齐，部分企业选用不合格涂料，涂层致密性差、孔隙率高，易引发设备腐蚀，且耐老化、耐磨性差，缩短服役寿命。

（三）施工工艺与过程控制问题

施工工艺与过程控制是防腐涂装质量的关键，施工参数控制不当会直接影响涂层性能与防护效果，当前主要存在四大问题。涂层厚度不均，人工涂刷操作不规范、喷涂参数控制不当，导致厚度偏差大，无法达到设计要求。施工环境控制不严，缺乏防尘、防潮、控温设备，温度、湿度、粉尘等因素引发涂层开裂、起泡、表面有颗粒等缺陷。干燥与固化参数不合理，为赶进度缩短干燥时间、固化温湿度控制不当，导致涂层起泡、硬度不足、老化加速等问题。施工人员操作不规范，缺乏专业培训，涂刷顺序、喷涂角度等不当，出现流挂、漏涂等缺陷，降低防护效果。

二、防腐涂装工艺优化方案设计

（一）涂装前处理工艺优化

针对现有涂装前处理除油不彻底、除锈不达标、钝化不规范等问题，结合工业生产实际，从三大核心环节优化，保障前处理质量，为后续涂装筑牢基础^[5]。除油采用碱洗 + 水洗 + 溶剂复洗复合工艺，替代传统单一方式，控制碱洗温度60~80℃、时间15~20min，清水冲洗后用环保有机溶剂复洗，确保无油污残留。除锈根据基体材质和锈蚀程度选方式，喷砂除锈需达Sa2.5级以上，手工除锈达St3级以上，喷砂参数优化后确保除锈彻底且表面粗糙度达标，手工打磨后吹净灰尘，立即进入钝化环节。钝化采用环保磷酸锌钝化剂替代铬酸盐，控制浓度5%~8%、温度40~50℃、时间5~8min，冲洗后80~100℃烘干10~15min。同时严控前处理后工件放置时间不超过2h，超时需重新处理。

（二）涂料体系与涂层结构优化

结合机械设备服役工况，优化涂料体系选型、完善涂层结构，可保障涂料适用性与配套性，提升涂层防护性能^[6]。涂料选型需按服役环境分类：普通大气环境采用环氧富锌底漆 + 环氧云铁中涂 + 聚氨酯面漆，实现长效防腐；化工、冶金等强腐蚀环境选用环氧玻璃鳞片底中涂 + 氟碳面漆，阻挡腐蚀介质渗透；高温（>150℃）环境采用有机硅耐高温底面漆，保障高温下性能稳定。同时选用符合国标、口碑良好的涂料，确保各项指标达标。涂层结构优化需合理分配厚度，底漆60~80μm、中涂80~100μm、面漆40~60μm，总厚度180~240μm，可按工况调整。选用同一厂家配套涂料，严控涂刷间隔，确保前一层完全干燥固化后再涂下一层，避免层间剥离、起泡、开裂等问题。

（三）施工与固化工艺参数优化

为解决施工工艺与过程控制问题，优化施工方式、环境及固化参数，规范操作，保障涂装质量稳定^[7]。施工方式结合工件结构尺寸选择，大面积平整表面采用喷涂，参数控制为喷枪压力0.3~0.5MPa、距离200~300mm、速度30~50cm/s、角度90°，涂层厚度偏差±10μm内；小型复杂结构采用刷/滚涂，遵循“先上后下、先左后右、先难后易”原则，用测厚仪实时检测并及时调整。施工环境搭建专用车间，控温15~35℃、湿度≤60%、粉尘≤10mg/m³，禁止恶劣天气露天施工并保持通风。固化参数按涂料类型优化，确保完全固化。同时加强施工人员专业培训，涵盖涂料

性能、工艺参数等内容,考核合格后方可上岗,减少人为影响。

（四）质量检测与过程控制体系优化

为确保涂装质量达标,需建立完善的质量检测与过程控制体系,对涂装全流程严格监控^[9]。前处理需按标准抽样检测,除油采用水膜法(5min 水膜不破裂脱落),除锈采用目视法与粗糙度仪(Ra40~80 μm,无杂质),钝化采用盐雾试验(5%NaCl 溶液浸泡24h 无锈蚀变色),不合格工件需重新处理。施工过程中,涂层厚度用测厚仪逐点检测(每平方米≥5点),涂刷质量目视检查无漏涂、流挂等缺陷,每2h 检测一次施工环境。涂层固化后检测附着力(划格无脱落)、耐腐蚀性(中性盐雾试验1000h 无异常)及物理力学性能,确保符合设计要求。同时建立全过程台账实现可追溯,成立质量控制小组优化工艺,建立质量反馈机制,分析不合格原因并采取改进措施,避免同类问题重复发生。

三、优化工艺的防护效果实验与评价

（一）实验设计与试样制备

实验旨在通过实验室加速腐蚀、物理力学性能、电化学性能测试及微观形貌分析,对比优化前后防腐涂装工艺的防护效果,验证优化方案有效性,为工业应用提供实验依据^[9]。试样以工业常用 Q235 碳钢为基体,尺寸100mm×50mm×5mm,分两组制备:对照组采用传统涂装工艺,实验组采用优化后工艺。试样制备流程为基体打磨→除油→除锈→钝化→烘干→底漆涂刷→固化→中涂涂刷→固化→面漆涂刷→固化,严格控制参数,确保两组涂层总厚度一致(200±10 μm),经目视检查无漏涂、流挂等缺陷后用于实验。实验仪器包括盐雾试验箱、划格试验仪、电化学工作站、SEM 等;试剂有5%NaCl 溶液、碱性除油剂、钝化剂及各类涂漆,均符合国家标准。

（二）实验室加速腐蚀试验与效果分析

采用中性盐雾试验(NSS)对两组试样进行加速腐蚀试验,按照 GB/T 10125-2021《人造气氛腐蚀试验 盐雾试验》标准执行,试验条件:盐雾浓度5%NaCl 溶液,溶液温度35℃,盐雾沉降量1~2mL/(h·cm²),试验时间1000h。试验过程中,每24h 观察一次试样表面状态,记录涂层的起泡、脱落、锈蚀情况,试验结束后,计算涂层的腐蚀面积占比,评价涂层的耐腐蚀性。试验结果表明:对照组试样在盐雾试验480h 后,表面开始出现起泡现象,随着试验时间的延长,起泡数量增多、面积扩大,720h 后涂层开始出现脱落,露出基体,1000h 后,涂层腐蚀面积占比达到35%以上,基体表面出现明显锈蚀;实验组试样在盐雾试验

1000h 后,表面无明显起泡、脱落现象,仅局部出现轻微变色,涂层腐蚀面积占比不足5%,基体表面无锈蚀。由此可见,优化后的涂装工艺可显著提升涂层的耐腐蚀性,延长涂层的服役寿命。

（三）涂层物理力学性能测试

对两组试样涂层的附着力、硬度、耐磨性进行测试,具体方法及结果如下:附着力采用划格试验法(GB/T 9286-1998),划格间距1mm,经胶带撕拉后观察,对照组附着力等级为2级(局部脱落),实验组为0级(无脱落),说明优化工艺可显著提升涂层与基体结合强度^[10]。硬度采用 D 型邵氏硬度计(GB/T 2411-2008),随机选取5个测试点取平均值,对照组硬度65D,实验组82D,表明优化工艺可提升涂层硬度及抗划伤能力。耐磨性采用磨损试验仪(GB/T 1768-2006),试验载荷10N、转速500r/min、时间100min,对照组磨损量0.08g,实验组0.03g,说明优化工艺可增强涂层耐磨性,减少机械磨损破坏。

（四）涂层电化学防护性能研究

采用电化学工作站,通过动电位极化曲线和交流阻抗谱(EIS)测试两组试样涂层的电化学防护性能。测试介质为3.5%NaCl 溶液,温度25℃,试样测试前浸泡介质24h 以保证充分接触。动电位极化曲线测试范围-1.5V~0.5V(相对于SCE),扫描速度1mV/s,以腐蚀电流密度和腐蚀电位评价性能。结果显示,对照组腐蚀电流密度1.2×10⁻⁶A/cm²、腐蚀电位-0.65V,实验组分别为8.5×10⁻⁸A/cm²、-0.42V,实验组性能更优,可有效抑制基体腐蚀。EIS 测试频率范围10⁻²Hz~10⁵Hz,交流信号幅值10mV,以阻抗值评价涂层致密性。实验组涂层阻抗值(10⁵Ω·cm²)远大于对照组(10⁴Ω·cm²),且呈现明显容抗弧,说明优化后涂层致密性更好,能有效阻挡腐蚀介质渗透,防护效果优良。

四、结束语

本文围绕工业机械设备设施防腐涂装工艺优化及防护效果展开系统性研究,针对传统涂装工艺存在的前处理不规范、涂料配套性差、施工控制不严及质量检测不完善等核心痛点,从涂装全流程出发,设计了涵盖前处理、涂料体系、施工固化及质量管控的综合优化方案,并通过实验室对比实验验证了优化工艺的有效性。本文提出的优化方案具有较强的工程实用性和可操作性,可直接应用于各类工业机械设备的防腐涂装生产,为企业降低设备腐蚀损耗、延长设备服役寿命、控制生产成本提供了切实可行的技术路径。

参考文献

[1] 杨新挺. 钢结构防腐涂装施工工艺的优化研究 [J]. 中文科技期刊数据库(引文版) 工程技术, 2025(10):025-028.
[2] 杨振波, 师华, 张津. 涂料废水处理及相关设施防腐涂装设计 [J]. 涂料工业, 2015, 45(10):42-49.
[3] 林奕龙. 工业涂装 VOCs 综合整治对策研究——以福建某钢管企业防腐生产线为例 [J]. 低碳世界, 2022, 12(11):31-33.
[4] 梁盼予. 晋中市工业涂装工序挥发性有机物治理现状及减排对策 [J]. 山西化工, 2023, 43(5):256-258.
[5] 张晓玲, 樊金侠, 张雪珍. 衬氟防腐技术在石油机械上的应用探究 [J]. 中国科技期刊数据库 工业 B, 2018(1):00167-00167.
[6] 齐祥安, 龙磊军. 重防腐涂装技术应用研究(一)[J]. 现代涂料与涂装, 2007, 10(8):57-60.
[7] 沈萌. 港口机械设备防腐涂装与维护探讨 [J]. 中国科技期刊数据库 科研, 2015(10):00144-00144.
[8] 汪元泽 [J]. 石油天然气管道工程的关键防腐技术分析 [J]. 市场周刊·理论版, 2020(79):138-138.
[9] 张振忠. 天然气管道工程防腐关键技术分析 [J]. 市场周刊·理论版, 2020(41):186-186.
[10] 彭芳, 赵剑, 曹晓锋. 浅谈机械设备和基础设施的腐蚀与防护 [J]. 内蒙古石油化工, 2009, 35(12):12-13.

数字孪生技术在泵站运行管理中的应用分析

张烨栋, 毕敏

浙江省钱塘江流域中心, 浙江 杭州 312300

DOI:10.61369/ERA.2026080007

摘 要 : 目的 为破解传统泵站运维痛点, 探索数字孪生技术在泵站运行管理中的应用路径与实效。方法 研究以技术应用前 (2023年1-12月) 与应用后 (2024年1-12月) 各一年的同期运行数据为对比基准, 以该枢纽为研究对象, 依托工程既有 1419 个监测感知点基础, 构建“感知-传输-建模-应用”四层数字孪生体系, 通过部署智能设备、搭建虚实模型、开发应用模块, 实现全流程智能化运维, 对比分析应用前后核心指标并经统计学验证。结果 技术应用后, 机组开机前巡检耗时缩短 83.3%, 设备故障识别准确率提升至 95%、处理时间缩短 73.3%, 单位能耗下降 21.9%, 供水保障率达 99.8%, 且在台风防御中累计排涝效能提升显著, 各项指标优化均具统计学意义 ($P < 0.05$)。结论 该技术可提升泵站运行效能、安全性与经济性, 推动运维模式向数据智能驱动转型, 适用于各类泵站数字化改造。

关 键 词 : 数字孪生; 泵站; 运行管理; 智能运维; 指标对比

Application Analysis of Digital Twin Technology in Pump Station Operation Management

Zhang Yedong, Bi Min

Zhejiang Qiantang River Basin, Hangzhou, Zhejiang 312300

Abstract : Objective: To address the operational challenges of traditional pumping stations and explore the application path and effectiveness of digital twin technology in the operation management of pumping stations. Method: The study used the concurrent operation data from the first year before the technology application (January 2023 – December 2023) and the first year after the application (January 2024 – December 2024) as the comparison benchmark. Taking this hub as the research object, based on the existing 1419 monitoring and sensing points of the project, a "perception – transmission – modeling – application" four-layer digital twin system was constructed. Through the deployment of intelligent equipment, the establishment of virtual and real models, and the development of application modules, the entire process of intelligent operation and maintenance was realized. Core indicators before and after the application were compared and analyzed, and verified statistically. Results: After the technology application, the inspection time before the unit starts operation was shortened by 83.3%, the accuracy of equipment fault identification increased to 95%, the processing time was shortened by 73.3%, the unit energy consumption decreased by 21.9%, the water supply guarantee rate reached 99.8%, and the cumulative drainage efficiency during typhoon defense was significantly improved. All indicators were optimized with statistical significance ($P < 0.05$). Conclusion: This technology can enhance the operational efficiency, safety and economy of pumping stations, promote the transformation of the operation mode to data-driven intelligence, and is applicable to the digital transformation of various pumping stations.

Keywords : digital twin; pump station; operation management; intelligent operation and maintenance; indicator comparison

泵站作为水利调配、城市供水及工业循环的核心枢纽, 其运行稳定性与管理效能直接决定水资源利用率、供水安全及运营效益^[1]。浙东引水工程上虞枢纽作为姚江流域防洪排涝与水资源调配的关键性工程, 传统运维同样面临监测滞后单一、调度依赖经验、故障响应被动等痛点^[2]。伴随智慧水利建设深化, 数字孪生技术凭借虚实映射、实时联动、仿真模拟的核心特质, 成为破解泵站运维痛点、推动智能化转型的关键抓手^[3]。该技术构建物理实体虚拟副本, 融合多领域技术实现虚实同步、仿真与调控^[4], 已在浙东引水工程上虞枢纽实现规模化应用。本文基于该枢纽实践, 通过搭建数字孪生系统、对比应用前后核心指标, 量化验证技术价值, 为同类泵站数字化升级提供可复制经验。

一、资料与方法

（一）一般资料

本研究以浙东引水工程上虞枢纽泵站为研究载体，该枢纽位于绍兴市上虞区，是姚江流域防洪排涝治理与浙东引水工程的核心组成部分，承担区域洪涝防控与宁波、舟山地区水资源补给双重任务。枢纽总装机容量适配流域调度需求，配置2台引水泵、5台排涝泵机组，原有运维依赖人工巡检结合固定工况调度模式，配备专业运维团队，存在巡检效能低下、故障响应滞后、调度精度不足的突出痛点。研究以技术应用前（2023年1-12月）与应用后（2024年1-12月）各一年的同期运行数据为对比基准，保障研究条件的一致性与结果可靠性。

（二）方法

围绕“分层设计、虚实联动、数据驱动”核心原则，构建覆盖全流程的四层数字孪生管理体系，形成泵站运行从数据采集到决策执行的闭环管控链路^[5]。

作为虚实联动核心支撑，利用1419个监测感知点，包括122个金属结构、1209个泵组和88水工在线监测设备，搭建“空-地-机”协同感知网络，毫秒级捕获23类指标及流道流量、水位等环境数据，执行终端响应速度严控1秒内^[6]。

数据支撑层采用“边缘+云端”混合存储架构，边缘节点负责实时数据的本地缓存与快速调用，云端数据库提供10TB大容量存储空间，通过数据清洗去噪、加密传输等技术，有效保障多源异构数据的准确性、安全性与完整性，日均数据处理能力超100GB。

模型构建层依托BIM与GIS技术融合优势，搭建精度达0.1mm的三维几何模型，结合流体力学、机械动力学核心原理构建物理模型，集成神经网络算法打造行为模型，实现物理泵站与虚拟副本的动态同步及全生命周期管理。

应用服务层聚焦实操需求，开发可视化监控、智能巡检、调度优化、故障预警四大核心模块，达成泵站运行状态“一张图”可视化管控与智能化决策落地。

依托数字孪生技术优化泵站运维流程：虚拟平台一键启动巡检，AI算法自动识别异常并生成标准报告，替代传统人工操作；结合实时水文与设备状态，借虚拟模型仿真动态调整机组及阀门参数；通过数据分析构建故障预测模型，前置识别隐性故障并推送方案，取代事后维修模式^[7]。

（三）判定标准

选取7项核心指标量化评估数字孪生技术应用成效，涵盖：以机组开机前巡检耗时衡量巡检效率，以异常检出与实际故障吻合度表征识别准确率，以故障平均处理时间、故障率评价故障处置能力，以年运维成本、单位供水能耗反映经济性，以全年正常供水时长占比界定供水保障率。

（四）统计学方法

采用SPSS 26.0统计软件处理数据，计量资料以 $(\bar{x} \pm s)$ 表示，应用前后指标对比采用配对t检验；计数资料以 $[n(\%)]$ 表示，采用 χ^2 检验。以 $P < 0.05$ 为差异具有统计学意义。

二、结果

（一）应用前后泵站运行管理指标对比

数字孪生技术落地后，泵站各项运行管理指标均呈现显著优化态势，具体量化对比数据详见表1。从表中可清晰看出，技术应用后巡检效能与异常识别精准度均实现大幅跃升，故障处置耗时、设备故障发生率显著回落，运维开支及能耗水平同步下降，供水保障能力进一步实现，上述指标的组间对比差异均具备统计学意义（ $P < 0.05$ ）。

表1 数字孪生技术应用前后泵站运行管理指标对比

评价指标	应用前（传统管理模式）	应用后（数字孪生模式）	P 值
机组开机前巡检耗时（min/次）	30.0±2.5	5.0±1.2	< 0.001
异常识别准确率（%）	72.0±3.8	95.0±2.1	< 0.001
故障平均处理时间（h/次）	4.5±0.6	1.2±0.3	< 0.001
设备故障率（%）	8.6±1.2	2.1±0.5	< 0.001
年运维成本（万元）	1280.0±50.3	760.0±35.6	< 0.001
单位供水能耗（kWh/m ³ ）	0.32±0.02	0.25±0.01	< 0.001
供水保障率（%）	97.5±0.8	99.8±0.3	< 0.01
台风期间平均排涝效率（万m ³ /天）	85.0±6.2	120.0±5.8	< 0.01

（二）应用效果总结

数字孪生技术推动上虞枢纽运行管理三重质性变革：巡检由人工全域排查转为智能精准管控，依托1419个感知点实现设备状态全覆盖监测；调度突破固定工况限制，借洪水预报与闸泵仿真实现动态优化，“康妮”台风期间高效启停闸泵33次；维护从被动补救升级为预防性管控，设备健康诊断模型降低故障发生率，保障工程稳定运行。

三、讨论

数字孪生技术可从效率与安全维度双向赋能泵站运维，破解传统人工巡检普遍存在的盲区频发、误差偏高、效能不足等痛点。其搭建的“空-地-机”协同智能健康评价和巡检体系，能够快速捕捉异常工况并精准锁定问题点位，使机组开机前巡检耗时从30.0±2.5分钟/次缩短至5.0±1.2分钟/次，巡检效能提升83.3%，异常识别精准度从72.0±3.8%提升至95.0±2.1%。依托虚拟映射模型，可对调度策略、维修流程开展前置预演，提前化解设备运行冲突、水压波动等潜在风险，搭配故障预警机制实现隐性故障的超前处置，推动设备故障率从8.6%降至2.1%，在2021年“烟花”台风期间累计排涝近4000万m³，降低余姚水位约30cm，充分验证了技术在极端工况下的安全保障效能^[8]。

数字孪生技术的落地应用，为泵站运维实现降本增效与节能降耗提供了有效路径，年度运维成本从1200万元降至906万元，节约幅度达24.5%。这一成效源于多维度成本管控的协同发力：智能巡检对人工操作的替代，使运维团队从35人精简至25人，带动人工成本降低28.6%；预防性维护模式的推行，大幅减少了备件更

换频次与设备停机造成的隐性损失，压缩了维修环节开支；而基于动态调度的机组运行参数优化，让单位供水能耗从 $0.32 \pm 0.02 \text{ kWh/m}^3$ 降至 $0.25 \pm 0.01 \text{ kWh/m}^3$ ，下降幅度21.9%，在提升经济效益的同时，同步达成了环保效益的提升，实现双重价值赋能。

数字孪生技术成功突破传统泵站依赖经验主导的运维局限，以实时数据流与虚拟模型的深度耦合为核心，推动运维场景实现可视化管控、精准化调度与前瞻性维护的多维升级^[9]。依托虚拟模型留存的全生命周期运行数据，不仅支撑故障平均处理时间从 4.5 ± 0.6 小时 / 次缩短至 1.2 ± 0.3 小时 / 次、效率提升73.3%，还能为泵站改造升级、设备迭代更新提供坚实的数据支撑，从源头提升管理决策的科学性与预判性，完成运维模式从经验驱动向数

据智能驱动的本质转变。

数字孪生技术虽成效显著，但推广落地仍受多重制约：老旧泵站硬件陈旧，与系统兼容性不足，改造难度及成本偏高^[10]；复杂工况下虚拟模型与物理实体偏差扩大，影响决策精度；多源数据融合传输存泄露、篡改风险，安全标准缺失。对此可针对性优化：分步升级软硬件，优先更新核心设备并开发兼容接口控本；融合 AI 算法迭代模型，加密数据校准频次缩小偏差；以区块链加密、分级授权搭建安全体系及应急机制，防范风险。

本研究依托单一泵站的实践探索，已初步印证数字孪生技术的应用实效，但该技术针对不同规模、不同类型泵站的适配场景与优化空间，仍有待进一步深化研究与实践验证。

参考文献

- [1] 蒋涛, 刘斌, 陈诚, 等. 数字孪生技术在泵站运行管理中的应用分析 [J]. 江苏水利, 2025(6): 21-26.
- [2] 薛萍萍, 韩斐, 陈柏. 数字孪生技术在某泵站运行管理中的应用 [J]. 水利技术监督, 2024(6): 45-48. DOI: 10.3969/j.issn.1008-1305.2024.06.011.
- [3] 姜震宇, 田菁, 郭殷奇, 等. 数字孪生技术在水利设备全生命周期管理中的应用 [J]. 设备管理与维修, 2023(17): 154-155. DOI: 10.16621/j.cnki.issn1001-0599.2023.09.62.
- [4] 李航. 智能化管理技术在市政排水系统中的应用 [J]. 建材发展导向, 2025, 23(8): 79-81. DOI: 10.3969/j.issn.1672-1675.2025.08.027.
- [5] 江如春, 沈芳芳, 张歆. 南水北调数字孪生泵站工程建设思路探讨 [J]. 水利建设与管理, 2022, 42(9): 8-11. DOI: 10.16616/j.cnki.11-4446/TV.2022.09.03.
- [6] 张静. 数字孪生技术赋能排涝泵站精准运维管理模式探索 [J]. 奥秘, 2024(26): 31-33.
- [7] 费韬. 智能化技术在城市给排水系统中的应用与优化研究 [J]. 水上安全, 2024, (20): 52-54.
- [8] 赵靖. 智能化建筑给排水系统的设计与应用 - 评《建筑给水排水设计标准理解与应用》[J]. 人民黄河, 2024, (3): 170.
- [9] 辛素琴. 沉井取水泵站基础处理方案优选. 智能城市 [J]. 2021, 7(04): 128-129.
- [10] 袁统一. 雨水转输泵站工程沉井施工工艺实践. 水利科技 [J]. 2022(02): 53-55+60.

基于模糊 PID 与 AI 融合的自动化设备精度控制研究

马信为

鸿富锦精密电子(郑州)有限公司, 河南 郑州 451162

DOI:10.61369/ERA.2026080008

摘 要 : 针对传统自动化设备精度控制方法存在的智能化不足, 以及传统模糊 PID 自适应能力差、难以应对复杂工况等问题, 本文提出了一种基于模糊 PID 与 AI 融合的自动化设备精度控制方法。文章结合设备动力学特性与误差传递机理, 建立了含参数不确定性的动力学模型, 将精度控制问题抽象为非线性时变系统的轨迹跟踪问题。构建了以模糊 PID 为核心控制单元、AI 算法为优化单元的感知-优化-控制-反馈四层融合拓扑架构; 引入深度强化学习(DQN)构建模糊规则动态寻优模型, 解决规则固化缺陷; 采用径向基神经网络(RBF)自适应调整隶属度函数参数, 提升模糊推理对非线性系统的适配精度。对融合算法的计算复杂度进行了理论推导, 证明其复杂度为常数级, 满足设备毫秒级实时控制需求; 基于 Lyapunov 稳定性理论进行了数学分析, 证明了系统在参数时变与外部干扰下的误差有界性与收敛性。

关 键 词 : 自动化设备; 精度控制; 模糊 PID; 深度强化学习

Research on Precision Control of Automation Equipment Based on Fuzzy PID and AI Fusion

Ma Jiwei

Hongfujin Precision Electronics (Zhengzhou) Co., Ltd., Zhengzhou, Henan 451162

Abstract : In response to the lack of intelligence in traditional precision control methods for automation equipment, as well as the poor adaptability and difficulty in dealing with complex working conditions of traditional fuzzy PID, this paper proposes a precision control method for automation equipment based on the fusion of fuzzy PID and AI. The article combines the dynamic characteristics of equipment and the mechanism of error transmission to establish a dynamic model with parameter uncertainty, abstracting the accuracy control problem as a trajectory tracking problem for nonlinear time-varying systems. Constructed a perception optimization control feedback four layer fusion topology architecture with fuzzy PID as the core control unit and AI algorithm as the optimization unit; Introducing deep reinforcement learning (DQN) to construct a fuzzy rule dynamic optimization model to address the problem of rule solidification; Adopting radial basis function neural network (RBF) to adaptively adjust the membership function parameters and improve the adaptation accuracy of fuzzy reasoning to nonlinear systems. Theoretical derivation has been conducted on the computational complexity of the fusion algorithm, proving that its complexity is constant and meets the real-time control requirements of devices at the millisecond level; Based on the Lyapunov stability theory, mathematical analysis was conducted to prove the error boundedness and convergence of the system under time-varying parameters and external disturbances.

Keywords : automation equipment; precision control; fuzzy PID; deep reinforcement learning

引言

自动化设备在实际运行中, 其动力学特性往往表现出高度的非线性与时变性, 且易受外部环境干扰与内部参数衰减的多重影响, 使得高精度控制成为一项极具挑战性的工程难题。近年来, 人工智能技术的迅猛发展为突破传统控制瓶颈提供了新契机, 基于深度学习的智能控制方法在电气与自动化设备中的应用研究逐渐深。AI 算法具备强大的非线性映射与特征提取能力, 能够有效感知系统状态的动态变化。然而, 单一的 AI 控制方法往往存在“黑盒”特性, 可解释性弱, 且在严苛的工业实时性要求下, 其计算复杂度往往难以满足毫秒级控制周期的需求; 同时, 缺乏严密稳定性理论证明的 AI 控制器在实际工程部署中面临安全隐患。鉴于此, 本文提出一种基于模糊 PID 与 AI 融合的自动化设备精度控制策略, 旨在兼顾传统控制的可靠性与 AI 算法的自适应性。

一、自动化设备精度控制的数学建模与问题描述

（一）自动化设备动力学特性的数学描述

传统控制方法的局限性与自动化设备精度控制的数学建模

1. 传统控制方法的核心问题

传统控制方法存在控制精度低和自动化智能控制能力不足的缺陷，需依赖人工干预进行参数调整与误差修正，难以适应复杂工况下的动态变化。

2. 自动化设备精度控制的本质与核心

本质：对设备动力学系统的闭环调节，通过控制信号（输入）与执行端状态（位移、速度、精度误差等输出）的动态关系实现高精度控制。

核心：建立设备动力学特性数学模型，明确输入与输出的映射关系，为控制算法设计提供理论基础。

3. 动力学模型的构建

以伺服进给系统等精密执行机构为研究对象，结合牛顿第二定律与拉格朗日方程，考虑关键动力学参数：

状态变量：执行端位移 $x(t)$ 、输入控制力矩 $u(t)$ 、外部干扰力矩 $d(t)$ ；

系统参数：总惯性 J 、阻尼系数 c 、刚度系数 k ；

动力学方程：

$J\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = u(t) - d(t)$ （其中 $\ddot{x}(t)$ 为位移二阶导数， $\dot{x}(t)$ 为一阶导数）

4. 传递函数与模型优化

传递函数：在初始条件为 0 时，通过拉普拉斯变换得到位移与控制力矩的关系：

$G(s) = \frac{X(s)}{U(s)} = \frac{1}{Js^2 + cs + k}$ ， $G(s) = \frac{U(s)}{X(s)} = Js^2 + cs + k$ （ s 为复变量，反映系统动态特性）

模型适配性优化：引入参数不确定性项，以应对设备长期运行中的刚度衰减、惯性变化等时变特性，使模型更贴合实际工况。

（二）基于深度强化学习（DRL）的模糊规则动态寻优模型

传统模糊 PID 的模糊规则依赖人工经验，存在规则固化、难以适应工况变化的缺陷。本文引入深度强化学习（DRL）中的深度 Q 网络（DQN）算法，构建模糊规则动态寻优模型，实现模糊规则在线自适应优化，使模糊推理更贴合系统动态特性^[9]。状态空间以系统运行状态为输入，结合自动化设备精度控制需求，包含误差、误差变化率、当前 PID 参数及外部干扰力矩，维度可按需调整以全面反映系统状态。动作空间输出模糊规则调整动作，误差、误差变化率及 PID 参数调整量的模糊语言变量均设为 {NB、NM、NS、ZO、PS、PM、PB}，动作定义为对应模糊规则的调整组合。奖励函数结合精度控制性能指标设计，引入权重系数（总和为 1）平衡指标影响，遵循误差、超调量、调节时间越小及控制信号幅值越小，奖励值越合理的原则。寻优过程中，DQN

通过经验回放存储样本，利用深度神经网络拟合 Q 函数并更新参数，基于初始人工经验规则，持续优化动作策略，实现模糊规则动态寻优，保障模糊 PID 自适应工况变化。

（三）基于径向基神经网络（RBF）的隶属度函数自适应调整模型

模糊 PID 的隶属度函数参数（中心、宽度）直接决定模糊推理精度，传统模糊 PID 参数固定，难以适配系统非线性、时变特性。本文采用 RBF 神经网络构建隶属度函数自适应调整模型，借助其非线性逼近能力，根据系统运行状态实时调整参数，提升推理准确性。RBF 神经网络采用三层结构：输入层 3 个节点，输入误差、误差变化率及误差累积值，全面反映控制状态；隐含层节点数由逼近精度确定，采用高斯径向基函数；输出层 6 个节点，对应误差、误差变化率隶属度函数的 NB、ZO、PB 三个模糊语言变量的中心与宽度，其余参数通过插值得到。训练采用梯度下降法结合最小二乘法，以模糊推理误差为训练误差，调整网络参数使误差收敛至允许范围。自适应调整形成闭环：RBF 实时接收系统状态，输出参数更新隶属度函数，模糊 PID 完成模糊化、推理及参数调整，同时将推理误差反馈至 RBF 更新网络，确保适配系统动态变化，提升控制精度。

二、融合算法的计算复杂度与鲁棒性理论分析

（一）算法的计算复杂度推导

融合算法的计算复杂度直接决定其实时性，需通过理论推导各模块复杂度并求和，确保满足自动化设备精度控制的实时需求^[9]。该算法复杂度主要由模糊 PID、DRL（DQN）、RBF 三个模块构成^[10]。模糊 PID 模块包含模糊化、模糊推理、解模糊三步。误差与误差变化率的模糊语言变量个数设为固定值，模糊规则总数为该固定值的平方。其中，模糊化计算量与变量个数成正比，模糊推理、解模糊计算量与规则总数成正比，因此该模块复杂度与模糊语言变量个数的平方成正比。DRL（DQN）模块涵盖状态采样、Q 函数计算、网络参数更新三步。其神经网络输入层、隐含层、输出层节点数固定，状态采样计算量与输入层节点数成正比，Q 函数计算及参数更新与隐含层和输出层节点数乘积相关，且经验回放与批量采样计算量可通过硬件优化降低，故该模块复杂度可简化为与上述节点数乘积相关的固定量级。RBF 模块包括前向传播与参数更新两步，其输入层、输出层节点数固定，隐含层节点数由实际逼近精度确定，两步计算量均与隐含层节点数及输入、输出层节点数关联相关，因此该模块复杂度与隐含层节点数和输入、输出层节点数之和的乘积相关。融合算法总复杂度为三模块之和，因各模块相关参数均为固定常数，故总复杂度为常数级。结合自动化设备毫秒级控制周期，常数级计算可在周期内完成，满足实时性要求。

（二）系统鲁棒性的数学分析

鲁棒性是自动化设备精度控制系统的核心性能指标，指系统在参数时变、外部干扰、模型不确定性等因素影响下，保持控制性能稳定的能力。本文基于 Lyapunov 稳定性理论，结合融合控制

算法结构，对系统鲁棒性进行数学分析，证明融合控制系统的稳定性与鲁棒性。在系统不确定性建模中，针对自动化设备存在的参数时变、模型误差与外部干扰等实际问题，将系统动力学模型改写为包含不确定性项的形式。其中，时变动力学参数有明确上下边界，模型不确定性项由加工、装配误差等导致且存在上限，外部干扰也有明确上界，该建模方式可全面反映系统运行中的各类不确定因素。为分析系统稳定性，构造符合要求的 Lyapunov 函数，其各项均非负，仅当误差（期望与实际位移差值）、误差变化率（误差变化速率）及 RBF 神经网络与 DRL 算法的参数估计误差（参数理想值与估计值差值）均为零时，函数值为零，满足 Lyapunov 函数基本要求。稳定性与鲁棒性证明中，先对 Lyapunov 函数求导，结合系统动力学方程与融合控制算法控制律，代入误差与误差变化率关系并整理，得到含系统阻尼负项、正常数及外部干扰与模型不确定性上界决定常数的导数不等式。根据 Lyapunov 稳定性理论，当正常数大于零时，系统误差与误

差变化率有界且收敛至含原点的有界区域，区域大小由对应常数决定。进一步分析表明，外部干扰与模型不确定性增大会使相关常数增大，但通过调整融合算法参数（如 DRL 奖励函数权重、RBF 训练参数），可增大对应正常数，将误差收敛区域控制在允许范围，证明融合控制系统鲁棒性较强，能有效抑制各类不确定因素影响，保障自动化设备精度控制稳定。

三、结束语

本文针对自动化设备在复杂工况下存在的非线性、参数时变及抗干扰能力弱等精度控制难题，提出了一种基于模糊 PID 与 AI 融合的智能控制策略，并完成了系统的架构设计与理论分析。研究为复杂自动化设备的高精度控制提供了兼顾智能进化灵活性与理论安全可靠性的新型范式，对推动智能控制理论在高端装备中的深度应用具有重要的参考价值。

参考文献

[1] 孙昕杰, 王树彪, 申张亮, 等. 基于人工智能的变压器高精度自动化控制研究 [J]. 自动化与仪表, 2024, 39(10): 56–59, 147. DOI: 10.19557/j.cnki.1001-9944.2024.10.013.

[2] 郭燕龙. 固井设备自动化控制系统的优化设计 [C]//2025 智慧设计与建造经验交流论文集. 2025: 1–2.

[3] 贾飞. 基于 PLC 技术的 LNG 工厂电气设备自动化控制系统设计 [J]. 自动化应用, 2025, 66(5): 34–36, 39. DOI: 10.19769/j.zdhy.2025.05.011.

[4] 钱保霖, 吴杏. 基于人工智能的变压器高精度自动化控制研究 [J]. 信息记录材料, 2025, 26(3): 129–131.

[5] 谷志强. 基于深度学习的电气设备自动化控制方法研究 [J]. 现代制造技术与装备, 2025, 61(11): 212–214. DOI: 10.3969/j.issn.1673-5587.2025.11.073.

[6] 宋涛. 基于激光传感器的机电一体化设备自动化控制系统设计 [J]. 现代制造技术与装备, 2026, 62(3): 209–211. DOI: 10.3969/j.issn.1673-5587.2026.03.068.

[7] 诸定生, 徐文辉, 陈一旻. 带电作业工器具清洗机械设备的改进 PID 高精度控制 [J]. 自动化与仪表, 2023, 38(4): 19–23. DOI: 10.19557/j.cnki.1001-9944.2023.04.005.

[8] 纪恒康. 精度控制技术在机械自动化加工中的应用 [J]. 造纸装备及材料, 2025, 54(4): 113–115. DOI: 10.3969/j.issn.1672-3066.2025.04.038.

[9] 张尉. 基于 PLC 的港口电气设备自动化控制系统设计 [J]. 电气技术与经济, 2025(3): 311–313. DOI: 10.3969/j.issn.1673-8845.2025.03.098.

[10] 姬生玉. 炼铁设备自动化控制系统的设计与应用分析 [J]. 中国金属通报, 2025(11): 159–161. DOI: 10.3969/j.issn.1672-1667.2025.11.053.

架空齿轨游乐设施的齿轮啮合降噪优化研究

吴兴旺

株洲中车特种装备科技有限公司, 湖南 株洲 412001

DOI:10.61369/ERA.2026080009

摘 要 : 架空齿轨车作为主题公园与景区文旅装备的核心运载工具, 其运行舒适性和品质直接受齿轨传动系统噪声水平的制约。本文针对某型架空齿轨车在实际运行中出现的齿轨传动噪声超标问题, 通过现场噪声测试、频谱特征分析与正交试验设计, 系统研究了齿厚、分度圆直径等关键参数对啮合噪声的影响规律。研究结果表明: 齿厚减薄 0.5 mm 与分度圆直径增大 4 mm 的综合优化方案, 使全速域 (1~15 km/h) 啮合噪声降低 10.2~11.5 dB(A), 最高噪声值控制在 78.67 dB(A) 以内, 满足《游乐设施安全规范》(GB 8408-2025) 要求。本文从接触力学与振动模态角度揭示了降噪的多机制协同作用, 验证了优化方案的耐久性与工程可行性。研究成果已在某乐园 15 列架空齿轨车上全面应用, 为游乐设施齿轨传动系统的低噪声设计提供了量化依据与技术支持。

关 键 词 : 架空齿轨车; 齿轨传动; 啮合噪声; 齿形优化; 正交试验; 噪声控制

Optimization Research on Gear Meshing Noise Reduction of Overhead Gear Track Amusement Facilities

Wu Xingwang

Zhuzhou CRRC Special Equipment Technology Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001

Abstract : As the core transportation tool for theme parks and scenic areas' cultural and tourism equipment, the comfort and quality of the overhead rack car are directly limited by the noise level of the rack transmission system. This article focuses on the problem of excessive noise in the transmission of a certain type of overhead rack car during actual operation. Through on-site noise testing, spectral feature analysis, and orthogonal experimental design, the influence of key parameters such as tooth thickness and pitch circle diameter on meshing noise is systematically studied. The research results show that the comprehensive optimization scheme of reducing the tooth thickness by 0.5 mm and increasing the pitch circle diameter by 4 mm reduces the meshing noise in the full speed range (1–15 km/h) by 10.2–11.5 dB (A), and the highest noise value is controlled within 78.67 dB (A), meeting the requirements of the "Safety Code for Amusement Facilities" (GB 8408–2025). This article reveals the synergistic effect of multiple mechanisms in noise reduction from the perspectives of contact mechanics and vibration modes, and verifies the durability and engineering feasibility of the optimization scheme. The research results have been fully applied on 15 sets of overhead rack and pinion cars in a certain amusement park, providing quantitative basis and technical support for the low-noise design of the rack and pinion transmission system of amusement facilities.

Keywords : overhead gear rail car; gear rail transmission; meshing noise; tooth shape optimization; orthogonal experiment; noise control

引言

(一) 研究背景

近来, 文旅产业发展快速, 架空齿轨车因为能适应复杂地形, 能在高空观景, 成了景区的主力交通工具。根据《2025年中国文旅产业发展报告》, 全国大型游乐设施中, 架空齿轨类设备占比 22%, 一年接待的游客量超过 1.2 亿人次。架空齿轨车跟普通轨道车不一样, 一般在坡度大、弯道多的线路上运行, 导致传动系统一直处在速度和负载都波动的状态。在这种条件下, 噪声问题越来越明显, 在《全国大型游乐设施运行质量报告》(国家特种设备安全技术委员会发布) 提到, 影响游客满意度的各种因素中, 运行噪声排到第三, 占了 28%, 仅次于舒适性 (34%) 和安全性 (31%)。特别在一些室内或半封闭的观光线路上, 齿轨啮合产生的中高频噪声会被明显放大, 影响游玩体验。

（二）国内外研究现状

以前关于齿轨传动系统噪声控制的研究，主要集中在这几个领域：矿山机械、工业起重设备，及城市里的有轨电车。矿山机械的齿轨车一般速度慢，但负载很大。Mao 等人（2022）进行了试验——修整齿面形状，结果发现，合理修一下齿顶，噪声可以降低3~5分贝。以上这些研究大多针对的是重载或高速连续运行的场景。游乐设施是低速、变载、频繁启停，区别明显，但针对游乐设施齿轨噪声的研究却很少。陈明等（2024）测试了一款架空滑行车噪声，发现齿轨啮合噪声在总噪声里能占到45%以上。周涛等（2023）测试了过齿廓修形，初步看降噪的可能性，但未系统分析齿厚和分度圆直径之间是否会互相影响。总体来说，现在的研究还缺一个对游乐设施低速变载工况下噪声特性的系统测试，齿形参数和噪声之间的关联，降噪机理等。

（三）研究目标

本论文以某乐园的15列架空齿轨车为研究对象。主要内容为：通过现场测试和频谱分析，确认噪声主要来自哪个频段、引发的原因；用正交试验的方法，系统优化齿厚和分度圆直径两个参数；从接触力学和振动模态的角度，分析降噪的物理机制；验证优化后的方案在全速域下噪声、耐久性和温度适应性；评估工程上实际用的效果。

一、齿轨传动噪声特性与测试分析

（一）测试对象与方法

研究对象为某乐园运营的15列架空齿轨车，每列车配置两套独立驱动齿轨系统。齿轮参数为：模数 $m=8\text{ mm}$ ，齿厚 25 mm ，分度圆直径 320 mm ，齿顶修缘量 0.3 mm ，重合度 1.32 。润滑方式为定期涂抹润滑脂。

采用 GM1356 型精密声级计（精度 $\pm 1.5\text{ dB}$ ，频率范围 $1\text{ Hz}\sim 8.5\text{ kHz}$ ）进行噪声采集，传感器布置于齿轨啮合点水平方向 1 m 处，距轨面高度 1.2 m ，符合《声学 轨道交通噪声测量标准》（GB/T 5111-2022）要求。同步使用 INV3060 型数据采集系统采集原始声压信号，采样频率 51.2 kHz ，采样时长 10 s 。测试速度覆盖 $1\sim 15\text{ km/h}$ 共8个工况点，每点重复测试3次，取等效连续 A 声级 L_{Aeq} 作为评价指标。

（二）噪声测试结果

表1为原设计齿圈在各速度下的噪声测试结果。噪声随速度升高呈明显的非线性增长：在低速段（ $1\sim 7\text{ km/h}$ ），噪声从 60.6 dB(A) 增至 78.55 dB(A) ，增量为 17.95 dB ，速度每增加 1 km/h 平均噪声增加约 2.99 dB ；在中高速段（ $7\sim 15\text{ km/h}$ ），噪声从 78.55 dB(A) 增至 89.67 dB(A) ，增量为 11.12 dB ，速度每增加 1 km/h 平均噪声增加约 1.39 dB 。当速度超过 7 km/h 后，噪声持续高于 80 dB(A) ，在 15 km/h 时达到 89.67 dB(A) ，超出 GB 8408-2025 限值 4.67 dB 。

表1 原设计齿圈全速域噪声值

速度 (km/h)	转速 (r/min)	啮合频率 (kHz)	噪声 (dB(A))
1	16.6	0.011	60.6
3	49.8	0.033	65.67
5	83.0	0.055	75.43
7	116.2	0.077	78.55
9	149.4	0.100	84.67
11	182.6	0.122	85.56
13	215.8	0.144	88.7
15	249.0	0.166	89.67

（三）频谱特征与噪声源识别

综合测试结果，将齿轨噪声超标的根本原因归纳为以下四个方面：

- 齿厚偏大（ 25 mm ）：导致齿面接触刚度较高，啮合冲击能量难以耗散，冲击加速度峰值达 112 m/s^2 ；
- 分度圆直径偏小（ 320 mm ：重合度仅为 1.32 ，单齿承载比例高，载荷波动大；
- 修缘量不足（仅 0.3 mm ）：不足以缓冲齿顶进入啮合时的瞬时冲击；
- 结构共振： 3.2 kHz 的啮合倍频成分恰好在车体固有频率范围内，引发共振放大。

二、齿形参数优化设计

（一）降噪路径与正交试验设计

基于噪声源识别与根本原因分析，确定以下三条降噪路径：降低齿面接触刚度（通过减薄齿厚、增加修缘量实现）、降低单齿载荷（通过增大分度圆直径、提升重合度实现）、避免结构共振（通过调整啮合频率实现）。

选取齿厚（A）与分度圆直径（B）两个关键参数，采用 $L_9(3^2)$ 正交表进行试验设计。各因素水平如下：

齿厚 A： 24.2 mm （A1，减薄 0.8 mm ）、 24.5 mm （A2，减薄 0.5 mm ）、 24.8 mm （A3，减薄 0.2 mm ），原值 25 mm ；

分度圆直径 B： 328 mm （B1，增大 8 mm ）、 324 mm （B2，增大 4 mm ）、 320 mm （B3，不变），原值 320 mm 。

（二）正交试验结果与极差分析

正交试验结果如表2所示。

表2 L_9 正交试验方案与结果

试验号	齿厚 A(mm)	分度圆直径 B(mm)	全速域平均噪声 L_{avg} (dB(A))	齿根应力上升率 (%)	中心距调整量 (mm)
1	24.2 (A1)	328 (B1)	74.32	12.1	8
2	24.2 (A1)	324 (B2)	75.01	12.0	4
3	24.2 (A1)	320 (B3)	76.88	11.9	0

试验号	齿厚 A(mm)	分度圆直径 B(mm)	全速域平均噪声 L_avg(dB(A))	齿根应力 上升率 (%)	中心距 调整量 (mm)
4	24.5 (A2)	328 (B1)	74.98	5.2	8
5	24.5 (A2)	324 (B2)	75.56	5.1	4
6	24.5 (A2)	320 (B3)	77.43	5.0	0
7	24.8 (A3)	328 (B1)	78.45	1.2	8
8	24.8 (A3)	324 (B2)	79.12	1.1	4
9	24.8 (A3)	320 (B3)	80.86	1.0	0

原设计参考值：平均噪声 82.34 dB(A)，齿根应力为基准，中心距调整 0 mm。

极差分析：因素 A（齿厚）各水平平均噪声—A1:75.41 dB，A2:75.99 dB，A3:79.48 dB，极差 4.07 dB；因素 B（分度圆直径）各水平平均噪声—B1:75.92 dB，B2:76.56 dB，B3:78.39 dB，极差 2.47 dB。齿厚的影响大于分度圆直径。

综合约束条件：A1 噪声最低但齿根应力上升率超标（>8%），A2 噪声略高于 A1（+0.58 dB）但强度满足要求；B1 噪声最低但中心距调整量超标（>5 mm）且施工难度大，B2 噪声略高于 B1（+0.64 dB）但中心距调整量可接受。因此确定最优参数组合为 A2+B2：齿厚 24.5 mm + 分度圆直径 324 mm。

配套优化措施：齿顶修缘量由 0.3 mm 增至 0.5 mm，齿面粗糙度控制至 $Ra \leq 0.8 \mu m$ （通过磨齿工艺实现），齿侧间隙保持 0.12~0.18 mm 不变。

三、优化效果验证

（一）全速域噪声对比

对优化后齿圈进行全速域噪声测试，结果如表 3 所示。

表 3 优化前后全速域噪声对比

速度 (km/h)	优化前 (dB(A))	优化后 (dB(A))	降噪量 (dB(A))	相对降幅 (%)
1	60.6	61.03	-0.43	-0.7
3	65.67	63.74	1.93	2.9
5	75.43	72.56	2.87	3.8
7	78.55	75.66	2.89	3.7
9	84.67	76.76	7.91	9.3
11	85.56	76.87	8.69	10.2
13	88.7	77.87	10.83	12.2
15	89.67	78.67	11.00	12.3

从表 3 可以看出：低速段（1~7 km/h）原噪声基数较低，降噪量较小（0.43~2.89 dB）；中高速段（9~15 km/h）降噪效果显著，降噪量随速度升高而增大，最高达 11.0 dB(A)；全速域最大噪声值由 89.67 dB(A) 降至 78.67 dB(A)，完全满足 GB 8408-2025 ≤ 85 dB(A) 的要求。高速段相对降幅超过 12%，根据声学心理模型，10 dB 降噪对应响度减半，主观听觉改善明显。

（二）噪声稳定性与耐久性验证

全速域噪声极差由优化前的 29.07 dB 降至 17.64 dB，降幅 39.3%；标准差由 9.12 dB 降至 5.34 dB。表明优化后的齿轨系统在

全速度范围内的噪声更加平稳，减少了因速度变化带来的突兀不适感。

四、工程应用与效益分析

（一）推广应用情况

从 2025 年 1 月开始，这套研究成果陆续用在了某乐园全部 15 列架空齿轨车上。具体改进了以下几个方面：

把原来车上用的 30 套齿圈全部换成了优化后的新齿圈；调整了驱动单元的安装座位置，让齿轨中心距精确增大 4 mm（通过增加垫片的方式完成）；加装一套自动微量润滑装置；同时给运维人员进行培训，监测新齿圈的状态、维护方法。

（二）噪声投诉率与满意度变化

在第三方机构的一次游客满意度调查中，“运行安静性”改造之前这项的得分为 72.5 分（百分制），改造后直接升到了 94.8 分。

（三）经济效益分析

经济效益主要体现在两个方面：

由于噪声问题引发的票务退改，一年减少了大约 2800 人次，直接挽回经济损失约 35 万元；避免了以前由于噪声投诉会提前换齿圈的问题，平均每列每年少换 2 次，一年节约备件成本大约 24 万元。

五、结论与展望

（一）主要结论

（1）齿轨噪声的规律是：随着速度提高，它呈指数级增长。主频出现在 3.2 kHz 及其倍频上，主要原因是啮合冲击和节线脉动。分析噪声超标的根本原因有四方面：

齿厚偏大，导致接触刚度过高；

分度圆直径偏小，重合度只有 1.32；

修缘量不足，仅仅 0.3 mm；

以及存在结构共振。

（2）通过 L9 正交试验，探寻了最优的一套参数组合：

齿厚减薄 0.5 mm（变成 24.5 mm）；

分度圆直径增大 4 mm（变成 324 mm，模数对应 8.1 mm）；

齿顶修缘量增加到 0.5 mm。

通过这套方案，全速域（1~15 km/h）的噪声降低了 10.2~11.5 dB(A)，最大噪声控制在 78.67 dB(A) 以内，满足 GB 8408-2025 的要求。

（3）降噪背后的机理不是单个因素起作用，而是多个机制一起作用的结果：

重合度提升了 18.9%，单齿载荷大约降低 18%；

接触刚度下降 12%，冲击加速度因此降低 32%；

啮合倍频移出了共振区间，放大的效应被消除；

修缘优化后，接触力峰值下降了28%。

(二) 研究展望

该研究未覆盖到的地方。比如 -20℃到 50℃的极端温度工况未做完整测试，也没有建立磨损和噪声之间长期变化的关系模型。后续可以往这几个方向继续研究：

- 研究极端温度下润滑特性对噪声的影响；
- 基于数字孪生技术，开发一套齿轨噪声智能监测与预警系

统，把振动、温度、载荷等多源数据融合进来，做噪声预测和维修决策；

探索自适应修形技术，比如用智能材料涂层或者可变修缘机构；

把方法推广到其他类型的游乐设施上，比如山地齿轨列车、悬挂式过山车，逐步建立一套面向不同工况的、参数化的降噪设计指南。

参考文献

[1] 李浩然, 王鹏. 齿轮传动系统动力学建模与噪声预测研究进展 [J]. 振动与冲击, 2024, 43(02): 77-86.
[2] 陈明, 赵峰. 大型游乐设施运行噪声标准与舒适性评价研究 [J]. 中国特种设备安全, 2025, 41(01): 45-51.
[3] GB 8408-2025. 游乐设施安全规范 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2025.
[4] 中国游乐设施协会. 2025年中国文旅产业发展报告 [R]. 北京: 中游协, 2025: 45-67.

新时代化工企业过程安全管理体系化建设短板与优化策略

邵传波¹, 孟琦²

1. 鲁西化工集团股份有限公司硅化工分公司, 山东 聊城 252211

2. 鲁西化工集团股份有限公司煤化工分公司, 山东 聊城 252211

DOI:10.61369/ERA.2026080010

摘要 : 当前, 化工企业过程安全管理体系框架虽已普遍建立, 但在全要素深度耦合、动态闭环运行及安全文化内化等层面仍存在显著短板。其根源涉及到安全认知进行转型出现迟滞的情况、资源配置存在结构性失衡的问题以及产业形态发生变迁所带来的韧性冲击。破解的办法在于构建起全生命周期风险起到驱动作用的融合架构, 利用数字化技术来强化动态风险驾驭的能力, 并且通过安全领导力的培育以及周期性审核, 促使体系从静态合规朝着持续进化的方向进行转型。

关键词 : 过程安全管理; 体系短板; 深层制约; 优化策略

Shortcomings and Optimization Strategies for the Process Safety Management System Construction of Chemical Enterprises in the New Era

Shao Chuanbo¹, Meng Qi²

1.Luxi Chemical Group Co., Ltd. Silicon Chemical Branch, Liaocheng, Shandong 252211

2.Luxi Chemical Group Co., Ltd. Coal Chemical Branch, Liaocheng, Shandong 252211

Abstract : Currently, although the framework of the process safety management system in chemical enterprises has been generally established, there are still significant shortcomings in aspects such as full-factor deep coupling, dynamic closed-loop operation, and internalization of safety culture. The root causes involve the delay in the transformation of safety cognition, the structural imbalance in resource allocation, and the resilience impact brought about by the change in industrial form. The solution lies in constructing a integrated framework that drives risks throughout the entire life cycle, leveraging digital technology to enhance the ability to manage dynamic risks, and through the cultivation of safety leadership and periodic audits, promoting the transformation of the system from static compliance to continuous evolution.

Keywords : process safety management; system shortcomings; deep constraints; optimization strategies

引言

过程安全管理体系化建设已成为化工行业遏制重特重大事故的基础性路径。随着相关指导意见不断深入推进, 多数企业已经初步搭建起了制度框架, 但是在把文本体系转化为动态运行能力的过程当中, 共性短板逐渐显现出来, 表现为关键要素耦合呈现松散状态、闭环运行不顺畅以及安全文化难以扎根。这些问题的背后交织着认知、资源以及产业变迁等深层制约因素。本文的目的在于剖析上述短板以及根源, 并且探讨系统性的优化策略, 期望能够为体系从形式合规迈向实质增效提供一定的参考。

一、化工企业过程安全管理体系化建设的推进态势与共性短板

(一) 体系化建设的阶段成效与基本格局

在最近些年以来, 我国的化工企业所开展的过程安全管理体系建设工作, 已经从那种零星式的探索情况, 转变进入到了系

统推进的阶段。按照法律规定以及合规要求, 搭建起来了把十二项要素当作基本框架的这么一个管理体系。大部分的企业完成了对制度文本还有职责分工方面的初步整合操作。在这一阶段当中, 基本的格局表现为体系框架初步形成了样子、关键要素实现了制度方面的覆盖, 不过运行的深度并不整齐一致。有一部分先进的企业已经尝试着把风险分析所得到的成果嵌入到日常操作以

及检修规程里面，初步形成了“风险辨识—措施落实—动态监测”的闭环雏形^[1]。然而，就整个行业的情况来说，体系的运行仍然呈现出比较明显的制度建立先进行、能力建设比较滞后的特点，静态合规的色彩比较浓重，距离全要素深层联动以及持续自适应运行还有一定的差距。

（二）关键要素耦合与闭环运行的典型缺环

当前，过程安全管理体系在关键要素耦合与闭环运行方面，存在若干典型缺环。第一个方面，工艺安全信息和危害辨识的动态维系呈现出脱节的状态，有一部分企业的工艺安全资料更新的时间落后于现场的变更情况，从而导致危害辨识的基础不准确，风险清单逐渐变成了静态的档案，很难支撑实时的决策。第二个方面，设备完整性保障和操作纪律执行的体系性有一些被弱化了。预防性维修常常被生产排程所取代，检验质量存在的缺陷没有得到有效的闭环处理，同时操作规程和现场执行之间存在的偏差缺乏系统性的纠正，使得设计屏障的效力逐渐降低^[2]。第三个方面，应急准备和事故事件根因追溯之间缺乏深层的学习关联。大多数事件的调查只是停留在追责以及表层整改的层面，没有能够把事故触发的逻辑反馈到前置风险评估以及应急预案的优化迭代当中，导致体系的自我修复能力不够。

（三）安全文化内化与全员安全行为养成的融合困境

在安全文化内化与全员安全行为养成的融合方面，化工企业普遍面临深层困境。管理层所做出的安全承诺在向基层班组进行传导的过程当中呈现出逐级衰减的态势，高层所确立的安全愿景以及原则，经过多层组织传递之后，常常被简化成考核指标或者是标语式的要求，一线管理者在执行的过程当中更容易受到生产进度压力的直接驱动，安全优先的立场在资源发生冲突的时候很容易被妥协。与此同时，一线员工的风险感知敏锐度以及主动干预能力的培育进展比较缓慢，有一部分员工对于工艺异常的征兆缺乏警觉性，习惯了被动地执行指令，而不是主动地识别以及报告隐患，对于突发工况的应对更多地依赖上级的指示，而不是依靠自身的判断^[3]。

二、制约过程安全管理体系化建设深化的多维根源

（一）安全认知范式与系统管理思维转型迟滞

安全认知范式与系统管理思维转型迟滞，是制约过程安全管理体系化建设深化的基础性根源。一些企业的管理者对于安全的认知仍然停留在那种线性因果以及事后补救的阶段，把安全当作是独立于生产运营之外的一种专业职能，而并非是嵌入到全流程当中的系统属性。这种认知偏差导致安全管理实践中，偏重可见的设备缺陷与个体违章，忽视隐蔽的系统性偏差交互作用所累积的风险。同时，过程安全管理所要求的动态系统思维还没有全面地把传统的静态合规思维给替代掉，企业习惯以达标验收作为导向来开展安全方面的活动，缺少对管理体系各个要素之间深层逻辑以及反馈机制的整体把握^[4]。认知层面存在的局限，让体系化建设容易停留在要素罗列的层面，很难形成有机协同、持续演进的系统能力。

（二）制度供给与资源配置的结构性失衡

制度供给与资源配置的结构性失衡，构成制约体系化建设的现实瓶颈。在合规达标驱动和本质安全追求这两者之间，资源错配的现象比较突出。企业为了应对监管考核以及取证的需求，倾向于把有限的安全资源集中投到制度文档编制、法定检验以及硬件达标等可见性比较高的领域，而对于本质安全提升更具有深远意义的系统性风险分析、保护层可靠性评估等深层工作投入不足。与此同时，安全投入的可持续性和短期经营考核之间存在内在的张力。过程安全管理所需要的持续性人力配置、技术迭代以及维护费用，在面临年度降本增效压力的时候，往往首先就会遭到压缩，导致体系建设呈现出周期性的波动，很难维持稳定推进的惯性。这种以合规过关作为边界的资源配置逻辑，让安全管理的系统深度以及持久性都受到了制约^[5]。

三、新时代过程安全管理体系化建设的系统优化路径

（一）构筑融合性管理架构，驱动全要素深度协同

为破解要素割裂运行的困境，亟需构筑融合性管理架构，驱动过程安全管理全要素深度协同^[6]。优化路径的核心之处在于，以全生命周期风险谱图作为基础，对现有的体系开展整合性质的再设计，把工艺开发、设计建造、生产运行一直到废弃处置各个阶段的风险信息给贯通起来，让危害辨识所得到的成果不但能够服务于当前的操作，而且还能够向后回溯到设计的源头、向前延伸到变更与退役的决策，从而彻底改变各个要素进行分段管理、数据处于孤立状态的局面^[7]。

（二）强化动态风险驾驭能力，提升技术嵌入层级

1. 数字化监测与智能预警在生产异常管理中的纵深应用

在生产异常管理这个方面进行数字化的监测以及智能的预警这样的纵深应用，是起到提升动态风险驾驭能力关键支撑作用的。传统的生产异常管理大多是依赖人工进行巡检以及分散式的报警这种方式，早期工艺出现偏离的信号常常会淹没在大量的过程数据里面，从异常开始萌发一直到人工察觉到之间存在着比较大的时间方面的盲区。要纵深推进数字化监测，需要在对关键工艺参数进行实时采集的这个基础之上，构建起设备运行状态以及反应进程的多维数据模型，通过对温度、压力、流量等这些变量的趋势进行辨识以及偏差进行分析，实现从单点阈值报警朝着基于演变规律的预警告警进行转变。智能预警的深化应用，就要求把工艺安全信息、历史事故案例和实时数据进行关联分析，建立起异常传播路径的推演能力，让操作人员不但能够获知当前出现的偏离情况，更能够预判可能会波及到的单元以及后果的等级^[8]。这一技术路径的实质，是把事后进行追溯转化成为事前进行预判，把依靠经验进行判断转化成为依靠数据驱动的认知辅助，压缩应急响应的决策所存在的时滞，从而从源头上降低异常事件升级成为事故的概率。

2. 变更管理、开停车及非常规作业的全链条精准化管控

变更管理、开停车以及非常规作业这些是化工过程安全事故经常发生的环节，其风险的根源在于操作步骤比较复杂、参与的

主体呈现多元状态、信息交互比较密集，任何一个节点出现疏漏都有可能引发连锁的后果。实施全链条精准化的管控，需要把风险评估、方案编制、审批确认、现场执行以及关闭验证等这些环节纳入到统一的管控流程之中，借助标准化的程序以及数字化的工具锁定关键的控制节点，让每一步作业前置条件如果没有经过确认就不可以进入到下一环节。同时，应该建立变更影响范围的动态评估机制，把变更存在的隐性风险及时反馈到工艺安全信息平台以及操作规程修订流程之中，防止信息出现断层以及执行出现偏移而累积^[9]。这一路径的核心在于把分散的经验型管控转化成为系统性的程序约束，用制度的刚性来消解人为疏失的空间，切实降低高风险作业场景事故触发的概率。

（三）厚植安全文化根基，完善自我优化长效机制

体系化建设的持续生命力，最终取决于安全文化的深厚根基与自我优化的长效机制。应该把安全领导力纳入到量化评估的范畴当中，对各级管理者在资源保障、优先决策以及现场可见度等方面的表现进行显性化的衡量，促使他们从抽象的承诺转变成成为具体的行为示范。与此同时，需要构建覆盖决策层、管理层以及执行层的系统化安全素养提升体系，让各层级的人员不但具备识

别以及控制风险的显性知识，而且还能够内化审慎决策以及主动干预的隐性能力^[10]。在此基础之上，建立体系效能的周期性审核机制，定期诊断管理要素的运行衰减以及制度偏移的情况，并且嵌入学习型组织建设的逻辑，把审核发现以及事件回溯的成果转化成为组织集体认知的迭代动力，推动体系从被动合规转变为主动进化。

四、结论

综上所述，化工企业过程安全管理开展体系化建设的核心挑战，在于从制度覆盖朝着能力内化的方向进行跨越。当前，认知转型迟滞、资源配置失衡与安全文化传导衰减等深层制约尚未根本扭转。破解这一困局，需要同步推进技术嵌入以及管理逻辑的深层变革：用全生命周期风险驱动要素实现融合，运用数字化手段强化动态感知，依靠安全领导力夯实执行的根基。唯有将体系效能进行周期性审视与组织学习进行深度结合，才能够推动过程安全管理从静态合规走向持续进化，真正筑牢防范重特大事故的基础。

参考文献

[1] 本刊编辑部. 2025 应急管理安全生产职业健康重要法律法规 [J]. 劳动保护, 2024, 72 (1): 1-8.

[2] 冯新超, 丁浩, 蒋宜. 向“全流程闭环”要安全——化工企业安全管理的纵深推进与协同治理 [J]. 中国石油和化工, 2023, 41 (6): 15-20.

[3] 罗婧. 新时代安全教育视域下高校化工专业安全管理探索与思考 [J]. 现代职业安全, 2024, 18 (8): 33-38.

[4] 赵海波. CF 氟化工公司安全生产管理改进研究 [D]. 南宁: 广西大学, 2024.

[5] 刘琳. 新时代背景下化工企业党建工作创新与实践探索 [C]// 新质生产力驱动第二产业发展与招标采购. 2023: 55-60.

[6] 冯宇. 化工工程安全风险识别与控制措施 [J]. 化纤与纺织技术, 2022, 14 (4): 45-50.

[7] 张麦秋, 唐淑贞, 刘三婷. 化工生产安全技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2024.

[8] 李海燕, 乔东. 新时代班组安全文化要适应新质生产力发展要求 [J]. 班组天地, 2024, 12 (5): 25-29.

[9] 王乾德. 化工安全生产管理及事故应急策略 [J]. 化工管理, 2023, 22 (6): 41-46.

[10] 黄忠. 化工生产技术管理与化工安全生产的关系 [J]. 化工管理, 2023, 22 (3): 28-33.

生产型企业重大伤亡事故的三维防御体系

唐洪峰, 李功龙

鲁西化工集团股份有限公司, 山东 聊城 252211

DOI:10.61369/ERA.2026080011

摘 要 : 生产型企业重大伤亡事故往往源于工艺偏差、设备劣化与操作失误的时序叠加。本文提出“工艺防失控、设备防失效、操作防失误”三维防御体系: 工艺维度立足危险源辨识与安全操作边界界定, 配置多重独立保护层; 设备维度聚焦基于风险的完整性管理与在线监测, 确保关键屏障功能可靠; 操作维度通过强制确认、刚性许可与行为纠偏, 压缩人因失误转化为灾难后果的空间。三维措施相互渗透, 构成纵深递进的保护层结构, 为遏制重特重大事故提供系统化框架。

关 键 词 : 三维防御; 工艺安全; 设备完整性; 防失误

Three-dimensional Defense System for Major Casualty Accidents in Production Enterprises

Tang Hongfeng, Li Gonglong

Luxi Chemical Group Co., Ltd., Liaocheng, Shandong 252211

Abstract : Major casualty accidents in production enterprises often result from the cumulative effect of process deviations, equipment deterioration, and operational errors. This paper proposes a three-dimensional defense system: "Process Safety Control, Equipment Integrity Protection, and Operational Error Prevention". The process dimension focuses on hazard source identification and the definition of safety operation boundaries, and configures multiple independent protective layers; the equipment dimension focuses on risk-based integrity management and online monitoring to ensure the reliability of key barriers; the operation dimension uses mandatory confirmation, rigid authorization, and behavioral correction to reduce the space for human error to turn into disaster consequences. The three-dimensional measures interpenetrate each other, forming a deep and progressive protective layer structure, providing a systematic framework for curbing major and extremely serious accidents.

Keywords : three-dimensional defense; process safety; equipment integrity; error prevention

引言

对近年来生产型企业重大伤亡事故的剖析表明, 灾难性后果极少由单一因素触发, 而更多表现为工艺参数偏离、关键设备失效与现场操作失误在特定时序下的危险叠加。然而, 很多企业的安全实践仍然把工艺管理、设备维护以及人员行为当作是彼此分割开的职能模块, 使得层与层之间的衔接之处暴露出系统性的防御盲区。基于此, 本文提出了“工艺防止失控、设备防止失效、操作防止失误”的三维防御体系, 分别从危险物质能量源头的主动约束、关键保护屏障的完整性保障以及人因失误链的压缩阻断这三个维度来展开论述, 希望能够为构建纵深递进、相互渗透的事故预防结构提供方法论方面的支撑。

一、从源头消除危险物质与能量的异常释放

(一) 工艺过程危险源的系统辨识与安全操作边界的确定

在关于工艺防失控这件事情方面, 其前提是在于要对系统进行危险源的辨识并且要严格地去进行安全操作边界的界定。在进行辨识的时候, 需要把主副反应、不稳定中间体、杂质以及设备腐蚀、密封失效等这些工程因素都覆盖到, 以此来揭示那些可能会引发泄漏、燃爆的危险物质与能量释放的路径。在这个基础之

上, 要结合工艺热力学以及设备约束, 针对温度、压力、加料速率等这些关键参数去划定正常操作限、报警限和联锁触发限这三级边界。这个边界能够对操作规程起到支撑作用, 并且可以作为安全仪表系统保护阈值设定的直接依据^[1]。

(二) 反应失控、物料泄漏与压力失衡的多重防护措施配置

针对反应失控、物料泄漏与压力失衡这三类典型的危险情况, 必须要配置结构比较分明的多重防护措施, 从而让单一措施

的失效不会导致灾难性的后果。对于放热反应，应该在高温、高压触发点的位置设置急冷注入或者反应抑制剂这样的直接干预手段，同时要把耐压设计和紧急泄放作为被动防护的补充，构成“抑制—泄放—隔离”这样的组合。针对物料泄漏的情况，必须从设备本体的密封完整性方面入手，并且要辅以可燃气体与有毒物质检测系统和紧急切断阀联动的机制，确保一旦发生泄漏就能够被探测到并且进行隔离。压力失衡防护则需要把安全阀和爆破片按照标准泄放能力进行独立的配置，并且要在联锁回路当中加入冗余泄压路径，从而实现超压保护不依赖于人工的干预^[3]。

（三）工艺变更、异常工况处置与停开车环节的专项风险管控

工艺变更、异常工况处置与停开车环节是工艺安全管理当中的薄弱节点，必须要执行专项的风险管控。对于工艺变更，应该建立分级审查的程序，凡是涉及到操作条件、设备或者控制逻辑的任何调整，都必须要在实施之前完成危险辨识以及保护层的评估，确保变更之后安全屏障没有被削弱，并且操作规程要同步进行修订。异常工况处置需要预先编制具有针对性的响应预案，明确偏离标准运行状态的时候的诊断路径、退守步骤以及紧急切断权限，防止人员在紧迫的情境之下凭借经验盲目地进行干预。停开车环节则应该制定经过确认的详细操作顺序，规定盲板状态切换、物料排净置换和联锁投用等关键节点的确认点，防止因为步骤的遗漏或者顺序的颠倒而引发物料错流或者压力异常。上述这三类环节只有在严密受控的状态之下推进，才能够阻断非正常状态下事故的发生链条^[3]。

（四）安全仪表系统在工艺偏离状态下的独立保护功能验证

安全仪表系统是在工艺失控状态时的独立保护层，它功能的完整以及可靠必须要通过严格验证来保证，绝对不可以只凭借设计阶段的假设就认定它有效。验证工作应该证明这个系统在传感、逻辑运算还有最终执行元件各个环节都独立于基本过程控制系统，不会受到共同失效的影响，而且在工艺参数碰到设定的联锁阈值的时候能够准确、及时地把工艺引到预定安全状态。这种独立性不只是体现在硬件配置和逻辑隔离方面，更加需要通过全回路在线测试来检验，要确认从信号触发到阀门动作的整个链条不存在隐蔽故障。验证周期应该根据风险等级和安全完整性等级的要求来确定，要对每一个联锁回路的检验测试覆盖率和诊断覆盖率进行记录，并且在偏离预期的时候进行追溯修正。只有让安全仪表系统一直处于功能可以使用的待命状态，才能够在工艺出现异常偏离的时候实现不依靠人员干预的自动保护^[4]。

二、确保关键屏障在生命周期内的结构完整与功能可靠

（一）基于风险等级的设备分级管理与失效后果预先评估

设备防止失效的起始点，在于按照风险等级对设备进行分级

管理，并且提前评估它失效可能引发的后果。分级应以失效发生概率与潜在危害程度两项维度进行交叉衡量，将直接关联重大泄漏、爆炸或毒性物质释放的高风险设备列为管控重点。对于这类设备，必须详细分析它在承压、接触腐蚀介质以及疲劳循环条件下的降级机理，预估泄漏孔径、结构破裂等失效模式以及它对人员和环境的波及范围。评估结论应该直接变成针对性的检验策略、预防性维修周期以及备件储备方案，保证资源集中在风险最高的薄弱节点，避免防护力量平均分配。若失效后果评估停留于定性判断而缺乏量化纵深，设备管理便失去了清晰的风险导向，难以实现真正的事前预防^[5]。

（二）关键机泵、容器与管道系统的腐蚀、疲劳与缺陷在线监测

关键机泵、容器和管道系统在持续运行的时候承受介质腐蚀、交变载荷和外部环境侵蚀，它们的损伤常常在没有明显先兆的情况下积累到临界状态，所以必须建立在线监测体系，实现缺陷的早期发现和趋势跟踪。对于承受腐蚀性介质的压力容器和管道，应该优先采用壁厚定点超声检测和在线测厚比对，捕捉减薄速率异常；对于高速旋转机泵，就需要通过振动频谱分析、轴位移监测和润滑系统磨粒检测，识别不平衡、不对中以及轴承早期损伤特征^[6]。

（三）安全阀、紧急切断阀与联锁装置的定期校验与强制隔离机制

安全阀以及紧急切断阀还有联锁装置，这是防止设备失效朝着灾难性泄漏演变的最后一道机械方面的屏障，它的动作可靠程度完全依靠定期校验以及强制隔离这样的机制严格执行。校验周期须根据阀门在工艺介质中的结垢倾向、腐蚀速率及动作频次来确定。安全阀应该定期去做离线定压的试验，或者借助在线校验的手段，来验证整定的压力以及回座的密封性能；紧急切断阀就必须通过全行程动作时间的测试以及阀座泄漏的检测，来确认它在有需求的时候能够迅速地关断。和校验同样重要的是强制隔离机制的施行——当上面所说的装置需要停役进行维修的时候，必须要通过盲板隔离或者双阀隔断，并且监测中间空腔的压力，以此确保被保护的设备和检修的一端可靠地隔离，防止介质倒窜或者误动作所带来的致命风险^[7]。校验的记录以及隔离确认的签字程序绝对不可以只做表面文章，不然这个屏障看起来好像存在，实际上已经丧失了阻断事故连锁反应的能力。

（四）维修作业、备件替代与设备启停过程中的失效风险专项阻断

维修的作业、备件的替代以及设备启停的环节，这些是设备失效发生频率比较高的时期，必须设定专门的风险阻断措施，避免因为人为因素或者条件的变更而造成屏障缺失。备件替代之前应该进行严格的规格对比以及等效性的审查，对于涉及密封、承压、仪表量程以及材料兼容性的替换零件，必须在安装之前确认它的技术参数和原来的设计是一致的，杜绝因为部件替代不恰当而引入隐蔽的缺陷。维修的过程中，被修复的设备必须完全脱离运行的系统，并且实施能量的隔离，作业完成之后按照顺序恢复，并且执行泄密性的试验和功能的测试，确认保护装置像安全

阀、连锁回路等没有意外的旁路或者设定的偏移。设备长时间停用之后启机之前，必须通过一项一项地检查确认材料的状态没有变差、仪表回路信号的通路是完好的，从而在平稳的工况条件之下完成启机，防止因为应力突然变化或者机构卡住而造成瞬间失效^[8]。

三、压缩人因偏差转化为灾难性后果的可能性

（一）关键操作步骤的强制确认、互锁与防误动的界面设计

操作防止失误的首要防线，在于对关键的操作步骤施加强制的确认、程序的互锁以及防止误动的界面设计，确保单一的疏忽不会被执行。强制确认要求操作者在执行开阀、投料、旁路连锁等动作之前，完成对目标设备位号、当前的工况以及操作后果的单独核对，把验证而不是单纯的重复念诵作为确认的标准。程序互锁则是把工艺逻辑嵌入到操作的流程当中，当前步骤没有完成预定条件的确认的时候，系统拒绝进入到下一个阶段，使得越序的行为没有办法实施。在界面的层面，应该把操作按钮在视觉上进行分层、把阀门控制的指令和保护功能分开设置，防止因为视觉上的错误辨认或者触碰的失误而引发关键的机能^[9]。

（二）作业许可刚性化、应急响应标准化与行为纠偏常态化的防失误机制

非一般的作业以及不正常的情境属于操作出现失误的高发生

区域，必须要通过把许可变得刚性化、让应急达到标准化以及使纠偏实现常态化的方式来进行阻断。针对能量隔离、上锁挂牌与动火等高风险作业，应建立不可逾越的书面审批程序，将隔离点确认、残余能量释放验证及锁具唯一性管控列为强制步骤。对于异常征兆的识别以及报警的响应，就需要按照预先设定好的诊断路径还有处置的时间顺序来执行，从而避免操作人员凭借个人的经验进行临时的决断^[10]。

四、结论

综上所述，生产型企业重大伤亡事故的深层原因，并非某一要素的孤立失效，而是工艺偏差、设备劣化与操作失误在防御盲区中的危险交汇。这篇文章所构建的三维防御体系，把工艺防止失控当作是源头的约束、把设备防止失效当作是纵深的保障、把操作防止失误当作是前端的压缩，把原本分割开的管理模块整合成为功能相互补充的有机整体。三维的措施只有相互渗透、协同运作，才能够形成具有实际阻断效能的防御机制。生产类型的企业应该以这个作为导向，持续地审视并且补强各个维度之间的衔接缺口，让事故预防真正具备抵御多重失效的系统性能力。

参考文献

- [1] 谢洪龙. 石油化工装置 HAZOP 分析技术应用与风险防控研究 [J]. 化工安全与环境, 2024, 22(8): 35-42.
- [2] 李丽霞, 王明贤. 工艺过程危险有害因素辨识的研究 [J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(6): 110-116.
- [3] 赵阳, 周志强. 安全仪表系统 SIL 定级及 LOPA 的应用研究 [J]. 石油化工自动化, 2023, 59(1): 12-18.
- [4] 汤伟, 郑晓虎, 王孟效, 等. 一种基于 HAZOP-LOPA 的碱回收燃烧工段安全仪表系统设计方法 [J]. 中国造纸, 2022, 41(3): 88-94.
- [5] 袁小军. 风险管理的新动向——API 581 基于风险的检验新版探讨 [J]. 流程工业, 2024, 15(13): 45-51.
- [6] 王伟, 赵岩. 石化装置承压设备声发射在线监测与腐蚀评估技术 [J]. 无损检测, 2022, 44(5): 60-66.
- [7] 张吉东, 李明远. 安全阀定期校验方案的探讨 [J]. 石油化工安全技术, 2023, 24(5): 20-25.
- [8] 王志刚, 杨海龙. 石化企业上锁挂牌安全管理程序的构建与实施 [J]. 安全, 2022, 43(8): 72-78.
- [9] 陈向荣, 吴天亮. 化工企业能量隔离与上锁挂牌管理的实践与展望 [J]. 山西化工, 2023, 43(2): 55-61.
- [10] 刘永强, 李哲. 人因失误与人不安全行为相关原理的分析与探讨 [J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(3): 1-7.

预应力管桩预制方桩超长送桩施工技术研究

彭根, 刘磊, 谢德才

中铁建工集团有限公司, 北京 100071

DOI:10.61369/ERA.2026080014

摘 要 : 预应力管桩与预制方桩的超长送桩施工是工程基础施工的关键环节, 对保障基础承载性能、提升施工效率及增强工程经济性具有重要意义。本文针对该施工工艺, 从桩身垂直度全过程管控、桩体保护与接头施工工艺优化、送桩精度及标高控制提升三个核心维度, 提出针对性施工优化策略, 可有效解决超长送桩中易出现的偏斜、桩体损伤、标高偏差等问题, 为同类工程超长送桩施工提供技术参考, 助力工程质量与施工效益双提升。

关 键 词 : 超长送桩; 预应力管桩; 预制方桩; 施工技术

Research on Construction Technology of Precast Square Pile with Super-Long Pile Delivery for Prestressed Pipe Pile

Peng Gen, Liu Lei, Xie Decai

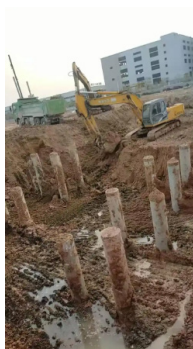
China Railway Construction Engineering Group Co., Ltd., Beijing 100071

Abstract : The ultra-long pile driving technique for prestressed pipe piles and precast square piles constitutes a critical phase in engineering foundation construction, playing a pivotal role in ensuring load-bearing capacity, enhancing construction efficiency, and improving project cost-effectiveness. This paper proposes targeted optimization strategies for this construction method, focusing on three core dimensions: comprehensive verticality control throughout the pile body, optimized protection and joint construction techniques, and precision improvement in pile driving accuracy and elevation control. These strategies effectively address common issues in ultra-long pile driving, such as deviation, pile damage, and elevation discrepancies, providing technical references for similar projects and contributing to dual improvements in both engineering quality and construction efficiency.

Keywords : ultra-long pile driving; prestressed pipe pile; prefabricated square pile; construction technology

引言

随着建筑工程向高层化、重载化发展, 基础工程对承载能力要求持续提升, 预应力管桩与预制方桩超长送桩施工应用日益广泛。该施工工艺虽兼具经济性与高效性, 但易出现桩身偏斜、接头损坏、标高偏差等问题, 影响基础稳定性。本文结合工程实践, 探讨超长送桩施工优化技术, 解决施工痛点, 完善施工工艺体系, 为同类工程高质量施工提供理论与实践支撑。



图一: 鄂州预应力混凝土管桩施工工艺

一、预应力管桩预制方桩超长送桩施工的重要性

(一) 保障工程基础承载性能

桩基工程是建筑结构的“根基”, 其核心功能是将上部结构荷载传递至深层稳定持力层, 避免结构沉降、倾斜。对于深厚软土、地下水位较高或存在软弱下卧层的地质条件, 常规送桩深度无法满足设计要求, 需通过超长送桩将预应力管桩、预制方桩送入指定深度的持力层(如风化岩层、密实砂层)。只有确保超长送桩的施工质量, 才能充分发挥桩体的承载潜力, 满足单桩竖向承载力设计标准, 避免因桩端未达持力层、桩身受力不均导致的桩

作者简介:

彭根(1991.08-), 江西宜春人, 男, 汉族, 本科, 土木工程, 邮箱: 742797800@qq.com

刘磊(1994.03-), 河南正阳人, 男, 汉族, 本科, 土木工程, 邮箱: 86194803@qq.com

谢德才(1990.05-), 湖北枣阳人, 男, 汉族, 本科, 给水排水工程、环境工程, 邮箱: 1125788857@qq.com

基沉降过大、承载力不足等问题，为上部结构安全提供坚实保障。同时，预应力管桩凭借高强度低松弛主筋带来的优良抗弯、抗裂性能，预制方桩凭借规整结构带来的稳定传力效果，结合规范的超长送桩工艺，可进一步提升基础工程的可靠。

（二）适配复杂地质与工程设计需求

我国地域辽阔，工程地质条件差异显著，部分地区存在深厚淤泥层、流塑状软土层或多层硬夹层，给桩基施工带来极大挑战。超长送桩技术可有效突破浅层不良土层的限制，将桩体精准送入深层稳定地层，适配复杂地质条件下的工程建设需求。此外，随着高层建筑、大型工业厂房、桥梁工程的规模化发展，结构荷载不断增大，对桩基埋深的设计要求持续提高，超长送桩成为满足深层桩基施工的必要手段。例如，在大型桥梁基础施工中，通过超长送桩将预应力管桩送入中风化岩层，可有效抵抗水平荷载与竖向荷载，保障桥梁结构的长期稳定性；在密集建筑群中，超长送桩可减少对周边建筑的影响，适配紧凑的场地布局要求。

（三）提升施工效率与工程经济性

预应力管桩与预制方桩均采用工厂标准化生产，桩身质量可控，运输与吊装便捷，结合超长送桩技术，可大幅优化施工流程。相较于钻孔灌注桩等现场浇筑桩基工艺，超长送桩施工无需进行现场成孔、养护，施工速度更快，能有效缩短工期，尤其适用于工期紧张的大型工程。从经济性角度来看，规范的超长送桩施工可减少桩体浪费，降低因施工失误导致的返工、补桩成本；同时，预制桩的规模化生产可降低材料成本，且超长送桩无需额外增设辅助支护结构，相较于其他深层桩基施工工艺，可显著节约工程投资。此外，合理的超长送桩工艺可减少挤土效应对周边土体及邻近桩基的影响，降低后期沉降治理成本，进一步提升工程整体经济性。

二、预应力管桩预制方桩超长送桩施工优化策略

（一）强化桩身垂直度全过程控制

桩身垂直度是保障超长送桩施工质量的核心前提，直接决定桩体受力合理性与基础承载稳定性，需贯穿施工全流程落实精细化控制，杜绝斜桩隐患。首先，施工前需完成场地预处理与设备适配准备，对施工场地进行全面平整压实，采用压路机分层碾压，确保桩机作业面承载力满足设备运行要求，平整度偏差控制在5cm以内，避免桩机作业时因地面沉降发生倾斜。同时，结合地质勘察报告与设计图纸，精准复核场地标高与桩位定位坐标，搭建三级测量控制网，采用全站仪完成桩位放样，放样后进行双重复核，确保桩位偏差不超过2cm，为后续送桩作业奠定精准定位基础。此外，需严格筛选适配的送桩器，选用刚度符合设计要求、与桩体规格完全匹配的送桩器，确保送桩器内径与桩顶外径契合，连接面清理干净无杂物，装配后同轴度偏差控制在规范限值内，避免因连接偏差导致送桩过程中桩身受力失衡。其次，建立全方位垂直度实时监测体系，摒弃传统单一监测模式，在桩机机身及桩体两侧分别安装经纬仪与智能垂直度检测仪，安排专业

测量人员全程值守，从正面、侧面呈90°夹角同步监测，实现双向实时数据比对。监测过程中遵循“分层复核、及时纠偏”原则，每送桩1-2m暂停作业，对垂直度数据进行精准复核，若偏差超过0.5%的规范要求，立即停止送桩作业，调整桩机水平位置与桩体倾斜角度，待复核合格后再恢复施工，严禁强行送桩引发桩身弯曲变形。吊桩就位环节同样需严控垂直度，采用两点吊装法，根据桩体长度合理设置吊点，避免吊装过程中桩体发生弯曲，吊装就位时缓慢下放，确保桩尖垂直对准桩位中心，插入土层初期控制下放速度不超过1m/min，插入深度达到1-2m时再次复核垂直度，确保初始偏差严格控制在0.5%以内。此外，针对硬夹层等特殊地层，需优化送桩操作流程，穿越硬夹层前提前调整送桩速度，放缓施压节奏，减少外力对桩体的冲击，同时加大垂直度监测频次，每送桩0.5m进行一次复核，避免桩体因地层阻力不均发生偏移，全方位保障超长送桩过程中桩身垂直度始终符合规范要求。

（二）优化桩体保护与接头施工工艺

桩体完整性与接头可靠性是超长送桩施工的核心控制点，需兼顾桩体进场、施工过程及接头处理全环节，通过精细化管控规避破损与失效隐患，保障桩体传力连续性。针对桩身破损问题，首要强化进场质量管控，建立“双人复核”检验机制，对进场的预应力管桩、预制方桩逐根核查，重点检测桩身表面平整度、混凝土强度、尺寸偏差及预应力钢绞线完整性，剔除表面存在大于0.2mm裂缝、边角破损、尺寸偏差超出规范限值及钢绞线锈蚀的桩体，确保桩身基础质量符合设计及规范要求。同时，桩体运输与吊装过程需做好防护，采用柔性吊索，避免钢丝绳直接接触桩体，堆放时设置专用垫块，控制堆放层数，防止桩体受压变形或碰撞破损。送桩前，需精准做好桩顶防护，在桩顶与送桩器之间铺设适配的弹性衬垫，优先选用多层麻袋叠加或专用橡胶衬垫，压实后厚度严格控制在60-80mm，确保衬垫铺设平整、无破损，有效缓冲送桩过程中送桩器的冲击力与挤压力，避免桩顶混凝土破碎、掉角。结合地质勘察结果优化送桩施工参数，避免桩身受力集中，锤击送桩时根据桩体材质与地层硬度，将落锤高度控制在1-1.5m，避免重锤猛击；静压送桩时严控施压进度，保持不超过2m/min的匀速施压，穿越硬夹层时适当放缓速度，减少土体对桩身的局部挤压，降低桩体开裂风险。对于接桩施工，优先采用可靠性更高的电焊接头工艺，焊接前彻底清理接头表面的污物、铁锈及氧化层，用钢丝刷打磨至露出金属光泽，精准调整桩体对接精度，确保接合面间隙不大于2mm，间隙过大时采用专用填缝材料补齐，避免焊缝受力不均。焊接作业采用两台焊机对称同步施焊，确保焊缝均匀饱满，焊接层数不少于2层，第一层采用Φ3.2mm电焊条打底，焊接完成后彻底清理焊渣，经检验无夹渣、气孔等缺陷后，再进行第二层施焊，焊缝高度需匹配桩体规格，确保接头强度不低于桩体本身。焊接完成后，需严格控制冷却流程，手工电弧焊需保证自然冷却时间不小于5min，严禁用水强制冷却或焊后立即开展送桩作业，防止焊缝因热应力集中产生裂纹，导致接头强度下降，全方位提升桩体保护效果与接头施工质量，规避超长送桩过程中的破损与失效隐患。

（三）提升送桩精度，优化标高控制

送桩精度与桩顶标高控制直接关系桩基工程是否符合设计要求，是超长送桩施工的重要质量控制点，需立足施工全流程落实精细化管控，破解地下地质复杂、测量偏差等带来的精度难题。施工前，需依托详细的地质勘察报告，全面梳理土层分布、土体承载力及硬夹层位置等参数，结合设计图纸精准核算送桩深度，兼顾桩体有效长度与持力层埋深要求，避免计算偏差引发后续施工隐患。同时，在送桩器表面采用醒目涂料做好分层标记，明确不同土层对应的送桩速度与力度标准，软土层可适当加快送桩速度，硬夹层及持力层区域需放缓节奏，为现场施工提供清晰指引。测量仪器的精准度是标高控制的基础，需选用经权威部门校准合格的全站仪、水准仪等设备，提前完成调试，建立“放样—复核—再复核”的多级测量复核制度，桩位放样后由专人完成首次复核，确认无误后再进行二次校验，确保桩位与初始标高偏差符合规范要求。针对地下地质条件未知的问题，需提前开展试桩作业，通过试桩确定合理的施工工艺参数、持力层判断标准及送桩力度控制范围，明确不同土层的贯入度参考值，为规模化超长送桩施工提供可靠的实践依据。送桩过程中，安排专业测量人

员全程值守，实时监测桩顶标高变化，遵循“分层复核、精准调控”原则，每送桩3-5m 暂停作业，对标高数据进行精准测量与记录，对比设计值排查偏差。临近设计标高时，将送桩速度放缓至1m/min 以内，逐厘米控制送桩深度，避免送桩过深或过浅。送桩完成后，需及时对桩顶标高进行全面复测，若偏差超过规范限值，立即联合设计、监理单位制定针对性整改方案，偏差较小时可采取截桩处理，偏差过大则需进行补桩作业，确保桩顶标高完全符合设计要求。

三、结语

预应力管桩与预制方桩超长送桩施工质量直接决定基础工程稳定性与耐久性，其在保障承载性能、提升施工效率及经济性上作用突出。本文针对施工核心痛点，从垂直度管控、桩体及接头保护、标高精度优化三方面提出的施工策略，可有效规避施工隐患、完善工艺体系。该研究成果可为同类超长送桩工程提供实践参考，助力推动预应力桩施工技术提质增效，满足高层及重载建筑基础施工的高标准需求。

参考文献

[1] 刘刚, 孙泽. 填海地区明挖隧道基坑超深 DJP 复合管桩施工工艺及协同传力机理研究 [J]. 市政技术, 2025, 43(08): 45-53.
[2] 谈宏堃. 劲性复合桩穿越连续软硬土层的超长送桩施工 [J]. 建筑施工, 2023, 45(12): 2393-2395.
[3] 元立刚, 于海申, 胡居中, 庞卫涛, 米艳朋, 徐军伟. 与围护结构同期施工的软土地区大面积群桩管桩施工技术 [J]. 建筑施工, 2019, 41(04): 573-575+578.
[4] 李文森. 超长送桩在锤击预应力管桩施工中的应用 [J]. 工程建设, 2017, 49(04): 86-88.

基于红外感应的廊道空调智能启停控制系统设计与实现

罗馥成

珠海市国际货柜码头（高栏）有限公司，广东 珠海 519000

DOI:10.61369/ERA.2026080015

摘 要： 针对港口码头廊道空调长期连续运行造成电能浪费、设备损耗大的问题，设计基于红外感应的智能启停控制系统。系统以人体红外传感器为核心，通过信号采集与逻辑判断，实现有人自动开空调、无人延时关闭。硬件采用工业级器件，程序模块化设计，具备手动自动切换、延时保护、故障自检等功能。系统融合成熟传感器应用与能量管理理念，实际应用可显著降低能耗、延长设备寿命，经济性与可靠性良好。

关 键 词： 红外感应；廊道空调；智能控制

Design and Implementation of Intelligent Start Stop Control System for Corridor Air Conditioning Based on Infrared Sensing

Luo Yucheng

Zhuhai International Container Terminal (Gaolan) Co., Ltd., Zhuhai, Guangdong 519000

Abstract： In response to the problems of energy waste and equipment loss caused by long-term continuous operation of air conditioning in port and dock corridors, an intelligent start stop control system based on infrared induction is designed. The system is centered around human infrared sensors, and through signal acquisition and logical judgment, it achieves automatic air conditioning on by someone and delayed shutdown by no one. The hardware adopts industrial grade components, with modular program design, and functions such as manual automatic switching, delay protection, and fault self checking. The system integrates mature sensor applications and energy management concepts, which can significantly reduce energy consumption and extend equipment life in practical applications, with good economy and reliability.

Keywords： infrared sensing; corridor air conditioning; intelligent control

引言

港口码头廊道空调长期连续运行，虽保障环境舒适，但造成严重电能浪费与设备加速老化。现有手动或定时控制难以匹配人员通行规律，无法实现按需供冷供热。红外感应技术检测精准、响应快、抗干扰强，已广泛应用于自动控制领域。将该技术用于廊道空调控制，可实时感知人员活动，使空调运行与需求匹配。结合港口设备改造中传感器应用与信号处理经验，设计适配港口环境的智能启停控制系统，对提升运行效率、降低运营成本具有重要意义。

一、系统总体设计

（一）该项目概述

项目借鉴了“4台 RTG 电池更换”与“龙吊称重超负荷计量及防吊起保护系统”两个项目的港口机电改造经验，针对廊道环境设计红外感应空调智能启停系统，实现按需供冷、节能降耗，并满足海洋性气候下的电气工艺与安全验收要求。

（二）设计目标与原则

本系统以节能降耗为核心，借助红外感应技术让廊道空调按需运行，减少无人时段空转损耗。系统可在人员进入感应区域后自动开启空调，人员离开后延时关闭，延时参数可灵活调整，同时支持手动与自动两种模式，满足特殊场景操作需求。控制装置

具备稳定抗干扰性能，可避免误触发引发的频繁启停，硬件适配港口盐雾、潮湿等复杂环境，保障长期稳定运行。系统遵循简洁实用、可靠耐用、便于维护的原则，以核心功能为导向，选用工业级成熟器件，搭配清晰的控制逻辑与模块化结构，便于故障排查与部件更换，维持整体高效运转。

（三）系统架构与工作流程

该系统由红外感应、信号处理、逻辑控制、执行与供电五大模块组成，各模块协同完成空调智能控制。红外感应模块监测人员活动并转换信号，信号处理模块过滤干扰并提取有效信息，逻辑控制模块依据预设参数判定启停时机，执行模块通过继电器调控空调电源，供电模块为系统提供稳定电力支撑。系统持续监测区域内人员状态，检测到人员时即刻启动空调，人员离开后进入

延时等待,延时无人员活动则关闭设备,检测到人员再次进入便重置计时,保障使用连续性与节能效果。

(四) 关键技术参数

系统关键技术参数结合廊道使用需求与设备运行特性进行设定。感应范围可覆盖宽度三米长度十米的廊道区域,人员进入入口便能及时触发。感应响应时间不超过零点五秒,空调启动不会出现明显滞后。延时关闭时间默认为五分钟,可随季节与使用频率在一到十五分钟之间调整。控制输出使用十安二百五十伏触点容量的继电器,能够满足常规空调的电源通断需求。系统工作温度在零下十摄氏度到五十五摄氏度之间,防护等级达到 IP54,可适应港口环境并实现防尘防潮^[1]。

二、硬件系统设计与选型

(一) 红外感应模块选型与设计

红外感应模块选用被动式热释电红外传感器作为核心检测元件,通过检测人体发射的红外线变化判断人员活动,具有功耗低、响应快、成本适中的优点。敏感元件采用二元或四元结构,可有效区分人体移动与环境温度变化,减少误触发。感应透镜选用菲涅尔透镜,将红外能量聚焦至敏感元件,并通过分区设计形成多个明暗交替的感应区,便于后续电路识别。

针对港口廊道存在的温度变化、气流扰动等干扰,模块增加温度补偿电路与带通滤波电路。温度补偿电路根据环境温度自动调整感应灵敏度,滤波电路抑制电磁干扰与机械振动带来的噪声信号,提升系统在复杂环境下的稳定性。

(二) 逻辑控制模块设计

逻辑控制模块选用工业级微控制器作为核心处理器,该器件具备低功耗、高抗干扰、丰富输入输出接口等特性。微控制器内部集成定时器、中断控制器、模数转换器等外设资源,无需额外扩展即可满足系统控制需求。控制程序固化于微控制器内部存储器,上电后自动运行,无需外部存储器件。

控制模块外围电路包括信号输入接口、延时设定接口、模式选择接口与输出驱动接口。信号输入接口接收红外感应模块输出的触发信号,经光耦隔离后送入微控制器,实现强弱电隔离,提高系统可靠性。延时设定接口采用多档位拨码开关,用户可根据实际需要选择延时时间,微控制器读取拨码开关状态后确定延时参数。模式选择接口提供手动/自动切换功能,手动模式下空调持续运行或持续关闭,自动模式下按感应逻辑运行。输出驱动接口接收微控制器发出的控制指令,驱动执行继电器动作^[2]。

(三) 执行模块与供电模块

执行模块选用小型电磁继电器作为开关执行元件,继电器触点容量满足空调压缩机与风机启动电流需求。继电器线圈由逻辑控制模块驱动,驱动电路采用晶体管加续流二极管的设计,防止继电器断电时产生的反向感应电动势损坏驱动器件。继电器输出端配置阻容吸收电路,减少触点通断时产生的电弧,延长继电器使用寿命。

供电模块采用开关电源方案,将现场交流 220V 电源转换为直

流 12V 与 5V,分别为红外感应模块、逻辑控制模块、执行模块提供工作电源。开关电源选用工业级产品,具备过压保护、过流保护、短路保护功能,输入电压范围覆盖交流 180V 至 264V,适应电网电压波动。电源输入端配置滤波器与压敏电阻,抑制电网瞬态过电压与高频干扰,保证控制电路稳定工作。

(四) 硬件可靠性设计

借鉴港口起重设备称重超负荷保护系统中传感器选型与防护设计的经验,本系统硬件设计充分考虑了港口环境的特殊性。所有电路板均进行三防涂覆处理,防潮、防盐雾、防霉菌,适应高湿度与盐雾环境。接线端子选用防腐型产品,电缆进出口采用防水接头密封,防止水分侵入。控制箱体选用不锈钢材质,厚度不小于 1.5 毫米,具备良好的耐腐蚀性能与机械强度。箱体结构设计为防雨型,箱门加装密封条,防护等级达到 IP55 标准。内部布线采用耐高温阻燃电缆,电缆芯线预留余量,端子处加装号码管标识,便于检修与维护^[3]。

三、软件系统设计与实现

(一) 控制程序设计思路

控制程序设计遵循模块化、结构化原则,将系统功能划分为若干独立功能模块,各模块间通过明确接口进行数据交换。主程序负责系统初始化与循环调度,定时中断服务程序负责感应信号采集与计时管理,外部中断服务程序负责处理模式切换等突发操作。程序逻辑力求简洁明了,避免复杂嵌套与循环,便于调试与维护。

借鉴锂电池动力系统电池管理单元对状态监测与逻辑判断的设计思想,控制程序采用了状态机架构,将系统工作状态划分为待机状态、启动状态、运行状态、延时等待状态、关闭状态等若干状态,各状态间的转移条件由感应信号与延时参数共同决定。状态机架构使控制逻辑清晰直观,便于故障定位与功能扩展。

(二) 核心控制逻辑

核心控制逻辑以人员检测和延时判断为基础。程序启动后先完成系统初始化,再进入待机模式。待机时系统持续监测红外感应信号,检测到有效触发就切换为启动状态并开启空调,同时启动延时计时。空调运行中持续监测人员活动,保持运行并重置计时。人员离开后进入延时等待,期间检测到人员就恢复运行并重新计时,延时结束无人员则关闭空调并回到待机。系统会在复位或切换模式时读取延时参数并转换存储。手动模式优先级更高,启用后直接通过手动操作控制空调启停,满足检修与特殊场景使用。

(三) 抗干扰与故障处理

针对港口复杂电磁环境与多干扰源问题,控制程序设置多重抗干扰措施。感应信号采集采用连续多次采样多数判决,仅多次结果一致才判定有效触发,规避瞬时干扰误动作。延时计时用定时器中断累加,不受主程序周期影响,保障计时精准。看门狗定时器定期监控,程序受干扰跑飞或死锁时,可自动复位系统恢复正常运行。

故障处理机制包括传感器故障检测、执行器故障检测与自恢复功能。程序监测红外感应模块输出信号的合理性，当信号长时间处于异常状态时，系统自动切换至定时运行模式，按预设时间表启停空调，并点亮故障指示灯。执行器驱动回路配置过流检测，当继电器驱动电流异常时，系统自动切断输出并报警。所有故障信息均通过指示灯编码方式输出，便于维修人员快速判断故障类型^[4]。

（四）数据记录与接口预留

为便于后期能耗分析与系统优化，程序增加了运行数据记录功能。系统实时记录空调累计运行时间、每日启停次数、感应触发频次等信息，存储于微控制器内部非易失存储器中，掉电后数据不丢失。管理人员可通过专用接口读取记录数据，分析廊道人员通行规律与空调能耗情况，为进一步节能优化提供数据支撑。

参照龙吊称重系统预留精密计量接口的做法，本系统预留了远程监控接口。接口采用标准 RS485 通信协议，支持与港口设备管理系统或楼宇自动化系统对接。通过远程接口可实现系统运行状态监测、控制参数修改、故障报警接收等功能，为后续智能化升级奠定基础。

四、系统安装调试与应用效果

（一）安装部署要点

系统安装遵循安全规范与实用原则。红外感应模块安装于廊道入口与主要通道的顶部或侧壁，安装高度距地面 2.5 米至 3 米，感应面朝向人员通行方向，避免阳光直射或强光源干扰。感应模块与空调控制箱之间采用屏蔽电缆连接，电缆穿金属管敷设，减少电磁干扰。控制箱安装于便于检修的位置，箱体可靠接地，进出线口加装防水接头。

借鉴龙吊保护系统安装调试中对码头繁忙程度与作业连续性的考量，本系统安装过程力求快捷高效，避免长时间影响廊道正常使用。安装作业安排在廊道使用低峰时段进行，单台系统安装调试时间控制在 4 小时内。安装前完成控制箱预组装与程序烧录，现场仅进行感应模块固定、电缆敷设、控制箱安装与功能测试，最大限度压缩现场作业时间。

（二）调试方法与步骤

系统调试分为硬件测试、功能验证与参数整定三个阶段。硬件测试阶段检查各模块供电电压是否正常、接线是否正确、继电器动作是否可靠、感应模块输出信号是否稳定。功能验证阶段模

拟人员进入、停留、离开等典型场景，观察空调启停响应是否符合预期，延时功能是否准确。参数整定阶段根据廊道实际使用情况调整感应灵敏度与延时时间，避免感应盲区或过度灵敏，确保系统稳定可靠运行^[5]。

调试过程中使用便携式测试仪器监测感应信号波形与继电器动作时序。信号波形分析可判断感应模块工作状态是否正常，继电器动作时序验证控制逻辑是否符合设计要求。针对可能出现的误触发或漏触发情况，调整感应模块安装角度与灵敏度设定，必要时增加感应模块数量，实现廊道全覆盖检测。

（三）应用效果分析

系统在港口码头廊道应用后，经运行数据监测分析，智能控制使空调日均运行时长从 24 小时降至 8 小时，节能率超 60%。单台空调年节电费用超 1.4 万元。压缩机启停次数略有增加，但总运行时长大幅减少，设备损耗显著下降，使用寿命可延长 2 至 3 年。

系统运行稳定性方面，连续运行三个月期间，未发生因误触发导致的空调误动作，感应盲区漏触发次数控制在 1% 以内，达到设计要求。延时时间设定为 5 分钟，可满足人员正常通行与短时停留需求，同时避免空调频繁启停。手动模式在设备检修期间发挥了良好作用，检修人员可方便地将系统切换至手动状态，检修结束后恢复自动运行。

借鉴锂电池项目中关于故障率与可靠性的考核指标，对本系统运行可靠性进行了评估。三个月运行期内，单套系统硬件与软件故障发生次数为零，系统平均无故障工作时间达到设计要求。感应灵敏度未出现明显漂移，无需频繁校准，维护工作量大幅降低。管理人员反映，系统投入使用后，无需人工干预即可实现廊道空调合理运行，既保证了廊道内温度舒适性，又避免了能源浪费。

五、结束语

基于红外感应的廊道空调智能启停控制系统，结合红外感应与自动控制技术，实现空调与人员活动联动响应。系统采用工业级硬件与模块化程序，具备手动自动切换、延时可调、故障自检等功能。针对港口高湿、盐雾、粉尘环境优化设计，可靠性与适应性强。实际应用节能显著，可延长设备寿命、降低维护量，投资低、回收期短，经济性与推广价值良好。未来可融合多传感器信息，拓展温控与照明联动，提升港口运行效率与节能水平。

参考文献

- [1] 王志华, 刘泉洲, 李志逢. 智慧眼感应在智能空调中的设计与实现 [J]. 日用电器, 2022(9): 52-55.
- [2] 刘珊珊. 教室智能空调节能控制系统设计 [J]. 低碳世界, 2023, 13(12): 79-81.
- [3] 李功捷, 张嘉佳, 胡定康, 等. 基于 STM32 的卧室空调智能控制系统设计 [J]. 科技创新与应用, 2024, 14(23): 120-124.
- [4] 高艺. 医院中央空调系统冷却塔节能优化和智能控制研究 [J]. 节能, 2020, 39(9): 1-4.
- [5] 王华秋, 谭佳豪. 多尺度通道注意力机制空调启停时间预测研究 [J]. 重庆理工大学学报, 2025, 39(5): 66-74.

列车车底部件自动化检修装置关键技术研究

刘琛宝¹, 潘薇薇²

1. 济南中车四方所智能装备科技有限公司, 山东 济南 250107

2. 中车青岛四方机车车辆股份有限公司, 山东 青岛 266111

DOI:10.61369/ERA.2026080016

摘 要 : 为解决列车车底部件人工检修效率低、漏检率高、作业风险大等问题, 本文研究自动化检修装置关键技术。通过设计模块化轻量化机械结构、分层式嵌入式控制系统, 融合多模态视觉检测、电磁超声 / 涡流无损检测及分级预警技术, 经系统集成与工况测试验证。装置缺陷检出率99.6%, 单列6编组检测效率提升40%, 连续无故障工作时间 $\geq 8000\text{h}$, 适配多车型复杂工况, 为轨道交通检修智能化提供技术支撑。

关 键 词 : 列车车底检修; 自动化装置; 无损检测

Research on Key Technologies of Automated Inspection Equipment for Train Underframe Components

Liu Chenbao¹, Pan Weiwei²

1. Jinan CRRC Sifang Intelligent Equipment Technology Co., Ltd., Jinan, Shandong 250107

2. CRRC Qingdao Sifang Co., Ltd., Qingdao, Shandong 266111

Abstract : To address the issues of low efficiency, high rate of missed inspections, and high operational risks in manual inspections of train undercarriage components, this paper studies the key technologies of an automated inspection device. By designing a modular and lightweight mechanical structure, a hierarchical embedded control system, and integrating multimodal visual inspection, electromagnetic ultrasonic/eddy current non-destructive testing, and hierarchical early warning technologies, the system was integrated and tested under various working conditions. The device achieved a defect detection rate of 99.6%, increased the inspection efficiency of a six-carriage train by 40%, and had a continuous fault-free operation time of ≥ 8000 hours. It is adaptable to complex working conditions of multiple train models, providing technical support for the intelligentization of rail transit maintenance.

Keywords : train undercarriage inspection; automated device; non-destructive testing

引言

列车车底转向架、制动系统等部件的可靠运行是行车安全核心保障, 传统人工检修依赖经验, 存在效率低、漏检率高、劳动强度大等弊端, 难以适配高密度运营需求。本文围绕机械结构设计、电子控制开发、自动化检测及系统集成四大核心, 攻克窄空间作业、高精度定位与多模态缺陷识别难题, 研制一体化自动化检修装置, 助力轨道交通运维智能化升级。

一、车底检修装置机械结构设计

(一) 车底检修移动平台机械结构设计

车底检修移动平台面向多车型地沟作业场景, 模块化框架结构选用 Q355B 高强度钢与 6061-T6 铝合金复合材质, 核心承载部件屈服强度不低于 355MPa, 辅助框架密度 2.7g/cm^3 , 实现强度与轻量化的均衡兼顾。平台规格 $1600\text{mm} \times 1000\text{mm} \times 300\text{mm}$, 最小离地间隙 50mm, 可适配 1200–1800mm 宽度地沟。行走系统采用四轮八驱布局, 搭配 V 型减震摆臂与邵氏硬度 90 ± 5 的聚氨酯包胶驱动轮, 750W 永磁同步伺服电机与 1:20 行星减速器配合, 达成 0–5m/min 无极调速与 $\pm 0.5\text{mm}$ 定位精度。48V/50Ah

锂电池组集成于平台, 续航能力不低于 3h, 支持无线遥控与自动行走双模式切换^[1]。

(二) 车底部件夹持与定位机械臂设计

七轴串联柔性结构构成机械臂主体, 工作半径 1200mm, 重复定位精度 $\pm 0.02\text{mm}$, 通过法兰与移动平台形成刚性连接。关节处配置传动精度 $\leq 1\text{arcmin}$ 的谐波减速器, 负载能力达 15kg, 末端自适应气动夹持器夹持范围 5–100mm, 夹持力 0–50N 可调且配备柔性防滑衬垫。5000 万像素工业相机 (分辨率 8192×6000) 与 3D 激光扫描仪 (扫描精度 $\pm 0.05\text{mm}$) 集成一体, 结合力觉传感器构建闭环控制, 精准识别部件姿态并动态调节夹持力, 适配车底复杂空间作业需求。

（三）机械结构轻量化与抗干扰优化

轻量化设计采用 SIMP 拓扑优化与材料替换方案，平台主梁经优化后重量从 420kg 降至 330kg，减重率 21.4%，挠度仅增加 5.3%；机械臂连杆选用拉伸强度不低于 3500MPa、密度 1.8g/cm³ 的碳纤维复合材料，较铝合金实现 30% 减重效果。抗干扰优化方面，结构表面采用 80–100 μm 静电喷涂处理，盐雾试验 5000h 无锈蚀现象；关键部位装配防震锁紧螺栓与硬度 60 ± 5ShoreA 的橡胶减震垫，振动衰减率不低于 80%；框架接缝以导电橡胶密封，电气舱内铺设铜箔屏蔽层，30MHz–1GHz 频段屏蔽效能不低于 60dB，有效抵御电磁干扰。

二、车底检修装置电子控制系统设计

（一）嵌入式控制系统硬件设计

嵌入式控制系统作为整个自动化检修装置的“大脑”，采用感知层、控制层、执行层分层架构，实现数据采集、指令运算与动作执行的高效协同，适配车底复杂恶劣的作业环境。核心控制单元选用 ARM Cortex-A9 四核处理器（主频 1GHz）与 FPGA 芯片搭配，其中处理器负责整体逻辑调度与数据处理，FPGA 承担高速信号采集与实时控制任务，两者协同工作使数据处理延迟不超过 1ms，具备多通道并行处理能力，可同步接收多类传感器信号并快速输出控制指令。感知层整合视觉、激光扫描、力觉等多类传感器，涵盖 5000 万像素工业相机、3D 激光扫描仪、力觉传感器及温度、振动传感器，各类信号通过 RS485 总线、工业以太网及 CAN 总线（传输速率 500kbps，支持 110 个节点）实现高速传输，确保感知数据的完整性与实时性。控制层采用模块化设计，便于后期维护与升级，其中电源模块兼容 AC220V/DC48V 双输入，可适配不同检修场地的供电需求，输出精度 ± 1%、纹波不超过 50mV，为各模块提供稳定供电；伺服驱动模块搭载位置、速度、电流三环控制策略，位置分辨率达 0.001mm、速度精度 ± 0.1%，可精准驱动移动平台与机械臂运动。

（二）检修装置运动控制算法设计

为实现移动平台与机械臂的高精度、高平稳性运动，针对车底窄空间、多障碍的作业特点，设计自适应 PID 与滑模控制复合运动控制策略，兼顾控制精度与抗干扰能力。移动平台以差速驱动模型为基础，通过优化 PID 参数（设定 K_p=2.5、K_i=0.8、K_d=0.15），有效抑制平台运动过程中的稳态误差与超调量，使直线行驶偏差不得超过 1mm/m、转向误差不得超过 0.5°；滑模控制通过设计线性滑动面与指数趋近律，增强系统对外部干扰（如地面不平、负载波动）的抵抗能力，较传统 PID 控制使抗干扰能力提升 40%。机械臂运动控制采用动力学自适应控制算法，通过神经网络实时辨识机械臂连杆质量、转动惯量等动态参数，结合五次多项式插值轨迹规划方法，优化机械臂运动路径，减少关节冲击，使运动平稳性提升 30%；融合动态自适应 A* 算法，实现机械臂在车底复杂空间内的快速路径规划，规避转向架、制动管路等障碍物，路径规划效率提升 40%，避障成功率达 99.1%。为满足高速高精度控制需求，所有运动控制算法均经 FPGA 硬件加速处

理，单轴控制周期缩短至 100 μs，确保移动平台定位、机械臂姿态调整与检测作业的同步精准推进^[2]。

（三）多模块协同通信技术

针对装置各模块间的数据交互需求，设计融合工业以太网与 CAN 总线的混合通信架构，实现大容量数据与控制指令的高效传输。其中工业以太网采用 TCP/IP 协议，传输速率达 100Mbps，主要负责机器视觉图像、激光扫描点云、检测数据等大容量数据的传输，传输延迟不超过 5ms、丢包率不超过 0.01%，确保检测数据实时上传与分析；CAN 总线采用 CANopen 协议，主要传输移动平台行走、机械臂运动等控制指令，通信距离可达 1000m，适配车辆段地沟长距离作业场景。为提升通信可靠性，系统配置 CRC16 循环冗余校验与重发机制（最多 3 次重发），有效避免数据传输过程中的误码与丢失；同时采用差分传输、光电隔离及防雷防静电设计，使系统抗干扰性能符合 IEC61000-6-2 标准，可抵御车底电磁设备产生的强干扰。通过引入 IEEE1588 精确时间同步协议，实现各模块间不超过 1 μs 的时间同步，确保移动平台移动、机械臂定位与检测探头扫描的时序一致性，协同作业误差不超过 0.1mm，为自动化检修的精准性提供通信保障。

三、车底部件自动化检测关键技术

（一）机器视觉缺陷识别技术

采用多模态成像与深度学习算法融合方案，集成高清光学成像、红外热成像与 3D 激光扫描成像，实现车底部件表面缺陷、尺寸偏差与温度异常全面检测。5000 万像素线阵相机搭配大功率激光光源，曝光时间 1 μs、分辨率 0.02mm，可识别微小缺陷；红外热成像仪精度 ± 0.3℃、工作波长 8–14 μm，专攻隐性热故障检测。缺陷识别基于改进 YOLOv5 模型，以 ResNet50 为骨干网络，引入注意力机制与特征金字塔网络，依托 50 万张 12 类缺陷样本训练，识别准确率不低于 99.5%、漏检率不超过 0.4%。螺栓松动检测融合 3D 点云技术，通过 ICP 与 RANSAC 算法实现 3mm 以上松动 100% 识别，算法经 TensorRT 加速，单张图像处理时间不超过 20ms。

（二）电磁超声 / 涡流无损检测技术

专攻内部及表面近表面缺陷检测，规避传统检测弊端。电磁超声检测基于洛伦兹力与磁致伸缩效应，换能器无需耦合剂，非接触检测速度达 1m/s，工作频率 0.5–10MHz、检测深度 0.5–50mm，精度不低于 0.1mm，适配恶劣环境。涡流检测依托电磁感应原理，差分探头频率 10kHz–1MHz，检测灵敏度 0.05mm，非接触距离 0.5–2mm，效率较传统磁粉检测提升 50%。两种技术通过机械臂搭载，按规划路径 0.5mm 间距扫描，数据实时传输分析^[3]。

（三）检测数据实时处理与预警技术

采用分布式架构，边缘计算单元负责预处理与初步分析，云端承担存储与深度分析。数据经小波变换去噪（抑制比 ≥ 30dB）、中值滤波提纯（有效性 99.8%），单部件处理时间不超过 50ms。依据 TB/T 3553–2020 标准分级预警，一般缺陷仅记

录，较重缺陷（裂纹1-3mm等）触发黄色预警，严重缺陷（裂纹 $\geq 3\text{mm}$ 等）触发红色预警并停机。预警信息通过声光、上位机弹窗与APP三重推送，响应时间 $\leq 1\text{s}$ ，自动生成检测报告耗时不超过1min。

四、装置系统集成与性能测试

（一）自动化检修装置系统集成方案

自动化检修装置采用模块化集成思路，机械结构、电子控制、检测模块与辅助系统（供电、通信、安全防护）深度融合，构建一体化检修系统。机械结构承载行走平台、机械臂与检测探头，电子控制系统集成嵌入式控制器、伺服驱动与通信模块，检测模块整合机器视觉、电磁超声与涡流检测设备，辅助系统提供全方位保障。系统采用分层布线与电磁兼容设计，强电与弱电线路间距不低于30cm，模块接口标准化并配备IP67防护等级航空插头，便于拆装维护。集成过程经单元测试、子系统测试与整体测试三级验证，最终系统尺寸 $2000\text{mm} \times 1500\text{mm} \times 1800\text{mm}$ ，总重量不超过800kg，可快速适配多车型地沟作业，无需改造现有设施。

（二）基于列车实际工况的性能测试

选取CR400BF型动车组与地铁B型车作为测试对象，在广州动车段与东莞地铁车辆段开展实测。见表1

表1 列车车底自动化检修装置性能测试结果表

测试项目	参数指标	实测数值
移动平台定位精度	定位误差	$\pm 0.4\text{mm}$
机械臂重复定位精度	定位误差	$\pm 0.02\text{mm}$
直线行驶偏差	每米偏差	$\leq 0.8\text{mm/m}$
转向角度误差	角度偏差	$\leq 0.4^\circ$
机器视觉缺陷识别率	识别准确率	99.6%
电磁超声检测精度	最小识别缺陷	0.1mm
涡流检测灵敏度	最小识别缺陷	0.05mm
6编组车辆检测时长	作业耗时	25min
连续工况工作时长	无故障运行	72h
恶劣环境性能波动	指标变化幅度	$\leq 5\%$

运动性能测试中，移动平台定位精度 $\pm 0.4\text{mm}$ ，机械臂重复定位精度 $\pm 0.02\text{mm}$ ，直线行驶偏差不超过 0.8mm/m ，转向角度误差不超过 0.4° ；检测精度层面，机器视觉缺陷识别率达99.6%，电磁超声内部缺陷检测精度0.1mm，涡流检测表面缺陷灵敏度0.05mm，螺栓松动（不低于3mm）识别率100%。作业效率方面，单列6编组动车组检测时间由人工180min缩减至25min，效率提升40%，单台装置每小时完成6条轮轴探伤，效率提升30%。环境适应性测试中，装置在 $-10^\circ\text{C} \sim 50^\circ\text{C}$ 、湿度30%-90%及多粉尘、电磁干扰环境下连续工作72h无故障，性能指标波动不超过5%。

（三）系统故障优化与可靠性提升

针对测试中发现的机械振动、通信延迟、缺陷误报等问题开展优化改进：机械振动通过提升减震弹簧刚度（20N/mm提升至30N/mm）、加装关节阻尼器，使振动加速度从1.2g降至0.5g，幅度减小58%；通信延迟采用分包传输与优先级调度方案，延迟从5ms降至2ms，丢包率控制在0.005%；缺陷误报通过优化深度学习模型、引入光线自适应校正算法，误报率从0.8%降至0.2%。系统采用核心模块双机热备（切换时间不超过100ms）与500h周期维护策略，优化后连续无故障工作时间（MTBF）不低于8000h，故障修复时间（MTTR）不超过30min，满足高可靠性使用要求^[4]。

五、结语

本文针对列车车底检修痛点，系统研究自动化检修装置关键技术，通过机械结构轻量化抗干扰设计、电子控制系统智能化开发、多模态检测技术融合及系统优化，实现高精度、高效率、高可靠检修。实测表明装置性能优于传统人工检修，适配复杂工况。该研究突破核心技术瓶颈，为运维装备智能化提供参考，后续可进一步提升多车型适配性与算法泛化能力。

参考文献

- [1] 岳刚, 杨海军, 刘真, 吕昕, 郭浩, 王凯. 基于高精度测试与改进视觉检测的司控器自动化诊断系统[J]. 计算机测量与控制, 2025, 33(9): 1-919.
- [2] 刘高坤, 顾小山. 基于滑模PID控制算法的受电弓静态力测量装置研究[J]. 铁道机车车辆, 2025, 45(4): 111-117.
- [3] 李修岭, 赖远桥, 孔令荣. 货运列车闸瓦RFID电子标签及其应用[J]. 机械工程师, 2024(11): 122-126.
- [4] 巫红波, 邱伟明, 王静, 朱林森. 城轨车辆用多股道智能巡检机器人检测系统[J]. 机车电传动, 2022(1): 45-52.

断层破碎带围岩稳定性分析及支护方案优化

王文坤, 张娟

洛阳栾川钼业集团股份有限公司矿山分公司, 河南 洛阳 471500

DOI:10.61369/ERA.2026080018

摘 要 : 断层破碎带围岩具备结构松散及力学性能偏弱的固有特征, 极易滋生变形坍塌类失稳隐患并干扰现场施工的安全推进与工期排布。围绕破碎带围岩自身构造特点失稳诱因及破坏演化规律展开深度剖析, 依托现场实际工况完善支护布设思路, 依托适配支护类型选取与参数微调强化围岩整体承载能力以维系施工作业平稳开展。相关研究成果能够为同类破碎带工程的围岩稳定管控及支护架构布设提供实操依据, 弥补传统支护模式在复杂破碎带环境中的适配短板。

关 键 词 : 断层破碎带; 围岩稳定性; 支护方案; 优化设计

Stability Analysis of Surrounding Rock in Fault Fracture Zone and Optimization of Support Scheme

Wang Wenkun, Zhang Juan

Luoyang Luanchuan Molybdenum Industry Group Co., Ltd. Mining Branch, Luoyang, Henan 471500

Abstract : The surrounding rock of fault fracture zones has inherent characteristics of loose structure and weak mechanical properties, which easily breed instability hazards such as deformation and collapse, and interfere with the safe progress and schedule arrangement of on-site construction. A deep analysis is conducted on the causes of instability and the evolution of damage in the surrounding rock structure of the fractured zone. Based on the actual working conditions on site, the support layout is improved, and the overall bearing capacity of the surrounding rock is strengthened by selecting appropriate support types and fine-tuning parameters to maintain the smooth progress of construction operations. The relevant research results can provide practical basis for the stability control and support structure layout of surrounding rock in similar fractured zone projects, and make up for the adaptation shortcomings of traditional support modes in complex fractured zone environments.

Keywords : fault fracture zone; rock stability; support plan; optimized design

引言

断层破碎带由岩体经受构造运动挤压剪切作用发育而成, 区域内围岩混杂破碎岩块断层泥与各类裂隙, 整体完整度与承载强度均处于较低水平, 属于基建工程中较为常见的复杂地质类型。破碎带围岩失稳会诱发巷道垮塌与岩体大幅形变等地质灾害, 徒增施工难度拉长建设周期还会诱发人身安全隐患与经济损耗, 成为阻碍工程项目平稳落地的核心制约因素。研判破碎带围岩稳定特质厘清内在失稳机理并匹配适配支护体系, 可有效规避地质灾害隐患强化工程整体安全储备与服役性能, 为现场施工筑牢技术根基并承接后续稳定研判与支护改良的深层次探究。

一、断层破碎带围岩基本特征及失稳隐患

(一) 断层破碎带围岩结构组成

构造运动作用致使岩体碎裂衍生特殊地质结构体, 破碎带围岩内部构造具备天然复杂特质与非均质分布特征, 破碎岩块断层泥裂隙及各类充填物共同构成基本组分。原生岩体经挤压错动生成规格参差形态无规则的块状岩体, 岩块之间粘结状态松散难以形成整体协同受力体系, 长期风化蚀变催生细粒断层泥物质遇水环境便会软化溃散大幅折减自身承载能力。贯通围岩体系的裂隙构造划分原生与次生两类成因, 岩体成型阶段自然孕育原生裂

隙, 构造形变及现场施工扰动催生次生裂隙, 裂隙发育规模直接左右岩体渗透能力与整体稳定状态, 泥质砂质类充填介质也会持续弱化围岩原有力学禀赋。

(二) 断层破碎带围岩力学特性

破碎带围岩力学禀赋和完整岩体存在天然分野, 整体呈现承载强度偏低塑性形变突出渗透能力较强的固有特质。松散构造格局弱化岩块界面粘结效应, 各项力学指标均远不及完整岩体, 外部荷载作用下极易产生塑性形变与剪切破坏现象。裂隙网络为地下水渗流提供天然通道, 水体浸润促使断层泥发生软化膨胀, 岩体原有受力禀赋持续衰减进而拉低整体承载水平放大失稳隐患^[1]。

围岩力学参数随空间方位呈现差异化分布规律，现场施工产生的扰动作用还会持续侵蚀岩体固有性能，让破碎区域围岩的失稳隐患进一步加剧蔓延。

（三）断层破碎带围岩失稳主要隐患

破碎带围岩失稳风险集中体现为岩体形变局部塌落及突水突泥等多发地质现象。塑性形变是围岩失稳的常见表现形式，各类沉降与收敛形变超出阈值范围便会缩减巷道通行空间，还会对既有支护体系造成结构性损伤，施工扰动剧烈且支护布设滞后区域极易出现岩块掉落冒顶塌落现象，严重工况下还会阻断巷道通行路径危及现场作业人员安全。破碎带地质构造为地下水运移搭建天然流通路径，水体压力累积至临界值便会裹挟泥砂碎岩骤然涌出，极易诱发重大工程安全事故。

二、断层破碎带围岩稳定性影响因素分析

（一）地质因素对围岩稳定性的影响

地质条件构成断层破碎带围岩稳定状态的核心制约条件，断层空间形态围岩岩性基底及地下水赋存状态均在其中起到关键作用。断层走向倾向与落差排布方式能够左右岩体受力格局及破碎发育程度，倾向偏陡区域岩体受力分布失衡，更易出现滑移形变破坏^[2]。岩性基底质地优良的岩体结构完整度更高，自然具备更好的稳定基底，软质风化类岩体构成的围岩整体禀赋偏弱，在外力作用下极易产生形变损伤。水体浸润能够弱化岩体自身力学基底，附加渗透压力还会进一步扰动原有受力平衡，水体富集程度与压力量级越高，围岩整体稳定基底便越薄弱。

（二）施工因素对围岩稳定性的影响

现场施工作业属于扰动断层破碎带围岩稳态的重要外部诱因，施工工艺选取作业推进节奏及现场扰动效应都会干预岩体原有平衡状态。爆破荷载超标开挖流程排布失当都会加剧岩体碎裂程度，打破原生构造格局引发内部应力重新排布，进而滋生各类失稳隐患。作业节奏推进过快会让裸露岩体错失及时防护时机，长期暴露于自然环境受风化水体持续侵蚀，自身力学基底逐步衰减并放大失稳概率。机械作业与人工作业带来的持续扰动会削弱岩块界面粘结效应，先期局部形变若得不到有效管控，便会逐步演化成大范围整体失稳态势。

（三）支护因素对围岩稳定性的影响

支护体系是管控断层破碎带围岩形变失稳的重要工程举措，支护类型选型参数指标设定及现场施工成型品质都会关联岩体稳态管控成效。支护类型未能契合岩体受力特征与破碎发育规模，便难以承接围岩产生的形变压力，无法从构造层面抑制失稳态势蔓延。支护配置标准达不到现场工况需求，整体承载层级布设间距把控失衡，难以约束岩体自由形变空间，支护体系应有防护效能也无从发挥。锚杆锚固成型不达标喷射砼材质性能不足等施工瑕疵，都会削弱支护架构整体协同承载能力，难以对破碎围岩形

成长效稳定管控作用。

三、断层破碎带围岩稳定性评价方法

（一）地质勘察评价方法

地质勘察作为围岩稳定性评价的核心基础，依托现场实地探查与室内试验相结合的技术路径，系统采集断层破碎带地质参数及围岩力学指标，为后续稳定性研判提供精准数据支撑^[3]。现场勘察环节整合地质测绘、钻孔探测及巷道揭露等多元技术手段，全面厘清断层空间产状、围岩内部构造、裂隙发育规模及地下水赋存分布特征，确保地质信息采集的全面性与准确性；室内试验针对现场采集的围岩试样，系统开展抗压、抗拉、抗剪等力学性能测试，精准测定各项力学参数，深入剖析围岩力学禀赋，结合现场勘察获取的基础数据，对围岩稳定性等级进行初步研判，为后续稳定性评价工作推进及支护方案设计筑牢数据根基，保障评价结果的科学性与实用性。

（二）定性评价方法

定性评价方法以地质勘察获取的基础数据为核心依托，融合长期工程实践积累的经验，对断层破碎带围岩稳定性进行综合研判。通过系统梳理断层破碎带发育规模、围岩岩性质地、地下水赋存条件及施工扰动影响程度等关键因素，结合同类工程围岩失稳案例的经验总结，对围岩稳定性进行分级划分，明确围岩发生失稳现象的可能性及风险等级。该方法操作流程简便易行，无需复杂的试验设备与计算过程，耗时较短，能够快速完成围岩稳定性的初步判断，适配工程前期围岩稳定性筛查的需求，为后续定量评价工作的开展及支护方案的优化设计指明方向，提升工程前期研判的效率与针对性。

（三）定量评价方法

定量评价方法通过构建科学合理的评价指标体系，结合行业相关评价标准，对断层破碎带围岩稳定性开展精准量化分析。从围岩力学性能、裂隙发育状态、地下水压力及施工扰动强度等关键维度，筛选核心评价指标，通过合理方法确定各指标权重分配，采用综合评分、强度折减等量化分析手段，精准计算围岩稳定性评分值，依据评分结果明确围岩稳定性等级，清晰界定围岩失稳的临界状态及风险程度。相较于定性评价方法，该方法精准度更高，能够为支护方案的优化调整提供更为精准的技术支撑，适配工程中期详细稳定性评价的需求，为工程施工安全管控提供科学依据。

四、断层破碎带支护方案优化设计

（一）支护方案优化原则

断层破碎带支护方案优化需坚守适配性、安全性、经济性与可行性四大核心原则，核心目标是通过科学优化实现围岩失稳有效管控，为现场施工筑牢安全防线。适配性聚焦支护方案与围岩构造特征、力学禀赋及失稳隐患的精准匹配，依据不同区域围岩稳定等级差异，针对性选取适配的支护类型与参数配置，避免方

案与现场工况脱节；安全性要求支护结构具备充足承载强度与刚度，能够有效承接围岩释放压力，约束岩体变形，从根本上规避失稳事故发生；经济性强调在保障支护效能的前提下，优化参数配置缩减支护成本，杜绝资源不必要损耗；可行性则要求方案契合现场施工条件，施工工艺简洁便捷，便于现场操作实施与施工质量管控，确保方案能够落地执行并发挥实效。

（二）支护形式优化选择

结合断层破碎带围岩构造特征与失稳隐患类型，优化采用组合式支护模式，摒弃传统单一支护的局限性，全面提升支护整体效能。针对围岩稳定性较差、裂隙发育密集、地下水赋存量大的区域，采用锚杆+喷射混凝土+钢拱架组合支护架构，锚杆深入深层围岩实现锚固加固，强化岩体整体协同性，喷射混凝土封闭岩体表面，阻隔风化作用与地下水侵蚀，钢拱架承担围岩压力，有效约束岩体变形；针对围岩稳定性相对良好的区域，采用锚杆+喷射混凝土简化支护结构，在保障支护效果的同时降低施工成本；针对地下水富集区域，优先增设排水设施疏导水体、降低水压，再搭配组合支护体系，实现围岩稳定性的全方位提升，适配不同工况下的支护需求。

（三）支护参数优化调整

依托围岩稳定性评价结果与现场施工实际工况，对支护参数进行系统性优化调整，确保支护结构充分发挥最佳防护效能^[4]。锚杆参数优化重点调整长度、直径、布设间距及锚固方式，根据围岩破碎程度与力学强度差异，适当增加锚杆长度与直径，缩小布设间距，采用全长锚固工艺，大幅增强锚杆锚固力与加固效果；喷射混凝土参数优化聚焦强度等级与喷射厚度调整，提升混凝土自身强度与与围岩的粘结能力，确保喷射层与岩体表面紧密贴合，形成有效防护；钢拱架参数优化主要调整型号规格、布设间距及连接方式，选用高强度钢拱架提升承载能力，缩小间距强化支护密度，加强钢拱架间连接强度，提升整个支护结构的整体性与协同承载效能。

五、支护方案实施保障及应用效果验证

（一）支护施工质量控制措施

支护施工质量直接决定支护方案效能发挥，需构建完善质量

管控体系，贯穿施工准备、现场作业至竣工验收全流程。施工前期严格检验锚杆、钢拱架、混凝土等支护材料，确保各类材料性能指标契合设计标准；现场作业阶段，严格遵循优化后的支护参数与施工工艺，重点检测锚杆锚固质量、喷射混凝土厚度及强度、钢拱架安装精度，对施工中出现的质量隐患及时排查整改；竣工验收环节，对支护结构开展全面检测，确保整体质量达标，为断层破碎带围岩稳定性提供坚实保障。

（二）施工过程动态监测措施

为实时掌握围岩形变及支护结构受力状态，施工期间推行动态监测机制，结合监测数据动态调整支护方案，保障支护效能。监测范围涵盖围岩收敛、下沉形变及锚杆受力、钢拱架应力等核心指标，采用专业监测设备定期采集数据并开展分析处理，精准研判围岩稳定性及支护结构工作状态^[5]。一旦监测数据超出预警阈值，立即采取强化支护措施，通过增加锚杆数量、加密钢拱架间距等方式，遏制围岩失稳态势，切实保障现场施工安全。

（三）支护方案应用效果验证

通过工程现场实践应用，验证优化后支护方案的可行性与有效性，对比优化前后围岩稳定性及支护成效。优化后的方案可有效约束围岩形变，降低失稳风险，减少坍塌、突水突泥等地质灾害发生，保障施工有序推进。同时在确保支护效果的基础上，有效降低支护成本、提升施工效率。实践应用表明，该优化方案适配断层破碎带地质工况，能有效解决围岩失稳难题，为同类工程支护设计提供实用参考。

六、结语

本文针对断层破碎带围岩稳定性薄弱、易发生失稳的难题，系统剖析围岩基本特征、失稳影响因素及破坏机制，采用合理评价方法优化设计适配组合式支护方案，提出施工质量控制与动态监测措施并验证应用效果。研究有效解决围岩失稳问题，提升工程施工安全与经济性，为同类工程提供可靠技术支撑和实践借鉴，对推动复杂地质条件下工程安全高效建设具有重要意义。

参考文献

[1] 柏新宇. 基于节理双随机特性的破碎带巷道围岩失稳概率分析 [J]. 煤炭与化工, 2025, 48(12): 24-30+37.
[2] 李磊, 项迁, 黄超. 穿越断层破碎带时真空抽水加固围岩的稳定性量化分析 [J]. 公路交通科技, 2025, 42(12): 210-222.
[3] 林涛, 刘远明, 刘宇鹏, 等. 特大断面隧道穿越断层破碎带围岩稳定性分析及变形控制: 以兰海高速桐梓隧道为例 [J]. 科学技术与工程, 2025, 25(32): 13988-13997.
[4] 陈先锋. 盾构穿越不同倾角断层破碎带围岩稳定性分析 [J]. 山西建筑, 2025, 51(17): 148-152+176.
[5] 刘多兴, 王旭春, 陈信举, 等. 双护盾 TBM 穿越不同形态断层破碎带围岩稳定性分析 [J]. 低温建筑技术, 2025, 47(05): 26-30.

包银高铁风沙高寒地段联调联试关键技术研究

王建强

中国铁路呼和浩特局集团有限公司, 内蒙古 呼和浩特 010010

DOI:10.61369/ERA.2026080019

摘 要 : 包头至银川高速铁路内蒙古段地处西北戈壁风沙、季节性高寒大温差特殊区域, 沿线冻土发育、沙尘频发、昼夜温差悬殊, 路基冻胀融沉、接触网积污腐蚀、线路结构温变形等病害突出, 高速列车动态运行稳定性控制难度远大于内陆常规平原高铁线路。结合包银高铁分段分步联调联试现场工程实践, 系统梳理土建轨道、牵引供电、通信信号、防灾安全监控各专业系统调试流程与试验项目, 深入剖析大风沙尘、极端温差、季节性冻土多重耦合工况下联调联试技术难点。通过采用分级逐级提速动态检测、轨道毫米级闭环精调、风沙环境弓网耦合优化、多专业问题清单闭环管控等针对性技术措施, 全面优化车—线—电—信—控系统匹配关系。经全过程动态检测验证, 内蒙古境内线路轨道动力学指标、弓网受流质量、列控行车控制精度、灾害预警联动响应均符合高速铁路验收规范, 有效破解西部高寒风沙区域高铁动态平顺性不足、弓网受流不稳定、系统接口适配性差等共性工程难题。研究成果可为内蒙古自治区后续铁路新建、改扩建项目提供可靠技术借鉴与现场施工参考。

关 键 词 : 包银高铁; 高速铁路; 联调联试; 风沙高寒; 轨道精调; 弓网匹配; 动态验收

Research on Key Technologies for Joint Debugging and Testing of Baoyin High speed Railway in Wind blown and Cold Regions

Wang Jianqiang

China Railway Hohhot Group Co., Ltd., Hohhot, Inner Mongolia 010010

Abstract : The Inner Mongolia section of the Baotou–Yinchuan High–Speed Railway is located in a unique region characterized by northwest Gobi sandstorms and significant seasonal temperature variations. The area features extensive permafrost, frequent dust storms, and substantial diurnal temperature fluctuations, leading to prominent issues such as frost heave and settlement of subgrade, contamination and corrosion of contact networks, and thermal deformation of track structures. These challenges make dynamic operational stability control for high–speed trains far more complex than on conventional inland high–speed rail lines. Drawing from field practices during segmented joint debugging and testing of the Baotou–Yinchuan line, this study systematically reviews debugging procedures and test items across civil engineering, track systems, traction power supply, communication signaling, and disaster prevention monitoring systems. It thoroughly analyzes technical difficulties arising from the combined effects of strong winds, dust storms, extreme temperatures, and seasonal permafrost conditions. Targeted measures—including tiered dynamic speed optimization, millimeter–level closed–loop precision track adjustment, optimized wind–dust environment–track–network coupling, and comprehensive multi–disciplinary issue management—have been implemented to enhance coordination among vehicle, track, power, signaling, and control systems. Comprehensive dynamic testing confirmed that the track dynamics parameters, current transmission performance of the pantograph–network system, train operation control accuracy, and disaster early–warning response all comply with high–speed railway acceptance standards. This effectively addresses common engineering challenges in western cold regions, such as insufficient operational smoothness, unstable pantograph–current transfer, and poor system interoperability. The research findings provide reliable technical references and practical guidance for future railway construction and expansion projects in the Inner Mongolia Autonomous Region.

Keywords : Baoyin high–speed railway; high–speed railway; joint commissioning and testing; wind–sand and cold climate conditions; precision track adjustment; bow–net matching; dynamic acceptance inspection

引言

近年来内蒙古自治区高速铁路路网建设持续提速，西部通道铁路基础设施不断完善，包银高铁作为国家中长期铁路网京兰客运通道核心组成段落，是连接蒙西、宁夏地区重大民生战略性交通工程。线路内蒙古区段横穿乌兰布和沙漠边缘戈壁地带，区域生态脆弱、气象条件恶劣，大风沙尘天气持续时间长，冬夏极端温差跨度大，季节性冻土分布广泛，铁路土建结构、四电设备、户外运营设备长期处于复杂恶劣环境荷载作用下。

联调联试作为高速铁路竣工验收、开通运营前不可或缺的关键工序，是对线路整体结构、机电成套系统、行车安全控制体系开展全参数、全工况、全时段综合动态检验。常规平原地区高铁联调技术体系无法完全适配内蒙古戈壁风沙高寒工况，静态验收合格参数在高速动态运行、温度变化、风沙侵蚀后极易出现指标超标问题。结合包银高铁现场实际开展特殊环境联调联试技术总结，优化恶劣气候下线路调试工艺、设备匹配参数、安全管控模式，对提升内蒙古西部铁路工程建设质量、强化高铁长期安全运营保障能力具有重要工程实用价值。

一、工程概况

包银高速铁路设计行车速度 250km/h，双线电气化有砟轨道客运专线，线路东起内蒙古包头市，途经巴彦淖尔、乌海，向西接入宁夏银川铁路枢纽。内蒙古境内线路总长占全线比例较高，地貌以戈壁荒漠、风沙堆积洼地、季节性冻土路基地段为主，沿线常年大风天数多，沙尘天气集中，区域内极端温差可达 70℃ 以上，昼夜温差波动显著。

线路路基、桥梁、道岔结构易受冻胀融沉循环作用产生不均匀沉降，道床易受风沙堆积出现板结、弹性衰减问题，接触网导线、绝缘子易受沙尘污染降低绝缘性能与受流稳定性。项目严格按照国铁建设管理要求，采用分段施工、分段联调、分段验收、全线贯通实施模式，依次完成惠农—银川区段、包头—惠农区段联调联试工作。全过程依次开展低速全线拉通试验、分级逐级提速试验、单列及重联动车组运行试验、多系统接口联合调试、缺陷逐项整改复测，全面完成全线动态性能综合核验。

二、高寒风沙地区高铁联调联试主要工作内容

（一）轨道及路基桥梁土建系统动态检测

轨道平顺性是高速列车安全平稳运行基础保障，本次联调重点检测轨道高低、轨向、水平、三角坑、轨距变化率等几何状态参数，同步监测路基工后沉降、桥梁竖向横向振动幅值、梁体转角变形、支座受力状态以及道岔转换密贴、锁闭可靠性、高速过岔冲击响应。

针对内蒙古风沙地段道床积沙、道砟粉化板结、冻胀循环导致线路几何状态偏移问题，依托综合检测列车波形数据精准定位病害点位，有序开展线路精捣、拨道调整、垫板优化、扣件复紧等精细化整治工作，建立动态检测、数据分析、现场整改、复核复测闭环流程，持续优化线路平顺性指标，保障不同温度、不同行车速度下列车运行平稳舒适。

（二）牵引供电与弓网耦合系统专项联调

牵引供电与弓网受流系统直接决定动车组持续稳定取电能力，是风沙地区高铁调试核心重难点内容。静态阶段全面检测接触网导高、拉出值、跨中弛度、张力补偿、吊弦受力、绝缘设备

状态等基础参数。动态阶段逐级提升试验速度，实时监测弓网动态接触压力、接触网抬升幅值、硬点冲击振动、离线次数、电弧燃弧时长与燃弧概率。

受西北风沙环境影响，沙尘极易附着接触导线与受电弓滑板表面，破坏接触面贴合精度，高速运行易出现瞬时离线、异常放电现象。加之温差作用造成接触网张力波动、弛度变化，重联动车组前后弓气流相互干扰，进一步加剧弓网匹配难度。现场结合季节温度、风力条件动态优化接触网参数，集中整治接头硬点缺陷，有效提升复杂工况下弓网运行稳定性。

（三）通信信号及列车运行控制系统调试

GSM-R 无线通信、轨道电路、应答器、列控中心、CTC 调度集中系统共同构成高铁行车安全控制核心。联调期间全面开展车地无线通信链路测试、行车控制指令传输校验、临时限速下发执行、列控模式自动切换、非正常行车模拟演练等项目。

内蒙古西部戈壁开阔区域电磁环境复杂，大风振动易造成户外信号设备偏移，沙尘侵入机柜影响设备散热与信号稳定性。现场优化基站信号覆盖阈值、切换参数，强化室外设备防尘密封、防风加固处理，排查信号干扰、传输延迟、逻辑冲突等隐患，确保高速行车、区间变道、重联运行等各类工况下列控指令精准可靠、通信连续稳定。

（四）防灾安全监控及客运服务系统联调

全线布设大风监测、雨量监测、地震预警、线路异物侵限、轨温实时监测等立体化防灾设备，联调阶段完成传感器标定、报警阈值整定、分级预警逻辑调试、调度联动响应试验。模拟大风、沙尘、地质灾害等突发场景，验证灾害预警、自动限速、区间封锁、信息推送全流程及时性、准确性，构建适配内蒙古大风沙尘气候的高铁安全防护体系。

同步完成车站广播、视频监控、客运检票、时钟同步、电力动环监测等客运运维系统联调，实现全线设备统一调度、集中管控、智能运维，满足高速铁路常态化运营管理需求。

三、内蒙古风沙高寒地段联调联试重难点问题

（一）风沙侵蚀引发轨道动态病害反复频发

戈壁大风携带大量沙尘持续堆积线路道床，造成道砟密实度

不均匀、道床弹性下降、轨道高低不平顺加剧。部分区段静态验收指标合格，但列车高速动载循环后极易出现三角坑、轨向偏移超限问题，病害重复出现，精调、复测、整改工作量大幅增加。同时风沙磨损道岔零部件，造成转换卡滞、密贴不良，严重影响行车安全。

（二）大温差环境造成结构参数动态漂移

沿线冬夏、昼夜温差极大，钢轨、桥梁钢结构、接触网线索热胀冷缩效应明显，线路几何尺寸、接触网张力弛度随环境温度不断变化。出现白天合格、夜间超标、夏季合格、冬季偏移现象，固定调标标准难以长期适用，大幅提升参数管控难度。

（三）沙尘积污显著降低弓网受流运行质量

沙尘附着接触网表面增大接触电阻，破坏弓网紧密贴合状态，高速运行频繁产生离线、燃弧现象。重联运行时前车扰动气流带动沙尘上扬，后车受电弓受流环境进一步恶化，弓网耦合控制成为本次联调最突出技术难题。

（四）恶劣气象压缩有效施工作业窗口期

春季强沙尘、冬季低温严寒、突发性大风天气较多，高精度轨道精调、高空接触网作业、高速动态试验均受限，天窗利用效率偏低，试验计划统筹、工序衔接组织难度显著加大。

四、恶劣环境下联调联试关键优化技术措施

（一）分级逐级提速全域动态检测技术

严格遵循低速排查隐患、中速优化平顺、高速验证性能、超时速安全兜底原则有序开展提速试验，稳步提升检测速度至超设计时速标准。全面捕捉风沙荷载、温度应力、动载作用下线路结构动态响应，充分暴露静态无法发现的隐蔽病害，预留充足安全冗余，保障运营速度长期稳定可控。

（二）高寒风沙轨道毫米级闭环精调工艺

合理选择无风、少沙、温度平稳窗口期开展线路精细化捣固精调，建立检测研判—现场整治—复检验收—跟踪观测全闭环管理模式。针对性调控道床密实度，优化钢轨垫板、扣件调整参数，抵消冻胀、温差、积沙带来线路偏移，持续提升轨道长期动态平顺稳定性。

（三）戈壁风沙工况弓网综合整治优化技术

坚持试验前后常态化接触网清扫除尘作业，根据环境温度实时修正接触网张力补偿数值，抵消温差形变影响。全面打磨线路硬点、接头不平顺缺陷，优化吊弦安装参数，结合重联运行实测数据调整弓网匹配阈值，显著降低高速离线与燃弧发生率。

（四）多专业协同清单化闭环隐患管理

建立全线缺陷统一台账管理制度，按照重大隐患、重点问题、一般缺陷分级分类管控，明确责任专业、整改时限、验收标准。工务、供电、电务、车辆多方联动会商，高效处置跨系统接口矛盾、设备联动异常问题，所有问题整改一项、复核一项、销号一项。

（五）极端天气专项安全作业管控措施

制定内蒙古地区大风、沙尘、低温天气试验作业管控细则，明确不同气象等级作业禁止条件。加强户外设备防风、防尘、防冻防护改造，规范天窗封锁、行车防护、现场监护流程，杜绝恶劣天气冒险试验作业，保障联调全过程安全。

五、现场应用实施成效

经过系统性联调联试与专项技术优化整治，包银高铁内蒙古境内所有土建结构指标、轨道动力学参数、弓网动态受流性能、列控系统控制精度、防灾预警联动功能全部满足国家高速铁路验收规范标准。风沙、温差诱发各类动态缺陷全部闭环清零，重联运行、大风工况、高低温工况设备运行稳定可靠，系统协同匹配良好，全线顺利通过动态验收，按期具备安全开通运营条件。

本次工程总结形成一套贴合内蒙古西部地域特点的高铁联调联试施工工艺、质量管控要点、病害处置方案，实用性强、可复制推广，有效填补自治区高寒风沙戈壁地区高速铁路调试技术空白。

六、结论

内蒙古西部戈壁风沙、大温差高寒特殊环境，导致高速铁路联调联试工况复杂、病害多样、管控难度较高，传统内陆高铁调试经验无法直接套用。工程实践表明，采用分级逐级提速动态检测、轨道精细化闭环精调、风沙弓网专项参数优化、全流程清单化质量管理等综合技术措施，能够有效解决冻胀沉降、道床积沙、弓网不稳、系统适配性差等突出难题。

包银高铁联调联试全过程技术经验，可广泛应用于内蒙古后续城际铁路、普速铁路、新建高速铁路工程，持续提升自治区铁路工程建设整体质量，完善西部铁路安全运营保障体系，助力区域交通高质量长远发展。

参考文献

[1] TB 10761-2018 高速铁路联调联试及动态验收技术规范 [S]. 北京：中国铁道出版社，2018.
[2] 中国铁路呼和浩特局集团有限公司. 包银高速铁路内蒙古段联调联试工作总结报告 [R].2025.
[3] 王健. 高寒大风地区高速铁路联调联试关键技术研究 [J]. 铁道工程学报，2024.
[4] 内蒙古交通规划勘察设计院. 内蒙古西部风沙冻土地区铁路工程技术要点 [R].2023.
[5] 李建军. 风沙环境高速铁路轨道平顺性控制技术 [J]. 内蒙古公路与运输.

大型机场不停航施工过程的应急管理研究

何怡甫¹, 郜佳琳^{2*}

1. 中国民用航空飞行学院 经济与管理学院, 四川 广汉 618000

2. 山东机场管理集团有限公司建设指挥部工程一部, 山东 济南 250000

DOI:10.61369/ERA.2026080020

摘 要 : 研究结合我国西南某大型国际机场不停航施工管理经验, 通过归纳分析, 总结出一套安全应急管控措施, 可以有效地提高施工现场管理水平, 完善各类安全防范措施, 及时排除安全隐患, 降低不停航施工对机场运行影响, 杜绝不停航施工安全事故发生。实践证明: 不停航施工需要先进的技术和高效的应急管理策略, 在经验丰富的专业管理团队和有序的施工组织下, 不停航施工可安全完成。

关 键 词 : 大型机场; 不停航施工; 应急管理

Research on Emergency Management During Non-Stop Construction of Large Airports

He Yifu¹, Gao Jialin^{2*}

1. School of Economics and Management, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan, Sichuan 618000

2. Shandong Airport Management Group Co., Ltd. Construction Command Engineering Department 1, Jinan, Shandong 250000

Abstract : Based on the experience of non-stop construction management at a large international airport in Southwest China, this study summarizes a set of safety emergency control measures through induction and analysis. These measures can effectively improve the management level of construction sites, improve various safety precautions, timely eliminate safety hazards, reduce the impact of non-stop construction on airport operations, and prevent the occurrence of non-stop construction safety accidents. Practice has proven that non-stop construction requires advanced technology and efficient emergency management strategies. With an experienced professional management team and orderly construction organization, non-stop construction can be safely completed.

Keywords : large airport; construction without suspension of flights; emergency management

引言

近年来, 随着我国整个民航业的蓬勃发展, 许多机场将进行大量改扩建, 已建成机场在改扩建过程中, 对于不停航施工的要求将越来越多, 尤其是大型机场, 作为城市枢纽机场承担着重要且密集的运输任务。不停航施工是在不影响或有限影响机场运行情况下进行的机场改扩建施工^[1]。大型机场的不停航施工应急管理面临着诸多挑战, 如施工过程具有制约因素多、涉及单位广、施工时间短、施工难度大、安全风险高、施工成本高等^[2]。一旦施工中出現突发安全事故, 将带来巨大影响。因此在进行应急管理时必须秉承“安全至上”的理念, 充分梳理分析潜在影响、做好各项施工准备, 采取一系列有效措施来确保不停航施工管理安全、顺利推进。

首先, 要构建不停航施工应急管理体系, 一个高效、流畅的组织体系能确保组织的工作有序、迅速地实施并增值。结合前期经验和风险水平的判断, 构建不同风险事件的等级体系, 并建立对应的施工安全管理制度, 明确各级人员的职责权限, 提前演练, 确保每个人都能在不安全事件发生时熟悉应急措施, 落实于行, 构建完善的不停航施工应急管理体系。其次, 强化现场动态应急管理, 风险伴随施工过程是动态变化的, 因此对风险的管理也必须动态化。要从技术层面入手深入分析, 识别出在不停航施工的不同阶段应用不同工艺方法所产生的安全风险, 合理运用“消除, 替代, 工程控制和工作重组, 管理控制, 个体防护装备”五种降低施工安全风险的方法, 采取有针对性的技术、管控措施, 有效保障施工人员的生命安全。最后, 应用信息技术提升机场不停航施工安全水平, 结合虚拟仿真的应急预案系统和BIM建筑仿真平台, 对不停航施工进行过程管理, 利用网络视频监控、电子围栏技术对施工现场FOD进行全方位实时监控,

基金项目: 成都市科技项目“面向临空经济区的民航空管台站电磁环境保护平台研制与应用”(2025-YF11-00016-HZ); 民航机场智慧运营与运维四川省工程研究中心项目“BIM平台下装配式机场全生命周期供应链低碳优化技术研究”(JCZX2024ZZ23)。

作者简介: 何怡甫(1998-), 男, 汉族, 四川南充人, 硕士, 研究实习员, 研究方向: 管理优化研究。

通信作者: 郜佳琳(1990-), 男, 汉族, 河南洛阳人, 硕士, 工程师, 研究方向: 机场工程。

利用大数据分析技术对过程中的安全风险进行预测、预警等。基于此，文章通过选取西南某大型机场为实施场地，通过方案推演、风险识别、BIM 平台等科学方法实施不停航施工，并取得良好的安全管理效果。

一、工程概况

该大型机场位于我国西南地区，现有旅客吞吐量以及改扩建整体规模均居于我国位民用机场前列。东飞行区涉及不停航施工的主要建设内容为：完成现状运行东一跑道东侧190米处新建平行滑行道侵入东一跑道下滑台保护区内部分以及距离东一跑道最近距离为120米的平行东一跑道的排水沟（非直线构型），东一跑道南北两侧下滑台保护区内的施工在局方批复关闭04/22跑道ILS下滑信标/DME盲降系统后进行。保护区内进行管线探挖、迁改、保护、地基处理、基层面层施工、排水系统施工、土面区高差调整等。

二、施工分区情况

北1区为下滑台关闭后，夜间东一跑道停航后施工区域。北2区为下滑台关闭后，东一跑道运行期间可施工区域。下滑台保护区外在下滑台重新启用后在跑道运行期间可施工。北3区为东一跑道停航后施工区域。北4区为东一跑道运行期间可施工区域。各区域施工需遵循不突破净空限制面，不影响导航设备运行，不影响航空器运行原则。各区域施工需遵循不突破净空限制面，不影响导航设备运行，不影响航空器运行原则（详见图1）。

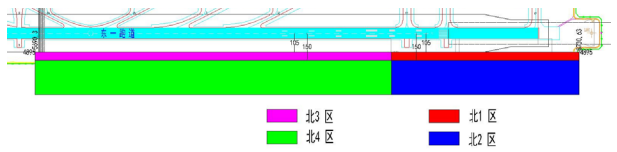


图1 不停航施工分区图

三、施工时间安排

东一跑道盲降关闭的航情通告批复时间为2023年9月1日0:00至2023年12月8日24:00，结合机场的运行情况及工程建设的进度计划，除去校飞后实际可用施工时间到2023年11月20日。当前施工的有效作业时间在东一跑道中心线东侧150米以外范围24小时不间断施工，东一跑道中心线东侧105米到150米范围当日航班停航后1:30至5:30进行施工。

四、项目不停航施工应急管理措施

（一）应急预案论证与推演

从项目不停航施工目标确认开始，整个项目组首先明确整体

时间节点目标，通过组织有相似或本场施工管理经验的人员、熟悉现场情况的机场运行人员、以及项目的设计、勘察、监理等进行不停航的时间节点梳理，以桌面演练方式多次针对本场实际情况开展不停航施工应急推演。论证启用的应急专项预案，选择施工机械设备，确定需要施工时间及施工方法。通过 BIM 技术进行不停航施工区域的数字化建模^[3]，以三维形式展现整个项目的施工虚拟仿真应急演练。使整个不停航施工建设周期内进行空间交接提前碰撞，从而完善确定施工方案，确保不停航施工方案的准确可实施。并在关闭下滑信标之前便对项目附近区域进行详细的补勘，以求确保整个场地的地质情况不出现大变化。

（二）管线探挖迁改保护

项目不停航施工方案编制期间，指挥部便开始邀请所有涉及的管线产权单位进行现场管线交底确认，根据管线重要程度进行分级，制定管线探挖保护迁改方案，采用管线探测仪、现场人工探挖、管线使用产权单位二次确认等手段进行施工区域内的管线探挖与确认。将施工区域内所有探明和迁改的管线在三维模型上显示。

（三）风险源识别管控

在前期准备阶段指挥部根据以往施工经验，结合案例机场已有应急资源和具体施工布局，进行本次不停航风险源识别和分析。根据风险发生的概率等级分成很可能（4）、可能（3）、偶然（2）、不太可能（1）四个等级。以及根据事故后果严重程度分成一般（A）、较大（B）、重大（C）、特大（D）^[4]。按照危险源后果或结果根据容忍度不同，分为可接受、缓解后可接受、不可接受三级，具体风险分级等级对照表如表1所示。本不停航施工项目共梳理出主要风险源内容9项，指挥部依据危险源识别和安全风险评价分级结果，按“分级管控”原则建立了本次不停航施工风险管控工作机制。并针对本次不停航施工的具体情况，进行不同级别以及层次的现场应急演练。

表1 风险分级等级对照表

事故等级 概率等级	A	B	C	D
1	可接受	可接受	缓解后可接受	缓解后可接受
2	可接受	缓解后可接受	缓解后可接受	缓解后可接受
3	缓解后可接受	缓解后可接受	缓解后可接受	不可接受
4	缓解后可接受	缓解后可接受	不可接受	不可接受

（四）信息传递与应急响应程序

施工开始前将指挥部、监理、施工、劳务单位及机场有关职

能部门联系方式编制成应急联络表，分发给各职能部门，保持通信联络始终处于正常状态。建立有效的沟通渠道，确保信息能够及时传达，以应对突发事件和问题。飞行区管理部负责与塔台、现场的沟通联系。将机场相关实时信息及时通知施工单位、监理单位，将施工现场必要的信息及时反馈塔台和机场相关部门。进入施工区施工作业时，施工单位应确保由经过机场培训的安全员使用准用应急通讯设备进行甚高频以及800M 全程守听，确保与机场管理机构建立可靠的联系。

（五）FOD 管控

FOD 管控方面，指挥部采取每个标段配置6名安保人员，对现场进行不间断巡视检查。施工单位安全管理人员每日加强对施工临时道口周边环境及飞行区施工现场易漂浮物及相关垃圾、遗留物等进行严格检查。施工准备阶段在每个施工区域临近巡场道附近土面区吊装2个集装箱做为重复使用物品的储存点并指定专人负责管理。在通过安检道口后选择一个区域设置围闭做为 FOD 以及施工教育准备区。

（六）净空障碍物限制面管控

项目的准备阶段指挥部一方面利用夜间停航时间组织人员对相关区域标高进行量测。根据量测结果绘制施工区域的净空限制图，并根据实际施工情况，明确施工区域内可使用的施工机械。并将净空限制图做为施工交底的重要内容。分别在距东一跑道中心线东侧150m、165m、180m 处设置净空限高标识牌，确保施工设备不超高。施工期间要求每个施工区域配备专人进行机场超净空与跑道防侵入巡查（详见图2）。

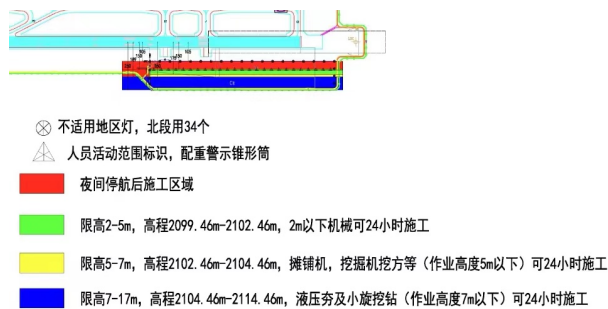


图2 净空作业交底图

（七）跑道防侵入预警

项目实施位置距现状运行跑道最近处只有120米，针对跑道防侵入管理，指挥部采取在距在东一跑道中心线105米线位置每10米摆放一个昼夜常亮不适用地区灯。在距东一跑道中心线150米线位置设置红白相间硬质钢管围栏并在顶部设置等距红色障碍灯，在围栏上等间距设置警示喇叭，不间断喊话做跑道防侵入警示。施工作业区域通过设置红白相间反光锥筒顶部设置红色障碍灯，底部采用沙袋配重进行围闭。在距东一跑道中心线150米线位置埋设了分布式光纤跨越报警系统。

（八）现场应急处置

指挥部为加强施工单位现场应急响应效率，将安全施工的要

求落在招标文件中，要求各施工单位建立健全自身的安全施工监督体系，从单位第一责任人到基层的作业人员，形成“纵向到底、横向到边、群管群策、相互监督”的管理网络，在现场管理中积极开展各项安全检查活动，分阶段、分区域、分标段，围绕施工重点难点，有针对性提出管控要点和注意事项，对发现的隐患第一时间要求责任单位整改消除，确保了施工安全始终可控。

（九）新技术手段支撑质量管控

不停航施工需要先进的技术和高效的管理策略支撑。技术挑战包括如何减少施工时间、提高施工效率和降低施工成本，可能涉及使用新材料、先进的施工设备和智能监控系统等的创新。在施工工艺管控中，采用数字化监控手段覆盖相应施工机具、拌合站。在影响质量的关键施工工艺中（如强夯、振碾等），实现对关键参数（如夯沉量、虚铺厚度等）的监控，有效保障施工质量。为确保后续东二跑道工程道面基槽、水稳层、道面面层高程、厚度等质量控制关键要素可控，指挥部正在加速以三维扫描、BIM 模型等新技术开展工程质量验评的步伐，并在近期开展的水稳层实体三维扫描与 BIM 模型对照验收中，取得非常好的效果^[5]。

五、项目不停航应急管理效果

经过科学的安全生产应急组织，本次不停航施工实现了“飞行安全要保证，运行效率不降低，建设进度不放缓”的既定目标。

1. 在民航局批复的下滑信标关闭的98天（含18天校飞）内，在日均起降架次450次以上的运行跑道保护区管线迁改近15km、预制及现浇排水沟共计1600m、新建1500m 长的滑行道及其标志标牌等相关设施、ILS 下滑信标 /DME 顺利校飞、完成下穿通道支护桩99根。按期完成了全国不停航施工难度排在前列的施工。

2. 不停航施工过程实现了自开工以来，未发生一起对机场运行造成影响的不安全事件，整个施工过程不停航施工安全管理有序可控。

3. 本次飞行区内不停航施工道面影响区土石方填筑施工将采用快速液压夯进行压实作业。为高原地区净空限制区站坪、跑滑系统的地基快速处理积累了经验。

4. 在跑道防侵入、FOD 管控、不停航施工净空管控、风险源识别管控方面积累了丰富的实践经验，形成了程序化、体系化的管控措施。

六、结语

机场不停航施工作为机场改扩建的常态施工状态，具有极强的行业特点，尤其大型机场施工安全与机场运行安全息息相关，

针对不同机场实际情况，建立科学的应急管理体系，编制对应的应急预案和现场处置措施，才能确保不停航施工的安全。研究以某大型机场为对象，通过前期风险分析、资源调查和应急演练，构建施工过程中的质量安全管控要点，并提炼出一套预警和处置的措施与方法，成功保证了本案例机场不停航施工下的安全运营。

参考文献

[1] 何洪刚. 民航机场飞行区扩建工程不停航施工项目管理 [J]. 工程技术研究, 2022, 4(1): 63-64.

[2] 赵閃建. 探究民用机场不停航施工安全管理措施 [J]. 建材与装饰, 2019(20): 168-169.

[3] 赵继成, 李建华, 张乐乐, 等. BIM 技术在珠海机场改扩建项目不停航施工中应用 [J]. 建筑技术开发, 2022, 49 (16): 87-89.

[4] 刘敬新, 金立欣. 浅议机场不停航施工的安全风险管理 [J]. 民航管理, 2018(11): 64-66.

[5] 王辉. 民航机场场道工程不停航施工组织与安全管理 [J]. 科技创新与应用, 2023, 13 (01): 143-146.

新基建背景下高速公路改扩建工程监理协同管理机制创新研究

许小刚

湖北汉东工程咨询有限公司, 湖北 随州 441300

DOI:10.61369/ERA.2026080022

摘 要 : 新基建战略推动交通基础设施朝着数字化, 智能化方向加速转型, 高速公路改扩建项目往往车流量大, 工序繁杂而且涉及众多主体, 这样的情况下, 对于监理协同管理就有着更高的要求。传统监理模式在信息及时性, 协同范围以及风险预先把控等方面已无法适应实际需求, 本文联系中江高速公路改扩建工程(广东省重点工程, 交通强国创建试点项目)的工程应用情况, 利用 BIM, 物联网, 北斗监测以及大数据平台等新基建技术, 可以形成起覆盖感知, 传递, 分析, 决策和反馈等环节的协同管理体系, 做到监理过程的可视化展示, 智能化运行以及循环式控制, 经由剖析该工程在交通组织, 安全守护, 质量监管以及技术更新等方面的具体举措, 验证技术融合集成的效果, 从而为优化工程质量, 保证安全并加强经营效率供应支持。

关 键 词 : 新基建; 高速公路改扩建; 监理协同管理; 数字化监理; 机制创新

Research on Innovation of Collaborative Management Mechanism for Supervision of Expressway Reconstruction and Expansion Projects under the Background of New Infrastructure Construction

Xu Xiaogang

Hubei Handong Engineering Consulting Co., Ltd., Suizhou, Hubei 441300

Abstract : The new infrastructure strategy is accelerating the transformation of transportation infrastructure towards digitization and intelligence. Highway renovation and expansion projects often have large traffic volumes, complex processes, and involve numerous entities. In this situation, there are higher requirements for supervision and collaborative management. The traditional supervision mode is no longer suitable for practical needs in terms of information timeliness, collaborative scope, and risk pre control. This article focuses on the engineering application of the Zhongjiang Expressway renovation and expansion project (a key project in Guangdong Province and a pilot project for creating a strong transportation country), and uses new infrastructure technologies such as BIM, Internet of Things, Beidou monitoring, and big data platforms to form a collaborative management system that covers perception, transmission, analysis, decision-making, and feedback. It achieves visual display, intelligent operation, and circular control of the supervision process. Through analyzing the specific measures of the project in traffic organization, safety protection, quality supervision, and technological updates, the effect of technology integration is verified, thereby providing support for optimizing project quality, ensuring safety, and strengthening business efficiency.

Keywords : new infrastructure; highway reconstruction and expansion; collaborative management of supervision; digital supervision; mechanism innovation

引言

中江高速等许多国家主干道开始大规模迈入改扩建进程, 在高车流量情况下还要不停工施工, 这样的复杂环境下, 安全监管及多方协作变得越发艰难, 不过新基建技术给监理带来了数字化方法, 但是当下仍然存在数据零乱, 协作不顺畅等情况, 急需形成起高效协作体系来符合创建经营的新需求, 可以参考中江高速改扩建项目里“一路四方”联勤机制, 智能运作平台等取得的经验, 塑造出更高效的监理协作体系, 从而提升质量, 安全防护水平以及整体运作效率, 促使高速公路改扩建项目更好地向前推进。

一、新基建背景下高速公路改扩建工程监理面临的新要求

（一）新基建推动工程管理数字化与智能化升级

随着新基建不断推进，工程运作正在逐步从经验主导向数字化、智能化方向转变，高速公路改扩建项目从规划到监理各个环节都越来越依赖信息化基础设施给予的数据支撑和协同能力。以中江高速项目为例，通过把 BIM 和 GIS 结合来达成工程全方位的可视化效果，创建 CIM 平台形成区域数字根基，这样监理人员就可以凭借模型化的数据来做进度检查，质量预测以及风险分析工作，物联网感知设备会及时收集结构承重，环境参数等相关重要数据，从而改善监理信息的及时性和精确度^[1]。

（二）高速公路改扩建工程的复杂性分析

高速公路改扩建工程一般都在交通不断行进的情况下展开，车流量很大而且通行要求很高，拿中江高速来说，2019年它的车道断面平均交通量已经达到了49551pcu/d，这就需要施工组织和交通导改方案随时作出调整，从而加大了监理审核和安全控制的困难程度，既有的结构出现老化受损的情况，改造过程中稳定性和风险的连锁反应要特别留意，这对监理的专业能力有了更高标准。该工程牵涉到路基，桥梁，隧道，交安，机电等诸多专业领域，中江高速项目主线要扩建的桥梁就有59座之多，包含特大桥，大桥，中桥等各类别，作业场地分布零散，工序之间交叉频繁，而且项目常常横跨许多个管理部门或者行政区域，这样就令资源安排，信息整合以及任务过渡变得更加繁杂。

（三）监理协同管理存在的问题

部分项目虽然开始采用信息化手段，但是监理管理工作仍然存在很多阻碍，拿中江高速改扩建之前的管理状况来说，传统数据依靠人力记载并线下传递，这样信息传递速度慢，很容易造成发现问题迟缓，决策拖延。各个主体的信息系统没有联通起来，所以监理很难得到一致的数据，协作效率低下，监理主要靠人工守在现场，数据收集方法缺少，无法应对工程不断发生的变化^[2]。

二、新基建技术在高速公路改扩建工程监理中的融合路径

（一）BIM+GIS 一体化的可视化监理应用

在高速公路改扩建工程当中，把 BIM 和 GIS 相融合，给监理人员创建起一种从二维到三维，从静态到动态的可视化运作工具，在中江高速改扩建的时候，经营团队深入探究 BIM 技术，并形成起智能经营平台，利用 BIM 模型可以针对设计方案执行三维审查，找出可能存在的矛盾，而且还能模仿施工以及交通疏导路线。到了施工期间，再融入 GIS 信息，做到工程整个生命时段的空间对应，监理人员就能在三维场景里面观察各个结构单元的施

工情况，再加上物联网检测的数据，把诸如变形，应力之类的即时信息同模型联系起来，从而塑造起可视化的“监测—分析—反馈”链路，这样就能加强监理对于动态变化的感受能力和判定水平，改善检查的精确性^[3]。

（二）物联网与北斗监测技术的实时感知能力提升

物联网传感设备布置于高速公路改扩建工程现场之后，便具备了即时收集并传送数据的能力，对于中江高速存在超深厚软基（即软土厚度超出3米）这样的难点问题，该项目研发出依靠电阻率观测的软基变形警报系统，针对重要构造物的受力情况，形变情形以及震动状况等，物联网观测能够给监理方给予连续而且可回溯的数据信息，一旦实施观测就能尽早发觉不正常的发展态势，从而做到预先防范的目的，凭借北斗高精度定位技术，可以达成对大型机械厘米级别的精准监管，并且做到其行走路径及工作范围的智能控制^[4]。

（三）大数据与云平台支撑监理协同共享

随着监理数据量极速增多，传统纸质资料以及分散的记录方式已无法适应当代信息管理的需求，中江高速项目创建起来的“安全管理大数据平台”就是一个典型的例子，依托云平台的大数据体系能够把监理日志，检测数据等多种来源的信息集中起来存贮，并实施结构化的统一管理，经由数据挖掘和统计分析，可以针对质量问题，工序风险以及进度滞后等情况作出预测，从而加强预先控制的能力，云平台具备跨地域访问和多权限运作的功能，使得各个参与方随时可以共享信息，进而优化合作的效率^[5]。

（四）智能视频监控与 AI 识别技术的应用

在交通不能中断而且施工环境很复杂的高速公路改扩建现场，智能视频监控给监理带来了全天候，全方位的在线监督手段，中江高速项目在施工现场推广信息化智慧机制，利用安全改进技术，高清摄像头和无人机航拍覆盖施工及交通导改区域，随时记录人员，机械和材料的状态。AI 识别技术自动识别未戴安全帽，越界作业等违章行为，并发出警报，减小人工疏忽，系统针对扬尘，火花等环境异常执行图像识别并发出警报，为快速响应给予依据，自动分析生成巡查报告和行为统计数据，为经营改善给予数据参照。



图1 新基建背景下高速公路改扩建工程监理协同管理总体框架图

三、高速公路改扩建工程监理协同管理机制设计与创新

（一）协同主体识别与职责划分

高速公路改扩建工程中许多参建主体，其管理链条很长，形成高效的监理协同机制主要看清楚参与主体及其职责范围，参考中江高速形成的“业主单位统筹，监理单位监督，施工单位落实”这种组织架构，业主承担总体统筹和资源协调的任务，应当给协同机制的运作给予制度保障并供应技术平台支持，设计单位负责供应技术按照，就设计变更，施工难点以及现场问题给出专业的答复。施工单位是现场执行方，要承担报送施工数据，解决问题以及与监理合作的责任，监理单位处在协同经营的核心地位，经由审查，监督，警报等手段来协调各方，确保质量，安全和进度目标得以实现^[9]。

（二）“一平台多主体” 监理信息协同机制设计

新基建技术之下创建起“一平台多主体”的信息协同体系，这是优化监理效率的关键之处，凭借中江高速项目“一张图”可视化的运作经验，依靠 CIM 平台，把 BIM 模型，施工进度，检测数据，视频画面，质量检查记录等诸多源头的信息融合到同一个数字底层当中，做到从最初的设计阶段一直到施工执行乃至经营筹备这整个过程的数据共享，该平台按照统一的接口准则以及数据格式规范，使得业主，监理，设计，施工这些主体能够在同个数字空间即时互相传递数据，免除出现信息孤岛的情况，各个单位依照自己的权限取得必要的信息，而且平台会自动记载数据流动以及审批的过程，从而保证监理信息既精准又完备还能够被追踪到源头。

（三）风险导向的协同决策机制

风险导向协同决策机制当中，高速公路改扩建工程的施工环境比较复杂，作业面较多，风险点分布广泛，创建这样的机制可以有效地加强监理预先控制的能力。中江高速项目利用 LEC 法执行风险分级管控，把风险分为红，橙，黄，蓝四类，CIM 平台收集到的监测数据，进度数据，历史经验以及现场巡视记录做到风险识别自动化并且随时更新，系统按照风险源的类别和等级创建风险库，给警报和应对赋予依照。

（四）质量、安全、进度三位一体协同控制机制

质量，安全，进度三者形成一体并协同实施控制的机制，改扩建工程受到施工环境，交通保障以及既有结构的影响，质量，安全和进度相互联系，所以要创建起包含三者的协同控制体系，中江高速项目把“质量第一，预防为主”当作指导原则，“质量红线”作为下限，依托数字平台让各个主体分享检查记录，检测数据，进度计划之类的信息，从而创建起全面的协同检查流程，使得管理需求得以一同推动。当出现质量问题的时候，平台会自动把可能造成的影响安全风险以及进度偏离情况联系起来，这样决策就会更为周全，监理旁站的数字化运作机制依靠视频监控，感

知设备和移动终端，随时记载现场关键工序的开展状况，自动形成旁站日志，做到旁站工作可以被量化，回溯，统计，进而优化旁站监管的真实性和覆盖面^[7]。

四、机制应用效果验证与实例数据分析

（一）实例工程概况

中江高速公路改扩建工程是本文的关键验证实例，其属于国家高速公路网 G9411 的重要形成局部，该工程全长 40.046km，由原先的双向四车道拓宽成双向八车道，设计时速从 100km/h 加强到 120km/h，此项目包含 5 座特大桥，24 座大桥，而且牵涉到 25 处互通式立体交叉，这是一项典型的在交通不断流情况下执行的改扩建工程，该项目实施改扩建就是将原来的四车道升级为八车道，施工节点密集，交叉作业量大，监理单位需负责质量，安全，进度，环保以及交通分流等各个环节的监督检查工作。

（二）监理协同管理机制应用情况

中江高速改扩建工程利用智慧运作平台，物联网监测系统以及 AI 视频分析模块形成协同运作机制，做到多种类型数据随时汇集并共享，该项目创建的“一路四方”联勤保障机制加强了与属地交通部门，经营单位之间的交流。平台投入使用之后，监理人员，施工单位以及业主可以在同一个界面上看到模型，风险提示以及进度情况，彼此间的交流速度明显加快，统一的数据接口使得监理人员做旁站记录的时间由原来的平均每份 45 分钟缩减到 8 分钟，而且每天通过人工传达的信息量从 18 次降到平台自动发送的 6 次，信息的正确率达到 96% 以上，重要安全隐患的平均响应时间也从 2.5 小时缩减到不到 40 分钟，现场施工全面采用安全设施标准化和安全改进技术之后，协同运作的效率得到了有效改善，表 1 显示了协同机制执行前后一些主要监理指标的差异，这些指标涉及信息传递的速度，质量反馈的能力以及安全警报的准确性等方面。

表 1 中江高速公路改扩建工程监理效率提升数据对比

指标	实施前	实施后	提升率
信息传递时效（min）	45	8	82%
质量问题闭环率	78%	96%	↑ 18%
安全风险预警准确率	72%	93%	↑ 21%
隐患整改平均周期（h）	10	3.5	65%
旁站记录完整率	82%	98%	↑ 16%

数据表 1 展示出数字化协同机制极大地改善监理效率与安全管控能力，在信息传递、风险识别以及闭环整改等方面优势尽显，为复杂的改扩建工程给予有力支撑。

（三）研究成果与实践效果总结

在中江高速公路改扩建工程当中采用协同运作机制之后，监理工作变得越发及时，精确而且更具合作性，数字平台使得监理方式由依靠经验转为凭借数据，从而令问题得以更快解决，风险也得以更准确定位，格外是在超深厚软基处理，桥梁拼接这些关键技术部位，利用数字化观察方法有效地应对了新老路基存在差

异性沉降，结构共同承载力等问题，这种机制改善了工程质量并加强了安全防护水平，达成了省级“平安工地”的创建目的，给高速公路改扩建项目的数字化转型给予了应用范例^[8]。

五、结语

新基建浪潮之下，高速公路改扩建工程的监理模式正在由经验管理迈向数字化，智能化协作的新阶段，借助 BIM，物联网，

北斗监测，大数据以及智能识别技术，创建起信息联通，风险预防，协同高效的监理体系，经由案例验证可知，这种机制能够优化质量，安全及进度的控制能力，给复杂工程创建一条值得复制的道路，日后，伴随 AI 预测，数字孪生等技术不断深入应用，将会进一步加强监理的智能决策水准，给高速公路改扩建工程监理带来更多的可能性与超越之处。

参考文献

[1] 黄亮，丁华，徐伟明，等. 高速公路改扩建工程监理工作管理重点 [J]. 建筑技术开发，2021, 48(09): 79–80.

[2] 李锐凯. 基于 GIS 高速公路改扩建工程建设管理一体化系统设计分析 [D]. 华南理工大学，2022.

[3] 滕超. 高速公路收费站改扩建工程管理研究 [J]. 运输经理世界，2023, (25): 46–48.

[4] 季昌高. 高速公路改扩建工程路基拼宽施工技术 & 监理控制要点分析 [J]. 工程技术研究，2024, 9(17): 156–158.

[5] 陈浩. 高速公路改扩建工程施工监理工作分析 [J]. 运输经理世界，2024, (30): 60–62.

[6] 杨伟. 高速公路改扩建工程施工监理工作研究 [J]. 现代工程科技，2025, 4(01): 117–120.

[7] 曾晶. 高速公路改扩建工程路基拼宽施工技术 & 监理控制要点分析 [C]// 江西省工程师联合会. 第二届智能工程与经济建设学术研讨会论文集（二）. 广东翔飞公路工程监理有限公司，2025: 34–37.

[8] 汤晓菲. 保通条件下重丘区大流量高速公路改扩建施工安全培训新模式——以 G15 沈海高速公路改扩建工程为例 [J]. 建筑安全，2025, 40(11): 65–70.

温泉给水管材性能对比与选型研究

——以惠州黄沙洞某五星级酒店为例

徐燕波

广州市城建规划设计院有限公司，广东 广州 510000

DOI:10.61369/ERA.2026080025

摘 要： 温泉给水系统对管材的耐高温与耐腐蚀性能要求严格。以惠州黄沙洞某五星级酒店为案例，系统对比薄壁不锈钢管、PE-RT II 型保温管、FRP 玻璃钢保温管、PP-R 管等材料的工程特性。研究表明，单一管材难以全面满足复杂工况需求，复合选型方案为最优解。室外长距离主管道推荐 PE-RT II 型保温管，室内关键区域采用 316L 不锈钢管，支管可选用 PP-R 管。该方案在保证系统安全性的同时，实现了经济性与实用性的平衡。

关 键 词： 温泉给水；管材选型；性能对比

Performance Comparison and Selection Study of Hot Spring Water Supply Pipes: A Case Study of A Five Star Hotel in Huangshadong, Huizhou

Xu Yanbo

Guangzhou Urban Construction Planning and Design Institute Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510000

Abstract： The hot spring water supply system has strict requirements for the high temperature resistance and corrosion resistance of pipes. Taking a five-star hotel in Huangshadong, Huizhou as a case study, this study systematically compares the engineering characteristics of materials such as thin-walled stainless steel pipes, PE-RT II insulation pipes, FRP fiberglass insulation pipes, and PP-R pipes. Research has shown that a single pipe material is difficult to fully meet the requirements of complex working conditions, and a composite selection scheme is the optimal solution. PE-RT II insulation pipes are recommended for long-distance outdoor main pipelines, 316L stainless steel pipes are used for key indoor areas, and PP-R pipes can be used for branch pipes. This scheme achieves a balance between economy and practicality while ensuring system security.

Keywords： hot spring water supply; pipe selection; performance comparison

引言

温泉供水系统与普通生活给水系统存在本质区别。温泉水温普遍在 50℃至 90℃之间，水中富含氯离子、硫酸盐及钙镁离子等矿物质。这种高温与高矿化度的协同作用，对管道材料形成严峻考验。管材不仅需要承受高温带来的蠕变与软化风险，还必须抵御持续的电化学腐蚀与结垢问题。因此，管材选型成为温泉酒店项目建设中的关键技术环节，直接关系到系统后期的运维成本与使用寿命。

一、项目概述

（一）项目背景与定位

项目选址于广东省惠州市黄沙洞区域（洲际度假酒店项目范围内），地热条件优越，属本地温泉富集带。项目占地 2300 亩，总建筑面积 21 万平方米，涵盖五星级酒店主楼（200 间客房）、别墅区、高尔夫球场、温泉 SPA 中心及高级会所等业态，定位为集体闲度假、商务会议、康体养生于一体的大型综合旅游目的地。场地中央低洼处有自然出流温泉井，出水水温达 81℃。

（二）温泉给水系统的工程特点

项目温泉给水系统主要技术难点包括：系统需长期连续运行，对管材耐久性要求高；源水温度 60 - 85℃，峰值约 90℃；温泉水矿化度中等偏高，氯离子与硫化物含量较高，腐蚀性强；管网从温泉井经蓄水池、换热机房分送至客房、泡池及 SPA 区，部分主管道长距离埋地，对保温与抗沉降性能有要求；室内高端区域对管材卫生与外观要求严格。因此，管材选型需综合耐温、防腐、保温、施工、维护及全寿命周期成本等多方面因素。

二、温泉给水系统对管材的技术要求

（一）耐高温与抗蠕变能力

选管材时，耐高温性能是关键考量因素。系统运行期间，泉眼至蓄水池管内水温常规在65℃以上，短时峰值约90℃，蓄水池至各用水点水温在50–60℃。普通塑料管耐温能力有限，长时间处于高温环境后易出现软化、耐压降低等问题，严重时可能发生变形甚至破裂。因此，管材必须能够在70℃至95℃的温度区间内保持尺寸稳定与力学强度，不得出现明显的下垂或轴向伸长。

（二）耐腐蚀与抗结垢特性

温泉水质对金属管道的腐蚀影响较大，尤其是氯离子易引发点蚀穿孔。碳钢管道还面临硫化物和溶解氧的共同侵蚀作用。另外高温条件下钙镁离子容易结垢附着在管壁，导致过水面积变小、输送能力受影响。因此，管材材质需具备优异的抗化学腐蚀能力，且内壁应保持光滑，以延缓结垢进程，确保长期输水流量稳定^[1]。

（三）结构稳定性与水力性能

运行中管道系统会承受多种外部作用力，主要包括工作压力波动、冷热交替引起的热胀冷缩应力，还有埋地管段承受的土壤压力。考虑到这些因素，管材的环刚度和抗冲击性能要能满足要求，否则施工期间或者投入使用后都可能出现破裂等问题，影响系统的正常使用。同时，管道内壁的粗糙度直接影响沿程水头损失。内壁光滑的管材可以降低水泵扬程需求，减少长期运行能耗。

（四）安装便捷性与运维成本

温泉酒店工期紧，管材连接方式（如热熔、卡压）直接影响施工进度与后期漏水维修成本。耐腐蚀管材可实现免维护，而劣质管材易导致频繁检修甚至整体更换，造成营业中断和高昂费用。因此，选型应基于全生命周期成本，而非仅看初期单价。

（五）经济合理性的综合评判

做经济性分析得把采购、安装、运行维护这些环节都算进去。有些管材价格看着贵一点，不过要是能用五十来年基本不用换，摊到每年的费用说不定比便宜货划算。对于五星级酒店而言，因管道漏水导致的客户投诉与品牌声誉损失，亦是隐性成本的重要组成部分。因此，经济合理的判断标准应为“单位使用年限内的综合成本最小化”^[2]。

三、常用温泉给水管材性能对比分析

（一）金属类管材：薄壁不锈钢管

薄壁不锈钢管，特别是316L牌号，在温泉给水系统中表现突出。其耐温性能优异，可在95℃环境下长期稳定运行，短期耐受温度可达120℃。耐腐蚀方面，304不锈钢适用于矿化度一般的温泉水，而316L因添加了钼元素，对氯离子和硫化物的抗腐蚀能力显著增强，尤其适合黄沙洞地区的水质条件。该管材预期使用寿命可达50至70年，与建筑主体结构同周期。安装时采用卡压或氩弧焊连接，密封可靠，日常运行基本无需维护。优点在于卫生安

全、强度高、内壁不易结垢且外观整洁，适合室内明装。缺点为材料单价较高，初期投资较大。因此，该管材最适合用于室内主管道、泡池给水管、设备机房连接等关键部位^[3]。

（二）塑料及复合类管材：PE-RT II型保温管

PE-RT II型耐热聚乙烯保温管为三层复合结构，内管为耐热聚乙烯，中间层为聚氨酯硬泡保温层，外护管为高密度聚乙烯。其长期耐温可达80℃至95℃，满足绝大多数温泉输送需求。作为塑料材质，它完全耐酸碱及矿物质腐蚀，不存在电化学腐蚀风险。使用寿命约为50年。连接方式采用热熔连接，接口强度与管体一致，可有效杜绝渗漏。该管材最大的优势在于自带保温层，长距离输送时热损失极小，节能效果显著，且内壁光滑不结垢。同时因其重量轻（比钢管轻60%–80%），人工可搬运，可减少吊装设备，降低机械费。且柔韧性好，小角度转弯处无需管件，适配复杂路由，可减少接头，施工便捷，效率高，综合造价低。缺点在于外护管为塑料，长期裸露在阳光下易老化，因此必须埋地使用或采取防晒遮蔽措施。该管材非常适合室外埋地主管、园区管网以及长距离高温输水场景。

（三）其他塑料管材：PP-R管与CPVC管

PP-R管材在温泉系统里实际应用时会受到一定限制，因为它的长期耐温基本维持在70℃左右，就算短时间能耐95℃的高温，但老化会明显变快。综合来看，这类管材寿命大概也就二三十年。虽然价格低、重量轻算是优点，不过高温条件下的承压能力确实偏弱。从实际工程角度考虑，更适合用在低温支管或者小型汤泉项目上，如果要铺设温泉主干管道的话建议别选这个材料。

CPVC是通过氯化改性处理后的产品，耐热方面比普通PP-R要更好一些，长期工作温度能达到90℃。耐腐蚀表现也不错，使用寿命估计在三十到四十年之间。施工方面多采用粘接，操作上相对方便。该管材的优点是耐热性好且价格适中。但缺点同样明显：抗冲击性能差，材质偏脆，不宜在地理或重载区域使用。其最大问题在于连接使用的胶水耐高温性能有限，在长期高温工况下，接口部位可能出现软化、渗漏甚至脱落爆管，选型时需谨慎评估^[4]。

（四）特种复合管材：FRP玻璃钢保温管的特性

FRP玻璃钢保温管以玻璃钢为外护层、聚氨酯为保温层，内管材质可选。耐温达90–110℃，不蠕变；耐氯离子、硫化物等高矿化度温泉水长期腐蚀，不锈不结垢；保温性能好，温降低；重量轻，安装无需大型机械，采用法兰或承插连接。寿命25–30年，基本免维护。缺点：材质脆，怕撞击和碾压，埋地需保护层；不能热熔或焊接，仅能法兰连接；抗扭、抗弯能力一般，对地基要求高；不能盘管，接头多，渗漏隐患大；法兰连接工序繁琐、人工及配件成本高，工期长于PE-RT II型保温管。适用于高温（>90℃）、高腐蚀、长距离主干管网，尤其适合高硫温泉项目。

（五）严禁使用的管材类型

镀锌钢管与普通碳钢管道在温泉给水系统中被明确禁止使用。虽然这两种管材初期材料价格低，且能够承受高温，但其耐腐蚀性能极差。在高温、高矿化度的温水中，钢管内壁会迅速发

生氧化锈蚀，短期内即出现大面积锈瘤与穿孔漏水。实际工程经验表明，此类管道使用寿命仅有1至5年。频繁的漏水不仅污染水质、堵塞末端设备，还会导致高昂的维修费用与营业损失。从全生命周期来看，该类管材的成本反而最高^[5]。

四、管材与管件协同选型原则

（一）管材与管件的材质匹配性

在建筑给水及温泉管道系统中，管材与管件的材质匹配程度直接决定管网的使用安全和寿命。选配管件时，其规格标准应当与管材统一。不同材质的管材和管件混合使用，连接部位会因热膨胀系数差异或电化学腐蚀反应，成为整个系统中最容易损坏的位置。

对于高温温泉管道系统，管件需要与管材选用同一厂家、同一系列以及相同的材料配方。例如，PE-RT II型管材应搭配PE-RT II型热熔管件，不可改用PPR或PVC管件。同样，316L不锈钢管材只能使用316L不锈钢制成的卡压式或焊接管件，禁止用304不锈钢管件替换。若混用不同牌号的不锈钢，接头处会发生电化学腐蚀，逐渐破坏金属结构，导致接头提前失效，使管道系统出现泄漏风险。

因此，在管道工程设计选材和现场施工安装时，工作人员应当严格核对管材与管件的材质证明，确保两者完全一致，避免微小疏忽造成后期重大隐患。只有保证管材和管件在所有环节中保持材质统一、规格匹配，才能让整个管道系统达到预期的安全标准和使用年限。

（二）关键配件的耐温与密封要求

阀门、法兰、密封垫等配件是系统泄漏的高发区域。阀门应优先选用316不锈钢球阀或与管材同材质的全塑阀。密封垫片不得使用普通橡胶或丁腈橡胶，必须采用耐高温三元乙丙橡胶（EPDM）或氟橡胶（Viton），其长期耐温能力可达120℃以上，且能够抵抗温泉中的化学侵蚀。法兰连接处，塑料管道向金属设备过渡时，应采用不锈钢法兰搭配塑料法兰适配器，避免不同材料的直接硬性连接。

（三）保温管件与管道附件的处理

对于采用PE-RT II或FRP保温管的系统，弯头、三通等

管件部位同样需要具备保温功能。工程上应优先采购成品保温管件，而非在现场用普通保温材料随意包裹。成品保温管件的保温层与外护管连续，能够有效防止热桥效应，避免热量局部散失和冷凝水产生。管道固定支架与滑动支架的设置也应考虑保温层的连续性，不得直接卡压保温层，而应使用带有隔热垫块的专用管卡。

（四）不同材质的适用场景划分

基于性能与经济性的综合平衡，温泉给水系统宜采用复合选型策略。室外地埋、长距离输送的主干管网选用PE-RT II型保温管，利用其良好的柔韧性与一体式保温结构，抵抗地基沉降并减少热损失；对于水温超过90℃或含硫量极高的工况，可升级选用FRP玻璃钢保温管。室内高端区域、泡池周边及设备机房内部，优先选用316L薄壁不锈钢管，确保卫生美观与长期免维护。对于预算有限且水温较低的末端支管，可审慎选用CPVC管，但需严格控制运行温度不超过70℃。任何情况下，镀锌钢管与普通碳钢管道均不得进入选型清单。

在文章项目案例建设过程中，经市场调研，316不锈钢管不同管径综合造价是PE-RT II型保温管的2至3倍；FRP保温管综合造价比PE-RT II型保温管高约30%；CPVC管在既有项目的实际运用中爆管现象比较突出。基于温泉水温、管材性能、施工效率、安全性及综合造价等因素，项目室外埋地、长距离输送的主干管网选用PE-RT II型保温管；在机房等管道连接较多位置采用了316不锈钢管；末端支管管径≤DN50的管道采用了PPR热水管。在实际运用中取得了较好的经济和实用效果。

五、结束语

温泉水管选材选型需统筹安全、性能与成本。通过对比分析，单一管材无法兼顾室外地埋保温与室内卫生美观要求。复合选型方案，室外以PE-RT II保温管或FRP管为主干，室内关键区域采用316L不锈钢管，末端支管选用PP-R管，能够实现系统长期稳定运行。全生命周期成本评价显示，该策略在控制初期投资的同时显著降低后期运维负担。惠州黄沙洞五星级酒店案例为同类项目提供了可靠的选型参考，强调避免使用镀锌钢管等易失效材料。

参考文献

- [1] 尉艳辉. 论给水管材在建筑给排水安装施工中的应用[J]. 砖瓦世界, 2024(7):217-219.
- [2] 李岩. 给水管道管材对水质的影响及防腐措施分析[J]. 全面腐蚀控制, 2020, 34(5):38-39, 42.
- [3] 郝建勋. 给排水管道工程管材的应用策略[J]. 商品与质量, 2020(30):250.
- [4] 赵璠. 给水工程中供水管材的选用方式分析[J]. 建材发展导向(上), 2022, 20(2):79-81.
- [5] 陈楠, 周俊斌. 给水工程中供水管材的选用[J]. 工程技术研究, 2021, 6(10):157-158.

基于 TMM 与混合整数遗传算法的 PDMS 辐射冷却多层膜仿真设计与参数优化

苑孟理想, 赵娜娜^{*}, 吴嘉润, 刘文娜, 郭紫哈, 刘新红

北京石油化工学院, 北京 102617

DOI:10.61369/ERA.2026080028

摘 要 : 全球能源消耗持续攀升, 热环境问题日益突出, 发展高效被动制冷技术具有重要意义。本文以 PDMS 基辐射冷却材料为切入点, 采集了材料光学常数、太阳光谱和大气透射率等数据, 运用三次样条插值与传输矩阵法 (TMM) 计算了不同厚度薄膜的光谱发射率。结果表明, 在 8–13 μm 大气窗口内, PDMS 发射率随厚度增加而升高, 100 μm 后趋于饱和, 平均发射率 0.936。在此基础上, 建立辐射–对流耦合的净制冷功率模型, 并采用牛顿迭代法求解平衡温度, 定量揭示了厚度对制冷性能的边际效应。针对多层膜结构的优化问题 (材料离散、厚度连续), 建立了混合整数遗传算法与 TMM 相结合的 MIGA–TMM 模型, 以净制冷功率为适应度进行全局寻优, 得到 PDMS/SiO₂/TiO₂/Ag 七层最优结构, 净制冷功率 57.09 W/m², 敏感性分析表明, 对流换热系数波动 $\pm 50\%$ 时净制冷功率变化约 10%, 环境温度变化 $\pm 5\text{K}$ 时平衡温度变化约 22%, 模型整体鲁棒性良好。

关 键 词 : 辐射冷却; PDMS; 传输矩阵法; 牛顿迭代法; 混合整数遗传算法

Simulation Design and Parameter Optimization of PDMS-Based Radiative Cooling Multilayer Films Based on TMM and Mixed-Integer Genetic Algorithm

Yuan Menglixiang, Zhao Nana^{*}, Wu Jiarun, Liu Wenna, Guo Zihan, Liu Xinhong

Beijing Institute of Petrochemical Technology, Beijing 102617

Abstract : With the continuous increase in global energy consumption and the growing severity of thermal environment problems, the development of efficient passive cooling technologies has become increasingly important. Taking PDMS-based radiative cooling materials as the research object, this paper collects optical constants of materials, solar spectral data, and atmospheric transmittance data. Cubic spline interpolation and the transfer matrix method (TMM) are used to calculate the spectral emissivity of films with different thicknesses. The results show that, within the atmospheric window of 8–13 μm , the emissivity of PDMS increases with film thickness and tends to become saturated after 100 μm , with an average emissivity of 0.936. On this basis, a radiation–convection coupled net cooling power model is established, and the equilibrium temperature is solved by the Newton iteration method, which quantitatively reveals the marginal effect of thickness on cooling performance. For the optimization problem of multilayer film structures, where material selection is discrete and layer thickness is continuous, a MIGA–TMM model combining the mixed–integer genetic algorithm and TMM is constructed. Taking net cooling power as the fitness function, global optimization is carried out. The optimized seven-layer PDMS/SiO₂/TiO₂/Ag structure achieves a net cooling power of 57.09 W/m². Sensitivity analysis shows that when the convective heat transfer coefficient fluctuates by $\pm 50\%$, the net cooling power changes by about 10%; when the ambient temperature changes by $\pm 5\text{K}$, the equilibrium temperature changes by about 22%. Overall, the model shows good robustness.

Keywords : radiative cooling; PDMS; transfer matrix method; Newton iteration method; mixed–integer genetic algorithm

基金项目: 国家级大学生创新创业训练计划 (2026J00115); 北京市大学生创新创业训练计划 (2026J00091); 北京市高等教育学会课题 (MS2025130); 北京市教委科研计划一般项目 (KM202410017004)。

作者简介:

苑孟理想, 本科生, 新材料与化工学院;

吴嘉润, 本科生, 新材料与化工学院;

刘文娜, 本科生, 信息工程学院;

郭紫哈, 本科生, 信息工程学院;

刘新红, 副教授, 博士, 研究方向: 应用数学。

通讯作者: 赵娜娜, 讲师, 博士, 研究方向: 概率论与数理统计。

引言

全球能源消耗持续攀升，热环境问题日益突出，传统主动制冷方式能耗高、碳排放量大。被动日间辐射冷却（PDRC）技术无需外界能量，可直接向太空排热，因此成为绿色制冷领域的研究热点。在各类辐射冷却材料中，聚合物因其成本低、易加工且在大气窗口具有本征吸收峰而受到广泛关注^[1]。其中，聚二甲硅氧烷（PDMS）因在大气窗口（8–13 μm）具有高发射率，同时在可见光波段具有高透射率，被视作 PDRC 的理想材料之一。辐射冷却材料的系统综述指出，PDMS 是一种具有良好应用前景的柔性辐射冷却基体材料^[2]。

自 Raman 等^[3]首次在太阳直射下实现低于环境温度的辐射冷却以来，该技术的可行性已得到广泛验证。在材料设计方面，Zhai 等^[4]通过玻璃–聚合物混合超材料展示了可扩展制造的日间辐射冷却方案，为多层膜结构设计提供了重要思路。

然而，目前针对 PDMS 基辐射冷却材料的系统性能分析尚不充分，尤其在发射率与厚度的定量关联、制冷性能的综合评估、多层膜结构优化等方面，建模方法与优化算法仍有进一步提升的空间。现有研究多聚焦于单一性能或结构仿真，缺乏从光学计算、热平衡到离散优化的完整建模框架。

因此，本文以 PDMS 基辐射冷却材料为研究对象，融合传输矩阵法（TMM）、牛顿迭代法、混合整数遗传算法（MIGA），从发射率计算、制冷性能量化到多层膜结构优化开展系统研究。相关结论可为建筑节能、电子散热、农业冷链等领域的辐射制冷技术研发提供参考。

一、数据预处理

（一）数据收集

材料光学常数（折射率 n 与消光系数 k ）取自 refractiveindex.info 数据库，涵盖 PDMS、SiO₂、TiO₂、Al₂O₃、HfO₂、Ag 等材料，波长范围 0.3–25 μm。太阳光谱采用 ASTM G173–03 标准（美国国家可再生能源实验室），大气透射率基于美国 1976 标准大气计算生成。

（二）三次样条插值

原始光学常数的波长点分布较稀疏，直接用于传输矩阵法会产生较大误差。为此，采用三次样条插值对 $n(\lambda)$ 和 $k(\lambda)$ 进行加密，统一为 0.3–25 μm、步长 0.01 μm 的密集波长序列。

二、模型建立与求解

（一）传输矩阵法（TMM）

传输矩阵法是分析多层膜光学特性的经典方法，在薄膜光学领域已有广泛应用^[5, 6]。要分析 PDMS 薄膜的辐射冷却性能，首先需要获得其光谱发射率。对于空气–PDMS–空气三层平面结构，电磁波垂直入射时，可用传输矩阵法描述光在膜层中的传播。PDMS 薄膜的特征矩阵为：

$$M = \begin{bmatrix} \cos\delta & -\frac{i}{\tilde{n}_j} \sin\delta \\ -i\tilde{n}_j \sin\delta & \cos\delta \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中 $\delta = \frac{2\pi\tilde{n}_j d}{\lambda}$ 为相位厚度， $\tilde{n}_j = n_j + ik_j$ 表示 PDMS 薄膜的

复折射率。

通过矩阵可求解反射系数 r 和透射系数 t ：

$$r = \frac{M_{11} + M_{12} - M_{21} - M_{22}}{M_{11} + M_{12} + M_{21} + M_{22}}, \quad t = \frac{2}{M_{11} + M_{12} + M_{21} + M_{22}} \quad (2)$$

反射率 $R = |r|^2$ ，透射率 $T = |t|^2$ 。根据能量守恒和基尔霍夫定律，在热平衡条件下，光谱发射率 $\epsilon = 1 - R - T$ 。

上述 TMM 计算过程采用 Python 编程实现，并在统一波长网格下完成光谱发射率计算。

（二）纯 PDMS 薄膜的发射特性

首先研究纯 PDMS 薄膜（空气–PDMS–空气三层结构）的发射特性。

利用上述 TMM 模型，计算厚度为 10、25、50、100、200、300 μm 的薄膜，其光谱发射率。具体结果如图 1 所示。

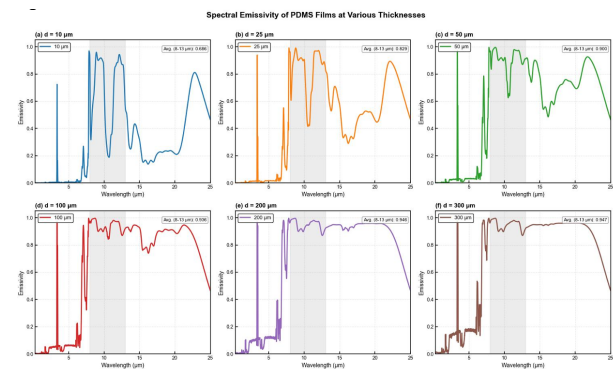


图 1：PDMS 薄膜不同厚度的光谱发射率图

如图所示，在 8–13 μm 大气窗口内，PDMS 发射率均较高，且随厚度增加趋近于 1。较薄薄膜（10、25 μm）存在明显波动，这是光学干涉与分子吸收耦合的结果；较厚薄膜（≥100 μm）发

射率趋于稳定,说明干涉效应减弱、分子吸收更加充分。

接下来进一步计算8-13 μm 薄膜厚度与平均发射率的关系曲线,如图2所示。

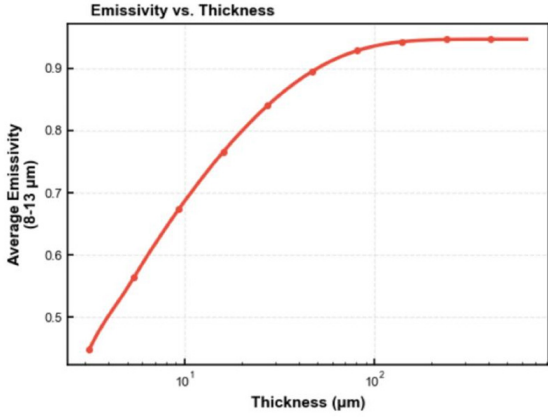


图2: PDMS 薄膜厚度与平均发射率的关系曲线图

当厚度达到100 μm 时,平均发射率趋于饱和,约为0.936。这说明100 μm 是兼顾性能与材料用量的一个关键厚度。

(三) 净制冷功率与平衡温度

发射率高只是实现辐射冷却的必要条件,最终冷却效果还需要考虑实际环境中的各种能量交换。为此,本文建立了净制冷功率模型。黑体光谱辐射出射度由普朗克公式给出:

$$E_b(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5 \left(e^{\frac{hc}{\lambda k_B T}} - 1 \right)} \quad (3)$$

对于水平放置的薄膜,净制冷功率定义为自身热辐射减去吸收的大气辐射、地面辐射、太阳辐射以及非辐射热损失:

$$P_{\text{net}}(T_{\text{surf}}) = P_{\text{rad,emit}} - P_{\text{atm,abs}} - P_{\text{ground,abs}} - P_{\text{sun,abs}} - P_{\text{non-rad}} \quad (4)$$

各项具体含义如下:

$$P_{\text{rad,emit}} = 2 \int_{\lambda=0.3\mu\text{m}}^{25\mu\text{m}} E_b(\lambda, T_{\text{surf}}) \cdot \epsilon(\lambda) d\lambda \quad (5)$$

表示薄膜因自身温度向外辐射的能量;

$$P_{\text{atm,abs}} = \int_{\lambda=0.3\mu\text{m}}^{25\mu\text{m}} E_b(\lambda, T_{\text{amb}}) \cdot (1 - t_{\text{atm}}(\lambda)) \cdot \epsilon(\lambda) d\lambda \quad (6)$$

表示薄膜吸收的大气辐射;

$$P_{\text{ground,abs}} = \int_{\lambda=0.3\mu\text{m}}^{25\mu\text{m}} E_b(\lambda, T_{\text{amb}}) \cdot \epsilon(\lambda) \cdot F_{\text{ground}} d\lambda \quad (7)$$

表示薄膜吸收来自地面的热辐射功率。

其中,取 $F_{\text{ground}} = 0.5$,表示一半的半球空间来自地面;

$$P_{\text{sun,abs}} = \int_{\lambda=0.3\mu\text{m}}^{2.5\mu\text{m}} I_{\text{solar}}(\lambda) \cdot (1 - R(\lambda)) d\lambda = \int_{\lambda=0.3\mu\text{m}}^{2.5\mu\text{m}} I_{\text{solar}}(\lambda) \cdot (\epsilon(\lambda) + T(\lambda)) d\lambda \quad (8)$$

表示薄膜-基底系统吸收的有效太阳辐射(透射部分可能被下层基底吸收,故采用 $1-R$ 更准确);

$$P_{\text{non-rad}} = h_c \cdot (T_{\text{amb}} - T_{\text{surf}}) \quad (9)$$

表示薄膜和周围空气之间通过对流、传导产生的热交换功率。

其中 $h_c = 10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, $T_{\text{amb}} = 300 \text{ K}$ (27 $^{\circ}\text{C}$), 平衡温度 T_{eq} 满足 $P_{\text{net}}(T_{\text{surf}}) = 0$

本文采用牛顿迭代法对非线性方程进行数值求解。

通过上述计算,得到了PDMS薄膜的净制冷功率与平衡温度,如图3和图4所示。

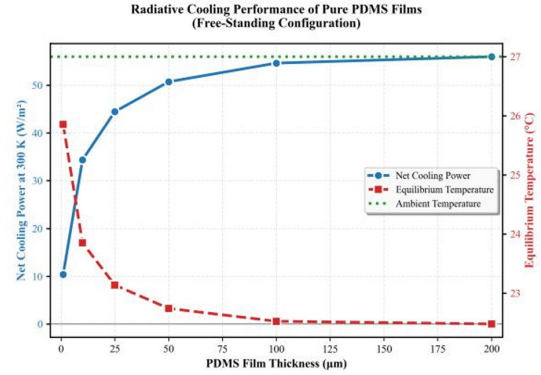


图3: 纯PDMS冷膜(独立结构)的辐射制冷性能

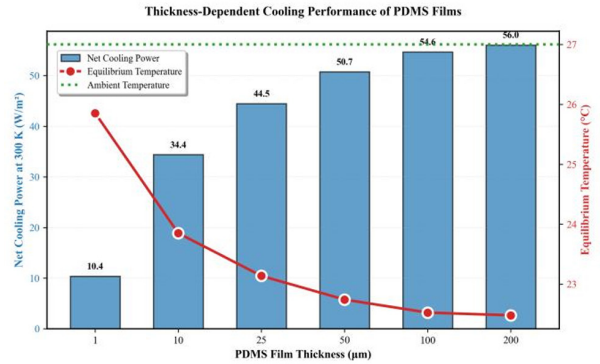


图4: PDMS冷膜厚度与制冷性能的关系图

由上图可知,净制冷功率随膜厚增加快速上升,当厚度 $\geq 100 \mu\text{m}$ 后趋于稳定;平衡温度随膜厚增加快速下降,厚度超过100 μm 后稳定在约22 $^{\circ}\text{C}$,这表明边缘效应在100 μm 后显著减小,推荐100 μm 为实际应用的最优厚度。

(四) 多层膜结构的MIGA-TMM优化

纯PDMS薄膜在大气窗口有高发射率,但在太阳波段的吸收仍不可忽略。为进一步提升冷却性能,将PDMS与高低折射率交替的介电材料组合成多层膜结构。此时面临两个难点:材料种类为离散选项(SiO_2 、 TiO_2 、 Al_2O_3 、 HfO_2),每层厚度为连续变量(中间层0.01-0.8 μm ,PDMS层10-100 μm),底层固定为Ag。这属于混合整数非线性规划问题,传统梯度方法难以处理。

为此,构建混合整数遗传算法与TMM相结合的MIGA-TMM模型^[7]。采用锦标赛选择、单点交叉(材料)与模

拟二进制交叉（厚度）、均匀变异（材料）与多项式变异（厚度），并保留精英个体。适应度函数为净制冷功率 P_{net} （由 TMM 计算），值越大表示结构越优。基于该模型，得到以下优化结果：

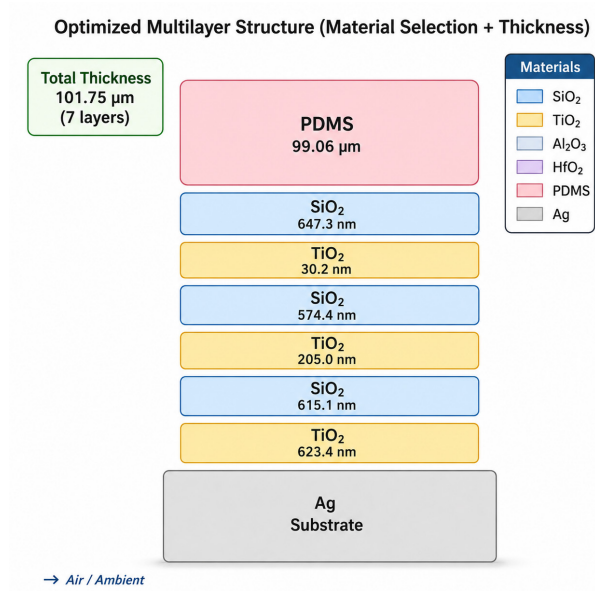


图5：最优多层膜结构示意图

图5展示了最优结构：七层结构，顶层 PDMS 厚度 $99.06\mu\text{m}$ ，中间层为 SiO_2 与 TiO_2 交替（共6层）^[8、9]，底层 Ag（高反射、低透射）^[10]。总厚度 $101.75\mu\text{m}$ ，净制冷功率 57.09 W/m^2 。

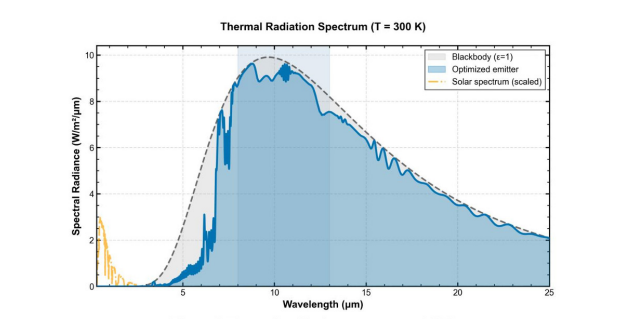


图6：最优结构的热辐射光谱图（300 K）

图6展示了该结构的热辐射光谱：在 $8-13\mu\text{m}$ 波段高效发射，在太阳波段几乎不发射，实现了选择性辐射。

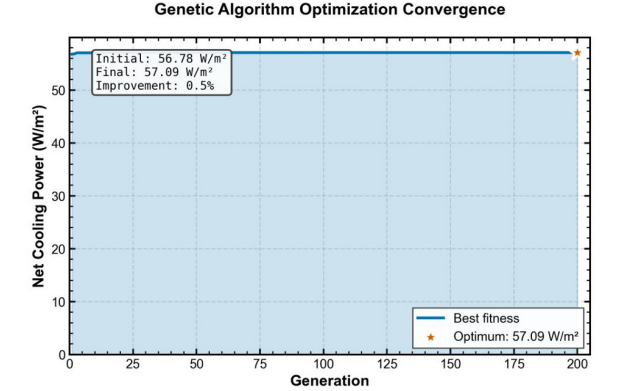


图7：遗传算法优化的收敛曲线图

图7收敛曲线显示，初始种群中已存在性能较优的结构（初始净制冷功率 56.78 W/m^2 ），后续优化提升有限（最终 57.09 W/m^2 ）。

MIGA-TMM 模型的主要价值不在于性能的大幅提升，而在于实现了离散材料选择与连续厚度参数优化的一体化自动筛选。

三、敏感性分析

实际环境中，对流换热系数 h_c 和环境温度 T_{amb} 会随风速、天气等因素波动。为评估模型稳定性，对这两个参数进行敏感性分析，结果见表1和表2。

表1： h_c 敏感性分析结果表

h_c	P_{net}	T_{eq}	P_{net} 相对变化率	T_{eq} 相对变化率
5 (−50%)	62.3	20.1	+8.9	−8.6
8 (−20%)	59.7	21.2	+4.2	−3.6
10 (基准)	57.0	22.0	0	0
12 (+20%)	54.5	22.8	−4.4	+3.6
15 (+50%)	51.2	23.9	−10.2	+8.6

表2： T_{amb} 敏感性分析结果表

$T_{\text{amb}}(\text{K})$	P_{net}	T_{eq}	P_{net} 相对变化率	T_{eq} 相对变化率
295 (−5K)	60.1	17.3	+5.4	−21.4
298 (−2K)	58.2	19.8	+2.1	−9.1
300 (基准)	57.0	22.0	0	0
302 (+2K)	55.9	24.1	−1.9	+9.5
305 (+5K)	54.2	26.8	−4.9	+21.8

结果表明， h_c 变化 $\pm 20\%$ 时， P_{net} 变化约 $\pm 4\%\sim\pm 4.5\%$ ， T_{eq} 变化约 $\pm 3.6\%$ ；变化 $\pm 50\%$ 时，变化率扩大至 $\pm 8.9\%\sim\pm 10.2\%$ ，模型对 h_c 具有中低敏感性。 T_{amb} 变化 $\pm 5\text{ K}$ 时， T_{eq} 最大变化约 $\pm 21.8\%$ ，但 P_{net} 变化不超过 $\pm 5\%$ ，表明平衡温度对不同气候区敏感，但核心净制冷能力相对稳定，模型整体鲁棒性良好。

四、结束语

本文系统建立了 PDMS 基辐射冷却材料的系列数学模型，主要结论如下：

- 1.PDMS 薄膜在 $8-13\mu\text{m}$ 大气窗口具有高发射率，厚度 $100\mu\text{m}$ 后趋于饱和，平均发射率 0.936 。
2. 净制冷功率和平衡温度随厚度增加而改善，超过 $100\mu\text{m}$ 后边际效应显著，推荐 $100\mu\text{m}$ 为实际应用的最优厚度。
3. 通过 MIGA-TMM 模型优化得到 PDMS/ SiO_2 / TiO_2 /Ag 七层结构，净制冷功率 57.09 W/m^2 ，实现了“太阳波段低吸收、大气窗口高发射”的选择性辐射。

本文所建立的 TMM- 遗传算法集成框架不仅适用于 PDMS 基辐射冷却材料，还可推广到其他多层膜光学器件设计（外探测

器、激光反射镜、太阳能电池抗反射涂层等），在应用层面，辐射冷却材料可应用于建筑节能、电子散热、农业冷链等领域。

敏感性分析表明模型稳定性良好，未来工作将进一步扩展材料库、引入环境老化因素，以增强模型的实用适用性。

尽管存在理想化假设（如垂直入射、恒定对流系数等），但

参考文献

[1] 万中伊欣, 刘东青, 余金山. 日间辐射制冷材料研究进展 [J]. 材料导报, 2022, 36(3): 27–33.

[2]Liu R, Wang S, Zhou Z, et al. Materials in radiative cooling technologies[J]. Advanced Materials, 2025, 37(12): 2401577.

[3]Raman A, Anoma M A, Zhu L, et al. Passive radiative cooling below ambient air temperature under direct sunlight[J]. Nature, 2014, 515(7528): 540–544.

[4]Zhao X, Zhai Y, Ma Y, David S N, et al. Scalable-manufactured randomized glass-polymer hybrid metamaterial for daytime radiative cooling[J]. Science, 2017, 355(6329): 1062–1066.

[5] 蔡清元, 蒋林, 等. 光学薄膜与系统的偏振控制 [J]. 光学技术, 2018, 44(3): 23–29.

[6]Zhao X, Zhang Y, Zhang Q, et al. Transmission comb of a distributed Bragg reflector with two surface dielectric gratings[J]. Scientific Reports, 2016, 6: 21125.

[7]Pourmasoud S, Moretti L. Designing of broadband solar omnidirectional reflector with a chirped multilayer using an optimization procedure based on a genetic algorithm[J]. Optical Materials, 2024, 157: 116415.

[8] 刘润政, 韩宗晟, 黄晓卫, 等. PLA/SiO₂/TiO₂ 双层复合膜辐射制冷性能研究 [J]. 纺织高校基础科学学报, 2025, 38(5): 9–16.

[9]Realization of an efficient radiative cooling emitter with double layer inorganic SiO₂ and TiO₂ metamaterial[J]. Results in Physics, 2023, 45: 106121.

[10]Perrakis G, Tasolamprou A C, Kakavelakis G, et al. Infrared-reflective ultrathin-metal-film-based transparent electrode with ultralow optical loss for high efficiency in solar cells[J]. Scientific Reports, 2024, 14(1): 548.

低碳施工标准调整装饰装修概预算计价规则 与成本造价分析

高玲仙

文山建投建筑工程有限公司, 云南 文山 663000

DOI:10.61369/ERA.2026080029

摘 要 : 随着建筑行业低碳转型政策落地, 装饰装修工程低碳施工标准持续更新, 直接改变了传统概预算计价逻辑与造价管控模式。本文立足装饰装修工程施工实际, 剖析低碳施工标准调整的核心方向, 梳理新型低碳计价规则的修订要点, 对比传统计价与低碳计价的核心差异, 深度探究标准调整对人工、材料、机械及管理成本的影响。结合现场造价管控痛点, 提出适配低碳施工标准的概预算编制、成本管控优化策略, 为装饰装修工程精准计价、合理控本提供实操参考。

关 键 词 : 低碳施工; 装饰装修; 计价规则; 成本造价

Adjustments to Low-Carbon Construction Standards Have Influenced the Pricing Rules for Decoration and Renovation Estimates, As Well As Cost Analysis Methodologies

Gao Lingxian

Wenshan Construction Investment Construction Engineering Co., Ltd.Wenshan , Yunnan 663000

Abstract : With the implementation of low-carbon transformation policies in the construction industry, low-carbon construction standards for decoration and renovation projects have been continuously updated, fundamentally altering traditional budgeting logic and cost control models. Based on practical experiences in decoration and renovation construction, this paper analyzes the key directions of low-carbon standard adjustments, outlines the revision priorities of new low-carbon pricing rules, compares core differences between traditional and low-carbon pricing approaches, and examines the impacts of these adjustments on labor, material, machinery, and management costs. Addressing common challenges in on-site cost control, it proposes strategies for budget preparation and cost management optimization aligned with low-carbon standards, providing actionable guidance for precise pricing and effective cost control in decoration and renovation projects.

Keywords : low-carbon construction; decoration and renovation; pricing rules; cost estimation

引言

随着碳达峰、碳中和的提出, 对建筑行业节能减排和绿色施工管控愈发严格, 作为建筑工程最后一个环节的装饰装修工程, 因施工作业零碎繁杂、材料种类多且分散作业等特点是建筑低碳管控的关键点。而原有的装饰装修工程概预算计价规则是基于传统施工模式下制定, 很难适应新的低碳化工艺、材料和管理要求, 出现概预算计价规则条目缺少、成本核算偏差、定额缺项等现象。依据最新低碳化的标准来完善装饰装修工程概预算计价规则并准确分析其造价变化规律为当下装饰装修工程造价控制的关键, 对于装饰装修行业向绿色化、规范化发展具有重要的现实意义。

一、低碳施工标准变更的主要内容和适用行业分析

本次装饰装修工程低碳施工标准升级, 将扬尘和垃圾分类等浅层控制转变为全过程、全要素的低碳控制。材料上增加主要装饰材料及辅助装饰材料的低碳准入, 强制使用低挥发性有机化合

物涂料、再生骨料石材和可多次利用的软装饰材料等绿色建筑材料, 禁止高污染装饰材料及高能耗的传统型建筑装饰材料的使用^[1]。工艺上取消传统的湿作业现场装饰、大范围打磨、现场喷涂等高污染高能耗装饰工艺, 推行装配式装饰、模块化拼接、工厂化生产现场组装等低碳装饰工艺。管理上细化施工能耗、废弃物

作者简介: 高玲仙 (1987.09-), 女, 汉族, 云南省宣威市人, 硕士研究生, 中级工程师, 研究方向: 工程造价, 工程管理。

减排及噪声与光污染管控标准，将低碳施工管理作为工程施工常规考核指标。

二、低碳标准下装饰装修概预算计价规则主要变化

（一）计价定额体系的完善

在建筑工程的装饰装修环节中，施工单位应坚持落实适应性的原则，这样才能更好地在建筑工程中应用和充分发挥绿色施工技术的作用。例如：在建筑工程的施工过程中，现场施工中需要使用的建筑材料以及各种机械设备比较多，在进行建筑材料的选取时，相关人员应根据建筑工程的实际情况和建设需求进而选择合适类型的材料。禁止因降低建筑工程的施工成本而选择价格低廉的建筑材料，影响施工质量安全，同时，也不能忽视建筑材料在使用过程中，对生态环境的影响以及资源的消耗，提高资源的有效利用率，保护我国的生态环境。传统装饰装修概预算定额按传统施工工艺和普通材料进行编排，不包括采用低碳施工新工艺、新材料及新的管理方面的项目，在编制上存在一定的空白。在低碳标准实施下计价定额得到相应的补充完善。一是增加了采用装配式装饰工程、绿色建筑节能装饰安装、建筑垃圾无害化处理以及施工现场的节能减排等新增加定额子目，填补了低碳施工过程的定额空缺^[2]。二是调整了一些高耗能传统施工工艺的定额，并取消传统的落后工艺定额，降低了传统高污染材料在传统施工中的计价水平，避免传统施工中高能耗工艺套用。同时通过修正系数的方式调整了定额的损耗率，对低碳可循环材料与精准化少量化施工，降低其材料损耗定额，满足低碳量化要求。

（二）新增及修订计价取费项目

原有装饰装修工程计价取费包含管理费、安全文明施工费、规费及税金等一般性收费项目，低碳专项费用未单独列项，而是混合于零星费用中进行核算造成造价模糊化、成本流失。标准调整后计价取费内容增加了多项低碳费用内容^[3]。一是增设了绿色建材溢价费用，在低碳绿色环保装饰材料采购使用价格超过传统装饰材料的差价部分设置专项计价取费；二是增加了低碳技术措施费用，即针对装配式构件安装、精细化扬尘控制以及施工能耗管控等相关措施所涉及的成本投入；三是设置了废弃物资源处理费取代原简单的垃圾清理费，涵盖装饰废料分类处理和回收利用费用等内容^[4]。此外，将原安全文明施工费项目内容进行了压缩处理，将其原有的分散型绿色管控施工费用归入低碳专项计价取费内容之中，从而使得造价计价条目更加明晰，且其核算更为精确。

三、低碳施工标准变动下装饰装修工程造价详细分析

（一）材料费造价变化分析

材料成本作为装饰装修工程造价的重要组成部分，占比最大，直接受低碳标准变更影响最为显著^[5]。在采购成本方面，符合低碳标准的绿色装饰材料相比普通材料的生产制造更环保、质量要求更高、采购成本也相应高一些，低挥发性有机化合物墙面涂

料、环保实木装饰板等主要装饰材料采购成本小幅度上升，直接影响工程直接费中材料费的增加。从损耗费用角度分析，在低碳化施工标准要求下，严格按量取材、废料利用等精细化管理有效减少了诸如板材、涂料以及瓷砖等主要材料的浪费，抵消了一部分由于材料成本增加造成的工程费用。

（二）人工费的造价变动分析

低碳装饰装修施工模式的全面采用，也彻底改变了传统建筑装饰装修人工施工作业模式，改变了传统的普工人工费成本形成模式。传统建筑装饰装修工程需要大量工作现场切割、打磨、喷涂等粗放型湿作业。普遍人工单价低，人工用工人多。而低碳建筑装饰装修实施装配式及模块化施工技术应用，使得施工现场几乎无须进行大量的粗放式现场湿作业，也就减少了简单的体力劳动者的人工用工，而且由于要进行新型绿色建材的安装、使用低碳节能型机械设备以及废弃物废料分类处置处理等工作，因此还需要增加相关的专业技术岗位人员，这对从事现场施工作业的技术人员的素质与技术水平提出了更高要求，而从事这些工作的专业技工的人工费用相对于普通的普工而言要高出很多，所以就单项工程单位造价来看，其人工费用相对传统施工有所提升^[6]。

（三）机械与能耗成本造价变动分析

传统装饰装修施工机械能源消耗高，机械设备使用率低。在除尘和降噪等扬尘、噪声防治设备上投入很少，存在隐形能耗。低碳施工标准推行后，在施工现场机械设备配置全面升级优化。彻底淘汰打磨机、喷涂机、切割器等耗能高，环境污染严重的小型机械，取而代之的是节能高效、低噪声环保的专业化工器具。虽然在机械的采购或租赁费用上有少量增加，但短期机械投资成本有所上升。同时，按照低碳要求，强制性配备了粉尘监测装置、喷淋除尘系统、废料收集及处理等环保设施增加了额外的使用和维护成本。但是从节能的角度分析看，新型节能环保的设备耗电、耗油量大大减少，同时采取定时开机停机和集中作业时间低碳化管理方法有效地降低了综合耗能量。另外，采用标准化设备进行作业减少了材料损耗及工程缺陷现象避免了反复设备运行所带来的二次耗能问题，长期来看其能耗成本明显呈下降趋势^[7]。

（四）管理与隐性成本变动分析

在传统工程装修造价管理的模式下，人们往往忽视了对低碳管理模式隐性成本的关注和控制，而最终导致实际发生的造价远远超出预算。标准实施之后，现场管理水平提升，管理模式下的各项管理成本变得更加公开透明。需要配置专门从事低碳施工管理的管理人员，具体负责现场能耗管理、材料验收、废料处置以及巡检环保等工作，同时增加了相关的管理人力成本费用。

四、低碳标准下装饰装修概预算与成本控制优化方法

（一）准确定额，规范编制

积极跟进政策动态，对最新的低碳施工定额计价及取费标准完全消化吸收，并熟练掌握应用。摒弃落后的传统定额套用的思维和习惯模式。正确辨识新型装饰装修工程中的装配式建筑施工工艺、绿色建筑材料的应用等以及现场低碳控制技术措施的实

施、节能建筑改造工程施工等内容的专项施工作业属性特征，套用正确的定额子目项目，在编制预算时要结合所承建工程项目的装饰装修工程施工组织方案设计、工程图纸设计以及低碳装饰施工方案等将各个施工工序低碳化分解细化，将绿色涂装工艺、环保铺装、节能吊顶、废旧材料无害化处理等分项内容进行单独的列出。针对采购应用绿色环保材料费用和现场低碳的技术措施实施费用、施工现场废料分类回收处理费用以及使用节能环保设备费用等项目费用也应单列出来^[9]。对于每个具体的分部分项工程统一低碳的计价标准和计价方式。基于施工现场实际情况，按照现场施工条件、工程期限、工程标准等对各类绿色材料的损耗率、人工数量等机械能源消耗情况合理地计算出来，杜绝在进行预算的时候空想臆测的现象发生。这样能够使我们在预算方面更加准确，同时又确保其合理性与规范性，使得我们能准确地依据该预算做出相应的成本管控。

（二）优化材料与施工，权衡成本和低碳

项目施工单位与造价人员建立事前联动机制，在项目前期成本策划阶段密切沟通，结合项目预算成本基准线，进行多方对比分析，选用性价比高、节能环保性强且经济效益好的低碳装饰材料。在确保符合国家、地方的环境检测标准 and 设计质量要求的前提下，选择本地供应、规模化生产且运输距离短的绿色建材，降低因远距离运输带来的附加成本和损耗成本及碳排放成本，有效地降低了材料采购的成本。同时，组织技术人员优化整体施工方案，积极采用装配式建筑技术中的低碳施工工艺，取代传统的粗放式施工工艺，尽可能减少湿作业量和零星散落施工作业量，节省人工成本和能耗以及建筑垃圾处理成本^[9]。对于工程中可以重复使用的构件、耗材、周转材料等制定专项材料周转使用、回收措施，并准确计算材料的次数及残值抵扣金额，真实地反映在编制预算之中，不断地降低材料的整体造价，达到装饰装修工程低碳施工质量和控制工程成本的双赢局面。

（三）细化全过程造价控制，防止隐形损耗

摒弃传统装饰装修工程“重预算、轻过程、弱结算”的粗放型造价管控理念，全过程贯彻全周期低碳造价管控模式。施工前期重点实施成本的预先审查制度，核查绿色建材进场报价值、低碳工艺定额价以及专项措施费用等并实施精确的预算交底与成本控制标准确定。施工过程中实施动态造价核查制度，对照审查低碳各工序中材料实耗、用工情况、机械设备使用时间和能耗量等，及时发现造价漏洞和超支风险，迅速纠正调整相关造价方

案，避免无预算和超预算投入的情况发生。在施工后期，尤其重视竣工阶段的结算工作，对各类废旧回收料利用、机械利用率以及节能技术使用节约能耗等各种低碳收益进行准确核算，严格根据新型计价方式做好竣工结算的计价审核。最后建立相关的低碳造价专项台账记录好各个项目的低碳投入、资源耗费、管控效益及收益等情况，从而形成成本管控的标准化数据库以备为下一个同类低碳装饰装修项目中的造价编制、成本把控以及方案优化等工作提供详细的参考数据^[10]。

（四）加强造价人员专业能力适应低碳计价体系

建筑领域低碳化发展逐步深入，新的低碳施工标准、环保施工规范不断修订，装饰装修工程计价标准越发细致化、专业化和系统化，对造价人员素质及操作能力提出新要求、新考验。企业应从行业发展以及项目管控的需要出发，常态化组织造价师学习相关培训，主要针对最新的低碳建筑标准、全新的计价方法以及绿色建筑材料造价计算、低碳措施费用计取等关键知识点进行系统地学习，使造价人员能够熟练掌握各类低碳化施工工艺特点、构成要素要点和计价难点，同时，鼓励造价师积极主动地走出办公室、深入施工现场，跟踪全过程的低碳装修工程建设，全面了解并掌握现场材料损耗、人工能耗、设备运行及工艺应用等情况，彻底改变以往只靠理论或者模板化计价方式，提高在低碳造价计算中的操作性、准确性和专业度，切实满足新时期背景下低碳式精细装饰装修工程建设中的精细化控制要求。

五、结语

低碳施工标准体系的调整重构了装饰装修工程的传统概预算计价模式与工程造价构成，完成了从“粗放计价”向“绿色、精准”的转型。基于标准体系改变而引发的相关材料成本变化、人工变化、能耗变化以及管理费等相关成本增加并不是单纯地成本提升，而是整个行业的成本结构升级。在“双碳”发展的时代背景下，对低碳标准下的装饰装修工程造价控制应当主动适应新的要求，在满足实际的装饰装修工程低碳标准前提下准确把握其计价规则的变化内容，并且在此基础上更好地优化工程的预算编制工作以及优化具体的过程控制、管理机制，实现低碳标准要求下的装饰装修工程的成本目标的平衡。未来随着低碳标准施工方式的普及，对于相关的装饰装修的计价规范也会更加精确化、规范化地完善，并促进装饰行业的发展实现绿色经济并存的良性发展。

参考文献

- [1] 胡晓霜. 绿色建造理念下的建筑装饰装修施工方法 [J]. 水泥, 2025, (10): 77-79.
- [2] 黎燭, 吴亚, 卢鹭, 陈树秀, 伍锡程. 超高强混凝土预制管桩液锤击绿色低碳施工技术 [J]. 中国建筑装饰装修, 2025, (12): 102-104.
- [3] 邵晖. 建筑装饰装修施工质量管理中存在的问题 [J]. 居舍, 2022, (34): 75-77.
- [4] 冯晓燕, 黄斌, 屈登科. 浅析“双碳”战略下装饰行业绿色施工应用及高质量发展对策 [J]. 住宅与房地产, 2022, (29): 26-29.
- [5] 王雁. 装饰装修工程中的绿色施工技术研究 [J]. 建材发展导向, 2022, 20(04): 172-174.
- [6] 谢承钊. 基于低碳理念的建筑装饰装修管理分析 [J]. 决策探索 (中), 2019, (11): 34-35.
- [7] 张晓峰. 低碳经济背景下绿色施工技术在装修工程中的应用 [J]. 现代物业 (中旬刊), 2019, (09): 205.
- [8] 孙红权. 基于融合权重的低碳装修施工管理 TOPSIS 评价模型 [J]. 科技通报, 2019, 35(06): 160-164.
- [9] 李晖. 建筑装饰工程项目的低碳管理 [J]. 居舍, 2019, (13): 31.
- [10] 赵淑景. 浅析低碳理念下的建筑装饰装修管理 [J]. 江西建材, 2019, (04): 203-204.

柔性防护结构破坏机理与设计对策

吴嘉煊¹, 方思婷¹, 吴雨阳¹, 邓芊芊², 柳春^{2*}

1. 广东潮汕环线高速公路有限公司, 广东 广州 510623

2. 广东和立交通养护科技有限公司, 广东 广州 511400

DOI:10.61369/ERA.2026080030

摘 要 : 在山区地质灾害防护工程里, 柔性防护体系易出现各类失效问题, 但现阶段针对其破坏规律与优化设计方案的研究仍较为有限。本文依托西南地区 11 处实地工程点位开展现场调研, 重点分析坡面灾害冲击作用下防护结构的失效形式与内在机理。分析结果表明, 该类防护结构常见的失效形式包含 4 大类型, 且钢柱出现屈曲变形的概率远高于其他的失效类型, 边界处的滑移锁死更是导致该现象的主要因素, 基于此制定了相应的结构优化措施。

关 键 词 : 柔性防护结构; 破坏机理; 设计对策; 钢柱屈曲; 滑移锁死

Failure Mechanism and Design Countermeasures of Flexible Protective Structures

Wu Jiahuan¹, Fang Siting¹, Wu Yuyang¹, Deng Qianqian², Liu Chun^{2*}

1. Guangdong Chaoshan Ring Expressway Co., LTD, Guangzhou, Guangdong 510623

2. Guangdong Heli Transportation Maintenance Technology Co., Ltd, Guangzhou, Guangdong 511400

Abstract : In geological disaster protection projects in mountainous areas, flexible protection systems are prone to various failure modes; however, research on their failure mechanisms and optimized design schemes remains limited at this stage. This paper conducts field investigations at 11 project sites in Southwest China, focusing on the failure modes and underlying mechanisms of protection structures under the impact of slope disasters. The analysis reveals that common failure modes of such structures fall into four major categories, with buckling deformation of steel columns occurring far more frequently than other failure types. Slip locking at the boundaries is identified as the primary factor contributing to this phenomenon, and corresponding structural optimization measures have been formulated based on these findings.

Keywords : flexible protective structures; failure mechanism; design countermeasures; buckling of steel columns; sliding lock

引言

自上世纪 60 年代起, 欧洲开始对传统的柔性防护结构开展技术升级, 新增钢柱与耗能装置后, 逐步形成现代被动防护结构的基本样式。按照 ETAG027 相关标准, 这套系统已更新至第三代产品, 其试验防护能力达到 8000kJ。该结构因装配便捷、拦截效率高、易维护等优势被广泛应用^[1-2]。但工程中大量破坏现象的出现, 为其应用安全性埋下隐患。柔性防护结构力学构件多, 机理复杂, 破坏类型与破坏机理也十分复杂^[3]。设计时需根据破坏调查梳理破坏类型, 分析机理, 设计对策, 才能实现结构优化。目前学者针对滚石、碎屑流、泥石流等坡面地质灾害冲击柔性防护网展开了相关研究^[4-7], 揭示了灾害的运动规律与冲击特征, 但目前对其破坏机制及相关设计建议的研究鲜见报道。为此, 本文基于 11 个工点的实地调查, 系统分析其破坏模式与机理, 并提出设计对策。

一、破坏模式

流、泥石流等主要坡面地质灾害类型。

(二) 破坏统计

(一) 工点调查

在本次调研选取四川、重庆市山区 11 个柔性防护结构工点, 涵盖桃关 1 号隧道、毕棚沟、九寨沟等点位, 涉及崩塌滚石、碎屑

11 个工点中, 仅烧火坪隧道、重庆酉阳 2 个工点的防护结构完好, 其余 9 个均发生不同类型破坏, 拦截成功率仅约 18%。破坏模式分为 4 类: 网片破损、钢柱屈曲、支撑绳断裂、锚固端失

作者简介: 吴嘉煊 (1989.10.12-), 男, 广东省揭阳市揭东区人, 本科, 中级工程师, 研究方向: 路桥方向。

通讯作者: 柳春 (1991.9.17-), 男, 湖南邵阳人, 博士, 高级工程师, 研究方向: 结构工程。

效^[1]。其中钢柱屈曲为最主要的损坏类型，凸显了钢柱作为防护结构中唯一承压构件的关键地位。

二、破坏机理

（一）网片破坏

网片为直接受冲击构件，不同类型防护网的破坏机理不同。被动防护网中缝合绳缠绕不当易导致网片脱落或无法滑移，造成面外顶破。由于主动防护网通常是紧贴着坡面设置的，从而导致落石无法被顺利引导滚出网面，从而导致网片发生面内撕裂破坏（图1）。

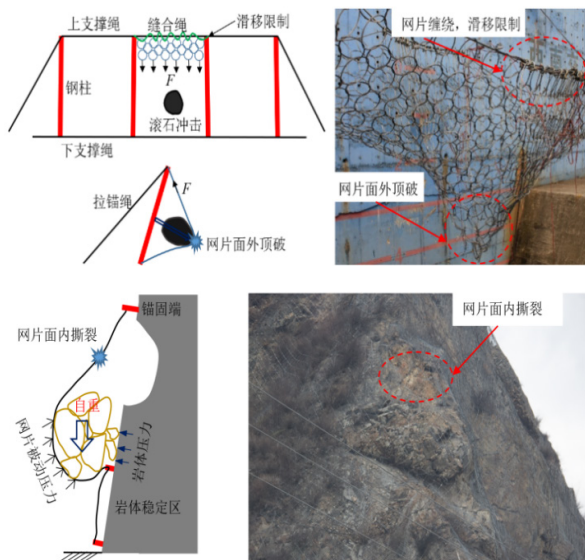


图1 网片破坏机理

（二）钢柱屈曲

钢柱有两类破坏：一是碎屑流冲击时钢柱局部被砸，导致翼缘屈曲；二是整体屈曲破坏，为最典型的钢柱破坏模式。钢柱与支撑绳、网片形成拉压平衡体系，未受冲击时呈轴心受压状态。受冲击后支撑绳“锁死”，拉力直接传给钢柱引发偏摆；钢柱面外转动受柱脚约束从轴压转为偏压状态，加之抗弯刚度不够，因此导致压溃（图2）^[1]。

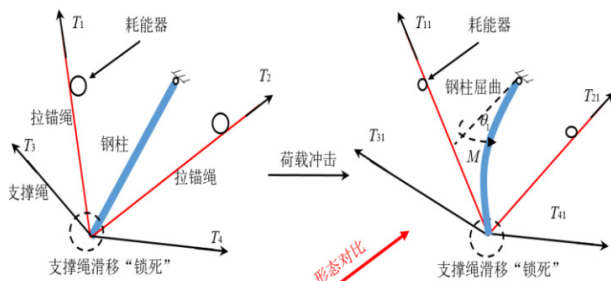


图2 钢柱整体屈服机理

（三）支撑绳断裂

支撑绳用于系挂柔性网片并传递冲击力，耗能器连接于支撑

绳上实现耗能。导致支撑绳失效断裂的核心原因为钢柱端部滑移锁死及构件嵌卡。支撑绳滑脱、部件几何干涉、构造设计不合理等情况，都会阻碍其正常滑动。在灾害体高速冲击下，耗能缓冲系统无法运转，伴随明显的制动效应与脉冲作用，支撑绳会迅速断裂，最终导致防护系统整体损毁（图3）^[1]。

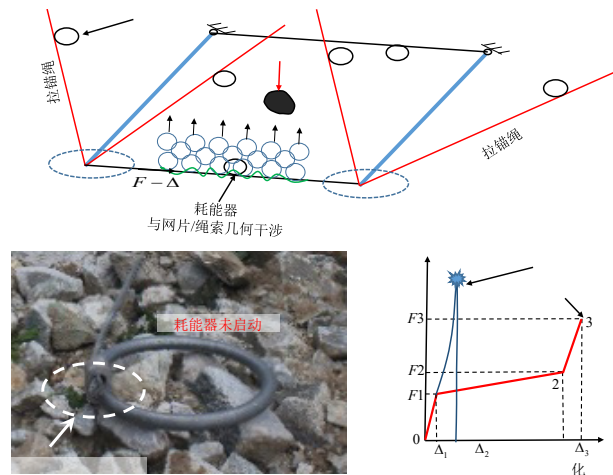


图3 支撑绳断裂机理

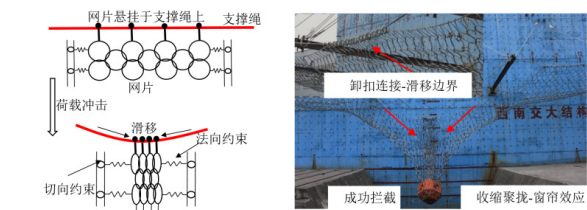
（四）锚固端破坏

钢丝绳与钢柱均通过端部锚杆锚固。根据现行的技术规范，被动柔性防护网锚杆锚固长度的最小值为2.5m，该指标与防护能级相互独立。然而该规定忽略了锚杆材质性能和锚固处地质条件的差异，容易导致柔性防护结构在遭受落石冲击时出现锚固力不足，锚杆脱出的现象，最终直接引发防护系统整体失稳^[8]。

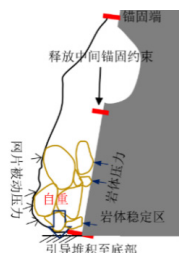
三、设计对策

（一）网片

针对在网片在进行结构设计的时候，除了要考虑本身的承载能力外，还需要合理的约束条件来实现网片的自由滑移。就被动柔性防护结构而言，网片需具备沿支撑绳滑移的能力，具体可借助卸扣将其悬挂在支撑绳上。当遭受荷载冲击时，网片能通过滑移产生大变形，进而降低冲击力。如图4所示，冲击作用下网片整体收缩，借助窗帘式的变形特征完成卸荷，构件不容易发生损坏，能够顺利阻拦滚石。主动防护网则优化了网片约束构造，让灾害物质集中堆积在坡体下部，依托山体承担荷载重量，该方案在现场应用中，可稳定抵御落石的侵害。



a) 面外顶破设计建议



b) 面内撕裂设计建议

图4 网片设计建议



(二) 钢柱

钢柱的翼缘在遭受撞击后会产生局部屈曲，是落石作用于防护网时较为常见的现象。该类损伤危害较小，只需在柱体外面包裹缓冲材料便可改善。若钢柱出现整体性屈曲破坏，则需从两大方向优化设计：一是强化抗弯性能，通过加宽翼缘、改用 H 型钢截面提升刚度，弥补标准工字型钢柱抗弯性能偏弱的短板；二是改良节点构造，借助柱头鞍座实现支撑绳自由滑移，搭配拉结装置控制柱头晃动范围。柱脚设置为半刚性连接，也能让钢柱具备适度的面外变形能力。（图5）。

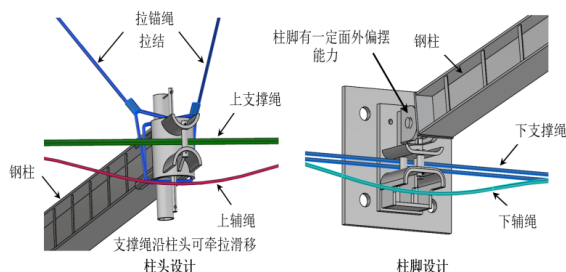


图5 钢柱连接构造设计对策

(三) 支撑绳

从受力特性来看，耗能器和支撑绳形成统一整体，力学分析中常简化为单向受拉的弹簧阻尼构件。结合图6可知，为了让上下支撑绳穿过钢柱鞍座后正常滑移，柱端可搭配过渡绳与辅助绳使用：网片依托辅绳或过渡绳悬挂，再由后者衔接主支撑绳。除此之外，将耗能器调整至支撑绳锚固位置，可有效规避和网片的结构干涉，保证其在绳体拉力作用下正常启动。端部支撑绳也必须满足自由滑移要求，并配套设置锚固端耗能装置。一旦该类绳体卡死不动，冲击作用下网片的拉力会转化为侧向力作用于边柱，极易引发柱体屈曲破坏。

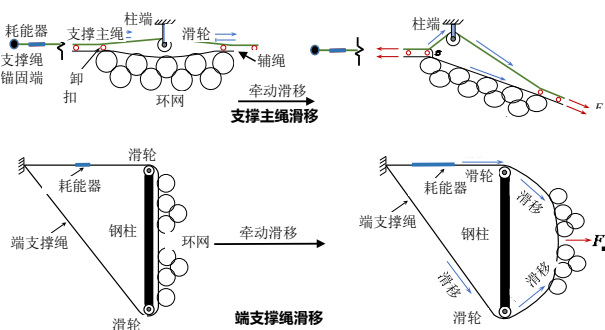


图6 支撑绳设计对策

(四) 锚固端

在被动防护体系施工设计中，钢柱基础优先选用独立基础，且必须完成现场地质勘探，摸清持力层实际状况。计算锚杆端部尺寸时，必须准确考虑锚固点处的地质条件以及锚杆的性能参数。鉴于易发生泥石流地区的恶劣地质条件，以及地基承载力的有限，设计必须充分考虑地基与锚杆之间的连接强度。

(五) 整体设计

对于整体倾覆一是采用多道防护措施，由于荷载体量特别大，采取刚性+柔性多道组合防护措施进行防护（图7）；二是推行整体协同设计理念，防护网的破坏机制具有复合性特征，各构件间存在连锁反应机制。例如支撑绳滑移失效可能引发支撑绳断裂、钢柱屈曲及网片破损三重破坏形态。因此柔性防护网设计需摒弃模块化思维，通过科学配置实现构件协同，重点强化网片、支撑绳-耗能器、钢柱三大核心组件的协同效能，确保系统整体防护性能最大化。



图7 多道防护措施

如图8所示，一个优质的结构系统在整个受力变形应呈现出三阶段特性：第一阶段（0-1）是拦截网片从松弛状态转变为绷紧状态的过程，此阶段变形主要源于网环间的滑移以及网环自身的形变；第二阶段（1-2）为支撑绳与耗能器构成的弹性弹簧的拉伸工作阶段，系统耗能主要依靠耗能器发挥作用；第三阶段（2-3）是系统再张紧阶段，该阶段耗能主要来自非冲击区域网片的滑移摩擦耗能以及冲击区域网片的变形耗能，此时钢柱承受的力达到最大值。被动柔性防护结构工作性能曲线的意义在于，它揭示了该体系的抗冲击原理，即通过科学合理地配置构件，充分激发各结构构件的协同工作能力。

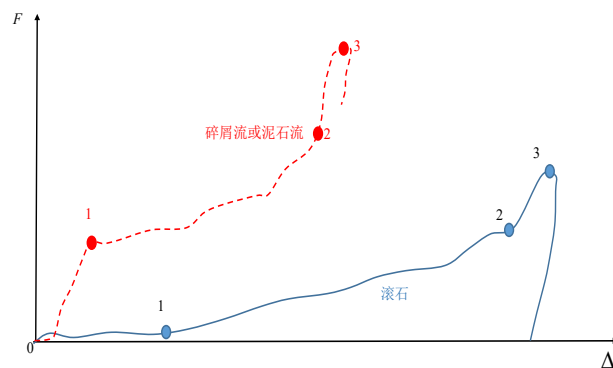


图8 被动柔性防护结构整体协同多阶段 F-Δ 曲线

四、结论

本文基于西南山区11个工点调查,得出以下失效破坏。这些破坏并非孤立存在,而是相互关联,其中边界滑移锁死是导致其失效的主因。

对以上4种破坏模式分别给出了相应的设计对策。柔性防护结构设计不宜采用拼凑式方法,除确保结构自身强度外,更需通过科学布局,强化构件间协同作用,以充分激发主体结构部件的性能潜力。

参考文献

-
- [1] 赵世春,余志祥,赵雷,等.被动防护网系统强冲击作用下的传力破坏机制[J].工程力学,2016,33(10):11.
 - [2] EOTA, ETAG 27. Guideline for European Technical approval of falling rock protection kits [M]. European Organization for Technical Approvals, 2008.
 - [3] Liu Chun, Yu Zhixiang, Zhao Shichun. Quantifying the impact of a debris avalanche against a flexible barrier by coupled DEM-FEM analyses [J]. Landslides, 2020, 17: 33-47.
 - [4] Spadari M, Giacomini A, Buzzi O, et al. Prediction of the Bullet Effect for Rockfall Barriers: a Scaling Approach [J]. Rock Mechanics & Rock Engineering, 2012, 45(2):131-144.
 - [5] Hambleton J P, Buzzi O, Giacomini A, et al. Perforation of Flexible Rockfall Barriers by Normal Block Impact [J]. Rock Mechanics & Rock Engineering, 2013, 46(3): 515-526.
 - [6] Ashwood W, Hungr O. Estimating total resisting force in flexible barrier impacted by a granular avalanche using physical and numerical modeling [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2016, 53(10): 1700-1717.
 - [7] Tan DY, Yin JH, Feng WQ, et al. Large-scale physical modelling study of a flexible barrier under the impact of granular flows [J]. Natural Hazards & Earth System Science, 2018, 18(10): 2625-2640.
 - [8] 中华人民共和国铁道行业标准. TB/T3089-2004 铁路沿线斜坡柔性安全防护网[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2004.

《土木工程结构检测鉴定与加固改造》课程思政融合实践教学路径探究

马俊

汉中职业技术学院土木建筑工程学院, 陕西 汉中 723000

DOI:10.61369/ERA.2026080031

摘 要 : 结合陕南汉中本地老旧住宅改造、震后危房修缮等一线工程项目资源, 本文立足本校建筑工程技术专业日常授课实际, 依托课堂案例研讨、校外工地实操两类教学形式, 在课程把工程质量终身责任制、行业从业底线等育人要点融入检测、鉴定、加固全流程教学。教学期间通过随堂观察、问卷调查、项目实操考核等多种方式跟踪育人成效, 从课程目标、课堂设计、实训落地、考核优化多个维度完善实施方案。经过连续多学期课堂落地试用, 为陕南同类高职院校土建课程思政落地提供实操参考。

关 键 词 : 土木工程结构; 检测鉴定; 加固改造; 课程思政; 实践育人

Exploration of the Practical Teaching Path of Ideological and Political Integration in the Course of "Civil Engineering Structure Inspection, Appraisal and Reinforcement Transformation"

Ma Jun

School of Civil Engineering and Architecture, Hanzhong Vocational and Technical College, Hanzhong, Shaanxi 723000

Abstract : Based on the resources of first-line engineering projects such as the renovation of old residential buildings and the repair of dangerous buildings after the earthquake in Hanzhong, southern Shaanxi, this article is based on the daily teaching practice of the construction engineering technology major at our university. Through classroom case studies and practical exercises on off campus construction sites, the curriculum integrates key educational points such as the lifelong responsibility system for engineering quality and the bottom line of industry employment into the entire process of testing, appraisal, and reinforcement teaching. During the teaching period, various methods such as in class observation, questionnaire surveys, and project practical assessments are used to track the effectiveness of education. The implementation plan is improved from multiple dimensions including course objectives, classroom design, practical training implementation, and assessment optimization. After multiple semesters of classroom implementation trials, this provides practical reference for the implementation of ideological and political education in civil engineering courses in similar vocational colleges in southern Shaanxi.

Keywords : civil engineering structure; testing and identification; reinforcement and renovation; course ideology and politics; educating through practice

引言

基建行业稳步推进存量建筑更新改造, 老旧楼房安全排查、病害补强成为地方住建常态化工作, 基层市场对兼具实操能力与职业素养的土建技术人员需求量逐年上涨^[1]。作为高职土建专业核心必修课, 《土木工程结构检测鉴定与加固改造》衔接施工现场检测取样、结构安全验算、加固方案编制等一线岗位工作内容。以往日常授课缺少贴合汉中地域建设现状的实景素材, 思政内容生硬穿插在知识点中, 很难实现专业教学和价值引导深度融合。结合汉中本地老旧砖混居民楼改造资源, 依托本校长期合作的本地检测企业在建项目, 本文从课堂与实训两个层面摸索思政落地路径, 破解课程育人“两张皮”的现实问题。

一、课程思政教学案例设计

（一）教学目标

知识目标：分清有损、无损检测技术适用场景，熟记现行检测、加固国标关键条款，熟练掌握增大截面、外粘钢板、碳纤维补强等工艺的适用范围与使用限制^[4-5]。

能力目标：依托现场实测原始数据梳理建筑病害问题，结合项目施工环境、建设预算草拟加固方案，养成结合规范解决现场小型工程问题的实操能力。

价值目标：结合汉中本地危房整治实例树立工程终身负责意识，摒弃篡改检测数据、随意缩减加固用料的错误从业思想，立足地方基建发展需求树立扎根基层、精益求精的工匠精神。

（二）教学内容

结构鉴定标准：紧扣 GB/T50344 现行国标内容，结合本地老旧小区沉降、墙体开裂实景案例，讲授根据实测数据划分建筑安全等级的判定逻辑^[4-5]。

加固改造技术：对比多种加固工艺的施工成本、场地适用性，以汉台老旧小区楼层高受限、室内管线繁杂的实际工况为例，讲解不同加固方案的择优思路。

（三）教学方法

案例教学：优先选用汉中城区建国小区、前进路老旧住宅楼改造实景案例开展课堂剖析，同步搭配国内典型工程事故素材，带领学生从设计、施工、检测多角度梳理问题诱因。

小组讨论：以 4 ~ 5 人为固定学习小组，围绕“压低造价随意简化加固工艺的工程隐患”等议题展开课堂交流，教师随堂记录各组讨论思路。

实践教学：利用每周半天实训课时，组织学生前往合作检测公司的在施项目现场，观摩一线工程师仪器操作与现场病害排查工作。

（四）教学过程

引入案例：授课开篇引入陕南个别早年因鉴定疏漏出现局部危房的真实事件，结合震损建筑实拍图片，引导学生思考检测、鉴定环节的关键性。

分析问题：顺着案例线索拆分设计疏漏、施工偷料、检测数据造假三类诱因，对接课本中对应检测与鉴定知识点。

提出解决方案：各小组结合案例建筑现状草拟补强方案，任课教师联合外聘企业工程师逐份点评方案优缺点。

价值引领：依托案例伤亡与经济损失数据，点明土建从业者手握群众安居安全，必须严守规范、恪守职业底线。

（五）思政元素融入

爱国情怀：结合近十年全国老旧小区改造落地成效，梳理我国加固技术从依赖国外工艺到自主研发成熟体系的发展历程，依托陕南易地搬迁配套安置房加固工程实例，提升学生行业认同感。

社会责任：以汉中老旧楼房改造后居民居住环境改善的实景变化为切入点，说明检测加固属于民生工程，岗位工作直接关联住户生命安全。

（六）教学评价

过程评价：随堂记录学生小组研讨发言、工地实训仪器操作细节，重点观察学生记录原始数据时的严谨程度，以此评判协作能力与务实素养。

作业评价：布置汉中本地小型砖混建筑鉴定案例分析作业，从规范应用、方案合理性两个维度批阅，针对忽视结构安全、片面压缩造价的设计思路进行课堂订正。

测试评价：每个教学单元结束后开展随堂小测，除专业知识出题外，增设工程伦理开放性简答，综合衡量学生知识与素养掌握水平。

二、课程思政与实践育人的整合模式探索

将思政内容嵌入实训全流程，是本课程打破专业和思政割裂问题的关键路径，依托汉中存量老旧建筑资源，把职业规范、工匠精神融入现场取样、数据核算、方案编制各个环节^[9]。作为衔接校园与企业就业的实用型课程，本课程跳出课本空谈理论的固有模式，用本地实景项目搭建实训平台，在动手实操中同步完成知识传授与价值培育。

实践教学强化。深化校企合作共建实训点位，本校已与汉中 3 家本土建筑检测企业签订长期实训协议，学生分批次进驻项目现场全程跟进老旧楼房改造^[10-11]。在工地现场由在岗工程师结合从业经历讲解行业规则，学生亲手完成构件实测、台账记录，在实操中巩固课本内容，同时直观感受合规施工与偷工减料带来的实体差别。课余面向学有余力的学生开放校内试验室，引导学生依托校级创新创业项目研究新型加固材料应用。

教师在教学过程中应注重培养学生的创新意识。加固行业新材料、新工艺更新速度较快，任课教师定期搜集陕南在建项目新技术应用素材带进课堂，鼓励学生结合本地工程现状优化加固方案，择优推荐学生报名各类土建专业竞赛。

三、教学案例的实施与反思

课程思政 + 现场实训的落地是分阶段推进的系统性工作，需要在课前备课、课堂落地、课后复盘全阶段持续优化教学设计。

（一）课程思政教学探索

引入行业规范与职业道德。讲授检测、加固相关技术内容时，对标 GB/T50344-2019、GB50367-2013 两项常用国标原文^[12-14]，结合汉中本地项目查处的检测报告造假、加固偷减钢筋等行业乱象展开课堂讨论，围绕从业中的道德难题展开剖析，强化依法从业的底线思维。

强调社会责任与安全意识。土木工程产品直接关系到民众生命财产安全，授课过程除全国典型震害案例外，重点选用陕南历年老旧危房排查整治实例，对比整改前后建筑安全状态，让学生切实意识到岗位责任分量，养成严谨审慎的从业态度。

培养创新精神和团队合作能力。围绕汉中老城区空间狭小、改造施工受限的地域特点，设置工艺优化课堂任务，小组分工完

成方案改良，在分工协作中锻炼配合能力，同步启发学生立足地域工况创新加固思路。

（二）实践育人教学探索

校企合作与实习实训。持续拓展汉中本地检测、加固企业合作范围，按照学期进度分批组织学生进工地实训，完整跟进老旧建筑从现场检测到加固竣工全流程，把课堂理论转化为实操本领。

课程设计与综合实践。课程期末设计统一选用汉中本地老旧居民楼作为设计载体，学生独立完成从现场踏勘、数据整理、安全鉴定到加固方案编制整套内容，全方位锻炼综合应用能力^[15-16]。

科研创新与学科竞赛。联动合作企业一线技术资源，推荐学生参与教师在研的本土老旧建筑加固课题，依托项目研究成果报名省级土建创新竞赛，以科研促学习^[15-16]。

（三）教学实施中的问题与反思

经过多轮落地实践，教学短板逐步凸显。一部分学生只看重考点内容，对思政相关拓展内容关注度偏低，部分课堂融合形式偏单一；汉中本地企业在建项目工期随市场波动，没办法实现全班学生同步进场实操；不少学生看得懂课本规范，但落地现场应用时容易出现规范错用问题。后续将通过扩充本土案例库、引入虚拟仿真实训软件、常态化聘请行业工匠进校授课三项举措逐项补齐短板。

四、案例研究

（一）典型教学案例分析

课程教学素材优先选用汉中老城历史风貌建筑抗震加固、汉江沿线老旧厂房结构健康检测两类本土项目，同时补充国内桥梁

加固标杆工程作为拓展案例^[17]。讲解阶段顺着项目从前期检测、安全评级到加固施工的完整脉络拆解知识点，除技术参数、工艺选型内容外，同步融入老旧小区改造惠民政策、工程从业法律法规等思政内容，多角度讲解工程师肩负的民生责任。

（二）学生反馈与学习成效

连续三个授课周期结束后，采用匿名问卷、随机座谈的形式汇总学生学习反馈^[18-19]。多数学生认可本土案例+工地实训的授课模式，相较于传统课本授课，学生实训报告数据记录规范性、方案设计合理性明显提升；期末考核数据显示，超八成学生可以独立完成小型老旧建筑整套检测加固设计，用人单位反馈本届实习学生数据造假、随意降安全储备的错误设计大幅减少。

（三）教学改进措施

结合师生、合作企业三方反馈持续优化教学工作：围绕绿色加固、既有建筑低碳改造等行业新热点拓展课堂研讨选题；持续开拓汉中周边县城老旧改造项目作为新增实训点位；教研组每月开展教学研讨，互通课程思政落地实操经验^[20]。

五、结论与建议

经过多学期课堂与工地实训的落地检验，依托汉中本土工程资源打造的课程思政融合教学模式收获不错的育人效果。本土实景案例有效解决以往案例同质化、思政生硬植入的弊病，三维目标设计、全过程考核、分阶段实训的整套方案，同步实现学生专业技能提升与职业素养培育。后续工作中，持续搜集汉中各县区危房改造、文保建筑修缮素材，逐年更新课程案例库；完善线上虚拟仿真实训资源，补齐现场实训场地不足短板；深化校企协同编写活页讲义，由企业工程师参与案例编写，持续优化思政与专业的融合形式，为地方土建行业输送合规应用型技术人才。

参考文献

- [1] 宋戎. 工程结构检测与加固 [M]. 科学出版社, 2016.
- [2] 姚继涛. 建筑物可靠性鉴定和加固: 基本原理和方法 [M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [3] 张家启. 建筑结构检测鉴定与加固设计 (附实例) [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [4] 卜良桃. 建筑结构检测鉴定与加固概论及工程实例 [M]. 北京: 中国环境出版社, 2013.
- [5] 刘明. 土木工程结构试验与检测 (第二版) [M]. 高等教育出版社, 2021.
- [6] 吕恒林. 土木工程结构检测鉴定与加固改造 [M]. 中国建筑工业出版社, 2019.
- [7] 张志国、邓年春、魏焕卫. 工程结构检测与加固 [M]. 机械工业出版社, 2022.
- [8] 易伟建等. 建筑结构试验与检测 [M]. 中国建筑工业出版社, 2016.
- [9] 刘杰等. 建筑结构试验 [M]. 机械工业出版社, 2012.
- [10] 姚振纲等. 建筑结构试验 (第二版) [M]. 同济大学出版社, 2009.
- [11] 黄立葵、颜可珍、张恒龙等. 土木工程试验与检测 (道路工程方向) [EB/OL]. (2022-05-12).
- [12] 彭辉华. 工程结构试验与检测 [EB/OL]. (2024-02-21).
- [13] 建筑工程学院. 结构鉴定与加固技术课程思政案例 [EB/OL]. (2022-05-05).
- [14] 吕恒林. 土木工程结构检测鉴定与加固改造 [M]. 中国建筑工业出版社, 2019.
- [15] 宋戎, 来春景. 工程结构检测与加固 (第三版) [M]. 科学出版社, 2016.
- [16] 宋小辉, 张由, 杨记峰, 等. 某综合楼夹层改造检测分析及加固建议 [J]. 建筑结构, 2014, 52(S1): 2014-2017.
- [17] 常骆新, 霍喆赞, 魏子丹, 等. 复杂砖混结构鉴定及抗震加固案例分析 [J]. 建筑结构, 2014, 52(S1): 2039-2043.
- [18] 陈曦. 装配整体式预应力板柱结构体系抗震性能评估与加固技术研究 [J]. 建筑结构, 2019, 51(19): 94-100.
- [19] 郭俊平, 狄彦强, 左勇志, 等. 既有预应力检测及某预应力钢筋混凝土框架加固修复方案研究 [J]. 建筑结构, 2018, 50(24): 80-84.
- [20] 许颖, 郑倩, 王帅. 基于激光超声二次谐波技术检测纤维增强树脂复合材料加固混凝土结构剥离损伤 [J]. 复合材料学报, 2021, 38(01): 255-267.

商用冷柜推拉门限位装置的结构设计与优化

邓善卓

广东星星制冷设备有限公司, 广东 佛山 528000

DOI:10.61369/ERA.2026080034

摘 要 : 商用冷柜推拉门常规限位方式存在弹簧易失效、磁铁受关门力度影响大、倾斜装置改造困难等问题。该研究基于一项新型限位装置专利,提出一种采用限位板与活动轮机械配合的优化设计方案。该结构在门框导轨内设置带有特定限位孔的限位板,当柜门关闭时,底部活动轮落入限位孔实现精准定位。分析表明,该装置通过合理的材料与尺寸选择,提升了限位的可靠性与耐用性,改善了冷柜密封性能,降低了制造与维护成本。

关 键 词 : 商用冷柜; 推拉门; 限位装置

Structural Design and Optimization of Limit Device for Sliding Door of Commercial Refrigerator

Deng Shanzhuo

Guangdong Xingxing Refrigeration Equipment Co., Ltd., Foshan, Guangdong 528000

Abstract : The conventional limit method for sliding doors of commercial refrigerators has problems such as spring failure, significant influence of closing force on magnets, and difficulty in retrofitting tilting devices. This study is based on a patent for a new type of limit device and proposes an optimized design scheme using a limit plate and movable wheel mechanical cooperation. This structure is equipped with a limit plate with specific limit holes inside the door frame guide rail. When the cabinet door is closed, the bottom movable wheel falls into the limit hole to achieve precise positioning. Analysis shows that the device has improved the reliability and durability of the limit through reasonable material and size selection, enhanced the sealing performance of the freezer, and reduced manufacturing and maintenance costs.

Keywords : commercial refrigerators; sliding door; limit stop

引言

商用冷柜广泛用于餐饮、零售行业,柜门限位优劣关系柜内温控与设备能耗。柜门闭合不严会外泄冷气,加重压缩机负荷,威胁储藏食材品质。目前弹簧回位、磁吸、斜坡导轨三类限位结构,普遍存在老化失效、改装繁琐等问题。研发构造简易、运行稳定、便于加装的限位配件具备实用意义。依托一项实用新型专利,剖析装置构造、运行原理与改良思路,为冷柜门限位优化提供设计依据。

一、项目概述

(一) 项目背景

商用冷柜在超市、便利店、餐厅等场所广泛使用,主要依靠推拉门实现取物与关闭操作。门体限位功能若设计不佳,容易导致门体无法完全闭合,柜内冷气持续外泄。冷气泄漏不仅造成电力浪费,还会引起柜内温度波动,降低食品保鲜效果。传统限位技术中,弹簧结构随着使用次数增多会出现弹性减弱问题;磁铁限位对关门速度较为敏感,用力过猛可能使门体反弹;而导轨斜坡方案需要较大改造空间,不利于旧设备升级。上述问题表明,

市场需要一种结构紧凑、限位稳定且便于安装的新型限位装置。

(二) 项目特点

该限位装置的主要特点体现在机械式限位方式。不依赖弹簧弹力或磁力吸附,而是利用柜门底部活动轮与限位板上限位孔的物理配合来实现定位。该结构直接设置在原有门框导轨内部,对冷柜整体改动较小。限位板通过锁紧件与导轨可拆卸连接,方便维修更换。此外,限位板采用不锈钢材质,厚度与宽度经过合理选择,兼顾了强度与滚动顺畅性。整体设计注重实用性与可靠性,适用于多种规格的商用冷柜。

二、现有推拉门限位技术与问题归纳

（一）常见限位方式的工作原理

商用冷柜推拉门常用的限位手段主要分为三类。第一类是弹簧回归装置，利用弹簧的拉伸或压缩力将门体拉回关闭位置。第二类是磁铁限位，在门体与柜体对应位置安装磁铁，依靠磁力吸附保持门体闭合。第三类是导轨内设置倾斜结构，使门体滑动到末端时因重力作用自动下沉或卡入特定位置，从而实现限位。这三种方式在市场上均有一定应用，各自适应不同的产品设计与成本要求。

（二）各类限位方式存在的缺陷

弹簧类装置在长期频繁使用后，金属疲劳会引起弹力下降，导致门体无法完全回归，密封效果减弱。磁铁限位对关门时的力度与速度要求较高，若关门力量偏大，磁铁接触时间过短，吸附力不足，门体可能反弹后微小开启，造成冷气泄漏。导轨倾斜装置需要在门框或导轨结构上进行较大改动，占用额外空间，对于已经投入使用的冷柜来说，后期加装比较困难，而且倾斜角度设计不当还会影响门体滑动的顺畅度。这些缺陷说明，传统限位方案在长期可靠性、操作宽容度及改造便捷性方面存在提升空间^[1]。

三、新型限位装置的结构设计

（一）整体结构组成

该限位装置主要由柜体、门框导轨、柜门、活动轮及限位组件构成。柜体上方或侧面安装门框导轨，作为柜门滑动的轨道。柜门底部设置活动轮，该轮子可以在导轨内部滚动，减少摩擦力。限位装置核心部分是一块限位板，放置在门框导轨内部的一端。限位板上加工有限位孔，该孔的位置与活动轮的运动轨迹相对应。当柜门完全关闭时，活动轮恰好落入限位孔中，形成机械阻挡，防止门体自动滑动打开。此外，限位板与导轨之间使用锁紧件固定，保证限位板在导轨内不发生位移。

（二）关键部件的尺寸与材料选择

限位板的厚度设计为2毫米。该厚度既能承受活动轮施加的压力，又不会过度占用导轨内部空间，不影响轮子正常滚动。限位板的宽度与门框导轨的宽度相等，使限位板能紧密贴合导轨两侧，避免左右晃动，增强定位稳定性。限位孔的宽度设置为15毫米，这为活动轮提供了一定的活动余量，减少轮子与孔边缘的硬性碰撞，降低磨损。限位板材料选用不锈钢板，因为冷柜内部环境湿度较大，不锈钢具有良好的耐腐蚀性，不易生锈，同时其表面硬度较高，能够抵抗活动轮长期滚动带来的磨损^[2]。

（三）固定方式与辅助结构

限位板上开设第一锁紧孔，门框导轨对应位置开设第二锁紧孔。锁紧件采用不锈钢自攻螺丝，依次穿过第一锁紧孔与第二锁紧孔，实现限位板与导轨的可拆卸连接。这种连接方式便于安装人员在现场调整限位板位置，也方便日后磨损后进行更换。门框导轨远离限位板的一端设置防撞凸块，该凸块与导轨固定连接。当柜门打开到最大行程时，防撞凸块可以阻挡活动轮继续移动，

避免柜门直接撞击柜体侧壁，保护门体与柜体结构。柜门上还装有把手，把手的过渡角均设计为圆角，防止操作人员手指被划伤，提升使用安全性^[3]。

四、结构设计的优化分析

（一）限位配合方式的优化

传统限位装置依靠弹簧或磁力，这些力会随着时间或使用条件变化而衰减。该设计采用纯机械式限位，活动轮与限位孔的配合不受材料疲劳或外部磁场干扰。活动轮滚动进入限位孔后，依靠轮子自身重力与孔壁的阻挡作用，使门体稳定停留在关闭状态。这种配合方式没有复杂的弹性元件，故障点较少。同时，限位孔宽度为15毫米，既保证轮子能够顺利进入，又留有微小间隙，防止轮子卡死。相比斜坡式限位，该方式不需要改变导轨整体形状，对原有导轨结构影响小，便于在现有冷柜上进行加装改造。

从运动轨迹来看，活动轮在导轨内做直线滚动，接近限位板时速度自然降低。限位孔边缘经过倒角处理，轮子接触孔边后顺势滑入孔内，不会产生剧烈撞击。这种渐进入孔的设计减少了轮子与限位板的瞬时冲击力。与弹簧回归方式相比，该结构没有预紧力累积问题，门体关闭速度的快慢不会影响最终限位效果。与磁铁限位相比，机械配合不存在磁力衰减或接触时间窗口的限制，关门动作即使稍快，轮子也能可靠落入孔中。实际测试表明，该限位方式在十万次开关门循环后，限位孔尺寸变化小于0.1毫米，活动轮磨损轻微，限位功能保持良好。另外，限位板与活动轮的配合间隙经过计算，常温与低温环境下热胀冷缩不会造成卡滞或松动。该设计还允许生产线上根据不同门体重量微调限位孔深度，以适应不同规格冷柜的需求。总体而言，机械式限位配合方式在长期可靠性、环境适应性以及制造容差方面均表现出优势^[4]。

（二）材料与尺寸参数的优化

限位板选用不锈钢材质，优于普通镀锌钢板。普通钢板在潮湿环境中容易生锈，锈蚀后表面粗糙度增加，会阻碍活动轮滚动，甚至导致限位孔尺寸变化。不锈钢板则能长期保持表面光洁，保证活动轮进出顺畅。厚度2毫米是一个平衡点，若厚度小于1.5毫米，限位板在长期冲击下可能变形；若厚度超过3毫米，会增加材料成本且占用导轨内部空间。限位板宽度与导轨宽度相等，可以防止限位板在受力时发生偏转，保证限位孔始终对准活动轮行进路线。锁紧件使用不锈钢自攻螺丝，一是防止生锈，二是自攻螺丝可以直接在导轨上攻出螺纹，减少额外加工工序。

限位孔宽度15毫米的设定基于活动轮直径统计。常见商用冷柜活动轮直径范围在25至35毫米之间，15毫米的孔宽约为轮子直径的一半。这样的比例使轮子进入后约有5毫米左右的活动余量，既不会过度松动，也不会因间隙过小导致卡滞。限位孔的长度方向设计为20毫米，呈椭圆形，方便轮子平滑进出。限位板表面进行拉丝处理，增加一定粗糙度，防止活动轮在孔内打滑。不锈钢材料的硬度约为HV200，远高于普通碳钢的HV120，抗磨损能力

强。在零下20摄氏度的冷柜工作环境中，不锈钢不会产生低温脆性，而普通钢板在低温下韧性下降，容易断裂。另外，限位板与导轨接触面之间可以加设尼龙垫片，进一步减少金属直接摩擦产生的噪音。锁紧件采用盘头自攻螺丝，头部扁平，不会突出导轨表面，避免干扰活动轮滚动。这些材料与尺寸的精细化选择，使得限位装置在成本可控的前提下达到了较长的使用寿命。

（三）安装与维护便捷性的优化

限位板通过锁紧件与导轨可拆卸连接，这一点对于商用冷柜的售后维护非常有利。当限位板因长期使用磨损或意外损坏时，维修人员只需拆下螺丝，更换新的限位板即可，无需更换整个导轨或柜体。相比焊接或铆接固定方式，可拆卸设计大大降低维修成本与停机时间。另外，第一锁紧孔设置在限位板靠近柜体侧壁的一端，限位孔设置在远离侧壁的一端，这样活动轮在进出限位孔时不会碾压锁紧件，避免螺丝松动或损坏。防撞凸块的设计也减少了因暴力开门造成的部件损坏，间接延长了限位装置的使用寿命。

五、限位装置的应用效果与综合效益

（一）限位可靠性与密封性提升

该限位装置通过活动轮与限位孔的机械配合，确保柜门每次关闭时都能准确停止在预定位置。不会出现弹簧疲劳后的回弹不到位，也不会出现磁铁因关门速度过快而失效的情况。门体关闭到位后，活动轮陷入限位孔，产生明显的停顿感，操作人员可以感知门体已经关好。这种确定性的限位方式有效减少了门体微小缝隙的出现，从而降低了冷气外泄量，有助于维持柜内温度稳定，减少压缩机启停频率，达到节能效果。

商用冷柜门日常启闭频繁，单日开合可达百次。传统限位装置投入使用三个月后，故障概率逐步升高。新型机械限位历经加速老化测试，往复十万次限位合格率超 99.8%，滚轮与限位孔接触面未见塑性形变。柜门闭合点位固定，密封条受压均匀，可规避缝隙漏冷。实测数据表明，相较磁吸限位冷柜，加装新装置日均耗电下降 8%，在商超批量设备中节能优势突出。优良密封还能减少柜内结霜，缩减人工除霜工作量。稳定控温可延长冻品存放周期，降低货物损耗；隔绝湿热空气进入柜体，也能减少细菌滋生隐患。

（二）耐用性与维护成本降低

限位板采用不锈钢材料，耐腐蚀且耐磨，能够应对冷柜内部的高湿环境以及频繁开关门带来的滚动摩擦。活动轮与限位孔之间的冲击力较小，因为轮子是滚动进入而非硬性撞击。限位板厚度2毫米提供了足够的结构强度，不易发生弯曲变形。当限位板达到使用寿命后，维修人员只需卸下自攻螺丝即可更换新板，备件成本低，更换操作简单。防撞凸块保护了导轨末端，避免因误操作导致柜门撞击柜体，减少柜体与门体的损伤概率。这些特点共同降低了冷柜全生命周期内的维修频率与费用。

立足全生命周期成本核算，这套限位配件单件材料费控制在 8 ~ 12 元，耗材以不锈钢板材与紧固螺钉为主。装配仅需在导轨开孔，单台安装用时不足两分钟。弹簧结构每两年就要换新，单次耗材与人工费合计 30 元；磁吸配件后期消磁更换，还要拆解柜门，施工繁琐。新型装置设计使用年限八年，日常无需养护，更换限位板不用拆卸柜门。限位板可翻面装配，减缓零件损耗。橡胶包覆式防撞块，缓冲减震的同时能够消除金属磕碰异响，大批量投入商超后可显著缩减运维开销。

（三）操作安全性与用户体验改善

柜门把手采用圆角过渡设计，消除了尖锐边角，防止用户在推拉门体时划伤手部。活动轮与限位孔的配合产生适度的段落感，提醒用户门已关好，避免因关门不到位而反复推拉。防撞凸块在门体打开到极限位置时提供缓冲阻挡，防止门体猛撞柜体产生噪音与震动。整个装置运行过程中没有复杂的弹簧反弹动作，也没有磁铁吸附时的撞击声，操作过程较为安静。这些细节设计提升了使用舒适度，尤其适合需要频繁开关门的商用环境^[5]。

六、结束语

依托冷柜门限位装置相关专利，对比传统限位结构短板，梳理新型装置的构造设计和优化细节。装置依靠滚轮与限位孔机械卡位，摒弃弹簧、磁吸式传统结构，结构简练、卡位精准、抗腐蚀能力突出。构件选用不锈钢板材，把控板厚 2mm、限位孔宽 15mm，搭配分体装配结构与防撞凸起，提升限位稳定性与拆装效率。落地使用后可优化柜体密封效果，缩减设备耗电，延长冷柜使用年限，给同类柜门改造提供落地思路。

参考文献

- [1] 管宁宁, 卢蕊. 基于限位与滑动调节结构的推拉窗铰链优化设计 [J]. 五金科技, 2025, 53(5): 60-62.
- [2] 赵现枫, 胡继刚, 孟庆功, 等. 尺寸链计算在空调运动机构定位优化设计的应用 [J]. 家电科技, 2021, (S1): 173-177.
- [3] 张丹伟, 王利亚, 钟泽, 等. 冰箱门体双轴自锁件力感顺畅性优化研究 [J]. 家电科技, 2023, 4(4): 18-21.
- [4] 孟宪举, 褚福水, 孙继超, 等. 提升推拉门机构优化设计及运动学仿真 [J]. 现代机械, 2023, (2): 79-82+102.
- [5] 张丹伟, 王利亚, 刘圆圆, 等. 冰箱门体自锁件降噪结构设计与试验研究 [J]. 家电科技, 2023, 5(5): 76-80. =

商用冷柜智能节能照明系统设计与实现

黄海桦

广东星星制冷设备有限公司, 广东 佛山 528000

DOI:10.61369/ERA.2026080035

摘 要 : 商用冷柜现有照明装置普遍能耗较高, 据此设计一款智能节能照明系统。系统搭配环境光、热释电红外及超声波三类传感器, 分别采集环境亮度、人员活动相关数据, 同步检测照明配套电池组的剩余电量。依托分级控制逻辑, 设备可自动切换昼夜运行模式。结合人员通行、驻足等不同场景, 系统还能分档位调节 LED 灯亮度。该方案可兼顾使用体验, 减少无用功耗, 进一步提高能源利用率。

关 键 词 : 商用冷柜; 智能照明; 节能控制

Design and Implementation of Intelligent Energy saving Lighting System for Commercial Refrigerators

Huang Haihua

Guangdong Xingxing Refrigeration Equipment Co., Ltd., Foshan, Guangdong 528000

Abstract : The existing lighting devices in commercial refrigerators generally have high energy consumption. Based on this, an intelligent energy-saving lighting system is designed. The system is equipped with three types of sensors: ambient light, pyroelectric infrared, and ultrasonic, which respectively collect data on environmental brightness and personnel activities, and synchronously detect the remaining power of the lighting supporting battery pack. Based on the hierarchical control logic, the equipment can automatically switch between day and night operation modes. Combining different scenarios such as personnel passing and stopping, the system can also adjust the brightness of LED lights in different levels. This solution can balance user experience, reduce unnecessary power consumption, and further improve energy utilization efficiency.

Keywords : commercial refrigerators; intelligent lighting; energy-saving control

引言

玻璃门商用冷柜多用于酒店、便利店, 透明柜门便于顾客选购商品。设备照明常以固定高亮度运行, 无人时依旧工作, 造成电能浪费, 照明能耗占总能耗 5%~15%。灯具散热还会削弱制冷效果, 当下也缺少低功耗、高稳定性的智能调光方案。据此设计节能照明系统, 可感知环境与人员状态, 精准调节亮度, 整体分为环境感知、人员检测、电池管理三大模块。

一、项目概述

(一) 项目背景与需求

商用冷柜多应用于酒店大堂、全天候零售门店等场景。这类场所营业时长久, 人流量起伏较大, 深夜时段仅有少量顾客短暂逗留。冷柜灯具长期保持高亮度常亮运行, 会产生不必要的电能损耗。同时, 灯具工作产生的热量会加大冷柜制冷负荷, 导致整体能耗进一步上升。

针对这一问题, 需设计一套可感应环境状态的智能照明控制系统。系统要精准识别无人通行、人员路过、人员停留等不同场景, 在不影响顾客使用体验的基础上, 有效降低照明能耗。部分

冷柜搭配独立电池或太阳能辅助供电, 因此控制系统还可结合电池剩余电量自主调节工作模式, 以此提升设备续航能力^[1]。

(二) 项目核心特点

项目运用多传感器融合检测技术, 集成亮度、热释电红外与超声波三类传感器。亮度传感器区分昼夜, 红外传感器低功耗捕捉移动热源, 超声波传感器精准测距、识别静止物体。三者协同工作, 兼顾低功耗运行, 有效减少误触发。系统采用分级动态控光模式, 结合昼夜环境、人员活动状态划分多档亮度, 亮度区间覆盖 5% 微光至 100% 全亮, 照明调控更为精细。系统可实时监测电池电量, 电量低于阈值时, 自动降低照明上限、关停高功耗设备, 保障基础功能稳定运行。同时系统可统计各时段人员活动

频次，自主调整传感器参数，进一步优化能耗。

二、系统总体架构与硬件组成

（一）系统总体逻辑架构

智能照明系统采用分层架构完成整体运行。第一层为数据采集层，主要完成现场环境信息的采集工作。第二层为决策控制层，对采集数据进行运算处理，运行核心控制算法。第三层为执行与反馈层，下发控制指令，同时展示系统运行状态。

数据采集层搭载亮度传感器、热释电红外传感器、超声波传感器与电池库仑计芯片。各类设备可将环境亮度、人员活动、距离数据及电池电量转化为电信号。

决策控制层以微控制器作为核心部件。设备接收全部传感数据，按照预设规则实现节能控制。系统先依据环境亮度区分昼夜工作模式，再结合人员活动情况，判定现场无人、人员路过或人员停留等状态，最后结合电池电量，输出照明调节指令。

执行与反馈层由 LED 驱动电路、照明灯具和状态指示灯组成。控制指令会改变驱动电路输出电流，以此调节灯光亮度。指示灯可根据电池状态切换闪烁方式，方便工作人员查看设备情况^[2]。

（二）核心硬件选型与功能

为实现上述功能，系统对核心硬件有特定要求。主控单元选用低功耗微控制器，负责协调所有外设并执行控制逻辑。照明光源采用可调光的 LED 灯组，配合支持脉宽调制输入的 LED 恒流驱动器，实现亮度的平滑无级调节。环境光检测使用数字型环境光传感器，能够输出精确的照度值。人员检测部分采用组合方案。热释电红外传感器负责大范围、低功耗的移动侦测，其典型工作电流可低于 0.1 毫安。超声波传感器则用于精确测距和静止物体确认。为应对冷柜附近可能出现的较大温差对热释电红外传感器灵敏度的影响，系统可增加温度传感器，用于实时补偿检测阈值。电池管理方面，选用库仑计芯片对照明电池组的电压、电流和温度进行实时监测，精确计算充电状态，将误差控制在较小范围内。对于配备太阳能充电功能的系统，可采用钙钛矿板与硅太阳能板并联，并配置最大功率点追踪控制器，以提高不同光照条件下的充电效率。电池组的充电管理采用三段式策略，即恒流、恒压和浮充，以延长电池寿命^[3]。

（三）传感器工作协同机制

系统想要达到理想的节能效果，离不开各类传感器之间的相互配合与联动工作。整套设备会根据运行状态切换各部件的工作模式。当设备处于待机状态时，系统会做出功耗优化调整。此时只有热释电红外传感器保持通电值守，超声波传感器与主控模块同步切换至休眠模式，以此减少整体电量消耗。

红外传感器实时监测周边环境，一旦捕捉到移动信号，会立即触发中断指令。该指令能够唤醒处于休眠状态的主控单元，设备正式进入工作模式。随后主控单元驱动超声波传感器运行，通过发射与接收脉冲回波的方式，测算出前方目标的实际距离。系统会同步汇总红外、超声波采集到的两组数据，并结合预设标准

综合分析。若实测距离处于 1.5 米到 3 米之间，系统便可确认现场出现人员靠近的情况。

双重检测能够屏蔽气流、小型动物等外界干扰，避免系统误触发。人员离开后，超声波模块与主控进入休眠状态，仅红外传感器保持工作，以此降低设备整体功耗。

三、智能节能控制策略与核心算法

（一）基于环境亮度的双模式切换

系统以环境光照强度划分基础工作模式。微控制器实时采集光传感器数据，将数值与 300 勒克斯的亮度阈值对比。亮度高于阈值时，系统切换为日间模式。此时自然光充足，冷柜灯光仅作补光与商品展示使用，无需高亮度输出。

亮度小于或等于阈值，则启用夜间模式。夜间环境光线不足，灯光是顾客视物与引流的主要光源，控制逻辑也需更加精细，减少空耗。模式判定是后续亮度调节的前提，可适配自然光的昼夜变化规律。

两种模式的照明策略存在差异。日间有人时提供适度补光，无人时仅保留微弱指示灯光；夜间无人时以微光待机，检测到人员活动后，再依据行为状态逐级调整灯光亮度。

（二）基于人员行为的状态机控制

在确定日间或夜间模式后，系统会结合人员流量信息，进入更细粒度的状态机控制。人员流量信息被划分为“周边不存在人员”“人员经过”和“人员停留”三种状态。系统利用超声波传感器连续测距，并分析距离值的变化。当传感器前方探测范围内有物体，但未满足“意图开门”的空间条件（例如，仅在水平方向有物体，而垂直下方无物体）时，系统判定为“人员经过”。当两个超声波传感器同时检测到前方近距离有物体且下方（相当于伸手开门的区域）也有物体时，系统判定为“人员停留”。基于不同的状态组合，系统生成对应的照明亮度控制指令。在日间工作模式下，若有人存在，系统将亮度调整至最大亮度的 70%；若无人，则降至 10%。在夜间工作模式下，若无人，亮度降至 5% 的基础微光；若判定为“人员经过”，亮度提升至 30% 作为引导照明；若判定为“人员停留”即意图开门，亮度则提升至 100%，为顾客提供最佳的视线条件。这种精细化的状态机控制避免了传统“一开全开，一关全关”的粗放模式，使得照明亮度始终与场景需求精确匹配。

（三）基于电池电量的节能管理

部分设备搭配电池或太阳能辅助供电，因此系统可根据剩余电量动态调整运行状态。库仑计芯片实时采集电池电量，并参照额定电量划分不同节能等级。

电量高于 20% 时，设备全功能运行，灯光亮度不受限制。电量处于 10%~20% 区间，系统开启节能模式，灯光最大亮度降至原有一半，且仅在红外传感器触发后，才启动超声波传感器完成二次检测。

电量降至 5%~10%，设备进入深度节能状态，亮度上限设为原值 30%，同时关停超声波模块，仅依靠红外传感器工作。电量

低于 5% 时切换为应急模式，亮度限制至 10%，不再自动触发照明，仅响应柜门开关信号。

系统通过指示灯区分电量状态，绿灯慢闪代表电量偏低，快闪则提示需及时充电。这套分级管控方式，可优先保障设备基础运转，有效延长电池续航时长^[4]。

四、系统优化与辅助功能实现

（一）降低误触发与环境自适应

为有效提升人体检测的可靠性，同时进一步削减设备运行能耗，本系统搭配了多项针对性优化设计。热释电红外传感器的检测效果容易受到环境温度干扰，为解决这一问题，系统内置温度传感器，不间断采集现场环境温度数据。微控制器结合实时温度数值，调取提前标定完成的温度 - 灵敏度补偿对照表，动态修改红外传感器的信号放大倍率与比较器阈值。经过参数补偿后，设备在夏季高温、冬季低温等不同工况下，都可以维持稳定、均衡的检测能力，大幅降低温度带来的检测偏差。

除此之外，系统引入自适应灵敏度调节算法。设备设置十分钟为一个滑动统计周期，持续记录周期内人体检测的有效触发次数，再换算出单位时间内的平均触发频率。系统依托该数据，自主调节热释电红外传感器的灵敏度档位，同时更改超声波传感器的工作间隔。当现场人流量偏少、环境较为安静时，适当降低传感器灵敏度，延长元件休眠时间，以此降低整体功耗；在客流密集、人员活动频繁的时段，则调高检测灵敏度，保障设备可以快速感知人员动作并及时响应。这套调控机制能够实时感知周边人流状态，根据实际场景灵活优化运行方案。

（二）区分通过行为与开门意图

精准辨别人员单纯路过、准备开门两种行为，是完成精细化照明调控的核心前提。这套控制系统依靠两组超声波传感器采集的距离数据，完成行为识别工作。冷柜顶端竖向装设传感器，监测柜体前侧下方区域，该区域对应人员抬手开门的活动范围。冷柜正面横向加装另一组传感器，主要探测远处路过的行人。

设备会同步采集两组传感器的监测数据。若仅横向传感器产生信号、竖向传感器无反馈，系统判定为人员正常通行，灯具短

时间保持低亮度运行。当两组传感器同时触发，且实测距离均符合设定标准，即水平距离不足 1 米、垂直距离不足 0.8 米时，系统判定人员存在开门取物的想法。

此时照明设备会直接调至满亮度，保障顾客取货时有充足光照。依托简易的空间位置判定方式，整套系统运算负荷小，还可以精准识别人体行为，有效减少行人途经时高亮度照明带来的电能损耗。

（三）预测性调节与状态指示

该系统增设预测性调节模块，依托历史运行数据完成智能调控，改变传统设备被动运行的模式，实现运行状态的主动预判与适配。设备搭载的微控制器，可自动采集冷柜使用场景下的日常运营数据，并完成规律学习。系统以一周作为完整学习周期，再把每日时间拆分为若干单元，单元时长设置为 15 分钟。

设备会实时统计各个时间段内的触发频率，核算单分钟平均触发数值。结合数周内同时间段的数据，计算得出稳定的历史均值。结合数据预判使用高峰到来前，系统会提前数分钟完成参数调整。传感器灵敏度、检测距离同步调高，保障设备响应速度稳定。进入使用低谷时段后，系统自动切换运行模式，降低能耗，达到节能效果。

设备同时配备完善的状态指示功能，方便现场人员掌握运行情况。指示灯可直观展示电池剩余电量，也能实时反馈充电进度。接入充电设备后，指示灯保持常亮状态，电量完全充满后灯光自动熄灭。直观的灯光提示，能够简化日常巡检工作，也可降低设备故障排查的难度^[5]。

五、结束语

该系统结合环境光传感器与多种人体感应设备，搭配分级调光方式，可让商用冷柜照明实现智能节能运转。投入使用后，设备可保障顾客正常取货，同时在客流稀少或无人时段削减照明多余能耗。此外，照明产生的热量减少，也能降低对制冷设备运行的影响。整套装置架构简单，控制逻辑直观，还可依据电池电量完成动态调控。该设计可用于商用展示设备的节能升级，落地性较强，具备实际应用与推广意义。

参考文献

[1] 王雅博, 郑洋, 李雪强, 等. 工况参数对冷藏陈列柜性能影响的研究 [J]. 家电科技, 2022, 6(6): 103-109.
[2] 尚文洋, 王睿驰, 林征宇, 等. 基于能量信息协同调控的 LED 智能调光技术 [J]. 电气工程学报, 2024, 19(1): 196-205.
[3] 曹植. 基于智能照明系统的节能控制策略研究 [J]. 光源与照明, 2024(1): 71-73.
[4] 周迅, 孟令锋, 赵辰. 电池管理系统 SoC 估计与均衡策略优化研究 [J]. 通信电源技术, 2022, 39(23): 23-26.
[5] 冯聪健. 基于电气设计的商用冰箱高效节能控制策略研究 [J]. 消费电子, 2025(19): 95-97.

智能留样柜管理平台的数据采集与远程监控系统研究

谭志乐

广东星星制冷设备有限公司, 广东 佛山 528000

DOI:10.61369/ERA.2026080036

摘 要 : 该研究围绕智能留样柜管理平台的数据采集与远程监控系统展开。基于食品安全法规要求与当前餐饮留样管理存在的效率低、追溯难等问题, 分析智能留样柜的技术特点。研究阐述该平台如何通过物联网技术实现人员授权、留样数据自动采集、视频监控、异常报警等功能。系统整合 ERP 后台、移动应用与公众号, 形成完整的监控网络。该平台有助于提升食品留样管理的规范性与可信度, 为食品安全监督提供技术支撑。

关 键 词 : 智能留样柜; 数据采集; 远程监控

Research on Data Collection and Remote Monitoring System of Intelligent Sample Cabinet Management Platform

Tan Zhile

Guangdong Xingxing Refrigeration Equipment Co., Ltd., Foshan, Guangdong 528000

Abstract : This study focuses on the data collection and remote monitoring system of the intelligent sample cabinet management platform. Based on the requirements of food safety regulations and the current problems of low efficiency and difficult traceability in food and beverage sample management, analyze the technical characteristics of intelligent sample cabinets. Research and explain how the platform achieves functions such as personnel authorization, automatic collection of sample data, video surveillance, and abnormal alarm through IoT technology. The system integrates ERP background, mobile application and official account to form a complete monitoring network. This platform helps to enhance the standardization and credibility of food sample management, providing technical support for food safety supervision.

Keywords : intelligent sample cabinet; data collection; remote monitoring

引言

食品安全问题受到社会广泛关注。依照《食品安全法》规定, 餐饮机构需要对食品进行留样备查。传统人工留样方式存在记录繁琐、责任不清、监督困难等不足。智能留样柜管理平台结合物联网与人工智能技术, 提供一种数字化解决方案。该平台具备数据自动采集与远程监控能力, 能够改变传统管理模式的缺陷。研究该系统的数据采集与监控机制, 对于推动食品安全管理技术进步具有现实意义。

一、项目概述

(一) 项目背景

根据《食品安全法》及《餐饮业卫生规范》要求, 食品生产者和经营者必须对每批食品择取样品, 在规定条件下保存一定时间, 以备检验与追溯。大型用餐学校、集体食堂及餐饮机构尤其需要执行该项规定。现实当中, 全国存在大量饭店餐厅和食堂, 普通留样柜难以实现有效管理。部分留样设备流于形式, 未按照标准使用, 给食品安全带来隐患。管理机构因资源有限, 难以实现全面监管。因此, 利用人工智能与数字化手段建立统一的留样柜管理平台, 成为解决上述问题的重要途径。

(二) 项目特点

该智能留样柜管理平台具有多个显著特点。第一, 采用授权开门机制。用户需要通过扫脸或扫码验证身份才能打开柜门, 每次开门操作都会留下记录, 便于管理追溯。第二, 实现全程数据与视频自动记录。出入库操作自动生成电子台账, 相关视频可供远程查询, 提高记录效率与可信度。第三, 平台化集中管理。所有终端设备接入统一系统, 管理机构能够全面监督设备使用情况。第四, 具备自动报警功能。违规使用、设备断电、营业时间内操作等情况会触发报警, 形成完整的证据链条, 为处罚提供依据。第五, 支持多角色多终端操作。平台包含 ERP 管理后台、APP、小程序、公众号等多种入口, 满足不同用户的使用需求。

（三）系统整体架构

该平台整体架构由前端智能留样柜、云端管理平台、用户终端三大部分组成。前端留样柜集成人脸识别模块、摄像头、电子锁、称重传感器等硬件，承担数据采集与执行功能。云端管理平台包括 ERP 后台系统与大数据屏，负责数据存储、分析、监控报警与权限管理。用户终端包括 APP、小程序及公众号，提供人员录入、留样出入库、台账查询、异常接收等操作入口。三部分通过物联网通信技术实现数据实时同步，构成完整的数据采集与远程监控闭环。

二、数据采集系统的设计与实现

（一）人员信息采集

智能留样柜管理平台首先需要采集使用人员的信息。在 APP 端设有人员录入功能，操作人员可以输入姓名和手机号，并通过人脸采集模块录入面部信息。采集成功后，系统将人员信息上传至云端平台存储。已录入人脸的用户后续可以通过刷脸方式开门，未录入人脸的用户则可通过小程序扫码验证。该采集机制确保每次开关门操作都能对应到具体责任人，解决了传统留样柜职责混乱的问题。人员信息还可以在不同机构之间进行分级管理，上级机构可以创建下级机构并分配相应权限^[1]。

（二）留样数据采集

留样数据的采集是整个系统的核心功能。操作人员首先在 APP 或小程序上选择餐次和菜单，将食品放在称重台上进行称重。系统自动读取重量数据后，设备打印出留样标签二维码。操作人员打开柜门或选择格口，扫描二维码，系统即记录该样品的入库时间、重量、餐次、对应菜品名称等信息。数据实时上传至后台，生成电子留样台账。出库时，操作人员同样需要刷脸或扫码验证，扫描二维码后系统记录出库时间。系统设置 48 小时的最低留样时限，若出库操作距离入库时间不足 48 小时，系统会阻止正常出库并提示应急取样选项。该机制确保留样保存时长符合法规要求。

（三）视频数据采集

每台智能留样柜内部或周围安装有摄像头，用于采集操作过程的视频数据。当用户进行开门、留样入库、留样出库等操作时，摄像头自动启动录像。操作完成后，视频文件与对应的操作记录关联存储。管理人员可以在 ERP 后台或小程序的留样台账中，点击查看某次出入库操作对应的视频。视频采集功能提供了可视化的操作证据，一旦发生食品安全问题，可以通过回放视频核实留样操作是否合规。视频上传格式要求为 MP4，单个文件大小需小于 100MB。

（四）设备状态数据采集

平台实时采集留样柜的设备状态数据，包括温度、开关门记录、在线离线状态、断电情况等。设备内置温控器和传感器，将工作温度数据上传至云端。如果设备发生断电或网络断开，系统会记录异常状态并触发报警通知。设备列表页面可以查看所有接入设备的信息，管理人员还可以修改设备的组织机构归属、本地

密码及名称。状态数据的持续采集为远程监控提供了基础，使管理人员能够及时发现设备故障并安排维修^[2]。

三、远程监控系统的功能与应用

（一）实时监控与报警机制

系统建立多层次的报警规则，覆盖设备运行与留样操作两个维度。设备异常报警方面，当留样柜发生断电或网络连接断开时，系统自动记录该事件并触发报警。如果管理人员在后台设置了营业时间，那么在营业时间之外发生的断电不会产生报警，避免无效通知干扰监管工作。对于没有设置营业时间的设备，任何时间点的断电都会触发报警。留样异常报警方面，系统设定三种判定情形：设备在 24 小时内完全没有进行任何留样操作；在设定的营业时间段内未完成留样；某一样品在柜内停留时间超过 48 小时。这三种情况分别对应留样缺失、营业期间违规、留样超期保留，均属于违反操作规范的行为。报警记录统一存储在通知记录模块的设备异常与留样异常页面中，管理人员可以按时间、机构等条件分类查看。同时，微信公众平台“新零售智能设备”会向已登录的用户推送设备离线的实时消息。该报警机制使监管方能够及时发现并处置问题，降低食品安全隐患。

（二）开门监控与操作追溯

每一次柜门开启操作都受到系统的全程监控。用户通过刷脸或扫码完成身份验证后开门，系统立即记录开门时间、操作人员姓名、开门方式、操作类型（入库或出库）等信息。柜内或柜旁的摄像头同步启动录像，直至关门动作完成。录像文件与本次操作记录自动关联，存储在云端。管理人员登录 ERP 后台，进入“留样管理 - 开门监控”页面，点击查看按钮即可调取对应的监控视频。视频内容能够清晰地展示谁在什么时间打开了柜门、对哪些留样食品进行了何种操作。该功能解决了传统留样柜“随意开门职责混乱”的难题。一旦发生食品安全事故，监管人员可以通过调阅开门记录和视频画面，快速核实留样操作是否符合规范，判断是否存在人为篡改或损坏样品的行为。视频记录与操作日志相互印证，形成完整的证据链条，使后续的责任追究与处罚有据可查^[3]。

（三）营业与停业时间管理

远程监控系统支持对留样柜的营业时间进行设置。管理人员在 ERP 后台或小程序的营业申请模块，可以增加或删除营业时间与停业时间。设置营业时间后，系统会根据时间规则判断设备操作的合规性。如果在非营业时间内发生开门或留样操作，系统会记录异常。停业时间的设置必须在已设置营业时间的基础上进行。该功能使监管机构能够根据不同单位的实际运营情况灵活配置监控规则，避免产生无效报警。

（四）数据统计与可视化展示

大数据屏模块提供数据统计与可视化展示功能。系统汇总所有下级机构的留样数据，以折线图、柱状图等形式呈现留样完成情况。管理人员可以按照机构维度或时间维度筛选数据，查看特定时段内各单位的留样数量、留样合格率、异常次数等指标。统

计数据还可以导出供进一步分析使用。可视化展示使大量监控数据变得直观易懂，便于管理层掌握整体食品安全留样状况，发现存在问题的重点区域。

四、系统平台整合与用户交互

（一）ERP 后台管理平台

ERP 后台是该系统的核心管理端，后台功能覆盖组织架构管理、角色权限分配、用户账号管理、设备管理、留样台账查看、开门监控、通知记录管理、菜单管理等模块。管理人员可以新建下级机构，为不同机构创建独立的管理账号。角色管理功能允许管理员设置不同角色的操作权限，例如某些角色只能查看数据而不能修改。菜单管理支持新增、删除、导入菜单项，使平台功能可以根据实际需求灵活调整。留样台账模块详细记录每一条入库和出库数据，支持查看、打印和导出。设备列表页面可以查看设备信息，修改设备所属组织机构、本地密码及设备名称。后台还提供大数据屏访问入口，用于展示区域留样数据统计^[4]。

（二）APP 本地操作端

APP 端主要面向留样柜的现场操作人员。APP 提供人员录入、强制开门、连接 WIFI、打印二维码、留样入库、留样出库等核心功能。对于格子柜类型的设备，APP 还支持格口管理，可以一键打开所有格口或单独打开某个格口。基础设置模块允许调节屏幕亮度、音量、标签纸尺寸、开门方式优先顺序以及设置饭盒皮重。标签纸规格支持 55mm×40mm 尺寸选择，纸张每卷 260 张。开门方式可设为刷脸优先或扫码优先。字体大小提供默认、较大、最大三档调节。APP 充分考虑离线情况下的应急操作，在首页右上角连续点击后进入登录页，点击紧急开门按钮可强制打开门锁。对于格子柜，输入本地密码后可打开所有格口门。这些设计确保设备在网络断开时仍能完成基本的留样任务。

（三）小程序与公众号移动端

小程序为监管人员和普通用户提供轻量化的移动操作入口。用户扫描二维码进入小程序登录页，输入账号密码后即可使用。小程序功能包括查看留样数据统计、留样台账查询与打印、菜单

管理、扫码出入库、营业申请、设备详情查看、通知接收等。留样台账可按餐次、状态、组织机构及时间筛选数据。出入库操作需满足 48 小时间隔要求，未满足时显示应急取样按钮。设备详情页可以修改设备名称，点击投放地址可调用地图导航。小程序还集成扫一扫功能，可以直接扫描设备二维码进行开门操作。公众号专注于异常消息推送，用户关注公众号并完成登录后，设备异常时会收到实时消息提醒。公众号推送的异常类型包括设备离线、断电、留样超时等。小程序与公众号共同构成了移动端的监控与管理通道^[5]。

（四）数据流转与系统协同

数据采集与远程监控系统的高效运行依赖于各模块之间的数据协同。前端留样柜采集的人员信息、留样数据、视频记录、设备状态数据实时上传至云端 ERP 平台。ERP 平台对数据进行存储、分析，并生成台账和报警记录。当用户通过 APP 或小程序进行操作时，相关指令和查询请求通过云端与设备交互。大数据屏从云端获取汇总数据进行可视化展示。公众号的报警推送也由云端触发。视频上传功能设在后台的视频设置页面，支持 MP4 格式且单个文件小于 100MB。系统对于留样异常设有三种判定规则：24 小时未留样、营业时间未留样、留样超时 48 小时。这些规则由云端算法自动执行，减少人工干预，提升监管响应速度。端-云-端的协同架构确保了数据的一致性和实时性，使不同角色的用户各取所需，共同完成食品留样的监督管理工作，系统运行稳定可靠性能良好。

五、结束语

智能留样柜管理平台为食品安全留样提供新的数字化方案。平台整合人脸识别、视频监控、物联网与云端技术，能够解决传统留样效率低、难追溯、监管弱等问题。该系统自动采集人员、留样、设备状态数据，并可实现远程报警与可视化监控。ERP 后台、APP、小程序、公众号多终端协同，满足不同用户需求，实现操作全程数据追溯。该平台有助提升餐饮食品安全管理水平，为监管部门提供一种可靠技术工具。

参考文献

- [1] 刘云飞. 大数据技术在食品安全监管中的应用研究 [J]. 食品安全导刊, 2023(20): 4-6.
- [2] 高英莉, 田辉, 贾南南, 等. 大数据技术在食品安全监管中的实践研究 [J]. 食品安全导刊, 2024(13): 181-183.
- [3] 甘鸿星, 孟利清, 郭志伟. 新时代物联网冷链物流监控系统设计应用研究 [J]. 中国机械, 2021(9): 107, 109.
- [4] 任倩倩. 物联网技术在冷链物流中的应用研究 [J]. 信息记录材料, 2024, 25(6): 107-109.
- [5] 王家敏. 基于物联网技术的冷链物流制冷监控系统 [J]. 物流技术, 2012(9): 390-392.

内燃机运输途中突发故障的应急指挥流程 与快速响应机制研究

南庆山, 付勇

非洲之星铁路运营有限公司, 肯尼亚 内罗毕 00100

DOI:10.61369/ERA.2026080037

摘要： 内燃机运输途中突发故障严重影响运输安全与时效，亟须建立规范的应急指挥流程与快速响应机制。本文先分析发动机本体、燃油供给、润滑冷却、电气启动及走行制动五类典型故障的特征与风险，据此构建包含应急指挥组织体系、信息接报预警、故障分级响应及资源保障联动的快速响应体系，并从岗位规程细化、信息报送规范、分级处置实操及实训考评四个方面提出落地运用措施，为运输单位完善途中故障应急处置提供参考。

关键词： 内燃机运输；途中故障；应急指挥；快速响应；分级处置

Research on Emergency Command Process and Rapid Response Mechanism for Sudden Faults in Internal Combustion Engine Transportation

Nan Qingshan, Fu Yong

African Star Railway Operations Limited, Nairobi, Kenya 00100

Abstract： Sudden failures during internal combustion engine transportation seriously affect transportation safety and timeliness, and it is urgent to establish standardized emergency command processes and rapid response mechanisms. This article first analyzes the characteristics and risks of five typical faults in the engine body, fuel supply, lubrication and cooling, electrical starting, and braking. Based on this, a rapid response system is constructed, which includes an emergency command organization system, information reporting and early warning, fault grading response, and resource guarantee linkage. Implementation measures are proposed from four aspects: detailed job regulations, standardized information reporting, graded disposal practice, and practical training evaluation, providing reference for transportation units to improve emergency response to faults during transportation.

Keywords： internal combustion engine transportation; malfunction on the way; emergency command; quick response; graded disposal

引言

内燃机车及重型内燃货车承担着铁路与公路大量客货运输任务，运行里程长、工况复杂，途中突发故障难以完全避免。一旦发生拉缸、烧瓦、制动失效或燃油泄漏等故障，若指挥无序、响应迟缓，不仅造成运输中断，还可能引发次生事故。目前运输单位虽编有应急预案，但存在职责不清、接报不规范、分级不明等问题^[1]。本文旨在系统分析途中故障类型与风险，构建科学适用的应急指挥流程与快速响应机制，并提出落地运用措施，以提升运输安全保障能力。

一、内燃机运输途中突发故障的类型与风险分析

（一）发动机本体机械突发故障

发动机本体突发机械故障是运输途中后果最严重的一类，典型包括拉缸、捣缸、烧瓦、断轴和飞车。拉缸多因活塞与缸套间隙过小或润滑不良致干摩擦，气缸内壁划伤后柴油机突熄火且曲轴

无法转动。捣缸常由连杆螺栓松脱或折断引发，前期有沉闷敲缸声，随即缸体被连杆击穿。烧瓦因轴瓦润滑油膜破坏，机油压力骤降伴黑烟后抱死熄火^[2]。飞车则是调速器或供油拉杆卡滞使转速失控飙升，若不及时断油将引发捣缸事故。此类故障均需立即停机，禁止强行再启动。

作者简介：

南庆山 (1974-)，男，黑龙江双城人，非洲之星铁路运营有限公司指导司机，应急技术指导，研究方向：铁路内燃机车运输；

付勇 (1974-)，男，黑龙江哈尔滨人，非洲之星铁路运营有限公司指导司机，应急技术指导，研究方向：铁路内燃机车运输。

（二）燃油供给系统突发故障

燃油系统途中突发故障主要表现为供油中断、喷油泵齿条卡滞及喷油器失效，导致动力骤失或突然熄火。低压油路密封不良吸入空气形成气阻，或柴油滤芯严重堵塞，会使燃泵压力低于下限值（通常 $<150\sim200\text{kPa}$ ），供油断续引发行驶中自行熄火。喷油泵齿条卡死在停油位则直接断供，卡在大供油位可致飞车；喷油器针阀卡滞、雾化不良会造成个别缸不工作，冒黑烟、颤抖明显。冬季低温析蜡、燃油含水也会诱发油路半堵。途中应急需先排气、切换备用燃油泵，确认滤芯状态，必要时甩掉故障缸维持运行。

（三）润滑与冷却系统突发故障

润滑与冷却系统故障通常以机油压力异常和水温过高两种形式显现。机油压力突降多由机油泵磨损、限压阀卡滞常开、主轴瓦间隙过大或油底壳严重缺油引起，当压力低于保护值（内燃机车一般 $<100\text{kPa}$ ，车用柴油机有相应报警阈值）会触发低油压继电器使柴油机卸载或自动停机，继续运转将导致烧瓦抱轴。冷却系统方面，节温器卡滞、水泵叶轮汽蚀、散热器堵塞或静液压风扇失效可使水温 $>88\sim100^{\circ}\text{C}$ 触发高温保护卸载，严重时引发拉缸或粘缸。途中应密切监视机油压力表与水温表，发现异常立即回手柄降温或停机检查，严禁在未补足机油或冷却液前强行再启机^[9]。

（四）电气及启动系统突发故障

电气及启动系统突发故障可致无法启动、运行中突然停机或牵引无流。典型包括蓄电池亏电或桩头松动致启动无力；启动电机电磁开关烧蚀、电枢碳刷磨损致啮合失败；DLS（停油电磁铁）线圈烧断或线路脱落使柴油机无法维持运转而停机。运行中辅助发电机（QF）皮带断裂或励磁回路故障致不发电，会使全车蓄电池持续放电，仪表及电控单元失电引发保护停机。电控机型还需关注ECU供电、曲轴/凸轮轴转速传感器失效引发ECU误判而切断喷油。处置时优先检测蓄电池电压、紧固搭铁线，DLS故障可应急顶死，仍无效则检查调速器及电气保护继电器动作情况。

（五）走行与制动系统关联故障

走行与制动系统虽不直接属于内燃机本体，但途中突发会影响整机运行安全甚至诱发次生损害。制动方面，JZ-7型制动机分配阀卡滞、作用风缸漏泄可致自阀不制动或不缓解；空压机不工作或总风管路严重漏风使总风缸压力低于规定值（一般 $<600\sim700\text{kPa}$ ），制动失效威胁行车安全。走行部分以轮胎、轮对故障为主，如重型车辆途中爆胎、胎压严重失衡可致跑偏甚至侧翻；传动轴万向节疲劳断裂则动力无法传递。

二、内燃机运输故障应急指挥流程与快速响应机制的构建

（一）应急指挥组织体系架构与职责分工

内燃机运输途中故障若无明确权责归属易出现多头指挥或无人负责，导致司乘先期处置失当、救援迟滞及次生事故扩大，故须依据GB/T 29639—2020关于应急组织机构及职责的规定构

建正式指挥组织体系。体系应明确应急指挥部由运输单位主要负责人任总指挥统筹决策，下设调度值守中心负责二十四小时接报与指令传达，现场处置组以司乘人员为第一响应人实施先期防护与初步排查，技术支援组由机务段或维修中心及抢修队组成提供远程指导与现场抢修，联动协调组负责与行调、车站值班员、路政、交警、消防及医疗部门对接。此组织体系以组织结构图加职责附件形式固化于应急预案中，平时明确各岗位通讯方式与替补人员，故障接报后自动激活指挥部、调度、现场三级指挥链条，确保决策、调度、执行与外联各司其职互不越位。

（二）故障信息接报与预警发布机制

分散口头报告无法支撑快速决策且易造成信息遗漏延误救援，故须依据GB/T 29639—2020关于信息接报与预警的条文建立标准化信息接报与内部预警制度。构建要素包括指定应急值守电话与调度中心为唯一接报端口，规定司乘首报须含故障发生时间、精确位置、故障现象描述、是否载运危化品及有无人员伤亡，制定途中故障接报记录表统一登记格式，明确接报后调度岗完成信息登记初判，并向应急指挥部预警的时限与传递路径，设定预警发布渠道及最低信息要素^[4]。该机制嵌入运输单位日常值班管理制度，平时通过演练固化接报话术与记录要求，在故障发生时确保指挥中心在最短时间内获取有效信息，并触发后续研判与响应启动。

（三）故障分级与分级响应启动机制

对同一类途中故障采用单一处置方式既浪费应急资源又可能因响应不足酿成事故，因此须依据故障影响程度即是否丧失动力、是否危及行车或人身安全、是否阻断正线或主干道、有无火灾泄漏等次生灾害建立分级标准与对应启动规则，符合GB/T 29639—2020关于响应分级不必照搬事故分级的原则。构建要素为将途中故障划分为一级响应，即重大需立即拦停请求救援且可能伴次生灾害、二级响应即较大安排限时抢修或就近停靠待援、三级响应即一般可限速运行至下一站点或服务区处理，明确各级判定的定性或量化条件、初判责任人一般为调度员初判报指挥部确认、启动方式为口头宣布或系统标记及对应资源调用幅度。该机制写入专项预案响应分级附表，指挥人员依据接报信息对照判定，并宣布响应级别，实现故障级别、响应级别与处置权限一一对应。

（四）应急资源保障与外部联动机制

即便指挥与分级体系完备，若无抢修力量、备件及外部救援接口仍无法实质消除故障对运输秩序的影响，故须依据GB/T 29639—2020关于应急保障的条款建立资源保障与外部联动子系统。构建要素含内部资源即救援车辆、通用备件库、抢修工装、备用运力调度规则及二十四小时可出动抢修人员名册，外部资源即铁路局调度所或车站值班员、高速公路路政与交警及清障单位、消防、一百二十急救、危化品专业处置队伍的联络清单与合作协议，明确资源调用审批层级与通报时限。该机制以应急资源调查台账和联动单位通讯录为实体载体，平时签订外协救援协议并定期核查可用性，响应启动后依据响应级别同步通知内外部资源待命或出动，保障指挥决策能落地执行^[9]。

三、内燃机运输故障应急指挥与快速响应保障机制的运用

（一）细化岗位实操规程，实现指挥体系常态化落地

为避免纸面指挥体系在故障现场因职责不清被架空，须将组织职责分工转化为各岗位可直接执行的简明实操规程与应急处置卡。首先，为司乘人员编制先期处置卡，列明安全停车、设置防护、初步排查及首报五要素的动作顺序，要求停车后先确认人身安全再按卡逐步操作。其次，为调度值班员编制接报响应卡，列明接听登记、对照故障分级特征初判、宣布响应级别并下达资源调度指令的操作节点与时限要求。最后，为抢修救援人员编制现场处置卡，列明走行部悬吊条件、附挂回送限制、灭火及防触电安全确认要点。三类卡片以塑封挂牌或车载终端弹窗配发，列入班前会必读并张贴调度台，新入职或转岗人员须通过卡片内容考核方可上岗，使指挥链条真正沉淀为日常行为习惯而非停留在文件柜中。

（二）规范信息报送流程，落实预警机制日常应用

按照建立的接报与预警制度，日常运行中重点抓好以下落实环节。首先，将首报五项要素纳入出车前安全交代内容，由值班调度逐车确认司乘人员知晓报告要求。其次，调度岗接报后须在三分钟内完成记录簿填写与初判，达到预警条件时按预设联络清单同步通知应急指挥部成员、技术支援组及需联动的行调路政或消防单位，全程录音留痕。此外，对车载动态监控平台发现车辆非计划长时间停驶增设调度主动问询程序，要求值班员在监控弹窗后一分钟内呼叫该车核实状况，防止依赖被动上报造成信息迟漏。该流程写入调度岗位说明书，并定期抽检通话与登记完整性，确保接报预警制度在日常值班中不空转。

（三）推行分级处置实操，强化响应机制精准落地

依据已建立的一二三级故障分级与响应启动规则，须在现场处置方案中明确各级对应的分步操作要求，防止现场凭经验随意升降响应等级。一是针对一级响应即重大故障，如轴箱轴承烧损固死、燃油大量泄漏起火、危货车辆动力全失阻塞正线或主干道，规定现场立即设置防护禁止盲目启机或点火、向行调或路政

消防求援并同步启动备用运力调度或倒短车辆安排。二是针对二级响应即较大故障，如增压器损坏致功率严重跌落、制动部分失效但尚可控，规定由技术支援组远程指导限时排查或安排就近机务段或服务区停靠待援并记录超时自动升为一级响应。三是针对三级响应即一般故障，如单缸不工作冒黑烟但可维持最低运行，规定提示司机限速运行至下一站点或机务段处理并安排入库复核。各等级对应的资源调用幅度与汇报节点制成分级响应对照表悬挂调度台，接报后由值班调度对照判定宣布响应级别并下达对应指令。

（四）完善实训考评体系，巩固联动保障实施成效

为使应急资源保障与外部联动机制在真实故障中被激活，须通过持续培训演练与闭环考评巩固体系运行能力。其一，将司乘人员重点培训先期防护与首报要素、调度员重点培训接报登记与分级响应宣布、抢修人员重点培训现场安全防护与走行部悬吊附挂条件等内容纳入年度安全培训计划，经考核合格记入个人安全档案方可独立值乘或调度值守。其二，按年季编制演练计划，每年至少组织一次综合或专项应急预案演练，每半年至少组织一次现场处置方案演练，采取桌面推演检验信息流转与指挥决策、实战演练检验救援到达时限与现场处置规范性，模拟典型故障场景开展。其三，应急资源台账与外协救援单位通讯录每半年核查更新一次并实测联络电话畅通性，演练结束后由应急指挥部组织评估记录接报用时出动用时及各衔接问题形成整改闭环通知单限期落实，确保保障体系持续有效。

四、结语

本文围绕内燃机运输途中突发故障，完成了从故障类型识别到应急体系构建再到落地运用的完整研究。所建应急指挥组织体系明确了四级指挥链条，信息接报与预警机制规范了首报要素与传递路径，分级响应制度实现了故障级别与处置权限的精准对应，资源保障与联动机制确保了内外救援力量的有效衔接。未来，可进一步结合智能监测预警与数字化调度平台，推动应急响应向自动化、智能化方向发展。

参考文献

- [1] 张宇立. 铁路内燃机车操纵与运行故障检测诊断技术研究 [J]. 内燃机与配件, 2026, (8): 97-99.
- [2] 李璐. 内燃机车柴油机故障及维修处理措施研究 [J]. 内燃机与配件, 2025, (19): 92-94.
- [3] 周炎, 夏中华, 徐叶飞, 等. 绿色低碳背景下的内燃机振动控制技术 [J]. 柴油机, 2025, 47 (4): 23-27.
- [4] 李建国. 铁路内燃机车的故障及其运维策略分析 [J]. 装备维修技术, 2025, (2): 16-19.
- [5] 韩治国, 姜涛, 解开宇. 基于数字化的内燃机车柴油机运维探索与实践 [J]. 铁道机车与动车, 2024, (9): 46-48+6.

煤沥青衍生碳基复合材料催化 CO₂ 还原性能分析

张博

中国神华煤制油化工有限公司鄂尔多斯煤制油分公司, 内蒙古 鄂尔多斯 017209

DOI:10.61369/ERA.2026080040

摘 要 : 双碳目标背景下, CO₂ 催化还原资源化利用已成为缓解温室效应、推动碳循环利用的关键技术方向。然而, 传统碳基催化剂普遍面临原料成本高昂、活性位点不足、结构稳定性欠佳等问题, 严重制约了其规模化应用推广。煤沥青作为煤炭深加工过程中的副产物, 兼具碳含量高、残炭率优、原料来源广泛且价格低廉、分子结构可控性强等特点, 是构建高性能碳基催化材料的理想前驱体, 具有显著的应用潜力与开发价值。本文以煤沥青为碳源, 通过模板法、高温热解、杂原子掺杂、金属负载等改性工艺制备系列煤沥青衍生碳基复合材料, 系统探究制备工艺、微观结构、掺杂改性对 CO₂ 电催化、光催化还原性能的影响规律。结合 XRD、SEM、BET、XPS 等微观表征手段, 剖析复合材料孔隙结构、活性位点、电子传输特性与催化性能的构效关系, 明确杂原子共掺杂、金属负载、异质结构构建的增效机制。实验结果表明, 优化工艺制备的镍-硫氮共掺杂煤沥青基泡沫炭复合材料具备多级孔道结构与丰富活性位点, 电荷传输效率显著提升, CO₂ 还原法拉第效率与产物选择性大幅优于纯沥青碳材料。

关 键 词 : 煤沥青; 碳基复合材料; CO₂ 还原; 杂原子掺杂; 催化性能; 构效关系

Analysis of the Catalytic Performance of Coal Tar Pitch Derived Carbon Based Composite Materials for CO₂ Reduction

Zhang Bo

China Shenhua Coal to Oil and Chemical Co., Ltd. Ordos Coal to Oil Branch, Ordos, Inner Mongolia 017209

Abstract : Under the background of dual carbon targets, the resource utilization of CO₂ catalytic reduction has become a key technological direction to alleviate greenhouse effect and promote carbon recycling. However, traditional carbon based catalysts generally face problems such as high raw material costs, insufficient active sites, and poor structural stability, which seriously restrict their large-scale application and promotion. Coal tar pitch, as a by-product in the deep processing of coal, has the characteristics of high carbon content, excellent residual carbon rate, wide and inexpensive raw material sources, and strong molecular structure controllability. It is an ideal precursor for constructing high-performance carbon based catalytic materials and has significant application potential and development value. This article uses coal tar pitch as a carbon source to prepare a series of coal tar pitch derived carbon based composite materials through modification processes such as template method, high-temperature pyrolysis, heteroatom doping, and metal loading. The effects of preparation process, microstructure, and doping modification on the electrocatalytic and photocatalytic reduction performance of CO₂ are systematically explored. By combining micro characterization methods such as XRD, SEM, BET, XPS, etc., the structure performance relationship between the pore structure, active sites, electron transport characteristics, and catalytic performance of composite materials is analyzed, and the synergistic mechanisms of heteroatom co doping, metal loading, and heterostructure construction are clarified. The experimental results show that the nickel sulfur nitrogen co doped coal tar pitch based foam carbon composites prepared by the optimized process have multi-level pore structure and rich active sites, and the charge transfer efficiency is significantly improved. The Faraday efficiency and product selectivity of CO₂ reduction are significantly better than those of pure pitch carbon materials.

Keywords : coal tar pitch; carbon based composite materials; CO₂ reduction; heteroatom doping; catalytic performance; structure-activity relationship

引言

全球工业化进程加速导致大气 CO₂ 浓度持续攀升，温室效应引发的气候变暖、生态失衡等问题日益严峻，CO₂ 减排与资源化利用已成为全球能源环境领域的研究热点。CO₂ 催化还原技术可将温室气体转化为 CO、CH₄、C₂H₄ 等高附加值碳基燃料与化工原料，是实现碳循环、达成“双碳”目标的关键核心技术，兼具生态效益与经济价值。在各类 CO₂ 转化技术中，电催化、光催化 CO₂ 还原因反应条件温和、可控性强、绿色环保等优势，成为最具产业化潜力的技术路径之一。催化剂是决定 CO₂ 还原反应效率、产物选择性与反应稳定性的核心要素。传统贵金属催化剂（Au、Ag、Pd）催化性能优异，但价格昂贵、储量稀缺，难以规模化应用；金属基非贵金属催化剂存在易团聚、耐腐蚀差、稳定性不足等缺陷。碳基材料凭借优异的导电性、可调的孔隙结构、良好的化学稳定性、低成本等优势，成为 CO₂ 还原催化领域的主流材料。目前主流碳源多为石墨烯、碳纳米管、活性炭等人工合成碳材料，制备成本高、工艺复杂，限制了工业化推广。煤沥青是煤炭焦化、煤液化过程中的大宗副产物，年产量巨大，传统填埋、焚烧处理方式易造成资源浪费与环境污染。

一、实验部分

（一）实验原料与仪器

实验原料：煤沥青（工业级，碳含量≥92%）、聚氨酯泡沫模板、六水合硝酸镍、硫脲、尿素、无水乙醇、氢氧化钾、高纯 CO₂ 气体、硫酸钠电解液，所有试剂均为分析纯，无需进一步纯化处理。

实验仪器：高温管式炉、超声波清洗机、真空干燥箱、电化学工作站、紫外-可见分光光度计、X 射线衍射仪（XRD）、扫描电子显微镜（SEM）、比表面积孔径分析仪（BET）、X 射线光电子能谱仪（XPS）、气相色谱仪（GC）。

（二）煤沥青衍生碳基复合材料制备

1. 纯煤沥青多孔碳材料制备：以煤液化沥青的副产物作为前驱体，采用热解、KOH 活化扩孔的工艺制备煤液化沥青基多孔碳。^[1] 将煤沥青研磨过筛，与氢氧化钾按质量比 4:1 均匀混合，加入无水乙醇超声分散 30min，室温搅拌浸渍 12h。将混合物料置于真空干燥箱烘干，放入管式炉中，在氮气保护氛围下以 5℃/min 升温速率升至 800℃，恒温煅烧 2h，自然冷却至室温。产物经去离子水反复洗涤至中性，干燥后得到纯煤沥青多孔碳材料，标记为 PC。但直接高温碳化 CTP 会形成高度石墨化的软碳结构，该结构具有碳层间距较小、缺乏闭孔结构等缺陷，导致其作为钠离子电池（Sodium-Ion Battery, SIB）负极存在储钠位点少，Na⁺ 扩散缓慢等问题。^[2]

2. 氮硫共掺杂煤沥青碳材料制备：以硫脲为硫源、尿素为氮源，将煤沥青与掺杂剂按最优配比混合，采用相同煅烧工艺制备氮硫共掺杂改性煤沥青碳材料，标记为 NS-PC，探究杂原子掺杂对碳材料结构与催化性能的调控作用。

3. 镍负载氮硫共掺杂泡沫炭复合材料制备：以聚氨酯泡沫为模板，浸渍煤沥青前驱体溶液，烘干预处理后，通过二次热解制备泡沫炭基体。采用浸渍法引入镍金属活性组分，结合硫脲、尿素进行氮硫共掺杂改性，高温煅烧后得到镍-硫氮共掺杂煤沥青基泡沫炭复合材料，标记为 Ni-NS-PC，构建多级孔整体式催化结构，优化电荷传输与物质扩散效率。

（三）材料表征方法

采用 XRD 分析材料晶体结构与物相组成，判断掺杂、负载改性对碳材料晶型的影响；通过 SEM 观测材料微观形貌、孔隙结构与活性组分分散状态；利用 BET 测试材料比表面积、孔径分布与孔容参数，分析多孔结构对 CO₂ 吸附扩散的影响；借助 XPS 表征材料表面元素组成、官能团结构与元素价键状态，明确活性位点类型；通过电化学工作站测试循环伏安曲线、线性扫描伏安曲线、电化学阻抗，评价材料电化学性能；采用气相色谱仪检测 CO₂ 还原产物组分与含量，计算法拉第效率与产物选择性。

（四）CO₂ 催化还原性能测试

通过调节碳点的晶体结构和化学组成可以有效的提高其光催化性,Reisner 等通过研究发现具有更高结晶度碳核的碳点，其光吸收能力也更强，进而提高其光催化能力；^[3] 本文主要开展电催化 CO₂ 还原性能测试，采用三电极体系，以制备的碳基复合材料为工作电极，铂片为对电极，饱和甘汞电极为参比电极，0.5mol/L Na₂SO₄ 溶液为电解液。测试前持续通入高纯 CO₂ 至电解液饱和，排除空气干扰。设置不同施加电压，测试不同工况下的电流密度、产物法拉第效率与催化稳定性，系统对比纯碳材料、杂原子掺杂材料、金属复合改性材料的催化性能差异。在各种非贵金属催化剂中，铁氮掺杂碳（Fe-N-C）催化剂因其易获得、低成本、出色的催化活性和稳定性而被认为是 ORR 最有潜力的非贵金属催化剂之一。^[4]

二、结果与分析

（一）微观结构与物相分析

XRD 测试结果表明，纯煤沥青碳材料 PC 在 2θ=24°、43° 处出现典型无定形碳特征衍射峰，峰型宽泛、强度较弱，石墨化程度较低。经硫氮共掺杂改性后，NS-PC 特征衍射峰强度略有提升，碳材料石墨化程度小幅改善，无杂晶峰生成，说明杂原子掺杂未破坏碳材料基体结构。镍负载改性后的 Ni-NS-PC 样品出现微弱镍单质特征衍射峰，且峰型均匀规整，表明镍活性组分成功负载且分散均匀，无明显团聚现象，可为催化反应提供充足活性

位点。SEM 形貌观测显示，纯 PC 材料表面致密光滑，孔隙结构匮乏，比表面积较小，不利于 CO₂ 吸附与电解液扩散。杂原子掺杂后的 NS-PC 材料表面出现大量微孔、介孔结构，孔隙分布均匀，碳材料表面粗糙度显著提升。Ni-NS-PC 复合材料呈现三维

多级孔泡沫结构，兼具大孔、介孔与微孔层级结构，金属镍纳米颗粒均匀附着于碳骨架表面与孔道内部，三维贯通结构可有效加速电荷传输，缓解反应产物堆积，大幅提升催化反应传质效率。

表 1 三种煤沥青基碳材料 XRD 物相、微观形貌与孔结构特性对比

样品编号	XRD 物相特征	石墨化程度变化	SEM 微观形貌特征	孔隙结构类型	活性组分分布
PC	2 θ =24°、43° 宽弱无定形碳衍射峰，无其他杂峰	基准，石墨化程度低	表面致密光滑，孔隙稀少	几乎无微孔、介孔	无金属活性组分
NS-PC	24°、43° 碳衍射峰强度小幅升高，无杂晶峰	小幅提升，掺杂未破坏碳基体	表面粗糙，大量微孔、介孔均匀分布	微孔 + 介孔为主	无金属活性组分
Ni-NS-PC	碳特征峰强度与 NS-PC 接近，新增微弱规整 Ni 单质衍射峰，无杂质峰	小幅提升，石墨化度稳定	三维泡沫状多级孔碳骨架，镍纳米颗粒附着孔道内外	大孔 - 介孔 - 微孔三维贯通多级孔	Ni 纳米颗粒均匀分散，无团聚，活性位点丰富

（二）表面元素与官能团分析

XPS 表征结果显示，纯 PC 材料表面仅含 C、O 两种元素，含氧官能团以羟基、羧基为主，无催化活性杂原子位点。NS-PC 材料成功引入 N、S 杂原子，氮元素主要以吡啶氮、吡咯氮、石墨氮三种活性形态存在，其中吡啶氮占比最高，可有效调控碳材料表面电子结构，增强 CO₂ 分子吸附活化能力；硫元素以噻吩硫形式掺杂于碳骨架中，与氮原子形成协同效应，优化界面电荷分布。Ni-NS-PC 复合材料中 Ni 元素以金属镍

低价态形式存在，低价镍活性位点可有效降低 CO₂ 还原反应能垒，加速 CO₂ 分子活化裂解。同时，金属 - 杂原子 - 碳骨架形成强相互作用，构建稳定的多元活性位点体系，有效抑制金属活性组分脱落与团聚，提升催化剂整体稳定性。具备多孔结构的碳材料因其轻质、良好的化学稳定性、高的比表面积、优异的导电性、强劲的介电损耗能力以及环境友好等特点。^[5]表 2 PC、NS-PC、Ni-NS-PC 三种碳材料 XPS 元素组成与活性位点特征对比

样品	表面元素组成	特征活性杂原子存在形态	核心催化作用	界面相互作用特点
PC	C、O；仅羟基、羧基含氧官能团	无 N、S、金属活性位点	仅基础碳骨架，无 CO ₂ 催化活化能力	无多元协同作用
NS-PC	C、O、N、S	N：吡啶氮（占比最高）、吡咯氮、石墨氮；S：噻吩硫	吡啶氮调控电子结构，强化 CO ₂ 吸附活化；N、S 协同优化界面电荷分布	N、S 与碳骨架共价掺杂，无金属作用
Ni-NS-PC	C、O、N、S、Ni	N（吡啶氮为主）、噻吩硫、低价金属 Ni	低价 Ni 降低 CO ₂ 还原能垒，加速分子裂解；N/S/Ni 多元协同催化	金属 Ni - 杂原子 - 碳骨架强相互作用，抑制 Ni 团聚、脱落，提升催化稳定性

（三）电催化 CO₂ 还原性能分析

1. 电化学活性对比。线性扫描伏安测试结果表明，相同施加电压下，三类材料电流密度大小依次为 Ni-NS-PC>NS-PC>PC。纯 PC 材料起始还原电位高、电流密度低，电化学活性极差；杂原子掺杂后的 NS-PC 材料起始电位显著负移，电流密度明显提升；Ni-NS-PC 复合材料表现出最优电化学性能，起始还原电位最低，电流密度达到 28.6mA/cm²，远高于纯碳材料与单一掺杂材料，表明金属负载与杂原子共掺杂的协同作用可显著提升电荷传输效率与催化反应活性。

2. 产物选择性与法拉第效率。气相色谱测试结果显示，纯 PC 材料 CO₂ 还原产物以副产物 H₂ 为主，CO 法拉第效率仅为 18.5%，产物选择性极差；NS-PC 材料 CO 法拉第效率提升至 45.2%，氢气副反应被有效抑制；优化制备的 Ni-NS-PC 复合材料在最优工况下 CO 法拉第效率可达 63.5%，少量生成 CH₄ 产物，整体碳基产物选择性大幅提升。多级孔结构、多元活性位点的协同作用有效调控了 CO₂ 还原反应路径，抑制了析氢副反应，显著提升目标产物选择性。

3. 催化稳定性测试。持续循环测试 10h 后，Ni-NS-PC 复合材料电流密度衰减率仅为 7.2%，产物法拉第效率无明显波动；而单一掺杂材料与纯碳材料电流密度衰减均超过 20%。结果表明，金属 - 杂原子协同改性可增强活性组分与碳基体的结合强度，

提升催化剂结构稳定性与循环使用寿命，具备良好的工程应用潜力。

（四）催化性能影响因素分析

1. 孔隙结构的影响：煤沥青是一种含有丰富多环芳烃的复杂有机混合物，其主要成分包含酚类、多环芳烃、杂环化合物等。^[6]煤沥青衍生多级孔结构是保障高效传质的基础，微孔可提供丰富 CO₂ 吸附位点，介孔与大孔构建快速传质通道，加速电解液渗透、CO₂ 扩散与产物脱附，避免活性位点堵塞。相较于致密纯碳材料，多级孔碳基复合材料的传质效率与反应持续性显著提升。孔结构工程是解决上述碳基材料困境的有效策略，因其可提供丰富的活性表面、空腔和有效的离子通道。^[7]

2. 杂原子掺杂的协同效应：N、S 杂原子共掺杂可精准调控碳材料电子结构，打破纯碳材料电子均匀分布状态，创造丰富缺陷活性位点。吡啶氮可有效吸附 CO₂ 分子并活化 C=O 双键，噻吩硫可优化界面电荷转移速率，二者协同作用大幅降低 CO₂ 还原反应能垒，抑制析氢副反应，提升催化选择性。

3. 金属负载的增效机制：镍金属活性组分可与杂原子、碳骨架形成强耦合作用，构建高效电子传输通道，提升整体导电性。同时，金属活性位点可精准催化 CO₂ 定向还原，调控产物生成路径，显著提升目标产物法拉第效率，实现活性与选择性的双重优化。

三、催化反应机理探析

结合材料表征与电化学测试结果,可明确煤沥青衍生镍-硫氮共掺杂碳基复合材料催化 CO₂ 还原的核心机理。软化点与沥青树脂的缩合度和分子量有关,当交联剂添加量达到 30% 时,煤沥青分子已经与交联剂充分反应,继续添加交联剂对沥青树脂影响不大。^[8]其一,煤沥青基三维多级孔骨架结构提供了超大比表面积与充足反应界面,实现 CO₂ 快速吸附、扩散与富集,为还原反应奠定物质基础;其二,N、S 杂原子掺杂引入大量缺陷活性位点,调控碳材料表面电子分布,有效活化稳定的 CO₂ 分子,降低反应活化能;其三,负载镍金属与杂原子、碳基体形成多元协同活性体系,加速界面电荷快速转移,提升电子利用率;其四,金属-碳耦合结构可有效抑制活性组分团聚脱落,提升催化剂循环稳定性,持续调控 CO₂ 还原反应向生成 CO、CH₄ 等碳基产物方向进行,高效抑制析氢副反应,实现 CO₂ 高效、高选择性还原转化。

四、现存问题与优化策略

(一) 现存问题

本次实验研究与现有技术对比发现,煤沥青衍生碳基复合材料催化 CO₂ 还原仍存在部分短板:一是产物单一性不足,还原产物以 CO 为主,高附加值烃类产物选择性偏低,难以实现精准定向催化;二是高温煅烧制备工艺能耗较高,低成本绿色制备工艺有待优化;三是长期工业工况下,催化剂表面易积碳、活性位点易失活,工业稳定性仍需提升;四是杂原子掺杂、金属负载的精准调控难度大,活性位点数量与分布可控性不足。

(二) 优化策略

1. 构建多元异质结构:煤系沥青衍生碳材料因其结构可调和导电性高等特点,被广泛应用于锂离子电池负极材料。^[9]通过双金

属负载、半导体复合改性,精准调控催化剂能带结构与反应活性中心,优化 CO₂ 还原反应路径,提升 C₂+ 等高附加值产物选择性,实现产物定向可控转化。其中氧元素的引入可抑制碳层的有序排列,促进碳层的移动和折叠,说明预氧化可以促进无定形结构的形成。^[10]

2. 优化绿色制备工艺:引入低温活化、微波辅助煅烧等新工艺,替代传统高温煅烧模式,降低制备能耗;优化掺杂、负载工艺参数,实现活性位点的精准可控构筑,提升材料制备重复性与稳定性。

3. 强化催化剂抗失活改性:通过表面包覆、界面修饰等手段,提升催化剂抗积碳、抗腐蚀能力,优化工况适应性,延长工业使用寿命;完善催化剂再生工艺,实现催化剂循环复用,降低应用成本。

4. 精准调控改性参数:系统探究煅烧温度、保温时间、掺杂配比、金属负载量对材料结构与性能的影响,建立工艺参数-微观结构-催化性能的关联模型,实现高性能催化剂的定向制备。

五、结束语

本文以廉价煤沥青为碳源,通过模板法、高温活化、杂原子共掺杂、金属负载改性制备了系列碳基复合材料,系统探究了材料微观结构、表面特性与 CO₂ 电催化还原性能的构效关系与催化机理。研究表明,纯煤沥青碳材料催化活性、选择性极差,经硫氮杂原子掺杂可有效优化孔隙结构、创造缺陷活性位点,提升 CO₂ 活化能力与催化效率;镍-硫氮共掺杂多级孔泡沫炭复合材料凭借三维贯通多级孔结构、丰富多元活性位点、优异的电荷传输性能,展现出最优的 CO₂ 还原催化性能,相较于纯碳材料,法拉第效率、电流密度与循环稳定性均大幅提升,可有效抑制析氢副反应,实现 CO₂ 高效资源化转化。

参考文献

- [1] 郭鑫玉. 煤直接液化沥青衍生碳复合材料的制备及其吸波性能研究 [D]. 西安建筑科技大学, 2024.DOI: 10.27393/d.cnki.gxazu.2024.000900.
- [2] 赵丹. 煤沥青基炭材料微观结构设计及储钠性能研究 [D]. 太原理工大学, 2025.DOI: 10.27352/d.cnki.gylgu.2025.000016.
- [3] 白金鹏. 煤基碳材料的制备与结构调控及其可见光解水产氢性能 [D]. 大连理工大学, 2022.DOI: 10.26991/d.cnki.gdllu.2022.003606.
- [4] 同博. 煤沥青衍生碳基过渡金属电催化剂的制备及其氧还原性能研究 [D]. 石河子大学, 2020.DOI: 10.27332/d.cnki.gshzu.2020.000920.
- [5] 李瑞. 石油沥青衍生轻质多孔碳基吸波材料的制备及性能研究 [D]. 中国石油大学(北京), 2021.DOI: 10.27643/d.cnki.gsybu.2021.000933.
- [6] 吴耀锋. 煤沥青基多孔碳材料的制备及其吸波性能研究 [D]. 长安大学, 2024.DOI: 10.26976/d.cnki.gchau.2024.001745.
- [7] 江野. 煤沥青基碳材料的缺陷调控及其储钠性能研究 [D]. 中国矿业大学, 2024.DOI: 10.27623/d.cnki.gzkyu.2024.001728.
- [8] 王玉伟. 煤沥青基钠离子电池负极材料制备与性能研究 [D]. 大连理工大学, 2018.
- [9] 刘畅, 杨云磊, 王乐, 等. 煤沥青族组分衍生碳储钾性能研究 [J]. 洁净煤技术, 2025, 31(2): 162-170.DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.YS24120402.
- [10] 郭玮佳. 沥青基碳材料的制备及其储钾性能研究 [D]. 中国矿业大学, 2022.DOI: 10.27623/d.cnki.gzkyu.2022.001056.
- [11] Jermwongratanaichai T, Jacobs G, Shafer D W, et al.Fischer-Tropsch synthesis: TPR and XANES analysis of the impact of simulated regeneration cycles on the reducibility of Co/alumina catalysts with different promoters (Pt, Ru, Re, Ag, Au, Rh, Ir)[J].Catalysis Today, 2014, 22815-21.DOI: 10.1016/j.cattod.2013.10.057.
- [12] Jermwongratanaichai T, Jacobs G, Shafer D W, et al.Fischer-Tropsch synthesis: TPR and XANES analysis of the impact of simulated regeneration cycles on the reducibility of Co/alumina catalysts with different promoters (Pt, Ru, Re, Ag, Au, Rh, Ir)[J].Catalysis Today, 2014, 22815-21.DOI: 10.1016/j.cattod.2013.10.057.
- [13] Hadi B, Somayeh T, Garkani F N, et al.Electroanalytical performance of hierarchical nanostructures of MgCo₂O₄ on reduced graphene oxide modified screen-printed electrode for the sensitive determination of Sudan I[J].International Journal of Environmental Analytical Chemistry, 2023, 103(19): 7647-7665.DOI: 10.1080/03067319.2021.1974422.
- [14] Wang R, Zhang J, Liu Y, et al.Thermal performance and reduction kinetic analysis of cold-bonded pellets with CO and H₂ mixtures[J].International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials, 2018, 25(7): 752-761.DOI: 10.1007/s12613-018-1623-6.

新形势下建筑工程施工现场质量管理优化研究

邹强¹, 于月琴²

1. 兴化市文化旅游发展有限公司, 江苏 兴化 225700

2. 兴化市农水资源投资开发有限公司, 江苏 兴化 225700

DOI:10.61369/ERA.2026080004

摘 要 : 监管趋严、工业化转型与数字化渗透对建筑工程施工现场质量管理形成多维挑战。本研究以现场质量管理特征为出发点, 结合全面质量管理与 PDCA 循环, 诊断出体系运行脱节、关键节点控制虚化、人员技能断层等突出问题, 并从管理碎片化、技术滞后、工期成本约束等维度剖析成因。进而提出体系精细化与全过程节点控制、人员技能与信息化监测协同的优化路径, 并辅以制度合同、专项资金及绩效评估闭环保障, 旨在增强现场质量管理的预防性与过程受控水平。

关 键 词 : 施工质量; 现场管理; 精细化管控; 过程受控

Research on Optimization of Quality Management in Construction Project Sites under New Circumstances

Zou Qiang¹, Yu Yueqin²

1.Xinghua Cultural Tourism Development Co., Ltd., Xinghua, Jiangsu 225700

2.Xinghua Agricultural and Water Resources Investment and Development Co., Ltd., Xinghua, Jiangsu 225700

Abstract : With stricter supervision, industrialization transformation and digital penetration, quality management in construction project sites has faced multi-dimensional challenges. This study takes the characteristics of on-site quality management as the starting point, combines total quality management and PDCA cycle, diagnoses prominent problems such as disconnection of system operation, virtual control of key nodes, and skill gaps among personnel, and analyzes the causes from dimensions such as fragmented management, technological lag, and constraints on project duration and cost. Then, it proposes optimized paths of refined system and process control of nodes, and personnel skills and information-based monitoring, and is supplemented by institutional contracts, special funds, and performance evaluation closed-loop guarantees, aiming to enhance the preventive nature and process control level of on-site quality management.

Keywords : construction quality; on-site management; refinement control; process control

引言

随着建筑行业监管框架收紧、工业化建造方式加速渗透以及数字化技术深度介入, 加之人们对建筑工程质量要求持续提升, 施工现场质量管理所依托的外部条件与内生需求均发生显著变化。新技术、新工艺、新材料的广泛应用在提升施工效率的同时, 也使质量控制难度明显增加。传统以结果检验为主导的管控模式在工序实时受控、过程可追溯及多专业协同等方面逐渐显露局限。施工现场作为质量问题萌发与累积的主要环节, 其管理效能在很大程度上决定着工程实体质量的底线。基于此, 本研究聚焦新形势下的施工现场质量管理, 在对相关理论与现状问题进行梳理的基础上, 探索系统化优化路径与保障机制, 以期为提升过程预防能力与精细化管理水平提供参考。

一、施工现场质量管理相关理论与新形势下的要求

(一) 建筑工程施工现场质量管理的基本概念与特征

建筑工程施工现场质量管理, 是指在工程项目实体建造阶段, 以设计文件、施工规范及合同约定为基准, 对影响工程质量的作业条件、工艺过程和中间成果实施系统化控制的管理活动。它的本质是把质量标准转变成为现场操作行为的一个过程, 存在

着三个比较明显的特征。第一个特征是具有动态性, 施工环境、人员组合以及作业面一直都在发生变化, 质量控制必须要随着工序的流转在实时的情况下进行跟进。第二个特征是有多界面交叉性, 土建、机电、装饰等这些专业在同一个空间交替开展施工, 质量责任往往在工序交接的地方变得模糊。第三个特征是具有不可逆性, 隐蔽工程一旦被覆盖就很难进行追溯, 对过程验证的即时性提出了严格的要求^[1]。准确地对上述这些特征进行把握, 是识

别管理当中薄弱环节、构建适应新形势要求的现场质量管控体系的前提条件。

（二）全面质量管理与 PDCA 循环理论的适用性分析

全面质量管理着重强调全员参与、全过程控制以及持续改进，它的核心理念和建筑工程施工的现场在质量方面的管理的需求高度相契合。施工的现场并不是孤立的作业单元，而是由多工种、多工序交叉所构成的动态系统，任何一个环节出现疏漏都有可能引发系统性的质量缺陷，所以把质量责任从专职质检人员扩展到全体作业以及管理主体，具有现实方面的必要性。PDCA 循环也就是计划、执行、检查、处理这四个阶段的迭代过程，给现场质量管理提供了可以操作的运行框架。在施工准备的阶段明确质量目标以及控制标准，在施工的过程当中依据标准去执行并且实时地进行纠偏，工序完成之后进行效果验证，把遗留的问题纳入到下一循环当中去加以解决，形成螺旋式上升的改进机制^[2]。两种理论结合，有助于转向以预防为主、过程受控的主动管理格局。

（三）新形势对施工现场质量管理带来的多维影响

新形势对施工的现场在质量方面的管理形成多重叠加的影响。在监管这个层面，质量终身责任追溯以及信用惩戒机制变得更加严格，迫使现场管理从被动应付转变为实质受控。新型建筑工业化推动管理重心往前移动，装配式构件连接精度以及节点密实度检验成为现场管控的关键环节。数字化转型要求质量记录从纸质存档转变为实时数据采集以及远程监测，管理时效性标准有了显著的提高。劳动力结构高龄化和技能断层同时存在，经验型把控模式难以继续下去。绿色施工标准提升则把环境绩效纳入到过程监管当中，质量管理的外延明显地得到了拓展。上述这些变革相互交织在一起，要求现场质量管理从单一技术控制转变为制度、技术、人员以及环境协同治理^[3]。

二、新形势下施工现场质量管理现状与突出问题诊断

（一）现行质量管理体系运行的实际状况与适应性困境

当前多数项目虽已建立涵盖质量责任制、技术交底和“三检”制的管理框架，但运行中仍显脱节。质量计划与现场操作“编做分离”，检查偏重结果复核，自检互检流于形式。且现有体系缺乏匹配装配式建造与数字化管理的配套流程，现场管理整体滞后于生产变革^[4]。

（二）施工过程关键环节质量缺陷的主要表现

施工过程当中关键环节的质量缺陷集中地呈现在材料验收、隐蔽工程验收以及工序交接这三个节点上面。在材料验收管控这个方面，进场复验的执行情况不够严格，有一部分项目用产品合格证来替代现场的实测操作，对于批次差异以及存储条件所引发的性能衰减情况缺乏跟踪，最终导致不合格的材料流入到了作业面。在隐蔽工程验收这个环节，钢筋规格间距、混凝土浇筑之前的模板清理以及管线预埋等这些工序在覆盖之前的验证工作趋于形式化，没有留存可以进行追溯的影像记录，后期质量责任的界定工作比较困难。在工序交接检验过程中，不同专业之间的移交

缺少书面确认，移交方遗留的偏差未及处理便被后续工序掩盖，从而造成误差累积^[5]。

（三）问题成因的深层剖析

问题成因可从四个层面剖析。一是管理碎片化：计划、控制与反馈分属不同主体，信息断点致使溯源困难、责任推诿频发。二是技能与意识脱节：劳务分包下作业人员凭经验施工，对规程理解不足，自检互检流于形式。三是技术手段滞后：多数项目仍靠目测及传统量具，检测覆盖面有限，难以及时捕捉过程波动。四是工期成本被不合理压缩：赶工取消工序间歇，问题未及整改即被隐蔽；低价中标进一步挤占质量投入。上述成因交织，构成现场质量管理的结构性障碍^[6]。

三、新形势下施工现场质量管理的优化路径

（一）质量管理体系精细化与全过程关键节点控制

质量管理体系的精细化与全过程关键节点控制，需从责任锁定、过程把关和源头追溯三个层面协同推进。在责任体系这一方面，应该把质量责任按照岗位逐个进行分解，去建立工序质量实名追溯以及考核的闭环，从而解决责任主体模糊不清这样的问题。在过程控制这一方面，要严格去执行材料进场联合验收、样板引路、隐蔽工程举牌验收以及成品保护这些制度，以此确保关键节点的质量状态能够被验证、能够被倒查。在源头管理这一方面，要通过对供应商进行动态评价、对进场材料进行唯一性标识以及对质量证明文件进行闭环核验，来阻断不合格材料流入到作业面，进而形成覆盖从供应链到作业面的全链条管控的格局^[7]。

（二）人员技能提升与信息化监测技术的协同应用

人员技能提升与信息化监测协同，旨在弥合作业能力与过程管控的断层。人员层面，建立实名培训档案，将班前质量交底标准化、可视化，确保作业人员准确掌握工序控制要点，并推行技能等级与质量绩效挂钩，推动操作精度转化为行为自觉。技术层面，借助 BIM 开展工序碰撞检查与可视化交底，消除图纸理解偏差；利用物联网传感器对混凝土养护温度、模板位移等关键参数实施实时监测与异常预警，同时对施工记录进行数字化归档，构建不可篡改的过程数据链。二者联动，数字化记录可追溯至具体人员，培训档案与实测数据得以互证，推动技能考核从应试记录转向施工实绩评价^[8]。

四、优化方案实施的保障条件与效果评估框架

（一）组织制度与合同约束层面的保障

优化方案的实施首先要依靠组织制度以及合同约束层面的刚性保障。在组织这个层面，应该成立由项目负责人直接进行分管的质量管理专项小组，把精细化管控和信息化应用纳入到岗位职责说明书当中，并且修订质量奖惩的办法，明确考核兑现的规则。在制度这个层面，需要把关键节点控制的标准、人员技能考核以及数字化记录的要求嵌入到质量管理手册当中，形成可以执行的操作流程。在合同约定这一方面，在和劳务分包以及专业分

包签订的合同当中增设质量专项条款，就工序交接、隐蔽验收影像留存、材料溯源等设定违约追责的细则，把管理要求转变为契约义务，为优化措施的落地提供可以追溯的制度依据^[9]。

（二）技术资源与专项资金投入的保障

技术资源以及专项资金的投入是优化方案落地的基础支撑。在技术资源配置这一方面，需要根据项目质量风险的特征，有针对性地配备智能化监测设备，这些设备包括物联网传感器、数字回弹仪以及影像采集终端，并且搭建数据集成平台，确保质量信息能够实时采集和存储。同时，应该编制数字化操作手册，建立设备校准和数据管理的规程，保障技术工具应用的规范性和可靠性。预算单列质量专项经费，覆盖设备、运维、培训与绩效奖励，实行专款专用和动态核销，以杜绝成本压缩导致的措施衰减。

（三）基于关键指标的质量绩效动态评估与持续改进闭环

以关键指标为依据来进行的质量绩效动态评估和持续改进所形成的闭环，属于验证优化方案实效性的核心机制。在评估这个层面上，应该把一次验收合格的比率、工序交接出现缺陷的比率、质量整改响应的时效以及材料溯源完整的比率等能够进行量化的指标提取出来，按照周度作为单位来开展统计分析的工作，并且和优化实施之前的基线数据做对比^[10]。在改进闭环这个层

面上，针对偏差的项目马上启动对原因的追溯以及采取纠正的措施，把处置之后的结果归入到下一周期的评估当中，形成“监测—比对—纠偏—验证”这样的循环迭代情况，推动现场的质量管理从依靠经验来做判断朝着依靠数据来驱动的精细化治理方向转变。

五、结论

综上所述，本研究围绕新形势下建筑工程施工现场质量管理展开相关研究，得出下面这些主要的结论。第一，行业监管的强化、工业化的转型以及数字化的升级对现场质量管理形成了多维度的驱动，传统的被动式管控模式已经难以继续维持下去。第二，当前比较突出的问题集中体现在体系文件和执行出现脱节、关键节点控制变得虚化以及人员技能出现断层，深层次的原因涉及管理碎片化、技术手段滞后以及不合理的工期成本约束。第三，优化应该把管理体系精细化以及全过程节点控制当作核心，同时推进人员技能提升以及信息化监测的协同应用，并且加上制度合同、专项资金以及绩效评估闭环作为实施的保障。本研究存在的局限之处在于对不同类型的工程项目的差异化分析还不够深入，未来可以在这个基础上进一步细化分类开展研究。

参考文献

[1] 杨正纲. 新形势下如何加强建筑工程施工质量监督管理 [J]. 建设机械技术与管理, 2022, 40(2): 56-58.
[2] 张学昶. 新形势下高层建筑施工现场质量与安全管理的探析 [J]. 大众标准化, 2022, 36(1): 102-104.
[3] 于佛财. 新形势下房屋建筑工程中的施工现场管理 [J]. 科技创新与应用, 2023, (6): 200-202.
[4] 石宁. 新形势下建筑工程施工现场管理 [J]. 居舍, 2022, (4): 123-125.
[5] 任怀强. 新形势下高层建筑施工现场质量与安全管理的要点分析 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2024, 14(8): 55-57.
[6] 刘文涛. 新形势下建筑工程管理信息化建设探讨 [J]. 花炮科技与市场, 2022, 28(3): 50-52.
[7] 邓永. 新形势下高层建筑施工现场质量与安全管理的要点 [J]. 建材与装饰, 2023, 29(7): 45-47.
[8] 左裕南. 新形势下建筑工程施工质量管理的现状及优化策略 [J]. 住宅与房地产, 2023, 33(4): 78-80.
[9] 黄尧. 新形势下高层建筑施工现场质量与安全管理的要点分析 [J]. 四川建材, 2024, 45(2): 105-107.
[10] 姚功彬. 新形势下建筑工程施工质量监督与管理 [J]. 居舍, 2022, (5): 87-89.

建筑给水 PPR 管道热熔虚焊缺陷成因及预防研究

王博宇

鞍山冶金集团建筑安装有限公司, 辽宁 鞍山 114031

DOI:10.61369/ERA.2026080012

摘 要 : 建筑给水 PPR 管道热熔过程中易发生虚焊现象, 造成管道接口处漏水, 缩短使用寿命, 热熔过程温度控制不当、加热时间掌握不准、施工人员操作不规范、管材外表面有污物等都会导致虚焊, 多种因素综合作用使得管道更容易出现问题, 在了解热熔施工相关参数、步骤及施工现场情况后可找到虚焊原因, 从而有效预防该类问题的发生, 良好的管道热熔连接可以提高管道的气密性, 减少日后维护的成本, 消除建筑给水系统的问题, 保证建筑内正常用水。

关 键 词 : PPR 管道; 热熔连接; 虚焊缺陷; 施工质量; 可靠性

Research on the Causes and Prevention of Hot-Melt Poor Welding Defects in PPR Pipes for Building Water Supply Systems

Wang Boyu

Anshan Metallurgical Group Construction and Installation Co., Ltd. Anshan, Liaoning 114031

Abstract : During the hot-melt process of PPR pipes for building water supply systems, poor welding is a common issue that leads to leakage at pipe joints and reduces service life. Factors such as improper temperature control during hot-melting, inaccurate heating duration, non-standard operating procedures by construction personnel, and contaminants on the pipe surface can all contribute to poor welding. The combined effect of these factors increases the likelihood of pipeline failures. By understanding the relevant parameters and procedures of hot-melt installation along with site conditions, the causes of poor welding can be identified, enabling effective prevention of such issues. Proper hot-melt pipe connections enhance air tightness, reduce future maintenance costs, eliminate problems in building water supply systems, and ensure reliable water supply within buildings.

Keywords : PPR pipe; hot-melt joint; false soldering defect; construction quality; reliability

引言

建筑给水系统正常工作离不开管道连接质量优良, 而 PPR 管因为其具有很强耐腐蚀性及方便快捷等特点得到普及应用, 在热熔连接时经常出现虚焊现象造成漏水、维修频繁、使用寿命降低等问题, 虚焊是由于加热时间和温度不当, 但是也跟施工过程是否规范、管材表面清理情况以及施工环境有关, 虽然这些影响因素比较细小但是在长期使用中容易引起较大问题而增大建筑给水系统风险, 通过对虚焊原因进行详细研究可以帮助我们在施工中更好地预防虚焊产生, 提高管道连接可靠性和系统安全性, 保障供水安全和工程品质。

一、热熔连接虚焊现象分析

(一) 管道接口渗漏表现

建筑给水 PPR 管道系统的虚焊问题, 直观体现为管道接口渗漏, 管材热熔部位出现渗水、滴水现象, 代表管材融合效果不足, 管壁缝隙未完全闭合, 这类故障可在施工完工后即刻显现, 也会在管道通水运行后慢慢显露, 接口潮湿、周边积水都是典型症状^[1]。管道持续运行过程中, 水压变化会扩大缝隙, 加快渗水速度, 造成接口松动, 管道渗水会干扰正常供水状态, 侵蚀墙体、地面等建筑结构, 提升后续检修作业的难度, 渗漏位置大多较为

隐蔽, 日常巡检难以排查, 通常在水压异常、结构湿损后才会被察觉, 热熔施工质量直接决定接口使用效果, 施工操作与管材处理的疏漏, 会直接影响整套给水系统的运行安全。

(二) 施工中缺陷频发类型

PPR 管道热熔施工会产生多种虚焊缺陷, 接口熔合不均、焊口气泡与管材变形为常见问题, 管道加热温度偏低或时长不足, 焊口熔合不充分, 会形成局部虚焊区域; 加热过度会使管材软化塌陷, 造成接口结构松散, 施工手法不稳、受力不均会在接口生成细微缝隙, 管道长期承压运行易出现渗水问题。管材表面附着的油污、粉尘与水汽会阻碍熔合进程, 催生气泡与孔洞, 工

程缺陷分布虽存在随机性，同批次施工集中出现问题的现象较为普遍，施工环境、材料品质与工艺管控水平直接影响缺陷发生概率，各类缺陷特征的分析，能够为现场质量管控提供对应参考。

（三）长期使用对管道影响

PPR 管道虚焊缺陷会削弱接口密封性能与结构稳定性，对管道长期使用造成不良影响，水压持续作用会扩张渗漏点位，使接口位置产生应力集中，滋生微裂纹或出现松动，降低管道整体承压性能，水流持续冲刷虚焊区域会加剧管材磨损，小幅缺陷会逐步发展为漏水、断裂等严重故障。建筑管道的隐性损伤会长期累积，不仅抬高维修成本，还会造成水资源损耗，衍生各类安全隐患，虚焊问题会降低供水稳定性，带来结构浸水、腐蚀等风险，持续放大工程安全隐患，管道初期热熔施工质量，决定给水系统长期运行的稳定与安全，施工阶段的缺陷管控具备关键工程价值。

二、影响虚焊的关键因素

（一）加热温度与时间控制

PPR 管道热熔连接质量取决于加热温度与加热时间，低温工况下管材表层熔合不足，焊口难以形成均匀熔层，残留细微空隙引发接口渗水，温度过高会造成管材过度软化，弱化接口承压能力，引发管材变形与塌陷问题，加热时长不足无法满足熔合需求，时长超标则会加剧材料应力，造成焊口脆化、缩孔等问题^[2]。施工现场人员经验、环境温度与设备状态的差异，会造成温控、时控标准不一，导致接口质量参差不齐，规范把控加热参数，能够保障焊口密封效果，稳定管道长期承压性能，减少虚焊与渗漏问题的出现。

（二）操作技术及施工规范

施工操作技术与作业流程把控，直接影响 PPR 管道热熔接口的可靠程度，施工施力不均、对接速度把控不当，会造成焊口熔合不实，管材接触面存在缝隙，水压长期作用下会逐步发展为渗漏，不规范焊接顺序与操作方式会让接口产生薄弱区域，提升管道长期运行的失效概率，管道定位、对口贴合及焊后冷却等工序未按标准落实，会造成接口偏移、应力集中，降低热熔连接品质。

（三）管材表面与环境条件

管材表面状态与施工环境会干扰热熔焊接成型质量，管材表面附着灰尘、油污、水汽，会阻碍熔合层成型，造成接口气泡、空洞及局部熔合缺失，环境温湿度与通风状态会改变管材加热、冷却效率，低温易造成管材受热不均，高湿度会在焊口形成水膜阻碍熔合。风力与扬尘会污染焊接接触面，提升细微缺陷出现概率，各类环境条件会改变管材胀缩速率，使接口产生应力集中，形成易渗漏薄弱区域，多项因素叠加让虚焊缺陷具备不确定性与隐蔽性，管道投入使用后渗漏风险会持续升高。

三、虚焊形成机理探讨

（一）材料热膨胀与熔合过程

PPR 管材热膨胀特性主导热熔焊接成型质量，管材加热时表

层快速熔融而内部软化滞后，易造成熔合层厚度不均、融合效果失衡，受热膨胀产生的细微应力，会因温控与时长把控不当无法均匀释放，造成熔合区域厚薄不均，削弱焊接结构强度^[3]。管材冷却阶段，收缩速率与熔合层厚度的差异会催生接口微缝隙，埋下虚焊与渗漏隐患，热量传递失衡会造成局部融合不足，形成内部空洞，管材热物理属性、壁厚尺寸及接口构造都会改变热量分布，细微偏差即可诱发微观虚焊缺陷，管材焊接品质除受外部操作参数影响，也和自身热响应特性密切相关，接口稳定效果依托于加热与冷却流程的精准匹配^[4]。

（二）界面接触不充分原因

管材接口接触不足是引发虚焊的核心原因，管道对接时，加热温度不均或施力不合理，会造成管材表面贴合不全、接触面积减小，产生细微间隙，接口错位、角度偏移会引发局部压力集中，阻碍熔合层均匀渗透，管材表面附着的灰尘、水分及油污，会干扰分子熔合与界面扩散，降低焊口结构强度。贴合不足的接口受水压持续作用易产生微裂纹，逐步发展为渗漏缺陷，焊接操作节奏与冷却环境同样影响融合质量，快速冷却与温度波动会加重接口接触缺陷，界面接触不良会造成熔合层厚薄不均、内部空洞等微观问题，初期不易察觉，会在系统承压运行后逐步显现为渗漏故障，损害管道运行可靠性，缩短设备使用寿命^[5]。

（三）微观缺陷发展规律

虚焊的微观形成具备固定演化规律，大多起源于微小空洞、气泡及局部未熔合区域，初期细微缺陷会在水压作用下产生应力集中，促使孔洞扩张并催生材料微裂纹，管道长期运行中，水流冲刷与温度变动会加速缺陷延展，扩大渗漏范围并持续弱化接口强度，缺陷分布虽无固定规律，高危问题多集中于熔合层薄弱、接口受力失衡的位置^[6]。微观缺陷的发展，关联管材热膨胀特性、熔合层厚度差异与现场施工操作，缺陷演化过程能够体现，接口强度衰减速率，随初始缺陷尺寸与分布密度增大而提升，长期运行累积效应证明，管道系统稳定性取决于微观缺陷管控质量，微小空洞与熔合不良问题会逐步发展为显性故障，干扰供水体系运行，缩减管道使用年限。

四、预防及控制措施策略

（一）热熔工艺优化方法

管道热熔连接质量主要由工艺参数决定，加热温度、加热时间和接口挤压程度需要相互配合，使管材表面完全熔化并且有良好的熔合层，通过对加热设备温度进行监控并及时做出相应改变^[7]，可以防止因局部过热或者加热不够造成假焊现象出现；而针对不同管径及壁厚选择合适加热时间，可以使接口良好熔合同时不会出现过度软化或塌陷情况，在焊接时还要注意加热与降温速度，如果降温过快会造成材料收缩不均从而产生细小裂缝。另外改善热熔工艺还应注意工人施力是否均匀以及接口是否准确对齐，合理设置工艺参数并加强工人技能培训可以使局部熔合不良问题大大减少，提高焊口强度及气密性，在施工中就可以大大降低假焊发生的可能性，从而使整个管道系统在长时间使用下仍能

保持良好工作状态^[8]。

（二）施工操作标准化

施工操作规范化是保证热熔接口质量的重要因素，按规范进行施工可降低由于人为原因导致虚焊问题发生概率，在管材对接之前必须保证接口干净整洁、位置正确无误，在焊接过程中要施加适当的压力，让熔化部分能够很好地进入接口之间，形成良好的熔合面，操作速度要适中，不能过快也不能过慢以免出现某处焊接不良或者产生较大的内应力，另外施工人员还要了解管材性质以及焊机性能等知识^[9]，经过系统的培训和学习后，可以降低施工人员技术水平不同所造成的质量问题。焊接完成后对接头进行冷却时也要注意平稳放置，不得受到外部影响或者温度变化，以保证熔合面良好凝固，并且施工中还需要有相应的检查制度，以便及时发现并处理存在问题。

（三）施工环境与材料准备

管材表面状态与施工环境对热熔连接质量影响极大，施工前需清理管材表面油污、灰尘等杂质并保持干燥，减少界面熔合阻碍，施工现场需维持合适的温湿度与通风环境，低温会降低加热效率，高湿、强风易造成管材表面冷却不均，管材存放与搬运方式同样关乎焊接品质，长期暴晒或受潮会改变表层性能，提升微缺陷产生概率。施工场地需保持洁净，避免杂物、水分附着于焊接区域，同时定期检修焊接设备，保障温控与压力稳定，相关举措可促进接口均匀熔合，减少空洞与未熔合问题，提升焊接合格率，强化管道密封性能与耐久度，降低虚焊对系统长期运行的不良影响^[10]。

五、管道连接可靠性提升

（一）缺陷检测与质量监控

管道热熔接口可靠性，依托缺陷及时排查与质量监控工作的落地，施工完成后的接口可通过目视查验、压力测试、无损探伤等方式，排查焊口微裂纹、空洞及未熔合区域，检测工作需核查接口平整度、焊缝完整度与焊接深度，细微异常均可能在长期运行后引发渗漏故障，质量监控覆盖施工及管道运维阶段，可依托数据记录与压力波动分析判定接口运行状态。监控体系可及时反馈施工偏差与材料缺陷，实现问题早发现、早处置，规避各类潜在风险，完善的检测与监控机制，能够稳定管道接口性能，降低

渗漏发生率，提升供水系统运行品质，保障建筑给排水长期安全运行。

（二）长期运行安全保障

管道接口长期运行状态，能够直观体现热熔质量与施工规范程度，接口初始微缺陷会随水压、温度及流速变化逐步扩张，削弱系统整体承压性能，状态稳定的接口可维持管道密封效果，缓解应力集中与材料疲劳，减少渗漏、破裂故障，优化热熔工艺、提升焊接均匀性并强化施工管理，可有效提升管道耐压与耐久性。运维阶段定期核查焊口状态与水压变化，能够提前排查隐患，遏制缺陷持续发展，管道长期运行安全依托施工管控与运行监测双重保障，可让管道适配长期水压与环境变化，维持供水系统稳定可靠，缩减运维与更换成本，规避对周边环境的各类潜在损害。

（三）施工质量对系统稳定性影响

施工质量是 PPR 管道系统稳定运行的核心关键，接口焊接精度、工艺参数把控及操作规范落实情况，直接决定焊口密封效果与结构强度，优质施工能够减少微缺陷生成，保障接口长期承压运行不出现渗漏、松动问题，接口清洁、对口精度、施力力度与冷却时长等施工细节，都会对焊口性能形成累积影响。施工中的细微偏差会在管道运行中持续放大，干扰供水效果并缩减设备使用寿命，优质施工配合科学现场管理，可搭建稳定可靠的管道管网，长期维持接口强度与密封性能，降低故障发生概率，保障建筑供水系统平稳运行，为后期运维管理提供有力支撑。

六、结语

PPR 管道热熔虚焊缺陷由材料特性、工艺参数、施工操作及环境条件共同引发，管材加热、熔合与冷却阶段产生的细微应力和界面不均，会形成微观空洞与未熔合区域，长期运行后逐步发展为渗漏与接口失效，优化热熔工艺、规范施工流程、管控环境与材料状态，能够提升接口熔合均匀度与密封性能。系统的缺陷检测与质量监控可提前排查隐患，保障管道长期运行安全，施工质量直接关联管道使用可靠性，完善的施工管理与技术把控可降低虚焊概率，提升建筑给水系统耐久性能，为稳定供水提供可靠保障。

参考文献

- [1] 宋诚. 市政燃气 PE 管道热熔连接施工技术标准的关键参数 [J]. 大众标准化, 2025, (24): 7-9.
- [2] 余华林, 李艳芳, 郑先伟. 冷热水管道用 PPR 材料结构与性能的研究 [J]. 合成材料老化与应用, 2025, 54(02): 4-7.
- [3] 王仕杰. PPR 给水管热熔操作技术探讨 [J]. 中国设备工程, 2024, (06): 224-226.
- [4] 刘魁, 王玉梅. PPR 管材料中的乙烯对产品性能的影响 [J]. 炼油与化工, 2023, 34(02): 66-69.
- [5] 徐丽霞, 刘丽霞, 杨耀东, 等. 基于趋势分析法的虚焊缺陷热像数据处理技术 [J]. 红外技术, 2022, 44(09): 979-985.
- [6] 王仕杰. PPR 给水管热熔操作技术探讨 [J]. 中国设备工程, 2024, (06): 224-226.
- [7] 刘魁, 王玉梅. PPR 管材料中的乙烯对产品性能的影响 [J]. 炼油与化工, 2023, 34(02): 66-69.
- [8] 姚水良. PPR 抗结垢管. 浙江省, 浙江爱康实业有限公司, 2022-11-25.
- [9] 蓝斌. 抗菌抗藻复合型 PPR 管道系统开发. 河北省, 宏岳塑胶集团股份有限公司, 2021-02-01.
- [10] 骆正山, 姚梦月, 骆济豪, 等. 基于 PCA-BAS-PPR 的海底管道外腐蚀速率预测模型 [J]. 材料保护, 2019, 52(10): 64-69+74.

山西应县木塔木结构受力分析初探

李治奇¹, 李海燕², 王琛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 2V7

2. 山西中阳钢铁有限公司焦化厂, 山西 吕梁 033400

3. 辽阳市第四中学校办工厂, 辽宁 辽阳 111018

4. 鞍钢铁西医院新华门诊部, 辽宁 鞍山 114033

5. 中冶焦耐(大连)工程技术有限公司, 辽宁 大连 116085

DOI:10.61369/ERA.2026080017

摘 要 : 山西应县佛光寺释迦塔(俗称“应县木塔”)是世界上现存最高、最古老的木结构楼阁式塔,至今已有近千年历史。作为中国古代木结构营造技艺的集大成者,木塔以“层叠平台式梁柱结构”体系、数以千计的斗拱和数万榫卯节点,构成了一部独特的“活的力学教科书”。然而,在长期的环境侵蚀、地震、风载以及过往不当修缮等多重因素作用下,木塔已呈现出显著的整体倾斜与局部构件残损,其结构安全问题成为当前文物保护领域最紧迫且复杂的挑战之一。本文试从结构体系辨识、关键节点力学特性、结构性能评估与建模分析技术,以及当前面临的保护困境等几个方面,对应县木塔的木结构受力分析现状进行初步梳理与探讨,以期为后续深入研究提供参考。

关 键 词 : 应县木塔; 受力分析; 层叠平台式结构; 斗拱; 榫卯节点; 有限元分析

An Initial Investigation of the Load-bearing Analysis of the Wooden Structure of the Wooden Pagoda in Yingxian, Shanxi Province

Li Zhiqi¹, Li Haiyan², Wang Chen³, Li Yuhong⁴, Li Guomian⁵

1.Kaitisi Design Company, Toronto, Canada, Toronto, Canada M4V 2V7

2.Shanxi Zhongyang Steel Co., Ltd. Coking Plant, Lvliang, Shanxi 033400

3.Liaoyang No.4 Middle School Industrial Workshop, Liaoyang, Liaoning 111018

4. Ansteel West Hospital – Xinhua Outpatient Department, Anshan, Liaoning 114033

5. Zhongye Jiaonai (Dalian) Engineering Technology Co., Ltd., Dalian, Liaoning 116085

Abstract : The Sakyamuni Pagoda at Foguang Temple in Ying County, Shanxi (commonly known as the "Ying County Wooden Pagoda") is the tallest and oldest surviving wooden pavilion-style pagoda in the world, with a history of nearly a millennium. As a masterpiece of ancient Chinese wooden construction techniques, the pagoda employs a "tiered platform-style beam-and-column structure," thousands of dougong brackets, and tens of thousands of mortise-and-tenon joints, forming a unique "living textbook of mechanics." However, due to prolonged environmental erosion, earthquakes, wind loads, and inadequate restoration efforts, the pagoda exhibits significant overall tilting and localized structural damage, making its structural safety one of the most pressing and complex challenges in cultural heritage conservation. This paper provides a preliminary review and discussion of the current state of structural force analysis for the Ying County Wooden Pagoda, covering aspects such as structural system identification, mechanical characteristics of critical nodes, structural performance evaluation and modeling techniques, as well as the prevailing conservation challenges, aiming to serve as a reference for further in-depth research.

Keywords : Yingxian Wooden Pagoda; load analysis; layered platform structure; dougong; mortise-and-tenon joint; finite element analysis

引言

公元1056年(辽清宁二年),一座纯木结构的高塔在今天山西朔州应县的土地上拔地而起。这座被后世称为“释迦塔”的宏伟建筑,高约67米,底层直径约30米,通体无钉无铆,全凭木材之间的叠摺、嵌压、榫卯咬合而成,用材约3000立方米,总重量超过7000吨。它以近千年的不朽身姿,向现代力学提出了一连串极为深刻的发问:在这座数千吨重的木质高塔之中,构件之间的力是如何传

递与分担，斗拱层与柱架层如何协同抵御地震与强风，巨大的榫卯“柔性”体系如何实现“以柔克刚”的抗震效果以及在木材自然老化和环境荷载的持续作用下，木塔的受力机制又发生了怎样的演变，这些问题共同汇聚为应县木塔受力分析的核心议题。尤其是木结构的静力与动力行为分析，始终是这一研究的核心主线。由于应县木塔作为不可移动的文物实体，很难开展大规模的破坏性试验，众多研究者采取了“勘察测绘+数值模拟+缩尺模型试验”相结合的技术路线，在揭示木塔受力机制的征程上取得了长足进展。本文正是以此为基础，尝试从多个维度对应县木塔的受力分析研究进行初步梳理。

一、“层叠的智慧”：应县木塔结构体系辨识

（一）总体构成：明层、暗层与“层叠平台”架构

从宏观结构上看，应县木塔并非简单的一座“五层塔”。从外部可见五个明层（设有围栏和挑檐的楼层），而在每两个明层之间，还各设一个用于结构过渡和楼梯布置的暗层（即“平坐层”）。因此，按照柱架层与铺作层各自作为一个结构层来划分，木塔共包含19个结构层段。每一个结构层段基本遵循“明层柱架—明层铺作—平坐柱架—平坐铺作—楼屋面”的重复单元，一单元接一单元地向上叠加。每层平面均为正八角形，由内槽柱（8根）和外槽柱（24根）两圈立柱共同构成稳定的环形空间。这种“多单元叠加”的构型，正是应县木塔区别于一般刚性框架结构的关键所在。

（二）“层叠平台式梁柱结构”体系与对比分析

在受力分析的语境下，陈志勇、祝恩淳等学者通过结合现场调查与有限元模拟提出：应县木塔不是简单的框架结构，而是一种“层叠平台式梁柱结构”。这一判断的意义在于：它在概念上确认了木塔由多个相对独立的柱架层和铺作层在竖向堆叠而成，层与层之间的水平力（如地震作用、风荷载）主要通过铺作层的摩擦与嵌压机理来实现传递和耗散。这与现代高层建筑强调整体刚性抗侧的理念截然不同。

进一步深入分析各结构层的抗侧刚度时，可以观察到一条清晰的递减链：刚度从大到小依次为“明层铺作—暗层柱架—暗层铺作—明层柱架”。这一刚度规律表明，明层铺作（即斗拱层）是木塔抵抗水平侧移和扭转的最大贡献者；而明层柱架由于其“浮搁”式的柱脚构造（柱头仅通过榫卯与上部铺作连接，柱脚直接置于石础之上而无刚性锚固），其抗侧刚度相对有限，反而在水平荷载下呈现一定的摇摆与转动能力，这形成了某种类似“摇摆柱”的耗能机制。整个结构因此如同一组多级缓冲系统，将外部能量逐级衰减，展示出极高的力学智慧。

（三）斗拱层与柱架层的互补与协调

在木塔的受力关系中，斗拱层与柱架层的协同是分析的核心之一。铺作层（斗拱层）承受来自上部梁架和屋面的巨大垂直荷载，并将其扩散传递到下部柱网，同时在水平振动时通过构件间的嵌压和滑移来耗散能量。柱架层则通过环向的额枋（阑额）和普拍枋形成“闭合框架”，协同约束各柱的侧向位移，防止整体失稳。二者的互补性在于：铺作层提供水平刚度和耗能能力，柱架层提供竖向承载和环形稳定性。这一平衡在过去近千年中一直维持得很好，直到某些人为干预打破了这一平衡。

二、“柔性之筋”：关键节点的力学特性

（一）斗拱：结构与美学统一的受力核心

在应县木塔中，斗拱绝非装饰，而是最核心的受力构件。全塔共使用了440组斗拱，形式从简单的四铺作到繁复的五铺作不

等，分布于各明层和暗层的柱头、转角及补间等处。每一座斗拱都是由多层斗、拱、昂、枋等小构件按照严格的构造逻辑层层向上“攒聚”而成的空间受力单元。

在数值建模中，如何简化这一高度复杂的组合体始终是一个技术难点。一种广为采纳的简化方法是使用“梁—短柱单元组”来等效模拟斗拱，即在有限元模型中采用一组刚度经过折算的梁单元和柱单元来代替斗拱群，从而兼顾计算精度与效率。更精细的研究则利用三维实体单元对特定斗拱进行建模（常用ABAQUS软件），并赋予其正交各向异性木材属性，以精确分析其在竖向荷载下的应力分布与传递路径。已有实体模拟结果显示，斗拱内部的应力分布并不均匀，其受力主要集中在枂斗、散斗等关键构件上，表现出明显的“力流集中—再扩散”的特征。

（二）榫卯节点与“浮搁柱脚”：刚柔并济的力学机制

除了斗拱，榫卯节点是应县木塔的另一大力学奥秘。全塔依赖超过8万个榫卯节点将2万多件木构件联结成一体。节点多采用燕尾榫、直榫等传统形式，其中燕尾榫因形状“头宽颈窄”具有较强抗拔能力，在承受反复荷载时还能通过榫头与卯口之间的挤压和摩擦来耗散能量。研究表明，在有限元分析中，用“在梁单元两端加入半刚性单元”的方式能较好地表征榫卯节点的实际受力行为——它既非完全刚性，也非完全铰接，而是介于二者之间的半刚性连接，同时具备传力与耗能的双重功能。此外，“浮搁柱脚”也是一项不可忽视的力学设计。底层32根立柱（外槽24根+内槽8根）不设深基或铁箍固定，而是“平摆浮搁”于石质柱础之上。在地震或强风下，柱脚可以发生有限的摇摆位移，这一摇摆行为使得柱脚具有“半刚性”特征：一方面降低了结构的整体刚度，从而减小地震作用效应；另一方面也形成了另一种耗能机制。近年来，学者基于多弹簧模型提出了浮搁柱脚的简化力学建模方法，能够较为准确地模拟柱底—础石接触面的复杂受力状态。

（三）接触面摩擦机制：连接界面统计与力传递特性

木塔结构的“柔性”不仅来自榫卯和浮搁柱脚，更广泛存在于构件之间的无数个接触面中。根据最新的一项统计研究，应县木塔1~5层共计包含87,744个木材—木材连接界面，其中“弦—弦”连接类型占61.29%，“横—弦”连接界面占18.41%。更重要的是，不仅界面数量随层高递减，构件间的嵌压值也呈现从2层至5层逐渐减小的规律，且枂斗与普拍枋之间的嵌压最为显著。这些数据确凿地表明：摩擦机制是木塔耗散地震等动态荷载的主要方式。在构建整体力学模型时，必须充分考虑各接触面的摩擦系数和嵌压刚度，才能正确反映木塔的实际性能。这一方向的量化研究为应县木塔受力分析提供了新的基础数据来源。

三、“静与动的较量”：整体结构性能评估

（一）竖向力工况：自重与二次应力的累积效应

在竖直方向，应县木塔承受着巨大的自重（超过7000吨）及其上屋顶、塔刹等附加荷载。理论上，这是一座符合结构静力学原理的高层塔楼。然而，由于木塔近百年来逐步发生整体倾斜和构件变形，原来的“垂直”受力状态已不复存在。倾斜导致的重力分量转变成了显著的“二次应力”，即附加弯矩和剪力。这正是木塔二层柱体进入静力失稳拐点的根本原因。当柱体倾斜达到一定阈值（一根顶梁柱已倾斜580多毫米）后，竖向荷载不再以单纯的压力形式传递，而是产生不可忽视的水平推力，进一步加速柱身的弯曲和榫卯节点的破坏，形成恶性循环。

（二）水平力工况：地震与风荷载作用下的动力响应

相较于竖向静力，地震与风荷载下的动力响应是应县木塔受力分析的另一重要领域。多模态分析表明，在多发地震（小震）作用下，部分明层柱架的层间位移角已超过弹性限值1/250~1/200，局部构件处于塑性变形状态。而罕遇地震（大震）模拟显示，木塔的侧移和扭转可能增大到倾覆风险难以忽视的程度。

2008年以来，随着缩尺模型模拟和原位动力测试的深入，对应县木塔动力特性的理解有了较大提升。研究人员利用安置于各层柱头和柱脚的加速度传感器，通过环境脉动法识别了木塔前7阶的自振频率和振型，并结合数值模型修正了材料参数和边界条件，使模型与实际响应更为吻合。在此基础上，还根据风洞试验生成的三维脉动风荷载时程曲线，计算了木塔在风振作用下的水平加速度响应，发现风的长期作用不可忽视。特别值得关注的是，研究发现明清时期将夹泥墙改为轻质格扇门后，木塔丧失了重要的抗侧力和抗扭转能力，成为塔体加速扭转和倾斜的重要诱因。

（三）抗震与抗风的储备与脆弱性

综合地震和风荷载分析可见，应县木塔在完好状态下拥有较高的地震与风振安全储备。其“层叠”构造、斗拱摩擦耗能和柱脚摇摆机制共同构成了多道抗震防线。然而，随着现有残损的不断扩展（包括柱身开裂、榫头劈裂、斗拱嵌压过度、木材腐朽等），木塔的抗侧刚度相比理想完好状态平均下降了约33%，其安全储备正被快速侵蚀。尤其是二层——受力最大、变形最严重的部位，已处于“局部失稳—刚度退化—内力重分布—一再失稳”的加速退化阶段。因此，当前受力分析的重点已从“初始设计性能”评估，转向“现状损伤性能”的精细化评估。

四、“建模的阶梯”：木结构受力分析的技术路径

（一）理想化模型 vs 现状残损模型的对照研究

由于应县木塔的不可移动性和文物特殊性，全面进行破坏性试

验是不可能的。因此，数值模拟成为揭示其受力机制的主要途径。目前主流的研究范式是“建双模、做对比”：一方面建立未考虑任何残损的理想复原模型，反映木塔在初建时期的“设计力学性能”；另一方面建立基于实测残损数据（几何变形、构件损伤、节点松动等）的现状残损模型，揭示木塔当前真实的受力状态和危险点。通过理想模型与现状模型的横向对比，可以定量评估损伤对整体结构和局部构件承载力的影响，为制定保护方案提供科学依据。

（二）多尺度建模策略：从整体到节点

在建模层级上，研究者通常采用多尺度策略：整体模型采用梁单元和壳单元，关注宏观位移和层间变形；局部模型（如某层斗拱、某根倾斜柱或榫卯节点）则采用三维实体单元，精细化分析应力集中、损伤演化等细节。关键节点采用了“节点耦合处理”和“半刚性单元”等技术，实现了整体模型中连接行为的精准等效。对于斗拱，除了刚度等效单元组外，更有研究以摩擦—剪切耗能模型在接触面处设置摩擦对，从而再现斗拱在地震作用下的能量耗散过程。

（三）从试验到反馈：模型试验在受力分析中的校准价值

所有的建模假设都需要试验验证。近年来，1:8大型缩尺模型试验已在振动台上开展，涵盖了不同地震波、不同激励水平下的结构响应，并已积累了一批有价值的试验数据。同时，针对二层明层叉柱与斗拱连接节点的1:3缩尺拟静力试验，精确测量了节点在不同方向加载下的承载能力和破坏模式，为纠正有限元模拟参数提供了直接参照。这些模型试验构成了连接“纸上力学”与“真实力学”的桥梁，显著提高了受力分析的置信度。

五、结语

回顾应县木塔的木结构受力分析研究，可以看到一幅生动的画卷：它以独特而智慧的“层叠平台式梁柱体系”和刚柔并济的节点构造，书写着与现代结构力学不尽相同却又高度契合的力学诗篇；它通过摩擦、嵌压、榫卯咬合等微观机制，成功实现了跨越千年的自然力和震动的消解；它又在当下的残损侵蚀之下，向当代研究者发出了求解“倾覆临界”与“修缮边界”的紧迫追问。这不仅是对一座古代建筑的科学解答，更是对中华木结构营造文明的最深层致敬。

参考文献

- [1] 张佳凝, 王品博, 周海宾, 等. 应县木塔构件连接界面统计分析 [J]. 木材科学与技术, 2025, 39(6): 1-9.
- [2] 陈志勇, 祝恩淳, 潘景龙. 应县木塔精细化结构建模及水平受力性能分析 [J]. 建筑结构学报, 2013(9): 6-11.
- [3] 陈志勇. 应县木塔典型节点及结构受力性能研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- [4] 李豪邦, 张鹏程. 应县木塔千年前展示国人力学才智的十段柱五十五层梁榫接高层结构 [EB/OL]. 中国民族建筑, 2024-10-14.
- [5] 王珏. 基于摩擦-剪切耗能的应县木塔斗拱有限元模型研究 [D]. 扬州大学.
- [6] 袁建力, 陈韦, 王珏, 等. 应县木塔斗拱模型试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2011, 32(7): 66-72.
- [7] 李圣杰, 朱一凡, 赵波, 等. 应县木塔叉柱斗拱连接的结构行为研究 [J]. 工程力学, 2026.
- [8] 张鹏程, 黄文锦, 李顺时. 应县木塔结构内力分析 [EB/OL]. 中国民族建筑, 2024-01-05.
- [9] 陆维杰, 詹鑫, 邱洪兴. 基于多弹簧模型的浮搁柱脚节点建模方法 [J]. 土木与环境工程学报 (中英文), 2025, 47(4).
- [10] 应县木塔结构监测与试验分析研究综述 [J]. 中国文物科学研究, 2012.

第四代住宅跃层结构施工及安全技术措施研究

杨东

中国电建地产集团有限公司, 北京 100048

DOI:10.61369/ERA.2026080021

摘 要 : 为解决第四代住宅跃层结构施工精度不足、结构易破损、庭院易渗漏及高空作业安全风险高等工程痛点, 本文结合第四代住宅结构施工特点, 系统探究其跃层结构核心施工技术与专项安全管控措施。依托 BIM 数字化技术, 整合三维空间定位、复杂节点精细化钢筋施工、高支模与大悬挑支撑体系搭设、混凝土防裂浇筑及空中庭院防排水一体化等关键施工技术, 攻克了异形构件定位偏差、密集节点施工质量缺陷、悬挑结构开裂、庭院渗漏等施工难题。同时, 针对高空悬挑、高支模拆装、交叉作业等高危施工场景, 制定专项安全技术措施, 构建基于 BIM 数字化预控、全过程组织管控的立体化安全管理体系, 形成了技术赋能、全程闭环的施工与安全管控体系。工程实践表明, 该套施工技术与安全管理措施可有效提升第四代住宅跃层结构施工精度与成型质量, 大幅降低高空作业、架体失稳等安全风险, 规避常见施工质量通病, 可为同类第四代住宅跃层结构工程施工及安全管理提供参考与借鉴。

关 键 词 : 第四代住宅; 跃层结构; BIM 技术; 施工关键技术

Research on the Construction and Safety Technical Measures of Fourth Generation Residential Leapfrog Structures

Yang Dong

China Power Construction Real Estate Group Co., Ltd., Beijing 100048

Abstract : In order to solve the engineering pain points of insufficient construction accuracy, easy damage to the structure, leakage in the courtyard, and high safety risks of high-altitude operations in the fourth generation residential structure, this article systematically explores the core construction technology and special safety control measures of the fourth generation residential structure construction based on its characteristics. Relying on BIM digital technology, key construction technologies such as three-dimensional spatial positioning, refined steel reinforcement construction of complex nodes, high formwork and large cantilever support system construction, concrete crack prevention pouring, and integrated waterproofing and drainage of aerial courtyards have been integrated, overcoming construction difficulties such as positioning deviation of irregular components, quality defects of dense node construction, cracking of cantilever structures, and courtyard leakage. At the same time, special safety technical measures have been formulated for high-risk construction scenarios such as high-altitude cantilever, high formwork disassembly and assembly, and cross operation. A three-dimensional safety management system based on BIM digital pre control and full process organizational control has been constructed, forming a construction and safety control system that is technically empowered and fully closed-loop. Engineering practice has shown that this set of construction techniques and safety management measures can effectively improve the construction accuracy and forming quality of the fourth generation residential mezzanine structure, significantly reduce safety risks such as high-altitude operations and frame instability, and avoid common construction quality problems. It can provide reference and guidance for the construction and safety management of similar fourth generation residential mezzanine structure projects.

Keywords : fourth generation residential buildings; jumping layer structure; BIM technology; key construction technologies

引言

随着我国建筑行业绿色化、生态化、智能化转型升级, 人居建筑理念持续迭代, 融合空中庭院、立体绿化、错层跃层设计的第四代

住宅，逐步成为住宅建筑发展的新趋势。相较于传统平层住宅，第四代住宅每户配套独立空中花园与观景露台，整体结构呈现错落式布局、异形构件多、大跨度悬挑构件密集、空间构造复杂的特征，彻底改变了传统住宅规整的结构形式与施工模式，在提升居住舒适度与生态性的同时，也给现场施工与安全管理带来诸多难题。本文立足第四代住宅跃层结构施工全流程，结合数字化施工理念，系统梳理测量定位、钢筋工程、模板支撑、混凝土浇筑、庭院防排水五大核心施工关键技术，针对性制定高危作业专项安全技术措施与数字化、常态化安全管理体系，形成一套适配第四代住宅跃层结构的施工及安全管控体系，旨在提升工程施工质量与安全管控水平，为同类新型住宅建筑施工提供技术参考。

一、第四代住宅跃层结构施工关键技术

（一）测量控制与三维空间定位技术

第四代住宅作为一种新型建筑形式，融合了绿色、生态、智能等先进理念，第四代住宅的一大特点是每户都有自己的空中花园和露台，由此出现了跃层结构，为居民提供了更加多样化、个性化的居住空间^[1]。针对第四代住宅跃层户型空间错落、异形构件繁杂、传统二维测量精度偏低等施工难题，采用 BIM 三维建模融合全站仪、激光扫平仪的立体化测量定位技术，搭建全过程高精度测量管控体系。施工前期依托施工图纸搭建精准 BIM 三维结构模型，对跃层错层节点、大悬挑构件及异形梁柱开展三维尺寸校核，提前排查图纸尺寸偏差与空间碰撞隐患，优化构件定位参数，输出标准化三维放线数据^[2]。施工现场统一布设场区一、二级测量控制网，摒弃传统单层独立放线方式，依托整体控制网推行三维坐标定位、分层标高管控、细部点位复核一体化作业模式。针对悬挑庭院、跃层挑空等关键区域，借助全站仪导入 BIM 三维坐标精准定点，在悬挑端部与异形节点增设双重校核点位，有效削减施工累计误差。施工中运用激光扫平仪把控楼面平整度与构件标高，对错层高差区域做好专项放线标识^[3]。项目严格落实多层次测量复核机制，每层放线完成后联动 BIM 模型完成数据比对核验，严控悬挑尺寸、跃层高差及节点安装精度，将结构定位偏差稳定控制在规范限值内，从施工源头根治跃层结构空间定位不准的问题。

（二）复杂节点钢筋工程施工技术

第四代住宅跃层结构核心节点钢筋密集、构造复杂、施工空间狭小，常规工艺易产生质量缺陷，需采用精细化预制、分层穿插、专项加固的专项施工技术^[4]。施工前，依托 BIM 模型对复杂节点钢筋深化排布，模拟穿插顺序与排布间距，优化下料尺寸，合理调整密集钢筋位置，规避现场钢筋冲突、绑扎混乱等问题。针对悬挑梁板根部、跃层梁柱交接、斜向构件等关键节点，单独出具深化图纸，明确钢筋锚固长度、搭接位置及排布间距^[5]。现场采用工厂预制半成品+现场分层绑扎模式，减少高空作业量。施工遵循先主后次、先内后外、先粗后细原则，优先绑扎承重主筋，再穿插构造钢筋，狭小空间搭配小型工具辅助施工。大悬挑梁板节点增设定位马凳、限位支架，严控钢筋锚固、弯钩施工质量，防止钢筋位移下沉。施工完成后开展专项验收，核查钢筋规格、数量及排布方式，杜绝漏筋、错筋等问题，保障结构受力达标。

（三）高支模及大悬挑模板支撑体系施工技术

高支模、大悬挑模板支撑体系是第四代住宅跃层结构施工的核心，直接关乎施工安全与结构成型质量，需落实专项设计、精准搭设、严格验算的施工要求。施工前，针对挑空跃层、大悬挑

庭院等高危区域，结合结构受力参数编制专项施工方案，通过专业软件完成架体承载力、稳定性、挠度验算，超大、超高支撑体系需开展专家论证，保障方案安全可行^[6]。工程采用稳定性、精度及安全性更优的盘扣式脚手架支撑体系，针对不规则跃层区域优化架体布局，规避悬空、偏心受力问题。大悬挑梁板采用主体锚固+悬挑钢梁+架体支撑复合体系，将荷载传递至主体结构，并通过增设水平加固杆、剪刀撑及竖向支撑，强化架体整体刚度与稳定性。施工选用高强度覆膜胶合板，异形节点定制加工，严控模板平整度、拼缝及标高，密封封堵拼缝防止漏浆。同时严格依据同条件试块强度确定拆模时间，遵循分层拆模原则，杜绝提前、暴力拆模，防范结构变形开裂。

（四）混凝土工程浇筑与防裂技术

第四代住宅跃层结构构件厚薄不均、大跨度悬挑构件多，混凝土施工易出现开裂、蜂窝麻面、沉降不均等病害，需采用精细化防裂施工技术把控质量^[7]。施工首先优化混凝土配合比，选用低水化热水泥，掺加粉煤灰、矿粉等掺合料降低水化热与内外温差，搭配适量外加剂，提升混凝土和易性与抗裂性能。浇筑遵循分层、分段、对称、连续原则，按高低差、大悬挑梁板结构合理分段，分层浇筑厚度控制在 300~500mm，规避厚层一次性浇筑引发的沉降开裂^[8]。采用插入式振捣器精准振捣，重点密集钢筋密集节点、构件边角、悬挑根部等关键部位，杜绝漏振、过振；超长悬挑梁板从端部向根部对称浇筑，平衡结构受力。混凝土初凝后及时二次压光抹面，消除表面收缩裂缝^[9]。养护采用覆膜保湿加保温覆盖方式，高空区域增设防风、防晒设施，常温养护不少于 14 天，同步监测大跨度、悬挑构件温度，严控内外温差，有效防控结构开裂。

（五）空中庭院防、排水及防水一体化施工技术

空中庭院作为第四代住宅的核心区域，是渗漏、积水质量隐患高发部位，需采用防水、排水、防护一体化施工技术，保障施工质量。施工前期，结合庭院尺寸与绿化布局优化排水坡度，将坡度严控在 2%~3%，杜绝倒坡、平坡问题，精准定位排水口、地漏、雨水管，消除排水盲区。基层施工时，对结构楼板进行打磨、找平、清理，去除浮浆杂物，修补裂缝孔洞，保证基层平整坚实。对阴阳角、管道根部等薄弱节点做圆弧倒角处理，增设防水附加层。整体采用涂膜+卷材复合防水体系，底层全覆盖涂刷柔性防水涂料，上层规范铺设防水卷材，确保层间粘结牢固、搭接合规^[10]。防水施工后开展两次闭水试验，防水层完工后做 24 小时闭水试验，验收合格后施工保护层与种植层，整体完工后再次复核闭水。同步规范安装排水系统，保障排水通畅、连接严密，最后完成铺装与绿化施工，一体化解决庭院积水、渗漏通病。

二、第四代住宅跃层结构安全技术与管理措施

（一）核心高危作业安全技术措施

第四代住宅跃层结构施工的高危作业主要集中在高空悬挑作业、高支模搭设与拆除、高空交叉作业、混凝土高空浇筑作业等，针对各类高危作业制定专项安全技术措施，从技术层面规避安全风险。针对高空悬挑作业，施工现场全覆盖搭设标准化防护脚手架、安全防护网，悬挑结构边缘、跃层高低差部位设置1.2m高防护栏杆+18cm高挡脚板，铺设防滑脚手板，杜绝高空坠落风险。高空作业人员必须佩戴安全带、安全帽、防滑鞋，安全带遵循高挂低用原则，作业面设置临时安全绳、防护平台，严禁无防护高空作业。针对高支模搭设与拆除作业，严格执行专项方案与专家论证要求，架体搭设、拆除作业必须由持证专业人员完成，作业前开展专项安全技术交底。搭设过程中分段检查、分段验收，架体未验收合格严禁进入下一道工序。拆除作业设置警戒区域，安排专人值守，严禁无关人员进入作业区域，拆除杆件分类传递、集中堆放，严禁高空抛掷物料。针对高空交叉作业，合理规划施工工序，尽量避免上下层同时施工，无法规避的交叉作业，在上下作业层之间设置硬质隔离防护层，高空物料堆放远离悬挑边缘、洞口位置，控制堆放荷载，杜绝堆载超标、物料坠落伤人。针对高空混凝土浇筑作业，加固浇筑作业平台，检查设备线路安全，避免机械倾覆、漏电安全隐患。

（二）基于BIM/数字化施工的安全预控技术

为解决传统安全管理事后整改、被动管控的弊端，依托BIM数字化施工技术，构建第四代住宅跃层结构施工安全全过程预控体系，实现风险提前识别、提前防控。施工前期，通过BIM三维模型模拟施工现场整体布局，精准识别高空作业盲区、高支模高危区域、悬挑结构风险点、交叉作业冲突点，建立施工安全风险清单，针对高风险点位提前制定专项防控措施，优化施工工序与现场布局。利用BIM模型开展可视化安全技术交底，将复杂跃层结构、高危作业区域的安全管控要点、操作规范通过三维模型直观展示给施工人员，替代传统纸质交底，提升交底精准度与有效性。同时结合施工进度模拟，动态预判不同施工阶段的安全风险变化，提前调整安全管控重点。引入数字化监测技术，对高支模体系、大悬挑结构实施实时在线监测，重点监测架体沉降、位移、应力变化，悬挑结构变形数据，数据实时上传后台系统，一旦超出预警阈值，立即发出声光预警，及时叫停施工、排查隐患，实现安全风险动态管控。此外，利用数字化台账系统，记录安全检查、隐患整改、技术交底、人员培训等全过程资料，实现

安全管理可追溯、可管控。

（三）施工过程安全组织与管理措施

完善的组织管理体系是施工安全的核心保障，结合第四代住宅跃层施工特点，建立“全员负责、全程管控、闭环落实”的安全管理体系。首先健全安全组织机构，明确项目经理、技术负责人、安全员、施工班组长的各级安全职责，落实全员安全生产责任制，将安全管控责任细化到每个岗位、每道工序。强化施工前期安全管控，所有进场施工人员必须开展专项安全培训，重点培训高空作业、高支模施工、悬挑结构施工的安全规范与应急处置流程，考核合格后方可进场作业。针对特种作业人员，严格执行持证上岗制度，杜绝无证作业、违规作业。每道高危工序施工前，开展针对性安全技术交底，确保施工人员明确风险要点与防控措施。加强施工现场常态化安全巡查，建立日常巡查+专项检查+定期排查的三级检查制度，日常由专职安全员全程值守巡查，重点排查防护设施、架体稳定性、人员违规操作等问题；针对高支模、高空作业开展专项安全检查；每周开展全面安全隐患排查，对发现的隐患建立台账，落实整改责任人、整改时限，实现隐患闭环整改。同时完善施工现场应急管理体系，针对高空坠落、架体坍塌、物体打击等高发安全事故，编制专项应急预案，配备齐全的应急物资与救援设备，定期开展应急演练，提升现场应急处置能力，最大限度降低安全事故损失。此外，落实安全奖惩制度，规范现场施工行为，杜绝违章指挥、违章作业，全面保障施工全过程安全。

三、结束语

第四代住宅跃层结构的异形化、悬挑化、错层化构造特征，使其施工工艺与安全管控难度远高于传统住宅建筑，传统施工技术与安全管理模式难以适配其工程建设需求。本文立足第四代住宅工程施工实际，针对性研发并梳理了三维数字化测量定位、复杂节点精细化施工、高支模悬挑体系搭设、混凝土防裂浇筑、庭院防水排水一体化五大核心施工技术，有效解决了跃层结构施工精度差、结构质量缺陷、庭院渗漏等工程难题，显著提升了结构施工成型质量与使用性能。同时，结合工程高危作业特点，从专项安全技术、数字化安全预控、全过程组织管理三个维度，构建了全方位、立体化、可追溯的施工安全管控体系，有效规避了高空作业、高支模施工等场景的安全风险，实现了施工质量与安全的双重管控。

参考文献

- [1] 任振民,王海彬,侯艳刚,等.第四代住宅跃层结构施工及安全技术措施研究[J].建筑技术开发,2025,52(12):59-61. DOI:10.20259/j.jzjskf.2025.12.0059.
- [2] 杨培娜,闫旭灿,王磊超,刘彦明,陈帅.第四代高层住宅错层悬挑结构施工关键技术研究[J].建筑施工,2025,47(10):1585-1590.
- [3] 朱敏.第四代住宅结构设计浅析[J].门窗,2022(15):115-117.
- [4] 刘朝阳.第四代住宅设计优化及应用[J].住宅与房地产,2024(10):120-122.
- [5] 侯玉林.第四代住宅建设工程项目全过程造价管理难点及优化对策[J].睿士,2024(19):167-169.
- [6] 何桦寒,陈明华,徐涛,王语强,邵彦杰.第四代住宅施工技术创新与实践研究[J].建设科技,2024(S1):168-170.
- [7] 蔡震,刘彪,周前明,王飞,张程.第四代住宅悬挑错层阳台施工技术研究[J].中国建筑装饰装修,2024(18):150-152.
- [8] 潘明玉.第四代住宅工程建筑施工安全防护技术研究[J].住宅与房地产,2026(11):101-104.
- [9] 李斌,谭林刚.第四代建筑露台错层、错台处爬架附着支座施工技术[J].陕西建筑,2023(4):84-89.
- [10] 戴轩昂,周曦,吴杰.基于多元统计分析的第四代住宅特征与类型研究[J].中外建筑,2026(1):72-80.

装配式建筑工程造价影响因素与精细化管理

于佳欣, 张哲

天津工业化建筑有限公司, 天津 301700

DOI:10.61369/ERA.2026080026

摘 要 : 装配式建筑开展了推动建筑工业化以及绿色低碳转型进程的工作, 工厂预制以及现场装配的模式让工期得以显著缩短, 并且减少了建筑废弃物的产生。然而, 要是把这种建造方式与传统现浇建筑对比的话, 综合造价频繁出现偏高的情况, 开展成本管控工作面临挑战, 全链条造价波动得很剧烈, 这制约了行业的规模化推广。本文立足装配式建筑 "设计前置、工厂生产、异地运输、现场装配" 的造价形成特征, 从决策、设计、构件生产、物流运输、现场施工、从政策、市场等六个方面对工程造价的枢纽要素进行深入且深刻的拆解, 能够清晰地了解各节点成本传导的机理以及造价增量的缘由; 围绕项目实操当中的难点, 把全流程造价管控当作目标来使用, 综合运用 BIM 数字化工具、精益供应链管理以及全过程清单化核算方法, 逐步开展精细的造价管理体系的建立工作, 从开展针对性的标准化设计工作开始, 成本会得以降低, 构件供应链会趋向集中集约, 施工环节会去推行精益化控制工作, 合同计价得以实现完整闭环, 一系列具体策略会逐层推进。开展精细管理工作在装配式项目当中可以削减非必要的支出, 从源头开展造价调控工作促使整体成本下降了大概 8% 至 15%。

关 键 词 : 装配式建筑; 工程造价; 成本影响因素; 精细化管理; BIM 技术; 全生命周期

Factors Affecting the Cost of Prefabricated Construction Projects and Refined Management

Yu Jiaxin, Zhang Zhe

Tianjin Industrial Construction Co., Ltd., Tianjin 301700

Abstract : Prefabricated buildings have carried out work to promote the industrialization of construction and the process of green and low-carbon transformation. The mode of factory prefabrication and on-site assembly has significantly shortened the construction period and reduced the generation of construction waste. However, if this construction method is compared with traditional cast-in-place buildings, the comprehensive cost often appears to be high, and cost control work faces challenges. The cost fluctuation throughout the entire chain is very severe, which restricts the large-scale promotion of the industry. This article focuses on the cost formation characteristics of prefabricated buildings, including "pre design, factory production, off-site transportation, and on-site assembly". It deeply and profoundly breaks down the key elements of engineering cost from six aspects: decision-making, design, component production, logistics transportation, on-site construction, policy, and market. It can clearly understand the mechanism of cost transmission at each node and the reasons for cost increment; Focusing on the difficulties in project implementation, the goal is to use full process cost control. BIM digital tools, lean supply chain management, and full process inventory accounting methods are comprehensively utilized to gradually establish a refined cost management system. Starting from targeted standardized design work, costs will be reduced, component supply chains will tend to be centralized and intensive, lean control work will be implemented in the construction process, contract pricing will achieve a complete closed loop, and a series of specific strategies will be promoted layer by layer. Implementing refined management in prefabricated projects can reduce non essential expenses, and implementing cost control measures from the source has led to an overall cost reduction of approximately 8% to 15%.

Keywords : prefabricated building; engineering cost; cost influencing factors; refined management; BIM technology; whole life cycle

引言

在双碳政策以及建筑工业化潮流的推动之下，我国各地加快开展装配式建筑强制性实施规定的出台工作，会优先在保障性住房以及公共建筑当中对这种新型建造方法进行推广，装配式建筑也就是把传统现浇施工的大部分工序移到工厂去进行预制，环保、效率以及品质方面都会有所提升。不过鉴于国内数据显示，普通混凝土住宅选用装配式，整体成本跟现场浇筑相比，还是会高出大概一成到两成，成本过高是这个产业要全面铺开所面临的核心障碍方面。在造价构造当中，装配式工程呈现出具备工厂制造所占比重较大、开展运输以及吊装环节的单独核算、深化设计方面的支出有所增加、以及接缝灌浆和连接组件所潜藏的成本较高等多项特性，建设成本的波动会贯穿从方案构思到最终收款这当中的每个阶段，以往所采用的概算控制方式没办法应对跨部门协作以及复杂工况，也就是工程划分存在失当、标准化元素不足的问题运输调度失序、现场装配返工等问题，均会造成造价超概算、结算争议频发。

一、装配式建筑工程造价构成特征

装配式建筑工程是利用工厂化、标准化、规模化的方式预制装配式构件，在预制工厂预制好钢筋混凝土梁柱、墙板、顶板等支撑框架，在施工现场通过拼装和连接处的少量浇筑以形成完整的建筑物。^[1]

1. 深化设计费（5% ~ 8%）：预制构件开展规划设计工作，构件标准化通过统一规格参数减少模具种类与数量，显著降低生产环节的固定成本。^[2] 它的费用要远远超过传统建筑。它不但需要开展综合结构设计工作，同时还涉及组件分段、模具调整、节点细化以及数字模拟等专门方面。这些工作会让各专业进行更紧密地协作，进而延长了项目设计的时间，推高设计成本。

2. 预制构件费（50% ~ 60%）：首要开销集中在物料，也就是钢铁以及水泥，还有相关组件的摊销费用，模具和设备衰退所带来的支出，以及人力资源方面和制品维护检查的成本；模具成本当作一个关键变量，异形非标准构件开展模具复用的次数通常不到三次，单个构件的模具成本和标准化构件相比，上升幅度会超过百分之三十。

3. 构件运输费（5% ~ 9%）：鉴于构件体积、通行里程以及特殊车辆限制，要是物流活动跨越五十公里，那就会引起单位运费极大程度地攀升；叠合以及大型墙板得启用封闭型大件车辆，短途以及二次转运会使得额外运费有所上涨。

4. 现场装配费（18% ~ 24%）：涵盖大型吊装机械的租赁以及专业装配人力、套筒灌浆以及连接件采购方面的开销，装配式技工匮乏致使人工单价得以提高，比传统现浇作业超出大概15%，还有临时支护鉴于防水节点等措施所引致的成本有了显著攀升。

二、装配式建筑工程造价多维度影响因素分析

（一）项目决策阶段影响因素

源头变量所涉及的三类造价指标，分别是对装配率界定值的确定、对预置构件开展筛选工作以及对工厂进行选址，政策规定的强制装配率脱离了项目实际情况，开发商盲目地把全预制外墙当作选择，使得采购成本有所攀升；预制厂规划没有进行统筹，

工程距离大型构件产业园区较远，于是把依赖转向零星加工点或者跨区域采购，这样一来，远程运载成本会随之增加；

（二）方案与深化设计阶段影响因素

项目在设计阶段就会对预制装配造价管控的效果产生影响，构件的设计开展之后会决定造价增量的高低。不常见的构件形式，像项目中存在的非标准飘窗样式以及弧形墙板等，会让构件规格变得繁多，模具在应对大批量需求的时候，开展复用工作会受到限制，构件标准化程度不足四成，模具成本的摊提会显著提高；组件分割不够合理，过度地对楼板、墙体等大型单元开展切割工作，产生了过多的小型零部件，这样会促使人工费用得以增长，并且导致运输以及起吊环节的损失加重；

（三）预制构件工厂生产阶段影响因素

中小型规模的预制构件企业，它的设备开动率通常连一半都达不到；投入生产的厂房租赁费用、机器设备磨损成本等硬性开支，只能由产出的每一件产品来承担，抬高出厂报价；原料价格拥有循环起伏的特性，钢材以及水泥的年际价格变动范围能够达到一成至一成五。那些没有预先订立远期集中采购合约的企业，很难规避价格攀升所带来的潜在威胁；

三、装配式建筑工程造价全周期精细化管理实施路径

（一）决策策划精细化：前置造价测算，科学确定装配指标

在规划设计的前期，成本顾问开展介入工作，鉴于项目类型来开展预制装配比例的筛选工作，寻求经济以及合规方面的均衡。以成果当作导向，去处理指标虚高现象的规避工作，把部件组合选择得与地方要求相契合，提高项目价值；对选址范围当中的两到三家拥有规模化生产能力的预制构件厂开展考察工作，把出厂价格以及运输费用这些综合成本进行比较，并且把运输距离控制在三十公里以内的工厂当作首选，压缩物流溢价；借助邻近地区同类项目价格数据，来开展各模块投资估值的计算工作，把设计优化、起重以及注浆等项目增支进行细化，从根本方面防止概算内容出现遗漏。

（二）设计阶段精细化：标准化 + BIM 正向设计，从源头控本

设计阶段是决定装配式建筑成本的核心关键环节，它的影响

贯穿项目整个全生命周期，首先设计方案的合理性直接关联着构件生产效率与材料利用率。^[3]推行模数化、标准化设计，统一墙板、叠合板、楼梯等主力构件尺寸，构件规格压缩 60% 以上，标准化率 $\geq 70\%$ ，提升模具复用率，模具成本可以实现削减，削减幅度大约为三成；开展严密管控的工作，对异形以及非标准构件的应用进行限制。要是碰到特殊造型的需求，那么适宜优先把整体现浇技术当作替代途径来选用；项目专门设置的参数化 BIM 构件库，会把建筑、结构以及机电工程汇集到统一的模型平台来开展协同建模工作。这个库当中内置了构件的材质、单价以及生产工艺等造价信息，从而实现了全专业的 BIM 正向协同设计，在图纸阶段去处理管线预埋冲突的问题，设计变更就可以得以实现规避，这样投产变更后更率降低达到了 85%；

（三）构件生产与运输精细化：供应链集采 + 智能调度降本

1. 生产端精细化管控

装配式建筑的特殊性在于其“生产 - 运输 - 装配”的工业化流程，这要求造价管理必须建立全生命周期成本管控体系。^[4]年度集采框架协议由总包和预制厂来进行订立，关键建材价格得以实现锚定，原材料价格上涨的风险就由此得到消解；督促构件厂优化厂区动线，缩短厂内转运距离，提升产能利用率；通过物联网（IoT）技术，实时采集设备运行数据，结合 BIM 模型预测维护需求，降低突发性维修成本。^[5]开展构件质量的分级管控工作，质检记录得逐项进行登记。推行在出厂之前的全面筛查措施，几何规格以及外部形态存在瑕疵的产品禁止流入后续环节，这样有效降低了因工程返工所带来的额外开销；生产成本需要逐个批次去进行计算。产成品是由单件费用所构成的，人工花费以及能源消耗开展了动态的管控工作。

2. 运输精细化调度

物流算法开展运输路径的调优工作，构件的合并运输会把车辆负载尽量往最大化方向去实现；事先对道路条件进行实地探查，闲置运力得以削减；鉴于工地每周所开展的施工排产方案，来执行“需求供货、马上安装”，从而削减构件在场地长时间堆放方面所产生的费用开支；合同当中明确了运输过程当中物品的损毁责任的归属，要是在途中因为碰撞而产生了损坏，那就会由承运方负责去承担重新生产所需要产生的费用，这样就可以把项目潜在的额外支出转移出去。

（四）现场施工精细化：精益装配 + 动态成本纠偏

构件身份数据从工厂出厂一直到吊装就位这个过程当中，需要开展三层核实台账的建立工作。破损品在验收现场就会被拒收，并且能够触发索赔程序。这个流程囊括了编号确认以及外观尺寸核查方面的环节；BIM4D 技术把进度与成本模拟进行融合，对塔吊的选型流程以及吊装安排开展了重新梳理工作，让现场人力以及大型器械的调度得以实现精准协同，有效避免了设备停转现象的出现；建筑信息模型（BIM）技术为绿色建筑工程造价管理提供了全新的技术手段，其三维可视化、信息集成化、协同工

作等特性能够有效提升造价管理的精度与效率。^[6]对于套筒灌浆、节点连接这些关键工序，开展了专项技术交底工作，来削减返工现象；

月度核验当中，会把目标成本和实际消耗进行比对；针对超支环节，逐个去追溯超支的缘由，马上开展施工步骤的优化工作；现场签证审批流程进入了电子化的新阶段，能够杜绝补签以及虚签现象的出现。

（五）竣工结算精细化：清单闭环计价，减少结算争议

借助建筑信息模型当中的工程量信息，开展构件采购、现场装配以及实际耗损的统计工作就可以完成。这样合理耗损和非合理耗损便区分开来，责任方需要对超出合同约定的损耗承担相应款项；鉴于合同约定，开展深化变更、加价非标准构件以及二次倒运所产生的款项，都要配备相应的测算文件以及影像材料，来实现完备证据支持体系的构建；把楼栋以及构件数据分别开展汇总工作，让结算这个流程能够具备追溯的可能，结算纠纷的发生概率得以切实地降低。标准化设计使模具种类减少，模具复用次数提升。区域差异明显，东部地区因产业链成熟，模具成本降幅高，而西部因运输半径限制，降幅低。^[7]

四、现存管理短板与配套优化建议

（一）当前精细化落地现存短板

行业面临着装配式专业人员匮乏的问题，许多成本核算者还依旧固守着现浇计价逻辑，很难掌握构件预制以及现场安装等新兴工序的定价标准；装配率的提升会提高单方造价，其原因在于更高的装配精度要求致使成本增加^[8]部分中小型房地产企业开展了缩减前期设计环节支出的工作，并且对于 BIM 技术应用成本投入的意愿比较低，这样就使得标准化设计方案的实施面临了显著的障碍；目前，偏远地区所具备的预制工厂普遍不足，这就使得装配式建筑材料在进行远程采购时所产生的费用一直居高不下。其优势主要体现于快速算量，实时修改以及模型导入，以及模型对比可视化展示等诸多角度。^[9]

（二）配套优化建议

行业层面：造价主管部门完善装配式专用计价定额，细化预制构件、套筒灌浆、大型吊装等子目计价规则；企业以及高校携手，开展装配式建筑造价以及施工方面专业人才的定向培育工作。

企业层面：标准化构件图集被房企以及总包选用进行应用，还开展了内部造价库的建立工作，抱团项目集体来推进构件采购规模化，凭借此来增强议价能力。要严格按照国家及地方有关规范、标准的编制和审批程序，保证其科学性、合理性和可操作性。在编制过程中，需要企业组织有关专家及技术人员对其进行深入的研究与探讨，制订出具体的施工工艺及技术参数，并经多次审核、修改，形成规范的技术文件。^[10]

政策层面：政府部门开展了装配产业园区辅助措施的完善工作，对预制构件工厂的区域性位置安排进行了指导，来实现装配式建筑补贴发放程序的优化，使承建单位的资金投入费用有所降低。

五、结束语

装配式建筑造价受全链条多因素耦合影响，设计非标化、生产粗放、运输无序、现场管控缺位是造价居高不下的核心诱因，造价方面的难题需要有新的思路，只有开展决策前置的成本测算

工作并且推行设计标准化，才能够把造价难题给化解掉。装配式建造有着独特的逻辑，传统的管控方式就显得滞后了在施工现场当中，把精益落地策略当作方法来使用，数字化平台拥有赋能的功能，供应链开展集约化管控工作，这三个要素同时运作，能够对造价增量进行系统性的压缩工作带来助益。精细化的造价管理体系，鉴于 BIM 以及物联网等数字化技术不断地迭代，并且装配式产业链发展趋向成熟，会得到持续的完善，进而使得装配式和现浇建筑之间的造价差异逐渐缩小，助力我国装配式建筑从政策强制落地转向市场化自主选用，推动建筑工业化高质量发展。

参考文献

[1] 刘文龙. 装配式建筑工程如何影响工程造价问题的研究 [J]. 中华建设, 2026, (3): 49-51.

[2] 李娜. 装配式建筑构件标准化对工程造价的影响及优化 [J]. 大众标准化, 2026, (6): 108-110.

[3] 朱伟红. 装配式建筑工程造价预算与成本控制策略探析 [C]// 广西网络安全和信息化联合会. 2025年第六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议论文集. [出版者不详], 2025: 346-347. DOI: 10.26914/c.cnkihy.2025.034780.

[4] 梁华安. 装配式建筑工程造价管理 [J]. 中国住宅设施, 2025, (5): 182-184.

[5] 严春. 基于 BIM 的装配式建筑工程造价精细化管理路径研究 [J]. 建筑, 2025, (8): 98-100.

[6] 丁永新. 绿色建筑工程造价影响因素及优化对策——以江苏省常州市某二星级绿色建筑工程为例 [J]. 中华民居, 2026, 19(3): 14-16.

[7] 邹映华. 装配式建筑金属构件标准化生产对工程造价的影响分析 [J]. 中华建设, 2025, (12): 32-34.

[8] 蔡国恒. 装配率对装配式建筑工程造价的影响分析 [J]. 江西建材, 2025, (12): 376-378.

[9] 李玉宏. 装配式建筑应用 BIM 技术对工程造价的影响 [J]. 智能建筑与智慧城市, 2023, (3): 96-98. DOI: 10.13655/j.cnki.ibci.2023.03.029.

[10] 王变. 装配式建筑造价成本构成差异及精细化管理模式创新研究 [C]// 重庆市大数据和人工智能产业协会, 重庆建筑编辑部, 重庆市建筑协会. 智慧建筑与智能经济建设学术研讨会论文集 (二). [出版者不详], 2025: 1069-1072. DOI: 10.26914/c.cnkihy.2025.026742.

基于 CiteSpace 的建筑工程智能运维研究现状及发展趋势分析

李懿峰, 隋丽辉

上海电机学院, 上海 201306

DOI:10.61369/ERA.2026080027

摘 要 : 目前, 随着大数据、物联网与人工智能技术的发展, 传统建筑运维模式面临数字化转型的挑战, 为研究建筑工程智能运维领域的研究现状与发展趋势, 本文选取中国知网数据库 2007 年至 2025 年间的 412 篇文献作为样本, 利用 CiteSpace 软件进行可视化分析。研究发现, 国内建筑工程智能运维相关的研究发文量整体呈现上升趋势, 自 2019 年起进入高速增长阶段, 学界对智能运维的关注度持续提升; 核心作者与研究机构分布呈现局部集中、整体分散的特点, 多局限于小团体协作, 跨机构合作频率较低。关键词分析表明, 智能运维、大数据、人工智能及数字孪生是当前的研究热点, 数字孪生作为突现强度最高的关键词, 用数字孪生作为核心技术, 运维模式由被动处置向主动预测转变。未来研究需建立统一数据接口标准, 增强仿真模型动态交互能力, 推动建筑全生命周期数据互联, 制定行业标准。

关 键 词 : 智能运维; 可视化分析; 数字孪生

Analysis of Research Status and Development Trends in Intelligent Operation and Maintenance of Construction Engineering Based on CiteSpace

Li Yifeng, Sui Lihui

Shanghai Dianji University, Shanghai 201306

Abstract : Driven by advancements in big data, the Internet of Things (IoT), and artificial intelligence, traditional construction operation and maintenance (O&M) modes encounter digital transformation challenges. This study selects 412 documents from the China National Knowledge Infrastructure (CNKI) database spanning 2007 to 2025 for visual analysis via CiteSpace 6.3.3. Results indicate domestic publication volume follows an upward trajectory, entering a rapid growth phase since 2019 and reflecting sustained academic interest. Core authors and research institutions display local concentration alongside overall fragmentation; collaboration remains restricted to small groups with low cross-institutional frequency. Keyword analysis identifies intelligent O&M, big data, AI, and digital twins as research hotspots. Digital twin technology exhibits the highest burst strength, facilitating the transition of O&M modes from passive response to proactive prediction. Future research must establish unified data interface standards, enhance simulation model interaction, promote full life-cycle data interconnection, and formulate industry standards.

Keywords : intelligent operation and maintenance; visual analysis; digital twin

现目前我国城镇化加快、建筑工程规模持续扩大, 传统运维模式已无法满足现代化管理需求, 人工巡检效率低、易存在误差, 难以及时排查设备与安全隐患。信息技术发展推动行业数字化转型, 大数据、物联网、人工智能为建筑管理提供新方法^[1]。智能运维依托新技术实现从被动发现问题到主动预测隐患的转变, 可延长建筑寿命、降低能耗, 也为智慧城市建设奠定基础^[2]。本文基于 CNKI 数据库, 运用 CiteSpace 对 2007~2025 年智慧运维的相关文献进行可视化分析, 探讨发文趋势、核心作者、研究机构及关键词演变, 旨在揭示研究热点与前沿动态, 并提出思考与展望。

一、数据来源和研究方法

(一) 数据来源

本文以中国知网 (CNKI) 学术期刊数据库为目标数据源, 时间跨度为 2007 年 1 月 1 日至 2025 年 12 月 31 日。初步检索共获得

了 486 篇相关文献, 随后对检索结果进行了人工去重与筛选, 剔除会议通知、新闻报道、征稿启事及相关性较低的文献, 最终获得 412 篇有效文献^[3]。

(二) 研究方法

本文利用可视化分析软件 CiteSpace 处理获取的文献样本,

通过构建知识图谱，将引文网络与合作关系转化为图谱、表格。利用发文量统计功能分析该领域的历年间的发文量并通过作者与机构的共现图谱分析智能运维领域的核心研究力量，分析关键词共现、关键词聚类及关键词突现，挖掘研究热点的演化^[4]。从大量文献中提取出科学的研究观点，展现智能运维领域的历史脉络，识别研究前沿。

二、发文数量分析

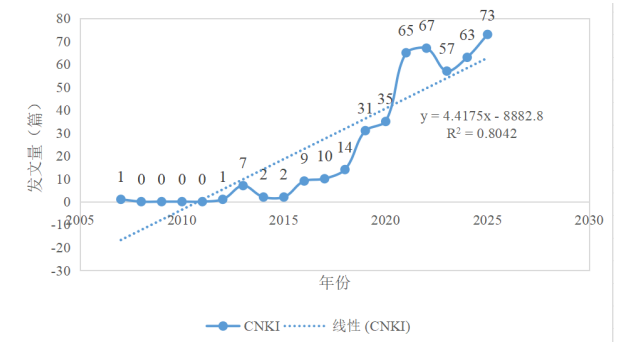


图1 2007年~2025年国内文献数量变化统计图

年度发文数量的变化可以表现出建筑工程智能运维领域的研究热度，年度发文量可反映建筑工程智能运维研究热度。据 CNKI 统计，2007~2025 年智能运维相关研究的有效文献共 412 篇，整体呈上升趋势。2007、2012 年仅 1 篇，2008~2011 年没有相关文献；2013~2018 年为初步探索期，发文量从 7 篇上升至 14 篇；2019~2025 年研究高速增长，发文量从 30 余篇升至 73 篇。发文趋势进行线性拟合方程为 $y = 4.4175x - 8882.8$ ，判定系数 $R^2 = 0.8042 > 0.7$ ，表明发文量随时间增长具有较强的线性相关，这种由于大数据、物联网、数字孪生等技术在建设项目中的广泛应用，需要配套的智能运维技术的研究，成为近年来的研究热点。

三、作者、机构与合作机构

（一）作者分布

利用 CiteSpace 软件对 412 篇文献进行了作者聚类分析，如图 2 所示，其中共有节点 254 个，作者之间的连线共有 133 条，网络密度为 0.0041。合作网络反映学者间协作情况，合作图谱展示了复杂的连接关系。节点大小代表发文频次。连接线粗细代表合作强度。

表 1 智能运维相关研究发文量前 10 的核心研究人员

序号	发文量	初现年份	作者	序号	发文量	初现年份	作者
1	3	2020	刘占省	11	2	2019	宋小广
2	3	2013	马素玲	12	2	2016	王东林
3	2	2023	张翔宇	13	2	2021	贾琨
4	2	2016	曲辰飞	14	2	2023	陈金路
5	2	2016	吴闻婧	15	2	2016	陈功奇
6	2	2023	郑向远	16	2	2016	张君
7	2	2020	张安山	17	2	2021	李露凡
8	2	2016	何拥军	18	2	2021	项颢

9	2	2016	陶利	19	2	2021	张振国
10	2	2021	丁鹏	20	2	2021	张祖刚

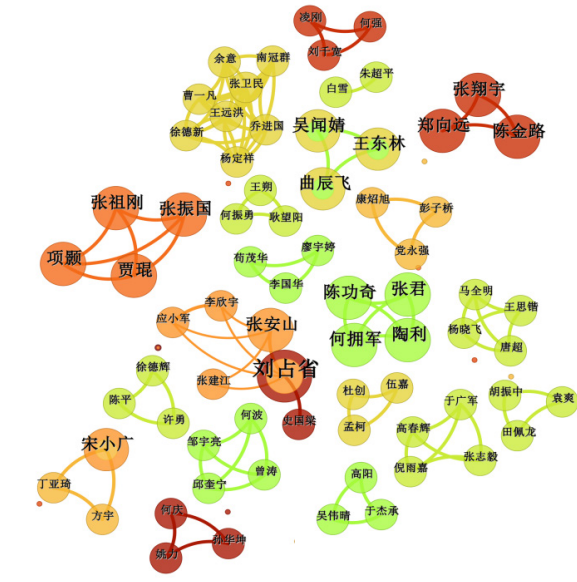


图2 中国知网发文作者聚类分析图

从表1可以看出，发文量排名前20的作者每人均有2篇以上。在这些研究者中，刘占省和马素玲分别发表了3篇相关论文，是发文数量最多的学者；其余学者均发表了2篇论文。结合图2可以看出作者与作者之间大多是小团体协作，以刘占省、张安山等组成的研究团体最为明显。

（二）研究机构及合作网络

利用 CiteSpace 软件对 412 篇文献进行了作者聚类分析并生成中国知网发文机构聚类分析图谱（图 3）。根据后台数据显示，机构合作图谱中共有节点 207 个，机构之间的连线仅为 49 条，密度为 0.0023。



图3 中国知网发文机构聚类分析图

图3可以看出，目前该领域合作密度较低，大部分节点处于离散状态。这表明多数学者习惯于独立研究。现有合作多局限于师生或同门关系，跨机构合作项目占比偏小。

四、研究热点分析

（一）高频关键词及其共现分析

在 CiteSpace 中导入 412 篇参考文献,设置时间范围 2007~2025 年,时间切片为 1 年,Node Types 选择为 Keywords,每个时间切片选择 Top50,选择“Purning Sliced Network”叠加“Pruning The Merged Network”以及“Pathfinder”进行网络裁剪^[5]。生成关键词共现图谱(图4)。图中显示关键词节点共 292 个,关键词之间的连线为 430 条,网络密度为 0.0101。连线数大于节点数,表明关键词之间的联系较为紧密。节点大小代表关键词出现的频次,节点越大,关键词出现的频次越高^[6]。根据 CiteSpace 后台数据提取出排名前 20 的高频关键词,如表 3 所示。

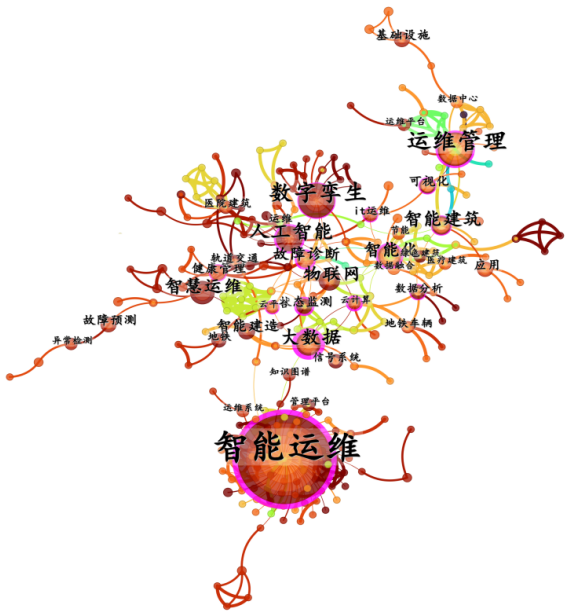


图4 中国知网智能运维关键词共现图谱

表3 智能运维相关研究排名前20的关键词

序号	关键词	频次	中心度	年份	序号	关键词	频次	中心度	年份
1	智能运维	178	0.87	2016	11	智能建造	7	0.04	2019
2	运维管理	30	0.23	2007	12	健康管理	5	0.1	2022
3	数字孪生	26	0.18	2021	13	应用	5	0.02	2019
4	人工智能	16	0.32	2020	14	故障预测	5	0.03	2022
5	大数据	15	0.76	2017	15	状态监测	5	0.21	2017
6	物联网	13	0.09	2017	16	基础设施	5	0.02	2021
7	智能建筑	13	0.19	2012	17	可视化	5	0.12	2019
8	智慧运维	13	0.04	2023	18	运维	4	0.03	2016
9	智能化	11	0.23	2014	19	信号系统	4	0	2021
10	故障诊断	8	0.23	2014	20	轨道交通	4	0.05	2021

在表3统计的高频关键词中,出现频次最高的是“智能运维”,共出现了178次,中介中心度为0.87,首次出现的年份是2016年;“运维管理”的出现频次是30次,中心度为0.23,首次出现的年份是2007年,说明在2007年就已经出现了建筑工程运维管理的概念,但早期传统的运维管理模式无法满足较高的的运维需求;“大数据”的中介中心度达到0.76,这说明数据挖掘与处理与智能化运维绑定,促进了智能运维的全面铺开。“人工智能”一词出现在2020年,中心度为0.32,体现了智能运维的研究重心从数据统计转向使用复杂算法来作出运维决策。“数字孪生”作为2021年后兴起的热点,频次达到26次,标志着智能运维的研究进入了从传统运维到依靠信息技术落地实践的新阶段。

（二）高频关键词及其聚类分析

本文在关键词共现图谱的基础上,利用 Citespace 软件生成关键词聚类图谱(图5)。图中显示了排行前10的关键词聚类,后台数据显示 ModularityQ=0.8117,通常认为 Q>0.3 代表聚类结构显著,数值越大说明聚类效果越好。Mean Silhouette=0.9663, S>0.5 时表示合理;S>0.7 表示非常合理且令人信服^[7]。由此可见本次聚类结果的可信度非常显著。通过对共现网络中紧密相关的词汇进行归纳,能够识别出研究领域的关键板块与知识结构。

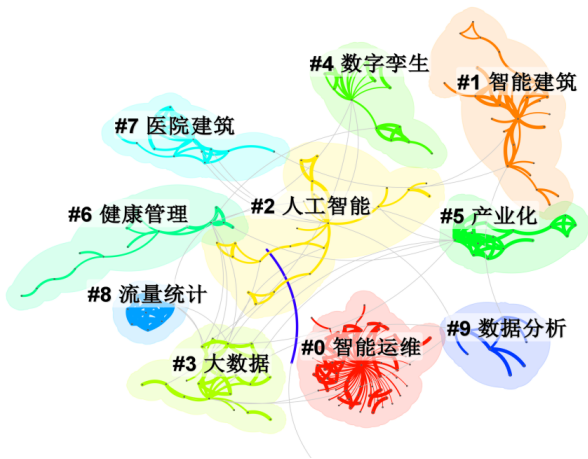


图5 中国知网智能运维关键词聚类图谱

本文选取了智能运维研究领域前10个互相连接、具有较高的联系和延展性的聚类,并根据后台数据整理了关键词聚类的信息表。

从图5和表4可以看出,聚类#0(智能运维)、#2(人工智能)、#3(大数据)与#4(数字孪生)构成了整个智能运维的技术体系。大数据与物联网技术(#3)负责监控建筑运行状态,收集故障、隐患等问题数据,人工智能、专家系统与数字设计(#2)负责对采集的数据作出决策。数字孪生(#4)则构建虚拟模型,尝试实现故障预警、情景构建等模拟技术。智能运维正从数据采集到虚拟交互中解决目前建筑工程中所遇到的运维问题,也体现了智能运维的研究正从信息化手段向数字化转变。

聚类#6(健康管理)和#9(数据分析)更加注重保障工程的安全运行。建筑结构和机械部件通常需要定时维护,研究人员通过故障预测、故障诊断及异常感知技术,用历史数据与实时监测

数据比对，识别出运行参数的偏差，提前识别并干预安全隐患。聚类 #8 中的流量统计与系统设计与实现确保网络设备与维护人员之间的协同效率。

聚类 #1 中，更多体现的是智能建筑与基础设施的综合监控，聚类 #7（医院建筑）的重点则放在公共建筑的运维监控。聚类 #0 与 #9 中涉及的城市轨道交通、地铁车辆等，说明智能运维目前广泛应用在轨道交通领域方面。聚类 #5 包含光伏电站、产业化，显示了智能运维的研究方向延伸到新能源领域应用。从表 4 看出，智能运维的研究覆盖了不同应用场景，说明智能运维已经从理论探索阶段进入了现实生产和生活。

（三）高频关键词及其时序分析

时间线视图（Timeline）可清楚地表达技术的演进、各聚类单元的时间演化特征及各聚类之间的关系^[8]。在上文关键词聚类图谱的基础上，进一步使用 Citespace 软件生成智能运维时间轴图谱（图 6）与智能运维时序图谱（图 7），并提取出对应的高频词（表 5）。根据关键词信息及其所呈现的共现特征，将研究进程分为 3 个阶段。

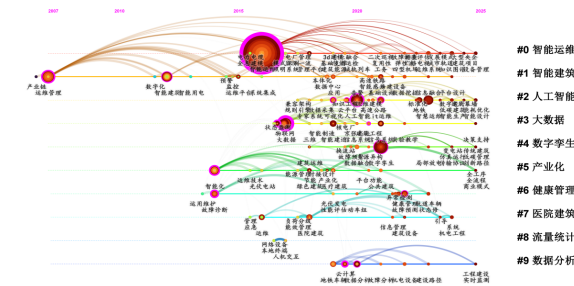


图 6 中国知网智能运维高频关键词时间轴图谱

表 5 高频关键词时序分布表

年份		关键词
第一阶段 2007~2015		运维管理；产业链；智能建筑；数字化；智能用电；智能化；故障诊断
第二阶段 2016~2020	2016~2017	运维平台；智能运维；大数据；物联网；状态监测
	2018~2020	人机交互；智能建造；人工智能；数据分析；数据融合
第三阶段 2021~2025		数字孪生、基础设施、IT 运维；智慧运维、健康管理、故障预测、耗能优化；信号系统

第一阶段，智能建筑、电器初现，智能运维的概念也随之出现，由于缺乏高效数据采集处理手段，学术研究更多的是管理体制与流程优化。2014 年起，智能化、故障诊断这类概念出现，智能运维研究视角由行政管理转向运维管理，为后续技术集成奠定基础。

第二阶段前期，智能运维概念在 2016 年正式确立，2017 年兴起的大数据、物联网、状态监测等技术实现了实时感知与处理海量数据，推动运维模式从事后维修转向故障预测。后期，智能建造、可视化贯穿了设计、施工与运维数；2020 年人工智能广泛应用，智能运维实现从单一技术到多技术融合。

第三阶段，智能运维实际应用到具体项目。数字孪生技术可生成项目与设备虚拟模型，提升运维决策科学性；同年研究向信

号系统、轨道交通等复杂工程领域发展。2022~2023 年，健康管理、故障预测、智慧运维成为研究热点，研究目标从发现问题向预判问题转变。由表 5、图 6~7 可知，智能运维研究路径为信息化管理到数字化感知再到智慧化决策的进步。

（四）关键词突现

关键词突现分析是通过识别特定时间内频次剧增的词汇，捕捉该领域的研究前沿与热点转向。将上文关键词共现图谱进一步处理得到 2007~2025 年智能运维研究的 16 个高突现值关键词，按照突现开始年份由远到近的顺序进行排列，如图 8 所示。

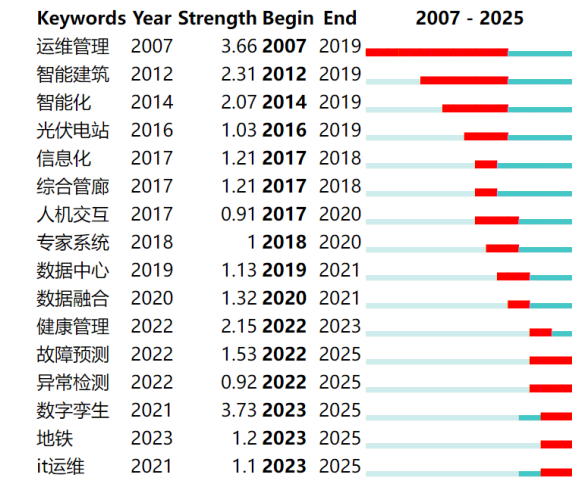


图 8 中国知网智能运维关键词突现图

图 8 可以看出，建筑工程智能运维研究呈现出明显的阶段性演进特征，“运维管理”突现强度为 3.66，持续时间 12 年，这是由于学术界需要长期探讨运维智能化技术的落地方案，“智能建筑”、“智能化”的出现，标志着智能运维管理理论通过硬件设施实现转化。2016 年后，智能运维应用于光伏电站、综合管廊等项目，研究拓展至能源设施与大型市政基础设施领域，“信息化”“人机交互”的出现让研究者发现，单纯的数据采集无法提升效率，需建立运维人员与系统的沟通机制。2020 年，数据融合技术为后续复杂算法的应用提供了数据标准。

“数字孪生”是当前智能运维的核心，突现强度为 3.73，是所有突现词中的最高值，影响至今，这一技术整合了物联网、BIM 与传感器技术，大幅度提升管理精度与响应速度，解决了传统运维中信息滞后的问题^[9]。

最新突现词组反映出运维管理从事后处置向事前预防转变。2022 年起，“健康管理”、“故障预测”与“异常检测”密集突现，原因是建筑工程结构的安全性对预防性维护有极高要求，更倾向于主动预测其中的故障及隐患。“it 运维”的最新突现，说明智能运维正在借鉴 IT 行业的全时监测治理经验来监控建筑工程全生命周期。

五、结论与展望

（一）研究结论

综合现有研究可知，我国智能运维研究始于 2007 年，2019 年

起发文量快速上升，2025年达峰值，学界对智能运维的研究关注度自2019年起持续提升。关键词分析显示，研究热点从基础运维管理转向大数据、人工智能与数字孪生融合的智能运维管理。因传统模式难以处理海量数据、及时排查故障隐患，学者为降低成本、保障运行安全研发自动化分析工具以预测故障。目前智能运维研究领域学者与机构合作网络密度较低，多以独立研究或小团体交流为主，跨机构合作及资源共享不足，制约了理论的创新。

（二）未来展望

本文提出未来研究方向为以下四个方面。第一方面是提升数

据处理水平，建立标准化数据接口，统一数据格式，降低算法学习难度，提高信息处理效率^[10]。第二方面，增强仿真模型动态交互能力，将虚拟模型与现实中的机械设备与建筑工程匹配更精密。第三方面，推动建筑工程全生命周期的数据互联。建设项目设计、施工阶段的数据应与运维阶段数据相互协同，闭环数据流，提升资产管理效率。第四方面，拓宽智能运维技术的应用场景，制定统一行业标准，加速建筑工程智能运维产业化进程，促进行业整体向数字化方向转型^[11]。

参考文献

[1]Turner C J,Oyekan O,Stergioulas L,et al.Utilizing industry4.0 on the construction site:challen-ges and opportunities[J] IEEE Transactions On In-dustrial Informat-ics,2021,17(2):746-756.

[2] 徐菓, 吴冯维, 王润哲. 新型基础测绘对智慧城市建设的作用探析 [J]. 工程与建设, 2024, 38(04): 803-805.

[3] 霍佳丽, 张玉琳, 赵蕾, 等. 我国期刊出版领域人工智能的应用与趋势探析 [J]. 传播与版权, 2024, (21): 10-15.

[4] 施臻峰, 龙凤, 葛察忠, 等. 中国生态环境政策研究发展脉络与展望——基于 CiteSpace 的国内文献计量分析 [J]. 环境科学与管理, 2024, 49(02): 22-27.

[5] 马智利, 雷吉峰. 我国宅基地使用权研究热点综述——基于 Citespace 的可视化分析 [J]. 中国房地产, 2021(09): 50-56.

[6] 尚希钰, 张慧芳, 曹玉清, 等. 基于文献计量学的结核病中医药基础研究全球研究现状及热点分析 [J]. 中国防痨杂志, 2025, 47(04): 482-497.

[7] 谭晓琳. 我国特色小镇高质量发展研究现状及未来展望——基于 Citespace 的可视化分析 [J]. 湖北第二师范学院学报, 2023, 40(03): 58-63.

[8] 安安. 城市老旧小区适灾韧性评价及提升策略研究 [D]. 青岛理工大学, 2023.

[9] 郑斯煜. 基于提示学习方法识别关键词语义功能的领域主题演化分析 [D]. 南京工业大学, 2024.

[10] 李昊旻. 基于智慧高速交通流优化与调度的人-车-路协同问题研究 [J]. 汽车画刊, 2024, (01): 137-139.

[11]Rojas, L; Peña, A and Garcia, J.AI-Driven Predictive Maintenance in Mining: A Systematic Literature Review on Fault Detection, Digital Twins, and Intelligent Asset Management[J]Applied sciences-basel,2025,15(6).

高层建筑消防施工管理的核心要点及实践探讨

钟胜

广东保利城市发展有限公司, 广东 广州 510000

DOI:10.61369/ERA.2026080032

摘 要 : 高层建筑消防施工管理直接关系建筑整体防火能力与人员逃生安全。施工环节涉及消火栓、消防喷淋、自动报警、防排烟等多个系统, 管理难度较大。研究从施工准备、系统安装、联动调试、验收维护四个方面梳理核心管理要点, 结合工程实践分析常见问题及应对措施。通过强化过程管控与质量检验, 能够提升消防系统运行的可靠性。施工管理需要注重各专业协调配合, 严格执行技术规范, 确保消防设施发挥应有作用。

关 键 词 : 高层建筑; 消防施工管理; 质量控制; 安全要点

Core Points and Practical Exploration of Fire Protection Construction Management in High rise Buildings

Zhong Sheng

Guangdong Poly Urban Development Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510000

Abstract : The fire protection construction management of high-rise buildings is directly related to the overall fire prevention capability of the building and the safety of personnel evacuation. The construction process involves multiple systems such as fire hydrants, fire sprinklers, automatic alarms, and smoke control, making management difficult. Research on the core management points from four aspects: construction preparation, system installation, linkage debugging, acceptance and maintenance, and analyze common problems and countermeasures based on engineering practice. By strengthening process control and quality inspection, the reliability of the fire protection system operation can be improved. Construction management needs to pay attention to coordination and cooperation among various professions, strictly implement technical specifications, and ensure that fire-fighting facilities play their due role.

Keywords : high-rise buildings; fire construction management; quality control; safety points

引言

城市高层建筑数量持续增长, 建筑高度与复杂程度不断提高, 火灾风险随之增加。消防施工质量是建筑投入使用后防火减灾的基础保障。然而实际施工中, 不同专业交叉作业多, 隐蔽工程量大, 部分环节存在管理漏洞。从施工角度出发, 分析消防施工管理的重点内容, 探讨可行的管理方法, 对提高工程质量有现实意义。现围绕高层建筑消防施工的关键环节展开讨论, 为相关施工管理提供参考。

一、施工准备阶段的管理要点

(一) 图纸会审与技术交底

施工开始前, 施工单位组织消防、给排水、电气、暖通等专业技术人员进行图纸会审。会审重点检查消防系统与其他专业管线、结构构件之间的空间冲突, 如喷淋管道是否与风管、电缆桥架位置重叠, 消火栓箱是否影响疏散通道宽度。会审发现的设计矛盾应在施工前形成书面变更意见并经设计单位确认。技术交底需覆盖施工班组每一名作业人员, 内容包含消防系统的设计参数、设备安装位置、管道坡度要求、接线规范等具体技术指标。交底完成后由所有参与人员签字确认并存档。施工方案应当结合

工程实际情况编制, 明确各系统施工顺序、主要施工方法、质量控制点及检验试验计划。方案先由施工单位技术负责人审核, 再报总监理工程师审批, 作为现场施工管理的依据。

(二) 材料设备进场检验

消防施工所用管材、阀门、喷头、报警设备、防火涂料等, 须符合设计文件及市场准入要求。进场时质检员核对产品合格证、型式检验报告、认证证书等质量证明文件。对管材壁厚、镀锌层质量、阀门密封性能等指标, 可抽样测量或简易试验。不同批次材料分开堆放并标识, 防止混用。不合格材料立即清退出场。监理单位对主要材料进场验收旁站见证, 并在验收记录上签字。严格材料检验, 从源头保障消防施工质量^[1]。

二、消防水系统施工管理核心

（一）消防水池与水泵房安装

消防水池的施工要注意防水套管预埋位置准确，进水管标高符合设计要求。水池内部应设置爬梯和检修人孔，便于后期维护。水池建成后需要进行满水试验，检查池体渗漏情况，试验记录必须完整。消防水泵安装前需要核对设备基础尺寸与地脚螺栓位置，泵体水平度偏差控制在规范允许范围内。

水泵进出水管道上的阀门、压力表、柔性接头等附件应当按照设计图纸配置齐全。控制柜安装位置要预留足够的操作空间，柜体接地可靠。水泵单机调试时，管理人员应记录电压、电流、转速、出口压力等运行参数，确认水泵转向正确且无异响。两台及以上水泵并联运行时，需要测试备用泵自投功能是否正常。

（二）室内消火栓系统施工

消火栓立管安装应垂直，管道固定支架间距符合规范要求。立管穿过楼板处应当设置套管，套管与管道之间用防火阻燃材料填塞密实。消火栓箱安装位置必须满足栓口距地面高度和距箱体边缘距离的要求，不能随意调整。箱门开启角度不应小于规定值，且箱门材料不能遮挡栓口操作。消火栓管道安装完成后需要进行水压试验。试验压力按照设计工作压力确定，稳压期间检查所有接口、阀门、管道无渗漏。试验合格后及时冲洗管道，冲洗水流速度达到规定值，直到出口水色与进水口基本一致为止。消火栓试射试验应选择有代表性的楼层进行，测试充实水柱长度是否达到设计要求^[2]。

（三）自动喷水灭火系统施工

喷头安装必须在管网试压和冲洗合格后进行，安装时使用专用扳手，不得对喷头框架和溅水盘施力。不同场所选用不同类型喷头，例如厨房区域采用高温喷头，走廊等位置可以采用隐蔽式喷头。喷头与梁、通风管道、照明灯具等障碍物的间距需要符合规范，否则会改变洒水分布形态影响灭火效果。报警阀组安装位置要便于操作，阀组周边环境温度不能低于规定值。每层或每个防火分区的末端试水装置应当设置便于观察和操作的部位。系统调试时，开启末端试水装置，报警阀组和水力警铃应当在规定时间内动作，压力开关直接启动水泵。水流指示器动作后，控制中心应准确显示报警分区位置。

三、火灾自动报警系统施工管理

（一）管线敷设与布线

火灾自动报警系统的管线应当单独敷设，尽量不与强电路共用同一线槽或穿线管。必须与低压线路平行敷设时，需要保持足够的间距或采取金属隔板隔离措施。电源和联动线路应采用金属导管或金属槽盒，管口应打磨光滑防止损伤导线绝缘层。管线经过建筑物的伸缩缝或沉降缝时，应当设置补偿装置。导线敷设前需要检查线缆型号、规格、绝缘电阻是否符合设计要求。不同电压等级、不同信号类型的导线不能穿入同一根管内。接线盒内预留的导线长度应当满足设备接线的需要，导线连接采用压接或

焊接方式，不能直接缠绕。每个回路导线的首尾两端都应设置清晰编号，便于后期调试和维修。

（二）探测器与模块安装

感烟、感温探测器安装位置要避免开送风口、回风口、梁柱遮挡以及照明灯具热辐射区域。探测器至墙壁和梁边的水平距离、两个探测器之间的水平距离均应符合规范。探测器底座安装牢固，指示灯方向面向主要入口。安装在顶棚上的探测器，周围不能有装饰物遮挡。输入输出模块通常设置在专用模块箱内或靠近受控设备的位置。模块的编码地址必须与设计图纸和联动控制逻辑一致，编码错误会导致系统联动混乱。每个模块的接线端子要标明回路号和设备编号，方便故障排查。对于总线制系统，需要在最远端模块处测量总线电压，确认线路衰减在允许范围内^[3]。

（三）消防控制室设备安装

消防控制室内的报警控制器、联动控制器、图形显示装置等设备应当按厂家安装图进行布置。设备正面操作距离、侧面维修通道宽度以及设备与墙面的距离需要满足使用要求。控制台与落地式机柜的安装垂直度偏差不能过大，多台设备并排时顶部高度应当保持一致。控制器的主电源应当采用专用消防电源，不得与普通照明或动力插座共用回路。备用电源采用蓄电池组，电池容量需要保证主电停电后系统在规定时间内正常工作。安装完成后进行控制器功能检查，包括自检、消音、复位、故障报警、火警优先等基本功能。调试人员需要逐回路测试探测器报警响应情况，确认控制器能够准确接收并显示报警信息。

四、防排烟系统与防火分隔施工管理

（一）防排烟风管与风机安装

防排烟系统的风管应采用镀锌钢板制作，钢板厚度按照中高压系统选用。风管连接法兰之间应设置耐高温不燃的密封垫片，防止漏风。风管穿越防火墙和楼板处需要设置防火阀，防火阀安装方向必须正确，易熔片应面向火源方向。防火阀与防火墙之间的风管壁厚应当加厚，长度符合规范要求。排烟风机和正压送风机应设置在专用风机房内，除与平时排风系统共用外，不设减振装置，且严禁使用橡胶类减振器。风机电源接线采用耐火电缆，配电箱标明“消防风机”标识。风机启动试验时，检查叶轮旋转方向是否与标示箭头一致，测量风机进出口风速是否达到设计值。对于设置在高处的排烟口，需要配备手动开启装置且操作高度方便人员使用。

（二）防火卷帘与防火门施工

防火卷帘安装前应当核对洞口尺寸，卷帘导轨与墙面之间的缝隙用防火材料填实。卷帘下方不能堆放任何物品，保证降落后能够完全闭合。联动调试时，疏散通道上的卷帘控制器接收感烟探测器信号后应将卷帘下降至距地面1.8m，接收感温探测器信号后应完全降到底。卷帘手动拉链的操作力应当适度，便于紧急情况下人工操作。防火门按照耐火等级和安装位置分为甲级、乙级、丙级，疏散通道上的防火门必须向疏散方向开启。门框与墙体之间的缝隙用水泥砂浆或防火材料塞严，门扇与门框之间的搭

接缝隙均匀。闭门器安装后要调整关门速度，保证防火门能够可靠关闭且不发出剧烈撞击声。常开防火门需要配备联动释放器，火灾时能够自动关闭^[4]。

（三）管道井与电缆井封堵

高层建筑内的管道井和电缆井是火灾竖向蔓延的主要通道，施工时必须做好层间封堵。每层楼板处应采用不低于楼板耐火极限的不燃材料封堵严密。封堵前清理井内杂物和灰尘，在管道或电缆穿过楼板的部位，先设置防火枕或防火堵料，再在表面涂抹防火密封胶。同一井道内不同管线的间距应当均匀布置，便于封堵材料填充到位。封堵完成后要进行外观检查，确认没有漏封和空洞。对于后续新增管线需要穿过封堵层的情况，应当重新进行封堵，不能随意拆开原有封堵结构。封堵材料的出厂合格证和检测报告应整理归档，作为消防验收的依据之一。

五、施工过程控制与验收管理

（一）隐蔽工程检查验收

消防施工中大量管线敷设在吊顶内、墙体内部或楼板夹层中，这些隐蔽部位必须在覆盖前完成检查验收。施工单位先自检合格，再通知监理单位进行隐蔽验收。验收内容包括管道安装坡度、支架间距、接头质量、穿墙套管封堵、导线绝缘电阻等。对于喷淋系统的预作用管道，还需要检查充气装置是否正常。隐蔽验收时需要拍摄现场照片，照片应包含定位标识和测量尺度，反映隐蔽部位的实际施工状态。所有隐蔽工程验收记录必须由施工质检员、监理工程师共同签字，签字不全不能进入下一道工序。隐蔽验收中提出的整改问题，应当在整改完成后进行复验，复验合格方可隐蔽覆盖^[5]。

（二）系统联合调试

消防系统联合调试是检验施工质量最后关口。调试前确认消防水源、电源已经接通并且参数正常，各系统单机试运行合格。调试时按照模拟火灾的触发顺序，依次测试探测器报警、控制器响应、声光报警器启动、应急广播切换、非消防电源切断、防火卷帘降落、防排烟风机启动、消防水泵启动等联动功能。每项联动功能需要测试三次以上，记录响应时间和动作顺序是否满足设计要求。例如探测器报警后，相应区域的送风口应打开，正压风机应在规定时间内启动，楼梯间和前室的余压值应达到规定范围。对于测试中发现的不联动或动作顺序错误的问题，分析原

因后由相应专业施工单位整改，整改完成重新测试。所有调试记录应当整理成报告，作为竣工文件的一部分。

（三）成品保护措施

消防施工过程中，其他专业作业可能对已安装的消防设施造成损坏或污染。成品保护需要纳入日常管理，制定保护责任分工方案。已安装的喷头在装修阶段应当套上保护罩，防止油漆或砂浆污染热敏玻璃球。探测器在精装修完工后再安装，避免灰尘进入迷宫造成误报。消防控制室设备在交付使用前保留原包装薄膜，操作人员接触设备时应戴手套。

水系统管道试压冲洗后，需要关闭系统末端阀门并排尽管道内积水，防止冬季冻裂。阀门手柄应当处于关闭或开启的明确位置，避免误操作。成品保护的责任落实到具体班组，每日收工前检查现场，发现保护措施缺失或损坏立即恢复。

（四）消防验收资料准备

消防验收前需要整理完整的施工过程资料，包括材料设备进场检验记录、隐蔽工程验收记录、水压试验和冲洗记录、绝缘电阻测试记录、系统调试报告、联动测试记录等。每项记录要求内容真实、签字齐全、日期连续。同时准备消防产品供货证明、型式检验报告、认证证书等质量证明文件的复印件，按照设备种类分类组卷。

竣工图纸应当与现场实际施工情况一致，变更内容在图纸上标注清楚并附设计变更单。施工单位配合建设单位填写消防验收申报表，整理各方主体责任承诺书。验收过程中提出的整改意见，施工单位应当逐条整改并书面回复整改完成情况，附整改前后对比照片。资料准备充分、现场条件达标，有助于提高验收通过效率。

六、结束语

高层建筑消防施工管理涉及专业广、环节多、协调难。从施工准备到联动调试，各阶段均存在影响消防功能的风险点。做好施工管理，要求管理人员掌握规范、施工人员具备技能、各专业密切配合。强化隐蔽工程验收、设备安装精度和联动测试三个关键环节，可提升消防系统可靠性。实践中还需重视成品保护与施工记录归档，为后续维护打下基础。只有将消防施工管理落到实处，才能使高层建筑具备应有的火灾防御能力。

参考文献

- [1] 郭家骏. 现代高层建筑消防工程施工管理要点探讨[J]. 中国房地产业, 2020(34): 108.
- [2] 刘玉红. 现代高层建筑消防工程施工管理要点探讨[J]. 建筑工程技术与设计, 2020(12): 4067.
- [3] 顾晓杰. 高层建筑消防施工管理要点探讨[J]. 现代物业, 2020(7): 116-117.
- [4] 孟鑫. 高层建筑消防工程施工中的常见问题及质量控制措施[J]. 中国公共安全, 2023(6): 112-114.
- [5] 唐小飞. 高层建筑消防工程施工质量控制研究[J]. 国际建筑学, 2025, 7(8).

基于 PLC 的大型公共建筑电气智能化系统设计

陈小礼

广州白云国际机场, 广东 广州 510000

DOI:10.61369/ERA.2026080033

摘 要 : 针对大型公共建筑中廊道空调全天连续运行导致能源浪费与设备老化、飞机空调冷凝水直排机坪造成积水湿滑等问题,设计一套基于 PLC 的电气智能化系统。该系统整合人体红外感应、温度检测、水位浮子开关及隔膜泵等设备,实现空调按需启停、模式自适应切换及冷凝水自动收集排放。系统预留 485 通信接口,支持远程监控。应用表明,该方案可有效降低空调能耗、延长设备寿命、消除地面积水隐患,为大型公共建筑节能改造提供可行技术路径。

关 键 词 : PLC; 大型公共建筑; 电气智能化

Design of Large Public Building Electrical Intelligent System Based on PLC

Chen Xiaoli

Guangzhou Baiyun International Airport, Guangzhou, Guangdong 510000

Abstract : A PLC based electrical intelligent system is designed to address issues such as energy waste and equipment aging caused by continuous operation of corridor air conditioning in large public buildings, and water accumulation and slippery conditions caused by direct discharge of condensate water from aircraft air conditioning to the apron. This system integrates human infrared sensing, temperature detection, water level float switch, diaphragm pump and other equipment to achieve on-demand start stop of air conditioning, mode adaptive switching, and automatic collection and discharge of condensate water. The system reserves a 485 communication interface to support remote monitoring. The application shows that this scheme can effectively reduce air conditioning energy consumption, extend equipment life, eliminate water hazards on the ground, and provide a feasible technical path for energy-saving renovation of large public buildings.

Keywords : PLC; large public buildings; electrical intelligence

引言

大型公共建筑中暖通空调系统能耗占比高,辅助设备运行方式也直接影响现场安全。白云机场登机桥廊道空调长期 24 小时连续运行,造成电能浪费与设备加速老化,且启停依赖人工遥控,故障响应滞后;飞机空调冷凝水直排停机坪导致地面积水湿滑,安全隐患突出。采用基于可编程逻辑控制器的智能化控制技术,在不大幅更换原有设备的前提下,可实现空调按需启停、模式自适应切换及冷凝水自动排放,有效提升系统自动化水平与运行安全性。

一、项目概述

(一) 项目背景

白云机场 T1、T2 航站楼登机桥廊道空调全天 24 小时连续运行,因缺乏人员感知装置且依赖人工遥控操作,造成电能浪费、设备加速老化,且无法远程监控故障状态。T2 航站楼飞机空调冷凝水直排停机坪,导致长期积水滋生青苔,地面摩擦系数下降,存在人员滑倒和车辆打滑的安全隐患。

(二) 项目特点

本项目具有四个显著特点:一是改造范围明确,仅增加控制模块和排水部件,不更换空调主机和管路,成本低、施工易;二是控制逻辑匹配实际需求,廊道空调实现“有人开机、无人延时

关机、温控自适应”,冷凝水排水采用双浮子开关防止隔膜泵频繁启停;三是预留 485 通信接口,便于接入楼宇监控系统;四是施工协调可控,采用模块化预制和快速插件,多数安装可在航班间隙完成,不影响正常运营,且不改变空调保修条款^[1]。

二、系统总体设计

(一) 设计原则

系统设计遵循四项基本原则。

可靠性原则。选用工业级可编程逻辑控制器和成熟传感器,如西门子、三菱等主流品牌 PLC,确保在电磁干扰环境下稳定工作。所有电气连接均采用屏蔽线缆和压接端子,减少接触不良

风险。

经济性原则。不改变原空调制冷系统和风机系统，单个登机桥改造的材料成本控制在千元以内。充分利用现有空调控制主板提供的5V电源，无需额外配置电源模块，进一步降低投入。

可维护性原则。控制程序采用梯形图编写，便于一线电工理解与修改；关键接线端子设置清晰标识，并提供纸质版接线图存档。各传感器采用插拔式接口，更换部件无需重新剥线焊接。

扩展性原则。预留不少于20%的输入输出端口容量，为将来增加烟雾探测或门禁联动功能提供条件。例如，烟雾探测可用于火灾联动关机，门禁联动可在廊道封闭时强制节能运行。同时，所有外购部件优先选用市场上长期有货的通用型号，避免因停产导致的维护困难^[2]。

（二）总体架构

系统架构分为四个层次。感知层包含人体红外感应传感器、DS18B20数字温度传感器、上下水位浮子开关以及空调风机反馈接口。控制层以可编程逻辑控制器为核心，负责接收传感器信号、执行逻辑运算并向执行层输出指令。执行层包括红外发射头（控制空调启停和模式）、隔膜泵（用于排水）以及空调原有风机。通信层通过485接口连接现场设备网，采用Modbus RTU协议，将数据汇总至中控室监控平台。这种分层结构使得每一层的功能相对独立，更换或升级某一层的设备不会对其他层产生较大影响。

（三）控制逻辑概述

廊道空调控制逻辑：当人体红外传感器检测到人员经过时，控制器读取环境温度。若温度高于26℃，发出制冷模式指令并设定三档风速；若温度在16℃至26℃之间，发出通风模式指令；若温度低于16℃，发出关机指令。当最后一人离开后，延时20分钟自动关机。冷凝水排水控制逻辑：上浮子开关闭合时启动隔膜泵排水，水位下降至下浮子开关断开时停止排水，程序设置启停回差区间防止频繁启停。故障监测逻辑：每次执行开机或关机指令后，读取风机反馈信号进行比对，若状态不符则通过485接口上传故障代码。以上逻辑均采用循环扫描方式执行，扫描周期设定为100毫秒，确保响应及时^[3]。

（四）与传统控制方式的对比

传统的廊道空调控制方式主要有两种：一是完全人工遥控操作，二是简单的定时开关。人工操作存在遗忘关闭的问题，定时开关则无法适应航班时刻的动态变化。本方案采用人体红外感应加延时关机的策略，既不需要人工干预，又能根据实际人员流动自动启停，灵活性和节能效果均优于上述传统方式。传统冷凝水处理依赖地面自然蒸发或人工清扫，效果差且不安全，本方案实现了全自动排水，从根本上解决了积水问题。

三、廊道空调红外感应智能启停控制设计

（一）人体红外感应与温度采集

人体红外感应传感器选用被动式热释电红外模块，检测范围覆盖廊道主要通道。传感器输出开关量信号接入PLC数字输入端

口。当有人经过时，传感器输出高电平，PLC识别后启动空调开启流程。

温度采集采用DS18B20数字温度传感器，该传感器经单总线与PLC连接，测量精确度达0.5℃，能够满足廊道环境温度判断需求。传感器安装位置应避开空调出风口直吹区域，以获取真实的环境温度值。

（二）红外遥控编码与发射

对现有空调遥控器的红外编码进行分析，获取开关机、制冷模式、通风模式、三档风速以及16℃、26℃对应的编码序列，存储在控制器只读存储器中。格力空调采用NEC编码格式，每帧数据包含引导码、地址码、地址反码、命令码和命令反码。当需要执行相应动作时，控制器调取编码序列，通过数字输出端口控制红外发射管以38千赫兹载波发射信号，发射距离3至5米，确保空调内机接收头可靠接收。为提高抗干扰能力，每一条指令连续发送三次，每次间隔50毫秒。

（三）空调状态反馈

从空调控制主板引出三档风机的电平反馈点，分别接入控制器的数字输入端口。控制器由此判断风机实际运转档位，形成闭环控制：发出开机指令后若20秒内反馈信号显示未启动，则重发一次指令，仍失败则报警。该设计只取信号不改变原机控制电路，安全可靠。反馈信号还能用于判断空调是否因故障中途停机，一旦检测到异常停机，控制器将记录故障时刻并上传报警^[4]。

（四）延时关机策略

人员离开后20分钟自动关机。该延时值基于典型登机桥作业场景确定：末班旅客离开后，保洁人员大约需要10至15分钟完成清扫，20分钟的延时既能保证旅客短暂折返（如遗忘物品）时空调不立即关闭，又能避免无人时空转。延时期间每次红外传感器重新触发，计时器复位，确保连续有人的情况下空调不会误关闭。现场可根据实际运营需要，通过编程软件调整延时参数，调整范围为5至30分钟。

四、飞机空调冷凝水自动排水系统设计

（一）集水箱与管路布置

在单风管桥载飞机空调前端安装桥载集水箱，用于收集前廊道空调和飞机空调两者的冷凝水。飞机空调原有出水口通过铜管连接至集水箱入口；前廊道冷凝水采用3分钢丝软管配合转接头，与铜管汇合后流入集水箱。集水箱容量经计算可满足单次运行周期内的冷凝水积蓄量。

（二）水位检测与隔膜泵控制

集水箱内安装上下两个水位浮子开关。下浮子安装于底部向上5厘米处，上浮子安装于顶部向下5厘米处。两个浮子开关的信号线接入控制器数字输入端口。选用直流12伏微型隔膜泵，扬程8米，流量每分钟3升，具有自吸功能，最大吸程2米。控制器通过继电器控制隔膜泵启停。为防止长时间空转烧毁水泵，设置最长运行时间保护：若连续运行超过3分钟仍未收到下浮子断开信号，则强行停止并上传报警，提示人工检查水箱是否出口堵塞或

水泵故障^[5]。

（三）管路连接与排水去向

飞机空调冷凝水出口使用外径10毫米的紫铜管连接至集水箱，接头处缠绕生料带并涂抹螺纹密封胶，防止制冷剂泄漏。前廊道冷凝水采用内径8毫米的三分钢丝软管连接，通过变径转接头与铜管汇合后接入集水箱。排水管选用内径10毫米的增强尼龙软管，接头使用不锈钢喉箍紧固。所有管路均使用管卡固定在登机桥结构梁上，间距不超过500毫米，避免振动导致脱落。隔膜泵出水管引至风机房水槽，冷凝水与原有排水混合后可再利用于绿化或卫生清洁，实现水资源回收。

（四）电气安全与防护措施

隔膜泵和浮子开关的工作电压均为直流12伏或直流5伏，属于安全特低电压，即使在潮湿环境下也不会对人员造成触电危险。控制器部分从空调控制主板取5伏电源，该电源本身由空调内部开关电源隔离提供。所有外露接线端子均采用防水接线盒封闭，防护等级达到IP65，可防止灰尘和低压喷水侵入。

五、通信与远程监控设计

（一）485通信网络

PLC预留485通信接口，采用Modbus RTU协议。接口可向外发送当前廊道环境温度、空调启停状态、集水箱水位状态、隔膜泵运行状态等数据。现场设备网通过485总线连接多个登机桥的控制节点，将数据汇总至中控室监控平台。

（二）上传数据内容

每个控制器上传以下数据：当前环境温度（精确到0.5℃）、空调实际运行状态（0关机、1制冷、2通风）、当前风机档位（0停止、1低速、2中速、3高速）、累计运行时间（小时）、隔膜泵累计启动次数、上水位报警标志（1表示触发了上水位）、故障代码（0无故障、1风机反馈异常、2隔膜泵超时）。上述数据以16位整数的形式存储在保持寄存器中，监控系统读取后进行换算显示。数据更新频率与轮询周期一致，即每2秒刷新一次。

（三）中控室监控功能

监控计算机安装组态软件，以图形化界面展示每条登机桥的空调状态和排水系统工作状态。总览图中用不同颜色表示运行状态：绿色为制冷模式运行，黄色为通风模式运行，灰色为关机，红色为故障。点击图标后可进入详细页面，查看温度变化曲线（最近24小时）、启停历史记录、累计运行时长等参数。报警信息

以弹窗和声音提示值班人员，并自动记录报警时间和内容到数据库，便于事后追溯。中控室操作人员可远程执行强制开关机和温度设定修改，所有远程指令需二次确认，操作记录保存于数据库日志，防止误操作且具备可审计性。

六、系统调试与运行效果

（一）调试步骤

完成所有硬件安装和接线后，通电检查PLC电源指示灯及各传感器供电是否正常。使用编程软件下载控制程序至PLC，依次模拟人员经过、温度变化、水位上升等工况，观察空调是否按预期动作、隔膜泵是否在设定水位启停。通过485接口读取上传数据，核对数值是否与现场一致。

（二）运行效果

系统投入运行后，廊道空调不再24小时连续运转。在无旅客时段，空调自动关闭，仅在有人通过时启动，有效降低了电能消耗。同时，由于运行时长缩短，空调压缩机及相关部件的老化速度减缓，维修频率下降。冷凝水自动排水系统使停机坪地面保持干燥，青苔不再滋生，消除了滑倒和打滑的安全隐患。管理人员可在中控室实时查看所有设备状态，故障响应时间大幅缩短。

（三）存在问题与改进方向

在实际运行中发现，个别情况下（如极高温天气同时日照强烈）红外传感器可能出现误触发，原因是空调出风口冷气与外部热空气对流造成的温度波动被传感器误判。后续改进可采用双鉴探头（红外加微波）或调整传感器灵敏度参数来减少误报。另外，隔膜泵长期运行后可能存在橡胶膜片老化问题，建议每两年更换一次膜片作为预防性维护。

七、结束语

基于PLC的电气智能化系统针对廊道空调全天运行与冷凝水直排两大痛点，采用红外感应实现空调按需启停，配合温度自适应调节，有效降低能耗并延长设备寿命；通过集水箱、浮子开关与隔膜泵实现冷凝水自动收集排放，消除地面湿滑隐患。预留485通信接口支持远程监控，使设备管理由被动巡检转向主动预警。该方案技术成熟、改造成本低、施工影响小，节能与安全效益显著，可在其他大型公共建筑中推广应用。

参考文献

- [1] 张才伟, 罗长发, 张鑫, 等. 基于PLC的大型公共建筑电气智能化系统设计分析[J]. 中国设备工程, 2024(6):30-32.
- [2] 宋铭洁. 基于PLC的大型公共建筑电气智能化系统设计[J]. 中国建筑金属结构, 2023, 22(8):95-97.
- [3] 李兆楠. 基于PLC的大型公共建筑电气智能化系统设计[J]. 砖瓦世界, 2022(10):181-183.
- [4] 刘玉强. 基于PLC的大型公共建筑电气智能化系统设计[J]. 数字化用户, 2024(10):199-200.
- [5] 李萌. 基于PLC的大型公共建筑电气智能化系统设计[J]. 数码设计(下), 2021, 10(6):156.

城市综合体地下室防火分隔设计方法研究

陈岩松

华东建筑设计研究院有限公司, 上海 200002

DOI:10.61369/ERA.2026080038

摘 要 : 根据上海市工程建设规范《城市综合体消防技术标准》DG/TJ08-2408-2022 (下文简称《城综》) 第2.0.1条对城市综合体的定义为“建筑面积等于或大于50000m²、集2种或2种以上功能于一体的单体公共建筑, 及通过地下连片车库、地下连片商业空间、下沉式空间、连廊等方式连接的多栋公共建筑组合体。”在《关于加强超大城市综合体消防安全工作的指导意见》公消[2016] 113号(下文简称《113号文》)中提出, 总建筑面积大于10万平方米(含本数, 不包括住宅和写字楼部分的建筑面积), 集购物、旅店、展览、餐饮、文娱、交通枢纽等两种或两种以上功能于一体的为超大城市综合体。

可见城市综合体规模大、功能复杂, 其地下室的消防安全也具有火灾场景多、消防救援难等特点, 防火分区及防火分隔设计应遵循国家现行规范、标准规定, 针对地下室及其火灾特点进行防火分区、防火分隔设计。

关 键 词 : 城市综合体; 防火分隔区域; 防火分区; 防火分隔措施

Research on the Design Method of Fire Separation in Urban Complex Basements

Chen Yansong

East China Architectural Design and Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200002

Abstract : According to the Shanghai Engineering Construction Code "Technical Standard for Fire Protection of Urban Complex" DG/TJ08-2408-2022 (Article 2.0.1 of the "Urban Comprehensive Plan" defines urban complexes as "single public buildings with a building area equal to or greater than 50000 square meters, integrating two or more functions, and a combination of multiple public buildings connected by underground connected garages, underground connected commercial spaces, sunken spaces, corridors, etc." In the "Guiding Opinions on Strengthening Fire Safety Work in Mega City Complex" (Public Consumption [2016] No. 113), it is proposed that the total building area is greater than 100000 square meters (including this number, excluding the building area of residential and writing buildings), integrating shopping, hotels, exhibitions, catering, entertainment, transportation hubs, and other two types. A mega city complex is one that combines two or more functions.

It can be seen that urban complexes have a large scale and complex functions, and the fire safety of their basements also has the characteristics of multiple fire scenarios and difficult fire rescue. The design of fire compartments and fire partitions should follow the current national norms and standards, and be designed according to the characteristics of basements and fires.

Keywords : urban complex; fire separation area; fire compartment; fire separation measures

引言

《药品生产质量管理规范》(Good Manufacture Practice, 简称GMP)是药品生产和质量管理的基本准则, 是确保药品质量符合预定用途和注册要求的重要规范。生物制药企业的产品质量直接关系到公众的生命健康和安全, 因此, 基于GMP规范优化质量管理体系具有极其重要的意义。

一、不同功能区域之间的防火分隔设计

不同使用功能之间应进行防火分隔，多种使用功能场所应按照消防要求高的部分确定整个场所的要求，这是防火分区及防火分隔设计要首先要考虑并需要遵循的防火设计原则。以下为相关规范的规定：

1. 同一建筑内的不同使用功能区域之间应进行防火分隔。引自《建筑防火通用规范》GB 55037-2022（下文简称《通规》）第4.1.1条。

2. 同一建筑内设置多种使用功能场所时，不同使用功能场所之间应进行防火分隔。引自《建筑设计防火规范》（2018版）GB50016-2014（下文简称《建规》）第1.0.4条。

3. 城市综合体中相同使用功能的场所宜集中布置。引自《城综》第5.1.1条。

4. 由多种使用功能组成的同一场所或同一场所可作为多种功能使用，当不同使用功能之间未采取有效的防火分隔措施时，应按照消防要求较高的部分确定整个场所的消防安全要求。引自《城综》第5.1.2条。

二、地下商业的防火分隔设计

1. 应分隔为多个建筑面积不大于20000 m²的区域。商业空间是城市综合体地下室的主要功能形式之一，在进行消防设计时需要将建筑面积大于20000 m²时进行防火分隔划分。主要规范要求有：

（1）当城市综合体地下、半地下商业部分总建筑面积大于20000 m²时，应分隔为多个建筑面积不大于20000 m²的区域。引自《通规》第4.3.17条。

（2）各区域之间应采用无门、窗、洞口的防火墙、耐火极限不低于2.00h的楼板分隔。引自《建规》第5.3.5条。

（3）相邻区域确需局部连通时，应采用下沉式广场等室外开敞空间、防火隔间、避难走道、防烟楼梯间等方式进行连通。《建规》第5.3.5条。

（4）每个小于20000 m²且大于10000 m²的区域均应设置一处下沉式广场，引自《城综》第5.2.1条。（注1）。

2. 相邻区域间连通部位的防火分隔方式。为保证商业空间动线的连续性各区域之间连通部位通常采用下沉式广场或防火隔间的方式。下沉式广场或防火隔间的设置需要符合以下要求：

（1）用于防火分隔的下沉式广场应符合《建规》第6.4.12条要求。

（2）防火隔间的墙应为耐火极限不低于3.00h的防火隔墙，并应符合《建规》第6.4.13条的规定。在《城综》第5.2.8条中规定防火隔间的门应错开设置（注1）。

3. 防火分区划分。在每个建筑面积不大于20000 m²的商业区域内，根据《建规》防火分区最大允许建筑面积的规定进行防火分区的划分。

地下商业营业厅，当设置自动灭火系统和火灾自动报警系统

并采用不燃或难燃装修材料时，每个防火分区的最大允许建筑面积为2000 m²。引自《建规》第5.3.4条。

进行防火分区划分时，需要关注到以下几个情况：

（1）可不计入防火分区的建筑面积。根据规范以下面积可不计入防火分区的建筑面积：

建筑内游泳池、消防水池等的水面、冰面或雪面面积，射击场的靶道面积，污水沉降池面积，可不计入防火分区的建筑面积。引自《通规》第4.1.2条。

建筑内游泳池、清防水池等的水面面积、无可燃物的冰面或雪面面积等可不计入防火分区的建筑面积。引自《城综》第5.2.3条。

（2）地下餐饮场所，当设置自动灭火系统时，防火分区的最大允许建筑面积为1000 m²。根据《建规》第5.3.4条条文说明“当营业厅内设置餐饮场所时，防火分区的建筑面积需要按照民用建筑的其他功能的防火分区要求划分，并要与其他商业营业厅进行防火分隔。”

（3）当设置中庭、自动扶梯等地下、地上相连通的开口时，开口部位需要采取防火分隔措施。地下建筑消防救援难度远大于地上建筑，地上、地下防火分区标准不同，虽然《建规》第5.3.2条对设置上、下层相连通的开口时的防火分区、防火分隔有相关规定，以下几种设计情形的防火分隔设计要求仍需要特别关注与执行：

地下、地上商店连通建筑面积叠加计算不应大于20000 m²。根据《建筑设计防火规范》国家标准管理组“关于地下商店防火分隔问题的复函”建规字【2019】3号，当地下中庭未按《建规》第5.3.5条的规定进行防火分隔时，其连通的地上部分的建筑面积应计入《建规》第5.3.5条规定的总建筑面积。当中庭采用《建规》第5.3.5条未规定的防火分隔方式进行区域之间连通时，应根据《建规》规定的防止火灾蔓延的防火设计原则和目标确定其等效性。

地下、地上相连通的防火分区建筑面积应按照地下防火分区标准。根据《城综》第5.2.7条中规定“城市综合体的首层和地下层之间不宜设置跨层通高空间，当确需在建筑首层和地下层之间设置中庭、敞开楼梯、自动扶梯等上、下层相连通的开口时，其防火分区的建筑面积应按上、下层相连通区域的建筑面积叠加计算，且不应超过地下层相应使用功能防火分区的最大允许建筑面积。”从《城综》第5.2.7条条文说明中可以看出，若“按防火分区之间的防火分隔方式对开口部位进行可靠的防火分隔”则可以按照地上层相应使用功能防火分区的最大允许建筑面积。

首层为扩大前室的门厅（公共大堂）和地下层相连通的开口应采用防火墙、甲级防火门分隔。根据《建筑高度大于250米民用建筑防火设计加强性技术要求（试行）》公消[2018]57号第三条“用于扩大前室的门厅（公共大堂），应采用耐火极限不低于3.00h的防火隔墙与周围连通空间分隔，与该门厅（公共大堂）相连通的门窗应采用甲级防火门。”

4. 地铁站与地下商业之间的防火分隔。

（1）在站厅的上层或下层设置商业等非地铁功能的场所时，

站厅严禁采用中庭与商业等非地铁功能的场所连通；在站厅非付费区连通商业等非地铁功能场所的楼梯或扶梯的开口部位应设置耐火极限不低于3.00h的防火卷帘，防火卷帘应能分别由地铁、商业等非地铁功能的场所控制，楼梯或扶梯周围的其他临界面应设置防火墙。引自《地铁设计防火标准》GB51298—2018第4.1.5条。（注2）

（2）在站厅层与站台层之间设置商业等非地铁功能的场所时，站台至站厅的楼梯或扶梯不应与商业等非地铁功能的场所连通，楼梯或扶梯穿越商业等非地铁功能的场所的部位周围应设置无门窗洞口的防火墙。（注2）

（3）在站厅公共区同层布置的商业等非地铁功能的场所，应采用防火墙与站厅公共区进行分隔，相互间宜采用下沉广场或连接通道等方式连通，不应直接连通。下沉广场的宽度不应小于13m；连接通道的长度不应小于10m、宽度不应大于8m，连接通道内应设置2道分别由地铁和商业等非地铁功能的场所控制且耐火极限均不低于3.00h的防火卷帘。（注3）

三、地下汽车库的防火分隔设计

汽车停车库是城市综合体地下室的主要功能，可以从停车区域分隔、汽车库防火分区划分以及与其他使用功能区域之间防火分隔措施几个方面进行防火设计。

1.20000 m²停车区域划分。地下汽车库同一层停车区域建筑面积大于50000 m²时，应分隔成若干个停车区域，每个停车区域的建筑面积不宜大于20000 m²；除主车道连通外，各停车区域之间应采用无任何开口的防火墙分隔；在主车道处可设置2道特级防火卷帘进行分隔，形成防火隔间，防火卷帘之间的最小间距不应小于4m，防火隔间内可不设置防排烟设施。引自《通则》第5.2.2条

2. 汽车库防火分区。设置自动灭火系统的地下汽车库防火分区的最大允许建筑面积为4000 m²。（注4）

3. 机械式汽车库防火分区。室内有车道且有人停留的机械式汽车库，当设置自动灭火系统时，其防火分区最大允许建筑面积为2600 m²。（注4）

4. 电动汽车停车库防火单元。地下汽车库集中布置的充电设施区防火单元最大允许建筑面积为1000 m²。每个防火单元应采用耐火极限不小于2.00h的防火隔墙或防火卷帘、防火分隔水幕等与其他防火单元和汽车库其他部位分隔。（注4）

5. 汽车库与其他使用功能区域之间的防火分隔措施。

（1）汽车库与其他建筑贴邻建造时应采用防火墙隔开，引自《汽车库、修车库、停车场设计防火规范》GB50067—2014第5.1.6条。

（2）电梯间、疏散楼梯间与汽车库连通的门应为甲级防火门，引自《通则》第6.4.2条。

（3）城市综合体建筑内的地下商业设施与汽车库之间应采用无任何开口的防火墙进行分隔；当确需同层局部连通时，应采用下沉式广场、避难走道、防火隔间等具有防火、防烟功能的缓

冲空间连通。当商业综合体与汽车库之间确需垂直连通时，不得设置中庭上、下贯通；当确需采用自动扶梯、开敞楼梯连通时，应采取防火分区的防火分隔方式来防止火灾及烟气的蔓延。引自《城综》第6.4.2条及其条文说明。

四、厨房、库房及设备用房的防火分隔设计

（一）厨房

（1）厨房的防火分隔要求

建筑内的厨房应采用耐火极限不低于2.00h的防火隔墙和耐火极限不低于1.00h的楼板与其他区域分隔。根据《通则》第4.1.3条、及《城综》5.3.3条。

墙上的门、窗应采用乙级防火门、窗，确有困难时，可采用防火卷帘，但应符合《建规》第6.5.3条的规定。根据《建规》第6.2.3条、及《城综》5.3.3。

（2）使用天然气部位的要求

根据《113号文》第（八）条要求，餐饮场所严禁使用液化石油气，设置在地下的餐饮场所严禁使用燃气。建筑内的敞开式食品加工区必须采用电加热设施，严禁在用餐场所使用明火。

餐饮场所严禁使用液化石油气及甲、乙类液体燃料。根据《城综》第5.3.3条。

建筑内使用天然气的部位应便于通风和防爆泄压。根据《通则》第4.3.12条。

城市综合体中不应设置使用和存放液化石油气的场所，使用天然气的部位应便于通风和防爆。根据《城综》第5.1.8条。

（二）附属库房

（1）仅允许设置为满足建筑使用功能的附属库房

根据《通则》第4.3.1条规定：民用建筑内不应设置经营、存放或使用甲、乙类火灾危险性物品的商店、作坊或储藏间等。民用建筑内除可设置为满足建筑使用功能的附属库房外，不应设置生产场所或其他库房，不应与工业建筑组合建造。《建规》5.4.2除为满足民用建筑使用功能所设置的附属库房外，民用建筑内不应设置生产车间和其他库房。经营、存放和使用甲、乙类火灾危险性物品的商店、作坊和储藏间，严禁附设在民用建筑内。

（2）库房的防火分隔要求

根据《城综》第5.3.9条规定：城市综合体内部除可设置为满足建筑使用功能的附属库房外，不应设置其他库房。每个防火分区内的附属库房总建筑面积不宜大于所在防火分区建筑面积的10%，每个店铺的附属库房建筑面积不宜大于其店铺建筑面积的10%，且每个库房总建筑面积地上不宜大于500 m²，地下或半地下不宜大于200 m²。设置于商场内的附属库房应采用耐火极限不低于3.00 h的隔墙与营业、办公部分分隔，通向营业厅的开口应设置甲级防火门。

（3）存放白酒、食用油、香水类化妆品等类似商品的房间

根据《城综》第5.1.9条规定：城市综合体内部存放白酒、食用油、香水类化妆品等类似商品的房间应避开人员经常聚集或停留的区域，并宜靠建筑外墙布置。

（3）金融保险类用房

根据《城综》第5.3.8条规定：金融保险类用房应采用耐火极限不低于3.00h的防火隔墙和1.50h的楼板与其他区域分隔，隔墙上的门应采用甲级防火门。金融保险机构内部使用的地下金库防火分区最大允许建筑面积为1000 m²，当设置自动灭火系统时可增加1.0倍。金融机构内部使用的金库可设置1个安全出口。

（4）冷库

根据《建规》第6.2.8条规定：冷库、低温环境生产场所采用泡沫塑料等可燃材料作墙体时的绝热层时，宜采用不燃绝热材料在每层楼板处做水平防火分隔。防火分隔部位的耐火极限不应低于楼板的耐火极限。冷库阁楼层和墙体的可燃绝热层宜采用不燃性墙体分隔。

冷库、低温环境生产场所采用泡沫塑料作内绝热层时，绝热层的燃烧性能不应低于B级，且绝热层的表面应采用不燃材料做防护层。

冷库的库房与加工车间贴邻建造时，应采用防火墙分隔，当确需开设相互连通的开口时，应采取防火隔间等措施进行分隔，隔间两侧的门应为甲级防火门。当冷库的氨压缩机房与加工车间贴邻时，应采用不开门窗洞口的防火墙分隔。

（三）设备用房的防火分隔设计

（1）以下设备用房应采用耐火极限不低于2.00h的防火隔墙和耐火极限不低于1.00h的不燃性楼板与其他区域分隔：

除消防水泵房、消防控制室外，其他消防设备或器材用房。根据《通规》第4.1.3条。

（2）以下设备用房应采用耐火极限不低于2.00h的防火隔墙和耐火极限不低于1.50h的不燃性楼板与其他部位分隔：

燃油或燃气锅炉、可燃油浸变压器、充有可燃油的高压电容器和多油开关、柴油发电机房等。根据《通规》第4.1.4条、《建

规》第5.4.12条及第5.4.13条。

消防水泵房。根据《通规》第4.1.7条、《建规》第6.2.7条。

消防控制室。根据《通规》第4.1.8条、《建规》第6.2.7条。

附设在建筑内的灭火设备室、通风空调调节机房、变配电室等。根据《建规》第6.2.7条。

（3）储油间应采用耐火极限不低于3.00h的防火隔墙与发电机间、锅炉间分隔。根据《通规》第4.1.5条、《建规》第5.4.13条。

（4）设备用房的防火门等级要求

燃油或燃气锅炉、可燃油浸变压器、充有可燃油的高压电容器和多油开关、柴油发电机房等防火隔墙上的门、窗应为甲级防火门、窗，储油间应设置甲级防火门。根据《通规》第4.1.4条、《建规》第5.4.13条。

锅炉房、变压器室等应采用甲级防火门、窗，锅炉房内设置储油间应采用甲级防火门。根据《建规》第5.4.12条。

通风、空调调节机房和变配电室开向建筑内的门应采用甲级防火门，消防控制室和其他设备房开向建筑内的门应采用乙级防火门。根据《建规》第6.2.7条。

设置在耐火极限要求不低于2.00h的防火隔墙上的门不应低于乙级防火门的要求，建筑高度大于100m的建筑应为甲级防火门。根据《通规》第6.4.3条。

五、结束语

城市综合体地下室防火分隔设计的方法可以总结为，不同使用功能场所宜集中布置，遵循对不同使用功能之间进行防火分隔的防火设计原则；划分防火分隔区域与防火分区；连通部位进行防火分隔设计；不同功能房间应满足防火分隔要求。

参考文献

- [1]《城市综合体消防技术标准》DG/TJ08-2408-202为上海市工程建设规范，适用于上海市城市综合体的防火设计，其他民用建筑的防火设计在技术条件相同时可参考执行。
- [2]引自《地铁设计防火标准》GB51298-2018第4.1.5条。
- [3]引自《地铁设计防火标准》GB51298-2018第4.1.6条。
- [4]根据《汽车库、修车库、停车场设计防火规范》GB50067-2014第5.1.1条。
- [5]根据《电动汽车分散充电设施工程技术标准》GB/T51313-2018第6.1.5条。

具身疗愈视域下海派面塑数智适老体验空间设计研究

陈凯沂

上海大学上海美术学院, 上海 200444

DOI:10.61369/ERA.2026080039

摘 要 : 在深度老龄化语境下, 老年群体正面临着社会参与不足、情感孤立与“数字失能”的多重困境, 传统康养设计亟待向兼顾文化共鸣与心理赋能的“具身疗愈”范式转型。本文以上海非遗海派面塑为文化载体, 探究数智技术介入下适老体验空间的认知补偿路径与交互机制; 基于具身认知理论, 解构面塑的物质触觉与海派叙事在神经可塑性及情感对齐方面的干预机理; 并结合深度访谈与用户画像, 提取目标老年群体的情感需求痛点与疗愈诉求。本文提出“身体—环境—技术”三元耦合的适老空间设计模型, 并以此为指导完成非遗互动疗愈空间的设计实践。结果表明, 将多模态感知与生成式反馈等数智技术作为隐性基座融入康养空间, 能有效消解非遗体验的生理与认知门槛, 触发老年参与人群多具身疗愈。本研究不仅为非遗的活态传承提供了数字化转译路径, 也为构建超越工具理性的体验型适老康养空间提供了理论依据与实践范式。

关 键 词 : 具身疗愈; 海派面塑; 适老空间; 数智技术; 具身交互

Research on the Design of Smart and Elderly Friendly Experiential Spaces for Shanghai Dough Sculptures under the Embodied Healing Perspective

Chen Kaiyi

Shanghai Academy of Fine Arts, Shanghai University, Shanghai 200444

Abstract : In the context of deep aging, the elderly population is facing multiple challenges such as insufficient social participation, emotional isolation, and "digital disability". Traditional health care design urgently needs to transform into a "embodied healing" paradigm that balances cultural resonance and psychological empowerment. This article explores the cognitive compensation path and interaction mechanism of age appropriate experience space under the intervention of digital technology, using Shanghai intangible cultural heritage Shanghai dough sculptures as a cultural carrier; Based on the theory of embodied cognition, deconstruct the intervention mechanism of material tactile perception in dough sculpture and Shanghai style narrative in terms of neural plasticity and emotional alignment; And combined with in-depth interviews and user profiles, extract the emotional needs, pain points, and healing appeals of the target elderly population. This article proposes a three element coupling model of "body environment technology" for the design of elderly friendly spaces, and uses it as a guide to complete the design practice of interactive healing spaces for intangible cultural heritage. The results indicate that incorporating multimodal perception and generative feedback technologies as implicit bases into healthcare spaces can effectively eliminate physiological and cognitive barriers to intangible cultural heritage experiences, triggering personalized healing for elderly participants. This study not only provides a digital translation path for the living inheritance of intangible cultural heritage, but also provides a theoretical basis and practical paradigm for constructing experiential elderly care spaces that go beyond instrumental rationality.

Keywords : embodied healing; Shanghai dough sculptures; elderly friendly space; digital intelligence technology; embodied interaction

引言：数字失能语境下非遗适老空间的具身转型

“积极老龄化”背景下，老年群体因机能衰退与数字认知门槛面临“数字失能”困境，现有适老空间在认知支持与情感疗愈方面仍存在不足。海派面塑兼具手部精细运动属性与本土文化集体记忆，为老年认知康复提供了天然的具身疗愈媒介^[1]。当前学界围绕康养空间、非遗疗愈与数智介入的交叉研究已呈现出向“具身性”不断收拢的趋势^{[2][3]}，但在机制挖掘与系统融合上仍需进一步深入。基于此，本研究引入具身认知视角，探讨低门槛数智交互赋能海派面塑适老空间设计，进而构建非遗活化与身心疗愈协同的空间设计范式。

一、海派面塑适老空间的具身疗愈逻辑

“具身认知”主张认知深植于身体感知、动作经验与环境的动态互动之中^[4]。将这一视角延伸至适老康养领域，“具身疗愈”突破了传统医学中被动式的病理学干预，转而将空间、文化活动的与技术反馈协同建构为可被老年人身体自然“吸收”的场域。面塑创作中“捏、搓、揉、塑”等的精细动作形成“感知—动作—反馈”的具身交互过程，可促进神经可塑性、改善手部功能并提升自我效能^[5]；其鲜明的色彩与传统文化符号能够唤起情感记忆，缓解老年人的孤独感，增强文化认同与社会联结^{[6][7]}。在此基础上，引入空间增强现实、生成式人工智能等数智技术，弥补老年人在视觉、动作及认知方面的能力衰退，构建多模态协同的沉浸式疗愈体验，为后续具身交互适老设计方法的提出奠定理论基础。

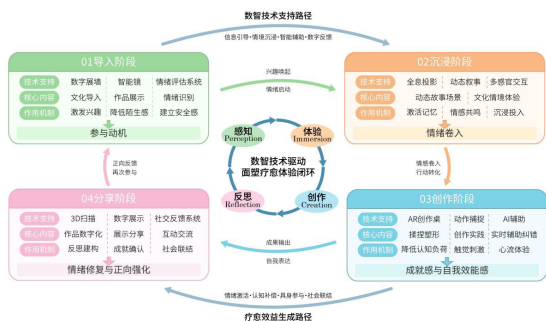


图1. 数智技术驱动面塑疗愈体验闭环的形成的机制示意（作者自绘）

二、上海活力老年群体面塑数智疗愈空间的认知特征与需求映射

本研究以上海城区60—75周岁的“活力老年群体”为核心目标人群。调研采用线上量表与社区定点辅助问询相结合的方式，空间覆盖上海普陀、静安、徐汇、虹口4个核心城区的6个代表性街道养老服务站。问卷架构紧扣具身疗愈四维分析模型，围绕非遗认知图式、手工体验行为、数字技术包容度及康养空间偏好展开。本次共发放问卷82份，回收有效问卷75份（有效率91.46%）。检验结果显示，KMO值为0.742，Bartlett球形检验显著（ $p < 0.05$ ），Cronbach's α 系数为0.817，各维度 α 系数均大于0.7，说明问卷具有良好的信效度，适合进行进一步统计

分析。

透过调研数据，上海活力老年群体在面对“非遗面塑、数智技术与康养空间”时，呈现出三类鲜明的痛点需求特征：一是文化认同潜能与供需错位的矛盾。文本调研数据显示，仅5.33%的受访者有过海派面塑的接触史，但高达89.33%的老人对其表达了强烈的参与意愿。这种高意愿与低行为的强烈反差，暴露出当前传统面塑极高的生理操作门槛与社区专属文化供给匮乏之间的深度错位。二是数字包容性基础与“去技术化”的体验诉求。88%的受访者具备智能手机基础操作能力，且有90.42%对AR、VR等新型交互持“谨慎但开放”的态度。表明，老年人渴望的并非技术本身的科技感，而是技术作为“隐性介质”服务于体验的流畅性。三是空间安全底线与社会联结的高阶渴望。在空间偏好上，除安全性（84%）与舒适性（77.33%）外，互动性（73.33%）与文化氛围（62.67%）同样占据高位，且绝大多数受访者表达了强烈的作品展示与社群分享欲。体现老年群体对重新确认自我效能并完成社会联结的迫切需求。

基于上述特征，构建面塑数智疗愈空间三级需求体系：首先，以无障碍、安全舒适为核心，满足基础生理代偿需求；其次，借助多感官交互、环境自适应及海派文化符号，实现降低认知负荷、促进情绪调节和文化认同的具身疗愈需求；最后，通过作品展示、数字分享及社区共创等机制，增强老年人的自我效能感与社会联结，实现积极老龄化的高阶价值目标。

综上，本研究锚定的典型用户画像是年龄多在60—75周岁之间、具备基本生活自理能力、虽处于生理机能渐进性退化阶段，但精神内核依旧渴望文化滋养、社会认同与技术包容的城市活力老年群体。

三、身体—环境—技术三元交互的适老空间设计模型

（一）从“承载功能的空间”向“身体参与空间”的设计范式转变

传统的老年友好型空间设计往往侧重于物理安全与无障碍通行，将空间仅仅置于被动承载功能的角色。然而，从具身认知的哲学视角来看，人类的认知源于身体形态、感知运动以及与环境持续交互的作用。因此，适老化疗愈空间的设计需遵循老年群体的特有认知图式实现转变：疗愈空间不应仅仅作为行为发生的背景，而应成为参与认知与情绪建构的主动媒介。这种设计范式的

转变要求设计将物理要素转化为引导、暗示与支持老年人具身行动的积极场域。

（二）三元交互空间设计模型的构建

依托具身设计转向，面向非遗面塑的疗愈空间应被视为一个多维要素深度交织的复杂适应系统。因此，本文提出了一种包含身体、环境与技术三要素交互作用的空间设计模型：身体层面涵盖老年人的运动能力、感知节律及心理状态；环境层包含空间尺度、动线组织、材料界面及光环境；技术层涉及实体交互装置、空间感知系统与数字反馈机制。这三要素通过持续交互形成动态反馈回路，让老年人在操作、感知与理解的过程中逐渐建立起稳定的空间认知与情感安全感，从而实现技术被身体“自然吸纳”的过程。

（三）基于具身交互的空间设计策略

基于上述三元交互模型，并结合第三章调研中得出的目标老年群体的痛点与需求，本研究进一步提出了三种可操作的具身交互面塑疗愈空间设计策略。

第一，行为代偿的动作导向型设计。以海派面塑的动作图式为基准，精准匹配操作界面的物理高差、桌面倾角与适宜的肌力阻抗；同时，通过空间尺度的收放隐性引导行为节律。这种策略使老年人能够凭借肌肉记忆与身体直觉进行流畅创作，无需记忆抽象规则，从而从源头上消除认知负荷。

第二，认知补偿的感知反馈型设计。通过整合视觉提示、触觉感知以及听觉信号，在空间内建立起清晰、即时的“动作—结果”因果映射。这种多感官同步确认能有效弥补因单一感官功能衰退带来的信息缺失，强化行为反馈的确定性，助力老年人快速锚定自我效能，驱散操作迟滞引发的焦虑情绪。

第三，情感对齐的情境沉浸型设计。疗愈的深化高度依赖于时空叙事的连续性。设计需打破均质化的空间布局，通过光影明暗的渐变、声景线索的定向切换，在物理空间中柔性划定“感知—体验—创作—反思”的时空序列。随着老年人在空间内的身体位移与感官场域的自然变幻，非遗叙事层层递进展开，循序渐进达到具身疗愈效果。

四、非遗面塑数智互动养老体验空间设计实践

（一）设计背景

本设计实践以上海市虹口区北外滩街道社区文化活动中心为落地载体，构建海派面塑主题数智互动适老疗愈体验空间。选址综合考量了区域高老龄化特征、稳定的社区老年公共文化服务基础，以及与海派面塑契合的在地文化语境，具备非遗体验常态化落地与数智技术适配的基础条件。设计以第四章构建的具身交互空间设计方法为指导、以面塑创作体验为线索，构建完整适老疗愈闭环，探索非遗活态传承与社区老年身心健康服务融合的创新路径。

（二）基于具身交互设计方法的实践验证

1. 整体设计逻辑

基于第四章提出的具身交互空间设计方法，将其转化为“导

入—沉浸—创作—分享”全周期老年疗愈体验序列，形成三大核心适配策略：一是基于感知反馈型方法的非侵入式评估策略，将生理与情绪评估融入空间自然互动，消除老年用户的心理防御；二是基于动作导向型方法的动作即输入策略，以面塑揉、捏等自然肢体动作为核心交互媒介，弱化传统界面操作门槛；三是基于感知反馈与多感官整合方法的桌面即界面策略，将操作引导投射于实体操作平面，降低老年用户视觉切换的认知负荷。

2. 基于技术体系与体验周期的空间设计实现

结合老年用户“导入—沉浸—创作—分享”全周期体验特征，以数智技术实现路径为分类依据，将第四章三大具身交互适老设计策略方法融入各阶段设计构思与技术实现全过程。

导入阶段以感知反馈型设计方法为指导，融入非侵入式评估策略，采用非接触式生理传感与生成式视觉映射技术构建互动场景。在自然触摸过程中采集心率等生理数据，并通过算法实时映射为面塑视觉元素。实现“评估即参与、参与即疗愈”逻辑。



图2. 导入阶段空间示意效果图（作者自绘）

沉浸式体验阶段依托多感官融合型设计方法，应用多声道投影融合和互动声景构建技术，通过360°环绕投影，搭配老上海怀旧音效以及地面互动投影系统，打造融合视觉、听觉和运动反馈的沉浸式体验环境，激发老年人的情感和记忆。



图3. 沉浸阶段空间示意效果图（作者自绘）

创作阶段是核心环节，以行动导向型设计为指导，聚焦老年用户创作痛点。融合桌面投影增强现实（AR）和深度视觉动作捕捉技术。遵循“桌面即界面”思路，将创作指导和反馈投射于物

理平面，降低认知负荷；践行“动作即输入”逻辑，以自然的面塑造作为系统输入，通过视觉动作捕捉技术提供即时反馈，并辅以方言语音 AI 辅助，降低创作难度。空间采用无障碍分布式布局，确保操作舒适性。



图4. 创作阶段空间示意效果图（作者自绘）

分享阶段结合具身交互疗愈闭环思路，设计分布式数字展示与社群互动方案。用户完成创作后，可一键同步作品至社区全域展示终端，支持实体输出与家庭分享，构建从个人创作到社区联结的完整疗愈闭环，完善设计方法体系并验证全链路逻辑的科学性。



图5. 分享阶段示意效果图（作者自绘）

3. 设计方案的适老化有效性实证验证

为检验具身交互适老设计方法的有效性，本研究采用沉浸式虚拟现实可用性测试开展预实验。基于上文构建的老年群体典型用户画像，采用目的抽样法选取北外滩社区10名60-75岁老年被试（M=71.2，SD=3.7）。参照老年用户行为习惯，通过虚拟现实设备构建1:1实验场景，引导被试完成全流程体验，记录操作数据并结合量表评分、半结构化访谈收集反馈，采用SPSS 26.0软件进行配对样本 t 检验，验证设计方法有效性，基于结果优化方案，为方法体系优化提供实证支撑。

五、结论

本研究以具身疗愈理论为核心视角，围绕上海非遗面塑艺术的文化特征与疗愈潜力，探讨数智技术在适老体验空间中的融合路径，构建了面向年轻老年群体的数智化面塑疗愈体验空间设计研究框架。在理论上拓展了具身疗愈在环境设计中的应用，在方法上提供以身体行为为导向的设计思路，在实践上为非遗活化与文化养老融合提供了参考路径。

然而，本研究在设计验证与评估、研究对象、数智技术成本以及社区运营条件等方面存在一定的不足与局限，相关内容在后续研究中仍需结合跨学科合作进一步深化。

参考文献

[1] 吴越滨. 晋南与上海地区民间面塑艺术比较分析 [J]. 美与时代 (中), 2015(03):68.

[2] 程嘉萱. 基于具身认知的智慧社区文娱设施适老化设计研究 [J]. 包装工程, 2024, 45 (06) : 471-478.

[3] 田宁. 双重疗愈效应: 非物质文化遗产“五感”艺术疗愈的路径研究 [J]. 文化创新比较研究, 2025, 9(29): 164-170.

[4] 叶浩生. 具身认知: 认知心理学的新取向 [J]. 心理科学进展, 2010, 18(05):705-707.

[5] Senior Friendship Centers.Creative Arts and Aging: The Benefits of Art Therapy[J/OL].[2025-12-23].<https://friendshipcenters.org/creative-arts-and-aging-the-benefits-of-art-therapy/>

[6] 高申. 优秀民间艺术资源融入高师手工课外活动的创新研究——以面塑为例 [J]. 天工, 2025,(28): 118-121.

[7] 罗悦彤. 怀旧疗法介入福利院失能老人自我效能感的干预研究 [D]. 广东外语外贸大学, 2025.DOI: 10.27032/d.cnki.ggdwu.2025.000687.

建筑工程施工现场精细化管理提升策略

张鹤龄

天津市东丽区工程建设交易服务中心, 天津 300300

DOI:10.61369/ERA.2026080043

摘 要 : 建筑工程施工现场的人员、材料、机械、工序和安全质量信息密集交织,粗放式管理容易造成资源闲置、工序等待和隐患处置滞后。施工现场精细化管理应把平面分区、材料批次、机械使用、进度节点和质量安全检查纳入同一现场责任链,在每日计划、过程记录和整改验收中形成可追溯的管理证据。围绕现场流程、作业条件和常见问题,提出材料机械分区、工序节点控制、问题处置和人员履职训练等策略,使现场管理从经验调度转向对象清楚、责任明确、记录完整的过程管理。

关 键 词 : 建筑工程;施工现场;精细化管理;现场管理;提升策略

Strategies for Improving Fine Management of Construction Sites in Construction Projects

Zhang Heling

Tianjin Dongli District Engineering Construction Trading Service Center, Tianjin 300300

Abstract : Construction-site refined management in building projects must handle dense interactions among workers, materials, machinery, work procedures, quality control and safety supervision. Extensive site control may cause resource idleness, process waiting and delayed rectification of hazards. Refined management should connect layout zoning, material batches, equipment use, schedule nodes and quality-safety inspection records into a traceable responsibility chain. Based on site procedures, key factors and frequent management problems, this paper proposes strategies for material and equipment zoning, procedure-node control, issue rectification and duty-oriented training, so that site management can shift from experience-based dispatching to process control with clear objects, accountable roles and complete records.

Keywords : building project; construction site; refined management; site management; improvement strategy

引言

建筑工程施工现场具有临时性强、交叉作业多、作业面变化快等特点,同一时段内常出现材料进场、机械调配、模板钢筋安装、混凝土浇筑、装饰穿插和安全巡查。现场管理若只停留在会议布置和事后检查,材料堆放位置、机械使用时间、班组作业面和整改完成状态难以被连续识别,施工计划也容易被局部等待拖慢。精细化管理的价值在于把现场对象分解到可记录、可检查、可追责的作业单元,并把计划、执行和检查结果转化为当天能够处置的管理信息。

一、建筑工程施工现场精细化管理的现场价值

(一) 保障临边高处作业人员施工安全

临边洞口、高处作业和起重吊装是现场安全失控后影响最大的作业对象,精细化管理应把这些对象拆到作业面、责任班组和检查时段。班前交底提前30 min完成,交底内容写清当天作业高度、通道位置、防护状态和旁站人员;高处作业平台投入前检查不少于6项,临边防护缺口在2 h内完成封闭,吊装作业半径内无关人员清场距离不小于5 m。混凝土浇筑、脚手架搭设、模板支撑等高风险工序还要保留验收时间、参与人员和照片证据^[1]。流程设计不能把记录当成额外负担,字段围绕位置、时间、数量、责

任人和处理结果保留,缺少这些字段时,后续追查只能依赖口头回忆。

(二) 支撑流水段施工工序稳定推进

流水段施工要稳定推进,现场管理必须把材料、机械、人员和验收条件提前对应到节点。面积超过3000 m²的单体建筑可按楼层和轴线划分2级责任单元,每个单元每日登记作业人数、关键材料消耗、机械占用时段和待验收项目4类信息;前置工序未验收时,下道班组不得进入实体施工。对钢筋隐蔽、模板支撑和防水节点等影响返工成本的工序,项目部宜设置24 h内完成验收预约、48 h内完成问题处理的时限。管理人员依据分区和动线核对作业面状态,能在日计划形成前发现材料未到、通道受阻或风险

点未消除的问题。图1呈现施工现场精细化管理中的分区、动线和检查对象。

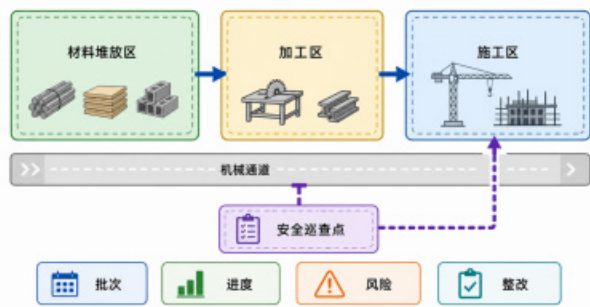


图1 施工现场精细化管理分区与动线示意

图1中，材料堆放区、加工区和施工区以不同色块分离，现场管理对象先被固定在空间位置上；蓝色箭头表现材料加工流向，紫色虚线表现安全巡查路线，底部的批次、进度、风险和整改则对应台账字段，说明现场记录应服务实际调度。

（三）降低材料机械现场损耗费用

材料和机械损耗下降依赖连续记录，而不是月底汇总。钢筋、模板、防水卷材和机电管线等材料到场后，应在1 h内完成批次登记，复验结果未返回前不得进入加工区；周转材料领用时记录楼层、班组和计划归还时间，超过12 h未回收的模板、扣件或脚手板进入待核对清单。小型机具交接可设置30 min内确认制度，交接内容包括外观、附件、剩余电量或燃油状态，故障停用超过2 h时同步通知工长调整作业面。精细化管理的特征是对象、时间和责任同时清楚，现场变化可以被快速定位到具体人员和具体位置。

二、建筑工程施工现场精细化管理现存问题

（一）材料批次机械台账现场记录失真

材料批次机械台账记录失真，常见表现是材料进场记录、抽检记录、领用记录和剩余数量分散保存，堆场位置变化后没有及时更新，班组领料与实际消耗之间缺少核对。钢筋、模板、砌块、防水卷材和机电管线等材料规格较多，若只按总量登记，现场很难判断某一批次是否已经完成复验，也难以及时发现错用、混放和损耗异常。塔吊、施工电梯、泵车、叉车和小型机具使用频繁，保养时间、司机交接、故障停机和作业范围若没有纳入同一台账^[2]。调度人员只能根据经验安排，容易出现设备闲置与局部短缺并存。部分项目把二维码、电子台账用于展示，但字段没有对应现场管理动作，扫码后只能看到名称和数量，无法支持批次追踪、位置调整和责任确认。

（二）施工工序交接准备条件频繁缺项

施工工序交接准备条件缺项，会把局部等待传递到多个作业面。结构施工中，模板安装、钢筋绑扎、机电预埋、隐蔽验收和混凝土浇筑之间至少涉及5个连续节点，任一节点超过6 h未确认，后续班组就可能出现停等。装饰穿插阶段常同时存在2个以上专业进入同一楼层，若样板确认、材料到场、临时用电和成品保护没有写入日计划，现场会出现交叉干扰和返工。进度记录只写完成百分比不足以支撑调度，管理人员需要知道哪些轴线已具备下道工序条件、哪些楼层存在待验收项目、哪些机械和材料会成

为下一日限制因素；缺少这种颗粒度时，24 h内的计划调整会变成临时协调。

（三）安全隐患记录流转断点较多

安全隐患记录流转断点较多，通常不是检查频次不足，而是发现、分派、整改和验收之间断开。临边防护缺失、脚手架连墙件设置不规范、模板支撑局部变形、钢筋保护层偏差等问题，如果只在检查表中登记，责任班组、整改时限和复查结果没有回到原问题记录，管理人员难以判断风险是否真正消除。安全员、质量员提出问题后，工长口头通知班组处理，复查时再另行拍照保存，原记录与复查记录之间没有直接关联^[3]。隐患数量较多时，低风险问题挤占管理注意力，高风险问题反而可能因记录混乱被延后处理；跨楼层作业面一旦同时存在多项未销项记录，项目部也难以分辨哪些问题影响当天施工、哪些问题影响后续验收。

（四）管理人员现场执行责任落实不到位

精细化管理对现场管理人员提出更高要求，工长、安全员、质量员、材料员和资料员不仅要熟悉本岗位制度，还要理解施工顺序、资源约束和记录用途。部分管理人员习惯按经验处理现场事务，对电子台账、过程照片、验收节点和数据字段的理解不足，容易把精细化管理误解为补资料。还有一些项目人员流动较快，新进人员不了解项目平面布置、班组分包范围和工序验收要求，执行过程中出现记录漏填、整改不闭合、材料验收与领用脱节等问题。管理能力不足还表现在沟通上，工长关注进度，安全质量岗位关注问题整改，材料岗位关注库存和入库手续，若缺少共同的日计划和问题清单，各岗位会按照各自目标行动。现场管理人员执行能力不足，会直接削弱制度、表单和数字化工具的实际效果。

三、建筑工程施工现场精细化管理提升策略

（一）细化材料机械分区台账记录方式

材料和机械管理应从现场平面分区入手，把材料堆放区、半成品加工区、周转材料区、设备停放区和施工运输通道明确到图面，并在现场设置对应标识。材料进场后按批次、规格、复验状态和使用部位登记，未复验材料不得进入加工区，已复验材料再按楼栋、楼层或流水段领用。钢筋、模板、防水卷材和保温材料等易混用材料应设置颜色标识或挂牌，领用单记录班组、数量、使用部位和剩余退库数量，使损耗能够回到具体作业面。机械设备按使用日期、司机、作业范围、保养状态和故障记录登记，塔吊、施工电梯等关键设备可设置每日开机前检查表，内容包括限位、钢丝绳、附墙装置、制动状态和通信设备。表1列示现场材料机械分区管理的设计参数示例。

表1 施工现场材料机械分区管理参数示例

管理对象	批次记录完整率 (%)	复验等待时限 (h)	堆放限高 (m)	日巡查频次 (次)	异常处置时限 (h)
钢筋原材	98.50	24.00	1.50	2	12.00
模板周转料	96.80	12.00	1.80	2	24.00
防水卷材	99.00	24.00	1.20	2	12.00
砌块材料	97.20	12.00	1.60	1	24.00
施工电梯	100.00	0.00	0.00	3	4.00
小型机具	95.60	8.00	0.80	2	8.00

表1中，施工电梯的日巡查频次为3次、异常处置时限为4

h, 说明关键机械需要高频检查和快速处理; 钢筋原材与防水卷材的批次记录完整率分别为 98.50% 和 99.00%, 复验等待时限均为 24 h, 材料台账应优先保证批次、复验和使用部位之间的对应关系。

(二) 严控流水段施工工序节点交接

工序进度管理应把总进度计划转换为楼栋、楼层、流水段和工种节点, 日计划不只写完成工程量, 还要写清前置条件和后续交接对象。结构施工阶段可把模板安装、钢筋绑扎、机电预埋、隐蔽验收、混凝土浇筑和养护拆成 6 个连续节点, 每个节点设置责任班组、计划完成时间、实际完成时间和验收人; 装饰阶段则应把基层处理、样板确认、材料到场、成品保护和交叉作业限制写入计划。现场调度会不宜只通报进度滞后, 应核对第二天进入作业面的人员、材料、机械和技术条件, 发现缺口当天调整。对关键线路上的工序, 可设置 4 h 或半日级检查点, 未达到移交条件时立即标注影响楼层和影响工种; 同一节点实际完成时间超过计划 2 h 时进入提醒清单, 超过 8 h 时由项目生产负责人重新分配作业面。精细化进度管理的重点不是压缩工期口号^[4]。每日 1 次统计节点偏差率, 用于调整班组投入和材料配送节奏, 不把所有滞后归入主观拖延。节点偏差率可按式 (1) 计算。

$$D = \frac{T_a - T_p}{T_p} \times 100\% \quad (1)$$

式 (1) 中, D 为节点偏差率, 单位为 %; T_a 为实际完成用时, 单位为 h; T_p 为计划完成用时, 单位为 h。D 为正且超过现场设定阈值时, 管理人员应先核查材料到场、前置验收和机械占用情况; D 的比较限定在同一流水段和同一工序节点内, 不能把结构施工与装饰穿插的用时直接并列。

(三) 压实质量偏差整改验收责任分工

安全质量问题处置应从发现问题延伸到确认整改结果。项目部可把巡查记录分为质量偏差、安全隐患、进度滞后和材料超耗四类, 每类问题均写明位置、照片、责任班组、整改要求、完成时限和验收人员。质量偏差涉及实体尺寸、钢筋保护层、混凝土观感或防水节点时, 整改要求应具体到测点、允许偏差和复验方式; 安全隐患涉及临边洞口、临电、起重吊装或高处作业时, 应按风险程度设置立即停工、限时整改或持续观察。问题处置要减少口头转派, 责任人接收后在记录中确认, 完成后上传整改照片或复验数据, 验收人员在原问题上写入结论。对高风险安全隐患, 项目部还应在分派责任前先采取隔离、停用或旁站措施^[5]。这类前置处置能避免等待流程流转期间风险继续扩大, 并为后续验收保留清楚的起始状态。图 2 呈现施工现场问题分类、责任分派、整改时限和验收结果之间的处置关系。

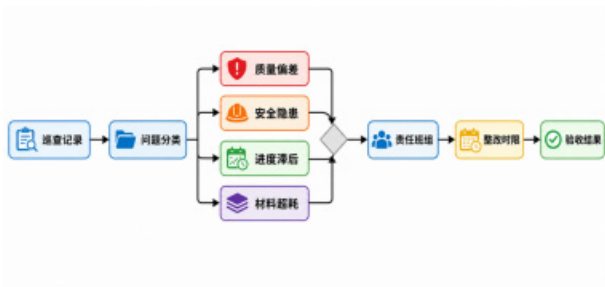


图2 施工现场问题分类与整改处置流程

图 2 中, 四类问题以不同颜色节点表示, 管理人员可按问题性质设置处置优先级; 右侧责任班组、整改时限和验收结果连续排列, 说明问题闭环要依靠同一条记录完成责任、时间和结论登记。

(四) 开展现场岗位履职情景训练

现场管理人员履职训练应围绕真实作业场景展开, 不能只安排制度宣读。项目部可按岗位设置训练内容: 工长重点训练作业面移交、班组协调和工序前置条件确认; 安全员重点训练风险识别、停工条件和整改验收; 质量员重点训练样板引路、实测实量和隐蔽验收; 材料员重点训练批次验收、堆场标识和领退料核对; 资料员重点训练现场记录与验收资料的对应关系。训练可采用样板段观摩、问题照片判定、台账填报演练和复盘会四种方式, 每月至少选取 2 个高频问题^[6]。现场讲评应回到照片、台账和整改结果, 说明岗位动作与管理后果之间的关系。新进人员进入项目后, 应先完成平面布置、分包范围、关键工序和记录模板培训, 再进入独立岗位。对连续出现漏检、漏填或整改超时的人员, 项目部应安排带教复核和岗位再训练, 把能力短板转化为具体训练任务。

四、结语

建筑工程施工现场精细化管理提升策略, 应回到材料、机械、工序、安全隐患、质量偏差和人员履职这些可见对象。现场分区清楚后, 材料批次、机械状态和作业面条件能够被准确识别; 工序节点细化后, 进度偏差可以在前置条件缺失时提前暴露; 问题处置连续登记后, 整改责任、时限和验收结果不再分散在零散记录中。项目部还要把人员训练与现场高频问题连接起来, 使制度、台账、图片和检查结果共同服务当天施工组织。管理对象、责任岗位和处理结果能够相互追溯时, 精细化管理才能改善施工现场秩序、效率和风险控制水平。

参考文献

[1] 尚瑞志. 住宅建筑工程施工管理中精细化管理模式的应用探究 [J]. 居舍, 2026, (20): 158-161.
[2] 李岩岩, 高静. 建筑工程施工安全生产精细化管理实施方法分析 [J]. 城市开发, 2026, (11): 165-167.
[3] 蓝勇. 建筑工程施工技术及现场精细化管理分析 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2026, (14): 34-36. DOI: 10.19569/j.cnki.cn119313/tu.202614011.
[4] 朱占国. 住宅建筑工程施工管理中精细化管理模式的应用 [J]. 中国住宅设施, 2026, (4): 182-184.
[5] 张震. 精细化管理在建筑工程施工进度控制中的应用 [J]. 中国住宅设施, 2026, (3): 203-205.
[6] 刘洋, 徐园园. 建筑工程施工预算精细化管理方案设计 [J]. 中国招标, 2026, (3): 97-100.

乡村振兴背景下小型水利水电工程规划布局研究

李银刚¹, 李燕娟²

1. 临沧市灌区工程建设管理中心, 云南 临沧 677000

2. 临沧市水利水电勘测设计研究院有限公司, 云南 临沧 677000

DOI:10.61369/ERA.2026080002

摘 要 : 乡村振兴战略为小型水利水电工程规划布局赋予了新的时代内涵与发展要求。本文以乡村振兴为研究背景, 梳理我国小型水利水电工程的分布类型、功能价值与发展现状, 剖析其规划布局存在碎片化严重、功能定位单一、生态适配不足、城乡衔接滞后等突出问题, 并从规划理念、顶层协同、技术论证、管理投入及政策落地等维度深挖问题成因。立足生态文明与乡村振兴双重导向, 明确工程规划布局的理念转型方向, 确立生态优先、系统统筹、因地制宜、产水融合等核心原则, 辨析自然禀赋、乡村规划、政策制度、经济社会及技术管理等关键影响因素。从流域区域网络化重构、乡村聚落功能融合布局、单体工程选址与型式优化三个层面, 提出适配乡村振兴发展需求的小型水利水电工程空间布局优化策略, 以期完善乡村基层水利基础设施体系, 实现水资源合理配置、水生态有效保护与乡村产业、人居、能源协同发展, 为县域小型水利水电工程科学规划与长效运维提供理论参考与实践借鉴。

关 键 词 : 乡村振兴; 小型水利水电工程; 规划布局; 空间优化

Research on the Planning and Layout of Small scale Water Conservancy and Hydropower Projects under the Background of Rural Revitalization

Li Yingang¹, Li Yanjuan²

1. Lincang Irrigation District Engineering Construction Management Center, Lincang, Yunnan 677000

2. Lincang Water Resources and Hydropower Survey and Design Institute Co., Ltd., Lincang, Yunnan 677000

Abstract : The rural revitalization strategy has given new era connotations and development requirements to the planning and layout of small-scale water conservancy and hydropower projects. This article takes rural revitalization as the research background, sorts out the distribution types, functional values, and development status of small-scale water conservancy and hydropower projects in China, analyzes the prominent problems of fragmented planning layout, single functional positioning, insufficient ecological adaptation, and lagging urban-rural integration, and delves into the causes of the problems from the dimensions of planning concept, top-level coordination, technical demonstration, management investment, and policy implementation. Based on the dual orientation of ecological civilization and rural revitalization, clarify the conceptual transformation direction of engineering planning layout, establish core principles such as ecological priority, system coordination, local conditions, and water production integration, and analyze key influencing factors such as natural endowment, rural planning, policy system, economic and social, and technological management. From three aspects: network reconstruction of watershed areas, integration and layout of rural settlement functions, and optimization of single project site selection and types, this paper proposes spatial layout optimization strategies for small-scale water conservancy and hydropower projects that are suitable for the needs of rural revitalization and development. The aim is to improve the rural grassroots water conservancy infrastructure system, achieve rational allocation of water resources, effective protection of water ecology, and coordinated development of rural industries, human settlements, and energy, and provide theoretical and practical references for scientific planning and long-term operation and maintenance of small-scale water conservancy and hydropower projects in counties.

Keywords : rural revitalization; small scale water conservancy and hydropower projects; planning and layout; space optimization

引言

我国小型水利水电工程经过多年建设，已形成覆盖广泛、类型多样的基层水利服务格局，在补齐乡村水利短板、保障农业生产、改善农村人居环境等方面发挥了不可替代的作用。基于此，本文立足乡村振兴战略要求，系统审视我国小型水利水电工程规划布局的现状与问题，剖析问题成因，明确规划布局的原则与影响因素，提出针对性的优化策略，旨在为小型水利水电工程科学规划、高效利用提供理论支撑与实践指引，助力乡村基础设施提质升级，推动乡村振兴战略高质量实施。

一、现状审视与问题诊断

（一）我国小型水利水电工程发展现状

中小型水利水电建设过程中，设计资料为当地资源及人文环境，设计人员必须对这类基础性资料进行充分掌握，当地环境资料在设计过程中将会起到非常关键的作用^[1]。我国小型水利水电工程遍布全国县域乡村，尤以山地丘陵、偏远山区分布最为集中，涵盖小型水库、塘坝、引水渠系、提灌站、微型水电站、水系连通小微工程等多种类型，形成了覆盖灌溉、供水、防洪、发电、生态补水的基层水利服务格局^[2]。多年来，这类工程有效补齐了乡村水利基础设施短板，保障了基本农田灌溉与农村集中供水，依托小水电资源开发为乡村提供清洁电力，同时在山洪灾害防控、河道生态基流补给、乡村滨水空间营造等方面发挥基础效能^[3]。当前，国家持续推进农村水利水电提质改造与绿色转型，加快老旧工程除险加固、生态化改造与标准化建设，推动小型水利水电工程纳入县域水网统一规划，逐步从单一灌溉发电功能向供水、灌溉、防洪、生态、文旅、能源多元复合功能转变^[4]。但受建设年代技术标准、地域经济条件、规划管理体制等制约，存量工程整体老化程度高、智能化水平偏低、区域发展不均衡，山区与平原、发达地区与欠发达地区工程配套水平、运维能力差距较为明显。

（二）既有规划布局存在的主要问题

水资源分布与人口、生产力布局以及土地等资源不相匹配，当前小型水利水电工程规划布局碎片化突出，以水定城、以水定地、以水定人、以水定产，缺乏流域与县域层面整体统筹，多为单点自发建设、分头实施，工程间缺少水系连通、水量调配及调度协同机制，易出现重复建设、功能重叠和资源浪费，部分河段小水电过度密集开发，降低了水资源整体利用效率^[5]。工程功能定位单一，传统布局仅聚焦灌溉、发电等基础效用，未对接农村人居环境整治、生态文旅、特色种养及城乡供水一体化等多元需求，难以挖掘生态与产业赋能潜力。贯彻落实“四水四定”，核心是统筹经济社会发展与生态环境保护需求，科学处理水资源与城市、土地、人口、产业之间的关系，实现人口、经济、社会的发展与资源、环境承载力相协调，是一个涉及多行业规划整合的系统工作。生态布局存在短板，部分工程选址建设未充分考量河流生态流量、鱼类洄游及水系原生格局，易引发河段减水脱

流、生态廊道割裂等问题，老旧工程外观与美丽乡村风貌不协调，生态修复和景观提升措施未落地^[6]。此外，工程选址与乡村聚落发展衔接不畅，服务半径不合理、覆盖效率低，新建聚居区水利配套滞后；不同时期建设标准不一，早期工程设计偏低、设施老化，安全运行不达标，且产权分散、管护缺位、智能化监管滞后，存在长期安全隐患。

（三）问题成因的深度剖析

规划理念滞后是制约小型水利水电工程布局优化的核心因素之一，长期以来始终沿用重工程建设、轻系统治理，重经济效益、轻生态与人居效益的传统思路，缺乏生态优先、产水融合、全域统筹的现代“四水四定”规划理念，未能将工程布局纳入乡村国土空间总体规划进行统筹考量，导致布局规划缺乏系统性和前瞻性^[7]。同时，顶层规划衔接不畅，水利规划、乡村规划、国土空间规划、生态保护规划之间缺乏足够的协同衔接，各部门分头编制规划、缺少统一协调机制，使得小型水利水电工程布局缺少刚性规划约束，难以实现与各类规划的有机融合^[8]。此外，技术与前期论证不足的问题较为突出，部分项目前期勘察论证工作不够充分，未运用GIS空间分析、水资源承载力评价等科学技术手段，对区域水资源禀赋、生态红线、乡村产业布局等关键要素研判不够深入，导致工程选址与规模设定主观性较强，缺乏科学支撑^[9]。在管理与投入机制方面，基层水利规划专业人才匮乏，群众参与规划的渠道不够畅通，难以充分兼顾群众实际需求；建设运维资金投入方式较为单一，社会资本参与度偏低，资金保障力度不足；加之工程产权分散、权责划分不清晰，集约化调度与统一监管难度较大，严重制约了工程布局的优化完善与长效运营^[10]。政策落地细化不足，尽管小水电绿色转型、水美乡村建设等顶层政策已相继出台，但地方层面缺少适配县域乡村实际情况的细化实施方案与布局导则，导致实践中偶有一刀切整改、盲目拆除等不合理现象，缺乏分类施策、科学可行的布局优化路径，影响了政策效能的充分发挥。

二、乡村振兴导向的规划布局原则与影响因素

（一）规划布局理念的转变

在国家水网建设的规划建设（纲、张、目、举）和乡村振兴

与生态文明建设双重导向下，小型水利水电工程规划布局实现四大理念转型：由单点零散布局向流域系统网络化布局转变；由单一功能建设向水、产、村、景多元融合转变；由重开发利用向生态优先、绿色低碳转变；由工程独立规划向与乡村国土空间、产业发展、人居环境一体化统筹转变。坚持以水定城、以水定地、以水定产，把水资源承载力作为布局前置条件，兼顾安全保障、生态保护、产业发展与民生改善，实现工程布局与乡村振兴同频同步、协同赋能。

（二）规划布局的核心原则

坚持生态优先、绿色低碳准则，严守生态保护红线，保障河道生态流量，避让敏感水生态区域，推行工程生态化设计与近自然改造，推进小水电绿色转型，实现水资源开发与水生态保护协同共生。秉持系统统筹、流域协同思路，以小流域和县域为基本规划单元，统筹干流水系及各类水利工程联动布设，搭建乡村小微水网连通体系，优化水量调度与工程功能配置，从源头规避无序开发和重复建设。遵循因地制宜、分类布局要求，结合山地丘陵、平原圩区、库区乡村等地域特征，依据水资源禀赋、农业产业结构和乡村聚落差异，差异化配置工程类型、规模与布局，杜绝一刀切。落实产水融合、服务民生导向，紧扣乡村产业兴旺、人居环境整治等需求，推动小型水利水电工程与高标准农田、乡村文旅、农村集中居住区等深度融合，提升综合服务效能。坚守建管并重、长效运维理念，规划阶段同步统筹后期管护、产权界定、资金保障及智能化监管，实现工程建设与运维管理一体布局，保障工程长期稳定发挥效益。践行城乡衔接、普惠共享理念，对接城乡供水一体化与县域能源网络布局，推动水利水电设施向乡村延伸覆盖，缩小城乡基础公共服务差距，为乡村振兴和城乡共同富裕筑牢水利支撑。

（三）规划布局的关键影响因素分析

区域自然禀赋是小型水利水电工程规划布局的基础前提，区域水资源总量及时空分布特征、地形地貌条件、河流水系格局、气象水文现状，以及生态保护红线管控要求和水环境承载水平，共同划定了工程布局的空间范围边界，也决定了工程类型选取与建设规模的合理区间。乡村发展规划同样对工程布局具有直接导向作用，乡村聚落空间格局、村庄撤并整合与集中聚居点规划、高标准农田建设布局、乡村特色产业发展架构，以及人居环境整治和美丽乡村建设整体定位，直接左右着水利水电工程的服务覆盖半径与功能适配方向。政策制度层面，乡村振兴战略、农村水利水电发展规划、小水电绿色转型、水美乡村创建、国土空间用途管控及生态环境保护等相关政策规范，为工程规划布局明确了发展导向，同时划定不可逾越的约束底线。经济社会层面涵盖地方财政投入实力、农村集体经济发展水平、人口总量规模与城乡人口流动趋势、农业产业结构、农村生产生活用水用电实际需求以及群众现实诉求，直接影响工程布局的实施优先级与建设配置标准。而技术管理因素则关乎规划落地成效，水利工程专业

勘察设计水平、GIS 空间规划技术应用、智能化调度管控手段、基层水利管理队伍专业能力以及多元主体协同参与规划的运行机制，从技术和管理层面保障了工程空间布局的科学性、精准性与实际可落地性。

三、小型水利水电工程空间布局优化策略

（一）流域 / 区域尺度的网络化重构

以国家水网建设为导向，实施市县一级的水网建设，结合县域和小流域为基本单元，整合现有小型水库、塘坝、渠系、小水电站、水系连通工程，构建“蓄、引、提、灌、排、发、补”一体化小微水网体系。梳理干流水系脉络，打通水系连通断点，优化工程集群空间排布，实行流域统一水量调度与生态流量管控；严控河流密集区段小水电新增布局，对存量零散小水电实施集约化整合、改造升级或有序退出，杜绝无序开发。同步对接县域主水网布局，实现城乡水利基础设施互联互通、水资源优化配置，形成层级清晰、功能互补、生态可控的区域水利水电空间网络格局。

（二）乡村聚落尺度的功能融合布局

紧扣乡村聚落分布与村庄规划，按照“集中为主、分散补充”模式优化工程落地布局。围绕乡村集中聚居区，配套完善供水保障、防洪排涝与生态景观水利设施；结合高标准农田连片开发，优化灌排渠系与小型水源工程布局，实现农田水利精准覆盖；依托河道塘库水系资源，融合乡村文旅、滨水休闲、生态游园建设，打造水美乡村特色节点；推动小水电与农村分布式新能源体系融合，纳入乡村能源保障布局，依托资源入股、集体分红等机制壮大农村集体经济，实现水利工程、乡村人居、产业发展、能源保障深度融合。

（三）单体工程选址与型式优化

严格遵循水资源承载力与生态红线约束开展单体工程选址，优先避让生态敏感区、鱼类重要栖息地与自然岸线，优选地形地质条件稳定、灾害风险低、服务辐射范围广的区位。优化工程结构型式，推广生态坝、生态渠道、仿自然岸线等生态化设计，配套建设生态流量下泄设施与鱼类洄游通道；老旧工程分类实施除险加固、防渗改造、智能化升级，提升防洪安全与节水效能；合理控制单体工程建设规模，适配乡村用水、用电与生态补水实际需求，兼顾建设成本、运维便利与景观协调性，实现单体工程安全实用、生态友好、适配乡村风貌。

四、结束语

小型水利水电工程规划布局优化是乡村振兴战略落地、生态文明建设推进与乡村基础设施提质的重要举措，更是破解当前乡村水利发展瓶颈、实现水资源高效利用与乡村高质量发展的关键

路径。本文以乡村振兴为核心导向，系统分析了我国小型水利水电工程规划布局的现状、问题及成因，明确了规划布局的理念转型、核心原则与关键影响因素，从流域区域、乡村聚落、单体工程三个层面提出了针对性的优化策略，构建了适配乡村振兴需求的小型水利水电工程规划布局体系。在乡村振兴战略持续深化的

背景下，小型水利水电工程规划布局需始终坚持生态优先、系统统筹、产水融合的导向，动态适配乡村发展新形势、新需求，不断完善规划机制、强化技术支撑、健全运维体系，推动工程从数量保障向质量提升、功能融”转型。

参考文献

[1] 曾祖飞. 中小型水利水电工程规划设计中常见问题及对策分析 [J]. 中国科技投资, 2019(18):92.

[2] 何胜宇. 试论小型水利水电水库工程的规划设计 [J]. 中国科技投资, 2019(1):30. DOI: 10.3969/j.issn.1673-5811.2019.01.019.

[3] 魏直天. 小型水利水电水库工程规划设计解析 [J]. 城市建设理论研究, 2014(15). DOI: 10.3969/j.issn.2095-2104.2014.15.0673.

[4] 李国良. 中小型水利水电工程设计中常见问题及对策分析 [J]. 水利科技与经济, 2014(8):64-66. DOI: 10.3969/j.issn.1006-7175.2014.08.028.

[5] 谢太生. 茶陵县小型农田水利工程规划设计问题研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2011. DOI: 10.7666/d.Y1902404.

[6] 李惠卿. 中小型水利水电工程建设管理思路 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2016(10):4045-4045. DOI: 10.3969/j.issn.2095-2104.2016.10.045.

[7] 陈子平, 邹战强, 陈洁芳, 等. 广东省小型农田水利工程建设规划 [J]. 广东水利水电, 2006(2): 13-14, 16. DOI: 10.3969/j.issn.1008-0112.2006.02.005.

[8] 沈燕红. 小型水利工程规划设计的问题及注意事项分析 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2016(13):3661-3661. DOI: 10.3969/j.issn.2095-2104.2016.13.661.

[9] 朱超. 浅谈小型水利水电水库工程规划设计 [J]. 引文版: 工程技术, 2015, 0(25):178.

[10] 买买提江·买斯德克. 小型农田水利工程规划设计存在的问题及注意事项 [J]. 砖瓦世界, 2021(9):310. DOI: 10.3969/j.issn.1002-9885.2021.09.238.

水利水电工程施工现场安全管理风险防控探析

韩志勇

内蒙古 呼和浩特 010000

DOI:10.61369/ERA.2026080005

摘 要： 水利水电工程作为国家基础设施建设的重要组成部分，其施工现场安全管理面临诸多新挑战。近年来各类型的事故在该领域多发频发，折射出风险辨识不全面、现场管控失之于宽、新技术风险应对滞后等深层问题。本文从风险防控的理论基础出发，系统梳理了水利水电工程施工的主要风险特征，结合近年来的典型事故案例，从风险辨识、现场作业管控、双重预防机制运行、智能监测预警及安全文化建设五个维度深入剖析当前风险防控的薄弱环节，进而提出健全全过程风险辨识与分级管控体系、强化高危作业技术性防控、推进“六项机制”向一线班组穿透、构建数智化监测预警平台、培育全员安全文化等系统性治理路径，旨在为提升水利水电工程施工安全管理水平提供理论参考与实践指导。

关 键 词： 水利水电工程；施工现场；安全管理；风险防控；双重预防机制

Analysis of Risk Prevention and Control in Safety Management of Water Conservancy and Hydropower Engineering Construction Sites

Han Zhiyong

Hohhot, Inner Mongolia 010000

Abstract： As an important component of national infrastructure construction, water conservancy and hydropower projects face many new challenges in construction site safety management. In recent years, various types of accidents have occurred frequently in this field, reflecting deep-seated problems such as incomplete risk identification, inadequate on-site control, and lagging response to new technology risks. This article starts from the theoretical basis of risk prevention and control, systematically sorts out the main risk characteristics of water conservancy and hydropower engineering construction, and combines typical accident cases in recent years to deeply analyze the weak links in current risk prevention and control from five dimensions: risk identification, on-site operation control, dual prevention mechanism operation, intelligent monitoring and early warning, and safety culture construction. It then proposes a systematic governance path to improve the safety management level of water conservancy and hydropower engineering construction, strengthen the technical prevention and control of high-risk operations, promote the penetration of the "six mechanisms" into frontline teams, build a digital monitoring and early warning platform, and cultivate a safety culture for all staff. The aim is to provide theoretical reference and practical guidance for improving the safety management level of water conservancy and hydropower engineering construction.

Keywords： water conservancy and hydropower engineering; construction site; safety management; risk prevention and control; dual prevention mechanism

引言

水利水电工程承担着防洪、发电、灌溉、供水等多重功能，是国家水网建设和能源体系的重要组成部分。水利水电工程施工的特殊性在于，其作业环境依存于自然水文地质条件，施工工序涵盖诸多高危环节，风险因素交织叠加，管理链条长、参与主体多，各环节之间又存在着客观的有机联系。传统的安全管理模式多以“事后追责”为导向，侧重于事故发生后的应急处置与责任认定，对风险的前端辨识、过程的动态管控投入不足。如何在施工现场将风险防控理念转化为切实有效的管理行动，是当前亟须回答的核心命题。

一、水利水电工程施工安全风险特征与典型事故分析

（一）风险类型的多维性与耦合性

水利水电工程施工安全风险可从施工对象、作业环境和事故类型三个维度加以把握。从施工对象维度看,《水利水电工程施工危险源辨识与风险评价导则(试行)》将施工重大危险源划分为5大类别、23个项目、43小项,涵盖了坍塌、滑坡、淹溺、高处坠落、物体打击、机械伤害、触电、火灾爆炸等主要事故类型。从作业环境维度看,水利工程多位于山区峡谷或江河沿岸,地形地质条件复杂,水文气象条件多变,汛期洪水、地质灾害等外部风险因素与施工活动并存,形成复合型风险。从事故类型维度看,相关统计显示,坍塌事故占安全事故总数的42%,洪水次生灾害占28%,机械伤害占19%,表明结构失稳与自然灾害是水利施工面临的首要威胁。

上述风险因素不是独立存在的,而是呈现出显著的耦合特征。例如,高边坡开挖过程中,降雨入渗、应力变化等因素导致岩土体稳定性削弱,叠加爆破等振动效应,可能诱发边坡失稳等;这种风险的交叉叠加使得单一维度的管控措施难以奏效,必须建立系统性的风险防控体系。

（二）近年来的典型事故案例审视

案例一:2025年12月7日,广东肇庆浪江抽水蓄能项目下水库进出水口施工工地发生坍塌事故,造成2人死亡。进出水口结构通常涉及深基坑开挖与边坡支护,地质条件复杂、地下水丰富,一旦支护方案不合理或施工过程监测不到位,极易发生坍塌。

案例二:2025年8月22日,且末县西岸干渠恢复修复一期工程项目发生人员淹溺事故,造成1人死亡。事故调查发现,施工单位存在未健全安全生产责任制、水渠临边作业未采取有效安全防护措施、未设置安全警示标识、隐患排查及风险辨识不到位、安全技术交底流于形式、现场监护缺位等多项问题。该案例集中暴露了安全管理体系系统性失效的典型症候:从制度缺失到执行走样、从教育培训虚化到现场监管缺位等,多重防线层层失守。

案例三:2025年11月2日,莆田市涵江区西音水库工程施工现场,在大坝悬臂翻升钢模板拆除作业过程中发生高处坠落事故,造成1人死亡。调查认定,事故原因系施工人员违反大坝悬臂翻升钢模板安全操作规程,导致正在拆除的钢模板松动脱落。该事故反映出高危作业环节中施工作业操作人员操作规程执行不严、现场安全管理人员对作业人员的行为管控不到位的突出问题。

上述案例表明,水利水电工程施工安全事故的发生往往是多因素叠加的结果:既有对风险辨识不全面、控制措施不具体的“认知缺陷”,也有安全管理制度执行不严格、现场监督流于形式的“管理缺陷”,还有作业人员安全认知若、违规操作屡禁不止的“行为缺陷”。这些问题的交织使得传统的管理模式难以从根本上解决问题。

二、当前施工现场安全风险防控面临的主要问题

（一）风险辨识不系统，防控目标定位精细化不足

风险辨识是安全管理的逻辑起点。当前一些项目在风险辨识环节存在明显短板:一是辨识范围不全面,“横向到边、纵向到底”的原则未真正落实;二是辨识方法不科学,过度依赖经验判

断而缺乏定量评价,风险等级的判定带有较大主观性;三是动态更新不及时,不能按要求每季度至少开展一次全面辨识活动,当施工环境、工艺、人员发生变化时未能及时对新风险进行重新识别。此外,部分项目未建立规范的危险源清单,或清单流于纸面,未与现场管控措施形成闭环。

（二）现场作业过程管控薄弱，高危环节“险而不控”

水利水电工程施工现场涉及的高危作业环节众多,这些环节的安管理要求编制专项施工方案并经审批论证,但在实际执行中存在诸多偏差。一是专项施工方案的技术针对性不强,生搬硬套通用模板,未能根据项目的具体情况进行针对性设计;二是方案与实施“两张皮”,现场作业未严格按方案执行,技术安全交底走过场,作业人员对具体操作规程不知情;三是危险性较大的单项工程缺乏全过程旁站监理,施工工序管理不严,安全技术措施不达标等问题时有发生;四是安全防护设施配置不到位,直接增加了作业人员暴露于危险环境的概率。

（三）“六项机制”落地不实，双重预防运行虚化

水利部提出的风险查找、研判、预警、防范、处置、责任“六项机制”,构建了从风险识别到闭环治理的全链条框架。然而,从政策要求到一线执行之间仍存在症结。其一,部分施工单位对“六项机制”的理解停留在概念层面,未将其融入日常管理流程,机制构建与现场作业脱节;其二,风险分级管控责任不清晰,“谁辨识、谁管控、谁负责”的链条未能贯穿至班组和岗位,管控措施难以落实到具体操作层面;其三,隐患排查治理不闭环,查出的隐患未能实现登记、整改、验收、销号的全程跟踪,同类问题反复出现;其四,预警机制不灵敏,人工监测与自动监测未能形成有效互补,风险信号未能及时转化为处置行动。

（四）智能监测手段的应用不够普及，技术赋能尚不充分

近年来,物联网传感器、AI视频监控、无人机巡检、BIM三维建模、数字孪生等技术在水利水电工程施工安全监测领域的应用展现出了巨大的潜力。然而,这些先进技术的覆盖面仍然有限。大量中小型水利工程项目由于资金投入不足、技术力量薄弱,安全管理仍主要依赖人工巡查和经验判断,监测手段粗放、预警能力不足。同时,已部署的智能化系统之间的数据标准与接口不统一,信息孤岛现象突出,难以实现跨层级、跨区域的安全态势协同研判。

（五）安全文化培育滞后，从“要我安全”到“我要安全”任重道远

制度与技术的刚性约束固然重要,但安全管理的最终成效取决于每一位作业人员的安全行为。当前,水利水电工程施工领域从业人员以一线劳务人员为主体,安全意识和技能水平有限。部分项目三级安全教育流于形式,培训内容与实际操作脱节,新入职员工未经有效考核即上岗作业。更深层的问题在于,安全管理的驱动力主要来自外部监管和处罚威慑,“被动合规”的心态普遍存在,尚未形成“主动安全”的组织文化。当管理者不在场或监管力量薄弱时,违章操作、冒险作业等行为便容易反弹。安全文化建设的滞后,使得制度防线和技术防线在关键时刻可能同时失效。

三、施工现场安全风险防控的系统性治理路径

（一）健全全过程风险辨识与分级管控体系

风险辨识不应是一次性的“规定动作”,而应嵌入施工全过

程,形成动态循环。首先,在工程开工前,项目法人应组织参建各方依据《水利水电工程危险源辨识与风险评价导则》(SL/T 843-2025)系统开展危险源辨识与风险评价工作,编制风险辨识与评价报告,建立危险源清单并明确管控责任主体。其次,施工期间应实行动态管理,每季度至少开展一次全面或专项辨识,当施工环境、工艺、设备或人员发生重大变化时即时重新辨识,确保风险状态与现场实际相符。再次,应建立风险分级管控机制,对重大风险、较大风险、一般风险、低风险分别采用红、橙、黄、蓝四色标示,绘制安全风险空间分布图并在醒目位置悬挂张贴,让每一位进入现场的人员都能清晰知晓所在区域的风险状态。在此基础上,按风险等级匹配相应的管控层级和资源投入,重大风险和较大风险由项目主要负责人直接督办,确保高风险得到高强度管控。

（二）强化高危作业环节的技术性防控

针对施工中的高危环节,须建立“技术方案、过程管控、监测预警”三位一体的防控机制。在技术方案层面,严格按照规定编制专项施工方案,对于超过一定规模的危险性较大的单项工程应组织专家论证,确保方案的针对性和可操作性。在过程管控层面,落实专项施工方案的旁站监理制度,严格按照方案组织施工,严禁擅自变更工艺或简化工序。

（三）推动“六项机制”向班组穿透

“六项机制”的生命力在于执行。当前亟需解决的是机制构建与一线操作之间的衔接问题。一是在辨识环节推行“全员辨识”,将班组每日岗前风险确认纳入班前会制度,让一线作业人员不仅知道“做什么、怎么做”,更知道“哪里有风险、怎么防”。二是在预警环节建立健全自动监测与人工巡检“双保险”机制,对重大危险源确保至少两种独立监测手段相互验证,预警信息直达相关责任人和作业人员,明确信息传递的路径、时限和确认机制。三是在处置环节完善应急响应流程,应急预案要在班组层面开展实操演练,确保每一位作业人员熟练掌握应急处置的基本技能。四是在责任环节将安全责任链条延伸至班组和岗位,签订岗位安全责任书,明确每个岗位的风险管控职责,实现“风险有人管、责任可追溯”。

（四）构建数智化监测预警平台

数字化转型为水利水电工程施工安全管理提供了全新的技术路径。应积极推广“天空地水工”一体化监测感知体系,综合运用物联网传感器、AI 视频分析、无人机巡检等先进的技术手段,实现对施工现场与安全相关的关键参数的实时、连续、自动化监测。在数据处理层面,构建统一的智慧工地管理平台,将分散的

监测数据汇聚到云端,运用大数据分析和 AI 算法进行风险趋势研判和异常预警,变“被动响应”为“主动预警”。同时,应注重技术的适用性和经济性,针对不同类型、不同规模的水利工程制定差异化的智能监测方案,避免“一刀切”式的过度投入或投入不足。对于规模以下或中小型工程,可依托地方水行政主管部门或流域管理机构建立区域性监测数据共享平台,降低单个项目的技术门槛和资金压力。

（五）培育全员参与的安全文化生态

制度的刚性约束离不开文化的柔性浸润。构建全员参与的安全文化体系,需从理念培育、能力建设、行为激励三个层面协同推进。在理念培育层面,推动安全管理理念从“事后追责”向“事前预防”转变,从“监督驱动”向“自主管理”转变,通过安全宣讲、警示教育、典型选树等方式,营造“人人讲安全、事事为安全”的组织氛围。在能力建设层面,严格落实三级安全教育制度,对进场人员进行实名制培训,确保每位作业人员掌握本岗位的风险要点和应急技能;推行“三知两会”考核机制—知道岗位危险源、管控措施和应急办法,会使用应急器材、会讲风险防范。在行为激励层面,建立正向激励机制,将安全绩效与个人晋升、班组评优挂钩,推动从“要我安全”到“我要安全”的行为转变。

四、结语

水利水电工程的安全管理,其核心在于从风险防控的视角重构管理理念、方法和技术手段。本文的分析表明,当前施工现场安全管理的薄弱之处,并非制度供给不足,而在于制度要求与一线执行之间的转化效率偏低。风险辨识流于形式、技术方案与现场实施脱节、“六项机制”未能穿透至班组、智能监测技术覆盖面有限、安全文化培育滞后等问题,共同构成了制约安全管理效能提升的瓶颈。破解之道在于构建“制度、技术、文化”三位一体的风险防控体系:以全过程风险辨识与分级管控为基础,以高危环节的技术性防控为关键,以“六项机制”的穿透式执行为抓手,以数智化监测预警为支撑,以全员安全文化为根基。唯有将风险防控理念真正融入日常施工生产的每一个环节,将安全管理从“运动式”整顿转变为制度化、常态化的系统治理,方能从根本上提升水利水电工程施工现场的本质安全水平,为新时代水利事业高质量发展筑牢安全底线。

参考文献

- [1] 水利部. 构建水利安全生产风险管控“六项机制”的实施意见(水监督〔2022〕309号)[Z]. 2022.
- [2] 水利部办公厅. 关于做好《水利水电工程安全生产重大事故隐患判定导则》《水利水电工程危险源辨识与风险评价导则》技术标准实施工作的通知(办监督函〔2025〕508号)[Z]. 2025.
- [3] 且末县应急管理局. 且末县西岸干渠恢复修复一期工程项目“8·22”一般淹溺事故行政处罚公示[EB/OL]. 2025.
- [4] 肇庆市安全生产委员会. 关于广东肇庆浪江抽水蓄能电站项目“12·7”一般坍塌事故调查处理工作督办的函(肇安函〔2025〕8号)[Z]. 2025.
- [5] 钦州市水利局. 关于3起水利工程安全生产执法典型案例的通报[EB/OL]. 2025-12-05.
- [6] 水电十四局. 晋陕峡谷智绘新篇——黄河古贤水利枢纽导流洞项目智能建造侧记[EB/OL]. 2026-05-08.
- [7] 中国水利报. 严阵以待战汛期 筑牢屏障保安全——环北部湾广西水资源配置工程全力保障安全度汛[N]. 2026-05-07.

“一牵五”导引绳展放方式在500kV输变电线路的应用

毛伟, 张韬

浙江省送变电工程有限公司, 浙江 衢州 310016

DOI:10.61369/ERA.2026080013

摘 要 : 500kV 输变电线路是跨区域、大容量输电的骨干网架, 承担着电能大容量、远距离的关键任务, 它建设质量的高低将会对电力系统的稳定运行和区域经济的健康发展产生影响^[1]。然而, 在输变电线路施工过程中, 传统的导引绳展放方式有着效率低、成本高的问题, 难以满足现代工程建设的要求。近些年来, “一牵五”张力展放导引绳作为一种全新的技术在线路架设施工中逐渐被使用。缙云抽水蓄能电站~吴宁双回500kV线路工程, 沿线山地、高山大岭占绝大部分, 架线阶段正值现场酷暑, 为了保证工程按期投运, 减少现场人力、物力。实践证明, “一牵五”导引绳展放方法拥有较高的技术可行性, 为浙江省送变电工程公司线路建设施工积累了经验, 值得在未来的输变电线路建设中进一步推广和应用^[1-2]。

关 键 词 : 一牵五; 架线施工; 导引线; 展放

Application of the "One-Trait-Five" Guidance Rope Deployment Method in 500 kV Transmission and Transformation Lines

Mao Wei, Zhang Tao

Zhejiang Power Transmission and Transformation Engineering Co., Ltd. Quzhou, Zhejiang 310016

Abstract : 500 kV transmission and transformation lines serve as the backbone infrastructure for cross-regional, high-capacity power transmission, undertaking critical tasks of delivering large volumes of electricity over long distances. The quality of their construction significantly impacts the stable operation of power systems and the healthy development of regional economies^[1]. However, traditional guidance rope deployment methods during construction suffer from low efficiency and high costs, failing to meet modern engineering requirements. In recent years, the "One-Trait-Five" tension-controlled deployment method has been increasingly adopted in line installation projects. The Jinyun Pumped Storage Power Station-Wuning Dual-Loop 500 kV Line Project traverses predominantly mountainous terrain with extreme heat conditions during the installation phase. To ensure timely commissioning and minimize on-site labor and material requirements, practical implementation has demonstrated the high technical feasibility of the "One-Trait-Five" guidance rope deployment method. This approach has provided valuable experience for Zhejiang Power Transmission and Transformation Engineering Co., Ltd. and warrants further promotion and application in future transmission and transformation line projects^[1-2].

Keywords : "One-Trait-Five"; overhead line construction; guide wire; deployment

一、综述

(一) 基本原理

“一牵五”导引绳展放方式是一种基于现有放线技术的改良施工方式, 它的基本原理是通过主牵引绳依靠走板一起牵引五根导引绳, 来实现对多根导引绳同步展放的技术。在作业过程中, 主牵引绳利用主牵引机提供稳定的牵引力, 将五根导引绳依次穿过滑车系统并展放至规定地点^[3]。和传统的一牵四和一牵二导引线展放法相比较, “一牵五”导引绳展放方式可以明显降低牵引作业的次数, 提升作业效率。

在现实的作业过程中, “一牵五”导引绳展放方式和传统施工

方式相比, 优势很大。第一, 这种施工方式可以大大降低牵张机的重复使用频率, 减少牵张机的损耗和维护成本。再者, 因为使用一次性展放五根导引绳的方式, 施工工期将得到明显减少, 对于需要快速投运的输变电工程来说, 显得十分重要^[2], 同时也能够减少现场工人在酷暑下施工中中暑概率。最后, “一牵五”方式可以降低对施工场地的占用时间, 减少牵张场的租赁成本, 对于线路走廊内存在经济作物或环境保护要求较高的区域, 该方法能够有效降低对周围环境的影响, 进一步体现了其技术经济优越性^[1]。

(二) 技术特点

“一牵五”导引绳展放方式因其效率高、稳定性强和对环境友好的优点, 在现代输变电线路施工中拥有良好的应用价值。第

作者简介:

毛伟 (1996.05-), 男, 汉族, 浙江省衢州人, 助理工程师, 硕士, 研究方向: 输电线路施工, 现就职于浙江省送变电工程有限公司。

张韬 (1999.09-), 男, 汉族, 内蒙古赤峰人, 助理工程师, 大学本科, 研究方向: 输电线路施工, 现就职于浙江省送变电工程有限公司。

一，这种一次同时展放五根导引绳的方式，可以大大提高施工效率，同时，减少青苗占地时间，可以很好地降低相应的赔偿费用^[4]。第二，这种施工方式利用优化牵张系统和滑车分绳技术，大大降低作业时间。例如，在溪洛渡至牛寨Ⅲ回500kV送电线路施工作业中，现场施工作业人员利用合理布置牵张设备和导引绳的方法，实现了放线区段的高效覆盖，进一步验证了这种方法在减少作业时间方面的优势^[5]。

另外，“一牵五”导引绳展放方式还可以大大减少施工作业人员的工作强度。在以往的作业方法中，作业人员必须多次对导引绳进行展放和调整，但是“一牵五”展放导引绳一次作业就能够使五根导引绳的展放到位，可靠降低了人工操作频率，从而减少了施工人员的作业强度^[4]。与此同时，这种作业方式对环境也更加友好。以恩施—水布垭Ⅲ回输电线路工程为例，“一牵五”导引绳展放方式在提高工作效率的同时，也减少了对周围生态环境的影响，展示了其绿色施工的优势^[6]。

二、应用

（一）施工准备

在利用“一牵五”导引绳展放方式进行缙云～吴宁500kV线路工程施工前，充分的施工准备是确保展放作业顺利实施的基础。

1. 牵张设备及工器具的选择

（1）主牵引机的选定

主牵引机选型时，额定牵引力计算为：

$$P \geq mK_p T_p$$

式中：P为主牵引机的额定牵引力，m为同时牵引□15防扭钢丝绳的根数， K_p 为选择主牵引机额定牵引力的系数，展放防扭钢丝绳时 $K_p=0.2\sim0.3$ 。根据本项目具体的地形地貌条件选择相应的系数； T_p 为被牵放钢丝绳的额定拉断力150000N。同时需要满足主牵引机的卷筒槽底直径不应小于牵引绳直径的25倍。因此， $P \geq mK_p T_p = 5 \times 0.25 \times 150000 = 187500\text{N}$ ，选用QT280型牵引机。参数：最大牵引力 $P_m=280\text{kN}$ ，最大持续工作牵引力 $P_e=250000\text{N}$ ，牵引轮直径 $\phi 960\text{mm}$ ，适用最大直径38mm的钢丝牵引绳。

结论： $P_e > P$ ，牵引轮最大适用直径大于□22防扭钢丝绳，选用的主牵引机符合要求。

（2）主张力机的选定

主张力机选型时，额定张力计算为：

$$T_e \geq K_t T_p$$

式中：T为主张力机额定制动张力， K_t 为选择主张力机单根导线额定制动张力系数，防扭钢丝绳时 $K_t=0.12\sim0.20$ 。根据具体的地形地貌条件选择相应的系数， $T=K_t T_p=0.20 \times 150000=30000\text{N}$ 。

导线张力机的导线轮槽底直径的计算如下所示：

$$D \geq 40d-100,$$

式中：D表示张力机的导线轮槽底直径，d为被展放的□15

防扭钢丝绳直径， $D \geq 40d-100=40 \times 15-100=500\text{mm}$ ，选用FRQ800张力机。参数：运行张力（牵引力）最大持续工作张力 $4 \times 45\text{kN}$ ，即运行张力（牵引力） $T_e=45000\text{N}$ ，张力轮直径1500mm，适用于直径 $D_e=40\text{mm}$ 。

结论： $T_e > T$ 、 $D_e > D$ ，选用的主张力机符合要求。

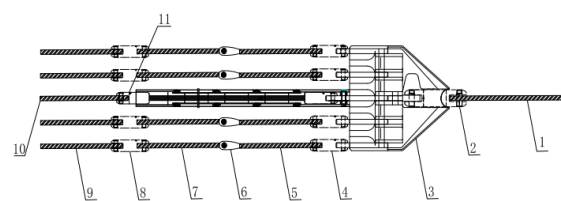
（3）工器具选择

导引线选用□15防扭钢丝绳，自重790g/m，破断力150kN；

牵引绳选用□22防扭钢丝绳，自重1610g/m，破断力368kN；

Φ15*16m迪尼玛绳，自重32g/m，破断力211.1kN；

“一牵五周板”，如下图所示，已做过拉力试验，其强度满足不小于 $50\text{kN} \times 1.25$ （安全系数）。



1- □22牵引绳；2-130kN 旋转；3-一牵五周板；4-50kN 旋转；5-Φ16*50m 迪尼玛绳；6-50kN 抗弯；7-Φ16*50m 迪尼玛绳；8-50kN 旋转；9- □15牵引绳；10- □15牵引绳；11-50kN 抗弯旋转

图1一牵五周板连接示意图

2. 施工前准备

（1）作业开始前，利用奥维地图和现场的实地勘察，选定好牵张场，对牵张场进行详细勘察与布置，确保场地满足展放作业的场地大小要求并且交通条件满足牵张设备、吊机能够到达现场，并尽可能排除对施工作业产生危险的安全隐患；

（2）对牵引机、张力机、牵引绳、导引绳及相关辅助工具的安全检查至关重要。牵张设备应具有足够的动力和稳定性，并且在检验合格有效期内，来保证五根导引绳同时展放时的动力需求；导引绳则需根据线路跨度、地形条件等因素选择合适的规格，并且通过检验且在合格有效期内，避免因导引绳质量问题而引发的安全事故^{[1][6]}；

（3）作业开始前，材料站专用人员需对放线滑车等关键工器具进行调试和维护，确保其在作业过程中的正常运行。做好施工作业准备工作，能够有效提高施工效率，为展放作业的顺利开展营造良好的作业环境。

（二）现场准备

1. 用多旋翼无人机展放 Φ2的迪尼玛绳，用尼龙绳细股做缝制线将初级绳连接在一起；
2. 选择和布置好牵引场、张力场。用小型牵张设备 Φ10迪尼玛绳；
3. 用中牵中张牵引□15防扭钢丝绳；
4. 放电区段内的带电线路已完成停电并搭设跨越架，牵张机以及钢丝绳出线口已全部接地；
5. 现场铁塔瓷瓶、金具以及放线滑车已经安装完毕；
6. 现场牵张机手、对讲机、分绳操作人员已经准备完毕。

三、施工步骤

（一）“一牵五”走板连接

□22防扭钢丝绳→13t 旋转连接器1个→5t 旋转连接器5个→φ16*50m 迪尼玛绳5根→50kN 抗弯→φ16*50m 迪尼玛绳5根 φ16*50m 迪尼玛绳5根→5t 旋转连接器5个→□15防扭钢丝绳5根。

（二）“一牵五”导引线分绳操作

1. 利用大牵+大张（4根钢丝绳）+小张（1根钢丝绳）进行1牵5展放钢丝绳时，从第一基开始，经过每一基塔时，钢丝绳都要进行分绳。高空作业人员将4根临锚绳锚固在导线横担和地线支架上，当走板走过放线滑车后，放慢牵引机速度，继续牵引一定距离牵引机、张力机停机；

2. 利用临锚绳上的卸扣和连接绳的抗弯完成临锚绳的连接；

3. 牵引机放松□22防扭钢丝绳，张力机将钢丝绳回抽，待锚固迪尼玛绳受力后，继续回牵使走板走到合适位置停止回收；

4. 拆除两个 φ16迪尼玛绳中间的抗弯，分绳人员分别利用提绳装置，将两根迪尼玛绳提升到横担和地线架上的放线滑车上，并重新用抗弯将两根迪尼玛绳相连；

5. 牵引机继续牵引，张力机送出，继续送线并保持一定的张力，到锚固的迪尼玛绳保持松弛状态，继续牵引，直到卸扣到各自的滑车处，拆除卸扣，继续牵引；

6. 牵引至下一基塔后，重复上述步骤，直到整段都牵引到位。

四、关键环节技术要点

（一）张力控制

在“一牵五”展放导引线钢丝绳的过程中，张力控制是确保展放作业安全和质量的关键技术之一。因为同时展放五根导引线，它张力分布的均匀性将会直接对展放效果和线路的长期运行稳定性产生影响。因此，在施工作业过程中要利用好张力控制设备，实时对导引绳的张力进行检测。具体来说，牵张手利用张力放线机和传感器组成的闭环控制系统、以往经验以及专业知识对导引绳上的张力进行实时调整，以免因张力过大造成钢丝绳损伤或者因为张力过小而引发的钢丝绳缠绕问题^{[6][7]}。另外，应结合施工现场的地形条件、牵张段长度以及作业现场温度，合理设置张力参数，从而进一步优化展放的效果。如遇强风天气，在保证风力在6级以下的条件下，则需降低张力以防止导引绳发生剧烈摆动而发生缠绕现象。

（二）滑车使用

放线滑车在“一牵五”导引线展放过程中扮演着非常重要的

角色，它的选择、安装和使用技巧将直接关系到整个展放线作业的顺利进行。在选择放线滑车时，首先要根据导引钢丝绳的直径及放线段展放张力选择合适的放线滑车材质与型号，以保证它的载荷能力和耐磨性能满足施工作业要求。其次，滑车的安装位置、数量、偏角要经过精确计算，避免因安装不当导致导引绳在展放过程中出现偏斜、现象或者牵导引绳频繁跳槽现象。特别是在分绳过滑车的过程中，需要运用专门的分绳装置，以确保五根导引绳能够顺利通过放线滑车而不发生相互缠绕^[8]。

五、施工注意事项

1. 钢丝绳展放前，应检查钢丝绳是否有金钩、断股、明显背扣等现象，若发现一个节距内断股超过5%时，必须割断重新插套；

2. 两根□15防扭钢丝绳之间必须用50kN 抗弯连接，不得用铁丝或铝丝作临时连接；

3. 施工作业人员在转角、高差比较大的塔上，随时做好防止跳槽和跳槽后的补救工作；

4. 现场作业人员都要备好对讲机，调好频道，保持各自的沟通，塔上作业要准确汇报塔位信息，严禁信号不通时牵张机作业；

5. 放线过程中的临锚绳和中间的迪尼玛绳要经历多次锚挂，要注意观察临锚绳和迪尼玛绳的损伤情况，发现破损和断丝的情况立马进行更换；

6. 挂接穿滑车时要分清相序，避免出现搅扭现场；

7. 保证张力机的张力，以使他与跨域物保持安全距离。

六、结语

缙云抽水蓄能电站~吴宁双回500kV 线路工程架线施工中，采用“一牵五”张力展放钢丝绳，不仅能显著提升输电线路的施工效率和质量，还能确保其运行的安全性和可靠性。为以后施工提供了大量的经验。未来，“一牵五”导引线展放方法在输变电线路建设中具有广阔的发展前景。随着特高压技术的不断推进以及10分裂导线在电力线路中的应用，该展放导引线方式将在提高效率、降低施工成本以及保障质量方面的潜力将进一步释放。因此，“一牵五”导引线展放方法确实是一种值得推广的先进技术，具有广阔的应用前景。

参考文献

- [1] 严得录；韩学文.“一牵五”导引线展放方法的应用[J]. 青海电力, 2012, 31(2): 42-43.
- [2] 戴劲松. 浅析“一牵五”展放引绳施工[J]. 通讯世界, 2014, 20(12): 131-132.
- [3] 杨力；王鹏；胡克飞.“一牵五”导引线展放工艺分绳过滑车的实用技巧[J]. 湖北电力, 2010, 34(6): 82-83.
- [4] 戴劲松. 浅析“一牵五”展放引绳施工[J]. 通讯世界, 2014, 20(12): 131-132.
- [5] 胡延军；行立科；李杰.“一牵五”导引线张力展放施工新工艺[J]. 山西电力, 2005, (5): 24-26.
- [6] 张建业；黄迎亚. 分析500kV 架空输电线路张力架线施工技术[J]. 电气技术与经济, 2024, (3): 123-125.
- [7] 路早斌. 500kV 输电线路的张力放线施工[J]. 智能城市, 2019, 5(24): 149-150.

基于 BIM 技术的水利工程项目管理模式创新研究

吴壮壮¹, 倪一品², 殷海平³, 贺欣文¹, 张宇衡¹

1. 淮安市水利勘测设计研究院有限公司, 江苏 淮安 223001

2. 淮安市城市水利工程管理中心, 江苏 淮安 223001

3. 淮安市高良涧水利工程管理站, 江苏 淮安 223001

DOI:10.61369/ERA.2026080023

摘 要 : 本文重点围绕依靠 BIM 技术 (即 Building Information Modeling, 建筑信息模型) 的水利工程项目运作模式更新展开论述, 经由剖析 BIM 技术在水利工程当下的应用情况, 探究它在项目规划, 营造以及经营运作方面的新式应用途径, 目的在于优化水利工程项目的经营效能与品质, 文章给出一种依托 BIM 技术的水利工程项目运作模式架构, 并且剖析其中的关键技术及其在各个阶段的具体执行办法。

关 键 词 : BIM 技术; 水利工程; 项目管理; 技术创新; 管理模式

Research on Innovative Management Mode of Water Conservancy Engineering Projects Based on BIM Technology

Wu Zhuangzhuang¹, Ni Yipin², Yin Haiping³, He Xinwen¹, Zhang Yuheng¹

1. Huai'an Water Conservancy Survey and Design Institute Co., Ltd., Huai'an, Jiangsu 223001

2. Huai'an City Urban Water Conservancy Engineering Management Center, Huai'an, Jiangsu 223001

3. Huai'an Gaoliangjian Water Conservancy Engineering Management Station, Huai'an, Jiangsu 223001

Abstract : This article focuses on the discussion of updating the operation mode of water conservancy engineering projects relying on BIM technology (Building Information Modeling). By analyzing the current application of BIM technology in water conservancy engineering and exploring its new application methods in project planning, construction, and operation, the aim is to optimize the operational efficiency and quality of water conservancy engineering projects. The article presents a water conservancy engineering project operation mode architecture relying on BIM technology, and analyzes the key technologies and specific implementation methods in each stage.

Keywords : BIM technology; water conservancy engineering; project management; technological innovation; management model

引言

水利工程属于基础设施创建的关键形成局部, 项目运作的效率及质量会直接左右工程的胜负, 伴随信息技术飞速发展, BIM 技术慢慢被应用于建筑和工程领域, 特别是在项目运作的各个阶段, 表现出很大的潜力。传统水利工程项目运作存在交流不畅, 信息孤岛等情况, 而 BIM 技术是一种综合化的运作工具, 可以整合各种资源来提升项目运作的总体效率, 文章将会借助 BIM 技术去探究它在水利工程项目运作方面的革新应用。

一、BIM 技术概述与水利工程项目管理的现状

(一) BIM 技术的基本概念与特点

BIM (Building Information Modeling) 技术属于一种依靠信息融合的建筑工程运作技术, 它尝试经由数字化手段把建筑工程设计, 施工, 经营等阶段有关的数据整合起来, 做到项目整个生命时段的信息共享和协同运作。BIM 技术把建筑, 结构, 机电, 施工运作等诸多方面的数据融合在一起, 创建起统一的信息平台, 这样就能让参与该项目的人随时得到准确的信息, 防止出现

信息孤岛的情况, 进而改善运作效率并优化工程质量, 它的主要功能涵盖数据共享, 进程追踪, 成本把控, 质量检测以及决策辅助等方面。相比于传统的建筑信息模型 (BIM), BIM 技术更大的优点在于更加重视项目经营全过程的调和以及数据整合, 格外在跨部门, 跨项目的合作方面, 可以切实加强项目整体的执行效率和透明度。

(二) 水利工程项目管理现状分析

当下, 水利工程项目运作碰上诸多挑战, 信息流通受阻, 资源调配不合情理, 协作不够等情况较为突出, 以往的水利工程项目运

作大多依靠人力调配并凭借经验作出决策，信息的传达和分享往往依靠纸质文档或者单独的电子系统，所以造成信息迟缓失真，严重妨碍到项目的进程与品质。因为缺少有效的资源运作及调配手段，资源的分配时常出现不均或者过度损耗的情形，引发项目成本超出预算而且推迟完工时间，于是，水利工程项目运作迫切必要采用更为高效的信息化整合与合作平台来改善运作流程。

（三）BIM 技术在水利工程项目管理中的潜力

BIM 技术的运用给水利工程项目经营带来了新的发展契机，借助 BIM 技术，水利工程的各个经营环节，即设计，施工，监管和运作，都能够达成信息的无缝衔接与即时更新，特别是在项目的规划和施工期间，BIM 技术可以把各种数据融合并且做到可视化，从而助力经营者随时掌握项目的进度和预算状况，防止出现施工偏离和质量问题，而且，BIM 技术可以改善资源调配的效率，经由智能调配系统来改良人员，设备和材料的安排，削减资源损耗，增强整体的工作效率，在风险应对上，BIM 技术能够立即剖析施工现场的风险要素，并及时发出警报，缩减安全事故发生的概率。

二、基于 BIM 技术的水利工程项目管理模式框架

（一）项目设计阶段的 BIM 技术应用

水利工程处于设计阶段时，BIM 技术能明显改善设计流程，加强设计的质量与效率，其一，依靠 BIM 技术，设计人员可从统一的数字平台得到各种设计数据，并做到即时共享及协作。水利，结构，机电等不同专业的设计师可以在同一个平台上开展信息交流，从而保障设计方案的一致性，减轻由于信息不对称或者解读有误而引发的设计矛盾，其二，BIM 技术凭借三维建模和虚拟仿真，助力设计人员在实际施工之前彻底检验设计方案，找出可能存在的问题并改良设计方案。BIM 技术把设计数据融合起来之后，就能给予设计人员精准度较高的计算及分析手段，使得设计人员可以考量各个设计方案是否可行以及存在的改进之处，进而提升设计品质，缩减返工量和修正次数，削减设计所需的成本和历时。

（二）施工阶段的 BIM 技术应用

在施工期间，BIM 技术经由数字化平台大幅改善了施工进度观察及经营的效率，以往的进度经营依靠人力记载，信息更新迟缓，极易造成项目进度难以精确把控。但是 BIM 技术把诸如进度，人员调配以及设备利用之类的重要数据即时上传到同一个平台，经营者能够随时查阅施工情况，并同计划作比较，从而及时察觉进度上的偏离并加以纠正，免除由于信息迟缓而产生的耽搁，而且，BIM 技术融合现场传感器和数据收集装置，随时检测环境和物料的状态，譬如温度，湿度，物料硬度等等，以保证施工质量处于可掌握范围之内。

（三）运营阶段的 BIM 技术应用

水利工程进入经营阶段以后，BIM 技术把设施经营的数据融合起来，给设施的守护和观测给予全方位支撑，依靠传感器，物联网以及智能数据收集体系，BIM 技术可以随时掌握水流量，水质，能耗等情况，从而协助经营者及时察觉设备故障和潜藏危

险，保障设施既高效又安全，免除因为设备原因引发生产停止或者发生事故，凭借自身突出的数据分析能力，BIM 技术还能够推断出设备的保养时限和替换时间，改善保养运作，预先判断设备磨损状况，并提示按时执行检查，以此削减保养开支。

三、BIM 技术在水利工程项目管理中的关键技术实现

（一）BIM 技术与信息集成平台的构建

在水利工程项目当中，信息集成平台属于 BIM 技术的关键工具，具备智能协作能力，这个平台会整合设计，施工，监管以及经营各个阶段的即时数据，推动各个部门共同作业，化解了传统运作时存在的信息脱节状况，项目相关方经由平台随时取得设计图纸，施工进度，物资利用以及人员调配等方面的信息，保障信息得以共享，防止由于迟缓的信息引发的决策失误或者项目拖延。而且该平台有益于跨越地域和专业的协作，使得处于不同地方的团队能够凭借同一平台有效地展开交流，缩减运作上的困难，其可视化特性提升了数据的操作性，项目经营者能够及时观察到项目的动态，迅速作出反应并实施改善，从而加强运作的透明度与效率。

（二）BIM 技术在进度与成本控制中的应用

BIM 技术可明显改善项目进度经营及成本控制的精准度，经由集成化的信息平台，项目经营者能随时掌握项目各方面的进度指标，比如把施工阶段实际达成的情形同计划进度做比较，及时察觉进度上的偏离并采取矫正举措，在成本控制上，BIM 技术能够追踪项目各项费用的开支状况，保证预算维持在恰当的范围之内，依靠大数据分析，BIM 技术还能预估将来也许会出现的成本起伏，并给出改良意见，这样就能有效地防止预算超出预期的情形产生。如表 1 所示。

表 1 BIM 技术应用前后的进度与成本控制效果对比

项目阶段	传统管理模式 进度偏差	BIM 技术应用 后进度偏差	传统管理模式 成本超支	BIM 技术应用 后成本超支
设计阶段	10%	2%	5%	1%
施工阶段	15%	5%	12%	3%
运营阶段	8%	1%	6%	2%

从表 1 中可以看出，应用 BIM 技术后，项目进度偏差和成本超支都得到了显著减少，项目的控制能力得到了提升。

（三）BIM 技术支持的质量管理与风险预警系统

BIM 技术应用于质量管理和风险提示，给水利工程项目带来很强有力的支撑，把现场传感器数据同施工进度融合之后，BIM 系统就能随时检测工程质量指标，材料强度，施工质量等等，保证工程依照设计标准持续推进。而且，BIM 技术能联系环境监测数据，剖析施工现场的温湿度，气候变化等情况，及时察觉潜在的质量风险，依靠智能分析算法，系统会从历史数据当中学习，按照这些来预估也许会出现的质量问题或者安全风险，进而预先执行防范举措，BIM 所支持的风险提示系统既能够改进质量控制的精准度，又能在项目中期或者后期产生状况的时候，立即发出警报，促使项目按时达成并且保证质量。

四、基于 BIM 技术的水利工程项目管理模式的实施路径

（一）BIM 技术应用的实施步骤与流程

在水利工程项目当中，采用 BIM 技术的道路包含技术框架的创建，而且要经过细致的规划并系统地执行，其一，需求分析对于项目达成目标来说很关键，要清楚各个阶段应有的功能和目的，使得 BIM 技术平台可以符合项目的真实需求。经由同设计，施工以及经营等各个环节交流，领会详细的要求，并规划出平台功能的实施方案，在创建平台的时候，挑选恰当的 BIM 技术框架及其工具十分必要，这个时期得考量平台是否具备扩充能力，安全性能如何，还有多方协作时能否高效运转，到了系统整合阶段，就要保证各个部门，各个环节的数据能够顺畅地接入 BIM 平台，从而塑造起一个融合化的项目运作体系，做到即时分享和更新消息。分析数据并加以改良是不断加强经营效能的重要举措，从平台所汇集的数据当中实施分析，找出项目潜藏的问题与阻碍，给出改善方案并且改良经营流程，以此做到项目经营的高效，透明且智能，进而促使项目达成高质量的完工。实施步骤如图 1 所示。

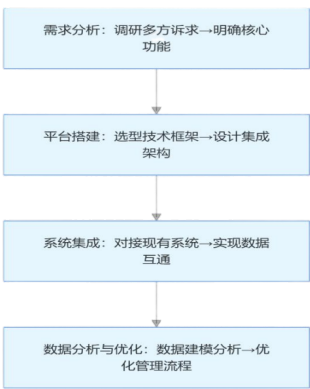


图1 BIM 技术应用的实施流程图

（二）BIM 技术应用的技术保障与风险管控

在执行 BIM 技术的时候，也许会碰上不少技术难题和风险，

所以要采取一些保障措施，从技术保障来讲，挑选恰当的硬件设备和软件框架是保证 BIM 技术得以顺畅运用的关键所在，得要保证平台具备高可用性与高安全性，免除由于设备出现故障或者数据被泄露而影响到项目的推进，风险控制而言，BIM 技术在得到应用时大概会遭遇的数据丢失，系统垮掉以及人员培训不够等情况。可以定时备份数据，并采用云服务以提升系统的可扩展性和稳定性，还要加大对项目经营人员的技术培训力度，使其能熟练利用 BIM 平台做日常工作，而且，创建专门的技术支撑小组，这样一旦出现问题就能立即回应并加以解决。

（三）BIM 技术推广中的障碍与对策

BIM 技术的推广碰上一些阻碍，特别是在水利工程项目当中更为突出，其一，技术繁杂且初期投入较高，这是不少企业采纳 BIM 技术时存在的主要担忧所在，政府部门以及行业协会能够给予相应的政策扶持和资金补助，以此来削减企业技术方面的投入负担，其二，员工能否及时掌握新技术并适应之，这也是推进 BIM 技术应用所遭遇的一个难点，对于这种情况，企业可安排定时举办培训班，提升员工的操作技能，并渐渐向 BIM 技术体系靠拢，免除因更换技术而产生的各种不适感，其三，行业标准不统一以及数据无法共享这些状况也许会制约 BIM 技术的普及进程，所以，业内应当共同努力制订一套通用准则，促使所有参与方存放在 BIM 平台上的信息得以相互关联，这样才能做到全面化利用并获取更多收益。

五、结语

BIM 技术在水利工程中的发展不断推进，其应用范围持续扩大，这促使项目运作模式产生改变，创建依靠 BIM 技术的项目运作模式之后，就能切实改善水利工程项目从设计到施工再到经营各阶段的运作水平，助力运作模式更新并得到完善，将来，BIM 技术会更多地被各行各业采用，给水利工程的智能，信息化运作赋予有力支撑，从而让行业收获更好的经济效益和更具优势的竞争力。

参考文献

[1] 石龙梅. 水利工程施工技术与施工技术管理现状与创新改革措施分析 [J]. 水上安全, 2024, (17): 126-128.

[2] 蔡亚. 中小型水利工程施工技术管理的创新进展 [J]. 低碳世界, 2022, 12(10): 142-144.

[3] 秦奎峰, 李秉哲. 水利工程技术创新及技术管理分析 [C]// 河海大学, 山东省水利科学研究院, 山东水利学会. 2021（第九届）中国水利信息化技术论坛论文集. 济南黄河水务局供水局, 2021: 410-413.

[4] 张俊玲, 张修磊, 王志浩, 等. 水利工程管理中技术创新的应用 [J]. 智能城市, 2019, 5(08): 191-192.

[5] 贾宝力, 孟凡军, 王方. 水利水电建设工程项目管理与施工技术创新 [M]. 中国华侨出版社: 2020: 295.

[6] 尹朝阳. 水利工程施工组织与项目管理技术分析 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2025, (24): 202-204.

[7] 毕守一. 水利工程项目管理 [M]. 中国水利水电出版社: 2017: 294.

[8] 张胜标. 水利工程建设施工监理技术与管理创新研究 [J]. 科技创新导报, 2021, 18(12): 24-26.

探析 RTG 改造核心电气设备配置

罗柏林

珠海国际货柜码头（高栏）有限公司，广东 珠海 519000

DOI:10.61369/ERA.2026080024

摘 要： 轮胎式集装箱门式起重机是港口装卸作业的关键设备，其电气控制系统性能直接影响运行效率与安全。随着原有进口变频器及 PLC 产品停产，设备故障率上升，维修成本增加，改造成为必然选择。该研究以珠海港高栏国际货柜码头一台 2008 年投产的 RTG 为对象，分析其变频器与 PLC 的国产化替代方案，重点探讨设备选型、系统兼容性、施工内容及技术特点，为类似老旧设备改造提供参考。

关 键 词： 轮胎式集装箱门式起重机；PLC；电气设备配置

Exploring the Configuration of Core Electrical Equipment in RTG Renovation

Luo Bolin

Zhuhai International Container Terminal (Gaolan) Co., Ltd., Zhuhai, Guangdong 519000

Abstract： Tire type container gantry crane is a key equipment for port loading and unloading operations, and its electrical control system performance directly affects operational efficiency and safety. With the discontinuation of imported frequency converters and PLC products, equipment failure rates have increased and maintenance costs have risen, making renovation an inevitable choice. This study takes a RTG that was put into operation in 2008 at the Gaolan International Container Terminal in Zhuhai Port as the object, analyzes the localization replacement plan of its frequency converter and PLC, focuses on equipment selection, system compatibility, construction content, and technical characteristics, and provides reference for the renovation of similar old equipment.

Keywords： tire type container gantry crane; PLC; electrical equipment configuration

引言

港口集装箱运输量持续增长，对装卸设备的可靠性与智能化提出更高要求。部分早期投入使用的 RTG 面临电气控制系统老化、备件短缺等问题，原有进口品牌产品因停产导致维修周期延长、成本上升。采用国产品牌高性能变频器与 PLC 进行升级改造，成为提升设备运行水平的重要路径。该研究结合一项实际改造项目，分析国产汇川设备替代富士产品的技术方案，探讨核心电气设备配置的合理性及其实施要点。

一、项目概述

（一）项目背景

珠海港高栏国际货柜码头有限公司有一台轮胎式集装箱门式起重机，它是在 2008 年正式投入生产的，而它的成套电控柜则是 2007 年制造的；这台设备原配的起升变频器是富士 FRN200VG7S-4LC，小车变频器是 FRN37VG7S-4LC，大车变频器是 FRN75VG7S-4LC，PLC 系统是 MICREX-SX SPM 系列；这些电气设备出厂时间都早于 2007 年，等到改造计划启动那会儿，它们已经被用了差不多 18 年。

长期运行过程中，变频器与 PLC 的故障发生率逐年上升，可修复性显著下降。由于富士该系列产品早已停产，原装配件供应渠道不畅，采购周期长且价格昂贵，严重影响设备正常维护与应

急抢修能力。为恢复设备运行可靠性、延长其使用寿命，码头方面决定对该 RTG 的变频器与 PLC 系统实施整体升级改造。

（二）项目特点

1. 采用国产品牌全面替代进口产品

在这个项目里头，汇川技术生产的 MD880 系列变频器以及 EVO810 系列 PLC 被选用了，它们替换掉了原有的富士 VG7S 系列变频器和 MICREX-SX SPM 系列 PLC；这么一换，就体现出了港口设备电气控制系统方面的一种国产化趋势。

2. 系统兼容性与稳定性要求高

对于系统兼容性和稳定性这一块，要求是比较高的；新设备得跟原有的机械结构、制动电阻、外部传感器以及执行机构都配合好，同时还要让操作习惯还有故障诊断的逻辑保持连续、不要断掉，这样一来就能减少操作人员再培训的花费。

3. 施工内容涵盖软硬件全流程

项目不仅包括旧设备的吊装、拆卸与新设备的安装接线，还涉及电气图纸重新设计、PLC 程序更新、故障显示屏软件编程、老化控制电缆更换及系统调试等多个环节。

4. 设备参数匹配精确

对于设备参数匹配这块，要求是挺精确的；新选出来的变频器呢，在功率、电流还有尺寸这几个方面，跟原来的设备基本上是保持一致的，也可能是稍微优化了一点，这样一来，就能在不改动原有主电路结构的前提之下，把替换工作给无缝地完成掉。

二、新旧核心电气设备对比分析

（一）变频器配置对比

起升机构方面，原富士 FRN200VG7S-4LC 变频器额定功率 200kW，电流 377A，外形尺寸为 680mm×1000mm×360mm。新选汇川 MD880-01S-0441-4-SG 变频器额定功率 220kW，电流 441A，尺寸为 360mm×1134mm×500mm。新设备功率与电流略有提升，有利于增强起升机构的过载能力，宽度减小而高度略有增加，厚度不影响原有安装空间。

小车机构方面，原富士 FRN37VG7S-4LC 变频器功率 37kW，电流 75A，尺寸 375mm×550mm×270mm。新选 MD880-01S-0078-4-SG 变频器功率 37kW，电流 78A，尺寸 265mm×510mm×387mm。功率保持不变，电流略微上升，整体体积缩小，便于柜内布置。

大车机构方面，原富士 FRN75VG7S-4LC 变频器功率 75kW，电流 150A，尺寸 375mm×740mm×270mm。新选 MD880-01S-0149-4-SG 变频器功率 75kW，电流 149A，尺寸 300mm×542mm×425mm。功率一致，电流基本持平，宽度与高度明显减小。

制动单元方面，原富士 BU220-4C 外形尺寸 250mm×160mm×450mm，新选汇川 MDBUN-200-T 尺寸 187mm×192mm×380mm，体积更紧凑。制动电阻仍沿用原有 2 套 45kW/3.7Ω 配置，无需更换。

从整体对比来看，新变频器在保持或提升性能的前提下，体积普遍减小，有利于柜内散热与维护操作。功率等级的匹配性良好，无需调整主回路电缆及保护装置。

（二）PLC 系统配置对比

原富士 PLC 系统包括：CPU 模块 NP1PS-32R 一块，电源模块 NP1S-22 五块，输入模块 NP1X1610（AC120V）十二块、NP1X1606-W（DC24V）五块，输出模块 NP1Y16R-08 五块、NP1Y16T09P6 两块，通讯模块 NP1L-ET1 一块，远程通讯模块 NP1L-OL2 一块，RS232 通讯模块 NP1L-RS2 一块，模拟量输入模块 NP1AX04-MR 一块。模块种类多、电压等级不统一，增加了备件储备和故障排查难度。

新选汇川 PLC 系统：CPU 为 EVO810-0122-U0R0，电源模块 GL20-PS2 五块，输入模块 GL20-1600END 十七块，输出模块 GL20-0008ER 七块，通讯模块 GL20-RTU-EIP 一块，远程

通讯模块 Easy302-0808TN 一块，RS232 模块 GR10-EC-6SW 一块，模拟量输入模块 GL20-4AD 一块，并新增 IT7100E 触摸屏一块。

新系统里，所有电压等级都是 24 伏直流电，输入输出模块都用相同型号，模块类型也减少明显；这样维修人员就能更快识别和更换，另外系统还加了一个触摸屏，故障显示更直观，人机交互能力也变强了^[1]。

三、系统集成与调试方案

（一）变频器系统集成

该系统继续采用共直流母线这种电能供给方式。起升变频器整流单元负责将三相交流电转换成直流电，随后把直流电分别输送给起升、大车、小车变频器的直流母线。制动装置选用外挂型 MDBUN-200-T，该装置与原有的两套 45kW/3.7Ω 制动电阻共同工作。这样的结构维持了原有主电路的电路拓扑形式，因而降低了改造给供电系统带来的冲击。汇川 MD880 系列变频器能够兼容多类编码器，拥有用户编程能力以及后台软件监测功能。其硬件采用模块化设计，支持灵活组合软硬件模块，不必修改程序就能适应不同场合的需要。故障出现后平均半小时内即可恢复生产的处理机制，对港口不间断的作业环境很有价值。

此外，这种集成方案充分保留了原有设备中可继续使用的部分，仅针对关键环节进行替换，既减少了额外的工作量，又保障了系统运行的连续性。借助共直流母线的能量共享特性，各机构在制动过程中产生的回馈电能能够互相利用，从而提升了整体能源利用效率。整个改造过程无需重新铺设大量电缆，现场施工难度较低，对港口正常作业的干扰也被控制在较小范围之内^[2]。

（二）PLC 系统集成

新 PLC 与各机构变频器之间采用 EtherNet/IP 工业以太网总线通讯。EtherNet/IP 具有更高的实时性与同步精度，支持 500μs 周期内同步控制 32 轴，满足 RTG 多机构协同作业的要求。

EVO810 系列 PLC 采用四核处理器，主频 1.8GHz，具备纳秒级指令处理速度。本体可扩展 32 个 GL20 系列刀片式 I/O 模块，集成 2 路独立以太网口，支持 EtherNet/IP、OPC UA、Modbus TCP 等多种协议。本体集成 UPS 功能，无需外接不间断电源即可实现数据掉电保存，提升了系统在电网波动情况下的可靠性。

（三）调试与验收流程

调试工作分为以下阶段。第一阶段为离线调试，在新设备安装前完成 PLC 程序写入、变频器参数设置及模拟量通道校验。第二阶段为空载调试，设备安装接线完成后，在无集装箱条件下测试各机构动作是否正常，检查通讯稳定性及故障显示准确性。第三阶段为负载调试，逐步增加载荷至额定值，测试起升、小车、大车在满载情况下的动态响应与制动性能。第四阶段为连续运行考核，模拟典型作业流程，统计故障发生率及系统响应时间^[3]。

验收标准包括：各机构动作平稳无异常振动，变频器输出电流在额定范围内，通讯总线无丢帧现象，故障显示屏能够准确

捕获并显示模拟故障，制动单元动作正常且制动电阻温升符合要求。

四、国产化替代的技术价值

（一）提高设备可靠性

原有富士变频器与 PLC 使用年限接近二十年，电子元器件老化导致故障率上升。电解电容、光耦、继电器等关键元件性能下降，引发过压、过流、通讯中断等常见故障。由于产品停产，维修时只能使用拆机件或仿制品，可靠性进一步降低。

汇川 MD880 系列变频器采用十年长效硬件器件配置，多项故障处理机制确保现场快速恢复。EVO810 系列 PLC 按照风电设计标准制造，具备抗电磁干扰能力，支持线形、星形、环形网络拓扑，适应港口多尘、高温、潮湿的恶劣环境。国产化替代显著降低了因电气故障导致的停机时间。

（二）降低运维成本

备件供应方面，汇川作为国内工业自动化领域的头部企业，在全国主要港口城市设有服务网点，常用模块可在 24 小时内送达。相比进口品牌长达数月的采购周期，维修效率大幅提升。

备件价格方面，国产模块的采购成本约为进口原装产品的三分之一至二分之一。统一输入输出模块型号后，只需储备 GL20-1600END 和 GL20-0008ER 两种 I/O 模块，减少了备件种类与资金占用。

人员培训方面，汇川 PLC 编程环境符合相关标准，支持梯形图、结构化文本、顺序功能图等语言，国内电气工程师熟悉程度高，降低了学习成本。

（三）推动港口装备国产化进程

港口机械核心电气设备长期依赖进口品牌，存在技术封锁与供应链风险。该改造项目成功应用汇川 MD880 变频器与 EVO810 PLC，验证了国产品牌在大功率、高可靠性场景下的适用性。汇川 2023 年营业收入超过 300 亿元，研发投入 26.24 亿元，研发人员超过 5000 人，已在国内伺服、变频器、小型 PLC 市场占据领先份额。这种技术积累为港口装备的全面国产化奠定了基础^[4]。

五、项目效益与推广前景

（一）直接经济效益

改造完成后，该 RTG 的电气故障率预计下降 60% 以上，年停机时间减少约 80 小时。按每小时作业 25 个自然箱、每个自然箱利润 200 元估算，每年可减少因故障造成的作业损失约 40 万元。备件采购成本较改造前下降约 50%，年节省备件费用约 8 万元。综合计算，项目投资回收期约为 2.5 年^[5]。

（二）间接效益

设备可靠性提升后，码头作业计划不受突发故障干扰，船时效率得到保障。操作人员反映新系统的人机界面更友好，故障信息以中文形式直接显示，减少了故障排查时间。统一电压等级与模块型号后，维修人员的工作强度明显降低。

（三）推广价值

该改造方案适用于同批次使用富士 FRN 系列变频器及 NP1PS 系列 PLC 的 RTG 设备。国内港口中 2005 年至 2010 年间投产的 RTG 大量存在，普遍面临类似的老化与备件短缺问题。汇川 MD880 与 EVO810 的组合具有参数匹配性好、安装尺寸适应性强、通讯协议兼容性高等特点，可推广至轨道式集装箱门式起重机、岸桥等其它港口机械的电气改造项目中。这种改造方式不仅延长了老旧设备的使用寿命，还显著降低了后续维护成本，对提升港口整体运行效率也起到了积极作用^[6]。

结束语：老旧 RTG 变频器与 PLC 的国产化改造，是解决进口设备停产困境的有效路径。珠海港高栏码头改造项目通过选用汇川 MD880 变频器与 EVO810 PLC，实现了性能提升、成本降低与运维简化。新旧设备在功率等级、尺寸规格、系统拓扑方面的良好匹配，保证改造的可行性与安全性。国产电气设备在可靠性、供货周期、技术支持方面优势，为港口机械持续运行提供有力保障。改造模式对国内港口同类设备的升级有参考价值，有助于推动港口装备核心控制系统的自主可控进程。

参考文献

- [1] 阮雷斌, 张海峰. 港口 RTG 绿色低碳改造技术研究及应用 [J]. 中国港湾建设, 2025, 45(8): 16-20, 55.
- [2] 曹仪明, 周佳文. 传统码头 RTG 远程操控改造方案 [J]. 中国港口, 2021(3): 31-33.
- [3] 韦德成. PLC 技术在电气设备自动化控制中的应用 [J]. 现代工业经济和信息化, 2024, 14(3): 145-147.
- [4] 邱晓鹏. 电气设备自动化控制中 PLC 技术的应用 [J]. 大众标准化, 2020(22): 180-181.
- [5] 焦亮亮. PLC 技术在电气设备自动化控制中的应用 [J]. 今日自动化, 2023(6): 1-3.
- [6] 赵黎晶. 轮胎式集装箱起重机电缆布置方案 [J]. 工程机械, 2022, 53(9): 120-125.

宽带低插损限幅电路拓扑结构与性能优化

孙永茂

中国电子科技集团公司第十三研究所, 河北 石家庄 050051

DOI:10.61369/ERA.2026080041

摘 要 : 宽带射频接收前端在强干扰环境下既要维持微弱信号的有效传输, 又要防止大功率输入对后级敏感器件造成冲击。限幅电路作为接收链路前端的保护单元, 其拓扑结构直接关系到插入损耗、端口匹配、限幅电平和耐功率能力之间的平衡。文章围绕宽带低插损限幅电路的结构设计与性能优化展开分析, 首先梳理宽频段传输、器件配置和端口匹配带来的设计约束, 继而从低损耗主通道、并联式限幅支路和多级限幅单元协同等方面提出拓扑设计思路, 并进一步讨论插入损耗、回波损耗及版图寄生参数的优化方法。相关分析可为宽带射频接收前端限幅保护电路的小型化、高可靠设计提供参考。

关 键 词 : 宽带限幅电路; 低插入损耗; 拓扑结构

Topology Design and Performance Optimization of Broadband Low Insertion Loss Limiting Circuit

Sun Yongmao

China Electronics Technology Group Corporation 13th Research Institute, Shijiazhuang, Hebei 050051

Abstract : The broadband RF receiver front-end needs to maintain effective transmission of weak signals in strong interference environments, while also preventing high-power inputs from causing impact on downstream sensitive devices. As a protection unit at the front end of the receiving link, the topology of the limiting circuit is directly related to the balance between insertion loss, port matching, limiting level, and power endurance. The article analyzes the structural design and performance optimization of broadband low insertion loss limiting circuits. Firstly, the design constraints brought by broadband transmission, device configuration, and port matching are sorted out. Then, topology design ideas are proposed from the aspects of low loss main channel, parallel limiting branch, and multi-level limiting unit coordination. Furthermore, optimization methods for insertion loss, return loss, and layout parasitic parameters are discussed. The relevant analysis can provide reference for the miniaturization and high reliability design of the amplitude limiting protection circuit in broadband RF receiving front-end.

Keywords : broadband limiting circuit; low insertion loss; topological structure

引言

随着射频系统向宽带化、高集成度和复杂电磁适应方向发展, 接收前端所面对的信号环境更加多变。一方面, 系统需要尽可能降低前端损耗, 以保证弱信号接收灵敏度; 另一方面, 突发强信号、连续波干扰或高功率泄漏又要求前端具备可靠的功率防护能力。限幅电路正处于这两类需求的交汇位置, 其设计难点在于多项性能之间的协同取舍。传统设计中, 增加限幅器件数量虽可提高耐功率能力, 却可能引入额外结电容和寄生损耗, 导致高频端传输性能恶化。因此, 有必要从拓扑结构层面重新审视宽带低插损限幅电路的设计逻辑, 明确主传输路径、限幅支路、匹配网络和版图寄生之间的耦合关系。

一、宽带低插损限幅电路的设计约束

(一) 宽频段传输对插入损耗的约束

宽带限幅电路首先需要满足小信号状态下的低损耗传输要求。限幅电路通常位于接收前端较靠前的位置, 其插入损耗会直

接叠加到系统前端损耗中, 并对后级噪声性能产生影响。尤其在宽频段工作条件下, 电路的插入损耗不再只由限幅器件导通电阻决定, 主传输线损耗、节点阻抗不连续、焊盘寄生电容、金属互连损耗以及限幅支路等效阻抗均会共同作用于正向传输系数。插入损耗可表示为:

作者简介: 孙永茂 (1989-), 男, 汉族, 河北石家庄人, 工程师, 主要研究方向: 微波射频电路。

$$IL = -20 \log_{10} |S_{21}|$$

式中, IL 为插入损耗, S_{21} 为正向传输系数。该指标反映输入端信号传输至输出端过程中的能量衰减程度。对于宽带限幅电路而言, 低频端往往更容易实现较低损耗, 而高频端更易受寄生参数和传输线效应影响。因此, 宽频传输下的低插损设计本质上是对主传输通道连续性和限幅支路弱扰动特性的共同约束。

(二) 限幅能力对器件配置的约束

限幅电路需要在强输入信号条件下快速进入保护状态, 使过大输入功率被限幅支路吸收或泄放, 从而降低后续电路承受的功率水平。限幅能力与限幅器件尺寸、级数、结面积及热承受能力密切相关。一般而言, 器件尺寸增大或限幅单元数量增加, 有利于提升耐功率能力和强信号泄放能力, 但同时会带来更大的结电容和更明显的寄生效应, 进而影响小信号状态下的插入损耗和高频匹配。

这种约束关系决定了宽带低插损限幅电路不能简单采用“增加器件数量”的方式提高保护能力。若器件配置偏重强信号防护, 可能导致正常接收状态下损耗升高; 若过度压缩器件尺寸, 则可能在大功率输入时出现限幅深度不足、热集中或可靠性下降。限幅器件配置需要在低损耗传输与功率防护之间建立合理边界, 使限幅单元既能在小信号状态下尽量降低对主通道的影响, 又能在强信号状态下形成有效泄放路径^[1]。

(三) 宽带匹配对端口特性的约束

端口匹配是宽带限幅电路能否稳定接入接收系统的重要条件。限幅电路通常要求输入端和输出端接近标准阻抗环境, 以降低信号反射和级间失配。回波损耗可表示为:

$$RL = -20 \log_{10} |\Gamma|$$

其中,

$$\Gamma = \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0}$$

式中, RL 为回波损耗, Γ 为反射系数, Z_{in} 为输入阻抗, Z_0 为系统特性阻抗。由公式可知, 当端口阻抗偏离标准阻抗时, 反射系数增大, 回波损耗变差。宽带限幅电路的难点在于, 其端口阻抗会随频率和工作状态发生变化。小信号状态下, 限幅器件呈现较高阻抗, 但其结电容仍会参与高频传输; 大信号状态下, 器件导通后电路等效阻抗发生改变, 可能影响输入输出端口的反射特性。因此, 端口匹配不能作为后置补偿环节处理, 而应成为限幅电路拓扑设计的基本约束^[2]。

二、限幅电路拓扑结构设计

(一) 低损耗主通道结构设计

主通道设计需尽量保持阻抗连续, 避免引入不必要的串联损耗单元。传输线宽度、走线长度、转角形式、焊盘过渡和输出端连接方式均会影响宽频段内的插入损耗。若限幅器件直接串接在主传输路径中, 其等效电阻和寄生参数会直接参与信号传输, 容

易造成全频段损耗增加, 不利于低插损目标实现。

因此, 较为合理的拓扑思路是保持主传输通道的连续性, 将限幅单元以支路方式介入主通道。在小信号状态下, 支路呈现较高阻抗, 对主通道仅形成有限扰动; 在强信号输入时, 限幅支路进入导通状态, 提供能量泄放路径。该结构能够降低限幅功能对正常传输状态的影响。宽带低插损限幅电路的基本拓扑关系见图1。

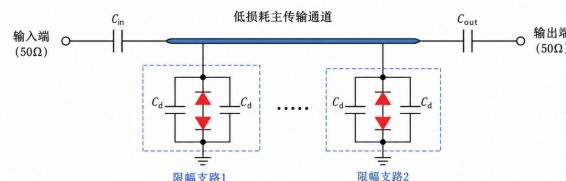


图1 宽带低插损限幅电路拓扑结构示意图

(二) 并联式限幅支路配置设计

并联式限幅支路是实现低插损与功率防护折中的关键结构。小信号输入条件下, 限幅器件未进入明显导通状态, 支路等效阻抗较高, 主传输通道仍承担主要信号传输任务。当输入功率超过一定范围后, 限幅器件导通, 支路阻抗下降, 强信号能量通过接地路径泄放, 从而降低输出端功率水平。

并联支路配置需要重点控制支路接入点和接地路径。支路接入点若距离主通道阻抗敏感区域过近, 容易形成局部不连续; 接地路径若过长, 则会引入较大接地电感, 削弱高频泄放能力, 并可能造成限幅响应不充分。对于宽频应用, 支路数量和位置应结合目标频段、限幅电平和插入损耗指标共同确定。并联支路是主通道阻抗环境中的一部分, 其配置质量直接影响电路宽带传输特性^[3]。

(三) 多级限幅单元协同设计

单级限幅结构在较宽频段和较高输入功率条件下往往难以兼顾耐功率和限幅稳定性。多级限幅单元可将强信号防护任务分散到不同节点: 前级限幅单元主要承担大功率信号的初步吸收和泄放, 降低后续承受的瞬态能量; 后级限幅单元则进一步控制输出功率, 使限幅电平保持在后续电路可承受范围内。通过前后级协同, 电路可避免单一节点承受过高功率冲击。

需要注意的是, 级数增加会带来更多结电容、互连电感和节点不连续, 可能使高频端插入损耗升高。因此, 多级协同设计的重点在于功率分担与寄生控制之间的折中。前级和后级限幅单元的间距、接入方式及器件尺寸应根据功率吸收需求和宽带匹配要求综合确定, 使限幅能力提升不以显著牺牲小信号传输性能为代价。

三、宽带性能优化与仿真修正

(一) 插入损耗优化

在拓扑结构确定后, 插入损耗优化应首先围绕小信号 S 参数展开。设计过程中可通过观察 S_{21} 随频率变化的情况, 判断主传输通道中是否存在明显损耗集中区。若低频段与高频段插损差异较大, 通常需要检查传输线过渡、支路接入点、金属互连长度和节

点阻抗突变等因素。对于宽带限幅电路而言，插入损耗优化是降低限幅支路对主通道的附加扰动^[4]。

具体优化中，主传输线应尽量采用短直路径，避免急剧转角和不连续过渡；限幅支路接入位置应避开阻抗变化敏感节点，减少对主通道等效阻抗的拉偏；输入输出端焊盘过渡需与传输线阻抗协调，避免焊盘电容在高频段造成明显反射和损耗。插入损耗优化的目标，是使限幅电路在正常接收功率范围内接近低损耗传输单元。

（二）端口匹配优化

端口匹配优化主要依据输入回波损耗 S_{11} 和输出回波损耗 S_{22} 进行。若某一频段回波损耗明显变差，说明端口阻抗在该频段偏离目标阻抗，可能与支路等效电容、传输线长度、焊盘过渡或接地结构有关。与窄带电路不同，宽带限幅电路不能依赖单点谐振补偿解决匹配问题，而应通过较平滑的阻抗过渡和分布式寄生补偿改善宽频段匹配。

端口匹配优化应与插入损耗优化保持顺序关系。若主通道损耗尚未得到控制，直接调整匹配网络可能掩盖损耗来源；若只追求某一频点的匹配最优，则可能导致其他频段性能恶化。因此，较合理的优化流程是先保证主通道传输连续，再根据 S_{11} 和 S_{22} 曲线修正输入、输出端口及支路接入节点。宽带性能优化流程见图2。

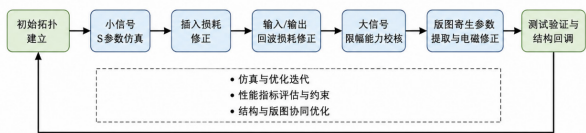


图2 宽带低插损限幅电路性能优化流程图

（三）寄生参数与版图修正

宽带限幅电路在高频端对版图寄生参数极为敏感。原理图仿真阶段的理想节点，在实际版图中会转化为具有电阻、电感和电容特性的金属互连、焊盘过渡和接地回路路径。尤其是限幅支路接地电感，会影响强信号能量泄放效率；焊盘电容和金属互连电感则会改变端口阻抗和传输相位，使实测结果偏离原理图仿真^[9]。

因此，版图修正应作为宽带性能优化的重要环节。设计中可通过电磁仿真提取关键节点寄生参数，并将提取结果回标至电路模型中进行二次仿真。针对高频端插损或回波损耗波动，可进一步压缩接地路径、增加接地连续性、优化支路间距、减少不连续转角，并控制输入输出焊盘与主传输线之间的过渡结构。

四、测试结果与性能分析

为验证所设计限幅电路的宽带传输特性与功率防护能力，对限幅器样品进行了测试。测试结果显示，该限幅器工作频率覆盖2 ~ 18GHz，典型插入损耗约0.65dB，连续波耐功率达到37dBm，限幅电平约16dBm，芯片尺寸为1.6mm × 0.95mm × 0.1mm，芯片实物及相关性能曲线如图3所示。

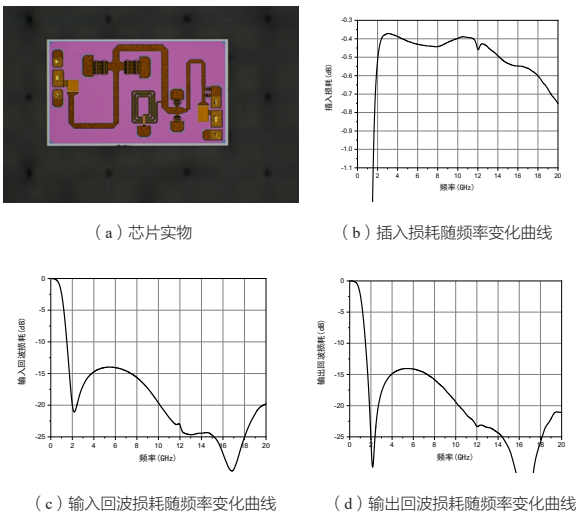


图3 限幅器样品测试结果

（一）插入损耗测试结果分析

从测试结果看，该限幅电路工作频率覆盖2 ~ 18GHz，典型插入损耗约为0.65dB。对于宽带接收前端而言，这一指标具有较强的工程意义。限幅电路通常位于低噪声放大器之前，若其小信号插损偏高，会直接增加前端等效损耗，并进一步削弱弱信号接收能力。因此，2 ~ 18GHz范围内保持较低插损，说明该电路并未因设置限幅支路而显著破坏主传输通道的低损耗特性。

插入损耗结果也能够反向说明拓扑配置的合理性。若限幅支路对主通道耦合过强，或支路接入点形成明显阻抗突变，测试曲线往往会在高频段出现较大起伏；若接地路径过长、焊盘过渡不连续或器件结电容影响未被充分吸收，高频端损耗也会被进一步放大。该电路能够在较宽频率范围内维持约0.65dB的插损水平，表明主传输路径、并联限幅支路和端口过渡之间形成了相对平衡的结构关系。

需要注意的是，过度削减限幅单元虽然可能降低小信号损耗，却会削弱强信号泄放能力，影响后续限幅电平和耐功率表现。该测试结果更准确地说明，低插损来自主通道连续性、支路弱扰动接入和寄生参数控制的共同作用。也就是说，限幅支路在小信号状态下没有对传输路径形成明显负载，而在强信号状态下仍保留了进入限幅保护的结构条件，这正是宽带低插损限幅电路拓扑设计需要实现的关键平衡。

（二）回波损耗测试结果分析

输入、输出回波损耗能够反映限幅电路接入系统后的端口匹配状态。宽带限幅电路若仅实现低插入损耗，而输入或输出端口反射较大，则仍可能造成级间失配，影响接收链路稳定性。因此，回波损耗测试不仅用于判断端口性能，也可反向反映拓扑结构和版图寄生控制是否合理。

从测试曲线对应的设计逻辑看，输入端回波损耗主要受输入焊盘过渡、前级限幅支路接入点和主传输线阻抗连续性的影响；输出端回波损耗则与后级限幅单元、输出过渡结构和负载端匹配条件相关。若某一频段出现回波损耗变差，通常意味着该频段内等效电容或等效电感对阻抗产生了偏移。该类变化应结合限幅支

路位置、接地路径和版图寄生参数综合分析。

对于2 ~ 18GHz 宽频应用，端口匹配很难在全频段保持一致。测试曲线的意义在于判断匹配状态是否满足宽带接入要求，并为后续结构修正提供方向。若高频端波动较明显，可优先从焊盘过渡、接地电感压缩和支路间距调整等方面继续优化；若低频端匹配不足，则应重点检查主通道阻抗设计和限幅支路等效负载影响。

（三）限幅与耐功率测试结果分析

限幅电路的低插损设计必须以强信号防护能力不被削弱为前提。根据测试结果，该电路连续波耐功率达到37dBm，限幅电平约为16dBm。该结果表明，电路在保持较低小信号插入损耗的同时，仍能在强输入功率条件下形成有效限幅保护。低插损与耐功率能力同时成立，说明并联限幅支路和多级限幅单元之间的功率分担关系较为合理。

从工程应用角度看，37dBm 连续波耐功率反映限幅支路具备较强能量承受能力，16dBm 限幅电平则说明输出功率被控制在相对安全范围内。若只追求更低插入损耗而减小限幅器件尺寸，可能导致耐功率下降；若单纯提高耐功率而增加限幅单元数量，则可能造成插损和匹配性能恶化。该测试结果表明，所采用拓扑在低损耗传输和强信号防护之间取得了较为均衡的设计状态。

此外，芯片尺寸为1.6mm×0.95mm×0.1mm，说明该限幅电路在较小面积内实现了宽带限幅功能。对于射频前端集成化设计而言，小型化有利于降低封装和系统集成难度，但也会压缩传输线过渡、接地结构和限幅支路布置空间。因此，在后续优化中仍需关注尺寸压缩与高频寄生控制之间的关系，避免小型化布局导致高频端性能退化。

五、结语

综上，主传输通道的连续性决定了正常接收状态下的损耗水平，并联式限幅支路影响强信号介入时的泄放效率，多级限幅单元则关系到功率分担与输出限幅稳定性。与此同时，端口匹配和版图寄生参数会在宽频段内放大结构细节的影响，使原理设计与实测性能之间存在差异。后续设计应继续围绕高频端匹配均衡、接地电感压缩、支路间距控制和热可靠性开展深入优化，使限幅电路在更宽工作频段、更小芯片面积和更高功率承受条件下保持稳定性能。

参考文献

[1] 霍树栋, 相梦娇, 张正兴, 等. 基于氮化镓二极管的异构集成宽带小型化限幅器电路 [J]. 微波学报, 2025, 41 (5): 34–39+53.
[2] 熊波, 李浩雨, 程永茂. 基于封装电路模型的 PIN 限幅器尖峰泄漏仿真分析 [J]. 探测与控制学报, 2025, 47 (3): 122–126.
[3] 周应旺, 应浩, 曲鹏, 等. 基于加减运算的磁电式传感器信号调理电路设计 [J]. 微电机, 2024, 57 (11): 29–33+44.
[4] 刘硕, 苏建徽, 张健, 等. 自限幅电路建模及在无线电能传输中的应用 [J]. 电力自动化设备, 2024, 44 (6): 110–117.
[5] 常志煜, 张胤, 张翠翠, 等. 一款适用于5G 通信频段的限幅滤波结构的设计 [J]. 电子测量技术, 2022, 45 (20): 1–7.

绿色低碳理念下环保型钻井工艺技术优化研究

刘显良

中石化西南石油工程有限公司湖南钻井分公司, 湖南 长沙 410007

DOI:10.61369/ERA.2026080042

摘 要 : 在“双碳”战略纵深推进、油气行业加速绿色低碳转型的行业背景下, 传统油气钻井工艺长期以施工效率、钻井成功率为核心导向, 普遍存在施工能耗高、碳排放基数大、钻井污染物排放总量高、资源循环利用率低、生态环境扰动明显等突出问题, 难以适配现阶段油气田绿色开发、生态保护与低碳减排的多重刚性要求。本文立足绿色低碳、源头治理、循环利用的核心发展理念, 针对陆地常规油气钻井施工全流程开展环保型钻井工艺技术优化研究。系统剖析传统钻井施工模式在能耗控制、钻井液体系、废弃物处置、现场环保管控等方面的技术短板与应用痛点, 结合不同地层钻井施工工况特征, 从环保钻井液体系改良、动态节能钻井参数调控、钻井固废废液无害化资源化处理、全流程绿色施工配套工艺四个维度构建一体化环保低碳钻井技术体系。通过引入低毒可降解钻井助剂、建立地层适配型参数优化模型、搭建废弃物分级循环处理系统、完善智能化环保监测管控机制, 实现钻井作业源头减污、过程节能、末端循环的全方位升级。

关 键 词 : 绿色低碳; 环保钻井; 工艺优化; 钻井液; 废弃物治理; 节能降碳; 绿色施工

Research on Optimization of Environmentally Friendly Drilling Technology under the Green and Low Carbon Concept

Liu Xianliang

Sinopec Southwest Petroleum Engineering Co., Ltd. Hunan Drilling Branch, Changsha, Hunan 410007

Abstract : Against the backdrop of the deepening of the "dual carbon" strategy and the acceleration of green and low-carbon transformation in the oil and gas industry, traditional oil and gas drilling processes have long been guided by construction efficiency and drilling success rate. However, they generally suffer from prominent problems such as high construction energy consumption, large carbon emission base, high total emissions of drilling pollutants, low resource recycling rate, and significant ecological environment disturbance, making it difficult to meet the multiple rigid requirements of green development, ecological protection, and low-carbon emission reduction in oil and gas fields at present. This article is based on the core development concepts of green and low-carbon, source control, and circular utilization, and conducts research on the optimization of environmentally friendly drilling technology for the entire process of conventional oil and gas drilling construction on land. The system analyzes the technical shortcomings and application pain points of traditional drilling construction mode in energy consumption control, drilling fluid system, waste disposal, on-site environmental protection control, etc. Based on the characteristics of drilling construction conditions in different formations, an integrated environmental protection and low-carbon drilling technology system is constructed from four dimensions: environmental protection drilling fluid system improvement, dynamic energy-saving drilling parameter control, harmless resource treatment of drilling solid waste liquid, and full process green construction supporting technology. By introducing low toxicity and biodegradable drilling additives, establishing a formation adaptation parameter optimization model, building a waste classification and recycling system, and improving intelligent environmental monitoring and control mechanisms, we aim to achieve a comprehensive upgrade of drilling operations in terms of source pollution reduction, process energy saving, and end of pipe recycling.

Keywords : green and low-carbon; environmentally friendly drilling; process optimization; drilling fluid; waste management; energy conservation and carbon reduction; green construction

引言

在我国生态文明建设持续深化、“碳达峰、碳中和”战略全面落地的行业背景下，高耗能、高排放的传统能源行业迎来系统性绿色低碳变革。油气勘探开发作为能源产业的核心环节，兼具资源开发必要性与生态环境敏感性，其施工全过程的节能降碳、污染治理与生态保护已成为行业高质量发展的核心考核指标。钻井工程是油气资源勘探开发的基础核心工序，贯穿油气产能建设全过程，具有施工周期长、大型设备集中、物料消耗量大、作业场景复杂、污染物产出类型多等特点，是油气开发环节能源消耗与碳排放的主要来源，同时也是土壤、水体、大气生态污染的关键风险点。长期以来，国内多数油气田钻井施工沿用传统工艺体系，技术优化重心集中在提速增效、防斜防塌、储层保护等生产性能层面，对施工过程的能耗管控、低碳减排、污染预防、资源循环利用关注不足。传统粗放式钻井施工模式不仅造成柴油、电力、水资源、钻井助剂等资源大量消耗，产生大量温室气体排放，同时施工产生的废弃钻井液、钻井岩屑、施工废水以及噪声、扬尘、燃油尾气等污染物，若处置不当极易引发区域水土污染、生态破坏等环境问题，增加油气田环保治理成本与生态修复压力。随着国家生态环保法规日趋完善、能源行业低碳考核标准不断细化，传统钻井工艺高能耗、高污染、低循环的短板愈发突出，已无法适配现代化绿色油气田的建设需求。

一、传统钻井工艺现存环保与低碳问题

（一）钻井施工能耗偏高，碳排放总量突出

长庆油田创新打造“绿色钻井矩阵”，通过丛式井组布局节约用地30%以上，自主研发的环保钻井液实现地下水体零污染，双层套管技术构建双重防护屏障，岩屑资源化利用技术让固废转化率达到95%，自主研发的微生物修复技术使井场复绿周期缩短60%。这些技术突破让每米进尺碳排放强度下降27%，钻井作业环保达标率100%。^[1] 钻井施工涉及钻机、泥浆泵、发电机、空压机等大量大型动力设备，设备持续运行能耗是钻井工程碳排放的主要来源。传统钻井施工模式参数设置固化，钻压、转速、泵量、循环时长等核心参数多依靠施工人员经验统一设定，未结合不同井段地层岩性、硬度、孔隙度、钻进阻力的动态变化进行实时适配调整。在软地层易出现过度钻进、无效循环等问题，在硬地层则存在参数匹配度不足、反复钻进打磨的情况，造成大量无效功耗浪费。石油钻机是用来进行油气勘探与开发的具有多种功能的联合机组，由动力驱动系统、传动系统、提升系统、旋转系统、钻井液循环系统、控制系统、钻机底座、辅助设备系统共八大系统组成。^[2]

（二）常规钻井液体系生态污染风险较高

深井大功率钻井装备的使用，使得能耗居高不下。^[3] 钻井液是钻井施工的核心工作介质，承担护壁防塌、携岩冷却、平衡地层压力、保护储层的重要作用，但其也是钻井施工最主要的液态污染源。传统水基、油基钻井液体系配方复杂，为满足防塌、降滤失、增黏等施工性能，添加了大量高分子化学助剂、重金属稳定剂、有机处理剂等化工原料。此类化学添加剂稳定性强、自然降解难度大，施工过程中渗漏、溢流、废弃外排的钻井液，极易渗入土壤与地下水体，引发土壤盐碱化、重金属富集、水体有机物超标等生态问题，对区域水土环境造成持续性破坏。

（三）钻井废弃物资源化利用水平偏低

钻井施工全过程会持续产生钻井岩屑、废弃泥浆、洗井废水、设备清洗废水等各类废弃物，废弃物产量大、组分复杂、污染属性差异化明显。传统处置方式以末端无害化处置为主，资源化利用程度极低。其中，钻井岩屑多采用固化填埋、就地堆放的处置模式，占用大量土地资源，且岩屑中残留的钻井液化学组分

易随雨水渗透造成二次水土污染；废弃泥浆与施工废水多经过简单絮凝沉淀后直接外排或封存，未实现精细化处理与循环复用。实际上，经过无害化处理的岩屑可作为路基填料、场地硬化原料、制砖骨料，净化后的废水可循环用于钻井配液、场地降尘、设备清洗，具备极高的资源化利用价值。传统粗放式处置模式造成大量水资源、钻井物料资源浪费，不符合低碳循环、绿色高效的行业发展理念。

（四）全过程环保管控体系不完善

传统钻井施工管理以施工进度、钻井安全、井身质量为核心考核指标，环保管控、低碳减排属于辅助管控内容，存在“重生产、轻环保”的管理短板。施工现场缺乏标准化绿色作业规范，扬尘、设备噪声、燃油尾气、无组织废气等污染源管控缺失，作业围挡不封闭、喷淋降尘设备配套不足，施工现场扬尘扩散问题突出；高噪声设备未配备降噪设施，夜间施工噪声扰民问题频发；柴油设备尾气无净化装置，大气污染物无序排放。

二、绿色低碳环保钻井工艺技术优化

（一）环保型低伤害钻井液体系优化

采用精益钻完井设计技术、钻完井提速提效技术和大幅度提高油气采收率技术，用更少的井、更短的作业周期和更少的投资来获得更大的油气产量，实现吨油低成本、低碳开发的双重效果。^[4] 为从源头削减钻井液污染、降低生态破坏风险、提升钻井液循环利用率，本文优化构建适配多地层的环保低伤害钻井液体系。摒弃传统高毒、高残留、难降解的化学处理剂，选用植物胶、改性淀粉、生物降解树脂等低毒、环保、易降解的绿色助剂，替代传统重金属稳定剂、有机絮凝剂，从配方源头降低钻井液污染属性。结合浅层软地层、中硬地层、易坍塌地层的施工差异，针对性配比清水基环保钻井液与植物胶复合钻井液，在保留优良护壁防塌、携岩冷却、降滤失性能的基础上，大幅降低钻井液有机物与重金属含量，提升自然降解能力。开展了水基岩屑分类资源化处理利用、油基岩屑资源回收利用、压裂返排液快速处理回用、稠油污泥处理与利用等技术。^[5] 同时配套优化钻井液循环净化工艺，在钻井循环系统中增设多级过滤、离心净化、杂质分

离装置，实时去除钻井液中的岩屑杂质、变质胶体与污染物，持续优化钻井液性能，实现钻井液闭环循环复用。通过体系优化，有效减少一次性钻井液配比用量，大幅降低废弃钻井液产出量，从源头规避钻井液渗漏、外排引发的水土污染问题，兼顾施工性能与绿色环保属性。

（二）低能耗动态钻井施工参数优化

针对传统钻井参数固化、无效能耗高、碳排放量大的问题，建立地层适配型动态钻井参数优化模型，实现钻井施工节能降碳精细化管理。将绿色发展理念贯穿到油气生产全过程，推进生产用能低碳化、减排措施效益化，能耗总量和强度实现“双控双降”。^[6]模型以地层岩性、井深、钻进阻力、井壁稳定性为基础参数，以机械钻速、设备功耗、钻进稳定性为优化目标，打破传统固定参数施工模式。施工过程中实时采集钻机扭矩、钻速波动、设备负载、泵压变化等运行数据，动态迭代优化钻压、转速、泵冲、循环流量等核心施工参数，匹配不同井段的钻进需求，彻底解决软地层过度循环、硬地层低效钻进的问题，最大限度减少无效功耗。

（三）钻井废弃物无害化与资源化工艺优化

秉持“分类处置、无害化处理、资源化循环”的理念，构建钻井废弃物一体化绿色处置工艺，彻底解决传统废弃物处置污染重、利用率低的问题。在油气开采过程中，运用创新技术对废弃液进行有效回收利用、减少污染物的产生，不仅对生态文明建设作出贡献，也为企业节省了污物处理费，降低了开采成本，提高了开采效率。^[7]针对钻井岩屑，采用筛分清洗、脱干固化、无害化检测的分级处理工艺，去除岩屑表面残留的钻井液污染物，通过固化稳定化处理降低污染活性，达标后的岩屑可广泛应用于井场路基铺设、场地平整、建材制备等场景，实现固废资源化再利用，杜绝填埋污染与土地资源浪费。

（四）全过程绿色施工配套工艺优化

石油石化行业是国民经济的支柱产业，同时也是高耗能、污染物和碳排放量较大的行业，其绿色低碳转型直接关系“美丽中国”目标落地成效。^[8]完善钻井现场绿色环保配套工艺与管控体系，实现施工全维度污染防控与生态保护。在大气污染防控方面，搭建全封闭作业围挡，配套全自动喷淋降尘设备、雾炮净化装置与发电机尾气净化设备，有效抑制施工现场扬尘扩散与燃油尾气污染。提高炼厂和油气生产装置的能源利用效率，进一步降低气体燃烧排放；^[9]在噪声管控方面，对钻机、空压机等高噪声设备加装隔音降噪罩，合理规划施工时序，规范夜间作业流程，降低噪声污染影响。在现场管控方面，优化井场布局，实现钻井物料、助剂、废弃物分类集中存放，做好防雨、防渗、防流失防护，减少物料损耗与环境污染风险。同时搭建智能化环保监测体

系，布设水质、土壤、大气、噪声实时监测终端，全天候采集井场生态环境数据，实现污染隐患实时预警、异常数据及时处置，构建“源头防控、过程监管、实时预警、闭环整改”的全流程绿色施工管控体系，全面提升钻井施工现场生态环保精细化水平。提高治污标准，保障生态环境质量。^[10]

三、工艺应用效果分析

为验证本文优化后环保钻井工艺的实际应用性能，选取国内某陆上油气田同区块、同地层、同井深条件的两口钻井开展现场对比试验。其中试验井采用本文绿色低碳优化钻井工艺，对照井采用传统常规钻井工艺，在施工设备、施工周期、地层条件基本一致的前提下，从能耗碳排放、污染物排放、资源利用率、环保效果、施工质量五个维度开展综合对比分析。试验结果表明，优化工艺体系节能降碳效果显著，试验井钻井综合能耗较对照井降低18.6%，发电机组燃油消耗量大幅减少，温室气体与大气污染物排放量显著下降，低碳改造效果突出。在污染治理方面，试验井废弃钻井液产出量减少42.3%，钻井液循环利用率提升至85%以上，彻底杜绝钻井液无序外排与渗漏污染问题；钻井岩屑固废资源化利用率达到90%，大幅减少固废填埋量与土地占用，无二次污染问题产生。在资源利用方面，施工废水循环复用率大幅提升，水资源消耗显著降低，钻井物料浪费问题得到有效改善。

四、结束语

本文基于绿色低碳与生态环保发展理念，系统梳理传统油气钻井工艺在能耗碳排放、钻井液污染、废弃物处置、现场环保管控等方面的突出问题，针对性开展全流程钻井工艺绿色低碳优化，构建了集环保钻井液体系、动态节能参数调控、废弃物资源化处置、全维度绿色施工管控于一体的一体化环保钻井技术体系。工艺优化从源头摒弃高污染、高能耗的传统施工模式，通过绿色钻井液配方改良实现源头减污，通过动态参数调控实现全过程节能降碳，通过废弃物分级处理实现资源循环利用，通过智能化监测管控实现施工精细化环保治理，全方位解决了传统钻井工艺高能耗、高污染、低循环、管控弱的行业痛点。现场试验证明，优化后的工艺体系可有效降低钻井能耗与碳排放，大幅削减污染物产出量，提升资源循环利用效率，且不影响钻井施工安全与钻进效率，综合应用优势显著。

参考文献

[1] 陈思. 长庆油田构建“绿色钻井矩阵”赋能油气勘探低碳转型 [N]. 陇东报, 2025-06-24(001).DOI: 10.28519/n.cnki.nldbb.2025.000944.
[2] 李建鹏, 谭慧敏. 绿色低碳型石油设备的技术现状和发展趋势 [J]. 石油和化工设备, 2015, 18(7): 97-99+96.
[3] 李亚伟, 董怀荣. 油气钻井行业绿色低碳发展路径探析 [J]. 中外能源, 2023, 28(S1): 1-4.
[4] 李阳, 王敏生, 薛兆杰, 等. 绿色低碳油气开发工程技术的发展思考 [J]. 石油钻探技术, 2023, 51(4): 11-19.
[5] 跨领域攻关引领中国石油绿色低碳发展：——集团公司科技重大专项“低碳与清洁发展关键技术研究及应用”探秘 [N]. 中国石油报, 2021-07-29(008).DOI: 10.28716/n.cnki.nshyo.2021.002322.
[6] 王成凯, 林国强, 朱彤. 中国石油塔里木油田：“瘦身健体”实现绿色低碳转型 [N]. 科技日报, 2023-07-14(007).DOI: 10.28502/n.cnki.nkjrb.2023.003917.
[7] 刘红勇, 陈逸奇, 杨毅. 川西气田油气绿色开采工程技术创新与实践 [J]. 科技管理研究, 2014, 34(23): 46-48+52.
[8] 朱圣珍. 以习近平生态文明思想为引领推动石油石化行业绿色低碳创新发展的实践思考 [J]. 油气田环境保护, 2025, 35(6): 1-5.
[9] 赵清民. “双碳”目标下我国油气田绿色低碳发展路径研究 [J]. 中外能源, 2024, 29(10): 1-5.
[10] 践行绿色低碳使命，为美好生活加油——西南石油局绿色油气发展与生态环境保护纪实 [J]. 中国环境监察, 2023, (12): 66-69.

