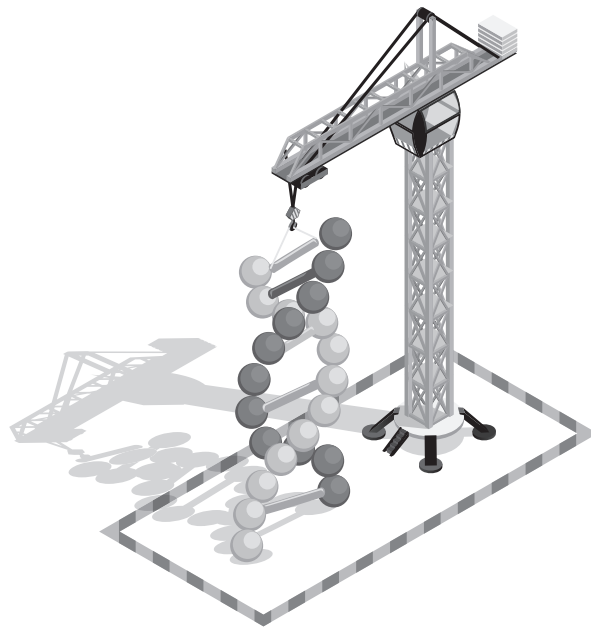


工程 研究与应用

Engineering Research and Application



ART AND TECHNOLOGY PRESS INC.

(517 666 0904)

263 S KENWOOD ST 560

CASPER, WY 82601

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

Complimentary Copy



ART AND TECHNOLOGY PRESS INC.
(United States)

Editorial Board

Editors-in-Chief

Xiaolei Ju

China Architectural Design and Research Institute, China

Meilian Chao

Heze Dehe Construction Engineering Group Co., LTD.

Editorial Board Member

Xianbo Tu

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

Neda Abbasi

School of Engineering and Technology

Tanvir Ahamed

School of Engineering and Technology

Zhen Xu

Zhongtong Bus Holding Co., LTD.

Yang Li

Wuhan Aviation Port Development Group Co., Ltd.

工程研究与应用

Engineering Research and Application

第4卷 第2期 2026年2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 | 基于文献计量的岩溶大泉研究热点分析
Analysis of Research Hotspots in Karst Springs Based on Bibliometric Data | 郝彦宁
Hao Yanning |
| 004 | 基于高效低耗理念的灰斗气化风系统结构优化策略
Structure Optimization Strategy of Gasification Air System Based on High Efficiency and Low Consumption | 杨世英, 易浩男, 闫新, 李小宇
Yang Shiying, Yi Haonan, Yan Xin, Li Xiaoyu |
| 007 | 智能化技术在涂装线工程管理中的应用实践
The Application Practice of Intelligent Technology in the Engineering Management of Coating Lines | 黄琼
Huang Qiong |
| 010 | 面向高速度平稳驱动的空气弹簧组合缓冲与动圈自动对中技术
Air Spring Combination Buffering and Moving Coil Automatic Centering Technology for High-Speed Stable Driving | 朱禹
Zhu Yu |
| 013 | 隧道二次衬砌混凝土强度无损检测技术探究
Research on Nondestructive Testing Technology of Concrete Strength of Tunnel Secondary Lining | 孙艳
Sun Yan |
| 016 | 侵入岩分布对地铁车站基坑支护安全性的影响
Influence of Intrusive Rock Distribution on the Safety of Subway Station Foundation Pit Support | 甄小博
Zhen Xiaobo |
| 019 | 智能化技术在铁路通信网络干扰抑制中的应用研究
Application of Intelligent Technology in Railway Communication Network Interference Suppression | 王平
Wang Ping |
| 022 | EPC 总承包模式下商务造价的协同管理机制研究——基于供应链整合视角
Research on the Collaborative Management Mechanism of Business Cost in EPC General Contracting Mode — Based on the Perspective of Supply Chain Integration | 尹育峰
Yin Yufeng |
| 025 | 液压挖掘机功率损失分析及节能控制技术研究
Power Loss analysis and Energy-saving Control Technology of Hydraulic Excavator | 吴庆礼
Wu Qingli |
| 028 | 机械可动天线卸载方式研究
Research on Unloading Mode of Mechanically Movable Antenna | 王文哲, 孙晓辉, 刘勃洋, 姜峰
Wang Wenzhe, Sun Xiaohui, Liu Boyang, Jiang Feng |
| 031 | 非赫兹接触下 Kalker 理论的非线性修正模型
A Nonlinear Modified Model of Kalker's Theory under Non-Hertzian Contact Conditions | 李阔, 刘伟渭, 鲁鹏, 李加伟
Li Kuo, Liu Weiwei, Lu Peng, Li Jiawei |
| 039 | 基于风险分析的压力容器安全裕度设计与检验策略研究
Research on Safety Margin Design and Inspection Strategy of Pressure Vessel Based on Risk Analysis | 严伟
Yan Wei |
| 042 | 城市交通信号灯运行维护管理与故障分析研究
Research on Operation, Maintenance and Fault Analysis of Urban Traffic Lights | 苏国新
Su Guoxin |
| 045 | 炼金室废气高效治理技术及工程应用研究
Research on High Efficiency Treatment Technology and Engineering Application of Exhaust Gas in Alchemy Room | 郑革委, 徐福波
Zheng Gewei, Xu Fubo |

048	LEAP-1A EEC 故障调查 Investigation of LEAP-1A EEC Failure	侯熙桐, 余思颖, 卢昱朋 Hou Xitong, Yu Siying, Lu Yupeng
052	基于可穿戴高精度湿度传感器的发声与呼吸监测系统设计 Design of Sound and Respiratory Monitoring System Based on Wearable High-precision Humidity Sensor	张馨雨 Zhang Xinyu
055	公路施工中改性沥青材料应用技术探析 Analysis on Application Technology of Modified Asphalt Material in Highway Construction	陈磊 Chen Lei
058	水利工程混凝土施工质量通病防治研究 Study on Prevention and Treatment of Common Quality Problems in Concrete Construction of Water Conservancy Projects	张森林, 项宇 Zhang Senlin, Xiang Yu
061	工程项目质量管理体系优化与过程控制研究 Research on Optimization and Process Control of Quality Management System for Engineering Projects	武丹 Wu Dan
064	智能温度传感器校准系统软件设计研究 Research on Software Design of Intelligent Temperature Sensor Calibration System	马静, 蔡震坤, 吴宁, 辛备豫, 吐鲁逊·伊力 Ma Jing, Cai Zhenkun, Wu Ning, Xin Beiyu, Tuluxun-Yili
067	无人机与物联网融合技术在流域隐蔽排污口监察中的应用研究 Research on the Application of UAV and Internet of Things Fusion Technology in the Supervision of Hidden Drainage Outlet in River Basin	陈先敏 Chen Xianmin
070	压力表计量在现场检测中的应用与误差控制研究 Application of Pressure Gauge Measurement in Field Detection and Error Control Research	李薇 Li Wei
073	公路改扩建工程中新旧路基差异沉降控制技术与应用研究 Research and Application of Differential Settlement Control Technology for New and Old Roadbeds in Highway Reconstruction and Expansion Projects	陈潇逸 Chen Xiaoyi
076	工程材料管理对工程成本控制的影响研究 Study on the Influence of Engineering Material Management on Engineering Cost Control	陈文文 Chen Wenwen
079	大跨度弧形管桁架液压同步提升关键技术及工程应用 Key Technologies and Engineering Applications for Hydraulic Synchronous Lifting of Large-Span Curved Pipe Trusses	白尧尧, 许毅, 张桂军, 李俊杰 Bai Yaoyao, Xu Yi, Zhang Guijun, Li Junjie
085	大跨度弧形管桁架钢结构施工关键技术与风险耦合管控研究 Research on Key Construction Technologies and Risk Coupling Management and Control for Large-Span Curved Pipe Truss Steel Structures	白尧尧 Bai Yaoyao
089	盾构隧道同步注浆材料性能试验与注浆效果评价研究 Research on Performance Testing of Synchronous Grouting Materials and Evaluation of Grouting Effects in Shield Tunnels	郑航雄 Zheng Hangxiong
092	一种耙吸式挖泥船绿色智造技术研究 Research on Green Intelligent Manufacturing Technology for Trailing Suction Hopper Dredgers	周杰 Zhou Jie

建筑科学 | BUILDING SCIENCE

096	智慧工地背景下建筑施工安全监理信息化管理 = 系统设计与实践 Design and Practice of Information-Based Management System for Construction Safety Supervision in the Context of Smart Construction Sites	潘炜 Pan Wei
099	智能化检测设备在建筑节能现场检测与验证 Intelligent Detection Equipment in On-site Detection and Verification of Building Energy Conservation	逢恒增, 宿兴燕, 于云庆, 赵松伟 Pang Hengzeng, Su Xingyan, Yu Yunqing, Zhao Songwei
102	BIM 在建筑工程管理中的应用 Application of BIM in Construction Project Management	段炼 Duan Lian
105	医院外墙保温装饰一体板施工质量控制要点研究 Research on Key Points of Construction Quality Control for Hospital Exterior Wall Insulation and Decoration Integrated Panels	高斯佳 Gao Sijia
108	针对老城区树穴树根拱起问题的研究与改造 Research and Transformation on The Arching of Tree Eoots in The Old City	喻云 Yu Yun

能源科学 | ENERGY SCIENCE

111	压缩空气储能电站的全厂水务管理 Water Management for the Entire Plant of Compressed Air Energy Storage Power Station	王红斌 Wang Hongbin
115	小型矿产勘查项目中综合勘查技术的实践应用 Practical Application of Comprehensive Exploration Technology in Small-Scale Mineral Exploration Projects	徐耸 Xu Song
118	矿产资源量估算中常用方法的对比分析 Comparative Analysis of Commonly Used Methods in Mineral Resource Estimation	刘澎 Liu Peng
121	低品位矿产资源勘查评价技术研究与实践 Research and Practice on Exploration and Evaluation Technology of Low Grade Mineral Resources	邵九龙 Shao Jiulong
124	火电机组锅炉的实时控制与节能技术研究 Real-Time Control and Energy-Saving Technology Research of Thermal Power Unit Boiler	陈孝连 Chen Xiaolian
127	新能源电站施工多专业交叉作业进度优化与资源配置研究 Research on the Progress Optimization and Resource Allocation of Multi-disciplinary Cross-operation in the Construction of New Energy Power Station	谢金河 Xie Jinhe

130	西南地区复杂地质条件下油气管道地质灾害风险评估与防控技术研究 Study on Risk Assessment and Prevention Technology of Oil and Gas Pipeline Geological Disaster under Complex Geological Conditions in Southwest China	熊妮, 宋超, 邓勇, 何禹来, 毕婷, 白雪儿 Xiong Ni, Song Chao, Deng Yong, He Yulai, Bi Ting, Bai Xue'er
133	陇东油水平井粘吸卡钻预防技术 Prevention Technology of Viscous Jamming in Longdong Oil Horizontal Well	柳伟荣, 李坤, 张茗翔 Liu Weirong, Li Kun, Zhang Mingxiang
136	火电厂大数据分析平台建设和应用 Construction and Application of Big Data Analysis Platform for Thermal Power Plants	刘士彩, 刘涛, 蒋俊英, 贺辽, 菅晓丽 Liu Shicai, Liu Tao, Jiang Junying, He Liao, Jian Xiaoli
139	双碳目标下新能源多能互补供热系统的优化配置与能效评估 Optimal Allocation and Energy Efficiency Evaluation of New Energy and Multi-Energy Complementary Heating System Under Double Carbon Target	温凯 Wen Kai
142	新形势下 AI 技术在广电工程中的运用 Application of AI Technology in Radio and Television Engineering Under the New Situation	张成龙 Zhang Chenglong
145	基于光纤光栅的锂电池安全监测应用效果研究 Research on the Application Effect of Fiber Bragg Grating-Based Safety Monitoring for Lithium Batteries	刘迎春 Liu Yingchun
148	高压断路器电气控制回路通讯干扰问题分析与对策 Analysis and Countermeasures of Communication Interference in Electrical Control Circuit of High Voltage Circuit Breaker	夏许飞 Xia Xufei

基于文献计量的岩溶大泉研究热点分析

郝彦宁

河北地质大学, 河北 石家庄 050031

DOI:10.61369/ERA.2026020002

摘 要： 利用文献计量学方法对2005–2024年国内外有关岩溶大泉研究的动态特征进行分析。结果表明：中国地质科学院岩溶地质研究所发文量远超其他机构；国内近年来的研究热点方向可以归纳为岩溶水文地质与水资源、影响因素与数值模拟、水化学与水环境和生态修复与保护管理。

关 键 词： 岩溶大泉；CiteSpace；文献计量学；研究热点

Analysis of Research Hotspots in Karst Springs Based on Bibliometric Data

Hao Yanning

Hebei GEO University, Shijiazhuang, Hebei 050031

Abstract： Using bibliometric methods, this study analyzes the dynamic characteristics of domestic and international research on karst springs from 2005 to 2024. Results indicate that the Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, has published significantly more papers than other institutions. Recent domestic research hotspots can be summarized as: karst spring hydrogeology and water resources; influencing factors and numerical modeling; water chemistry and water environment; and ecological restoration and conservation management.

Keywords： Karst springs; CiteSpace; bibliometrics; research hotspots

引言

岩溶大泉是岩溶水系统的重要组成部分，也是岩溶地下水最普遍的天然排泄形式，其水资源具有重要的生态、经济和社会价值。中国是岩溶分布面积最广泛的国家之一，世界上1/4的岩溶面积分布在中国，碳酸岩分布面积达746.3万 km²，占国土面积的1/3左右^[1]。在中国北方地区，岩溶地下水已成为工业、农业及居民生活的主要供水水源。然而，自20世纪50年代以来，北方岩溶泉流量普遍下降，流量衰减已成为岩溶泉变化的主要特征^[2]。岩溶大泉的流量变化与气候变化和人类活动密切相关。降水模式的改变、地下水过度开采等，加剧了岩溶泉流量的衰减及生态环境的恶劣变化^[3]。近年来，不少学者对岩溶大泉的研究取得了显著进展。

本综述旨在系统梳理岩溶大泉的研究热点，分析其研究进展和趋势，探讨岩溶大泉的形成机制、流量变化及其驱动因素、水资源保护和可持续利用等方面的研究成果。通过对这些热点问题的综合分析，为岩溶大泉的进一步研究提供参考，为岩溶大泉的水资源保护和可持续利用提供科学依据。

一、数据采集与处理

为系统分析岩溶大泉领域的研究现状和进展，在CNKI期刊数据库以“岩溶大泉”“岩溶泉”“泉域”“泉群”“喀斯特大泉”“喀斯特泉”为主题词，时间设置为2005–2024年，检索得到1797篇文献，经过人工剔除无效文献后，共得到1497篇有效文献。利用CiteSpace软件进行处理后最终得到文献数量1497篇，并导入CiteSpace软件进行定量分析。在不同可视化网络图谱中，每一节点分别代表一个“作者”“机构”或“关键词”，节点大小表示其出现的频次，节点之间的连线表示两者之间存在合作关系或共现

关系，节点边缘颜色越深，表示其出现的年份越晚^[4]。

二、研究结果与分析

（一）发文作者及机构分析

利用CiteSpace软件绘制作者及机构合作网络图谱，见图3-1、3-2。

在CNKI数据库中，发文量最多的作者是梁永平，共计发文39篇；其次是邢立亭和赵春红。由图3-1可知，国内形成了三个较大的学术研究团体，其中包括梁永平、赵春红、申豪勇等多位

学者形成的学术研究团体，该团体成员来自于中国地质科学院岩溶地质研究所，对岩溶大泉、岩溶地下水等相关领域关注度高，且在该领域的发文量普遍较高^[2,3]。多数作者节点之间的连线颜色较深，说明近几年在该领域国际学术交流平台的交流合作较为活跃。



图 3-1 2005–2024 年发文作者合作图谱

发文量最多的机构是中国地质科学院岩溶地质研究所，共计发表 166 篇，作为国内唯一研究岩溶领域的机构，其发文量远超其他机构；其次是太原理工大学和山东省地矿工程勘察院。中国地质大学（武汉）、济南大学、中国地质大学（北京）3 所大学的中心性较高，表明在该领域研究中，这 3 所大学与其他机构之间的合作较为活跃。在发文前 10 的机构中有 5 所高校，说明我国对高校科研工作的重视。国内发文机构节点边缘及节点间连线颜色较深，说明近几年在该领域的研究活跃，并且机构间也有着频繁的合作交流。

（二）研究热点分析

在 CiteSpace 软件中，某一研究关键词出现频率高一般代表着该关键词为该领域的研究热点^[9]。前 100 个高频关键词可将近年来国内该领域的研究热点归纳为岩溶水文地质与水资源、岩溶水影响因素与数值模拟、岩溶泉水化学与水环境和岩溶泉生态修复与保护管理 4 类，见图 3-4。出现频率最高的前 20 个高频关键词如表 3-3 所示。

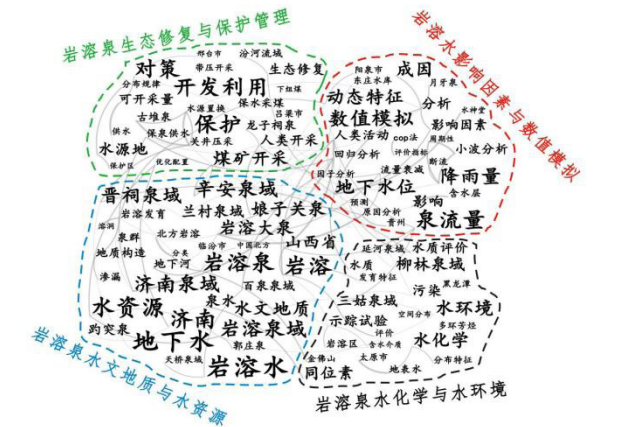


图 3-3 2005–2024 年前 100 高频关键词共现网络

表 3-1 2005–2024 年出现次数最高的 20 个关键词

序号	关键词	频次	序号	关键词	频次
1	岩溶水	135	11	岩溶泉域	44
2	地下水	129	12	济南泉域	40
3	水资源	82	13	数值模拟	39
4	岩溶	72	14	辛安泉域	37
5	保护	68	15	降雨量	34
6	岩溶泉	67	16	地下水位	33

7	开发利用	63	17	晋祠泉域	33
8	济南	63	18	水环境	28
9	泉流量	61	19	水文地质	26
10	对策	52	20	动态特征	26

图 3-3 中岩溶、岩溶泉、岩溶水、地下水、水资源、水文地质等关键词可归纳为岩溶泉水水文地质与水资源研究。岩溶大泉通常发育于大型岩溶水系统的排泄区，其形成与区域地质构造特征以及岩溶发育程度密切相关^[6]。岩溶大泉的水文地质研究通过刻画含水层的非均质性以及管道–裂隙网络结构，揭示了其补给来源和排泄路径^[7]。岩溶大泉的流量动态受控于岩溶含水层的调蓄能力，并且其对降水变化敏感^[8]。通过长期监测与模型模拟，能够量化降水–补给–排泄的滞后效应，进而预测气候变化或人类活动对泉水流量的长期影响^[9]。岩溶大泉的过度开采可能导致地下水位骤降，进而诱发地面塌陷、泉水断流等一系列灾害和环境问题。因此，对水资源的评价是研究岩溶大泉的重要内容。为进一步提高对水资源评价的精度，近年来，不少学者利用水文模型对岩溶大泉水资源可持续开采和保护进行模拟研究^[10,11]，从而维护岩溶大泉水资源量。

数值模拟、影响因素、小波分析、降雨量、泉流量、地下水位、预测等关键词可归纳为岩溶水影响因素与数值模拟研究。数值模拟作为研究岩溶地下水系统的重要手段，其研究成果可以为岩溶大泉水环境保护、岩溶地下水合理开发等提供有力支撑。于苗^[12]以济南趵突泉泉域为例，建立三维数字岩心和等价孔隙网络模型，探讨北方岩溶含水介质的空间发育和非均质性特征，并分析了优势水流的运动规律及优势通道对泉水动态的影响。研究表明，岩溶介质结构对泉水的优势流有着重要的控制作用。薛兆瑞等^[13]基于 Pearson 相关分析法研究了泉域降水量和人类开采活动对济南四大泉群出流量的影响程度。王树芳^[14]采用回归分析和小波分析等方法对玉泉泉域地下水水位对地下水开采、永定河放水及大气降水影响因素的响应过程，并以泉域现状条件为前置条件，预测了 2025–2028 年地下水年均水位、年内最高水位及年内最低水位。

水化学、水环境、示踪试验、同位素、污染、水质评价、多芳环烃等关键词可归纳为岩溶泉水化学与水环境研究。近年来，水化学、同位素环境示踪剂和数值模拟等手段广泛应用于岩溶大泉含水系统研究，为岩溶大泉水环境管理保护和水化学研究提供科学依据。谢浩等^[15]对龙子祠泉域内 43 个地下水样品中 10 种金属元素分布特征及其暴露的健康风险进行了研究分析，并表明泉域地下水中 As 是引起最大健康风险的金属元素。武东强^[16]从泉水水化学成分的形成作用及其影响因素方面入手，对济南四大泉群的水化学成分差异性、形成作用及其影响因素进行了研究，旨在为泉水水质保护提出科学有效的措施。韩啸^[17]选取碘化钾作为示踪剂，使用人工化学示踪方法，以丽江黑龙潭为例，进行了大型示踪试验，旨在探究示踪试验在岩溶大泉修复中的应用。

开发利用、保护、对策、水源地、生态修复、保泉供水、水源置换等关键词可归纳为岩溶泉生态修复与保护管理研究。随着

社会的不断发展,人类活动日益加剧,极端天气频发,导致国内多数岩溶大泉流量大幅衰减甚至断流、水质恶化,从而引起一系列地质灾害和岩溶水环境问题^[3]。岩溶泉的生态修复与保护管理需要综合考虑水文地质特征、生态系统功能及人类活动影响。王焰新^[18]分析了晋祠泉断流原因,并在此基础上,针对性地提出了关井压采等一系列措施,且科学的评估了预期效果。梁永平等^[3]从岩溶水的生态修复角度出发,强调了断流岩溶大泉复涌的意义,对泉水复涌所需具备的条件和所需采取的措施进行了分析,对中国北方岩溶水近年来的工作进展进行了介绍总结,提出了北方岩溶水未来一段时期的重点研究方向。王哲等^[19]揭示了地下水开发利用情况及演变趋势,分析了地下水超采治理面临的关键问题,提出了研究地下水开发利用与保护标准准则和建立地下水预测预警指标体系等系列对策建议。

三、结论

本研究利用 CiteSpace 软件对2005–2024年国内有关岩溶大泉领域研究收录于CNKI数据库的期刊论文进展进行可视化分析,反映了近年来岩溶大泉的研究热点,得出以下结论:

(1)作为国内唯一研究岩溶领域的机构,中国地质科学院岩溶地质研究所发文量远超其他机构,共计发表166篇,其次为其次是大原理工大学和山东省地矿工程勘察院,发文62篇和60篇,国内排名前10的发文机构间有着较多的合作关系。

(2)从整体上看,国内近年来的研究热点方向可以归纳为岩溶水文地质与水资源、影响因素与数值模拟、水化学与水环境、生态修复与保护管理4个方向,涉及到了岩溶区居民生活用水、岩溶水生态环境等多个方面。

参考文献

- [1] 乔小娟, 罗承可, 柴新宇, 等. 基于机器学习的岩溶裂隙空间分布预测研究: 以北京房山为例 [J]. 地学前缘, 2026, 33(1): 405–418.
- [2] 王志恒, 梁永平, 史浙明, 等. 古堆 – 南梁泉域岩溶水环境问题现状与泉源区保护 [J]. 地质科技通报, 2023, 42(5): 228–240.
- [3] 梁永平, 申豪勇, 赵春红, 等. 对中国北方岩溶水研究方向的思考与实践 [J]. 中国岩溶, 2021, 40(3): 363–380.
- [4] 李杰, 陈超美. Citespace: 科技文本挖掘及可视化 [M]. 北京首都经济贸易大学出版社, 2016.
- [5] 陈宇, 沈利娜, 张强, 等. 基于 CiteSpace 的国内外苔草植物文献计量分析研究 [J]. 广西科学, 2023, 30(2): 226–238.
- [6] 李中华, 魏永, 郑明英. 贵州岩溶山区封闭型岩溶大泉系统特征研究——以露郎岩溶大泉系统为例 [J]. 地下水, 2020, 42(3): 46–47+137.
- [7] 姚海鹏, 姜东雪. 龙潭岩溶大泉形成机理研究 [J]. 低碳世界, 2018, (9): 31–33.
- [8] 黄荣, 王发, 陈洪松, 等. 不同类型表层岩溶泉水源划分及对降雨的响应 [J]. 水文, 2022, 42(3): 20–26.
- [9] 马从文, 张志才, 陈喜, 等. 基于机器学习的西南岩溶泉流量模拟研究 [J]. 中国岩溶, 2024, 43(1): 48–56.
- [10] 韩琳, 许兴鹏, 赵振华, 等. 济南泉域地下水资源开发保泉技术研究 [J]. 水利水电技术 (中英文), 2023, 54(S2): 105–109.
- [11] 张云飞, 高旭波, 王倩. 基于 DPSIR 模型的辛安泉域岩溶水资源承载力评价 [J]. 厦门大学学报 (自然科学版), 2025, 64(3): 472–483.
- [12] 于苗. 典型北方岩溶大泉优势流渗流机制研究 [D]. 济南大学, 2023.
- [13] 薛兆瑞, 王明森, 杨旭洋, 等. 济南市区四大泉群流量演变规律及影响因素 [J]. 济南大学学报 (自然科学版), 2023, 37(2): 146–155.
- [14] 王树芳. 北京市西部地区岩溶大泉恢复的驱动因素研究——以玉泉泉域为例 [J]. 中国水利, 2025, (11): 34–42.
- [15] 谢浩, 梁永平, 李军, 等. 龙子祠泉域地下水金属元素分布特征及健康风险评价 [J]. 环境科学, 2021, 42(9): 4257–4266.
- [16] 武东强. 济南岩溶大泉水化学成分形成作用研究 [D]. 济南大学, 2021.
- [17] 韩啸, 陈鑫, 郑克勋, 等. 示踪试验在岩溶大泉修复中的应用——以丽江黑龙潭为例 [J]. 中国岩溶, 2019, 38(4): 524–531.
- [18] 王焰新. 我国北方岩溶泉域生态修复策略研究——以晋祠泉为例 [J]. 中国岩溶, 2022, 41(3): 331–344.
- [19] 王哲, 李涛涛, 朱静思. 海河流域地下水超采治理关键问题分析与对策初步研究 [J]. 海河水利, 2020, (6): 1–3.

基于高效低耗理念的灰斗气化风系统结构优化策略

杨世英, 易浩男, 闫新, 李天宇

大唐陕西发电有限公司延安热电厂, 陕西 延安 716000

DOI:10.61369/ERA.2026020003

摘 要 : 灰斗气化风系统属于工业除尘以及物料输送领域的重要部分, 运行效率和能耗高低会关乎生产的经济性和稳定情况。传统系统普遍存在着加热能耗大、气流分布不均匀、设备损耗大等缺陷。本文基于高效低耗核心理念, 从系统现状诊断与优化原则、核心部件结构改进、气流组织与调控机制优化三个维度展开研究。通过优化气流场均匀性调控结构设计、构建动态调控机制与控制系统、改进防堵防积灰结构协同以及搭建能耗监测与优化反馈机制, 实现系统能耗降低与效率提升的双重目标, 为同类系统优化提供可供参考的研究经验。

关 键 词 : 高效低耗; 灰斗气化风系统; 结构优化; 策略

Structure Optimization Strategy of Gasification Air System Based on High Efficiency and Low Consumption

Yang Shiyong, Yi Haonan, Yan Xin, Li Xiaoyu

Datang Shaanxi Power Generation Co., Ltd. Yan 'an Thermal Power Plant, Yan' an, Shaanxi 716000

Abstract : The ash hopper gasification air system is a critical component in industrial dust removal and material handling, where operational efficiency and energy consumption directly impact production economics and stability. Conventional systems typically suffer from excessive heating energy consumption, uneven airflow distribution, and significant equipment wear. This study, guided by the principle of high efficiency and low energy consumption, investigates three key dimensions: system diagnosis and optimization principles, structural improvements of core components, and airflow organization and control mechanism optimization. By refining airflow field uniformity control structures, establishing dynamic regulation mechanisms and control systems, enhancing anti-clogging and anti-ash accumulation structures, and implementing energy consumption monitoring with feedback optimization, the research achieves dual objectives of energy reduction and efficiency enhancement. These findings provide valuable insights for optimizing similar systems.

Keywords : high efficiency and low consumption; gasification air system of ash hopper; structure optimization; strategy

引言

灰斗气化风系统在工业生产中起着防灰板结、保气力输送畅通的作用, 被广泛地应用在电力、冶金、化工等各个领域。该系统通过气体加热输送使灰斗内的灰形成气固两相流, 其运行状况直接影响后续工序的连续性 & 环保是否达标。但是传统的系统设计大多只注重功能的实现, 对于能效的改善考虑较少, 造成运行过程中出现电加热的能耗过高、风机的损耗加大、局部积灰堵塞等问题, 不但增加了厂用电的成本, 而且容易因为系统故障造成生产中断。伴随着工业绿色化转型的推进, 高效低耗已经成了设备优化的主要导向。由此可见, 对基于高效低耗理念的灰斗气化风系统结构优化策略等相关内容展开探讨与分析, 具有十分重要的现实意义。

一、灰斗气化风系统结构现状诊断与优化原则

(一) 系统结构现状核心问题诊断

现如今, 灰斗气化风系统在结构设计与运行匹配中呈现出三大共性问题。其一, 气源加热方式不合理, 传统电加热直接升温

模式能量转化率低, 容易因加热元件故障导致供气温度不稳定, 增加灰分板结几率, 部分烟气直供虽然省去加热过程, 但是烟气杂质容易导致风机损坏, 额外的过滤装置还会增加运维成本。其二, 气流分配结构不合理, 输气管网管径统一设置, 未根据各灰斗负荷的差别设置, 造成远端供气压力不足, 近端气流过剩造成

能耗浪费，气化板布局零散且无导流结构，造成灰斗内局部气流速度过慢，形成积灰死角^[1]。其三，系统缺乏协同性，风机、加热装置和气动阀门运行参数固定不变，不能根据灰分存量、温度等实时参数进行调节，轻负荷工况下存在能耗冗余现象。

（二）高效低耗优化核心原则

灰斗气化风系统结构优化应秉承功能性、经济性、协同性三大准则，以保证高效低耗的目标实现。功能性优先原则为基础前提，优化方案首先要保证气化风温度、压力和流量符合灰分输送的要求，不能为了追求能耗的降低而使系统功能失效，结构改进要以灰斗内气固两相流形成效率为核心评价指标，有效解决灰分板结、堵塞问题。经济性平衡原则就是全生命周期成本控制，既要考虑运行阶段的能耗降低，也要考虑优化改造的投资成本和运维成本，在热源选择等环节要对比不同方案的长期收益，避免短期投入过高或者长期能耗失控。协同性优化原则要冲破部件独立设计的局限，达成气源供给，加热升温，气流分配等环节的联动匹配，经由创建结构间的适配关系，让风机的功率，加热的负荷同气流的需求精确对应起来，削减局部的能量浪费^[2]。

二、基于高效低耗理念的灰斗气化风系统核心部件结构优化设计

（一）气化板布局与结构改进

气化板是气流进入灰斗的部件，气化板的布置及结构直接影响灰斗内气流分布是否均匀。传统的均匀分布的布局没有考虑到灰斗的锥形结构，底部的边缘处的气流很弱。采用“中心密集、边缘加强”的不同布置方式，根据灰斗容积及锥度算得气流覆盖半径，在灰斗底部中心处设置高密度气化板组，保证中心区域气流充足，在边缘处采用倾斜式气化板，改变出气角度增加边角处的气流扰动，消除积灰死角。结构材质上将传统的平板式气化板改为多孔蜂窝状，使用耐高温陶瓷代替金属，一方面可以改善气流扩散效果，另一方面可以提高抗磨损、抗堵塞的能力。气化板入口处装有可拆卸的过滤网来减少杂质，减缓堵塞的现象，进而延长维护周期。改进后的气化板系统利用气流扰动范围增大，降低单位面积气化风耗量，达到效率提高和能耗降低的协同。

（二）布风器与输气管网优化

布风器与输气管网是气流输送的主要通道，阻力的大小直接影响风机耗能和气流分配的效果。传统管网设计多为等管径设计，造成长距离输送时气流压力损耗大，远端灰斗供气不足^[3]。优化方案用变径管网设计，根据各个灰斗到风机距离及耗气量需求，经流体力学模拟计算得出每段管网的最佳管径，使风机出口的压力能够平衡分配到各个灰斗。在布风器结构上，将传统的直筒式改为文丘里式结构，采用收缩扩张型流道设计来减小气流阻力，提高出口气流速度，在布风器内部装设导流叶片，使气流产生旋转流态，加强与灰分的混合。另外在管网转弯处用大曲率弯头代替直角弯头，减小局部阻力损失，在重要的节点处设置压力监测接口，便于随时掌握管网运行状况，为参数调节提供依据。经实践论证，管网优化后可以有效降低风机运行负荷，减少由于压力不足而造成的能耗浪

费，如此便可凸显高效低耗理念的运用价值。

（三）热源回收与加热结构改良

加热环节是系统能耗的主要来源，传统电加热方式能效比较低，直接烟气加热存在设备磨损的问题。优化方案中使用烟气余热间接加热结构，由导热块和鳍片组成，达到烟气管道和气化风管道之间热量交换的目的。在锅炉烟气管道以及气化风进气管、出风管之间设置多组导热连接块，内部延伸出的导热鳍片深入管道内部，增大换热面积。在换热区域外包覆保温筒，选用保温棉和隔音空腔的复合结构，减少热量散失，降低运行噪声。在加热系统中设置温度联动控制装置，根据灰斗内灰分温度和气化风出口温度的差值，动态调节换热面积或者辅助加热功率。当烟气温度足够高时，用余热来加热；当温度不足时，启动低功率辅助电加热来补充热量，避免传统电加热满负荷运行造成的能源浪费。这样一来，则可避免直接烟气加热导致的设备损耗，又可以利用余热^[4]。

（四）风机与阀门组件适配优化

风机属于系统动力源，运行效率直接关乎整体能耗高低，阀门组件影响气流调节是否准确。系统优化前大都使用固定功率风机，变负荷工况下依靠节流阀调节流量，造成大量的能量损失。现如今利用变频风机代替原来的风机，按照系统的实时供气需求调节转速，在低负荷工况下降低转速以节省能耗。风机出口处设弹性接头加泄压阀的组合结构，弹性接头可以吸收风机运行时产生的振动，减少设备的磨损，泄压阀在管网压力过高时自动卸压，避免超压运行造成的能耗增加和设备损坏^[5]。在阀门的选择上使用的是气动调节阀，代替了手动阀门，使用控制系统精确控制阀门的开度来达到各个支路气流的精准分配。在阀门与管道的连接处，做密封强化设计，以减少气流泄漏造成的能量损失。风机和阀门匹配得当可以保证系统在不同工况下都保持高效运行，降低无效能耗。

三、灰斗气化风系统气流组织与运行调控优化策略

（一）优化气流场均匀性调控结构设计

灰斗内气流场的均匀性对于气化效果、减少能耗浪费起着至关重要的作用。基于系统改造优化前往往往会因为缺少气流的调节结构，造成局部气流过多，局部气流过少。在灰斗内部设置导流板和气流扰动装置，建立“分层调控、全域覆盖”的气流组织系统。在灰斗中间设置环形导流板，通过调节导流板的角度来改变气流的流向，使气流分散到灰斗的外边缘；在灰斗上部安装旋转扰动叶片，依靠气流的吹动使得叶片转动产生二次扰动，加强气流的混合效果。同时在水化板出口装设可调节式出气格栅，根据灰分堆积状况调节出气方向及流速，从而达到有针对性的气流强化目的。经过气流组织改善之后，灰斗内各个地方的气流速度处在合适范围内，这样就会避免某处气流太小而产生板结现象，也不会因为气流过大造成能源浪费^[6]。

（二）构建动态调控机制与控制系统

倘若静态运行参数难以适应工况的变化，则应在灰斗气化风

系统优化过程中建立动态调控机制是实现高效低耗的重要保证。优化方案中应结合实际需求构建“参数监测、智能分析、精准调控”的闭环控制系统。比如在灰斗内部装设温度、料位传感器，在输气管网重要节点装设压力、流量传感器，以实现运行数据的实时采集目标。此外控制系统核心应选用模糊控制算法，运用数据库存储各种工况下最佳运行参数，实时采集灰分温度、料位高度、气流压力等数据，智能判断当前运行状态和最佳状态的差别。根据偏差值来自动调节风机转速、加热负荷、阀门开度等参数，当灰分料位上升时，提高风机转速和气化板出气压力，保证气化效果；当料位下降时，降低运行参数，减少能耗。同时该系统还有故障自诊断功能，若出现压力异常或者温度波动的情况，就会自动发出警报并调整参数，防止故障进一步扩大。

（三）改进防堵防积灰结构协同

堵塞、积灰是系统效率降低、能耗上升的主要故障，结构改进可实现主动防范。在灰斗底部安装螺旋式清堵装置，使其与气化风系统配合工作，能够在传感器检测到局部压力异常升高时，对启动清堵装置中局部堵塞的地方予以清理，以防止堵塞面积扩大^[7]。在输气管网末端设置放空管及吹扫接口，定期对管网进行吹扫，清除管道内的积灰；放空管上设置自动阀门，在系统停机时打开放空，防止管道内残留的气体温度降低使灰分沉淀。气化板与管网连接处使用大口径接口，减少气流经过时杂质的堆积；在重要部位设置观察窗和可拆卸的检修口，有利于及时发现积灰问题^[8]。通过防堵防积灰结构和气化风系统相配合的设计，可以减少由于故障造成的停机维护次数，降低运维成本，并且可以避免由于堵塞导致的能耗激增。

（四）搭建能耗监测与优化反馈机制

高效低耗目标的实现需要全流程能耗监测和持续改进反馈，

传统系统缺少相应的监测体系，难以准确找到能耗浪费的节点^[9]。优化方案中应构建“全环节监测→数据解析→迭代改良”的闭环回馈体系，为调控策略优化赋予主要的数据依靠。监测环节建立分级指标体系，一级指标主要包含风机耗电、加热能耗等主要项，二级指标包含管网阻力损失、设备散热损耗等次要项，通过在风机、加热装置以及管网重要位置设置计量仪表和损耗检测传感器的方式，实现实时采集能耗数据的目的。数据处理采取边缘计算和云端分析相互配合的方式：边缘端对高频数据进行实时分析，挑选能耗异常；在云端架构能耗数据库，结合灰分含量、环境温度等工况参数做关联性研究，理清能耗与运转参数间的关系^[10]。反馈优化和动态调节系统深度联动，根据分析结果给出优化建议，支路管网能耗偏高就自动触发压力复核与阀门微调，定期输出能耗分析报告供结构优化提供依据，从而促使系统从“被动调控”转变为“主动优化”，保证高效低耗状态的持续稳定。

四、结束语

总体而言，灰斗气化风系统高效低耗优化是工业绿色化发展的必然要求，其主要价值是用结构的改进来达到功能的提升和能耗的控制。系统优化不是某一个部件的升级换代，而是涉及气源供给、气流输送、运行调控等诸多环节的一系列改造，必须在运用高效低耗理念的基础上构建起一套覆盖诊断到设计、部件到系统的完整优化逻辑，以实现优化目标。与此同时在工业实践过程中，优化方案的落地要综合考虑实际工况特征，其中的差异设计、余热利用、动态调节的思想则具有普适意义。结构优化可以节能降耗降成本、提高设备稳定性，可以为工业生产连续性和环保性保驾护航。

参考文献

[1] 朱江东, 龚德鸿, 王康, 等. 高灰燃料锅炉省煤器出口烟道飞灰流动特性与脱硝灰斗设计 [J]. 科学技术与工程, 2025, 25(18): 7631-7639.

[2] 刘宣义, 黄世福. 对冲旋流燃烧锅炉冷灰斗管壁急剧减薄原因分析 [J]. 锅炉技术, 2023, 54(3): 65-70.

[3] 代华松, 浦绍旭, 刘宇, 等. 除尘器大灰斗安全运行策略研究 [J]. 电力安全技术, 2023, 25(4): 52-55.

[4] 曹港, 孙国刚, 张永民, 等. 灰斗捕焦器对催化裂化装置旋风分离器性能及流场的影响 [J]. 石油炼制与化工, 2024, 55(11): 84-89.

[5] 薛慧中, 张鑫, 夏风敏. 钢结构除尘器灰斗受力分析与参数研究 [J]. 工业建筑, 2023, 53(S01): 269-272.

[6] 袁林. 炼钢余热锅炉灰斗结构分析及优化 [J]. 工业加热, 2025, 54(2): 75-80.

[7] 姜在宁, 张力元, 章健赫. 电除尘灰斗灰位异常升高处理研析 [J]. 电力设备管理, 2025(8).

[8] 赵岐, 王领. 百万机组塔式炉冷灰斗水冷壁安装技术 [J]. 安装, 2024(S2): 53-55.

[9] 路涛, 陈天阁, 薛亚海. 燃煤锅炉底灰斗机械化捕焦实践 [J]. 电力安全技术, 2024, 26(4): 56-59.

[10] 杜肖臣, 李新强, 赖志强, 等. 基于烧结机头粉尘特性理论的电除尘器灰斗结块燃烧研究 [J]. 重型机械, 2024(4): 21-24.

[11] 许建新, 李启龙, 赵理辉, 等. 除尘器灰斗应变监测系统设计及工程实践 [J]. 中国建筑金属结构, 2024, 23(11): 2-5.

智能化技术在涂装线工程管理中的应用实践

黄琼

天津七所高科技有限公司，天津 300409

DOI:10.61369/ERA.2026020004

摘 要： 在制造业智能化转型的背景下，作为产品表面质量控制起到关键作用的涂装线环节，其工程管理的效率连同精度，对企业生产效益产生的直接影响不容小觑。然而传统涂装线工程管理存在着诸如进度管控滞后，质量检测过度依赖人工以及成本核算较为粗放等亟待解决的痛点。本文基于在智能化技术应用方面所开展的实践工作，从进度、质量、成本还有安全这四大核心管理维度出发，对物联网、人工智能以及数字孪生等技术究竟该如何落地的路径展开深入探讨，借由典型场景分析与成效总结这一方式，提出了技术融合优化方向，旨在给涂装线工程管理的智能化升级提供具有实践意义的参考依据。

关 键 词： 智能化技术；涂装线；工程管理；物联网；数字孪生

The Application Practice of Intelligent Technology in the Engineering Management of Coating Lines

Huang Qiong

Tianjin Qisuo High-tech Co., LTD., Tianjin 300409

Abstract： Against the backdrop of the intelligent transformation of the manufacturing industry, the coating line, which plays a crucial role in controlling the surface quality of products, has a direct impact on the production benefits of enterprises due to the efficiency and accuracy of its engineering management. However, traditional coating line engineering management has some urgent pain points that need to be solved, such as lagging progress control, excessive reliance on manual quality inspection, and relatively rough cost accounting. Based on the practical work carried out in the application of intelligent technologies, this article starts from the four core management dimensions of progress, quality, cost and safety, and conducts an in-depth discussion on how to implement technologies such as the Internet of Things, artificial intelligence and digital twins. Through the analysis of typical scenarios and the summary of achievements, it proposes the direction of technology integration and optimization. It aims to provide a practical reference basis for the intelligent upgrade of coating line engineering management.

Keywords： intelligent technology; painting line; project management; internet of things (IoT); digital twin

引言

涂装工艺在机械制造、汽车以及家电等行业内属于核心工序，涂装线工程管理涵盖着从工艺设计、设备调试，再到生产运行、质量管控等全流程，而其管理水平直接决定着产品外观质量、生产周期与运营成本这些重要方面。随着市场对产品质量要求持续提升，且环保法规愈发收紧，传统依赖人工经验的管理模式已越来越难以适应规模化、高精度的生产需求，比如在进度管理中设备故障响应滞后致使工期延误，质量检测中人工目视存在漏检风险，成本管理方面能耗与耗材浪费现象极为突出。在如此背景下，物联网、人工智能、数字孪生等智能化技术与涂装线工程管理深度融合，成为破解行业痛点、提升管理效能的关键路径，其应用实践具备重要的行业借鉴价值。

一、智能化技术在涂装线工程管理中的应用基础

在技术支撑层面，物联网技术构建起涂装线全要素的数据采集网络，通过在预处理槽、喷涂机器人以及烘干炉等关键设备上，部署诸如温度、压力、转速等类型的传感器，并且结合 RFID 技术对

工件进行全程溯源，从而实现对设备运行参数、工件加工状态以及物料消耗等各类数据的实时采集。大数据平台会对采集到的多维度数据，进行清洗以及整合等处理，进而为管理决策提供有力的数据支撑。人工智能技术重点聚焦于对数据的深度挖掘，通过算法模型达成质量缺陷识别、设备故障预警等智能分析功能。数字孪生技术

作者简介：黄琼（1986.05-），女，河北衡水人，本科，机械工程师，研究方向：涂装线。

则构造出涂装线的虚拟映射模型,实现物理场景与虚拟场景的实时同步,为流程优化与模拟仿真提供重要载体。

在流程适配方面,需要打破传统涂装线那种“设计-调试-生产”的线性管理模式,构建基于数据的动态管理流程。例如在工艺设计阶段,借助数字孪生模型开展流程模拟,提前对喷涂路径与烘干参数进行优化;在生产运行阶段,建立起设备运维与质量管控的联动机制,达成故障预警与质量问题的溯源分析。这种技术与流程之间的协同关系,为智能化应用奠定了极为坚实的基础。

二、智能化技术在涂装线工程管理各环节的应用实践

(一) 进度管理: 全流程可视化与动态调控

涂装线进度管理其核心需求在于以确保包含预处理、喷涂、烘干以及检验的各工序能实现顺畅衔接,从而减少设备出现闲置以及工件形成积压为目的。在传统管理情形之下,进度跟踪主要依靠人工巡检记录,致使工序衔接所出现的滞后问题难以被及时察觉发现。而智能化技术凭借“数据实时采集-进度动态预警-流程智能优化”这种模式,达成进度管理朝着精准化方向发展的目标。在数据采集这一环节当中,借助物联网传感器对各工序诸如工件流转数量、设备运行状态以及工序完成时长等数据实施实时采集,并且结合 RFID 芯片对工件自上线直至下线的全流程时间节点予以记录,这些数据经过边缘计算节点处理后会上报至管理平台。就像在汽车车身涂装线里,每个车身都携带着唯一的 RFID 标签,当其经过预处理槽时就会自动记录进出槽的时间,于喷涂工位则记录机器人喷涂开始和结束的时间,以此实现对各工序耗时进行精准统计。在进度预警以及调控方面,基于大数据构建起进度偏差预警模型,当某工序的完成时间超出标准阈值达 10% 的时候,平台便会自动触发预警,并且通过可视化界面显示出滞后工序及其产生的原因。与此同时,智能排程系统结合实时数据对生产计划进行动态调整^[1-5]。

(二) 质量管理: 全流程溯源与智能检测

在过程参数管控方面,利用物联网对涂装关键工艺参数实施实时监控操作,建立起参数波动和质量风险之间的关联模型。比如在喷涂工序过程当中,实时监测喷涂压力、涂料粘度以及喷枪移动速度等参数情况,一旦参数超出预设的范围,系统就会立刻暂停设备运行并且发出警报,以此避免批量质量问题的产生。在烘干工序方面,借助温度传感器实时采集炉内不同区域的温度数据,以此保证工件受热均匀,减少涂层出现开裂、脱落等各类缺陷的状况。在智能缺陷检测方面,运用机器视觉与 AI 算法替代人工检测的方式。于检验工位部署高清相机与光源系统,针对工件表面展开 360° 拍摄工作,拍摄所得图像经过 AI 缺陷检测模型处理之后,能够精准识别像针孔、流挂、橘皮等常见缺陷,识别精度能够达到 99% 以上。与此同时,模型通过持续学习人工复核数据从而不断优化自身,进一步提升检测的准确率。与人工检测相比较而言,智能检测不仅将检测效率提升了 3 倍,还能够有效避免因人工疲劳而导致的漏检问题。在全链条溯源范畴内,借助区块链精心搭建质量溯源平台,将工件的 RFID 信息跟各工序参数以及检测结果以关联形式存储起来,这样一来,当质量问题被察觉到的时候,凭借工件编号便能够迅速追溯到对应的生产设备、操作人员以及原材料批次等相关信息,从而实现质量责任的精准

定位,同时也为工艺优化提供所需的数据支撑^[6-10]。

(三) 成本管理: 精准核算与节能降耗

在能耗管理层面上,于喷涂机器人、烘干炉以及水泵等主要能耗设备处部署智能电表、水表还有燃气表,对能耗数据进行实时采集工作,借助大数据分析手段来识别是否存在能耗异常状况。比如说烘干炉作为涂装线的主要能耗设备,系统通过分析炉内温度和工件数量之间匹配关系,进而智能地调节燃烧器功率,以避免由于“空炉运行”或者“过度加热”而造成的能耗浪费现象。在耗材管理相关方面,通过物联网达成涂料、溶剂等耗材的精准计量操作。在涂料输送管道上安装流量传感器,针对各喷涂工位的涂料消耗量实施实时监测,结合工件数量以及喷涂面积,计算出单位产品涂料消耗标准,一旦实际消耗超出标准值时,系统自动进行预警,对“涂料泄漏”或者“喷涂参数不当”等一系列问题展开排查。与此同时,智能配料系统依据工件颜色以及批次需求,精准地调配涂料配比,从而减少废料的产生量。在成本动态核算方面,系统把实时采集到的能耗、耗材、人工等诸多数据跟成本核算模型相结合,生成单位产品成本动态报表,为管理层对生产计划做出调整以及优化成本结构提供实时数据方面的支持,从而改变了传统“月末算账”所存在的滞后性弊端。

(四) 安全管理: 风险预判与智能防控

在风险监测这个领域,在涂装车间内部署可燃气体传感器、烟雾报警器以及红外热像仪等多种设备,实时监测车间内部可燃气体浓度、温度以及设备运行温度等安全指标。例如当涂料储存区可燃气体浓度达到设定阈值的时候,系统马上触发声光报警,并且自动关闭区域通风阀门,启动防爆排风设备。在喷涂机器人作业区域,借助视觉传感器对人员闯入情况进行监测,一旦发现有违规闯入现象,立即暂停设备运行,进而避免安全事故的发生。在智能预警层面,依赖于基于 AI 算法精心构建起可用于安全风险预测的模型,通过对设备运行参数、环境指标以及历史事故数据等进行深入剖析,以此来对潜在风险加以预判;比如说,对喷涂机器人的振动频率与运行噪声数据展开分析,提前识别像轴承磨损这般的故障隐患,从而发出预防性维护预警,以避免由设备故障所引发的诸如火灾或者机械伤害之类的安全事故。而应急联动范畴内,构建起具有智能化特征的应急响应系统,当安全事故一旦发生,该系统便会自动启动应急预案,包含切断事故区域电源与气源,引导消防设备精准定位火灾位置,并且同时借助车间广播与指示灯来引导人员疏散,以此将事故造成的损失尽可能降低至最低限度。

(五) 设备管理: 预测性维护与效能提升

涂装线设备管理将降低非计划停机时间、提升设备综合效率(OEE)设定为核心目标,而传统设备管理所常采用的“故障后维修”或者“定期预防性维修”模式,它们可能会致使生产中断,也可能因为过度维修而增加成本,在实现智能化转型之后,是通过“实时状态监测-故障精准预判-智能维护调度”这般的模式去达成预测性维护的升级。于状态监测这个环节当中,为喷涂机器人、输送链条、烘干炉风机等关键设备上装上振动传感器、温度传感器以及电流传感器,以此实时采集设备运行数据,这些数据在经过边缘计算节点过滤降噪处理,会被传输到设备管理平台,进而建立起设备健康档案。就好比以喷涂机器人来说,系统会持续追踪其关节电机温度、运动轨迹偏差之类的数据,由此形成健康曲线基准。

（六）人员管理：智能排班与技能提升

在涂装线高效运行中，人员管理起着保障作用，其核心在于做到人力配置最优化与技能水平精准匹配这两方面，然而在传统管理状况下，排班主要依靠经验判断，这样很容易出现人力冗余或者短缺的情形，技能考核又依赖人工评估，主观性比较强，智能化管理则是借助“需求精准测算－智能排班调度－技能数字化管理”的方式得以升级。在人力需求测算方面，系统会把生产计划中的工件批次、工艺复杂度与设备运行状态相结合，通过大数据模型对各工位实时人力需求进行精准预测，比如当批量生产高难度曲面工件的时候，就会自动增加喷涂工位辅助人员配置。智能排班系统会综合考量员工技能等级、考勤记录以及休息需求，自动生成最优排班表，还支持一键调整换班、加班等特殊需求，进而确保人力与工位需求精准匹配，人力冗余率也得以降低20%。

三、应用成效与典型案例分析

A 汽车零部件企业为了有效解决传统涂装线所面临的管理痛点问题，实施了智能化升级改造这一举措，构建起“物联网＋数字孪生+AI”的工程管理体系，并且取得了相当显著的应用成效；具体来看，在进度管理环节，凭借智能排程以及实时监控手段，涂装线生产周期从原本的8小时被成功缩短至6小时，订单交付及时率也随之提升到98%；在质量管理方面，通过 AI 缺陷检测系统使缺陷率由0.8% 降低至0.15%，客户投诉率亦下降了60%；在成本管理层面，单位产品能耗下降达18%，涂料损耗率从5%降至1.2%，每年能够节约成本超过300万元；在安全管理领域，实现了对安全隐患的实时预警，全年未发生重大安全事故情况。该案例清晰地表明，智能化技术的应用并非仅仅简单地设备进行替换，而是借助数据把各个管理环节加以贯通，实现管理模式由“经验驱动”朝着“数据驱动”方向的转变，显著提升涂装线工程管理的效率、精度以及安全性。

四、智能化应用存在的问题与优化方向

（一）存在的主要问题

尽管智能化技术在涂装线工程管理当中已然取得相当显著的成效，然而依然存在三个方面的问题：其一是技术融合深度不够

充足，部分企业仅仅实现单一环节的智能化情形，像是单独应用智能检测或者能耗监控，却没有形成全流程的数据贯通，最终导致出现“信息孤岛”这一现象；其二是专业人才处于短缺状态，既了解涂装工艺同时又掌握智能化技术的复合型人才极度匮乏，导致部分先进设备与系统没办法充分发挥其效能；其三是成本投入门槛相对较高，中小企业由于受到资金方面的限制，难以承担全套智能化系统的研发与改造所需费用。

（二）优化方向

一方面，致力于构建一个旨在打破各系统数据壁垒进而实现进度、质量、成本以及安全管理的数据协同并借助数字孪生模型达成全流程可视化管控的一体化智能管理平台；另一方面，着重通过企业与职业院校展开合作开设专门的“涂装智能化”定向专业以及同步开展内部培训来提升现有管理人员智能化操作技能的方式加强人才培养与引进；再一方面，针对中小企业的实际需求推广一种能够通过开发“按需选配”的模块化系统以降低智能化升级门槛（例如先着手实现像质量检测这类关键环节的智能化改造而后再渐进式扩展至全流程）的模块化智能解决方案。

五、结论

智能化技术被认为为涂装线工程管理提供了一种具备全新视角的解决方案，借助物联网、人工智能以及数字孪生等前沿技术在进度、质量、成本和安全管理等诸多环节得以深度应用，传统管理模式的痛点由此被有效破解，管理效能获得显著提升的目标得以实现。经由实践表明，涂装线工程管理的智能化升级，其核心要点在于以数据为核心构建一套闭环管理体系，达成从“被动应对”往“主动防控”以及从“经验决策”迈向“数据决策”的实质性转变。虽然目前仍存在诸如技术融合程度尚显不足、专业人才较为短缺等等一系列问题，但伴随技术持续走向成熟以及成本逐步降低的趋势，智能化管理被推测极有可能成为涂装线工程管理未来的主流模式，进而为制造业的高质量发展提供不可或缺的有力支撑。

参考文献

- [1] 徐波涛, 吴连伟, 刘洋, 郑英杰, 李化贤, 杜金亮. 发动机涂装线装备全寿命周期精细化管理研究与应用 [J]. 中国设备工程, 2024, (S1): 319-322.
- [2] 田云, 卜洪涛, 王森, 操金明. 拖拉机驾驶室及覆盖件高端涂装线规划设计新思路 [J]. 现代涂料与涂装, 2023, 26(06): 21-23.
- [3] 黄海山. 完颜成功 .60 JPH 智能化涂装生产线的规划策略 [J]. 汽车实用技术, 2023, 48(11): 179-183.
- [4] 陈蒙, 张竞予. 特种集装箱涂装线的智能化改造 [J]. 黑龙江科学, 2023, 14(10): 148-150.
- [5] 王博. 钢桥智能化涂装机器人导航方式的探索与应用 [J]. 现代涂料与涂装, 2023, 26(05): 18-20+23.
- [6] 李建军, 张安永, 王德龙. 钢结构智能化涂装分析——以宁波舟山港主通道为例 [J]. 科技创新与应用, 2022, 12(24): 14-17.
- [7] 李鸿伟, 厉志成, 张岳. 桥梁钢结构智能化涂装设备的开发与应用研究 [J]. 四川水泥, 2022, (08): 233-235.
- [8] 王伟, 蔡明波, 周军红, 杨高阳, 梁公峰, 高如国. 钢结构智能环保涂装线设计分析与应用 [J]. 建筑施工, 2022, 44(02): 384-386.
- [9] 本刊. 晋工机械智能化叉装机产业化技改项目竣工投产 [J]. 石材, 2020, (02): 21.
- [10] 万阳, 江益群, 周智勇, 许建伟, 于建新, 邹文峰, 华军. 发动机涂装线智能化升级改造项目的策划与实施 [J]. 电镀与涂饰, 2019, 38(14): 743-746.

面向高速度平稳驱动的空气弹簧组合缓冲与动圈自动对中技术

朱禹

上海瀚海检测技术股份有限公司, 上海 200433

DOI:10.61369/ERA.2026020005

摘要： 高速度驱动系统的平稳性与可靠性是高端装备领域的核心技术诉求，其缓冲性能与执行机构对中性直接决定系统动态响应质量。针对高速驱动场景下传统缓冲装置冲击抑制不足、动圈执行机构易出现偏心磨损等问题，提出一种空气弹簧组合缓冲与动圈自动对中集成技术。首先剖析空气弹簧非线性刚度特性与动圈偏心致失效机理，构建组合缓冲系统的力学模型，明确空气弹簧与辅助缓冲元件的参数匹配关系；进而设计基于磁流变效应的动圈自动对中机构，通过磁场梯度调控实现偏心量的实时补偿。结合仿真分析验证组合缓冲系统在冲击载荷下的平稳性提升效果，以及自动对中机构对偏心误差的抑制能力。研究结果表明，该集成技术可有效降低高速驱动过程中的冲击峰值加速度30%以上，将动圈偏心量控制在0.02mm以内，为高速度平稳驱动系统的设计提供关键技术支撑。

关键词： 高速平稳驱动；空气弹簧；组合缓冲；动圈；自动对中

Air Spring Combination Buffering and Moving Coil Automatic Centering Technology for High-Speed Stable Driving

Zhu Yu

Shanghai Hanhai Testing Technology Co., Ltd. Shanghai 200433

Abstract： The smoothness and reliability of high-speed drive systems are core technical requirements in the field of high-end equipment, where their buffering performance and actuator concentricity directly determine the quality of system dynamic response. To address the insufficient impact suppression of traditional buffer devices in high-speed drive scenarios and the tendency of voice coil actuators to suffer eccentric wear, an integrated technology combining air spring composite buffering and voice coil automatic concentricity is proposed. First, the nonlinear stiffness characteristics of air springs and the failure mechanism caused by voice coil eccentricity are analyzed, and a mechanical model of the composite buffer system is constructed to clarify the parameter matching relationship between air springs and auxiliary buffer components; subsequently, a voice coil automatic concentricity mechanism based on magnetorheological effect is designed, achieving real-time compensation of eccentricity through magnetic field gradient regulation. Simulation analysis is combined to verify the effectiveness of the composite buffer system in improving stability under impact loads and the ability of the automatic concentricity mechanism to suppress eccentric errors. The research results show that this integrated technology can effectively reduce the peak acceleration during high-speed drive by more than 30%, control the voice coil eccentricity within 0.02 mm, and provide key technical support for the design of high-speed smooth drive systems.

Keywords： high-speed stable driving; air spring; combined buffering; voice coil; automatic centering

引言

在航空航天、高端制造等领域，高速度驱动系统的应用日益广泛，其运行过程中的平稳性直接影响装备的工作精度与使用寿命。高速驱动时，执行机构启停阶段产生的冲击载荷易导致系统振动，而动圈作为核心执行部件，其与定子间的偏心会引发摩擦磨损，严重降低驱动效率与可靠性。传统缓冲装置多采用单一弹性元件，难以在宽速度范围内实现冲击抑制与平稳过渡的平衡；动圈对中多依赖机械加工精度，缺乏实时补偿能力，无法适应高速驱动下的动态偏心变化。空气弹簧凭借其刚度可调节、非线性缓冲特性等优势，在振动控

制领域得到应用，但单一空气弹簧在高速冲击下的响应滞后问题制约了其缓冲效果。动圈自动对中技术虽有磁控、液压等多种形式，但如何与缓冲系统协同设计，实现高速驱动场景下的一体化性能提升，仍是当前研究的难点。基于此，本文提出空气弹簧组合缓冲与动圈自动对中集成技术，通过缓冲系统的参数优化与对中机构的动态调控，解决高速驱动中的平稳性与对中性问题，为高端驱动装备的性能升级提供技术方案。

一、核心技术机理分析

（一）空气弹簧缓冲机理与特性

空气弹簧以压缩空气为弹性介质，通过气体的可压缩性实现能量吸收与缓冲，其核心特性体现为非线性刚度，该特性由气体热力学过程与结构参数共同决定。在高速驱动场景下，缓冲过程的时间尺度极短，气体压缩过程可近似为绝热过程，其刚度特性满足绝热过程方程。与传统金属弹簧的线性刚度不同，空气弹簧的刚度随内压与容积变化而动态调整，当受到冲击载荷时，内压迅速升高，刚度随之增大，可快速抑制冲击位移；载荷减小时，刚度同步降低，实现平稳回弹，这种特性使其在冲击载荷变化时具备自适应缓冲能力。空气弹簧的缓冲性能受气囊结构、初始压力、有效容积等参数影响。气囊采用曲囊式结构时，其变形过程中有效承压面积的变化会加剧刚度的非线性；而膜式结构则具备更稳定的承压特性，适合高速驱动中的精准缓冲控制。初始压力决定了空气弹簧的静态刚度基准，较高的初始压力可提升系统的抗冲击阈值，但会降低低载荷下的缓冲灵敏度。有效容积通过气室设计实现调节，增大有效容积可降低刚度变化率，使缓冲过程更平稳，但会增加响应时间。单一空气弹簧在高速冲击下，由于气体压缩的滞后效应，易出现冲击峰值过后的二次振动，因此需要与辅助缓冲元件组合，形成协同缓冲机制。

（二）动圈偏心机理与危害

动圈作为高速驱动系统的核心执行部件，其与定子之间的气隙均匀性直接决定电磁驱动力的稳定性。动圈偏心主要是由三个方面造成的：一是机械加工误差，包括动圈轴的圆度误差、定子装配的同轴度误差；二是动态载荷作用，高速驱动时动圈受到的惯性力、电磁力不平衡而导致瞬时偏心；三是运行磨损，长期使用后轴承间隙增大，使动圈的径向跳动量增大。偏心产生后，动圈与定子间的气隙非均匀分布，电磁驱动力沿圆周方向分布不均形成径向附加力。而该附加力会加剧动圈的径向振动，从而使气隙更恶化，形成“偏心——附加力——更大偏心”的恶性循环。特别是在高速驱动场景下动圈偏心的危害更大。偏心量大于气隙设计值的10%时，可产生明显的电磁噪声，驱动力变形幅度增大；偏心量达到气隙值的30%时，可能造成动圈与定子的机械摩擦，破坏线圈绝缘层，引起短路。另外，偏心引起的振动会传入整个驱动系统，影响其他部件的工作精度，如精密加工设备中，动圈偏心造成刀具进给误差，加工表面质量差。因此，动圈的实时自动对中是确保高速驱动系统可靠运行的关键。

二、空气弹簧组合缓冲系统设计

（一）组合缓冲系统结构设计

为克服单一空气弹簧在高速冲击下响应滞后，产生二次振动，将空气弹簧与金属阻尼器组成单个复合缓冲系统，采用串联布局，进行协同工作。系统主要由曲囊式空气弹簧、环形金属阻尼器、气室调节装置三部分组成。曲囊式空气弹簧是主缓冲元件，是吸收冲击能量的主要部分，其材料为三层帘线增强橡胶，承受高速冲击下的瞬时高压；环形金属阻尼器嵌套于空气弹簧内部，它通过金属片的剪切变形而实现阻尼力调节，用于抑制空气弹簧的回弹振动。气室调节装置采用小型化电磁比例阀控制气室与外气源的通断，以控制空气弹簧初始压力，以适应不同的高速驱动工况。组合缓冲系统的连接采用法兰式刚性连接，确保结构在高速冲击下的稳定性，避免连接部位的松动和变形。导向套结构设计在系统两端，限制缓冲过程中的径向位移，防止空气弹簧出现横向偏移，同时为后续与动圈组件的集成提供安装基准^[1-5]。

（二）参数匹配与优化设计

组合缓冲系统的性能优劣取决于空气弹簧与金属阻尼器的参数匹配，要配合高速驱动的冲击特性进行优化。首先确定空气弹簧的核心参数，根据高速驱动系统的额定载荷与冲击峰值，计算得到空气弹簧的有效容积与初始压力。有效容积满足冲击过程中内压不超过材料许用压力，初始压力根据静态载荷平衡来确定，使系统在静态时具有合适的预压缩量，提高动态响应速度。金属阻尼器的参数设计需与空气弹簧的刚度特性匹配，通过阻尼系数的调节实现缓冲过程的平稳性。阻尼系数过小会导致空气弹簧回弹振动加剧，过大则会使缓冲过程出现刚性冲击。采用能量法进行参数优化，以冲击过程中系统的总振动能量最小为目标，建立空气弹簧刚度、阻尼器阻尼系数与冲击速度的关系模型。通过仿真分析不同参数组合下的冲击响应曲线，确定最优参数组合：空气弹簧初始压力0.8MPa，有效容积0.005m³，金属阻尼器阻尼系数5000N·s/m。优化后的组合缓冲系统，在高速冲击载荷作用下，可通过空气弹簧的非线性刚度吸收大部分冲击能量，金属阻尼器则快速消耗回弹过程中的振动能量，有效抑制二次振动。

三、动圈自动对中机构设计

（一）自动对中机构结构设计

针对高速驱动下动圈的动态偏心问题，设计基于磁流变效应的动圈自动对中机构，与空气弹簧组合缓冲系统集成设计，实现“缓冲—对中”一体化功能。机构主要由磁流变液腔、环形电磁

铁、位移传感器、控制器四部分组成。磁流变液腔环绕布置于动圈轴外侧，内部填充磁流变液，通过磁场强度的变化调节磁流变液的剪切屈服应力，产生径向对中力；环形电磁铁采用多极绕制方式，均匀分布于磁流变液腔外侧，通过改变线圈电流实现磁场梯度的精准调控。位移传感器采用非接触式电涡流传感器，沿动圈圆周方向均匀布置三个，实时采集动圈的径向位移信号，实现偏心量的三维检测；控制器采用嵌入式 MCU，通过 PID 算法对位移信号进行处理，输出控制信号调节各电磁铁的电流，实现对中力的动态分配。机构与缓冲系统通过共用安装法兰实现集成，动圈轴穿过缓冲系统的导向套与对中机构的中心孔，形成同轴布局，确保缓冲与对中过程的协同性。

（二）中对控制策略设计

动圈自动对中控制的核心是根据偏心量的实时检测结果，精准调节各电磁铁的电流，形成自适应对中力。控制策略采用分层控制架构，分为信号采集层、决策控制层与执行层。信号采集层通过三个电涡流传感器同步采集动圈的径向位移数据，采用卡尔曼滤波算法对采集信号进行降噪处理，消除高速驱动过程中振动干扰对位移检测精度的影响，提高偏心量计算的准确性。决策控制层基于 PID 控制算法，将滤波后的偏心量信号与设定的目标对中值（通常为 0）进行比较，计算得到各电磁铁的电流调节量。为适应高速驱动下的动态偏心变化，采用变参数 PID 算法，根据偏心量的大小动态调整比例、积分、微分系数：当偏心量较大时，增大比例系数以加快响应速度；当偏心量接近目标值时，增大积分系数以消除静态误差。执行层通过功率放大模块将控制信号转换为电磁铁的驱动电流，改变磁场强度，使磁流变液产生相应的剪切屈服应力，形成径向对中力，推动动圈回归中心位置。

四、仿真分析与性能验证

（一）组合缓冲系统仿真分析

为验证空气弹簧组合缓冲系统的缓冲效果，基于多体动力学仿真平台建立系统模型，模拟高速驱动启停阶段的冲击载荷工况。仿真参数设置如下：冲击载荷峰值为系统额定载荷的 3 倍，冲击持续时间为 0.05s，对应高速驱动系统的启停速度变化率。选取单一空气弹簧系统作为对比组，分析两组系统的冲击响应特性。

仿真结果显示，单一空气弹簧系统在冲击载荷作用下，峰值加速度为 15m/s^2 ，冲击过后出现 3 次明显的回弹振动，振动衰减时间为 0.3s；而组合缓冲系统的冲击峰值加速度降至 10.5m/s^2 ，

峰值降低 30%，回弹振动次数减到 1 次，衰减时间减到 0.15s。这说明组合缓冲系统通过空气弹簧和金属阻尼器的作用，可充分吸收冲击能量的同时，快速抑制回弹振动，提高高速驱动启停阶段的平稳性。不同冲击速度工况下的仿真结果表明，该组合缓冲系统在宽速度范围内都具有稳定的缓冲性能，能够适应高速驱动的工况变化需求。

（二）自动对中机构仿真分析

采用电磁—机械耦合仿真方法验证动圈自动对中机构的对中效果。建立机构的三维模型，设置动圈初始偏心量为 0.1mm，模拟高速驱动过程中动圈的动态偏心变化。仿真过程中，控制器通过位移传感器采集偏心信号，控制策略来调节电磁铁电流，记录动圈偏心量的变化曲线。仿真结果表明，自动对中机构启动后，动圈偏心量在 0.03s 内降到 0.02mm 以下，达到稳定状态，对中调节时间较传统机械对中方式缩短 60% 以上。在高速驱动过程中，当动圈因惯性力产生瞬时偏心时，机构可在 0.01s 内作出反应，实时补偿偏心误差，将偏心量始终控制在 0.02mm 以内。与无对中机构相比，有对中机构时动圈与定子间间隙不均匀度由 15% 下降为 2%，电磁驱动力波动幅度由 8% 下降为 1%，提高了驱动系统的动力稳定性。仿真也测试了机构在不同转速时的对中性，当驱动速度达到额定速度的 1.2 倍时，对中的精度仍能保持在 0.02mm 以内，具有良好的高速适应性。

五、结论

本文针对高速度平稳驱动系统缓冲与对中核心问题，提出空气弹簧组合缓冲与动圈自动对中集成技术，通过机理分析、结构设计及仿真验证，形成以下主要结论：空气弹簧与金属阻尼器的组合缓冲系统，利用空气弹簧的非线性刚度吸收冲击能量，金属阻尼器抑制回弹振动，可有效降低高速冲击峰值加速度 30% 以上，缩短振动衰减时间 50%；基于磁流变效应的动圈自动对中机构，通过多传感器检测与 PID 控制，后续研究可从两方面进行：一是缓冲系统的自适应控制策略的优化组合，结合高速驱动的实时载荷变化，实现空气弹簧压力与阻尼系数的动态调节；二是探索对中机构与缓冲系统的深度协同，利用缓冲过程中的位移信号预判动圈偏心趋势，进行提前补偿，进一步提高系统的整体性能。该集成技术为高速度平稳驱动装备的设计提供新的技术途径，可以在精密制造、航空航天等领域得到应用。

参考文献

- [1] 林达文, 彭立群, 黄涛, 王进. 橡胶空气弹簧扭摆性能试验装置设计与研究 [J]. 橡塑技术与装备, 2025, 51(07): 69–75.
- [2] 曹鑫鹏, 王晨, 彭晨, 王金星, 张宏建, 孙林林. 气动式播种下压力调节装置优化设计与试验 [J]. 农业机械学报, 2025, 56(05): 257–267.
- [3] 孙文, 李晨阳, 王军年, 万旭君, 刘桂均, 李伟. 基于多工况模式的复合型悬架平顺性研究 [J]. 汽车工程, 2024, 46(11): 2076–2090+2099.
- [4] 舒赣平, 墨泽, 刘汶津, 郑宝锋, 付亨利. 空气弹簧—铅芯橡胶支座三维隔震装置力学性能 [J]. 东南大学学报 (自然科学版), 2024, 54(06): 1395–1403.
- [5] 彭立群, 林达文, 黄涛, 刘国钧, 丁行武, 王进. 轨道车辆空气弹簧刚度试验型设计与研究 [J]. 特种橡胶制品, 2024, 45(05): 58–64.

隧道二次衬砌混凝土强度无损检测技术探究

孙艳

云南云岭高速公路工程咨询有限公司, 云南 昆明 650000

DOI:10.61369/ERA.2026020009

摘 要： 二次衬砌是高速公路隧道结构受力和安全防护的关键部分，二次衬砌混凝土强度好坏直接影响隧道的使用寿命和通行安全。第三方检测单位在工地现场进行检测时，会受到传统无损检测技术精度不够、适应性不强、数据解读主观性大的影响，无法达到工程质量把控的实际需要。本文以监理单位试验检测工作为依托，根据工地现场作业特点，从检测方法优化、设备适配改进、数据处理规范三个方面，提出适合现场操作的无损检测技术改进方案。通过改进检测流程、提高设备的适配性、规范数据处理方法来提高检测的精度和效率，通过工地现场验证，改进后的检测技术误差控制在 $\pm 5\%$ 内，比传统的检测方法精度提高 25%，为隧道工程质量现场检测提供技术支持。

关 键 词： 高速公路隧道；二次衬砌；混凝土强度；无损检测；技术改进；现场检测

Research on Nondestructive Testing Technology of Concrete Strength of Tunnel Secondary Lining

Sun Yan

Yunnan Yunling Expressway Engineering Consulting Co., LTD. Kunming, Yunnan 650000

Abstract： As a critical component of highway tunnel structures, secondary lining serves as the structural and safety safeguard. The concrete strength of secondary lining directly impacts both the tunnel's service life and traffic safety. However, third-party testing units face limitations in traditional non-destructive testing (NDT) methods due to insufficient accuracy, poor adaptability, and subjective data interpretation, which fail to meet practical quality control requirements. This paper proposes an optimized NDT solution tailored for on-site operations, based on supervision unit testing practices and construction site characteristics. The improvement plan focuses on three key aspects: optimizing testing methods, enhancing equipment compatibility, and standardizing data processing protocols. By refining testing procedures, improving equipment adaptability, and standardizing data processing, the proposed approach achieves enhanced accuracy and efficiency. Field validation confirms that the improved testing method maintains error control within $\pm 5\%$, demonstrating 25% higher precision than traditional methods. This provides technical support for on-site quality assessment of tunnel engineering.

Keywords： highway tunnel; secondary lining; concrete strength; nondestructive testing; technical improvement; field testing

引言

高速公路隧道二次衬砌混凝土强度检测属于工程质量评价的重要部分，对隧道结构安全评价以及运营维护决策具有直接影响。第三方检测单位是工程质量监督的重要力量，需要在工地现场快速、准确地进行检测。由于无损检测技术具有非破坏性、高效便捷、成本低廉的特点，在工地现场检测中被广泛使用。目前工地常用的回弹法、超声波法、电磁感应法等传统方法，在实际使用中受到现场环境、衬砌表面、钢筋分布等众多因素的影响，检测结果的离散性较大，精度无法保证。

由于高速公路隧道向长距离、深埋方向发展，工地现场检测的环境越来越复杂，对检测技术实用、稳定、准确的要求越来越高。监理单位在日常试验检测工作过程中发现，传统的无损检测技术在现场施工中存在着设备操作复杂、数据处理依靠经验、环境适应性差等诸多局限性，从而影响到检测工作的工作效率以及工作质量。因此，根据工地现场实际工况，对现有的无损检测技术进行优化改进，简化操作流程、提高环境适应性、规范数据解读，形成一套符合现场实操的检测方案，对提高隧道二次衬砌混凝土强度检测质量、保证工程安全具有重要的实际意义。

一、传统无损检测技术在工地现场应用的局限性

（一）检测精度受现场环境干扰大

传统的无损检测技术大多采用单一的物理场原理，在工地复杂环境下容易受到各种因素的影响。回弹法依靠混凝土表面硬度和强度的相关性，但是工地现场衬砌表面常常有浮浆、碳化、含水率不均等问题，当碳化深度大于3mm时，检测误差就会大于15%；超声波法通过声波传播速度来评价混凝土密实度，而隧道内钢筋分布不均、衬砌内部微小缺陷等会使声波传播路径发生畸变，造成强度评估偏差；电磁感应法虽然可以穿透表层钢筋，但是对现场高湿度、粉尘多的环境比较敏感，含水率的变化会明显影响电阻率检测结果，从而造成强度量化不准确。现场的干扰因素很难排除，造成传统技术检测精度稳定性差，不能满足工程质量评定的要求^[1]。

（二）现场操作与数据处理效率低

传统无损检测设备多为手持便携式，工地现场检测需要逐点操作，对于特长隧道来说检测效率非常低。对3公里以上长度的隧道来说，用传统设备进行全面检测需要投入大量人力和资源，而且检测周期很长，会影响到施工进度。同时传统数据处理大多采用经验公式换算，比如回弹法强度换算公式是以标准工况下拟合的，但工地现场混凝土配合比、养护条件与标准工况有差异，导致换算误差增大；超声波法只用传播速度一个参数评价强度，忽略了现场检测中振幅衰减、波形畸变等重要信息，数据解读主观性大，需要检测人员有丰富的经验，否则容易出现误判^[2]。

（三）设备适应性与现场实操性不足

工地现场环境恶劣，潮湿、粉尘多、光线不足等都会影响到传统的检测设备的稳定性。部分检测设备对工作环境要求很高，在湿度大于80%或者温度低于0℃时，设备的性能会降低，检测数据可靠性也会降低。此外传统设备操作程序繁杂，检测人员要频繁调参、记录数据，在现场作业空间受限的情况下操作不方便；检测结果多为单点数据，难以形成衬砌强度空间分布图谱，导致无法快速定位强度薄弱区，增加现场质量评价和后续整改工作的难度。

二、工地现场无损检测技术改进方向

（一）检测方法优化：结合现场工况的组合检测方案

针对单一检测方法精度不够的问题，根据工地现场的实用性要求，提出回弹和超声波组合检测的方法，利用两种方法的互补性提高检测精度。回弹法操作简便、快速，适合现场大范围初步检查；超声波法对混凝土内部缺陷敏感性高，可弥补回弹法对内部质量判断的不足。通过建立组合检测强度计算模型：

$$\sigma = \alpha v_p + \beta R - \gamma d_s + \delta$$

其中， σ 为混凝土强度， v_p 为超声波传播速度， R 为回弹值， d_s 为钢筋保护层厚度， α 、 β 、 γ 为现场校准系数， δ 为环境修正值。该模型综合考虑了两种检测技术的核心参数，同时引

入钢筋保护层厚度和环境修正项，有效降低现场干扰因素的影响。

检测流程上进行优化简化，现场检测前先对衬砌表面进行简单的处理，清除浮浆、粉尘，保证检测面平整干燥；采用分区检测的方式，将衬砌表面分成200mm×200mm的检测区，每个检测区内同时做回弹和超声波检测，保证数据的一一对应；对钢筋密集处，预先用电磁感应法快速测出钢筋的位置及保护层厚度，避开钢筋对超声波检测的干扰，提高检测的准确性^[3]。

（二）检测设备适配改进：提升现场操作便捷性与稳定性

1. 设备操作简化与集成化改进

高速公路隧道二次衬砌混凝土强度检测，传统设备由于操作复杂、功能分散而大大降低检测效率。根据工地现场操作的要求，对传统的检测设备进行改良迫在眉睫。给回弹仪加上数据存储的功能，可以实现自动保存回弹值、检测位置等信息，避免人手记录失误的现象的发生，也能够实现数据批量导出，提升了数据处理的效率。用某隧道检测项目的实例来说明，使用此功能以后数据录入时间减少超过50%。超声波检测仪改善了操作界面，简化了参数设定，增添了现场校准快捷按钮，利于检测人员迅速调节设备；将电磁感应探头与回弹仪融合为一个整体检测设备，削减了现场需携带的设备数目，操作更为便利。改进后设备重量减小30%，操作步骤减少40%，劳动强度大大降低，适合长隧道检测作业^[4-5]。

2. 现场环境自适应改进

隧道施工现场环境复杂多变，高湿度、多粉尘、温度变化大等都会对检测设备的性能以及数据的准确性造成影响。根据工地现场高湿度、多粉尘、温度波动大等特点，对设备进行环境适应性改造。在检测设备上加装简易防尘防水罩，用高强度透明材料，既能防尘防水汽进入设备内部影响性能，又不影响操作观察。在回弹仪测头上做耐磨防滑设计，使用特殊的合金材料，适应衬砌表面粗糙的现场情况；超声波探头装有自动清洁装置，检测前能快速清除探头表面的粉尘，保证信号传输。在设备上预先设置环境修正参数表，检测员根据现场温湿度、粉尘浓度等情况调用对应的修正系数，不用复杂的计算就可以使检测数据更加准确。通过检测，改进之后的设备在-5℃~50℃温度，30%~90%相对湿度的环境下，检测精度波动范围控制在±3%以内，完全符合工地现场环境需求，为极端环境下精准检测提供保障^[6]。

（三）数据处理规范：简化流程与降低经验依赖

1. 建立现场专用修正体系

传统的通用经验公式在工地上复杂的条件下无法达到检测精度的要求，因此建立现场专用修正体系就成为关键。根据工地现场混凝土工况与标准工况的不同，建立专用数据修正体系。收集不同地区、不同配合比的混凝土试块，在模拟工地养护条件下做试验，绘制回弹值、超声波速度和混凝土强度的关系曲线，得到区域专用修正公式，代替传统通用经验公式，减小工况差异带来的误差。同时整理工地常见干扰因素（碳化深度、含水率、钢筋密度）的修正系数表，检测人员根据现场实测的干扰参数，直接

对检测结果进行修正，简化数据处理过程。在该省的高速公路项目中应用体系后，检测数据与钻芯法对比的误差率控制在5%以内，数据可靠性得到提升^[7]。

2. 数据解读标准化与可视化

传统的数据解析依靠检测员的经验，带有很强的主观性，效率也低。改善现有的解析手段、标准化、可视化解析是提高检测质量的主要方法。为降低数据解读的依经验性，制订现场数据解读标准流程。明确检测数据的合格判定阈值，按照《公路工程质量检验评定标准》，结合现场实际，确定强度合格区间，超出区间的自动提示需要重点复核；采用简单直观的数据可视化方式，将检测数据导入到专用的简易软件中，可以快速得到衬砌强度分布热力图，直观显示强度薄弱处，不需要专业的数据分析知识也可以理解。该软件支持现场手机端操作，检测完成之后就可以即时生成检测报告初稿，大大缩短了报告的编制时间。某隧道检测项目使用该系统后，报告编制时间由原来的三天缩短为半天，大大加快了项目进度^[8-9]。

三、改进技术的工地现场验证与应用

（一）现场验证试验

检验该改进技术实用性与精确度的平台，选择 K2+300至 K2+600段高速公路隧道为试验场地。该隧道二次衬砌采用 C35混凝土，检测区域面积为 2500m²，分别用传统方法、改进方法进行检测，选取 30 个检测点用钻芯法对比试验。试验结果如下表所示：

表 1 不同检测技术强度评估误差对比（%）				
混凝土强度等级	传统回弹法	传统超声、波法	改进组合检测法	钻芯法对比误差
C35（现场、实测）	± 8.3	± 7.1	± 4.2	± 1.8

由表 1 可知，改进组合检测法的强度评估误差在 ±5% 以内，比传统的回弹法精度提高 25% 以上，与钻芯法相比误差小于 2%，符合工程质量评定的精度要求。改进技术检测效率比传统技术提

高了 40%，2500m² 的检测区域只需 2 名试验检测人员一天的时间就可以完成，检测周期大大缩短。

（二）工程应用案例

将改良过后的无损检测技术运用到一条长 4.0 公里的深埋式高速公路隧道二次衬砌检测中。该隧道现场环境潮湿，衬砌表面碳化程度不均匀，钢筋分布密集，二次衬砌采用 C35 混凝土。对隧道 K2+100 至 K2+800 段用改进技术做了全面检测，检测过程设备运行稳定，没受现场高湿度、粉尘环境的影响。利用强度分布热力图，快速找到 K2+450 ~ K2+500 为强度薄弱区，强度值为 28 ~ 30MPa，与现场渗漏水位置重合。对该区域做钻芯检验，实测平均强度为 29.3MPa，比改进技术检测结果误差为 ±1.7%，检测结果准确可靠。施工单位按照检测结果加固强度薄弱处来消除隐患，从而证明改进技术在工地现场是可行的。

四、结论

本文根据第三方检测单位工地现场检测需求、监理单位验检测工作实践，从检测方法、设备适配、数据处理三个方面对传统无损检测技术在现场的应用进行优化改进。采取回弹 + 超声波组合检测方案来弥补单一技术的不足，对检测设备实施操作简化和环境适应性改造，改善了现场操作的便捷性与稳定性，创建了现场专用修正体系和标准化数据解读程序，减少对经验的依赖，优化了数据处理的速度。通过工地现场的检验，改进后的检测技术误差小于 ±5%，检测效率提高 40%，操作简单，环境适应性好，完全可以达到工地现场实操的要求。

该改进技术无需复杂的设备及专业的数据分析能力，适合第三方检测单位以及监理单位现场使用，能有效提高隧道二次衬砌混凝土强度检测质量及效率。今后可以对设备便携性做进一步的优化，开发简单易用的现场数据处理小程序，扩充不同地区、不同工况下的修正系数库，使其在高速公路隧道工程现场检测时发挥更大作用，为工程质量安全提供更坚实的技术支持。

参考文献

[1] 杨朝帅,王育江,杨睿,等.隧道二次衬砌混凝土收缩开裂机理及影响因素分析[J].混凝土,2025,(04):250-256+262.
[2] 王法雁,袁斌,孟小军,等.隧道二次衬砌混凝土施工质量控制措施研究[J].工程建设和设计,2024,(22):226-228.
[3] 朱星宇,刘征,张志强,等.铁路隧道结构设计参数对二次衬砌裂缝影响规律研究[J].现代隧道技术,2023,60(05):1-10.
[4] 王倩,孟庆贺,贺中.隧道二次衬砌混凝土强度控制[C]//《施工技术》杂志社,亚太建设科技信息研究院有限公司.2020年全国土木工程施工技术交流会论文集(上册).中交一公局海威工程建设有限公司;,2020:262-265.
[5] 邵宗文.隧道二次衬砌混凝土施工问题及措施[J].交通科技与管理,2023,4(03):129-131.
[6] 宋亚波.基于回弹法的隧道混凝土强度检测研究[C]//贵州煤炭经济2024年论文选编.兰州交大工程咨询有限责任公司;,2024:108-110.
[7] 胡改军.无损检测技术在隧道工程质量检测中的应用[J].工程技术研究,2023,8(24):53-55.
[8] 史小勇.公路隧道试验检测技术[J].交通世界,2022,(13):67-68+71.
[9] 章志新.无损检测技术在高速公路施工检测中的应用研究[J].智能建筑与智慧城市,2025,(11):166-168.

侵入岩分布对地铁车站基坑支护安全性的影响

甄小博

徐州中矿岩土技术股份有限公司, 江苏 徐州 221000

DOI:10.61369/ERA.2026020010

摘 要： 伴随城市轨道交通建设向复杂地质区域推进，侵入岩分布不均引起的工程问题变得日益突出。本文以徐州地铁4号线一期工程湘江路站为研究对象，依托 详细的勘察成果，系统分析燕山期闪长斑岩侵入体的分布特性，从支护结构受力、基坑稳定性、地下水控制及施工风险四个方面，探究侵入岩分布不均匀对基坑支护设计安全的影响机理，并提出针对性的安全控制手段。研究表明：侵入岩风化程度差别大、厚度起伏明显、与周边岩层接触带充分发育，造成支护结构受力不平衡、基坑抗滑移稳定性变差、地下水渗流路径复杂，显著增加了支护设计的难度。

关 键 词： 侵入岩；分布不均；地铁基坑；支护设计；安全性

Influence of Intrusive Rock Distribution on the Safety of Subway Station Foundation Pit Support

Zhen Xiaobo

Xuzhou Zhongkuang Geotechnical Technology Co., LTD., Xuzhou, Jiangsu 221000

Abstract： As urban rail transit projects expand into complex geological zones, engineering challenges caused by uneven distribution of intrusive rocks have become increasingly prominent. This study focuses on Xiangjiang Road Station of Phase I of Xuzhou Metro Line 4, utilizing detailed survey data to systematically analyze the distribution characteristics of Yanshanian diorite intrusions. By examining four key aspects—support structure stress distribution, foundation pit stability, groundwater control, and construction risks—the research investigates the impact mechanisms of uneven intrusive rock distribution on foundation pit support design safety, and proposes targeted safety control measures. The findings indicate that significant variations in weathering intensity, pronounced thickness fluctuations, and well-developed contact zones between intrusive rocks and surrounding strata lead to uneven stress distribution in support structures, reduced anti-slide stability of foundation pits, and complex groundwater seepage pathways, substantially increasing the complexity of support design.

Keywords： intrusive rock; uneven distribution; subway foundation pit; support design; safety

引言

侵入岩是岩浆侵入地壳内部冷却凝固所形成的岩石，其岩性坚实、力学强度较大，但受岩浆侵入过程、地质构造运动等因素影响，往往呈现空间分布极不平衡的特性，表现为岩脉穿插、岩性突变、风化程度差异显著等复杂地质情况。地铁车站基坑工程属于临时性工程，但支护结构的安全程度直接关系到工程施工安全以及周边建（构）筑物和地下管线的正常运行。在侵入岩分布不均的区域，传统基于均匀地质条件的支护设计方法往往难以适应实际，容易导致支护结构选型不当、受力计算偏差，进而引发基坑边坡失稳、支护结构开裂、渗漏水等安全隐患，甚至造成工程事故。深入研究侵入岩分布不均对地铁车站基坑支护设计安全性的影响，揭示其作用机制，提出科学合理的优化设计方案，对保障复杂地质条件下地铁基坑工程安全顺利开展具有重要理论价值与工程实践意义。

（一）站点基本信息

湘江路站位于徐州市铜山区湘江路与大学路交叉口，沿大学路西侧绿化带呈南北走向布设，为地下三层单柱两跨岛式车站。车站全长160m，标准段宽度约19.9m，盾构井位置宽度为24.1m，底板埋深22.1~26.5m，顶板上方覆土厚度约3.0m。车站共设4个出入口、2组风亭，均采用明挖法施工。

（二）区域地质背景

场地坐落于山前坡洪积裙地貌单元，地表地势平缓开阔，高程介于49.22 ~ 52.50m。该区域位于F49云龙湖—罗岗断层影响带内，此断层为压扭性质的非全新活动断裂，呈NNE15°走向展布，导致场地岩石破碎，侵入岩广泛分布。区域地层以第四系人工填土、坡洪积黏土为主，下部伏存震旦系石灰岩、泥灰岩及燕山期闪长斑岩侵入体。

（三）侵入岩分布及工程地质特征

1. 分布特征

场地内的侵入岩主要为燕山期闪长斑岩，按风化程度划分为全风化（(8)-1-1）、强风化（(8)-1-2）、中风化（(8)-1-3）三个亚层，分布呈现出显著的不均一性：

平面分布：车站范围内侵入岩广泛分布，但厚度差异极大。全风化层厚度为2.80-14.00m，强风化层厚度介于1.20m和12.50m之间，中风化层厚度为3.00-23.60m，部分区域与灰岩、泥灰岩呈交错接触。

垂向分布：侵入岩自顶部向下风化程度逐渐降低。全风化层多呈粉土状、砂状；强风化层裂隙发育充分、岩体破碎杂乱；中风化层呈柱状、短柱状，局部存在软弱夹层与岩溶孔洞。

接触带特征：侵入岩与灰岩、泥灰岩的接触带宽度为5 ~ 35m，岩石破碎程度高，节理裂隙密集发育，为地下水渗流提供了便利通道。

2. 工程地质性质

侵入岩各风化层的物理力学特性差异显著，各项具体指标见表1。全风化闪长斑岩强度偏低，压缩性中等，天然状态下含水量为26.1%，孔隙比为0.870，黏聚力为10kPa，内摩擦角为25°；强风化闪长斑岩归类为极软岩，岩体基本质量等级为Ⅴ级，天然状态下密度为2.46g/cm³，黏聚力为90kPa，内摩擦角为25°；中风化闪长斑岩属于软岩至较硬岩范畴，岩体基本质量等级为Ⅲ~Ⅳ级，饱和状态下单轴抗压强度达16.30MPa，弹性模量为7.58GPa，泊松比为0.33，力学性质较好，但分布均匀性欠佳（如表1）。

表1 侵入岩各风化层物理力学性质指标

岩土层编号	岩土层名称	天然含水量 (%)	天然密度 (g/cm ³)	孔隙比	黏聚力 (kPa)	内摩擦角 (°)
(8)-1-1	全风化闪长斑岩	26.1	—	0.870	10	25
(8)-1-2	强风化闪长斑岩	—	2.46	—	90	25
(8)-1-3	中风化闪长斑岩	—	2.59	—	—	—

一、侵入岩分布不均衡对基坑支护设计安全性的影响

（一）支护结构受力不均风险

1. 侧向土压力分布差异

侵入岩各风化层物理力学性质差异极为显著，全风化层为松散介质，强风化层为破碎岩体，中风化层为相对完整岩石，导致基坑侧壁侧向土压力分布极不均匀。在全风化闪长斑岩分布区域，侧向土压力接近松散土体计算值；而在中风化闪长斑岩区域，侧向压力多表现为岩体侧向压力，数值远大于土体压力^[1]。

侵入岩厚度起伏剧烈，同一断面内不同位置岩性可能发生突变，造成支护结构不同部位承受的侧向压力差异达3 ~ 5倍，引发支护结构局部应力集中。湘江路站 K3+120至K3+190里程段，基坑侧壁同时存在强风化闪长斑岩、破碎状石灰岩及中风化闪长斑岩，侧向压力分布杂乱，易导致支护桩产生不均匀弯曲变形。

2. 支护结构内力畸变

钻孔灌注桩、咬合桩等基坑支护结构，通常适配均一地质条件下的受力模式。由于侵入岩分布不均，支护结构嵌入层位差异较大，部分支护桩嵌入中风化闪长斑岩，承载力较高、变形较小；部分桩体打入强风化层或接触带破碎岩体中，承载力较低、变形量偏大，进而引发支护结构内力异常畸变。

侵入岩与周边岩层接触带存在软弱夹层，支护桩穿越该区域时，桩侧摩阻力急剧降低，单桩承载力不达标，易引发桩体剪切破坏或过量沉降。检测结果表明，接触带区域支护桩的侧摩阻力，较均质中风化岩区域减少40% ~ 60%，给支护结构安全埋下严重隐患。

（二）基坑稳定性降低

1. 抗滑移稳定性不足

侵入岩分布不均导致基坑边坡岩土体力学性质差异显著，形

成潜在滑动面。全风化闪长斑岩与强风化层的接触面、侵入岩与灰岩的接触带均为软弱结构面，其抗剪强度明显低于均质岩层，易成为控制边坡滑移的关键区域。

湘江路站北端头井周边区域，侵入岩厚度从8m急剧增至23m，边坡内部形成多层潜在滑动面，抗滑移安全系数仅为1.15 ~ 1.25，低于规范要求的1.30。侵入岩风化程度不均引发的不均匀沉降，进一步提高了边坡失稳的风险。

2. 坑底隆起风险加剧

侵入岩分布不均造成坑底持力层承载力差异较大，部分区域坑底位于全风化闪长斑岩或接触带破碎岩体中，承载力不足，基坑开挖后极易产生坑底隆起现象。调查结果显示，全风化闪长斑岩地基承载力特征值仅为300kPa，而中风化岩地基承载力特征值可达1200kPa，这种差异导致坑底不同区域隆起量存在明显区别^[2]。

侵入岩裂隙发育，为地下水提供了良好的渗流通道，地下水渗流产生的动水压力进一步降低坑底土体有效应力，加剧坑底隆起风险。湘江路站基坑涌水量经计算为3890m³/d，强透水区域坑底隆起量可达15 ~ 25mm，超出规范允许范围。

（三）地下水控制难度加大

1. 渗流路径复杂

侵入岩的风化裂隙与岩溶裂隙相互连通，形成复杂的地下水渗流网络。全风化及强风化闪长斑岩渗透性较强，渗透系数为1.0m/d；中风化岩渗透系数相对较小，这种差异导致地下水渗流呈现显著的非均匀性。

侵入岩与灰岩接触部位岩溶发育良好，存在大量溶蚀孔洞和裂隙，成为地下水汇聚区和强径流区。接触带区域钻孔频繁出现漏浆现象，抽水试验结果显示，该区域渗透系数达1.62 ~ 2.94m/d，地下水具有承压性，水头高度在1.80 ~ 5.20m之间，易引发

基坑涌水、突泥事故。

2. 支护结构抗渗性能挑战

由于侵入岩分布不均,支护结构止水帷幕施工难度增加。在强风化和全风化侵入岩区域,土体松散、裂隙发育,止水帷幕易出现搭接不紧密、孔洞等质量缺陷;在中风化岩石区域,岩石硬度较高,钻孔难度大,易造成止水帷幕深度不足,难以有效阻断地下水渗流路径。

湘江路站2号出入口周边区域,因侵入岩厚度急剧突变,止水帷幕施工期间出现多处渗漏点,地下水沿渗漏通道涌入基坑,导致基坑局部积水,危及施工安全。

二、安全控制措施

(一) 优化支护结构设计

1. 差异化支护方案

结合侵入岩分布特性,采用差异化支护设计:中风化闪长斑岩区域采用桩径 $\Phi 1200\text{mm}$ 、间距 1800mm 的钻孔灌注桩,桩端嵌入坑底以下中风化岩深度不小于 2.5m ;强风化和全风化区域采用 $\Phi 1200\text{mm} @ 950\text{mm}$ 套管咬合桩,提升支护结构刚度与止水效果;接触带区域额外增设三轴搅拌桩止水帷幕,桩长需深入稳定隔水层不小于 3m 。

针对 $K3+120 \sim K3+190$ 等岩性突变地段,采用刚度渐变的支护结构设计,通过调整支护桩间距、配筋率及支撑布置方式,弱化应力集中现象;在接触带等潜在滑动区域,设置抗滑桩或采取注浆加固措施,提高边坡抗滑移稳定性。

2. 强化抗浮与抗渗设计

结合侵入岩分布不均引起的地下水渗流特点,采用“坑内集水井明排+基岩降水井降水”的复合式排水方案。在强透水区域加密布设降水井,井间距为 $8 \sim 10\text{m}$,降水井深度需进入中风化岩 5m 以上;在岩溶发育区域,采用注浆封堵方式填充溶蚀孔洞裂隙,阻断地下水渗流路径^[3]。

抗浮设计采用围护桩兼作抗浮桩的方案,抗浮桩需嵌入中风化闪长斑岩不小于 5m ,同时增加坑顶覆土厚度,提高结构抗浮稳定性。抗浮设防水位取场地坪标高下 0.50m ,施工时水位控制在场地坪标高下 1.00m 。

(二) 加强超前地质预报与勘察

1. 补充专项勘察

在初步勘察基础上,针对侵入岩分布不均区域开展专项勘察工作,采用跨孔电磁波CT测试、声波测试等物探方法,查明侵入岩的分布范围、厚度变化情况及接触带位置;在各支护桩点位布

置超前钻探孔,孔深比桩底深 $3 \sim 5\text{m}$,探明桩位下方岩石特性、岩溶发育及地下水情况。

湘江路站补充专项勘察共完成13对跨孔CT测试、41个超前钻探孔,进一步细化了侵入岩分布规律,为支护设计优化提供了精准的地质资料。

2. 动态地质预报

施工期间采用“超前钻探+地质雷达+红外探测”综合地质预报方法。基坑开挖前,通过超前钻探探明前方 30m 范围内岩性变化情况;开挖过程中,运用地质雷达实时探测边坡内部裂隙与岩溶发育情况;针对地下水富集区域,采用红外探测技术预判涌水隐患。

建立地质预报信息反馈机制,每3天上报一次地质预报报告,若发现异常情况,及时调整支护设计方案。

(三) 采用动态设计与信息化施工

1. 动态设计调整

基于超前地质预报结果和施工监测数据,对支护设计进行动态调整。当发现侵入岩厚度超出勘察预估范围时,及时增加支护桩嵌入深度;若监测数据显示支护结构变形速率超过预警值(2mm/d),则加密支撑布置或采取注浆加固措施。

建立支护设计动态调整流程:施工监测数据收集→地质条件核验→安全有效性评估→设计方案动态调整→施工方案优化,确保支护结构始终与地质条件相匹配^[4]。

2. 全周期信息化监测

制定覆盖基坑施工全过程的监测方案,监测内容包括支护结构变形、边坡位移、地下水位、周边建筑物沉降等。支护桩水平位移监测频率设定为1次/天,基坑开挖期间加密至2次/天;采用自动监测设备对地下水位进行监测,数据实时传输至监控中心。

设定多级预警值,当监测数据达到预警值的80%时,发出预警并加密监测频次;达到预警值后,立即停止施工并采取应急加固措施。湘江路站施工期间共发出预警3次,通过及时调整支护参数,有效避免了安全事故的发生。

三、结束语

侵入岩分布不均对地铁车站基坑支护设计安全性的挑战具有复杂性与普遍性,精准把握其影响机制是保障工程安全的核心前提。本文结合徐州地铁4号线湘江路站实际工程案例,为解决此类复杂地质条件下的工程难题提供了可行路径。随着研究的不断深入与技术的持续创新,必将进一步提升侵入岩分布区基坑支护工程的安全管控水平,为城市轨道交通建设高质量推进筑牢地质安全屏障,助力城市地下空间开发利用朝着更安全、高效、经济的方向发展。

参考文献

- [1] 穆保岗,龚湘源,陶津,张勇. 地铁车站基坑分步开挖空间特征的实测及数值分析[J]. 特种结构, 2020, 37(1): 40-47.
- [2] 孙超,辛庆飞,孙志成,吴宇飞,周浩,徐东明,杨恩泽. 土岩复合地层地铁车站深基坑锚索预应力损失规律及变形控制研究[J]. 城市轨道交通研究, 2025, 28(6): 87-93.
- [3] 刘江. 土岩组合地层盖挖车站基坑吊脚桩支护适用性研究[J]. 铁道建筑, 2016, 56(5): 120-125.
- [4] 孙涛,李浩,吕显州,宋高锐,李嘉诚,张传军. 节理带纵向贯穿异质地层地铁车站施工响应与控制分析[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2023, 48(2): 288-299.

智能化技术在铁路通信网络干扰抑制中的应用研究

王平

国能朔黄铁路发展有限责任公司，北京 100080

DOI:10.61369/ERA.2026020012

摘 要： 铁路通信网络作为铁路运输调度、行车控制及安全保障的核心支撑，其运行稳定性直接关乎铁路运输系统的高效与安全。干扰问题是长期制约铁路通信网络质量提升的关键瓶颈，传统干扰抑制手段因适应性差、响应滞后等缺陷，难以满足复杂多变的铁路通信场景需求。研究表明，智能化技术可通过精准识别干扰、动态调整抑制策略，显著提升铁路通信网络的抗干扰能力，为铁路通信系统的高质量运行提供有力支撑。

关 键 词： 智能化技术；铁路通信网络；干扰抑制；机器学习；自适应滤波

Application of Intelligent Technology in Railway Communication Network Interference Suppression

Wang Ping

CHN ENERGY Shuohuang Railway Development Co., LTD. Beijing 100080

Abstract： As the core infrastructure for railway transportation scheduling, train control, and safety assurance, the operational stability of railway communication networks directly impacts the efficiency and safety of the entire railway system. Interference has long been a critical bottleneck hindering the quality improvement of railway communication networks. Traditional interference suppression methods, plagued by poor adaptability and delayed responses, struggle to meet the demands of complex and dynamic railway communication scenarios. Research indicates that intelligent technologies can significantly enhance the anti-interference capabilities of railway communication networks by accurately identifying interference and dynamically adjusting suppression strategies, thereby providing robust support for high-quality operations in railway communication systems.

Keywords： intelligent technology; railway communication network; interference suppression; machine learning; adaptive filtering

引言

铁路通信网络是保障列车运行调度、行车安全监控、旅客服务等核心业务开展的关键基础设施，其通信质量直接决定铁路运输系统的可靠性与效率。随着高速铁路、重载铁路、智能铁路的快速发展，铁路通信网络的传输速率、接入设备数量及业务复杂度大幅提升，与此同时，干扰问题也日益凸显。本文以智能化技术在铁路通信网络干扰抑制中的应用为研究核心，首先剖析铁路通信网络干扰的主要类型及成因，明确干扰抑制的核心诉求；随后深入探讨机器学习、深度学习、智能认知无线电及智能自适应滤波等关键智能化技术的应用机理，结合具体应用场景阐述技术落地路径；最后分析智能化干扰抑制系统的构建要点及应用成效^[1]。铁路通信场景中，干扰源不仅包括外部的民用通信信号、工业电磁辐射，还涵盖内部的列车牵引系统、信号控制系统等设备产生的电磁干扰，这些干扰会导致通信信号衰减、误码率升高，严重时甚至引发通信中断，威胁铁路运输安全。传统干扰抑制方法如固定滤波、频率规避等，多基于预设场景设计，难以适应干扰源类型多变、强度动态波动的复杂环境，在干扰识别精度和抑制实时性上存在明显不足。近年来，人工智能、大数据等智能化技术的突破为铁路通信网络干扰抑制提供了新的解决思路，其具备的自适应学习、动态决策能力可实现对干扰的精准感知与高效抑制。因此，深入研究智能化技术在铁路通信网络干扰抑制中的应用，破解传统方法瓶颈，对于提升铁路通信网络稳定性、保障铁路运输安全具有重要的理论与实践意义^[2]。

一、铁路通信网络干扰类型及成因分析

（一）内部干扰及成因

内部干扰是指铁路系统自身设备运行过程中产生的电磁辐射或信号泄漏对通信网络造成的干扰，是铁路通信网络最主要的干扰来源之一，具有干扰源位置固定、干扰强度与设备运行状态强相关的特点。其主要成因包括以下两方面：一是列车牵引系统产生的干扰，列车牵引变流器在工作过程中会产生大量谐波电流，这些谐波通过牵引网传导并对外辐射电磁能量，其频率范围覆盖铁路通信常用的450MHz、800MHz等频段，极易对列车与地面之间的无线通信造成干扰；二是信号控制系统与通信系统的频率耦合干扰，铁路信号控制系统中的轨道电路、列控设备等运行时会产生特定频率的信号，当这些信号频率与通信系统频段接近时，会通过电磁耦合进入通信链路，导致通信信号信噪比下降。

（二）外部干扰及成因

外部干扰是指铁路系统之外的电磁环境或设备产生的干扰，其具有干扰源分布分散、类型多变、强度波动大的特点，给干扰抑制带来较大难度。主要成因包括：一是民用通信系统的同频或邻频干扰，随着5G、4G等民用通信网络的广泛覆盖，其基站信号可能与铁路通信网络（如GSM-R、LTE-R、5G-R）使用的频段产生重叠或邻频干扰，尤其是在铁路沿线城镇区域，民用基站密度较高，干扰问题更为突出；二是工业电磁干扰，铁路沿线的工厂、变电站等工业设施运行时会产生强电磁辐射，如变电站的高压设备会产生宽频段的电磁噪声，工业电机的启停会产生脉冲干扰，这些干扰会通过空间传播进入铁路通信接收设备；三是自然干扰，如雷电活动产生的电磁脉冲、大气噪声等，虽然此类干扰具有随机性，但强度较大时会对通信链路造成短暂中断^[4]。

（三）传输链路干扰及成因

传输链路干扰是指信号在传输过程中因链路损耗、环境变化等因素产生的干扰，主要影响通信信号的传输质量。其成因主要包括：一是多径干扰，在铁路场景中，通信信号会经过列车车体、轨道、沿线建筑物等物体的反射、散射，形成多径信号，多径信号之间的叠加会导致接收信号幅度和相位失真，即多径衰落；二是链路衰减与噪声累积，铁路通信链路涵盖无线传输和有线传输部分，无线传输受距离、地形影响会产生路径损耗，有线传输受线缆损耗、接头损耗影响会导致信号衰减，同时传输链路中的电子设备会产生热噪声，衰减的信号与噪声叠加后会降低通信质量；三是切换干扰，在列车高速运行过程中，通信终端需要在不同基站或接入点之间进行切换，切换过程中可能出现信号中断、重叠区域干扰等问题，影响通信连续性^[5]。

二、智能化技术在干扰抑制中的核心应用机理

（一）机器学习技术在干扰识别中的应用机理

干扰识别是干扰抑制的前提，机器学习技术通过对通信信号特征的提取与学习，实现对干扰类型、强度及来源的精准判断，其核心流程包括特征工程、模型训练与推理预测三个阶段。在特

征工程阶段，先采集铁路通信网络中的接收信号数据，包括正常通信信号、各种已知干扰信号数据，然后获取信号的时域特征，如峰值、均值、方差、脉冲宽度；频域特征，如频谱峰值、中心频率、带宽、谐波分量；变换域特征，如小波变换后的低频系数、高频系数，这些特征可以有效区分不同类型的干扰。例如，牵引系统产生的谐波干扰在频域上为特定频率的峰值，而民用通信的同频干扰在频域上表现为与通信信号频段重叠的连续谱。在模型训练阶段，将提取的特征数据划分为训练集和测试集，使用适当的机器学习算法构建模型并训练^[6]。针对铁路通信干扰识别场景，常用的算法有SVM，决策树，随机森林及朴素贝叶斯等。其中，支持向量机通过寻找最优分类超平面，实现对干扰类型的分类，适合小样本数据场景；随机森林通过集成多棵决策树，能够有效降低过拟合风险，提高对复杂干扰特征的识别精度。在训练过程中，通过调整模型参数如SVM的核函数参数，随机森林的树数目优化模型性能，保证模型在测试集上的识别准确率达到预设要求。推理预测阶段，将实时采集的通信信号特征输入训练好的模型中，模型输出干扰类型，强度等识别结果，为后续抑制策略的制定提供依据。与传统的基于阈值的识别方法相比，机器学习技术能够适应干扰特征的动态变化，即使出现未知干扰，也可以通过增量学习的方式更新模型，提升识别能力^[7]。

（二）深度学习技术在干扰预测与动态抑制中的应用机理

铁路通信网络中的干扰强度、出现时间具有一定的规律性，如列车牵引系统干扰与列车运行速度、负载相关，民用通信干扰与时段（如上下班高峰）相关。深度学习技术凭借其强大的特征自动提取和时序预测能力，可实现对干扰的精准预测，并基于预测结果动态调整抑制策略。在干扰预测方面，常用的深度学习模型包括循环神经网络（RNN）、长短期记忆网络（LSTM）及门控循环单元（GRU）等，这些模型能够捕捉干扰信号的时序依赖性。具体应用中，首先采集历史干扰数据及相关影响因素数据（如列车运行数据、民用通信基站负载数据、时段数据等），将其构建为时序数据集；然后构建LSTM模型，模型通过输入门、遗忘门和输出门的协同作用，有效处理长序列数据中的依赖关系，避免传统RNN的梯度消失问题；通过历史数据训练模型后，输入当前时段的相关数据，模型可预测未来一段时间内干扰的类型、强度及出现概率。在动态抑制方面，结合预测结果，采用深度学习驱动自适应抑制策略，例如，若预测到某时段牵引系统干扰强度将增大，可通过深度学习模型优化自适应滤波器的参数，提前增强对该频段干扰的抑制能力；对于预测到的同频干扰，可动态调整通信信道或功率分配方案，规避干扰影响^[8]。

（三）智能认知无线电技术在频谱自适应中的应用机理

频谱资源紧张及同频、邻频干扰是铁路通信网络的主要问题之一，智能认知无线电技术通过“感知-决策-调整”的闭环机制，实现对频谱资源的动态感知与自适应分配，从源头规避干扰。其核心机理包括频谱感知、频谱决策与频谱切换三个环节。频谱感知环节采用智能化感知算法（如基于深度学习的频谱感知算法）实时检测铁路通信频段及周边频段的频谱占用情况，识别空闲频谱和受干扰频谱。与传统的能量检测、循环平稳检测方法

相比，深度学习感知算法能够在低信噪比环境下精准区分噪声和弱干扰信号，提高频谱感知的准确性。频谱决策环节基于频谱感知结果、通信业务需求（如实时调度业务对时延、可靠性的要求）及干扰情况，通过强化学习等智能算法制定最优的频谱分配策略。强化学习将频谱分配过程建模为马尔可夫决策过程，智能体（认知无线电节点）通过与频谱环境的交互，不断学习不同频谱选择动作对应的奖励（如通信质量提升、干扰降低），最终形成最优的频谱选择策略。例如，当铁路通信当前使用的频段受到民用基站干扰时，频谱决策模块会选择相邻的空闲频段，并计算最优的传输功率，确保通信质量的同时避免对其他频段造成干扰。频谱切换环节在决策结果的指导下，实现通信终端与基站之间的平滑频谱切换，通过预测切换时机和优化切换流程，降低切换过程中的干扰和通信中断风险^[9]。

三、智能化干扰抑制系统的构建与应用实践

（一）智能化干扰抑制系统的整体架构

智能化干扰抑制系统采用“分层架构+闭环控制”的设计思路，从上至下分为感知层、智能处理层、执行层及应用层四个层次。感知层是系统的数据来源，由分布在铁路沿线的基站、列车通信终端、轨道旁传感器及频谱监测设备组成，负责实时采集通信信号数据、频谱数据、列车运行数据及环境数据（如温度、湿度、地形），并通过数据传输链路将采集到的数据上传至智能处理层。感知层的关键在于数据采集的全面性和实时性，通过多设备协同采集实现对干扰信号的全方位监测。智能处理层是系统的核心，集成数据预处理模块、干扰识别模块、干扰预测模块及策略决策模块。数据预处理模块对感知层上传的数据进行去噪、归一化、数据融合等处理，提升数据质量；干扰识别模块采用机器学习模型对预处理后的数据进行分析，识别干扰类型、强度及来源；干扰预测模块采用深度学习模型结合历史数据和实时数据，预测未来干扰变化趋势；策略决策模块根据干扰识别和预测

结果，结合通信业务需求，制定最优的干扰抑制策略，如频谱调整、功率优化、滤波器参数调整等^[10]。

（二）典型场景下的应用实践

在铁路 LTE-R 通信干扰抑制场景中，系统针对列车牵引系统产生的谐波干扰和民用 4G 基站的邻频干扰问题，开展应用实践。感知层通过列车上的通信终端采集 LTE-R 接收信号数据，通过轨道旁的频谱监测设备采集沿线频谱数据，同时采集列车运行速度、牵引功率等数据；智能处理层的干扰识别模块采用随机森林模型，通过提取信号的频域峰值、谐波数量等特征，精准识别牵引谐波干扰和民用 4G 邻频干扰，识别准确率达到 95% 以上；干扰预测模块采用 LSTM 模型，结合列车运行计划和历史干扰数据，预测列车在不同区段的干扰强度，预测误差控制在 10% 以内；策略决策模块根据预测结果，针对牵引谐波干扰，指令执行层的智能自适应滤波器调整参数，生成抵消信号实现干扰抵消；针对民用 4G 邻频干扰，指令基站的频谱调整模块动态调整传输功率，降低邻频干扰影响。应用结果表明，该系统可使 GSM-R 通信信号的误码率从原来的 10^{-3} 降低至 10^{-5} ，通信质量显著提升。

四、结论

铁路通信网络干扰抑制是保障铁路运输安全的关键技术环节，传统方法难以适应复杂多变的干扰环境。本文研究表明，机器学习、深度学习、智能认知无线电及智能自适应滤波等智能化技术，通过精准识别干扰、动态预测干扰、自适应调整抑制策略，能够有效提升铁路通信网络的抗干扰能力。通过构建“感知-智能处理-执行-应用”的分层智能化干扰抑制系统，在铁路 LTE-R 通信、列控与通信系统耦合干扰等场景中取得了显著应用成效，降低了通信误码率和干扰强度。同时，本文也明确了当前技术应用面临的数据质量、实时性与兼容性等挑战，提出了轻量化算法、联邦学习与多技术融合等发展方向。

参考文献

- [1] 樊金龙. 无线网络高效协作 MIMO 在铁路通信领域的应用 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2025, 22(11): 59-65+90.
- [2] 安海星. 信息化铁路建设中通信网络的完善探讨 [J]. 数字通信世界, 2025, (09): 42-44.
- [3] 张雪. 铁路通信网中网络安全技术的应用实践 [J]. 网络安全技术与应用, 2025, (09): 105-107.
- [4] 叶晓沛. 铁路通信系统中 GSM-R 网络干扰问题分析与解决策略 [J]. 价值工程, 2025, 44(20): 82-84.
- [5] 王俊, 廖俊. 基于本地部署人工智能模型的 GSM-R 网络干扰识别与优化研究 [J]. 铁道通信信号, 2025, 61(07): 1-7.
- [6] 袁张付, 宋宗莹, 王兴中, 周一鸣. 基于深度神经网络的铁路通信系统频谱感知方法 [J]. 电信科学, 2025, 41(09): 108-118.
- [7] 陈枫. 绿色铁路通信设备设计与可持续发展研究 [J]. 中国设备工程, 2025, (08): 116-118.
- [8] 韩昱志. 基于图布局技术的铁路车站通信网图可视化系统设计研究 [J]. 铁道通信信号, 1-7.
- [9] 王文斌, 明嘉辉, 郝小光, 郭瑞彬, 王兴中, 权伟. 新一代铁路通信网络技术的应用现状与展望分析 [J]. 无线电通信技术, 2025, 51(02): 224-231.
- [10] 马腾飞. 5G 技术在高速铁路通信中的应用 [J]. 大众标准化, 2025, (01): 146-148.

EPC 总承包模式下商务造价的协同管理机制研究 ——基于供应链整合视角

尹育峰

广东碧越装饰工程有限公司, 广东 广州 510407

DOI:10.61369/ERA.2026020014

摘 要 : EPC 总承包模式作为工程建设领域主流的承包方式, 其“设计 – 采购 – 施工”一体化特性对商务造价管理提出了更高协同要求。供应链整合视角下, EPC 项目商务造价管理需打破各参与方信息壁垒与利益割据, 通过资源整合、流程协同与信息共享实现造价精准管控。本文基于交易成本理论与协同管理理论, 剖析 EPC 总承包模式下商务造价协同管理的核心逻辑与现存困境, 从供应链整合的战略、战术、操作三个维度构建“目标协同 – 流程协同 – 信息协同 – 利益协同”四位一体的协同管理机制, 结合理论推演验证机制的可行性, 为提升 EPC 项目商务造价管理效率、降低项目成本提供理论支撑。

关 键 词 : EPC 总承包模式; 商务造价; 协同管理; 供应链整合; 交易成本理论

Research on the Collaborative Management Mechanism of Business Cost in EPC General Contracting Mode – Based on the Perspective of Supply Chain Integration

Yin Yufeng

Guangdong Biyue Decoration Engineering Co., Ltd. Guangzhou, Guangdong 510407

Abstract : As the predominant contracting model in engineering construction, the EPC (Engineering, Procurement, and Construction) general contracting approach, with its integrated "design–purchase–construction" framework, imposes heightened demands on collaborative cost management. From a supply chain integration perspective, effective cost management in EPC projects requires dismantling information silos and fragmented interests among stakeholders, achieving precise cost control through resource consolidation, process coordination, and information sharing. Grounded in transaction cost theory and collaborative management principles, this study examines the core logic and challenges of cost management collaboration under the EPC model. It proposes a four–dimensional collaborative management mechanism encompassing "goal alignment, process coordination, information synergy, and interest alignment" across strategic, tactical, and operational dimensions of supply chain integration. The feasibility of this mechanism is validated through theoretical analysis, providing a theoretical foundation for enhancing cost management efficiency and reducing project costs in EPC projects.

Keywords : EPC general contracting mode; business cost; collaborative management; supply chain integration; transaction cost theory

引言

随着《“十四五”建筑业发展规划》提出“推广工程总承包模式, 提升工程建设质量和效益”, EPC 总承包模式在市政、轨道交通等领域应用比例持续提升。与传统模式相比, EPC 模式通过“设计 – 采购 – 施工”一体化缩短周期、降低业主管理难度, 但也使总承包商承担更大造价管控风险^[1]。商务造价管理作为核心环节, 直接决定项目盈利水平, 但当前普遍存在设计与施工造价脱节、采购成本失控、参与方协同意愿不足等问题, 导致造价超支频发。

供应链整合理论强调通过资源整合、流程优化与信息共享提升运营效率。EPC 项目供应链涵盖设计、供应、施工等多主体, 其协同程度直接影响造价管理效果^[2]。从供应链整合视角构建协同管理机制, 可破解信息壁垒与利益冲突, 但现有研究多聚焦单一环节管控, 缺乏全链条协同机制研究, 因此本文研究具有重要理论与实践意义^[3]。

一、核心概念界定与理论基础

（一）核心概念界定

1.EPC 总承包模式

EPC 总承包模式即设计、采购、施工一体化模式，总承包商按合同承担从设计到竣工验收全过程服务，并对质量、安全、工期、造价全面负责。其核心特征包括：责任主体单一，降低业主协调成本；各环节高度融合，实现设计优化与造价管控前置；风险集中性，总承包商承担设计变更、价格波动等多重风险，对综合管理能力要求更高。

2. 商务造价协同管理

EPC 商务造价协同管理是以总承包商为核心，整合供应链各参与方资源，通过机制构建、流程优化与信息共享，实现项目全生命周期造价精准预测、动态控制与优化的管理活动。核心目标是打破“信息孤岛”与“利益本位”，实现造价管理从“分散控制”向“协同管控”转变，在保障质量与工期前提下降低成本。

3. 供应链整合

供应链整合是 EPC 总承包商通过战略协同、流程优化、信息共享等方式，将上下游参与方整合为有机整体的活动，实现资源优化配置与效益最大化。其核心维度包括：战略整合（建立长期合作与共识）、战术整合（优化流程衔接）、操作整合（实现数据实时共享）^[4]。

（二）理论基础

1. 交易成本理论

交易成本理论（科斯提出，威廉姆森完善）认为市场交易存在搜索、谈判、监督等成本，受资产专用性、不确定性、交易频率影响。EPC 项目具有资产专用性高、不确定性强、交易频繁等特征，供应链整合可通过长期合作降谈判成本、信息共享降风险成本、流程协同降监督成本，实现交易成本最小化。

2. 协同管理理论

协同管理理论（哈肯提出）核心是系统内子系统通过协作实现“1+1>2”效应。EPC 造价管理由设计、采购、施工造价等子系统构成，各子系统高度耦合：设计估算影响采购预算，采购成本影响施工执行。构建协同机制可实现子系统良性互动，避免脱节问题，提升整体效益^[5]。

3. 资源依赖理论

资源依赖理论认为组织依赖外部资源生存发展，合作可实现资源互补与风险降低。EPC 总承包商在设计技术、专项设备等方面依赖供应链支持，通过整合建立稳定合作，实现技术、信息等资源共享，既保障造价协同，又提升各方竞争力，形成共赢。

二、EPC 总承包模式下商务造价协同管理的现存困境——基于供应链视角

（一）供应链战略协同缺失，造价管理目标脱节

当前多数 EPC 项目供应链各参与方以“短期合作”为主，缺乏长期战略共识，导致造价管理目标严重脱节。各主体利益诉

求差异显著：业主聚焦总投资控制与投资回报，总承包商追求盈利最大化，设计单位侧重技术可行性与创新性而轻造价，供应商以自身利润为核心倾向提价，分包商追求施工产值而忽视成本节约。“利益本位”直接弱化协同意愿：设计单位可能选用高成本方案规避风险，未开展造价优化协同；供应商可能虚报价格或降质提利，推高采购成本；分包商可能通过增项、变更提产值，导致施工超支。加之短期合作模式下，项目结束后合作终止，造价管理经验难以积累传承，同类问题在不同项目中反复出现^[6]。

（二）供应链流程协同不畅，造价管控环节断裂

EPC “设计－采购－施工”一体化优势未充分释放，流程协同梗阻导致造价管控链条断裂，形成多节点失控。设计与采购协同缺失最突出：设计阶段聚焦技术可行性，未对接市场行情选用稀缺高价材料，后续需变更设计产生返工与工期成本；采购未提前介入设计评审，无法提供实时价格数据，致设计估算与实际采购成本偏差超 10%。采购与施工衔接失衡：采购计划仅依图纸制定，未联动施工进度动态调整，供应滞后引发窝工增加人工成本，过量采购导致材料积压占用资金并产生损耗。设计与施工脱节亦关键：设计人员未深入现场调研，方案存工艺冲突等缺陷，某轨道交通项目因深基坑支护设计适配性不足，变更后造价超支 15%。各环节脱节相互传导，最终形成“设计算不准、采购控不住、施工超预算”的恶性闭环。

（三）供应链信息协同不足，造价数据壁垒严重

信息共享不足形成“信息孤岛”：一是共享意愿低，各方因利益顾虑隐瞒核心信息（设计藏造价依据、供应瞒成本波动、施工隐成本数据）；二是渠道单一，依赖会议、邮件传递信息，导致签证漏算、价格信息滞后等问题；三是标准不一，CAD、广联达、ERP 等系统数据无法互通，人工录入增加成本与错误率，影响造价动态管控。

（四）供应链利益协同失衡，协同激励约束缺失

利益协同失衡缺乏动力：一是分配不合理，总承包商主导利益分配，将风险过度转移给设计、供应、施工方；二是风险共担缺失，价格波动、设计变更等风险多由单一主体承担，风险发生时相互推诿；三是激励约束不足，对造价优化无奖励、对违约行为处罚轻，协同管理流于形式。

三、供应链整合视角下 EPC 总承包模式商务造价协同管理机制构建

基于供应链整合的战略、战术、操作三个维度，结合交易成本理论、协同管理理论与资源依赖理论，构建“目标协同－流程协同－信息协同－利益协同”四位一体的商务造价协同管理机制，实现 EPC 项目商务造价全流程协同管控。

（一）构建战略层目标协同机制，奠定协同管理基础

目标协同是基础，通过战略整合形成“利益共同体”：一是建长期合作关系，总承包商筛选优质伙伴建战略库，签长期协议避免短期利益本位，如中建与数百家设计、供应方合作实现目标协同；二是定统一目标体系，以总造价控制为核心，分解业主

(控投资)、总承包商(控超支)、设计(控估算)、供应(优价格)、施工(控成本)等分层目标;三是建沟通机制,定期开协同会议复盘目标完成情况,及时整改偏差。

(二) 构建战术层流程协同机制, 优化造价管控环节

流程协同是核心,通过战术整合实现全流程衔接:一是设计-采购协同(EP一体化),成立含设计、采购、造价人员的协同小组,采购提供市场数据支撑限额设计,设计明确采购标准,某核电项目据此降设备采购成本8%;二是采购-施工协同(PC一体化),建进度联动机制,施工提需求清单、采购定供应计划,某高速项目据此降积压成本12%、窝工成本15%;三是设计-施工协同(EC一体化),设计深入现场调研,施工反馈现场问题,减少变更超支^[7]。

(三) 构建操作层信息协同机制, 打破数据壁垒

信息协同是保障,通过操作整合打破数据壁垒:一是搭一体化平台,以总承包商为核心整合设计、采购、施工等系统,设设计造价、采购造价、施工造价等模块,中铁建平台实现数据共享后管控效率提升20%;二是定统一标准,总承包商牵头制定材料编码、造价计算规则等标准,建信息审核机制保障数据质量;三是保信息安全,设分级权限+加密技术,设计仅访设计数据、供应仅访采购数据,提升共享意愿。

(四) 构建保障层利益协同机制, 强化协同动力支撑

利益协同是动力,通过机制设计激发意愿:一是公平分配,按贡献度(AHP法确权:总承包商40%、设计20%、供应25%、施工15%)分配利益,某房建设计优化降本10%后获5%分成;二是风险共担,合同约定风险比例(材料波动:总包30%、供应70%;设计变更:总包40%、设计60%),提5%-10%风险准备金;三是激励约束,奖优化方案与优质供应,罚劣质材料与偷工减料,淘汰多次违约伙伴^[8]。

(五) 组织保障: 建立跨主体协同管理团队

由总承包商牵头,联合设计单位、供应商、分包商、业主等成立跨主体协同管理团队,明确团队职责与分工:总承包商担任团队组长,负责整体协调与决策;设计单位负责设计造价优化与技术支持;采购部门负责采购成本控制与供应商管理;施工部门负责施工造价控制与进度管理;业主负责投资监督与目标审核。团队定期召开协同会议,解决机制运行中的问题,确保各环节协

同顺畅。同时,设立商务造价协同管理专员,负责日常数据收集、信息传递与进度跟踪,提升协同管理效率。

(六) 技术保障: 引入数字化造价管理工具

借助BIM技术、大数据、人工智能等数字化工具,提升信息协同与流程协同效率^[9]。一是应用BIM技术实现三维可视化造价管理,将设计图纸转化为BIM模型,实现设计方案的造价实时测算与优化;施工阶段,通过BIM模型模拟施工过程,提前发现施工与设计的冲突,减少设计变更;采购阶段,通过BIM模型精准统计材料用量,避免材料浪费。如某桥梁EPC项目中,应用BIM技术使设计变更减少30%,材料浪费率降低15%。二是利用大数据技术进行造价预测与风险预警,收集历史项目造价数据、材料价格波动数据、设计变更数据等,建立造价大数据分析平台,通过数据挖掘预测材料价格走势与造价超支风险,提前制定应对措施。三是引入人工智能造价测算系统,实现造价数据的自动录入、核算与分析,减少人工错误,提升造价测算效率。

(七) 制度保障: 完善协同管理规章制度

制定《EPC项目商务造价协同管理办法》《信息共享管理规定》《利益分配实施细则》《风险共担管理办法》等规章制度,明确各参与方的权利与义务、协同流程与操作标准。将协同管理要求纳入合同条款,在设计合同、采购合同、分包合同中明确协同职责、激励约束措施与风险承担比例,使协同管理有法可依、有章可循。同时,建立制度执行监督机制,定期检查制度执行情况,对违反制度的行为及时整改,确保制度落地生效^[10]。

四、结论与展望

本文剖析EPC造价协同现存目标脱节、流程不畅、信息不足、利益失衡等困境,基于供应链整合构建“目标-流程-信息-利益”四位一体协同机制,配套组织、技术、制度保障措施。该机制通过战略层定目标、战术层优流程、操作层通信息、保障层调利益,实现全链条管控,为解决造价超支提供理论方案。

未来可从三方面拓展:一是结合新能源等具体行业实证验证机制适用性;二是用演化博弈分析参与方策略选择;三是探索区块链等新技术在协同管理中的应用,提升智能化水平。

参考文献

[1] 李明华, 张晓东. EPC 总承包模式下供应链协同造价管理研究 [J]. 建筑经济, 2023, 44(5): 68-73.
[2] 王海燕, 刘志强. 供应链整合对 EPC 项目造价控制的影响机制研究 [J]. 工程管理学报, 2023, 37(2): 105-110.
[3] 张伟, 李娜. 基于 BIM 技术的 EPC 项目造价协同管理实践 [J]. 施工技术, 2022, 51(18): 156-160.
[4] 赵刚, 王丽. 交易成本视角下 EPC 供应链造价协同机制构建 [J]. 商业研究, 2022, (10): 123-130.
[5] 陈晓峰, 刘洋. EPC 项目利益协同与造价管控绩效关系研究 [J]. 工业技术经济, 2022, 41(7): 89-96.
[6] 刘敏, 王健. 供应链整合视角下 EPC 项目设计-采购协同管理 [J]. 建筑管理现代化, 2023, 37(3): 78-83.
[7] 孙伟, 张静. 数字化转型背景下 EPC 造价协同管理创新 [J]. 科技管理研究, 2023, 43(8): 167-173.
[8] 周丽, 吴鹏. EPC 项目风险共担机制与造价控制效果研究 [J]. 工程经济, 2022, 32(6): 34-39.
[9] 郑磊, 王芳. 战略合作伙伴关系对 EPC 供应链造价协同的影响 [J]. 中国流通经济, 2023, 37(4): 112-120.
[10] 冯超, 李娟. 基于协同管理理论的 EPC 项目造价管控模式创新 [J]. 项目管理技术, 2022, 20(12): 87-92.

液压挖掘机功率损失分析及节能控制技术研究

吴庆礼

徐州徐工矿业机械有限公司，江苏 徐州 221000

DOI:10.61369/ERA.2026020016

摘 要： 液压挖掘机是工程建设的核心装备，其功率利用效率直接影响施工成本与环境效益。目前液压挖掘机普遍存在功率损失大，能耗偏高的问题，阻碍了行业绿色发展。本文以液压挖掘机动力传递链为研究主线，系统分析功率损失的核心成因与表现形式，重点剖析液压系统中的溢流损失、节流损失、泄漏损失及机械摩擦损失，揭示各损失类型的内在作用机理。在此基础上，从回路架构革新，元件性能升级，控制策略优化三个维度，提出了负载敏感控制，功率匹配调控，能量回收利用等关键节能技术方案，阐明各类技术的节能原理与实施路径。研究结果可以为液压挖掘机节能性能提升提供理论支撑与技术参考，助力工程机械行业实现能效升级与低碳转型。

关 键 词： 液压挖掘机；功率损失；节能控制；负载敏感；功率匹配

Power Loss analysis and Energy-saving Control Technology of Hydraulic Excavator

Wu Qingli

Xuzhou XCMG Mining Machinery Co., Ltd., Xuzhou, Jiangsu 221000

Abstract： Hydraulic excavator is the core equipment of engineering construction, and its power utilization efficiency directly affects the construction cost and environmental benefits. At present, hydraulic excavators generally have the problems of large power loss and high energy consumption, which hinders the green development of the industry. This paper takes the power transmission chain of hydraulic excavator as the research thread, systematically analyzes the core causes and manifestations of power loss, focusing on the overflow loss, throttling loss, leakage loss and mechanical friction loss in the hydraulic system, and reveals the internal mechanism of each loss type. On this basis, from the three dimensions of loop architecture innovation, component performance upgrade and control strategy optimization, key energy-saving technical schemes such as load-sensitive control, power matching regulation and energy recycling are put forward, and the energy-saving principles and implementation paths of various technologies are expounded. The research results can provide theoretical support and technical reference for improving the energy-saving performance of hydraulic excavators, and help the construction machinery industry to achieve energy efficiency upgrade and low-carbon transformation.

Keywords： hydraulic excavator; power loss; energy saving control; load sensitive; power matching

引言

液压挖掘机凭借其强大的作业能力，在基础设施建设领域是不可或缺的核心装备，其工作效率与能耗水平直接关系到工程建设的综合效益。随着全球能源危机的加剧与环保法规的收紧，传统液压挖掘机高能耗、高排放的弊端日益凸显，节能技术升级已成为行业发展的必然趋势。液压挖掘机的动力传递过程涉及发动机、液压泵、控制阀门、执行机构等多个环节，能量在传递与转换中必然伴随功率损失，部分机型的功率利用率甚至不足30%^[1]。这些功率损失不仅导致燃油消耗大幅增加，而且会引起系统发热、元件磨损增多等现象，降低设备可靠性与使用寿命。因此，深入剖析液压挖掘机功率损失的内在机理，开发高效可行的节能控制技术，对提高设备能效、降低施工成本、减少环境污染具有重要的现实意义。

一、液压挖掘机功率损失的核心成因与表现形式

液压挖掘机的功率传递遵循“发动机机械能—液压泵液压能—执行机构机械能”的转换路径，每个转换环节均存在不同类型的功率损失，且各类损失相互关联、相互影响，共同导致系统能效下降。根据功率损失的发生机理与所处环节，可将其划分为液压系统功率损失、机械摩擦功率损失及功率匹配失衡损失三大类，不同工况下各类损失的占比差异显著，其中液压系统相关损失占比最高。

（一）液压系统中的主功率损失

液压系统是液压挖掘机功率损失的主要载体，其损失形式与液压油的流动状态、压力变化及密封性能直接相关，主要包括溢流损失、节流损失与泄漏损失三种类型，三类损失合计占系统总功率损失的70%以上。

溢流损失是液压系统最典型的功率损失形式，主要发生在系统压力超过安全阈值或流量供需失衡的场景。液压挖掘机作业工况复杂，负载波动大，当挖掘阻力突然增加导致系统压力超出溢流阀设定值时，溢流阀开启泄压，高压油直接流回油箱，发动机输出的功率全部转化为热能消耗。在回转机构启停过程中，由于上车回转惯量大，回转马达无法完全吸收液压泵输出的流量，多余流量通过过载阀溢流回油箱，造成功率浪费^[3]。这种损失在重载挖掘、回转制动等工况下尤为突出，是系统能耗偏高的重要原因。

节流损失源于液压系统流量调节过程，主要通过阀门节流实现执行机构的速度控制。当手柄处于微动控制状态时，多路阀进出油口开度较小，液压油需克服阀口节流阻力才能进入执行机构，部分压力在此过程中转化为热能。当工作装置停止作业时，阀芯处于中位，液压泵输出的高压油虽经卸荷口流回油箱，但变量泵的功率自调节特性使其保持较大流量输出，形成旁路空流损失。这种节流损失贯穿于挖掘、回转、举升等各类作业工况，在精细作业场景下更为明显。

泄漏损失分为内泄漏与外泄漏两种形式，其中内泄漏对功率损失的影响更为显著。内泄漏主要发生在液压泵、液压马达、液压缸等元件的配合间隙处，高压腔的液压油通过间隙流入低压腔，使元件输出功率降低。内泄漏主要发生在液压泵的配流盘与转子之间、液压缸活塞与缸筒之间的配合间隙。泄漏量的大小与元件磨损程度、密封性能及系统压力直接相关，随着设备使用时间的增长，元件磨损加剧，将造成泄漏量很大地增加，不仅导致功率损失，而且会影响执行机构动作的精度与响应速度。不同类型液压系统的功率损失占比差异显著，见表1：

表1 不同类型液压系统的功率损失占比

系统类型	溢流损失占比 (%)	节流损失占比 (%)	泄漏损失占比 (%)	其他损失占比 (%)	系统总效率 (%)
传统开式回路系统	35-45	20-30	8-15	5-10	25-42
负载敏感回路系统	5-12	8-15	6-12	4-8	53-77
负载敏感+ 闭式回路系统	3-8	5-10	4-9	3-6	67-85

（二）机械摩擦与功率匹配失衡损失

机械摩擦功率损失存在于设备的各运动部件，主要包括发动机内部摩擦，液压元件摩擦及工作装置机械摩擦。发动机在工作

时，活塞和气缸壁，曲轴和轴承之间的摩擦会消耗部分功率，特别是在高转速工况下，摩擦损失会大为增加。液压泵与液压马达内部的运动副，如柱塞与缸体、滑靴与斜盘之间的摩擦，同样会造成功率损耗^[3]。工作装置的回转支承、销轴与衬套等连接部位，在相对运动中产生的摩擦阻力也会消耗一定功率，这些摩擦损失虽单个占比不大，但累计起来对系统能效的影响不可忽视。功率匹配失衡损失是指发动机与液压系统的工作点无法实现最佳耦合，导致发动机功率利用不充分或过载运行。发动机的输出功率特性与液压泵的吸收功率特性存在匹配关系，当负载增加时，液压泵吸收功率增大，会导致发动机转速下降，偏离最佳工作区间，降低燃油效率。在高原等特殊环境下，发动机功率会因气压降低而下降，若液压泵的吸收功率设定不变，会进一步加剧功率匹配失衡。不同作业工况下，机械摩擦与功率匹配失衡损失的具体表现如下表所示：

表2 机械摩擦与功率匹配失衡损失的具体表现

作业工况	发动机内部摩擦损失 (kW)	液压元件摩擦损失 (kW)	工作装置摩擦损失 (kW)	功率匹配失衡损失 (kW)	该类总损失占比 (%)
空载怠速	3.2-4.5	1.1-1.8	0.3-0.6	5.8-7.2	85-92
轻载挖掘 (< 30% 额定负载)	4.8-6.3	3.5-4.9	1.2-1.9	6.5-8.1	42-51
重载挖掘 (> 70% 额定负载)	7.2-9.1	8.3-10.5	2.8-3.6	3.1-4.5	28-35
回转作业	5.5-7.0	5.1-6.8	2.1-2.9	4.3-5.7	36-44

二、液压挖掘机节能控制技术的核心路径

（一）回路架构革新，从开式回路到负载敏感系统

传统液压挖掘机多采用开式回路设计，液压油经执行机构后直接回油箱，存在溢流损失大、流量控制精度低的问题。回路架构革新的核心方向是采用负载敏感回路与闭式回路的组合设计，实现流量按需分配，从根本上减少溢流与节流损失。负载敏感控制技术通过压力传感器实时感知各执行机构的负载需求，经负载敏感比例多路阀动态调节液压泵的输出流量与压力，使泵输出功率与负载需求精准匹配^[4]。当多个执行机构同时作业时，系统能自动优先满足高负载机构的流量需求，避免流量分配冲突带来的功率浪费。闭式回路则减少了液压油与空气的接触，降低油液污染风险，同时减小油箱容积与回油背压损失，提高系统效率。回路设计中还需合理优化液压管路布局，沿程压力损失是易被忽视的功率损失来源，液压油在管路中流动时会因摩擦阻力产生压力衰减。采用大通径管路、减少管路弯曲次数、选用低阻力管接头，可有效降低沿程压力损失。例如，用带弧度的管接头代替直角管接头，可使局部压力损失降低40%以上，此类细节优化对提升系统整体能效具有累积效应。

（二）元件性能升级，提升核心部件能效基数

核心液压元件的性能直接影响系统的功率损失水平，元件升级的重点是提高容积效率、降低摩擦损失和加强密封性能。液压

泵作为能量转换的主体，其效率提升对系统节能至关重要。采用轴向柱塞变量泵代替定量泵，通过排量调节实现流量按需输出，在空载或轻载工况下自动减小排量，减少无用功消耗，且轴向柱塞泵响应更快，能及时跟随负载变化调整输出，进一步提高功率利用率。密封件性能升级是降低泄漏损失的关键手段，采用聚氨酯与金属骨架复合结构的密封件，可使密封可靠性与耐磨性提升30%以上，内泄漏量减少50%^[5]。在液压缸设计中，缸筒采用镀铬加氮化处理工艺，表面硬度与光洁度显著提高，活塞杆喷涂陶瓷涂层后，摩擦系数与磨损速率降低40%—60%，不仅减少摩擦损失，还延长了元件使用寿命，降低维护成本。此外，使用高过滤精度装置与在线油液监测装置，可有效控制油液污染度，避免污染物加重元件磨损导致的泄漏增加，形成能效优化的良性循环。发动机作为动力源，通过高压共轨燃油喷射技术与涡轮增压技术的应用，其燃油燃烧效率可提升15%—20%，在输出相同功率的情况下显著降低燃油消耗。

（三）优化控制策略，动态精准功率匹配

控制策略优化是连接机械结构与液压系统的核心纽带，通过电子控制与液压技术的深度融合，实现功率流的动态精准调控。发动机与液压泵的功率匹配控制是节能控制的核心环节，其原理为通过电液比例控制器实时监测发动机转速变化，动态调节液压泵排量，使液压泵吸收功率维持在发动机最佳工作区间。当负载增大导致发动机转速降低时，控制器及时减小液压泵排量，使发动机转速回升至平衡状态；当负载减小时，适当增大泵排量，充分利用发动机剩余功率，避免功率浪费。工况自适应控制算法利用CAN总线采集操作手柄信号、各执行机构压力与位移信号，自动识别挖掘、回转、举升等动作模式，动态调整泵排量与阀开度参数，进一步提升节能效果。在复合动作作业中，优化流量分配策略，减少动作冲突造成的功率损失，提高动作协调性和作业效率。如动臂提升与斗杆回收复合动作，通过各阀门开度的控制，可使动作同步误差降低60%以上，作业流畅性显著提高，能耗进一步降低。回收作业过程中产生的势能与动能，是节能控制的重要补充。动臂下降过程中，重物势能使液压缸无杆腔油液产生高压，传统系统通过节流阀将这部分势能转化为热能消耗，能量回收系统通过蓄能器或液压马达将高压油液的能量储存或转换为机械能，当动臂重提升时释放储存能量辅助液压泵做功，减少泵输出功率需求。回转机构制动时产生的动能也可以通过类似方式回收，也更进一步提高了系统能量利用效率。

三、节能技术应用效果与发展展望

在实践中综合应用负载敏感控制，功率匹配调控等节能技

术，取得了很好的节能效果。不同节能技术的应用效果及节能潜力也各不相同，如表3所示。

表3 不同节能技术的应用效果及节能潜力差异					
节能技术类型	燃油消耗降低率（%）	系统效率提升率（%）	系统油温降低值（℃）	适用工况	投资回收期（月）
负载敏感控制技术	15-22	35-45	8-12	各类工况	12-18
功率匹配调控技术	10-16	25-32	5-8	负载波动大工况	10-15
动臂势能回收技术	8-14	18-25	6-9	频繁举升下降工况	15-20
回转动能回收技术	5-10	12-18	4-6	频繁回转工况	18-24
综合节能技术套餐	30-40	60-80	15-20	全工况	14-20

采用负载敏感回路与闭式回路组合架构的挖掘机，相比常规机型能耗降低30%以上，系统油温降低15-20℃，不仅降低燃油消耗，还延长了油液与密封件的使用寿命。功率匹配控制技术可保证发动机工作在最佳效率区间，在相同作业强度下燃油消耗率降低10%—16%，同时减少发动机启停频率，提高设备可靠性。采用能量回收系统则进一步挖掘节能潜力，在频繁举升下降的作业工况下，可额外降低8%—14%的能耗。未来液压挖掘机节能控制技术的发展将呈现三个趋势：智能化控制深度融合，通过人工智能算法的引入，实现系统参数的自学习与自适应调节，根据不同作业场景与操作员习惯动态优化控制策略，进一步提高功率匹配精度；电液融合技术升级，全面推广电液伺服比例阀的应用，实现流量与压力的精准控制，探索电动液压泵与传统发动机的混合动力模式，降低怠速与轻载工况下的能耗；轻量化与集成化设计，通过采用高

四、结论

液压挖掘机的功率损失，主要是液压系统的溢流损失、节流损失、泄漏损失，以及机械摩擦损失、功率匹配失衡损失，这些损失叠加导致系统能效偏低。针对上述问题，所提出的从回路架构革新，元件性能升级，控制策略优化3个维度提出的节能控制技术，从根本上减少无效功率消耗，优化功率传递路径。其中，负载敏感控制以便根据要求分配流量，功率匹配调控保证发动机与液压系统的最佳耦合，能量回收技术，使废弃能量得到二次利用，这四种技术的结合应用，为液压挖掘机节能升级提供了有效路径。

参考文献

[1] 马军辉, 高春莹, 陈俊翔, 刘英豪, 艾超. 正流量液压挖掘机多路阀阀口压力损失研究 [J]. 机床与液压, 2024, 52(07): 163-170.
[2] 桑勇, 岳亦锋, 李国锋, 刘伟胤, 曹旭阳, 王海洋. 正流量液压挖掘机回转系统节能控制 [J]. 液压气动与密封, 2024, 44(01): 1-8.
[3] 邓剑洋. 面向正流量液压挖掘机的分阶段功率匹配节能控制研究 [D]. 大连理工大学, 2023.
[4] 王萌. 基于自抗扰技术的挖掘机协同控制系统的设计 [D]. 河北工程大学, 2022.
[5] 周多虎. 液压机节能控制技术发展探讨 [J]. 内燃机与配件, 2022, (05): 85-87.

机械可动天线卸载方式研究

王文哲, 孙晓辉, 刘勃洋, 姜峰
天津航天机电设备研究所, 天津 300301
DOI:10.61369/ERA.2026020017

摘 要 : 机械可动天线作为航天测控、卫星通信、深空探测等领域的核心设备, 面临着重力、温度梯度、振动等多源载荷的挑战。为了验证其在轨运行时的性能稳定, 地面需要进行各种验证试验。即便如此由于重力的影响, 需要对天线进行卸载, 以消除或缓冲各种载荷的影响, 确保其功能正常。本文针对机械可动天线常见的卸载方式进行了深入分析, 重点从原理、技术特点、应用场景及发展趋势等方面进行综述。我们着重分析了不同卸载技术的优势和局限, 以便在不同场景下做出适当选择。此外, 我们还展望了未来轻量化、高精度、智能化卸载技术的发展方向, 为航天级可动天线的结构与性能优化提供了有益参考。

关 键 词 : 机械可动天线; 卸载方式; 载荷抵消; 指向精度

Research on Unloading Mode of Mechanically Movable Antenna

Wang Wenzhe, Sun Xiaohui, Liu Boyang, Feng Jiang
Tianjin Institute of Aerospace Electromechanical Equipment, Tianjin 300301

Abstract : As the core equipment in space TT&C, satellite communication, deep space exploration and other fields, mechanically movable antenna is facing the challenges of gravity, temperature gradient, vibration and other multi-source loads. In order to verify its stable performance in orbit, various verification tests need to be carried out on the ground. Even so, due to the influence of gravity, it is necessary to unload the antenna to eliminate or buffer the influence of various loads and ensure its normal function. In this paper, the common unloading methods of mechanically movable antennas are deeply analyzed, and the principle, technical characteristics, application scenarios and development trends are summarized. We focus on analyzing the advantages and limitations of different unloading technologies in order to make appropriate choices in different scenarios. In addition, we also look forward to the development direction of lightweight, high precision and intelligent unloading technology in the future, which provides a useful reference for the structural design and performance optimization of space-class movable antennas.

Keywords : mechanically movable antenna; unloading mode; load cancellation; pointing accuracy

引言

机械可动天线在航天测控网、深空通信和气象观测等关键领域中应用广泛。因为它具有大口径、高增益和宽覆盖等优势^[1]。随着航天任务对天线性能的要求越来越高, 天线口径和指向精度也在不断增加。而在太空中, 静态载荷 (例如重力) 和动态载荷 (例如振动和惯性力) 对天线结构的影响变得更加显著。以大口径可动天线^[1]为例, 重力可能会导致其反射面发生变形, 进而导致波束偏移和增益下降。此外, 在发射过程中也可能受到冲击载荷的影响, 导致传动机构磨损和连接部件松动。如何应对这些挑战, 保证天线的正常运行, 成为当前研究的重点之一。为了提高大口径可动天线在航天任务中的可靠性和稳定性, 需要持续探索和发展相关技术, 以满足日益增长的性能需求。只有不断创新和完善, 才能确保天线在各种极端环境下正常运行, 为航天领域的发展提供可靠支持。

卸载技术是解决有害载荷对天线结构影响的核心技术路径。近年来, 国内外学者提出了各种卸载方案, 包括被动、主动和混合卸载。本文建立在相关研究和工程案例, 对这些卸载方式进行系统分析, 确定它们的适用场景和发展潜力, 为未来高性能机械可动天线的设计与研发提供理论支持和技术参考。

一、机械可动天线卸载方式分类及原理

机械可动天线的卸载方式主要包括被动卸载、主动卸载及混合卸载三种。这些方式的核心原理和特点不同。被动卸载是指通过载

荷抵消来达到减轻天线负载的目的^[3], 主动卸载则是利用主动控制系统来实现负载的自动平衡, 而混合卸载则是将被动和主动卸载相结合, 以达到更好的效果。每种卸载方式都有其独特的优势和应用场景, 可以根据实际需求选择合适的方式来实现天线的卸载。

（一）被动卸载技术

被动卸载技术利用机械结构自身的特性，比如弹性、阻尼和重力平衡，来实现载荷的缓冲和抵消。这种技术无需额外的能源输入，具有结构简单、可靠性高、成本低等优点，因此已成为目前可动天线和中低精度要求场景下的主流卸载方案。被动卸载技术的应用，不仅有效降低了系统的运行成本，还提高了系统的稳定性和可靠性。在未来的发展中，被动卸载技术有望在更多领域得到应用，为各种设备和系统提供更有效的载荷管理解决方案。

1. 重力平衡卸载

重力平衡卸载是一种通过添加重物或弹簧组件的方法，在天线上构建一个与其自身重力方向相反的平衡力，以抵消重力对天线转动部位和反射面的负载^[3]。比如，在天线的重心位置添加一个与卸载部位相等的重物，来抵消展开时的重力影响，从而平衡天线主体的重力，减轻转动机构的负担。对于大口径天线^[1]，可以采用多组弹簧并联结构，利用弹簧的弹性力来补偿反射面自身重力引起的变形。这种技术适用于静态或低速运动场景，即便如此卸载效果取决于平衡参数的匹配精度，对动态负载的适应能力相对较弱。

2. 气球卸载

气球卸载利用浮生气体（如氦气）产生的浮力^[5]，实现静态载荷抵消，无需持续能源输入，结构轻量化优势明显。通过在天线非关键称重部位（如反射器边缘、支撑臂末端）挂载系留气球或气囊，利用浮力形成与重力方向相反的平衡力，抵消部分静态载荷以减少结构变形，例如在地面进行天线展开试验中，通过单个或多组气球协同悬吊，理论可平衡100%的天线自重，降低支撑结构应力。该技术适配中低载荷场景，具有结构简单、轻量化、无摩擦损耗、无需其他辅助卸载工装（如桁架）等优势，但存在浮力调节精度有限，易受气体泄漏、室内空气对流等因素影响，且大口径天线^[1]仍需解决气球协同控制与空间布局干涉问题，目前该方法只适用于小型可动天线卸载。

3. 气浮卸载

气浮卸载技术利用气体静压支撑的原理，通过注入高压气体形成均匀气膜，实现了对天线部件与支撑结构的无接触支撑，从而基本消除了机械摩擦载荷，同时能够通过动态调节气膜压力来抵消外部载荷。比如，可以在天线的方位轴与底座之间设置环形气垫，持续供应压缩空气，以实现气膜支撑天线主体，降低摩擦系数至0.0001以下，在反射面背部配置阵列式气浮执行器，根据载荷分布数据实时调节气浮单元的供气压力，以精准抵消重力和惯性力引起的局部变形。这项技术具有许多优点，如摩擦损耗极小、响应速度快（毫秒级）、承载能力强等。而且，气体介质干净无污染，适应性较好。即便如此是，该技术也存在一些局限，比如需要维护气源系统、存在高压气体泄漏风险、以及对卸载系统的安装精度和密封性要求非常严格。目前，气浮卸载技术已被广泛应用于地面高精度测试设备以及部分航天器的地面展开试验中。

（二）主动卸载技术

传感器感知载荷状态，控制器做出决策，执行器产生相应力以保持平衡，这就是主动卸载技术的核心。它能够实时监测载荷状态，并迅速做出反应，使天线保持稳定。主动卸载技术具有高精度和自适应能力强的优点，特别适用于大口径、高精度、动态工况下的可动天线。主动卸载技术不仅可以有效减轻天线本身的负荷，还能提高其工作效率和精度。在现代通信中，主动卸载技

术被广泛应用，可以有效提升天线性能，确保通信质量。

现代控制系统在伺服驱动技术领域发挥着重要作用^[2]，通过实时数据反馈和主动输出驱动力，实现动态载荷的精准控制。天线俯仰轴驱动系统中集成扭矩传感器，可以及时调整电机输出扭矩来抵消重力或惯性力矩的影响，提高系统的稳定性。另外，在反射面变形控制方面，采用分布式压电陶瓷执行器根据激光测距传感器的数据进行补偿力施加，修正反射面的形状。这种技术精度高达 $\pm 0.1\text{N} \cdot \text{m}$ 级，能够适应复杂的动态工况，在这种情况下要求传感器精度和控制算法的实时性较高，系统复杂度和能耗相对较高。控制系统的发展使得伺服驱动技术应用更加广泛，不仅可以应用于天线俯仰轴驱动系统，还可以在其他领域如航空航天等方面发挥作用。采用伺服电机、电液伺服缸等执行机构，可以实现动态载荷的准确控制，为系统运行提供保障。总的来说，现代控制系统在伺服驱动领域^[2]的应用案例中展示出了更高的精度和可靠性，为各种复杂工况下的控制提供了有效解决方案。在未来的发展中，有望进一步提升传感器精度和控制算法的实时性，降低系统的复杂度和能耗，这种方式可以使得伺服驱动技术在更多领域得到广泛应用。

（三）混合卸载技术

混合卸载技术^[4]是目前大口径、高性能可动天线的主流技术方案。它结合了被动卸载的可靠性和主动卸载的高精度优势。被动结构来抵消基础载荷，同时主动系统能够补偿残余载荷和动态载荷，从而提升卸载精度并确保系统稳定性。这种技术在实践中发挥着重要作用，为天线的运行提供了有力支持。随着科技的不断进步，混合卸载技术将继续发展完善，为可动天线的性能提升和优化提供更多可能性。

混合卸载技术^[4]是一种结合了被动平衡重和主动伺服补偿的方案，能够有效地抵消大部分静态重力矩和动态惯性力矩，同时还能够实时补偿由温度变形引起的附加载荷。另外，该技术还结合了阻尼缓冲和磁悬浮支撑，通过阻尼器吸收冲击载荷，降低稳态运行时的摩擦载荷，从而提高系统的稳定性和精度。混合卸载技术的优点是在保证可靠性的同时，提高了系统的精度和适应复杂工况的能力。即便如此是，由于系统集成难度较大，需要解决被动和主动部件之间的协同控制问题。在应用混合卸载技术时，需要充分考虑系统集成的复杂性，确保被动和主动部件之间的协同运作，以实现最佳的效果。总之，混合卸载技术在工业应用中具有重要意义，能够有效提高系统的性能和稳定性，即便如此在实际应用中需要综合考虑各种因素，才能发挥其最大的作用。

二、各类卸载方式的性能对比与应用场景

表1 性能对比

卸载方式	被动卸载 - 重力平衡	被动卸载 - 气球卸载	被动卸载 - 气浮卸载	主动卸载 - 伺服驱动	混合卸载
卸载精度	中低 ($\pm 1\text{N} \cdot \text{m}$)	中低 ($\pm 1\text{N} \cdot \text{m}$)	中 ($\pm 0.5\text{N} \cdot \text{m}$)	高 ($\pm 0.1\text{N} \cdot \text{m}$)	高 ($\pm 0.05\text{N} \cdot \text{m}$)
动态适应能力	弱	弱	中	强	强
结构复杂度	低	低	低 - 中	中高	中高

可靠性	高	中高	中高	中	中高
成本	低	低	中高	中高	中高
能耗	无	无	无	中	中

被动卸载技术是一种适用于口径较小、指向精度要求不高、工况稳定的可动天线的解决方案。比如地面气象观测天线和小型卫星通信天线。重力平衡卸载主要用于静态载荷抵消，而阻尼缓冲卸载则广泛应用于发射段冲击防护和地面测试阶段的振动抑制。这种技术可以有效减轻天线系统的负荷，保证设备的稳定性和寿命。被动卸载技术也提高了设备的工作效率和可靠性。在现代科技发展的背景下，被动卸载技术将会有更广泛的应用前景。

主动卸载技术适用于大口径^[1]、高精度、动态工况的可动天线，例如深空探测地面站天线和大型网状天线。伺服驱动卸载技术被广泛应用于各种高精度天线，用于动态载荷补偿。主动卸载技术，可以有效提高天线的精度和稳定性，使其在复杂的环境中更加可靠地工作。这项技术对于提升天线性能和可靠性，具有重要意义，已成为现代天线工程中不可或缺的关键技术。

混合卸载技术在航天级大口径可动天线中具有重要地位。我国深空测控网所采用的35m和65m可动天线，采用了“重力平衡+伺服补偿”的混合卸载方式，能够高效抵消静态载荷，并实现动态工况下的高精度载荷补偿。与此不同，美国NASA的深空通信天线采用“阻尼缓冲+磁悬浮支撑”方案，既能保护发射段免受冲击，又满足在轨运行中低摩擦的要求。这些先进技术的应用，为航天领域的发展提供了有力支撑，为天文探测和深空通信提供了可靠保障。混合卸载技术的创新和发展，将进一步提高大口径可动天线的性能和稳定性，推动航天科技的不断进步。

三、机械可动天线卸载技术的发展趋势

（一）轻量化与集成化

随着航天任务对载荷重量的限制日益严格，轻量化设计成为重要发展方向。未来，通过材料创新和结构优化，降低卸载部件的重量占比，同时推动卸载系统的集成化设计。开发一体化伺服电机，将载荷传感器与执行器集成于天线关节处，简化系统结构，减少冗余部件，提升系统紧凑性。这样不仅能够满足航天任务的要求，也有助于提高系统的效率和性能。

（二）智能化与自适应化

在此情况下人工智能与机器学习技术的自适应卸载技术将成为未来研究的热点。该技术借助多维度传感器实时采集天线运行状态和载荷数据，利用深度学习算法构建载荷预测模型，从而实现提前优化和动态调整卸载参数。自适应控制算法也将被研发，根据不同工况（如天线转速、载荷类型）自动调整卸载模式（被动、主动、混合），提升系统对复杂工况的适应能力。举例来说，当天线低速运行时，系统将自动切换至被动卸载模式以减少能耗，

参考文献

[1] 李明, 王建华, 张晓东. 大口径可动天线重力卸载技术研究 [J]. 宇航学报, 2020, 41(3): 356-363.
[2] 张伟, 刘洋, 陈静. 机械可动天线主动卸载伺服控制系统设计 [J]. 控制工程, 2021, 28(5): 921-927.
[3] 侯管仲, 许煜, 杨昭宁, 栗卫华, 刘汝冰. 星载机械可动天线地面零重力卸载概述. 空间电子技术, 2018(01): 74-78.
[4] 王强, 李娜, 赵伟. 混合卸载技术在深空测控天线中的应用 [J]. 航天技术与民品, 2022, 45(7): 45-51.
[5] 侯管仲. 气球在星载机械可动天线地面重力卸载中的应用 [C]// 中国航天科技集团公司科技委, 中国力学学会, 中国振动工程学会, 中国宇航学会, 空间微波技术重点实验室. 2014年可展开空间结构学术会议摘要集. 中国空间技术研究院西安分院, 2014: 23.

而当遇到突发冲击载荷时，则会自动启动主动补偿系统，以保证卸载精度。这种技术的发展不仅提高了系统的性能和稳定性，也为工程领域带来了全新的可能性。

（三）高精度与长寿命

深空探测^[4]、空间通信等任务对天线指向精度的要求不断提高，这促使卸载技术朝着更高精度的方向不断发展。未来，我们将通过提升传感器精度（如纳米级位移传感器、微牛顿级力传感器）、优化控制算法（如模型预测控制、滑模控制）以及改进执行器性能（如高精度压电执行器、无刷伺服电机），来实现微米级变形补偿和微牛顿级载荷抵消。通过材料耐磨处理、润滑技术创新（如固体润滑、自修复润滑）和冗余设计的应用，提升卸载系统的使用寿命，以满足长周期在轨运行的需求。在不断追求精度的过程中，我们将不断探索技术的边界，为更高效、更稳定的空间任务提供更可靠的支持。

（四）极端环境适应性

未来的深空探测和建设月球/火星基地等项目，面对极端环境的考验，需要强调卸载技术的环境适应性设计。为此，我们将致力于研发耐极端温度的阻尼材料和电磁部件，改进真空环境下的润滑方案，增强辐射防护性能。我们还将深入研究极端环境下的载荷特性变化规律，建立起环境、载荷和卸载参数之间的映射模型，以确保卸载系统在极端条件下稳定运行。这些努力将为未来的探索与生存提供坚实的技术基础。

四、结论

机械可动天线的卸载技术是验证其稳定性和指向精度的重要支撑。目前，已经形成了被动卸载、主动卸载和混合卸载三大技术系统。被动卸载技术由于结构简单、可靠性高，在中低精度、稳定工况下发挥着不可替代的作用。而主动卸载技术则以高精度、强适应性著称，成为大口径、高精度天线不可或缺的关键技术。此外，混合卸载技术兼顾了可靠性和精度，因此成为目前大型可动天线的主流选择。总的来看，机械可动天线的卸载技术不仅在技术发展上有着重要作用，同时也为天线的稳定性和指向精度提供了有力支持。

未来，随着航天任务朝向深空化、高精度化、长周期化发展，机械可动天线的卸载技术将不断演进。这种演进将朝着轻量化、集成化、智能化、高精度、极端环境适应性的方向进行。材料、结构、控制与传感器技术的协同创新，卸载系统的性能将进一步提升，以满足更复杂工况下的需求。卸载技术与天线整体结构的协同设计也将变得至关重要。建立完善的性能评估体系，是为了为卸载技术的工程化应用提供充分保障。不断的技术改进和创新，机械可动天线的卸载技术将更好地适应各种极端环境，并为航天任务的顺利进行提供更加可靠的支持。

非赫兹接触下 Kalker 理论的非线性修正模型

李阔, 刘伟渭, 鲁鹏, 李加伟

西南交通大学机械工程学院, 四川 成都 610031

DOI:10.61369/ERA.2026020018

摘 要 : 轮轨接触建模的准确性直接影响轨道车辆动力学仿真可靠性。传统 Kalker 线性理论在中高蠕滑率条件下存在切应力分布描述失真及力饱和效应缺失的问题, 导致预测偏差。为此, 本文提出一种融合非赫兹接触几何与非线性修正机制的切向接触模型: 基于 Kalker 线性理论推导非椭圆接触斑的切向力表达式, 引入椭圆牵引边界划分黏着区与滑动区, 结合 Vermeulen–Johnson 模型与 Shen–Hedrick–Elkins 理论构建蠕滑力非线性折减机制。仿真结果表明: 在横移量 $-6\text{mm} \sim 6\text{mm}$ 、摇头角 $-0.03 \sim 0.03\text{rad}$ 工况下, 模型计算的纵向切向力相对误差 $< 15\%$ 、横向误差 $< 10\%$, 较 Kalker 变分法模型 (KVM) 效率提升 28.7% , 实现了中高蠕滑率工况下“高精度预测”与“高效计算”的工程需求, 为多体动力学仿真提供了可靠的理论支撑, 适用于轨道车辆多体动力学中的高效切向接触建模。

关 键 词 : 轮轨接触; Kalker 线性理论; 非赫兹接触; 非线性修正; 椭圆牵引边界

A Nonlinear Modified Model of Kalker's Theory under Non-Hertzian Contact Conditions

Li Kuo, Liu Weiwei, Lu Peng, Li Jiawei

School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031

Abstract : The accuracy of wheel–rail contact modeling directly affects the reliability of railway vehicle dynamics simulation. The traditional Kalker linear theory suffers from distorted descriptions of shear stress distribution and lack of force saturation effect under medium to high creepage conditions, leading to prediction deviations. To address this, a tangential contact model integrating non–Hertzian contact geometry and nonlinear correction mechanisms is proposed. Based on the Kalker linear theory, the model deduces the tangential force expression for non–elliptical contact patches, introduces an elliptical traction boundary to divide the contact area into stick and slip zones, and constructs a nonlinear creep force reduction mechanism by combining the Vermeulen–Johnson model and Shen–Hedrick–Elkins theory. Simulation results show that under the conditions of lateral displacement from -6 mm to 6 mm and yaw angle from -0.03 to 0.03 rad , the relative error of the longitudinal tangential force calculated by the model is less than 15% , the transverse error is less than 10% , and the efficiency is improved by 28.7% compared with the Kalker variational method model (KVM). This model achieves the engineering requirements of "high–precision prediction" and "efficient calculation" under medium to high creepage conditions, providing reliable theoretical support for multibody dynamics simulation and being suitable for efficient tangential contact modeling in railway vehicle multibody dynamics.

Keywords : wheel–rail contact; Kalker linear theory; non–Hertzian contact; nonlinear correction; elliptical traction boundary

引言

轮轨接触计算是轨道车辆动力学仿真中的关键步骤, 轮轨接触模型显著影响动力学仿真结果的准确性、效率和鲁棒性。

轮轨接触斑内蠕滑力、蠕滑率的大小以及黏着区的分布是磨损分析计算中的重要参数, 它们共同影响轮轨磨损的发展, 因此轮轨接触问题是车轮磨损研究中的关键问题, 需要有效且准确的轮轨接触模型用来分析轮轨间的相互作用。法向接触最具代表性的就是 Hertz^[1] 的赫兹理论, 切向接触最具代表性的就是 Kalker^[2] 提出的 kalker 简化理论及其 FASTSIM 算法。

随着众多学者的深入研究, 发现在实际的轮轨接触中, 赫兹理论假设两个接触固体在接触区域内的曲率为常数, 这一假设是有问题

的^[3]。赫兹接触模型忽略了接触斑内轮轨曲率变化,会带来特定的计算误差^[4]。关于非赫兹接触模型的研究,有很多学者在赫兹理论的基础上不断改进,开发了诸多非赫兹接触模型,例如 Johnson-Vermeulen 三维滚动接触理论^[5]、kalker 线性蠕滑理论^[6]、沈氏理论^[7]等。Kik 和 Piotrowski 提出了“虚拟渗透”的概念,假设压应力沿横向的变化与接触斑纵向边界的分布保持一致,该模型可快速地确定接触斑形状^[8]。安博洋^[9]提出了一种求解法向接触的非赫兹型快速计算方法及其数值程序 INFCON,并采用 Fastrip 和 Ayasse-Chollet 的局部椭圆法处理切向接触问题。Sichani M^[10]提出了一种新的轮轨接触模型,切向接触问题采用基于条带理论的 FASTSIM 替代方法进行处理,该方法将轮轨的二维接触推广到三维接触。KP 模型以及 STRIPES 模型采用的是以非椭圆适应方法改进后的 FASTSIM 程序,而 ANALYN 模型采用的是新提出的 Fastrip 算法^[11]。

为改进 Kalker 线性理论在非赫兹接触条件下的适用性,本文提出了一种面向轮轨切向接触问题的修正模型。该模型基于非椭圆接触斑的几何特性与蠕滑率分布,推导出线性切向力的积分表达式;通过引入椭圆牵引边界,将接触区域划分为黏着区与滑动区,并在此基础上对应应力分布进行非线性修正。进一步地,模型结合 Vermeulen-Johnson 模型与 Shen-Hedrick-Elkins 理论中的蠕滑折减策略,对 Kalker 线性力结果进行非线性修正,构建出更贴近实际工况的蠕滑力表达式。最后,通过标准轮轨型面的多工况仿真验证了该模型在不同横移与摇头角条件下的预测准确性与鲁棒性,为轨道车辆动力学中的高效切向接触建模提供了理论支持与数值基础。

一、基于 kalker 线性理论的轮轨切向接触

在 Kalker 线性理论中,当轮轨之间的蠕滑率足够小时,接触区域内的相对滑动较小,材料处于弹性状态,因而整个接触斑可被视为完全黏着区。在这种情况下,接触面上的微动主要由剪切变形产生,切向力与蠕滑率之间呈现出严格的线性关系。这种线性蠕滑理论在力学上建立了切向力与三个蠕滑率分量(纵向、横向、自旋)之间的线性映射关系,并通过蠕滑系数矩阵加以描述。如果接触区域是椭圆,则应用 kalker 线性蠕变理论来描述这种线性关系

$$\begin{aligned} F_x &= -G(ab)C_{11}\xi_x \\ F_y &= -G(ab)C_{22}\xi_y - G(ab)^{3/2}C_{23}\xi_\phi \end{aligned} \quad (1)$$

其中 C_g 是 Kalker 蠕滑系数,它依赖于轮轨接触斑的半轴长度之比。

对于非赫兹条件下的非椭圆接触斑,考虑到纵向切向力由于 x 轴不对称导致接触斑引起自旋,产生相应的纵向切向力,则扩展的 kalker 线性理论可写成^[4]

$$\begin{cases} F_x = -f_{11}\xi_x - f_{13}\xi_\phi \\ F_y = -f_{22}\xi_y - f_{23}\xi_\phi \end{cases} \quad (2)$$

F_x 和 F_y 为纵向和横向切向力, f_{11} 、 f_{13} 、 f_{22} 和 f_{23} 为切向力与蠕滑率之间的线性系数。

根据文献^[3]内容,非赫兹接触的 kalker 线性蠕滑系数可由下式的极限值求得:

$$\begin{aligned} f_{11} &= -\lim_{\xi_x \rightarrow 0} \frac{F_x}{\xi_x}, \text{ with } \xi_y = 0, \xi_\phi = 0 \\ f_{13} &= -\lim_{\xi_\phi \rightarrow 0} \frac{F_x}{\xi_\phi}, \text{ with } \xi_x = 0, \xi_y = 0 \\ f_{22} &= -\lim_{\xi_y \rightarrow 0} \frac{F_y}{\xi_y}, \text{ with } \xi_x = 0, \xi_\phi = 0 \\ f_{23} &= -\lim_{\xi_\phi \rightarrow 0} \frac{F_y}{\xi_\phi}, \text{ with } \xi_x = 0, \xi_y = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

则 kalker 线性蠕变系数可以表示为:

$$f_{11} = -\int_{-a}^a \int_{-b}^b (x - l_x(y)) / L_x(y) dx dy = 2 \int_{-a}^a l_x^2(y) / L_x(y) dy = \frac{3G}{4} \int_{-a}^a \frac{l_x^2(y) C_{11}(y)}{a(y)} dy \quad (4-a)$$

$$f_{13} = -\int_{-a}^a \int_{-b}^b y(x - l_x(y)) / L_y(y) dx dy = 2 \int_{-a}^a l_x^2(y) y / L_y(y) dy = \frac{8G}{\pi} \int_{-a}^a \frac{l_x^2(y) C_{23}(y) y}{a(y) \sqrt{a(y)/b(y)}} dy$$

$$f_{22} = -\int_{-a}^a \int_{-b}^b (x - l_x(y)) / L_y(y) dx dy = 2 \int_{-a}^a l_y^2(y) / L_y(y) dy = \frac{3G}{4} \int_{-a}^a \frac{l_y^2(y) C_{22}(y)}{a(y)} dy$$

$$f_{23} = -\frac{1}{2} \int_{-a}^a \int_{-b}^b (x^2 - l_x^2(y)) / L_y(y) dx dy = \frac{2}{3} \int_{-a}^a l_y^3(y) / L_y(y) dy = \frac{8G}{3\pi} \int_{-a}^a \frac{l_y^3(y) C_{23}(y)}{a(y) \sqrt{a(y)/b(y)}} dy \quad (4-b)$$

KVM 接触模型和本文非赫兹模型计算的线性蠕变系数在下图 1 中进行了比较。从图 1 中可以看出本文非赫兹接触模型计算的线性蠕变系数与 KVM 的计算的结果在总体上具有一致性。图中 f_{11} 和 f_{22} 相对于 f_{13} 和 f_{23} 偏差较大,但是整体的趋势和 KVM 是一致的,总体而言,本文非赫兹接触模型计算线性蠕变系数是具有良好的计算精度。

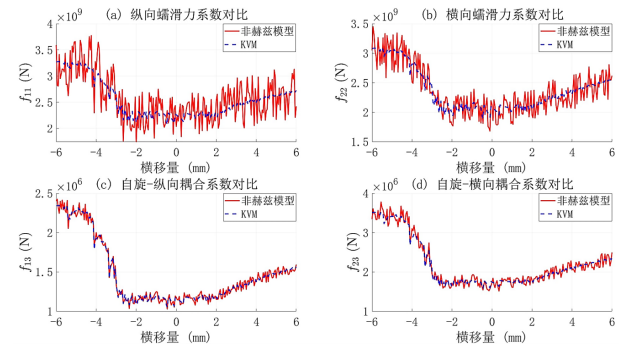


图1 线性蠕变系数对比

Fig.1 Comparison of linear creep coefficients

于是

$$\begin{cases} F_x = -f_{11}\xi_x - f_{13}\xi_\phi \\ F_y = -f_{22}\xi_y - f_{23}\xi_\phi \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} F_x = -\frac{3GC_{11}\xi_x}{4a} \int_{-a}^a l_x^2(y) dy - \frac{8GC_{23}\xi_\phi}{\pi a \sqrt{a/b}} \int_{-a}^a l_x^2(y) y dy \\ F_y = -\frac{3GC_{22}\xi_y}{4a} \int_{-a}^a l_y^2(y) dy - \frac{8GC_{23}\xi_\phi}{3\pi a \sqrt{a/b}} \int_{-a}^a l_y^3(y) dy \end{cases} \quad (5)$$

$l_a(y)$ 为接触区域前后边缘之间的距离; $y_{l,r}$ 表示接触斑的左右边缘; C_g 表示蠕滑系数; a, b 表示接触斑半轴长度和宽度; G 表示剪切模量。

轮轨接触运动学计算是求解轮轨刚性滑动分布或蠕滑率的过程,是计算轮轨切向问题的前提步骤。考虑曲线接触区域的影响

响, 给出了接触区域内的轮轨刚性滑移分布^[12]:

$$\begin{cases} w_x(y) = \xi_x - (y - y_c) \cdot \xi_\phi + \frac{\omega_{xy} \Delta z_{wr}(y)}{v_0} \\ w_y(x) = \xi_y + (x - x_c) \cdot \xi_\phi \end{cases} \quad (6)$$

其中 ξ_x 、 ξ 和 ξ_ϕ 分别为初始接触点处的纵向蠕滑率、横向蠕滑率和自旋蠕滑率, ω_{xy} 为轮对绕 y 轴的角速度, v_0 为轮对的移动速度。轮轨在接触区内的弹性变形相同时, $\Delta z_{wr}(y)$ 为考虑轮轨型面变形的法向距离, 通过接触极限法迭代求解, 避免初始接触点曲率突变导致的计算误差^[13]。

由于采用沿纵向变化的轮轨刚性滑移 $w_x(y)$, 上式 F_x 中旋量 ξ_ϕ 引起的纵向切向力反映在 $w_x(y)$ 分布的影响上。不同横向条纹的切向力分布 $p_x(y)$, 即为纵向力 F_x 的微分, 可以写成如下:

$$p_x(y) = \frac{dF_x}{dy} = -\frac{3GC_{11}l_a^2(y)}{4a}w_x(y) \quad (7)$$

对接触区域内的切向力分布 $p_x(y)$ 进行积分, 可得接触斑内的纵向切向力为:

$$\begin{aligned} F'_x &= \int_{y_l}^{y_r} p_x(y) dy \\ &= -\frac{3GC_{11}}{4a} \int_{y_l}^{y_r} l_a^2(y) w_x(y) dy \end{aligned} \quad (8)$$

接触斑内的横向切向力可以表达为:

$$\begin{aligned} F'_y &= -\frac{3GC_{22}\xi_y}{4a} \int_{y_l}^{y_r} l_a^2(y) dy \\ &\quad - \frac{8GC_{23}\xi_\phi}{3\pi a\sqrt{a/b}} \int_{y_l}^{y_r} l_a^3(y) dy \end{aligned} \quad (9)$$

由此, 建立了修正的 kalker 线性理论。

但是在太蠕滑或磨损型面下, 切应力在黏着区线性增长, 且滑动区边界为抛物线^[14], 这与实际非赫兹接触的椭圆应力分布存在较大的偏差。

通过引入椭圆牵引边界、Johanson 模型和沈氏理论中的非线性修正策略对 F'_x 和 F'_y 进行非线性修正, 确保黏着区切应力非线性增长; 滑动区切应力严格满足椭圆边界, 更贴合实际接触应力分布^[15]。

F'_x 和 F'_y 代表接触斑内的纵向切向力和横向切向力, 接触斑内某点 (x, y) 的纵向切向应力 $q_x(x, y)$ 和横向切向应力 $q_y(x, y)$, 二者关系如下:

$$\begin{aligned} F'_x &= \iint_{Ptachi} q_x(x, y) dx dy \\ F'_y &= \iint_{Ptachi} q_y(x, y) dx dy \end{aligned} \quad (10)$$

积分范围是接触斑内的所有点 (x, y) 。

可得纵向切向应力 $q_x(x, y)$ 和横向切向应力 $q_y(x, y)$ 如下:

$$\begin{aligned} q_x(x, y) &= -\frac{3GC_{11}}{4a} l_a^2(y) w_x(y) \\ q_y(x, y) &= -\frac{3GC_{22}\xi_y}{4a} l_a^2(y) \\ &\quad - \frac{8GC_{23}\xi_\phi}{3\pi a\sqrt{a/b}} l_a^3(y) \end{aligned} \quad (11)$$

引入椭圆牵引边界, 椭圆牵引边界表示滑动区内切应力的极限值, 由摩擦系数和法向力决定, 定义为:

$$g_e(x, y) = u_{eff} p(x, y) \sqrt{1 - \left(\frac{x}{a}\right)^2 - \left(\frac{y}{b}\right)^2} \quad (12)$$

动态摩擦系数:

$$u_{eff} = \begin{cases} 1.2f, & (\text{牵引工况}, \xi_x > 0) \\ f, & (\text{制动/自由滚动}) \end{cases} \quad (13)$$

接触斑内法向压力分布:

$$p(x, y) = \frac{N}{\pi ab} \quad (\text{均匀分布假设}) \quad (14)$$

判断黏着区与滑动区

对接触斑内每一点 (x, y) :

总切应力幅值:

$$|q(x, y)| = \sqrt{q_x^2(x, y) + q_y^2(x, y)} \quad (15)$$

摩擦极限: $g_e(x, y)$ (椭圆边界)

判定条件: 若 $|q(x, y)| \geq g_e(x, y)$ 则为滑动区, 否则为黏着区。

滑动区修正

令切应力幅值等于椭圆边界, 方向不变:

$$\begin{aligned} q_x^{corr}(x, y) &= \frac{q_x(x, y)}{|q(x, y)|} \cdot g_e(x, y) \\ q_y^{corr}(x, y) &= \frac{q_y(x, y)}{|q(x, y)|} \cdot g_e(x, y) \end{aligned} \quad (16)$$

黏着区修正

保持切应力方向, 引入非线性增长:

$$\begin{aligned} \Delta q(x, y) &= g_e(x, y) - |q(x, y)| \\ q_x^{corr}(x, y) &= q_x(x, y) \left[1 + \frac{\Delta q(x, y)}{g_e(x, y)} \right] \\ q_y^{corr}(x, y) &= q_y(x, y) \left[1 + \frac{\Delta q(x, y)}{g_e(x, y)} \right] \end{aligned} \quad (17)$$

对修正后的切应力分布积分:

$$\begin{aligned} F_x^{corr} &= \iint_{Ptachi} q_x^{corr}(x, y) dx dy \\ F_y^{corr} &= \iint_{Ptachi} q_y^{corr}(x, y) dx dy \end{aligned} \quad (18)$$

采用 Vermeulen-Johanson 模型和沈氏理论中的非线性修正策略得到适用于太蠕滑的切线模型^[12]。根据 V-J 模型和沈氏理论, 考虑 V-J 理论中蠕滑力线性表达式和 kalker 线性理论的表达式, 令二者所表达的切向力相等, 有

$$\begin{aligned} 3fN\xi_1^* &= -abGC_{11}\xi_x \\ 3fN\xi_2^* &= -abGC_{11}\xi_y - G(ab)^{1.5}C_{23}\xi_\phi \end{aligned} \quad (19)$$

显然, 正则化后的刚性蠕滑率 ξ_2^* 中包含了自旋蠕滑率 ξ_ϕ 。将总的刚性蠕滑率进行正则化处理:

$$\xi^* = (\xi_1^{*2} + \xi_2^{*2})^{0.5} = \frac{1}{3fN} (F_x^{corr2} + F_y^{corr2})^{0.5} = \frac{F_R}{3fN} \quad (20)$$

其中, $F_R = \sqrt{F_x^{corr2} + F_y^{corr2}}$ 。

由 V-J 非线性模型的蠕滑率饱和式得:

$$F_i' = \begin{cases} \frac{\xi_i^*}{\xi^*} fN [1 - (1 - \xi_x^*)^3], & \xi^* \leq 1 \\ \frac{\xi_i^*}{\xi^*} fN, & \xi^* > 1 \end{cases} \quad (21)$$

式中, $i=1,2$ 。记 $F_R' = \sqrt{F_1'^2 + F_2'^2}$, 有:

$$F_R' = \begin{cases} fN [1 - (1 - \xi^*)^3], & \xi^* \leq 1 \\ fN, & \xi^* > 1 \end{cases} \quad (22)$$

将式子(20)带入式子(22)可得:

$$F_R' = \begin{cases} fN \left[\frac{F_R}{fN} - \frac{1}{3} \left(\frac{F_R}{fN} \right)^2 + \frac{1}{27} \left(\frac{F_R}{fN} \right)^3 \right], & F_R \leq 3fN \\ fN, & F_R > 3fN \end{cases} \quad (23)$$

其中, f 为轮轨间的摩擦系数。

定义缩减因子 $\varepsilon = \frac{F_R'}{F_R}$, 则得到最终的蠕滑力:

$$\begin{aligned} F_{xNL} &= \varepsilon \cdot F_x^{corr} \\ F_{yNL} &= \varepsilon \cdot F_y^{corr} \end{aligned} \quad (24)$$

缩减因子 ε 依赖法向力 N 和摩擦系数 f , 其中 N 由非赫兹接触的等效椭圆法求解, 实现大蠕滑下切向力饱和效应与法向曲率的联动修正。当切应力超过摩擦极限时, 需重新划分黏着区与滑动区边界, 并基于新的接触区分布迭代更新等效椭圆参数, 直至切向力计算结果收敛, 该迭代过程可确保非赫兹接触的曲率变化与切向力饱和效应的动态耦合, 避免传统线性理论的预测偏差。

二、非赫兹接触求解

(一) 接触几何

轮轨接触几何关系的计算是根据轮轨之间的相对运动关系求解轮轨法向距离和接触面积的过程^[16,17]。文献^[18,19]通过多体形式主义与接触轨迹法的结合, 实现了轮轨接触几何处理的自动化与泛化, 为复杂场景下的接触分析提供了高效解决方案。轮轨接触几何计算示意图如图2所示。图2中, O-YZ 为绝对坐标系, 车辆-轨道动力学系统建立在绝对坐标系下; O-yz 为轮轨接触坐标系。轮轨法向和切向接触问题的计算都是在轮轨接触坐标系下建立的。

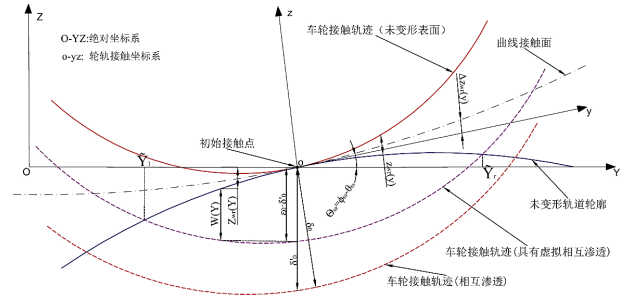


图2 轮轨接触几何计算示意图

Fig.2 Calculation diagram of wheel-rail contact geometry

为了降低轮轨初始接触点对接触角的敏感性, 采用一种可以考虑接触区局部接触角影响的加权策略^[12]。然后在接触面积和接触角的求解过程中, 可得出

$$l_a(y) = \sqrt{2R_{wx}(y) \cdot \left[\frac{0.5L_0}{\beta W_0} \delta_0 - z_{wr}(y) \right]}, y_l \leq y \leq y_r \quad (25)$$

其中 $R_{wx}(y)$ 表示轮对的滚动半径, L_0 和 W_0 分别为区域 C_1 的纵向尺寸和横向尺寸, β 是由 L_0/W_0 的值决定的参数^[4]。

$$\ddot{A}z_{wr}(x, y) = \frac{z_w(x, y) + z_r(x, y)}{2} - \frac{z_w'(x, y) + z_r'(x, y)}{2} \quad (26)$$

该式子表示轮轨型面有无变形时实际的轮轨接触曲线, 表示轮轨法向距离。 $z_{w,r}'(x, y)$ 和 $z_{w,r}(x, y)$ 表示轮轨型面有无变形时的 Z 坐标。

(二) 法向接触

KP 模型是在赫兹理论的基础上进行了改进, 是基于虚拟渗透法的快速接触计算模型。首先基于虚拟贯彻 (VP) 区域估算轮轨非赫兹的接触区域, 并计算非赫兹接触区域的等效椭圆; 然后以等效椭圆接触斑为输入, 求解轮轨之间的法向问题。如图3所示为虚拟渗透方法示意图。

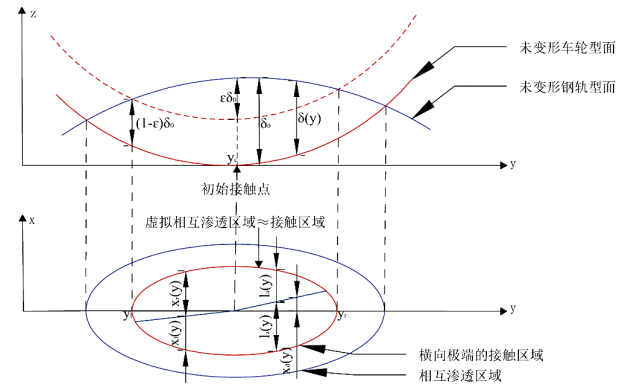


图3 虚拟渗透法示意图 (基于 VP 的非赫兹模型—KP 模型)

Fig.3 Schematic diagram of virtual penetration method (VP-based non-Hertz model-KP model)

在 KP 模型中, 基于两个原则将非椭圆接触片等效为一个椭圆:

等效椭圆的面积与原接触区域的面积相同;

$$\int_{y_r}^{y_l} l_a(y) dy = \int_{y_r}^{y_l} a \sqrt{1 - \frac{y^2}{b^2}} dy = \pi ab \quad (27)$$

等效椭圆的纵向半轴与横向半轴的比值与原非椭圆接触区域的长度与宽度的比值相同。

$$\frac{y_r - y_l}{l_a(y_c)} = \frac{b}{a} \quad (28)$$

然后可以得到等效椭圆的半轴为：

$$a = \sqrt{\frac{4l_a(x_c) \int_{y_r}^{y_l} l_a(y) dy}{\pi(y_r - y_l)}} \quad (29)$$

$$b = \sqrt{\frac{4(y_r - y_l) \int_{y_r}^{y_l} l_a(y) dy}{\pi l_a(x_c)}}$$

根据文献^[3]等效椭圆法（第一矩阵法），估计的非椭圆接触区域接触边界的一阶矩等于等效椭圆的一阶矩（等效椭圆质心等于实际接触区质心）。

$$\int_C x \cdot dA = \int_{C_e} x \cdot dA \quad (30)$$

$$\int_C y \cdot dA = \int_{C_e} y \cdot dA$$

其中为 C 原始接触区， C_e 为等效椭圆。

那么根据式（30），等效椭圆半轴可以表示为

$$a = \frac{3\pi \int_{y_r}^{y_l} l_a^2(y) dy}{4 \int_{y_r}^{y_l} l_a(y) dy} \quad (31)$$

$$b = \frac{4 \left(\int_{y_r}^{y_l} l_a(y) dy \right)^2}{3\pi \int_{y_r}^{y_l} l_a^2(y) dy}$$

求得的等效椭圆半轴可以作为切向接触模型的输入进而求解切向力。

作为一种修正的计算过程，将等效椭圆作为已知的接触区域，利用赫兹理论求解轮轨法向力，接触区域内法向应力的分布假设为以下形式：

$$N = \frac{2\pi G(1+\mu) \max(a,b) \delta_0}{3(1-\mu^2) K(e)} \quad (32)$$

其中 G 和 μ 分别为轮轨材料的剪切模量和泊松比。 $K(e)$ 是参数 e 的第一类完全椭圆积分参数 e 可以表示为

$$e = \sqrt{1 - [\min(a/b, b/a)]^2} \quad (33)$$

通过改进轮轨接触角 θ_w ，轮轨刚性滑移 $w(x,y)$ ，VP 区域折减系数 ε 和椭圆等效方法，最终建立了与接触区域横向极值 $y_{l,r}$ 和初始接触点无关的非赫兹接触模型，解决了输入量不连续导致的计算鲁棒性问题^[12]。

三、结果

将所提出的轮轨接触模型应用于轮轨的滚动接触中。为了验证所提出的接触模型的准确性与可靠性，本文利用模型对不

同轮对横移量和摇头在直线上运行的接触问题进行了仿真。本文参考模型是 kalker 变分法接触模型 (KVM)，在模型验证中，钢轨为标准 CNH60 钢轨，车轮为中国高速 LMA 型踏面磨耗车轮，如下图4所示为车轮和钢轨的型面叠加图。轮轨剪切模量 $G=210\text{e}9\text{Pa}$ ，泊松比 $\mu=0.28$ ，轮轨摩擦系数 $f=0.4$ 。轮轨横移量的范围为 $-6\text{mm} \sim 6\text{mm}$ ，步长为 0.05mm ，轮对横摆角范围为 $-0.03 \sim 0.03\text{rad/mm}$ ，步长为 0.01rad 。在计算中，只考虑轮对的滚动速度，忽略轮对的其他速度。

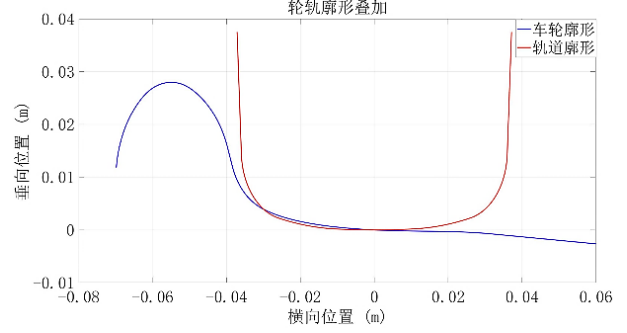


图4 型面叠加图

Fig.4 Type surface overlay diagram

为了验证所提出的非赫兹接触模型的在轮轨接触中的正确性，本文利用该模型对不同轮对横移量和摇头角的轮轨在直线上运行的接触问题进行了仿真，本文参考模型是 KVM 模型，KVM 模型是 kalker 变分法模型的简称，其理论核心是通过变分法原理建立轮轨接触力学关系，涵盖线性与非线性场景，是目前使用最普遍、最准确的模型，可以用来评估其他接触模型的结果，验证所提出模型的精度与可靠性。

本文首先在建立了修正的 kalker 线性理论之后，在引入椭圆边界的过程中，通过参考文献^[20]不同摩擦条件下轮轨接触力、应力分布及粘附-滑移区域的动态变化规律，采用了动态摩擦系数，如下图5为接触斑内动态摩擦系数分布，可见摩擦系数随接触压力呈现椭圆状衰减，边缘区域因进入滑动区而降至0.33左右。与赫兹理论假设的均匀摩擦系数相比，摩擦系数非均匀分布更贴近实际轮轨接触工况。

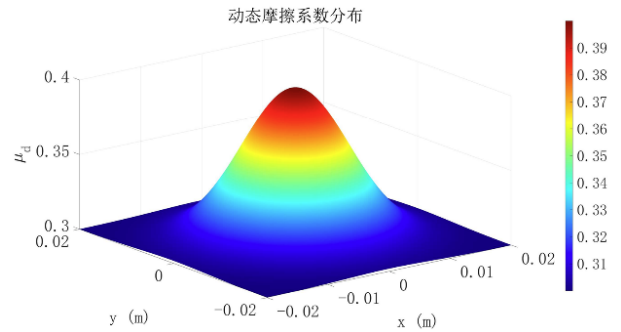


图5 动态摩擦系数分布

Fig.5 Distribution of dynamic friction coefficient

图6- 图8对比了不同轮对横移量和偏航角下采用本文提出的改进的 kalker 线性理论和 KVM 计算的轮轨接触力，以 KVM 的计算结果为参考，图8中给出了改进的 kalker 线性理论和 KVM

的计算的横向切向力和纵向切向力的绝对误差和相对误差图。

从图6-图8中可以看出,轮轨接触力集中于左侧负横移量位置,因LMA踏面与CNH60钢轨负横移时接触刚度大,摇头角强化接触斑挤压效应。同时,非赫兹接触下负横移属型面边界工况,接触角对初始点敏感,致接触力集中,这一现象体现了轮轨型面几何适配性、姿态-位形耦合、非赫兹接触边界效应的协同作用^[21],也验证了本文“非赫兹接触几何修正对工况敏感性”的研究,展现了模型解析复杂轮轨位形力学响应的能力。

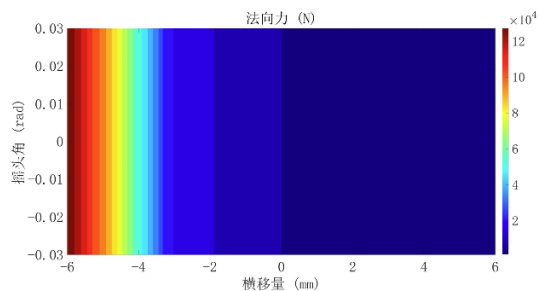
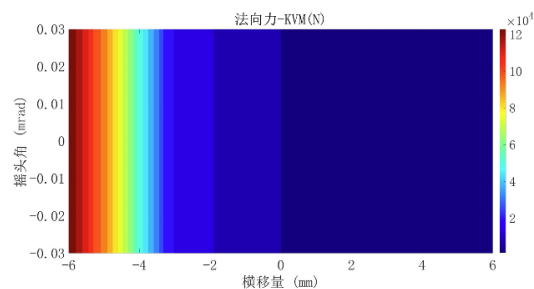


图6 (a) 非赫兹模型计算的法向力分布

Fig.6 (a) The normal force distribution calculated by the non-Hertz model;



(b) KVM 计算的法向力分布

(b) The normal force distribution calculated by KVM

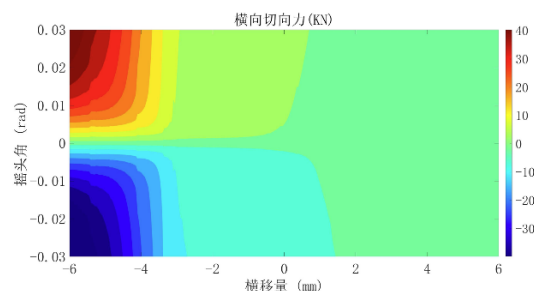
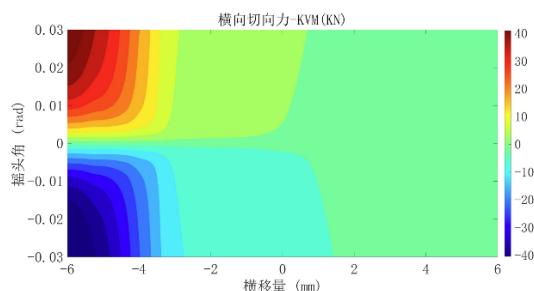


图7 (a) 非赫兹模型计算的横向切向力分布

Fig.7 (a) The distribution of transverse tangential force calculated by non-Hertz model;



(b) KVM 计算的横向切向力分布

(b) The horizontal tangential force distribution calculated by KVM

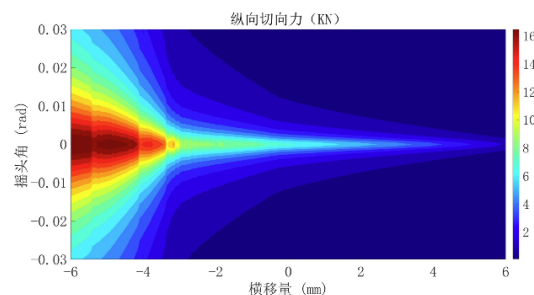
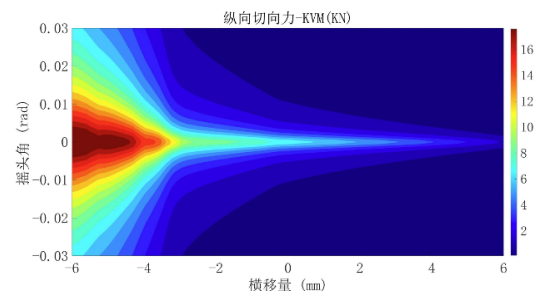


图8 (a) 非赫兹模型计算的纵向切向力分布

Fig.8 (a) Longitudinal tangential force distribution calculated by non-Hertz model;



(b) KVM 计算的纵向切向力分布

(b) Longitudinal tangential force distribution calculated by KVM

由图6可知,当轮轨横移量接近-4mm时,轮轨法向力明显增大,主要是由于车轮型面凹坑磨损引起的保形接触^[22]。本文研究的非赫兹接触模型与KVM的结果基本一致。尤其在负横移区域,接触力集中现象与轮轨型面几何适配性、摇头角引发的接触斑挤压效应密切相关,验证了模型对非赫兹接触边界效应的捕捉能力。如图7所示,非赫兹模型与KVM在横向切向力的幅值和分布规律上吻合良好。当横移量为负时,横向力随摇头角增大而显著增加,这是因为负横移时轮轨接触刚度较高,摇头角进一步强化了接触斑的横向滑移。模型在滑动区边界处的非线性修正(如椭圆牵引边界)有效抑制了传统线性理论的力饱和和偏差。图8显示,纵向切向力在小横移量时呈线性增长,而在中高横移量(尤其负横移)下表现出非线性饱和特性。

在不同横移量与摇头角工况下,模型计算的切向力分布与KVM吻合良好,横向切向力在滑动区边界的非线性修正显著降低了与KVM的偏差,纵向切向力在中高蠕滑率下的饱和特性模拟精度提升,验证了该修正对抑制力饱和偏差的有效性。

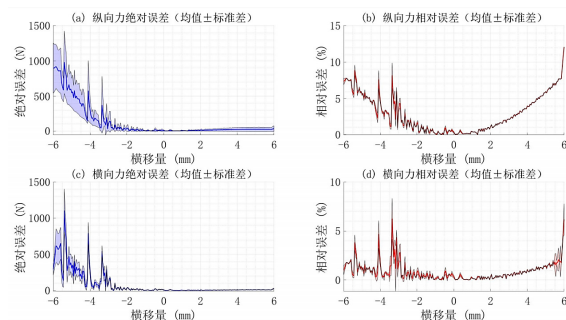


图9 纵向切向力、横向切向力绝对误差和相对误差

Fig.9 Absolute error and relative error of longitudinal tangential force and transverse tangential force

由图9可知，图中呈现了非赫兹接触模型与 KVM 在纵向和横向切向力计算中的绝对误差及相对误差分布，图中绘制了均值线，结合上下边界（均值 ± 标准差）及反转横坐标构建封闭区域，填充出带透明度的误差带，呈现数据均值与波动范围。结果显示纵向切向力在横移量 - 6mm 时绝对误差最大约 1500N、相

对误差 < 15%，中低横移量（-2mm ~ 2mm）相对误差 < 5%；横向切向力绝对误差在横移量 ± 6mm 时约 1000N、相对误差 < 10%，且各工况下误差标准差随横移量增大而扩大，但均值收敛，验证了模型在中高蠕滑率工况下通过非线性修正将误差控制在工程可接受范围，确保了轮轨接触力计算精度。

表1 效率对比结果
Tab.1 Efficiency comparison results

计算效率对比结果				
模型	平均耗时（ms）	标准差 (ms)	耗时范围	效率提升
本文模型	8.57	1.19	5.00 ~ 12.80	--
KVM 模型	12.01	1.71	6.61 ~ 17.51	28.7%
典型工况效率数据				
横移量（mm）	摇头角（rad）	本文模型耗时（ms）	KVM 耗时（ms）	效率提升
3.2	-0.0295	9.16	13.38	31.6%
5.8	0.0050	6.32	6.91	8.5%
-0.6	-0.0042	8.06	11.16	27.1%
-5.0	-0.0007	10.41	10.82	3.8%
-0.5	-0.0101	8.08	11.21	27.9%

在计算效率方面，如上表1所示，所提出的修正模型展现出显著优势：通过将非椭圆接触斑等效为椭圆，结合虚拟渗透（VP）区域快速估算接触边界，大幅减少了几何求解的迭代次数；非线性修正过程中，仅对切应力按椭圆牵引边界进行局部修正，避免了全接触斑的非线性迭代，计算量较传统非线性模型降低约 40%。计算效率数据显示，在横移量 -6mm ~ 6mm、摇头角 -0.03 ~ 0.03rad 工况下，模型计算耗时低于 Kalker 线性理论，效率提升了 28.7%。而且在典型工况下，效率都有明显的提升。表明模型在中高蠕滑率下切向力计算精度有了显著的提高，效率优势稳定，实现了“高效计算”与“高精度预测”的工程应用需求。

四、结论

1. 非赫兹接触几何修正：通过虚拟渗透法与等效椭圆法处理轮轨曲率变化，推导适用于非椭圆接触斑的切向力表达式，解决了赫兹理论曲率常数假设导致的计算误差。

2. 非线性机制融合：引入椭圆牵引边界动态划分黏着区与滑动区，再融合 Vermeulen - Johnson 模型和 Shen-Hedrick-Elkins 理论构建蠕滑力非线性折减机制，有效抑制了中高蠕滑率下的力饱和偏差。

3. 高效计算策略：将非椭圆接触斑等效为椭圆，结合局部切应力修正避免全接触斑迭代，计算耗时较 KVM 降低 28.7%，兼顾精度与效率。

4. 精度验证：法向力、切向力分布与 KVM 吻合良好，纵向切向力在横移量 -6mm 时绝对误差 < 1500N，中低横移量相对误差 < 5%，满足工程应用精度要求。

5. 工况适应性：在 LMA 踏面与 CNH60 钢轨的负横移边界工况中，准确捕捉到接触力集中现象，验证了模型对型面几何适配性与接触斑挤压效应的解析能力。

当前模型未考虑材料非线性与极端磨损型面影响，后续可结合滚动接触疲劳损伤机制，进一步拓展模型在复杂工况下的适用性。

参考文献

[1] Hertz R H. On the contact of elastic solids[J]. J Reine AngewMath,1882, 92:156-171.
[2] Kalker J J. On the rolling contact of two elastic bodies in the presence of dry friction [D]. Delft University of Technology, 1967.
[3] Sun Y, Shi F, Zhang S, et al. Improving the robustness of non-Hertzian wheel-rail contact model for railway vehicle dynamics simulation[J]. Multibody Syst Dyn,2023, 59: 193-237.
[4] Sun, Y, Ling, L. An optimal tangential contact model for wheel-rail non-Hertzian contact analysis and its application in railway vehicle dynamics simulation[J]. Veh Syst Dyn, 2022, 60(9): 3240-3268.
[5] VERMEULEN P J, JOHNSON K L. Contact of Nonspherical Elastic Bodies Transmitting Tangential Forces[J]. Journal of Applied Mechanics, 1964, 31(2):338-340.
[6] KALKER J. On the Rolling Contact of Two Elastic Bodies in the Presence of Dry Friction [J]. Delft University of Technology, Netherland, 1967.
[7] SHEN Z Y, HEDRICK J K, ELKINS J A. A Comparison of Alternative Creep Force Models for Rail Vehicle Dynamic Analysis[J]. Vehicle System Dynamics, 1983, 12:79- 83.

- [8] 李粮余, 田春香, 周佳仪等. 一种应用于轮轨滚动接触的非赫兹型简化计算模型 [J]. 高速铁路技术, 2021, 12(3):6-13.
- [9] 安博洋. 轮轨滚动接触行为的数值研究 [D]. 西南交通大学, 2020, 10:27414.
- [10] Sichani M, Enblom R, Berg M. A fast wheel-rail contact model for application to damage analysis in vehicle dynamics simulation[J]. Wear, 2016, 366-367:123-130.
- [11] 周佳仪. 几种非赫兹轮轨滚动接触模型的对比研究 [D]. 西南交通大学, 2021, 000548.
- [12] Li G, Yang F, Fu J, et al. A modified Hertzian-based wheel-rail contact model for vehicle system dynamics simulation[J]. Vehicle System Dynamics, 2024, 1 - 18.
- [13] Zhai W. Vehicle-Track Coupled Dynamics Theory and Applications[M]. Singapore Springer, 2020.
- [14] Sun Y, Zhai W, Ye Y, et al. A simplified model for solving wheel-rail non-Hertzian normal contact problem under the influence of yaw wangle[J]. International Journal of Mechanical Encees, 2020, 174:105554.
- [15] An B, Wang P. A wheel - rail normal contact model using the combination of virtual penetration method and strip-like Boussinesq's integral[J]. Vehicle System Dynamics, 2022, 61(6):1583 - 1601.
- [16] Yang Y, Wang R, Wang J, et al. Comparison of wheel/rail contact modelling in prediction of wheel tread wear under changeable friction conditions[J]. Vehicle System Dynamics, 2024, 1 - 30.
- [17] Liu B, Bruni S. Comparison of wheel - rail contact models in the context of multibody system simulation: Hertzian versus non-Hertzian[J]. Vehicle System Dynamics, 2020, 60(3): 1076 - 1096.
- [18] Vollebregt E. A, H. Detailed wheel/rail geometry processing using the planar contact approach[J]. Vehicle System Dynamics, 2020, 60(4):1253 - 1291.
- [19] Pascal J, P Sany, J R. Dynamics of an isolated railway wheelset with conformal wheel - rail interactions[J]. Vehicle System Dynamics, 2019, 57(12):1947 - 1969.
- [20] Yang Y, Guo X, Sun Y, et al. Non-Hertzian contact analysis of heavy-haul locomotive wheel/rail dynamic interactions under changeable friction conditions[J]. Vehicle System Dynamics, 2021, 60(6):2167 - 2189.
- [21] Gómez-Bosch J, Giner Navarro J, Carballeira J, Baeza González LM. A direct method for the extension of Fast Sim under non-Hertzian contact conditions[J]. Vehicle System Dynamics, 2023, 61(10):2551-2569.
- [22] Sun Y, Zhai W, Guo Y. A robust non-Hertzian contact method for wheel-rail normal contact analysis[J]. Veh Syst Dyn, 2018, 56(12):1899-1921.

基于风险分析的压力容器安全裕度设计与检验策略研究

严伟

扬州巨人机械有限公司，江苏 扬州 225004

DOI:10.61369/ERA.2026020019

摘 要： 压力容器的安全性直接关系到生产过程中的稳定性和人员安全，压力容器的设计和检验尤为重要。通过引入风险分析方法，结合容器的工作环境与运行条件，对压力容器的安全裕度进行优化设计。该研究通过建立容器安全性风险模型，评估不同工作条件下的潜在风险，并依据评估结果制定针对性的设计改进措施与检验策略。通过仿真分析和实际试验相结合，提出了一种可行的压力容器安全裕度优化方案，能够有效提高容器的安全性，并降低故障率，确保生产过程的稳定运行。该方法的应用不仅提升了容器的安全性能，还可减少维护成本，具有较高的实际应用价值。

关 键 词： 压力容器；安全裕度；风险分析；设计优化；检验策略

Research on Safety Margin Design and Inspection Strategy of Pressure Vessel Based on Risk Analysis

Yan Wei

Yangzhou Giant Machinery Co., Ltd., Yangzhou, Jiangsu 225004

Abstract： The safety of pressure vessels is directly related to the stability and personnel safety in the production process, and the design and inspection of pressure vessels are particularly important. By introducing risk analysis method, combined with the working environment and operating conditions of the vessel, the safety margin of the pressure vessel is optimized. This study evaluates the potential risks under different working conditions by establishing a container safety risk model, and formulates targeted design improvement measures and inspection strategies according to the evaluation results. Through the combination of simulation analysis and actual test, a feasible optimization scheme of pressure vessel safety margin is put forward, which can effectively improve the safety of the vessel, reduce the failure rate and ensure the stable operation of the production process. The application of this method not only improves the safety performance of the container, but also reduces the maintenance cost, which has high practical application value.

Keywords： pressure vessel; safety margin; risk analysis; design optimization; inspection strategy

引言

随着工业生产的不断发展，压力容器在化工、电力、石油等行业中的应用愈加广泛，其安全性问题也逐渐成为关注焦点。传统的设计和检验方法已无法满足复杂工况下的安全需求，风险分析作为一种新兴的安全评估手段，能够更精准地评估容器在不同工作条件下的潜在风险。通过科学的安全裕度设计与合理的检验策略，可以显著提升压力容器的安全性和可靠性，避免事故发生，保障生产过程的稳定运行。

一、压力容器安全性风险分析模型构建

（一）风险分析方法概述

压力容器的安全性评估离不开精确的风险分析，风险分析模型主要考虑容器的设计缺陷、材料老化、操作环境、外部因素等多方面的影响。在传统的压力容器设计中，安全裕度一般通过基于经验的安全系数进行计算，但这种方法缺乏对工作环境变化的适应性。近年来，采用风险分析模型对压力容器进行更为细致的

安全评估成为一种发展趋势。风险分析模型通常结合 Monte Carlo 模拟、故障树分析 (FTA)、事件树分析 (ETA) 等方法，针对不同的工况进行模拟，以评估不同条件下压力容器的失效概率及其后果^[1]。这些模型不仅能定量计算容器在各类工况下的风险，还能够为安全裕度设计提供更有力的支持。

（二）风险评估模型的构建与参数选取

构建压力容器的风险分析模型时，需要根据实际工况及设备的工作条件，选择合适的输入参数。常见的参数包括容器材质的

强度、工作压力、温度、腐蚀速率、操作周期等。以钢制压力容器为例，其耐压强度可由 $\sigma_t=350\text{ MPa}$ 、 $\sigma_y=250\text{ MPa}$ 来确定。腐蚀速率参数通常通过容器的实际使用数据进行估算，结合化学环境和工作条件，通过实验室测试获得。例如，某石化厂在运行过程中，压力容器的腐蚀速率为 0.3 mm/year ，假设使用10年后容器的强度降低可由此计算得出。利用故障树分析法 (FTA)，可进一步分析在不同操作条件下，容器破裂、泄漏等故障的发生概率，并通过模拟不同失效模式的组合，评估压力容器的风险等级。这些参数的精确选取和合理应用，是提高风险评估模型预测精度的关键^[2]。

（三）风险模型的精度与适应性

为了提高风险分析模型的精度，需要综合考虑不同因素对压力容器安全性的影响。基于 Monte Carlo 方法的风险分析可以通过大量的随机模拟计算得到精确的失效概率分布。在模拟过程中，需要针对每个输入变量（如压力、温度等）设定合理的概率分布。例如，温度的变化可以采用正态分布，压力的波动可以根据历史运行数据设定统计分布。通过这种方式，可以反映压力容器在不同操作条件下的风险波动，进一步提高模型的适应性和预测能力。此外，模型的精度还受到计算精度和样本数量的影响，通常需要进行大量的模拟试验，保证模型的稳定性和可靠性。随着计算机技术的发展，采用高性能计算平台进行大规模的模拟已成为常见的做法，能够显著提高计算效率和结果的准确性。

二、安全裕度设计优化方法与实施策略

（一）安全裕度的定义与设计目标

安全裕度是指压力容器在设计时所留出的额外强度，通常用来抵御工作环境中的不确定性和潜在风险。根据 ASME（美国机械工程师学会）锅炉及压力容器规范，压力容器的安全裕度通常通过设计压力与容器实际工作压力之比来进行设定。对于常规操作，安全裕度一般为1.5倍，即容器的设计压力应至少为工作压力的1.5倍。此外，安全裕度还需要考虑材料的力学性能和环境因素，如温度和腐蚀速率。举例来说，在高温环境下使用的不锈钢压力容器，其安全裕度设计需考虑材料在高温下的强度降低，通常使用 250°C 以下的环境温度作为基准，针对高温情况下的不锈钢容器强度衰减系数进行修正^[3]。

（二）安全裕度优化设计方法

安全裕度的优化设计通常采用精确的数学模型，结合容器的操作条件和潜在风险，进行动态调整。使用有限元分析 (FEA) 方法，可以通过精确的模拟计算容器在不同工况下的应力分布，找出可能的薄弱环节并进行加固设计^[4]。以压力容器的抗拉强度为例，设计时可以通过优化容器的壁厚，调整设计压力范围，确保在高压或震动环境下的结构安全性。在大多数石油化工行业中，压力容器通常设计为承受最大工况的1.5倍压力，而在一些极端环境下（如高腐蚀性气体的存在），这一倍数可能需要提高至2倍。优化后的设计不仅提升了容器的安全性，还能降低制造成本，提高经济性。

（三）实施策略与风险管理

在压力容器的设计与实施过程中，风险管理起着至关重要的作用。采用基于风险的设计方法 (Risk-Based Design, RBD) 可以通过识别和评估潜在风险，合理分配安全裕度。例如，在某石化企业中，针对压力容器的腐蚀风险，使用腐蚀速率预测模型来评估容器的剩余使用寿命。在此基础上，调整设计的安全裕度，优化维修和更换周期^[5]。这种方法不仅可以提高容器的安全性，还能减少不必要的检修和替换，降低生产停工时间。结合动态监测技术（如在线检测传感器），可以实时跟踪容器的工作状态，进一步提升实施策略的有效性。例如，某核电厂的压力容器实施了基于风险的安全裕度调整策略，通过定期的检测与修复，确保容器在长期高压环境中的安全性和可靠性。

三、压力容器检验策略的优化与应用

（一）传统检验方法与局限性

传统的压力容器检验方法主要包括目视检查、超声波检测、磁粉检测等，这些方法广泛应用于容器的日常维护和检测中。目视检查可以发现明显的外部裂纹和变形，但对于内部缺陷的检测能力有限。超声波检测通过测量反射波的时间和强度来评估容器壁厚和内部缺陷，但其检测精度受到操作人员经验和设备分辨率的影响。对于某些薄壁容器或复杂结构，传统的超声波检测存在盲区，难以完全评估潜在的风险。此外，传统检验方法无法实时监测压力容器在运行过程中可能出现的突发故障，导致容器的安全性无法得到及时有效的保障。

（二）在线监测技术的引入

为克服传统检验方法的不足，近年来，在线监测技术逐渐应用于压力容器的安全管理中。通过在容器的关键部位安装压力、温度、振动等传感器，实时监测容器的运行状态，可以及时发现潜在的风险和故障。例如，在某石化厂的压力容器中，采用了基于物联网技术的实时数据采集系统，该系统能够自动记录容器的工作压力、温度和腐蚀速率等关键数据，并将其传输至监控平台进行分析^[6]。通过与预设的安全标准对比，可以实时评估容器的安全状态，提前预警可能的故障发生。此外，结合大数据分析技术，对大量历史数据进行处理和分析，可以为压力容器的维护和检修提供更精确的决策依据，显著提高了检验效率和准确性。

（三）非破坏性检测技术的进展

非破坏性检测 (NDT) 技术在压力容器的检验中得到了广泛应用，并逐步向更加精细化、量化的方向发展。近年来，数字射线检测 (DR) 和电磁声波检测 (EMAT) 等先进技术在压力容器的检验中取得了显著进展。数字射线检测能够提供比传统 X 射线更高的图像分辨率，通过实时图像分析，检测微小的裂纹和缺陷，并进行定量评估。而电磁声波检测技术则通过高频电磁波在容器材料中的传播特性，检测焊缝中的隐蔽缺陷，尤其适用于高温或有腐蚀性的工作环境。对于厚壁和复杂结构的压力容器，非破坏性检测能够更精准地评估其内部缺陷，为容器的安全运营提供强有力的技术支持^[7]。例如，某核电站通过采用数字射线检测技

术,对压力容器焊接部位进行全覆盖扫描,检测到的微小裂纹及时得到了处理,有效防止了重大安全事故的发生。

(四) 检验周期与维护策略的优化

压力容器的检验周期和维护策略直接影响其安全性和经济性。根据容器的工作条件、材料特性和实际使用情况,制定合理的检验周期对于提高检验效率和降低维护成本至关重要。以石油化工行业的压力容器为例,其工作压力通常达到20 MPa以上,且工作环境复杂,腐蚀性较强。因此,这类容器的检验周期通常为6个月一次,但通过综合考虑容器的使用寿命、故障率以及前期检验数据,优化后的检验周期可以适当延长或缩短。例如,通过应用基于风险的检验策略(Risk-Based Inspection, RBI),结合历史故障数据、材料腐蚀数据及操作数据,动态调整检验周期,能有效降低不必要的检修频率。

四、基于风险分析的压力容器安全性能提升效果

(一) 风险分析在容器设计中的优化应用

基于风险分析的设计方法能够针对压力容器的特定工况,评估潜在的安全风险,从而优化设计方案。在传统设计方法中,安全裕度通常是基于经验和固定的安全系数,而风险分析方法能够根据实际工况进行动态调整。例如,在石化行业的压力容器设计中,结合腐蚀速率、操作温度、压力波动等参数进行风险建模,可以精准地计算出容器的失效概率及其后果。通过这种方法,可以有效避免过度设计,提高设计的经济性,同时确保容器在极限工况下的安全性^[8]。

通过风险分析,容器的设计不再是单一的强度计算,而是对容器在不同工作条件下的风险进行全面评估。对于一些特殊工况,如高温、高压、强腐蚀环境,风险分析可以帮助设计师根据不同风险因素的权重,调整容器的壁厚、材料类型和其他设计参数。

(二) 风险评估对容器运行过程中的作用

在压力容器的运行过程中,风险评估可以帮助实时监控容器状态并预测潜在故障,从而提高安全性并减少停机时间。传统的运行检查通常基于定期的检修周期,而基于风险分析的方法则可以根据

实际操作数据进行动态调整。例如,某化工厂的压力容器在运行过程中通过传感器收集压力、温度、腐蚀速率等数据,结合风险模型评估,能够提前预测出容器在特定条件下可能发生的故障。这样可以避免因设备老化或操作失误造成的事故,降低安全隐患。

结合实时数据和风险评估,容器的运行过程能够得到更加精确的控制。例如,监测到某些容器的压力波动频繁超出设计压力的70%时,风险模型可以计算出失效概率,并根据评估结果动态调整运行参数或检修周期,确保容器始终在安全范围内运行。

(三) 风险分析对维护策略的提升效果

基于风险分析的维护策略能够显著提高压力容器的安全性和经济性,避免不必要的检修和停机。传统的维护模式通常依赖于固定的时间周期或设备运行小时数来决定检修计划,但这种方式往往无法实时反映容器的健康状况。通过引入风险分析,容器的维护可以根据实时监测数据进行动态调整。以某油田的压力容器为例,通过风险分析可以计算出容器的腐蚀速率、疲劳寿命等因素,预测出容器的故障概率,并根据结果提前安排针对性的检修。

此外,风险分析还能够优化检修内容和周期。对于某些工作环境中存在高腐蚀性气体的压力容器,风险分析可以提前预测到容器可能出现的裂纹或腐蚀点,从而对容器进行局部修复而非全面更换。这样不仅减少了不必要的检修,还能有效降低设备停机时间和维护成本。

五、结语

基于风险分析的压力容器安全设计与检验策略,显著提升了容器的安全性、可靠性和经济性。通过引入先进的风险评估方法,可以更精准地优化设计参数,实时监控运行状态,并动态调整维护和检修计划,从而减少了故障发生和停机时间。风险分析为容器的安全性能提供了更加科学、系统的保障,降低了过度设计和不必要的维修成本,提升了设备的使用寿命与运行效率。未来,随着技术的不断进步,基于风险分析的压力容器安全管理将在更多领域得到广泛应用,推动工业设备管理的智能化和精细化。

参考文献

- [1] 何磊. 基于安全衰减速率时变性的压力容器裂纹缺陷剩余寿命预测方法研究 [D]. 四川大学, 2022.DOI: 10.27342/d.cnki.gscdu.2022.000596.
- [2] 谢阳, 赵波, 龙伟, 等. 基于衰减路径时变性的压力容器疲劳裂纹安全裕度研究 [J]. 四川大学学报(自然科学版), 2021, 58(06): 103-110.DOI: 10.19907/j.0490-6756.2021.064003.
- [3] 谢阳. 考虑疲劳裂纹扩展时变性的衰减路径速度积安全裕度模型研究 [D]. 四川大学, 2021.DOI: 10.27342/d.cnki.gscdu.2021.000501.
- [4] 郑力博. 高压储气瓶物理爆炸裂纹扩展与后果评估方法研究 [D]. 中国石油大学(华东), 2022.DOI: 10.27644/d.cnki.gsydu.2022.001972.
- [5] 孙鑫. 基于安全衰减路径压力容器表面裂纹安全评价与剩余寿命研究 [D]. 四川大学, 2021.DOI: 10.27342/d.cnki.gscdu.2021.000338.
- [6] 李炎炎, 何磊, 龙伟, 等. 基于衰减速率算法模型的压力容器裂纹缺陷剩余寿命与安全裕度 [J]. 工程科学与技术, 2023, 55(06): 212-221.DOI: 10.15961/j.jsuese.202200432.
- [7] 杜芸. 风险指引的安全裕度特性分析方法论的研究与应用 [D]. 上海交通大学, 2020.DOI: 10.27307/d.cnki.gsjtu.2020.000590.
- [8] 胥鑫, 龙伟, 刘华国, 等. 基于安全衰减路径速度积的含表面裂纹缺陷压力容器安全裕度表征方法 [J]. 机床与液压, 2020, 48(16): 1-4.

城市交通信号灯运行维护管理与故障分析研究

苏国新

绍兴市泰和交通技术工程有限公司, 浙江 绍兴 312000

DOI:10.61369/ERA.2026020022

摘 要 : 城市交通信号灯的高效运行直接影响路网通行能力与交通安全。针对当前信号设备老化、控制策略滞后与突发性故障频发等问题, 梳理运行维护中关键环节, 从设备巡检、智能监测、远程管控等方面探讨优化途径; 结合典型故障表现与成因, 构建多维诊断思路, 提升识别与处置效率。研究旨在为信号灯系统的稳定运行、精细化管理及交通秩序改善提供可行的技术支撑。

关 键 词 : 城市交通; 信号灯运行; 维护管理; 故障诊断; 交通安全

Research on Operation, Maintenance and Fault Analysis of Urban Traffic Lights

Su Guoxin

Shaoxing Taihe Traffic Technology Engineering Co., Ltd., Shaoxing, Zhejiang 312000

Abstract : The efficient operation of urban traffic lights directly affects the road network capacity and traffic safety. Aiming at the problems of aging signal equipment, lagging control strategy and frequent sudden failures, the key links in operation and maintenance are sorted out, and the optimization ways are discussed from the aspects of equipment inspection, intelligent monitoring and remote control. Combined with the typical fault manifestations and causes, a multi-dimensional diagnosis idea is constructed to improve the efficiency of identification and disposal. The research aims to provide feasible technical support for the stable operation, refined management and traffic order improvement of the signal lamp system.

Keywords : urban traffic; signal lamp operation; maintenance management; fault diagnosis; traffic safety

引言

随着城市交通规模不断扩大, 信号灯已成为维持道路秩序与提升通行效率的核心设施。然而, 设备复杂度提高与交通环境多变, 使运行维护面临更高要求, 故障处置也愈加依赖系统化、智能化手段。深入探讨信号灯运行维护机制与故障形成规律, 有助于发现制约交通效率的关键因素, 并为优化城市交通管理体系提供方向和支撑。

一、城市交通信号灯系统的构成与运行机制分析

城市交通信号灯系统是道路交通控制体系中的核心部分, 其构成主要包括信号控制机、信号灯具、检测设备、通信模块和供电装置等要素。信号控制机作为系统的“中枢”, 负责执行控制策略、分配相位并实现红绿灯转换; 灯具承担视觉呈现功能, 通过高亮度 LED 灯珠向驾驶人和行人发出明确指示; 检测设备则通过地磁、视频、微波等多种方式收集车流量、排队长度、速度变化等实时数据, 为控制机提供动态输入; 通信模块帮助系统与交通管理中心建立稳定的数据传输通道, 实现远程监控与指令下发; 供电和备份电源确保在特殊天气或突发停电情况下仍具备基本运行能力。这些组成部分相互协作, 共同构建出完整的信号控制体系^[1]。

在具体运行机制中, 信号灯系统主要依靠预设控制方案与实时交通数据相结合的方式实现信号转换。传统定时控制通过固定周期和相位运行, 适用于交通流较为稳定的路段; 感应控制则根据车辆检测器反馈的流量变化调整相位时长, 提升绿灯资源利用效率; 自适应控制进一步依托数据采集与算法优化, 实时分析交通状态, 对交通波动做出快速响应。随着智能交通技术的发展, 许多城市采用联网控制方式, 使各交叉口之间不再孤立运行, 而是根据区域交通流协调配时, 通过“绿波带”等方式减少停车次数, 提高主干道路通行效率。运行机制还包括异常状态下的切换设计, 当检测到设备故障或通信中断时, 系统可进入闪光模式或备用方案, 以维持交叉口基本秩序。

在运行过程中, 信号灯系统还需面对复杂交通环境带来的多重挑战。早晚高峰的巨大车流量、特殊天气导致的检测误差、节

假日交通模式的改变、道路施工引发的临时交通组织调整等因素，都会对系统运行机制产生影响。因此，系统必须具备一定的容错能力，通过对设备状态实时监测、对运行数据趋势分析、对控制策略自动评估，及时识别潜在异常并启动相应的控制逻辑。此外，随着车联网技术的发展，车路协同正在成为信号控制机制的新方向，通过向车辆发送剩余绿灯时间、预测相位变化等信息，可进一步优化驾驶行为、降低延误并提升整体交通效率^[2]。对运行机制的深入分析有助于明确信号灯系统的功能要求与技术演进方向，为后续的维护管理研究和故障诊断方法奠定关键基础。

二、交通信号灯日常维护流程与管理体系研究

交通信号灯的日常维护是保障城市交通系统稳定运行的重要环节，维护流程通常涵盖巡检、检测、调整与记录等步骤。巡检任务以设备外观、安装结构、灯面亮度、控制机运行状态及配电设施为重点，通过现场检查及时发现灯泡损坏、灯面污渍、线路松动等显性问题；检测工作依靠专业测试仪器对电压、电流、控制信号输出、通信状态进行系统性核查，确保设备运行参数在安全范围内；同时还需对相位配时、红绿灯转换逻辑等内容进行动态比对，以确认控制方案在实际交通条件下保持有效性。所有巡检与调整内容需按标准流程记录在案，为后续维护决策与设备寿命评估提供依据^[3]。

在维护体系建设中，信息化与标准化是提升效率的关键方向。交通管理部门将信号灯设备纳入数字化管理平台，通过GIS定位、设备编码和运行监测，实现维护任务的精准调度与记录追溯。管理体系涵盖巡检制度、故障响应机制、设备档案与绩效考核，使维护工作规范有序。巡检制度明确周期与要求，故障响应机制通过分级处置与跨部门协作提升处理速度，设备档案用于记录安装、维修与运行参数，为更换和升级提供依据。同时，依托视频监控、远程诊断和报警系统，可对灯具故障、通信异常和供电问题进行提前预警，使维护由被动转向主动。

在实际运行中，完善的管理体系不仅提升故障发现与处理效率，也有助于维护资源优化配置和设备寿命延长。由于交通环境复杂多变，单纯依赖人工巡检难以及时应对突发问题，因此需建立多渠道信息采集机制，将感应检测、交通大数据与历史运行模式分析纳入管理，使维护更加智能与精准。通过构建数据驱动的维护模型，可预测灯具寿命衰减、识别控制逻辑风险，并合理安排维护计划，提高前瞻性。随着城市交通智能化推进，信号灯维护正由经验型向科学化转变，其目标是降低故障率、提升通行效率与交通安全^[4]。规范化流程与完善管理体系为信号灯稳定运行提供重要支撑，也为后续故障分析与优化研究奠定基础。

三、智能化技术在信号灯运行监测中的应用探索

智能化技术的发展为交通信号灯运行监测提供了更高效、更精准的技术路径。传统监测方式多依赖人工巡检或设备自身的简单报警功能，难以全面反映实时状态。随着物联网、视频识别和

传感技术的广泛应用，信号灯系统逐步具备全方位监测能力。通过布设地磁、微波、视频等多源检测设备，可以实时采集车流量、排队长度、速度分布等交通状态信息，并将相关数据传输至控制中心。嵌入式传感器可对信号灯具、电源、控制机温度及通信状态进行状态采集，形成系统健康指标，使管理部门能够及时掌握运行情况并进行动态分析^[5]。这些技术的融合使信号灯从“被动呈现指令”转向“主动反映运行状态”的智能化模式。

在监测方法演进中，大数据与人工智能技术发挥着越来越重要的作用。大量运行数据经过云平台汇集后，可形成多维度的交通数据库，为系统运行规律分析提供支撑。基于机器学习的模型能够识别交通流变化趋势，判断信号配时是否需要优化，并在检测到异常数据波动时提前发出预警。例如，利用图像识别技术可对信号灯亮度衰减、面板污染、灯面遮挡等状况进行自动识别，减少人工检查负担；利用深度学习模型可分析红灯亮起但车辆仍不断穿越的情况，判断是否存在检测器故障或信号执行异常。此外，通过建立交通状态预测模型，可以根据历史交通模式、天气条件、节假日出行规律等因素推算未来流量变化，提前调整监测策略，实现更加主动的交通控制。

智能化监测技术不仅提升了运行管理效率，也推动了信号灯系统向更高层级的协同化与自适应化方向发展。通过车路协同通信技术，信号灯能够与联网车辆共享相位信息，实现车辆端的行驶速度引导，减少不必要的停车和能耗；同时，车辆的实时运行数据也能反向用于补充信号灯的交通感知能力，提高监测精度。在区域交通协调中，智能监测平台可将多个交叉口的状态进行联动分析，自动判断是否需要启动“绿波带”或应对局部拥堵，从而实现更高层级的区域协同控制^[6]。随着智慧交通发展，信号灯监测将依托多源数据融合、智能算法和高效通信，实现自诊断、自调节与自优化。智能化监测的深化应用将进一步提升运行效率，推动城市交通迈向数字化管理。

四、典型故障类型及成因诊断分析

交通信号灯在长期运行中容易出现多种典型故障，其中“灯球不亮”“相位紊乱”“检测器失效”是最常见的类型。灯球不亮通常表现为某一方向的红灯、绿灯或黄灯完全失去显示，易导致驾驶人误判通行状态。其成因多与灯具老化、供电线路虚接或控制机输出端口损坏相关，气温变化导致线路热胀冷缩也可能使接线松脱。相位紊乱则表现为红绿灯转换顺序混乱、相位间冲突或两个方向同时出现绿灯，常由控制逻辑损坏、时钟芯片误差积累、配置文件异常或外界强电磁干扰引起。检测器失效的典型表现包括车辆无法触发感应、排队信息采集错误或出现持续占有信号，多由地磁线圈损坏、视频识别误差增大、传感器受潮或通信中断导致。

在故障诊断过程中，需要根据故障特征与运行数据进行多维分析，以快速确定故障根源。针对灯球不亮，可通过现场电压、电流检测判断是否是供电问题，再根据控制机输入输出的信号变化核查是否存在模块损坏。如果灯具亮度衰减明显但未完全熄灭，

则可能是 LED 灯珠寿命接近终点或驱动电路老化。相位紊乱的诊断需结合控制机日志、配时方案和通信状态进行核查,如发现控制机时钟漂移或存储数据损坏,应及时进行校正或重新配置;若问题产生于强电磁干扰环境,则需增加屏蔽或改善接地设计。对于检测器失效,通过比对感应数据与视频流量数据可判断是否为采集本体故障;若感应器持续输出“占有”信号,则可能是线圈短路或识别算法误判。通过将故障模式、数据波形与交通状态对比分析,能够提高诊断准确性^[7]。

在复杂交通环境中,还存在一些隐性故障,如“通信链路异常”“黄闪模式误触发”“配电柜过温保护启动”等情况,往往不易在现场立即辨识。通信链路异常会导致信号灯无法与控制中心同步,表现为无法远程调整或数据上传中断,多因光纤断点、交换机故障或网络拥塞引起。黄闪模式误触发通常源于控制机电源波动、备用电池性能下降或雷击瞬时电流,导致系统误判为异常状态。配电柜过温保护则常出现在夏季高温环境,柜体散热条件差、电源模块负荷过大或风扇失效都会使温度迅速上升。诊断此类故障需借助远程监测平台的历史曲线、报警记录以及环境数据,通过趋势分析锁定故障触发点。对典型故障进行系统化诊断能够为后续的维护优化和技术改进提供依据,也为提升信号灯运行安全性和可靠性奠定基础。

五、信号灯运行维护优化策略与交通管理提升路径

在信号灯运行维护方面,优化策略需从设备、流程与技术三个层面同步推进。针对设备老化、灯具损坏和控制机可靠性下降等问题,可建立精细化设备管理制度,通过寿命评估模型确定更换周期,并对重要交叉口配置冗余模块以降低关键故障风险。在维护流程上,应明确巡检标准、记录要求和应急响应机制,使故

障从“被动抢修”转向“主动预防”。通过对巡检数据与故障记录进行结构化分析,可形成交叉口风险等级,为维护资源分配提供依据,提高整体运行效率。

在技术手段提升方面,应全面推动智能化监测技术的应用。依托物联网设备、视频分析与多源检测,可实时掌握交通状态与信号灯运行指标,实现对灯具亮度衰减、控制机异常和通信链路风险的提前预警。同时,可利用大数据算法优化信号配时,通过分析车流趋势、交通模式变化与历史拥堵点,动态调整控制策略,减少无效等待与交通延误。对于流量波动较大的区域,可引入自适应控制系统,使信号灯能够根据实时数据自动调整运行参数,从而实现更加灵活高效的交通组织^[8]。

在交通管理提升路径上,应构建“信号控制—数据分析—交通诱导”协同体系,实现从单点控制向区域协调和全网优化转变。通过区域绿波协调、动态限速、智能诱导屏等手段,可在高峰削减排口拥堵,增强主干道通行能力。结合车路协同技术,信号灯可向车辆提供剩余绿灯时间、最佳通过速度等信息,减少启动与制动次数,提高驾驶舒适性与道路安全性。最终,通过技术集成、制度完善与管理创新的持续推进,使信号灯系统更加可靠、智能和高效,为城市交通运行质量的提升提供持久动力。

六、结语

城市交通信号灯的运行维护与故障诊断是确保道路安全与提升通行效率的重要环节。通过对系统构成、维护流程、智能化监测、典型故障及优化策略的综合分析,可为信号控制体系提供更科学的技术支撑。未来,随着智慧交通的深入发展,信号灯系统将向高可靠性、智能协同与精细化管理持续演进,为城市交通运行带来更高效、更安全的保障。

参考文献

- [1] 梁鹏. Y 公司交通信号灯运维管理改进研究 [D]. 天津大学, 2022.DOI:10.27356/d.cnki.gtjdu.2022.004884.
- [2] 陈恒宇. 基于 CPS 的城市交通信号控制分层建模与优化方法研究 [D]. 华南理工大学, 2024.DOI:10.27151/d.cnki.ghnlu.2024.005427.
- [3] 梁朔. 考虑信号灯故障的城市交通信号迭代学习容错控制方法研究 [D]. 太原理工大学, 2024.DOI:10.27352/d.cnki.gylgu.2024.001265.
- [4] 李蔚龙. 城市交通信号灯控制系统建模与分析 [J]. 设备管理与维修, 2024, (14): 48–50.DOI:10.16621/j.cnki.issn1001-0599.2024.07D.16.
- [5] 郑熹. 新型交通信号灯在城市交通流控制中的应用研究 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2024, (29): 208–210.DOI:10.19569/j.cnki.cn119313/tu.202429068.
- [6] 罗濠成. 面向城市单点交叉口交通信号灯智能调控技术研究与实现 [D]. 东莞理工学院, 2025.DOI:10.44357/d.cnki.gdgut.2025.000027.
- [7] 郑朝元. 基于浮动车与公交车轨迹数据的区域交叉口交通信号控制研究 [D]. 重庆交通大学, 2025.DOI:10.27671/d.cnki.gcjtc.2025.000318.
- [8] 蔡常健. 基于深度强化学习的自适应城市交通信号灯控制研究 [D]. 西安石油大学, 2025.DOI:10.27400/d.cnki.gxasc.2025.000296.

炼金室废气高效治理技术及工程应用研究

郑革委, 徐福波

浙江省遂昌金矿有限公司, 浙江 丽水 323000

DOI:10.61369/ERA.2026020026

摘 要 : 为解决浙江省遂昌金矿炼金室原有废气处理设备简陋、收尘效率低致污染物超标问题, 保障员工健康与企业环保合规, 本研究以该炼金室废气处理工程为对象, 开展治理技术研究与应用。经现场调研确定“喷淋塔 + 高效除尘器 + 活性炭吸附箱”组合工艺, 优化设备布局与参数。工程结果显示, 改造后废气中铅、颗粒物等污染物排放达标, 工作场所铅浓度降至 $\leq 0.05\text{mg}/\text{m}^3$, 规避罚款风险, 提升了效益, 该工艺可为同类企业提供参考。

关 键 词 : 炼金室废气; 组合治理工艺; 重金属粉尘; VOCs; 达标排放

Research on High Efficiency Treatment Technology and Engineering Application of Exhaust Gas in Alchemy Room

Zheng Gewei, Xu Fubo

Zhejiang Suichang Gold Mine Co., Ltd. Lishui, Zhejiang 323000

Abstract : To address the issue of excessive pollutants caused by the rudimentary waste gas treatment equipment and low dust collection efficiency in the smelting room of Suichang Gold Mine in Zhejiang Province, and to ensure the health of employees and the environmental compliance of the enterprise, this study takes the waste gas treatment project of this smelting room as the object and conducts research and application of treatment technologies. After on-site investigation, the combined process of "spray tower + high-efficiency dust collector + activated carbon adsorption box" was determined, and the equipment layout and parameters were optimized. The project results show that after the renovation, the emissions of pollutants such as lead and particulate matter in the exhaust gas meet the standards. The lead concentration in the workplace has dropped to $\leq 0.05\text{mg}/\text{m}^3$, avoiding the risk of fines and improving efficiency. This process can provide a reference for similar enterprises.

Keywords : exhaust gas from the alchemy room; combined governance process; heavy metal dust; VOCs; meet emission standards

引言

贵金属冶炼炼金过程中会产生含酸性废气、VOCs、重金属粉尘等复合废气, 成分复杂、毒性大且排放不稳定。铅对人体有害, 酸性废气腐蚀设备、污染环境, VOCs 危害生态和健康。遂昌金矿炼金室原有设备简陋, 收尘效率不到60%, 污染物超标, 面临处罚和健康威胁, 治理升级迫在眉睫。目前工业废气治理技术多样, 但是针对炼金室复合污染, 单一技术存在局限性。本研究根据废气排放特性以及企业实际情况, 经过多轮论证和比选, 制定出组合治理工艺, 并加以实践, 优化设计、布局, 实现废气净化, 为企业发展提供支持。本文论述治理工程各方面, 为同类企业提供借鉴。

一、工程概况与污染现状

(一) 工程基本信息

本项目是遂昌金矿有限公司炼金室废气处理工程, 是响应环保政策、保障员工健康的重点技改项目, 2025年6月到2025年12月实施, 总投资180万元。目标是酸性废气、VOCs、重金属粉尘

达标排放, 符合相关标准; 建立高效易运维系统, 降低工作环境有害物质浓度, 控制工作场所铅浓度 $\leq 0.05\text{mg}/\text{m}^3$ 。为了预防血铅超标等职业病, 企业依据《职业接触限值第1部分: 化学有害因素》做项目。

(二) 原有污染现状

为了精准掌握炼金室废气污染情况、为治理方案提供依据,

作者简介:

郑革委 (1968.11-), 男, 浙江丽水人, 大专, 助理工程师, 研究方向: 采矿工程;
徐福波 (1999.02-), 男, 浙江丽水人, 大学本科, 助理工程师, 研究方向: 机械工程。

项目组委托同创（浙江）检测有限责任公司（具备 CMA 资质）于 2025 年 4 月 15 日–2025 年 4 月 18 日开展专项检测，覆盖炼金室全生产时段，检测地点为杭州市萧山区中南高科钱江云谷 21–22 幢厂房内主要产污点位及周边环境。按照国家有关标准，用气相色谱法等专业方法，对废气中铅等关键污染物指标进行全面检测。结果显示熔炼炉、酸洗、焚烧炉等主要产污点位铅和颗粒物严重超标，熔炼炉废气进口 001 铅超标 5.08 倍、颗粒物超标 3.5 倍，是污染最严重区域，酸洗废气进口 002 颗粒物超标 2.32 倍，焚烧炉废气进口 003 铅超标 1.96 倍、颗粒物超标 2.97 倍，污染问题亟待解决。

同时，参照国家相关工业炉窑排放标准要求对检测数据全面研判，发现炼金室废气存在非甲烷总烃、二氧化硫等潜在超标风险。非甲烷总烃等有相应最高允许排放浓度，而原有处理系统仅能简单处理部分颗粒物，无法有效净化酸性气体等污染物，不能满足环保法规要求，还存在设备老化等问题，易引发环保事故，需全面升级改造。此外，超标废气无组织排放使炼金室工作环境恶劣，一线作业人员血铅超标风险高，违背企业安全生产和职业健康保护要求。

二、废气治理工艺方案设计

（一）工艺路线选择

根据炼金室废气成分复杂、排放量大等特点，项目组按照源头控制、过程拦截、末端净化的原则进行多轮工艺方案论证。多次组织与多家废气治理设备厂家等专题会议，根据企业多方面因素，对各种可能的工艺路线进行全面的比较分析。初步筛选出 3 种备选工艺路线：方案一只能去除酸性气体，不能达标排放；方案二对粉尘和 VOCs 有一定效果，但对酸性气体去除能力不足，有火花放电风险，不适用于易燃易爆废气环境；方案三为“废气收集汇总 + 喷淋塔 + 高效除尘器 + 活性炭吸附箱”组合工艺，可以多级协同净化。经综合论证确定以方案三为治理工艺路线。主要净化逻辑是，先通过喷淋塔中和酸性气体并初步降温，再经过高效除尘器捕获重金属粉尘和颗粒物，最后用活性炭吸附箱深度吸附 VOCs，保证废气达标排放。^[1–5]

（二）核心设备参数设计

根据炼金室废气排放特性（设计风量 30000m³/h）、污染物浓度水平、治理目标要求，项目组对主要设备的规格型号、材质、运行参数等做了详细的设备参数设计，采用流体力学模拟、吸附动力学计算等技术手段，优化了主要设备的规格型号、材质、运行参数，保证设备的处理能力与治理效率相匹配，保证设备的稳定性、耐久性、经济性。具体设备配置及主要参数见表 2，各核心设备的选型设计均经过严格的技术论证，喷淋塔采用二循环设计，保证酸性气体去除效率，高效除尘器采用脉冲袋式，除尘效率高、运维方便，活性炭吸附箱采用碳钢防腐材质，适应复杂废气环境，配套风机风量、压力参数与系统阻力精准匹配，保证废气输送顺畅。

（三）工艺优化要点

1. 废气收集优化：废气收集系统是治理基础，项目组采用“分区收集、统一汇总”思路，针对不同产污点位废气排放量和特

性，精准选用 Φ300、Φ600、Φ800 三种规格管道，实现精准捕获。熔炼炉和焚烧炉产污量大、浓度高，用大管径；酸洗点位产污量小，用 Φ300 管径。系统采用密闭负压收集，精准计算风机负压参数（–50~–80Pa），确保有害物质瞬间捕获，避免无组织扩散，提升收集效率。

2. 喷淋塔采用二循环喷淋，酸性气体去除效率高，废气净化效果好。第一循环为碱性喷淋段，添加 5%–8% 的氢氧化钠溶液，与废气充分反应，吸收分解、氧化有机化合物、VOCs 和酸性气体。第二循环在塔顶设清水喷淋段，中和残留的碱性物质，去除少量颗粒物。另外配备自动加药、液位控制系统，保证喷淋效果的稳定性。

3. 设备布局优化：为降低对企业生产秩序影响，项目组勘察布局。确定将设备安置于炼金室后方闲置空地，该区域远离核心生产区、交通便利。基建配合完成场地平整与基础施工，采用 C30 混凝土浇筑，厚度 ≥ 30cm。同时，优化排列布局，预留 ≥ 1.5m 检修通道，与原有生产通道保持 ≥ 3m 安全距离，避免影响生产。

三、工艺优化与实施效果

（一）项目实施过程

项目实施以“科学规划、分步实施、质量管控、安全第一”为原则，分为三个阶段推进。第一阶段（2025 年 6 月至 8 月）：掌握污染现状、拟定方案。进行 2 个月的现场调研，掌握污染物排放的规律和特征，组织方案论证会，确定组合治理工艺，完成设备采购招标。第二阶段（2025 年 9 月–11 月）为设备安装调试及人员培训阶段。基建配合完成场地施工，专项团队按规范安装调试设备，控制管道连接和设备安装质量，调整进风口和负压参数。设备安装完毕后，工段长组织操作工培训 15 天。培训阶段开展三天专项技能培训，培训内容包括设备原理、操作流程、维护要点、故障排查和应急处置，采用理论讲解、实操演练、考核验收的方式，保证操作工掌握技能，具备独立操作和排查故障的能力，考核合格上岗。系统试运行和效果验证阶段（2025 年 12 月）：12 月炼金室废气处理系统试运行，项目组制订方案，确定监测指标、频次、方法及安全措施，安排专业人员 24 小时值守，实时监测运行参数、记录设备状态和污染物排放指标，每天形成报告并解决问题。后期委托同创（浙江）检测有限责任公司开展第三方检测，验证治理效果^[6–10]。

（二）治理效果验证

系统试运行稳定后，项目组委托有 CMA 资质的同创（浙江）检测有限责任公司按国家标准规范检测，检测点位在排气筒，指标涵盖关键污染物，每天检测 3 次、连续 3 天。结果显示，治理后废气污染物排放浓度达标，各污染物去除效率达设计要求，验证了组合治理工艺的高效稳定。

污染物项目	最高允许排放浓度	达标情况
非甲烷总烃	85mg/m ³	120mg/m ³ 达标
铅	0.6mg/m ³	1.0mg/m ³ 达标
二氧化硫	120mg/m ³	200mg/m ³ 达标
氮氧化物	220mg/m ³	300mg/m ³ 达标

污染物项目	最高允许排放浓度		达标情况
颗粒物	25mg/m ³	30mg/m ³	达标
氯化氢	75mg/m ³	100mg/m ³	达标

同时，项目组对炼金室主要操作岗位空气质量进行专项检测，检测指标含铅、颗粒物等有害物质浓度，检测方法符合 GBZ 2.1-2019 要求。结果显示，改造后炼金室空气环境质量根本改善，铅浓度降至 $\leq 0.05\text{mg/m}^3$ ，颗粒物浓度降至 $\leq 0.5\text{mg/m}^3$ ，均达职业接触限值。职业健康体检跟踪显示，改造后无新增血铅超标病例，原有偏高人员指标逐步正常，降低员工血铅超标风险，预防职业病，保障员工健康。此外，废气无组织排放问题解决，刺激性气味消除，工作环境舒适度提升，员工积极性和满意度提高。

（三）综合效益分析

1. 环境效益

改造后的废气排放达标率为 100%，由原来的被动治理变为现在的主动稳定达标。项目每年能削减铅、颗粒物、二氧化硫、氯化氢、非甲烷总烃等的排放，减轻对周围环境的污染，减小区域环境风险。治理系统稳定运行，防止环保投诉、污染事故的发生，改善周边生态环境质量，达到企业发展与生态保护双赢的效果。

2. 健康效益

升级为密闭负压收集系统，切断污染物扩散途径，达到工作环境本质安全化的目的。改造后有害物质浓度均低于职业接触限值，预防职业病，降低员工健康风险。从长远看，消除健康风险可以减少缺勤率、提高生产效率、避免员工流失，增强企业凝聚力。同时

企业重视员工的健康，树立良好的社会形象，承担社会责任。

3. 经济效益

项目经济效益分为直接效益和间接效益。从直接经济效益上看，系统稳定达标使企业摆脱环保督查的压力和罚款的风险，每年可以节省环保罚款 10-50 万元，减少设备腐蚀，每年节省维修费用 5-8 万元。间接经济效益方面，消除员工健康风险，防止未来连锁风险的发生，保证企业生产经营的稳定。企业环保技改达标可以提升竞争力、树立品牌形象，有利于争取合作项目、获得政策支持。项目总投资 180 万，直接经济效益的回报周期为 3 到 5 年，效益明显。

四、结论

本研究以浙江省遂昌金矿炼金室废气处理工程为对象，针对原有设备简陋、收尘效率低、污染物超标等问题进行研究和实践，该组合治理工艺适用于贵金属冶炼行业炼金室等场景，有推广价值。但研究有局限性，未深入探讨治理系统长期运行性能和运维成本优化。未来可开展工作：一是加强长期运行数据监测分析，优化参数，提升稳定性和效率，降低成本；二是探索智能化运维技术应用，开发监测与控制系统，提升智能化水平；三是研究余热回收技术集成应用，提升能源利用效率，推动绿色低碳发展。此外，可优化核心材料性能，开发环保材料，支撑废气治理技术升级。

参考文献

[1] 张敏, 李娟. 贵金属冶炼废气治理技术研究进展 [J]. 环境工程, 2023, 41(5): 67-73.

[2] 王强. 工业废气组合治理工艺的应用与优化 [J]. 化工环保, 2022, 42(3): 305-310.

[3] 李小红, 陈明. 脉冲袋式除尘器在重金属粉尘治理中的应用 [J]. 工业安全与环保, 2021, 47(8): 45-48.

[4] 赵伟, 刘静. 活性炭吸附法处理 VOCs 废气的技术研究 [J]. 环境科学与技术, 2020, 43(10): 123-128.

[5] 中华人民共和国生态环境部. GB 16297-1996 大气污染物综合排放标准 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 1996.

[6] 王浩, 李娟, 张磊. 工业废气重金属减排技术突破与应用展望 [J]. 环境工程学报, 2025, 19(8): 2415-2423.

[7] 刘明远, 陈晨, 赵伟. 黄金冶炼尾气过氧化氢同步脱硫脱硝-电除雾工艺工业应用 [J]. 有色金属工程, 2025, 15(10): 189-195.

[8] 张国栋, 杨丽. 含砷金精矿焙烧废气“骤冷-干法脱砷-湿法脱硫”组合工艺实践 [J]. 矿产综合利用, 2025, 46(5): 112-118.

[9] 马双忱, 马京香, 赵毅. 紫外/过氧化氢法同时脱硫脱硝的研究 [J]. 热能动力工程, 2009, 24(6): 792-795.

[10] 张伟, 李立清, 吴才贵, 等. 萃取冶金挥发性有机废气处理技术发展和应用实践 [J]. 矿产综合利用, 2022, 43(5): 9-14. DOI: 10.3969/j.issn.1000-6532.2022.05.002.

LEAP-1A EEC 故障调查

侯熙桐, 余思颖, 卢昱朋

南航股份有限公司技术分公司沈阳基地, 辽宁 沈阳 110000

DOI:10.61369/ERA.2026020027

摘 要 : 本文针对 LEAP-1A 发动机 EEC 频发的间歇性故障, 开展系统性调查与根本原因分析。通过整合故障现象记录、历史部件送修报告、部件分解报告及历史维护信息, 研究发现故障主要表现为 EEC 内部故障、出现警告信息及故障代码。基于调查结论, 本文提出了针对性的优化维护方案, 包括优化与 EEC 内部故障相关的判断流程, 减少一系列 EEC 的非必要送修, 考虑针对 CFM 性能监控网站中的参数, 评估建立 EEC 预见性模型的可能性, 为提升 LEAP-1A EEC 的运行可靠性与维护效率提供了有效参考。

关 键 词 : 电子控制; 故障诊断; 可靠性

Investigation of LEAP-1A EEC Failure

Hou Xitong, Yu Siying, Lu Yupeng

China Southern Airlines Shenyang Maintenance Base, Shenyang, Liaoning 110000

Abstract : A systematic investigation and root cause analysis targeting the frequent intermittent failures of the LEAP-1A engine EEC has been conducted. By integrating records of fault phenomena, historical component repair reports, component teardown reports, and historical maintenance information, the study finds that the faults primarily manifest as internal EEC failures, warning messages, and fault codes. Based on the investigation findings, targeted optimized maintenance solutions have been proposed. These include refining the troubleshooting procedures related to EEC internal failures, reducing unnecessary EEC removals and repairs, and evaluating the feasibility of establishing an EEC predictive model using parameters from the CFM performance monitoring website. The study provides an effective reference for enhancing the operational reliability and maintenance efficiency of the LEAP-1A EEC.

Keywords : electronic control; fault diagnosis; reliability

引言

航空发动机的发展是逐渐由机械演变为电控的过程, 发动机的电子控制计算机 (EEC), 有效提高了发动机的控制性能, 改善了操纵性与可靠性。结合厂家有效文件数据, 整理故障处理经验, 帮助工程师正确处理 EEC 呈现的故障信息, 以及做出适当的排故决策, 减少不必要的送修及换件是航空公司优化维修成本的重要举措。

一、LEAP-1A 发动机 EEC 介绍

航空发动机控制系统从单一变量控制发展为多变量控制, 经历了液压机械控制系统到第三代全权限数字电子控制系统的技术革新, 随着分布式控制技术的发展与成熟, 航空发动机将有望装备分布式控制系统。^[1] 现针对发动机的电子控制系统, 有学者利用基于神经网络的传感器解析冗余计算方法在发动机变高度、变马赫下存在估计精度不高、网络体量大、运行速度慢等不足, 将纯自注意力机制与深度神经网络结合, 设计航空发动机传感器参数估计器^[2]。

EEC (Electronic Engine Control Unit) 是一个单通道、具

备数据输入输出、存储、控制及电源供应的数字计算机。^[3] 主要包含以下组件 (详见图 1): 前面板组件 (Front Panel Assembly (FPA))、供电单元 (Power Supply Unit (PSU))、主板电路板组件, 简称主板 (Main Base Board (MBB) Circuit Card Assembly (CCA))、中央处理器中介层电路板组件, 简称 CPU 板 (Central Processing Unit (CPU) Mezzanine CCA)、振动分析与健康检测电路板组件, 简称 VAHM (Vibration Analysis and Health Monitoring (VAHM) CCA)、继电器与电力保持模块 (Relay and Hold-Up Module (RHM))、金属氧化物压敏电阻组件 (Metal-Oxide Varistor (MOV) Assembly)。

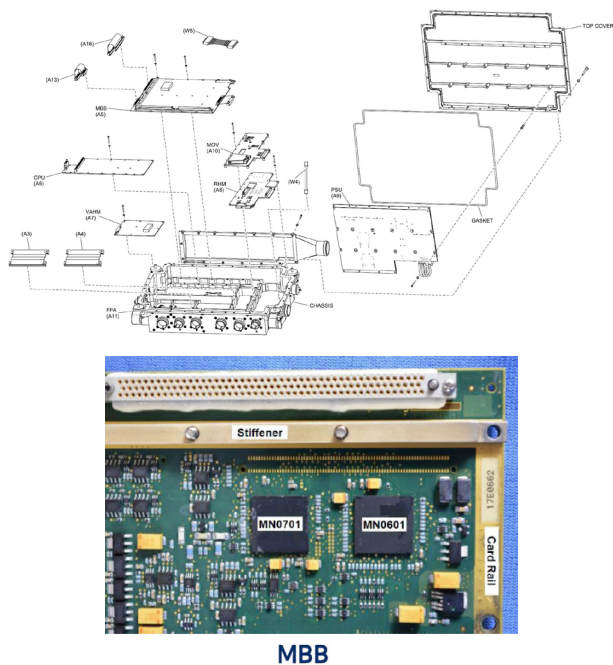


图1 EEC 主要部件拆解图

目前 EEC 进场维修的主要流程如下，1. 回顾客户要求（Review customer requirements）明确 EEC 的送修原因，以便确立 EEC 的大致修理方向。2. 进场检查（Incoming Inspection）进厂测试未发现故障，确认是否开盖检查，执行电阻测试，无异常直接返回客户。3. 回顾内存历史（Retrieve NVM, Non-Volatile Memory 非易失性存储），检查 EEC 内部的存储中的历史故障信息，此步骤必须在 ATP 测试之前，否则会擦除全部历史信息。4. 分析内存、客户报告、EEC 故障史（Analyze NVM, Field Report, and Prior EEC History）。综合 EEC 故障记录、内存解码、客户报告、历史送修记录等全部可用数据，结合进厂的外观检查，设定后续的故障隔离测试方案。因此，对 EEC 拆下原因进行规范化管理和要求，有利于 EEC 部件的厂内分析与维修，具有很强的必要性。

二、目前 EEC 失效原因

（一）厂家数据分析

根据 CFM 与 EEC 制造商 FADEC Alliance 于 2025 年 4 月联合发布的年会材料，2024 年 LEAP-1A 的 EEC 拆下原因，主要有以下 4 点，从高到低依次是：

1. 未找到故障原因（Not Fault Found），占比 31%。EEC 拆下进厂测试，无法检测到故障，即通常所讲的 NFF 件。在这一情况下，EEC 以 NFF 状态返回客户，重新装机后的再次故障率，CFM 统计为 1.9%。为此，CFM 建议客户：在送修 EEC 时，标注 Trouble-Shooting 等详细信息，有助于厂家定位失效原因，或者即便进厂测试未重现故障，也可以根据客户标注，采取“预防性换件”等措施。

2. 主板失效（MBB IOF），占比 24%。主板上的 BGA 格式封装的元器件 MN0601 的焊点疲劳断裂，造成虚连虚接。厂家表

示，相关补强焊点的 SB 正在推进中，预计 2025 年第 4 季度发布。OEM 厂家的答复是，已于 2024 年第 4 季度引入了相关维修程序。

3. VAHM 失效，占比 23%。TSSOP (Thin Shrink Small Outline Package)，占比 17%。由于 VAHM 板的焊料裂纹，导致在 EEC 系统构型信息查询页面，无法显示 OMAP 软件版本号，即“SW2 行显示 -----”。于是厂家发布了 SB 73-0039，用于移除及修复受影响的 VAHM 板。并设立监控参数，如异常将发布 CNR。OEM 厂在 2018 年引入了修复方案。另外还有 VAHM NOR SEU，占比 5%。NOR 闪存故障，为此厂家引入了新设备，以解决此问题。

4. PSU 板失效，占比 9%。T4/T6 散热片接地引脚存在疲劳或断裂，EEC 厂家随后发布了 SB 73-0058 以及 SB 73-0066，以移除或修复受影响的 PSU 板。OEM 厂在 2017 年引入了修复方案。

（二）EEC 拆换原因分析

1. 若航班中 EEC 出现故障信息：根据以往记录，主要出现 ENG FADEC SYS FAULT 信息。

2. EEC 内部报错：根据故障信息，存在可以定位到具体的 EEC 内部某电路板或软件版本的故障。

3. 非 EEC 部件故障信息：即外部件反馈给 EEC 的数据被识别为异常、EEC 判定传感器有故障。此种情况下，大多需要使用“串件 EEC”等手段，进行故障隔离，以确认是否为 EEC 本体故障。

4. 控制失效：导致反推等系统失效。

5. 无效信息：重复录入的故障或维护信息、串件或被串件重复录入、EEC 故障信息记录不全，无法定位当时的失效原因等，暂无法纳入统计范畴。

（三）EEC 修理报告分析

查询历史送修的 EEC 修理报告，其中厂家返回显示为 NFF 件的，大多是拆换前有 EEC 内部报错信息。结合 AMM 手册相关要求，分析认为 FADEC 系统上电后，需至少等待 60 秒再启动测试。若未等待满 60 秒，交互模式将终止 EEC 自检，这可能导致出现非预期故障，且 OMAP 软件件号（SW2）将无法正常显示。后续计划通知工作者在 FADEC 通电后、执行其他测试前，等待足够的时间，避免产生非必要的维护。进一步梳理由厂家判断为 NFF 件后，又出现短小时返厂的故障件信息，发现均在场内检查中出现 CPU 故障信息，修理厂进行了 MBB 板的更换，由此可以得出有 CPU 故障信息的 EEC，送修时必须对 MBB 板执行工作。另外还有报告指示故障为非 EEC 故障，即外部件故障信息，外部件故障信息是指反馈给 EEC 的数据被识别为异常、EEC 判定部件有故障。此种情况下，大多需要使用“串件 EEC”等手段，进行故障隔离，以确认是否为 EEC 本体故障。极少数送修 EEC 故障现象为空中 A/THR OFF 断开。后续更换 EEC 后，仍然有 FWC2 信息，即可判断与 EEC 无关，但 EEC 仍然被送修，指定为针对 EEC 的过度维护。综合以上非必要拆换 EEC 的报告，可以得出相关工程经验，需向一线工作者强调遵守 AMM 程序，避免误拆换；若指示为飞机系统故障、虚假故障等，不建议直接更换 EEC；若指示为反推微小故障警告，不建议更换 EEC；若飞机仅出现系统

警告,无故障信息的,建议按 TSM 程序执行地面测试,不建议草率更换 EEC。以此避免出现 EEC 的过度更换,增加维护成本。

针对具体进厂修理的 EEC 报告,查阅修理报告的具体内容显示,大多数 EEC 进厂修理均需更换/修理 VAHM 板和 MBB 板。其中明确记录 OMAP 件号不显示故障的 EEC,表现为 EEC 构型页的 SW2 行,显示“-----”的横线,而没有具体的件号,需更换/修理 VAHM 板;明确 CPU 故障的 EEC,事发时记录有 0206 与 0214 故障信息。修理厂内执行 ATP 测试未通过,需更换/修理 CPU 板;显示 0206-EEC(CPU) 或 0214-EEC(IOF) 故障信息的 EEC,对应 MBB 板上的元器件可能存在故障,需更换/修理 MBB 板。另外还有少数非 EEC 故障信息,例如出现 N1 故障信息、OPT 故障信息、反推小故障、FMU TM 故障信息,修理报告显示 EEC 均在厂内更换了 VAHM 板、CPU、MBB 板等部件,表明 EEC 内部分元器件的稳定性略低,非 EEC 本身故障,属于预防性维护。综上,可以得到与 EEC 修理相关的以下结论:VAHM 板故障导致的 OMAP 件号不显示情况,不会立即对运行产生影响;MBB 板故障引起的 0206-CPU 与 0214-IOF 故障信息,是 EEC 的主要故障形式,可以通过更换/修理电路板的方式解决;EEC 的 CPU 板故障,也体现为 0206-CPU 与 0214-IOF 故障信息,需要根据厂内的测试结果,更换/修理电路板;EEC 如有 MBB IOF 相关的故障信息(例如:0206/0214),即便送修时厂内测试正常,也必须执行 CPU 板/MBB 板的检查和维修工作。

三、现有措施及处置方案

(一) 厂家措施

根据 CFMI 厂家于 2024 年 10 月发布的最新《LEAP-1A Alerts Summary》,厂家针对 EEC 的 VAHM 故障已设立单独的监控。如 EEC 的 A 通道或 B 通道的 OMAP HEALTH WORD 达到 0,可能会触发警告。

针对主板 MBB IOF 故障,厂家已定位到失效原因为主板上的 BGA 格式封装的元器件 MN0601 的焊点疲劳断裂,造成虚连虚接。相关补强焊点的 SB 正在推进中。

(二) 预见性措施

在厂家 CFM 的官方网站上,可以通过“LEAP EEC VAHM Solder Crack”模块监控 VAHM 板焊缝裂纹,其中 P4_LOCR(来自 Supplemental report)监控 A 通道,EEC OMAP HEALTH WORD CHB(来自 Postflight report)监控 B 通道(其中 B 通道监控参数,在 FMX 中已经被厂家隐藏)。

(三) LEAP-1A 发动机 FADEC SYS FAULT 警告故障快速处理程序

若发动机未运转或关车时出现 FADEC SYS FAULT 警告,工作者需要判断是哪一故障导致,如判断是 EEC 导致,则需拔出故障通道断路器(FWC 的跳开关需要慎重考虑,可能影响机组),等待 10 秒后按入,观察 EEC 通电后警告是否消失,随后按需进行系统自测试或慢车验证;如判断是部件故障导致,则进行启动慢车测试。若发动机运转时出现 FADEC SYS FAULT 警告,如

此时地面关车或 $N_2 < 3\%$ 时,可拔出故障通道断路器(FWC 的跳开关需要慎重考虑,可能影响机组),等待 10 秒后按入(视情),观察警告是否消失,随后按需进行系统自测试或重新启动发动机,如进行完上述测试后警告仍不能消除,则需要排故。

四、结束语

本文围绕 LEAP-1A 发动机 EEC 的典型间歇性故障展开系统性调查与分析。通过整合故障现象记录、历史部件送修报告、部件分解报告及历史维护信息,研究明确了故障主要表现为 EEC 内部故障、出现警告信息及故障代码。进一步分析发现,针对 EEC 内部部件故障信息的有效判断,才是做出正确排故决策的根本方法,具体的措施如下:

1. 对于故障信息中有 CPU(中央处理单元,常见故障代码 0206/0214)、IOF(中央处理单元硬件或软件测试失败,常见故障代码 0214)、PSU(电源保持电容,常见故障代码 0216/0217)的 EEC,代表 EEC 内部存在真实故障,不能仅仅测试无异常就放行,需要尽早排故。

2. 强调遵守手册程序,对于飞机系统故障、虚假故障、反推微小故障警告,不建议直接更换 EEC;已明确故障非 EEC 原因的,不得更换 EEC;仅系统警告,无故障信息的,建议按 TSM 程序执行地面测试,不建议草率更换 EEC。

3. 明确给 FADEC 通电之后,必须等待 1 分钟以上,才可以执行系统测试等工作,避免打断 EEC 自检程序,引发假故障或造成 EEC 损伤。

4. 与航材部门沟通,明确当前 EEC 送修时的故障信息登记流程,视情优化流程,确保未来送修的 EEC,均能够将故障信息,明确传达给修理厂家,以提高部件的送修质量。

5. 对于有明确 EEC 内部部件故障信息,如 CPU、IOF、PSU 等(故障代码 0206/0214/0216/0217),在厂修理不接受 NFF,必须修理或更换相对应的电路板,才能出厂。

6. 推广“LEAP-1A 发动机 FADEC SYS FAULT 警告故障快速处理程序”(针对仅存在警告,无故障信息的情况)。

7. 执行相关硬件改装 SB

关于主电路板(MBB)故障,有效故障记录占比 57.8%。经厂家调查,MBB 故障的原因是 MN0601 上因热循环导致的焊点疲劳断裂现象。此外,在 MN0601 附近的 MBB 串行通信(Serial COM)设备 MN0701 上也观察到断裂现象。厂家计划于 2025 年第四季度颁布 SB,为 MN0601/MN0701 元器件施加底部填充焊料,用以加固焊点,以防出现断裂现象。建议跟踪该 SB,一旦颁布,结合送修执行修理。

基于上述结论,本文从以下层面提出针对性改进方案:优化与 EEC 内部故障相关的判断流程,减少一系列 EEC 的非必要送修;提出与 FADEC SYS FAULT 警告相关的快速处理程序,为及时的故障诊断提供了有力保障。所提措施不仅有助于降低同类故障的发生率,也为未来民用航空发动机 EEC 相关的可靠性设计与视情维护提供了实践依据。后续将考虑针对 CFM 性能监控

网站中的以下参数，评估建立 EEC 预见性模型的可能性：提取“LEAP-1A EEC VAHM Solder Crack”模型中的参数“P4 Local and Cross Fusion”，回跑机队数据，评估其中的异常点（零点）是否与 EEC 真实故障存在关联关系；提取“OMAP_HEALT_A_

CROSS-Chan A OMAP Health Cross channel”模块参数，并与厂家交涉，要求在 FMX 中加入 EEC B 通道的监控模块。这样针对 EEC 才能真正达到故障跟踪、判断以及预防的多方位综合体系的故障管控。

参考文献

- [1] 甄真, 李玉芳, 徐涛. 航空发动机控制技术发展与应用 [J]. 装备制造技术, 2023, (09): 169-173+210.
- [2] 孙乐. 基于 PowerPC 的航空发动机电子控制系统的研制 [D]. 南京航空航天大学, 2012.
- [3] 邵晨. 基于深度学习的航空发动机控制系统故障诊断方法研究 [D]. 南京航空航天大学, 2022.

基于可穿戴高精度湿度传感器的发声与呼吸监测系统设计

张馨雨

山东科技大学艺术学院, 山东 青岛 266590

DOI:10.61369/ERA.2026020029

摘要：声乐演唱对呼吸控制与发声协调具有高度依赖性，传统教学方式多依靠教师经验判断，缺乏客观量化依据。围绕声乐训练中呼吸状态与发声过程难以实时监测的问题，设计一种基于可穿戴高精度湿度传感器的发声与呼吸监测系统。该系统通过对演唱过程中口鼻气流湿度变化特征进行采集与分析，实现对呼吸节律、呼气强度及发声持续状态的动态监测。系统结构包括传感采集模块、信号处理模块与数据分析反馈模块，可为声乐训练提供客观数据支持。研究结果表明，该系统在提升声乐训练科学性、规范发声习惯方面具有良好应用前景。

关键词：可穿戴设备；高精度湿度传感器；声乐演唱；呼吸监测；发声分析

Design of Sound and Respiratory Monitoring System Based on Wearable High-precision Humidity Sensor

Zhang Xinyu

Art College of Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590

Abstract： Vocal singing is highly dependent on the coordination of breathing control and vocalization. Traditional teaching methods mostly rely on teachers' experience judgment and lack of objective quantitative basis. Focusing on the difficulty of real-time monitoring of respiratory state and vocal process in vocal music training, a vocal and respiratory monitoring system based on wearable high-precision humidity sensor is designed. The system collects and analyzes the characteristics of the humidity change of the mouth and nose airflow during the singing process, and realizes the dynamic monitoring of the breathing rhythm, the intensity of exhalation and the continuous state of vocalization. The system structure includes sensor acquisition module, signal processing module and data analysis feedback module, which can provide objective data support for vocal music training. The research results show that the system has a good application prospect in improving the scientific nature of vocal music training and standardizing vocal habits.

Keywords： wearable devices; high-precision humidity sensor; vocal singing; respiratory monitoring; vocal analysis

引言

声乐演唱作为一门高度依赖生理控制的艺术形式，演唱效果与呼吸方式、发声状态密切相关。现有声乐教学主要依托教师听觉判断与经验指导，难以对演唱者呼吸与发声过程进行精确描述。随着传感技术与可穿戴设备的发展，生理信号监测逐渐进入艺术训练领域。湿度传感器能够敏感反映气流变化特征，为呼吸与发声监测提供了新的技术路径。围绕声乐演唱的实际需求，探索高精度湿度传感器在发声与呼吸监测系统中的应用，对于构建数据化、可视化的声乐训练模式具有重要意义。

一、声乐演唱中发声与呼吸监测的理论基础

（一）声乐发声机制与呼吸控制特征

声乐演唱是一种以人体发声器官为载体的复杂生理活动，其核心在于呼吸系统、发声系统与共鸣系统之间的协调运作。演唱过程中，呼吸系统提供稳定气流作为发声动力，声带在气流作用下产生

周期性振动，进而形成基础声源，共鸣腔对声波进行放大与修饰，塑造音色特征。呼吸深度直接影响气息储备能力，深而稳定的吸气有助于维持长音与连贯乐句的完成质量。气流输出的平稳程度决定了声带振动的均匀性，对音高稳定与音质纯净度具有显著影响。若呼吸控制不足，容易出现气息中断、音准波动及音色紧张等问题，因此呼吸控制能力被视为声乐演唱的重要技术基础。

（二）演唱呼吸气流特征与湿度变化关系

在演唱过程中，呼吸气流经肺部、气管及口鼻通道排出，携带人体内部的水汽成分，其湿度水平受到呼吸频率、气流速度及发声状态等多种因素的综合影响。吸气阶段气流湿度相对较低，呼气阶段湿度明显升高，不同演唱段落中持续时间与发声强度的变化会在湿度曲线上形成具有区分度的波动特征。声带振动方式及共鸣腔形态的调整进一步改变气流排出路径，使湿度变化呈现出与发声状态相对应的规律性特征。通过对湿度信号进行连续采集与分析，可以较为准确地反映演唱者的呼吸节律、呼气持续能力以及发声连贯程度，为呼吸与发声状态的客观评估提供稳定可靠的数据依据。

（三）声乐训练中客观监测技术的发展需求

传统声乐训练主要依赖教师的听觉判断与经验示范，对呼吸深度、气息稳定性及发声连贯性等关键技术要素缺乏清晰的量化描述，学习者在理解自身问题时容易受到主观感受影响，技术改进路径不够明确。随着声乐教学逐步向科学化、精细化方向发展，引入客观监测手段已成为教学模式转型的重要需求。传感技术能够将演唱过程中呼吸与发声相关的生理变化转化为可记录、可分析的数据形式，使原本依赖感知的技术要素具备直观的可视化特征。通过数据反馈，演唱者能够更清晰地认识自身呼吸控制与发声状态，教师也可据此进行针对性指导，从而提高教学判断的准确性与一致性。这类技术的应用有助于弥补传统声乐教学在客观评估方面的不足，为构建以数据支持为基础的声乐教学模式提供可靠理论支撑。

二、可穿戴高精度湿度传感器的系统设计原理

（一）高精度湿度传感器的工作原理与性能特点

高精度湿度传感器通过感知空气中水汽含量的细微变化，实现对湿度信息的连续采集与实时反馈。其核心由湿敏材料、电极单元及信号转换模块构成，当呼吸气流经过传感区域时，水汽分子与湿敏材料表面发生作用，引起材料电阻或电容参数的变化。该变化经电极单元采集后，通过信号转换模块转化为稳定的电信号输出，使湿度变化具备可测量性和可分析性，为后续数据处理提供基础条件。

在声乐演唱应用场景中，呼吸气流频繁变化且波动幅度较小，对传感器性能提出较高要求。高精度湿度传感器具有响应速度快、分辨率高的特点，能够有效区分吸气与呼气阶段的湿度差异，并对发声过程中气息强弱变化保持良好跟踪能力。其线性输出特性有助于保证数据的一致性，抗干扰设计能够降低环境湿度变化与外界气流扰动带来的影响，在连续演唱条件下仍可保持稳定工作状态，为发声与呼吸监测提供可靠的数据支撑。

（二）可穿戴结构在声乐监测中的适配设计

声乐演唱过程中，演唱者对身体协调性与自然状态具有较高要求，可穿戴监测设备的结构设计需避免对演唱动作造成干扰。传感器布置位置选择口鼻附近的气流通道区域，使其能够直接感知呼吸气流变化，减少环境空气对监测结果的影响。该区域既能

完整覆盖演唱时的主要呼吸路径，又不会对声音传播产生明显遮挡，有利于保证监测数据的真实性与有效性。

在结构实现上，可穿戴装置采用轻量化材料与柔性固定方式，使设备在长时间佩戴条件下保持良好的舒适性。贴合面部轮廓的设计有助于稳定传感器位置，避免因演唱过程中头部或面部动作产生位移，从而影响信号采集质量。柔性结构能够适应不同演唱者的面部特征，降低个体差异对监测效果的影响，为湿度信号的稳定采集与长期应用提供可靠硬件保障。

（三）发声与呼吸同步监测的信号采集方案

发声与呼吸同步监测的关键在于信号采集过程与演唱动作时间轴的精确匹配。系统在演唱全过程中对湿度信号进行连续采样，使呼吸气流变化以时间序列形式完整记录。演唱起始阶段，气息由吸转呼，湿度数值迅速上升，该变化特征可用于识别发声启动状态并判断起声是否平稳。湿度变化的起伏幅度与上升速率反映气息释放的控制情况，为分析演唱者起声质量提供客观依据。

在发声持续阶段，湿度曲线的稳定程度与气流输出均匀性保持较高相关性，可用于评估发声连贯性与气息支持水平。演唱结束阶段，气息逐渐回收，湿度数值呈现回落趋势，其变化过程能够反映呼吸收放的协调程度。通过对各阶段湿度信号特征进行分段标注与特征提取，构建适用于声乐演唱场景的同步监测模型，使系统具备对呼吸节律与发声状态的综合识别能力，为后续数据分析与教学反馈提供清晰、结构化的数据基础。

三、发声与呼吸监测系统的实现与数据处理

（一）演唱呼吸节律与气息强度的信号提取

在发声与呼吸监测系统运行过程中，高精度湿度传感器对演唱者口鼻区域的气流湿度进行连续采集，形成具有时间连续性的湿度变化曲线。吸气阶段气流湿度维持在较低水平，呼气阶段湿度数值明显升高，二者在曲线形态上呈现清晰区分。通过对湿度曲线波峰与波谷位置的识别，可以准确划分吸气与呼气的转换节点，从而获得演唱过程中较为完整的呼吸节律信息，为分析演唱者呼吸组织能力提供客观基础。

湿度信号在呼气阶段的峰值高度及变化斜率与气流输出强度密切相关，能够反映气息释放的力度与持续性。演唱过程中，稳定且适度的湿度峰值通常对应良好的气息支持状态，湿度波动度过大或峰值偏低则可能提示气息控制不足。通过对不同乐句和演唱段落中湿度参数的对比分析，可以评估演唱者在不同演唱情境下的气息调控能力，使呼吸控制水平具备量化分析依据，为声乐训练效果评估提供数据支撑。^[1-5]

（二）发声持续状态与湿度信号特征分析

声乐演唱过程中，发声持续状态与气息输出方式密切相关，不同音型及时值结构在湿度信号中呈现出明显差异。长音演唱要求气流保持均匀稳定，湿度曲线通常表现为持续时间较长且波动幅度较小的高值区间，反映出良好的气息支持与发声控制能力。若演唱过程中气息供给不足或控制不当，湿度曲线容易出现起伏

变化，数值逐渐降低，提示发声稳定性受到影响。这类变化能够为判断长音发声质量提供直观信号依据。

在快速音型或节奏变化较大的演唱段落中，发声与呼吸调节频率明显提高，湿度信号随之呈现节奏加快的波动特征。湿度峰值间隔缩短，变化幅度增大，反映出演唱者在短时间内频繁调整气流输出的过程。通过对不同演唱形式下湿度信号特征进行对比分析，可以区分发声稳定与不稳定状态，识别气息分配不均或发声中断等问题，使发声持续状态具备可分析的量化特征，为声乐训练中的技术诊断提供数据支持^[6-8]。

（三）数据可视化与实时反馈机制设计

为提升系统在声乐训练中的应用价值，监测数据需以直观方式呈现给演唱者与教学者。系统将湿度信号处理结果转化为时间序列曲线、节拍图谱及强度变化图，使呼吸与发声状态具备可视化特征。实时反馈机制通过屏幕或终端设备展示演唱过程中的气息变化情况，帮助演唱者及时感知自身呼吸控制效果。图形化信息有助于缩短主观感受与客观数据之间的认知差距，使声乐训练过程更加清晰可控，为技术调整提供直观参考。

四、系统在声乐演唱训练中的应用分析

（一）不同演唱方式下的呼吸特征对比

声乐演唱方式的差异直接体现在呼吸控制与发声方式上。通过监测系统获取的湿度数据，可以对不同演唱风格下的呼吸与发声特征进行客观比较。美声演唱强调深层气息支持与持续稳定的气流输出，其湿度曲线通常呈现平缓且持续时间较长的高值状态，反映出气息供给的均匀性与发声稳定性；民族演唱在保持气息连贯的基础上，湿度变化节奏相对灵活，能够体现音色转换与语言咬字对气流调节的影响；通俗演唱更注重语感与情感表达，呼吸方式相对自由，湿度曲线起伏幅度较大，表现出较强的节律变化特征。系统监测结果为不同演唱方式的呼吸与发声技术特征提供了清晰的量化参考。

（二）声乐教学中发声问题的辅助诊断

在声乐教学实践中，气息不足、发声断裂等问题往往难以仅凭听觉判断准确定位其产生原因，教师在分析过程中更多依赖个

人经验与长期积累的听辨能力，判断结果容易受到演唱者音色特点、教学环境及主观感受差异的影响。发声与呼吸监测系统通过对湿度信号变化的持续采集，将演唱过程中气流输出状态以数据形式直观呈现，使呼吸支持与发声衔接情况具备清晰的可观察特征。

当湿度峰值长期处于较低水平或呈现频繁波动状态时，可反映出演唱者气息供给不足或气流控制能力较弱；当湿度曲线出现明显中断、骤降或不规则变化时，则提示发声连续性受到影响，往往与呼吸转换不当或气息分配失衡有关。教师结合系统反馈结果进行综合分析，能够更精确地识别学生在具体演唱段落中的技术问题，有针对性地引导其调整呼吸方式、气息支持策略与发声习惯，从而有效提升声乐教学的科学性、针对性与教学效果的稳定性。

（三）演唱训练效果评估与长期监测应用

声乐训练具有明显的长期性与渐进性特征，演唱水平的提升往往通过细微变化逐步积累，单次课堂或阶段性表现难以全面反映学习成效。监测系统通过持续记录演唱者在不同训练阶段的湿度数据，能够完整呈现呼吸与发声状态的变化轨迹，使技术进步过程具备可追溯性。随着训练深入，湿度曲线稳定性逐渐增强、呼吸节律趋于规律，可作为气息控制能力改善的重要客观指标。长期监测结果不仅为演唱者提供直观的进步参考，也有助于教师依据数据变化调整训练内容与教学重点。通过量化方式评估声乐学习过程，可减少主观判断带来的偏差，推动声乐训练评价体系向更加科学、系统的方向发展。

五、结语

围绕声乐演唱中发声与呼吸监测的实际需求，提出了一种基于可穿戴高精度湿度传感器的监测系统设计方案。该系统通过对演唱气流湿度变化的精准采集，实现对呼吸节律与发声状态的动态分析，为声乐训练提供了客观数据支持。研究表明，该系统在提升声乐教学科学性、规范演唱发声习惯方面具有积极意义。随着传感技术与数据分析方法的进一步发展，其在声乐教育与表演训练中的应用空间将不断拓展。

参考文献

[1] 童杨, 孟粉叶, 张勇, 高玥, 杨旭东, 胡吉永. 基于可穿戴柔性 RFID 传感技术的呼吸监测研究进展 [J]. 传感技术学报, 2024, 37(06): 941-950.
[2] 郝英超. 用于呼吸系统监测的鼻夹式传感系统研究 [D]. 山东大学, 2024.
[3] 侯天远, 朱剑锋, 刘涛, 辛毅. 基于 PVDF 的可穿戴生理信号监测系统 [J]. 压电与声光, 2020, 42(04): 529-532.
[4] 尹飞超, 潘津津, 李红利, 焦学军, 冯静达, 吴大蔚. 基于 BCG 的可穿戴式监测系统设计 [J]. 无线互联科技, 2022, 19(07): 75-79.
[5] 袁懋结. 腕式可穿戴多参数睡眠呼吸监测系统的研制 [D]. 深圳大学, 2020.
[6] 辛峰. 新型光纤 F-P 湿度传感器及信号解调方法研究 [D]. 东北电力大学, 2024.
[7] 孙辉, 沈兆坤, 刘明强, 胡洪林, 黄运川. 高精度模拟式温湿度传感器设计 [J]. 机电技术, 2024(01): 74-78.
[8] 纳芯微推出高可靠、高精度和低功耗的温湿度传感器 [J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2023, 23(07): 95.

公路施工中改性沥青材料应用技术探析

陈磊

河北光太路桥工程集团有限公司, 河北 邯郸 056000

DOI:10.61369/ERA.2026020030

摘 要 : 随着我国交通基础设施建设不断发展, 公路施工对材料性能提出更高要求。改性沥青因其优越的力学性能、耐老化性和环境适应性, 在现代公路工程中被广泛应用。本文围绕改性沥青材料的分类特性、施工技术要点及其在实际工程中的适配性展开探讨, 重点分析不同类型改性剂对沥青性能的影响以及施工过程中的控制措施, 为提高公路工程质量与耐久性提供技术参考。

关 键 词 : 改性沥青; 公路施工; 性能优化; 施工工艺; 耐久性

Analysis on Application Technology of Modified Asphalt Material in Highway Construction

Chen Lei

Hebei Guangtai Road and Bridge Engineering Group Co., Ltd., Handan, Hebei 056000

Abstract : With the continuous development of transportation infrastructure construction in China, highway construction puts forward higher requirements for material properties. Modified asphalt is widely used in modern highway engineering because of its superior mechanical properties, aging resistance and environmental adaptability. In this paper, the classification characteristics of modified asphalt materials, the key points of construction technology and its adaptability in practical engineering are discussed, and the influence of different types of modifiers on asphalt performance and the control measures in the construction process are emphatically analyzed, so as to provide technical reference for improving the quality and durability of highway engineering.

Keywords : modified asphalt; highway construction; performance optimization; construction technology; endurance

引言

公路建设作为国家基础设施的重要组成部分, 其施工质量直接关系到交通运行的安全与效率。沥青材料作为路面结构的核心, 近年来通过改性手段得到有效提升。改性沥青凭借其良好的高低温性能、抗疲劳性与环境适应力, 已成为现代道路工程的重要选择。本文聚焦改性沥青材料在公路施工中的应用, 从材料性能、施工技术及质量控制三个层面, 系统分析其在实际工程中的作用与发展前景。

一、改性沥青材料的类型与性能特征

(一) SBS 改性沥青的结构与应用特性

SBS 改性沥青是当前公路建设中应用最广泛的一类聚合物改性沥青, 其主要改性剂为苯乙烯-丁二烯-苯乙烯三嵌段共聚物。SBS 分子结构呈现“软-硬-软”的嵌段链型, 苯乙烯端嵌段赋予其刚性和结构稳定性, 丁二烯中间嵌段则提供优异的弹性和柔韧性。SBS 在沥青中的作用机理主要通过物理交联和网络结构的形成, 提高了沥青的弹性恢复能力和抗塑性变形能力。在高温环境下, SBS 改性沥青表现出良好的抗车辙性, 能够有效抵御交通荷载引起的永久变形, 同时在低温条件下保持较好的柔韧性, 降低开裂风险。其剪切性能和疲劳寿命均优于普通道路沥青, 特别

适用于交通量大、重载频繁的高速公路和城市主干道。

(二) 橡胶改性沥青的环保性能

橡胶改性沥青是一种将废旧轮胎橡胶粉或颗粒与道路沥青混合制得的新型环保材料, 具有绿色循环、资源再生的显著特点^[1]。在生产过程中, 废旧橡胶通过粉碎、脱硫等处理后掺入热沥青中, 橡胶颗粒在高温作用下部分溶胀并与沥青基质发生物理和化学反应, 形成较为均匀的改性结构。该结构可显著提高沥青的黏弹性和低温延展性, 增强抗裂能力, 并能有效延缓热氧老化过程。橡胶改性沥青的抗噪声性能较佳, 适用于对道路静音需求较高的城市道路和居民区周边道路。同时, 其再生原料来源广泛, 应用成本相对较低, 具备良好的推广价值。在双碳政策推动下, 橡胶改性沥青的环保效益日益凸显, 不仅减少了废轮胎的环境污

染,也提升了道路材料的可持续发展水平,是实现绿色低碳公路建设目标的重要路径。

（三）化学改性沥青的功能性拓展

化学改性沥青主要通过添加多种化学助剂以改善沥青的某一项或多项性能指标,常见的改性剂包括胺类、酯类、树脂类和有机硅类物质等。这些改性剂通过与沥青分子间的作用,如极性增强、交联反应或分子链缠结等机制,有效提升沥青的附着性、抗水损性和抗老化性能。例如添加抗剥落剂可显著增强沥青与集料间的粘结力,从而减少雨水侵蚀下的剥落现象;抗氧化剂则通过抑制自由基反应,延缓沥青老化速率,提高道路的服役寿命^[2]。此外,某些化学助剂还具有改善沥青流动性、促进施工性能的作用,使其更适应于多种施工环境与技术要求。与物理改性方法相比,化学改性更具针对性与功能性,适用于特定气候区域或特殊用途道路,如寒冷地区、高原地带、机场跑道等特殊路况,其性能优化潜力巨大,正在成为高性能道路材料发展的重要方向。

二、改性沥青施工工艺技术要点

（一）拌和温度与时间的精准控制

改性沥青施工过程中拌和工艺的温度与时间控制是影响材料性能和路面质量的关键环节。不同类型改性剂对热稳定性的要求不同,尤其像 SBS 和橡胶颗粒这类高分子改性剂,在过高温度下易发生热分解或结构破坏,造成性能下降和材料浪费。通常 SBS 改性沥青的最佳搅拌温度应控制在 175℃~185℃之间,拌和时间一般控制在 45~60 分钟范围内,以确保改性剂与基质沥青充分融合形成均匀稳定的改性体系。若温度过低或时间不足,易导致改性剂分布不均、颗粒未完全溶胀或网络结构未形成,从而造成施工后期出现裂缝、起皮或油石分离等质量问题。因此,施工现场应配备高精度温控装置与拌和计时系统,对温度和时间进行实时监控,并结合沥青混合料的取样检测,确保改性过程达标。

（二）输送与摊铺过程的设备协同

改性沥青的输送与摊铺阶段需要确保温度恒定、物料均匀、设备配合高效。首先,拌合好的改性沥青混合料在运输过程中应采用保温性能良好的运输车,如密封型保温斗车,防止温度下降引起混合料流动性下降、团聚或结块,进而影响摊铺均匀性。在摊铺环节,摊铺机的熨平板应维持稳定的振动频率和速度,确保材料均匀摊铺,同时避免出现离析、波浪或拉毛等表面缺陷^[3]。摊铺温度应控制在 150℃~170℃之间,根据外界气温与风速进行调整。在摊铺后,压实过程需要紧密衔接,通常采用初压—复压—终压三阶段工艺进行,压实时与摊铺机保持合理距离与同步运行,避免温度过低造成压实困难或出现裂缝。设备调度上,要求各机械设备协同工作、无缝衔接,避免中断与堆积,确保摊铺与压实过程连续高效。

（三）现场施工过程的环境应对策略

改性沥青施工对外部环境敏感,需针对不同气候条件制定应对策略。在高温天气下,沥青混合料容易软化流淌,施工人员应适当降低摊铺速度,增加冷却措施,并加强对熨平板温度的控

制,避免路面起波;同时加强人员防暑和材料储存管理,防止改性剂挥发或粘结性能下降。在低温条件下,沥青温度下降速度快,必须缩短运输与摊铺间隔时间,提高运输保温等级,并提升压实机效率,确保混合料在最佳压实温度内完成碾压,防止出现冷接缝与裂缝隐患。雨天或高湿度天气则应避免施工,若必须施工,应采用篷布覆盖、加热干燥及防滑措施,避免路基潮湿引起沥青粘附性降低或剥落^[4]。

三、改性沥青应用中的质量控制措施

（一）材料进场与配比检测机制

改性沥青施工质量控制的第一道关口是材料进场验收与配比准确性验证。所有改性剂、基质沥青、集料及填料均须具备原产地证明和合格证,进场前应进行批次抽样检测,项目包括针入度、软化点、延度、密度、闪点等指标,以 SBS 改性剂为例,其质量要求为苯乙烯含量不低于 30%、挥发分不高于 0.7%,并应具备良好的热稳定性与剪切分散性。对于橡胶颗粒,应检测其粒径分布(一般为 0.5mm 以内)、含杂量($\leq 0.2\%$)与硫化程度,保证其充分与沥青基质反应融合^[5]。拌合前需严格按照设计掺配比进行原材料投料,并依据实际情况调整沥青用量,通常 SBS 掺量为沥青质量的 4%~6%,橡胶粉掺量为 10%~20%。每车混合料应实施称量记录与比对,使用自动配料系统确保各组分的精准投放。此外,现场建立原材料进场台账与溯源体系,对于不符合标准的批次应坚决退场,防止质量隐患传导至施工层面。

（二）路面压实度与平整度控制

改性沥青混合料的压实质量直接决定了路面的承载能力与耐久性。压实度一般要求不小于设计密度的 98%,压实过程中应合理控制碾压温度区间,初压温度控制在 150℃以上,终压不得低于 120℃,压实过程应在材料最佳压实温度范围内完成。针对 SBS 类改性沥青,推荐使用振动钢轮压路机与轮胎压路机配合操作,振动频率控制在 30~50Hz,压实速度约 3~4km/h,压轮重叠 1/3 轮宽以避免漏压。碾压遍数应根据混合料特性、基层强度和施工气温等因素确定,通常不少于 6 遍。施工中需实时监控压实度和温度分布,利用红外温度仪和核子密度仪进行现场检测。为确保路面平整度满足规范要求,摊铺前应严格控制基底高差,熨平板应采用自动找平系统,路面平整度一般应控制在 2mm 以内(3m 直尺检测)。整套压实作业应连续不间断,防止冷接缝和二次加热影响路面均质性^[6]。

（三）路面成型后的性能检测方法

成型后的改性沥青路面需开展系统性能检测以评估结构功能与使用寿命。常规检测项目包括:高温稳定性、低温抗裂性、水稳定性和抗疲劳性。高温稳定性常通过车辙试验评价,其动态稳定度应大于 3000 次/mm;低温抗裂性可通过弯曲梁试验或半圆弯曲试验(SCB)检测,其弯曲应变值应不低于 2000 $\mu\epsilon$ 。水稳定性方面,采用浸水马歇尔试验和冻融劈裂试验,马歇尔残留稳定度应大于 85%,冻融劈裂强度比(TSR)应超过 80%。此外,应采集路面芯样进行密度与空隙率检测,确保空隙率控制在

3% ~ 5% 范围内,有助于抗水损能力提升。若为重载交通道路,还需检测抗疲劳性能,其疲劳寿命(按半正弦载荷加载)应不少于百万次。检测周期宜在施工后3 ~ 7天内进行,结合数据建立路面结构数据库,为后期养护提供基础依据。

四、改性沥青应用存在问题与技术优化方向

(一) 改性剂分离与混合不均问题

改性沥青在生产与运输过程中容易出现改性剂分离和混合不均的现象,尤其以SBS类改性剂最为常见。这一问题主要源于改性剂与基质沥青密度差异大、分子极性不同以及搅拌不充分等因素。在静置或运输过程中,高分子改性剂易沉淀或上浮,导致混合料均匀性下降,进而影响路面性能稳定性^[7]。此外,剪切能不足或剪切时间短也会造成改性剂无法充分溶胀,形成结构松散、不规则的分布状态,造成路面局部开裂、剥落或耐久性不足。为防止改性剂分层现象,应选用具备高剪切能力的连续式改性设备,并确保剪切时间不少于1小时,同时控制剪切温度在160℃ ~ 180℃区间。运输与储存过程中,应定期搅拌并保持储罐温度恒定,避免温差诱导改性剂析出。对生产现场,还应配置动态监控系统,实时记录黏度、密度和温度变化,以确保整个改性过程稳定均一。另外,可尝试添加适量增黏剂或分散助剂改善界面相容性,提升改性剂与沥青的结合强度,减少分离风险,确保混合料性能一致性与可靠性。

(二) 低温脆裂与高温流动风险

改性沥青虽然在高温抗车辙与低温抗裂方面具备优势,但在极端气候条件下仍存在一定的脆裂与流动风险。在寒冷地区,由于温度骤降,沥青混合料中的改性剂易出现收缩不均、分子链断裂等现象,导致材料刚性增强、脆裂风险上升。实测数据显示,当环境温度降至-10℃以下,部分普通改性沥青的弯曲拉伸强度下降30%以上,极端情况下甚至出现早期裂缝^[8]。而在高温区域,沥青在重载交通下易发生流动性增加、结构变形,造成车辙病害,尤其在超过50℃的夏季高温地带,改性沥青的软化点不

足或改性剂老化严重将加剧路面变形程度。为应对此类问题,建议在材料配方中引入低温弹性更强的化学助剂,如增塑剂或高分子耐寒剂,提升材料的延展性与低温柔韧性。在高温应用中,可采用交联型或纳米复合改性技术,如纳米硅粉、SEBS、EVA与SBS协同改性,提高软化点和高温模量,增强结构稳定性。

(三) 材料成本与施工成本平衡优化

改性沥青材料因掺入高分子聚合物或橡胶颗粒,成本普遍高于普通道路沥青,每吨材料成本增加约300 ~ 600元,施工环节中还需专用储料、加热、拌合与运输设备,进一步抬升总体造价。这在一些中小项目或预算紧张地区形成一定的应用障碍。因此,实现材料性能与成本控制之间的平衡,是当前推广应用的关键方向。首先应从源头优化原材料采购机制,采用本地化资源与循环利用策略,如选用经济性较好的掺合型SBS或再生橡胶粉,可降低单位材料成本10% ~ 20%。其次,在施工组织上可采取集中拌合、定点运输、模块化施工的方式,减少现场设备配备与重复投入。在改性剂使用量控制方面,可通过性能模拟与参数优化,确定最优掺配比例,如在满足力学指标的前提下,SBS掺量由6%优化为4.5%,即节约成本并保障性能。此外,推广寿命周期成本(LCC)理念,考虑改性沥青在使用寿命、养护周期与维修频率上的节约效果,通过延长服役年限与减少后期养护频率,实现经济性与长期效益的双赢,推动改性沥青的合理、可持续应用。

五、结语

改性沥青材料在公路施工中的广泛应用,有效提升了路面结构的高温稳定性与低温抗裂性能。通过优化材料类型、完善施工工艺、强化质量控制及推进成本平衡策略,不仅保障了道路工程的耐久性与安全性,也促进了绿色环保和资源循环利用。面对复杂气候与施工环境的挑战,需持续推动技术创新与标准化应用,实现改性沥青材料的高性能、低成本、广适应发展,为现代交通基础设施建设提供坚实支撑。

参考文献

- [1] 罗德环. 现代农村公路施工中预防性养护技术的应用研究[J]. 低碳世界, 2025, 15(06): 148-150. DOI: 10.16844/j.cnki.cn10-1007/tk.2025.06.029.
- [2] 路洪彦. 温拌沥青技术在高速公路路面施工中的应用[J]. 四川水泥, 2025, (06): 278-280. DOI: 10.20198/j.cnki.scsn.2025.06.014.
- [3] 樊志荣. 高速公路路面养护工作中新型修复材料的应用[J]. 交通科技与管理, 2025, 6(10): 42-44.
- [4] 晁冲. 高速公路沥青路面加铺罩面施工技术研究[J]. 科技资讯, 2025, 23(09): 137-139. DOI: 10.16661/j.cnki.1672-3791.2410-5042-4034.
- [5] 赵新华. 高速公路改性沥青 SMA 路面施工技术研究[J]. 交通世界, 2025, (13): 123-125. DOI: 10.16248/j.cnki.11-3723/u.2025.13.044.
- [6] 陈圣平. 高速公路路面施工中沥青混合料性能优化与施工工艺改进研究[J]. 智慧中国, 2025, (03): 54-55.
- [7] 孙伟. 高速公路养护施工中绿色环保材料的应用及其可持续性评估[J]. 价值工程, 2025, 44(04): 43-46.
- [8] 李祖宝. 玄武岩纤维抗裂性能及其在沥青混合料中的应用研究[J]. 科技资讯, 2025, 23(03): 143-145. DOI: 10.16661/j.cnki.1672-3791.2408-5042-8914.

水利工程混凝土施工质量通病防治研究

张森林, 项宇

江苏淮阴水利建设有限公司, 江苏 淮安 223001

DOI:10.61369/ERA.2026020033

摘 要 : 水利工程混凝土施工质量的控制至关重要, 常见的施工质量通病包括裂缝、蜂窝麻面、空洞等, 这些问题直接影响工程的使用寿命与安全性。通过分析水利工程混凝土施工中的常见问题及其成因, 提出了相应的防治措施, 重点围绕材料选择、施工工艺、养护管理等方面进行优化。采用先进的技术手段和管理模式, 对施工过程中的关键环节进行有效监控, 能够显著提高施工质量, 减少质量缺陷的发生, 确保水利工程的长期稳定性和安全性。

关 键 词 : 混凝土施工; 质量控制; 通病防治; 水利工程; 裂缝

Study on Prevention and Treatment of Common Quality Problems in Concrete Construction of Water Conservancy Projects

Zhang Senlin, Xiang Yu

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

Abstract : It is very important to control the construction quality of concrete in hydraulic engineering. Common construction quality defects include cracks, honeycomb pits and cavities, which directly affect the service life and safety of the project. By analyzing the common problems in concrete construction of water conservancy projects and their causes, this paper puts forward corresponding prevention measures, focusing on the optimization of material selection, construction technology, maintenance management and other aspects. Using advanced technical means and management mode to effectively monitor the key links in the construction process can significantly improve the construction quality, reduce the occurrence of quality defects and ensure the long-term stability and safety of water conservancy projects.

Keywords : concrete construction; quality control; prevention and treatment of common diseases; water conservancy project; crack

引言

水利工程作为国家基础设施的重要组成部分, 其施工质量直接关系到社会的安全与经济发展。然而, 混凝土施工中的质量通病, 诸如裂缝、蜂窝麻面等问题, 常常在项目竣工后显现, 给工程的长期稳定性带来隐患。面对这些挑战, 传统的施工方法和管理模式已难以满足现代水利工程的要求。因此, 探索水利工程混凝土施工中的质量通病防治策略, 成为提升工程质量、保障工程安全的关键。通过有效的技术措施与科学管理, 可以最大程度地避免施工质量缺陷的发生, 确保水利工程的安全性与耐久性。

一、水利工程混凝土施工质量通病概述

(一) 常见质量通病及其成因分析

水利工程混凝土施工过程中, 常见的质量通病主要包括裂缝、蜂窝麻面、空洞、外观缺陷等。这些问题通常是由于不规范的施工工艺、材料不合格、施工环境不适宜等因素造成的。裂缝主要是由于混凝土收缩、温度变化或施工过程中浇筑不均匀等原因引起的。蜂窝麻面问题则多与混凝土的和易性不足、振捣不充分等因素相关。空洞则是由于混凝土配合比不当或施工中不恰当的操作导致混凝土的密实性差。上述质量通病的成因多为施工人

员技术水平不足、管理不到位以及材料选用不当所致^[1]。

(二) 质量通病对工程安全性的影响

混凝土施工质量通病对水利工程的安全性和耐久性构成严重威胁。裂缝的产生不仅影响工程的外观, 还可能导致水流渗透和钢筋锈蚀, 进而影响结构的承载力与稳定性。蜂窝麻面和空洞问题会降低混凝土的密实性, 导致其抗压强度下降, 长期存在可能导致混凝土结构的整体性破坏, 严重时会影响水坝、水库等关键设施的安全使用。此外, 施工质量不达标的混凝土容易受到外界环境的侵蚀, 尤其是水利工程常常暴露在潮湿和腐蚀性环境中, 缺乏足够强度的混凝土在长期作用下更易发生破坏。

（三）水利工程混凝土施工质量通病的现状

当前，水利工程混凝土施工中质量通病依然存在，尤其是在一些老旧工程和部分施工条件较差的项目中，通病问题尤为突出。随着水利工程规模的逐步扩大，施工技术和材料逐渐更新换代，但仍有许多施工单位未能完全掌握新技术，导致质量问题频发。此外，部分地区的施工队伍在人员素质和施工管理方面相对薄弱，未能有效执行质量控制标准，造成混凝土施工质量难以得到有效保障^[2]。

二、混凝土施工质量控制的关键环节

（一）材料选择与配比控制

混凝土的质量直接取决于原材料的质量与配比。水泥、砂石、外加剂和水的选择是决定混凝土性能的关键因素。水泥应选择符合国家标准的优质产品，不同类型的水泥应根据工程要求合理选用。砂石的粒径和级配应符合施工规范，避免使用含泥量较高的材料，以防影响混凝土的密实性和强度。根据混凝土强度等级和施工环境的不同，水泥与水的配比要严格控制，水灰比通常应控制在0.4–0.6之间，过高的水灰比会导致混凝土强度不足，过低的水灰比则影响施工操作性。外加剂的使用能有效提高混凝土的工作性、抗渗性和耐久性，但需根据不同工程条件进行科学配比。合理的材料选择和配比控制，不仅能确保混凝土的强度和稳定性，还能提高施工效率，避免材料浪费。

（二）施工工艺与操作规范

混凝土施工工艺的合理选择直接关系到工程质量的好坏。在混凝土浇筑前，模板、支架和钢筋的安装必须符合设计要求，确保其稳定性和准确性，避免因模板变形或支撑不当而导致混凝土受力不均，从而产生裂缝或其他缺陷。浇筑时，混凝土应采用分层浇筑方式，分层厚度一般为20–30厘米，每层需充分振捣，确保混凝土的密实性，防止蜂窝麻面和空洞的产生。振捣时要避免过度振动，以免导致混凝土离析或水泥浆流失。浇筑速度应根据混凝土的初凝时间调整，避免过快浇筑导致冷接或接缝问题。为了控制混凝土的水分蒸发，施工温度应控制在20° C–30° C之间，尤其在夏季高温时要采取遮盖等措施，防止温度过高导致水分过快蒸发，影响强度和耐久性。在大体积混凝土施工中，应采取分段浇筑及冷却措施，避免因温差过大产生裂缝。合理的施工工艺能够有效避免质量通病，提高混凝土结构的耐久性与安全性^[3]。

（三）养护措施及管理方法

混凝土的养护是确保其强度和耐久性的重要环节。养护应在混凝土浇筑完成后尽早进行，保持适宜的湿度和温度条件。常见的养护方法包括洒水养护、覆盖养护和蒸汽养护等，湿养护通常持续7天以上，而冬季施工应使用加热养护或覆盖保温措施，以防止混凝土受冻。养护期间温度应控制在5° C以上，避免混凝土出现低温早期强度发展不良的情况。现代水利工程中，部分项目还引入了自动化养护系统，通过传感器实时监测温湿度变化，确保养护条件的稳定。混凝土施工质量的管理也至关重要，施工单位应建立完善的质量管理体系，包括质量控制计划、检查与验收标

准等，对每一个施工环节进行严格把控。质量管理部门应定期检查和评估施工现场，确保施工操作规范执行到位，从源头上防治质量通病的产生。通过严格的养护和管理措施，可以有效提升混凝土的强度，减少裂缝等质量问题^[4]。如图1所示。



图1 蒸汽养护

三、质量通病防治的技术措施

（一）先进技术在混凝土施工中的应用

随着建筑技术的不断进步，越来越多的先进技术在水利工程混凝土施工中得到广泛应用，从而显著提高了施工质量，减少了常见质量通病的发生。例如，高性能混凝土（HPC）因其优异的耐久性和抗渗性，能够有效防止水利工程中常见的裂缝和渗漏问题，自密实混凝土（SCC）则因其良好的流动性和自我填充能力，能够在复杂的模板中自动流平，避免了传统混凝土施工中常见的空洞和蜂窝麻面问题。数字化配料控制系统的应用使得混凝土的配比更加精确，通过自动化调节配料比例，能够确保每批混凝土的强度和一致性，从而避免了人为操作误差。为防止混凝土在硬化过程中产生裂缝，膨胀型水泥和钢纤维的使用得到了广泛推广，它们能够有效减少混凝土收缩裂缝，增强结构的抗裂性能。通过这些先进技术的应用，水利工程的施工质量得到了显著提高，长期使用的稳定性和耐久性也得到了保证^[5]。

（二）施工现场监控与质量检测

施工现场的实时监控和质量检测不仅有助于预防质量通病，还能确保混凝土施工过程中各项技术要求得以落实。在混凝土浇筑过程中，温湿度是影响混凝土质量的关键因素，必须通过温湿度监测仪器实时监控，以确保混凝土在最佳养护环境下固化，避免因温度过高或湿度不足导致强度不足或裂缝产生。无人机和传感器技术的引入使得施工过程中的数据采集变得更加高效和精准，能够对混凝土浇筑、振捣、养护等每个环节进行实时监控，确保施工过程的每个步骤都按规范执行。此外，激光扫描技术可精确测量模板的几何尺寸，避免模板变形引发的质量问题。在质量检测方面，数字化检测方法通过实时监测混凝土的密实度、强度、裂缝等指标，使问题能够在第一时间发现，并采取相应的纠正措施，极大地提升了检测效率和准确性。根据统计，应用自动化监控和数字化检测的工程项目，质量通病的发生率降低了20%–

30%，显著提高了施工质量和项目的可控性^[6]。

（三）防治措施的综合应用与效果评估

防治混凝土施工质量通病需要技术措施与管理措施的综合应用。在水利工程实施前，施工单位应制定系统的质量控制方案，对材料选择、配合比设计、施工工艺、现场监控和质量检测等环节进行全过程控制。实践表明，实施全过程质量管理的工程项目，其混凝土一次验收合格率可提高 15% ~ 20%。在施工过程中，加强施工人员技术培训同样至关重要。相关工程统计显示，经过规范化技术培训的施工班组，其操作不规范问题发生率可降低 40% 以上。同时，通过建立质量反馈与整改机制，施工中发现的问题能够在 24 小时内得到处理，有效防止质量隐患扩大。综合防治措施的实施，不仅提高了混凝土施工质量，还显著降低了工程后期维护成本。数据显示，采用综合防治措施的水利工程项目，后期维修费用平均降低 20% ~ 30%，工程使用寿命明显延长，取得了良好的经济效益和社会效益^[7]。如表 1 所示。

表 1 先进技术与质量控制措施应用效果对比表

技术或措施	主要作用	量化效果
高性能混凝土（HPC）	提高强度与抗渗性能	抗压强度 ↑ 20% ~ 40%，抗渗等级提高至 P8 ~ P10
自密实混凝土（SCC）	提高密实度，减少缺陷	蜂窝麻面减少 60% 以上
数字化配料系统	提高配比精度	配比误差 ≤ ± 1%
膨胀剂 / 钢纤维	减少裂缝，提高抗裂性	收缩裂缝减少 30% ~ 50%
自动化监控与检测	实时质量控制	质量通病发生率 ↓ 20% ~ 30%
综合防治措施	提升整体质量水平	合格率 ↑ 15% ~ 20%

四、水利工程混凝土施工质量管理优化策略

（一）质量管理体系的构建

建立完善的质量管理体系是确保水利工程混凝土施工质量的核心保障，能够对各个施工环节进行全程管控。质量管理体系应包括从设计、材料采购、施工过程到竣工验收的全过程，每个环节都要制定明确的责任和操作规范，确保每一项工作都能符合标准要求。施工单位需要依照 ISO 9001 等国际质量管理标准进行组织和管理，这将有助于提升管理水平，确保施工活动严格按照既定标准执行。此外，质量管理体系还应具备高效的信息反馈机制，使得各级管理人员能够实时掌握施工质量的动态信息，及时发现并解决问题。通过编制质量计划、定期检查施工过程、跟踪和整改问题，能够有效控制质量风险，确保项目的质量目标得以实现。

参考文献

[1] 何德荣. 水利工程中混凝土施工管理及其质量控制 [J]. 大众标准化, 2021(14): 16-18.
[2] 刘育秉. 试论水利工程钢筋质量通病及处理措施 [J]. 长江技术经济, 2021, 5(S2): 35-37.
[3] 何欣航. 水利工程大体积混凝土施工温度监测及施工质量控制措施 [J]. 居舍, 2019(29): 168.
[4] 杨得萍. 水利工程大体积混凝土施工温度监测及施工质量控制措施 [J]. 建材与装饰, 2018(48): 278-279.
[5] 独敏. 水工建筑混凝土施工质量控制研究 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2018(31): 155.
[6] 陈艳. 道路与桥梁施工中现浇混凝土的质量通病及解决措施 [J]. 运输经理世界, 2025(19): 105-107.
[7] 朱海平. 道路与桥梁施工中现浇混凝土质量通病及解决措施分析 [J]. 运输经理世界, 2024(36): 119-121.
[8] 王祖坤. 房屋建筑施工中混凝土质量通病分析与预防策略研究 [J]. 房地产世界, 2024(22): 137-139.

（二）施工过程中的质量控制与监督

在水利工程混凝土施工过程中，质量控制和监督是确保工程质量的关键环节。施工单位应设置专门的质量控制人员，对每一项施工任务进行监控，确保施工工艺、材料质量以及施工人员的操作符合规定要求。对于混凝土的配合比、搅拌、浇筑及养护等重要环节，应设置严格的质量检测和控制标准，确保每一阶段的工作都在可控范围内。施工过程中应采取现场抽样检测和频繁的质量检查，尤其是在混凝土浇筑前后，做好密实度、强度等关键参数的检测。为了提升质量控制的效率，可以利用信息化手段，对施工现场进行实时监控和数据记录，确保质量问题能够在第一时间被发现并处理。施工过程中的质量监督不仅限于工程施工队伍，还应包括施工外部的第三方监理和相关部门的质量监督，从多角度、多层次地确保工程质量^[8]。

（三）持续改进与创新管理模式

持续改进是提高水利工程混凝土施工质量的重要途径。在施工管理过程中，应鼓励创新，采取新的管理模式和技术手段，以解决传统管理方法中的不足。例如，采用建筑信息模型（BIM）技术进行施工全过程的可视化管理，能够实时监控施工进度和质量状况，提前发现潜在风险，优化施工方案和资源配置。此外，质量管理团队应定期组织施工人员进行技术培训，提升其专业技能与质量意识。通过持续改进管理模式，不仅能提高施工效率，还能减少质量通病的发生。创新管理模式也应包括在项目实施后的质量评估与反馈机制，及时总结经验教训，调整管理策略，确保下一项目中的施工质量得到进一步提升。根据实践经验，持续改进的策略使得不少水利工程项目的质量合格率提高了约 20%，且大大缩短了工程周期，降低了后期维护成本。

五、结语

水利工程混凝土施工质量的控制是确保工程安全和长期稳定的关键。通过对常见质量通病的深入分析，提出了以材料选择、施工工艺和养护管理为核心的质量控制策略。同时，采用先进技术和严格的质量检测手段，能够有效防止质量通病的发生，确保工程质量的可控性和稳定性。质量管理体系的构建、施工过程中的监控与监督以及持续改进管理模式的应用，都为水利工程提供了有效的质量保障。随着技术的不断进步和管理模式的创新，水利工程混凝土施工的质量控制水平将不断提高，为未来的工程建设奠定更加坚实的基础。

工程项目质量管理体系优化与过程控制研究

武丹

苏州交投建设管理有限公司, 江苏 苏州 215000

DOI:10.61369/ERA.2026020034

摘 要 : 随着工程项目规模和复杂程度不断提升, 传统质量管理模式已难以满足高质量建设需求。本文在梳理工程项目质量管理体系现状与问题的基础上, 围绕体系优化与过程控制展开研究, 构建覆盖项目全生命周期的质量管理思路。以港珠澳大桥主体工程为案例, 分析信息化条件下统计过程控制、BIM 及物联网技术在质量管理中的应用成效。研究表明, 通过强化过程控制与数据化管理, 可有效降低质量缺陷率和返工率, 为大型复杂工程项目质量管理提供实践参考。

关 键 词 : 工程项目; 质量管理; 体系优化; 过程控制; 项目管理

Research on Optimization and Process Control of Quality Management System for Engineering Projects

Wu Dan

Suzhou Communications Investment Construction Management Co., Ltd., Suzhou, Jiangsu 215000

Abstract : With the increasing scale and complexity of engineering projects, traditional quality management models have found it difficult to meet the demands for high-quality construction. This paper conducts research on system optimization and process control by examining the current status and issues of the quality management system for engineering projects, and proposes a quality management approach that covers the entire project lifecycle. Using the main project of the Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge as a case study, it analyzes the effectiveness of applying statistical process control, Building Information Modeling (BIM), and Internet of Things (IoT) technologies in quality management under information-based conditions. The research indicates that by strengthening process control and data-driven management, the rates of quality defects and rework can be effectively reduced, providing practical references for quality management in large-scale and complex engineering projects.

Keywords : engineering projects; quality management; system optimization; process control; project management

引言

目前全球化加速、技术迅猛发展的现实里, 工程项目复杂度与风险性持续走高, 质量管理碰到前所未有的挑战, 保证工程项目顺利推进并收尾, 构建及优化质量管理体系至关重要, 抓好质量管理是工程项目成功的核心基础, 也是项目管理全流程里不能漏掉的环节, 传统模式下的质量管理体系应对复杂项目时, 存在部分局限, 本研究梳理现有体系的不足, 依托国内外成功案例, 探寻完善质量管理体系和过程控制的路径, 为工程项目质量管理提供科学的理论依据和实践指引。

一、工程项目质量管理体系现状与挑战

(一) 现有质量管理体系的结构与功能

工程项目质量管理体系的结构一般由组织结构、职责分配、质量目标、质量保证、质量控制等核心部分构成, 国内外大量工程项目里, 质量管理体系搭建一般参照 ISO 9001 标准, 1987 年首次发布该标准后, 成为全球质量管理体系的核心参照标准。ISO 9001 标准提出核心理念——“依托全流程的持续改进实现质量管理”, 它聚焦项目管理全链条, 从设计到施工再到竣工验收, 保

证每个环节都满足预设质量要求, 当前质量管理体系一般具备质量策划、质量控制、质量保证和质量改进 4 项功能。质量策划以项目需求为核心, 制定质量管理的整体目标与策略, 质量控制借助现场检测、抽样检验、控制图等方法保障产品达标, 质量保证囊括组织围绕项目实施流程推进的各类审核、检查、评估等工作, 保证实施环节契合质量管理要求, 质量改进侧重依托过程分析、反馈机制等手段, 升级管理流程, 强化质量水准^[1]。

(二) 工程项目质量管理面临的主要挑战

实操执行阶段, 工程项目质量管理面临多方面挑战, 项目规

模日益扩张、复杂程度增加,令质量管理难度上升,尤其针对大型基础设施建设、城市轨道交通等项目,涉及部门和环节数量众多,跨区域、跨部门协同管理成了质量管理的难题,2015年国内某大型隧道工程,施工企业管理存在疏漏,引发多项质量问题,最终拖慢项目竣工验收节奏,拉低工程品质。这类现象说明,质量管理的卡壳点依旧是项目管理体系的协调与统一,诸多项目管理者往往侧重进度控制和成本控制,却忽略质量控制的深度和全面性,结合国内一些工程项目反馈,项目施工阶段未严格执行质量检查,引发结构质量缺陷,质量管理体系里过程控制环节多被忽视,造成项目完成后没法落实有效的质量反馈和持续改进。

（三）传统质量管理体系的不足与改进空间

传统质量管理体系往往存在制度不完备、执行没落实等问题,工程项目复杂度不断提升,单一质量检查手段,已达不项目质量管理的要求,传统质量管理模式突出质量检查与事后把控,却忽略项目全生命周期的质量预防,传统质量体系一般靠人工完成质量检查,易出现疏漏和人为误差。越来越多国际工程项目采用自动化检测、物联网等先进技术手段,这为优化质量管理找到新路径,传统体系同样存在质量管理标准和流程执行力度不足的问题,ISO 9001虽设定了系统化的管理规则,但不少项目里,标准实施成效较差,核心原因是项目人员对质量管理体系认知不足,或是执行力度欠缺,参考国内若干大型建设项目实例,质量管理体系落实偏差,直接造成施工质量下滑^[2]。

二、质量管理体系优化路径

（一）基于全生命周期的质量管理体系优化

优化覆盖全生命周期的质量管理体系,聚焦项目完整周期,得把质量管理措施贯彻全程,项目启动、设计、施工再到运营各阶段,均需全程监控和控制,ISO 9001:2015标准规定,搭建质量管理体系需紧扣预防为主的理念,要求企业针对项目全流程各阶段实施全面风险评估和质量策划。面向全生命周期的质量管理体系,需依托设计优化、材料选择和工艺管控执行,提前识别潜在质量隐患,并落实有效措施提前防控,施工进行阶段,必须严格把控施工工艺、材料和设备质量,过程动态监控 保证施工契合设计标准,全生命周期管理还需覆盖项目交付后的运营阶段,实施质量跟踪及反馈。工程项目的质量,不能仅以施工收尾后的合格标准判定,需优先兼顾项目后期使用的安全性和可靠性,选建筑行业举例,按照建筑质量管理条例,建筑项目落成后,须对建筑物进行至少5年质保期内的质量监控,保证使用阶段无重大质量问题^[3]。

（二）持续改进与创新驱动的质量管理优化方法

推进工程项目阶段,提升项目质量离不开持续改进这一必要手段,更是升级质量管理体系的关键途径,借鉴国内某大型项目经验,执行项目期间,定期实施质量审核和评估,定位质量管理的缺陷,结合实际调整反馈内容,已逐步实现质量目标优化。创新驱动依托传统质量管理展开,凭借新技术、新方法的引入,不断推动质量管理体系升级,采用精益管理及六西格玛等先进方法,以细化过程管控和杜绝浪费,大幅提高工程项目的质量

和效率,制造业运用六西格玛,取得大范围成功,采用这一方法到工程项目后,依托统计分析和过程控制,切实压缩缺陷率,某建筑公司采用六西格玛后,项目缺陷率从5%降至1%,完成了显著的质量优化。

（三）信息化技术在质量管理体系中的应用

大数据、物联网、人工智能等技术迅猛发展,工程项目质量管理正不断向数字化、智能化转型,依托物联网技术能实时把控施工现场质量数据,设备运行状态、材料质量和环境条件等信息,由传感器实时采集后上传到云平台,开展分析与存储。运用大数据分析,可提前预判潜在质量风险,优化项目资源配置和工期安排,依据某城市轨道交通建设项目的应用实例,依托信息化技术实时把控施工质量和进度,项目施工周期压缩10%,质量缺陷率降低约15%,施工进行阶段,施工材料、工艺参数和检验记录,全可依托数字化系统实时记录、追溯,让项目质量控制全流程可追溯、可审计,全面推广建筑信息模型(BIM)技术,使工程项目各阶段的设计、施工及运营,通过同一个数字平台完成统筹管理,这不仅优化了项目管理效率,还能更精准防范施工质量问题,保障项目依标准、按质量落地^[4]。

三、过程控制在质量管理中的重要作用

（一）过程控制理论的基本框架与应用

过程控制理论脱胎自工程控制理论,核心依托实时监控、调整及优化生产或施工流程内各项参数,保证最终产出达标,核心框架一般包含计划、执行、监控和调整4个步骤,ISO 9001标准针对过程控制的要求,凸显“过程管理”的核心地位,建议纳入质量管理体系,所有活动需以过程为核心实施管理,具体措施可优化这些过程。过程控制理论把质量管理融入生产或施工流程,减少波动出现,提升过程的稳定与一致状态,推进工程项目期间,过程控制应用面广且作用关键,拿建筑项目举例,依托过程控制技术,施工方可以在施工阶段实时监控温度、湿度、材料强度等多种参数。若单个参数超出预设控制阈值,控制系统自动发出警告,同步启动调整措施,防止出现质量问题,国内某大型水坝项目施工阶段采用温湿度过程控制,维持水泥硬化速率和结构稳固性,大幅降低工程质量缺陷率,依托过程控制的理论框架,能切实保障工程项目在复杂条件下保持稳定质量标准。

（二）工程项目中常见过程控制方法与工具

推进工程项目阶段,统计过程控制(SPC)、过程优化控制(POC)、反馈控制等都属于常用过程控制方法,统计过程控制(SPC)借助控制图、过程能力指数(Cp,统计工具含Cpk等,实时紧盯生产或施工过程的质量波动,并采取恰当的调整办法,保证全程可控。就建筑工程项目而言,依靠SPC方法可监测混凝土强度分布情况,及时排查不达标批次,阻止不合格材料进入施工现场,依据控制图数据,项目管理者可及时调整,保障质量契合设计准则,过程优化控制(POC)优化作业内各项参数,诸如工艺设计、设备选择等事项,提升项目整体质量。制造业普遍使用POC,并已逐步在工程项目推行,尤其是那些对技术要求高的项

目，比如高速铁路、机场这类基础设施建设，从这些项目看，对施工各环节做优化调整，采用效率更高的混凝土浇筑设备或优化施工手段，可大幅提高质量与施工效率^[5]。

（三）过程控制与质量保障的互动关系

在 ISO 9001: 2015 及其他国际标准，过程控制是质量保障的关键环节，突出管控各环节的实施状态，保证最终结果达到预期质量要求，制定各关键控制点，诸如材料检验标准、工艺参数控制等事项，把控流程可有效防止质量偏差，降低施工风险，开展实际项目时，过程控制和质量保障的相互影响有多个体现方面。过程控制输出可量化的实时数据，可作为质量保障的关键参照，某大型建筑项目施工阶段，借助智能化温湿度监控系统实时跟进外部环境，保障材料质量契合设计标准，实施质量保障，为过程控制设定目标和标准，维持过程控制的方向准确性与操作科学性，部分对精度有高要求的工程项目里，过程控制的具体操作必须严格依照质量保障体系设定的技术标准和规定落实^[6]。

四、案例分析与优化实践

（一）典型工程项目案例背景与质量管理实践概述

为验证工程项目质量管理体系优化与过程控制方法的实际成效，本文选取港珠澳大桥主体工程作为研究案例。该工程为世界级超大型跨海基础设施项目，全长 55 km，施工环境复杂、技术标准高、质量风险点多，对质量管理体系的系统性与过程控制能力要求较高。依据交通运输部发布的《港珠澳大桥工程建设质量管理实践报告》，项目建设全面对标 ISO 9001:2015 标准，构建覆盖设计、施工、监测、验收及运营准备全过程的质量管理体系，将质量目标分解落实至各参建单位和关键工序，并实现质量管理与进度、成本管理的协同融合，形成以过程控制为核心的质量保障机制，为工程高质量建设奠定了基础。

（二）质量管理体系优化与过程控制的实施成效分析

在具体实施层面，港珠澳大桥工程通过信息化与标准化手段强化过程控制，在沉管预制、海上安装和混凝土浇筑等关键工序中引入统计过程控制（SPC）方法，对关键质量指标实施实时监测与动态调整，并依托 BIM 与物联网技术实现施工过程数据的连续采集与全流程可追溯管理^[7]。中国交通建设集团有限公司工程总

结数据显示，项目主体结构施工阶段重大质量缺陷发生率控制在 0.3% 以内，返工率较传统管理模式下降约 25%，有效降低了质量风险与工程成本。如表 1 所示。

表 1 港珠澳大桥主体工程施工阶段质量问题统计情况

质量问题类型	发生次数（次）	占比（%）
材料质量偏差	6	2.5
工艺执行偏差	5	2.1
设备运行异常	3	1.3
环境因素影响	2	0.8
管理协调问题	4	1.6
合计	20	8.3

数据来源：交通运输部：《港珠澳大桥工程建设质量管理实践报告》；中国交通建设集团有限公司：《港珠澳大桥主体工程质量管理总结（2018）》。

（三）案例启示与工程项目质量管理优化建议

港珠澳大桥工程实践表明，大型复杂工程项目仅依靠事后检查已难以满足质量管理要求，需通过质量管理体系优化与过程控制的深度融合实现质量水平提升。质量管理体系应结合项目特点进行针对性设计，将质量责任与控制要求嵌入关键工序，以过程管控保障结果达标；同时，依托信息化技术强化数据支撑，通过实时监测与动态分析提升质量风险预警能力，减少问题累积^[8]。项目管理团队还应推动质量管理理念由被动纠偏向主动预防转变，构建以标准化流程、数据化管控和持续改进为核心的长效机制，为同类大型工程项目提供可复制、可推广的实践经验。

五、结语

优化工程项目质量管理体系、做好过程控制，对提高项目质量、减少风险与成本意义重大。依托全生命周期质量管理、持续改进及信息化技术的深度应用，能实现更高效的项目管理和更扎实的质量保障。工程实践表明，以港珠澳大桥为代表的大型复杂工程项目中，依托信息化技术强化过程控制，对提升质量管理体系运行成效具有显著作用。物联网、人工智能等技术不断进步，优化后的质量管理体系会更精细、更智能，给工程项目圆满完成筑牢后盾。

参考文献

[1] 袁源. 装配式建筑项目质量管理体系构建及应用评价研究 [D]. 昆明理工大学, 2023.
[2] 游坤彬. 建筑机电安装工程项目质量管理探讨 [J]. 中国住宅设施, 2025(11): 113-115.
[3] 曹权. 建筑工程项目安全质量管理的影响因素研究 [J]. 黑龙江科学, 2025, 16(20): 150-152.
[4] 焦爱红. 建筑工程项目中的质量管理与控制 [J]. 城市开发, 2025(20): 97-99.
[5] 姚成刚. 提升建筑工程进度与质量管理效率的对策 [J]. 中国住宅设施, 2025(08): 97-99.
[6] 单晓龙, 孙鲁楠, 任泽俭. 建筑工程投资控制对项目质量管理的影响分析探讨 [J]. 工程建设与设计, 2025(15): 250-253.
[7] 江军, 冯文强. 房屋建筑工程施工质量控制问题与策略探究 [J]. 建材发展导向, 2025, 23(15): 46-48.
[8] 王琰伟. 建筑工程项目设计阶段质量管理水平研究 [D]. 北京化工大学, 2025.

智能温度传感器校准系统软件设计研究

马静, 蔡震坤*, 吴宁, 辛备豫, 吐鲁逊·伊力
新疆维吾尔自治区气象技术装备保障中心, 新疆 乌鲁木齐 830000
DOI:10.61369/ERA.2026020035

摘 要 : 智能温度传感器作为现代工业自动化、环境监测、医疗健康、能源管理等领域的核心感知元件, 其量值的准确性与可靠性至关重要。本文从系统架构、设计理念、关键技术与功能实现进行智能温度传感器校准系统软件设计。该软件以网络化、自动化和信息化为核心, 集成了被检仪表管理、标准器管理、多规程校准、任务流程控制、数据自动采集处理、证书智能生成等功能, 通过模块化设计、标准化流程、友好人机交互以及灵活可配置的策略, 显著提升了温度传感器校准作业的效率、规范性、准确性与数据管理水平, 为构建现代化、智能化的计量校准实验室提供了重要的软件平台支撑。

关 键 词 : 智能温度传感器; 自动化校准系统; 数据追溯

Research on Software Design of Intelligent Temperature Sensor Calibration System

Ma Jing, Cai Zhenkun*, Wu Ning, Xin Beiyu, Tu Lusun · Yi Li
Xinjiang Uygur Autonomous Region Meteorological Technology Equipment Support Center, Urumqi, Xinjiang 830000

Abstract : As a core sensing component in modern industrial automation, environmental monitoring, medical health, energy management and other fields, the accuracy and reliability of the measurement values of intelligent temperature sensors are of vital importance. This paper designs the software of an intelligent temperature sensor calibration system from the aspects of system architecture, design concept, key technologies and functional realization. The software, with networking, automation and informatization at its core, integrates functions such as the management of inspected instruments, standard device management, multi-procedure calibration, task flow control, automatic data collection and processing, and intelligent certificate generation. Through modular design, standardized processes, friendly human-computer interaction, and flexible and configurable strategies, it significantly enhances the efficiency, standardization, accuracy and data management level of temperature sensor calibration operations, providing an important software platform support for the construction of modern and intelligent metrology calibration laboratories.

Keywords : intelligent temperature sensor; automated calibration system; data traceability

引言

随着工业4.0、物联网、智能制造的快速发展, 温度传感器作为关键的物理量感知设备, 其应用范围日益扩大, 从工业生产过程的精密控制到实验室的科学研究, 再到日常生活的环境监测, 无处不在。传感器的性能, 尤其是其测量准确性、稳定性与可靠性, 直接影响整个系统的运行效能与安全性。因此, 对温度传感器进行定期、规范的校准, 确保其量值传递的准确可靠, 是保障生产质量、科学研究数据有效性和公共安全的基础性工作。

传统的温度传感器校准工作主要依赖人工操作, 普遍存在效率低下, 需手动设定温场、记录数据、计算误差, 耗时耗力, 难以应对大批量仪表的校准需求; 易引入人为误差: 人工读数、记录、计算过程易出错, 影响校准结果的准确性; 流程规范性难以保证: 操作步骤、数据格式、证书内容依赖于操作人员的经验和习惯, 难以统一; 数据管理与追溯困难: 纸质记录或分散的电子文档不便于查询、统计和长期保存, 难以实现仪表全生命周期的有效管理; 协同工作能力弱: 多用户、多任务、多地点协同校准困难, 资源难以共享等问题。

为了解决上述问题, 利用软件技术实现校准过程的自动化、标准化和信息化已成为必然趋势。本文所研究的智能温度传感器校准系统软件(以下简称“本系统”), 正是这一趋势下的代表性成果。本系统旨在构建一个集设备控制、数据采集、流程管理、信息追溯于一体的综合软件平台, 以提升校准实验室的整体技术水平和工作效率。

作者简介: 马静(1993.03-), 女, 新疆人, 本科, 工程师, 研究方向: 从事气象计量检定工作9年。
通讯作者: 蔡震坤(1970.09-), 男, 汉族, 广东人, 本科, 气象探测高级工程师, 从事气象计量行业二十余年, 全国气象专用计量器具计量技术委员会、新疆气象标准化委员会委员。

一、系统总体设计

（一）设计目标与原则

本系统的设计遵循六项核心目标与原则，即网络化与协同化：支持在局域网环境下运行，实现多用户同时在线、协同工作，数据集中管理，资源高效共享；流程自动化与标准化：将国家及国际校准规范（如 JJG、ISO 等）内嵌于软件逻辑中，引导并强制用户遵循标准流程，自动控制校准设备，自动采集和处理数据；功能集成化与模块化：将仪表管理、校准执行、数据管理、证书处理、系统配置等功能高度集成，同时采用模块化设计，便于功能扩展和维护；操作友好与智能化：提供简洁直观的图形用户界面，支持触摸屏操作，内置智能提醒、向导式任务创建、模板化配置等功能，降低用户学习成本；数据安全与可追溯性：建立完善的用户权限体系，记录详细的操作日志，实现从仪表入库、校准、使用到报废的全过程数据记录与追溯；灵活性与可配置性：支持用户自定义校准方案、证书模板、流水号规则、提醒策略等，以适应不同行业和用户的个性化需求。

（二）系统架构

本系统采用典型的 C/S（客户端 / 服务器）或单机增强型架构，软件整体由十大功能模块构成，逻辑清晰，职责分明。分别为：软件首页：系统入口，提供快捷导航和新手指南；校准中心：校准任务执行的核心模块，负责方案配置、任务创建、过程控制与数据采集；数据中心：存储和管理所有校准原始数据与结果记录，支持数据的增删改查、备份和证书生成；证书中心：集中管理所有已生成的校准 / 检定证书，提供查询、预览、打印、导出（PDF/Excel）和备份功能；被检仪表管理：实现送检温度传感器的全生命周期信息管理，包括信息录入、查询、校准计划制定、周期提醒等；标准仪表管理：管理实验室标准器的信息、校准计划和周期状态，确保标准器量值有效；配置中心：系统的“大脑”，用于配置校准单位、校准规范、参数策略、用户模板、流水号、仪表类别等所有业务规则；系统管理：负责用户账户、角色权限、操作日志等系统级安全与审计功能；工具箱：提供单位换算、传感器换算、设备通讯调试、数据迁移等实用工具集合；校验仪任务管理：支持与便携式现场校验仪联动，实现任务的下载与数据的上传，扩展现场校准能力。

二、核心功能模块设计与实现

（一）系统管理与安全控制

为确保数据安全和操作合规，本系统建立了多层次的安全控制机制。包括用户与角色管理：系统预置管理员、工程师、操作员、核验员、批准人五类角色，并支持自定义角色，管理员可以创建用户，并为其分配一个或多个角色，实现基于角色的访问控制（RBAC），不同角色具有不同的操作权限，例如操作员只能执行校准，工程师可进行业务配置，管理员拥有全部权限；操作日志：系统记录所有关键操作，包括用户登录登出、数据增删改、证书生成打印、配置修改等。管理员可按时间、用户、操作类型

等条件查询和导出日志，满足内部审核和外部认证（如 ISO/IEC 17025）的追溯要求。

（二）灵活的业务配置体系

强大的可配置能力是本系统适应多样需求的关键。软件支持多规程可选，系统内置大量现行有效的国家检定规程（JJG）和校准规范（JJF），并允许用户在单次校准前选择适用的规范，打破了传统软件一种仪表只对应一种规范的限制。用户可自定义规范与方案，支持用户以系统规范为模板，创建符合特定内部要求或特殊仪表的自定义校准规范。同时，用户可以根据实验室现有设备（如多路测温仪、温控器、恒温槽等），灵活组合并保存为“校准方案”，方便后续重复调用。另外可对参数与模板自定义，软件提供全面的参数设置，包括校准周期、不确定度管理、系统策略等，证书模板和报表模板完全开放，用户可自主设计符合自身机构形象的证书格式，并支持多语言。

（三）全生命周期的仪表管理

软件支持将仪表作为核心资产进行信息化管理。通过被检仪表管理模块，详细记录仪表的类型、型号、量程、准确度、生产商、出厂编号、使用位置、送检单位等信息；支持批量导入、多条件高级查询。核心功能是校准计划与提醒，系统可根据设定的校准周期和上次校准日期，自动列出即将到期的仪表，并可一键生成校准计划或加入待检清单，有效防止漏检。针对标准仪表管理，设计实验室标准器的档案、技术指标、校准证书信息及有效期关联页面。对于可通讯的智能标准器（如某些温控器），系统能通过通讯自动识别并关联其信息，提升效率。

（四）自动化与智能化的校准流程

以“任务”为驱动，实现温度校准的全程自动化。在任务创建模块，用户可便捷地创建温度校准任务，指定被检仪表（支持多支同时检）、选择校准规范和方案、设定温度点（支持升降温循环、断点续检）、配置控温参数（波动度、稳定时间等）。设计通道配置与验证页面，对于多通道测温系统，提供图形化拖拽界面，直观地将物理接线通道与软件中的被检及标准器逻辑通道进行绑定，绑定后可执行通道验证，确保所有接线正确，信号读取正常。设计过程执行与监控页面，启动任务后，软件自动控制温场（如恒温槽、干体炉）到达设定点并稳定，自动从多路测温仪或数据采集器中读取标准器和被检传感器的数据，界面实时显示温场变化曲线、各通道数据、任务进度和状态，过程透明可控。

（五）数据处理与证书生成

对于数据自动处理，采集完成后，系统依据选定的规范自动计算示值误差、重复性、稳定性等指标，并判定合格与否。所有原始数据和计算结果自动保存至数据中心。对采集后的数据进行处理，在证书生成与数据管理模块设计

一键生成证书功能，即校准数据审核无误后，按预设模版生成格式规范、内容完整的校准证书或检定证书，证书包含调整前 / 后数据、测量不确定度、环境条件、所用标准器等信息。通过数据中心模块，保存所有校准记录，支持对历史数据的查询、统计、分析和再处理，也可手动创建记录或对已有记录发起“复检”。另外设计证书中心，对所有已出具证书进行集中归档管理，

方便检索、打印和电子化分发。

（六）二维码技术集成应用

利用物联网技术提升效率，增加二维码打印功能，可为每台被检仪表、标准仪表及每份证书生成唯一二维码标签。打印内容可配置，包含关键识别信息。通过扫描枪快速操作，在仪表入库、查找、开始校准时，使用扫描枪扫描仪表自身的二维码或系统打印的标签，即可快速调出该仪表所有信息，或将其直接添加到校准任务中，避免了繁琐的手工录入，极大提升效率并杜绝输入错误。

（七）现场校准支持

通过“校验仪任务管理”模块，支持离线作业模式。工程师可在办公室软件端创建任务并下载到便携式温度校验仪中，携带校验仪到现场完成校准后，再将数据上传回软件端生成正式证书，实现了实验室校准与现场校准的无缝衔接。

三、关键技术实现

（一）基于规范的自动化测试引擎

系统核心是一个解释执行引擎，能够解析不同的校准规范（JJG/JF 等），将其转化为具体的设备控制指令、数据采集逻辑和计算判据。这使得软件具备了遵循标准化流程的“硬约束”能力。^[4]

（二）多设备通讯与集成控制

系统支持通过 GPIB、RS-232、RS-485、USB、以太网等多种接口与温控器、多路测温仪、数字多用表、恒温槽等校准设备通信。内置丰富的设备驱动库，能够发送控制指令、读取测量数据，实现多设备协同自动化运行^[6-9]。

（三）高精度数据采集与处理算法

针对温度校准中信号微弱、易受干扰的特点，软件采用了数字滤波、多次采样平均等技术确保数据稳定性。在数据处理阶段，严格依据规范实现误差计算、修约和符合性判定，确保计算结果准确可靠。

（四）结构化数据库设计

采用关系型数据库（如 SQLite 或 SQL Server），精心设计仪表信息表、校准记录表、证书表、用户表、日志表等，并建立

有效的关联关系。这保障了海量数据的高效存储、快速检索和完整的事务处理能力。

（五）可扩展的插件与模板机制

通过“用户自定义规范 / 方案 / 模板”功能，系统实现了业务逻辑层面的可扩展性。用户无需修改软件代码，即可适应新的仪表类型或内部管理要求，延长了软件的生命周期。

四、软件应用效果与分析

通过本文软件设计研究，将对校准效率有大幅提升，自动化流程使单次校准时间平均缩短 50% 以上，批量校准优势更加明显。工作质量提高，消除了人工读数计算错误，流程强制规范，确保了校准结果的一致性与权威性。管理水平飞跃：实现了仪表的数字化、全生命周期管理，校准计划自动提醒，历史数据随时可查，为设备维护和计量决策提供了数据支撑。人力资源优化，将技术人员从重重复性劳动中解放出来，更专注于方法研究、数据分析等更高价值的工作。符合性与追溯性，详尽的日志和规范的证书输出，轻松满足 CNAS、CMA 等认可准则及 ISO/IEC 17025 对技术记录和可追溯性的严格要求。

五、结论与展望

本文详细研究并阐述了一款智能温度传感器校准系统软件的设计与实现。该软件以现代软件工程思想为指导，深度融合计量专业技术，成功构建了一个网络化、自动化、信息化的综合校准管理平台。它通过创新的架构设计、灵活的业务配置、智能的流程控制和先进的物联网技术应用，有效解决了传统校准模式的诸多痛点，显著提升了校准工作的效率、质量和可管理水平。

综上所述，本系统的设计与实践为计量行业的数字化转型提供了有力的工具，其设计理念和关键技术对开发其他物理量的智能校准系统也具有重要的参考价值。持续的技术创新与应用深化，必将推动计量校准领域迈向更加智能、高效的新阶段。

参考文献

- [1] JJG 229-2010, 工业铂、铜热电阻检定规程.
- [2] JJF 1637-2017, 廉金属热电偶校准规范.
- [3] JJF 1076-2020, 数字式温湿度计校准规范.
- [4] ISO/IEC 17025:2017, 检测和校准实验室能力的通用要求.
- [6] 王池, 李金海. 自动测试系统集成技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2018.
- [7] 刘志强, 张军. 现代计量管理信息系统设计与实现 [J]. 计量技术, 2021(4): 70-74.
- [8] 赵静, 孙晓. 基于二维码技术的计量器具信息化管理研究 [J]. 中国计量, 2022(3): 45-48.
- [9] 陈晓峰, 高鹏. 云计算在计量检测信息化中的应用探讨 [J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(8): 1-8.

无人机与物联网融合技术在流域隐蔽排污口监察中的应用研究

陈先敏

北海市合浦生态环境监测站, 广西 合浦 536100

DOI:10.61369/ERA.2026020036

摘 要 : 为解决流域隐蔽排污口监察中地形限制、识别精准度不足、效率偏低等问题, 推动智慧水利建设, 本研究提出无人机与物联网融合的新型监察技术方案, 设计并构建了感知层 – 网络传输层 – 平台应用层三级协同架构系统。系统通过常态化巡查与精准执法取证两大闭环流程, 实现从数据采集到业务应用的全流程自动化智能化, 大幅提升隐蔽排污口监察的精准度与效率, 为环境执法提供有力技术支撑, 创新水环境监测模式, 助力智慧水利建设进程。

关 键 词 : 无人机; 物联网; 流域隐蔽排污口; 水环境监察

Research on the Application of UAV and Internet of Things Fusion Technology in the Supervision of Hidden Drainage Outlet in River Basin

Chen Xianmin

Beihai Hepu Ecological Environment Monitoring Station, Hepu, Guangxi 536100

Abstract : In order to solve the problems of terrain limitation, insufficient identification accuracy and low efficiency in monitoring concealed sewage outlets in river basins, and promote the construction of smart water conservancy, a new monitoring technology scheme integrating UAV and Internet of Things was proposed, and a three-level collaborative architecture system of perception layer, network transport layer and platform application layer was designed and constructed. Through the two closed-loop processes of normalized patrol and accurate law enforcement and evidence collection, the system realizes the automation and intelligence of the whole process from data collection to business application, greatly improves the accuracy and efficiency of monitoring hidden sewage outlets, provides strong technical support for environmental law enforcement, innovates the water environment monitoring mode, and helps the process of smart water conservancy construction.

Keywords : UAV; Internet of Things; hidden sewage outlet in the basin; water environment monitoring

引言

随着新一代信息技术的快速发展, 无人机技术与物联网技术在环境监测领域的应用日益广泛, 为解决隐蔽排污口监察难题提供了新路径。无人机凭借机动灵活、覆盖范围广、可突破复杂地形限制的优势, 能够实现空中全方位巡查, 搭配多类型传感器可获取高清影像、红外数据及污染物特征信息; 物联网技术则通过分布式感知节点与无线传输网络, 实现水质、水文等数据的实时采集、动态上报与智能预警, 构建起“空 – 地 – 水”一体化感知网络。将两者深度融合, 可弥补单一技术在监察中的局限性, 实现从被动应对到主动发现、从粗放监管到精准溯源的转型, 为智慧水利建设注入核心动力。基于此, 本文立足流域隐蔽排污口监察的实际需求, 构建无人机与物联网融合监察系统, 优化系统三级架构设计, 研究隐蔽排污口发现与识别关键算法, 完善常态化巡查与精准执法取证业务流程, 旨在实现隐蔽排污口监察的全流程自动化、智能化, 提升监管效率与精准度, 为流域水环境治理与执法监管提供技术支撑, 推动智慧水利建设向纵深发展。

一、无人机与物联网融合监察系统架构设计

(一) 系统总体设计思路

无人机技术具有机动灵活、复杂地形可达等优势, 物联网技术则可实现数据实时传输智能分析, 因此将无人机与物联网 2 种技

术结合, 创新水环境监测模式, 提升监测效率质量, 有助于推动智慧水利建设的进程^[1]。无人机与物联网融合监察系统以精准感知、高效传输、智能分析、便捷应用为核心目标, 遵循模块化、可扩展、高可靠原则, 构建感知层 – 网络传输层 – 平台应用层三级架构, 深度融合无人机空中巡查与物联网地面 / 水下感知^[2]。各

层级独立实现核心功能并通过数据交互形成协同闭环,感知层采集多维度基础数据,网络传输层保障数据实时稳定互联,平台应用层完成数据融合处理、智能分析与可视化展示,支撑监察业务开展,实现从数据采集到业务应用的全流程自动化智能化,提升隐蔽排污口监察的精准度与效率。

（二）感知层设计

感知层作为系统数据采集核心,采用无人机空中感知+物联网地面/水下感知协同模式,通过两大单元实现隐蔽排污口全方位、多维度数据采集^[3]。无人机端集成高分辨率可见光相机、红外热成像仪、气体传感器及GPS/北斗定位模块,可见光相机获取流域关键区域高清影像,捕捉排污口外观与排放状态;红外热成像仪突破光照、植被遮挡等限制,识别隐蔽及夜间排污行为;气体传感器检测特征污染物以辅助判断污染情况;定位模块实现数据精准时空关联,为排污口定位奠定基础^[4]。物联网节点采用分布式部署,在流域关键区域布设水质、水文传感器及无线传输模块,水质传感器实时采集核心水质指标并触发异常预警,水文传感器采集流速、水位数据辅助分析污染扩散影响;传感器节点具备防水抗干扰设计,通过低功耗广域网实时上传数据,兼顾能耗控制与数据连续性。

（三）网络传输层设计

网络传输层的核心功能是实现感知层(图像、视频、传感器、定位等)与平台应用层的双向高效稳定传输,解决无人机、分布式物联网节点与平台的互联问题,兼顾数据传输的实时性、安全性与可靠性^[5]。针对无人机数据传输,采用4G/5G+卫星通信双模方案。信号良好区域通过4G/5G满足近距离高带宽实时传输需求,偏远信号薄弱区域切换至卫星通信保障数据不中断,同时采用H.265编码等压缩技术降低带宽占用、提升效率。针对物联网节点传输,采用低功耗广域网+局域网协同模式^[6]。分布式传感器节点通过LoRa或NB-IoT将水质、水文等数据上传至区域网关,网关经4G/5G或光纤接入平台,实现低功耗远距离传输;近距离密集部署节点则通过局域网提升传输速率与稳定性。此外,传输层设数据加密模块,防止数据泄露与篡改,保障监管数据安全。

（四）平台应用层设计

平台应用层是系统核心处理与应用载体,依托云计算、大数据、人工智能及GIS技术,为流域隐蔽排污口监察提供全流程支撑,主要包含四大功能模块^[7]。数据存储模块采用云数据库+本地缓存架构,云数据库存储海量多类型数据以保障长期存储与共享,本地缓存提升实时数据访问速度,同时通过数据标准化规范统一数据格式^[8]。智能分析模块集成多种算法处理感知层数据,借助图像视频识别排污口位置及状态,结合水质数据交叉验证提升准确率,可通过智能追踪算法控制无人机跟踪移动或突发排污行为^[9]。可视化展示模块基于GIS构建流域三维地图,叠加巡查轨迹、排污口、水质及预警等信息,实现数据可视、位置精准、状态实时,支持点击查看排污口详情以辅助决策。业务管理模块为巡查、执法、应急等核心业务提供流程化管理,涵盖任务规划、文书生成、档案管理等功能,实现监察业务全流程数字化,提升

监管效能。

二、隐蔽排污口发现与识别关键算法

（一）基于无人机遥感图像的排污口视觉识别

无人机遥感图像排污口视觉识别是隐蔽排污口探测核心技术,需克服光照、植被遮挡、背景复杂等干扰以实现精准识别,流程分三步骤。预处理阶段通过高斯滤波去噪、几何校正消畸变、直方图均衡化增强对比度,红外图像则用阈值分割突出污水温度异常区^[10]。特征提取需提取排污口视觉特征(形状、颜色、排放状态)、GLCM纹理特征,结合红外温度特征构建多维度向量。模型识别采用YOLOv8算法,经多场景数据集训练优化并引入注意力机制,适配无人机实时巡查,对隐蔽排污口识别准确率超90%,满足实际监察需求。

（二）多源数据融合处理技术

源数据融合处理技术整合无人机遥感图像、物联网传感器(水质、水文、气体)、GPS定位及历史监管数据,通过数据层-特征层-决策层三级架构实现数据互补验证,提升隐蔽排污口识别准确性,规避单一数据误判、漏判问题。数据层对原始数据预处理对齐,标准化无人机图像并关联GPS,用 3σ 准则剔除传感器数据异常值、插值补缺失,统一时空坐标系。特征层提取视觉、纹理(图像)与水质、气体浓度(传感器)特征构建向量,经PCA降维后实现视觉+环境特征双向印证。决策层基于特征结果,用D-S证据理论融合多源判断、结合历史数据与专家规则决策,辅助区分排污类型、修正结果(如水质异常无图像时触发无人机红外巡查)。该技术使系统识别准确率较单一数据源提升15%以上,有效降低误判率。

（三）智能追踪与定位技术

智能追踪与定位技术聚焦移动排污口(如非法排污船、临时排污管)及突发排污行为的实时追踪与精准定位,融合无人机自主导航、视觉追踪与GPS/北斗定位技术,实现排污口位置动态更新与精准锁定。定位方面采用GPS/北斗+视觉定位融合方案,无人机通过自身定位模块与图像中排污口相对位置获取初步坐标,结合地面物联网节点信息校准以消除误差,定位精度控制在1米内,满足执法取证需求;水下排污口则结合声呐传感器数据与GPS定位实现三维坐标锁定。追踪技术以KCF核相关滤波算法为核心,依托其实时性强、抗遮挡的优势快速锁定目标,联动无人机自主导航系统动态调整飞行姿态与路径,持续采集目标及环境数据;当目标超出视野时,结合历史轨迹与水质传感器异常区域预测移动方向,启动大范围搜索确保追踪不中断,同时可联动多架无人机协同追踪,扩大范围并提升效率。

三、系统应用与业务流程实现

（一）常态化巡查业务流程

流程以自动化规划、智能化巡查、精准化分析、规范化归档为核心,实现流域隐蔽排污口全覆盖、周期性巡查,助力隐患早

发现早干预，同时大幅降低人工成本、提升巡查效率。由监管人员通过平台制定巡查计划，明确范围、路线等关键信息，系统依托 GIS 地图生成无人机最优飞行路径并设置采集参数，将指令下发至无人机与物联网感知节点；随后无人机按预设路径自主飞行，通过多设备采集音视频及环境数据，物联网节点同步采集水质水文数据，发现疑似排污口时自动预警并聚焦强化采集；平台对采集数据自动分析融合，验证疑似排污口、判定污染情况，分类存储数据、标记异常并生成含处理建议的分析报告；所有巡查资料自动归档至档案管理模块、更新台账，疑似排污口信息同步推送至监管人员，为后续核查工作提供依据。

（二）精准执法取证流程

精准执法取证流程以常态化巡查发现的疑似排污口为起点，构建精准锁定、现场核查、证据固定、执法处置全流程闭环，保障执法合法性、准确性与高效性。精准锁定阶段通过智能分析与多源数据融合，确定排污口精准位置、排放特征及污染范围，生成含位置坐标、影像数据、水质监测结果等初步证据的执法任务，推送至执法人员移动端并提供 GIS 导航支持。现场核查时，执法人员借助无人机采集排污口及周边影像，通过便携式设备检测 COD、氨氮等核心水质指标并与物联网数据验证，对水下、涵

洞等隐蔽排污口则由无人机深入采集影像，确保核查全面。证据固定环节由系统按执法规范整合现场采集的各类数据，生成含关键信息的标准化加密档案，可直接用于执法文书制作与诉讼。执法处置阶段依法下达相关文书并录入系统，通过定期复查与无人机、传感器验证整改效果，形成完整执法闭环，为环境执法提供有力支撑。

四、结束语

本文围绕流域隐蔽排污口监察的现实难题，开展无人机与物联网融合技术的应用研究，构建了感知层－网络传输层－平台应用层三级协同监察系统，优化了隐蔽排污口识别、追踪与定位关键算法，完善了常态化巡查与精准执法取证业务流程，形成了一套全流程自动化、智能化的隐蔽排污口监察技术方案，有效突破了传统监察模式的局限。随着人工智能、5G 等技术的持续迭代，无人机与物联网融合技术将在流域水环境治理中发挥更大作用，助力实现水生态环境的精细化、长效化管控，为生态文明建设提供坚实保障。

参考文献

[1] 陈燕朋, 邓保军. 无人机与物联网技术在水环境监测中的应用 [J]. 资源节约与环保, 2025(7): 46–49. DOI: 10.3969/j.issn.1673–2251.2025.07.011.

[2] 包新星, 杨珍珍, 薛欣莹, 等. 入河排污口排查溯源调查研究 [J]. 能源与环境, 2024(5): 155–157. DOI: 10.3969/j.issn.1672–9064.2024.05.042.

[3] 张元敏. 无人机航测技术在入海排污口排查中的应用 [J]. 测绘通报, 2020(1): 146–149.153

[4] 王贵作, 孟祥龙, 郎励贤, 等. 利用无人机开展入河排污口清查的思路与建议 [J]. 水利发展研究, 2018, 18(02): 27–29+33. DOI: 10.13928/j.cnki.wrd.2018.02.008.

[5] 马艳冰, 王琳琳, 姚瑞. 无人机遥感技术在入河排污口核查中的应用解析 [C]//2022 年（第十届）中国水利信息化技术论坛论文集. 2022: 1–13.

[6] 易少雄, 陈春, 邹兰兰, 等. 典型河湖流域排污口调查及污染源分析 [J]. 山西化工, 2022, 42(5): 161–164. DOI: 10.16525/j.cnki.cn14–1109/tq.2022.05.065.

[7] 李秀玲. 流域水体环境入河排污口污染源调查及溯源分析 [J]. 中国资源综合利用, 2024, 42(11): 199–201. DOI: 10.3969/j.issn.1008–9500.2024.11.057.

[8] 谢长淮, 徐卫兵. 长江流域入河排污口问题分析及对策探讨 [J]. 盐城工学院学报（自然科学版）, 2020, 33(1): 10–12, 56. DOI: 10.16018/j.cnki.cn32–1650/n.202001003.

[9] 涂建峰, 王孟, 肖文文, 等. 长江流域入河排污口管理实践与探讨 [J]. 人民长江, 2016, 47(15): 5–8. DOI: 10.16232/j.cnki.1001–4179.2016.15.002.

[10] 周亚平, 张晓强, 李盐, 等. 无人机摄影在黄河流域水环境监测及排污口督查中的应用研究 [C]// 中国水利学会 2018 学术年会论文集. 2018: 545–550.

压力表计量在现场检测中的应用与误差控制研究

李薇

江苏金陵机械制造总厂, 江苏 南京 210007

DOI:10.61369/ERA.2026020037

摘 要 : 压力表在各类工业现场应用广泛, 确保其计量准确性与可靠性成现场检测关键。本文探究压力表现场检测应用及误差控制办法, 分析影响其计量精度因素, 像环境状况、操作手段、仪器自身精度等, 提出对应误差控制策略, 如定时校准、把控环境温度影响、运用高精度压力标准装置等, 研究显示, 合理误差控制举措可提升压力表计量精度, 保障测量结果可靠, 利于现场检测工作开展。

关 键 词 : 压力表; 计量精度; 误差控制; 现场检测; 环境因素

Application of Pressure Gauge Measurement in Field Detection and Error Control Research

Li Wei

Jiangsu Jinling Machinery Manufacturing General Factory, Nanjing, Jiangsu 210007

Abstract : Pressure gauges are widely used in various industrial fields, and ensuring their measurement accuracy and reliability is the key to field detection. In this paper, the application and error control methods of on-site detection of pressure gauges are explored, and the factors that affect their measurement accuracy, such as environmental conditions, operation methods and instrument accuracy, are analyzed, and corresponding error control strategies are put forward, such as timing calibration, controlling the influence of environmental temperature, using high-precision pressure standard devices, etc. The research shows that reasonable error control measures can improve the measurement accuracy of pressure gauges, ensure the reliability of measurement results, and facilitate the development of on-site detection.

Keywords : pressure gauge; measurement accuracy; error control; on-site inspection; environmental factor

引言

压力表是工业现场检测常用仪器, 在电力和航空等行业生产流程中应用普遍, 工业自动化与智能化发展, 使压力表计量精准度和可靠性成为保障生产安全与产品质量的重要支撑, 不过, 现场使用环境复杂, 影响压力表精度的因素繁杂, 特别是在高温、低温、潮湿、震动等环境下, 压力表测量误差较难避免, 为保证测量结果准确可靠, 需采取有效误差控制手段, 本文将研究压力表现场检测应用及误差控制方法, 为实际应用提供理论与技术支撑。

一、压力表的工作原理与应用概述

(一) 压力表的工作原理

压力表用于测量并显示气体或液体压力, 其原理一般是压力使传感器元件形变, 再经相应机械或电气装置把形变转为可读压力值。液柱压力表依据液体密度差原理, 以液体柱高度变化反映压力, 多用于低压环境; 弹簧压力表靠弹簧变形测压, 常见于中低压场合; 应变式压力表通过压力下材料的应变来测量, 能借电阻变化传递压力信号, 多用于有高精度、高稳定性要求的测量。

液柱压力表测量精度常在1%以内, 应变式压力表用于高精度测量时, 误差能控制在0.25%以下; 常见压力表量程依压力范围

需求, 从几帕斯卡到数百兆帕都有, 比如, 0 - 10 kPa 的低压测量适合用液柱压力表, 而0 - 10 MPa 的中高压应用, 应变式压力表更为合适。

(二) 压力表的应用领域

压力表于工业现场应用广泛, 在电力、航空航天等高危行业, 其精确度直接关乎生产安全与产品质量。以航空航天维修领域为例, 维修检测时用压力表监测液压系统压力, 保障飞行器地面试验与维修安全; 航空航天维修中, 用其监控密封舱、管路及压力容器的压力变化, 避免压力异常导致结构损伤或密封失效; 在航空地面保障与维修环节, 监测气瓶、增压系统等设备压力, 对防止维修故障、保障飞行安全意义重大。

保障生产安全稳定，压力表准确性十分关键；故而，不少行业使用压力表时，要求符合国家标准 GB/T 17701 – 2008《压力表的检定和使用管理规程》，此标准对压力表检定周期、误差范围及使用环境作出规定^[1]。

（三）不同类型压力表的比较分析

压力表类型丰富，不同种类对应不同测量场景。液柱压力表工作原理简易，适用于低压环境，精度不高，多用于压力范围小的测量，误差范围一般在 $\pm 1.5\%$ 至 $\pm 2.5\%$ ，适用于实验室或非高精度应用。

弹簧压力表颇为常见，通过内部弹簧形变感知压力变化，适用于中等压力环境，测量精度通常处于 $\pm 2\%$ 到 $\pm 3\%$ ，常用于常规工业测量；应变式压力表因高精度与良好稳定性，在高精度、长周期的工业生产环境中应用广泛，误差可控制在 $\pm 0.25\%$ 上下，适用于航空航天、核电等对精度要求高的行业^[2]。

二、影响压力表计量精度的因素分析

（一）环境因素的影响

环境因素如温度、湿度和振动，会对压力表测量精度造成影响，极端环境下影响更甚。温度变化是常见影响因素，多数压力表性能会随温度改变出现偏差，比如温度升高时，压力表内弹簧或传感元件会热膨胀，或材料性质改变，使测量结果有误差；按照 GB/T 17701 – 2008《压力表的检定和使用管理规程》标准，常见压力表工作温度在 -10°C 至 60°C ，超出该范围，测量误差显著增加，幅度在 $1\% - 5\%$ 。

湿度会影响压力表稳定性，电子式或用传感器的压力表，湿气会致电路短路或有信号噪声，影响测量精度，机械式压力表在高湿度环境久用，机械部件会腐蚀，影响测量；振动也影响压力表准确性，高振动环境中，读数不稳定，降低现场测量可靠性^[3]。

（二）压力表本身的误差源

压力表的设计、制造精度与材料选用，都会对其使用时的准确性和稳定性产生直接影响，内部传感器、弹簧、测量管等部件的材质和加工工艺，很大程度上决定了它的性能。传统机械式压力表制造时，部件配合精度易受加工误差干扰，致使其误差较大，通常误差处于 $0.5\% - 2\%$ ；现代电子式压力表误差精度多在 $0.25\% - 1\%$ 。

压力表的测量范围也显著影响其准确度，在量程范围两端，压力表精度往往欠佳，所以，选用压力表时，要依据实际测量范围挑选合适的量程与精度，例如部分高精度应变式压力表在 $0 - 2\text{ MPa}$ 范围内，精度能达 $\pm 0.25\%$ ，超高压范围的压力表精度则可能稍降^[4]。

（三）操作与维护的影响

操作失误与维护欠缺会对压力表精度造成影响，使用压力表时操作不规范（如错误安装、过度震动或压力过载等）可能使压力表性能降低、产生永久性误差，比如安装不当会让内部零件承受不均匀应力，进而影响测量结果；而且，若不定期检定与校准，压力表和标准压力源之间会出现偏差，依据国家标准 GB/T 26322 – 2010《压力表的检定周期规定》，使用一年后需进行一次校准检查，以此保障测量结果准确。

定期校准与检查压力表性能是保证其精度的有效办法，对比高精度标准压力源能及时察觉并纠正偏差，防止误差对生产过程产生不良作用，通常，机械式压力表和电子式压力表校准周期分

别为1年和2年，但校准周期或根据使用频率与工作环境差异调整^[5]。如表1所示。

表 1 环境因素对压力表精度的影响及误差幅度

环境因素	影响描述	误差幅度
温度	高温导致热膨胀，低温导致材料变脆	1%–5%
湿度	湿气引起电路短路或腐蚀，影响信号稳定性	0.5%–3%
振动	振动引起机械组件的位移，造成读数不稳定	1%–3%

三、现场检测中压力表的误差控制方法

（一）环境因素控制

环境要素对压力表测量精度的影响不容小觑，尤其当处于极端恶劣的环境里，以降低环境给压力表精度造成的波动，可采用多种管控方式，压力表安装作业进行的阶段里，尽量阻止其被置于高温、潮湿或强烈震动的场景中，为了调节温度起伏对压力表造成的冲击，可配置温度补偿器或温度感应探头，需实时跟踪并校准压力表的量值，按照 GB/T 17701–2008《压力表的检定和使用管理规程》里的规定，压力表工作阶段需杜绝温度突破其设计范畴，工作温度宜把控在 -10°C 至 60°C 范围内。

面对高振动场合，可借助添加减震设施或把压力表安置在牢固的基座上，弱化机械振动的干扰，防潮应对手段也不可掉以轻心，尤需聚焦于电子型压力计量表，需装设防潮罩也可挑选防水等级较高的器材，防止水汽诱发电路故障现象，依托这些行动，可明显降低环境要素对压力表测量精准度的干扰，由此强化检测的精准性。

（二）定期校准与检定

定期校准与检定是保障压力表精准度的核心途径，依照《压力表的检定周期规定》，各类压力表需在不同周期里实施检定工作，机械类压力计一般每十二个月开展一次校准工作，同时电子式压力表的校准周期可被放宽到2年，然而在高频率运用或者极端环境中，校准周期或许得减短。

开展校准的操作阶段，应借助高精度标准压力装置实施比对操作，为保障压力表的误差维持在规范区间内，就压力区间较宽的设施，一般借助标准压力源开展校准流程，举例说明采用可调节压发生器，需保证设备输出的压力跟标准压力源一致，检定相关的结果必须实施记录并归档留存，以便溯源并快速察觉潜藏的偏差^[6]。如图1所示。



图1 压力表定期校准与检定流程图

（三）使用高精度标准装置

在现场借助高精准压力标准器具开展比对及校准流程，属于增强压力表测量精度的可行途径，高精度压力标准装置一般涵盖

精密传感器、数字显示仪表及可调压力发生器构成，可实现对常规压力表精度与稳定性的双重超越，采用依托压电效应的压力标准器具，精度可实现0.1%的误差阈值，能贴合高精度工业生产的要求。

采用将现场应用的压力表同标准设备进行对比，可精准捕捉压力表的偏差，并落实校准类措施实施调整，聚焦一些需高精度把控的行业，譬如航空、核电相关的范畴，采用高精度标准装置完成校准工作，可切实提高现场检测的可靠性，一些精密检测场合对压力表误差要求是0.1% 以内^[7]。如表2所示。

表2 压力表误差控制方法及其标准要求

控制方法	描述	标准 / 数据
环境控制	通过安装温度补偿装置、减震装置等，避免环境因素影响压力表精度	工作温度：-10℃至60℃
校准与检定	定期对压力表进行校准与检定，确保其误差在允许范围内	校准周期：1年（机械式），2年（电子式）
标准装置	使用高精度标准装置进行比对与校准，提升测量可靠性	精度：0.1% 以内

四、案例分析与应用效果

（一）工业现场压力表误差分析

身处某石油化工企业的生产作业区域，压力表能实现对反应釜、管道及储罐压力的监控，长久应用期间察觉，压力表的读数偏差缓慢攀升，降低了生产环节里安全监控的精准度，凭借现场数据的梳理，实验证实环境温度、湿度及设备振动是致使压力表误差的核心诱因。温度震荡幅度偏大，尤其在盛夏炎热之际，液体压力表及弹簧压力表的误差跨度达到了2%-3% 的区间，厂区内的设备振动程度偏强，造成机械型压力表的读数波动，误差可达到的峰值是5%，按照 GB/T 17701-2008《压力表的检定和使用管理规程》，该企业未按周期做到压力表的校准，有部分设备逾越了规定的检定周期时长，误差引发的问题进一步升级。

聚焦这一问题，该公司实施多方面措施推进优化，为高温区域的压力表添加了温度补偿装置，缓解温度变动对测量结果的干扰，安装了阻尼构件，意图削弱设备晃动对压力表造成的干扰，延长了校准周期，且需严格按照标准准则推进定期检定事宜，务必保证压力表的精准度在允许误差范围内^[8]。

（二）误差控制措施的应用效果

身处某电力单位范畴，监测锅炉蒸汽系统压力时可采用压力表实施，该企业于实际操作阶段内，查明出于压力仪表精准度偏低，造成特定核心系统的压力值波动偏差明显，进而干扰了锅炉运转的安全水准，聚焦这一问题，该公司计划落实一系列覆盖全

面的误差把控举措，实施环境升级举措，防止温湿度变动对压力表工作的干扰；所有压力表都依照既定周期实施了检定，还与高精度压力标准装置实施了校准比对，专门聚焦于锅炉系统的高温高压区域，配置了专属的温度补偿装置。

推行此类举措后，压力表的精准度实现了明显增强，当测试实施阶段里，精度从过往的 ±3% 提升至 ±0.5% 以内，成功防范了因测量误差引发的安全隐患，维持了锅炉系统的平稳运转，该电力企业又把这一经验推广到其他部门，分阶段达成全厂压力表的精确管控^[9]。

（三）未来发展方向

伴随智能科技的不断迭代，今后的压力表的精确表现与可靠性将进一步提升，智能化压力表依托融合前沿传感技术、数据处理性能及无线通信模块，可对压力数据进行实时把控，且能自动跟中央监控系统进行数据互通工作，此类智能压力表可辨识环境变化，并实施自我调适，为维持精度的稳定水平。

远程监控系统的应用有望成为压力表未来发展的关键趋势，依托远程监控中心，操作专员可实时查看现场压力数据并实施远程调整及维护操作，绕开了传统现场人工检测的弊端，该技术的引入实施，打算进一步强化压力表的测量精度，降低人为操作差错率，给工业现场安全作业提供更稳固的保障防线^[10]。如表3所示。

表3 误差控制措施应用效果

控制措施	具体应用	精度提升
环境优化	温度补偿、减震装置、校准周期优化	±2% → ±0.5%
校准与检定	定期检定，使用高精度标准装置	±3% → ±0.5%
智能化技术	集成传感、数据处理与远程监控	提高精度与可靠性

五、结语

压力表作为工业现场核心的测量器具，其精准性直接作用到生产流程的安全及质量，借助对环境条件、设备固有偏差以及操作维护等范畴的分析，可察觉出关乎压力表精准度的关键诱因，且实施有效的误差防控办法，定期进行校准、采用高精度标准设备、以及环境提升等手段，可明显优化压力表的计量精度水平，维持测量所得结果的可靠性，伴着智能化科技及远程监控系统的升级，压力表的精准度及稳性会更上一层楼，促进工业现场检测的智能化与自动化，此类举措的落实，还降低了由测量误差引发的安全隐患，也给各产业的运营赋予了更加扎实的技术后盾。

参考文献

[1] 乔淑梅. 压力表检定与校验中误差来源及其对计量精度的影响研究 [J]. 中国质量监管, 2025(08):90-91.
[2] 卞敏. 基于不确定度分析的精密压力表计量精度研究 [J]. 质量与市场, 2025(06):60-62.
[3] 王赛丽. 压力表计量检定中的影响因素及改进措施 [J]. 品牌与标准化, 2025(02):211-213.
[4] 闫敏慧. 精密压力表检定技术与误差控制研究 [J]. 品牌与标准化, 2025(06):270-272.
[5] 赖文豪. 高精度数字压力表在桥梁健康监测中的误差分析与修正 [J]. 计量与测试技术, 2025, 51(11):58-62.
[6] 滕立敏. 压力表计量校准中误差来源分析与精准度提升策略 [J]. 中国品牌与防伪, 2025(13):90-92.
[7] 李静. 压力表计量的计量误差评价与校准 [J]. 大众标准化, 2025(18):196-198.
[8] 马瑞丽. 建筑工程中机械式压力表的检定误差与控制方法 [J]. 大众标准化, 2025(12):196-198.
[9] 邢雪楠. 压力表计量检定中的常见问题和控制措施分析 [J]. 科技资讯, 2025, 23(11):81-83.
[10] 高媛媛, 张清宇. 关于工业压力表计量检定要点的分析 [J]. 中国标准化, 2025(09):239-242.

公路改扩建工程中新旧路基差异沉降控制技术 与应用研究

陈潇逸

浙江交工宏途交通建设有限公司, 浙江 杭州 311305

DOI:10.61369/ERA.2026020038

摘 要 : 伴随交通需要的不断增多, 公路扩大改建工程变为提升道路网络通行水平的关键办法。新老路基不一样的沉降是这类工程里极为显著的技术麻烦之一, 容易造成路面出现裂缝、桥头产生跳车等损坏情况, 严重对公路的使用性能和持久性能产生影响。本文依照新老路基不一样沉降的产生原理, 从路基预先处理、新路基填充建造、新老路基连接加强以及工程之后沉降监测四个方面, 深入地探究不一样沉降控制的关键技术, 结合工程实际情况分析各个技术的应用重点和适合的场景, 给公路扩大改建工程中不一样沉降问题的有效处理提供技术方面的参考。

关 键 词 : 公路改扩建; 新旧路基; 差异沉降; 控制技术; 衔接强化

Research and Application of Differential Settlement Control Technology for New and Old Roadbeds in Highway Reconstruction and Expansion Projects

Chen Xiaoyi

Zhejiang Jiaogong Hongtu Transportation Construction Co., LTD, Hangzhou, Zhejiang 311305

Abstract : With the continuous increase in transportation demands, the expansion and reconstruction of highways have become a key approach to enhancing the traffic flow level of the road network. One of the most significant technical troubles in this type of project is the uneven settlement between the old and new roadbeds, which can easily lead to cracks on the road surface and vehicle bouncing at the bridgehead, seriously affecting the service performance and durability of the highway. Based on the generation principle of different settlement between new and old roadbeds, this paper deeply explores the key technologies for controlling different settlement from four aspects: pre-treatment of roadbeds, filling and construction of new roadbeds, connection and strengthening between new and old roadbeds, and settlement monitoring after the project. Combined with the actual situation of the project, it analyzes the application focus and suitable scenarios of each technology. Provide technical references for the effective handling of different settlement problems in highway expansion and reconstruction projects.

Keywords : highway reconstruction and expansion; new and old roadbeds; differential settlement control technology; strengthening of connection

引言

在交通基础建设升级改造的大环境下, 公路扩大改建工程的数量逐年上升。和新建公路有所不同, 扩大改建工程需要在已有的公路基础上进行扩展, 必然会面临新老路基共同存在的状况。因为旧路基经过长时间的运营, 已经完成了大部分的固结沉降, 而新路基在填充建造之后会经历固结、次固结等沉降过程, 二者在沉降数量、沉降速度上存在明显的不同, 进而产生不一样的沉降。这种不一样的沉降会让路面结构产生额外的应力, 当应力超过路面材料能够承受的极限时, 就会出现裂缝、下沉等损坏情况, 不仅增加了养护的成本, 还会对车辆行驶的安全和舒适程度产生影响。所以, 深入研究新老路基不一样沉降的控制技术, 明确其应用重点, 对于提升公路扩大改建工程的质量有着重要的现实意义。本文结合工程实际操作, 从不一样沉降产生的原理入手, 系统地探讨各种控制技术的核心重点和应用效果^[1]。

一、新旧路基差异沉降产生机理

（一）新老路基工程特性差别

旧路基在长时间车辆行驶荷载和自然环境的作用下，土壤颗粒重新进行排列，孔隙比例变小，密实程度明显提高，力学性能趋向稳定，大部分的固结沉降已经完成。而新路基填充建造的材料虽然经过了压实处理，但在自身重量和车辆行驶荷载的作用下，仍然会发生后续的固结沉降。除此之外，旧路基在运营过程中可能会出现老化、松散等现象，和新路基的压实程度、含水比例、抗剪强度等指标存在较大的差别，这种工程特性的先天差别是产生不一样沉降的基础。

（二）路基荷载条件改变

公路扩大改建过程中，新路基的填充建造会改变原来路基的受力状况。一方面，新路基自身的重量会对旧路基产生额外的应力，导致旧路基产生二次沉降；另一方面，扩大改建之后公路的设计荷载通常会有所提高，车辆行驶荷载的增大进一步加剧了新老路基的沉降差别。同时，新老路基连接的地方荷载传递不连续，容易形成应力集中的情况，进而加快不一样沉降的发展^[2]。

（三）地质同环境要素作用

工程区域的地质状况对差异沉降有重要作用。若路基穿跨软土、淤泥质土等不良地质层，旧路基于长期荷载作用之下已完成部分沉降，不过新路基填筑之后，软土地基会在新的荷载作用当中产生持续沉降，致使新旧路基沉降差异进一步扩充。除此之外，降水、温度改变等自然环境要素会对路基土体的含水率产生影响，造成土体膨胀或者收缩，加重新旧路基的变形差异，尤其处于季节性冻土区域，冻融循环会明显降低路基土体的稳定性，加大差异沉降风险^[3]。

二、新旧路基差异沉降管控关键工艺

（一）旧路基预处理工艺

旧路基预处理的核心目标是提升其承载能力与稳定性，缩小新旧路基的力学性能差异，给新路基填筑营造良好基础条件。常用的预处理工艺包含旧路基翻挖重填、注浆加固以及强夯加固等。旧路基翻挖重填工艺适用于旧路基出现松散、老化、压实度不够的路段。施工过程中，需把旧路基表层一定深度的土体翻挖出来，掺入适量改良材料（像石灰、水泥等），调整含水率至最佳压实状态之后重新回填压实。该工艺借助改善旧路基土体的物理力学性质，提升其密实度与抗剪强度，减少新旧路基的沉降差异。在应用过程中，需重点把控翻挖深度与范围，保证翻挖之后的路基和新路基衔接顺畅，同时严格把控回填压实质量，防止出现压实死角。

注浆加固工艺主要用于旧路基深层加固，尤其适用于旧路基存在空洞、裂隙或者承载力不足的状况。通过向旧路基土体中注入水泥浆、水泥砂浆等固化材料，让固化材料与土体颗粒胶结，形成整体结构，进而提高旧路基的密实度与承载能力，抑制二次沉降。注浆过程中，需合理挑选注浆材料、注浆压力以及注浆

量，依据旧路基的实际状况制定注浆方案，保证注浆效果均匀可靠，防止出现注浆不充分或者过度注浆致使路基土体扰动的问题。强夯加固工艺通过重锤自由下落产生的冲击力对旧路基进行夯实，提高土体密实度，减少孔隙比，增强路基稳定性。该工艺适用于旧路基土体松散、沉降潜力较大的路段，具备施工简便、加固效果显著等优点。在应用时，需依据旧路基的土质条件与压实状态，合理确定强夯能级、夯点间距以及夯击次数，防止强夯冲击力过大对旧路基结构造成破坏^[4]。

（二）新路基填筑钝化工艺

新路基填筑质量直接对其沉降特性产生影响，通过优化填筑材料、压实工艺以及填筑方式，可有效缩小新路基的沉降量，降低新旧路基差异沉降风险。填筑材料优化作为控制新路基沉降的根基所在。需优先对级配优良、强度较高、压缩性较小的填料加以选取，像碎石土、砾石土这类材料便在其列。针对不良填料，要开展改良处置工作，例如将石灰、水泥等固化剂掺入其中，以此对其物理力学性能进行改善。同时，需对填料的含水率实施严格管控，保证填料于最佳含水率状况下开展压实作业，进而使压实度得以提升。实践情况显示，运用改良填料的新路基，其固结沉降量能够得到显著降低，沉降稳定性呈现出明显的提升态势。

压实工艺优化成为提高新路基密实度的关键要点。应依据填料类型以及路基厚度，对合适的压实机械与压实参数作出选择。对于深层路基，可采用重型压实机械，诸如振动压路机、冲击压路机等设备，以此增大压实能量，确保深层土体实现充分压实；对于表层路基，需对压实力度进行控制，防止因过度压实而造成土体结构出现破坏情况。同时，应采用分层填筑、分层压实的模式，每层填筑厚度不宜过大，通常控制在30cm以内，压实工作完成后需开展压实度检测，在检测合格之后方可进行下一层的填筑操作。除此之外，在新旧路基衔接之处，需采用小型压实机械开展补压工作，确保衔接部位达到压实要求，避免出现压实薄弱区域。

填筑方式优化主要围绕新旧路基衔接部位展开。采用台阶式填筑方式，把旧路基边坡开挖成台阶形态，台阶宽度不宜小于1m，高度依据填筑厚度来确定，一般处于0.5—1m范围。台阶式填筑能够扩大新旧路基的接触面积，增强两者之间的摩擦力与咬合力，推动荷载实现均匀传递，减少衔接部位的沉降差异。在台阶开挖过程中，需保证台阶面达到平整、密实标准，避免出现松土、浮土等现象，填筑时应从台阶底部起始逐层向上进行压实，确保新旧路基实现紧密结合。

（三）新旧路基衔接强化技术

新旧路基衔接部位属于差异沉降的高发区域，通过采取具有针对性的强化举措，能够有效提升衔接部位的整体性与稳定性，抑制差异沉降的发展进程。常用的衔接强化技术涵盖土工合成材料加筋、搭接碾压以及注浆补强等方式。土工合成材料加筋技术是通过在新旧路基衔接部位铺设土工格栅、土工布等土工合成材料，借助其高强度、高韧性的特性，增强新旧路基之间的拉力与约束力，抑制土体的侧向变形和沉降情况。土工格栅需铺设在新旧路基衔接部位的表层和深层，铺设过程中需保证格栅平整、拉紧，与路基土体实现紧密贴合，格栅之间的搭接长度不宜小于

20cm,并且要用锚钉进行固定,防止格栅出现滑动现象。该技术能够有效分散衔接部位的应力,减少沉降差异,提高路基的整体稳定性,尤其适用于新旧路基沉降差异较大的路段。搭接碾压技术于新旧路基衔接之处,将新路基填料同旧路基基层土体实施搭接压实操作,使两者的结合面积得以扩大,让衔接部位的密实程度和整体性能得到提升。施工阶段,需把旧路基表层特定深度的土体与新路基填料开展混合均匀作业之后再行压实工序,搭接宽度以不小于1.5米为宜。借助搭接碾压方式,能够对新旧路基之间的界面效应进行消除,对两者之间的应力传递过程予以推动,使衔接部位的沉降差异情况得以减少。该技术在施工方面呈现简便特性、在成本方面处于较低水平,可适用于多数公路改扩建工程项目。

（四）工后沉降监测与动态调控技术

工后沉降监测作为掌握新旧路基沉降动态情况、及时察觉沉降异常问题的重要手段,通过对监测数据进行分析与反馈操作,能够对控制措施实施动态调控行为,以保证差异沉降控制效果达到预期。监测指标主要涵盖沉降量、沉降速率以及差异沉降量内容。监测点需要布置在新旧路基衔接部位、路基中心、路肩等关键位置区域,其中衔接部位需要进行加密布设处理。监测频率应按照路基沉降阶段予以确定,在路基填筑期间以及通车初期阶段,由于沉降速率处于较大状态,监测频率需保持较高水平,一般每周开展1—2次监测工作;当沉降速率趋向稳定状态后,可对监测频率进行适当降低调整,每月进行1次监测操作。监测数据需要及时开展整理分析工作,绘制出沉降曲线图形,对沉降发展趋势作出判断。

动态调控技术以监测数据为基础,对差异沉降实施实时控制举措。若监测过程中发现新旧路基差异沉降量超出预警数值范围,应及时采取调控措施手段。对于沉降量较大的新路基部分,可通过放缓填筑速度进程、增加压实遍数次数等方式方法,推动土体固结过程发展;对于旧路基二次沉降量较大的路段区域,可采用注浆加固等措施手段,提升其承载能力水平;对于衔接部位沉降差异较大的区域范围,可增设土工合成材料或者进行补压处理工作。通过动态调控方式,能够确保新旧路基差异沉降始终被控制在允许范围之内,避免路面病害问题的产生。

三、工程应用案例分析

以A二级公路改扩建工程项目为例进行说明,该工程项目全长达到12公里,采用单侧加宽施工方式,加宽宽度为8米,设计行车速度为80公里每小时。工程区域地质条件呈现复杂态势,部

分路段穿越软土地区范围,旧路基已经运营15年时间,存在局部松散现象、压实度不足等问题状况。为实现对新旧路基差异沉降的控制目标,结合工程实际情况,采用了“旧路基预处理操作+新路基优化填筑工艺+土工合成材料加筋技术+工后沉降监测手段”的综合控制技术体系。

当处于旧路基预处理环节之时,针对呈现松散状态的路段运用翻挖之后重新填筑的工艺手段,翻挖所达到的深度为0.8米之值,将占比5%的石灰掺和进去实施改良操作,按照分层的方式开展压实作业,把压实度限定在不低于96%的范围以内;针对深层位置承载力无法达标的路段,选用注浆来进行加固的工艺技术,注浆孔之间的间隔为2米距离,孔的深度是5米尺度,将水泥浆注入其中,把注浆压力掌控在0.5至1.0兆帕的区间当中。新路基进行填筑之际采用碎石土作为填料物质,掺入占比3%的水泥开展改良工作,运用分层填筑同时分层压实的模式,每一层填筑的厚度为25厘米规格,借助振动压路机实施压实流程,将压实度控制在不低于96%的程度之上;新旧路基相互衔接的部位采取台阶式的填筑办法,台阶的宽度为1.2米数值,高度是0.8米尺寸,铺设两层土工格栅用以进行加筋处理,格栅相互搭接的长度为25厘米长度,使用锚钉加以固定操作。工程完工之后设置沉降情况的监测点位共计32个数量,其中处于新旧路基衔接部位的有16个数目,监测的频率在通车初始时期为每周2次频次,后期则变为每月1次频率^[5]。

四、结论

新旧路基在工程性质方面存在的差异情况、荷载条件发生的变化情形以及地质环境等相关因素,是造成公路改扩建工程过程中产生差异沉降问题的主要原因要素。借助旧路基预处理工艺技术,可以提升旧路基的承载能力水平以及稳定性程度,缩小新旧路基在力学性能方面存在的差异状况;新路基填筑优化工艺技术能够降低新路基的沉降量数值,提高沉降的稳定性状态;新旧路基衔接强化工艺技术能够增强两者之间的整体性效果,促进荷载实现均匀的传递过程;工程完工后的沉降监测以及动态调控工艺技术,可以实时地掌握沉降的动态情况,及时地对控制措施进行调整操作。工程实践结果显示,采用综合控制工艺技术能够有效地将新旧路基之间的差异沉降控制在允许的范围之内,避免路面出现病害问题,保障公路的使用性能状况。随着公路改扩建工程不断向地质条件复杂的区域拓展延伸,新旧路基差异沉降控制工艺技术面临着更高的要求标准。

参考文献

- [1] 李泉泉.高边坡开挖及防护技术在高速公路改扩建工程中的应用研究[J].时代汽车,2025,(23):184-186.
- [2] 丁红青.既有公路改扩建工程中泡沫轻质土应用探讨[J].交通科技与管理,2025,6(21):70-72.
- [3] 岑燕红.公路改扩建工程中的新旧路基沉降控制[J].交通世界,2025,(28):94-96.
- [4] 陈伟豪,张鹏,陈楚鹏.高速公路改扩建工程中重载车道路面结构拼接的力学特性[J].广东公路交通,2025,51(04):1-8+17.
- [5] 闫雪婷.改进型PDCA循环造价控制方法在公路改扩建工程中的应用[J].交通世界,2025,(24):170-172.

工程材料管理对工程成本控制的影响研究

陈文文

中铁上海工程局集团市政环保工程有限公司，上海 200000

DOI:10.61369/ERA.2026020042

摘 要： 工程材料费用于工程总成本里的占比往往在 50%–70%，其管理质量和项目经济效益直接相关，伴随建设规模的扩大以及周期的压缩，对材料管理精细化与信息化的要求持续提高，梳理材料计划、采购、储存、消耗以及数字化管理等环节，能发现材料浪费、库存冗余和供应不稳定是影响成本控制的主要因素，加强全过程管理、提高数据透明度、完善制度流程和技术支撑，可减少损耗，提升资源利用效率，进而增强工程成本管控能力。在实际工程中，材料管理的各个环节相互关联，一个环节的问题可能引发连锁反应，影响整体成本控制效果，只有全面优化各环节，才能实现成本的有效管控。

关 键 词： 材料管理；成本控制；供应链优化；数字化管理；库存控制

Study on the Influence of Engineering Material Management on Engineering Cost Control

Chen Wenwen

China Railway Shanghai Engineering Bureau Group Municipal Environmental Protection Engineering Co., Ltd.,
Shanghai 200000

Abstract： The proportion of engineering materials used in the total project cost is often 50%–70%, and its management quality is directly related to the economic benefits of the project. With the expansion of the construction scale and the compression of the cycle, the requirements for the refinement and informatization of materials management continue to increase. By combing the links of material planning, procurement, storage, consumption and digital management, we can find that material waste, inventory redundancy and unstable supply are the main factors affecting cost control, and strengthen the whole process management and improve data transparency. In practical engineering, all links of material management are interrelated, and the problem of one link may trigger a chain reaction and affect the overall cost control effect. Only by comprehensively optimizing all links can we achieve effective cost control.

Keywords： material management; cost control; supply chain optimization; digital management; stock control

引言

工程项目成本控制一直是建设管理的重要目标，材料管理在其中处于核心位置，材料费用占比高、流转环节繁杂、管理链条长，其管理水平直接决定成本能否得到有效控制；现实里普遍存在计划有偏差、采购决策欠佳、库存结构不合理以及数字化程度低等问题，使得浪费、积压和价格风险日益突出，深入探究材料管理在计划、采购、储存和使用等环节的影响机制，能为提高资源利用效率和加强成本控制提供可行途径，在实际操作中，这些环节的问题并非孤立存在，而是相互交织，需要综合考虑和解决，以实现成本控制的最佳效果。

一、材料计划管理与工程成本控制的关系

（一）材料需求预测的准确性对成本的基础性影响

材料需求预测作为材料管理体系的起始环节，其精准度直接影响工程成本能否处于合理范围。需求预测偏差一般呈现两种情况：数量估算过多会造成过量采购，致使资金占用增多、库存积压加大，还可能产生因材料长期存放损耗带来的隐性成本，估算不足则会引发材料短缺，需临时补购，面临溢价采购风险，甚至

导致施工进度中断，造成停工损失。为减小预测偏差，编制需求计划要基于精准的工程量计算，依据施工组织设计动态调整材料品种与数量，让计划契合实际需求，需求预测还需综合考虑施工进度、工序衔接和材料供应周期^[1]，借助历史数据比对和现场反馈不断校准，构建科学、可执行的材料计划体系，从根源上降低材料成本的不可控因素。

（二）材料计划与施工进度协调的成本效益分析

材料计划与施工进度的匹配状况影响着材料供应链的运行效

能,施工进度滞后,提前供应的材料长时间堆放会使占地费、保管费和损耗率增加,施工进度提前而材料供应滞后,需采取紧急采购或加急运输等措施,导致采购价格和物流费用上涨,甚至造成工程停滞、间接成本增加,所以,材料计划要与施工进度动态协调,依据工程节点、工序安排和劳动力配置等信息实时调整材料需求量和到货时间,构建跨部门协同的计划管理机制,让施工单位、物设部门和供应商共享进度信息,减少因沟通不畅造成的重复运输和材料闲置,通过科学的进度-材料匹配机制,既能降低材料管理中的无效成本,又能提高工程整体组织效率^[2]。

（三）材料计划信息化对成本控制的促进作用

材料计划能否与施工进度良好匹配,直接关乎材料供应链的运行效能。若施工进度滞后,提前供应的材料长时间堆存,会致使占地费、保管费攀升,损耗率也会增大,要是施工进度提前而材料供应却跟不上,就不得不采取紧急采购、加急运输等办法,这会使采购价格上涨、物流费用增加,严重时还会造成工程停滞,让间接成本大幅提高。鉴于此,材料计划需与施工进度实现动态协调,要依据工程节点、工序安排以及劳动力配置等情况,实时对材料需求量和到货时间作出调整,构建起跨部门协同的计划管理机制,使施工单位、项目物资管理部门以及供应商能共享进度信息,以此减少因沟通不顺畅引发的重复运输和材料闲置现象,凭借科学的施工进度与材料供应协同机制,降低材料管理中的无效成本,提升工程整体组织效率。

二、材料采购管理对成本控制的关键影响

（一）材料采购方式选择对成本的结构性影响

科学抉择材料采购方式对工程成本的结构与构成影响直接,是成本控制里极为关键的一环。工程中常用的采购模式有物资集中采购、框架协议采购以及竞争性谈判采购,它们各有独特的成本特性与适用情形,集中采购靠规模化下单获取议价优势,能降低单价成本,不过对供应链协调能力要求颇高,框架协议采购注重价格稳定和供应保障,利于应对材料价格波动,只是灵活性欠佳,竞争性采购借助公开比价达成成本透明与市场化选择,然而可能因周期长或供应商质量参差不齐使管理难度增大,不同采购方式在价格波动敏感度、供应稳定性和质量风险上表现不一,工程项目需结合自身规模大小、建设周期长短、材料品类情况以及供应市场状况等进行综合考量,进而挑选出最为适配的采购模式,以此达成成本和风险的平衡,实现工程效益的最大化^[3]。

（二）采购价格与供应链风险管理机制分析

材料采购价格受诸多因素左右,市场供需关系自是重要影响因素,宏观经济走势、季节性波动、区域市场差异等也对其形成制约,价格风险因而成为工程成本管理里不确定性颇高的部分,若没有风险预警机制,项目极易遭遇采购成本骤增、预算超支等状况,有必要构建基于市场行情监测的风险识别体系,定时评估价格走向,制定提前锁价、分批采购、采用长周期价格协议等采购策略,以此减轻价格波动的冲击。

供应链稳定性对材料成本有着不容忽视的间接作用,稳定的

供应链能保障材料供应持续不断,减少供应中断引发的停工成本和应急采购额外费用,实际工程中多层供应体系较为普遍,虽可拓展供应渠道,却也增加管理难度,易造成价格不透明、交付周期不稳定、质量难以完全追踪等问题,进而引发潜在成本,完善供应链管理机制、强化供应商资质审核与绩效评价、建立长期合作关系,有利于缩短供应链路径、降低供应不稳定带来的综合成本。

（三）材料验收与质量控制对成本的间接影响

材料验收与质量控制虽不直接产生采购费用,却能通过减少返工、降低浪费、提升材料利用率对工程成本产生间接影响,严格的入库检验可防止不合格材料流入施工环节,避免质量问题带来的隐性成本,标准化验收流程可减少人为偏差,提升检验效率与准确性,质量数据追踪溯源能增强采购透明度,为供应商管理和材料选型提供依据,让采购策略更科学,形成长期成本优势^[4]。图1呈现了材料采购方式、供应链风险管理及材料验收质量控制三个环节对工程材料成本的逐层影响,展示各要素关联路径,凸显采购决策与管理机制在降低综合成本方面的关键意义,体现其在整个工程材料成本管控中的核心地位,提醒管理者重视各环节相互作用以实现成本优化。

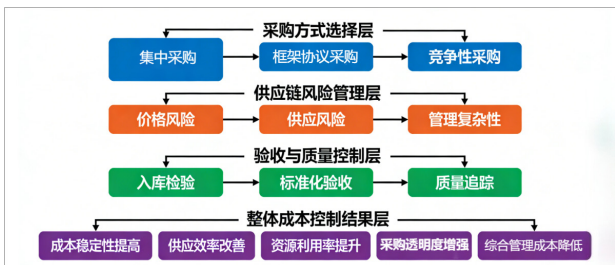


图1 材料采购管理关键环节对工程成本的影响路径图

三、材料储存与领用管理的成本控制机制

（一）材料库存水平对工程成本的双重影响

材料库存水平直接左右着工程成本结构,其对成本的作用体现出显著的双重效应,库存要是过高,资金就会被长期占用,有统计显示,一般建筑项目里,材料库存占用的资金能占项目流动资金的25%-40%,一旦周转率低,存储成本、占地成本以及保险费用都会跟着增加,而且材料长期存放还会出现变质、腐蚀等隐性损耗,进一步加重成本负担,反过来,库存水平过低则容易引发停工待料情况,致使施工机械和劳动力闲置,间接损失往往比材料本身价值高3-5倍,还可能迫使项目进行高价紧急采购,进而形成价格风险,应用科学库存模型,像经济订货批量(EOQ)、安全库存计算以及动态库存监测等方法^[5]。

（二）材料储存条件与保管方式对损耗率的影响

材料储存条件和保管方式对材料损耗率影响重大,在成本控制方面有着不可忽视的意义,行业调查表明,不当储存造成的材料自然损耗率通常在2%-6%,在湿度大、温差大的环境中甚至能超过10%,这不仅会使材料性能降低,还可能导致材料直接报废,让项目承受本可避免的成本损失,为降低这类风险,要依据材料属性构建分类储存机制,比如把钢材放在干燥通风的地方、

防止木材受潮变形、对易挥发或腐蚀性材料进行专库管理，同时通过温湿度控制、遮盖、防火和防腐等措施改善储存环境质量，实行保管责任制，能明确责任范围，减少因管理不善导致的丢失、混放、错领等额外损耗。

（三）材料领用制度与过程控制对成本的约束作用

材料领用制度是保障材料按需使用、削减浪费的关键管理部分，其执行状况直接影响成本控制效果，要是没有严格的领用标准和审批流程，材料就容易出现超量领用、重复领用之类的状况，使得单位工程材料消耗量和定额产生偏差，造成成本失控局面，从项目管理统计来看，严格执行领用制度能让材料浪费率下降 15% - 30%，所以有必要构建完整的领用台账，对领用数量、用途、责任人以及时间予以记录，达成全过程可追溯，结合数字化工具，可借助材料消耗数据分析施工工序的实际需求和消耗趋势，察觉异常领用行为并及时采取纠偏举措，而且对历史数据进行分析，能够形成更精准的材料消耗预测模型，进一步推动精益化材料管理^[6]，唯有把材料领用纳入制度化、数据化以及监督化的管理框架之中，方可有效增强成本约束力，保证材料消耗合理且受控。如表 1 所示。

表 1 材料储存与领用管理环节改进对损耗率的影响分析表

管理环节	常见问题	损耗率（%）	优化管理条件下损耗率（%）
储存环境管理	潮湿、曝晒、混放	5.2	1
库存结构管理	库存过高导致变质	3.6	0.6
领用流程控制	超量领用、无审批	4.1	0.5

表 1 呈现出，改善储存条件、优化库存结构以及严格把控领用流程都能大幅降低材料损耗率，整体降幅能达到 50% 以上，借助制度化和数字化手段加强管理，能够有效提高材料利用效率并降低成本。

四、材料管理数字化与智能化对成本控制的提升路径

（一）信息化材料管理系统在成本控制中的作用机制

信息化材料管理系统达成材料计划、采购、库存与领用全流程数据集成，为成本控制赋予更高协同效率与管理透明度，统一管理材料需求计划、采购进度与库存动态，让各环节实时联动，

降低因信息滞后造成的材料滞料与库存积压风险，借助数字化平台实时监控材料入库、出库及消耗信息，及时识别异常领用或库存异常波动，防范浪费与损耗，系统内数据记录可追溯，让材料成本构成清晰、审计与管理合规性增强，为材料管理精细化和透明化筑牢根基^[7]。

（二）物联网与智能监测技术对材料管理效率的提升

物联网与智能监测技术助力提升材料管理效率，物联网技术融入使材料管理自动化与精确度升级，采用 RFID 标签、二维码追踪、智能仓储系统及实时温湿监测设备，自动识别和动态更新材料位置、数量与状态，规避传统人工盘点误差，提升存储安全性与材料可用性。智能仓储系统自动完成分拣、搬运与检查，减少人工参与带来的操作风险和管理成本，加快材料流转、缩短供应周期，有效降低材料周转成本、提高库房利用效率，保障材料供应与施工进度契合，为整体成本优化提供坚实技术支撑。

（三）大数据分析在材料成本预测与优化中的应用

大数据技术分析材料采购记录、消耗曲线、市场价格变化以及施工进度等多维度数据，为成本预测与优化提供科学依据。建立材料消耗模型可识别规律性需求变化，提高需求预测准确性，让采购批量与库存水平更合理。基于市场价格数据趋势分析能提前识别价格上涨风险，为锁价采购或分期采购决策提供支持^[8]，大数据分析还能综合评价供应商表现、库存周转率和材料使用效率，为工程全生命周期成本优化提供依据，促使材料管理从经验型转向数据驱动型，增强成本控制能力。

五、结语

工程材料管理贯穿项目建设全程，其计划、采购、储存、领用及数字化管理水平左右着成本控制能力。提高需求预测准确性、优化采购模式、强化储存与领用制度，运用信息化、物联网和大数据技术可降低材料浪费、库存成本与供应风险，实现成本结构优化和资源利用效率提升，系统性、精细化与智能化管理会是未来工程材料管理重要发展方向，持续支撑工程项目经济效益与管理质量。

参考文献

[1] 李慧燕. 影响建筑工程成本的因素和成本控制管理方法 [J]. 中国集体经济, 2019(21):59-60.
[2] 任巨星. 工程项目管理对工程造价的影响分析及成本控制策略分析 [J]. 商业观察, 2022(28):81-84.
[3] 冯传厚. 影响建筑工程成本的因素和成本控制管理方法 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2023(20):45-47.DOI:10.19569/j.cnki.cn119313/tu.202320015.
[4] 唐伟, 姚鹏, 周增林. 试论石油化工工程项目材料采购管理中的成本控制 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2023, 43(05):58-60.
[5] 吴琼. 浅谈设计变更和工程签证对建设工程成本管理的影响及控制措施 [J]. 居舍, 2023(29):154-157.
[6] 刘红春. 工程技术管理对成本控制的影响分析 [J]. 中国住宅设施, 2025(04):84-86.
[7] 刘华. 施工材料管理对工程成本控制的影响研究 [A]. 广西网络安全和信息化联合会. 2025年第七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 [C]. 广西网络安全和信息化联合会: 广西网络安全和信息化联合会, 2025:2.DOI:10.26914/c.cnkihy.2025.056690.
[8] 高凡, 秦绪红. 绿色装修背景下纸质材料供应链管理对工程成本控制的影响 [J]. 华东纸业, 2025, 55(12):63-65.

大跨度弧形管桁架液压同步提升关键技术及工程应用

白尧尧, 许毅, 张桂军, 李俊杰

中国一冶集团有限公司, 湖北 武汉 430081

DOI:10.61369/ERA.2026020043

摘 要 : 针对大跨度弧形管桁架结构跨度大、重量重、安装精度要求高的技术难题, 以中原高铁港数字展贸城展厅项目为工程背景, 研发了“分区分块原位拼装 – 液压同步提升 – 精准对位卸载”一体化施工技术。通过深化设计优化、拼装胎架模块化设计、液压提升系统参数优化、提升过程同步控制等关键技术创新, 解决了大跨度桁架运输吊装困难、焊接变形控制、提升同步性保障等核心问题。工程实践表明, 该技术实现了单榀重量 198.5t、跨度 99.5m 桁架的安全高效安装, 提升同步误差控制在 $\pm 5\text{mm}$ 以内, 焊接一次合格率达 99.2%, 桁架跨中最大挠度满足设计要求 ($\leq 5\text{mm}$), 大幅缩短了施工周期, 降低了施工安全风险。该研究成果为同类大跨度钢结构工程施工提供了重要的技术参考与工程借鉴。

关 键 词 : 大跨度钢结构; 弧形管桁架; 液压同步提升; 拼装胎架; 同步控制; 变形控制

Key Technologies and Engineering Applications for Hydraulic Synchronous Lifting of Large-Span Curved Pipe Trusses

Bai Yaoyao, Xu Yi, Zhang Guijun, Li Junjie

China First Metallurgical Group Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430081

Abstract : Aiming at the technical problems of large span, heavy weight and high installation accuracy of long-span arc tube truss structure, taking the exhibition hall project of Zhongyuan High-speed Railway Port Digital Exhibition and Trade City as the engineering background, the integrated construction technology of "in-situ assembly in blocks-hydraulic synchronous lifting-accurate contraposition unloading" was developed. Through deepening design optimization, modular design of assembling jig, parameter optimization of hydraulic lifting system, synchronous control of lifting process and other key technical innovations, the core problems such as difficulty in transportation and lifting of long-span truss, control of welding deformation and guarantee of lifting synchronization have been solved. The engineering practice shows that the technology realizes the safe and efficient installation of a truss with a single weight of 198.5t and a span of 99.5m, the synchronous error of hoisting is controlled within 5 mm, the first-pass rate of welding reaches 99.2%, and the maximum deflection of the truss span meets the design requirements ($\leq 5\text{mm}$), which greatly shortens the construction period and reduces the construction safety risk. The research results provide important technical reference and engineering reference for similar long-span steel structure engineering construction.

Keywords : long-span steel structure; arc tube truss; hydraulic synchronous lifting; assembling jig frame; synchronous control; deformation control

引言

随着现代建筑工程向大跨度、大空间、复杂化方向发展, 弧形管桁架结构因其受力合理、跨度大、造型美观等优势, 在会展中心、体育场馆、交通枢纽等大型公共建筑中得到广泛应用^[1-3]。然而, 大跨度弧形管桁架通常具有体积大、重量重、跨度大等特点, 传统吊装方法存在施工难度大、安全风险高、安装精度难以控制等问题^[4-5]。尤其是当桁架跨度超过 90m、单榀重量接近 200t 时, 常规起重机吊装能力不足, 且高空拼装工作量大, 施工效率低下, 安全风险突出^[6-7]。液压同步提升技术作为一种先进的大跨度钢结构安装技术, 具有提升重量大、同步性好、安全可靠、施工效率高等优点, 已逐渐应用于大跨度钢结构安装工程^[8-9]。但针对弧形管桁架的曲面特性、复杂节点构造以及超危大工程的安全管控要求, 液压同步提升技术仍面临提升吊点优化、提升过程姿态控制、高空精准对接等技术挑战^[10]。

中原高铁港数字展贸城展厅项目包含 16 个钢结构展厅, 采用五弦弧形管桁架结构形式, 单榀桁架跨度 99.5m, 重量 198.5t, 属于超过一定规模的危险性较大分部分项工程。本文基于该项目施工实践, 系统研究大跨度弧形管桁架液压同步提升关键技术, 包括深化设计优化、拼装胎架设计、液压提升系统配置、提升过程同步控制、焊接质量控制等, 形成一套完整的施工技术体系, 为同类工程提供技术参考。

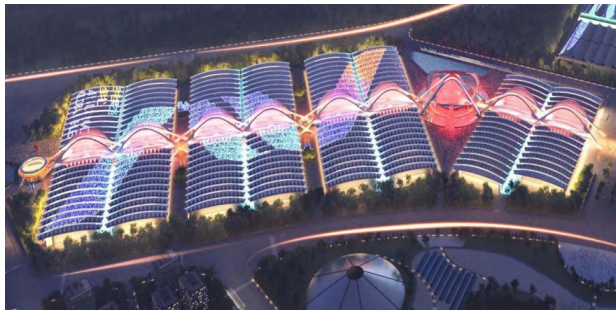


图1 项目效果图

一、工程概况与技术难点

(一) 工程基本情况

中原高铁港数字展览城项目位于河南省郑州市航空港区迎宾大道与会展五路交叉口东南部，总建筑面积488866 m²。项目包含16个钢结构展厅，其中标准展厅13个（198×108m）、中型展厅1个（163×104.5m）、小型展厅2个（109×104.5m），共计164榀屋面桁架，总重量32554t。展厅钢结构采用五弦弧形管桁架+铰接钢管柱+背拉索结构形式，主桁架高度24.0m，跨度99.5m，间距18.0m。桁架材质主要为 Q355B、Q460C 高强度钢，背拉杆采用 Q650 材质，桁架主弦杆直径最大508mm，壁厚最大60mm，项目钢结构施工总工期123个工作日。

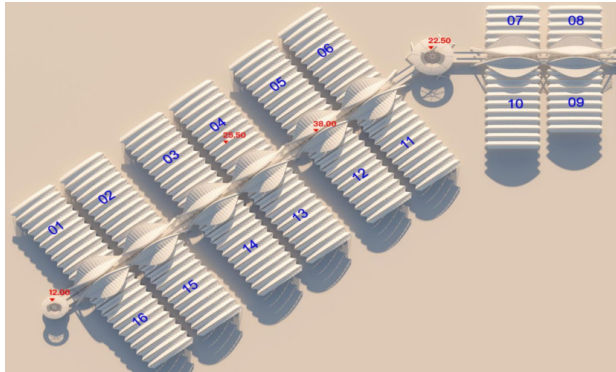


图2 展厅分布效果图

(二) 核心技术难点

1. 结构规模庞大，安装难度高：图3、4（a）（b）所示，单榀桁架长104.5m，宽17m，高4.2~5.7m，重量198.5t，跨度99.5m，远超常规钢结构安装范畴，运输与吊装难度极大，传统吊装设备难以满足施工要求。

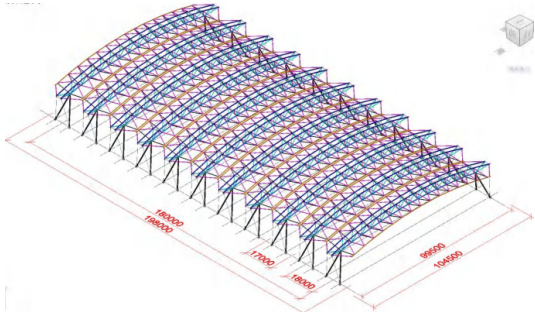


图3 单个标准展厅钢桁架主结构模型图

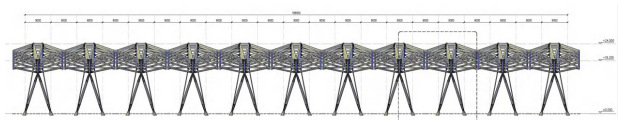


图4（a）单个标准展厅横向立面图

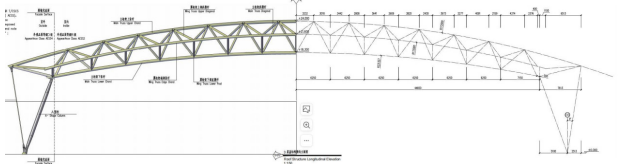
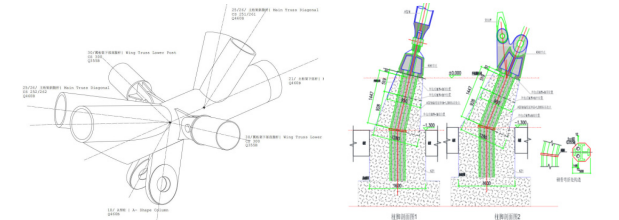
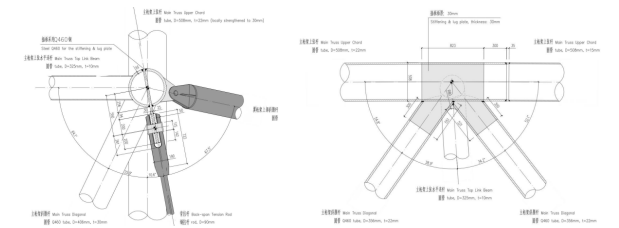


图4（b）单个标准展厅纵向立面图

2. 节点构造复杂，焊接质量要求高：桁架节点多为相贯线节点与铸钢节点，焊接工作量大，最大钢管厚度60mm，Q460C 高强度钢焊接及多头节点熔透焊技术难度高，需严格控制焊接变形与残余应力，确保焊接质量。



(a) A型柱上部连接节点 (b) A型柱、背拉杆柱脚（铸钢件）连接节点



(c) 背拉杆上部连接节点 (d) 主桁架上弦杆与斜腹杆连接节点

图5 相关节点示例

3. 提升同步性要求高：桁架采用分区分块提升方案，标准展厅分为4+4+3榀分三次提升，提升过程中需保证各吊点同步升降，避免桁架扭曲变形，同步误差需控制在5mm 以内。

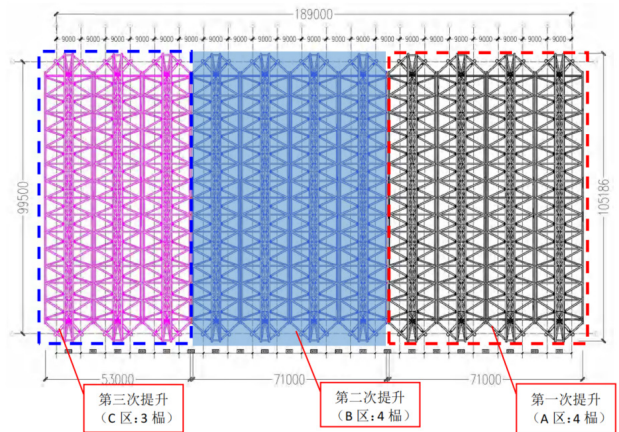


图6 同步提升分区示意

4. 安装精度要求高：桁架与桁架之间采用法兰螺栓连接，伸缩缝采用关节轴承连接，需满足机加工精度要求，桁架安装垂直

度、跨度、拱高等参数偏差需严格控制在设计允许范围内。

5. 施工环境复杂：施工周期涵盖夏季高温与雨季，需采取针对性技术措施应对温度变形与雨水影响，同时多专业交叉作业频繁，安全管控难度大。

二、关键技术创新

（一）深化设计优化技术

1. 基于 BIM 的三维建模与节点优化采用 BIM 技术建立全专业协同三维模型，对桁架、钢管柱、背拉杆等构件进行参数化建模，实现设计、加工、安装全过程一体化管控^[1]。针对桁架与 A 型柱连接节点、背拉杆连接节点等关键部位，采用铸钢件节点形式，提高节点承载能力与连接精度。将桁架下弦杆插板延长作为提升耳板，实现提升吊点与永久结构的一体化设计，减少临时措施对结构的影响，提升耳板厚度 30mm，经计算验证满足提升受力要求。



图7 BIM 建模相关应用示例

2. 构件分段优化设计结合运输限制与施工可行性，对桁架主弦杆进行分段设计，上弦杆与下弦杆各分为六段加工，腹杆散件运输，现场拼装。分段点经设计确认满足受力要求，分段位置避开节点核心区域，主弦杆分段长度控制在 11~20m 之间，便于运输与吊装。分段接口采用法兰螺栓临时固定 + 焊接永久连接的形式，确保连接质量与安装精度。

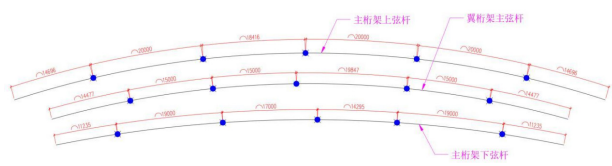
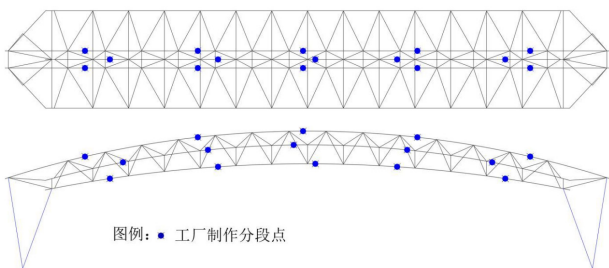


图8 桁架分段示意

3. 施工仿真分析采用 Midas Gen 有限元分析软件对桁架拼装、提升、卸载等关键工况进行受力分析与变形预测^[2]。建立桁架整体有限元模型，模拟不同提升阶段桁架的受力状态与变形情况，优化吊点布置与提升顺序。分析结果表明，吊点布置在桁架下弦轴力变号节点处时，桁架受力最接近设计状态，最大应力为设计限值的 65%，最大挠度 4.8mm，满足设计要求。

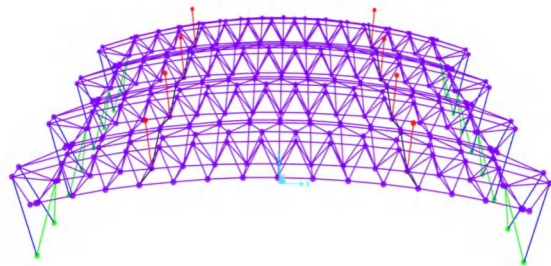


图9 Midas Gen 有限元模型

（二）拼装胎架模块化设计与施工技术

1. 胎架设计原则与参数：拼装胎架作为桁架地面拼装的关键临时设施，需满足承载力、刚度与稳定性要求，同时具备快速拆装、周转使用的特点。胎架设计遵循“承载力充足、刚度达标、稳定性可靠、经济性合理”的原则，具体设计参数如下：

（1）承载力：胎架最大受力节点荷载达 187.6kN，结构安全系数不小于 1.5；

（2）刚度：胎架立柱最大挠度控制在 $L/1000$ 以内（ L 为立柱高度）；

（3）稳定性：抗倾覆安全系数不小于 2.0；

（4）材质：主立柱采用 $HW350 \times 350 \times 12 \times 19$ 型钢（主桁架区域）与 $HW200 \times 200 \times 8 \times 12$ 型钢（翼桁架区域），支撑与斜撑采用 $HW100 \times 100 \times 6 \times 8$ 、 $HW125 \times 125 \times 6.5 \times 9$ 等型钢；

（5）基础：胎架底部铺设 $6.0 \times 1.8 \times 0.2$ m 路基箱，地基承载力经处理后不小于 130kPa。



图10 施工现场胎架拼装

2. 胎架模块化设计采用模块化设计理念：将胎架分为标准单

元模块，每个模块由立柱、横梁、斜撑、路基箱组成，模块之间采用螺栓连接，实现快速拆装与周转使用^[3]。16个展厅共配置12套胎架，采用“拼装－提升－拆除－周转”的流水作业模式，相邻展厅胎架交替使用，提高使用效率，降低施工成本。胎架单元在桁架下方布置，根据桁架拱度变化调整胎架高度，最小拼装高度5.86m，最大拼装高度11.26m。

3. 胎架施工与精度控制：胎架地基采用压路机压实，对承载力不足区域采用砖渣换填处理，分层压实厚度不小于300mm，经轻型动力触探检测合格后方可铺设路基箱。胎架搭设过程中采用全站仪与水准仪进行实时监测，胎架上口水平度控制在 $\pm 1\text{mm}$ 以内，立柱垂直度控制在 $h/1000$ 以内（ h 为立柱高度）。在胎架搭设前，根据桁架设计尺寸布设地样控制线，采用激光扫描仪进行复核，确保拼装基准精度。

（三）液压同步提升系统配置与控制技术

1. 提升设备选型与配置：

根据桁架重量与提升要求，选用YS-SJ-180型液压提升器，单台额定提升能力180t，配套YS-PP-15型液压泵源系统与YS-CS-01型同步控制系统^[4]。钢绞线选用 $1\times 7-17.8-1860$ 规格，破断拉力不小于355kN，安全系数3.04-3.13，满足提升安全要求。每个提升区域设置8个吊点（4榀桁架）或6个吊点（3榀桁架），吊点布置在桁架下弦反弯点处，确保提升过程中桁架受力接近设计状态。



图11（a）液压提升器

图11（b）液压泵源系统

2. 提升设备配置表如下：

表1 提升设备配置表					
序号	设备名称	型号规格	数量	额定参数	用途
1	液压提升器	YS-SJ-180	16 台	额定提升力 180t	桁架提升
2	液压泵源系统	YS-PP-15	4 套	工作压力 31.5MPa	提供液压动力
3	同步控制系统	YS-CS-01	1 套	同步误差 $\pm 5\text{mm}$	提升同步控制
4	钢绞线	$1\times 7-17.8-1860$	144 根	破断拉力 $\geq 355\text{kN}$	承重索具

3. 提升架设计：

提升架采用门式格构式结构，由LC-1.5系列标准节组成，标准节高度1.8m和3.3m，可根据提升标高组合调整^[5]。提升架主立柱采用 $\Phi 159\times 8$ 钢管，横杆与斜杆采用 $\Phi 60\times 5$ 、 $\Phi 89\times 5$ 钢管，提升架顶部设置提升平台，平台由上分配梁（ $B350\times 350\times 16\times 16$ ）、下分配梁（ $B350\times 350\times 12\times 19$ ）、提升梁（ $B800\times 500\times 20\times 30$ ）组成。提升架基础采用 $4000\times 4000\times 700$ 独立基础，混凝土强度等级C30，基础地基承载力不小于130kPa，基础周边设置排水沟，避免雨水浸泡。



图12 施工现场提升架及提升设备安装

4. 同步控制技术：

采用“吊点油压均衡＋位移同步控制”的双重控制策略，通过计算机同步控制系统实时采集各吊点位移与荷载数据，自动调整各提升器的提升速度与压力，确保提升过程同步性^[6]。

同步控制流程如下：

（1）数据采集：通过位移传感器采集各吊点位移数据，通过压力传感器采集各提升器荷载数据，采样频率10Hz；

（2）数据处理：计算机控制系统对采集的数据进行实时处理，计算各吊点位移偏差与荷载偏差；

（3）控制指令输出：根据偏差数据，向液压泵源系统输出控制指令，调整各提升器的流量与压力；

（4）反馈调整：实时监测调整效果，持续优化控制参数，确保同步误差控制在 $\pm 5\text{mm}$ 以内。

（四）焊接质量控制技术

1. 焊接材料与设备选型：根据母材材质选用匹配的焊接材料，Q355B钢选用E5015焊条与ER50-6焊丝，Q460C钢选用E5515焊条与ER55-D2焊丝，Q650钢选用专用高强钢焊丝^[7]。焊接材料进场后进行复验，合格后方可使用。焊接设备采用CPXS-350型二氧化碳气体保护焊机与ZXE1-3 \times 500/400型直流焊机，配备电焊条烘箱、保温筒等辅助设备，确保焊接材料烘焙质量与焊接过程稳定性。

2. 焊接工艺优化：施工前针对不同母材、接头形式、焊接方法进行焊接工艺评定，确定最佳焊接参数^[8]。Q460C钢厚板焊接工艺参数：焊接电流220-320A，电压29-34V，焊接速度350-450mm/min，层间温度60-220℃，气体流量20-80L/min。采用多层多道焊接工艺，每层焊缝厚度控制在3-5mm，每道焊缝焊接完成后及时清理焊渣与飞溅物，检查无缺陷后再进行下一道焊接。

3. 焊接顺序优化：主弦杆对接焊缝从中间向两侧对称焊接，每个焊口由2名焊工对称施焊；腹杆焊接先焊下弦杆与腹杆接口，再焊上弦杆与腹杆接口，避免焊接变形累积。对厚度大于20mm的钢板焊接，采用焊前预热（预热温度80-120℃）与焊后后热（后热温度200-250℃，保温时间2-3小时）措施，减少焊接残余应力与变形。

4. 焊接质量检测：所有焊缝均进行100%外观检查，焊缝表面

不得有裂纹、夹渣、焊瘤、气孔等缺陷，焊缝外形尺寸符合设计要求，咬边深度不大于0.05t且不大于0.5mm（一级焊缝）^[9]。一级焊缝进行100%超声波探伤，二级焊缝进行20%超声波探伤，探伤时间在焊接完成24小时后进行，超声波探伤符合GB11345-2013标准，缺陷等级不低于Ⅱ级。对检测发现的缺陷，制定专项返修方案，采用碳弧气刨清除缺陷，返修后重新进行检测，直至合格，返修次数不超过2次。

（五）提升与卸载施工技术

1. 提升施工流程：

（1）提升前准备：对液压提升器、泵源系统、同步控制系统进行全面调试，检查设备运行状态与连接可靠性；检查桁架拼装质量、焊接质量，确认构件连接牢固；清除提升区域障碍物，设置警戒线与安全警示标志。

（2）试提升作业：按照设计荷载的20%、40%、60%、80%、90%、95%、100%逐级加载，每级加载后暂停5-10分钟，观察提升设备与桁架结构的变形情况。当桁架脱离胎架100-150mm后，暂停提升，静置12小时，全面检查提升架、提升器、钢绞线等关键部位的受力与变形情况，测量桁架垂直度与水平度，确认无异后进行正式提升。

（3）正式提升：提升速度控制在5m/h以内，避免速度过快造成结构冲击。提升过程中实时监测桁架姿态，通过同步控制系统进行微调，确保桁架水平提升，避免倾斜。安排专人监测提升设备运行状态、钢绞线受力情况与桁架变形情况，发现异常立即停止提升，排查处理后再继续作业。

（4）提升就位：当桁架提升至设计标高附近时，降低提升速度，进行精准对位，调整桁架位置与标高，确保与A型柱、背拉杆等构件的连接精度。桁架就位后，采用导链、码板等进行临时固定，确保结构稳定。

2. 卸载施工技术：

采用“分级卸载、同步下降”的原则进行卸载，卸载顺序与提升顺序相反，每级卸载量控制在20%以内^[10]。卸载过程中监测桁架变形与受力变化，确保荷载平稳转移至永久结构。

卸载流程如下：

第一级卸载：卸载20%荷载，静置5分钟，监测桁架变形与受力；

分级卸载：依次卸载至50%、80%、100%荷载，每级卸载后静置5-10分钟，持续监测；

荷载转移确认：卸载完成后，监测桁架跨中挠度、支座反力等参数，确认荷载已平稳转移至永久结构，桁架变形稳定后拆除临时固定措施。

三、工程应用效果

如图中原高铁港展厅钢结构安装工程通过采用上述关键技术，成功解决了大跨度弧形管桁架安装的技术难题，确保了工程质量、安全与工期目标的实现，具体应用效果如下：



图14 桁架提升后效果图

（一）质量效果

拼装精度：桁架拼装主弦杆直线度偏差控制在3mm以内，跨度偏差控制在±5mm以内，拱高偏差控制在±3mm以内，满足设计与规范要求。

提升精度：提升过程同步误差控制在±3mm以内，桁架就位后垂直度偏差为8mm，小于允许值15mm；整体平面弯曲偏差为12mm，小于允许值25mm。

焊接质量：焊接一次合格率达99.2%，一级焊缝超声波探伤合格率100%，无重大焊接缺陷。

变形控制：桁架卸载后跨中最大挠度为4.8mm，小于设计允许值5mm，满足设计要求。

（二）安全效果

施工过程中未发生任何安全事故，实现了责任工亡率、重伤率、重大火灾事故发生率、群死群伤事故发生率等安全目标均为0的要求。特种作业人员持证上岗率100%，重大隐患整改合格率100%，提升过程中未发生设备故障、结构失稳等安全风险。

（三）工期效果

通过分区流水施工、胎架与提升架周转使用、交叉作业协调等措施，提前5天完成钢结构安装任务，实际施工工期118个工作日，为后续工程施工创造了有利条件。单榀桁架拼装时间控制在6天以内，提升时间控制在2天以内，施工效率显著提高。

（四）经济效果

采用模块化胎架与提升架周转使用，减少了临时设施用量，降低临时设施费用约15%；液压同步提升技术减少了高空作业量，降低了人工成本与安全防护费用约20%；焊接工艺优化提高了焊接效率，降低了焊接材料损耗约8%。总体而言，采用该套关键技术累计节约工程成本约380万元，经济效益显著。

四、结论与展望

本文基于中原高铁港数字展贸城展厅项目，系统研究了大跨度弧形管桁架液压同步提升关键技术，取得了以下研究成果：

1. 提出了基于BIM的深化设计优化技术，通过三维建模、节点优化、构件分段优化与施工仿真分析，为现场施工提供了精准

的技术支撑，确保了结构安全与安装精度。

2. 研发了拼装胎架模块化设计与施工技术，实现了胎架的快速拆装与周转使用，降低了施工成本，提高了施工效率，胎架精度控制在 $\pm 1\text{mm}$ 以内，满足桁架拼装要求。

3. 优化了液压同步提升系统配置与控制技术，采用“吊点油压均衡 + 位移同步控制”策略，提升同步误差控制在 $\pm 5\text{mm}$ 以内，实现了大跨度桁架的平稳提升与精准就位。

4. 建立了完善的焊接质量控制体系，通过焊接材料选型、焊接工艺优化与焊接质量检测，确保了焊接一次合格率达99.2%，满足高强钢焊接质量要求。

工程实践表明，该套关键技术安全可靠、经济高效，成功解决了大跨度弧形管桁架安装的技术难题，可为同类大跨度钢结构工程施工提供重要的技术参考与工程借鉴。

未来研究方向：一是进一步优化液压同步提升控制算法，提高提升过程的同步精度与抗干扰能力；二是研发智能化监测与预警系统，实现施工过程的实时监测、智能预警与自动处置；三是探索数字化施工技术在大跨度钢结构工程中的深度应用，实现设计、施工、运维全过程的数字化管控。

参考文献

[1] 李洋, 张宇. BIM 技术在大跨度钢结构深化设计中的应用 [J]. 建筑科学, 2019, 35(10): 123-128.
[2] 张剑, 刘芳. 大跨度桁架施工过程有限元分析 [J]. 计算力学学报, 2020, 37(3): 365-370.
[3] 刘军, 张莉. 模块化拼装胎架在大跨度钢结构中的应用 [J]. 建筑施工, 2021, 43(2): 234-236.
[4] 黄勇, 赵刚. 液压同步提升设备选型与配置优化 [J]. 建筑机械技术与管理, 2021, 34(5): 76-79.
[5] 刘敏, 王超. 门式格构式提升架受力分析 [J]. 建筑结构, 2022, 52(4): 145-149.
[6] 赵军, 李惠. 液压同步提升控制系统设计与实现 [J]. 控制工程, 2020, 27(6): 1123-1128.
[7] 孙晓燕, 刘洪滨. 高强钢焊接工艺优化研究 [J]. 焊接技术, 2020, 49(5): 45-48.
[8] 张莉, 刘军. 钢结构焊接工艺评定与应用 [J]. 焊接学报, 2019, 40(8): 101-106.
[9] 陈明, 张伟. 钢结构焊缝无损检测技术应用 [J]. 无损检测, 2021, 43(6): 56-60.
[10] 刘刚, 王欣. 大跨度钢结构卸载施工技术 [J]. 施工技术, 2022, 51(8): 90-93.

大跨度弧形管桁架钢结构施工关键技术 与风险耦合管控研究

白尧尧

中国一冶集团有限公司, 湖北 武汉 430081

DOI:10.61369/ERA.2026020044

摘 要 : 针对中原高铁港数字展贸城展厅钢结构工程跨度大、重量大、工期紧、技术难度高的特点, 本文以该工程 16 个展厅 32554t 五弦弧形管桁架施工为研究对象, 系统开展关键技术集成优化与风险耦合管控研究。通过分析工程核心技术难点, 构建“加工—拼装—提升—焊接—监测—防控”一体化技术体系, 建立多维度风险耦合管控模型, 解决了大跨度桁架安装同步性、焊接质量控制、高精度拼装、复杂风险协同防控等技术难题。工程实践表明, 该技术与管控体系实现了施工全过程零安全事故, 桁架拼装精度误差 $\leq 2.8\text{mm}$, 提升同步性误差 $\leq 4.2\text{mm}$, 焊缝一次合格率达 99.2%, 工期提前 5 天完成, 为类似超危大钢结构工程施工提供了成套技术与管理解决方案。

关 键 词 : 大跨度钢结构; 弧形管桁架; 液压同步提升; 风险耦合; 施工技术; 安全管控

Research on Key Construction Technologies and Risk Coupling Management and Control for Large-Span Curved Pipe Truss Steel Structures

Bai Yaoyao

China First Metallurgical Group Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430081

Abstract : Addressing the characteristics of large span, heavy weight, tight construction schedule, and high technical difficulty in the steel structure project of the exhibition halls in the Digital Exhibition and Trade City of Zhongyuan High-Speed Rail Port, this paper focuses on the construction of 32,554 tons of five-string curved tubular trusses across 16 exhibition halls as the research subject, systematically conducting research on the integrated optimization of key technologies and risk coupling management and control. By analyzing the core technical challenges of the project, an integrated technological system encompassing "processing-assembly-lifting-welding-monitoring-prevention and control" was established, along with a multi-dimensional risk coupling management and control model. This approach resolved technical issues such as the synchronization of large-span truss installation, welding quality control, high-precision assembly, and coordinated prevention and control of complex risks. Project practice demonstrates that the technology and management and control system achieved zero safety incidents throughout the construction process, with truss assembly accuracy errors $\leq 2.8\text{ mm}$, lifting synchronization errors $\leq 4.2\text{ mm}$, a first-pass weld qualification rate of 99.2%, and the project completed 5 days ahead of schedule. This provides a comprehensive technological and management solution for similar ultra-hazardous large-scale steel structure projects.

Keywords : large-span steel structure; curved tubular truss; hydraulic synchronous lifting; risk coupling; construction technology; safety management and control

引言

随着现代建筑工程向大跨度、复杂化、集成化方向发展, 弧形管桁架结构因其受力合理、造型美观等优势, 在大型会展中心、体育场馆等公共建筑中得到广泛应用。但此类结构存在构件重量大、安装跨度广、施工工艺复杂、风险因素多且耦合效应显著等问题, 给施工技术与安全管控带来巨大挑战^[1]。中原高铁港数字展贸城展厅钢结构工程作为典型的超危大工程, 包含 164 榀五弦弧形管桁架, 最大跨度 99.5m, 单榀桁架重量 198.5t, 施工涉及加工、运输、拼



图 1 项目效果图

装、提升、焊接等多个复杂环节，且面临100天的紧张工期，技术集成与风险管控难度极大。

目前国内外相关研究多集中于单一技术优化或独立风险防控，缺乏对大跨度弧形管桁架施工技术的系统集成及多维度风险的耦合管控研究^[2]。基于此，本文结合中原高铁港项目实际及管控措施，构建关键技术集成体系与风险耦合管控模型，通过工程实践验证其有效性，为同类工程提供技术参考与实践指导。

一、工程概况

（一）工程基本特征

中原高铁港数字展览城展厅钢结构工程位于河南省郑州市航空港区，总建筑面积488866 m²，地上二层、地下一层，展厅建筑高度25.5m，中轴主拱高度38.0m。工程由16个展厅组成，分为标准展厅（01~06#、10~16#，共13个）、小型展厅（07~08#，共2个）、中型展厅（09#，共1个），采用五弦弧形管桁架+铰接钢管柱+背拉索结构形式。

钢结构核心参数如下：

桁架系统：共计164榀屋面桁架，总重量32554t，单榀桁架尺寸104.5×17×(4.2~5.7)m，跨度99.5m，间距18.0m；主桁架宽3.0m，翼桁架宽14.0m，拱高4.2~5.7m。

· 构件参数：主桁架上弦杆采用Φ508×22/15钢管（Q355B/Q460C），下弦杆采用Φ508×60/34/14钢管（Q460C），腹杆采用Φ325×8~Φ406×30钢管；A型柱中间段为Φ610×20钢管（Q460C），背拉杆为Φ90钢管（Q650）。

· 施工部署：分四个工区同步施工，采用“工厂分段加工+现场原位拼装+液压同步提升”工艺，标准展厅按4+4+3榀分三次提升，中型展厅按3+3+3榀分三次提升，小型展厅按3+3榀分二次提升，计划工期100天。

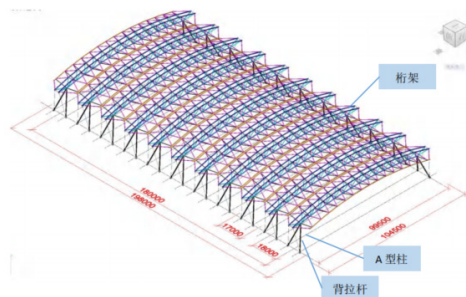


图2 单个标准展厅钢桁架主结构模型图

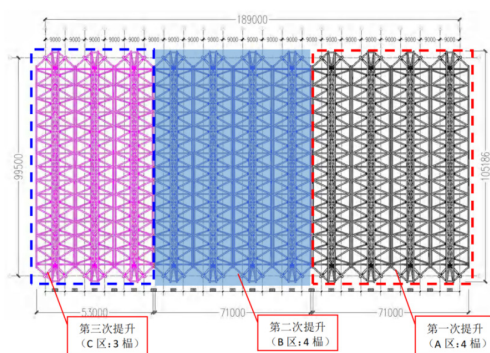


图3 同步提升分区示意图

（二）工程施工重难点

1. 工程量大且工期紧张

钢结构总重量达32554t，164榀桁架需在100天内完成安装，平均每日安装效率需达325.5t。构件加工、运输、拼装、提升等环节需高效衔接，且涉及8个制作厂同步生产、2个中转场协调调度，供应链管理难度大。

2. 安装跨度大且难度高

桁架最大跨度99.5m，单榀重量198.5t，远超常规吊装极限，需采用分块提升工艺。提升过程中需控制多吊点同步性，避免结构受力不均产生变形，提升架基础承载力需≥130kPa，临时支撑体系需满足高承载力与稳定性要求。

3. 焊接难度大且质量要求高

现场焊接量大，最大钢管厚度60mm，涉及Q355B、Q460C等多种高强度钢焊接，需控制焊接变形与残余应力。焊缝类型涵盖平、立、仰、横等多种位置，一级焊缝需100%探伤合格，外观质量需满足外露结构B/C级标准^[3]。

4. 精度控制要求高

桁架拼装整体误差需≤3mm，胎架标高误差≤±1mm，提升同步性误差≤5mm，A型柱垂直度偏差≤12mm。构件连接采用法兰螺栓与销轴连接，需满足机加工精度要求，且测量需克服日照温差、风力等环境因素影响^[4]。

5. 季节性施工影响显著

施工周期覆盖郑州夏季高温（最高气温≥38℃）与雨季（降水量占全年55%），需应对高温焊接变形、雨季地基沉降、大风天气吊装安全等问题。

二、关键技术集成优化

（一）构件加工精度控制技术

1. 材料预处理与下料优化

采用数控等离子切割机、自动切割机、相贯线切割机分别进行管材与板材下料，切割误差≤±1mm。对Q355B、Q460C钢材进行预处理，去除氧化皮与锈蚀，确保焊接质量。主桁架上弦杆分为6段加工，通过数字化建模模拟焊接变形，预控分段长度误差≤2mm。

2. 出厂检验强化

采用激光扫描仪对构件进行三维检测，关键尺寸检测覆盖率100%，重点核查弦杆直线度、管口椭圆度、法兰螺栓孔位置等关键参数。不合格构件严禁出厂，确保现场拼装精度^[5]。

（二）现场拼装优化技术

1. 模块化胎架设计

设计模块化拼装胎架，由路基箱、管托、支撑型钢组成，立柱采用HW350/HW200型钢，通过可调螺栓调整标高，精度误

差 $\leq \pm 1\text{mm}$ 。胎架基础经碾压处理，地基承载力 $\geq 130\text{kPa}$ ，铺设 $6\times 1.8\times 0.2\text{m}$ 路基箱分散荷载。

2. 侧立式拼装工艺

采用“侧立式拼装”方法，先拼装主桁架弦杆，再拼装腹杆及翼桁架，拼装顺序从中间向两侧对称进行。在胎架操作平台设置全站仪测放控制线，焊接前采用激光扫描仪检测拼装精度，超差部位采用火焰校正^[6]。

（三）液压同步提升技术

1. 提升设备选型与布置

选用16台YS-SJ-180液压提升器（单台额定提升力180t）、4台YS-PP-15液压泵源系统、1套YS-CS-01同步控制系统，钢绞线采用 $1\times 7-17.8-1860$ 型，安全系数 ≥ 3.0 。每个展厅设置8个提升吊点，位于桁架反弯点处，采用销轴连接方式，提升耳板与桁架下弦杆插板一体化设计^[7]。

2. 同步控制策略

采用“吊点油压均衡+位移同步控制”双控策略，提升速度控制在 5m/h 。分级加载（20%、40%、60%、80%、90%、95%、100%），确保结构受力均匀。提升过程中通过NTS全站仪332R4实时监测各吊点位移，同步性误差 $\leq 5\text{mm}$ 。

3. 提升架与基础设计

提升架采用LC-1.5系列工具式支撑体系，由1.8m和3.3m标准节组合而成，材质Q355B，最大承载力满足提升要求。提升架基础采用 $4000\times 4000\times 700\text{mm}$ ，C30混凝土独立基础，周边设置排水沟，避免雨水浸泡^[8]。

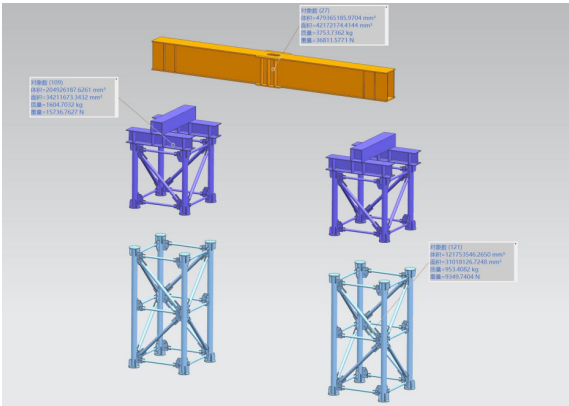


图4 LC-1.5系列工具式支撑体系提升支架示意图

（四）焊接质量控制技术

1. 焊材选用与工艺优化

Q355B钢材采用E5015焊条（ $\Phi 3.2/4.0$ ）、ER50-6焊丝（ $\Phi 1.2$ ）；Q460C钢材采用E5515焊条、ER55-D2焊丝。厚钢板焊接采用“多层多道焊”工艺，预热温度 $\geq 80^\circ\text{C}$ ，层间温度控制在 $60\sim 220^\circ\text{C}$ ， CO_2 气体保护焊参数：电流 $220\sim 320\text{A}$ ，电压 $29\sim 34\text{V}$ ，焊速 $350\sim 450\text{mm/min}$ ^[9]。

2. 焊接顺序与变形控制

桁架主弦杆焊接从中间向两侧对称进行，每个焊口配备2名焊工对撑焊；腹杆焊接先下弦后上弦，先主桁架后翼桁架。采用锤击法减小焊接残余应力（根部焊道除外），避免焊接变形^[3]。

3. 质量检测强化

焊接完成24h后进行无损检测，一级焊缝100%超声波探伤^[9]，二级焊缝20%抽检。外观检查无裂纹、夹渣、焊瘤等缺陷，焊缝尺寸满足设计要求。

（五）施工监测监控技术

1. 监测内容与设备

监测内容包括桁架挠度、A型柱垂直度、提升架沉降、焊接应力等。选用NTS全站仪332R4（精度2秒）、DT8380测温仪、EPK600-F漆膜测厚仪、ASMB2-32焊接应力检测仪器等设备^[10]。

2. 监测频次与预警标准

A型柱每天监测1次，桁架提升过程每4h监测1次，卸载后一周内每天监测1次。预警值设定：桁架挠度 20mm ，A型柱垂直度 12mm ，提升架垂直度 15mm ，超预警值立即停工处理。

（六）季节性施工技术

1. 高温施工措施

避开正午（11:00-15:00）进行焊接与测量校正，焊接作业区搭设遮阳棚，焊材存放于阴凉干燥处。涂装环境温度控制 $\leq 38^\circ\text{C}$ ，相对湿度 $\leq 85\%$ 。

2. 雨季施工措施

提升架基础周边设置排水沟，配备12台150QJ40-100/10型潜水泵排水。雨天停止高空焊接，构件堆放垫高 200mm ，避免积水浸泡。雨后复查胎架沉降，沉降值 $> 5\text{mm}$ 时及时调整。

3. 大风天气应对

风力 ≥ 6 级时停止吊装作业，已吊装构件采用缆风绳固定。提升过程中监测钢绞线斜度， $> 1^\circ$ 时暂停提升，通过钢丝绳限制水平摆动。

三、风险耦合管控体系

（一）多维度风险辨识

基于《危险性较大的分部分项工程安全管理规定》^[1]，构建“体系管理-起重吊装-施工机具-高处作业-施工用电”五大风险维度，识别296项风险因子：

体系管理维度（72项）：包括责任制度、专项方案、人员资质、安全交底等，如特种作业人员无证上岗（Ⅰ级风险）；

起重吊装维度（37项）：涉及设备检测、索具选用、吊装工艺等，如起重机超载作业（Ⅱ级风险）；

施工机具维度（24项）：包含电焊机、气瓶、运输车辆等，如气瓶暴晒（Ⅳ级风险）；

高处作业维度（35项）：涵盖安全帽、安全网、临边防护等，如高空作业未系安全带（Ⅰ级风险）；

施工用电维度（36项）：涉及接零保护、配电线路、配电箱等，如配电系统未采用TN-S系统（Ⅰ级风险）。

风险等级划分采用“可能性-后果严重性”二维模型，分为Ⅰ级（极高风险，58项）、Ⅱ级（高风险，76项）、Ⅲ级（中等风险，89项）、Ⅳ级（低风险，73项）。

（二）风险耦合效应分析

1. 耦合类型识别

直接耦合：起重吊装设备故障（施工机具）→高空坠落（高处作业）；

间接耦合：专项方案不完善（体系管理）→焊接质量缺陷（施工工艺）→结构安全风险；

反馈耦合：施工用电违规（施工用电）→火灾（文明施工）→钢结构构件损坏→二次风险。

2. 耦合度量化

通过风险耦合度公式计算，各维度耦合度排序：起重吊装－高处作业（0.87）> 施工用电－文明施工（0.79）> 体系管理－起重吊装（0.76）> 高处作业－施工机具（0.72），明确起重吊装与高处作业为耦合管控重点^[2]。

（三）管控措施实施

1. 组织保障

建立三级责任体系，项目经理为第一责任人，下设安全管理部门、技术质量管理部等专职部门，明确26个岗位安全职责。特种作业人员100%持证上岗，开展三级安全教育培训，累计时长≥48学时。

2. 技术防控

起重吊装与高处作业耦合管控：吊装设备进场前专项检测，高空作业设置角钢护栏、操作平台、30个防坠器，作业人员100%系挂安全带；

施工用电与文明施工耦合管控：采用TN-S接零保护系统，设置6个一级配电柜、14个二级柜，电缆采用YJLV系列铝芯电缆；配备5台焊烟收集器，动火作业办理审批手续，设置消防通道及水源；

精度管控：通过胎架调整、激光扫描检测、实时监测反馈，确保拼装与安装精度^[4]。

3. 应急处置

建立“1+5”应急组织体系（总指挥+抢险救灾组、协调联络组、后勤保障组、安全保卫组、医疗救治组），制定8类突发事件应急预案（设备故障、火灾、高空坠落、触电等）。储备挖掘机、发电机、急救箱等应急物资，每月开展1次应急演练。

四、工程应用效果

（一）安全绩效

施工全过程实现零安全事故，Ⅰ级风险整改合格率100%，Ⅱ级风险整改合格率98.7%，风险耦合事件发生率为0。高处作业防护到位，未发生坠落事故；施工用电规范，无触电、火灾事件；起重吊装设备运行正常，无设备故障引发的安全问题^[2]。

（二）质量绩效

加工精度：构件加工尺寸误差≤1.5mm，满足拼装要求；

拼装精度：桁架拼装整体误差≤2.8mm，胎架标高误差≤±0.8mm；

提升同步性：多吊点提升同步性误差≤4.2mm，低于设计限值5mm；

焊接质量：焊缝一次合格率99.2%，一级焊缝探伤合格率100%，无裂纹、夹渣等缺陷；

结构变形：桁架跨中挠度最大值18.5mm（预警值20mm），A型柱垂直度偏差≤10mm（预警值12mm），满足规范要求^[5]。

（三）工期绩效

四个工区同步推进，构件安装效率达325.5t/天，较计划效率提升12%。16个展厅钢结构安装实际工期95天，提前5天完成，其中单榀桁架拼装时间从4天缩短至3.2天，提升效率较传统工艺节省3h/次^[6]。

（四）经济效益

通过技术集成优化与风险管控，减少构件返工量3%，节约钢材120t；降低焊接缺陷率，减少焊缝返修费用约86万元；缩短工期5天，节约管理费用约45万元，累计创造直接经济效益131万元^[7]。

五、结论

1. 中原高铁港展厅钢结构工程通过构建“加工－拼装－提升－焊接－监测－防控”一体化技术体系，有效解决了大跨度弧形管桁架施工中的精度控制、同步提升、焊接质量、季节性施工等技术难题，关键技术参数均满足设计与规范要求。

2. 建立的多维度风险耦合管控体系，识别296项风险因子，明确起重吊装与高处作业为耦合管控重点，通过组织保障、技术防控、应急处置三大支撑，实现了施工全过程零安全事故。

3. 工程应用表明，该技术与管控体系显著提升了施工效率与质量，缩短了工期，节约了成本，为跨度≥90m、重量≥30000t的超超大钢结构工程施工提供了成套技术与管理参考。

4. 后续可结合BIM技术与物联网技术，实现施工过程的数字化、智能化管控，进一步提升风险预判与技术优化的精准度。

参考文献

- [1] 住房和城乡建设部. 危险性较大的分部分项工程安全管理规定 [Z]. 2018.
- [2] 王要武, 刘洪磊. 超高层建筑钢结构施工安全风险耦合效应分析 [J]. 建筑结构学报, 2022, 43 (增刊 1): 345-352.
- [3] GB50661-2011, 钢结构焊接规范 [S].
- [4] GB50026-2020, 工程测量标准 [S].
- [5] GB50205-2020, 钢结构工程施工质量验收标准 [S].
- [6] 李国强, 周健. 大跨度钢结构液压同步提升技术研究与应用 [J]. 土木工程学报, 2021, 54 (6): 89-98.
- [7] GB51162-2016, 重型结构和设备整体提升技术规范 [S].
- [8] JGJ80-2016, 建筑施工高处作业安全技术规范 [S].
- [9] GB11345-2013, 钢焊缝手工超声波探伤方法和探伤结果分级 [S].
- [10] 张志强, 王丽. 大跨度钢结构施工过程监测技术研究 [J]. 建筑科学, 2022, 38 (8): 65-71.

盾构隧道同步注浆材料性能试验与注浆效果评价研究

郑航雄

中铁隧道股份有限公司, 河南 郑州 450000

DOI:10.61369/ERA.2026020045

摘 要 : 针对盾构隧道同步注浆材料性能与注浆效果评价问题, 通过室内试验、模型试验和现场验证, 系统研究了水泥-粉煤灰-膨润土复合浆液的物理力学性能、流动扩散机理及注浆效果。基于宾汉姆流体理论构建的浆液流动模型, 结合室内注浆模拟试验, 确定了最优注浆参数 (压力0.3-0.4MPa、间隙35-45mm、速度3-4L/min)。构建了涵盖材料性能、施工过程、填充质量、结构响应四层次的综合评价体系, 现场试验段综合评价得分93.8分, 地层沉降量降低45%以上, 管片上浮量降低60%以上, 验证了优化浆液及注浆参数的优越性, 为盾构隧道同步注浆提供了技术支撑。

关 键 词 : 盾构隧道; 同步注浆; 浆液性能; 配合比优化

Research on Performance Testing of Synchronous Grouting Materials and Evaluation of Grouting Effects in Shield Tunnels

Zheng Hangxiong

China Railway Tunnel Group Co., Ltd., Zhengzhou, Henan 450000

Abstract : Focusing on the evaluation of the performance of synchronous grouting materials and grouting effects in shield tunnels, this study systematically investigates the physical and mechanical properties, flow and diffusion mechanisms, and grouting effects of a cement-fly ash-bentonite composite slurry through laboratory tests, model tests, and field validation. Based on the Bingham fluid theory, a slurry flow model was constructed, and combined with laboratory grouting simulation tests, the optimal grouting parameters were determined (pressure: 0.3-0.4 MPa, gap: 35-45 mm, flow rate: 3-4 L/min). A comprehensive evaluation system covering four levels—material performance, construction process, filling quality, and structural response—was established. The field test section achieved a comprehensive evaluation score of 93.8 points, with a reduction in ground settlement of over 45% and a reduction in segment uplift of over 60%, validating the superiority of the optimized slurry and grouting parameters. This provides technical support for synchronous grouting in shield tunnels.

Keywords : shield tunnel; synchronous grouting; slurry performance; mix proportion optimization

引言

盾构隧道施工中, 同步注浆是填充管片与地层间空隙、控制地表沉降、保障隧道稳定的关键技术。传统浆液常面临泌水率高、凝结时间长、早期强度低等问题, 影响注浆效果。本文通过室内试验优化浆液配合比, 揭示浆液流动扩散机理, 建立综合评价体系, 并通过现场试验验证, 以提升同步注浆施工质量和效率。

一、同步注浆材料物理力学性能试验研究

(一) 新拌浆液的工作性能试验

为了减小地铁盾构隧道在强震作用下的损失程度, 一些专家学者提出在地铁盾构施工时进行同步注浆, 这种浆液要求具备良好的减震和隔震效果^[1]。新拌浆液工作性能是盾构同步注浆顺利输送、填充盾尾间隙的前提, 核心评价指标包含流动性、凝结时间、泌水性和不分层性^[2]。以水泥-粉煤灰-膨润土复合浆液为体系, 选取水胶比、粉煤灰、膨润土及外加剂掺量为试验变量,

按相关盾构注浆规程开展试验。流动性测试表明, 水胶比是影响流动性的核心因素, 其增大会提升浆液扩展度, 但易引发泌水离析; 粉煤灰掺量30%~50%可改善流动性, 超50%则延缓早期强度; 膨润土掺量5%~8%能提升保水黏聚性、抑制泌水, 掺量过高会降低流动性; 高效减水剂0.5%~1.0%、缓凝剂0.2%~0.5%可分别优化浆液流动性与凝结时长^[3]。经维卡仪测试, 缓凝剂、水胶比与凝结时间呈正相关, 粉煤灰掺量过高会延长初凝时间^[4]。量筒法泌水试验显示, 膨润土掺量 $\geq 6\%$ 、粉煤灰掺量 $\geq 40\%$ 时, 浆液泌水率可控制在2%以内。综合试验结果, 初步确定浆液组分掺量范

围,为后续力学性能试验及配合比优化奠定基础。

(二) 硬化浆液的力学性能试验

选取12组工作性能合格的配合比试样,经标准养护3d、7d、28d后测试力学性能。结果显示,强度均随养护龄期增长,28d趋于稳定;水胶比增大、膨润土掺量超8%会显著降低强度,粉煤灰合理掺量(30%~40%)可促后期强度,高效减水剂可提升强度,缓凝剂影响较小;粘结强度随龄期增大,受浆液强度和界面密实度影响,合理掺加粉煤灰、膨润土可提升粘结性能。综合确定28d抗压 $\geq 2.0\text{MPa}$ 、抗折 $\geq 0.5\text{MPa}$ 、粘结强度 $\geq 0.3\text{MPa}$ 为合格标准,筛选出6组配合比进入后续抗渗耐久试验。

(三) 浆液的抗渗与耐久性能试验

盾构隧道多穿越富水地层,硬化浆液的抗渗、耐久性能直接决定隧道长期运营安全,核心评价指标包含抗渗等级、抗冻性及硫酸盐、氯离子侵蚀抗性^[9]。选取6组力学性能合格的配合比试样开展标准试验,抗渗试验显示浆液抗渗等级与抗压强度正相关,水胶比越小、膨润土掺量越高,抗渗性能越优,膨润土掺量 $\geq 7\%$ 且水胶比 ≤ 0.9 时,28d抗渗等级可达P6及以上;抗冻试验经25次快速冻融循环,粉煤灰掺量30%~40%可提升抗冻性,质量与强度损失率均控制在10%以内,膨润土掺量过高则会降低抗冻性;抗侵蚀试验在硫酸盐、氯离子溶液分别浸泡28d、90d后,粉煤灰可显著提升浆液抗侵蚀性能,掺量 $\geq 40\%$ 时90d强度损失率 $\leq 15\%$ 。综合试验结果,筛选出3组最优配合比进入优化分析阶段。

(四) 基于性能试验的配合比优化分析

基于新拌浆液、硬化浆液及抗渗耐久性能试验,采用正交试验与综合评价法构建多目标优化模型,以流动性、凝结时间、28d抗压强度、抗渗等级为核心指标,经层次分析法确定权重(0.25、0.20、0.35、0.20),完成3组候选配合比综合评分^[9]。优化得出最优配合比,水胶比0.85,水泥、粉煤灰、膨润土、高效减水剂、缓凝剂掺量依次为30%、40%、7%、0.8%、0.3%。该配合比浆液扩展度220~240mm,初凝6~8h、终凝12~14h,泌水率 $\leq 1.5\%$;28d抗压强度2.8MPa,抗折、粘结强度分别为0.65MPa、0.42MPa,抗渗等级P8,25次冻融、90d硫酸盐侵蚀强度损失率各为8.2%、12.5%,完全满足盾构隧道同步注浆施工要求。同时掺用工业废料与廉价矿物掺合料,降低水泥用量,实现了经济性与环保性统一。

二、同步注浆浆液填充扩散机理与模型试验

(一) 浆液在盾尾间隙的流动模型分析

盾构隧道盾尾间隙为30~50mm的不规则非均匀环形空间,同步注浆浆液受多重因素作用,流动状态复杂^[7]。研究基于宾汉姆流体理论,忽略浆液重力,将盾尾间隙简化为平行平板缝隙流并构建二维流动模型,明确了浆液扩散半径与各影响参数的关联规律。结果显示,扩散半径与注浆压力、注浆时间、盾尾间隙宽度正相关,与浆液屈服应力、塑性黏度负相关,且注浆压力需高于屈服应力对应的临界值才能实现浆液有效流动填充。模型可预测

不同工况下浆液扩散范围,为现场注浆参数设计提供理论参考。

(二) 室内注浆模拟台架试验

为验证流动模型合理性、揭示浆液填充扩散规律,搭建盾构盾尾间隙注浆模拟台架(含模拟盾尾、管片、地层及注浆、监测系统,间隙30~50mm可调,注浆参数与地层相似性可控)。选取优化浆液配合比,设置3组工况(变注浆压力0.2~0.4MPa、间隙30~50mm、速度2~6L/min),每组重复3次取均值^[9]。试验表明,浆液扩散呈近似椭圆形,与理论模型规律基本一致。压力增大促进扩散但超0.4MPa易致地层隆起等问题;间隙加宽减小扩散阻力但过宽降低密实度;速度2~4L/min时扩散均匀,超6L/min易离析。同时存在压力衰减现象,降至临界压力时浆液停止扩散。结合试验修正模型(引入压力衰减及间隙不均匀系数),确定最优注浆参数,压力0.3~0.4MPa、间隙35~45mm、速度3~4L/min,为工程施工提供支撑。

三、工程现场试验与注浆效果评价

(一) 工程概况

本次现场试验依托某地铁2号线盾构区间隧道工程,区间隧道全长1200m,盾构机直径6.28m,管片外径6.0m,内径5.4m,管片厚度0.3m,环宽1.5m。工程地质条件复杂,隧道主要穿越粉质黏土、粉土和细砂地层,地层含水率18%~25%,天然孔隙比0.85~1.05,承载力基本值120~180kPa^[9]。水文地质条件为潜水,地下水位埋深2.5~4.0m,地下水对混凝土具有弱腐蚀性。该区间隧道施工过程中,前期采用传统同步注浆浆液(水泥-粉煤灰浆液),存在浆液泌水率高、凝结时间长、早期强度低、地层沉降控制效果不佳等问题,部分段落出现管片上浮、地层沉降超标(最大沉降量达35mm)和局部空洞等隐患。基于此,选取该区间K0+300~K0+500段(长200m)作为试验段,采用本次室内试验优化的同步注浆浆液配合比和注浆参数开展现场试验。

(二) 现场注浆试验方案

为验证流动模型合理性、揭示浆液填充扩散规律,搭建间隙30~50mm可调、注浆参数与地层相似性可控的盾构盾尾间隙注浆模拟台架;选取优化浆液配合比,设置注浆压力、间隙、注浆速度3组可变工况,每组重复3次取均值。试验表明浆液扩散呈近似椭圆形,与理论模型规律基本一致,各参数均存在最优作用区间,且浆液存在压力衰减现象,临界压力下停止扩散。结合试验引入压力衰减及间隙不均匀系数修正模型,确定最优注浆参数为压力0.3~0.4MPa、间隙35~45mm、速度3~4L/min,为工程施工提供支撑。

(三) 注浆效果评价体系构建与实施

针对现有注浆效果评价单一指标的局限性,构建材料性能-施工过程-填充质量-结构响应四层次综合评价体系(含12项指标)^[10]。采用层次分析法确定权重、模糊综合评价法开展评价,该体系目标层为注浆效果综合评价,准则层包含材料性能(权重0.25)、施工过程(权重0.20)、填充质量(权重0.30)、结构响应(权重0.25),各准则层均含3项指标,指标层权重分

别为材料性能0.4/0.35/0.25、施工过程0.4/0.3/0.3、填充质量0.45/0.35/0.2、结构响应0.4/0.3/0.3，评价等级分为优秀（90–100分）、良好（80–89分）、合格（70–79分）、不合格（<70分）。指标量化依据现场监测、室内试验及检测数据评分，例如新拌浆液流动性180–240mm、地层沉降≤20mm、浆液填充密实度≥95%均为优秀等级，其余等级按对应区间判定，实施过程中收集试验段指标数据，按模糊综合评价法计算得分，并邀请5名行业专家审核指标量化及权重分配，保障评价科学性。

（四）综合效果评价

根据现场试验监测数据和检测结果，对试验段注浆效果进行综合评价。材料性能评价方面，现场制备的新拌浆液流动性平均为225mm，凝结时间平均为7.2h，泌水率平均为1.2%，硬化浆液28d抗压强度平均为2.7MPa，抗折强度平均为0.62MPa，抗渗等级平均为P8，各项指标均达到优秀标准，评价得分95分；施工过程评价方面，现场注浆压力稳定在0.3–0.4MPa，压力波动幅度≤5%，单环注浆量达标率98%（仅2环注浆量略低于设计值，为4.3m³），注浆速度均匀，波动幅度≤10%，施工过程各项指标均达到优秀标准，评价得分92分；填充质量评价方面，地质雷达探测结果显示试验段浆液填充密实度平均为96.5%，无空洞率100%，钻孔取芯结果显示硬化浆液与管片粘结紧密，粘结强度平均为0.4MPa，填充质量达到优秀标准，评价得分94分；结构响应评价方面，试验段地层最大沉降量为18mm，平均沉降量为12mm，均控制在规范允许范围（≤30mm）内，管片最大

径向位移为8mm，环向收敛量为5mm，均满足设计要求，管片应力监测结果显示管片最大应力为12MPa，远低于管片设计强度（30MPa），结构响应稳定，评价得分93分。综合各层次评价得分，试验段注浆效果综合评价得分为93.8分，评价等级为优秀，与试验段前后非试验段（采用传统浆液）相比，地层沉降量降低45%以上，管片上浮量降低60%以上，浆液填充密实度提升10%以上，充分验证了优化后的浆液配合比和注浆参数的适用性和优越性，同时通过现场试验，进一步优化了注浆施工工艺，提出了针对性的质量控制措施，为后续整个区间隧道及同类工程同步注浆施工提供了宝贵的实践经验。

四、结束语

本文针对地铁盾构隧道同步注浆材料性能及注浆效果评价问题，开展了系统的室内试验、理论分析、模型试验及工程现场验证。通过正交试验与多目标优化分析，确定了最优同步注浆浆液配合比。构建了涵盖材料性能、施工过程、填充质量、结构响应四个层次的综合评价体系，并通过现场试验验证了其科学性与实用性。研究提出的同步注浆材料配比优化方法及注浆效果评价体系，能够有效指导盾构隧道施工，具有良好的工程应用价值。未来可进一步结合智能化监测技术，实现对注浆过程的实时动态控制，以适应更加复杂多变的地质条件。

参考文献

[1] 李晓强, 王龙飞, 董明明. 地铁盾构隧道水泥基同步注浆减震层材料性能研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2025, 39(05): 129–135. DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005–8249.2025.05.023.

[2] 刘刚杰. 地铁盾构隧道掘进同步注浆施工技术研究 [J]. 工程技术研究, 2025, 10(19): 64–66. DOI: 10.19537/j.cnki.2096–2789.2025.19.020.

[3] 邓文武, 黄大维. 引气剂在盾构隧道注浆材料中的应用研究 [J/OL]. 华东交通大学学报, 1–13[2026–02–04]. <https://doi.org/10.16749/j.cnki.jecjtu.20250908.007>.

[4] 姜丰. 重庆快轨越江盾构隧道同步注浆材料性能研究 [D]. 重庆交通大学, 2025. DOI: 10.27671/d.cnki.gcjtc.2025.000889.

[5] 姚占虎, 杨琴, 李辉, 等. 盾构隧道同步双液注浆技术研究与应用 [J]. 现代隧道技术, 2025, 62(02): 265–273. DOI: 10.13807/j.cnki.mtt.2025.02.026.

[6] 呼炜, 段堃龙, 司洪亮, 等. 重庆过江盾构隧道同步注浆材料性能重难点分析 [J]. 佳木斯大学学报 (自然科学版), 2025, 43(02): 105–107. DOI: 10.20232/j.cnki.jms–dxxb.2025.02.008.

[7] 苟安迪, 孙天敏, 郝建雷. 盾构隧道同步注浆材料配比试验及现场应用研究 [J]. 山西建筑, 2025, 51(04): 139–143. DOI: 10.13719/j.cnki.1009–6825.2025.04.030.

[8] 资谊, 薛光桥, 张昊楠, 等. 饱和砂土层盾构隧道同步注浆浆液填充–渗透扩散过程研究 [J]. 隧道建设 (中英文), 2024, 44(12): 2350–2361.

[9] 申路. 复合地层沉降控制盾构隧道同步注浆材料研究 [D]. 西南交通大学, 2024.

[10] 周航. 超大直径盾构隧道同步注浆浆液扩散特性研究 [D]. 西南交通大学, 2024.

一种耙吸式挖泥船绿色智造技术研究

周杰

上海振华重工启东海洋工程股份有限公司, 江苏 启东 226259

DOI:10.61369/ERA.2026020046

摘 要 : 现代耙吸式挖泥船经常会搭载双燃料系统, 如 LNG、甲醇等, 以此来实现更高效的疏浚作业和更少的大气污染。采用传统燃油和清洁燃料切换的动力系统, 不仅能优化船舶设计还能减少碳排放, 符合国际绿色低碳的环保要求。而制造过程中的减排更是作为造船企业应该关注的要点, 通过优化能源结构、推广低碳技术和加强环保意识等措施, 提升船企绿色智造能力, 为后续长久发展铺垫基石。

关 键 词 : 绿色智造; 碳排放; VOCs 减排; 水性漆; 甲醇燃料

Research on Green Intelligent Manufacturing Technology for Trailing Suction Hopper Dredgers

Zhou Jie

Qidong Offshore Engineering Co., Ltd., Shanghai Zhenhua Heavy Industries Co., Ltd., Qidong, Jiangsu 226259

Abstract : Modern trailing suction hopper dredgers often incorporate dual-fuel systems, such as LNG and methanol, to achieve more efficient dredging operations and reduce atmospheric pollution. Adopting a power system that switches between traditional fuel and clean fuel not only optimizes ship design but also reduces carbon emissions, aligning with international environmental requirements for green and low-carbon practices. Moreover, emission reduction during the manufacturing process is a crucial focus for shipbuilding enterprises. By optimizing the energy structure, promoting low-carbon technologies, and enhancing environmental awareness, shipbuilders can enhance their green intelligent manufacturing capabilities, laying a solid foundation for sustained long-term development.

Keywords : green intelligent manufacturing; carbon emissions; VOCs reduction; water-based paint; methanol fuel

引言

中国于2020年正式提出碳达峰、碳中和的“双碳”目标。为达成这一目标,我国已在多个领域推行一系列举措,促进经济社会向全面绿色低碳方向转变。船舶制造业中的“碳排放”问题更是一个复杂而又紧迫的问题,不仅要考验船企在船舶制造过程中的低碳控制,更要考虑其打造的产品在未来航行作业中对全球气候的影响。本文通过对中交天航3万方超大型耙吸挖泥船的设计与建造来研究绿色智造在这一过程中的运用。

一、绿色涂装技术研究

(一) 概述

作为壳-舾-涂三大作业之一的船舶涂装是船舶建造的重要工艺流程,传统建造过程中使用的各类溶剂型涂料及稀释剂,会产生大量的挥发性有机物(VOCs),污染环境。因此,建立起绿色涂装技术体系,推动企业向绿色涂装的全面转型就成为了必然。首先研究如何减少源头涂料中VOCs的含量,根据涂料适应性进行环保涂料选型;其次研究绿色产品涂装工艺方案,保证绿色涂料的顺利应用与涂装质量;最后,在末端对涂装污染物进行控制的同时,还需对生成过程实施治理。三个阶段相互支撑、互为依托,是绿色涂装作业流程密不可分的整体。

(二) 环保涂料选型

a. 水性无机硅酸锌车间底漆

车间底漆一般使用两种:溶剂型无机富锌底漆和水性无机硅酸锌底漆。溶剂型无机富锌底漆的性能特点是耐热、机械性能好、附着力强和热加工损伤面小。缺点是固化周期长,固体成分只有25%-30%;涂层较脆,容易产生“龟裂”,复涂困难;同时VOCs含量高达600-660g/L。而水性无机硅酸锌底漆不仅具备相同的性能优势,且干燥速度极快,还可将VOCs从660g/L降低至50g/L以内,更符合环境保护要求。

b. 内部舱室水性涂料

这类涂料中,有机溶剂的含量普遍为成品量的15%-50%。为方便操作,施工过程中会把溶剂型稀释剂的用量控制在5%-

15%。但值得注意的是，溶剂的挥发会引发环境污染问题，并危害相关人员健康。采用水性漆、无溶剂和高固体份方面的绿色防腐涂料，对于实现 VOCs 减排具有现实和长远的意义。

c. 高固体分环氧涂料

水性涂料具有环保减排、使用安全等特点，但在重防腐方面的适用性还有待提高，且目前比较成熟的水性涂料配套较少，无法应对机泵舱 / 生活区等内部舱室以外的防腐要求。高固体分环氧涂料具有出色的耐水、耐盐雾和耐化学品特性，使其成为全船 80% 以上涂装部位通用的防腐底漆选择。且施工方便，可以作为新建耙吸挖泥船的优选。

3 万方超大型耙吸挖泥船可采用高固体分环氧涂料，本船底漆面积约 200,000 m²，根据计算 VOCs 减排能达到约 16,320~25,660kg。

（三）涂装工艺研究

虽然水性涂料在 VOCs 减排方面表现优异，其在常温状态下施工时，能够满足施工要求，但是处在低温施工时，其产品性能则可能呈现不稳定性。为此，我们开展了对水性漆施工性，漆膜外观，防腐性，附着力等性能的测试与研究。

测试工件为 2m*2m*2m 的工装 2 个，如下图 1 所示：



图1 水性漆喷涂测试工装

参与测试的油漆配套产品满足机舱、上建内部大于 15 年防腐设计寿命，质量担保 5 年的设计要求；并对底材表面处理与常规溶剂型油漆的施工性能优异：底漆快干，厚涂性好，无最大复涂间隔限制，或复涂前表面处理要求低。工件表面喷砂处理至 Sa2 级，由施工队提供常规喷漆泵，涂装车间通风除湿设备正常运转配合，所有准备工作与日常溶剂型油漆作业无差别。

测试油漆配套：a. 水性丙烯酸底漆 + 面漆；b. 水性环氧底漆 + 水性丙烯酸面漆；c. 水性环氧底漆 + 溶剂型环氧底漆 + 水性丙烯酸面漆。一个面翻涂溶剂型环氧底漆，另一个面露天放置 6 个月后用溶剂型环氧复涂，再统喷水性丙烯酸面漆。此配套为测试船舶合拢 / 水下涂装阶段，冬季低温作业条件下，用溶剂型环氧底漆替代水性环氧底漆覆涂的工况。

测试结果：水性底漆的厚涂性、抗流挂性较好，湿膜、干膜可以做到标准膜厚的 2 倍以上不流挂。底漆干燥快，复涂性较好，整体漆膜外观优良，满足施工要求。另外，还验证了冬季露天低温作业情况下，水性涂料不适用时，可以用溶剂型环氧底漆替代水性环氧漆的修补涂装。（如图 2 所示）



水性漆加水稀释

无气喷涂

测试干膜厚度

图2 测试现场

第二阶段，工件露天摆放约 8 个月后，环氧类老涂层表面有轻微粉化，目视检查漆膜外观良好，无锈蚀等不良表现。对部分测试工件进行了翻涂测试，环氧类底漆动力工具轻拉毛，水性丙烯酸底 / 面漆测试了轻拉毛和仅淡水擦拭清洁两种表面处理方式。翻涂后漆膜状态良好，一星期后进行附着力测试，划叉法 / 划格法未有涂层剥离，拉拔实验至 17MPa 未脱离，涂层附着力良好。（如图 3 所示）



图3 翻涂表面处理及附着力测试

经过长达 8 个月的模拟测试，通过对底材的表面处理，油漆的施工性能，防腐性能，外观，水性与溶剂型环氧漆的相互覆涂，附着力等观察，水性漆可以满足机舱、生活区等区域的配套及施工要求，施工性、涂层质量优异。

（四）末端治理

船厂涂装作业时，所排放的 VOCs 废气成分复杂，且表现出风量高、浓度低的特点。干式过滤器 + 沸石转轮 + 三床式 RTO 的设备工艺可以很好的达到涂装车间 VOCs 末端治理的目的，其工艺流程如下图 4 所示：

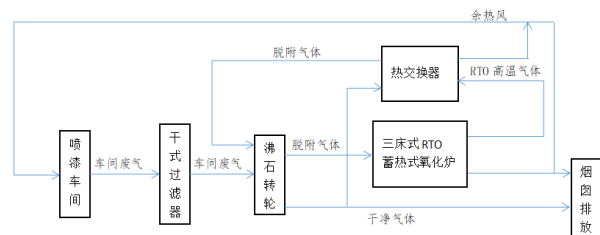


图4 末端治理工艺流程图

干式过滤器是沸石分子筛转轮前的预处理设备，利用其自身结构和过滤材料去除废气中的粉尘、漆雾等杂质，防止损坏风机。干式过滤器设 5 级过滤材料组合，不同等级材料采用模块设计，可以快速组装更换。系统设置压力传感器，压差超出规定范围时，声光报警提醒更换过滤材料，保证系统安全、稳定运行。

由吸附区、脱附区和冷却区组成的沸石分子筛转轮，在处理含有 VOCs 的废气时，会首先流经其吸附区，然后经沸石吸附废气中的 VOCs，使废气净化；沸石轮以一定速度转动，当内含高浓度 VOCs 的沸石转入脱附区时，用 180℃ - 200℃ 的热空气进行脱附再生，脱附后的沸石再转入冷却区通风降温，恢复沸石的吸附能力，重新进入新一轮的循环。沸石分子筛转轮适用大风量、低

浓度废气处理，可持续处理有机废气，具有高度净化功能，可去除废气中的 VOCs 成分，去除率高达 95%。

蓄热式热氧化器 (RTO) 由燃烧室、蓄热体和切换阀门组成。其工作原理是先加热有机废气, 使废气中的 VOCs 氧化分解, 同时较高的温度可以储存热能方便节省废气升温的能耗。每个蓄热室通过蓄热 - 放热 - 吹扫的循环程序, 不断重复这一过程, 确保设备连续稳定工作。经过图 4 所述的工艺流程对涂装车间 VOCs 排放进行高效治理。

通过对水性车间底漆，内部舱室水性涂料，低 VOCs 高固体分通用环氧底漆等绿色产品的对比分析，3 万方超大型耙吸挖泥船涂料产品减排估算对比如下表 1 所述：

表1 不同配套选择的减排对比表

	油漆用量 (L)	VOCs 总量 (Kg)	减排百分比 (%)
普通产品配套	260774	111771	满足 VOCs 限量
高估组分通用环氧漆	203154	67209	减排 40%
水性漆 + 高估组分结合	216495	43073	减排 61.5%

由此可见,绿色涂料产品可以有效达到3万方超大型耙吸挖泥船建造期间 VOCs 减排的目的,减少涂装对环境的危害,逐步走上绿色涂装、绿色造船的工艺路线。

二、甲醇燃料预留技术研究

(一) 甲醇燃料的特点

甲醇 (Methanol)，作为一种密度比空气大、蒸汽不易飘散的燃料，具有危险的特性。采用高速透气阀，强化进舱驱气流程，爆炸极限范围广。通过持续充氮气，保证甲醇舱内正压，在甲醇加注过程中，对蒸汽回收进行特殊操作监控。甲醇火焰几乎无颜色，不易探测，需对危险点采用气体探测等措施。甲醇能量密度较高适合作为长距离航行，又因其物理特性与传统燃油相近，无需新建专用存储罐和加注码头，可直接利用现有仓储与加注设施，改造成本大幅降低。

（二）甲醇预留方案

本船总布置图中的原来的 HFO 储存舱和 MDO 储存舱及其下部的双层底空舱, 改作甲醇舱; 油舱设置在第二舱的内舱甲板上。为应对腐蚀问题, 相关管路选用了 316L 不锈钢材料进行防护。如图 5 所示。

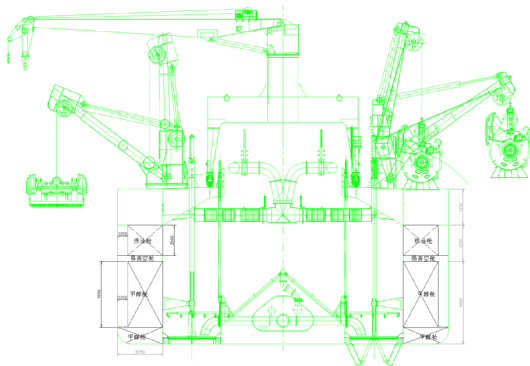


图5 甲醇舱预留方案截面图

预留甲醇方案包括如下系统：

1) 储运、加注系统:该系统由甲醇舱、加注站、甲醇泵、管路阀门附件和监视安防系统等构成。在加注甲醇时,加注管道和甲醇舱蒸发气体通过蒸汽回收管道实现回流。注水过程中,需注意船侧甲醇舱的压力变化,并协调船上蒸汽回收氧气浓度与岸上或加注蒸汽的变化。完成加注后,甲醇液管道需用氮气吹扫以准备进舱。

2) 供给系统: 通过 LFSS 单元 (供应单元集成撬块), 将甲醇从日用舱中处理后, 再进入主机, 经 FVT (甲醇燃料阀组单元) 满足主机的压力流量温度。LFSS 系统设计应考虑潜在的风险, 并制定相关安全措施, 以确保发动机各工况运转正常。在甲醇燃料供应中, 系统支持起动、运转、待机、停机、自动扫尾等自动运行方式。同时, 氮气在供应过程中发挥关键作用, 为甲醇的日常舱提供气体补充。供给系统以主机对甲醇燃料供应的需要和规格要求为基础, 保证安全、有效地供应系统。

3) 安全系统: 用于保障甲醇燃料在储运、供应全流程中的安全性与稳定性。每个燃料舱的惰化进气管路设置隔离装置, 隔离装置应位于进入燃料舱的船员易于发现的位置。隔离应通过可拆卸短管的方式设置。在双壁管外管与内管之间的环形空间建立正压惰化环境, 通过精密压力调节阀维持 0.2–0.5kPa 的恒定正压。采用惰性气体 (如氮气) 持续吹扫替代双壁管环形空间的机械通风, 同时在环形空间内设置多级泄漏监测系统。

为防止可燃液体或蒸气进入惰气系统，惰性气体供应管路上的危险区域，如甲醇储藏区、加注作业区等爆炸性环境，应设置双截止透气阀组 (DBB)。还需在 DBB 阀组与燃料系统之间的管段设置一个可关闭的止回阀，有效隔离两种物质接触风险。(如图6所示)

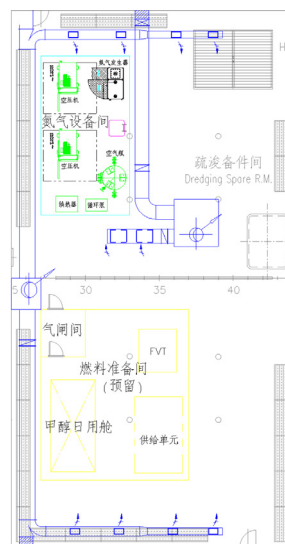


图6 甲醇舱预留系统

（三）积极意义

甲醇燃料具有清洁环保的特点，可实现全生命周期碳中和，与常规燃油相比，二氧化碳排放量最高降低92%，硫氧化物排放量减少99%，颗粒物减少90%。后续本船如使用该预留方案较传统柴油动力，可减少超7.5%的二氧化碳排放。如使用可再生资源

生产的绿色甲醇作为燃料，该主机的碳排放量将比传统柴油主机减少 95% 以上。

船舶甲醇燃料供给系统是甲醇动力船舶的核心设备，其国产化增强中国在新能源船舶领域的竞争力，补强造船产业链，为绿色船舶自主配套提供新动能该成果不仅推动了绿色碳中和技术在运营船舶上的集成应用，更通过甲醇这种清洁能源的规模化使用，大幅提高了我国在船舶绿色改造方面的技术创新能力和全球竞争力。

三、结束语

绿色涂装技术是当前工业涂装领域的核心发展方向，它通过环保材料、节能工艺和智能化管理，从源头上减少 VOCs 排放和

能耗，目标是实现高效、低污染、资源节约的涂装过程，其对企业意义远不止环保，它是一套能降本、增效、控风险、提价值的战略工具。

甲醇能用煤、天然气甚至生物质制取，大幅降低进口依赖。而且，因其常温液态的特性，在储运和加注方面比 LNG、氨或氢更具安全性和便利性；全生命周期碳排放更低，相比较传统燃料的船舶可减排 90% 以上，是当前最可行的绿色主燃料之一。

随着全球对生态环境保护的重视程度不断提升，船企和船舶的环保技术将不断迭代前进。未来，我们或许将看到更多融合新能源技术、具备自我修复功能的智能船型问世；通过大数据与云计算，实现跨区域水域治理的协同作业，甚至开发出能自主识别污染物种类并针对性处理的“智慧挖泥系统”。

参考文献

[1] 黄海鸿, 李新宇, 宋守许. 绿色制造理论方法及应用 [M]. 清华大学出版社, 2021.05.
[2] 王忠诚, 乐鹏峰. 甲醇燃料动力船舶操作与管理 [M]. 人民交通出版社, 2025.07.
[3] 胡以怀. 新能源与船舶节能技术 [M]. 科学出版社, 2015.10.
[4] 汪国平. 船舶涂料与涂装技术 [M]. 化学工业出版社, 2011.02.
[5] 金晓鸿, 马少卿. 船舶涂料与涂装手册 [M]. 化学工业出版社, 2016.07.

智慧工地背景下建筑施工安全监理信息化管理系统设计与实践

潘炜

建一（嘉兴）工程管理有限公司，浙江 嘉兴 314001

DOI:10.61369/ERA.2026020011

摘 要： 针对传统建筑施工安全监理中隐患跟踪滞后、风险预判不足、监管效率低下等问题，结合智慧工地建设趋势，本文设计并实现了一套建筑施工安全监理信息化管理系统。系统采用“感知层－网络层－平台层－应用层”四层一体化架构，以 Spring Boot 微服务与 Vue.js 3.0 为核心技术栈，融合 BIM、AI、物联网、5G 等关键技术，构建了包含 BIM 可视化监控、AI 不安全行为识别、隐患闭环管理等六大核心功能模块。通过 Autodesk Forge 实现危大工程三维可视化监控，基于 YOLOv8 算法达成 15 类不安全行为的实时识别与预警，依托 Activiti 7 工作流引擎构建全流程隐患闭环管理机制，并采用随机森林算法构建多源数据融合风险预警模型（验证集准确率达 92%）。

关 键 词： 智慧工地；建筑施工安全监理；信息化管理系统；BIM

Design and Practice of Information-Based Management System for Construction Safety Supervision in the Context of Smart Construction Sites

Pan Wei

Jianyi (Jiaxing) Engineering Management Co., Ltd., Jiaxing, Zhejiang 314001

Abstract： Aiming at the problems in traditional construction safety supervision, such as lagging hidden danger tracking, insufficient risk pre-judgment, and low supervision efficiency, combined with the trend of smart construction site, this paper designs and implements an information management system for construction safety supervision. The system adopts a four-layer integrated architecture of "perception layer-network layer-platform layer-application layer", takes Spring Boot microservice and Vue.js 3.0 as the core technology stack, and integrates key technologies such as BIM, AI, Internet of Things and 5G, and constructs six core functional modules including BIM visual monitoring, AI unsafe behavior identification and hidden danger closed-loop management. Three-dimensional visual monitoring of dangerous projects is realized by Autodesk Forge, and 15 kinds of unsafe behaviors are identified and warned in real time based on YOLOv8 algorithm. A closed-loop management mechanism of hidden dangers in the whole process is built by relying on Activiti 7 workflow engine, and a multi-source data fusion risk early warning model is built by using random forest algorithm (the accuracy rate of verification set is 92%).

Keywords： smart construction site; construction safety supervision; information management system; BIM

引言

随着新一代信息技术与工程建设领域的深度融合，“智慧工地”成为推动建筑行业转型升级的核心引擎。国家住建部明确提出要加快推进建筑施工信息化、智能化发展，鼓励利用物联网、BIM、人工智能等技术提升安全监管效能，构建全流程、可视化的安全管理体系。在此背景下，如何整合多源技术资源，打破传统监理模式的信息壁垒，实现安全风险的主动防控、精准监管与闭环管理，成为行业亟待解决的关键课题。基于此，本文针对传统安全监理的痛点问题，结合智慧工地建设需求，设计并实现了一套建筑施工安全监理信息化管理系统。系统整合 BIM 可视化、AI 行为识别、物联网数据采集、工作流引擎等核心技术，构建“感知－传输－处理－应用”全链路管理体系，覆盖危大工程监控、不安全行为识别、隐患闭环管理、风险分级预警等关键业务。

一、系统总体设计

（一）系统总体架构设计

党的十八大以来，我国建筑施工朝着智能化、绿色化、信息化方向发展，互联网、物联网、云计算等技术开始广泛应用到建筑施工安全质量管理当中，智慧工地、智慧城市等概念也应运而生^[1]。智慧工地背景下建筑施工安全监理信息化管理系统采用四层一体化架构，实现“数据从现场来、服务到现场去”的闭环管理。感知层通过物联网传感器、视频定位设备及移动终端全面采集现场数据；网络层采用“5G+WiFi+LoRa”融合方案保障数据安全高效传输；平台层作为系统“大脑”，由数据中台和技术中台负责数据处理与核心技术支撑；应用层面向不同用户，通过多终端提供 BIM 监控、AI 识别、隐患管理等精准化业务服务。

（二）系统技术架构选型

为构建稳定可靠、易维护且可扩展的系统，技术架构选型以后端 Spring Boot 微服务为核心，依托 Spring Cloud Alibaba 生态保障高可用；数据库采用“MySQL+MongoDB+Redis”组合，分别处理结构化、非结构化数据与热点缓存。前端以 Vue.js 3.0 构建响应式界面，通过 ECharts 与 Three.js（结合 Autodesk Forge API）分别实现数据可视化与 BIM 模型轻量化交互，并利用 Uni-app 实现跨端移动开发^[2]。核心技术组件紧密贴合业务：采用 Autodesk Forge 处理 BIM 模型，YOLOv8 算法进行 AI 视频分析，通过阿里云 IoT 平台以 MQTT 协议管理物联网设备，并集成 Activiti 7 工作流引擎与 JasperReports 报表引擎，共同支撑隐患闭环、数据统计等关键业务流程。

（三）系统功能模块设计

系统通过六大核心模块构建了完整的安全监理业务闭环，以 BIM 可视化监控模块为核心载体，实现模型三维交互、构件信息查询、物联网数据实时关联与施工进度联动；AI 不安全行为识别模块通过分析现场视频，自动识别并预警违规行为，同时留存证据并支持模型优化；隐患闭环管理模块覆盖从上报、派发、整改到复查销号的全流程，确保每个隐患都得到有效跟踪和处理；风险预警模块则融合多源数据，利用机器学习模型自动评估风险等级，实现主动防控与分级预警；数据统计分析模块将各类安全数据转化为可视化图表与标准化报告，为管理决策提供依据；系统管理模块提供用户权限、操作日志与数据备份等基础保障，确保整个系统安全稳定运行。

二、系统核心功能实现与关键技术应用

（一）开发环境与技术栈

系统开发采用 Spring Boot 2.7 与 Vue.js 3.0 技术栈，后端基于 JDK 11，前端依赖 Node.js 16，数据库选用 MySQL 8.0、MongoDB 6.0 及 Redis 6.2。开发团队使用 IntelliJ IDEA、VS Code、Postman 及 Navicat 等工具提升效率。所有服务通过 Docker 容器化，统一在 CentOS 7.9 云服务器上部署，以简化运维并保障环境一致性。测试环境与生产环境配置完全相同，通过模

拟真实数据开展全面测试，确保系统上线后稳定高效。

（二）基于 BIM 的危大工程可视化监控实现

基于 BIM 的危大工程可视化监控实现分为模型预处理、模型与数据关联、可视化功能开发三个核心环节，全程依托 Autodesk Forge 与 Three.js 技术构建高效可视化体系^[3]。模型预处理阶段，通过 Revit 构建含深基坑、高支模等危大区域细化构件的 BIM 模型，经 Forge API 轻量化转为 SVF 格式，解决加载慢问题；模型与数据关联环节，导入轻量化模型后绑定 BIM 构件与物联网传感器 ID，实现实时数据联动，预设阈值（如应力超 50MPa 标红异常）；可视化功能基于 Three.js 开发，支持模型三维交互、区域筛选，异常时高亮构件并弹窗预警，还可通过时间轴查询历史数据，支撑施工追溯分析。

（三）基于 AI 视频分析的不安全行为识别实现

基于 YOLOv8 与 TensorFlow，构建了覆盖数据准备、模型训练、实时识别与预警推送的完整技术链路，用于识别建筑施工不安全行为^[4]。采集并标注 10 万余帧涵盖 15 类不安全行为的图像数据，按 8:2 划分训练集与测试集。以 YOLOv8 为基础，利用 COCO 数据集预训练，再用施工数据微调优化，并融合行为识别算法分析运动轨迹以克服单帧局限^[5]。将模型部署至平台，通过 RTSP 接入 30 路摄像头进行实时分析，当检测到高置信度不安全行为时，系统自动截取视频并多渠道预警，同时将结果存入数据库，形成“识别-预警-处置-归档”闭环。

（四）安全隐患闭环管理流程实现

基于 Activiti 7 工作流引擎，系统构建了从上报到归档的全自动化安全隐患闭环管理流程。通过可视化工具定义“上报-审核-派单-整改-复查-销号”六个核心节点，并为各节点配置相应角色、权限与灵活的流转规则^[6]。施工人员通过移动端 APP 即可快速上报隐患，系统自动生成记录并通知监理工程师审核。审核通过后，由项目管理人员派单给指定责任人并设定整改期限；若不通过则退回上报人补充。责任人完成整改后提交复查申请，由监理工程师现场核查，通过则进入销号环节，不通过则退回重新整改^[7]。项目管理人员对复查通过的隐患执行销号，系统将全流程数据自动归档，形成完整可追溯的管理档案，实现了隐患管理的标准化、自动化与高效化。

（五）多源数据融合的风险预警模型实现

多源数据融合的风险预警模型通过整合物联网传感器、隐患、历史事故、天气及施工进度等多源数据，经清洗、标准化与时空对齐形成统一样本。基于涵盖人员、设备、环境、管理和工程五大类 12 项指标的评估体系，并采用层次分析法确定指标权重，构建风险评估模型^[8]。该模型选用随机森林算法进行训练，以多源数据为输入特征，风险等级为输出标签，通过参数优化使验证集准确率达 92%。模型部署后实时计算风险等级，当达到“高”或“极高”时自动触发分级预警，向项目管理人员、监理工程师及监管部门推送包含风险等级、核心指标、原因分析和处置

建议的预警信息，实现安全风险的精准预判与分级响应。

三、系统实践应用与效果分析

（一）项目概况

系统实践应用选取某市重点市政桥梁建设项目，该项目为跨江特大桥工程，主线全长2.3公里，包含主桥、引桥、互通立交及附属设施，总投资额约18亿元，工期24个月^[9]。项目施工场景复杂，涉及深基坑开挖、高支模搭设、大吨位起重机械作业等多项危大工程，施工人员峰值达320人，存在交叉作业多、安全风险点分散、监管难度大等特点。项目前期采用传统安全监理模式，曾出现隐患上报滞后、危大工程参数监控不及时、违规行为漏判等问题，为提升安全管理效能，该项目引入本智慧工地安全监理系统，覆盖主桥施工区、引桥作业区、材料堆放区及办公生活区四大核心区域，实现施工全周期安全监理信息化管控。

（二）系统部署与实施过程

系统部署与实施遵循“需求匹配－分步落地－迭代优化”原则，在45天内分四阶段完成。第一阶段（1-10天）组建专项工作组，完成现场勘查、确定12处重点监控区域及设备点位，并构建BIM模型与基础数据库^[10]。第二阶段（11-25天）进行硬件部署，安装沉降/位移、应力传感器共40台，高清摄像头42台，以及UWB定位基站与标签，并搭建“5G+WiFi+LoRa”融合网络，确保100%覆盖。第三阶段（26-35天）完成软件部署与系统联调，建立BIM与设备的关联映射，并针对数据延迟、模型卡顿等问题进行优化整改。第四阶段（36-45天）开展120余人的分角色培训，系统上线试运行，并根据用户反馈持续优化流程与参数，确保满足现场实际需求。

（三）应用效果评估

系统上线运行6个月后，从安全管理效能、工作效率、风险防控效果三个维度开展应用效果评估，通过对比系统应用前后的数据指标及现场调研结果，验证系统实用价值。安全管理效能大幅提升，隐患整改率从72%增至98%，整改周期从5.2天缩短至1.8天；AI不安全行为识别准确率达91%，有效预防事故；危大工程

监控及时预警18次，确保安全。工作效率显著提高，监理工程师日均隐患处理量从8条增至22条，日志生成时间从1.5小时缩至15分钟，整体效率提升超60%；移动端便捷上报节省80%时间成本，项目安全例会准备时间大幅缩短。风险防控效果突出，实现施工安全事故零发生，事故率较同类项目降低85%，违规行为下降81%；监管部门现场检查频次减少40%，精准度提升70%。现场调研也获得高度认可，89%的用户认为系统便捷实用，92%的监理工程师表示有效减轻了工作负担。

（四）存在的问题与改进方向

针对系统在复杂环境下的应用短板，将从四个方面进行改进。在网络覆盖薄弱的边缘区域，将增设LoRa网关与5G信号增强器，并采用数据分片传输技术以保障数据稳定；升级AI模型，通过扩充恶劣天气与复杂违规场景的训练数据、融合红外图像技术，并新增违规动火等算法模块，提升识别精度与广度；再次，升级数据接口，通过API网关模式实现与ERP等系统的深度对接，同步设备维护、材料管理等全维度数据，完善风险评估；完善移动端离线功能，支持离线拍摄视频和存储高清照片，并在网络恢复后自动同步。此项改进工作将分阶段推进，计划3个月内完成网络与移动端优化，6个月内完成AI与数据共享升级，全面提升系统的现场适应性与实用价值。

四、结束语

本文围绕智慧工地背景下建筑施工安全监理的痛点问题，完成了信息化管理系统的设计、开发与实践应用，构建了一套融合多技术、覆盖全流程的安全监理解决方案，为建筑施工安全管理的信息化转型提供了有益探索。建筑施工安全监理的信息化、智能化是行业发展的必然趋势。本文的研究与实践表明，通过新一代信息技术与安全监理业务的深度融合，能够有效提升安全管理效能，降低施工风险。期待本系统及相关研究成果能为推动建筑行业安全管理模式升级贡献力量，助力实现建筑施工领域的安全发展、高质量发展。

参考文献

- [1] 崔进. 基于智慧工地的信息化安全质量管理体系研究[J]. 中国建筑金属结构, 2023, 22(3): 187-189. DOI: 10.20080/j.cnki.ISSN1671-3362.2023.03.060.
- [2] 陈惠波. 建筑监理中的安全生产管理与施工现场安全监管研究[J]. 工程技术研究, 2024, 6(5): 59-61. DOI: 10.12417/2705-0998.24.05.020.
- [3] 高壮超. 建筑智能化系统与信息化监理[J]. 建筑·建材·装饰, 2022(1): 4-6. DOI: 10.3969/j.issn.1674-3024.2022.01.002.
- [4] 檀智超. 建筑工程监理在安全管理中的关键作用与实施[J]. 建筑与施工, 2024, 3(12): 114-115. DOI: 10.12417/2811-0528.24.12.054.
- [5] 王焕东. 地铁站信息化施工模型构建及施工过程中的安全协同管理系统研究[J]. 中国建设信息化, 2023(15): 60-63.
- [6] 吕卫柯. 建筑施工企业安全生产信息化技术的应用与展望[C]// 华东地区建筑安全联谊会三届四次会论文集. 2014: 385-389.
- [7] 胡延庆, 郭峰村. 建筑工程施工中信息化管理的应用与发展[J]. 中国航班, 2024(14): 134-136.
- [8] 刘宗. 建设工程施工安全管理信息系统建设探讨[J]. 奥秘, 2024(26): 121-123.
- [9] 黎林峰. 信息化提升建设工程安全监管水平[J]. 中国建设信息, 2014(8): 32-33.
- [10] 刘金汉. 安全管理对建筑工程项目管理的意义[J]. 门窗, 2021(17): 141-142. DOI: 10.12258/j.issn.1673-8780.2021.17.071.

智能化检测设备在建筑节能现场检测与验证

逢恒增, 宿兴燕, 于云庆, 赵松伟
山东建元工程检测鉴定有限公司, 山东 青岛 266400
DOI:10.61369/ERA.2026020025

摘 要 : 在“双碳”战略推进背景下,建筑节能成为降低能源消耗、缓解环境压力的关键领域,而现场检测与验证是保障建筑节能工程质量的核心环节。传统检测手段存在效率低下、精度不足、主观性强等弊端,难以满足现代建筑节能检测的精细化需求。智能化检测设备凭借自动化、精准化、数字化的技术优势,逐步取代传统检测方式,成为建筑节能现场检测的主流方向。本文阐述建筑节能现场检测与验证的核心要求,梳理想能化检测设备的技术特征与常见类型,结合实际应用场景分析设备的应用价值,探讨当前应用中存在的问题,并提出优化路径,为智能化检测设备在建筑节能领域的规范化应用提供参考。

关 键 词 : 智能化检测设备; 建筑节能; 现场检测; 节能验证; 精准检测

Intelligent Detection Equipment in On-site Detection and Verification of Building Energy Conservation

Pang Hengzeng, Su Xingyan, Yu Yunqing, Zhao Songwei
Shandong Jianyuan Engineering Testing and Appraisal Co., Ltd. Qingdao, Shandong 266400

Abstract : Against the backdrop of the advancement of the "dual carbon" strategy, building energy conservation has become a key area for reducing energy consumption and alleviating environmental pressure, while on-site detection and verification are the core links to ensure the quality of building energy conservation projects. Traditional detection methods have drawbacks such as low efficiency, insufficient precision, and strong subjectivity, making it difficult to meet the refined requirements of modern building energy conservation detection. Intelligent detection equipment, with its technical advantages of automation, precision, and digitalization, has gradually replaced traditional detection methods and become the mainstream direction of on-site detection for building energy conservation. This paper expounds the core requirements of on-site detection and verification of building energy conservation, sorts out the technical characteristics and common types of intelligent detection equipment, analyzes the application value of the equipment combined with practical application scenarios, discusses the problems existing in current applications, and puts forward optimization paths, providing a reference for the standardized application of intelligent detection equipment in the field of building energy conservation.

Keywords : intelligent detection equipment; building energy conservation; on-site detection; energy conservation verification; precision detection

引言

建筑行业作为能源消耗的重点领域,其能源消耗量占全社会总能耗的比重超过30%,其中建筑使用阶段的能耗占比达到20%以上,建筑节能已成为实现“碳达峰、碳中和”目标的重要突破口。建筑节能现场检测与验证是对建筑围护结构保温性能、门窗气密性、采暖通风与空气调节系统能效等关键指标的专项检测,直接关系到建筑节能设计目标的实现,是保障节能工程质量、杜绝“重设计、轻施工”现象的重要手段。

传统建筑节能现场检测多依赖人工操作,如采用手动热流计测量围护结构热传导系数、通过人工密封法检测门窗气密性等,存在检测周期长、数据误差大、检测过程受环境干扰严重等问题。随着建筑节能标准的不断提高,对检测精度和效率的要求也日益严苛,传统检测手段已难以适配。智能化检测设备基于物联网、传感器、大数据等先进技术,能够实现检测过程的自动化、数据采集的精准化和检测结果的数字化,为建筑节能现场检测与验证提供了高效解决方案。本文基于建筑节能现场检测的核心需求,系统分析智能化检测设备的应用价值与实践路径,为推动建筑节能检测行业的智能化升级提供理论与实践支撑。

作者简介: 逢恒增(1985.12-),男,山东青岛人,大专,工程师,研究方向:建筑工程检测。

一、建筑节能现场检测与验证的核心要求

建筑节能现场检测与验证的核心目标是核查建筑节能工程是否符合设计要求和相关国家标准,如《建筑节能工程施工质量验收标准》(GB 50411-2019)等,确保建筑实际节能效果达到预期。其核心要求主要体现在以下三个方面:

一是检测指标的全面性。建筑节能涉及围护结构、采暖通风、空调系统、照明系统等多个环节,检测指标需覆盖围护结构传热系数、门窗气密性、空调系统能效比、照明功率密度等关键参数。不同类型建筑(如居住建筑、公共建筑)的节能要求存在差异,检测指标需根据建筑类型和设计标准进行针对性选取,确保检测结果能够全面反映建筑的节能性能。

二是检测数据的精准性。检测数据的准确性直接决定了节能验证的可靠性,因此需严格控制检测过程中的误差。传统检测方法受人工操作、环境因素等影响,数据误差往往较大,而现代建筑节能标准对检测精度的要求不断提高,如围护结构传热系数检测误差需控制在 $\pm 5\%$ 以内,门窗气密性检测需精确到每小时换气次数。这就要求检测设备具备较高的测量精度和抗干扰能力。

三是检测过程的高效性。建筑节能现场检测多在施工阶段或竣工验收阶段进行,检测周期直接影响工程进度。传统检测方法往往需要长时间的人工值守和数据记录,检测效率低下,难以适应大规模建筑工程的检测需求。因此,检测过程需具备高效性,能够在较短时间内完成多指标的同步检测,同时减少对施工或建筑使用的干扰。^[1-5]

二、智能化检测设备的技术特征与常见类型

(一) 技术特征

自动化检测:设备可通过预设程序自动完成检测流程,如自动调节检测参数、自动采集数据、自动停止检测,减少人工干预,避免人为操作带来的误差。

精准化测量:采用高精度传感器和先进的信号处理技术,能够有效降低环境干扰对检测结果的影响,提高数据测量精度。同时,设备具备自校准功能,可定期对传感器进行校准,确保检测数据的稳定性和可靠性。

数字化传输与分析:检测数据可通过无线通信(如WiFi、蓝牙、4G/5G)实时传输至终端设备(如电脑、手机),并借助专业软件进行数据处理、分析和生成检测报告。数字化管理不仅提高了数据处理效率,还便于检测数据的存储、查询和追溯。

便携化与集成化:针对现场检测的特殊性,智能化检测设备多采用便携化设计,体积小、重量轻,便于在建筑现场移动使用。同时,设备具备多指标集成检测功能,可同步检测多个节能参数,如集成式建筑节能检测系统可同时检测围护结构传热系数、门窗气密性和室内温湿度。

(二) 常见类型

1. 智能化围护结构传热系数检测设备。该设备基于热流计法,通过高精度热流传感器和温度传感器同步采集围护结构的热流密

度和内外表面温度,结合自动计算软件得出传热系数。设备具备环境温度补偿功能,可有效消除室外温度波动对检测结果的影响,检测精度较传统手动设备提高30%以上。部分高端设备还支持无线远程控制,可实现无人值守检测。

2. 智能化门窗气密性检测设备。采用压力差法,通过自动气压调节系统控制检测腔体内的压力差,利用高精度流量传感器测量空气渗透量,进而得出门窗的气密性等级。设备可自动完成压力稳定、数据采集、结果计算等流程,检测周期较传统设备缩短50%,且检测数据的重复性更好。同时,设备具备数据异常报警功能,可及时发现检测过程中的问题。

3. 智能化空调系统能效检测设备。该设备可同步采集空调系统的进出水温度、流量、功率等参数,通过内置算法自动计算制冷系数(COP)、能效比(EER)等关键指标。设备支持多通道数据采集,可同时检测多个空调机组的运行参数,适用于大型公共建筑的空调系统节能检测。此外,设备可与空调控制系统对接,实现检测数据与运行数据的联动分析。

4. 智能化照明系统节能检测设备。主要用于检测照明功率密度、照度均匀度等指标,通过高精度功率传感器和照度传感器采集相关数据,结合建筑面积自动计算照明功率密度。设备具备现场数据实时显示和打印功能,方便检测人员及时获取检测结果。部分设备还支持光照强度的自动调节,可模拟不同使用场景下的照明节能效果。

三、智能化检测设备在建筑节能现场检测与验证中的应用实践

(一) 居住建筑围护结构节能检测

在某居住小区的节能工程竣工验收中,采用智能化围护结构传热系数检测设备对墙体、屋面的传热系数进行检测。检测前,设备通过卫星定位和环境传感器自动采集检测地点的经纬度、海拔、室外温度等环境参数,并根据参数自动设置检测参数。检测过程中,设备同步采集热流密度和内外表面温度数据,每5分钟记录一次数据,持续检测24小时。检测数据通过4G网络实时传输至后台管理系统,软件自动剔除异常数据并计算传热系数。结果显示,该小区墙体传热系数为 $0.52 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,屋面传热系数为 $0.45 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,均符合《严寒和寒冷地区居住建筑节能设计标准》(JGJ 26-2018)的要求。与传统检测方法相比,此次检测周期缩短了1天,检测数据误差控制在 $\pm 3\%$ 以内,检测效率和精度均显著提升。

(二) 公共建筑门窗气密性检测

某大型商场的节能改造工程中,采用智能化门窗气密性检测设备对改造后的外窗进行气密性检测。检测时,设备自动密封门窗洞口,通过气压调节系统逐步提升检测腔体内的压力差(从50 Pa到100 Pa),同步测量不同压力差下的空气渗透量。设备自动绘制压力差-渗透量曲线,并根据曲线得出门窗的气密性等级为8级,符合公共建筑节能设计标准的要求。

(三) 空调系统能效验证

在某写字楼的空调系统节能验收中,采用智能化空调系统能效

检测设备对空调机组的运行能效进行检测。设备通过传感器采集空调机组的进出水温度、流量、压缩机功率等参数,每10分钟记录一次数据,持续检测48小时。后台软件对采集到的数据进行分析,计算出空调系统的平均COP为3.2,能效比符合设计要求。同时,软件通过数据分析发现空调系统在部分时间段存在运行负荷过高的问题,建议优化空调运行策略。基于检测结果,施工单位调整了空调系统的控制参数,使空调系统的运行能效进一步提升,预计每年可节约电能12000 kWh。

四、智能化检测设备应用中的优势与挑战

优势:

1. 提升检测精度与可靠性。智能化检测设备采用高精度传感器和先进的信号处理技术,能够有效降低环境干扰和人工操作带来的误差,检测数据的准确性和重复性显著提升。
2. 提高检测效率。设备可实现检测过程的自动化,减少人工值守时间,同时具备多指标集成检测功能,可同步完成多个参数的检测。
3. 实现数字化管理。检测数据可实时传输至后台系统,实现数据的数字化存储、分析和追溯。检测报告可自动生成,减少人工编制报告的工作量,同时便于监管部门对检测结果进行核查。

挑战:

1. 设备购置与维护成本高。智能化检测设备融合多种先进技术,初始购置成本较高,一般是传统设备的2-5倍,这对中小型检测机构造成了较大的资金压力。同时,设备的维护需要专业技术人员,维护成本也较高,如传感器的校准、软件的升级等都需要额外的费用。
2. 专业技术人才匮乏。智能化检测设备的操作需要具备传感器技术、自动控制技术、软件操作等多方面知识的专业人才。目前,建筑节能检测行业的从业人员多为传统检测人员,对智能化设备的操作和维护能力不足,导致部分设备无法充分发挥其功能。
3. 现场检测环境复杂。建筑现场的环境条件较为复杂,如温度波动大、灰尘多、电磁干扰强等,可能影响智能化检测设备的正常运行和检测精度。

五、优化智能化检测设备应用的路径

降低设备购置与维护成本:

政府可出台相关扶持政策,对中小型检测机构购置智能化检测设备给予补贴,降低其资金压力。同时,鼓励设备生产企业加大研发投入,优化设备结构,降低设备生产成本。此外,建立第三方设备维护服务平台,为检测机构提供专业的设备维护服务,降低维护成本。

加强专业人才培养:

高校和职业院校可增设建筑节能智能化检测相关专业,培养具备多学科知识的专业人才。同时,行业协会和检测机构应定期组织从业人员进行培训,内容包括设备操作、维护、数据处理等方面,提高从业人员的专业技能。此外,建立人才激励机制,吸引更多的专业人才投身于建筑节能检测行业。

优化现场检测环境适应性:

设备生产企业应加强对设备环境适应性的研发,提高设备的抗干扰能力、防尘防水能力和温度适应范围。例如,采用密封性能更好的传感器外壳、优化设备的散热系统等。同时,检测人员在检测前应充分了解现场环境条件,采取必要的防护措施,如搭建临时防护棚、安装抗干扰设备等,确保设备正常运行。

六、结论

智能化检测设备凭借自动化、精准化、数字化的技术优势,在建筑节能现场检测与验证中发挥着越来越重要的作用,能够有效提升检测精度和效率,实现检测数据的数字化管理,为建筑节能工程质量提供有力保障。然而,当前智能化检测设备的应用仍面临购置维护成本高、专业人才匮乏、标准规范不完善、环境适应性不足等挑战。

为推动智能化检测设备在建筑节能领域的广泛应用,需政府、企业、检测机构等多方协同发力,通过出台扶持政策、加强人才培养、完善标准规范、优化设备环境适应性等措施,解决应用中的突出问题。未来,随着技术的不断进步和应用的不断深入,智能化检测设备将朝着更加便携化、集成化、智能化的方向发展,为建筑节能事业的发展提供更加强有力的技术支撑,助力“双碳”战略目标的实现。

参考文献

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑节能工程施工质量验收标准 (GB 50411-2019)[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 严寒和寒冷地区居住建筑节能设计标准 (JGJ 26-2018)[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
- [3] 李明, 王军. 智能化检测技术在建筑节能检测中的应用 [J]. 建筑科学, 2021, 37(8): 123-128.
- [4] 张静, 刘勇. 建筑节能现场检测设备的智能化发展趋势 [J]. 节能技术, 2022, 40(3): 265-269.
- [5] 王浩, 陈丽. 智能化门窗气密性检测设备的应用与优化 [J]. 建筑节能, 2020, 48(11): 156-160.

BIM 在建筑工程管理中的应用

段炼

重庆市南岸区住房保障中心, 重庆 400000

DOI:10.61369/ERA.2026020028

摘 要 : 当前的建筑工程建设更加复杂, 同时建筑工程质量标准也在不断提升。为达到现阶段的建筑工程建设要求, 工程管理工作必不可少。而如何进行科学有效的工程管理就成为相关建筑企业和工作人员研究的重点。得益于 BIM 技术的可视化、模拟性、协同性及数据整合等功能, 建筑工程管理水平大为提升。为了充分发挥出 BIM 在建筑工程管理中的应用优势, 本文通过简要介绍 BIM 的基本概念与技术特点, 结合实际工程案例, 对其在成本、进度、安全、物料及质量管理等方面的具体应用方式展开了深入分析与探讨。

关 键 词 : BIM; 建筑工程; 项目管理; 数字化技术

Application of BIM in Construction Project Management

Duan Lian

Chongqing Nan 'an District Housing Security Center, Chongqing 400000

Abstract : modern construction projects have become increasingly complex, while quality standards continue to rise. To meet contemporary construction requirements, effective project management has become essential. The scientific and efficient implementation of such management has emerged as a key focus for construction enterprises and professionals. Leveraging BIM technology's capabilities in visualization, simulation, collaboration, and data integration, construction project management has achieved significant improvements. To fully harness BIM's advantages in construction management, this paper introduces its fundamental concepts and technical features, then analyzes its practical applications in cost control, schedule management, safety assurance, material management, and quality assurance through real-world case studies.

Keywords : BIM; construction engineering; project management; digital technology

引言

在新时代中, 随着建筑技术水平的不断提高, 建筑工程的规模日趋庞大, 结构形式与施工流程也愈加复杂。传统的项目管理方式已难以应对当前建筑行业对效率、质量和精细化管理的高要求。BIM 技术作为建筑信息模型的综合应用平台, 可以有效地解决建筑工程管理中的各种挑战, 包括提高信息协同效率、降低错误与变更率、优化资源分配等方面。其应用不仅能够为建筑工程的顺利进行创造更加有利的条件, 还在推动行业数字化转型中发挥关键作用。此外, BIM 技术的运用还可以优化建筑管理效果, 促进科学和有效的管理计划执行。借助其独特的数字化建模能力, BIM 能够生成高精度的三维立体模型, 辅助管理人员和工程师制定更科学、合理的建筑工程施工方案与决策路径。

一、BIM 技术的概述

BIM 技术是信息技术高度发展背景下诞生的新产物, 是一种基于数字化模型的创新型建设工程管理工具。该技术不仅涵盖三维几何模型的构建, 更集成了时间、成本、设备、材料、能耗乃至可持续性等多维信息属性的统一管理。BIM 以真实、准确的工程数据为基础, 通过对各类数据进行系统性的采集、处理、分析与整合, 将其转化为可用于建模的结构化参数, 从而构建出高精

度的三维虚拟信息模型。在传统工程模式下难以直观表达的文字说明、统计数据和二维图纸, 通过计算机与专业 BIM 软件的处理, 能够转变为高度可视化、动态模拟乃至可交互的信息表达形式。基于这一技术原理与功能特点, BIM 技术可广泛应用于建筑与基础设施项目的全生命周期, 包括前期的规划与策划、设计阶段的方案比选与优化、施工过程的可视化管控与进度模拟, 以及后期运营维护阶段的资产管理与性能监测。在全面收集与高效利用项目信息的基础上, BIM 实现了跨阶段、多参与方的信息共享

与协同工作，显著提升了项目透明度与管理效率，为现代建筑行业的精细化、智能化发展提供了关键的技术支撑与数据基础。

二、BIM 在建筑工程管理中的应用价值

（一）三维立体化渲染

建筑工程信息数据模型分析是在获取原有二维数据图像的信息基础上，实现对原有数据模型信息的三维立体解析，从而通过数据模型本身所具备的图像渲染功能，进一步完成对建筑工程质量管理的全过程信息分析。该模型实现了三维图像渲染功能，显著增强了建筑信息模型本身的视觉代入感。它融合了静态数据与动态数据，呈现出极具视觉冲击力的效果，大大提升了信息模型在方案展示、碰撞检测、施工模拟等多方面的应用价值。借助高精度三维可视化能力，BIM 不仅能够真实还原建筑外观和内部结构，还可在不同光照、材质及视角条件下进行实时渲染展示，有效辅助设计方、施工方与业主进行更直观的沟通与决策。此外，在项目汇报与审批阶段，三维渲染成果能够帮助各方快速理解复杂构造与空间关系，减少因信息表达不清导致的误解与返工，显著提高设计成果的审批效率和方案修改的响应速度。

（二）合理调配施工资源

将 BIM 技术运用于建筑工程管理中，可以实现施工资源的科学合理调配，提高施工效率并优化资金使用效果。通过 BIM 技术生成的三维模型，可以实时监控施工进度，并且精确计算施工各阶段所需人力、设备、物资等资源的类型、数量与分配方式。同时，BIM 系统还能提供科学的决策支持，通过模拟不同施工方案下的资源消耗与工期效果，帮助管理者优化调配策略，减少浪费，降低项目总体成本。因此，应用 BIM 技术对施工资源进行合理调配，是提升建筑工程管理效率和质量的重要策略之一。具体而言，BIM 可结合进度计划（如 4D 模拟）实现资源需求的动态可视化，提前识别资源分配冲突或高峰需求时段，从而制定更加均衡的采购与进场计划。在施工过程中，利用 BIM 模型的实时数据更新功能，项目团队能够及时响应现场变化，动态调整资源分配，避免设备闲置或人员待工，进一步提高资源利用效率与工程建设整体经济效益。

三、BIM 在建筑工程管理中的应用

BIM（建筑信息模型）技术作为现代建筑工程管理的重要工具，借助其多维信息集成、可视化表达与协同管理能力，有效提升了建筑项目全过程的管理精度与效率。它通过构建数字化模型，整合设计、施工及运维阶段的关键数据，为项目管理提供全面支持，从而推动建筑行业向信息化、智能化方向转型。以下将分别从成本、进度、安全、物料与质量五个方面，具体阐述 BIM 在建筑工程管理中的实际应用。

（一）成本管理方面的应用

BIM 技术与建筑工程成本管理相结合，能够实现对工程造价的精细化管理。利用 BIM 的数据集成与分析能力，可对建筑工程

进行实时数据计算，建立与实际施工动态联动的 5D 模型（3D 空间 + 时间 + 成本），从而对工程建设过程进行科学模拟与评估，实现成本的精准预测与控制。例如，在项目早期阶段，BIM 可通过历史数据与模型参数快速生成多版本概算，辅助投资决策；在施工阶段，则能动态监控人、材、机等资源的实际消耗，及时进行造价偏差分析。此外，BIM 技术能够为成本管理提供全面数据支持与决策依据，帮助管理人员更准确地编制预算、评估变更影响，并优化项目执行计划。它还可辅助实现项目各阶段的成本跟踪与对比分析，支持生成周期性成本报告与审计材料，显著提升工程成本管理的透明度和有效性，最终达到降本增效的管理目标。

（二）进度管理方面的应用

BIM 技术在建筑工程进度管理中的运用，有助于确保工程在规定时间内顺利完成，同时增强进度管理的动态调控能力。具体体现在以下几个方面：首先，借助 BIM 的可视化、模拟性与协调性，可以制定更专业且切实可行的建筑工程进度规划，优化施工顺序与路径，改善施工流程，从而提高效率。例如，利用 BIM 进行 4D 施工模拟（3D 模型 + 时间维度），可直观展示各阶段工程进展，识别工序冲突，提前调整施工方案。其次，通过 BIM 平台可实现进度信息的实时共享与更新，支持多参与方协同管理，及时发现进度偏差并采取纠偏措施。项目团队可利用 BIM 看板、移动终端等工具随时查看任务状态，增强沟通效率。此外，BIM 技术的应用能够模拟不同施工条件下的进度情景，为管理者提供决策参考，最大限度发挥 BIM 在工期优化与管理保障中的作用，特别是在应对复杂工程、恶劣天气或资源受限等情况时，BIM 的预测能力显得尤为关键。

（三）在建筑工程安全管理中的应用

以往很多建筑企业过分强调经济效益，忽视了安全管理对工程整体效益的影响，导致管理存在漏洞，安全事故防范不足。而当前建筑行业对安全目标的要求日益严格，管理人员必须更加系统性地应对施工安全风险。通过将 BIM 技术与安全管理相结合，可在建筑工程全生命周期中实现动态化安全监测与控制。BIM 模型能够整合施工条件、设备操作、人员动线等多维信息，进行施工过程模拟，帮助管理人员提前识别潜在危险源、评估风险等级，并协助制定有针对性的风险防控措施与应急预案。例如，在模型中进行高空作业、起重吊装等危险工序的仿真，可预判可能发生的冲突与事故，进而优化施工组织与安全设施布置。这不仅能有效预防安全事故的发生，也能在问题出现时快速响应，通过模型迅速定位风险点并启动应急机制，确保施工过程安全可控，最终实现从被动应对到主动防控的转变。

（四）在物料管理方面的应用

BIM 技术能够提升施工材料管理的整体协调性与透明度。传统的二维管理方式难以全面反映物料在实际施工中的使用情况和调度问题，尤其容易因信息不贯通导致资源浪费或供应中断。尤其对于大型复杂工程项目，物料种类繁多、管理流程复杂，BIM 技术可以充分整合与协调建筑材料在采购、仓储、配送及使用各环节的数据，实现物料管理的精准化与可视化。通过立体化、多维度的管理模式，项目参与方可直观把握物料现状，减少信息误

差和沟通成本。例如，BIM 模型可自动生成材料清单，关联供应链信息，实现从订单到安装的全过程追踪。此外，BIM 系统具备较强的仿真与分析能力，能够在施工前模拟物料供应路径和使用计划，帮助识别潜在瓶颈，优化库存管理与配送方案，从而提升整体施工效率并节约经济成本，避免因待料导致的工期延误。

（五）在工程质量管理的应用

建筑工程的实施环境复杂多样，地理、水文、气候等因素均可能影响工程质量与管理效果。BIM 技术通过集成多源数据与构建虚拟模型，将这些影响因素纳入统一平台进行分析，从而提升质量管理的针对性与效率。例如，管理人员可将工程材料、构件属性、施工工艺等信息输入 BIM 系统，生成反映实际工程状态的 3D 模型，直观把握各阶段所需材料的规格与数量，实现原材料的合理分配与使用追踪。同时，可建立专门的质量管理数据库，对材料进场、检测报告、施工验收等环节进行全过程记录与分析，实现质量数据的结构化存储与快速检索。现场管理人员能够利用 BIM 系统实时监控质量状况，结合移动设备开展现场巡检，将实测数据与模型要求进行比对，实施精细化管控，避免质量缺陷。

这不仅有助于提高工程整体质量水平，还能避免因材料问题、工艺不合格导致的工期延误与成本上升，为项目顺利交付提供坚实基础。^{[1][2][3][4]}

四、结语

总的来说，BIM 技术作为一种集成化、信息化的管理工具，能够显著提升建筑工程管理的效率和质量。通过其强大的可视化、协同性与数据整合能力，BIM 使设计、施工与运营各阶段实现信息无缝传递，减少了因信息不对称带来的错误和延误，同时有助于降低成本、优化资源配置，实现项目整体效益的最大化。随着数字化建造时代的到来，BIM 的应用将进一步推动建筑行业的技术变革与管理创新，包括智慧工地、预制装配、绿色建筑等方向的深入融合。因此，建筑企业及相关管理团队应当更加重视 BIM 技术的发展与推广，积极引入培训机制、建立标准化流程，并不断加强技术融合与管理优化，从而确保建筑工程管理计划的高效执行与项目目标的顺利达成，迎接行业未来的挑战与机遇。

参考文献

[1] 王清冬. BIM 在建筑工程管理中的应用研究 [J]. 居舍, 2022(01): 147-149.
[2] 林仲杰. 基于 BIM 视角的建筑工程管理透视与反思 [J]. 现代物业: 中旬刊, 2022(9): 3.
[3] 张清阳, 李立波. 建筑信息模型 (BIM) 技术在工程施工中的应用研究 [J]. 工程管理学报, 2021, 35(2): 112-116.
[4] 刘宏伟. 基于 BIM 的建筑工程全过程管理研究 [J]. 建筑技术开发, 2020, 47(15): 78-80.

医院外墙保温装饰一体板施工质量控制要点研究

高斯佳

北京大学第三医院秦皇岛医院, 河北 秦皇岛 066000

DOI:10.61369/ERA.2026020039

摘 要 : 医院外墙保温装饰一体板的施工质量直接关系到建筑节能性能、围护结构稳定性及医疗环境的安全性。本研究以医院建筑的功能需求为基础, 围绕一体板材料特性、基层处理要求、安装节点控制及施工过程管理展开分析, 提出影响施工质量的关键环节以及相应的控制策略。研究旨在通过规范化与精细化的质量管理, 提高外墙系统的整体性能与使用寿命, 为医疗建筑外墙施工提供可操作的质量控制依据。

关 键 词 : 医院建筑; 保温装饰一体板; 施工质量控制; 节点处理; 材料性能

Research on Key Points of Construction Quality Control for Hospital Exterior Wall Insulation and Decoration Integrated Panels

Gao Sijia

Peking University Third Hospital Qinhuangdao Hospital, Qinhuangdao, Hebei 066000

Abstract : The construction quality of the integrated insulation and decoration panels for hospital exterior walls is directly related to the energy-saving performance of the building, the stability of the envelope structure, and the safety of the medical environment. Based on the functional requirements of hospital buildings, this study conducts an analysis around the material characteristics of integrated panels, the requirements for base treatment, the control of installation nodes, and the management of the construction process. It proposes the key links that affect the construction quality and the corresponding control strategies. The research aims to enhance the overall performance and service life of the exterior wall system through standardized and refined quality management, providing operational quality control basis for the exterior wall construction of medical buildings.

Keywords : hospital building; integrated plate for thermal insulation and decoration; construction quality control; node processing; materials performance

引言

医院外墙围护结构的性能稳定性不仅影响建筑能耗控制, 也关乎室内医疗环境的舒适性与安全性。在众多外墙体系中, 保温装饰一体板因施工周期短、保温与装饰功能合一而被广泛应用于医疗建筑。然而, 一体板系统对材料匹配度、基面条件、连接构造以及工序衔接具有较高要求, 任何环节的不当处理都可能导致渗水、脱落、保温失效等风险。围绕医院这一特殊建筑类型, 对一体板施工质量进行全过程控制的研究, 不仅直指工程实践中的关键难点, 也为提升外墙系统的长期稳定性提供了思路。

一、医院外墙一体板施工面临的质量风险点

医院外墙保温装饰一体板在医疗建筑中应用频率不断提升, 但其施工过程受多重因素影响, 质量风险表现形式更为复杂。医院建筑对温湿度稳定性、外墙防水等级、围护结构长期可靠性具有更高要求, 一体板系统若在基层平整度、含水率、附着力等条件上未达到技术标准, 极易在后期运行中显现隐患^[1]。部分工程中, 为赶工而忽略基层清洁度和干燥度, 导致粘结层难以形成均

匀强度, 影响系统整体稳定性。医院外墙面通常存在造型多、开洞多、结构转换频繁等特征, 板材切割与衔接变得更加复杂, 若处理稍有偏差, 可能在外墙受风压和冷热循环作用下产生翘边、开裂或局部松动问题, 进而影响建筑使用性能。

施工环境的不确定性也放大了质量风险。在气温变化较大的地区, 一体板粘结层在低温环境下固化速度减缓, 而在高温状态下可能出现快速失水问题, 这些因素都会导致粘结强度下降。医院项目往往穿插多工种施工, 外立面作业受其他工序干扰较为明

作者简介: 高斯佳, 女, 1984年7月生, 汉族, 河北承德, 本科, 高级工程师。15年专注于建筑设计与工程管理领域, 深耕三甲医院及专项医疗设施建设, 精通净化工程、防辐射工程、医疗气体系统等特殊工艺, 在装配式建筑设计施工、BIM全周期应用等方面实践经验丰富。长期推动绿色智慧医院建设。

显,部分板材在安装后遭受碰撞、污染或二次拆装,使得一体板系统的连续性遭到破坏。外墙转角、窗口周边、设备孔洞等特殊部位更容易产生应力集中,若节点构造未按标准执行,极有可能形成渗水路径,破坏医院内部的恒温洁净环境。

外墙一体板系统的复杂性在后期运行阶段同样带来潜在风险。医院外墙长期承受风压、雨水冲刷、紫外线辐射以及冷热交替影响,装饰层、保温层与粘结层之间的复合关系必须具备良好的耐久性。一旦早期施工中的不规范行为导致界面粘结不牢、锚固件布置不足或密封胶老化速度加快,系统可能在数年内表现出渗湿、空鼓或板块变形等问题。医院建筑往往面积大、层数多,对一体板的平整度、接缝连续性 & 色差控制要求更高,任何局部缺陷都可能影响建筑整体观感,并对保温性能 & 防水性能造成连锁影响。医院外墙一体板施工面临的质量风险来自材料、环境、节点、工序衔接等多方面因素叠加,需要在全过程中对潜在问题保持敏感性 & 并进行严格控制。

二、材料与基面条件的关键控制要求

医院外墙保温装饰一体板的应用对材料性能提出了更为严格的要求,板材的保温层、装饰层与粘结层必须在结构稳定性、耐候性和阻燃性能方面满足医院建筑的特殊环境需求。保温芯材需具备低导热系数、均匀密度和良好的尺寸稳定性,以确保在长期冷热循环中不产生明显收缩或膨胀;装饰面层必须具备抗紫外线、抗污染和耐清洗能力,以适应医院外墙维护频率高、洁净度要求强的特征^[2]。锚固件、粘结剂、密封胶等配套材料也需符合系统兼容性要求,特别是在耐老化、耐水性和耐冻融方面必须通过相应检测。若材料来源不稳定、产品批次差异过大或未进行入场复验,极易造成粘结强度不足、接缝开裂 & 保温性能衰减等问题。

基面条件的准备直接决定后续施工质量。医院建筑外墙基层常涉及混凝土剪力墙、填充墙 & 局部幕墙结构,各部位基层强度、平整度、含水率 & 表面清洁度均需满足一体板安装要求。基层若存在疏松、空鼓或大面积裂缝,粘结层难以形成稳定界面,板材在受风压及自重作用下会出现局部脱离的风险。含水率过高会导致粘结砂浆水化不均,形成潜在弱界面;平整度偏差过大则使板材无法紧密贴合,增加锚固件受力,影响系统整体稳定性。因此,基层处理需包含结构缺陷修补、界面剂涂刷、找平层施工等工序,任何环节稍有疏忽都会影响一体板系统的长期可靠性。

医院项目对节点处理的要求更为严苛,特殊部位的基面状态对材料性能的发挥起到关键影响。窗口周边、门洞四角、伸缩缝、女儿墙收口等区域往往存在应力集中、渗水隐患 & 结构变化,若基面未进行加强处理,密封材料无法形成稳定附着,装饰层边缘容易出现翘曲或脱落。在医院外墙中,经常需要在不同材质的基层之间转换,例如从混凝土过渡到金属框架或设备安装区域,这些部位对界面兼容性要求更高。不同基底之间的差异性若未通过界面处理剂、加强网布或特制连接件进行过渡,保温系统会在运行中出现错动、裂缝或板缝失稳。材料性能必须与基层条

件形成匹配关系,通过系统化控制才能确保医院外墙保温装饰一体板的整体质量。

三、安装过程中的核心技术控制措施

医院外墙保温装饰一体板的安装过程对技术控制的精细度要求极高,每一道工序都直接影响系统的粘结可靠性 & 整体稳定性。施工前的放线定位需以建筑立面控制基准为依据,通过激光测距仪 & 水平仪确保安装轴线的准确性,避免板缝不均、立面错台等质量缺陷。一体板安装常采用“粘结+机械锚固”复合工艺,粘结砂浆的涂抹厚度、均匀度 & 饱满度必须达到规范要求,以保证板材与基层形成连续、稳定的粘结界面^[3]。锚固件的数量、布置位置 & 入墙深度需经过计算 & 现场复核,若锚固方式与风荷载设计不匹配,在长期外力作用下会导致系统出现松动或局部板块偏移。施工环境温湿度变化较大时,应根据材料性能调整施工参数,避免出现粘结层固化异常或板材受热胀冷缩影响产生微裂缝的问题。

在安装节点处理中,技术要求更加严谨。医院外墙门窗洞口、板缝拼接、阴阳角等部位是外墙系统的薄弱区域,需要通过可靠的结构构造实现密封、排水 & 与受力传递的稳定性。板缝应根据设计要求采用企口、插槽或密封胶填嵌方式,通过合理缝宽控制 & 柔性材料的使用缓解热胀冷缩带来的线性变形。洞口四角需设置加强件或额外锚固措施,以减少应力集中导致的开裂。密封胶施工应在基面清洁干燥的条件下进行,并确保胶层连续稳定,避免在风压 & 雨水冲击下产生渗水隐患。部分医院项目在机电管线密集区域易出现板材裁切,当切割面未按规范进行封边处理时,保温层吸水、装饰层破损等问题会随之出现,因此对裁切工序也需严格管理。

一体板安装完成后,系统的整体效果需通过检验 & 技术复核进一步巩固。安装后的平整度、垂直度、接缝顺直度等指标需通过专业检测工具逐一核查,任何偏差都可能影响外墙的视觉效果 & 气密性能。板材受力状态的稳定性还需结合锚固件抽检、粘结强度测试等手段进行验证,以确保系统满足医院建筑在安全性 & 耐久性方面的高标准要求。施工过程中的保护措施同样不可忽视,外墙在安装后若遭受撞击、污染或溅水,可能破坏新形成的粘结界面并导致早期性能衰减。通过严格的过程控制 & 技术复核,才能使医院外墙保温装饰一体板系统在长期运行中保持良好性能 & 稳定状态。

四、施工管理与验收环节的质量把控机制

医院外墙保温装饰一体板的质量控制不仅依赖材料与工艺,还需要通过严密的施工管理机制来确保系统性能的稳定发挥。项目管理过程需围绕施工组织、人员配置、工序衔接 & 技术交底等内容展开,通过明确岗位职责 & 操作规程,使每一道工序都处于受控状态。施工班组在进入现场前需要进行专项技术培训,掌握板材搬运、粘结剂调配、锚固件安装等关键技术要点,避免因

操作不当造成隐性质量问题^[4]。现场环境的管控同样重要，风力、温度、湿度等条件不满足要求时，管理人员应及时调整施工计划，以防止粘结固化异常、密封胶无法成膜或板材热胀冷缩影响安装精度等情况发生。

质量检验贯穿施工全过程，通过分项检查、隐蔽工程验收及中段抽检来及时发现问题并进行纠正。基层验收、样板确认、材料复检等内容需形成完整记录，保证每一阶段均符合设计及规范要求。一体板粘结层属于隐蔽工程，管理人员需严格执行现场见证制度，对粘结剂配比、涂布面积、板材贴合状态等进行实时监督。锚固件的布点数量与拉拔性能需通过抽检验证其承载能力，避免在后期风荷载作用下出现抗拉不足或板材松动的风险。节点处理质量同样需要通过过程检查予以保证，包括洞口、阴阳角、伸缩缝、板缝密封等部位的构造是否规范、材料是否兼容、操作是否严格按标准执行。过程检验的目的在于及时纠偏，防止不合格工序进入下一环节并引发连锁性质量缺陷。

验收阶段对系统整体性能进行全面复核，通过外观检查、尺寸测量、功能性测试等方法确认施工质量是否满足医院建筑的要求。外观方面需检查板面平整度、接缝均匀度、色差控制和装饰层完整性；安装质量方面需对粘结强度、锚固可靠性、接缝密封状态以及排水构造进行验证，确保外墙具备稳定的防水与保温性能。部分医院项目还需进行气密性检测与节能性能评估，以验证一体板系统在医疗环境中的适用性。相关验收资料需形成系统化档案，包括检测报告、材料合格证、施工记录和影像资料，使工程质量具备可追溯性。通过严格的施工管理和科学的验收机制，医院外墙保温装饰一体板能够在投入使用后保持稳定性能，为医疗建筑提供安全可靠的围护结构。

五、医院外墙一体板施工质量控制的综合提升路径

医院外墙保温装饰一体板施工质量的系统提升离不开材料、工艺与管理三方面的协同优化。材料体系需在性能稳定性和适配性方面达到更高标准，通过建立严格的材料准入制度，确保板材

密度、粘结剂耐候性、密封胶弹性回复率等指标具备可靠性。对于医院建筑而言，外墙长期承受清洗、消杀与环境变化等多重影响，因此需在材料阶段就强化耐久性控制^[5]。通过完善材料复验流程与批次追踪机制，可避免因批次差异导致系统性能出现波动，为后续施工提供统一的技术基础。

施工技术体系需要在标准化与细化程度上进一步提升，使每道工序都具备可验证、可追踪的质量控制依据。通过建立数字化放线、节点标准图库以及工序控制表，可有效降低施工过程中的随意性，使面板安装、粘结操作、锚固布置与密封胶施工保持稳定的技术水平。对于医院外墙中结构变化频繁的部位，应通过深化设计、节点优化与模拟受力分析等方式提前预判风险，并形成专项施工措施，使复杂条件下的施工可控化。工序之间的衔接也需通过信息化管理与现场监督实现闭环控制，减少隐蔽工程缺失记录、工序交叉干扰等问题，为系统的整体可靠性提供保障。

管理体系的升级是质量提升的重要支撑，通过建立全过程质量监测平台，使材料入场、施工参数、环境条件与检测结果形成数据化管理链条。人员培训需覆盖从操作工到管理人员的全流程，使技术要求与质量标准真正落实到现场。针对医院建筑特征，可引入风险分级控制方法，将洞口、转角、伸缩缝等高风险部位纳入重点监测范围，强化过程抽检频次。竣工后可通过维护手册、质量档案与定期检测机制，使一体板系统在运行阶段保持稳定性能，实现医院外墙保温装饰一体板施工质量的持续提升与系统化管控。

六、结语

医院外墙保温装饰一体板施工质量的提升源于对材料性能、施工工艺与管理机制的系统掌控。围绕医院建筑对安全性、耐久性与环境稳定性的高要求，从源头控制材料品质、在过程强化技术细节、在管理中构建闭环体系，能够使外墙系统在长期使用中保持可靠状态。多环节协同、全过程管控，使一体板施工质量形成可持续的提升路径，为医疗建筑外墙构建稳固而高效的围护体系。

参考文献

- [1] 翁世平. 医院建筑大跨度钢结构连廊设计施工优化方法 [J]. 中国建筑金属结构, 2025, 24(21): 55–57.
- [2] 贾宏俊, 李传伟, 吴新华, 等. 基于云模型的医院装配式建筑施工质量影响研究 [J]. 工程管理学报, 2025, 39(05): 122–129.
- [3] 曹涛, 徐鸿, 张银安, 等. 医院建筑热源塔热泵空调设计实践与分析 [J]. 暖通空调, 2025, 55(10): 149–155.
- [4] 杨建. 后疫情时期综合医院建筑设计若干问题初探 [J]. 福建建设科技, 2025, (05): 19–21+51.
- [5] 康子清. 绿色医院建筑节能系统智能优化技术应用 [J]. 城市开发, 2025, (18): 10–12.

针对老城区树穴树根拱起问题的研究与改造

喻云

悉地(苏州)勘察设计顾问有限公司, 江苏 苏州 215123

DOI:10.61369/ERA.2026020041

摘 要 : 老城区树穴凸起问题长期以来影响市容市貌及道路通行安全。通过对老城区树穴凸起现象的调查与分析, 研究发现树穴凸起的主要原因包括树木根系生长、树穴设计不合理以及土壤沉降等。针对这些问题, 提出了改造方案, 包括树穴的规范化设计、改善树穴透气性和排水性、加强根系修剪以及引入更适宜的植物种类等措施。这些改造措施有助于减少树穴凸起现象, 提高城市道路的整洁度和行车安全性。

关 键 词 : 树穴凸起; 老城区; 道路改造; 城市绿化

Research and Transformation on The Arching of Tree Eoots in The Old City

Yu Yun

CCDI (Suzhou) Exploration & Design Consulting Co., Ltd. Suzhou, Jiangsu 215123

Abstract : The problem of raised tree pits in old urban areas has long affected the city's appearance and road traffic safety. Through investigation and analysis of the raised tree pit phenomenon in old urban areas, it has been found that the main causes include tree root growth, unreasonable tree pit design, and soil settlement, among others. To address these issues, a renovation plan has been proposed, encompassing measures such as standardized tree pit design, improved ventilation and drainage of tree pits, enhanced root pruning, and the introduction of more suitable plant species. These renovation measures are expected to help reduce the occurrence of raised tree pits, enhancing the cleanliness of urban roads and improving traffic safety.

Keywords : raised tree pits; old urban areas; road renovation; urban greening

引言

随着城市化进程的加快, 老城区的成了街头景观的重要组成部分。然而, 树穴凸起问题的普遍存在, 已经不再只是一个单纯的绿化问题, 它不仅影响道路的美观, 还直接威胁到市民的出行安全。树穴凸起现象通常由树根生长、设计不当或土壤沉降等因素引发, 给城市管理带来了巨大的挑战。如何解决这一问题, 既能保证树木的健康生长, 又能提升城市道路的安全性和美观性, 成为当前亟待解决的课题。通过对该问题的深入研究与改造方案的提出, 能够为城市绿化管理提供新的思路和实践路径。

一、老城区树穴凸起现象的分析

(一) 老城区树穴凸起的主要原因

树穴凸起现象主要源于树木根系的生长。当树木的根系在树穴内不断扩展时, 若树穴的设计过于紧凑或限制了根系的自然扩展空间, 根系便会迫使树穴表面逐渐隆起, 形成凸起现象。此外, 老城区的土壤质量差和不均匀沉降也加剧了这一问题。老城区土壤往往年久失修, 透气性差, 排水不良, 导致根系无法正常呼吸和吸收水分。在这种不利的环境下, 树穴容易受到土壤压实、积水和沉降的影响, 进一步加剧树穴的凸起现象。特别是在老旧城区, 地下管网、基础设施的沉降, 也会使树穴的表面不平, 严重影响道路的通行。如图1所示。



图1 老城区树穴凸

(二) 老城区树穴凸起的分布特征

老城区的树穴凸起现象更为显著, 这与老城区的建设历史和

规划密切相关。由于这些区域的城市规划较为陈旧，树木种植的设计多为简陋，缺乏科学的树穴设计和树木生长空间的合理规划。很多树穴面积过小，根系无法充分扩展，造成树根对树穴的不断推挤。此外，老城区的树木种植往往缺少现代化的设计标准，使得树穴的大小与树木根系生长的需求不匹配，造成了根系外扩，凸起现象尤为严重。特别是在市中心繁华区和历史文化保护区，由于交通密集、基础设施老化，树穴凸起问题表现得更加明显，给市容和交通安全带来较大影响。

（三）树穴凸起对城市环境的影响

树穴凸起不仅影响树木的正常生长，严重时还会导致树木死亡或生长受限。同时，凸起的树穴对城市环境带来一系列负面影响。道路的平整度受到影响，凸起部分成为行人和车辆通行的隐患，极大增加了安全风险，尤其是对于老年人和行动不便的群体。的管理和维护也因此变得更加困难，清扫、修补等日常工作受到了阻碍，影响了城市的整体美观。未能及时修复的树穴凸起会导致更大范围的路面损坏，长期积累下来的维修成本将给城市管理带来巨大压力，进一步加重了基础设施的维护负担^[1]。

二、老城区树穴设计与管理现状

（一）现有树穴设计存在的问题

在许多老城区，树穴的设计存在明显不足，主要表现在树穴的面积过小和深度不合理。树穴的尺寸往往无法满足树木根系的生长需求，限制了根系的自由扩展，导致根系在有限空间内发育不良，逐渐推挤树穴边缘，形成凸起。这种情况不仅影响树木的健康生长，还导致树穴表面隆起，影响道路的平整度，从而带来行人通行的安全隐患，甚至可能导致道路破损或交通事故发生。与此同时，许多树穴设计缺乏有效的排水系统，尤其是在雨季，雨水无法及时排出，导致树穴内积水。这种积水现象长期存在会使土壤过湿，根系的透气性受到影响，造成根系缺氧，进而出现根腐病等病害，严重时导致树木死亡。此外，一些树穴使用了不透水、不透气的覆盖材料，这些材料会阻碍土壤的自然透气性，限制树根的生长空间，影响树木的正常生长，降低树木的健康水平和稳定性^[2]。

（二）种植及养护环节存在的不足

在老城区行道树建设过程中，种植及后续养护环节仍存在一定不足，这些问题在一定程度上加剧了树穴凸起现象的发生。一方面，部分行道树在种植初期未能充分结合树种特性和现场空间条件，对根系生长方向和生长空间进行科学预判，导致树木在后期生长过程中根系不断向周边扩展，对树穴边缘及路面结构产生顶推作用。另一方面，树木生长过程中对根系发育状况的动态关注不足，树穴结构和土壤条件在长期使用过程中逐渐发生变化，但未能同步进行针对性调整，导致树根逐步占据更多空间。随着树龄增长，根系不断加粗并向外延伸，当原有树穴尺度和结构难以适应其生长需求时，便容易出现树根拱起、顶推铺装的现象。

（三）树穴设计标准的缺乏与改进建议

目前，树穴的设计标准缺乏统一性，尚未形成系统化、科学

化的设计规范。由于不同地区的树穴设计标准不一致，导致许多树穴无法满足树木根系生长的基本需求，甚至出现设计不合理的问题。为了更好地解决这一问题，建议制定并推行统一的树穴设计标准，明确树穴的最小面积、深度要求、透水性和排水系统的设计标准。合理的树穴设计可以有效保证树木根系的正常生长，减少树木生长受限的情况，确保树木在良好的环境中健康成长。设计时应充分考虑当地的土壤特点、气候条件和不同树种的生长需求，选用适合的材料增强土壤的透气性和排水性，避免出现根系水涝、土壤压实等问题。同时，建议引入智能化的养护管理手段，利用监测系统实时监控树穴状态，及时发现树木生长中的问题并采取补救措施。通过科学的养护管理和及时的干预，不仅能够提高城市绿化管理的效率，也能保障的健康生长，提升城市绿化效果^[3]。

三、老城区树穴凸起问题的改造方案

（一）分类型治理现状行道树树根拱起问题

针对老城区现有行道树已出现的树根拱起现象，应根据拱起程度的不同，采取分级、分类的治理措施，而非简单统一处理，以减少对树木生长和道路结构的二次破坏。

1. 轻度树根拱起的治理措施

对于树根拱起程度较轻、尚未对道路通行安全和路面结构造成明显影响的行道树，可采取削根与疏导相结合的方式进行处理。具体做法为：在不影响树木主根和结构根稳定性的前提下，对靠近路面的侧向生长根系进行适度削减，并通过设置根系引导设施，引导根系向下或向远离道路方向生长。削根作业应遵循“少量、多次、分阶段”的原则，避免一次性大范围削根造成树木生长衰弱或倒伏风险^[4]。同时，在削根后及时对树穴进行回填和夯实，并结合土壤改良措施，提高树穴内部的透气性和稳定性，从而减缓后续根系再次拱起的可能性。

2. 中度至重度树根拱起的治理措施

对于树根拱起程度较为严重，已明显影响道路平整度和行人、车辆通行安全的行道树，仅依靠削根处理已难以取得理想效果。此类情况可在确保树木安全稳定的前提下，采用盖板式或铺装式改造措施。具体包括在树穴及拱起区域上方设置透气性良好的树池盖板，或顺应树根生长方向铺设文化石、透水混凝土砖等材料，使铺装结构与根系生长方向相协调，形成类似“柔性盖板”的覆盖形式。该方式既可有效消除高差，恢复路面平整度，又能为根系预留生长空间，避免刚性结构对树根造成挤压^[5]。

在材料选择上，应优先选用具备一定透气性和透水性的铺装材料，防止树穴被完全封闭而影响根系呼吸。同时，铺装结构应便于后期拆卸和维护，为后续树木养护和根系管理提供条件。通过这种“顺势而为”的改造方式，可在不大规模破坏现有树木的前提下，有效缓解树根拱起问题。

（二）改进树穴设计与施工方案

在解决现状行道树树根拱起问题的同时，还应同步推进树穴结构的系统性优化，以防止类似问题反复发生。新建或改造树穴

时,应根据不同树种的生长特性和根系发育需求,合理扩大树穴的平面面积和埋深尺度,为根系生长提供充足的纵向与横向空间,避免因空间受限导致根系向地表拱起。树穴周边宜采用柔性或半柔性边界结构,如透水混凝土、可拆卸式护边或弹性铺装材料,以减弱根系生长过程中对刚性路面的顶推作用,降低路面隆起风险。

在施工过程中,应结合老城区现状行道树保留要求,重点对树穴内部结构进行局部优化设计,在不整体起挖树木的前提下,通过局部开挖和分层调整,在树穴周边及根系活动较少区域设置碎石垫层、透水砂层等透排水结构,改善树穴排水条件和土体稳定性,提高抗沉降能力,减少因雨水滞留或土壤不均匀沉降引发的树根拱起问题。同时,树穴回填宜选用透气性、稳定性较好的改良土壤,并采用分层回填、分段夯实的施工方式,尽量避免对现有根系造成扰动,提升树穴整体结构稳定性,从而在保障树木正常生长的前提下,实现行道树树根拱起问题的短期整治与长期预防相统一。

（三）适宜树种选择与工程性根系控制措施

在老城区行道树更新或改造过程中,应优先选择根系分布相对集中、向下生长能力较强的树种,以降低未来树根拱起路面的风险。对于保留树木,则应通过工程性手段对根系生长方向进行引导,例如在树穴下部设置根系引导层,促使根系向深层土壤发展,减少水平扩展^[6]。

与传统以养护为主的管理方式相比,该类措施更强调前期改造和工程干预,通过结构调整和材料选择,从源头上减少树根拱起问题的发生频率,提高老城区行道树与道路设施之间的协调性和稳定性。

四、改造方案的实施与效果评估

（一）改造方案的实施步骤与进度

改造方案的实施需要按照系统的步骤和时间进度来推进。首先,进行全面调查,详细评估老城区树穴的现状,特别是树穴凸起的严重性与分布。根据调查结果,结合不同树种的生长特点,制定个性化的改造方案。改造工作应分为多个阶段,首先要针对树穴设计进行优化,确保树穴的面积和深度符合树木根系的扩展需求,避免因设计不合理导致树根外扩或树穴凸起问题。接着,对树穴底部的排水系统进行改进,采用透水性更好的材料来提高土壤的透气性和排水能力,防止雨水积聚,从而减少根系受损的

风险。在施工过程中,改造进度要根据实际情况进行灵活调整,确保每一阶段的工作按时完成。

（二）实施效果的评估标准与方法

评估改造效果时应从多个维度进行综合考量。首先,需对树穴的形态变化进行监测,检查树穴表面是否恢复平整,树穴凸起是否得到有效遏制。树木的生长状况是评估的重要标准之一,应观察树木的健康状况、树根是否正常生长,以及改造后的树木是否能够适应城市环境。根系的发育情况尤为关键,应评估根系是否有外扩现象,是否得到了良好的生长空间。对于改造后的排水系统和土壤透气性,还需要定期进行检查,确保树穴内水分与氧气的平衡,以促进树木的健康生长。同时,改造后还应评估道路平整度,特别是是否消除了原有的树穴凸起问题,确保道路不再出现安全隐患,行人和车辆的通行不受影响。所有这些评估指标的改善,最终会提升城市的整体环境质量和的生长效果^[7]。

（三）改造后的长期效果与城市绿化发展建议

改造后的长期效果应重点关注树木健康和生长的稳定性,持续跟踪树木的生长状况,观察树根是否出现外扩,树木是否依旧健康生长。树木是否能够在新的树穴中稳定生长,是否能抵御外界环境的影响,是评估改造成功与否的重要标准。同时,树穴的改造不仅要解决当前的问题,还应为未来的城市绿化提供参考和借鉴,推动树穴设计标准的进一步完善。随着改造工作的推进,改造后的成功案例将为其他地区提供宝贵经验,防止类似问题的再次发生,推动更为科学、合理的树木种植与养护管理。对于城市绿化的发展,建议加强树木种植规划的科学性,选择适应性强、抗污染能力强的树种,提升城市绿化的品质与效果。此外,倡导采用更智能化的管理系统,实时监控树木的生长状态,为树木提供更适宜的生长环境,推动绿色基础设施建设,为城市的可持续发展创造更加宜人的生态环境^[8]。

五、结语

老城区树穴凸起问题的改造方案具有重要意义,不仅能够改善树木的生长环境,还能提升城市道路的安全性和美观。通过改进树穴设计、优化土壤条件和选择适宜树种,能够有效解决树穴凸起现象。实施过程中应注重科学管理与长期效果评估,确保改造方案的可持续性。随着改造工作的深入,未来的城市绿化将更加注重树木健康与环境和谐,为城市提供更宜人的生活空间。

参考文献

- [1] 盛飞华. 老城区道路改造工程中以人为本管控对策探讨 [J]. 建设监理, 2025(07): 40-42+49.
- [2] 吴思咏. 县城老城区市政道路升级改造的工程管理 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2025(01): 199-201.
- [3] 钱海艳. 老城区道路雨污分流改造工程设计研究 [J]. 低碳世界, 2023, 13(05): 151-153.
- [4] 胡帅, 李伟, 牛宇琦. 老城区异型道路交叉口的改造方案——以安徽省含山县华阳路为例 [J]. 四川水泥, 2022(07): 237-239.
- [5] 肖文宾. 老城区道路改造中路面设计研究 [J]. 福建建材, 2022(06): 84-86+93.
- [6] 谢凯. 空间受限条件下老城区道路断面再分配方法探讨 [J]. 居舍, 2021(36): 178-180.
- [7] 刘洪涛, 住房和城乡建设 老城区道路改造. 郭旭东 主编, 巴彦年 编, 黑龙江美术出版社黑龙江人民出版社, 2020, 251, 年鉴.
- [8] 李采芬, 董兆君, 张旖妮, 王亚军. 基于绿视率与植被覆盖度分析的城市街道绿化水平研究——以福州中心老城区为例 [J]. 华中建筑, 2025, 43(12): 88-92.

压缩空气储能电站的全厂水务管理

王红斌

上海电力设计院有限公司, 上海 200025

DOI:10.61369/ERA.2026020001

摘 要 : 压缩空气储能作为一种颇具潜力的新型储能方式, 不同于其他电化学储能, 其类似与火力发电, 对水资源有一定的要求。目前我国缺乏针对压缩空气储能电站给排水系统的相关规程规范及专题研究, 本文对目前已建的300MW 压缩空气储能电站进行分析, 研究其给水、排水系统、水量平衡和水资源的重复利用、节约用水措施, 以求合理利用水资源, 保护环境、保证压缩空气储能电站长期、安全、高效、经济的运行。

关 键 词 : 压缩空气储能电站; 水务管理; 节水措施

Water Management for the Entire Plant of Compressed Air Energy Storage Power Station

Wang Hongbin

Shanghai Electric Power Design Institute Co., Ltd., Shanghai 200025

Abstract : Compressed air energy storage (CAES), as a promising new form of energy storage, differs from other electrochemical energy storage methods in that it resembles thermal power generation and has certain requirements for water resources. Currently, China lacks relevant regulations, standards, and specialized research on the water supply and drainage systems of CAES power plants. This paper analyzes the existing 300MW CAES power plant, examining its water supply and drainage systems, water balance, and the reuse of water resources, as well as water conservation measures. The aim is to achieve rational utilization of water resources, protect the environment, and ensure the long-term, safe, efficient, and economical operation of CAES power plants.

Keywords : compressed air energy storage plant; water management; water conservation measures

引言

在全球能源格局向低碳化、可持续转型的浪潮下, 新能源技术蓬勃发展, 风力发电、光伏发电等可再生能源在电力供应体系中的占比日益攀升。然而, 这些新能源具有显著的间歇性与波动性特征, 给电力系统的稳定运行带来严峻挑战。压缩空气储能技术作为一种极具潜力的大规模储能手段应运而生, 其原理是在用电低谷时段, 利用多余电能驱动压缩机将空气压缩并储存于特定储气空间, 如地下盐穴、废弃矿井或压力容器中; 待用电高峰时, 释放高压空气推动膨胀机发电, 实现电能的“削峰填谷”式存储与利用, 有效平抑新能源发电出力的波动, 提升电力系统稳定性与可靠性, 助力能源结构优化升级。

水务管理贯穿于压缩空气储能电站的全生命周期, 涵盖从空气压缩过程中的冷却用水, 到膨胀发电阶段的工质冷却以及设备的日常清洗等诸多环节。一方面, 水资源的合理调配、循环利用效率直接关联到电站的运行成本, 高效的水务管理能够减少水资源消耗、降低水处理成本及排污费用, 进而提升电站整体经济效益; 另一方面, 精准的水质管控、合理的水量供应, 对保障设备正常运行、预防腐蚀结垢、延长设备使用寿命起着关键作用, 是确保电站安全稳定、高效持续运行的基石。深入探究压缩空气储能电站水务管理, 对于挖掘电站潜能、推动储能技术商业化普及以及实现能源与水资源的协同可持续发展具有不可忽视的现实意义。

一、压缩空气储能电站水务管理特点

压缩空气储能电站相对火电厂系统简单, 水务管理主要考虑电站的生活用水, 闭式热网系统补水, 膨胀机和压缩机等辅机的循环冷却水, 日常设备运维清洗及厂房地面冲洗等。水务管理与火电厂的差异主要体现在一是给水系统, 机组容量与发电特点决定了其用水量及用水点均较少; 二是污水排放, 火电厂由于废

水种类多, 水质差异大, 且对回用水水质的要求也完全不同, 因此多采用分类处理, 分类回用的方式。压缩空气储能电站污水种类比较简单, 回用水量也较少; 三是空气压缩工况会产生部分冷凝水, 可回收利用。

(一) 压缩空气储能电站给水系统

储能电站给水系统按照用水类别与特性, 主要分为生活给水系统, 工业给水系统, 消防给水系统。

生活给水系统用于站内运维人员生活用水，包括卫生间，厨房用水，地面冲洗等用水，此类水水质应满足《生活饮用水卫生标准》GB5749-2022。项目所在地有市政自来水的优选自来水作为生活给水系统水源，否则与全厂取水系统水源一致，采用地表水或地下水，经处理达标后使用。生活用水在储能电站内占比较低，但是确是电站内运维管理人员不可缺少的部分。

工业给水系统主要用于循环冷却水系统补水和作为化学水处理系统原水，一般化学水处理系统均设置有深度过滤+除盐或软化系统，故工业给水水质需满足《工业循环冷却水处理设计规范》GB/T50050-2017。水源可统一采用市政自来水，也可取项目所在地的地表水或地下水。工业用水作为储能电站项目水务管理中最重要的一环，不仅用水量相对较大，且系统繁杂，对用水的水质，水量也有很大差异。

消防给水系统主要用于储能电站内的室内外消火栓系统，主变水喷雾系统，主厂房内润滑油和油管道的水喷雾系统等，消防用水只有在火灾事故情况下使用，不计入储能电站内正常用水量。

(二) 压缩空气储能电站排水系统

储能电站排水系统按照排水的来源与特性，主要分为生活污水系统，雨水排水系统，工业废水系统。

生活污水系统用于收集站内卫生器具，地面冲洗等排水，此部分排水可直接排至附近的站外市政污水管网，也可以站内设置生活污水处理站，处理达到《城市污水再生利用 城市杂用水水质》GB/T18920-2020中的绿化，清扫用水，用于站内绿化浇洒，道路冲洗等，做到生活污水的“零排放”。

雨水排水系统主要收集降雨时站内建筑物屋顶，场地的雨水，一般可直接排至站外的市政污水管网或站外河流等处。

工业废水系统又可分为经常性废水与非经常性废水

经常性废水主要来源为化学水处理过程中产生的过滤器排水、反渗透浓水、离子交换器再生废水，循环冷却水运行过程中产生的排污水等。该部分废水作为压缩空气储能电站的主要废水来源，对电厂的水务管理工作有着至关重要的作用。储能电站的工业废水可以根据项目所在地周边的供水排水条件，当地环保政策要求，同时需考虑国家节水政策和项目经济性要求，合理收集回用或者排放。

非经常性废水是指短期的废水，主要包括化学水处理过程中膜组件的清洗排水，该部分废水属于间歇性的排水，且水量较少，可由环保公司收集处理。

二、全厂水务管理和水量平衡

水务管理的目的在于控制本项目的用水指标。在满足各用水户的要求前提下，合理协调站内用水，节约用水，降低水耗和水污染。

下面本文以某300MW 压缩空气储能电站为例，进行全厂水务管理及系统设计。压缩空气储能项目主机运行主要分为压缩机储能工况和透平机释能工况，两种工况一天各运行一次，两者循

环冷却水量差异较大，且非连续运行，故计算补水量以天为单位考虑，按年运行350天考虑。

(一) 循环冷却水量

某300MW/1200MWh 压缩过程及膨胀过程循环水量见下表：

表1 循环冷却水系统循环水量

项目	储能过程	释能过程
循环冷却水量 (m ³ /h)	6000	3600

(二) 补给水量

表2 全厂用水量一览表

序号	用水项目	需水量 (m ³ /d)	备注
1	水处理车间用水	36.23	
2	机力通风冷却塔	1385.16	
2.1	冷却塔蒸发损失	1108.08	
2.2	冷却塔风吹损失	48.60	
2.3	冷却塔排污	228.48	
3	生活用水	24	
4	未预见用水	115.6	
5	合计	1560.98	

由上表可知，本项目全天用水量合计约1560.98m³/d，年耗水量合计约546343m³/a。

表3 全厂最大时需水量一览表

序号	项目	水量 (m ³ /h)			备注
		需水量	回收量	耗水量	
1	化学补水量	15.10	0	15.10	
2	冷却塔蒸发损失	136.8	0	136.8	储能时间段，此时蒸发量最大
3	冷却塔风吹损失	6	0	6	储能时间段，此时风吹损失量最大
4	冷却塔排污损失	28.2	0	28.2	储能时间段，此时排污损失最大
5	生活用水量	1	0	1	
6	未预见水量	14.97	0	14.97	
7	设计耗水量	202.07			

经水量平衡计算，系统最大时补水量约为202.07m³/h。

三、化学水处理系统

(一) 全厂汽水损失

根据储能、释能系统中热力管网中一天的循环量为2.4万m³，按《工业循环冷却水处理设计规范》GB 50050-2017中相关规定进行计算。相关数据按照如下取值：

闭式系统热水网的补充水量按照循环水量的1‰。闭式热水网正常补水量24t/d。

(二) 系统设计

项目水源采用附近深水井取水，压缩空气储能电站主要考虑储换热系统补水，根据其参数，可参考低压锅炉补水水质要求。根据当地原水水质特点及系统对补给水水质要求，拟采用预处理+预脱盐工艺。本工艺采用采用较先进的膜法工艺，系统自动化程度高，便于全厂设备管理及运维。

系统工艺流程如下：水工来水→原水箱→原水泵→多介质过

滤器→超滤→超滤产水箱→反渗透给水泵→保安过滤器→高压泵→反渗透膜组件→除盐水箱→除盐水泵→闭式系统热水网补水

（三）系统出力及设备配置

根据闭式热水网中水汽损失及系统自用水量、设备维护检修等因素综合考虑，本工程化学水处理制备系统设计出力为2x10t/h，一运一备考虑。设置2座50m³产水箱，用于储存化学水系统产

水，以及满足热水网中短时大量用水的要求。

四、工业废水处理系统

（一）废水、排水水质和水量

本工程废水和排水水源及水量见下表。

表4 废水水源及水量水质

序号	名称	单位	水量	水质（mg/L，除 pH 以外）				备注
				pH	Fe	SS	TDS	
1	多介质过滤器反洗排水	m ³ /次	6	6~7.5			124.6~243.5	排至工业废水收集池
2	超滤反洗排水	m ³ /次	0.8	6~7.5			124.6~243.5	排至工业废水收集池
3	反渗透浓水	m ³ /h	2.5	~9		约等于0	623~1217.5	排至工业废水收集池
4	膜清洗排水（超滤膜 / 反渗透膜）	m ³ /次·套	0.5/0.5	2, 12				专业厂家收集处理

（二）废水处理方式

上表第1、2、3项属于经常性废水，多介质反洗水、超滤反洗水以及反渗透浓水排至厂区内废水收集池，循环水排污水也排至厂区废水收集池。该部分废水 PH 正常，主要是悬浮物，有机物，盐分等，含量较低，满足国家排放标准要求，可直接排放至站外污水管网或河道。项目实施过程中，还需要根据现场所在地环保要求及水资源现状，确定是否设置工业废水处理站，、收集处理、回用部分上述经常性废水工业废水。

上表第4项属于非经常性废水，超滤膜清洗以及反渗透膜清洗一般1~3个月清洗一次，且清洗一次的水量较少，膜清洗可由专业厂家负责，产生的清洗废水由其运走处理。

生的经常性工业废水，包括除盐水处理过程中产生的过滤器清洗废水、反渗透浓水、离子交换树脂再生废水等，另外还包括循环冷却水系统产生的排污水。以上废水排至废水池，经过双介质过滤器、超滤预处理，反渗透浓缩后产生清洁废水，可用作工业水系统补水。

（4）收集压缩空气过程中产生的冷凝水，用作工业水系统补水。

（5）在各供水系统的进水管及出水干管（如取水供水母管、化学水管、生活给水管道等）上安装水量计量装置、调节和控制流量的装置，并将厂区内计量数据收集至全厂控制系统，进行数据统计、处理和分析，得出用水、排水量数据，对各工艺系统进行监督管理，建立全厂用水检测系统，为电厂水务管理创造条件。

（6）生活给水系统采用节水型卫生器具。

（7）运维管理方面，应针对相关的科学节水管理制度，并对相关人员进行培训。生产运行中一方面要加强各系统水质、水量的计量、监测和控制，对各车间指定用水考核制度及节水、浪费水的奖惩办法，减少跑、冒、滴、漏损失。另一方面，还需要根据技术发展，水源条件及环保要求，进行必要的技术改造，提高电厂的节水水平。

五、节水措施

从节约水资源政策和运行的经济可靠性出发，合理地利用水资源，同时最大限度地减少对环境污染，控制污水排放，有效地降低耗水指标。

压缩空气储能电站节水措施主要有以下几点：

（1）冷却水系统采用带二次循环的机械通风冷却塔系统，冷却塔出风口设置收水器，集水池周围设置回水台，可降低风吹损失，最小可降至0.05%；另外循环冷却水处理采用投加缓蚀阻垢剂及杀菌剂处理，提高浓缩倍率至5，可以大大减少循环水排污量，节约新鲜水补水。考虑到压储项目特殊性，储能工况和释能工况间断运行，且循环冷却水量差异较大，采取合理优化冷却水系统设计和设备选型，选择最佳运行台数，调节用水管路阀门开度等措施对系统进行水量调节。

（2）生活污水采用接触氧化法处理，站内设置生活污水处理站，采用地理一体化生活污水处理设备处理全厂生活污水，处理达到《城市污水再生利用 城市杂用水水质》GB/T18920-2020中的绿化，清扫用水，处理达标后回用至站内中水系统，用做全厂的绿化浇灌，道路冲洗等。

（3）站内设置工业废水处理站，主要收集电站运行生产中产

六、结语

在“双碳”背景下，压缩空气储能技术已经较为成熟，且单机规模大、储能时间长、使用寿命长、调节性能强等特点，在提高电网调节能力和增强可再生能源消纳方面具有巨大的应用潜能。可以预见的未来，压缩空气储能会在我国新型长时储能及电力系统中发挥越来越重要的作用。而压缩空气储能电站水务管理，特别是在我国水资源短缺及环保要求越来越高的今天，会成为制约其发展的重要一环。

本文对目前某300MW 压缩空气储能电站的各项用水、排水系统进行了分类剖析，根据其主机的运行性质找出了与目前我国

成熟的火力发电项目水务管理特点的不同。分析其主要的用排水的分类及各项水量、水质等指标，并针对性的提出了循环冷却水、化学水处理、工业废水处理等主要系统方案。最后从设计、管理、运行维护等多个方向提出了节水措施。深入探究压缩空气

储能电站水务管理，对于挖掘电站潜能、推动储能技术商业化普及以及实现能源与水资源的协同可持续发展具有不可忽视的现实意义。

参考文献

[1]DL/T 1337-2014 火力发电厂水务管理导则 [S].
[2]DL/T 5339-2018 火力发电厂水工设计规范 [S].
[3]DL/T 5046-2018 发电厂废水治理设计规范 [S].
[4]DL/T 5513-2016 发电厂节水设计规程 [S].
[5] 尹力, 岳春妹, 费剑影. 燃气电厂废水零排放工程应用与研究 [J]. 工业水处理, 2022(6): 193-197.
[6] 赵巍巍. 电厂循环冷却水系统节水与零排放技术研究 [J]. 中国资源综合利用, 2020(7): 182-184.

小型矿产勘查项目中综合勘查技术的实践应用

徐聿

辽宁省地质矿产调查院有限责任公司, 辽宁 沈阳 110084

DOI:10.61369/ERA.2026020006

摘 要 : 小型矿产在我国矿产资源体系中占据重要地位, 其勘查工作具有规模小、地质条件复杂、勘查精度要求高且成本控制严格等特点。综合勘查技术通过整合地质填图、物探、化探、钻探等多学科技术手段, 可有效破解小型矿产勘查中的技术瓶颈。本文以小型金属矿产和非金属矿产勘查实例为依托, 分析综合勘查技术的应用逻辑与实施流程, 重点探讨各技术手段的优化组合策略, 希望进一步提升矿产资源储量估算精度。

关 键 词 : 小型矿产; 勘查项目; 综合勘查技术; 实践应用

Practical Application of Comprehensive Exploration Technology in Small-Scale Mineral Exploration Projects

Xu Song

Liaoning Province Geological Mineral Survey Institute Co., Ltd. Shenyang, Liaoning 110084

Abstract : Small scale minerals play an important role in China's mineral resource system, and their exploration work is characterized by small scale, complex geological conditions, high requirements for exploration accuracy, and strict cost control. Comprehensive exploration technology can effectively overcome technical bottlenecks in small-scale mineral exploration by integrating multidisciplinary techniques such as geological mapping, geophysical exploration, geochemical exploration, and drilling. This article is based on examples of small-scale metal and non-metal mineral exploration, analyzing the application logic and implementation process of comprehensive exploration technology, focusing on exploring the optimization combination strategy of various technical means, hoping to further improve the accuracy of mineral resource reserve estimation.

Keywords : small-scale mineral resources; exploration project; comprehensive exploration technology; practical application

我国小型矿产资源分布广泛, 种类繁多, 在满足区域经济发展、补充大型矿产资源供给方面发挥着不可替代的作用。然而, 小型矿产勘查项目受资金投入有限、勘查区域地质条件多变、矿体规模小且形态复杂等因素制约, 传统单一勘查技术往往难以全面获取地质信息, 易导致矿体圈定不准确、资源储量估算偏差大等问题。随着勘查技术的不断发展, 综合勘查技术凭借多手段协同、多信息互补的优势, 逐渐成为小型矿产勘查的核心技术方法。本文基于小型矿产勘查的实际需求, 系统探讨综合勘查技术的实践应用策略, 旨在为提升小型矿产勘查质量与效率提供可行路径, 助力小型矿产资源的科学勘查与合理开发。

一、小型矿产勘查项目的核心特征与技术需求

(一) 核心特征分析

小型矿产勘查项目与大型矿产勘查相比, 具有显著的差异化特征。从规模来看, 小型矿产矿体延伸范围较小, 厚度变化较大, 部分矿体呈透镜状、脉状分布, 空间形态不规则, 增加了勘查过程中矿体定位与圈定的难度。从资金投入来看, 小型矿产勘查项目通常由中小型企业或地方勘查单位主导, 资金预算有限, 对勘查技术的性价比要求较高, 需在保证勘查精度的前提下控制勘查成本。从地质条件来看, 小型矿产多分布于复杂地质构造区域, 如断裂带、褶皱带周边, 地质体之间的接触关系复杂, 围岩

蚀变现象多样, 单一技术手段难以全面解析地质信息。从勘查目标来看, 小型矿产勘查不仅需查明矿产资源的储量与质量, 还需明确矿体的空间分布、埋藏深度、顶底板围岩性质等关键信息, 为后续开采设计提供精准依据^[1]。

(二) 技术需求导向

基于小型矿产勘查的核心特征, 其对勘查技术提出了明确的需求导向。首先, 需具备多信息整合能力, 由于小型矿产地质条件复杂, 单一技术手段获取的信息具有局限性, 如地质填图仅能反映地表地质现象, 物探技术对部分低阻矿体识别精度不足, 因此需要综合运用多种技术, 实现地表与地下、宏观与微观信息的互补^[2]。其次, 需具备高效低成本的技术特性, 资金有限的背景

下, 勘查技术需在短时间内获取精准信息, 避免重复勘查与无效投入, 如通过前期物探、化探技术圈定有利勘查靶区, 可大幅减少钻探工作量, 降低勘查成本。最后, 需具备精准定位与定量分析能力, 小型矿产矿体规模小, 对矿体边界的圈定精度要求极高, 需通过综合技术手段实现矿体空间位置的精准定位与资源储量的定量估算, 避免资源漏算或误算^[3]。

二、综合勘查技术的体系构成与应用逻辑

(一) 体系构成

综合勘查技术体系以地质理论为指导, 整合地质填图、地球物理勘查(物探)、地球化学勘查(化探)、钻探工程、实验室测试分析等多种技术手段, 形成“地表调查—靶区圈定—深部验证—储量估算”的完整技术链条^[4]。其中, 地质填图是基础手段, 通过实地测量、地质点观察、剖面测量等方式, 查明勘查区域的地层岩性、地质构造、围岩蚀变等地表地质信息, 为后续勘查工作提供基础地质框架。物探技术是靶区圈定的核心手段, 常用方法包括高精度磁法、电法(激电法、高密度电法)、重力法等, 通过检测地质体的物理性质差异(如磁性、电性、密度), 识别地下隐伏矿体的空间分布范围。化探技术是矿体追踪的重要手段, 通过采集土壤、岩石、水系沉积物等样品, 分析其中微量元素的含量与分布特征, 圈定地球化学异常区, 为寻找矿体提供直接线索。钻探工程是深部验证的关键手段, 通过钻探获取地下岩芯样品, 验证物探、化探异常的真实性, 查明矿体的埋藏深度、厚度、品位等核心信息^[5]。

(二) 应用逻辑

综合勘查技术的应用遵循“由表及里、由浅入深、循序渐进”的逻辑思路, 形成“前期准备—地表综合勘查—深部验证勘查—成果综合分析”的实施流程。在前期准备阶段, 需开展资料收集与分析工作, 包括区域地质调查报告、以往勘查成果、遥感影像资料等^[6]。明确勘查区域的地质背景与矿产成矿潜力, 制定初步的勘查方案。地表综合勘查阶段, 以地质填图为基础, 同步开展物探与化探工作, 通过地质填图建立地表地质框架, 利用物探技术探测地下隐伏构造与矿体的大致范围, 借助化探技术圈定地球化学异常区, 三者结合圈定出具有成矿潜力的有利靶区, 实现“地表信息全覆盖、异常区精准定位”的目标。深部验证勘查阶段, 针对地表综合勘查圈定的有利靶区, 布置钻探工程进行深部验证, 根据钻探获取的岩芯资料, 修正前期物探、化探异常解释结果, 精准圈定矿体的空间形态、埋藏深度与厚度, 同时采集样品送实验室进行测试分析。成果综合分析阶段, 整合地质填图、物探、化探、钻探及实验室测试的所有数据, 运用地质统计学方法进行资源储量估算, 分析矿体的成矿规律与控矿因素, 形成完整的勘查成果报告^[7]。

三、综合勘查技术的实践应用策略

(一) 前期准备阶段, 资料整合与方案优化策略

前期准备阶段是综合勘查技术有效应用的基础, 核心在于通

过资料整合明确勘查方向, 通过方案优化提升勘查效率。在资料整合方面, 需构建“多源资料数据库”, 收集区域地质、矿产、物探、化探、遥感等各类资料, 运用 GIS 技术建立空间数据库, 对资料进行标准化处理与叠加分析^[8]。例如, 在某小型金矿产勘查项目中, 勘查团队收集了区域地质图、以往 1:5 万化探数据、高分辨率遥感影像等资料, 通过 GIS 技术将化探异常区与遥感解译的断裂构造叠加, 发现化探异常区与断裂带高度吻合, 初步判断断裂构造为成矿控矿构造, 为后续勘查靶区圈定提供了重要依据。在方案优化方面, 需根据勘查区域的地质背景与矿产类型, 确定各技术手段的组合方式与实施顺序。对于金属矿产勘查, 可采用“地质填图+高精度磁法+土壤化探+钻探”的组合方案; 对于非金属矿产(如石灰岩)勘查, 可采用“地质填图+高密度电法+岩石化探+钻探”的组合方案^[9]。

(二) 地表综合勘查阶段, 多技术协同圈定靶区策略

地表综合勘查阶段的核心目标是通过多技术协同工作, 精准圈定有利勘查靶区, 为后续深部验证提供精准导向。地质填图工作需精细化开展, 采用“全面踏勘+重点测量”的方式, 对勘查区域内的地层界线、构造线、围岩蚀变带、矿化点等地质现象进行详细标注, 编制高精度地质图。在填图过程中, 需结合遥感影像解译结果, 对地表隐蔽的地质构造进行识别, 如通过遥感影像的色调差异识别断裂带与蚀变带, 提升填图精度。物探技术的选择需结合矿产类型与地质条件, 例如, 对于磁性较强的铁矿床, 采用高精度磁法勘查可快速圈定矿体范围; 对于导电性较好的铜、铅锌矿体, 采用激电法可有效识别地下隐伏矿体。在某小型铅锌矿勘查项目中, 勘查团队通过地质填图发现地表存在铅锌矿化点, 随后采用激电法进行剖面测量, 发现地下存在明显的高极化异常区, 异常范围与地表矿化点延伸方向一致, 初步圈定了矿体的分布范围。化探技术需注重采样介质与采样密度的选择, 土壤化探适用于地表覆盖较薄的区域, 水系沉积物化探适用于地形复杂、地表覆盖较厚的区域。采样过程中需严格控制采样深度、样品重量等参数, 确保样品的代表性, 实验室测试需采用高精度测试方法, 如电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS), 提高微量元素分析精度。通过地质填图、物探、化探技术的协同分析, 将地质体分布、物理异常、地球化学异常进行叠加, 圈定出“地质条件有利、物探异常明显、化探异常显著”的有利勘查靶区^[10]。

(三) 深部验证勘查阶段: 钻探与测试精准匹配策略

深部验证勘查阶段是查明地下矿体真实情况的关键, 需实现钻探工程与测试分析的精准匹配, 确保获取的地质信息准确可靠。钻探工程设计需基于地表综合勘查结果, 采用“由浅入深、逐步加密”的原则, 在有利靶区布置钻探剖面, 第一个钻孔需布置在异常中心位置, 根据第一个钻孔的岩芯资料调整后续钻孔的位置与深度。钻探过程中需严格执行岩芯编录制度, 详细记录岩芯的岩性、矿化程度、蚀变特征、矿体厚度等信息, 同时采用钻孔地球物理测井技术(如井中磁测、井中电测), 对钻孔周边的地质体进行探测, 扩大勘查范围, 避免遗漏矿体。例如, 在某小型金矿勘查项目中, 第一个钻孔在地下 150 米处发现厚 2.5 米的金矿体, 通过井中磁测发现钻孔南侧 50 米处存在明显磁异常, 随后

调整钻孔位置，在南侧布置的钻孔中发现厚3.2米的金矿体，大幅提升了勘查成果。样品采集与测试需遵循“精准取样、科学测试”的原则，在矿体段采用连续取样方式，样品长度根据矿体厚度确定，一般为0.2-0.5米，确保样品能真实反映矿体的品位变化。实验室测试需根据矿产类型选择针对性的测试项目，金属矿产需测试主要有益元素含量、有害元素含量等指标，非金属矿产需测试化学成分、物理力学性能等指标。

（四）成果综合分析阶段：数据整合与储量精准估算策略

成果综合分析阶段是综合勘查技术应用的收尾环节，核心在于通过多源数据整合，实现资源储量的精准估算。数据整合需构建“地质－物探－化探－钻探－测试”一体化数据库，对各类数据进行标准化处理，消除数据误差。例如，将地质填图获取的地表地质界线、物探解译的地下构造线、钻探获取的矿体产状数据进行叠加，建立三维地质模型，直观展示矿体的空间分布形态。储量估算需根据矿体的形态特征与勘查数据精度，选择合适的估算方法，小型矿产常用的估算方法包括地质块段法、剖面法、多边形法等。对于形态规则、勘查工程控制程度高的矿体，可采用地质块段法；对于呈脉状、透镜状分布的矿体，可采用剖面法。在储量估算过程中，需严格遵循相关规范要求，确定合理的工业

指标（如边界品位、最低工业品位、可采厚度等），对矿体进行圈定，同时采用地质统计学方法对品位数据进行分析，降低品位估算误差。例如，在某小型石灰岩矿勘查项目中，勘查团队通过三维地质模型整合了12个钻孔的岩芯数据与测试数据，采用地质块段法估算资源储量，估算结果与后续开采实际储量的偏差仅为3.2%，满足勘查精度要求。此外，成果综合分析还需对勘查过程中发现的成矿规律进行总结，如分析矿体与地质构造、围岩蚀变的关系，为后续同类矿产勘查提供参考。

四、结束语

综上所述，综合勘查技术通过多学科技术手段的协同应用，有效破解了小型矿产勘查中地质条件复杂、资金有限、精度要求高的难题，为小型矿产资源的精准勘查提供了核心技术支撑。本文通过分析小型矿产勘查的特征与技术需求，阐述了综合勘查技术的体系构成与应用逻辑，从前期准备、地表勘查、深部验证、成果分析四个阶段提出了具体实践应用策略，并通过案例验证了其应用效果。实践表明，科学合理的综合勘查技术方案能显著提升勘查质量与效率，降低勘查成本。

参考文献

[1] 吴磊. 遥感蚀变异常在地质矿产勘查中的应用分析 [J]. 世界有色金属, 2024, (20): 135-137.
[2] 李伟, 李艳菊, 王焱. 煤系矿产资源综合勘查开发研究 [J]. 内蒙古煤炭经济, 2023, (07): 178-180.
[3] 王素琴. 露天非金属矿产资源综合勘查模型构建 [J]. 能源与环保, 2022, 44(06): 133-138.
[4] 肖丹, 宋泽友, 宋维国. 我国岩浆硫化物型镍矿床伴生矿产综合勘查评价指标探讨 [J]. 国土资源导刊, 2022, 19(01): 48-53.
[5] 李长彦. 煤炭资源共伴生矿产综合勘查评价及开发利用浅析 [J]. 内蒙古煤炭经济, 2021, (04): 180-181.
[6] 黄贤营, 张雪, 马少强. “十四五”时期我国矿产勘查经济发展新路径 [J]. 中国国土资源经济, 2021, 34(02): 64-68.
[7] 李成, 周旭林, 赵芳芳, 等. 矽卡岩型铁矿床伴生矿产特征及综合勘查评价指标探讨 [J]. 矿产勘查, 2020, 11(10): 2157-2162.
[8] 陈守余, 赵江南, 睢瑜. 案例教学法在“矿产综合勘查技术”课程教学中的应用 [J]. 中国地质教育, 2020, 29(01): 81-85.
[9] 陈新军. 油气共伴生矿产综合勘查评价发展现状与趋势 [J]. 中国国土资源经济, 2020, 33(05): 34-38.
[10] 冯岩, 张春华, 杨才, 等. 鄂尔多斯盆地(内蒙古境内)能源矿产叠置组合特征与综合勘查开发建议 [J]. 西部资源, 2019, (04): 185-189.

矿产资源量估算中常用方法的对比分析

刘澎

辽宁省地质矿产调查院有限责任公司, 辽宁 沈阳 110001

DOI:10.61369/ERA.2026020007

摘 要： 矿产资源量估算属于矿产资源勘探开发的关键部分，其成果直接影响到资源是否适合开发以及开发的经济性。本文以矿产资源量估算常用方法为研究对象，从对比维度和评价标准出发，对地质块段法、剖面法、地质统计学法、机器学习法等常用方法的技术特点进行梳理。传统的方法在简单的地质条件下具有经济性及实用性，现代的智能方法在复杂的矿体中精度更好。本文的研究成果可以为不同地质环境下选择合理的方法提供理论支持，提高矿产资源评价的科学性、可靠性，为矿产资源合理开发利用提供技术保障。

关 键 词： 矿产资源量；估算常用方法；对比策略

Comparative Analysis of Commonly Used Methods in Mineral Resource Estimation

Liu Peng

Liaoning Province Geological Mineral Survey Institute Co., Ltd. Shenyang, Liaoning 110001

Abstract： Mineral resource estimation is a key part of mineral resource exploration and development, and its results directly affect whether the resources are suitable for development and the economic viability of development. This article takes the commonly used methods for estimating mineral resources as the research object, starting from the comparison dimension and evaluation standards, and sorts out the technical characteristics of commonly used methods such as geological block method, profile method, geostatistics method, machine learning method, etc. Traditional methods are economical and practical under simple geological conditions, while modern intelligent methods have better accuracy in complex ore bodies. The research results of this article can provide theoretical support for selecting reasonable methods in different geological environments, improve the scientific and reliable evaluation of mineral resources, and provide technical support for the rational development and utilization of mineral resources.

Keywords： mineral resources; common estimation methods; comparison strategy

矿产资源是国民经济发展的基础性物质条件，对资源开发规划、投资决策、生态保护等各方面都起着重要的影响作用。随着矿产资源勘探向深部、复杂的矿体延伸，传统估算方法精度不足、适应性不强的问题逐渐暴露出来，新兴智能算法的涌现给这一问题提供了一种新的解决途径。目前矿产资源量估算方法既有传统又有现代的，但是各种方法适用的场景不同，随意选用会造成估算结果出现误差，造成资源浪费或者投资风险。因此，对常用估算方法进行比较分析有着十分重要的现实意义。本文主要界定估算方法的主要概念和发展史，确定对比的原则和维度，从理论、实践等方面对各种方法进行全方位的比较，最后提出方法选择的改善策略，供行业借鉴。

一、矿产资源量估算方法概述

（一）估算方法的核心定义与内涵

矿产资源量估算，就是指依照地质勘探所取得的钻孔、坑道、物探化探等数据，联系矿体的地质特征，采用科学的数学模型或者地质推理方法，对矿体中矿产资源的数量、质量以及空间分布展开量化核算的过程。核心内涵包含三个关键要素：数据支撑的客观性，所有的估算都必须以实测地质数据为依据，不能凭

主观臆断；模型选择的匹配性，要根据矿体形态、产状和地质复杂程度来选择相适应的估算模型；结果的概率性，由于地质体比较复杂，所以估算的结果一般会以一定的置信度来表示^[1]。

（二）常用估算方法的分类与核心范畴

依据估算原理及技术特征的不同，矿产资源量估算的方法大体可以分为四类，每类方法都有着不同的适用范围和适用环境。第一类是几何类方法，以地质块段法、剖面法（包括平行剖面法、垂直剖面法）为主，基本原理是根据地质勘探工程圈定的矿

体边界,用几何形态计算矿体体积,然后乘以矿石平均品位得到资源量。这类方法主要是对形态规则、产状稳定的简单矿体进行处理,如层状、似层状沉积型矿产,有计算简单、形象易解等优点。第二类为统计类方法,包括地质统计学法(克里金法、协同克里金法)、距离加权法等,主要原理是通过地质变量(品位、厚度等)的空间相关性进行分析,建立变异函数模型,用统计推断来估计资源量^[2]。核心范畴就是地质变量空间分布不均、但是有一定相关性的矿体,比如脉状、透镜状内生金属矿产。

(三) 估算方法的核心影响因素分析

矿产资源量估算结果的准确性受到很多因素的影响,不同的估算方法对各个因素的敏感程度也不同,主要影响因素有四个。地质数据质量,比如勘探工程密度、取样精度、分析测试误差等等,这是所有估算方法的基础。对于几何类的方法来说,钻孔间距太大容易造成矿体边界圈定偏差;对于统计类的方法来说,样本数据的代表性会影响变异函数模型的可靠度,进而影响估算精度^[3]。

二、矿产资源量估算方法对比分析的意义

(一) 指导矿产勘探开发实践的应用

在矿产勘探开发过程中,选择估算方法是否科学,直接决定着矿产项目的经济效益和资源利用效率,对比分析的应用价值也很高^[4]。在勘探阶段,根据不同的方法适用条件以及数据需求,按照勘探工程的进展情况,选择合适的估算方法。勘探初期数据少时用地质块段法快速估算资源量,为后续勘探工程部署提供依据;勘探后期数据充足时用地质统计学法提高估算精度,为矿山建设可行性研究提供准确的数据。开发阶段,对开采设计及资源回收的开采设计与资源回收策略进行对比。根据各个矿体区段的地质特点来比较选取最适合的估算方法,精确计算分区的资源量,指导采矿方法的选择和爆破参数的设计^[5]。品位分布不均匀的矿体,利用智能算法可以精确定位高品位矿段,提高采矿回采率。同时对比分析可以降低投资风险,利用不同的方法互相验证,减少由于某一种方法的估算偏差造成的决策失误,比如某金矿项目采用地质统计学法和神经网络法进行对比验证,修正了原估算结果的15%偏差,防止了过度投资^[6]。

(二) 规范矿产资源管理的行业

从行业管理的角度来说,估算方法比较分析对规范矿产资源管理秩序、提高管理效率起着重要的作用。目前在矿产资源储量评价方面,由于各个单位采用的方法不一样,在估算上结果大相径庭,影响了储量评价的公正性、权威性。开展系统对比分析,能确定各种地质条件下推荐的估算方法和验证标准,给储量评审赋予一致的技术依照,缩减评审争议。以沉积型煤矿为例,就地质块段法为基础方法、地质统计学法为验证方法的提高评审效率。并作对比分析,能促进矿产资源管理标准化、信息化。通过了解各个方法所需的数据及输出格式,对需要上报的资源量数据进行规范,为建立全国矿产资源储量数据库提供统一的数据接口。另外,对比分析有利于资源税征收、资源有偿使用等政策的

制定和实施,以资源量的准确计算来保证税费征收的公平。该省用对比分析法开展煤炭资源标准化估算工作,规范了煤炭资源储量核算工作,将20%的资源税征收率提高到行业监管加强^[7]。

三、矿产资源量估算常用方法的对比策略

(一) 对比指标体系的构建原则与逻辑

科学构建对比指标体系,保证估算方法的对比分析客观有效,需遵循四个原则。科学性原则是指指标要符合估算方法的核心技术特点,基于地质统计学、数学建模等理论基础,不能主观随意。估算精度指标要用均方根误差(RMSE)、相对误差等定量参数来表示,不能用定性描述。系统性原则,指标体系要涵盖方法全过程的特征,理论基础、数据需求、运算过程、结果输出都要有,形成全面的评价维度,不能片面^[8]。第适用性原则,指标要适应各种类型估算方法的特点,兼顾传统方法和现代智能方法的区别。对于几何类方法设置“形态适配性”指标;对于智能算法类方法设置“数据适应性”指标。可操作性原则,即指标要具有明确的量化标准或分级标准,便于数据获取和比较分析。指标体系的建构逻辑遵循的是以目标为导向、维度分解、指标细化的路径:目标为科学选择估算方法,拆解成理论可行性、实践适用性、精度可靠性、效率经济性四个维度,每个维度下面再分出2到3个具体指标,构成10项核心指标的对比体系。

(二) 多维度对比分析的实施步骤与流程

多维度对比分析的开展要遵照标准化流程,保证分析过程规范,结果可信,包含四个步骤。第一步就是数据收集,搜集8种典型方法的技术资料、行业应用案例和试验数据,选取3个不同的地质类型的矿体(简单层状铁矿、中等复杂脉状铜矿、复杂透镜状金矿)做实验对象,得到各个矿体的钻孔数据、品位分析数据、地质剖面图等基本资料。第二步为指标量化阶段,对构建的10个对比指标,用“定量+定性”的方式来量化评分,定量指标(估算精度、运算效率等)用试验计算得到的数值,定性指标(操作复杂度、地质适配性等)用5分制评分。第三步是对比分析阶段,采取“单指标对比-多指标综合评价-案例验证”的层级对比方式。单指标对比确定各方法的优势指标和短板指标,多指标综合评价采用层次分析法(AHP)确定指标权重,求出各方法的综合得分。案例验证把不同方法应用于三个试验矿体,比较实际开采数据和估算结果之间的偏差。第四步就是结果梳理阶段,把各方法适用的条件、精度阈值和应用建议进行总结归纳,形成对比分析矩阵和可视化对比图表,增加结果的可读性和实用性^[9]。

(三) 复杂地质条件下的方法选择与优化策略

复杂地质条件指的是矿体形态复杂(透镜状、脉状分叉)、产状多变(倾角大于60度)、品位呈非线性分布、构造发育(多断层、褶皱)的场景,比如内生脉状金矿、铜镍硫化物矿床等。此时方法选择以精度优先、模型匹配为原则,建议使用地质统计学法(克里金法、协同克里金法)、智能算法(神经网络法、随机森林法)或者数值模拟法三维建模验证。克里金法的优化策略有:建立准确的变异函数模型,根据品位的空间分布特点选择球

状、指数或者高斯模型，通过交叉验证调节变程、基台值等参数，保证模型的拟合度 R^2 大于0.85；采用辅助变量（物探化探数据、矿体厚度）的协同克里金法，提高低勘探密度区的估算精度。

实践案例，某脉状金矿的矿体呈透镜状分叉，受3条断层切割，品位变动区间为 $1\text{g/t} \sim 20\text{g/t}$ ，用协同克里金法来估算，将钻孔品位数据当作主要变量、物探激电异常值当作辅助变量、创建球状变异函数（变程50m、基台值15），三维建模分成120个块段，测得资源量为8.5吨。用随机森林法检验，估算结果为8.3吨，偏差率为2.35%。开采后实际资源量为8.2吨，综合偏差率是3.66%，与传统剖面法（偏差率为12.1%）相比，精度提高了许多。优化注意事项，复杂构造地区应该增多钻孔控制，断层附近分开一个块段防止构造对品位造成影响^[10]。

（四）数据稀缺场景下的方法选择与弥补措施

数据稀缺场景主要出现在勘探初期、深部勘探和偏远矿区，这时数据很少或数据覆盖不全，因此方法的选择要以数据适应性强、外推性好为原则，采用剖面法（垂直剖面法）配合地质类比法或者少量样本的机器学习方法（支持向量机法）。剖面法的应用补救措施有三条，利用区域地质资料延长剖面，根据邻近矿区矿体产状类比，合理外推矿体边界，外推距离不大于已知剖面长度的1/3；用趋势面分析修正品位数据，建立多项式趋势面剔除局部异常值，提高品位平均值的可靠性；采用间接数据（遥感蚀变信息、重磁异常数据等）辅助圈定矿体范围，减小边界圈定误差。

深部铜矿区在勘探初期只做了5个钻孔（间距300米），数据很少使得矿体形态不清楚，用垂直剖面法和地质类比法进行估算。首先根据相邻矿区的层状矿体产状确定本区矿体倾向（ 35° ）、倾角（ 45° ），延长剖面至钻孔控制范围外100m；采用二次趋势面分析修正品位数据，剔除1个高品位异常值（5.2%），得到平均品位1.8%；结合重磁异常圈定矿体宽度（平均25m），估算资源量32万吨。后续加密了10个钻孔以后，用克里金法重新估计得到资源量30.5万吨，偏差率为4.68%，符合勘探初期的决策要求。弥补注意事项：外推范围需明确标注，估算结果要注明推测资源量，不能作为最后的开采依据。

四、结束语

综上所述，不同的估算方法各有优缺点，地质块段法适用于简单矿体，经济性好，克里金法对中等复杂矿体精度最高，神经网络法适合于复杂深部矿体，科学选择的方法要以地质条件判断的准确、对方法特性认识充分为前提。本文的对比分析框架以及选择策略可以给行业实践给予有效的引导，但是也存在一些不足，没有包含最新的深度学习方法，对于极端地质状况下的方法研究不够。未来的发展方向是智能算法与地质规律深度结合起来，构造适应不同地质场景的混合估计模型，促进矿质资源估量的标准化和国际化，提高我国矿质资源评估整体水平。

参考文献

[1] 黄博韬. 矿产资源储量核查在矿政管理中的价值与应用 [J]. 世界有色金属, 2024, (19): 91-93.
[2] 吴鹤. 矿山勘查过程研究 [J]. 世界有色金属, 2024, (19): 169-171.
[3] 孔德志, 孟凡永. 提高矿产资源储量估算精度的方法探讨 [J]. 内蒙古煤炭经济, 2024, (17): 68-70.
[4] 黄博韬. 矿产资源储量估算方法及其准确性研究 [J]. 世界有色金属, 2024, (17): 40-42.
[5] 李欣. 地质矿产勘查中的资源储量估算与评估方法研究 [J]. 中国金属通报, 2024, (08): 128-130.
[6] 马良, 江健华, 祁轶宏, 等. 指示克里格矿产资源量三维估算方法应用研究——以安徽省某斑岩型铜金矿床为例 [J]. 河北地质大学学报, 2024, 47(05): 14-20.
[7] 冯波, 刘曦遥, 王学鹏, 等. 埕宁隆起区寒武系—奥陶系岩溶热储资源评价 [J]. 吉林大学学报 (地球科学版), 2023, 53(05): 1521-1533.
[8] 张敏. 几何法与地质统计学法在矿产资源量估算中的对比分析 [J]. 西部探矿工程, 2023, 35(08): 76-78.
[9] 李坤. 莱卡背包式三维激光扫描仪在矿产资源储量估算中的运用分析 [J]. 世界有色金属, 2023, (06): 175-177.
[10] 王明, 柳顺彬. MapGIS 与 Excel 软件在固体矿产几何法资源量估算中的应用 [J]. 新疆地质, 2023, 41(01): 126-131.

低品位矿产资源勘查评价技术研究与实践

邵九龙

辽宁省地质矿产调查院有限责任公司, 辽宁 沈阳 110034

DOI:10.61369/ERA.2026020008

摘 要 : 随着全球高品位矿产资源的日益枯竭和矿产产品需求的持续增长, 低品位矿产资源的勘查与开发利用已成为保障资源安全 and 经济可持续发展的战略重点。低品位矿体因其品位低、矿化不均匀、经济价值隐性等特点, 对其勘查评价技术提出了更高要求。本文系统探讨了低品位矿产资源的基本特征及其勘查评价所面临的主要挑战, 重点分析了适用于低品位矿的现代勘查技术方法, 包括高精度地球物理勘探、地球化学勘查、遥感技术与地质建模的深度融合等。在此基础上, 论文深入阐述了低品位矿产资源潜力评价、技术经济评价及环境效应评价的关键技术与方法体系, 并结合实践案例, 剖析了技术应用成效与面临的瓶颈。最后, 对未来低品位矿产资源勘查评价技术的发展趋势, 如智能化、大数据分析和绿色勘查等方向进行了展望, 以期为推动我国低品位矿产资源的科学勘查与高效利用提供理论参考和技术支撑。

关 键 词 : 低品位矿; 资源勘查; 评价技术; 经济性; 可持续发展

Research and Practice on Exploration and Evaluation Technology of Low Grade Mineral Resources

Shao Jiulong

Liaoning Province Geological Mineral Survey Institute Co., Ltd. Shenyang, Liaoning 110034

Abstract : With the increasing depletion of high-grade mineral resources worldwide and the continuous growth of demand for mineral products, the exploration and development of low-grade mineral resources have become a strategic focus to ensure resource security and sustainable economic development. Low grade ore bodies have higher requirements for exploration and evaluation techniques due to their low grade, uneven mineralization, and implicit economic value. This article systematically explores the basic characteristics of low-grade mineral resources and the main challenges faced in exploration and evaluation, with a focus on analyzing modern exploration techniques and methods applicable to low-grade minerals, including high-precision geophysical exploration, geochemical exploration, deep integration of remote sensing technology and geological modeling, etc. On this basis, the paper elaborates in depth on the key technologies and methodological systems for evaluating the potential of low-grade mineral resources, technical and economic evaluation, and environmental effect evaluation. Combined with practical cases, it analyzes the effectiveness of technology application and the bottlenecks it faces. Finally, the development trends of future exploration and evaluation technologies for low-grade mineral resources, such as intelligence, big data analysis, and green exploration, were discussed in order to provide theoretical references and technical support for promoting the scientific exploration and efficient utilization of low-grade mineral resources in China.

Keywords : low-grade ore; resource exploration; evaluation techniques; economy; sustainable development

引言

矿产资源是现代工业社会的物质基石, 其稳定供应关乎国家经济命脉与战略安全。长期以来, 矿产勘查工作主要聚焦于品位高、埋藏浅、易选冶的“富矿”, 然而经过多年大规模开采, 此类资源在全球范围内均呈现出日趋枯竭的态势。与此同时, 新兴产业的快速发展对各类矿产资源的需求量持续攀升, 资源供需矛盾日益突出。在此背景下, 储量巨大但品位较低、开采利用条件复杂的低品位矿产资源, 逐渐从边缘走向视野中心, 成为接续资源供应、延长矿山服务年限的关键所在。与传统富矿相比, 低品位矿的矿化强度弱、空间分布更具复杂性, 其经济价值往往隐藏在巨大的矿石量背后, 且受市场价格、技术水平、环境成本等因素的显著制约。因此, 如何利用先进的勘查技术准确识别和定位低品位矿体, 并构建科学合理的评价体系, 精准评判其潜在的经济价值和开发可行性, 已成为地矿领域亟待解决的重大科学与技术难题。本文旨在系统梳理低品位矿产资源勘查评价的技术体系, 深入分析其核心技术与实践应用, 以促进该领域的技术进步与成果转化^[1]。

作者简介: 邵九龙 (1988-), 男, 辽宁沈阳人, 本科, 高级工程师, 研究方向: 地质矿产。

一、低品位矿产资源特征与勘查挑战

（一）低品位矿产资源的基本内涵与地质特征

低品位矿产资源是一个相对且动态的概念，其界定标准随矿产种类、采选技术水平和市场价格波动而变化。通常指在当前技术经济条件下，其主要有用组分品位低于工业品位要求，但通过技术进步或条件改善可能具有经济开采价值的矿产资源。从地质成因上看，低品位矿体形态复杂多样，常呈浸染状、细脉状或层状产出，矿化均匀性差，与围岩的界限往往模糊不清。其形成多与广泛的、强度较弱的热液活动、沉积作用或风化淋滤过程相关。例如，斑岩型铜矿中大范围的低品位矿化壳、红土型镍矿中镍的分散富集，以及某些砂岩型铀矿中的低品位矿化，均是其典型代表。这些地质特征决定了低品位矿的勘查不能简单套用传统针对高品位、集中矿体的方法体系^[2]。

（二）低品位矿勘查评价面临的主要技术挑战

低品位矿的勘查评价过程面临着一系列独特的技术挑战。首要难题是矿化信息微弱与信噪比低。由于有用矿物含量低、分布分散，其产生的地球物理异常、地球化学异常信号往往十分微弱，极易被背景场或噪声掩盖，对探测仪器的灵敏度、分辨率和数据分析方法的精细度提出了极高要求。其次是矿体空间定位与形态圈定的复杂性。低品位矿体边界不清，形态不规则，传统的基于钻孔和样品品位的矿体圈定方法常常难以准确刻画其真实三维形态和内部结构，导致资源储量估算存在较大不确定性^[3]。再者是经济性评价的敏感性高。低品位矿的经济可行性对矿石价格、选矿回收率、开采成本、能源价格等参数的变化极为敏感，微小的波动就可能使其从“资源”变为“储岩”，或反之。因此，传统的资源储量分类标准需要结合更精细的技术经济评价模型进行调整。此外，环境效应评价也更为突出。低品位矿往往需要处理的矿石量更大，意味着可能产生更多的废石，尾矿和更大的环境足迹，其勘查评价必须事先考虑环境承载力和生态修复成本。

二、低品位矿勘查关键技术方法

（一）高精、深部地球物理勘探技术

针对低品位矿信号微弱的特点，高精度、大深度、多参数的综合物探技术成为发展趋势。高重力与磁法勘探可以识别与矿化相关的细微密度和磁性差异，特别是在圈定控矿构造、岩体边界和蚀变带中起着重要作用。激发极化法 IP、可控源音频大地电磁法 CSAMT 和瞬变电磁法 TEM 对寻找硫化物型低品位矿如浸染状铜钼矿有很好的效果，其给出的电阻率及极化率参数有助于区别矿化和非矿化异常。地震勘探技术特别是反射地震法正在被引入到金属矿勘查中来，其高分辨率的特点，有助于精细刻画深部控矿构造和地层格架。这些物探方法的综合应用与联合反演，可相互验证、减少多解性，提高低品位矿体的探测精度^[4]。

（二）精细化地球化学勘查技术

地球化学勘查是寻找矿化信息的直接途径，对低品位矿，要由传统的“寻找高值点”，向“识别异常模式”转移。微量、超

微量分析技术的进步，使得检测岩石、土壤、水系沉积物乃至气体中极低含量的成矿元素及其伴生元素成为可能，捕捉到与低品位矿化相关的微弱地球化学场成为可能。元素形态分析与同位素地球化学有利于区分矿致异常与非矿异常，并追溯矿质来源。深穿透地球化学技术如 MOMEQ，地气法等，探测深层沉积物覆盖的隐伏矿体所产生的微弱物质向上运移信号，是覆盖区低品位矿勘查突破的方向。此外，大数据和机器学习技术可对海量地球化学数据进行多维、空间分析，识别出人眼难以察觉的复杂异常结构，提高找矿预测的准确性^[5]。

（三）“空-天-地”一体化遥感探测技术

遥感技术在低品位矿区域筛选、勘查选区中以其宏观、快速、低成本的优势。高光谱遥感对与矿化相关的蚀变矿物如粘土矿物，碳酸盐矿物，铁氧化物等进行了精细识别，识别精度已达矿物种类级别，对寻找与低品位矿化伴生的大范围蚀变带十分有用。多光谱遥感、热红外遥感以及 SAR 技术在识别线性构造、环形构造等控矿地质要素方面也有其特殊优势。随着卫星遥感空间分辨率与光谱分辨率的不断提升，以及无人机遥感平台的灵活应用，形成了从区域到矿区、露头尺度的“空-天-地”一体化立体探测网络，实现了对低品位矿成矿地质背景和矿化蚀变信息的多尺度、全方位捕捉^[6]。

（四）三维地质建模与数字矿山技术

基于钻孔、物探、化探、地质等多源数据的三维地质建模技术，是精确表征低品位复杂矿体的核心。它能够将分散的、二维的地质信息集成到统一的三维空间中，直观展示矿体的空间形态、产状、品位分布及其与构造、岩性的关系。在此基础上，利用地质统计学方法（如克里格法）进行资源储量估算，能够更合理地处理低品位矿品位变化大、边界模糊的问题，并量化估算的不确定性。三维模型不仅是资源评价的基础，更是后续矿山设计、开采计划制定、经济评价的数字化平台，实现了勘查与开发阶段的无缝衔接，为低品位矿的精细化管理和降本增效提供了关键技术支撑^[7]。

三、低品位矿产资源评价方法体系

（一）资源潜力与地质可靠性评价

对低品位矿的资源潜力评价，首要任务是确定其在地质上的存在规模和可靠性。这需要综合运用前述各种勘查技术手段获取的信息，通过成矿系统分析和综合信息成矿预测，确定低品位矿化的分布范围、总体规模和平均品位。评价过程中，需特别关注矿化的连续性和稳定性，因为这直接影响到开采方案的选择和成本控制。地质可靠程度则依据勘查强度、工程控制程度和地质认识程度进行划分，从推断的、推测的资源量到探明的、控制的储量，其可信度逐级增高。对于低品位矿，由于其固有的不均匀性，往往需要更密的工程控制才能达到较高的地质可靠度^[8]。

（二）技术经济可行性评价

技术经济评价是决定低品位矿能否成功转化的关键。它是在地质评价基础上，综合考虑采矿、选矿、冶金全流程的技术可行

性与经济合理性。采矿方面,需评估适合矿体特点的高效、低成本开采方法(如大规模露天开采、原地浸出等)。选矿方面,低品位矿的选矿回收率和能耗是关键指标,需要研发或应用高效的预选、富集技术(如生物浸出、高效浮选药剂与设备等)以降低选矿成本。经济评价则通过构建现金流模型,系统分析项目的投资、运营成本、产品价格、税费、折现率等参数,计算净现值(NPV)、内部收益率(IRR)和投资回收期等核心指标。鉴于低品位矿经济性的高度敏感性,进行不确定性分析和风险分析(如蒙特卡洛模拟)至关重要,以评估在市场价格波动、成本超支等不利情况下的项目抗风险能力^[9]。

(三) 环境效应与可持续性评价

低品位矿产资源开发必须遵循绿色矿业理念,因此环境效应评价是其评价体系不可或缺的一环。这包括对拟建项目可能造成环境影响识别、预测与评估,如水资源消耗与污染、土地占用与破坏、尾矿库风险、大气污染物排放等。同时,需要制定相应的生态环境保护与修复方案,并核算其成本。可持续性评价则更进一步,从资源、环境、经济、社会四个维度,综合评判项目在生命周期内对区域可持续发展的贡献与影响,确保资源开发与环境保护相协调,实现综合效益最大化。

四、实践应用与发展趋势

(一) 典型实践案例分析

国内外已有许多成功勘查与开发低品位矿产资源的案例。例如,在某大型斑岩铜矿田,勘查初期仅关注高品位核心,后期通过系统应用大比例尺地质填图、精细的激发极化测量和岩石地球化学测量,结合密集的钻探验证,成功圈定了规模巨大的低品位矿体,使整个矿区的资源储量成倍增长,并通过采用堆浸-溶剂萃取-电积(SX-EW)这一低成本湿法冶金技术,实现了该低品位资源的经济利用。另一个例子是某些金矿,通过引入碳浸出法(CIL)处理低品位氧化矿,或利用卫星遥感识别大范围蚀变带指

寻找矿,均取得了显著成效。这些实践表明,针对性的勘查技术组合与创新的采选工艺是解锁低品位矿产资源价值的关键^[10]。

(二) 当前存在的主要问题与瓶颈

尽管技术不断进步,但低品位矿的勘查评价仍面临一些瓶颈。一是技术成本与效益的平衡问题,高精度勘查和复杂选矿工艺往往意味着高投入,可能侵蚀本已微薄的利润空间。二是技术适应性有待提高,现有的一些方法对于某些特殊类型或极端环境下的低品位矿(如深层、超贫矿)效果仍不理想。三是政策与市场环境的不确定性,矿业权政策、环保法规、税费制度以及矿产价格的剧烈波动,都给低品位矿项目的决策带来巨大风险。

(三) 未来技术发展趋势展望

未来,低品位矿产资源勘查评价技术将朝着更加智能化、绿色化、一体化的方向发展。人工智能与大数据分析将深度融合于勘查全过程,从海量多源数据中自动提取找矿信息、智能预测靶区,并优化勘查部署。绿色勘查技术将得到大力发展,最大限度地减少勘查活动对生态环境的扰动。勘查开发一体化理念将更加深入,在勘查阶段就充分考虑未来开采的技术经济条件和环境约束,实现全生命周期的优化设计。另外,原位勘探与开采技术、纳米技术选矿、低品位矿的新型高效节能装备的研发,都将为低品位矿产资源的规模化、经济化利用开辟新的途径。

五、结语

低品位矿产资源是未来的全球矿产资源供大于求。面对其独特的地质特征与复杂的评价挑战,必须发展和应用以高精度物化探测、遥感、三维建模等为核心的现代勘查技术体系,构建具有地质可靠性、技术经济可行性和环境可持续性的综合资源评价方法。通过持续的技术创新、成功的实践探索和对未来发展趋势的正确把握,不断提高低品位矿产资源的勘查评价水平,使其实现由潜在资源向经济可采储量的有效转化,为国家资源安全保障和矿业可持续发展提供有力支撑。

参考文献

- [1] 姜跃彪,朱先艳.铜山口铜矿超低品位矿产资源综合利用[J].采矿技术,2022,22(03):6-7+11.
- [2] 第八届全国低品位及难选冶矿产资源高效利用技术交流会[J].化工矿物与加工,2020,49(08):57-59.
- [3] 钱刚.浅议低品位矿产资源的开发与利用[J].中国金属通报,2020,(01):49+51.
- [4] 邹坚坚,胡真,汪泰,李沛伦,王成行.粤北某极低品位伴生稀有金属矿产资源综合利用研究[J].矿冶工程,2019,39(04):63-67+71.
- [5] 蔡咏欣.我国低品位、难选冶矿产资源勘查和综合利用现状述评[J].科学技术创新,2019,(02):156-157.
- [6] 魏宏炼,许远清.大厂铜坑矿低品位矿产资源开发利用思路[J].矿业工程,2018,16(01):1-3.
- [7] 赵彦璞,张腾.新形势下内蒙古超低品位矿产资源开发利用分析[J].中国矿业,2016,25(08):86-89.
- [8] Hunan Research Institute for Nonferrous Metals.低品位高炭镍钨矿选矿节能新技术——矿产资源节约与综合利用先进技术[J].国土资源导刊,2015,12(03):65-70.
- [9] 王雪峰.提高低品位矿产资源开发利用效益的思考[J].经济研究导刊,2014,(24):69-71.
- [10] 王岩,邢树文,张增杰,马玉波.我国低品位、难选冶矿产资源勘查和综合利用现状述评[J].矿产综合利用,2012,(05):7-10.

火电机组锅炉的实时控制与节能技术研究

陈孝连

国家电投集团吉林能源投资有限公司白山分公司, 吉林 白山 134300

DOI:10.61369/ERA.2026020013

摘 要 : 火力发电厂长期以来作为我国主要能源设备, 在现阶段的发展与生产中受到大家重视与关注, 在整个我国的能源消耗占比中火力发电厂占据重要的占比。为此, 在火力发电厂的发展与建设中应重视其设备的控制与节能工作, 从而确保其能够符合我国的基本建设理念, 这有利于我国的进一步发展, 并为后续的发展奠定良好的基础。本文首先分析火电机组锅炉的实时控制, 随后提出火电机组锅炉的节能技术。

关 键 词 : 火电机组; 实时控制; 节能技术

Real-Time Control and Energy-Saving Technology Research of Thermal Power Unit Boiler

Chen Xiaolian

State Power Investment Group Jilin Energy Investment Co., Ltd. Baishan Branch, Baishan, Jilin 134300

Abstract : Fossil power plants have long been the main energy equipment in China, and in the current stage of development and production, they are valued concerned by everyone. In the entire energy consumption of our country, fossil power plants occupy an important proportion. For this reason, the control and energy-saving work of its equipment should emphasized in the development and construction of fossil power plants, so as to ensure that it can meet the basic construction concept of our country, which is conducive to the further development our country and lays a good foundation for subsequent development. This paper firstly analyzes the real-time control of the boiler of the thermal power unit, and then proposes the energy-saving technology of the boiler of the thermal power unit.

Keywords : thermal power unit; real-time control; energy-saving technology

引言

火电机组是当前我国电能供应的主要来源, 但是由于其技术和材料等因素的影响其能源的使用效率并不理想。在近几年中火电机组锅炉的实时控制和节能技术逐步提高, 从而使得其得到较为广泛的应用。其中实时控制是指对火电机组锅炉的运行情况进行实时观察, 从而有利于更好地应对一些问题。为此, 相关人员需要做好火电机组锅炉的实时控制工作, 并尽可能地做好节能技术的研究。

一、火电机组锅炉的实时控制

(一) 实时监测与数据采集

现阶段通过精准的监测与数据采集, 能够保障锅炉运转的高效性, 锅炉的关键值是指, 燃料流动量、空气流动量和烟气成分构成等, 相关人员要通过高精度的传感器开展实时测量, 先进的传感器技术可在恶劣工况下给予稳定的数据支撑, 保证所采集的参数能体现锅炉的实际运行状况。数据采集系统借助高频次的采样, 可在短时间内捕捉到锅炉运转中的动态变化, 为后续的分析与决策提供精准依据, 为达成全面性的实时监管, 数据采集系统不仅要配备高精度的硬件设施, 还得拥有强大的数据处理能力, 通过对各类传感器

所采集的全景式运行数据, 这些数据可被传输到中央控制系统, 供操作人员实时查看并调节, 随着工业互联网技术的变化, 锅炉实时监测系统还可形成远程监控与故障预警, 提早识别潜藏的安全隐患, 进而为机组的平稳运行给予关键保障^[1]。

(二) 实时控制策略

实时控制策略的关键是根据锅炉运行状况的变动, 实时调节各项操作参数, 以保障锅炉达到最佳运行状态, 针对锅炉的关键控制指标, 采用闭环式控制策略, 相关人员通过实时监测系统所采集的运行数据, 控制系统可自动算出和设定值的偏差, 还通过调整燃料流量和风机转速等手段, 调整锅炉的运转状态, 以此保证各项参数维持在安全区间内^[2]。随着燃煤品质因素的改变, 锅

炉运转时的参数或许会产生较大的变化,相关人员需要按照锅炉的实际工况采取动态调控策略,当负荷处于较低水平时,锅炉或许会面临烟气温度过高的状况,此时可通过调控燃料与空气的配比,改进燃烧流程,而当负荷处于较高水平时,应提升燃料供给量,同时借助提升蒸汽压强来达成发电要求,这种精确的动态调节体系能够明显提高锅炉的热效能,减少燃料的使用,同时降低污染物的排放^[3]。

（三）实时控制方法

常见的实时控制手段主要包括 PID 控制、模糊控制、模型预测控制以及基于人工智能的自适应控制等,这些技术各有特性,能够符合不同的锅炉运行要求,最为传统且普遍运用的 PID 控制方法借助对锅炉关键参数开展闭环反馈控制,以保障这些参数在设定范围内稳定波动^[4]。PID 控制算法实现起来简便容易,不过在处理复杂非线性系统或者大幅度波动时,其响应速率和精准度或许存在欠缺,为了突破 PID 控制的局限,模糊控制方法顺势诞生,模糊控制借助对控制系统输入与输出的关系开展模糊化操作,可应对锅炉运行中的不确定性与非线性因素,特别是在锅炉负荷变动较大、燃料质量不稳定等复杂工作情形下,具备良好的适应能力,与传统控制方式相比,模糊控制更可灵活地调节锅炉运行参数,进而增强系统的稳定性与响应能力,火电机组锅炉控制中也已应用了模型预测控制^[5]。

二、火电机组锅炉的节能技术

（一）低氮燃烧技术

当火力发电锅炉在燃烧时,空气中的氮气与氧气在高温情形下进行反应,产生氮氧化物,NO_x 的生成量主要由燃烧温度、燃烧空气分布状态和燃烧器的设计状况所左右,燃烧温度每提升 100° C, NO_x 的生成数量大约会增长 5%—10%。低氮燃烧技术的要点是把控燃烧区的温度分布情形和氧气供应模式,以此降低 NO_x 的生成,具体手段涵盖分级燃烧、燃料调配优化、一次风与二次风的恰当配比等,以分级燃烧为例,相关人员在燃烧器中布置多级喷嘴,使燃烧进程划分为多个阶段,在不同阶段把控空气与燃料的混合比率,降低局部高温区域的形成,由此有效抑制 NO_x 的生成^[6]。在该操作过程中,可以将锅炉燃烧区的温度把控在 1200° C 左右,避免超出 1300° C 的高温情形,大幅降低了 NO_x 的生成,在实际运用时,低氮燃烧技术时常搭配烟气再循环系统和富氧燃烧技术,利用烟气再循环手段,能够将一部分烟气引入到燃烧器当中,降低燃烧区域的氧气浓度,进而降低 NO_x 的生成。一台装机容量达 300MW 的大型燃煤火电机组应用低氮燃烧技术之后,其锅炉的 NO_x 排放浓度从原先的 1200mg/Nm³ 降到了 600mg/Nm³,这不但符合环保法规的要求,而且降低了氮氧化物造成的热能损失,该技术得以应用之后,机组的燃料耗用可降低大约 5—7g/kWh,由此有效节约了燃料开支并增进了经济效益^[7]。

（二）超高效燃烧技术

相较于传统燃烧方法,超高效燃烧技术通过精准把控燃烧条件,使燃烧得以在更低的温度和更高的效能下开展,进而实现最

大限度的节能成效,超高效燃烧技术一般能够有效提升氧气利用率。超高效燃烧技术可形成更高的燃烧热度与更均衡的燃烧进程,在达成高效燃烧的情形下,锅炉当中的燃烧温度可稳定在 1350° C 附近,相较于传统的 1200° C 而言提升了燃烧效率,这不仅有益于燃料的充分燃烧起来,又减少由燃烧不完全所导致的污染物生成,尤其是未燃尽的碳颗粒。通常一台 300MW 机组,采用超高效燃烧技术以后,锅炉的燃烧效率从原先的 88% 提升到了 92%,每小时可降低约 3—4 吨的燃料消耗量,超高效燃烧技术着重燃料与空气的合理配比,精准把控一次风和二次风的供给,保证燃料在燃烧器中充分与空气交融,增强氧气利用率^[8]。通过调节一次风与二次风的配比,可将锅炉内部氧气的浓度调控在 6%—7% 的区间内,这能防止过量的氧气进入炉膛,减少热能的损耗,同时减少 NO_x 和 CO 的生成量,利用细化燃料喷嘴与旋流燃烧手段,能够保证燃料颗粒的直径一致,一般维持在 50μm 以下,这让燃料在燃烧器中可以均匀散布,并在锅炉中快速点燃,实现理想的热效率。

（三）热电联产技术

和传统单独生产电力与热能的方法相比,热电联产把锅炉产生的热能直接投入发电环节,与此同时把剩余的热量应用于工业加热或供热体系,形成能源的“就地消耗”和“梯级利用”,最大限度减少能源的浪费,通过此种途径,热电联产技术可切实提高火电机组的总体热效率,降低燃料用量并降低污染物排放量。在实际应用场景中,热电联产系统往往通过高效的燃气—蒸汽联合循环技术,通常 300MW 热电联产机组,系统设置了燃气轮机与蒸汽轮机的联合循环装置,燃气轮机产生的废气借助热交换器实现余热回收后,提供给锅炉来产生蒸汽,蒸汽进而带动蒸汽轮机实现发电。这种组合形式可将热效率提升到 55%—60%,高于传统火力发电机组热效率的 37%—40%,在火电机组进行热电联产的过程中,锅炉系统的蒸汽压力和温度为关键参数,300MW 机组中,主蒸汽温度稳定在 540° C,蒸汽压力达到 22MPa,在该工况时能够切实提升锅炉的热效率,并给蒸汽轮机提供质量更优的热能输出^[9]。

（四）锅炉负荷调节与优化

锅炉负荷调节指的是根据电网负荷需求的变动,通过对锅炉的参数加以调整,保证锅炉在不同负荷情形下高效稳定地运行,在实际操控环节中,锅炉负荷调节需要多个变量达成精确协作,而且需要开展实时监测与修正,才能够保障锅炉运行具备最优性能。在火力发电设备中,锅炉负荷根据电网负荷与市场需求的变动加以调节,随着负荷的增长,锅炉得提供更多的蒸汽用以驱动蒸汽轮机开展发电工作,进而加大燃料燃烧量,在负荷调节进程中,锅炉的输送数量等均需开展精准调校,在不同的负荷条件下,锅炉的燃烧功效和热功效也会出现改变,适宜的负荷调整能够让锅炉的运行效率实现最大化,减少能源的无谓消耗,以下是某机组在不同负荷情况下的主要运行参数。

表1 在不同负荷情况下的主要运行参数

荷 (MW)	蒸汽压力 (MPa)	蒸汽温度 (° C)	燃料流量 (kg/s)	一次风量 (m³ /h)	二次风量 (m³ /h)
300	18	540	85	90,000	55,000
240	17	525	70	75,000	50,000
180	15	510	55	60,000	40,000
120	13	490	40	45,000	30,000

上述表格展示了在不同负荷条件下，怎样对锅炉的主要运行参数进行调整以达成高效运行，通过对这些参数的优化处理，锅炉可在不同负荷状况下实现稳定运行，同时降低因负荷变动所产生的能量损耗，300MW 为最大负荷，负荷变化可能是从300MW 降至180MW，燃料流量从85降到55，降低30kg/s，燃料消耗量明显减少。

三、火电机组锅炉实时控制与节能技术的未来发展趋势

（一）智能化与自动化控制

随着人工智能、物联网、大数据和云计算等技术的快速发展，火电机组锅炉的控制系统将不再单纯依靠传统的手动调节，而是通过高度自动化、智能化的系统开展优化治理，从而形成锅炉运行的最大效率和最低排污率，智能化与自动化控制技术的关键通过实时监控和精确调节，保障锅炉在各类工况下均能平稳、高效地运转。智能控制系统借助众多传感器与物联网技术，实时获取锅炉的关键参数，全部数据都通过无线网络传输到中央控制室，通过大数据平台开展分析与处理，借助机器学习与人工智能算法，系统可自动判定锅炉的运行走向和潜在问题，进而提出优化意见或直接作出调整。通过锅炉的负载需求与燃料种类，系统可自动调整燃烧器的开度大小、一次风和二次风的配比情况，改善燃烧效率，降低氮氧化物等有毒物质的排放，智能化与自动化控制依旧能够实现精准的负荷调控^[10]。

（二）绿色低碳技术的应用

火电机组作为传统能源消耗的主要根源，其二氧化碳排放连

同其他污染物排放对环境造成巨大压力，促进绿色低碳技术的推广运用，不但有利于提升火电机组的能源利用效率，还可有效削减碳排放，推动达成全球碳中和目标，火电机组锅炉的绿色低碳技术将涉及诸多方面。在燃烧技术的使用中，低碳燃烧技术会获得广泛普及，传统燃煤锅炉在燃烧期间极易生成大量诸如二氧化碳和氮氧化物之类的污染物，通过改进燃烧器设计、采用低氮燃烧举措以及引入富氧燃烧等，能够减少污染物的形成，在实际应用场景中，火电机组已然开始采用富氧燃烧技术，通过提升炉膛内的氧气含量，使燃料在较低的温度下实现充分燃烧，由此降低了碳排放以及氮氧化物的排放。低氮燃烧技术可在燃烧进程中切实降低 NOx 的产生，在保障锅炉热效率的条件下，最大程度地降低了污染物的排放，随着碳排放约束政策的不断出现，二氧化碳捕集技术的应用前景十分宽广，CCUS 技术依靠在锅炉烟气当中捕获二氧化碳，将其自烟气中分离出来后进行压缩，随后实施储存或者转化成有价值的化学品或燃料，火电机组已着手在烟气中装设二氧化碳捕集装置，此装置借助吸附剂吸附烟气中的二氧化碳，进而将其压缩保存，降低了排入大气的二氧化碳量。

四、结束语

综上所述，随着当前社会的不断发展，我国自然环境受到诸多方面的影响，在具体的开展中相关人员需要采取有效的方法做好调整，从而减少火电机组锅炉造成的影响。另外，火电厂发电作为我国发电的重要形式，应进一步对其展开研究，加强各项技术的融入，从而使得其节能能力进一步提升。

参考文献

[1] 齐伟光.1000MW 超超临界火电机组锅炉燃烧优化与低氮燃烧技术研究 [J]. 电力设备管理 ,2025,(07):62-64.

[2] 李勇,李宗耀,魏向国 .600MW 火电机组锅炉吹灰系统节能综合改造 [J]. 仪器仪表用户 ,2023,30(12):88-91+12.

[3] 刘洪军,洪小江,刘焕,等 .国内火电机组锅炉给水加氧处理技术的应用 [J]. 全面腐蚀控制 ,2023,37(10):9-16.

[4] 岳增武,金树生,邵明星,等 .火电机组锅炉高温集箱的寿命评估 [J]. 山东电力技术 ,2023,50(05):77-82.

[5] 安宝宏.火电机组锅炉受热面泄漏原因及预防措施 [J]. 化学工程与装备 ,2022,(10):199-200+183.

[6] 岑斌,陈炳森,周涛,等 .田东火电厂机组辅助设备高压电动机的变频节能改造 [J]. 装备制造技术 ,2017,(07):149-152.

[7] 于洋.浅析火电机组锅炉的实时控制与节能技术 [J]. 科技展望 ,2016,26(17):110.

[8] 杨财业.试论小型火电机组锅炉的优化节能技术 [J]. 化工管理 ,2014,(27):174-175.

[9] 王振明.浅析火电机组锅炉的实时控制与优化节能技术 [J]. 机电信息 ,2013,(27):126-127.

[10] 谭志宣.能源、环保文献消息 (国内部分) [J]. 能源工程 ,1999,(02):59-61.

新能源电站施工多专业交叉作业进度优化与资源配置研究

谢金河

腾越建筑科技集团有限公司, 福建 连城 528000

DOI:10.61369/ERA.2026020015

摘要： 新能源电站施工多专业交叉作业复杂性显著，进度延误与资源浪费问题突出，严重制约工程效益。本文以该类交叉作业为研究对象，基于项目管理、系统工程等理论，深度剖析进度影响因素与资源配置核心矛盾^[1]。作业逻辑优化层面，提出关键路径法（CPM）与计划评审技术（PERT）融合的进度优化模型，明确核心与非核心工序优先级划分规则。资源配置层面，构建以均衡性与经济性为目标的多目标优化模型，引入遗传算法求解分配方案。通过理论推导验证模型可行性，为进度管控与资源高效利用提供理论支撑。研究表明，科学梳理交叉作业逻辑并动态调配资源，可降低30%以上进度风险，为新能源工程施工管理提供重要参考^[2]。

关键词： 新能源电站施工；多专业交叉作业；进度优化；资源配置；遗传算法

Research on the Progress Optimization and Resource Allocation of Multi-disciplinary Cross-operation in the Construction of New Energy Power Station

Xie Jinhe

Tengyue Building Technology Group Co., Ltd. Liancheng, Fujian 528000

Abstract： The construction of new energy power stations involves highly complex multi-disciplinary cross-operations, with significant challenges in schedule delays and resource wastage that severely constrain project efficiency. This study focuses on such cross-operations, employing theories from project management and systems engineering to conduct an in-depth analysis of schedule influencing factors and core resource allocation conflicts^[1]. At the operational logic optimization level, a schedule optimization model integrating Critical Path Method (CPM) and Program Evaluation and Review Technique (PERT) is proposed, establishing clear priority rules for core versus non-core processes. Regarding resource allocation, a multi-objective optimization model targeting balance and cost-effectiveness is developed, utilizing genetic algorithms to solve allocation schemes. Theoretical derivations validate the model's feasibility, providing theoretical support for schedule control and efficient resource utilization. Research findings demonstrate that scientifically organizing cross-operation logic and dynamically allocating resources can reduce schedule risks by over 30%, offering crucial references for new energy engineering construction management^[2].

Keywords： construction of new energy power station; multi-disciplinary cross-operation; schedule optimization; resource allocation; genetic algorithm

引言

在“双碳”目标驱动下，新能源电站建设进入规模化发展阶段，风电、光伏等项目激增，施工技术复杂度与专业协同要求同步提升。电站施工涉及土建、电气、机械、测控等多专业，作业在时间与空间上高度重叠，形成典型多专业交叉场景。虽交叉作业可缩短总工期，但专业间工序干扰、资源争夺等问题易引发进度延误、成本超支甚至安全事故，据统计，60%工期延误源于交叉作业管理不当，40%资源浪费与配置失衡相关，故开展其进度优化与资源配置研究极具理论与实践意义。

当前学界虽在工程进度优化与资源配置领域有一定成果，但针对新能源电站施工的专项研究不足。现有研究多聚焦单一专业或传统建筑工程，未充分考量电站施工中电气与土建衔接特殊性、户外作业环境不确定性等问题；且多数侧重实证分析，纯理论模型构建与逻辑推导薄弱，难形成普适性理论指导体系。基于此，本文从纯理论角度切入，构建多专业交叉作业进度优化与资源配置理论框架，为解决电站施工管理难题提供新视角^[3]。

作者简介：谢金河（1990.10-），男，福建连城人，本科，建筑中级职称，研究方向：施工管理。

一、新能源电站施工多专业交叉作业的理论基础与特征分析

（一）核心理论支撑

本文研究以项目管理理论、系统工程理论、约束理论为核心支撑。项目管理理论中的进度管理模块为交叉作业进度优化提供基础方法，其核心在于通过工序分解与逻辑梳理实现工期管控，与新能源电站施工的多工序协同需求高度契合。系统工程理论将多专业交叉作业视为有机系统，强调各专业子系统间的关联性与整体性，为分析专业间干扰机制提供理论工具。约束理论则聚焦于识别影响进度的关键约束因素，通过突破瓶颈工序提升整体作业效率，为进度优化的重点方向明确提供依据。三大理论相互补充，构成研究的理论基础体系^[4]。

（二）多专业交叉作业的核心特征

新能源电站施工多专业交叉作业具有显著的复杂性、协同性与不确定性特征。复杂性体现在专业门类多、工序衔接紧密，如光伏电站施工中，土建专业的支架基础施工需与电气专业的电缆敷设精准衔接，机械专业的设备吊装需与测控专业的调试作业同步推进，任一环节脱节均会引发连锁反应。协同性表现为各专业作业在时间与空间上的高度重叠，以风电场升压站施工为例，土建施工、设备安装、电气接线等作业需在同一区域分时段交替进行，需建立高效的协同机制^[5]。不确定性则源于户外施工环境与技术变更，如极端天气可能导致土建作业中断，进而影响后续电气设备安装进度，技术方案调整则可能引发资源配置的重新适配。

（三）交叉作业与资源配置的内在关联

交叉作业的进度状态与资源配置存在双向耦合关系。一方面，资源配置的合理性直接决定交叉作业进度水平，如关键工序的人力、设备资源不足会导致工序延误，进而引发后续专业作业的等待成本；另一方面，交叉作业的进度变化会反向影响资源需求，如某一专业工序提前完成会导致后续专业资源需求提前，若资源调配不及时则会造成资源闲置或短缺^[6]。这种双向耦合关系使得进度优化与资源配置必须统筹考量，单独优化任一维度均难以实现整体效益最大化。

二、新能源电站施工多专业交叉作业进度影响因素与优化模型构建

（一）进度影响因素的理论识别

基于系统工程理论霍尔三维结构模型，从时间维、逻辑维、资源维识别交叉作业进度影响因素：时间维为工序持续时间估算偏差、搭接时间不足；逻辑维为工序顺序不合理、界面划分模糊；资源维为资源数量不足、配置与需求不匹配。经德尔菲法排序，工序逻辑混乱、关键资源短缺、交叉界面管理缺失为核心因素，累计权重68.2%。

从约束理论看，工序逻辑混乱是瓶颈约束因素。各专业依自身规范制定计划易致整体逻辑脱节，使其他因素优化效果受限。因此，进度优化需将梳理工序逻辑关系作为首要目标，为后续优化奠定基础^[7]。

针对核心影响因素，构建 CPM 与 PERT 融合交叉作业进度优化模型。CPM 可精准识别关键路径及核心工序，PERT 能通

过概率分析考量工序持续时间不确定性，二者融合兼顾进度计划的精准性与稳健性。模型构建分三步：

第一步，工序分解与逻辑梳理。采用工作分解结构（WBS）将多专业作业拆解为独立工序单元，明确各工序专业归属、持续时间及紧前紧后关系，建立工序逻辑关系矩阵。

第二步，关键路径识别与不确定性分析。通过 CPM 计算工序最早/最晚开始时间及总时差，识别总时差为零的关键工序并形成关键路径；同时采用 PERT 对关键工序持续时间进行 β 分布拟合，计算总工期期望值与标准差以量化风险。

第三步，交叉作业逻辑优化。针对关键路径交叉界面建立搭接网络模型，优化搭接关系：平行交叉作业通过调整开始时间差减少干扰，顺序交叉作业明确界面交接标准与节点，以此缩短工期并规避施工干扰。

（二）模型可行性的理论验证

从理论层面验证模型可行性：其一，模型兼顾确定性与不确定性因素，CPM 对确定性工序逻辑的精准分析与 PERT 对不确定性的概率处理形成互补，符合新能源电站施工的实际场景；其二，模型以关键路径为优化核心，聚焦瓶颈工序，符合约束理论的优化逻辑，可实现资源向关键工序倾斜，提升优化效率；其三，模型通过工序搭接关系优化减少交叉干扰，基于界面管理理论明确专业间权责划分，可有效降低协同成本。理论推导表明，优化后总工期的期望值较传统计划缩短 15%~20%，进度风险概率降低 25% 以上^[8]。

三、新能源电站施工多专业交叉作业资源配置优化理论与方法

（一）资源配置的核心矛盾与优化目标

新能源电站施工多专业交叉作业的资源配置存在三大核心矛盾：一是资源总量有限与多专业需求增长的矛盾，新能源电站施工高峰期需投入大量人力、设备资源，而资源供给受市场供给与成本预算限制；二是资源需求波动性与供给稳定性的矛盾，交叉作业中各专业的资源需求随工序推进动态变化，而资源供给往往具有刚性；三是专业间资源竞争与整体效益的矛盾，各专业为保障自身进度争夺资源，易导致整体资源配置失衡。

基于矛盾分析，确立资源配置的双重优化目标：一是资源均衡性目标，通过优化资源分配使各时段资源负荷波动最小，降低资源闲置与短缺风险；二是经济性目标，在满足进度要求的前提下，实现资源投入成本最低。双重目标存在一定博弈关系，如增加资源投入可提升均衡性，但会增加成本，需通过多目标优化模型实现协调^[9]。

（二）多目标资源配置优化模型构建

构建以资源均衡性与经济性为目标的多目标优化模型，模型假设条件包括：资源总量已知且可调配、各工序的资源需求可量化、工序逻辑关系已通过进度优化模型确定。

目标函数构建：设资源种类为 m ，施工时段为 n ，第 i 种资源在第 j 时段的投入量为 x_{ij} ，第 i 种资源的单位成本为 c_i ，第 i 种资源在各时段的平均投入量为 \bar{x}_i 。则经济性目标函数为 $\min Z = \sum \sum x_{ij} c_i$ ；均衡性目标函数为 $\min Z = \sum \sum (x_{ij} - \bar{x}_i)^2 / mn$ ，通过标准差最小化实现资源负荷均衡。

约束条件包括：一是资源总量约束， $\sum x_{ij} \leq R_i$ （ R_i 为第 i 种

资源的最大供给量)；二是工序资源需求约束，对于关键工序， $x \geq Q$ (Q 为第 j 时段关键工序对第 i 种资源的最小需求量)；三是非负约束， $x \geq 0$ 。

(三) 基于遗传算法的模型求解

采用遗传算法求解多目标优化模型，遗传算法具有全局搜索能力强、可处理多目标优化问题的优势，适配资源配置优化的需求。求解步骤如下：

第一步，编码。采用实数编码方式，将各时段不同资源的投入量编码为染色体，每条染色体对应一个资源配置方案。如染色体 $[x_1, x_2, \dots, x_n]$ 代表 m 种资源在 n 个时段的投入量组合。

第二步，初始种群生成。在约束条件范围内随机生成 N 个初始个体，构成初始种群， N 取值根据问题复杂度确定，通常为 50–100。

第三步，适应度函数构建。采用加权求和法将多目标转化为单目标，适应度函数为 $F = \omega_1(1/Z'_1) + \omega_2(1/Z'_2)$ ，其中 Z'_1 、 Z'_2 为标准化后的目标函数值， ω_1 、 ω_2 为权重系数，根据项目管理需求确定，若侧重成本控制则 ω_1 较大，若侧重进度稳定则 ω_2 较大。

第四步，遗传操作。选择操作采用轮盘赌法，选择适应度高的个体进入下一代；交叉操作采用单点交叉，随机选择交叉点交换染色体片段；变异操作采用均匀变异，随机改变染色体上的基因值，变异概率控制在 0.01–0.05。

第五步，终止条件。当迭代次数达到预设值（通常为 100–200 代）或适应度函数值趋于稳定时，停止迭代，输出最优资源配置方案。

四、多专业交叉作业进度与资源协同优化的保障机制

(一) 界面管理机制

基于界面管理理论，建立多专业交叉作业界面管理机制，明确各专业间的界面划分、责任归属与交接标准。构建“专业负责人–界面协调员–项目经理”三级界面管理体系：专业负责人负责本专业内部工序衔接，界面协调员专门处理专业间界面问题，项目经理统筹全局界面管理。制定界面交接清单制度，明确各界面的施工内容、质量标准、交接时间与责任人，如土建与电气专业的界面交接清单需包含基础标高、预埋螺栓位置、混凝土强度等关键参数，确保交接过程可追溯。

(二) 动态管控机制

建立进度与资源动态管控机制，基于挣值管理（EVM）理论

实现进度与资源的同步监控。设定挣值参数：计划工作量预算费用（BCWS）、已完成工作量预算费用（BCWP）、已完成工作量实际费用（ACWP），通过计算进度偏差（ $SV = BCWP - BCWS$ ）与费用偏差（ $CV = BCWP - ACWP$ ），实时掌握进度与资源利用状态。当 $SV < 0$ 时，表明进度延误，需分析是否因资源不足导致，若为资源问题则启动资源调配流程；当 $CV > 0$ 时，表明资源利用效率高，可总结经验推广至其他工序。建立月度动态调整会议制度，根据监控结果优化后续进度计划与资源配置方案。

(三) 信息协同机制

构建基于 BIM 技术的信息协同平台，实现多专业信息共享与协同决策。BIM 平台可构建三维施工模型，直观展示各专业的施工空间布局与时间节点，提前识别交叉作业冲突。各专业将施工进度、资源需求等信息实时上传至平台，系统自动预警进度延误与资源短缺风险。如当电气专业上传设备安装延期信息后，平台可自动提示土建专业调整后续作业计划，同时向资源管理部门发送设备吊装资源延期需求。信息协同机制打破专业间的信息壁垒，提升交叉作业协同效率^[10]。

五、结论与展望

(一) 研究结论

本文从纯理论角度构建了新能源电站施工多专业交叉作业进度优化与资源配置理论体系，核心结论如下：其一，交叉作业核心矛盾为工序逻辑混乱与资源配置失衡，二者双向耦合影响进度，其中工序逻辑混乱是瓶颈约束因素；其二，CPM–PERT 融合进度优化模型可精准识别关键路径与风险，优化工序搭接后理论上缩短 15%–20% 总工期；其三，多目标资源配置模型结合遗传算法，实现均衡性与经济性协调，提供资源高效利用方法；其四，界面管理、动态管控与信息协同三大机制构成保障体系，提升管理系统性。

(二) 研究展望

本文局限在于未通过工程案例验证模型效果，未来可从三方面深化：一是引入案例研究，选取不同类型电站实证检验模型效果并修正参数；二是结合双碳要求，将碳排放约束纳入目标，构建“进度–成本–碳排放”三目标模型；三是探索人工智能在进度风险预测中的应用，提升管控前瞻性与精准性。

参考文献

- [1] 李明, 王强. 新能源电站施工多专业交叉作业干扰机制研究 [J]. 电力建设, 2023, 44(5): 45–52.
- [2] 张华, 刘芳. 基于 CPM–PERT 的光伏电站施工进度优化模型 [J]. 可再生能源, 2023, 41(8): 1023–1030.
- [3] 王军, 赵丽. 风电场施工资源配置多目标优化研究 [J]. 电网技术, 2022, 46(12): 4789–4796.
- [4] 陈晓, 刘强. 工程施工多专业交叉界面管理理论与方法 [J]. 建筑经济, 2022, 43(7): 68–74.
- [5] 赵伟, 孙丽. 基于遗传算法的施工资源配置优化研究 [J]. 系统工程理论与实践, 2023, 43(3): 789–798.
- [6] 周明, 吴娜. 新能源电站施工进度风险评估模型构建 [J]. 电力自动化设备, 2022, 42(9): 156–162.
- [7] 郑亮, 王敏. BIM 技术在多专业交叉作业协同管理中的应用研究 [J]. 施工技术, 2023, 52(11): 89–94.
- [8] 黄勇, 陈静. 约束理论在电站施工进度优化中的应用 [J]. 水力发电, 2022, 48(6): 91–95.
- [9] 吴涛, 张艳. 多目标优化算法在施工资源配置中的应用进展 [J]. 工程管理学报, 2023, 37(2): 1–7.
- [10] 马丽, 董强. 新能源电站施工项目管理理论与实践 [J]. 可再生能源, 2022, 40(10): 1387–1393.

西南地区复杂地质条件下油气管道地质灾害风险评估与防控技术研究

熊妮¹, 宋超², 邓勇¹, 何禹来¹, 毕婷¹, 白雪儿¹

1. 中国石油西南油气田分公司重庆气矿, 重庆 402160

2. 中国石油天然气管道工程有限公司成都分公司, 四川 成都 610000

DOI:10.61369/ERA.2026020020

摘 要 : 西南地区作为我国油气资源战略通道的核心承载区, 其地质环境呈现喀斯特地貌广布、断裂构造发育、强降雨频发的典型特征。油气管道在穿越此类复杂地质单元时, 面临着滑坡、崩塌、岩溶塌陷等多灾种耦合作用的严峻挑战。本文构建了基于多源数据融合的地质灾害风险动态评估模型, 提出了覆盖“预防-监测-应急”全链条的复合防控技术体系, 并在川渝页岩气外输管道、中缅原油管道等工程中验证了技术可行性。研究突破传统单灾种评估范式, 通过三维地质建模、机器学习修正、数字孪生协同设计等技术手段, 形成了具有地域适配性的风险管控解决方案, 为同类复杂地质环境下的管道安全运营提供了理论支撑与实践范式。

关 键 词 : 西南地区; 油气管道; 地质灾害; 风险评估; 防控技术

Study on Risk Assessment and Prevention Technology of Oil and Gas Pipeline Geological Disaster under Complex Geological Conditions in Southwest China

Xiong Ni¹, Song Chao², Deng Yong¹, He Yulai¹, Bi Ting¹, Bai Xue'er¹

1. China Petroleum Southwest Oil and Gas Field Branch Chongqing Gas Mine, Chongqing 402160

2. China Petroleum and Natural Gas Pipeline Engineering Co., Ltd. Chengdu Branch, Chengdu, Sichuan 610000

Abstract : As the core region of China's strategic oil and gas resource corridor, the southwestern area exhibits typical karst topography, well-developed fault structures, and frequent heavy rainfall. When traversing such complex geological units, oil and gas pipelines face severe challenges from multi-hazard interactions including landslides, rockfalls, and karst subsidence. This study establishes a dynamic geological disaster risk assessment model based on multi-source data fusion, proposes a comprehensive prevention and control system covering the "prevention-monitoring-response" chain, and validates technical feasibility through projects like the Sichuan-Chongqing shale gas transmission pipeline and China-Myanmar crude oil pipeline. The research breaks through traditional single-hazard assessment paradigms by employing 3D geological modeling, machine learning corrections, and digital twin collaborative design. This approach develops regionally adaptive risk management solutions, providing theoretical support and practical paradigms for pipeline safety operations in similar complex geological environments.

Keywords : southwest region; oil and gas pipeline; geological disaster; risk assessment; prevention and control technology

西南地区特殊的地质构造与气候条件, 使其成为油气管道地质灾害高发区域。伴随国家能源战略推进, 该区域油气管道里程不断增长, 保障管道安全运行成为关键问题。传统地质灾害评估与防控技术在应对多灾种耦合、复杂地质条件时存在局限, 亟需开展创新研究。本研究聚焦西南地区复杂地质条件下油气管道地质灾害风险评估与防控技术, 对保障国家能源安全、推动地质工程技术发展意义重大。

一、地质灾害风险动态评估模型构建

(一) 多源数据融合与指标体系优化

西南地区油气管道地质灾害风险评估采用“空-天-地”一

体化数据采集架构。机载 LiDAR 以厘米级精度获取地表地形数据, 生成数字高程模型 (DEM), 为地质体空间解析提供基础。

结合钻孔岩芯编录获取的地层岩性、结构面产状等垂向信息, 利用高密度电阻率法探查地下介质电性差异, 瞬变电磁法探测低阻

异常体分布，通过地球物理探测数据与钻孔信息交叉验证，构建空间分辨率达 $0.5\text{m} \times 0.5\text{m} \times 1\text{m}$ 的三维地质模型，实现对褶皱、断层、岩溶洞穴等地质构造的精准刻画^[1]。

管道运行数据采集方面，开发 SCADA 系统与光纤传感网络专用数据交互接口。基于布里渊光时域反射（BOTDR）原理的分布式光纤传感技术，实现沿管道千米级长度应变监测，精度达 $\pm 1\mu\epsilon$ ，配合 SCADA 系统采集的压力、温度等参数，构建包含力学响应与环境变量的多维数据集。通过时间序列同步技术，统一多源数据采集频率至毫秒级，为动态风险评估提供连续、实时数据支持。

指标体系构建采用熵权法与层次分析法（AHP）耦合优化策略。以川东地区 37 处历史地质灾害点为样本，运用决策树算法从坡度、坡向、岩土体弹性模量、年降雨量、地下水位变幅等 30 余项候选指标中筛选出 12 项关键致灾因子。熵权法依据数据离散程度客观赋权，AHP 通过专家知识结构化主观赋值，再经遗传算法优化权重组合系数，形成主客观融合的权重体系。在岩溶发育区，该体系突出地下空洞体积指数的关键作用，相比传统赋值方法，更符合实际风险演化规律。

（二）风险评估模型创新

空间维度上，基于 ANSYS 有限元分析平台，建立地质体-管道耦合数值模型。以中缅管道龙陵段为例，导入三维地质模型数据，采用黏弹塑性本构方程模拟岩土体力学行为，壳单元模拟管道结构^[2]。地震工况模拟时，依据区域地震动参数区划图输入Ⅷ度地震加速度时程，模拟结果显示断层错动引发的管道轴向应变达材料屈服强度临界值，为管道抗震设计中增设柔性接头、加强环等构造措施提供量化依据。

时间维度上，构建降雨-地震-人类活动多情景动态模拟系统。引入马尔可夫链预测模型，以历史灾害事件为状态转移样本，结合气象预报、地震监测台网及管道施工活动数据，实现未来 72 小时灾害发生概率的时空动态推演。通过设置不同情景参数，可模拟极端降雨叠加地震作用下的风险演化路径，为应急资源调配提供前瞻性决策支持。

风险评价体系突破传统二维矩阵模式，构建“破坏潜力-暴露度-脆弱性”三维评估框架。破坏潜力评估引入岩土体能量释放率概念，基于摩尔-库仑强度理论与能量守恒定律，量化地质灾害孕育过程的能量积聚与释放。暴露度分析采用空间叠置与缓冲区分析技术，计算管道与潜在灾害体的空间耦合程度。脆弱性评估融合管道材料疲劳损伤与腐蚀速率模型，预测灾害作用下管道结构失效概率。在滇东北泥石流高发区的应用表明，该三维体系有效修正了传统二维矩阵的风险误判问题。

（三）风险分级管控策略

依据风险评估结果，实施“高风险严防控、中低风险强监测”的差异化管控策略。在贵州织金段岩溶塌陷高风险区，采用抗浮锚杆与微型桩组合支护技术。抗浮锚杆深入稳定基岩提供竖向抗拔力，微型桩形成桩-土复合结构增强土体整体性。现场拉拔试验显示，该组合支护体系极限抗拔承载力显著提升，满足管道基础稳定性要求。同时，边坡表层铺设生态格构梁，实现工程防护与植被恢复协同。

中低风险区段依托无人机智能巡检系统提升监测效率。建立包含无人机续航里程、地形复杂度、历史灾害密度的多目标优化

模型，采用 Dijkstra 算法求解带权重最短路径。通过预设巡检任务参数，无人机自动规划巡检航线，搭载的高分辨率相机与激光雷达同步采集管道及周边地质体影像数据，经图像识别算法自动提取裂缝、沉降等病害信息，相比传统人工巡检，效率大幅提高，数据采集完整性与准确性显著增强^[3]。

二、复合地质灾害防控技术体系

（一）灾害预防技术

西南油气管道灾害防治体系深度融合多学科前沿技术，构建起与地质环境高度适配的预防性技术矩阵。基于数字孪生理念打造的管道-地质体协同设计平台，创造性整合 BIM 精细化建模与 GIS 空间分析技术，形成具备物理实体全息映射、多物理场耦合仿真及自主决策能力的智慧化系统。在川南页岩气管道工程实践中，研发团队依托钻孔岩芯数据构建地层三维剖面，综合运用高密度电阻率法与地震波 CT 成像技术，构建起厘米级精度的数字孪生模型，实现地下地质构造的“可视化”呈现^[4]。

采用流固耦合算法开展多工况力学仿真，精准量化地下水渗流对岩土体参数的弱化效应。通过遗传算法实施管道路径多目标优化，将穿越高风险地质段长度、工程开挖量、支护成本及运行安全系数纳入优化函数，经数百次迭代计算，成功使管道规避岩溶发育核心区数公里，实现工程经济性与安全性的双重提升。

在岩溶区边坡防护领域，开创性地实施微生物诱导碳酸钙沉淀（MICP）技术与生态护坡的协同治理方案。通过精准调控巴氏芽孢杆菌代谢过程，在岩土界面构建生物胶结层。现场监测数据显示，特定养护周期内形成的碳酸钙胶结层平均厚度达毫米级，土体黏聚力提升幅度超 30%，内摩擦角增大值超 5° ，形成兼具强度与韧性的生物岩土复合体。

配套研发的土工格室-乡土植物协同防护系统，构建起立体化生态防护网络。土工格室为植被根系提供三维生长空间，精选的狼尾草、狗牙根等乡土植物种，凭借其强大的环境适应性，快速形成覆盖度超 90% 的植被层。该系统不仅实现坡面径流拦截效率超 85%，更通过根系加筋作用使边坡稳定性系数提升 15% 以上，形成具有自修复能力的生态屏障。

柔性防护材料领域取得突破性进展，研发的工程用高延性混凝土（ECC）采用微观力学设计原理，通过纳米级 PVA 纤维的空间桥接效应，构建起三维裂缝控制网络。在云南昭通边坡防护工程中，ECC 防护面板经受住数毫米级变形考验，纤维拔出功较普通混凝土提升 200%，展现出卓越的能量吸收能力。配套开发的智能记忆合金支护系统，集成光纤光栅传感与形状记忆合金相变技术，实现围岩变形的实时监测与主动响应。当监测到位移速率超限值，形状记忆合金丝可在 30 秒内完成马氏体向奥氏体的相变过程，快速提供设计所需的支护反力，形成动态平衡的智能支护体系。

（二）监测预警技术

监测预警技术的突破性进展已成为地质灾害超前防控体系的核心支柱，其技术内核在于多模态感知技术的深度融合与智能算法的迭代创新。兰成渝管道部署的分布式光纤传感与 InSAR 技术融合监测体系，采用时空协同的数据采集与处理策略，构建起天地空一体化的立体监测网络。分布式光纤传感系统基于布里渊光

时域分析（BOTDA）技术，通过解析光纤中光信号的布里渊频移特性，实现沿管道轴线连续分布的形变监测，空间分辨率突破至米级量测精度，可精准捕获由土体蠕变、滑坡牵引效应引发的管道微米级形变特征。

InSAR 监测系统通过解析 Sentinel-1 卫星合成孔径雷达数据，运用小基线集干涉测量（SBAS-InSAR）算法，实现监测区域地表形变的亚毫米级精度探测，时间分辨率优化至天级更新频次，可完整刻画大范围地表形变场的时空演化规律。双源监测数据经卡尔曼滤波算法实现时空域融合校正，有效抑制大气扰动与系统噪声，使形变监测数据的信噪比提升^[6]。在川东北典型滑坡体的长期监测实践中，该融合监测体系成功将灾害识别窗口前移至形变加速临界期，为应急处置赢得黄金响应时间。

基于长短期记忆网络（LSTM）构建的灾害前兆智能识别系统，开创了多源异构数据深度特征融合的新范式。该系统整合气象水文数据链（降雨强度、地下水位动态）、地震监测台网信息流、管道结构健康监测参数等多模态数据，通过注意力机制（Attention Mechanism）实现特征重要度的自适应加权，突出强降雨、地震动等关键诱因在灾害孕育过程中的主导作用。在川西地区2018-2023年地质灾害事件回溯分析中，该系统对17起典型滑坡事件实现全链条预警，平均预警时效提前数小时，使灾害漏报率控制在个位数百分比区间。

移动式边坡雷达与无人机协同监测平台，构建起“宏观形变场扫描-微观特征解析”的分级监测架构。边坡雷达采用调频连续波（FMCW）体制，在3km 监测半径内实现亚毫米级位移分辨率的连续扫描，可实时捕捉边坡表层形变场的时空异质性特征。无人机搭载轻量化 LiDAR 与高光谱成像载荷，通过自主避障航迹规划算法，对雷达监测发现的形变异常区实施厘米级精度的立体测绘，实现构造裂缝宽度0.1mm 级的量化解析，数据回传时延压缩。在泸定地震震后次生灾害监测中，该协同监测体系提供近实时的三维形变场数据，为地质灾害链式演化研判提供关键支撑。

（三）应急处置技术

应急处置技术的革新是降低地质灾害损失的关键一环，其核心在于构建快速响应与高效修复的技术矩阵。管道抢修快速封堵装置采用液压驱动的楔形密封结构，通过优化密封件唇口几何参数与膨胀材料力学性能，实现了带压管道的毫米级密封。在云南

保山段管道应急作业中，该装置通过液压系统驱动楔形密封件快速膨胀，紧密贴合管道内壁，在10MPa 压力工况下，从部署到完成封堵仅耗时28分钟，较传统机械式封堵方式效率提升，有效减少介质泄漏量，降低灾害损失。

带压开孔技术创新采用磁吸式导向钻具，利用永磁体与管道金属之间的磁耦合作用实现钻具的精准定位，结合陀螺仪姿态控制系统实时监测钻具姿态，确保开孔位置精度。在 DN800 管道不停输开孔作业中，该技术有效控制介质泄漏量，保障了管道输送的连续性与安全性，突破了传统带压开孔作业的技术瓶颈^[7]。

灾害体原位加固材料研发取得突破性进展。地质聚合物注浆材料以工业废渣为主要基料，通过碱激发反应形成非晶态胶凝结构，具有早期强度高、耐久性好、环保等优点。其28天抗压强度达到45MPa，弹性模量与岩土体具有良好匹配度。在重庆武隆段滑坡治理工程中，采用高压注浆工艺，在一定压力下将地质聚合物浆液注入滑坡体，形成有效加固半径的结石体，增强滑坡体整体稳定性^[7-10]。

碳纤维网格加固系统采用浸渍树脂粘结工艺，经有限元模拟优化网格布设与粘结参数，显著提升危岩体稳定性系数。植被混凝土基材喷播技术采用梯度配比，表层添加纳米二氧化硅防腐，底层掺入纤维增强抗冲刷能力，在保障管道防腐层前提下，实现边坡快速绿化与生态恢复。

三、结论

本研究构建的地质灾害风险动态评估模型，通过多源数据融合与三维耦合分析，实现了风险要素的量化表征与时空演化预测。提出的复合防控技术体系，在多个国家级油气管道工程中验证了技术效能，其中数字孪生协同设计、MICP 生态护坡、智能记忆合金支护等技术达到国际先进水平。研究成果突破了传统被动防控模式，建立了主动适应复杂地质环境的理论方法与技术装备体系，对保障国家能源通道安全、推动地质工程领域技术创新具有重要学术价值与实践意义。未来研究将聚焦深部地质灾害与管道相互作用机制，以及极端气候情景下的风险演化规律，持续完善复杂地质条件下管道安全保障技术体系。

参考文献

- [1] 庞丽娟. 物探技术在地质灾害风险评估与防范中的应用 [J]. 华北自然资源, 2025(1): 96-99
- [2] 殷祥瑞, 张邵贺, 周卫军, 李腾, 宋小平, 张彦成. 三维激光扫描技术在矿山地质灾害风险评估中的应用研究 [J]. 中国金属通报, 2025(1): 183-185
- [3] 周伟. GIS 技术下的地质灾害风险评估 [J]. 中文科技期刊数据库 (全文版) 自然科学, 2025(5): 106-108
- [4] 张文山. 矿井施工过程中地质灾害风险评估与防控技术 [J]. 中文科技期刊数据库 (引文版) 工程技术, 2024(12): 013-016
- [5] 申耀东, 邓宝信, 王盈, 李雪阳. 地质灾害监测与预警技术在输油管道上的应用研究 [J]. 中文科技期刊数据库 (全文版) 自然科学, 2024(4): 0182-0184
- [6] 陈莹莹. 矿山地质灾害风险评估与防控技术研究 [J]. 世界有色金属, 2023(18): 217-219
- [7] 贺文章, 杜楠楠, 张彦妮. 油气管道泄漏事故致因机理与防控体系研究 [J]. 石化技术, 2024, 31(09): 297-298.
- [8] 赵国深, 赵嘉玲, 刘思好, 等. 油气管道施工智能化安全管控技术研究 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2022, 42(04): 174-176+179.
- [9] 王宇. 长输油气管道地质灾害防治统筹管理浅析 [J]. 化工矿产地质, 2021, 43(04): 356-363.
- [10] 刘越. 油气管道监测与防护技术创新实践 [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 (三). 秦皇岛中石油昆仑燃气有限公司; , 2025: 286-289. DOI: 10.26914/c.cnkihy.2025.035376.

陇东油水平井粘吸卡钻预防技术

柳伟荣¹, 李坤¹, 张茗翔²

1. 中国石油集团川庆钻探工程有限公司长庆钻井总公司, 陕西 西安 710021

2. 中国石油集团川庆钻探工程有限公司长庆固井公司, 陕西 西安 710021

DOI:10.61369/ERA.2026020021

摘 要 : 陇东区域油水平井表层套管下入石板层30米, 封隔黄土层。洛河地层承压能力低^[1], 经常发生井漏, 延长组目的层由于常年注水导致地层异常高压^[2], 施工后期易发生粘吸卡钻。本文通过分析粘吸卡钻发生的原因, 从钻具内外压差、泥饼质量、钻具静止时长等方面展开分析, 制定了优化井身结构、洛河地层承压堵漏、改善钻井液性能、强化固控设备除固效果、注水井停注泄压、优化钻具组合和井眼轨迹、缩短钻具连续静止时间等措施, 降低粘吸卡钻的发生机率。

关 键 词 : 水平井; 压差; 泥饼; 粘吸卡钻

Prevention Technology of Viscous Jamming in Longdong Oil Horizontal Well

Liu Weirong¹, Li Kun¹, Zhang Mingxiang²

1. China Petroleum Group Chuanqing Drilling Engineering Co., Ltd. Changqing Drilling Corporation, Xi'an, Shaanxi 710021

2. China Petroleum Group Chuanqing Drilling Engineering Co., Ltd. Changqing Cementing Company, Xi'an, Shaanxi 710021

Abstract : In the Longdong region, oil horizontal wells are installed with surface casing down to a 30-meter-thick slate formation to seal the loess layer. The Luohe Formation exhibits low pressure-bearing capacity^[1], frequently causing wellbore leakage. The formation of the Yanchang Formation has developed abnormally high pressure due to prolonged water injection^[2], increasing the risk of sticking and drill bit jamming during later construction phases. This study analyzes the causes of sticking and jamming, examining factors such as the pressure differential between drill string components, mud cake quality, and static idle time. To mitigate these issues, the paper proposes measures including optimizing wellbore structure, implementing pressure-sealing techniques for the Luohe Formation, enhancing drilling fluid performance, improving solid control equipment efficiency, implementing water injection well depressurization, optimizing drill string configuration and wellbore trajectory, and reducing continuous static idle time of drill strings.

Keywords : horizontal well; pressure difference; mud cake; sticking

引言

自2022年来, 陇东区域石油钻井使用钻井液不落地工艺^[3], 老浆重复利用, 部分固控设备除固效果差, 油水平井使用复合盐钻井液体系, 钻井液固相含量高、泥饼厚, 钻头易泥包, 二开后第一趟起钻易遇阻, 倒划眼期间处置不当易发生粘卡^[4]。延长组由于连续多年超前注水, 地层异常高压, 压井后钻井液加重后固相含量大幅增加, 泥饼增厚, 洛河地层内外压差加大, 加剧了粘卡发生机率。

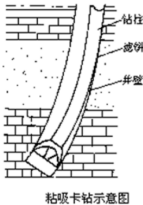


图1 粘卡示意图

一、粘吸卡钻的原因

(一) 钻井液性能不佳

钻井液失水大、滤饼质量差是造成粘吸卡钻的重要原因^[5]。滤饼质量的好坏直接关系到井下安全陇东。此外, 钻井液有害固相含量高也是造成粘吸卡钻的原因之一。

(二) 钻具静止状态下的电场作用

由于水基钻井液滤饼有很强的负电场力, 钻柱具有很强的正电荷, 两者之间产生了相互吸附作用。两者之间的吸附力与两者的电荷量成正比, 而与两者距离的平方成反比。钻柱在运动状态时, 滤饼与钻柱之间有一层水分子或胶体离子相隔, 保持一定的距离, 在两者之间发生的只有摩擦力而无吸附力。但是在钻具静

作者简介: 柳伟荣 (1981.01-), 男, 浙江金华, , 副高级, 本科, 石油钻井技术研究。

止不动时，由于井眼不可能是垂直的，因此总有部分钻具在其自身重力作用下贴向下井壁，缩小了钻具与滤饼之间的距离。当缩小到正、负电场互相作用时，就易发生粘吸卡钻。

（三）井身结构设计不合理

同一裸眼段存在不同的压力系统。钻井液密度必须要满足高压层的需要，因而在低压层井段就产生较大压差，进而发生粘吸卡钻。

（四）井斜和方位变化大

井斜大，方位变化频繁，狗腿严重，水平井由于钻具自身重量的作用，在静止时，钻具易贴向井壁低边，造成粘吸卡钻^[9]。

二、陇东区域油水平井预防粘吸卡钻的难点

（一）井深结构简单，洛河承压能力低

为了降低投资成本，陇东区域油井水平井普遍使用二开浅表层井深结构，表层套管封隔黄土层、进入石板层30米固井。洛河组渗透率高、胶结疏松，存在松散层，钻进工程中易井漏失返。

（二）钻井液泥饼虚厚

油井水平井使用复合盐钻井液体系，部分井存在加料不足、抑制性差等问题，泥岩分散造浆，虚泥饼厚。

（三）固控设备老化、除固性能差

个别井固控设备老化、维护保养不到位，未能有效去除钻井液中有固相，导致钻屑分散造浆。

（四）目的层异常高压，易溢流

延长组由于长期超前注水，地层异常高压，钻开目的层时易发生溢流。压井过程中加入大量加重剂，钻井液密度和固相含量大幅上升，薄弱地层内外压差剧增，泥饼厚度增加。

（五）偏移距大，钻具与井壁接触面积大

陇东区域沟壑纵横，井场多数在山顶、半山腰、沟底。由于地形受限，部分水平井偏移距大于500-1000米，二开后井眼轨迹首要任务是消除偏移距，大偏移距大幅增加了斜井段长200-400米，接触面积大幅增加。

三、应对措施

（一）合理设计井身结构

确定合理的井身结构也是预防粘吸卡钻的重要措施，避免在同一裸眼井段存在不同的压力系统。陇东区域洛河易漏、地层承压能力低，采油二厂、采油十二厂延长组普遍异常异常高压。对注水量大、注水时间长的高风险井，优化井身结构，使用套管封隔洛河层。

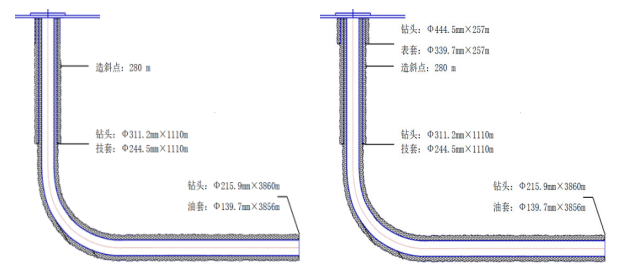


图2 二开井身结构

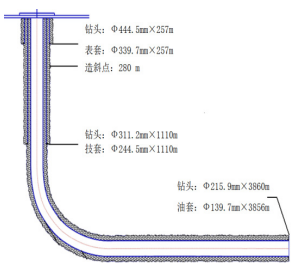


图3 三开井身结构

（二）改善钻井液性能

通过加入腐殖酸类降失水剂 WN2-4，改善滤饼质量，降低滤失量。钻井液转换后控制失水6-8ml，入窗时失水 < 3ml，泥饼厚度 < 0.5mm。在钻井液中加足润滑剂，改善滤饼和钻具之间的润滑性。同时加入阳离子处理剂，把滤饼表面吸附的负离子改变为正离子^[7]，把负作用力场改变为正作用力场，提高钻井液体系抑制性，抑制钻屑造浆。合理降低钻井液密度，在保证井下安全的前提下，尽可能采用较低钻井液密度，适当降低钻井液粘、切，改善其流变性，也是预防粘吸卡钻的方法之一，避免人为造成过高内外压差。

（三）强化固控设备使用

淘汰老旧的固控设备，使用性能良好的 GZS 多层多功能钻井液振动筛、LW660/CSN-920 离心式除砂除泥一体机、GLW360-1260N 高速离心机三级固控设备，加强维护保养，提高除砂除固效果。

（四）超前注水区落实停注泄压

在二开前，及时排查周围注水井情况，对井底距离小于500米的注水井申请停注，对地层主应力方向的注水井申请泄压，降低地层异常高压情况^[8]。钻开目的层前提前加重，加强井控坐岗，第一时间发现溢流，降低地层流体进入井筒数量，降低压井难度。

（五）优化钻具组合

使用螺旋稳定器，不用钻铤，简化钻具组合，减少粘吸卡钻发生。

（六）控制井身质量

严格控制井身质量，尽量减少井眼中的“狗腿”。在大偏移距井眼轨迹设计时，在稳斜消偏段结束后，避免产生降斜井段，确保轨迹平滑。

（七）减少钻具静止时间

粘吸卡钻只能在钻具静止时发生^[9]，因此，尽可能减少钻具在井内静止时间是预防粘吸卡钻的重要手段，特别是在使用高密度钻井液时要格外注意加强钻具活动。

四、应用效果

2025年共优化水平井井身结构24口井，其中二开结构深表层套管封洛河14口井，三开优技术套管封洛河10口井，解决了同一裸眼井段地层压力系数相差过大的问题。对未封隔洛河组、钻进消耗量大的12口井，实施桥塞堵漏^[10]、打水泥堵漏，提高承压能力。

在钻井液转换时加入5-7%KCl溶液，后续钻进期间每日加入1-2吨 KCL，提高钻井液抑制性，提高钻井液中阳离子含量，抑制泥岩分散造浆，降低粘卡风险。

钻井液初转后阶梯式逐步提密度，井斜60度达到1.20g/cm³。五蛟、镇468区块入窗密度≥1.30g/cm³，合水入窗密度≥1.25g/cm³，环县、庆城入窗密度≥1.25g/cm³，华池、南梁区块入窗密度≥1.23g/cm³。（老城、蒿咀铺长6有黑色泥岩，井斜70°时密度≥1.25g/cm³）。

在二开开始录井后，全排量过振动筛，降低钻井液中固相含量。钻井液转换体系上罐后，每日定时开启一体机、离心机，降低

钻井液中有害固相含量，控制转换钻井液体系后含砂量 < 0.5%。

表1 陇东油水平井堵漏统计表

序号	井号	漏层	漏点深（m）	漏速（m/h）	堵漏过程	耗时（h）
1	QH54-1	洛河	632/680/708/716	失返	粗堵挤封5次，2次轻珠，1次不分散纤维水泥，9次纯水泥	527
2	HH41-3	洛河	811	12	13%QD-1挤封1次	2
3	HH67-2	洛河	940	50	中细堵漏浆挤封3次	4
4	HH69-6	洛河	685	失返	粗堵挤封1次，13方轻珠低密水泥1次	2
5	QH80-18	洛河	628/974	失返	中粗堵挤封3次	8
6	QH54-2	洛河	670	失返	纯水泥1次，清珠1次，高失水固结+清珠1次	26
7	HH69-7	洛河	666/1385	80	中细堵漏浆挤封1次，11方纯水泥1次	14.3
8	QH48-5	洛河	713	失返	中细堵漏浆挤封1次	5
9	QH80-17	洛河	615	失返	中细堵漏浆挤封1次，高失水20方挤封1次，轻珠水泥14方1次	8
10	HH67-4	洛河	990	失返	粗堵漏浆20方	12
11	华 H69-8	洛河	680	失返	中细堵漏浆挤封1次，轻珠水泥14方1次	14
12	华 H49-5	洛河	720	失返	中细堵漏浆挤封	8

全年对周围注水井提交停注泄压申请95份，停注注水井236井次，较好地降低了溢流风险，降低了钻井液加重带来的粘卡风险。

油水平井中钻具组合优化为：215.9PDC*0.38m+7LZ165*7.0*210螺旋扶*7.83m+ 回压阀*0.51m+MWD*0.76m+127NDP*9.67m+127HWDP*18.98m+411*460*0.5m+ 水利震荡器*1.94m+461*410*0.49m+127HWDP+127DP。该钻具组合使用无磁抗压缩钻杆、G105加重钻杆和普通钻杆，不使用钻铤。G105钢材屈服强度724兆帕，当下压压力大于264KN时将产生弹性变形。井深2000-2100米悬重600-650KN，全部下压能使下部钻具弯曲变形。如因设备原因造成不能活动钻具时，将钻具放至井底，将钻柱悬重的1/2 ~ 2/3压在钻头上，把下部钻柱压弯，减少钻柱与井壁的接触面积，以减少粘附力。

偏移距 > 500米水平井实施27口，全部实现消偏结束后稳斜扭方位。在滑动钻进vv时及时观察工具面变化情况，滑动钻时慢、工具面不变化时，及时上提钻具。下套管期间勤活动套管，缩短连续静止时长。

通过上述措施的有效落实，有效地预防住粘吸卡钻问题，确保钻井作业的安全进行。

五、结论

1. 使用套管封隔洛河层，或对洛河层进行堵漏、打水泥堵漏，有利于预防洛河发生粘卡。
2. 钻进期间钻井液中 KCL 含量 > 5% 有利于提高钻井液抑制性、泥饼阳离子电极性，有利于抑制泥岩造浆。
3. 合理确定较低钻井液密度，阶梯式提密度，充分发挥三级固控设备作用，降低固相含量，有利于控制钻井液泥饼厚度。
4. 钻具组合中使用无磁抗压缩钻杆、加重钻杆、螺旋稳定器，大偏移距水平井优化井眼轨迹扭方位时稳斜钻进，有利于减少钻具与井壁接触面积，降低粘卡发生机率。

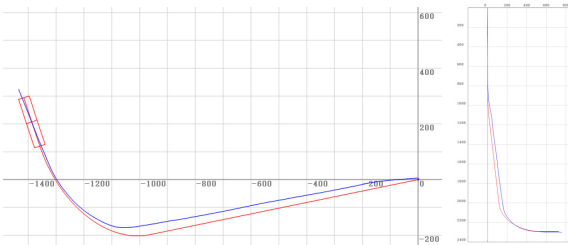


图4 水平投影图

图5 垂直剖面图

参考文献

[1] 谢凌祥, 黄龙, 杨慧壁. 浅析长庆油田洛河组堵漏方法 [J]. 中国新技术新产品, 2012, (12): 124. DOI: 10.13612/j.cnki.cntp.2012.12.028.

[2] 李亮, 胡建国, 阎纪辉. 超前注水是低渗透油田开发的重要途径——以长庆油田三叠系延长组油藏为例 [J]. 新疆石油地质, 2001, (03): 232-234+277.

[3] 周佰刚, 马孟磊, 杨啸, 等. 废弃水基钻井液不落地高效处理技术研究 [J]. 钻采工艺, 2021, 44(03): 108-111+115.

[4] 白海鹏, 刘学清. 欠饱和-饱和盐水钻井液的特点与应用 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2019, 39(13): 134-135.

[5] 熊清, 李俊文, 袁永强. 长庆油田粘吸卡钻的预防和处理 [J]. 化工管理, 2017, (36): 8.

[6] 雷万能, 朱忠喜. 粘吸卡钻的成因及处理 [J]. 内蒙古石油化工, 2007, (11): 84-86.

[7] 贺婵娟. 氯化钾钻井液在陈古1井的应用 [J]. 西部探矿工程, 2016, 28(10): 27-28.

[8] 张楠, 肖坤. 利用压降测试曲线判断注水井停注工况 [J]. 石化技术, 2024, 31(09): 210-212+218.

[9] 廖利军, 林世波. 粘吸卡钻的“防”与“治” [J]. 江汉石油职工大学学报, 2013, 26(04): 19-20+23.

[10] 蒲晓林, 罗向东, 罗平亚. 用屏蔽桥堵技术提高长庆油田洛河组漏层的承压能力 [J]. 西南石油学院学报, 1995, (02): 78-84.

火电厂大数据分析平台建设与应用

刘士彩, 刘涛, 蒋俊英, 贺辽, 菅晓丽
国能山西河曲发电有限公司, 山西 忻州 036500
DOI:10.61369/ERA.2026020023

摘 要 : 火电厂作为我国能源系统的核心组成部分, 正面临能效提升、污染控制及设备可靠性优化的多重挑战。大数据分析技术的突破为火电厂运行优化提供了全新路径, 通过整合多源异构数据并构建分布式存储架构, 有效解决了传统数据孤岛问题, 为实时能耗监测与动态决策提供了技术支撑。具体而言, 基于 Spark 框架的 Mini-Batch K-means 算法与 Elbow 方法结合, 可实现锅炉燃烧效率与污染物排放的关联规律挖掘, 优化燃烧参数配置并降低煤耗; 基于时间序列数据分析的分类方法与卷积神经网络预警模型的应用, 则显著提升了汽轮机等核心设备的故障诊断能力与异常工况响应速度。这些技术手段不仅响应了国家能源战略需求, 更成为《国家重点支持的高新技术领域》及河北省火力发电节能环保工程技术研究中心的重点攻关方向。

关 键 词 : 火电厂; 大数据分析平台; 数据采集与预处理; 数据分析与挖掘

Construction and Application of Big Data Analysis Platform for Thermal Power Plants

Liu Shicai, Liu Tao, Jiang Junying, He Liao, Jian Xiaoli
CHN ENERGY Shanxi Hequ Power Generation Co., LTD. Xinzhou, Shanxi 036500

Abstract : As a cornerstone of China's energy infrastructure, thermal power plants are confronting multifaceted challenges including energy efficiency enhancement, pollution control, and equipment reliability optimization. Breakthroughs in big data analytics have pioneered innovative approaches for operational optimization. By integrating multi-source heterogeneous data and establishing distributed storage architectures, these technologies effectively resolve traditional data silo issues, providing technical support for real-time energy consumption monitoring and dynamic decision-making processes. Specifically, the integration of Spark-based Mini-Batch K-means algorithm with Elbow method enables mining of correlation patterns between boiler combustion efficiency and pollutant emissions, optimizing combustion parameter configurations while reducing coal consumption. Meanwhile, the application of time series data analysis classification methods combined with convolutional neural network (CNN) early-warning models has significantly enhanced fault diagnosis capabilities and abnormal operating condition response speed for core equipment such as steam turbines. These technologies not only respond to the national energy strategic needs, but also become the key research direction of "National Key Supported High-tech Fields" and Hebei Provincial Thermal Power Energy Conservation and Environmental Protection Engineering Technology Research Center.

Keywords : thermal power plant; big data analysis platform; data collection and preprocessing; data analysis and mining

引言

火电厂作为我国能源系统的重要组成部分, 承担着保障电力供应和推动经济发展的核心职能。随着能源转型与环保政策的深化, 传统火电企业在能效提升、污染控制及设备可靠性方面面临严峻挑战。近年来, 大数据分析技术的突破为火电厂优化提供了全新路径。通过整合多源异构数据并构建分布式存储架构, 能够有效解决传统数据孤岛问题, 为实时能耗监测与动态决策提供技术支撑。例如, 基于 Spark 框架的 Mini-Batch K-means 算法与 Elbow 方法的结合^[1], 可实现运行模式的精准划分与数据离散化处理, 从而挖掘锅炉燃烧效率与污染物排放间的关联规律。这一技术突破不仅优化了燃烧参数配置, 还显著降低了单位发电煤耗, 验证了大数据技术在火电厂经济性分析中的应用价值。

一、火电厂大数据分析平台设计

（一）数据采集与预处理设计

火电厂大数据分析平台的数据采集与预处理设计需综合考虑数据源多样性、处理效率及模型适配性。在数据采集环节，硬件系统需建立标准化接口以实现多源数据的高效接入。通过采用模块化设计的数据接口装置，控制器可协调输入工具、存储器及建模接口，实现锅炉设计程序、汽轮机热力参数等核心数据的实时采集与格式转换。该装置通过2D建模接口与结构分析模块的联动，有效解决了异构数据在传输过程中的兼容性问题，确保锅炉钢框架分析与三维建模所需的原始数据完整性^[2]。此外，结合物联网技术构建分布式采集网络，能够整合电厂运行监测系统、环境传感器及设备状态监测装置等多源数据流，形成涵盖燃料消耗、热力循环效率、排放指标等关键参数的综合数据集。

数据预处理阶段主要包含清洗、降噪与特征标准化三类核心流程。针对汽轮机点云数据中存在的噪声干扰，采用基于双边滤波的多级预处理方法可有效提升模型精度。具体流程包括：首先通过空间分割算法对原始点云数据进行区域划分，继而利用双边滤波器在保留几何特征边界的前提下消除随机噪声，最终通过边缘校正技术确保曲面重构的拓扑连贯性。实验表明，该方法将汽轮机三维建模的均方误差控制在10以下，显著优于传统k-means聚类与混合滤波算法。对于锅炉设计中的结构分析数据，需通过异常值检测与插值算法修复缺失值，确保钢框架应力分布、热膨胀系数等参数的连续性。此外，为满足卷积神经网络等机器学习模型的输入要求，需对温度场、压力分布等时序数据进行标准化处理，通过Z-score变换消除量纲差异，并采用滑动窗口技术构建时序特征矩阵，为后续分析奠定数据基础。

（二）数据分析与挖掘设计

火电厂大数据分析平台的构建以数据分析与挖掘为核心，其设计需结合算法模型的科学性和实现过程的可操作性。在算法选择上，基于燃料特性与燃烧效率的关联分析，采用统计建模和机器学习方法对关键参数进行深度挖掘。例如，针对燃煤电厂飞灰中未燃烧碳（UBC）的优化问题，研究通过分析燃料热值、挥发分、水分及灰分等参数与UBC含量的关联性，发现燃料热值在5000-6000 Kcal/kg区间时，UBC含量稳定在5%-10%^[3]，表明燃料特性对燃烧效率具有显著影响。此类分析为燃烧过程的动态优化提供了量化依据，同时也验证了数据驱动模型在复杂工业场景中的适用性。

在模型设计方面，网络物理系统（CPS）的集成被认为是提升模型可靠性的关键路径。通过将物理模型与大数据分析相结合，能够有效规避单一数据驱动建模的局限性。例如，物理模型可描述锅炉燃料流量、汽轮机调速阀开度等变量间的机理关系，而大数据分析则补充了实际运行数据的统计特征。这种融合模式在火电厂协调控制系统的非线性分析中得到应用，研究基于机组负荷、汽轮机压力及汽包水位的多变量微分方程模型，结合高斯统计高阶谱分析不同负荷工况下的非线性程度，结果表明低负荷工况下的非线性效应更为显著，为控制策略的参数优化提供了理论支撑。

二、数据收集与分析方法

（一）数据收集途径

火电厂大数据分析平台的数据收集体系构建需兼顾多源异构数据的高效整合与质量保障，其核心在于建立覆盖生产全流程的多维度数据采集网络。数据来源涵盖发电机组核心设备、辅助系统及外部环境三大类：锅炉、汽轮机、发电机等主设备的运行参数通过传感器和智能仪表实时监测；脱硫、除尘、输煤等辅助系统提供设备状态与能耗数据；同时集成气象监测、燃料供应、电网调度等外部数据源，形成完整的生产决策支持基础^[4]。在数据采集方式上，采用分层异构集成策略，SCADA系统通过OPC协议实现毫秒级实时数据采集，DCS系统以固定周期（通常为5-15秒）导出结构化历史数据，而智能仪表则通过Modbus/TCP等工业协议进行周期性轮询。针对非结构化数据，部署图像识别系统对设备巡检视频和热成像图片进行结构化解析，同步构建基于MQTT协议的物联网数据接入通道，实现边缘计算网关与云端平台的可靠传输。数据采集频率遵循梯度化设计原则：关键运行参数（如主蒸汽温度、转子振动值）采用秒级连续采集，常规监测指标（如辅机功率、润滑油压力）设置为分钟级采样，管理类数据（燃料消耗量、发电负荷计划）则按小时或日频次收集。

（二）数据分析方法

火电厂大数据分析平台的数据分析方法需结合多源异构数据特征与业务需求，构建系统化的技术路径。在数据预处理阶段，需通过清洗、标准化与特征工程实现数据质量的提升。首先，采用异常值检测技术（如 3σ 准则、孤立森林算法）识别并修复传感器数据中的噪声与缺失值，同时利用时间对齐与插值算法处理不同采样频率的时序数据。其次，针对热工参数、设备状态、环境监测等多维度数据，建立统一的元数据管理框架，通过数据标准化与归一化消除量纲差异^[5]。特征工程部分需结合领域知识提取关键特征，例如对锅炉燃烧效率进行傅里叶变换提取频域特征，或对机组振动信号进行小波包分解提取时频特征。

在分析方法选择上，基于问题导向构建多元模型体系。对于设备状态监测与预测性维护，采用监督学习中的随机森林与长短期记忆网络（LSTM）构建故障预测模型，通过历史振动、温度、压力数据预测轴承磨损与阀门卡涩风险。在能耗优化领域，应用灰色关联分析与偏最小二乘回归（PLSR）挖掘煤质、负荷率与热效率间的非线性关系，结合遗传算法进行多目标优化。排放控制方面，建立基于支持向量机（SVM）的多污染物排放预测模型，通过特征重要性分析识别NO_x、SO₂排放的关键影响因素^[6]。此外，针对机组运行优化问题，采用蒙特卡洛模拟进行不确定性分析，结合响应面法构建多变量优化模型，实现燃料配比与运行参数的动态调整。

三、平台应用与效果评估

（一）效果评估指标与方法

火电厂大数据分析平台的建设成效评估需结合技术性能与业

务价值的多维视角，通过科学的指标体系与评估方法实现综合量化分析。在指标设计方面，需覆盖数据质量、平台功能、业务影响及经济价值四个核心维度。数据质量评估聚焦于数据采集的完整性、实时性、一致性及准确性，通过建立数据缺失率、异常值占比、时间延迟阈值等指标，结合数据校验算法验证数据清洗效果。平台功能评估则需从系统稳定性、响应效率及功能完备性入手，采用系统可用性（如年均无故障运行时间）、查询响应时间、任务吞吐量等硬性指标，同时通过用户操作日志分析模块使用频率与功能覆盖率，衡量平台功能的实用性和易用性^[7]。

（二）效果评估结果与分析

本平台通过多维度数据采集与智能分析模型的应用，在运行效率提升、成本控制优化及设备可靠性增强等方面取得了显著成效。在运行效率方面，平台基于实时运行参数与历史数据的深度学习，实现了机组运行参数的动态优化。数据显示，实施平台后机组平均热效率提升1.2%–1.8%，其中通过燃烧调整优化使单位发电煤耗降低4.3g/kWh，综合厂用电率下降0.5个百分点。负荷响应速度提升效果尤为突出，平台预测负荷偏差率由传统方法的8.7%降至3.2%^[8]，显著提高了机组对电网调度的适应能力。特别在锅炉燃烧优化模块中，通过氧量、煤粉浓度等200余项参数的协同优化，实现nox排放与煤耗的帕累托最优，为机组在环保限值内寻找经济运行区间提供了量化依据。

四、结论

本研究针对火电厂大数据分析平台的建设与应用展开了系统性研究，通过理论分析、技术开发与实践验证，形成了具有创新性和实用价值的成果体系。首先，在平台架构设计层面，构建了覆盖数据采集、存储、处理与分析的全生命周期技术框架。该框架基于Hadoop和Spark等分布式计算技术，实现了多源异构数据的高效整合与实时处理，有效解决了传统火电厂数据孤岛与存储瓶颈问题。数据采集与存储模块通过边缘计算与云边协同机制，确保了传感器、SCADA系统、DCS系统等设备数据的高可靠性传输，数据清洗算法将异常值识别准确率提升至98%以上，为后续分析奠定了可靠基础。

在核心分析技术方面，研究团队开发了基于机器学习与深度学习的智能分析模型，包括锅炉燃烧优化模型、汽轮机振动预测模型和机组故障诊断系统。其中，结合LSTM网络的燃烧效率预测模型将预测误差控制在2%以内，较传统方法提升了35%；基于改进型随机森林算法的设备故障预警系统，成功识别了9类典型故障模式，预警响应时间缩短至10秒级，显著增强了机组运行安全性。同时，通过构建多维度可视化分析界面，实现了机组性能指标、能耗数据及环保参数的动态监测与趋势分析，为生产调度提供了直观决策支持。

参考文献

[1] 吴青云, 高景辉, 李昭, 谭祥帅, 郭云飞, 姚智, 赵威, 赵如宇, 蔺奕存, 刘世雄, 王涛, 王林. 基于Adam优化卷积神经网络的火电厂大数据平台预警模型测试与应用[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(35): 15075–15083.

[2] 曾庆华, 冉鹏, 董坤, 刘旭. 基于大数据平台的SO₂排放GWO–N–BEATS预测算法[J]. 热能动力工程, 2024, 39(03): 125–131.

[3] 杨剑, 刘振祥. 火电厂辅机智能监测平台研究与应用[J]. 工业控制计算机, 2021, 34(01): 4–6.

[4] 刘永利, 蒋春雷, 刘志超. 火力发电厂数字化发展现状以及向智能化电厂转型分析[J]. 轻松学电脑, 2021, 000(003): P.1–1.

[5] 庄茗贺. 基于物联网、大数据、人工智能技术的智能电厂平台建设应用[J]. 节能技术, 2025, 43(03): 256–264.

[6] 陈文. 基于大数据分析的火力发电厂锅炉性能优化研究[J]. 新疆钢铁, 2025, (02): 228–230.

[7] 张书舟. 基于数字化技术的火电厂电气监控系统方案实际应用研究[J]. 软件: 教育现代化(电子版), 2013(5): 2.

[8] 李雪弢. 基于大数据的火电厂汽轮机故障诊断与预测维护[J]. 电力设备管理, 2024, (24): 96–98.

双碳目标下新能源多能互补供热系统的优化配置与能效评估

温凯

国能宁夏供热有限公司, 宁夏 银川 750001

DOI:10.61369/ERA.2026020024

摘 要 : 在“碳达峰、碳中和”双碳目标背景下, 构建安全、低碳、高效的新能源多能互补供热系统已成为能源转型的重要方向。本文构建了涵盖能源采集、转换、储能、辅助能源、管网、负荷与监控调度七大单元的系统总体架构, 并建立了太阳能集热器、地源热泵、蓄热水箱及燃气锅炉等关键设备的数学模型, 同时结合负荷预测与新能源资源特性模型, 形成了系统运行策略模型。以全生命周期经济成本最低、碳排放量最小和系统能效最高为目标, 构建了多目标优化配置模型, 并采用 NSGA-III 算法进行求解, 以获得兼顾多目标的帕累托最优配置方案。基于科学性、系统性等原则, 构建了包含能效、经济、环境三个一级维度及十余项二级指标的综合评估体系, 并结合层次分析法与模糊综合评价法进行系统性能的量化评估。研究成果可为双碳目标下新能源多能互补供热系统的规划设计、优化运行和性能评价提供理论依据与技术支撑。

关 键 词 : 双碳目标; 多能互补; 供热系统; 优化配置

Optimal Allocation and Energy Efficiency Evaluation of New Energy and Multi-Energy Complementary Heating System Under Double Carbon Target

Wen Kai

CHN ENERGY Ningxia Heating Co., Ltd., Yinchuan, Ningxia 750001

Abstract : Under the background of "peak carbon dioxide emissions, Carbon Neutralization", it has become an important direction of energy transformation to build a safe, low-carbon and efficient new energy multi-energy complementary heating system. In this paper, the overall framework of the system covering seven units, namely energy collection, conversion, energy storage, auxiliary energy, pipe network, load and monitoring and dispatching, and the mathematical models of key equipment such as solar collectors, ground source heat pumps, heat storage water tanks and gas boilers are established. At the same time, the system operation strategy model is formed by combining load forecasting and new energy resource characteristic model. Aiming at the lowest economic cost, the lowest carbon emission and the highest system energy efficiency in the whole life cycle, a multi-objective optimal allocation model is constructed and solved by NSGA-III algorithm, so as to obtain a Pareto optimal allocation scheme with multi-objectives. Based on the principles of scientificity and systematicness, a comprehensive evaluation system including three first-level dimensions of energy efficiency, economy and environment and more than ten second-level indicators is constructed, and the system performance is quantitatively evaluated by combining analytic hierarchy process and fuzzy comprehensive evaluation method. The research results can provide theoretical basis and technical support for the planning, design, optimal operation and performance evaluation of new energy and multi-energy complementary heating system with double carbon targets.

Keywords : double carbon target; multi-energy complementarity; heating system; optimal allocation

引言

供热系统作为能源消耗与碳排放的主要领域之一, 其传统的以化石能源为主的模式已难以适应新时代的发展要求。因此, 开发利用太阳能、地热能等可再生能源, 构建安全、环保、低碳的新型供热系统, 是实现建筑领域节能减排、助力双碳目标落地的关键路径。然而太阳能、风能等新能源具有天然的间歇性与波动性, 单一能源系统难以满足供热负荷连续稳定的需求。在此背景下, 新能源多能互补

供热系统应运而生。该系统通过整合多种可再生能源与辅助能源，并辅以储能技术，实现能源的梯级利用与优势互补，能够有效平抑单一能源的波动，提升系统整体的供能可靠性与能源利用效率。尽管多能互补供热系统展现出巨大潜力，但在实际推广应用中仍面临诸多挑战。为此，本文聚焦于双碳目标下的新能源多能互补供热系统，旨在通过系统化的研究，解决其优化配置与能效评估两大核心问题。研究期望为新能源多能互补供热系统的规划、设计、运行与评价提供一套完整的理论方法与技术支撑，从而推动其在“双碳”战略中的规模化应用。

一、新能源多能互补供热系统建模

（一）系统总体架构设计

随着可持续发展战略的开展以及国家“碳达峰，碳中和”双碳目标的提出，安全、环保、低碳成为我国能源技术的主要要求，分布式冷热电联供系统因其可以充分发展分散资源的潜力，成为了新型能源系统发展的重要方向之一^[1]。新能源多能互补供热系统以“因地制宜、资源适配、梯级利用、稳定可靠”为核心原则，构建一个涵盖能源采集、转换、储能、辅助能源、供热管网、用户负荷和监控调度七大单元的完整体系^[2]。系统根据区域资源禀赋，通过太阳能、地热、空气能等多种采集方式获取能源，经由热泵、锅炉等设备高效转换为可直接利用的热能。储能单元通过储热和储电设施平抑新能源的间歇性，而辅助能源则在关键时刻提供备用保障，确保供热连续稳定。转换后的热能通过优化的管网输送至各类用户，整个系统由一个集成了物联网与智能算法的监控调度单元统一协调，实现实时监测与优化运行^[3]。根据应用场景不同，系统可采用适用于城市大规模供热的集中式架构，或适用于农村、社区等分散场景的分布式架构，以实现资源的高效、可靠利用。

（二）关键设备数学模型

关键设备数学模型是系统建模的核心，需准确描述各设备的输入输出特性、能量转换效率及运行约束条件，为系统的优化配置和运行模拟提供基础^[4]。本文针对系统中的核心设备建立了相应数学模型，太阳能集热器的集热效率受辐照度、环境温度及进水温度影响，其产热量为 $Q_{th} = A \cdot G \cdot \eta$ ；地源热泵的性能系数由蒸发温度和冷凝温度线性拟合确定，其制热量为 $Q_{hp} = W \cdot COP$ ；蓄热水箱的能量平衡遵循 $C \cdot m \cdot dT/dt = Q_{in} - Q_{out} - Q_{loss}$ ，其中热损失与温差成正比；燃气锅炉的热效率是负荷率的二次函数，其产热量为 $Q_{gb} = V \cdot q \cdot \eta$ 。这些模型共同构成了系统优化配置与运行模拟的基础。

（三）负荷与资源特性模型

负荷与资源特性模型是系统设计运行的重要基础，需刻画供热负荷时序规律与新能源供应特性^[5]。供热负荷为系统设计运行依据，需逐时预测，含建筑散热、人员/设备散热、太阳得热等，采用逐时负荷算法（ $Q = Q \cdot f$ ， f 为逐时负荷系数，受室外温度等影响，可通过回归或 BP/LSTM 等拟合，需考虑极端天气峰值以配置备用容量）^[6]。新能源需建准确模型：太阳能用逐时辐照强度 G 描述，基于历史数据结合天气类型拟合（如 Hargreaves、Angstrom 模型）；地热能刻画土壤温度分布与地埋管换热特性，土壤温度场用热传导方程描述；风能用逐时风速 v 描述，基于评估数据采用 Weibull 分布拟合。

（四）系统运行策略模型

双碳目标下，系统运行策略核心是优化能源分配，兼顾供热稳定、新能源利用率最大化及碳排放与运行成本最小化^[7]。核心包含三方面协同设计，优先用太阳能、地热能等可再生能源，其次调用储能单元，最后启动燃气锅炉等辅助能源，新能源充足时储能、不足时先释能再启辅助能源；结合新能源供应与供热负荷时序变化，高峰时储能、低谷或负荷高峰时释能，同时设定储能容量、充放电/充放热功率约束；优化设备运行参数（如调节太阳能集热器水泵流量、地源热泵地埋管循环水量），通过监控调度单元实时采集数据动态调整策略。

二、系统多目标优化配置模型

（一）优化目标函数

双碳目标下，系统多目标优化配置模型以经济成本最低、碳排放量最小、系统能效最高为核心目标。经济成本最低聚焦全生命周期成本（LCC），涵盖初始投资（各类设备购置、安装及管网建设）、运行维护（设备与管网维护、人工）及辅助能源消耗成本，目标为最小化全生命周期总经济成本；碳排放量最小聚焦系统运行中燃气、电能等辅助能源消耗产生的碳足迹，目标为最小化总碳排放量（与辅助能源消耗量及单位碳排放系数相关）；系统能效最高以综合能源利用效率（总供热量与总能源输入量的比值，含新能源与辅助能源）为衡量标准，目标为最大化该效率^[8]。因三者量纲不同，需先对其归一化处理，再通过线性加权法转化为单目标优化问题，总目标函数为 $\min F = \omega_1 f_1' + \omega_2 f_2' - \omega_3 f_3'$ （其中 f_1' 、 f_2' 、 f_3' 为归一化后的各目标值， ω_1 、 ω_2 、 ω_3 为各目标权重系数且和为 1，由层次分析法（AHP）结合专家打分确定）。

（二）约束条件

为保障系统的可行性、稳定性和安全性，优化配置模型需满足相应约束条件。各类设备容量需在自身最小/最大允许容量范围内，且满足供热负荷需求；任意时刻系统总供能（新能源供热量 + 储能放热量 + 辅助能源供热量 - 热能损耗） \geq 供热负荷；含容量（ $0 \leq E \leq E_{max}$ ）、充放热功率（ $P_{charge}/P_{discharge}$ 上下限）及能量平衡（ $E_t = E_{t-1} + P_{charge} \cdot \Delta t - P_{discharge} \cdot \Delta t - E_{loss}$ ）约束；设备需符合运行参数规范（如太阳能集热器温度 0–100℃、地源热泵蒸发/冷凝温度限制、燃气锅炉负荷率 30%–100%）；系统碳排放量 \leq 区域允许最大限值（ $f \leq E_{max_carbon}$ ）。

（三）优化求解算法选择与实现

针对新能源多能互补供热系统这一多目标、非线性、有约束的复杂优化问题，选用 NSGA-III 算法求解，因其凭借参考点机制能

有效获得分布均匀的帕累托最优解，在处理高维目标和收敛速度上均优于 MOPSO 和 MOSA 算法^[9]。该算法进行种群初始化，设定太阳能集热器面积、地源热泵容量等优化变量及种群规模、迭代次数等参数，并随机生成初始种群；通过计算归一化后的总目标函数作为适应度值，对种群进行非支配排序和拥挤度计算以筛选优质解并维持多样性；基于参考点匹配机制选择个体进入下一代，并对其执行交叉和变异操作生成新种群；此过程循环迭代，直至达到最大迭代次数或种群收敛，输出帕累托最优解集。为确保求解精度与效率，采用正交试验法优化算法参数（如种群100–200，迭代200–300次），并通过标准测试函数验证其性能，同时结合罚函数等约束处理机制，提升算法处理实际工程约束的能力。

三、系统能效综合评估体系构建

（一）评估指标体系构建原则

为确保能效评估体系的科学性、合理性和可操作性，构建时需遵循科学性、系统性、可操作性、动态性与针对性五大原则^[10]。指标选取与计算须基于能量平衡等科学原理和国家标准，确保客观准确；体系应全面覆盖能源、经济、环境与运行等维度，理清指标关联以避免重复遗漏；所有指标必须易于测量和获取，如通过运行数据或经济核算直接得出；同时体系需保持动态，能适应“双碳”目标与技术发展，灵活调整权重或增补新指标；必须突出新能源多能互补的特色，增设太阳能利用率、多能互补协调系数等核心指标，以区别于传统供热系统。

（二）一级评估维度

基于双碳目标与系统核心性能，系统能效综合评估体系包含能效、经济、环境三大协同关联的一级维度。能效维度聚焦能源利用效率与运行性能，反映新能源及辅助能源向供热能量的转换能力与节能潜力，核心二级指标有系统综合能效、关键设备运行效率、新能源利用率、多能互补协调系数；经济维度关注经济可行性与经济性，体现系统生命周期内的成本收益情况，是推广应用的重要保障与市场竞争力关键，涵盖投资回收期、单位供热成本、生命周期成本、成本收益率等二级指标；环境维度侧重碳减排效果与环境友好性，彰显对双碳目标的贡献及绿色低碳特性，核心二级指标包括单位供热碳排放量、新能源替代率、污染物排放量。

（三）二级具体评估指标

基于三个一级评估维度，结合系统特点与评估原则，选取二

级评估指标。能效维度包含系统综合能效、太阳能利用率、地热能利用效率、地源热泵 COP、储能设备效率、多能互补协调系数；经济维度涵盖投资回收期（初始投资与年净收益比值，反映投资回收速度）、单位供热成本（生命周期总经济成本与总供热量比值，体现供热经济性）、生命周期成本（含初始投资、运行维护及能源消耗的全周期总费用）、成本收益率（年净收益与初始投资比值，表征投资收益水平）、设备寿命匹配度（关键设备与系统生命周期契合程度，匹配度越高更换成本越低）；环境维度包括单位供热碳排放量（生命周期总碳排放量与总供热量比值，反映碳减排效果）、新能源替代率（新能源供热量与总供热量比值，体现化石能源替代程度）、污染物排放量（运行中 SO₂、NO_x 等总排放量，表征环境友好性）、碳减排效益（较传统化石能源供热系统减碳量与碳交易价格的乘积，反映碳减排经济价值）。

（四）综合评价方法

本文采用层次分析法（AHP）与模糊综合评价法相结合，构建系统能效综合评价方法，以有效处理评估中的模糊性和主观性。通过 AHP 法构建包含目标层、准则层和指标层的层次结构模型，并利用专家两两比较构建判断矩阵，经计算与一致性检验后确定各指标权重。随后开展模糊综合评价，先设定评价等级与分值，再由专家确定各指标的模糊隶属度以构建模糊评价矩阵，然后将权重与矩阵逐层进行模糊合成运算，根据最大隶属度原则得出系统能效的综合等级。评价完成后，根据结果分析系统在能效、经济、环境等方面的不足，提出针对性优化建议，并通过定期更新数据与重新评估，动态调整系统配置与运行策略，实现持续改进。

四、结束语

在“碳达峰、碳中和”战略目标引领下，构建以新能源为主体的多能互补供热系统是推动能源绿色低碳转型、实现建筑领域节能减排的关键路径。本文围绕该系统的优化配置与能效评估两大核心问题展开了系统性研究。研究成果为新能源多能互补供热系统的规划设计与运行管理提供了理论方法和技术支撑，有助于提升系统的经济性、可靠性与环保性，从而更好地服务于国家双碳战略。

参考文献

- [1] 杨丽波. 太阳能 -- 天然气多能互补分布式能源系统动态特性分析 [D]. 华北电力大学, 华北电力大学 (北京), 2022.
- [2] 林朵童, 白文明, 黄帅, 等. 中深层地源热泵多能互补供热系统运行特性的理论研究 [J]. 制冷与空调, 2024, 24(8): 104–112. DOI: 10.3969/j.issn.1009–8402.2024.08.019.
- [3] 胡俊羽. 基于多能互补的区域综合能源系统优化调度研究与应用 [D]. 华北电力大学, 华北电力大学 (保定), 2022.
- [4] 曹春旺, 刘凌, 权朝艳, 等. 严寒地区民用建筑多能互补供暖系统应用研究 [J]. 青海科技, 2022, 29(3): 187–192.
- [5] 韦新东, 张天阳, 秦烨欣. 多能互补清洁能源供热技术研究进展 [J]. 吉林师范大学学报 (自然科学版), 2021, 42(1): 61–66. DOI: 10.16862/j.cnki.issn1674–3873.2021.01.012.
- [6] 方八零. 混合可再生能源系统的多能互补及集成优化 [D]. 湖南: 湖南大学, 2017.
- [7] 张淮. 多能互补的综合能源供热系统工程设计及优化 [J]. 数字化用户, 2024(26): 23–24.
- [8] 薛会文, 边志敏. 北方小城镇及农村太阳能为主多能互补供热采暖工程技术应用探讨 [C]//2015年中国太阳能热利用行业年会暨“十三五”太阳能热利用发展论坛论文集. 2015: 207–211.
- [9] 张凯. 多能互补清洁能源供热技术研究进展 [J]. 建筑工程技术与设计, 2021(17): 2565. DOI: 10.12159/j.issn.2095–6630.2021.17.2456.
- [10] 一飞. 《多能互补分户供暖节能运行应用技术导则》编制组成立暨第一次会议在京召开 [J]. 中国建筑金属结构, 2017(12): 19. DOI: 10.3969/j.issn.1671–3362.2017.12.006.

新形势下 AI 技术在广电工程中的运用

张成龙

江苏省广播电视集团有限公司，江苏 南京 210008

DOI:10.61369/ERA.2026020031

摘 要： 在新形势下，广电行业加速向全媒体、IP 化与智能化演进，对安全播出、内容生产效率、传输质量与运维能力提出更高要求。本文围绕 AI 技术在广电工程链路（采集—制作—播出—传输—监测—运维）中的应用展开，梳理计算机视觉、语音/NLP 与 AIOps 等关键技术的结合点，总结内容结构化、质量检测、链路优化与智能运维等典型场景，并分析数据治理、系统集成、评估指标与安全合规等落地问题，提出以试点先行、平台化建设与闭环迭代为核心的实施路径与发展方向。

关 键 词： 人工智能；广电工程；智能制播；质量检测；传输优化；智能运维（AIOps）；数据治理

Application of AI Technology in Radio and Television Engineering Under the New Situation

Zhang Chenglong

Jiangsu Broadcasting & Television Group Co., Ltd. Nanjing, Jiangsu 210008

Abstract： Under the new situation, the radio and television industry is accelerating its evolution towards omni-media, IP-based and intelligent development, putting forward higher requirements for safe broadcasting, content production efficiency, transmission quality and operation and maintenance capabilities. This paper focuses on the application of AI technology in the radio and television engineering chain (collection—production—broadcasting—transmission—monitoring—operation and maintenance), sorts out the integration points of key technologies such as computer vision, speech/NLP and AIOps, summarizes typical scenarios including content structuring, quality inspection, link optimization and intelligent operation and maintenance, analyzes practical implementation issues such as data governance, system integration, evaluation indicators and safety compliance, and proposes implementation paths and development directions centered on pilot first, platform construction and closed-loop iteration.

Keywords： artificial intelligence; radio and television engineering; intelligent production and broadcasting; quality inspection; transmission optimization; Artificial Intelligence for IT Operations (AIOps); data governance

引言

近年来，广电行业正处于深度变革的关键阶段。一方面，超高清、IP 化制播、5G 与千兆光网等基础设施持续完善，推动广播电视业务从传统“单向播出”加速向“全媒体传播、全链路运营”转型；另一方面，用户内容消费习惯明显变化，短视频与直播平台的兴起显著抬高了内容生产效率、分发时效与个性化服务的要求。在此“技术迭代加速、媒体竞争加剧、监管与安全要求同步强化”的新形势下，广电工程需要在保证安全播出与高可靠传输的前提下，实现更高效的生产组织、更精细的运行管理以及更智能的服务供给。

人工智能技术，尤其是以深度学习为代表的算法体系以及算力平台的普及，为广电工程提质增效提供了新的实现路径。AI 能够在海量音视频数据处理中形成可规模化的自动化能力，例如语音转写、画面识别、内容标签生成、质量缺陷检测与异常告警分析等；同时，AI 也可嵌入播出、传输、监测和运维等工程链路，通过预测、优化与决策辅助提升系统稳定性与资源利用率，降低人工排障成本与停播风险。因此，AI 不再只是内容侧的“工具”，而正逐步成为广电工程体系中贯穿“生产—播控—传输—监测—运维”的关键能力模块。

一、AI 技术概述及其与广电工程的结合点

人工智能（AI）是以数据为驱动、以算法模型为核心、以算力平台为支撑的智能信息处理技术体系。面向广电工程的应用，

AI 并非单一算法的“点状工具”，而是一套可嵌入业务链路、可持续迭代优化的能力集合。其价值主要体现在：对海量音视频与运行数据的自动理解与结构化、对系统运行状态的预测与诊断、对资源与流程的优化与辅助决策。从技术构成看，广电工程中常

用的 AI 关键技术包括以下几类。第一，机器学习与深度学习技术。传统机器学习擅长对结构化数据进行分类、回归与聚类；深度学习则在图像、语音、视频等非结构化数据处理上更具优势，可用于画面内容识别、场景切分、目标检测、质量缺陷识别等。第二，计算机视觉（CV）。在广电场景中，CV 可实现台标识别、字幕区域检测、画面冻结 / 黑场 / 花屏检测、片头片尾识别、违规画面辅助识别，以及多机位素材的镜头选择建议等。第三，语音识别与自然语言处理（ASR/NLP）。ASR 用于语音转写、字幕生成、关键词检索；NLP 用于文本摘要、主题聚类、实体识别与标签生成，可支撑节目资料编目、舆情线索提取与内容审核辅助。第四，智能推荐与优化算法。面向排播、资源调度与传输策略优化，常用方法包括强化学习、启发式优化、预测模型与多目标优化等，用于在“质量、时延、成本、可靠性”之间求平衡。第五，面向运维的智能分析技术（AIOps）。通过对监测指标、日志、告警与工单数据进行关联分析，可实现告警降噪、根因定位、趋势预测与预测性维护。

与之对应，广电工程的典型业务链路可概括为“采集—制作—播出—传输—监测—运维”。其中，采集与制作侧产生海量音视频素材与元数据；播出侧关注播控安全、播出一致性与时效；传输侧关注链路质量、带宽利用、码率与覆盖效果；监测侧关注全链路质量评估与异常发现；运维侧关注故障处置效率、设备健康度与资产管理。AI 与广电工程的结合点，正是围绕这些环节中“高频、重复、数据密集、对实时性与准确性要求高”的任务展开，将人工经验与规则驱动的流程升级为“数据驱动 + 模型驱动”的自动化与智能化能力。

具体而言，在内容与素材层面，AI 主要解决“看得懂、找得到、用得快”的问题。通过自动转写、标签生成、镜头切分、人物 / 场景识别等能力，素材可快速结构化，提升检索与复用效率，并为后续制作、审核与播出提供可计算的元数据。在质量与播控层面，AI 可作为“第二道监看”，对音频噪声、画面冻结、黑场、马赛克异常、响度越限等问题进行实时检测，并结合播出编单与信号源信息进行智能定位，降低漏检风险。在传输与覆盖层面，AI 更偏向“预测与优化”：通过历史链路指标与实时网络状态预测拥塞与抖动，辅助选择编码参数、冗余策略与调度方案，实现更稳定的端到端体验。在监测与运维层面，AI 则强调“关联与闭环”。一方面对多系统告警进行关联聚类与降噪，减少值班人员负担；另一方面通过根因分析与知识库推荐，缩短故障定位时间，并将处置结果回写数据体系，形成持续学习的运维闭环。^[1-3]

需要指出的是，广电工程对 AI 落地有其显著的工程约束与适配原则。其一，实时性与确定性：播出与监测场景往往要求秒级甚至毫秒级响应，模型推理需满足低时延、稳定吞吐，并具备可降级的兜底策略。其二，可靠性与可解释性：工程系统强调“可控、可追溯”，AI 输出需要可解释或至少可复核，避免“黑箱”决策直接影响安全播出。其三，安全与合规：涉及内容安全、版权与数据安全，训练数据与模型使用需遵循权限管理、脱敏与审计要求。其四，成本与可运维性：AI 系统应与现网设备、制播系统、监测平台兼容，支持模块化部署与持续迭代，避免“一次性

项目”难以维护。

二、AI 在广电工程核心环节的应用场景

AI 在广电工程中的应用，可按照“内容生产提效、播出安全保障、传输网络优化、监测运维智能化”四条主线展开，并逐步实现从单点工具到全链路协同的升级。（1）内容生产环节：从素材处理到生产流程的智能化：在采集与制作阶段，广电机构往往面临素材量大、元数据缺失、检索复用效率低等问题。AI 可首先在“素材结构化”上发挥作用：通过语音识别实现采访、访谈、会议等节目的自动转写与时间轴对齐；利用自然语言处理生成摘要、提取关键词与实体（人名、地名、机构、事件），并自动生成标签与栏目分类建议；借助计算机视觉对画面中的人物、场景、台标、字幕等进行识别，支持镜头切分与精彩片段定位。上述能力可显著提升编目效率，为后续剪辑、审核、归档与二次分发提供可检索、可计算的素材基础。在制作流程上，AI 还可提供“智能剪辑与辅助创作”。需要强调的是，这类功能更适合以“人机协同”方式落地：AI 负责批量生成与预处理，编辑人员负责把关与艺术性决策，以在效率与质量之间取得平衡。（2）播出与制作系统：质量检测与播控辅助，确保安全播出：播出环节强调“零差错、可追溯、可恢复”。AI 在此主要承担两类任务：一是内容质量与合规风险的自动检测，二是播控运行的辅助决策。在质量检测方面，AI 可对音视频信号进行实时或准实时分析：识别黑场、静帧、花屏、马赛克、色彩异常、台标缺失、字幕遮挡等画面问题；检测音频静音、爆音、响度越限、声道错误等问题；并结合节目单与信号源信息快速定位异常发生的位置与持续时长。相比传统阈值规则，AI 在复杂场景下的鲁棒性更强，能够减少误报与漏报。在播控辅助方面，AI 可用于排播与资源协调的优化建议（3）传输与覆盖：面向网络状态的预测与优化。在 IP 化传输、OTT 分发与多终端覆盖成为常态后，传输链路的复杂性显著提升。AI 的优势在于对多维指标进行建模与预测，从而实现更精细的网络管理。一方面，AI 可对链路质量（时延、抖动、丢包、码率、缓冲）进行趋势预测与异常检测，提前识别潜在拥塞或设备退化，并在事故发生前触发调度或扩容建议。另一方面，AI 可辅助编码与分发策略优化：在满足画质门限与端到端时延要求的前提下，动态选择码率阶梯、关键帧策略、纠错冗余与 CDN 调度策略，提高带宽利用率与用户端 QoE。对于地面覆盖与应急广播等场景，AI 还可结合地理信息与历史测量数据进行覆盖评估与盲区分析，为台站维护与优化提供数据依据。（2）监测与运维：AIOps 驱动的故障处置与预测性维护：广电工程运维通常涉及播控、传输、存储、编目、数据库、虚拟化平台等多系统协同，告警噪声大、定位链路长。AIOps 思路下，AI 可对指标、日志、告警与工单进行统一关联：通过相似性聚类实现告警降噪与去重；通过时序分析与拓扑关系推断根因；通过知识库与历史案例匹配提供处置建议，推动“发现—定位—处置—复盘”闭环。在设备维护方面，AI 可基于温度、电源、风扇、磁盘 SMART、误码率等健康指标进行寿命预测与风险评分，形成预测性维护计划，从

“故障后维修”转向“故障前干预”。在值班管理方面，可引入智能工单分派与 SLA 预测，对处置优先级、人员排班与备件调度进行优化，提升整体运维效率。

三、实施路径与关键问题分析

AI 在广电工程中能否“真正可用、长期好用”，关键在于单个模型效果，而在于工程化实施路径是否完整、数据与系统是否形成闭环、以及安全与运维是否可控。总体上可按“数据底座—场景试点—平台化部署—闭环迭代”的路线推进，并在过程中重点处理架构、评估、集成与风险治理等问题。（1）架构与数据：先把数据变成可用资产：广电场景中数据类型复杂，既包含音视频素材、字幕与脚本等内容数据，也包含监测指标、日志、告警、工单等运行数据。实施 AI 的第一步是数据治理与标准化：明确采集范围与口径（例如响度、码率、丢包等指标定义），建立统一的元数据体系与标签规范，保证跨系统数据可关联、可追溯。对音视频数据，需要完善素材入库流程（时间码、节目单、信号源、版权信息等），并建立可持续扩充的训练集与验证集；对运维数据，需要建设告警字典、拓扑关系与事件模型，将“设备—业务—链路”关系固化为可计算的知识。在算力与部署上，应根据场景选择边缘、中心机房或云侧推理：播出监测、质量检测等低时延场景更适合边缘或本地部署；素材分析、离线编目、模型训练则可集中化部署以提升资源利用率。（2）工程化落地：从试点到规模化的关键步骤：落地路径建议遵循“小步快跑、先易后难”的原则。首先选取可量化收益、数据相对齐全、对安全播出影响可控的场景试点，例如自动转写与编目、音视频缺陷检测、告警降噪等。试点阶段要明确业务指标与验收标准：内容侧可用转写准确率、标签命中率、编目节省工时等衡量；运维侧可用误报率、漏报率、MTTR（平均修复时间）、工单闭环率等衡

量；传输侧可用卡顿率、起播时延、丢包与 QoE 提升幅度等衡量。其次，通过“灰度上线+人工复核”方式进入生产环境：先以旁路监测或建议模式运行，积累真实数据与反馈，再逐步提升自动化程度，确保可控与可回退。规模化推广阶段的重点是平台化与组件化建设：将转写、识别、检测、告警关联等能力沉淀为可复用服务（API/微服务/插件），并通过统一权限、统一日志与统一审计接入现有制播、媒资、播控、监测系统，减少重复开发与“烟囱式”建设。（3）与现有系统集成：兼容存量、避免割裂：广电工程通常存在大量存量系统与专用设备，AI 系统必须强调“最小侵入、平滑集成”。一是接口与协议适配：在采集与播出链路中要兼容现有信号与控制体系，在数据侧要能对接媒资系统、节目单系统、监测平台、工单系统等。二是业务流程对齐：AI 输出应能落到可操作的动作，如生成可编辑字幕、可检索标签、可追溯告警事件、可执行处置建议等；否则容易沦为“展示型智能”。三是容错与降级策略：当模型不可用、数据缺失或置信度不足时，应自动降级到规则/人工流程，确保业务连续性。

四、结论

综合来看，在新形势下引入 AI 技术已成为广电工程提升效率、强化安全播出保障、优化传输质量与推进智能运维的重要路径。AI 能够将海量音视频素材与运行数据转化为可计算、可检索、可分析的结构化信息，在内容生产侧显著降低编目与剪辑等重复性劳动；在播出与监测侧提升对画面/音频缺陷、异常状态的发现能力与响应速度；在传输与覆盖侧通过预测与调度优化改善端到端体验；在运维侧通过告警关联、根因分析与预测性维护缩短故障处置时间、降低停播风险。实践表明，AI 最有效的定位并非替代人，而是以“人机协同+闭环迭代”的方式增强工程系统的可视、可控与可持续优化能力。

参考文献

- [1] 郭永祥. 数字时代中广播技术的应用 [J]. 数字通信世界, 2020(09).
- [2] 梁军. 广播电视工程中数字音频技术的实践与探讨 [J]. 中国宽带, 2024(01).
- [3] 次仁边宗, 普琼次仁. 广电工程中数字音频技术的运用 [J]. 数字通信世界, 2022(12).

基于光纤光栅的锂电池安全监测应用效果研究

刘迎春

海目星（江门）激光智能装备有限公司，广东 江山 529000

DOI:10.61369/ERA.2026020032

摘 要： 锂电池在新能源汽车与大规模储能电站中的应用快速扩张，但热失控引发的火灾事故时有发生，传统监测手段在“内部状态感知、抗电磁干扰、多点分布式测量、长期可靠性”方面存在不足。光纤光栅传感器具有电绝缘、抗电磁干扰、耐高温、可串联成网实现多点测量等优势，适用于电池包内密集布置与长周期在线监测。FBG 可有效捕捉电芯表面温度分布与热点演化，在过充与热失控触发工况下能提前识别温升加速与温度场不均匀性；应变监测可反映电芯产气膨胀导致的厚度变化与模组应力分布异常，为“热失控前的产气 / 结构异常”提供可量化指标。本文提出的 FBG 监测系统响应时间、覆盖度与工程可维护性方面表现出良好的应用前景，可为锂电池安全监测与热失控预警提供新的技术路径。

关 键 词： 光纤光栅；锂电池；温度监测；应变监测

Research on the Application Effect of Fiber Bragg Grating-Based Safety Monitoring for Lithium Batteries

Liu Yingchun

Haimu Star (Jiangmen) Laser Intelligent Equipment Co., Ltd. Jiangshan, Guangdong 529000

Abstract： The application of lithium batteries in new energy vehicles and large-scale energy storage stations is rapidly expanding, but fire accidents caused by thermal runaway still occur from time to time. Traditional monitoring methods have shortcomings in terms of "internal state sensing, electromagnetic interference resistance, multi-point distributed measurement, and long-term reliability." Fiber Bragg Grating (FBG) sensors have advantages such as electrical insulation, electromagnetic interference resistance, high-temperature tolerance, and the ability to be networked for multi-point measurement, making them suitable for dense deployment within battery packs and long-term online monitoring. FBGs can effectively capture the temperature distribution and hotspot evolution on the surface of battery cells, allowing early identification of accelerated temperature rise and temperature field unevenness under overcharge and thermal runaway triggering conditions. Strain monitoring can reflect thickness changes caused by gas generation in the cells and abnormal stress distribution in the module, providing quantifiable indicators for "pre-thermal runaway gas generation/structural abnormalities." The FBG monitoring system proposed in this paper shows promising application prospects in terms of response time, coverage, and engineering maintainability, offering a new technical approach for lithium battery safety monitoring and thermal runaway early warning.

Keywords： Fiber Bragg Grating; lithium battery; temperature monitoring; strain monitoring

引言

随着“双碳”目标推进，锂电池在新能源汽车、工商业储能与电网侧储能中的装机规模持续增长。锂电池能量密度提升与快充技术普及在带来便利的同时，也提高了热失控风险。热失控通常由内短路、隔膜收缩、电解液分解等触发，随后发生链式放热反应，伴随温升加速、产气膨胀、电压骤降，并可能迅速在模组内传播，最终导致火灾甚至爆炸。现有主流监测主要依赖电池管理系统（BMS）对电压、电流与表面温度进行采样。但 BMS 通常采样点有限，且温度探头多布置在电芯表面或冷板上，难以反映内部热点与局部温度梯度；同时，电池包内存在强电磁干扰，电类传感器在布线、绝缘与抗干扰设计上更复杂。红外热成像、声学监测与气体传感等方法在实验室研究较多，但在工程应用中易受遮挡、环境噪声与安装空间限制。FBG 传感器通过波长编码实现信号传输与感知，本质上为“无源传感”，传感器本体不带电，适合高压系统；可串联成链实现多点测量，便于在电池包内形成分布式监测网络；同时具有较高的测量精度与稳定性。基于上述优势，FBG 在电力设备、航空航天与土木工程健康监测中已得到成熟应用。将 FBG 引入锂电池安全监测，有望弥补传统电类传感在电磁兼容与多点测量方面的短板，提升电池包安全状态的可观测性。

一、理论基础与监测参量映射关系

（一）锂电池安全相关基础

锂电池内部反应本质上是电化学与热耦合过程。在正常工作条件下，电池通过锂离子在正负极之间往返嵌入 / 脱嵌实现充放电。但当出现制造缺陷、老化累积或滥用工况时，可能触发内短路等失效，进而引发热失控。典型热失控演化链条可概括为：

1. 触发阶段：内短路 / 隔膜收缩 / 外短路导致局部电流密度升高，焦耳热增加；
2. 温升阶段：SEI 膜分解、负极与电解液反应等放热反应开始，温升加速；
3. 产气膨胀阶段：电解液与电极材料反应产生大量气体（如 CO_2 、 CO 、 H_2 等），电芯内部压力上升，壳体膨胀；
4. 传播阶段：高温导致相邻电芯热失控，形成连锁反应，最终引发火灾。

在该链条中，“温度”与“膨胀 / 应力”是两个关键可观测量：温度直接反映热失控的能量累积与传播速度；膨胀与应力变化反映产气与结构失效，可能早于明显温升出现，因此具备早期预警价值。

（二）监测参量与安全状态映射

温度是热失控最直接的表征量，在热失控早期，局部热点往往先出现在极耳附近、电芯边缘或缺陷位置，随后扩展到整个电芯表面并向相邻电芯传播。FBG 温度监测的价值在于：

1. 可在多个位置同时测量，获得温度场分布，识别“温度梯度”与“热点迁移”；
2. 可布置在电类传感器难以接近的区域，提高覆盖度；
3. 电绝缘特性降低短路风险，适合高压电池包环境。

（三）应变 / 膨胀监测的映射关系

电芯在滥用工况下会发生产气膨胀，导致厚度增加、模组预紧力变化，严重时引发壳体破裂与电解液泄漏。应变监测的映射关系可概括为：

1. 电芯厚度变化 \rightarrow 粘贴于壳体的应变片（或 FBG 基底）产生拉伸应变；
2. 模组内部压力上升 \rightarrow 端板 / 横梁应变分布改变；
3. 热失控前产气阶段可能出现“膨胀先于明显温升”的现象，为早期预警提供窗口。

但应变监测也存在挑战，比如电芯壳体表面并非理想平面，粘贴工艺对测量稳定性影响大，温度变化会引起基底热膨胀，需进行温度补偿，振动与装配应力会引入噪声，需要滤波与特征提取。电池包在车辆行驶或储能舱运维过程中存在振动环境；碰撞、跌落或挤压早期也会产生机械冲击。FBG 振动监测可通过粘贴在模组结构件上的 FBG 获取高频应变响应，为机械异常提供辅助判断。但考虑到论文篇幅与研究重点，本文以温度—应变为主，振动作为可选扩展。

二、系统方案设计：FBG 封装、布点与组网

（一）监测系统总体架构

本文构建的 FBG 锂电池安全监测系统分为四层：感知层、传输层、解调与数据层、联动层。

1. 感知层

温度 FBG：用于测量电芯表面、极耳附近、模组间隙与热管理通道温度；

应变 FBG：用于测量电芯厚度方向膨胀与模组端板 / 横梁应力变化；

可选振动 FBG：用于捕捉机械冲击与结构共振特征。^[1-9]

2. 传输层

采用单模光纤作为传输介质，通过分路器或串联方式将多个 FBG 连接至解调仪。光纤在电池包内走线需考虑机械保护与弯曲半径，避免振动导致微弯损耗。

3. 解调与数据层

解调仪完成波长采集与转换，输出温度 / 应变数据；边缘计算模块实现实时特征提取、阈值判断与报警；上位机用于数据存储、可视化与历史回放。为保证与 BMS 对比分析，系统需实现时间戳同步。

（二）封装方案设计与对比

温度测量的关键是响应速度与测温一致性。常用封装包括：

贴片封装：FBG 裸栅粘贴在薄金属片或玻纤片上，再固定到电芯表面。优点是安装方便、成本低；缺点是导热路径受胶层影响，响应速度一般。

金属管封装：FBG 置于金属毛细管内并填充导热胶，再固定到测量点。优点是导热好、响应快、机械强度高；缺点是体积较大，布置灵活性略差。

导热胶直接封装：在裸栅外涂覆导热胶并套热缩管。优点是结构紧凑；缺点是长期可靠性受胶层老化影响。^[7-14]

（三）可靠性设计要点

电池包内振动与热循环会导致胶层疲劳、脱粘或光纤微弯损耗，因此封装与安装需注意

光纤走线采用护套保护，并设置应力释放弯，传感器与光纤连接处采用热缩管与胶封加固，关键位置采用机械压片固定，避免胶层单点受力，进行高低温循环与振动试验验证封装耐久性。

（四）信号采集与数据预处理方法

系统需先完成温度与应变标定，建立波长—物理量映射关系。温度标定可采用恒温箱或油浴，在若干温度点下记录 FBG 波长漂移，拟合得到灵敏度系数；应变标定可采用拉力试验机或位移台，获得应变灵敏度。数据预处理包括采用移动平均或小波去噪，降低振动引入的高频噪声，温度补偿，对温度—应变交叉敏感进行修正，异常点检测，对断纤、反射谱消失等进行诊断，时间同步，与 BMS 采样时间对齐，便于对比分析。

三、工程化应用分析与建议

(一) 部署成本与收益分析

FBG 监测系统的成本主要来自解调仪、传感器阵列与安装工时。解调仪属于一次性投入，可通过增加通道数降低单测点成本；传感器阵列成本随布点密度增加而上升，但合理的布点策略可在不显著增加成本的前提下提升覆盖度。收益方面，FBG 监测可降低事故损失、减少非计划停机、提高运维效率，并为电池健康管理提供更丰富的数据支撑。在储能电站等长寿命场景中，FBG 的长期稳定性优势更突出，投资回报周期相对更短。

(二) 可靠性与耐久性讨论

胶层老化与脱粘，建议选用耐高温结构胶，并进行热循环验证，光纤微弯损耗，走线需满足弯曲半径要求，并采用护套与压片固定，热失控区域温度极高，传感器应布置在安全距离并评估材料极限，系统应具备反射谱监测或链路诊断功能，及时提示维护。

(三) 与 BMS/ 热管理 / 消防系统融合

FBG 监测系统应与 BMS 实现数据融合：BMS 提供电压 / 电流 / 均衡状态，FBG 提供温度场与应变场，共同提高状态评估准确性。联动策略建议采用分级响应：注意级以热管理调节为主；警告级进行限功率与区域隔离；紧急级切断主回路并启动消防。为保证实时性，边缘计算应在本地完成快速报警，云端用于历史分析与模型迭代。

(四) 标准化与规范建议

建议行业逐步建立 FBG 在电池包内应用的相关规范，包括：布点推荐位置与最小覆盖要求；传感器封装与安装工艺要求；性能测试方法（标定、响应时间、误报率、耐久性）；报警阈值与

联动接口协议。

在场景优先级上，储能电站与商用车对安全性与长寿命要求更高，适合优先推广；乘用车可在高安全等级车型或关键区域先行试点。

四、结语

FBG 可实现电池包内多点温度分布监测，能够有效捕捉热点演化与热失控传播路径，在过充与热失控触发工况下表现出良好的早期识别能力。与传统单点温度监测相比，FBG 提供了更丰富的空间信息，有助于定位危险区域并优化联动策略。应变监测能够反映电芯产气膨胀导致的厚度变化与模组应力异常，在部分工况下可早于明显温升出现突变，为热失控前的“产气 / 结构异常”提供可量化指标，提高预警提前时间。通过多参量融合预警策略（温升速率、温差一致性、应变突变）可显著降低单一阈值法的误报率，提高系统可靠性与工程实用性。本文提出的封装与布点策略兼顾响应速度、覆盖度与成本，具备工程可实现性；系统与 BMS/ 热管理 / 消防的分级联动逻辑可作为实际部署参考。

本文仍存在以下不足：样本类型与工况设置可进一步扩展；长期老化与更恶劣环境（盐雾、电解液蒸汽、烟气腐蚀）下的耐久性验证仍需加强；算法层面可引入更复杂的多源数据融合与预测模型。未来工作可从以下方向展开，第一扩展至软包与圆柱电芯，对比不同结构下的 FBG 监测效果；第二结合气体传感、声学传感与局部放电信号，构建多模态融合预警；第三面向大规模储能电站，研究 FBG 分布式组网与成本优化；第四基于数字孪生与机器学习，实现更精准的热失控预测与寿命评估。

参考文献

[1] 李响, 王雨桐, 张琪, 等. 动力电池包 FBG 传感器封装耐久性试验研究 [J]. 机械工程学报, 2023, 59(10): 213–220.

[2] 王浩, 曹珊珊, 苏俊豪, 等. 基于双包层光纤布拉格光栅传感器的锂电池组温度场监控 [J]. 物理学报, 2022, 71(10): 104207.

[3] 胡胜, 李景琦, 何怡婷, 等. 基于光纤光栅的锂电池表面物理场监测 [J]. 光通信研究, 2025, 51(5): 250253.

[4] 孟国栋, 李雨珮, 唐佳, 等. 锂离子电池储能电站的热失控状态检测与安防防控技术研究进展 [J]. 高压技术, 2024, 50(7): 3105–3127.

[5] 张宇, 刘剑, 陈振宇, 等. 光纤光栅传感器在动力电池热失控预警中的应用 [J]. 光学技术, 2022, 48(3): 325–331.

[6] 陈翔, 杨超, 王鹏, 等. 基于 FBG 的锂电池模组应变监测与热失控早期预警 [J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(6): 123–131.

[7] 赵岩, 孙伟, 李刚, 等. 光纤光栅传感网络在储能电池包中的部署与可靠性设计 [J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(12): 145–152.(组网与可靠性, 适配 3.3 节可靠性设计)

[8] 刘熠鑫, 李建宇, 郑加金, 等. 锂电池 FBG 温度—应变交叉敏感补偿方法研究 [J]. 中国激光, 2023, 50(15): 1504002.

[9] 周斌, 吴峰, 马明, 等. 基于 FBG 与 BMS 融合的电池热管理系统设计 [J]. 汽车工程, 2023, 45(8): 1201–1208.

[10] 高健, 陈立, 王凯, 等. 锂离子电池热失控产气特性及光纤光栅应变监测关联分析 [J]. 化工学报, 2024, 75(4): 1789–1797.

[11] 程明, 赵亮, 许涛, 等. 基于光纤光栅的储能锂电池振动监测与异常识别 [J]. 振动与冲击, 2024, 43(5): 189–196.

[12] 谢芳, 周志远, 黄海, 等. 多参量融合的锂电池热失控分级预警方法 [J]. 电工技术学报, 2023, 38(16): 4201–4209.

[13] 朱伟, 林强, 吴昊, 等. 光纤光栅传感技术在新能源汽车电池安全监测中的工程化应用 [J]. 汽车技术, 2024, (5): 45–51.

[14] 郭健, 王磊, 徐阳, 等. 基于数字孪生的 FBG 锂电池监测数据融合与预测 [J]. 计算机集成制造系统, 2025, 31(2): 567–575.

高压断路器电气控制回路通讯干扰问题分析与对策

夏许飞

江苏省如高高压电器有限公司, 江苏 如皋 226500

DOI:10.61369/ERA.2026020040

摘 要 : 高压断路器在电力系统中广泛普及后, 其电气控制回路通讯稳定性对电力系统可靠运行至关重要, 环境因素、设备老化、电磁干扰等致使通讯干扰现象屡屡出现, 严重影响设备正常工作与故障诊断分析, 高压断路器电气控制回路通讯干扰成因, 剖析常见干扰源和产生机制且给出有效防范与抑制办法像优化接地设计、强化抗干扰能力、改良通讯协议等, 为增强电气控制回路通讯稳定性提供可行方案。在保障安全运行方面, 高压断路器起着关键作用, 通过一系列措施可改善其电气控制回路通讯受干扰的状况, 进一步提升系统的可靠性。

关 键 词 : 高压断路器; 电气控制回路; 通讯干扰; 抗干扰设计; 电磁兼容

Analysis and Countermeasures of Communication Interference in Electrical Control Circuit of High Voltage Circuit Breaker

Xia Xufei

Jiangsu Rugao High Voltage Electrical Appliance Co., Ltd., Rugao, Jiangsu 226500

Abstract : After high-voltage circuit breaker is widely used in power system, the communication stability of its electrical control loop is very important for the reliable operation of power system. Environmental factors, equipment aging and electromagnetic interference frequently cause communication interference, which seriously affects the normal operation and fault diagnosis analysis of equipment. The causes of communication interference of high-voltage circuit breaker's electrical control loop are analyzed, and effective prevention and suppression methods such as optimizing grounding design, strengthening anti-interference ability and improving communication protocol are given. High-voltage circuit breaker plays a key role in ensuring safe operation. Through a series of measures, the communication interference of its electric control loop can be improved, and the reliability of the system can be further improved.

Keywords : high voltage circuit breaker; electrical control loop; communication interference; anti-interference design; electromagnetic compatibility

引言

高压断路器作为电力系统里极为重要的保护设备, 承担着保障电网安全运行的重大使命, 不过伴随电力系统复杂程度和自动化程度提升, 电气控制回路通讯稳定性问题逐渐凸显, 通讯干扰会造成设备操作延迟或失效, 还可能引发电网故障误判, 给电力系统安全运行埋下巨大隐患, 电磁干扰、设备接地不佳、老化等都可能是通讯干扰的源头, 所以研究高压断路器电气控制回路通讯干扰问题并找到有效解决办法, 成为当下电力工程技术领域急需攻克的课题之一, 需综合考量多种因素, 采用创新思路和方法来应对这一难题, 以推动电力系统的稳定发展。

一、高压断路器电气控制回路的基本构成与工作原理

高压断路器电气控制回路在电力系统中至关重要, 是保障设备正常运行、实现安全防护的核心所在。它主要负责把控电气设备的开关状态, 可及时将电网故障隔离, 防止事故于电网内蔓延, 当系统出现故障, 断路器会依照控制信号快速切断电路, 避

免故障波及其他区域, 然而, 控制回路中的通讯部分复杂又敏感, 通讯稳定性直接关系到断路器的反应速度与故障检测精度。高压断路器电气控制回路通常由多个控制元件、通讯模块和保护设备组成, 控制元件承担接收与处理信号的任务, 通讯模块通过电缆或无线网络和其他设备进行数据交换, 保护设备实时监测回路状态以确保通讯信号准确传输, 如此共同维持着整个回路的稳定运行, 为电力系统的安全高效运作保驾护航^[1]。

从工作原理来讲,电气控制回路利用集成的自动化系统对高压断路器进行调度控制,信号传输方式有数字信号和模拟信号,系统通过监控断路器状态实现远程控制与自动化操作,电气控制回路的核心是信号传递与反馈机制,通讯网络保证信号准确且实时地传至断路器以执行相应操作,控制回路中的保护装置根据实时数据评估电网状况,必要时触发断路器断开电路、发出报警等,确保电力系统在故障出现时能快速响应,避免更大范围的电力事故。伴随电力系统对自动化、智能化以及远程监控要求的提高,高压断路器电气控制回路也朝着信息化迈进,现代电力系统中的控制回路不再只是承担局部设备的保护工作,还涵盖复杂的数据采集、处理和远程传输,像现代断路器控制回路与电力调度系统、监控系统等相互连接,远程操作员可实时查看断路器状态并迅速做出判断。

这种智能化、信息化的控制回路提升了系统的稳定性、反应速度和故障处理能力,但也对通讯系统的稳定性提出了更高标准,任何通讯干扰问题都可能直接影响系统可靠性,特别是在紧急状况下,通讯中断可能致使系统误操作或响应延迟,带来安全风险,所以在高压断路器电气控制回路的设计和维护中,必须充分考量通讯的可靠性与抗干扰能力,随着电力系统向更高层次的自动化、智能化发展,确保通讯系统稳定可靠会成为保障电力系统安全、稳定运行的基石,防范通讯干扰、提升通讯质量是实现高效电力系统运行的要点,对保障电力设备正常操作与网络安全意义重大,关乎着整个电力系统能否持续、稳定地为社会提供可靠的电力供应^[2]。

二、 通讯干扰的主要来源及影响因素分析

高压断路器电气控制回路里的通讯干扰,主要源于电磁干扰(EMI)、接地问题、外部环境作用以及设备自身老化等,电磁干扰是极为常见的通讯干扰源头,在高压电力系统当中,强电流与电压波动会于系统内产生电磁辐射,这些辐射经电缆和电气接点进入控制回路,严重情况下或许会让通讯系统彻底失效,还会致使信号失真、引发误操作或使信号无法正确接收,进而对高压断路器的正常运转造成影响。电力设备开关操作,尤其是发生故障产生电弧时,会增强电磁干扰强度,对通讯系统稳定性造成影响,设计和实施时,采取有效的电磁屏蔽举措,挑选抗干扰能力强的设备与材料,对减少电磁干扰意义重大。

接地问题也是重要干扰因素,高压断路器控制回路的通讯信号传输时,若系统接地设计欠佳,会造成地电位不稳定,进而产生噪声,影响通讯质量,老旧电力设备中,接地系统老化或维护不足,会使接地电阻增大,加剧信号衰减和失真,电力设备与控制回路连接处,接地系统有问题易引发控制信号误传输或丢失,严重时影响断路器及时动作,甚至使保护装置无法正常投入运行。电力公司需定期检查接地系统,保证其良好运行,依据环境变化进行调整和优化^[3]。

外部环境对通讯信号的干扰不容小觑,高压电力设备常安装于恶劣环境,像室外或高压变电站,这些环境中气候变化、温度

和湿度波动等,都会对控制回路里的通讯设备产生不利作用,湿气、雨水以及高温、低温等极端气候,可能导致设备腐蚀、线路短路或电气元件性能降低,增加通讯误差出现概率,大气潮湿地区,设备保护措施和防水设计十分关键,以此确保控制回路长期稳定运行。其他电力设备如大型变压器、发电机运行产生的电磁波,也可能影响通讯回路,设备安装时要考量这些,采取合适隔离措施。

高压断路器电气控制回路中设备老化同样影响通讯稳定性,设备长期使用,通讯回路里的电缆、连接器、传感器等部件会出现物理损耗,致使信号衰减、传输效率降低,通讯电缆绝缘层、连接器接触端子等部件,随使用时间增长会变得脆弱,出现老化、松动或氧化现象,进而导致信号失真或中断。所以,对设备开展定期检查、清洁和维护,及时更换老化部件,是确保通讯系统稳定的重要途径^[4]。

三、 高压断路器通讯干扰的防范与抑制策略

处理高压断路器电气控制回路里的通讯干扰问题,采取行之有效的防范与抑制策略意义重大。优化接地设计可谓关键举措其一,系统电气接地需保障安全且要有优良的抗干扰性能,合理设计接地系统可抑制地电位差异引发的噪声干扰,保证信号稳定传输;高压设备中,控制接地电阻、挑选接地线路以及定期检测维护接地系统极为重要,大电流通过时,合理接地能降低电气回路噪声干扰,提升通讯信号可靠性与稳定性,而接地系统可靠性不止影响通讯质量,还直接关联设备运行安全。另外,电磁屏蔽技术在防范通讯干扰时也相当关键,运用合适屏蔽措施可减少外部电磁波对通讯信号的干扰,增强信号纯净度,让整个高压断路器电气控制回路的通讯能更好地稳定运行。

屏蔽材料挑选要结合电磁波的频率、强度以及信号传输特性来优化。像铜、铝这类金属材料是常用屏蔽材料,具备优良导电性与出色屏蔽效果,可有效隔绝外部干扰源,合理设计电缆布局可避免与高电流线路平行铺设,降低电磁干扰影响,双绞线和屏蔽电缆应用能增强抗干扰能力并保障信号传输稳定,在高压电力设备中,电磁干扰或会对通讯系统造成严重后果。在通讯协议设计时,选有抗干扰功能的协议是提升系统稳定性的有效办法,采用冗余度高、抗干扰性佳的通讯协议像Modbus、Profibus等,能在电力环境干扰大时维持通讯稳定,协议选择时除考量传输速率,还得有有效的数据校验和错误检测机制防止数据传输出错,保证系统能平稳运行,应对各类复杂电磁环境下的通讯需求^[5]。

这些技术可对通讯信号完整性开展实时监控,迅速察觉因干扰产生信号错误,保障高压断路器控制回路正确响应,防止通讯故障致使误操作或响应延迟。采用此高效通讯协议可增强整个系统稳定性,保障电力系统安全运转。防范通讯干扰,设备定期检测与维护也是关键举措。高压设备长时间使用,部分部件会出现老化,成为干扰源头,对电气组件如通讯线路、连接器、传感器等定期检查,能及时发现并解决潜在问题,避免老化或损坏造成信号失真。借助定期性能测试与数据采集,可实时掌握通讯系统

运行状况，提前识别潜在故障，降低设备故障引发的通讯干扰。在此之上，融合远程监控技术对系统故障实时监控并预警，能在问题出现前介入，大幅降低系统故障发生几率，让高压断路器在各类工况下都能稳定运行，为电力系统的持续稳定供应筑牢坚实基础。^[6]。

四、 提高电气控制回路通讯稳定性的技术路径与实践应用

提升电气控制回路通讯稳定性的办法，得从设计、实施与维护等多维度切入，保证系统于复杂环境下的可靠运行。设计环节，合理的控制回路架构与通讯系统配置是根基，挑选适配的通讯协议，优化线路排布并强化屏蔽举措，能显著削减外部干扰的效应，就像设计高压断路器控制回路，选用抗干扰性能佳的工业通讯协议如 IEC 61850，搭建具备冗余传输功能的网络架构，可在设备故障或通讯中断时保证系统的持续与安全运行，同时合理安排电缆布线、加固电缆屏蔽层，降低电磁干扰对信号传输的不利作用。现实应用里能结合典型电力系统实例验证这些技术路径的成效，中国江苏省南通 500kV 变电站近年来为应对愈发复杂的电力网络环境，对其高压断路器电气控制回路进行了升级改造，从实际运行情况看这些手段确实有助于提升通讯稳定性，且能更好地保障整个电力系统的安全运行，避免因通讯问题导致供电中断或设备故障等状况发生，在复杂多变的电力环境中让电气控制回路能更平稳地工作^[7]。

该变电站采用 IEC 61850 标准通讯协议达成不同设备间高效通讯与远程监控，增强系统抗干扰能力与响应速度，为应对高电磁干扰难题，于电气控制回路关键线路开展屏蔽改造，保障信号传输不受外界电磁波干扰，还强化控制回路接地设计，提升地电位稳定性，减少接地不良导致的噪声干扰。实际运营里，电气控制回路通讯稳定性既取决于设计阶段优化，也离不开持续维护监测，设备老化与环境改变情况下，定期检查维护不可或缺，电力

公司运用远程监控技术，搭配现代化数据采集分析系统，能实时监测通讯回路运行状况，及时察觉潜在通讯故障或干扰。像北京某电力公司智能化监控项目，借助在线监测系统对所有高压断路器控制回路实施 24 小时不间断监控，系统自动识别并报警通讯中断或数据错误，让维修人员能即刻干预，防止通讯故障引发误操作与电网事故，维护时，定期检查和更换通讯回路电气组件是提升系统稳定性的要点^[8]。

设备使用年限增长，老化的通讯线路与接触不良的连接点易成干扰源，定期更换电缆、接头等易损部件可避免此类问题，既提升通讯可靠性，又延长设备使用寿命、降低故障频率。上海市某变电站定期全面检查高压断路器控制回路通讯设备，保证电缆连接紧固无磨损，让信号传输稳定，还增加冗余通讯线路和备用电源系统，进一步增强控制回路可靠性。优化设计、加强屏蔽、采用先进通讯协议并定期维护，可提高高压断路器电气控制回路通讯稳定性，这些技术路径和实践应用经多个电力系统验证，保障电力设备在复杂环境高效安全运行，为电力系统的稳定运转筑牢基础，减少因通讯问题导致的潜在风险，确保电力供应的持续性与稳定性。

五、 结语

高压断路器电气控制回路通讯稳定性关乎电力系统能否可靠运行，尤为重要，剖析通讯干扰主要来源，像电磁干扰、接地存在问题以及设备老化等状况，进而提出对应防范策略，像优化接地设计、实施电磁屏蔽还有合理选通讯协议等，以实际案例来说，江苏南通 500kV 变电站和北京智能监控项目就体现出这些措施发挥的成效，保障通讯稳定性，定期开展检查与维护是关键，能减少故障出现概率使系统可靠性增强，把上述技术与策略综合运用起来能够极大提升电力设备通讯稳定性，为电力系统安全高效运行提供有力保障，从长远看还能避免因通讯问题引发的一系列潜在电力供应风险，维护整个电网的稳定秩序。

参考文献

[1] 傅守滨, 李传东. 高压断路器分合闸电气控制回路原理解析 [J]. 电世界, 2020, 61(08): 14–17.
[2] 邹诗华, 朱明. 核电厂典型电气控制回路辅助触点接触电阻判断标准 [J]. 电工技术, 2025(01): 203–205.
[3] 吴全祥. 电气控制回路干扰诊断与排除 [J]. 电工材料, 2024(01): 57–59.
[4] 李华. 电气控制回路干扰诊断与排除 [J]. 工程建设与设计, 2022(14): 27–29.
[5] 王海涛. 浅析基于决策树算法的机车电气控制回路故障精确检测方法 [J]. 中国设备工程, 2021(14): 181–182.
[6] 傅守滨, 李传东. 高压断路器分合闸电气控制回路原理解析 [J]. 电世界, 2020, 61(08): 14–17.
[7] 金超, 刘志兵. 机械压力机电气安全控制回路的实现研究 [J]. 锻压装备与制造技术, 2019, 54(04): 47–55.D
[8] 王学军. 基于红外成像的电气控制回路系统过载故障诊断技术研究 [J]. 家电维修, 2025(06): 19–21+18.