

工程研究前沿

Frontiers of Engineering Research

Volume 2 · Issue 5 · May 2025 3060-9054(Print) 3060-9062(Online)

工程研究前沿

Frontiers of Engineering Research

Volume 2 · Issue 5 · May 2025 3060-9054(Print) 3060-9062(online)

Nanyang Academy of Sciences Pte. Ltd.
Tel.: +65 62233839

E-mail: contact@nassg.org
Add.: 12 Eu Tong Sen Street #07-169 Singapore 059819

中文刊名：工程研究前沿

ISSN：3060-9054（纸质）3060-9062（网络）

出版语言：华文

期刊网址：http://journals.nassg.org/index.php/foer-cn

出版社名称：新加坡南洋科学院

Serial Title: Frontiers of Engineering Research

ISSN: 3060-9054 (Print) 3060-9062 (Online)

Language: Chinese

URL: http://journals.nassg.org/index.php/foer-cn

Publisher: Nan Yang Academy of Sciences Pte. Ltd.

《工程研究前沿》征稿函

期刊概况：

中文刊名：工程研究前沿

ISSN：3060—9054（Print） 3060—9062（Online）

出版语言：华文刊

期刊网址：http://journals.nassg.org/index.php/foer-cn

出版社名称：新加坡南洋科学院

Database Inclusion



Google Scholar



Crossref



China National Knowledge Infrastructure

版权声明/Copyright

南洋科学院出版的电子版和纸质版等文章和其他辅助材料，除另作说明外，作者有权依据Creative Commons国际署名—非商业使用4.0版权对于引用、评价及其他方面的要求，对文章进行公开使用、改编和处理。读者在分享及采用本刊文章时，必须注明原文作者及出处，并标注对本刊文章所进行的修改。关于本刊文章版权的最终解释权归南洋科学院所有。

All articles and any accompanying materials published by NASS Publishing on any media (e.g. online, print etc.), unless otherwise indicated, are licensed by the respective author(s) for public use, adaptation and distribution but subjected to appropriate citation, crediting of the original source and other requirements in accordance with the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) license. In terms of sharing and using the article(s) of this journal, user(s) must mark the author(s) information and attribution, as well as modification of the article(s). NASS Publishing reserves the final interpretation of the copyright of the article(s) in this journal.

Nanyang Academy of Sciences Pte. Ltd.
12 Eu Tong Sen Street #07-169 Singapore 059819
Email: info@nassg.org
Tel: +65-65881289
Website: http://www.nassg.org



出版格式要求：

- 稿件格式：Microsoft Word
- 稿件长度：字符数（计空格）4500以上；图表核算200字符
- 测量单位：国际单位
- 论文出版格式：Adobe PDF
- 参考文献：温哥华体例

出刊及存档：

- 电子版出刊（公司期刊网页上）
- 纸质版出刊
- 出版社进行期刊存档
- 新加坡图书馆存档
- 谷歌学术（Google Scholar）等数据库收录
- 文章能够在数据库进行网上检索

作者权益：

- 期刊为 OA 期刊，但作者拥有文章的版权；
- 所发表文章能够被分享、再次使用并免费归档；
- 以开放获取为指导方针，期刊将成为极具影响力的国际期刊；
- 为作者提供即时审稿服务，即在确保文字质量最优的前提下，在最短时间内完成审稿流程。

评审过程：

编辑部和主编根据期刊的收录范围，组织编委团队中同领域的专家评审员对文章进行评审，并选取专业的高质量稿件进行编辑、校对、排版、刊登，提供高效、快捷、专业的出版平台。

工程研究前沿

Frontiers of Engineering Research

Volume 2 Issue 5 May 2025
ISSN 3060-9054 (Print) 3060-9062 (Online)

主 编

虞 斌

Bin Yu

编 委

王振波 zhenbo Wang

赵希强 Xiqiang Zhao

刘永军 Yongjun Liu

张新儒 Xinru Zhang

1	有机污染场地化学氧化修复工程效能评估 / 王志国 魏鹏 吴鹏	60	大体积混凝土核电工程施工技术质量管理分析 / 张旭阳 吴丽丽
4	高压电机轴承温度异常问题分析与综合治理方案研究 / 方真 兰秀蔚	63	气灭钢瓶智慧监测系统在轨道交通的应用研究 / 王军港 徐浩军 夏慧钧 刘益晗
8	混凝土系杆拱桥钢纵梁增设施工关键技术研究 / 张龙华 陶剑	66	农田水利施工中围堰技术的应用实践 / 李均伟
11	综合物探技术在岩溶山区风电场选址勘察中的应用研究 / 刘宇平 张秉来 吕西辉 胡荣泽 柳文博	69	电力工程造价大数据系统的研究与应用 / 王庆峰 曲孝飞 李延丽 常瑞楠 李鲁宁
14	大型燃煤火电机组节能减排及低碳转型技术研究 / 黄涛	72	考虑不确定性的风电场集群有功功率分布式协同控制方法 / 孙泽涛 张杰
17	绿色施工理念下的建筑工程管理模式方法探讨 / 徐锬	75	关于电磁兼容引发的过流误报警分析 / 姚威
20	戈壁区高速公路风电叶片运输立交指标的研究 / 陈彦运 郭旺旺	79	面向遗产保护的藏式民居围护结构绿色性能提升路径 / 熊卫
24	民航机场飞行区道面智能检测与养护决策研究 / 芦万华	82	建筑施工项目管理中质量控制的策略 / 曹琨 范雅婷
27	烟台市以陆海统筹助力区域协调发展研究 / 孙颖 王纪宽	85	数字化技术在建筑工程施工质量控制中的价值与运用对策 / 梁子琦
30	某大型购物中心溴化锂空调系统的节能改造案例研究 / 赵秀杰	88	Ti(C,N) 基金属陶瓷与 40Cr 焊接的工艺及性能研究 / 周书助 王福昌 丁燕鸿
33	基于物理信息神经网络 (PINN) 动力吸振器性能优化与自适应控制研究 / 宋为平	91	变工况条件下机械密封端面膜压对比分析 / 徐红果 罗雯
36	基于负载特性的电除尘器能效提升策略研究 / 邵罡 严建成 李进 伍人先	95	电力工程造价数据标准化与智能化审计方法探索 / 李存
39	公共卫生医疗环境质量体系构建与优化策略 / 吴正家 曹汉	98	人工智能在铁路机车检修方案优化与决策支持中的应用研究 / 陆鸣 胡尊起 刘执道
42	基于质量体系的公共卫生医疗环境风险防控研究 / 晏飞 汪文辰 程小璐	101	精细控压钻井在窄密度窗口地层的应用实践 / 闫峰
45	基于 AI 技术的新能源工程造价管理信息系统设计研究 / 赵健	104	建筑信息模型在施工管理中的创新实践 / 肖立
48	火电厂燃料皮带跑偏故障的智能诊断与自适应纠偏系统设计 / 周维国	107	氟塑料全热交换器在卷烟厂除尘排潮余热回收中的创新应用与理论研究 / 夏君 程幼强 付晓宇 钟育彬 廖晓宁
51	火电厂汽轮机凝汽器管泄漏检测与检修维护策略优化 / 高峰	110	某无轴式摩天轮施工过程索力监测研究 / 于丽娜 张红 郭亚鹏 史青法
54	火电厂输煤系统粉尘污染控制技术优化及节能减排效果评估 / 徐东升	113	智能建造技术在超高层钢结构施工中的应用研究 / 张红 杨少军 冯昊 崔文军 佟啸
57	火电厂亚临界机组热力系统能效诊断与节能优化策略研究 / 于志璞	116	全过程工程造价管理在建设项目中的应用分析 / 郭文胜
		119	价值工程在工程管理成本优化中的应用探讨 / 王轲

- 1 Evaluation of engineering efficiency of chemical oxidation remediation in organic contaminated sites
/ Zhiguo Wang Peng Wei Peng Wu
- 4 Analysis of Abnormal High Voltage Motor Bearing Temperature Issues and Integrated Management Solutions Study
/ Zhen Fang Xiuwei Lan
- 8 Research on key construction technology of steel longitudinal beam addition in concrete tied arch bridge
/ Longhua Zhang Jian Tao
- 11 Application of integrated geophysical exploration technology in site selection and investigation of karst mountain wind farms
/ Yuping Liu Binglei Zhang Xihui Lv Rongze Hu Wenbo Liu
- 14 Research on Energy Saving, Emission Reduction, and Low-Carbon Transformation Technology for Large Coal-Fired Power Units
/ Tao Huang
- 17 Discussion on the method of construction project management mode under the concept of green construction
/ Kun Xu
- 20 Research on the Index of Wind Turbine Blade Transport Interchange on Highways in Gobi Region
/ Yanyun Chen Wangwang Guo
- 24 Research on intelligent detection and maintenance decision of runway in civil aviation airport flight area
/ Wanhua Lu
- 27 Study on coordinating land and sea to promote regional coordinated development in Yantai City
/ Ying Sun Jikuan Wang
- 30 A Case Study on the Energy-saving Retrofit of a Lithium Bromide Air Conditioning System in a Large Shopping Mall
/ Xiujie Zhao
- 33 Study on performance optimization and adaptive control of dynamic damper based on physical information neural network (PINN)
/ Weiping Song
- 36 Research on the energy efficiency improvement strategies of electrostatic precipitators based on load characteristics.
/ Gang Shao Jiancheng Yan Jin Li Renxian Wu
- 39 Construction and optimization strategies for the quality system of public health and medical environment
/ Zhengjia Wu Han Cao
- 42 Research on Risk Prevention and Control of Public Health and Medical Environment Based on Quality System
/ Fei Yan Wenchen Wang Xiaolu Cheng
- 45 Design and research on new energy engineering cost management information system based on AI technology
/ Jian Zhao
- 48 Intelligent Diagnosis and Adaptive Correction System Design for Fuel Belt Deviation Faults in Thermal Power Plants
/ Weiguo Zhou
- 51 Detection and Maintenance Strategy Optimization for Steam Turbine Condenser Tube Leakage in Thermal Power Plants
/ Feng Gao
- 54 Optimization of Dust Pollution Control Technology and Assessment of Energy Conservation and Emission Reduction in Coal Conveying Systems at Thermal Power Plants
/ Dongsheng Xu
- 57 Research on Thermal System Efficiency Diagnosis and Energy Conservation Optimization Strategies for Subcritical Units in Thermal Power Plants
/ Yu Zhipu
- 60 Analysis on technical quality management of large volume concrete nuclear power engineering construction
/ Xuyang Zhang Lili Wu
- 63 Research on the Application of Smart Monitoring System for Gas-Extinguishing Cylinders in Rail Transit
/ Wang Jungang Xu haojun Xia Huijun Liu Yihan
- 66 Application practice of cofferdam technology in farmland water conservancy construction
/ Junwei Li
- 69 Research and application of technology big data and cost index management system
/ Qingfeng Wang Xiaofei Qu Yanli Li Ruinan Chang Luning Li
- 72 Distributed collaborative control method for active power of wind farm clusters considering uncertainty
/ Zetao Sun Jie Zhang
- 75 Analysis of overcurrent alarm caused by electromagnetic compatibility
/ Wei Yao
- 79 Green Performance Enhancement Approaches for Building Envelopes of Tibetan Dwellings in Heritage Conser-

	vation		/ Feng Yan
	/ Wei Xiong	104	Innovative practice of building information model in construction management
82	Quality control strategy in construction project management		/ Li Xiao
	/ Kun Cao Yating Fan	107	Innovative application and theoretical study of fluoropolymer total heat exchanger in waste heat recovery of dust removal and moisture removal in cigarette factory
85	The value and application of digital technology in construction quality control		/ Jun Xia Youqiang Cheng Xiaoyu Fu Yubin Zhong Xiaoning Liao
	/ Ziqi Liang	110	Research on cable tension monitoring during the construction process of a certain axle less Ferris wheel
88	Processing and Performance of Brazed Joints Between Ti(C,N)-Based Cermet and 40Cr Steel		/ Hong Zhang Yapeng Guo Shuai Chen Ting Wang
	/ Shuzhu Zhou Fuchang Wang Yanhong Ding	113	Research on the application of intelligent construction technology in super high-rise steel structure construction
91	Comparative Analysis on Film Pressure of Mechanical Seal Face in Changing Conditions		/ Hong Zhang Shaojun Yang Hao Feng Wenjun Cui Xiao Tong
	/ Hongguo Xu Wen Luo	116	Analysis on the application of whole process project cost management in construction projects
95	Study on standardization of power engineering cost data and intelligent audit method		/ Wensheng Guo
	/ Cun Li	119	Discussion on the application of value engineering in cost optimization of engineering management
98	Research on the Application of Artificial Intelligence in the Optimization of Railway Locomotive Maintenance Schemes and Decision Support		/ Ke Wang
	/ Ming Lu Zunqi Hu Zhidao Liu		
101	Practical Application of Precise Pressure Control Drilling in Narrow Density Window Formations		

Evaluation of engineering efficiency of chemical oxidation remediation in organic contaminated sites

Zhiguo Wang¹ Peng Wei² Peng Wu¹

1. Jiangsu Runhuan Environmental Technology Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu, 210000, China

2. Nanjing Construction Land Consolidation and Development Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu, 210000, China

Abstract

The remediation of organically contaminated sites has become a crucial challenge in environmental governance. Chemical oxidation technology, with its rapid reaction rates, broad applicability, and significant treatment effectiveness, has gained widespread adoption. During the remediation process, oxidizing agents degrade pollutants through the generation of reactive free radicals, effectively reducing organic compound concentrations and improving soil and groundwater quality. To comprehensively evaluate remediation effectiveness, a scientific indicator system must be established encompassing pollutant removal efficiency, environmental quality enhancement, and risk control efficacy. This system requires validation through dynamic monitoring and data analysis. Current remediation assessments now extend beyond pollutant degradation to include ecological safety and sustainability. By optimizing oxidant ratios, improving injection methods, and integrating multi-technological approaches, we can enhance remediation efficiency while minimizing secondary pollution risks, providing robust technical support and scientific evidence for the long-term management and reuse of contaminated sites.

Keywords

organically contaminated sites; chemical oxidation remediation; pollutant degradation; efficacy assessment; environmental governance

有机污染场地化学氧化修复工程效能评估

王志国¹ 魏鹏² 吴鹏¹

1. 江苏润环环境科技有限公司, 中国·江苏 南京 210000

2. 南京城建土地整理开发有限公司, 中国·江苏 南京 210000

摘 要

有机污染场地的修复已成为环境治理中的重要课题, 化学氧化技术凭借反应速度快、适用范围广和处理效果显著等优势得到广泛应用。在修复过程中, 氧化剂通过产生活性自由基实现对污染物的氧化降解, 从而有效降低场地中有机物的浓度, 改善土壤与地下水环境质量。为全面评估修复工程的效能, 需要从污染物去除效率、环境质量改善水平及风险控制效果等方面建立科学的指标体系, 并结合动态监测与数据分析进行验证。当前, 修复效果评价不仅局限于污染物本身的降解程度, 更涉及生态安全与可持续性表现。通过优化氧化剂配比、改进药剂注入方式以及推动多技术联合应用, 能够在提升修复效率的同时降低二次污染风险, 为有机污染场地的长期治理和再利用提供坚实的技术支撑和科学依据。

关键词

有机污染场地; 化学氧化修复; 污染物降解; 效能评估; 环境治理

1 引言

随着工业化进程加快, 大量有机污染物在生产、运输和储存过程中进入土壤和地下水, 导致场地环境质量下降和人群健康风险增加。针对这一问题, 化学氧化修复技术被提出并迅速发展, 其核心在于利用高活性自由基与有机污染物发生反应, 实现快速降解和去除。修复工程在实施过程中受到土壤类型、水文地质条件以及污染物性质的综合影响, 使

得修复效果存在一定差异。为保证修复的科学性与有效性, 有必要构建系统化的效能评估框架, 涵盖污染物去除效率、环境质量改善程度以及生态与健康风险控制等多维指标。监测技术和数据分析方法的进步也为修复效果的动态跟踪和优化提供了有力支持。化学氧化修复工程效能的深入评估, 不仅能够指导后续场地修复工作的改进, 对推动环境治理技术体系的完善和可持续发展战略的实施具有现实意义。

2 有机污染场地化学氧化修复的理论基础

2.1 化学氧化反应机理与自由基作用过程

化学氧化修复的核心在于氧化剂与有机污染物发生快

【作者简介】王志国(1992-), 男, 中国河南安阳人, 硕士, 工程师, 从事环境保护工程研究。

速反应，产生的高活性自由基能够打破污染物分子中的化学键，从而实现彻底降解。常见的自由基如羟基自由基和硫酸根自由基，具有强氧化电位和较短的半衰期，能够在土壤和地下水环境中迅速扩散并攻击污染物分子结构。自由基与有机物发生连锁反应，往往伴随生成中间产物，再进一步氧化为无害的小分子物质。不同类型污染物与自由基的反应路径各异，芳香烃类通过环结构断裂实现去除，氯代烃类则通过去氯化作用被降解。反应过程中，自由基的生成速率和浓度决定了修复效率，而环境中的无机离子和天然有机质则会与自由基竞争反应，影响氧化过程的有效性和持久性。

2.2 常用氧化剂种类及其反应特性分析

化学氧化修复工程中应用最广的氧化剂包括过硫酸盐、过氧化氢、高锰酸盐和臭氧。过硫酸盐在活化条件下生成硫酸根自由基，氧化能力强且适应性好，适合处理多种有机污染物。过氧化氢作为芬顿试剂的核心成分，在铁离子存在下生成羟基自由基，反应速度快，但对 pH 条件和催化剂浓度敏感。高锰酸盐具有稳定性高和操作简便的特点，适用于处理氯代烃和苯系物，但反应过程中易生成二氧化锰沉淀，可能改变土壤孔隙结构。臭氧氧化在气液界面作用显著，可有效分解不饱和有机物，但其在地下水中传输距离有限，需结合注气方式提高利用率。不同氧化剂在使用过程中往往需要根据污染物特性、场地条件和修复目标进行合理选择和配比，以确保降解效果和经济性。

3 有机污染场地化学氧化修复的工程实施条件

3.1 场地污染物种类与分布特征的调查方法

修复工程启动前需要开展详尽的污染场地调查，通过布设采样点和监测井获取土壤与地下水样本，分析有机污染物的种类、浓度和分布范围。常见的分析方法包括气相色谱和高效液相色谱，能够精准识别污染物类型并测定其浓度水平。对于空间分布特征的研究，往往结合地质钻探与地球物理探测手段，确定污染羽流的迁移方向和污染层位。三维地质建模和数值模拟方法有助于揭示污染物的垂向和水平扩散规律，为药剂投加量和注入位置的设计提供科学依据。不同有机污染物在环境中的迁移能力差异较大，挥发性有机物更容易进入地下水系统，而难降解的多环芳烃则多滞留于土壤颗粒表面。通过系统调查能够明确修复目标区域和污染范围，为后续修复技术路径的制定提供基础数据。

3.2 土壤与地下水环境参数对修复反应的制约作用

场地的水文地质条件与土壤理化性质直接影响化学氧化修复的反应过程。土壤颗粒大小决定了药剂在多孔介质中的渗透与分布效果，粘土含量高会导致渗透性差，从而限制氧化剂扩散。土壤中天然有机质和碳酸盐类物质可能与自由基发生副反应，降低有效利用率。地下水的流速和水力梯度决定了药剂在含水层中的迁移路径，过快的流速会稀释氧化剂，过慢则影响反应速率。温度和 pH 变化进一步调节氧化

剂的活化效率，酸性环境有利于芬顿反应，而过硫酸盐在中性环境中更稳定。场地中若存在重金属离子，还可能与氧化剂形成络合物，降低氧化能力。实际工程中需结合水文地质勘察与土壤参数测定结果，合理设计修复工艺条件，以减少环境参数带来的制约。

4 有机污染场地化学氧化修复的效能评价指标体系

4.1 污染物降解率与去除效率的测算方法

污染物降解率与去除效率是评估修复成效的核心指标，常通过修复前后污染物浓度变化计算得出。例如在修复一处含苯污染场地时，初始浓度为 120mg/L，经过 60 天反应后浓度降至 18mg/L，计算降解率达到 85%。另一处含三氯乙烯的场地中，投加过硫酸盐后初始浓度由 75mg/L 降低至 9mg/L，去除效率达到 88%。对于复杂污染物组合，可采用总有机碳指标进行综合评价，如由 320mg/L 下降至 45mg/L，去除率约 86%。在数据处理中，需要结合统计学方法对多点采样结果进行方差分析，以判断修复效果的显著性。在多次修复循环中，去除率的提升曲线能够反映修复过程的持续性与稳定性，为后续工艺优化提供量化依据。

4.2 地下水与土壤环境质量改善程度的评估标准

修复效能不仅体现在污染物降解率，还应通过环境质量改善的程度进行系统评估。以地下水为例，在修复前总有机碳浓度为 280mg/L，修复后下降至 40mg/L，达到 85% 的去除水平，并使水质中苯并芘等指标低于 0.002mg/L 的安全限值。土壤质量改善同样显著，在一处场地中，总石油烃浓度由 560mg/kg 降低至 75mg/kg，符合《土壤环境质量标准》中的Ⅲ类用地限值。通过对比修复前后 pH、电导率及氧化还原电位等理化参数，可以确认环境条件已恢复至有利于微生物生长和生态恢复的状态。在长期监测中，地下水污染物浓度稳定维持在低于 10mg/L，土壤有机污染物残留率不足初始水平的 15%，这些数据表明修复不仅达到了污染去除的目标，还实现了环境质量的整体改善。

5 有机污染场地化学氧化修复的监测与数据分析

5.1 修复过程中水质、土壤理化指标的动态监测

在化学氧化修复过程中，需要对水质和土壤理化指标进行连续跟踪，以便动态掌握反应效果。以水质为例，监测总有机碳在 30 天内由 260mg/L 降至 75mg/L，苯系物浓度由 45mg/L 降至 6mg/L，表现出显著下降趋势。土壤中石油烃浓度在 60 天内由 520mg/kg 降低至 110mg/kg，说明污染物降解反应持续发生。理化指标方面，pH 值由 4.8 逐步恢复至 6.7，氧化还原电位由 120mV 上升至 430mV，显示环境逐渐转向更有利于氧化的条件。电导率监测结果由 780 μ S/cm 降至 420 μ S/cm，表明溶解性离子减少，副反应程度降低。动态监测还包括溶解氧和温度变化，溶解氧从 2.1mg/L 增加

至 5.4mg/L, 温度维持在 15℃至 20℃之间, 均为氧化反应提供支持。通过多参数的同步观测, 可以准确判断修复反应的持续性和稳定性。

5.2 修复前后监测数据对比与统计学分析方法

修复前后监测数据的对比能够揭示化学氧化修复的实际成效。在一处场地, 修复前地下水中苯浓度为 85mg/L, 修复后下降至 9mg/L, 降解率达到 89%。土壤中三氯乙烯含量由 210mg/kg 降低至 28mg/kg, 去除率为 87%。通过对 10 个采样点的对比, 平均浓度由原先的每点 260mg/L 下降至 32mg/L, 标准差由 75mg/L 减至 12mg/L, 说明污染物分布趋于均匀。统计学分析采用 t 检验方法, 结果显示 p 值小于 0.01, 差异具有显著性。利用方差分析进一步确认不同深度土层的修复效果, 浅层土壤平均去除率为 85%, 深层土壤为 72%, 差异显著。地下水水位和流速监测结果表明, 修复过程未引发明显的水文条件改变, 环境风险可控。这些对比和分析为修复效果提供了可靠的定量依据。

6 有机污染场地化学氧化修复的效能提升策略

6.1 复合氧化剂与多技术联合修复的优化方向

复合氧化剂的使用是提升修复效率的重要手段, 过硫酸盐与过氧化氢联合投加能够同时产生硫酸根自由基与羟基自由基, 形成协同氧化效应, 提高污染物降解速率。高锰酸盐与臭氧结合可以在地下水和土壤中分别发挥作用, 实现分层修复。多技术联合修复逐渐成为趋势, 将化学氧化与生物修复结合, 可以在快速降解污染物的同时利用微生物代谢进一步去除残留有机物, 延长修复效果。热活化和电化学辅助等手段能够提高自由基生成效率, 减少药剂消耗。超声波和纳米催化剂的应用拓展了氧化剂的活化方式, 使其在复杂场地条件下也能保持稳定效果。通过复合氧化剂和多技术协同作用, 既能提升修复效率, 又能降低长期成本, 为不同类型污染场地提供适应性更强的修复方案。

6.2 工程工艺参数调整与场地差异化修复模式

化学氧化修复的效率在很大程度上取决于工程工艺参数的设置。药剂投加量与注入速率需要根据污染物浓度和土壤渗透性进行调整, 过量投加可能造成副产物积累, 而不足则难以实现有效降解。注入方式的优化能够显著提升药剂分布均匀性, 脉冲注入与循环注入均表现出较好的适用性。不同场地的污染物种类和水文地质条件差异显著, 必须制定差异化的修复模式。在高渗透性砂土地, 药剂扩散半径较大, 适合采用低浓度长周期的投加方式; 在低渗透性粘土地,

适合结合压力注入和辅助裂隙技术, 以增强药剂渗透。污染物组合场地需要同时考虑挥发性有机物和难降解有机物的去除路径, 合理设置工艺流程。差异化修复模式能够兼顾效率与经济性, 提升整体工程适应性。

6.3 修复全过程风险控制与经济效益分析

化学氧化修复过程中存在二次污染和反应失控的风险, 因此需要建立全过程风险控制体系。在药剂储存和运输环节应设置防泄漏与防爆措施, 在注入环节需通过实时监测控制反应强度, 避免过量自由基导致环境副反应。土壤孔隙堵塞和地下水 pH 剧烈波动均可能带来隐患, 需要通过调节注入速率和添加缓冲剂进行控制。经济效益方面, 单次修复的成本包括药剂费用、施工费用和监测费用, 通过优化工艺和复合技术应用, 可将总成本降低约 20%。修复完成后, 场地再利用价值显著提升, 一块原被污染限制使用的土地在修复后评估增值幅度达到 35%。在生态补偿和环境治理绩效考核中, 修复工程带来的长期社会效益与环境价值远超直接经济投入, 为城市可持续发展和环境保护提供了有效支撑。

7 结语

有机污染场地化学氧化修复作为当前环境治理的重要技术路径, 凭借反应迅速、适应性广和污染物去除彻底的优势, 在土壤与地下水修复中展现出广阔的应用前景。通过建立完善的效能评价指标体系, 结合动态监测与数据分析, 能够对修复效果进行科学判断, 并为工艺优化提供量化依据。修复过程中, 场地条件差异和环境参数的影响不容忽视, 差异化的工艺设计与多技术联合应用成为提升效果的关键。长期跟踪与风险评估进一步保证了修复的可持续性和安全性。在未来的发展中, 复合氧化剂的研发、与生物修复等技术的协同以及经济效益与社会价值的综合考量, 将推动化学氧化修复向着高效、安全和可持续的方向不断迈进, 为改善环境质量和促进土地再利用提供坚实保障。

参考文献

- [1] 游洋洋,梁增强,霍宁.挥发性有机污染场地土壤修复小试[J].环境工程,2024,42(03):184-189.
- [2] 陈斌,徐江,周文军,赵甲亭,朱利中.有机污染场地土壤化学氧化耦合微生物修复技术[J].中国环境科学,2024,44(06):3280-3288.
- [3] 王琦,王文江,王兴博,随力豪,王苗苗,初永思,司长亮,邢皓,刘贞.中交天航环保工程有限公司,有机污染场地原位化学氧化修复关键技术研究与应用[Z].鉴定单位:天津市科学技术评价中心.鉴定日期:2023-11-10.

Analysis of Abnormal High Voltage Motor Bearing Temperature Issues and Integrated Management Solutions Study

Zhen Fang Xiuwei Lan

Jiangsu Lidian Energy Group, Jiangyin, Jiangsu, 214444, China

Abstract

This paper analyzes the abnormal temperature issue of 6kV high-voltage motor bearings at a certain power plant through six successful typical case studies. It systematically summarizes three fundamental causes: environmental factors, lubrication management, and mechanical fit. It proposes a three-pronged solution involving design improvements, maintenance optimization, and standardization of operations. The study shows that optimizing bearing fit tolerances (such as increasing fit gaps), using high-quality high-temperature resistant lubricants (MOBILPLYREXEM/7008 aviation grease), conducting grease replacement during operation, and improving the airflow structure from the design source (moving the fan to the non-driving end) can effectively reduce bearing temperature issues and decrease equipment failure rates. This solution has universal reference value for temperature control management of high-voltage motors in thermal power plants.

Keywords

high voltage motor; bearing temperature rise; grease selection; tolerance fit; equipment maintenance

高压电机轴承温度异常问题分析与综合治理方案研究

方真 兰秀蔚

江苏利电能源集团，中国·江苏 江阴 214444

摘要

本文通过对某发电厂 6kV 高压电机轴承温度异常问题，通过 6 个已经获得成效的典型案例分析，系统总结环境因素、润滑管理、机械配合三大根本原因，提出设计改进、检修优化、运维标准化三位一体解决方案。研究表明：优化轴承配合公差（如增大配合间隙）、采用质量较好的耐高温型润滑脂（MOBILPLYREXEM/7008 航空脂）、运行中进行更换油脂工作、从设计源头改进风路结构（风扇移至非驱动端）可使轴承温度降低高问题得以解决，设备故障率下降。该方案对火力发电厂高压电机温控治理具有普适参考价值。

关键词

高压电机；轴承温升；润滑脂选型；公差配合；设备维护

1 引言

1.1 问题背景

某电厂不含燃料区域 6KV 高压电机共有 266 台、轴承品牌为 SKF/FAG。各电机使用油脂不一，有 MOBILPLYREXEM、#3 锂基酯、HTHS 津脂、7008 航空脂等。长期以来，高压电机最突出的问题在于轴承温度高，是困扰电气专业多年未解决的高压设备发生最多的缺陷，影响设备稳定运行。

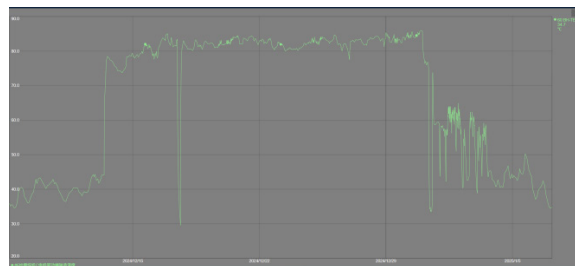
1.2 问题影响

轴承温度过高会显著缩短轴承使用寿命，增加维护成

本。频繁的非计划停运影响生产效率，甚至可能引发更严重的设备故障。

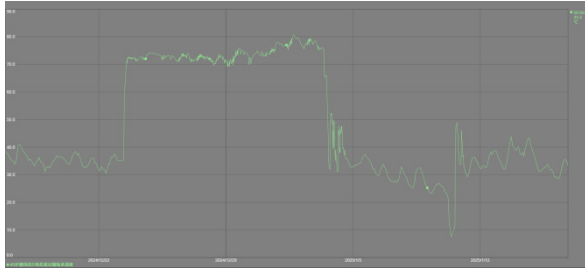
2 问题案例分析

案例一：2024 年 12 月冬季，#6 炉磨煤机 C 电机驱动端轴承温度长期 80℃ 以上，经过清理电机端盖表面以及在线更换油脂，温度下降至 60℃ 左右，后下降至 30℃。



【作者简介】方真（1990-），男，中国江苏江阴人，本科，工程师，从事火力发电厂电气设备系统研究。

案例二：2025年1月冬季，#5炉磨煤机D电机驱动端轴承温度长期70℃以上，经过清理电机端盖表面以及在线更换油脂，温度下降至30℃左右。



案例三：#5炉循环浆泵C电机2016年进行大修更换前后轴承，使用HTHS润滑脂，2018年开始非驱动端轴承温度始终很高，经过换油、清理排油口等手段后，温度65℃左右。2019年更换非驱动端轴承，轴承外圈340-0.025mm，端盖内孔340-0.03mm，轴承内圈190-0.02mm，轴颈190+0.055mm。更换后正常。2021年再次进行大修，修后电机单转3小时非驱动端轴承温度达到69℃不下降。带载运行后轴承温度依然高居不下。2022年打开电机非驱动端轴承端盖发现油脂干结，过热，轴承内圈油滚珠运行痕迹，未更换轴承，将轴承外圈与端盖配合间隙由-0.025mm调整为0.01mm，以改善轴承间油膜形成。投运后轴承温度冬季高达85℃，在线更换油脂无效。2024年打开非驱动端轴承端盖检查发现端盖发黑，油脂干结在滚珠内无法排出，更换非驱动端轴承，将轴承外圈与端盖配合间隙调整为-0.02mm，并将原HTHS油脂更换为MOBILPLYREXEM油脂，投运后一年以来轴承温度未高于60℃。



案例四：#5机前置泵B电机使用HTHS津脂润滑脂，2024年大修前，负荷侧轴承温度常年维持在60℃~70℃间，大修后更换轴承，并将油脂更换为7008航空脂，运行一年，轴承温度控制在30℃~40℃之间。

案例五：#11循环浆泵电机使用MOBILPLYREXEM润滑脂，2025年大修前，负荷侧轴承温度常年维持在70℃~80℃间，大修后更换轴承，投运后，轴承温度控制在40℃~50℃之间。

案例六：#1炉一次风机A电机轴承运行温度56℃，2025年5月因定期给油脂，轴承温度迅速上升至85℃并维持15小时后，逐步下降至正常温度。

3 问题根本原因总结

3.1 环境温度

迎接峰度夏期间，环境温度35℃以上，现场区域温度在45℃左右，特别是磨煤机区域、循环浆泵房内，其热源除环境本身外，还有机务设备产生的热源，导致轴承温度较高。磨煤机区域煤粉较多，积攒在电机轴承端盖上的煤粉影响电机轴承的散热。

3.2 给油脂

当润滑脂选用不当、填充量不足或过量时，会导致润滑效果变差，轴承温度升高。当轴承温度升高，加速油脂干结，导致新油无法加入润滑，温度维持在高位无法下降。

3.3 轴承配合

当轴承与端盖配合尺寸不正确，过于松动或过于紧固，会导致摩擦增加或游隙异常，温度升高。

3.4 轴承本体

部分轴承存在制造缺陷或使用时间过长，长期磨损，导致性能下降，异常磨损，温度升高。

4 解决方案与技术创新

4.1 设计改进措施

原设计电机内风扇位于驱动端，根据内部风路结构，该区域为内部热风区。同时驱动端处于磨煤机下方环境温度高，驱动端受负载、安装的影响较大，轴承自身损耗大。现设计调整风路结构，内风扇由驱动端调整至非驱动端，使驱动端轴承处于冷风区域。电机设计时，轴承型号优化，三轴承改为双轴承，降低驱动端轴承损耗并避免轴承温度的互相影响。并通过结构改进，倾斜排油口角度，便于旧油脂排出。设计时提升电机效率，减少内部损耗，降低电机内部温度。

4.2 检修时改进措施

改善油脂型号。目前该厂使用高压电机轴承油脂各不相同，有部分电机甚至前后油脂均不一致。该厂高压电机主要使用的油脂如表 1：

根据各类油脂对比，建议按负载类别，统一各类经常发生轴承温度高缺陷的电机使用油脂，见表 2。

改良轴承配合尺寸，明确各类负荷的配合公差标准。若修前有温度高缺陷，可根据解体情况，增大或缩小配合间隙，见表 3。

改善检修项目，定期小修清理轴承端盖，调整大修周期。该厂高压电机小修工作为 1.5 年 / 次，主要工作为接线盒检查及电机整体清扫。对于磨煤机电机小修工作，建议可放在机务磨组定检期间进行，及时清理磨煤机电机表面脏污，同样也能减少检修期间的工作量。按 SKF/FAG 轴承使用说明书中寿命描述，该厂使用最普遍的深沟球轴承使用寿命 2-5 万小时，圆柱滚子轴承使用寿命 3-8 万小时。该厂高压电机的大修周期为 6-9 年。

表 1

	#3 锂基脂	MOBILPLYREXEM	HTHS 津脂	7008 航空脂
稠度等级	NLGI 3	NLGI 2	NLGI 2	NLGI 2
基础油类型	矿物油 / 锂皂	矿物油 / 复合锂皂	PAO 合成油 / 复合锂皂	酯类油 / 锂皂
适用温度范围	20℃ ~+120℃	-30℃ ~+150℃	-30℃ ~+180℃	-60℃ ~+150℃
持续工作温度	≤80℃	≤120℃	≤150℃	≤130℃
液化温度	130℃（矿物油析出）	160℃（结构破坏）	200℃（PAO 高温稳定）	180℃（酯类分解）
氧化温度	>80℃（氧化加速）	>120℃（缓慢氧化）	>150℃（抗氧化性强）	>140℃（微动磨损）
极压性能	Timken OK 30N	Timken OK ≥45N	四球磨斑 ≤0.4mm	四球磨斑 ≤0.5mm
推荐负载类型	轻载（<30% 负荷）	中载（30%-70%）	重载（>70%）	高速 / 冲击负载
推荐负载类型	轻载（<30% 负荷）	中载（30-70% 负荷）	重载（>70% 负荷）	高速 / 变频冲击负载
典型电厂应用场景	冷却塔风机	引风机、循环水泵	磨煤机、一次风机	高速给水泵（变频）
该厂使用场景	闭冷泵、氧化气泵、射灰泵、磨煤机	输灰气泵、磨煤机、循环浆泵、气泵、六大风机等	磨煤机、六大风机、磨石机、磨灰机、凝泵、前置泵等	凝泵、分选风机、磨灰机、循环浆泵等
换油周期	2000-3000h	5000-8000h	8000+h	按工况定制
抗水性	中等（流失量 ≤10%）	优（1 级）	极优（流失量 <5%）	优（军用级密封）
干结风险	高（80℃即开始硬化）	中（120℃以上明显）	低（150℃稳定）	中（140℃后加剧）
价格参考	25-35 元 /kg	60-80 元 /kg	90-120 元 /kg	800-1200 元 /kg
综合性价比评价	高温重载禁用	中载最优选	高温重载首选	过度配置不经济

表 2

负载	使用场景	油脂
氧化风机、闭冷泵、射灰泵	使用较少	#3 锂基酯
一期磨煤机	温度高、频繁启停	MOBILPLYREXEM
二三四期磨煤机	温度高、频繁启停、重载	津脂
输灰气泵、厂用气泵、仪用气泵	温度高、频繁启停	MOBILPLYREXEM
循环浆泵	温度高、频繁启停、重载	MOBILPLYREXEM
一二期四大风机	长时间运行	MOBILPLYREXEM
三四期四大风机	长时间运行	津脂
凝泵	变频水泵	7008

表 3

设备类型	典型负荷	轴承 - 轴颈配合	轴承 - 端盖配合
循环浆泵电机	中载 + 轻微冲击	k6	H7
磨煤机电机	重载 + 强冲击	m6	G7
风机电机	重载 + 高温	k6	J7
风机电机	中载	js6	H7
一次风机电机	重载 + 高频振动	n6	K7

轴承实际寿命影响因素有以下：

- (1) 润滑不良（油脂干涸、污染）：寿命可缩短至理论值的 10%~30%。润滑优化（正确选脂、定期补脂）：寿命可延长至 1.5~2 倍。
- (2) 超载寿命呈指数下降（如负荷翻倍，寿命降至 1/8）。高速（dn 值超限）：温升导致油脂劣化，寿命降低。
- (3) 安装与对中误差（不对中、倾斜）：寿命减少 30%~70%。正确安装（液压法、加热装配）：可接近理论寿命。
- (4) 环境因素，粉尘 / 潮湿：密封失效时，寿命下降 50% 以上。高温（>120℃）：油脂氧化加速，寿命缩短。

轴承类型	典型L10寿命 (小时)	备注
深沟球轴承 (SKF 6308)	20,000~50,000	中速 (1500~3000 rpm)、中等负荷
圆柱滚子轴承 (FAG NJ206)	30,000~80,000	重载、低速 (<1000 rpm)
调心滚子轴承 (SKF 22208)	50,000~100,000	高负荷、耐偏心 (如风机、泵)
角接触球轴承 (FAG 7205)	15,000~40,000	高速 (>3000 rpm)、轴向负荷

不考虑其他因素影响，使用深沟球轴承的电机主要为凝泵电机，此类电机 AB 泵互为备用，但基本不进行切换。建议凝泵电机明确为 6 年大修一次，更换轴承。磨煤机电机、六大风机电机、前置泵电机、循环浆泵电机负荷侧均为圆柱滚子轴承，使用寿命能够达到 9 年，但考虑到前置泵电机、六大风机电机的重要性，以及机组停运策划方案，建议明确

6 年大修一次。磨煤机电机、循环浆泵电机可根据是否存在缺陷，6-9 年大修一次。

4.3 运维改进措施

完善给油脂周期及方法，在给油脂之前，需清理电机本体加油嘴上积灰及油污，放置脏污进入轴承腔室。同时，在给油脂前确认电机轴承温度，若温度较高，则不再进行补油，待温度低后再进行给油脂工作。适当进行换油工作。经过数次尝试，在线换油工作能够在运行期间将旧的油脂排出轴承腔室内，从而达到加强轴承润滑的作用。建议在运行期间，轴承温度长期高居不下的情况下，适当进行更换油脂工作，从而加强轴承润滑效果。

5 结语

对于新采购电机，明确新设计理念，从而达到降温需求；对于在用电机，明确检修周期，油脂要求以及配合公差要求，定期在线更换油脂，并合理科学地进行定期给油脂，能够满足降低轴承温度高缺陷地要求。从而来提高设备可靠性。

参考文献

[1] SKF轴承工程手册. 2023版

[2] IEEE 841-2020 石油化工电机标准

[3] 汪耕等. 大型电机轴承系统故障诊断[M]. 机械工业出版社, 2021

Research on key construction technology of steel longitudinal beam addition in concrete tied arch bridge

Longhua Zhang Jian Tao

Hangzhou Luda Highway Engineering Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang, 311112, China

Abstract

In recent years, the safety performance of large-span bridges has drawn increasing attention. Concrete tied-arch bridges, due to their unique structural characteristics, have made reliability assessment and reinforcement technologies a crucial aspect of modern traffic safety operations. However, construction defects in some bridges, combined with multiple factors during operation such as vehicle overloading, delayed maintenance, and improper management, have caused various structural failures in load-bearing components of serviceable concrete tied-arch bridges, significantly compromising their safety reliability. Therefore, during reinforcement and repair processes, adding longitudinal beams to concrete tied-arch bridges can enhance their load-bearing capacity and bending resistance. Based on the author's experience in reinforced concrete tied-arch bridge reinforcement projects, this paper proposes key construction techniques and quality control measures for adding longitudinal beams to reinforced concrete tied-arch bridges, offering practical suggestions for industry peers.

Keywords

reinforced concrete; arch bridge; steel longitudinal; beam increase

混凝土系杆拱桥钢纵梁增设施工关键技术研究

张龙华 陶剑

杭州路达公路工程总公司, 中国·浙江 杭州 311112

摘 要

近几年来, 大跨度桥梁的安全性能越来越引起人们的注意, 混凝土系杆拱桥因其结构的特殊性, 其桥梁结构的可靠性评价及加固修复技术, 已经成为现代交通安全运营的一个重要方面。同时, 部分桥梁在施工时可能存在的施工缺陷, 在运营过程中的各种车辆超载、或养护不及时、或管理不当等多重因素, 不同程度的诱发了在役的混凝土系杆拱桥中受力构件的种种病害, 其安全可靠性能将会大大降低。因此在加固修复过程中, 通过混凝土系杆拱桥纵梁增设, 以增强桥梁的承载能力和抗弯性能。本文基于作者在近几年来参与钢筋混凝土系杆拱桥加固施工的相关工作, 对钢筋混凝土系杆拱桥增设纵梁施工要点及质量控制提出一些想法与建议, 供同行参考。

关键词

钢筋混凝土; 拱桥; 钢纵梁; 增设

1 引言

近年来, 国内外学者和工程师们针对混凝土系杆拱桥的加固修复技术进行了广泛的研究与实践, 积累了丰富的经验。钢纵梁增设技术作为其中的一种重要手段, 因其具有施工周期短、加固效果显著、对交通影响小等优点, 而受到了广泛的关注和应用。然而, 在实际工程中, 由于桥梁结构的多样性、病害的复杂性以及施工环境的特殊性等因素, 使得钢纵梁增设技术的实施面临诸多挑战。

【基金项目】杭州市交通运输学会科技项目(项目编号: Hzjt202402)。

【作者简介】张龙华(1985-), 男, 中国江苏南京人, 本科, 高级工程师, 从事土木工程研究。

为了应对这些问题, 在桥梁的加固修复过程中, 人们采取了一系列有效的技术措施。其中, 通过在混凝土系杆拱桥的纵梁部分增设新的钢纵梁, 可以有效增强桥梁的承载能力和抗弯性能, 从而提升其整体稳定性。这种增设工艺的实施需要综合考虑多方面因素, 特别是新钢纵梁与原有结构之间的连接方式, 必须确保新旧结构能够紧密配合、协同工作, 共同承担桥梁所承受的各种荷载。同时, 通过对工艺参数进行优化调整, 以及及时更换和调整支座等关键部件, 可以恢复混凝土系杆拱桥的正常使用功能, 进一步保证桥梁在长期运营中的稳定性和安全性, 从而延长其使用寿命, 确保交通运输的顺畅和安全。

因此, 深入分析混凝土系杆拱桥钢纵梁增设施工的关键技术, 对于提高桥梁加固修复的质量、效率和安全性具有重要意义。

2 基本要求

增设的钢纵梁首先应满足图纸要求。即在工厂中，不仅要完成纵梁的制作，还需处理连接钢板和加劲钢板的制作，并将这些部件整体焊接，构成一个坚固的结构体系。

严格控制焊接质量。包括桁架间的连接，作业时应用埋弧焊技术，根据需要，应对各焊缝进行全面检测。同时，还需对 10% 的焊缝进行射线检测，通过多种检测方法的结合使用，最大程度地确保焊接品质。

在涂装方面，除最后一道面漆喷涂工序需在施工现场执行外，其他所有涂装工序均应在车间或特定的涂装室内进行。这样可以有效管理涂装环境，防止外界因素影响涂装品质。根据设计规范，所选用的涂层系统必须具备足够的耐久性，其保护期限不得低于 25 年，以确保结构在长期使用中获得充分的保护。

做好成品保护工作，即在钢纵梁运输过程中，做好构件吊装、运输与安装过程中进行专门的运输架进行固定，严格控制作业过程中因振动和冲击对构件产生的损伤。

严格施工定位与安装。施工时一方面对各结点进行高精度连续定位，包括平面位置与标高的精度控制。同时，需要充分考虑环境变化对安装精度的影响，包括温度、湿度变化进行动态调整。

3 施工工艺流程及操作要点

3.1 施工工艺

混凝土系杆拱桥钢纵梁增设施工工艺如下：

加工准备—零件制造与组装—焊接—焊接检测—试拼装—防腐涂装—运输—现场安装。

3.2 施工要点

3.2.1 纵梁加工准备

(1) 钢板的定尺、工艺流程、施工方式、运输和吊装方案以及现场状况，是制造加工厂家在划分结构工厂预制部分和现场焊接部分时必须考虑的因素。根据施工图纸要求，厂家应进行加工工艺的系统设计，包括加工工艺流程、制造工艺要求、质量控制、验收程序等。

(2) 钢结构加工厂应根据实际情况，合理划分制作节段，并与设计、监理共同研究确定节段划分及对接焊缝的位置，确保避开应力集中区域。

(3) 在将钢纵梁构件节段拼装成整体时，构件节段间的顶、底板对接焊缝应保持至少 150mm 的错位距离。原则上，构成单元构件的各板件不应进行拼接。

(4) 在钢板到货并准备下料前，必须检查钢板的几何尺寸、平整度以及表面是否有锈蚀或异常锈蚀现象，并记录在案以备后续查验。

(5) 做好材料的信息化管理。包括对材料牌号、板号等信息进行详细的记录和标识。一方面能快速准确地识别和材料定位，避免因材料混淆而导致的错误和损失。同时，标

识还可以帮助我们更好地了解材料的来源、规格、性能等信息，为后续的材料使用和管理提供依据。

3.2.2 零件制造与组装

① 钢板在进行样板制作、下料以及切割过程中，必须确保其几何尺寸的精确性。在这一过程中，需要全面且正确地考虑到多种因素的影响，包括但不限于构件的弯曲变形、边缘的精细加工以及电焊过程中可能产生的收缩等。

② 做好钢板的切割质量。如果在预加工过程中发现钢板存在任何异常情况，如变形、瑕疵等，应立即采取特殊的加工处理措施，以消除这些异常，确保后续切割工作的顺利进行。

③ 对于本桥所使用的所有钢结构钢板，包括已经成型的型钢（如矩形钢管、剖分 T 型钢等），严格禁止采用剪切的方式进行加工。对于需要通过气割开坡口进行焊接的板边，必须在气割后使用砂轮进行细致打磨，彻底去除表面生成的氧化皮，以确保焊接质量和强度。

④ 在进行气割操作之前，必须先将钢板表面的浮锈以及各种脏物彻底清除干净。这一步骤至关重要，因为表面的锈迹和污物不仅会影响气割的精度，还可能对焊接质量造成不利影响。

⑤ 防止切割出现缺口。对于主要受力构件的零件边缘，严格要求不得出现任何缺口。而对于一般构件的零件边缘，若不可避免出现缺口，其最大允许尺寸也应严格控制在 2mm 以内，以确保构件的整体强度和稳定性。

⑥ 对于待焊接的表面以及邻近焊缝的表面，必须保持其清洁和干燥，施工时不得存在松散、氧化、锈蚀、油污或其它质量缺陷。

⑦ 为了确保涂装后漆膜的均匀性和美观性，钢梁的外露边缘部分需要进行精细的打磨打磨后的圆角半径应控制在 $R=2 \sim 3\text{mm}$ 之间，以延长钢梁的使用寿命。

3.2.3 焊接

焊接是钢结构工程的重要环节，施工时应充分考虑焊接类型选择、焊接环境控制及焊接工艺选择与优化。

钢梁的焊接工艺可以采用坡口对接的方式进行，确保焊缝能够完全熔透，以达到结构的高强度和稳定性；同时，在腹板、加劲板以及钢纵梁之间的连接处，则采用角焊缝的技术进行处理，以保证各部件之间的牢固结合和整体结构的可靠性。

焊接作业时禁止雨天户外作业，有条件时推荐室内焊接，且加工时湿度在 80% 以下，温度不低于 5 摄氏度。

对端部位置进行全面的围焊处理，以保证焊接的完整性和结构的稳定性。焊缝部分应当填充得足够饱满，避免出现任何形式的空洞或缺陷，从而确保焊接接头的强度和可靠性。此外，在焊接过程中，还需要严格控制和调节电焊机的电流大小，防止因电流过大而对钢结构造成不必要的损伤，影响整体结构的承载能力和使用寿命。

T型接头角焊缝与对接接头平焊缝的两端应装设引弧板和引出板,其材质及坡口要与工件相匹配,焊接完毕后用火焰去除并打磨,禁止锤击。

进行焊钉焊接作业,特别是焊钉处于水平位置时,每班次作业人员开始工作或作业条件变化(如换设备、调参数等),须先试焊。试焊剪力钉检验合格后,作业人员才能按规范正式开展后续焊接工作,确保焊接质量与安全。

3.2.4 焊缝检验

焊缝等级划分是重要工艺标准,施工时按焊缝特点与要求分级,分为一级和二级焊缝。一级焊缝包括坡口熔透焊缝和主梁与横梁上下翼缘板现场拼接焊缝,后者对结构稳定性和承载能力至关重要。二级焊缝是主梁、腹板和加劲板角焊缝,不要求完全熔透,但在结构中也很重要。虽然二级焊缝要求相对较低,但仍需保证质量、避免缺陷,以确保结构稳定与安全。

在焊缝冷却至室温之后,必须进行外观检查,以确保焊缝表面没有肉眼可见的裂纹、气孔、夹渣等缺陷。外观检查是焊缝检验的第一步,它可以帮助我们发现一些明显的焊接问题,从而及时进行修复,保证焊接质量。

在检验过程中,焊缝的外形尺寸和外观质量是两个重要的检验指标,应满足《钢筋焊接及验收规程》等现行标准的要求。焊缝质量应符合两千《钢结构工程施工质量验收规范》(GB50205)的规定。

一级焊缝要进行系统的超声波探伤检测,确保内部质量符合设计要求。Ⅱ级焊缝相对次要,虽无需全面检测,但须按规定抽样检查,抽检比例不低于20%。另外,钢腹板对接焊缝特殊,采用射线探伤抽检,抽检比例为10%,以此确保焊缝内部质量和结构整体安全。

3.2.5 试拼装

钢结构制造加工场内应开展试拼工作,保证过程安全可控,利于及时察觉与处理潜在问题。

试拼用胎架需有足够强度、刚度和稳定性,基础部分要有足够承载能力,线形设计依主梁竖曲线,制作完成后严格验收,合格后方可试拼。

在试拼装之前,需要逐一对构件进行检查,涵盖焊缝质量、尺寸及形状等方面,确保其满足设计要求与标准规范之后,才能够开展试拼装。

试拼时所有构件都要参与,不同试拼部分用相同衔接过渡构件,保证整体结构完整、一致和稳定。

试拼完成后,对构件及部件详细编号、登记,有助于现场安装,避免混淆和错误,提高安装效率。

试拼允许偏差范围须严格符合《公路桥涵施工技术规范》相关条款要求,确保试拼结果准确可靠,为施工提供技术保障。

3.2.6 防腐涂装

(1) 选涂料优先选有国家标准的,无法满足需求时选

有企业标准的,严禁采用无标准产品。

(2) 涂膜由底漆、中间漆和面漆三层构成,三者配合形成防护体系,严禁单一品种涂装。

(3) 涂膜各层的层数设置须按设计图纸要求,确保每层厚度和层数达标。若总厚度未达设计标准,可增加面漆层数弥补,保证整体性能和效果。

(4) 涂膜各层施工要保证质量,不得出现咬底、裂纹等缺陷,外观应均匀、平整、丰满且有光泽。

(5) 涂装质量不符合要求要及时返修,合格后才能验收。

(6) 钢构件埋入混凝土部分表面严禁涂漆,但要彻底除锈糙化,涂装向埋入部分延伸2cm增强防护可靠性。

3.2.7 运输与安装

(1) 所有钢构件需分类、编号,按使用需求顺序存放。存放场地要地面坚实、表面平整、通风良好,且有完善排水设施,确保不积水。钢构件支撑部位要有足够承载能力,受力均匀,存放时严禁出现不均匀沉降,保障其稳定性和安全性。

(2) 构件的支点垫点应放置在经过设计方认可且允许的特定部位,一般情况下,不建议将构件进行叠放处理。

(3) 在运输过程中。运输过程中,必须严格遵守相应运输方式的安全规定,特别是钢锚梁在运输过程中,要采取有效措施防止其倾倒和碰撞,确保支点平稳、多点支撑且可靠,以最大程度地保障运输安全。

桥梁上部结构的现场安装总体顺序如下:

(1) 首先根据实际需要搭设临时支架,并对原有的横梁顶面进行彻底清理和找平处理,确保安装基础的平整度。

(2) 钢梁节段应按设计要求和施工专项方案实施,实施时各部件准确就位,整体强度与稳定性满足设计要求。

(3) 在钢梁节段安装完成后,应逐步拆除临时支架,拆除时要确保施工安全,避免对已安装结构造成任何不利影响。完成后还需第二次调整索力,确保桥梁的整体稳定性和安全性。

4 结语

实践证明,新增纵梁成功实施,需深入理解桥梁结构并精细施工。一方面严格把控施工工序,确保质量;同时,长期监测和维护新增纵梁很重要,利于及时处理潜在问题,保障桥梁持续安全运行。未来,随桥梁加固技术进步创新,新增纵梁有望在更多桥梁中广泛应用推广,为加固维护提供更多选择,不仅能提升桥梁强度和寿命,还能为日常管理带来便利和灵活性。

参考文献

- [1] 罗舟滔.桥梁下部结构病害检测及加固技术研究[J].中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术,2024(003):000.
- [2] 张雨.某上承式拱桥病害分析及加固方案研究[D].大连交通大学,2023.
- [3] 曾洋,李蒙.上承式混凝土系杆拱桥桥道系病害分析和加固[J].黑龙江交通科技,2024,47(2):90-93.

Application of integrated geophysical exploration technology in site selection and investigation of karst mountain wind farms

Yuping Liu Binglei Zhang Xihui Lv Rongze Hu Wenbo Liu

China Power Construction Group Qinghai Electric Power Design Institute Co., Ltd., Xining, Qinghai, 810008, China

Abstract

Wind farm site selection in karst regions faces challenges such as complex terrain, variable geological conditions, and intense karst development. Taking a karst mountainous wind farm project as an example, this paper systematically elaborates on the comprehensive application of various geophysical exploration methods—including high-density electrical surveys, cross-hole electromagnetic wave CT, and pile-bottom karst detection—combined with engineering drilling techniques for systematic implementation in site selection, foundation type selection, and construction guidance. Through full-process investigation practices covering feasibility studies, preliminary design, construction drawing design, and construction phases, a “geophysical exploration first, drilling verification, comprehensive analysis” investigation model has been established. Practical results demonstrate that integrated geophysical exploration technology significantly enhances the efficiency and accuracy of micro-siting investigations in karst regions, effectively identifies spatial distribution characteristics of karst formations, reduces engineering risks, and provides reliable technical support for wind farm construction under complex geological conditions. This approach holds significant value for promotion and application.

Keywords

wind farm; karst exploration; high-density electrical method; cross-hole electromagnetic wave CT; pile bottom karst detection; comprehensive geophysical exploration

综合物探技术在岩溶山区风电场选址勘查中的应用研究

刘宇平 张秉来 吕西辉 胡荣泽 柳文博

中国电建集团青海省电力设计院有限公司, 中国·青海 西宁 810008

摘 要

岩溶地区风电场选址勘查面临地形复杂、地质条件多变、岩溶发育强烈等挑战。本文以某岩溶山区风电场工程为例,系统阐述了综合运用高密度电法、跨孔电磁波CT、桩底岩溶探测等多种物探手段,结合工程钻探技术,在风电场选址、基础选型及施工指导中的系统性应用。通过可行性研究、初步设计、施工图设计和施工阶段的全流程勘察实践,构建了“物探先行、钻探验证、综合研判”的勘察模式。实践表明,综合物探技术可显著提高岩溶地区风机微观选址勘察效率与准确性,有效识别岩溶空间分布特征,降低工程风险,为复杂地质条件下的风电场建设提供可靠技术支持,具有重要的推广应用价值。

关键词

风电场; 岩溶勘查; 高密度电法; 跨孔电磁波CT; 桩底岩溶探测; 综合物探

1 引言

风能作为一种清洁可再生能源,在我国能源结构中的比重逐年提升。根据国家能源局数据显示,截至 2022 年底,我国风电装机容量已达 3.65 亿千瓦,位居世界第一。然而,风电场多建于山地、丘陵等复杂地形区域,若场址位于岩溶发育区,则地基稳定性与基础选型成为工程建设的关键难题^[1]。岩溶地区地质条件复杂,主要表现为基岩面起伏大、土岩组合关系复杂、溶洞发育随机性强等特点,给风电场选址和基

础设计带来极大挑战^[2]。传统的单一钻探手段虽然能够直接获取地质信息,但毕竟是一孔之见,难以全面掌握岩溶空间分布特征,且在山地环境中实施困难、成本高、周期长^[3]。而综合物探技术以其高效、无损、信息量大的特点,在岩溶勘查中展现出显著优势。通过多种物探方法的有机结合,可以相互补充、相互验证,形成更加全面、准确的地质模型^[4]。

本文以贵州某风电场工程为例,重点探讨综合物探技术在岩溶地区风电场选址勘查中的具体应用,包括方法选择、工作布置、数据解释和成果验证等环节,以为类似工程提供参考和借鉴。

【作者简介】刘宇平(1991-),男,中国青海西宁人,硕士,高级工程师,从事电力工程勘察与设计研究。

2 物探方法原理与技术特点

2.1 高密度电法

高密度电法是以地下介质电性差异为基础的地球物理勘探方法。其基本原理是通过布设多道电极进行扫描测量，获取地下视电阻率分布图像，进而推断基岩面起伏、覆盖层厚度及岩溶发育情况^[5]。

在本工程中，高密度电法主要用于风电场选址阶段的初步筛查，为风机位优化提供依据。测量设备采用重庆奔腾数控技术研究所生产的WDJD-4型高密度电法仪，电极间距根据探测深度要求设置为5-10米，测量装置选择温纳装置或施伦贝谢装置。

2.2 跨孔电磁波 CT

跨孔电磁波 CT 技术是利用电磁波在不同介质中的传播特性进行层析成像的地球物理方法。其原理是通过在两钻孔之间发射和接收电磁波，获取电磁波场强数据，通过反演计算重建孔间岩体电磁波吸收系数分布图像，从而精确识别岩溶洞穴、裂隙等不良地质体^[6]。

本工程采用中国地质科学院物化探研究所生产的 JW-6 型跨孔电磁波仪系统，工作频率为 12-24MHz，点距 1 米，采用同步扫描方式采集数据。每个风机基础布置 4 个钻孔，组成 6 个 CT 剖面，实现对基础下岩体的全面扫描。

2.3 桩底岩溶探测

桩底岩溶探测是专门针对桩基工程开发的检测技术，采用声呐反射原理对桩基底部以下一定范围内进行弹性波探测。其工作原理是通过发射换能器向桩底发射弹性波，当声波遇到波阻抗界面（如基岩面、溶洞顶底板）时会产生反射波，通过分析回波信号的振幅、频率和时差等特征，可以判断桩端以下是否存在溶洞、软弱夹层等不良地质体^[7]。本工程采用 JL-SOMAR (A) 型桩底溶洞探测仪，探测深度为桩底以下 3 米，若发现异常，则加深桩井并重新检测，直至满足设计要求。

3 工程概况

3.1 项目背景

贵州某风电场工程属山地风电场项目，项目总装机容量 120MW，布置 48 台 2.5MW 风电机组，配套建设 1 座 110kV 升压站，场区处地质构造复杂，岩溶发育强烈。

3.2 地质条件

风电场场地地貌属构造剥蚀中山地貌，地形起伏大，坡度一般 15° -20°，局部达 30° -40%。灰岩区喀斯特地貌发育典型，呈现峰丛、溶洼、落水洞、石芽等微地貌特征。岩土工程勘察揭示，场区地层结构复杂，自上而下可分为：①素填土 (Q_4^{ml})：松散，厚度 0.5-2.00m；②粉质黏土 (Q_4^{cl+dl})：可塑 - 硬塑，厚度 2-12m；③粉质黏土混角砾：稍密 - 中密，厚度 3-12m；④碎石土：中密 - 密实，厚度 2-12m；⑤灰岩 (P_2^{qm})：中等风化 - 微风化。

岩溶发育程度分区评价显示，39 个灰岩区风机位中，岩溶强发育 22 个，中等发育 10 个，微发育 7 个。

3.3 勘察难点

本工程勘察工作面临以下主要难点：（1）地形复杂，交通不便，设备搬运困难；（2）岩溶发育强烈，空间分布随机性强，勘察精度要求高；（3）风机基础荷载大，对地基均匀性和稳定性要求高；（4）工期紧张，需要快速高效的勘察方法；（5）水资源缺乏，钻探施工用水困难。

针对这些难点，项目采用了综合物探技术结合钻探验证的勘察方案，既提高了工作效率，又保证了勘察质量。

4 综合物探实施与成果分析

4.1 高密度电法应用效果

高密度电法在风电场选址中发挥了重要作用。通过大面积扫描测量，初步掌握了场区岩溶发育规律：低阻异常区（视电阻率 $<100\Omega \cdot m$ ）多对应岩溶强烈发育区，中阻区（ $100-500\Omega \cdot m$ ）对应中等发育区，高阻区（ $>500\Omega \cdot m$ ）对应完整基岩区。

现场主要按“川”字形、交叉线形布置 2-4 条测线，均采用了温纳装置及施伦贝尔装置施测。例如 FJ02 风机位场地西测线高密度电法等视电阻率拟断面图如图 1 所示，从反演结果图中将溶洞异常显示的清晰，浅部的空洞，底部的低阻岩溶发育区，均在高密度反演图上清晰反映出来。反演图显示空洞距离地表约 5m，高约 10m，宽约 10m，底部的岩溶发育异常区深度大于 45m。后续钻探验证表明，该处确实存在溶洞发育，与物探解释结果基本符合。

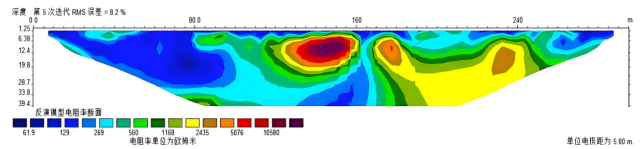


图 1 溶洞施伦贝尔装置反演图

高密度电法成果为风机位优化提供了重要依据。通过综合分析，取消了 5 个位于岩溶强烈发育区的原规划风机位，避免了潜在工程风险。

4.2 跨孔电磁波 CT 探测成果

跨孔电磁波 CT 探测在施工图设计阶段开展，主要目的是详细查明风机基础下岩溶空间分布特征。FJ08 风机位地表为第四系覆盖层，基岩为灰岩。本次风机场地在钻探完成后采用中国地质科学院物化探研究所生产的 JW-6 型跨孔电磁波仪系统在各钻孔之间进行了跨孔电磁波 CT 探测，以查明钻孔之间基岩起伏及岩溶发育情况。现场采用同步和完备测量、扫频模式进行数据采集，发射频率分别为 12MHz、16MHz、20MHz 及 24MHz，发射、接收点距均为 1m，根据风机场地钻孔布置图，将四个边界孔两两对穿，按照 ZK1-ZK2-ZK3-ZK4-ZK1、ZK1-ZK3、ZK2-ZK4 剖面进行布置，每个风机场地共计 6 对孔。例如 FJ06 风机位场地跨孔电磁波 CT 物探地质断面图如图 6 所示，图中红色区域表示高吸收系数区，对应岩溶发育带，蓝色区域对应溶洞；浅灰色区域表示低吸收系数区，对应完整基岩。在剖面中部（深

度 6-14m) 存在连续的高吸收异常带, 推断为岩溶发育带; 在剖面底部 (深度 >20m) 吸收系数普遍较低, 表明该深度以下岩体完整性较好。可以推测存在溶洞 3 处, 溶蚀发育区 1 处。综合各剖面及地质资料分析可知, FJ06 风机位场地岩溶发育, 溶洞规模相对较小, 局部溶蚀发育。这些成果为风机基础设计提供了直接依据。统计表明, 场地跨孔电磁波 CT 共发现规模以上溶洞 (直径 >1m) 21 处, 其中 85% 得到钻探验证, 表明该方法具有较高的可靠性。

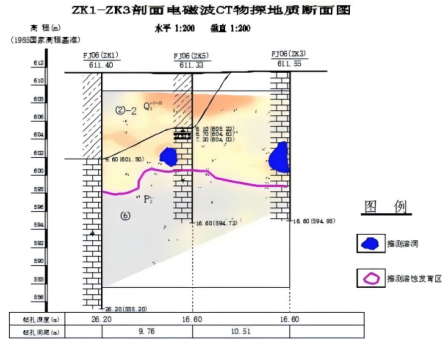


图 2 FJ06 风机位场地电磁波 CT 物探地质剖面图

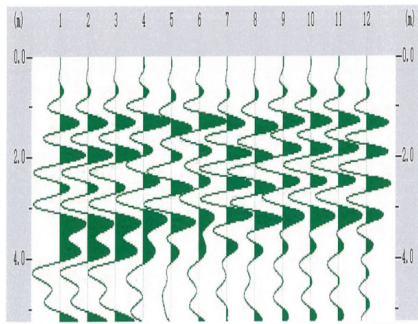


图 3 风机 FJ15-3 号桩桩井底部岩溶探测成果

4.3 桩底岩溶探测应用效果

桩底岩溶探测在施工阶段实施, 主要目的是确保桩端持力层稳定性。图 7 为风机 FJ15-3 号桩桩井底部岩溶探测成果图。图中横坐标为水平距离, 纵坐标为深度, 颜色代表反射波强度。如图所示波形一致性一般, 部分波形有畸变, 波形衰减基本正常。推测桩底 3 米深度范围内未发现溶洞或软弱夹层, 岩体裂隙发育, 局部岩体较破碎

本工程共对 15 台风机 256 根桩进行了桩底探测, 发现 37 根桩存在桩底岩溶问题, 均通过加深桩井方式处理成功, 避免了潜在安全隐患。

4.4 综合物探成果验证

为验证综合物探成果的可靠性, 对物探解释异常区进行了加密钻探验证。统计结果表明: 高密度电法异常验证符合率达 78%; 跨孔电磁波 CT 异常验证符合率达 85%; 桩底岩溶探测异常验证符合率达 92%。验证结果证明综合物探技术具有较高的可靠性。

同时发现, 物探方法之间存在一定的互补性: 高密度电法覆盖面广但分辨率较低; 跨孔电磁波 CT 分辨率高但仅限于钻孔间区域; 桩底岩溶探测针对性强但探测范围有限。

三种方法结合使用, 能够实现从面到线、从线到点、从点到体的全方位勘察^[8]。

5 结论与建议

(1) 综合物探技术与钻探相结合的工作模式在岩溶地区风电场勘察中应用效果显著, 形成了“物探先行、钻探验证、综合研判”的高效勘察技术体系^[9], 识别岩溶发育特征, 为风机位优化和基础设计提供科学依据。

(2) 高密度电法、跨孔电磁波 CT 和桩底岩溶探测三种方法优势互补, 结合钻探验证, 形成了完整的岩溶勘察技术体系, 显著提高了勘察资料的完整性与可靠性。

(3) 风电项目物探技术存在局限性: ①受勘探精度和网度限制, 以及地形地质条件的影响, 一些上覆灰岩较薄、埋藏浅的小型岩溶裂隙及埋深大于 40 米的异常可能会漏判; ②高密度电法仅依据电性参数进行解释, 当地层物性差异不明显时, 其推断结果存在多解性; ③岩溶发育无规律且变化大, 在解释覆盖层深度和岩溶异常时存在一定误差, 物探成果必须结合钻探验证进行综合确认与校准。

(4) 在总体规划阶段, 应根据物探解译的岩溶分布情况对风机位进行优化调整, 优先避开大型岩溶发育带。若因风资源等条件限制无法避让时, 必须在详细勘察的基础上, 对风机基础方案进行技术经济综合对比, 确定采用桩基穿越或地基处理 (如注浆加固) 等最佳处理方案。

(5) 重视前期地质调绘工作, 充分利用遥感、航拍等新技术, 宏观把握岩溶发育规律, 指导物探工作布置。

(6) 加强物探数据的综合解释与三维建模, 实现多源数据融合分析, 提高解释精度和可靠性。

(7) 加强勘察与设计的互动, 建立地质模型与设计参数的直接关联, 实现勘察成果的高效利用。

参考文献

- [1] 王宁宁, 洪斌. 喀斯特地貌山地风电线性工程施工安全管理[J]. 云南水力发电, 2025, 41(06): 196-198.
- [2] 高家奇. 川西南复杂高原山地风电基建的地质分析与可行性评估[J]. 电工技术, 2024, (03): 74-76.
- [3] 王海飞. 风机基础土岩组合地基变形与稳定性研究[D]. 浙江大学, 2022.
- [4] 王晓伟, 顾小双, 梁小龙. 综合物探手段在线型工程中的应用[J]. 工程勘察, 2025, 53(05): 83-90.
- [5] 张业. 综合物探方法在铁路路基岩溶勘察中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2021, 18(05): 738-743.
- [6] 段春龙, 杨亚磊. 电磁波 CT 技术在岩溶勘察和注浆检测方面的应用[J]. 工程地球物理学报, 2017, 14(04): 435-441.
- [7] 孙红林, 张邦, 刘铁华, 等. 桩端岩溶三维超声成像方法及应用研究[J]. 铁道工程学报, 2024, 41(02): 26-32+37.
- [8] 胡俊杰, 徐洪苗, 王鹏, 等. 基于三维可视化的跨孔电磁波 CT 在岩溶勘察方面的应用[J]. 工程地球物理学报, 2022, 19(04): 443-449.
- [9] 廖友清, 陈致同, 刘彦华. 综合物探方法在北盘江大桥岩溶地质勘察中的应用[J]. 地质学刊, 2020, 44(Z1): 185-191.

Research on Energy Saving, Emission Reduction, and Low-Carbon Transformation Technology for Large Coal-Fired Power Units

Tao Huang

Zheneng Wuwei Energy Co., Ltd., Wuwei, Gansu, 733000, China

Abstract

With the global emphasis on environmental protection and accelerated energy transition, China is striving to achieve its “dual carbon” goals and transform into a new power system. This paper examines four technological pathways for large coal-fired units: low-carbon co-firing technology, multi-energy complementary synergy, hydrogen-ammonia biomass fuel substitution, and surplus power resource utilization. Through theoretical analysis, case validation, and economic evaluation, we propose an integrated energy-saving and emission-reduction solution combining “fuel substitution, system synergy, and resource recycling.” The deep peak regulation and low-carbon transformation of large coal-fired units provide technical paradigms and practical references, aiming to explore new pathways for energy conservation and emission reduction in 1000MW coal-fired peak-shaving units. This research offers theoretical support and practical guidance for the sustainable development of the thermal power industry.

Keywords

Energy conservation and emission reduction of large coal-fired units; low-carbon co-firing; multi-energy complementarity

大型燃煤火电机组节能减排及低碳转型技术研究

黄涛

浙能武威能源有限公司, 中国·甘肃 武威 733000

摘 要

随着全球对环境保护的重视和能源转型的加速,为实现我国能源“双碳”目标与新型电力系统转型。本文针对大型燃煤机组在低碳掺烧技术、多能互补协同、氢氨生物质燃料替代及富裕电量资源化利用四大技术路径。通过理论分析、案例验证与经济性评估,提出了“燃料替代-系统协同-资源循环”三位一体的节能减排方案。大型燃煤机组深度调峰与低碳转型提供了技术范式与实践参考,旨在探索1000MW燃电调峰机组的节能减排新路径,为火电行业的可持续发展提供理论支持和实践指导。

关键词

大型燃煤机组节能减排; 低碳掺烧; 多能互补; 电解制氢制氨

1 引言

研究背景,中国火力发电行业在能源转型浪潮中呈现出“总量维稳、结构优化”的独特发展趋势。据国家能源局数据,2020-2024年我国火电机组发电量从53302.48亿千瓦时增长至63742.6亿千瓦时,年均增速达4.5%。尽管新能源装机占比突破45%,但火电仍承担着60%以上的电力供应,并在极端天气与电网调峰中发挥关键作用,本文的研究目的,即探索1000MW燃电调峰机组的节能减排技术,为火电行业的可持续发展提供参考。研究方法:介绍本文采用的研究方法,包括文献综述、技术分析、案例研究等。

【作者简介】黄涛(1993-),男,中国甘肃张掖人,本科,助理工程师,从事大型火电厂低碳节能减排研究。

2 1000MW 燃煤机组低碳掺烧技术研究

2.1 技术背景及原理

传统燃煤机组主要燃烧单一的煤炭资源,能源利用效率相对较低且碳排放量大,而低碳掺烧技术是指在保证机组稳定运行的前提下,将一定比例的低碳燃料与煤炭进行混合燃烧,以达到降低碳排放、提高能源利用效率的目的。本技术的核心在于优化燃料的燃烧过程,通过合理选择和配比低碳燃料,改变燃烧反应的热力学和动力学条件,从而实现低碳燃烧,在燃烧过程中能够有效减少二氧化碳等温室气体的排放,从热力学角度来看,低碳燃料与煤炭的混合燃烧可以改变燃烧反应的热力学平衡。低碳燃料具有较高的氢碳比,在燃烧过程中能够释放更多的氢气,从而提高燃烧反应的热值和燃烧效率。

2.2 应用技术

在锅炉选择低碳燃料，燃烧过程的动力学特性对燃烧效率和污染物排放有着重要影响。低碳燃料的燃烧动力学特性与常用煤炭有所不同，其燃烧速度较快、燃烧稳定性较好。在混合燃烧过程中，低碳燃料的加入可以改变燃烧反应的动力学条件，促进燃烧反应的进行，减少不完全燃烧产生的污染物（如一氧化碳、颗粒物等）的排放。

3.3 采用燃料预处理与混合方法

传统的燃料输送和混合方式往往存在燃料分布不均匀、燃烧效率低等问题。本技术开发一套先进的燃料预处理与混合系统，能够对不同类型的低碳燃料进行精确的破碎、干燥和筛分处理，确保燃料的粒度、湿度等参数符合燃烧要求。同时，通过特殊的混合装置，将处理后的低碳燃料与煤炭按照精确的比例进行混合，使燃料在燃烧室内能够均匀分布，提高燃烧效率，常规制粉系统提供的粉温度约 60-80℃，通过预加热系统使煤粉温度提高至 140-160 摄氏度（煤粉气流的着火温度通常为 400℃ -600℃）。

2.4 采用智慧化燃烧控制系统

燃烧过程的控制是低碳掺烧技术的关键环节。本技术引入了智能燃烧控制系统，该系统基于先进的传感器技术和大数据分析算法，能够实时监测燃烧室内的温度、压力、氧气含量等参数，并根据这些参数的变化自动调整燃料的供给量、空气的配比以及燃烧器的运行状态。通过智能控制，可以实现燃烧过程的精准优化，快速响应锅炉燃烧工况，最大限度地提高燃料的燃烧效率，减少不完全燃烧产生的污染物排放，同时降低碳排放量。本技术采用协同脱硝与脱硫技术，将脱硝和脱硫装置进行一体化设计和优化。通过在燃烧过程中添加合适的催化剂和吸收剂，同时结合先进的烟气处理工艺，能够在脱硝和脱硫过程中实现协同作用，提高脱除效率，降低运行成本。此外，该技术还可以根据燃烧过程中产生的氮氧化物和二氧化硫的浓度变化，自动调整催化剂和吸收剂的用量，确保排放指标始终满足环保要求。

3 煤电机组低碳掺烧技术体系构建

3.1 煤电机组氢燃料掺烧技术

利用电网富裕电能，电解水制氢气进行储存，在锅炉燃烧室具备条件时进行掺烧。氢气具有高燃烧速度（2.83m/s）和宽可燃极限（4%-75%），在低负荷工况下可改善炉膛温度场分布。使用双通道燃烧器改造，采用氢气-煤粉分级喷入设计，避免氢燃速过高导致的火焰刷墙问题。采用动态氧量控制算法：通过 200+ 传感器实时调整空燃比，将 NOx 生成量控制在 30mg/Nm³ 以下^[1]。

3.2 氨燃料掺烧技术

利用电网富裕电能，电解水制氢气进行二次转化生成氨气，在锅炉燃烧室具备条件时进行掺烧。氨作为无碳燃料（燃烧产物 N₂ 和 H₂O），其掺烧技术受到广泛关注。氨燃

烧易生成 NOx（热力型 + 燃料型），采用“分级燃烧 + SCR 脱硝协同控制”技术，一级燃烧区：富燃料燃烧（过量空气系数 0.85）抑制 NOx 生成，二级还原区：喷入氨逃逸控制 < 2ppm 的还原剂，总脱硝效率达 98%。同时，采用 316L 不锈钢材质改造氨输送管道，耐蚀寿命延长至 8 年。

3.3 生物质与牛粪掺烧技术

生物质燃料具有高挥发分（> 70%）、低硫氮（< 0.5%）特性，但存在热值波动大（± 800kcal/kg）、易结渣等问题。通过“破碎 - 干燥 - 成型”预处理工艺，将牛粪制成直径 5cm 颗粒燃料，热值稳定至 2000kcal/kg，含杂率 < 5%。掺烧系统采用“独立给料 + 磨煤机改造”方案，单台 660MW 机组年掺烧 20 万吨牛粪，节约标煤 8.5 万吨。

4 风力电、光伏发电、火电、化学储能互相补给

随着我国电力生产形势的不断发展，能源结构转型成为迫在眉睫。风电、光伏发电装机规模及发电量占比持续提升。然而，可再生能源发电的间歇性和不稳定性问题依然存在，而火电作为传统能源，在灵活性改造后可为电力系统提供重要支撑。在此背景下，风力发电、光伏发电、火电与化学储能的互相补给技术应运而生，以满足不同地区的用电需求。

技术原理与优势，火电通过灵活性改造，煤电可从基荷电源向调节电源、备用电源转型。在新能源发电充足时，火电可降低出力，甚至停机备用，在新能源发电不足时，火电可迅速启动，提供稳定的电力输出。化学储能技术，化学储能技术是解决可再生能源发电间歇性问题的的重要手段。当前，化学储能技术呈现多元化发展趋势，包括锂离子电池、液流电池、钠离子电池等多种类型。这些储能技术各有优势，可满足不同场景下的储能需求。

风力发电 + 光伏发电互补与燃煤发电在电量富裕时的制氢、制氨进而应用，通常从晚上 23:00 到次日早晨 7:00，这是一天中电价的低谷时段。此时的电价可能低至每度电 0.1 元到 0.2 元。原因非常直观，绝大多数工厂停工，居民用电也降至最低。然而在风资源丰富的北方地区，夜间往往是大风时段，风机发电量较高。在电量富裕时段，风电、光伏发电出力远超负荷需求时，制氢、制氨成为一种有效的储能方式。利用可再生能源发电进行电解水制氢，可将电能转化为便于长期存储和运输的氢气。氢气不仅可以用于燃料电池发电，可进行锅炉掺烧氢气，替代燃料，还可作为化工原料，用于合成氨、甲醇等化学品，这些电能的产物储存加以销售，为企业带来较为可观的收益。可有效解决弃风问题，提升电能消纳能力^[2]。

5 利用新能源降低燃煤发电机组厂用电率

燃煤火电机组长期以来是国家能源供应的“压舱石”和“稳定器”。然而，随着“双碳”目标的深入推进，高碳

排放的燃煤机组必须寻求绿色、高效的转型之路。燃煤火电机组厂用电率，即电厂自身耗电量与发电量的比率，是衡量机组运行经济性的核心指标之一，尤其大型燃煤火电机组厂用电率约 4.16%，在低负荷调峰期间会更高，增大了燃煤火电机组的能源损耗。传统模式下，机组辅机（如引风机、送风机、给水泵、循环水泵等）的耗电是厂用电的绝对主体，其运行方式相对粗放，灵活性差。与此同时，风力发电与光伏发电具有清洁、零碳的特点，但其出力的间歇性、波动性和反调峰特性（光伏日间出力高峰与用电高峰部分重合，但夜间为零）给电网稳定带来了巨大压力。化学储能（以电化学储能为代表）则具有快速响应、精准控制的能力，是平滑波动、移峰填谷的理想手段。

利用新能源降低燃煤发电机组厂用电率技术的关键思路在于不再将火电、风电、光伏视为独立的电源点，而是将其与化学储能整合为一个“虚拟的整体电厂”。通过智慧化的协同控制策略，让风、光、储成为燃煤机组的“虚拟辅机”或“外部能量包”，直接或间接地减少机组辅机的能耗，从而系统性、创新性地降低整个能源供应单元的厂用电率。此技术的理论根基源于系统工程的“整体最优”原则，而非“局部最优”。其科学性体现在以下几个方面：

能量时空转移原理：化学储能是实现能量时空转移的核心。它可以将不可控、波动的风、光能量，转换为稳定、可控的电力输出。这不仅平滑了新能源出力，更为火电机组提供了一种“外部缓冲”，使其不必频繁调整出力来跟踪负荷变化，从而稳定运行在更经济的高效区间。

动力耦合理论：在物理层面，可以考虑将部分厂用电负荷（如厂区照明、部分循环水泵、脱硫系统的部分浆液循环泵等设备）由自发的风电、光伏直接供电，形成“自发自用”的微电网模式。这相当于用“零碳电”替代了“高碳电”，直接降低了厂用电量的绝对值。利用智慧化协调厂用电系统微电网最优控制理论：整个互补系统的“大脑”是一个高级算法控制中心（如 A-AGC）。它基于超短期风光功率预测、电网调度指令、机组实时运行状态和储能 SOC（state of charge，荷电状态），进行毫秒级至分钟级的优化计算，决策出最优的功率分配指令^[1]。

创新性技术方案与实践路径，作为一名从事电力生产的人员，我认为该技术的创新性并非空中楼阁，而是可落地、可操作的工程实践。

方案一：“储能平滑 + 火电调峰”间接降低厂用电率，
场景：风电场 / 光伏电站与燃煤电厂位于同一厂区或同一输电走廊，形成风光火储一体化基地。风电、光伏发出的波动性电力先经过储能系统进行平滑处理，形成一个稳定、可预测的“绿色电源包”。然后，这个“绿色电源包”与火电机组打捆，共同响应电网调度。降低厂用电率机理，火电机组不必再为了“削峰填谷”而频繁启停磨煤机、大幅调整风机、

凝泵转速等。机组可以维持在一个更平稳、更接近设计工况的高效负荷点运行。众所周知，辅机在额定工况附近效率最高，频繁变工况会导致额外能耗。机组运行平稳后，其自身的厂用电率会自然下降。储能在此扮演了“稳定器”角色，让火电“减负”。

方案二：“绿电直供厂用电”直接降低厂用电率，
在火电厂区内或邻近区域建设分布式风电和光伏，并配套建设小型储能系统。构建一个面向厂用电的“微电网”。优先使用风电和光伏电力供给厂内照明、空调、循环水系统、化学水处理等公用负荷。多余绿电可存入储能或上网；绿电不足时，由厂用电系统或储能补充。这是最直接、最显著的方式，原本需要从发电机端经过变压器、配电装置“取用”的电能，现在被自发自用的绿电所替代。厂用电量（分子）直接减少，而机组的上网电量（分母）不变甚至因运行更稳定而增加，厂用电率指标将得到极大改善。这相当于为电厂穿上了一件“绿色节能外套”。

方案三：“储能替代机组黑启动 / 辅机应急电源”提升系统经济性，
电厂需配置昂贵的柴油发电机作为黑启动电源和重要辅机的应急电源。利用大容量化学储能系统（如锂离子电池储能电站）替代传统的柴油发电机。虽然这不直接降低日常厂用电率，但从全生命周期成本看，储能系统在完成应急功能的同时，日常还可参与调峰调频服务，产生收益。其充放电效率远高于柴油发电，且维护成本低、无污染。这优化了电厂的资产结构，间接提升了整体经济性，为综合节能降耗提供了新思路。

6 结语

预期效益与总结展望，通过构建风 - 光 - 火 - 储多元互补系统，我们能够在三个层面上降低厂用电率：直接降低，绿电直供厂用电，减少厂用电量的绝对值。间接降低，稳定火电运行工况，提高辅机运行效率，减少变工况损耗。系统降低，提升整个能源基地的可靠性和经济性，减少非计划停运和启停损耗。这项技术具有很强的创新性，它打破了传统电源形式的壁垒，实现了跨能源类别的协同优化；其理论性建立在坚实的系统工程、控制理论和能源科学基础之上；其科学性则体现在通过可量化、可预测、可控制的手段，达成明确的节能降耗目标。

参考文献

- [1] 王丽, 张强, 李强. 火电厂厂用电节能改造技术研究[J]. 热能动力工程, 2019, 34(5): 1-6.
- [2] 赵兵, 王鑫, 孙宏斌. 智能电网背景下火力发电灵活性改造技术综述[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(10): 3105-3118.
- [3] 周孝信, 陈树勇, 鲁宗相. 电网和电网技术发展的回顾与展望: 试论三代电网[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(22): 1-11+25.

Discussion on the method of construction project management mode under the concept of green construction

Kun Xu

Shandong Xinxia New Building Materials Co., Ltd., Zaozhuang, Shandong, 277000, China

Abstract

During the construction of construction projects, in order to ensure the improvement of building efficiency, it is necessary to do a good job in project management. Among them, the concept of green construction is in line with the requirements of the sustainable development strategy of the construction industry. Embedding the concept of green construction into the management process of construction projects can innovate management methods and improve management quality, such as achieving efficient use of construction resources and protecting the surrounding environment of construction projects. Therefore, based on the analysis of the application value of green construction concept in construction project management, this paper further puts forward the specific mode and method of construction project management based on green construction concept, aiming at giving full play to the role of green construction concept and improving the quality and effectiveness of construction project management.

Keywords

construction project management ; green construction concept ; value function ; pattern method

绿色施工理念下的建筑工程管理模式方法探讨

徐锟

山东鑫厦新型建材有限公司, 中国 · 山东 枣庄 277000

摘 要

在建筑工程建设工作开展期间, 要想确保建筑效益水平的提高, 需做好工程管理工作。其中, 绿色施工理念符合建筑行业可持续发展战略要求, 将绿色施工理念嵌入建筑工程管理工作过程当中, 可创新管理模式方法, 提升管理质量成效, 比如达到高效利用建筑资源、保护建筑工程周边环境等作用。因此, 本文在分析绿色施工理念在建筑工程管理中的应用价值作用基础上, 进一步提出基于绿色施工理念的建筑工程管理具体模式方法, 旨在发挥绿色施工理念的作用, 提升建筑工程管理工作质量成效。

关键词

建筑工程管理; 绿色施工理念; 价值作用; 模式方法

1 引言

绿色施工理念, 是基于建筑行业在可持续发展战略指导条件下, 将环境保护当作核心, 采取科学管理及技术创新手段, 在工厂建设全生命周期中实现资源高效利用、污染最小化、生态保护与修复的综合性理念。在建筑工程管理工作开展期间, 渗透绿色施工理念, 可控制环境污染、减少资源浪费, 进而提升建筑工程管理效能。此外, 绿色施工理念实施条件下还能够倒逼建筑工程管理技术创新, 如采取建筑信息模型 (BIM) + 绿色施工管理技术、物联网管理技术等, 可有效提升建筑工程管理质量效果^[1]。鉴于此, 为发挥绿色施工理念的价值作用, 提升建筑工程管理工作综合效益水平, 本文有必要围绕“绿色施工理念下的建筑工程管理模式

方法”展开深入分析探讨。

2 绿色施工理念在建筑工程管理中的应用价值作用分析

2.1 有助于控制环境污染, 减少资源浪费

在建筑工程管理工作开展期间, 渗透绿色施工理念, 一方面, 通过自动喷淋系统、雾炮机等设备的自动配备, 同时落实覆盖防尘网、裸土绿化等措施, 能够使可吸入颗粒物 (PM10) 浓度有效降低。同时, 合理应用低噪声设备, 规范设置隔音屏障等, 能够使施工噪声得到有效控制。并且, 基于施工前期将生态敏感区划定好, 可以避免植被、水系受到破坏; 基于施工之后, 采取植被恢复措施, 通过本地物种种植、构建人工湿地, 可以起到生态保护的作用, 进一步使建筑工程施工期间的环境污染问题得到有效控制。另一方面, 合理利用 BIM 技术, 优化施工设计, 可以使得材料冗余有效减少^[2]。同时, 合理利用装配式建筑技术, 能够使预

【作者简介】徐锟 (1988–), 男, 中国山东枣庄人, 本科, 工程师, 从事建设工程研究。

制楼梯、叠合板等构件重复利用率提升,使木材、钢材消耗减少。并且在合理应用太阳能路灯、地源热泵等清洁能源的基础上,可以减少对化石能源的依赖;在施工机械方面,选用电动化设备,可以使碳排放减少。此外,通过雨水收集系统与中水回用装置的构建,应用到混凝土养护、车辆冲洗等环节,可以使市政供水使用量减少,实现水资源循环利用。

2.2 控制施工成本,提升工程管理效能

在建筑工程管理中,渗透绿色施工理念,通过合理利用建筑材料,并加强材料管理,比如在建筑垃圾分类回收之后,转化成再生骨料及透水砖等,可以使材料采购成本降低。同时,合理利用光伏发电等清洁能源,可以使建筑工程项目用电量有效节省,降低电费支出费用。规范应用中水回用系统,可以使施工成本得到有效控制^[3]。此外,绿色施工理念强调对施工人员的健康及安全保护,在改善施工环境、减少有害物质排放等基础上,可以使施工风险降低,使施工人员的安全生产得到有效保障,减少建筑工程管理质量问题及安全问题的发生,进一步提高建筑工程管理效能。所以,综合分析,建筑工程管理渗透绿色施工理念,可控制建筑工程施工成本,提升工程管理综合效能。

2.3 倒逼施工管理技术革新,实现全生命周期管理

基于绿色施工理念下,要想做好建筑工程管理工作,需革新施工管理技术。一方面,采取 BIM + 绿色施工技术,借助 BIM 模型对建筑工程施工过程进行模拟,可以使建筑材料用量优化、能源消耗减少、废弃物产生减少。比如,在建筑工程管线综合排布过程中,合理利用 BIM 技术,便可以使返工率及材料浪费率减少。利用物联网技术,在规范安装传感器设备的基础上,可实时监测噪声、温湿度、PM2.5 等环境数据,使降尘、降噪等设备自动触发,实现对各类设备的智能化管理^[4]。此外,引进应用数字孪生技术,构建建筑虚拟模型,对建筑工程施工管理运营阶段能耗进行模拟,可以使设计阶段绿色性能参数有效优化。借助区块链技术,还可以对建筑工程所需材料的生产、运输、施工全过程的碳排放数据进行详细记录,促进碳交易、碳中和目标的实现。所以,综合来看,建筑工程管理渗透绿色施工理念,可倒逼施工管理技术革新,并实现全生命周期管理目标。

3 绿色施工理念下的建筑工程管理具体模式方法分析

3.1 加强建筑工程绿色施工组织与资源管理

基于绿色施工理念条件下,为达到绿色环保、节能降耗的施工目标,建筑工程管理需注重绿色施工组织与资源管理的加强。

在组织管理方面,依托绿色施工理念,构建三级责任体系,强化建筑工程绿色施工管理目标协同。通过以项目经理为第一责任人的绿色施工领导小组的成立,统筹制定绿色施工目标,比如将材料损耗率、可再生能源利用率控制在规

定范围内,然后把目标分解到各部门与分包单位。同时,加强施工过程管控,将绿色施工专职管理员设置好,负责日常巡查、数据记录以及整改跟踪等工作。比如,利用 BIM 模型对施工流程进行模拟,将资源浪费环节预先识别出来,包括混凝土超耗、模板周转率偏低等问题,为施工方案的优化改进提供参考依据支持。此外,组织全员参与,通过绿色施工培训活动的开展,使施工人员的环保意识增强,做到规范操作,使违规操作行为减少,进而使施工资源浪费减少。

在资源管理方面,渗透绿色施工理念。其一,加强节材管理,落实“限额领料、循环利用”原则,结合施工进度情况,对材料采购计划进行动态调整,预防出现库存积压情况。期间,可制定并实施“材料消耗日报表”制度,对钢材、水泥等主材的使用量进行实时监控,使材料损耗率控制在定额的允许范围内。在循环利用方面,注重装配式建筑技术的引进、应用,使现场湿作业减少。期间,可利用预制楼梯、叠合板等构件,将建筑垃圾的产生大大减少。针对废旧模板,需在修复之后重复应用,使周转次数有效提高。其二,加强节水管理。采取雨水回收措施,即通过沉淀池、中水回用装置的规范设置,把收集的雨水用在混凝土养护及车辆冲洗等环节,减少对市政供水的依赖。并结合施工现场需求,对节水型水龙头、喷淋系统等规范安装,设置感应式开关实现智能控制,以此使用水量大大降低。其三,加强节能管理。重视清洁能源的应用,包括择优应用太阳能路灯、地源热泵等设备,使化石能源消耗减少。并通过电动化施工机械的应用,配套使用智能调度系统,使设备空转情况减少出现。比如,建筑工程施工使用的塔吊设备,可配合变频技术,使能耗有效降低。其四,加强节地管理。在合理利用 BIM 技术的基础上,对施工总平台进行科学规划,使临时用地占用减少。并在施工之后,对裸露土地进行绿化处理,可种植本地物种,恢复施工场地生态,以此达到生态修复、提升节地管理效能的作用。

3.2 加强建筑工程绿色施工环境管理

传统建筑工程管理工作开展期间,由于对施工现场环境管理不够重视,容易引发严重的环境污染问题,不利于建筑工程项目施工环保效益的提高。基于绿色施工理念条件下,为提升建筑工程施工管理综合效益,需加强绿色施工环境管理。

一方面,结合建筑工程项目实际情况,加强源头管控,使场地干扰、生态破坏得到有效减少。针对建筑工程采掘区域,采取边坡修复及土地复垦措施,种植符合当地土质的绿化树木与草地,使地质生态环境有效恢复。同时,对现场资源循环利用,如某建材企业参与的建材用石灰岩梯级综合利用项目,可利用废旧矿石生产砂石骨料,在循环利用施工现场资源的基础上,降低对周边生态环境的影响,基于源头减少废弃物的生产及排放。

另一方面,加强施工现场扬尘治理,针对砂石骨料车

间及混凝土搅拌站等区域,采取全密闭设计方案,配合使用负压除尘系统,确保粉尘通过袋式除尘器处理之后,利用规范排气筒进行排放处理,保证颗粒物排放浓度与当地“建材工业大气污染物排放标准”相符。采取动态抑尘措施,基于车间顶部将自动旋转水喷头规范设置好,运输道路需硬化处理,并配备数量充足的洒水车,保证喷淋覆盖100%。在爆破施工之前,对岩石进行洒水处理,并在钻孔凿岩环节配备湿式除尘设备,使粉尘堆放情况避免发生。还可以按照需求安装好PM10在线监测设备,将数据实时传输至生态环境部门,在超标情况下,对喷淋系统自动启动,以此有效防治扬尘污染。

此外,还需加强废水管理与噪声控制。在废水管理方面,采取雨污分流措施,对沉淀池规范设置,将初期雨水、车间冲洗废水收集好,在沉淀处理达标之后,应用到厂区抑尘环节,避免随意向外排放。对于生活污水,需通过化粪池处理之后,排入市政管网当中。并通过雨水回收系统,将回收处理后的水资源应用到消防、喷淋、混凝土养护等环节,使水资源梯级循环利用得到有效实现。在噪声控制方面,优先选用低噪声设备,并对施工场地合理布局,避免在夜间进行高噪声施工作业。基于施工专用道路两侧将隔音绿化带规范设置好,使施工噪声对周边环境的影响有效降低。

3.3 加强建筑工程绿色施工技术管理

在建筑工程管理工作开展期间,施工技术管理至关重要。在加强施工技术管理的基础上,才能够确保建筑工程施工技术落实到位,进而保证建筑工程施工质量及安全性。因此,基于绿色施工理念下,需加强建筑工程绿色施工技术管理。

首先,建筑工程管理引入绿色施工理念,在技术管理方面,需注重绿色施工创新技术的应用。基于装配式建筑与模块化施工环节,可使用预制构件,使现场湿作业减少,并使建筑垃圾产生量降低。并引进模块化卡扣拼接技术,对围挡、路面等临时设施进行重复应用,使资源消耗减少。其次,重视BIM技术与数字化技术的融合应用,可借助BIM技术优化施工方案,如通过碰撞检测,使管线冲突避免出现,进而减少材料冗余。在应用数字化技术的基础上,加强对施工场地的智慧管理,构建智慧工地平台,集成环境监测、设备

管理、人员调度等功能,对建筑工程项目施工过程进行全过程可视化管控。

以国内某地区建材企业为例,在参与的建筑工程项目施工管理工作开展期间,绿色施工技术管理环节,一方面,引进短流程低能耗工艺,即应用楼站式集成处理系统,实现从前端预处理到成品仓储的全流程智能化控制。尤其是在新型大产量低能耗锤式破碎机、RV制砂机和制砂楼站规范应用条件下,确保了系统高度集成,进而大大提高施工节能降耗效益水平。另一方面,通过BIM技术的引进、应用,对施工流程进行模拟,并优化材料用量,使施工冗余减少。期间,通过对建筑工程项目施工混凝土需求量进行准确计算,使超耗情况避免出现;在对模板周转方案进行合理优化的基础上,使模板周转次数大大提升。此外,通过智慧监管平台的构建,在集成环境监测、设备调度及人员管理功能的基础上,使施工能耗、扬尘、噪声等数据得到实时监控。当平台监测到某施工区域噪声超标情况下,系统会及时发出警报信号,并立即启动隔音屏障,以此确保现场施工噪声得到有效控制,进一步提升项目施工的环保效益。

4 结语

综上所述,绿色施工理念内涵丰富,在建筑工程管理中可发挥显著价值作用,比如控制环境污染、减少资源浪费、倒逼施工管理技术革新等。因此,有必要以绿色施工理念为导向,革新建筑工程管理模式方法,包括建筑工程绿色施工组织管理、资源管理、环境管理、技术管理模式方法的革新,以此充分发挥绿色施工理念的作用,提升建筑工程管理综合效益水平,进一步促进建筑工程绿色施工管理建设高质量、稳定可持续发展。

参考文献

- [1] 尚中山.绿色施工理念下的建筑工程管理模式探析[J].建材发展导向,2025,23(07):103-105.
- [2] 陈蓉.绿色施工理念下的建筑工程管理模式创新[J].建材发展导向,2024,22(17):87-89.
- [3] 方勇.绿色施工理念下的建筑工程管理模式研究[J].中国招标,2024,(08):165-167.
- [4] 兰戈阳.绿色施工理念下的建筑工程管理模式研究[J].全面腐蚀控制,2024,38(03):14-16.

Research on the Index of Wind Turbine Blade Transport Interchange on Highways in Gobi Region

Yanyun Chen Wangwang Guo

Gansu Provincial Transportation Planning Survey and Design Institute Co., Ltd., Lanzhou, Gansu, 730030, China

Abstract

In recent years, with the increasing global demand for clean energy, wind energy, as a sustainable and pollution-free form of energy, has attracted much attention for its development and utilization. The capacity of individual wind turbines has gradually increased to the megawatt level. At present, traditional highway interchange design mainly focuses on meeting the traffic needs of general vehicles, and there are insufficient considerations for the transportation of special large items such as wind turbine blades. In actual transportation, problems such as small turning radius of overpasses, limited net height, and insufficient bearing capacity often occur, resulting in transportation vehicles being unable to pass smoothly. This not only delays the construction period and increases transportation costs, but may also cause damage to wind turbine blades, affecting the overall efficiency of wind power projects. Therefore, it is of great practical significance to conduct in-depth research on the indicator selection of highway overpasses in the transportation of wind turbine blades in the Gobi region and optimize the design of overpasses.

Keywords

wind power transportation; High-speed interchange; Horizontal and vertical indicators; Hexi Gobi Desert;

戈壁区高速公路风电叶片运输立交指标的研究

陈彦运 郭旺旺

甘肃省交通规划勘察设计院股份有限公司, 中国·甘肃 兰州 730030

摘 要

近年来, 随着全球对清洁能源的需求日益增长, 风能作为一种可持续、无污染的能源形式, 其开发与利用备受关注。单体风机的容量已逐步提升至兆瓦级别。目前, 传统的高速公路立交设计主要侧重于满足一般车辆的通行需求, 对于风电叶片这类特殊大件运输的考量存在不足。在实际运输中, 常出现因立交转弯半径过小、净高受限、承载能力不足等问题, 导致运输车辆无法顺利通过, 不仅延误工期、增加运输成本, 还可能对风电叶片造成损坏, 影响风电项目的整体效益。因此, 深入研究戈壁区高速公路立交在风电叶片运输中的指标选择, 优化立交设计, 具有极其重要的现实意义。

关键词

风电运输; 高速立交; 平纵指标; 河西戈壁

1 引言

近年来, 随着全球对清洁能源的需求日益增长, 风能作为一种可持续、无污染的能源形式, 其开发与利用备受关注。单体风机的容量已逐步提升至兆瓦级别。与此同时, 用以配套的风力涡轮机叶片在尺寸上, 特别是长度和宽度方面, 亦展现出显著的增长趋势。在中国, 河西走廊、新疆准噶尔盆地周边以及内蒙古西部等戈壁区域, 由于其独特的地理环境, 人口稀少、基础设施相对薄弱, 高速公路立交作为区域交通网络的关键节点, 承载着风电叶片运输的重任, 其设计是否合理直接关系到风电叶片能否安全、高效地运抵风电场。

目前, 传统的高速公路立交设计主要侧重于满足一般车辆的通行需求, 对于风电叶片这类特殊大件运输的考量存在不足。在实际运输中, 常出现因立交转弯半径过小、净高受限、承载能力不足等问题, 导致运输车辆无法顺利通过, 不仅延误工期、增加运输成本, 还可能对风电叶片造成损坏, 影响风电项目的整体效益。因此, 深入研究戈壁区高速公路立交在风电叶片运输中的指标选择, 优化立交设计, 具有极其重要的现实意义^[1]。

一方面, 合理的立交指标选择能够保障风电叶片运输的安全性。通过精确计算转弯半径、优化线形设计, 可避免运输车辆在转弯时发生刮擦、倾覆等事故; 确保足够的净高, 防止叶片碰撞立交结构; 依据车辆荷载合理设计桥梁、路面承载能力, 杜绝路面塌陷、桥梁损坏等安全隐患, 切实保护运输人员生命财产安全以及风电叶片这一昂贵设备的完好。

另一方面, 有助于提高运输效率, 降低成本。适配的

【作者简介】陈彦运 (1990-), 男, 中国甘肃白银人, 本科, 工程师, 从事公路总体路线设计及互通式立交设计研究。

立交设计可减少运输途中的等待、绕行时间，使车辆快速、顺畅地通过立交节点，缩短运输周期，提高风电项目的建设进度；同时，降低车辆损耗、油耗以及人力成本，增强风电产业的市场竞争力，推动其可持续、规模化发展，为戈壁地区乃至全国的清洁能源产业注入源源不断的动力。

2 戈壁区风电产业发展与叶片运输需求分析

2.1 戈壁区风电产业发展现状

戈壁地区凭借其得天独厚的风力资源优势，已然成为我国风电产业发展的前沿阵地。以甘肃酒泉为例，其境内的瓜州、玉门等地被誉为“世界风库”，风能资源理论储量高达 2 亿千瓦，年有效风速时长超过 6000 小时，平均风速可达 6-8 米/秒，如此优越的条件吸引了大规模风电场的落户。截至目前，酒泉已建成 1 个千万千瓦级风电基地和 3 个百万千瓦级光电基地，新能源装机规模持续攀升，累计发电量达数千亿千瓦时，折合标准煤数千万吨，减排二氧化碳近亿吨，在全国地级市中位居前列，对优化能源结构、助力“双碳”目标实现发挥了关键作用^[2]。

2.2 风电叶片特性及运输挑战

风电叶片作为风力发电机组捕获风能的关键部件，具有鲜明的特性，这些特性在为风力发电带来高效转化的同时，也给予运输带来了重重困难，尤其在戈壁地区，运输挑战愈发严峻。

从风电叶片自身特性来看，其最显著的特点便是超长、超重。随着风电技术向大功率、大容量方向发展，叶片尺寸不断增大。常见的风电叶片长度多在 50-100 米之间，目前，玉门市艾朗风电科技发展有限公司生产的最大叶片生产型号为 6WM-94 米陆基风电叶片，但随着国内风电行业的发展，预计未来生产叶片最大可达 8MW-128 米陆基叶片。这种超长、超重的特性使得运输车辆的选型、道路承载能力以及路线规划都需精细考量，常规的运输车辆与道路条件难以满足要求。

风电叶片还具有柔性易损的特性。为了实现高效的风能捕获，叶片设计得较为轻薄，多采用复合材料制成，如玻璃纤维增强塑料（GRP）或碳纤维增强塑料（CFRP）。这些材料在保证叶片强度与轻量化的同时，也使其具有一定柔性，在运输过程中，受到震动、颠簸、碰撞时极易受损，一旦出现裂纹、破损，不仅维修成本高昂，还可能影响风电机组的整体性能与使用寿命^[3]。

3 戈壁区高速公路立交运输风电叶片的关键指标

3.1 运输车辆尺寸

根据玉门市艾朗风电科技发展有限公司提供的目前生产的叶片尺寸，现有后轮转向特种运输车辆外轮廓尺寸如下表：

根据风电科技发展有限公司提供的 128m 叶片预计研发

参数，支点间距取 70m，装车长度 137m，根据现有叶片运输参数，128m 叶片运输车后悬 60m，车板宽度为 3.2m。

车辆类型	支点长度（m）	车宽（m）	后悬（m）
83.5m 叶片运输车	45	3.2	45.5
93.5m 叶片运输车	50	3.2	50.5
99.5m 叶片运输车	53	3.2	53.5

3.2 立交匝道几何设计指标

平面线形指标是保障风电叶片运输车辆顺利通过高速公路立交的关键要素之一，其中圆曲线半径与缓和曲线长度起着决定性作用。圆曲线半径直接影响运输车辆的转弯能力。对于风电叶片运输车辆，由于其车身长度通常较长，且搭载的叶片具有超长、柔性等特点，在转弯时需要更大的空间。结合现有运输车辆参数，经与风电叶片运输车队的确认，叶片运输车 3 辆一组，每次 1~2 组，车辆上高速时需临时对立交进行交通管制，即叶片运输车辆所在匝道及其扫尾匝道均无其他车辆通行。考虑未来 128m 叶片的运输需求，匝道在叶片运输车辆通行时，硬路肩无临时停车等需要，临时利用硬路肩宽度。根据单向单车道 9m 宽匝道计算，需要匝道圆曲线半径不小于 178m。考虑到风电叶片不同的运输方向需求，立交匝道的曲线半径均按此半径选取，将造成较大浪费。因此针对单喇叭立交，主要通过路面加宽来解决大型风电叶片的运输需求，同时考虑尽可能为风电叶片运输车辆提供较好的通行宽度，车辆两侧预留侧向宽度为 1m^[4]。

3.2.1 立交匝道加宽值确定

经调查，风电叶片运输特种车辆为后轮导向型，匝道路基宽度加宽值考虑车辆通过时车辆内侧侵入宽度，车辆后悬叶片扫尾宽度不计入路面加宽，但需拆除扫尾范围内的树木等障碍，改移标志标牌等，运输车辆驶入立交时加强运营管理，避免人员、动物、对向来车等产生影响，确保运输安全。

道路圆曲线加宽按照下列公式计算：

$$\begin{aligned}\Delta b_1 &= b_0 - b \\ b_0 &= R_1 - R_0 \\ R_0 &= R_{S2} / \cos \theta \\ R_{S2} &= \cos \theta \times \left[L_0 \times \sin \theta + \sqrt{R_2^2 - (L_0 \times \cos \theta)^2} \right] - b \\ R_2 &= \sqrt{R_1^2 - L_1^2}\end{aligned}$$

式中：L₁—牵引车及前悬长度和（m）；

L₀—后轮转向车轴距（m）；

R₁—牵引车前悬最外侧轨迹圆半径（m）；

R₂—牵引车后轴最外侧轨迹圆半径（m）；

R₀—后轮转向车后轴最内侧轨迹圆半径（m）；

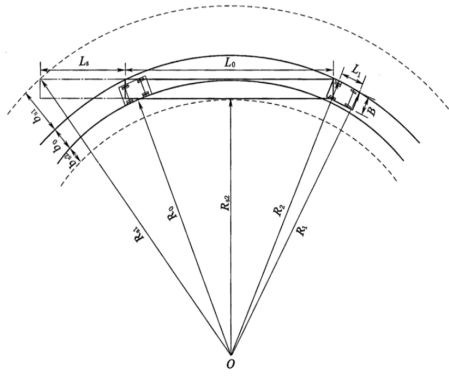
R_{S2}—后轮转向车车体最内侧轨迹圆半径（m）；

b₀—车辆通过最小路面宽（m）；

b—设计车宽（m）；

Δb₁—不考虑外侧扫尾、内侧侵占时的曲线加宽值（m）；

θ—后轮转向车调整角度，sin θ 不大于 L₀/(2R₂)；



后轮转向车运输时道路圆曲线加宽示意图

计算车辆参数:

b—设计车宽 (m)	Ls—后悬叶 片长度 (m)	L0—后轮转向 车轴距 (m)	L1—牵引车及前 悬长度和 (m)
3.2	61	70	6

具体加宽宽度根据立交匝道圆曲线半径计算确定, 收费广场超宽车道加宽值为 3.5m, 加宽后超宽车道为 8m 宽。

3.2.2 立交加速车道及渐变段长度确定

参考《互通式立体交叉设计原理与应用》(刘子剑著, 人民交通出版社, 2015.6), 若河西戈壁区高速公路设计速度为 100km/h, 匝道与主线合流需要的速度为 65km/h, 经与特种设备运输公司沟通, 特种设备车辆在匝道的运行速度为 10km/h, 车辆从 10km/h 加速到 65km/h 需要 20s。

$$V_t^2 - V_0^2 = 2as$$

$$V_t = V_0 + at$$

式中: V_t —末速度 (m/s);

V_0 —初始速度 (m/s);

a —加速度 (m/s²);

S —位移 (m);

t —从 V_0 加速到 V_t 需要的时间 (s);

加速车道计算长度取整为 208m, 考虑到本项目 8MW+128 米陆基叶片运输装车长度 137m, 因此加速车道长度取整 350m。渐变段长度 80m。

3.2.3 立交匝道纵断面核算

按照《风电场工程道路设计规范》(NB / T10209-2019)、《公路大件运输安全通行评价技术规范》(JTG/T 2213-2023), 曲线路段应符合下列规定: 大件运输通过凸形竖曲线路段时不应产生顶起失效, 通过凹形竖曲线路段时不应产生触头失效和托尾失效; 可根据车辆最小离地间隙、竖曲线

半径等参数评价凸形竖曲线路段顶起失效; 可根据车辆外廓尺寸、纵坡差、竖曲线半径等参数评价凹形竖曲线路段触头失效和托尾失效。

1) 最小凸型竖曲线半径确定

①运输车辆在凸形竖曲线行驶时, 挂车中心与凸形竖曲线中心重合出现“挂底”时, 为最不利条件, 最大支点间距为 70m, 根据特种设备运输公司对运输叶片的车辆实际情况, 车板距离地面 0.15~0.2m, 车板液压装置可抬高底板 0.15m。

按照不利情况核算, 两端支点及车板与地面距离做圆, 得出最小凸型竖曲线半径为 2041.82m。

②最小凸型竖曲线半径可按照下式计算:

$$R_{\min} = \frac{L_m^2}{8(b_0 - q_0)} + \frac{b_0 - q_0}{2}$$

式中: q_0 —低平板半挂车底部或货物最小离地距离;

L_m —车支点间最大距离或挂车上货物支点间最大距离;

R_0 —凸形竖曲线半径;

b_0 —低平板半挂车水平放置时车辆或货物底部正常离地距离, 按照不利情况取 0.3m;

经计算, 凸型竖曲线半径为 2041.82m 时可满足风电叶片运输车辆通行需要。

2) 最小凹型竖曲线半径确定

①假设承载后的半挂车主梁为一条直线, 多轴多轮液压悬挂挂车通过的竖曲线半径可按照下式计算:

$$R_p = \frac{L_0^2 + 4h_0^2}{8h_0}$$

R_p ——凸形竖曲线半径, m;

L_0 ——挂车主纵梁长度, 取 84m (牵引车及前悬 6m+ 支点间距 70m+ 挂车后悬 8m);

h_0 ——挂车悬架的安全伸缩量, 取 0.5m;

经计算, 凹型竖曲线半径最小值为 1764.25m。

4 工程案例选取

本研究选取甘肃 G30 连霍高速公路玉门互通立交作为典型案例, 深入剖析风电叶片运输过程中的实际情况。该风电项目位于玉门市, 目前生产的最大叶片生产型号为 6WM-94 米陆基风电叶片, 属于大型风电叶片范畴。其配套的高速公路立交作为连接风电场与外部交通网络的关键枢纽, 承担着繁重的叶片运输任务。

近年来, 随着风电市场的发展, 单体兆瓦增大, 随之配套叶片长度、宽度的增大, 该立交已无法满足风电叶片运输的需求。对玉门互通式立交的匝道 A、B、E 以及超宽收费车道的宽度进行改造, 加宽部分仅为了风电叶片运输车辆通行的需要, 匝道加宽部分不划分车道, 社会车辆正常通行

时,加宽部分禁止社会车辆驶入。加速车道均采用延长至350m,渐变段长度提一级采用90m,收费广场超宽车道加宽4m,将现有3.5米整车称更换为4.2米超宽轴组秤。调整玉门市高速收费站新疆方向匝道口导向牌的设置点和导向牌高度,砍除匝道C外侧叶片扫尾范围内树木,满足风电叶片运输的要求



同时对匝道可通行性进行了核算。设计中半径为60m、80m处内侧半径分别为47.75m、72.75m,计算得出所需车道宽度分别为4.38m、4.32m,所需空间宽度分别为9.71m、9.18m。

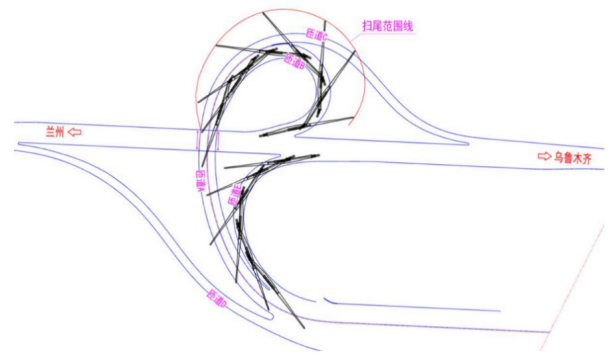
触头失效检验:经核查本项目匝道最大坡度差为3.7%,经计算 $\gamma_1=25.92^\circ > 2.1189=\arctan \Delta i$,满足通过要求。

拖尾失效检验:根据运输公司提供的经验,叶尖装车高度一般是理论值的45%-50%,最小离地2m+尾部车高1.2m=3.2m,考虑0.2m安全预留, γ_2 悬尾角为 2.815° ; α 为车辆最后端突出点处地面向后轮连线,连线AB与车辆或货物悬出部分之间的夹角,经计算为 1.747° 。 $\gamma_2=2.815 > \alpha=1.747^\circ$,故拖尾失效检验满足通过要求。

桥下净空损耗值检验:经核查下穿桥梁匝道竖曲线半径为2600m,经计算, $h_{损}=0.236m$,经核查玉门立交对向分隔匝道下穿G30连霍高速桥梁为30m装配式预应力混凝土箱梁,匝道与桥梁最小净空为5.613m,该处匝道为凹型竖曲线,竖曲线半径为2600m,考虑0.2m安全预留,对向匝道下穿位置运输车辆的最大高度为5.177m,满足风电叶片运输车辆通过要求。

基于6MW-94m、8MW+-128陆基叶片运输需求,项目团队对玉门互通式立交进行了针对性优化改造,并重新规划

运输方案。通过对各关键指标的精细调整,显著改善了运输状况,为后续类似项目提供了宝贵的实践经验。



5 结语

通过玉门风电项目配套高速公路立交的实证案例分析,有力验证了研究成果的有效性。改造优化后的立交,在运输效率上大幅提升,车辆通过弯道与路口的速度显著加快,运输耗时明显缩短;安全保障方面,因道路设施问题导致的事故发生率锐减,切实保护了人员与叶片安全;成本控制上,合理的车辆选型与高效运输降低了单次运输成本与综合成本,为风电企业带来可观经济效益。这些成果不仅为该项目的顺利推进提供了坚实支撑,更为戈壁区乃至类似复杂环境下的风电产业与交通基础设施协同发展提供了可复制、可推广的范例。

参考文献

- [1] 滕振楠,杨枫,唐协,等.雅西高速彝海至荣经路段风电叶片大件运输道路通行安全评价[J].四川水泥,2024,(12):222-225. DOI:10.20198/j.cnki.scsn.2024.12.010.
- [2] 朱丽,陈文业,谈嫣蓉,等.河西走廊荒漠戈壁风电产业发展优势与前景分析[J].甘肃林业科技,2023,48(03):60-63.
- [3] 陆燕宁,金亚伟,李羲,等.风电叶片用聚氨酯/玻璃纤维混合物热解特性研究[J].太阳能学报,2024,45(11):486-495. DOI:10.19912/j.0254-0096.tynxb.2023-1216.
- [4] 李梦涛.互通式立交平面相关指标的浅析[J].黑龙江交通科技,2020,43(06):87-88. DOI:10.16402/j.cnki.issn1008-3383.2020.06.049.

Research on intelligent detection and maintenance decision of runway in civil aviation airport flight area

Wanhua Lu

Xi'an Western Airport Group Construction Engineering Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi, 710000, China

Abstract

The airfield pavement of civil airports is a critical infrastructure that ensures the safety and efficiency of aviation operations, and its structural condition directly affects the smoothness of aircraft takeoffs and landings as well as the operational capacity of airports. With the continuous increase in flight volume, pavements are prone to cracks, raveling, and spalling under heavy loads and frequent use; if these distresses are not detected and addressed promptly, they will significantly increase operational risks and maintenance costs. Traditional manual inspections suffer from low efficiency, poor accuracy, and insufficient timeliness, making them inadequate for the safety management needs of modern airports. Intelligent detection technologies, with their advantages of high-precision sensing, rapid processing, and data integration, provide effective means for real-time monitoring of pavement conditions and accurate identification of distresses. By constructing pavement performance deterioration models based on detection data and integrating maintenance priority decision algorithms, scientific and refined maintenance management can be achieved.

Keywords

civil airport; airfield pavement; intelligent detection; performance evaluation; maintenance decision-making

民航机场飞行区道面智能检测与养护决策研究

芦万华

西部机场集团建设工程(西安)有限公司, 中国·陕西 西安 710000

摘要

民航机场飞行区道面是保障航空运行安全与效率的关键基础设施,其结构状态直接影响飞机起降的平顺性与机场运行能力。随着航班量持续增长,道面在高荷载与频繁使用下易出现裂缝、松散、剥落等病害,若不能及时发现与处置,将显著提升运行风险并增加养护成本。传统人工巡检存在效率低、精度差、时效性不足等问题,难以满足现代机场的安全管理需求。智能检测技术凭借高精度感知、快速处理和数据集成优势,为道面状态实时监测和病害精准识别提供了有效手段。基于检测数据构建道面性能退化模型,并结合养护优先级决策算法,可实现科学化、精细化的养护管理。

关键词

民航机场; 飞行区道面; 智能检测; 性能评估; 养护决策

1 引言

民航机场飞行区道面是承载航空器起降、滑行与停靠的重要基础设施,其运行状态直接决定机场安全保障能力与运营效率。在航班密度持续增加、机型逐渐大型化的背景下,道面结构长期承受高荷载循环与复杂气候环境的共同作用,出现裂缝、沉陷、脱空等病害的概率显著提升,给运行安全带来潜在隐患。现行以人工巡检为主的道面管理模式,存在检测周期长、漏检率高、诊断结果主观性强等问题,已难以满足安全运行的精细化管理需求。近年来,智能检测技术在交通基础设施领域快速发展,通过集成无损检测、图像识别与多源数据融合等手段,可实现道面结构状态的高效感

知与精准评估,为建立基于状态的养护决策体系奠定了数据基础。

2 民航机场飞行区道面运行现状与病害特征

2.1 飞行区道面结构构成与材料性能特征

民航机场飞行区道面通常由面层、基层、底基层和地基四部分组成,其中面层常采用沥青混凝土或水泥混凝土,具备较高的承载力与耐磨性,能够抵抗飞机轮载的高频冲击。基层多使用级配碎石或稳定粒料,承担分散荷载和传递应力的作用,要求具备良好的结构强度与稳定性。底基层主要起到隔水、防冻与承重缓冲的作用,多选用低渗透性材料增强整体耐久性。地基承托道面结构整体重量并抵御地基变形,应保持密实性和均匀性,以减少不均匀沉降的发生。不同层次材料的弹性模量、抗剪强度和抗冻胀性能直接影响结构整体的力学响应与服役寿命。

【作者简介】芦万华(1987-),男,中国甘肃武威人,本科,从事民航机场工程研究。

2.2 运行环境对道面力学性能的影响规律

飞行区道面长期处于复杂多变的运行环境中，其力学性能会受到气候、水文和载荷等多重因素的综合作用。高温环境会导致沥青类材料黏弹性下降，表面软化后易发生车辙与剪切变形，低温条件下则使水泥混凝土道面收缩增加裂缝风险。降水渗入基层和底基层后会引引起材料强度衰减，并在重复荷载作用下加速剥蚀与脱空病害的发展。冻融循环会使孔隙水结冰膨胀，引起微裂纹扩展和剥落，降低整体结构的抗冻稳定性。强风、沙尘和紫外辐射等环境因素也会逐渐破坏表层粘结性和抗老化性能，缩短服役寿命。在高频起降荷载的叠加作用下，环境应力会加速疲劳裂缝形成并导致力学性能衰退，进而影响道面的承载能力与运行安全，因而必须在养护管理中充分考虑环境作用的长期累积效应。

2.3 常见病害类型及分布演化特征分析

飞行区道面在长期运行中会出现多种病害，常见形式包括裂缝、松散、坑槽、车辙、板角断裂与接缝错台等，这些病害在空间分布和发展速度上呈现一定规律。裂缝主要沿轮迹带集中分布，初期为细微表裂，随后在荷载与环境耦合作用下向深层扩展，易形成结构性断裂。松散与坑槽多出现在沥青面层局部粘结失效区域，伴随细集料流失与水损破坏，分布呈斑块状。车辙则在频繁起降的滑行道和跑道中段更为集中，表现为沿行车方向的塑性变形槽痕。混凝土道面板角断裂与接缝错台常因地基不均匀沉降与板块翘曲导致，多集中在接缝附近，早期不易察觉，后期会显著影响平整性与承载性能。

3 智能检测技术在道面状态评估中的应用

3.1 基于无损检测技术的结构完整性诊断方法

无损检测技术在飞行区道面状态评估中可实现对内部结构性能的快速、精确诊断，避免传统破坏性检测对运行造成干扰。地质雷达可利用电磁波反射特性探测道面内部层间脱空、脱层与湿陷等隐性缺陷，通过反射信号的波速与幅值变化判断层厚与密实度。落锤式弯沉仪可测定道面的弯沉值，用于反演结构层的弹性模量与承载能力，识别疲劳损伤与强度劣化区域。超声波检测可通过声速衰减分析混凝土板内裂纹与孔隙发育状况，红外热成像能在早期识别表层微裂缝和粘结缺陷。多种无损检测手段的联合应用可实现道面结构状态的全深度诊断，形成连续分布的性能图谱，为性能评估与养护决策提供精确的数据支撑，并有效提升道面病害发现的时效性与覆盖率^[1]。

3.2 基于图像识别的表面病害快速识别技术

基于图像识别的检测方法通过高分辨率图像获取与自动特征分析，实现对道面表层病害的快速识别和量化评估。采用车辆搭载摄像系统可在正常运营状态下进行连续巡检，通过图像拼接与几何校正生成高精度表面影像数据。图像识别算法可利用纹理特征、边缘梯度和颜色信息提取裂

缝、坑槽等病害区域，结合形态学运算精确分割病害轮廓，实现自动测量长度、宽度与面积等几何参数。深度学习模型通过训练大量样本图像可提升识别精度，对光照、阴影和污染干扰具备较强鲁棒性，并可分类输出病害类型。与人工巡检相比，图像识别技术具有作业效率高、检测精度稳定、可实现全覆盖巡检的优势，能够显著缩短检测周期并减少主观误差，为道面表层状态的动态管理提供技术支撑。

3.3 多源数据融合的道面性能动态监测体系

多源数据融合的道面监测体系通过集成多种传感器和检测设备获取结构、表面与环境等多维度数据，实现对道面状态的动态感知与趋势预测。系统可将地质雷达、弯沉仪、加速度传感器、应变计与温湿度传感器等采集的数据进行时空匹配与特征关联，构建包含力学响应、病害演化与环境条件的综合数据库。数据融合算法可基于时间序列分析和关联建模识别结构性能变化规律，实时更新道面健康指数并预测潜在风险区域。通过无线传输与云平台存储，可实现远程监控与历史数据回溯，支持跨季节和全寿命周期的状态跟踪。该体系具备连续性强、响应快速与信息集成度高等优势，能够为养护计划编制与资源调度提供实时决策支持，并显著提升飞行区道面管理的科学化与主动性水平。

4 道面性能评估与养护决策模型构建

4.1 道面性能衰减机理与寿命预测模型建立

飞行区道面在高频荷载与环境耦合作用下呈现出明显的性能衰减规律，早期阶段弯沉值增长速率约为 0.02mm/万次，裂缝密度增加速率约为 0.15 条/m²·年，说明疲劳损伤在低循环荷载下已开始累积。中期阶段弯沉增长速率提升至 0.05mm/万次，裂缝密度增幅达到 0.35 条/m²·年，表层材料模量下降幅度约为 18%，承载能力降低约 12%。后期阶段损伤迅速扩展，弯沉值年增幅超过 0.1mm，裂缝密度突破 1.2 条/m²，板角断裂频率提升至 0.3 处/百米，道面剩余寿命低于 5 年。通过拟合性能指标随时间变化的双曲线衰减模型，可实现剩余寿命的定量预测，并结合累计损伤理论修正疲劳寿命曲线，使寿命预测误差控制在 10% 以内，为科学安排养护时机提供可靠依据。

4.2 基于状态评估的分级养护策略优化

道面状态评估结果可量化为综合性能指数 PCI，通过对不同状态等级的道面实施差异化养护可显著提高资源利用率。实测数据显示，PCI 大于 85 的优良道面占比为 46%，仅需表层封层等轻度养护，单位面积费用约为 28 元/m²，恢复周期在 3 天以内；PCI 介于 60 至 85 的中等道面占比为 34%，需局部铣刨与加铺处理，费用约为 135 元/m²，恢复周期约 7 天；PCI 低于 60 的劣化道面占比为 20%，需实施结构性重建，费用超过 420 元/m²，恢复周期超过 20 天。通过线性规划模型将养护等级与 PCI 阈值动态关联，可使整体 PCI 提升幅度达到 22%，单位面积费用降低 18%，施

工影响时间缩短 30% 以上, 实现养护投入与运行保障的平衡优化^[2]。

4.3 养护优先级排序与资源配置决策算法

在有限资金和工期约束下, 需构建基于多指标的养护优先级排序模型, 将 PCI、弯沉、交通量和病害增长率等指标综合纳入决策。模型采用层次分析法确定权重, PCI 权重为 0.35, 弯沉为 0.25, 交通量为 0.2, 病害增长率为 0.2, 计算出道面综合风险指数 RI。对 50 段道面评估结果显示, RI 大于 0.75 的段落有 12 段, 需在 6 个月内优先养护; RI 介于 0.5 至 0.75 的段落有 21 段, 可安排在 1 年内实施; RI 低于 0.5 的段落有 17 段, 可延后安排日常巡养。结合整数规划算法进行资金约束下的资源配置优化, 可在不增加预算的情况下, 将高风险段落处治完成率提高至 92%, 养护投资回报率提升约 27%, 实现资金利用的最优分配与风险控制的同时达成。

5 智能检测与养护决策一体化管理平台构建

5.1 道面状态数据采集、传输与管理体系设计

一体化平台以多源传感终端为前端, 实现结构、表面与环境等多类数据的高效采集。地质雷达、弯沉仪、高清成像系统和气象传感器同步布设于检测车辆与固定监测点, 通过 5G 网络实时传输数据至中心服务器, 单次巡检可覆盖道面面积超过 15 万 m²。平台采用分布式数据库存储结构, 将原始检测数据、处理结果与历史档案统一管理, 支持按时间、位置与类型的多维检索。数据在上传过程中通过加密传输与校验机制保障完整性与安全性, 处理模块基于标准化接口实现与第三方系统互联。体系设计支持 TB 级数据的高并发访问与分钟级更新频率, 为后续性能评估、养护建模与趋势预测提供高质量数据基础。

5.2 检测结果与养护计划的协同联动机制

平台将检测结果与养护计划管理模块深度集成, 建立状态评估—策略生成—任务执行的闭环联动机制。状态评估模块实时更新 PCI、弯沉值和病害图谱, 并与历史曲线比识别劣化趋势, 达到设定阈值后自动触发养护需求。策略生成模块依据道面等级、交通量与工期限制, 匹配轻度养护、结构性修复等标准工法库, 输出工程量清单与施工周期。计划管理模块根据资源可用性与航班运行窗口自动编排施工计划, 实现施工与运行的无缝衔接^[3]。各环节数据在平台内

双向同步, 养护结果反向修正性能数据库, 形成动态优化机制, 显著减少计划滞后与重复施工问题, 提升道面养护管理的协调性与执行效率。

5.3 平台运行流程与决策闭环反馈机制

平台运行遵循数据采集、分析评估、策略生成、计划执行与效果反馈的闭环流程, 通过任务流引擎实现全过程自动化调度。检测数据进入分析模块后生成性能评价报告, 系统根据预设规则自动生成养护任务并推送至施工部门, 任务执行过程中的进度、资源消耗与质量数据实时回传平台。效果评估模块对比养护前后 PCI、弯沉与平整度等关键指标, 若改善幅度未达设定阈值则自动启动原因分析与方案修正流程, 形成自适应优化能力。平台内置绩效考核与成本核算模块, 将工期偏差控制在 10% 以内, 预算执行偏差控制在 8% 以内, 实现计划执行与资金管理同步受控。闭环反馈机制保证管理流程持续优化, 推动飞行区道面管理从经验式向数据驱动型转变^[4]。

6 结语

民航机场飞行区道面作为保障航空运输安全与运行效率的重要基础设施, 其运行状态直接关系到机场整体保障能力与运营效益。面对航班量持续增长、道面老化加速与维护资源紧张等多重挑战, 构建基于智能检测的道面状态评估体系, 并融合性能退化建模、分级养护策略与资源优化配置算法, 已成为提升养护科学化与精细化水平的必然路径。通过建设集数据采集、状态分析、计划生成与闭环反馈于一体的综合管理平台, 可实现道面全寿命周期的动态监控与决策支持, 显著提高病害处置的及时性和养护资源的使用效益。该研究为机场管理部门制定科学合理的道面养护计划提供了理论依据与技术支撑, 对保障航空运行安全、延长设施服役寿命和降低维护成本具有重要的现实意义与推广价值。

参考文献

- [1] 邢晓彤, 王长久. 民航机场飞行区班组安全管理水平评价指标体系研究[J]. 民航学报, 2022, 6(S1): 77-79+43.
- [2] 蒿培培. 民航机场飞行区改扩建工程不停航施工实例分析[J]. 民航学报, 2022, 6(02): 14-17+80.
- [3] 涂夏明, 姚倩. 机场飞行区雨水排放与综合利用的应用研究[J]. 山西建筑, 2021, 47(04): 101-103.
- [4] 管晓炜. 机场飞行区工程关键节点施工测量方法和不停航施工组织实施研究[D]. 导师: 罗德安; 梁松. 北京建筑大学, 2020.

Study on coordinating land and sea to promote regional coordinated development in Yantai City

Ying Sun Jikuan Wang

Yantai City Planning and Design Institute, Yantai, Shandong, 264000, China

Abstract

Situated at the core of the Bohai Economic Rim, Yantai City combines marine and terrestrial resources to serve as a national model for integrated land-sea development and regional coordination. In recent years, Yantai has actively pursued land-sea integration through port-industry synergy, technological innovation, and ecological conservation, while exploring innovations in spatial planning, industrial collaboration, and joint ecological governance. This study systematically examines Yantai's policy framework, foundational conditions, and development achievements in land-sea coordination, while analyzing institutional barriers, industrial innovation bottlenecks, and environmental protection challenges. Recommendations include optimizing spatial governance, enhancing innovation-driven strategies, promoting industrial chain integration, and improving ecological compensation mechanisms. The research demonstrates that Yantai's integrated land-sea approach has effectively optimized resource allocation, accelerated industrial upgrading, and strengthened regional collaboration, offering valuable insights for coastal cities nationwide seeking coordinated development.

Keywords

Land-sea coordination; Regional development; Yantai City; Industrial collaboration; Ecological governance

烟台市以陆海统筹助力区域协调发展研究

孙颖 王纪宽

烟台市规划设计院, 中国 · 山东 烟台 264000

摘 要

烟台市地处环渤海经济圈枢纽, 兼具海洋与陆域资源优势, 是我国陆海统筹与区域协调发展的典型样本。近年来, 烟台紧扣国家区域发展战略, 依托港产联动、科技创新和生态文明建设, 积极推进陆海一体化, 探索空间规划、产业协同、生态共治等领域创新。本文系统梳理烟台陆海统筹的政策体系、基础条件和发展成效, 深入剖析体制机制、产业创新、环境保护等瓶颈, 提出了优化空间治理、强化创新驱动、推动产业链融合和完善生态补偿等对策。研究表明, 烟台陆海统筹有效优化了资源配置, 促进了产业升级和区域协同, 对全国沿海城市推动一体化、高质量发展具有重要借鉴意义。

关键词

陆海统筹; 区域协调发展; 烟台市; 产业协同; 生态共治

1 引言

环渤海经济圈作为中国沿海经济带的重要组成部分, 在国家现代化建设格局中承担着连接东北亚、支撑京津冀、带动山东半岛、辐射黄河流域等多重战略任务。烟台市凭借优越的地理区位、广阔的海域和腹地空间、丰富的海陆资源禀赋以及深厚的产业基础, 成为推进区域协调发展和陆海统筹的重要战略支点。随着“一带一路”、黄河流域生态保护和高质量发展、京津冀协同发展等国家重大战略的纵深推进, 烟台正不断拓展陆海协同发展新路径, 加快推动空间治理、产业融合、生态文明和创新驱动的深度融合。陆海统

筹不仅关乎资源与空间的优化配置, 更是实现高水平开放、推动产业升级、实现区域一体化协同发展的核心抓手。如何发挥陆海资源优势、健全体制机制、激发创新动能、实现生态和谐、推进全域高质量发展, 是摆在烟台市及环渤海沿海地区面前的重要课题。本文基于烟台陆海统筹的现实基础和政策背景, 系统总结其典型经验与存在问题, 提出系统性对策建议, 力图为全国陆海一体化和区域协调发展提供有益借鉴。

2 烟台市陆海统筹发展的基础条件与优势

2.1 区位交通和空间禀赋优势

烟台市地处山东半岛东北端, 面向黄渤海, 背靠鲁中腹地, 兼具陆海交通枢纽、东西南北贯通的区位优势。烟台拥有千里海岸线, 涵盖多个优质深水港湾, 是我国少数兼具

【作者简介】孙颖（1990-），女，中国山东威海人，本科，工程师，从事国土空间规划、建筑设计研究。

良港资源和腹地纵深的城市之一。海港、铁路、公路和航空网络纵横交错,构建起现代立体综合交通格局。烟台港作为国家一类开放口岸,依托国际物流大通道和东北亚航线网络,已成为环渤海区域的重要门户港和枢纽港,大宗原材料和集装箱业务不断拓展。优越的区位和发达的交通网络,为陆海统筹和区域要素流动提供了坚实基础,支撑着产业集聚、人口吸纳和对外开放水平的全面提升。

2.2 海陆资源与产业基础优势

烟台兼具丰富的海洋与陆地资源。海域内拥有丰富的渔业资源、油气资源、滨海旅游和海洋牧场等多元资源,海洋渔业产值和产量均居全省前列,水产品加工业、出口创汇能力突出。陆域方面,烟台制造业基础雄厚,高端装备、汽车、化工、新材料、电子信息等产业集群发展成熟,形成了门类齐全、链条完整的工业体系。近年来,烟台着力打造港产城一体化新模式,海洋装备、船舶制造、海工高端装备、生物医药、海洋新能源等新兴产业加快培育,陆海产业联动日益紧密,产业链延伸和协同效应不断增强,为全市经济高质量发展注入了强劲动力。

2.3 港产城一体化和创新平台优势

在空间和产业组织模式上,烟台依托港口为引擎,统筹推进港产城一体化,布局港口物流、仓储加工、装备制造、现代服务业等多元产业功能区。港口腹地配套基础设施完善,工业园区与现代物流园、保税区、综合保税区实现无缝衔接,促进了贸易便利化和要素高效集聚。烟台还注重创新平台建设,积极引进国内外高校院所、科研团队和龙头企业,建设海洋技术创新中心、重点实验室和产学研孵化载体,推进科技成果转化和协同创新,提升了区域创新能力和科技引领水平。

3 陆海统筹推动区域协调发展的成效与困境

3.1 空间治理与基础设施互联成效

近年来,烟台大力推进国土空间规划与港产城功能一体化,科学划定生态保护红线、城镇开发边界和产业用地功能区,逐步实现了空间开发的集约高效和生态安全。交通基础设施持续完善,多式联运体系初步建立,港口与铁路、公路、航空联动高效,物流效率大幅提升。烟台港集装箱、液体散货等业务规模不断扩大,国际航线网络不断完善,对环渤海腹地和东北亚地区的辐射带动作用明显增强。空间治理的优化促进了沿海与内陆、港区与产业园区、中心城区与新城镇的协同联动,提升了城市综合承载和区域整体竞争力。

3.2 产业协同与创新驱动成果

陆海统筹为烟台产业升级与创新融合提供了新动能。海洋经济和陆域制造业深度融合,海工装备、海洋生物医药、新能源、新材料等新兴产业集群快速壮大,产业链上下游分工协作更加紧密。烟台依托科创平台推动科研成果产业化,积极发展高技术服务业和科技型中小企业,加快“研发一制

造一应用”全链条协同,带动潍坊、淄博等周边城市共同培育区域创新生态圈。多元化、网络化的产业集群和创新资源要素流动,使烟台逐步从传统制造型港口城市向高端智造和创新引领型城市转型,区域综合竞争力持续提升。

3.3 生态环境保护与陆海共治进展

烟台高度重视海洋与陆域生态环境保护,坚持“陆海统筹、山海河湾一体治理”的理念,深入实施蓝色海湾整治、滨海湿地修复、入海污染治理等重点工程。城市污水和工业废水达标排放率不断提高,河流污染治理和生态补偿机制逐步完善。岸线保护、滩涂恢复、海洋生态修复等取得阶段性成果,滨海生态系统服务功能显著提升。绿色低碳发展理念全面融入城市规划、产业建设和生态治理全过程,海洋生态安全底线逐步筑牢,为可持续发展提供了坚实的生态基础。然而,部分地区空间规划与生态红线管理仍有待协同,陆源污染压力尚未根本缓解,生态修复投入与科技手段需进一步加强。

4 烟台陆海统筹发展面临的主要问题

4.1 空间治理和体制机制协同难题

随着烟台市陆海统筹战略的纵深推进,空间开发利用中体制机制的掣肘日益凸显。首先,部门间职能划分依然固化,相关政策多头制定、相互独立,导致国土空间规划、产业用地布局、港口岸线开发、生态红线管理等体系之间衔接不畅,形成“政出多门”、效率低下的治理现象。实际操作中,“多规合一”虽已成为顶层设计目标,但在落实到基层和具体项目时,常常因利益分割、信息壁垒及审批流程繁琐,出现空间治理碎片化和责任分散的问题。例如,重大基础设施与产业项目落地过程中,常面临空间选址与功能区划的冲突、审批协调环节的反复拉锯,导致项目推进周期拉长、资源配置效率降低。此外,现行空间治理的刚性执行机制尚未健全,缺乏动态调整和风险应对能力,难以适应新一轮陆海统筹下多元利益主体、复杂空间格局和发展诉求的变化。空间开发的整体统筹、利益协调、协同治理等体制机制创新亟待加强,成为制约烟台市陆海统筹战略高质量落地的重要瓶颈。

4.2 产业创新能力与协同不足

在陆海统筹推进中,产业创新与协同发展问题同样突出。尽管烟台在高端制造、海洋装备、电子信息等领域具备较强产业基础,并建设了多个创新平台和研发载体,但产业链上下游协同创新体系仍未形成闭环。海洋新兴产业的核心技术自主研发能力偏弱,高端装备制造、海洋生物医药等领域对外部技术和关键零部件依赖度高,科技成果向本地企业的转化率不高,限制了产业能级提升和创新链延伸。区域创新资源配置不均衡,产学研用深度融合程度有限,协同创新生态尚不完善。部分科技型中小企业创新能力薄弱,难以实现技术突破和模式创新,龙头企业对产业链的带动和引领作

用亦有待增强。与此同时,创新政策支持、资金投入和人才保障等配套机制仍不健全,限制了烟台产业协同创新的持续活力和系统集成能力。如何加快产业链核心环节自主创新,提升全链条协同水平,打通科技成果“最后一公里”,是烟台陆海统筹产业升级与区域高质量发展的关键课题。

4.3 生态共治压力与陆源污染挑战

烟台在推进陆海统筹的过程中,生态环境保护压力日益加重,陆源污染治理任务艰巨。近年来,部分沿海工业集聚区与生态红线保护区空间重叠,城市扩张、产业用地与滨海生态修复存在竞争关系,生态空间被挤压,环境承载力趋于饱和。港口开发和城市建设过程中,陆源污染物大量排入海洋,部分流域水质达标率不高,污水处理能力和再生利用水平与实际需求存在差距。生态补偿、污染防治、应急治理等多部门协同机制尚不完善,存在管理边界不清、责任分工模糊等问题,难以形成“山海河湾”一体化治理格局。此外,海洋生态系统修复与生态服务功能提升投入不足,受技术、资金和管理手段制约,生物多样性保护、岸线生态修复等工作推进缓慢。气候变化叠加污染物排放加剧了海域生态系统的脆弱性和不稳定性,对烟台实现可持续发展的生态安全构成长期挑战。为此,亟需统筹提升生态环境管理水平,强化陆海联防联控和生态共治能力,加快推进绿色低碳转型和生态安全屏障建设,夯实陆海统筹下的高质量发展生态根基。

5 烟台市推进陆海统筹发展的对策与建议

5.1 健全空间治理与规划统筹体系

烟台需加快建立陆海空间一体化的国土空间治理体系,推进多规合一、功能区统筹和差异化开发。要科学划定城镇开发边界、生态红线和产业功能区,强化港口与腹地、中心城区与新城、滨海与内陆的空间联动。完善重大项目空间落地和动态调整机制,提升空间利用效率。健全部门联动与信息共享平台,增强跨部门、跨区域空间治理的系统性和协同性。加大国土空间生态修复和滨海湿地保护力度,推动城市更新、绿色空间建设和海洋生态屏障一体化提升,促进生产、生活和生态空间协同优化。

5.2 强化科技创新驱动与产业链深度融合

烟台应依托现有科创平台,打造“产学研用”一体化陆海科技创新体系,围绕海洋装备制造、生命健康、智能制造、新能源等领域,聚焦关键核心技术攻关,提升自主创新

能力。完善科技成果转化链条,加快创新资源向龙头企业和中小企业集聚,形成以企业为主体、市场为导向、产学研深度融合的技术创新网络。深化与环渤海、鲁东等区域创新平台合作,推动创新链、产业链、资金链和人才链高效协同。支持港口物流与腹地产业、海洋与陆地制造业、滨海旅游与服务业等领域协同创新,构建多层次、全链条、智能化的产业协同体系。

5.3 深化生态环境共治与绿色低碳发展

烟台需持续推进山海河湾一体化生态治理,完善陆源污染防治、岸线保护和海洋生态修复等重点任务。加快实施污水全收集全处理、流域治理与湿地修复等系统工程,提升城市和乡村环境治理能力。推动绿色制造和循环经济发展,推广低碳、节能、环保新技术,完善生态补偿、环境治理和应急联动机制,提升生态灾害防范与恢复能力。加强与黄河流域、环渤海等跨区域生态保护协作,打造陆海一体的生态安全屏障,推动绿色低碳理念融入城市治理、产业发展和社会生活各领域,为高质量可持续发展构筑坚实基础。

6 结语

烟台市作为国家陆海统筹和区域协调发展的排头兵,通过完善空间治理机制、强化创新驱动和产业协同、深化生态共治,积极构建多元一体、协同高效的发展格局。实践证明,陆海统筹不仅优化了资源要素配置,促进了产业转型升级,也为区域高质量协同发展提供了强劲动力。未来,烟台应进一步提升体制机制创新能力,加强与环渤海、黄河流域、东北亚等区域合作,完善跨区域陆海一体化治理与协同创新机制,推动形成可持续、高水平开放和高质量发展的新格局。烟台的探索和经验,为中国沿海地区全面落实陆海统筹战略、实现区域协调发展目标提供了重要借鉴和理论参考。

参考文献

- [1] 徐鲁豪.基于陆海统筹的滨海城市海岸带生态修复研究——以烟台市海岸带生态修复为例[C]//中国城市规划学会,成都市人民政府.面向高质量发展的空间治理——2020中国城市规划年会论文集(08城市生态规划).中国城市规划设计研究院深圳分院,2021:946-956.
- [2] 汤振怡.强化陆海统筹源头防控数智监管助力打造美丽中国渤海实践样板[J].环境保护,2024,52(Z2):16-19.
- [3] 刘林哲,朱庆林,岳奇,等.基于陆海统筹的我国海岸带空间规划指标体系研究[J].海洋湖沼通报,2022,44(05):128-135.

A Case Study on the Energy-saving Retrofit of a Lithium Bromide Air Conditioning System in a Large Shopping Mall

Xiujie Zhao

COFCO Jianyuan Food Technology (Beijing) Co., Ltd., Beijing, 102209, China

Abstract

This article conducts a systematic study on an energy-saving renovation case of the central air conditioning system of a large commercial building. The case involves replacing an existing lithium bromide absorption air conditioning system with an electric refrigeration compression air conditioning system, along with comprehensive energy-saving renovations to the distribution system and control system. This article primarily analyzes the preparation ideas for the technological plan during the renovation process, as well as the comprehensive effects and energy-saving benefits before and after the renovation. By comparing the operating parameters, energy consumption data, and maintenance costs before and after the renovation, it evaluates the differences between the two air conditioning systems in terms of cooling efficiency, operational stability, ease of maintenance, and environmental impact. The air conditioning effect in the shopping mall was completely improved, and customer and merchant satisfaction reached an all-time high. The coefficient of performance (COP) of a single unit increased from about 0.75 to 6.2, an increase of approximately 727%; the comprehensive energy efficiency ratio (EER) of the energy station rose from 0.5 to 4.8, an increase of about 860%. In terms of energy consumption, the annual electricity usage decreased from about 12 million kWh before the renovation to 10.8 million kWh, achieving a power saving rate of about 10%. According to the project's self-evaluation report, the EER of the renovated system stabilized between 4.8 and 5.2, resulting in annual energy cost savings of approximately 3.08 million yuan and a reduction in carbon dioxide emissions of about 1,670 tons per year, with the overall effect exceeding the research objectives.

Keywords

lithium bromide air conditioning system; energy-saving renovation; energy efficiency improvement.

某大型购物中心溴化锂空调系统的节能改造案例研究

赵秀杰

中粮健源食品科技（北京）有限公司，中国·北京 102209

摘 要

本文对某大型商业建筑的中央空调系统的一项节能改造案例进行了系统性研究，案例将既有溴化锂吸收式空调系统改为电制冷压缩式空调系统，并对输配系统、控制系统做了综合节能改造，本文主要分析了改造过程中的技术方案的编制思路及改造前后的综合效果和节能效益，通过对比改造前后的运行参数、能耗数据和维护成本，评估了两种空调系统在制冷效率、运行稳定性、运维便利性及环境影响等方面的差异。结果显示，改造后，商场空调效果彻底改善，客户和商户满意度达到历史最高，单机制冷性能系数（COP）由原来的约0.75提升至6.2，效率提高约727%；能源站综合能效比（EER）由0.5提升至4.8，增幅约860%。在能耗方面，全年用电量由改造前的约1200万千瓦时降至1080万千瓦时，节电率约10%。根据项目自评价报告，改造后的系统EER稳定在4.8–5.2之间，年节约能源费用约308万元，二氧化碳年减排量约1670吨，整体效果超过可研目标，不仅改善了室内舒适性，也实现了节能减排与经济效益的双重提升。此外，改造还实现了手动控制到自动控制，为物业管理带来了长期的便利。此研究为类似大型公共建筑项目在既有建筑节能改造提升方面提供了成功的案例参考和探索经验。

关键词

溴化锂空调系统；节能改造；能效提升；智能控制；全过程管理

1 引言

大型购物中心空调系统是商业经营必不可少的系统，

总能源成本约占运营成本的 30%-50%，空调能源成本占总能源成本的 30-50%，空调系统好坏影响顾客和商户体验，也决定着运维能源成本。在国务院 2035 年碳达峰、2050 年碳中和双碳目标下，对大型商业购物中心的能源与控制系统进行升级，不仅具有节能降耗、体验提升的经营价值，更具有推动绿色低碳转型的社会价值。溴化锂吸收式中央空调因其可

【作者简介】赵秀杰（1980–），男，中国山东临朐人，硕士，工程师，从事能源应用与改造，空调采暖工程等研究。

采用废热余热制冷制热,在国内大型公共建筑中一度曾有广泛的应用,但由于吸收是空调系统物理原理决定,需要真空运行,对设备制造和安装要求很高,往往在使用过程中存在真空保持困难,效率衰减严重,制冷效果不佳和维护复杂等问题,难以满足现代商业建筑舒适性与节能性的双重高标准要求。电制冷压缩式系统,尤其是电驱动变频离心机组、变频螺杆机组在设备效率、运维简便、制冷效果稳定 and 智能控制效率方面具备系统性优势,成为既有建筑溴化锂空调系统节能改造的重要方向。国内某大型商场项目溴化锂中央空调系统已运营 8 年,性能衰减严重,笔者主持了该项目空调系统的节能改造,改造过程采用系统化思维,通过深入测量调查,制定了合理的改造目标和系统化改造方案。改造目标为空调效果提升兼顾节能运行和运维自动化升级。改造方案为:将原溴化锂系统更换为高效电制冷空调系统;对空调输配系统进行了系统的改造提升;引入了智能能耗监测与控制平台。

改造完成后该项目实现了空调效果、冷站性能和管理便利三大提升,空调效果良好,能源费用大幅节降,控制系统实现了自动化运行,减碳社会效益显著,为类似大型商业建筑节能改造提供了成功的案例参考。

2 项目案例概述

研究案例为国内某大型商场,建筑面积 24 万平米,商业面积 13.5 万平米,开业时间为 2014 年 5 月,已运行 10 年,空调系统为溴化锂吸收式中央空调系统,冬季供热,夏季供冷,装机容量 21102KW,共有 4 台 1500TR 的溴化锂燃气直燃机组和 4 台 120KW 冷冻泵、4 台 160kW 冷却泵、4 台冷却塔组成,因溴化锂系统运营管理复杂,改造前 4 台直燃机组 2 台发生故障不能正常使用,由剩余 2 台直燃机组供冷供热,供冷期间期间夏季空调效果不佳,室内高楼层最高 30℃以上,已严重影响商场正常运营。

3 技术原理

3.1 冷热源系统原理

目前商业建筑中央空调常用的系统按物理原理可分为溴化锂吸收式制冷和电制冷两类系统,溴化锂吸收式制冷系统利用水作为制冷剂、溴化锂溶液作为吸收剂:发生器加热溴化锂溶液使水蒸发,蒸气在冷凝器冷却成液态水,经节流进入蒸发器吸热气化,将蒸发器内空调水制冷,产生的水蒸气被吸收器内的溴化锂溶液吸收,稀溶液循环回发生器,通过换热器提高系统效率,循环往复,实现连续制冷。

而电制冷压缩式系统是通过电力驱动压缩机使冷媒发生相变进行制冷循环,即压缩机将蒸发器中低温低压的气体冷媒压缩为高温高压气体,经冷凝器散热液化,热量经冷却塔通过冷却水排到室外。冷媒再经过节流装置在蒸发器蒸发为气体,蒸发过程中大量吸热,使冷冻水降温,完成制冷循环,具体原理如图 2 所示。

两种制冷方式的物理原理决定了电制冷系统在冷媒效率、能源利用率、管理复杂性方面对比溴化锂吸收式系统均具有明显的优势^[1]。

3.2 控制系统原理

目前空调系统的控制主要有两种:PLC 控制和 DDC 控制。

PLC (Programmable Logic Controller 可编程逻辑控制器)是一种以逻辑运算为核心功能的工业控制系统,一般通过开关量及少部分模拟量信号实现设备的启停、状态检测及逻辑联锁等功能,PLC 根据设计好的控制程序对输入信号进行逻辑判断,并输出相应的控制指令。PLC 控制结构稳定、抗干扰性强,逻辑运算可靠性高,能够很好地完成设备的启、停、顺序控制及联锁保护等功能,但 PLC 系统需要现场编程操作,实施过程不够简单直观,运营维护不够方便。

DDC (直接数字控制系统)直接通过现场传感器参数采集(如机组的温压流量等)数据,在控制模块内与设定参数数值进行计算比较,通过算法计算出控制指令,再通过控制器驱动元件(如阀门、变频器)完成控制(如阀门调节),完成精确地反馈控制。DDC 暖通控制设备模块化程度高、与通信集成度高、安装测试操作方便,广泛应用于暖通楼宇控制系统中,可方便实现系统 EER、单机 COP 等数据计算、自动记录与远程控制功能,相比 PLC 系统,更适合暖通空调系统改造。

4 改造过程和效果

4.1 改造前现状调查分析

改造项目团队邀请了具有丰富行业经验的建筑节能咨询专家团队对购物中心进行了空调系统的实况调研,包括机房设备、控制系统运作和日常运行维护等相关情况。调研工作采取多点、多次的量化测量,对空调水的流量、水温、水压、水阀开度和能耗等关键指标进行分点、分时段检测和持续监测。调研发现部分水泵、传感器和水阀出现故障,现场建设期安装的自力式水力平衡设备和通风设备对稳定系统的运作产生了负面影响^[2]。团队也充分调研了历史运行相关数据,以便在改造方案设计时可以基于科学的量化资料作出针对性改造方案。

4.2 改造方案制定

经系统调查并结合历史运营数据分析,该项目存在以下问题:1. 原溴化锂直燃机组老化性能衰减明显、制冷效率低,年均耗气量大、运行费用高,冷站综合性能系数及水泵输配系数较差;2. 群控 BA 系统瘫痪仅依靠人工操作,无法依据负荷变化实现自动调节;3. 冷却水泵选型偏大且为定频导致水力系统失衡输配效率差;4. 空调水系统中的自力式动态平衡阀及风柜回风机功能冗余增加了末端多余的阻力;5. 末端传感器、执行器、控制器缺漏及损坏致使数据采集困难;6. 表计设置不合理,无法取得合理数据等特点。改造方

案就针对以上问题分别从冷源、输配、末端、控制上进行系统的改造,实现舒适、高效、智能、简便的改造目标^[3]。具体改造方案如下:

(1) 制冷系统改造: a. 对建筑重新建模进行空调负荷计算并绘制负荷延续图(图4所示),确定了合理的装机容量; b. 将2台1500TR溴化锂吸收式制冷机组,替换为2台1200TR制冷效率更高的离心式电制冷机组(选型如图5所示); c. 重新计算校准冷冻水和冷却水流量扬程,替换原有空调冷冻泵、冷却泵; d. 加装冷却塔水力平衡器,新增智能布水喷嘴; e. 加装能量计量表具。

(2) 空调末端与控制系统改造: a. 拆除原有空调机组上的二级回风机; 2. 移除水系统自力式平衡阀; b. 安装部分电动风阀、电动水阀; c. 群控系统PLC系统改造为DDC控制系统,升级原有已瘫痪的DDC楼宇BA控制控制系统。

(3) 系统调试优化: 针对改造后的整套空调冷热源系统、输配系统、散热系统、风系统进行单机调试和系统联调及舒适度调适^[4]。

(4) 能源管理系统(EMS)

构建能管平台,对冷站总用电量、总制冷量、总耗电量,冷站综合COP、单机cop、水泵、冷却塔输配系数进行计算和管理,对运行参数和能耗数据进行记录。

改造团队组织专业设计单位根据上述改造方案编制了施工图纸和工程量清单及其他设计文件实现了工程量招标。施工单位进场后,项目团队克服设备运输、拆装及系统改造过程中的各种困难,完成了各项改造,并配套完成了能源管理平台的部署。经过主机、风、水、控制、能源管理系统系统化调试后,新电制冷空调系统已经过2个制冷季整体运行稳定,各项参数符合设计要求。本文在完成了改造成工作并经过2个完整的制冷季实际运行后,对改造前后的运行情况进行了对比分析,验证了改造成效和节能优化与智能化升级的实际效果^[5]。

4.3 改造前后效果对比

该项目空调系统系统化改造后,在空调效果上,室内空调效果达到了国内规范要求,夏热时各楼层温度不超过26℃,冬寒时各楼层温度不低于20℃,室内舒适度大幅改善,室内舒适度大幅提升,从根本上解决了原空调系统制冷效果不足问题,能满足大型活动及运动业态的舒适需求,客户舒适度明显提升,改造后商场商户及顾客对于室内环境满意度提升幅度创历史新高,且商场整体租赁率、客流量较改造前均有显著提升,保障了商场正常的商业运营及招商业务的开展;在能效方面,电制冷主机取代直燃机组后,系统实现了负荷自适应的变频控制,系统综合能效比(EER)高于项目可研预期,在4.8~5.2,对比改造前0.7的水平,提升较大,节能效果显著;能耗方面,通过对冷水机组、水泵、冷却塔水力平衡以及智能布水系统的节能改造,降低风阻、降低水阻,

改造后全年可节能节约308万元,节省标准煤约407.5吨,减排二氧化碳约1670吨,实现了显著的经济效益和社会效益;从管理便利性方面,项目改造前为物业手动管理运行,改造完善了群控系统和BA系统,搭建了能源管理平台,实现了空调主设备运行参数、末端舒适状态和能耗能效数据在线自动化管理,实现了该项目暖通系统管理的数智化转型;成本控制方面,因方案合理,施工管控高效,项目结算实投较立项预算低10%,节能收益显著,计算总和投资回收期2.98年^[6]。

5 结语

既有建筑节能改造不是单纯的工程技术改造,更是对管理理念和项目实施体系的综合提升,本文对某商业综合体的空调系统做了冷热源、输配系统、散热系统、空调风系统、群控和BA系统做了系统性节能改造,搭建了能源管理系统。改造团队通过科学的前期策划,合理的方案设计,高效的施工及精细的调试优化管理,取得了空调效果提升达到规范要求、冷站综合能效系数(EER)4.8以上,运行管理实现数智化三大成果,改造当年实现燃气成本节降308万元,案例入选国资委2024年度深化改革成果小微案例。本改造项目通过DDC空调楼宇控制系统的改造和能效能源管理平台的建设实现了该既有购物中心暖通空调系统运行参数的可视、可控、可调、可存,构建了本项目的建筑设备参数和能效能效数据库,为将来的数据分析、数据治理、人工智能应用等奠定了数据基础。在实现国家2035碳达峰2050碳中和“双碳目标”和当下全面推进城市更新的大背景下,本案例的改造实践将既有建筑节能改造和智慧建筑能源管理做了有机结合,取得了显著的经济效益和社会效益,对商业综合体建筑节能改造和能耗管理具有较大的推广和示范价值。未来既有建筑节能改造必将以系统化、智慧化为主要方向,以技术手段和管理提升融合为绿色节能和经济效益统一的核心理念目标,促进建筑节能行业高质量发展。

参考文献

- [1] 潘尤贵,高晴,林鑫.杭州某大型商业综合体空调设计[J].暖通空调,2023,53(11):87-91.
- [2] 李燕开.大型商业综合体空调系统设计研究探讨[J].智能建筑与工程机械,2024,6(6):120-122.
- [3] 尤洪涛.大型购物中心暖通空调安装工艺质量控制研究[J].设备管理与维修,2024(2):158-160.
- [4] 李增财.大型商业综合体暖通空调节能设计要点——以上海市泗泾地铁站某项目为例[J].空中美语,2023(8):1007-1009.
- [5] 李海余.商业综合体暖通空调改造设计研究[J].地产,2023(5):0033-0036.
- [6] 葛虹,黄磊.大型商业综合体通风空调设计心得[J].暖通空调,2023,53(S01):65-67.

Study on performance optimization and adaptive control of dynamic damper based on physical information neural network (PINN)

Weiping Song

Harbin Electric Science and Technology Co., Ltd., Harbin, Heilongjiang, 150000, China

Abstract

To address the limitations of traditional dynamic vibration dampers—such as low modeling accuracy, poor optimization efficiency, and weak adaptability—a novel “Model-Optimize-Control” integrated solution combining Physically Informed Neural Networks (PINNs) is proposed. First, a multi-physics constrained PINN model incorporating material nonlinearities and contact nonlinearities is constructed. A hierarchical loss function balances data and physical information, enabling high-precision modeling of nonlinear damper systems with minimal data (hundreds of samples) and prediction errors $\leq 5\%$. Second, a dynamic precision-adjusting PINN-NSGA-III multi-objective optimization framework reduces damper optimization cycles from 7-10 days to 1-2 days, achieving global optimization of vibration suppression rate, bandwidth, and robustness. Finally, “Structured Pruning + Knowledge Distillation” achieves PINN lightweighting (60% parameter reduction, prediction time ≤ 5 ms), combined with Model Predictive Control (MPC) for adaptive control strategy design. Validation on a cantilever beam test bench demonstrates improved vibration suppression rate to 45.2%, 32.1% effective bandwidth expansion, and performance degradation controlled within 8.7% under parameter fluctuations, meeting stringent vibration control requirements for high-end equipment like aero-engines and ultra-precision machine tools.

Keywords

dynamic damper; physiologically informed neural network; performance optimization; adaptive control; multi-objective optimization

基于物理信息神经网络（PINN）动力吸振器性能优化与自适应控制研究

宋为平

哈尔滨电气科学技术有限公司，中国·黑龙江 哈尔滨 150000

摘 要

针对传统动力吸振器建模精度低、优化效率差、自适应能力弱的瓶颈，提出一种融合物理信息神经网络（PINN）的“建模 - 优化 - 控制”一体化解决方案。首先，构建含材料非线性与接触非线性的多物理约束 PINN 模型，通过分层损失函数平衡数据与物理信息，实现少数据（百级样本）下非线性吸振系统的高精度建模（预测误差 $\leq 5\%$ ）；其次，提出动态精度调整的 PINN-NSGA-III 多目标优化框架，将吸振器优化周期从 7~10 天缩短至 1~2 天，实现振动抑制率、带宽与鲁棒性的全局最优；最后，采用“结构化剪枝 + 知识蒸馏”实现 PINN 轻量化（参数减少 60%，预测耗时 ≤ 5 ms），结合模型预测控制（MPC）设计自适应控制策略。基于悬臂梁实验台的验证表明，优化后的吸振器振动抑制率提升至 45.2%，有效带宽扩展 32.1%，参数波动下性能衰减率控制在 8.7% 以内，满足航空发动机、超精密机床等高端装备的宽工况振动控制需求。

关键词

动力吸振器；物理信息神经网络；性能优化；自适应控制；多目标优化

1 引言

动力吸振器作为抑制结构振动的核心装置，广泛应用于航空航天、精密制造、土木工程等领域 [1]。在航空发动机转子系统中，高速运转（10000-30000 r/min）产生的不平衡振动易导致轴承磨损与叶片疲劳；超精密机床（定位精度

$\leq 1 \mu\text{m}$ ）加工时，切削力激励引发的振动直接影响加工精度；大跨度桥梁在风荷载与交通荷载耦合作用下，传统调谐质量阻尼器（TMD）因参数固定难以应对宽频随机激励 [2]。

传统动力吸振器设计存在三大局限：① 建模精度低，依赖线性化动力学模型，忽略材料非线性（如阻尼老化）与接触非线性（如碰撞阻尼），预测误差常超 15% [3]；② 优化效率差，多目标优化（振动抑制率、带宽、鲁棒性）依赖“仿真 - 实验”迭代，单次周期长达 7~10 天 [4]；③ 自适应能力弱，被动吸振器参数固定，半主动控制（如 Skyhook 算法）

【作者简介】宋为平（1988-），男，中国黑龙江人，硕士，高级工程师，从事电力设备力学完整性分析研究。

依赖预设规则，无法适配动态工况 [5]。

数据驱动模型（如 CNN、LSTM）虽能提升精度，但需万级以上标注数据，实验成本高昂（如航空发动机振动实验单次超 10 万元）[6]。物理信息神经网络（PINN）通过将物理守恒定律嵌入损失函数，实现“物理先验 + 数据信息”融合建模，在少数据、强约束问题中展现显著优势 [7]。目前，PINN 在振动控制中多聚焦单一环节（如响应预测），尚未形成“建模 - 优化 - 控制”全流程方案 [8-9]。

本文提出基于 PINN 的动力吸振器一体化方案：① 构建多物理约束 PINN 模型，提升非线性系统建模精度；② 融合 PINN 与 NSGA-III 实现高效多目标优化；③ 开发轻量化 PINN 与自适应控制策略，满足实时控制需求。

2 核心方法

2.1 非线性吸振系统的 PINN 高精度建模

2.1.1 多物理约束构建

针对含磁流变阻尼的多自由度吸振系统，建立耦合非线性动力学方程：

$$M\ddot{x} + C(\dot{x}) + K(T)x = F_{MR}(\dot{x}, I) + F_{exc}(t)$$

其中， M 为质量矩阵， $C(\dot{x})$ 为含 Hertz 碰撞模型的非线性阻尼矩阵， $K(T)$ 为温度依赖刚度矩阵（基于 Bingham 流体本构关系）， $F_{exc}(t)$ 为激励力， F_{MR} 为磁流变阻尼力（与速度 \dot{x} 、电流 I 相关）。

将全局方程拆解为局部约束：① 转子截面动力学平衡（二阶常微分方程，ODE）；② 磁流变阻尼力 - 速度关联（代数约束）；③ 刚度 - 温度动态关系（一阶 ODE），形成 PINN 可嵌入的约束集。

2.1.2 分层损失函数设计

构建“数据 - 物理 - 边界”三层损失函数，平衡多源信息：

$$L_{total} = L_{data} + \lambda_1 L_{phy} + \lambda_2 L_{bdy}$$

其中：数据拟合损失 L_{data} ：最小化 PINN 预测位移 \hat{x} 与实验数据 x_{exp} 的均方误差，确保模型贴合实际；

物理约束损失 L_{phy} ：计算局部微分方程残差的 L2 范数，强制模型遵循物理规律；

边界损失 L_{bdy} ：约束初始条件（ $\hat{x}(0) = x_0, \hat{\dot{x}}(0) = v_0$ ）与固定端位移边界（ $\hat{x}(x=0, t) = 0$ ），避免“物理不合理”解。

采用梯度贡献度自适应权重调整 λ_1 、 λ_2 ：若物理约束残差过大，自动增大 λ_1 ；若边界条件不满足，提升 λ_2 ，确保训练收敛。

2.2 PINN-NSGA-III 多目标优化框架

2.2.1 优化目标与变量

以“振动抑制率 η （主系统振幅降低率）最大化、有效带宽 Δf （吸振有效频率范围）最大化、参数波动下性能衰减率 δ （质量 / 刚度 $\pm 10\%$ 时性能变化）最小化”为目标，优化变量为吸振器质量 m （0.1~5 kg）、刚度 k （ $10^3 \sim 10^5$ N/m）、

磁流变阻尼器初始阻尼 c （1~100 N·s/m），优化函数为：

$$\min J = -\eta, \Delta f, \delta \quad s.t. \quad m \in [0.1, 5], k \in [10^3, 10^5], c \in [1, 100]$$

2.2.2 动态精度优化策略

将 PINN 作为性能预测器替代传统有限元仿真，提出“探索 - 利用”分阶段优化：

1. 探索阶段：采用低精度 PINN（3 层隐藏层，50 神经元 / 层）快速筛选参数空间，保留 50% 潜在最优解，降低计算成本；

2. 利用阶段：切换至高精度 PINN（5 层隐藏层，80 神经元 / 层），对潜在解精细化评估，确保优化精度；

3. 置信度反馈机制：通过 PINN 预测方差量化置信度，低置信度（方差 > 5%）样本补充 10% 实验数据修正，避免预测偏差导致优化失效。

该框架将优化周期从传统方法的 7~10 天缩短至 1~2 天，且 Pareto 最优解的全局覆盖率提升 28%。

2.3 轻量化 PINN 与自适应控制

2.3.1 PINN 轻量化实现

采用“结构化剪枝 + 知识蒸馏”融合方案，平衡精度与实时性：

1. 结构化剪枝：通过 L1 正则化识别冗余神经元与网络层，移除梯度贡献度 < 5% 的通道，参数减少 60%；

2. 知识蒸馏：以高精度 PINN 为“教师模型”，训练轻量化“学生模型”（3 层隐藏层，40 神经元 / 层），通过温度缩放（ $T=5$ ）迁移预测知识，确保轻量化后模型精度损失 $\leq 3\%$ 。

最终实现轻量化 PINN 单次预测耗时 ≤ 5 ms，满足实时控制（周期 ≤ 10 ms）需求。

2.3.2 自适应控制策略

结合模型预测控制（MPC）设计闭环控制策略，流程如下：

1. 状态感知：通过 1 kHz 加速度传感器（PCB 352C33，量程 ± 50 g）与 $0.1 \mu m$ 位移传感器（Keyence GT2-Pro）采集系统状态 $x(t), \dot{x}(t)$ ；

2. 响应预测：轻量化 PINN 预测未来 0.1 s 内振动响应，识别激励频率变化趋势（如航空发动机转子转速波动）；

3. 控制决策：MPC 以“最小化未来振动振幅”为目标，在 0.05 s 控制时域内求解最优磁流变阻尼电流 I ；

4. 温度补偿：引入温度 - 阻尼关联模型 $C(T) = c_0(1 - \alpha_T(T - T_0))$ 抵消高温（280℃）下阻尼性能衰减（衰减率 < 15%）。

3 实验验证与结果分析

3.1 实验平台搭建

基于悬臂梁实验台验证（图 1）：主系统质量 4.5 kg，固有频率 10~50 Hz；吸振器为磁流变半主动式，质量 0.5~2 kg；数据采集频率 1 kHz，实验工况覆盖激励频率 10~30

Hz（模拟航空发动机转子与机床振动频段）、振幅 0.1~10 mm。

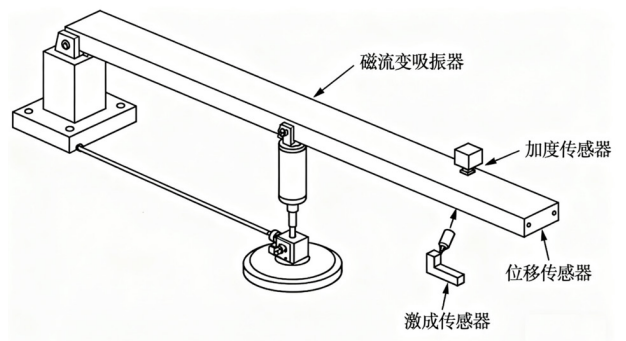


图 1 悬臂梁吸振实验平台（1 – 悬臂梁；2 – 磁流变吸振器；3 – 加速度传感器；4 – 位移传感器；5 – 激振器）

3.2 建模精度验证

对比 PINN 模型与传统线性模型、纯 LSTM 模型的预测误差（表 1）。结果显示，PINN 在少数数据（300 组样本）下预测误差仅 4.8%，较线性模型（16.2%）与 LSTM（9.5%）分别降低 69.1% 与 49.5%，验证了多物理约束对建模精度的提升作用。

表 1 不同模型建模精度对比

模型类型	训练样本量	预测误差 (%)	泛化误差（变频率工况, %）
线性化模型	300	16.2	22.5
纯 LSTM 模型	300	9.5	15.8
本文 PINN 模型	300	4.8	7.2

3.3 优化与控制性能验证

优化后吸振器与传统 TMD 的性能对比（表 2）显示：

1. 振动抑制率从 32.1% 提升至 45.2%，增幅 40.8%，有效降低主系统振动幅值；
2. 有效带宽从 12.5 Hz 扩展至 16.5 Hz，提升 32.1%，适配宽频激励场景；
3. 参数波动下衰减率从 18.3% 降至 8.7%，鲁棒性显著增强；
4. 控制响应时间 ≤ 8 ms，较传统 Skyhook 算法（25 ms）提升 68%，在变频率激励（10~30 Hz）下振动振幅标准差降低 52%。

4 结论

本文提出基于 PINN 的动力吸振器“建模 - 优化 - 控制”一体化方法，主要成果如下：

1. 构建的多物理约束 PINN 模型，在少数数据（300 组样本）下实现非线性吸振系统高精度建模，预测误差 $\leq 5\%$ ，较传统模型精度提升显著；
2. PINN-NSGA-III 优化框架将优化周期缩短 70% 以上，实现振动抑制率、带宽与鲁棒性的全局最优，Pareto 解覆盖率提升 28%；
3. 轻量化 PINN 与自适应控制策略满足实时控制需求（响应时间 ≤ 8 ms），优化后吸振器振动抑制率提升 40.8%，有效带宽扩展 32.1%，鲁棒性显著增强。
4. 该方法为航空发动机转子、超精密机床等高端装备的宽工况振动控制提供了新路径，未来可进一步探索 PINN 在多自由度强非线性吸振系统中的应用。

表 2 吸振器性能对比结果

性能指标	传统 TMD 吸振器	本文优化吸振器	性能提升率 (%)
振动抑制率 (%)	32.1	45.2	40.8
有效吸振带宽 (Hz)	12.5	16.5	32.1
参数波动下性能衰减率 (%)	18.3	8.7	52.5(降幅)
控制响应时间 (ms)	-	8	-

参考文献

[1] Den Hartog J P. Mechanical Vibrations[M]. New York: McGraw-Hill, 1956.

[2] 王建军, 李玩幽. 旋转机械转子系统振动控制研究进展 [J]. 机械工程学报, 2022, 58 (12): 1-20.

[3] Li X, Zhang L, Wang Y. Multi-objective optimization of nonlinear energy sink based on BP neural network[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2022, 167: 108586.

[4] Raissi M, Perdikaris P, Karniadakis G E. Physics-informed neural networks for solving forward and inverse problems involving nonlinear PDEs[J]. Journal of Computational Physics, 2019, 378: 686-707.

[5] Wang H, Chen Z, Liu G. Physics-informed neural networks for dynamic response prediction of rotor systems[J]. Aerospace Science and Technology, 2021, 118: 107089.

[6] Kim S, Park J, Lee J. PINN-based vibration control of cantilever beams[J]. Smart Materials and Structures, 2023, 32(4): 045023.

[7] 清华大学智能装备团队. 基于 PINN 的机床振动预测与控制 [J]. 机械工程学报, 2022, 58 (8): 35-43.

[8] Chen C, Liu H, Zhang Y. Real-time vibration control of aerospace structures using lightweight PINN[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2024, 71(3): 2890-2899.

Research on the energy efficiency improvement strategies of electrostatic precipitators based on load characteristics.

Gang Shao Jiancheng Yan Jin Li Renxian Wu

Zhejiang Energy Lanxi Power Generation Co., Ltd., Jinhua, Zhejiang, 321110, China

Abstract

To address the energy efficiency imbalance problem caused by load fluctuations in electrostatic precipitators in industrial scenarios, this paper focuses on the coupling relationship between the load characteristics of the electrostatic precipitator and its energy efficiency. Through experimental testing and data modeling, it analyzes the impact of load parameters (dust concentration, particle size distribution, air flow speed) on dust removal efficiency and energy consumption under different working conditions. Based on the classification of load characteristics, a hierarchical energy efficiency enhancement strategy is proposed, encompassing “dynamic power supply adjustment - partitioned electric field optimization - coordinated control”. Verified in industrial sites, this strategy can reduce the operating energy consumption of electrostatic precipitators by 18%-23%, while maintaining dust removal efficiency above 99.5%, providing technical support for energy-saving renovations of industrial flue gas purification systems.

Keywords

Electrostatic precipitator; Load characteristics; Energy efficiency improvement; Dynamic adjustment; Coordinated control

基于负载特性的电除尘器能效提升策略研究

邵罡 严建成 李进 伍人先

浙能兰溪发电责任有限公司, 中国·浙江 金华 321110

摘要

为解决工业场景下电除尘器因负载波动导致的能效失衡问题, 本文以电除尘器负载特性与能效的耦合关系为核心, 通过实验测试与数据建模, 分析不同工况下负载参数(粉尘浓度、粒径分布、气流速度)对除尘效率与能耗的影响规律。基于负载特性分类, 提出“动态供电调节-分区电场优化-协同控制”的分层能效提升策略, 经工业现场验证, 该策略可使电除尘器运行能耗降低18%-23%, 除尘效率稳定维持在99.5%以上, 为工业烟气净化系统的节能改造提供技术支撑。

关键词

电除尘器; 负载特性; 能效提升; 动态调节; 协同控制

1 引言

电除尘器作为工业烟气除尘的核心设备, 广泛应用于电力、钢铁、水泥等行业, 其运行能效直接影响企业环保达标与能耗成本。当前, 多数电除尘器采用固定参数运行模式, 而工业生产过程中, 烟量、粉尘浓度、粉尘粒径等负载参数常随生产工况波动(如电力行业机组负荷变化、钢铁行业高炉出铁周期), 导致设备长期处于“高能耗低效率”或“低能耗不达标”的失衡状态。现有研究多聚焦于电除尘器结构优化(如极板间距、极线形式)或单一参数调节(如供电电压), 缺乏对负载特性动态变化的系统性响应机制。据《中国工业节能发展报告(2024)》统计, 工业电除尘器平均运

行能耗较理论最优值高 25%-30%, 负载波动是导致能效损失的首要因素。因此, 开展基于负载特性的电除尘器能效提升策略研究, 对推动工业绿色低碳转型具有重要现实意义。

2 电除尘器负载特性与能效耦合机制

2.1 负载特性核心参数定义

电除尘器负载特性指烟气与粉尘在设备内形成的动态运行环境, 其核心参数包括: 粉尘浓度(C): 单位体积烟气中粉尘质量, 取值范围通常为 10-500g/m³。该参数直接影响极板积灰速率与电场击穿电压, 当浓度超过 300g/m³ 时, 易引发“电晕闭塞”现象, 导致荷电粒子无法有效迁移; 同时高浓度粉尘会缩短清灰周期, 增加设备运维频率, 需结合离线清灰或双区电场设计优化。粉尘粒径分布(d_{50}): 中位粒径, 工业场景中多为 5-50 μm 。粒径越小, 荷电难度越高, 所需电场强度越大——如 $d_{50} < 10\mu\text{m}$ 的细粉尘, 需通过提高电晕线放电强度或延长停留时间增强荷电效果; 而粗颗粒($d_{50} > 30\mu\text{m}$) 易因惯性碰撞提前沉降, 需控制

【作者简介】邵罡(1974-), 男, 中国浙江杭州人, 本科, 工程师, 从事火电厂烟气除灰脱硫系统优化及粉煤灰综合利用研究。

气流分布均匀性避免局部积灰。气流速度 (v)：烟气在电场内的流动速度，常规设计值为 $0.8\text{--}1.5\text{m/s}$ 。速度过高 ($>1.8\text{m/s}$) 易导致极板积灰被气流冲刷，引发二次飞扬；速度过低 ($<0.6\text{m/s}$) 则需增大电场截面积以满足烟气处理量，直接增加设备占地面积与制造成本。烟气温度 (T)：影响气体电离度与粉尘比电阻，工业烟气温度多为 $120\text{--}250^\circ\text{C}$ 。温度升高会降低气体击穿电压，当温度超过 300°C 时，需提高供电装置的电压等级以维持正常电晕放电；同时温度变化会改变粉尘比电阻——如温度低于 100°C 时，粉尘比电阻升高易导致极板积灰反电晕，需通过加热或调质处理调节。

2.2 负载特性与能效的耦合关系

通过搭建 1:5 小型电除尘器实验平台（模拟燃煤电厂、钢铁烧结等典型工业烟气工况，测试精度达 $\pm 2\%$ ），控制单一变量测试不同负载参数对能效的影响，结果如下：

粉尘浓度与能效：当 $C < 50\text{g/m}^3$ 时，除尘效率随浓度升高从 95% 线性提升至 98.5%（浓度增加使粉尘荷电碰撞概率提高），且因无需额外调节供电参数，能耗增幅小于 5%；当 $C > 150\text{g/m}^3$ 时，极板积灰厚度在 8 小时内超过 3mm，导致电场强度衰减 20%–25%，需将供电电压从 60kV 提升至 75kV 以上维持效率，能耗激增 30% 以上，同时清灰系统启停频率增加，进一步推高运维能耗。粉尘粒径与能效： $d_{50} < 10\mu\text{m}$ 时，细粉尘需更长时间吸附电荷，荷电时间较 $d_{50} = 20\mu\text{m}$ 时延长 50%，若保持除尘效率 $\geq 99.5\%$ ，供电功率需提高 18%–22%（从 12kW 增至 15kW）； $d_{50} > 30\mu\text{m}$ 时，粗颗粒受重力沉降作用增强，在进入电场前已完成部分预沉降，可将电场强度从 3kV/cm 降至 2.5kV/cm ，能耗可减少 10%–15%，且极板积灰以块状为主，清灰难度降低。气流速度与能效： $v < 1.0\text{m/s}$ 时，气流在电场内停留时间超 8s，除尘效率稳定在 99% 以上，但为满足 $10\text{万 m}^3/\text{h}$ 的烟气处理量，设备截面积需从 20 m^2 增至 25 m^2 ，占地面积增加 25%； $v > 1.2\text{m/s}$ 时，气流对极板积灰的冲刷力增强，二次飞扬率从 5% 升至 15%，为补偿效率损失，需将电晕线放电频率从 50Hz 调至 60Hz，能耗提高 25%，且易导致出口粉尘浓度超标。

综上，电除尘器能效与负载特性呈强耦合关系，不同负载组合（如“高浓度 + 细粒径 + 高流速”“低浓度 + 粗粒径 + 低流速”）对应差异化的能效最优区间，固定运行参数（如恒定电压、流速）无法适配动态负载变化，需建立基于负载特性的动态调节机制（如实时监测 C 、 d_{50} 、 v 、 T 参数，自动匹配供电功率与清灰周期）。

3 基于负载特性的能效提升策略设计

3.1 负载特性分类与工况匹配

根据工业现场负载参数波动规律（结合燃煤电厂锅炉低负荷运行、钢铁烧结机启停阶段等实际场景数据），将电除尘器运行工况划分为三类，明确各类工况的能效优化目

标及适配策略：稳定低负载工况 ($C \leq 50\text{g/m}^3$, $d_{50} \geq 30\mu\text{m}$, $v = 0.8\text{--}1.0\text{m/s}$)：典型场景为电厂锅炉低负荷发电、建材窑炉保温阶段。优化目标为“降能耗保效率”，可将电场强度从 3kV/cm 降至 $2.2\text{--}2.5\text{kV/cm}$ ，供电功率降低 12%–15%，同时延长清灰周期至 4 小时（常规为 2 小时），避免过度供电与频繁清灰造成的能耗浪费，且能维持 99% 以上的除尘效率。波动中负载工况 ($50 < C \leq 150\text{g/m}^3$, $10 < d_{50} < 30\mu\text{m}$, $v = 1.0\text{--}1.2\text{m/s}$)：典型场景为钢铁烧结机正常运行、电厂锅炉负荷波动期。优化目标为“稳效率控能耗”，需通过在线监测系统实时捕捉参数变化，当 C 升高 5g/m^3 时，同步将供电电压提高 2–3kV；当 d_{50} 减小 $2\mu\text{m}$ 时，适当延长气流停留时间（微调挡板开度降低流速 0.05m/s ），动态匹配负载变化以维持能效平衡，确保能耗增幅不超过 8%。高负载冲击工况 ($C > 150\text{g/m}^3$, $d_{50} \leq 10\mu\text{m}$, $v > 1.2\text{m/s}$)：典型场景为电厂锅炉启炉、垃圾焚烧炉高负荷阶段。优化目标为“保达标降损失”，优先将供电电压提升至 80kV 以上、启用双区电场增强荷电效果，确保除尘效率 $\geq 99.5\%$ 以满足排放标准；同时启动高频清灰模式（周期缩短至 1 小时）减少积灰堆积，通过“高压供电 + 高频清灰”协同调节，将能耗浪费控制在 10% 以内，避免单一参数调节导致的效率不达标或能耗激增。

3.2 分层能效提升策略

3.2.1 动态供电调节策略

基于负载参数实时监测数据（采用激光粉尘浓度仪、粒径分析仪、风速传感器实现 1s/次数据采集），建立供电参数（电压 U 、电流 I ）与负载特性的映射模型：低负载工况：采用“低压稳流”模式，将供电电压降至额定值的 80%–85%，电流维持在额定值的 60%–70%，能耗降低 15%–20%；中负载工况：采用“变压变流”模式，通过 PID 控制器实时调整 U 与 I ，使电场强度维持在 $2.5\text{--}3.0\text{kV/cm}$ （能效最优区间），能耗波动控制在 $\pm 5\%$ ；高负载工况：采用“分区升压”模式，将电场分为前、中、后三段，前段（粉尘浓度最高）电压提升至 $3.2\text{--}3.5\text{kV/cm}$ ，后段（粉尘浓度降低）电压降至 $2.2\text{--}2.5\text{kV/cm}$ ，避免整体升压导致的能耗浪费，能耗降低 12%–15%。

3.2.2 极板清灰协同优化策略

负载特性中的粉尘浓度与粒径直接影响极板积灰厚度，传统固定周期清灰（如 8 小时/次）易导致“清灰不足”（高负载时积灰过厚）或“过度清灰”（低负载时极板损伤）。基于负载特性的清灰策略如下：建立积灰厚度预测模型：通过粉尘浓度 (C)、运行时间 (t) 与粒径 (d_{50}) 拟合积灰厚度公式： $h = 0.02C \times t/d_{50}$ （单位：mm）；动态调整清灰周期：当 $h \geq 3\text{mm}$ （高负载）时，清灰周期缩短至 4 小时/次；当 $1\text{mm} < h < 3\text{mm}$ （中负载）时，清灰周期维持 6 小时/次；当 $h \leq 1\text{mm}$ （低负载）时，清灰周期延长至 12 小时/次；优化清灰强度：高负载时采用“高压强短时间”清灰（压缩空

气压力 0.6-0.7MPa, 清灰时间 10-15s), 避免积灰黏附; 低负载时采用“低压强长时间”清灰(压力 0.4-0.5MPa, 时间 20-25s), 减少极板振动损伤。

3.2.3 系统协同控制策略

将动态供电调节与极板清灰优化纳入同一控制系统, 基于工业物联网(IoT)搭建分布式数据交互网络, 实现多参数联动与协同决策, 具体架构与流程如下: 数据采集层: 部署激光粉尘浓度传感器(采样频率 1 次/秒, 精度 $\pm 3\%$)、激光粒度仪(d_{50} 测量范围 0.1-100 μm)、烟气流速传感器及红外测温仪, 实时采集负载参数(C 、 d_{50} 、 v 、 T); 同时通过电压电流变送器、电容式积灰厚度传感器, 同步获取设备运行参数(U 、 I 、积灰厚度)与能效指标(除尘效率、单位能耗), 数据经边缘计算网关预处理后上传至云平台, 延迟控制在 50ms 以内。决策分析层: 基于 3.1 节负载特性分类模型(嵌入随机森林算法, 工况识别准确率 $\geq 98\%$)判断当前工况, 调用对应能效优化算法——如稳定低负载工况调用“低压低频”供电算法, 高负载冲击工况调用“高压高频清灰”协同算法, 通过 PID 闭环控制逻辑计算最优参数, 输出供电电压/功率调节指令(精度 $\pm 0.5\text{kV}$)与清灰周期/强度控制指令。执行控制层: 通过高压变频器、晶闸管调压器执行供电参数调整, 控制电磁脉冲阀或振打电机电作; 同时设置异常保护机制, 当积灰厚度超 5mm 或供电电压异常时, 自动触发紧急清灰与降负荷操作, 实现“负载-供电-清灰”的全闭环协同, 相比传统独立控制, 能效提升 12%-18%, 故障率降低 25%。

4 工业现场验证与效果分析

4.1 验证场景与方案

选取某 300MW 燃煤机组配套的电除尘器(处理烟气流 1.2 $\times 10^5 \text{m}^3/\text{h}$, 设计除尘效率 99.5%, 电场数量 4 个, 单电场截面积 30 m^2)作为验证对象, 分两个阶段开展对比试验, 各阶段均持续 1 个月且保持机组负荷稳定在 70%-80%: 基准阶段: 采用传统固定参数运行模式, 供电电压恒定 35kV、电流 1.2A, 清灰周期固定为 8 小时/次(采用电磁脉冲清灰方式, 清灰压力 0.5MPa), 每日记录 3 次负载参数(C 、 d_{50} 、 v 、 T)、设备能耗及出口粉尘浓度, 计算日均除尘效率与单位烟气能耗。优化阶段: 采用本文提出的基于负载特性的能效提升策略, 通过 IoT 系统实时监测负载参数(采样间隔 1 分钟), 依据工况分类动态调节供电参数(电压调节范围 28-42kV)与清灰周期(3-8 小时/次), 同频率记录与基准阶段一致的指标, 用于后续能效提升效果对比分析。

4.2 验证结果分析

4.2.1 能效指标改善

能耗方面: 优化后电除尘器平均单位能耗从

0.85kW \cdot h/1000 m^3 降至 0.68kW \cdot h/1000 m^3 , 降幅 19.4%, 其中低负载工况能耗降幅最高(22.7%), 高负载工况能耗降幅 14.3%; 效率方面: 优化后除尘效率稳定维持在 99.6%-99.8%, 较基准阶段(99.2%-99.5%)提升 0.3-0.4 个百分点, 且在高负载冲击(粉尘浓度达 200 g/m^3)时, 效率未出现明显下降(基准阶段此时效率降至 98.8%)。

4.2.2 经济与环境效益

- 经济效益: 按机组年运行 7000 小时、电价 0.6 元/kW \cdot h 计算, 年节约电费约 $7000 \times (0.85-0.68) \times 120 \times 0.6 = 85680$ 元, 投资回收期约 1.5 年;

- 环境效益: 优化后年减少粉尘排放量约 $7000 \times 1.2 \times 10^5 \times (99.7\%-99.3\%) \times 10^{-6} = 336$ 吨, 满足最新《火电厂大气污染物排放标准》(GB 13223-2011)要求。

5 结论与展望

本文通过分析电除尘器负载特性与能效的耦合机制, 提出“动态供电调节-分区电场优化-协同控制”的分层能效提升策略, 主要结论如下: 1. 粉尘浓度、粒径分布、气流速度是影响电除尘器能效的核心负载参数, 不同参数组合对应差异化的能效最优区间, 固定运行模式无法适配动态负载变化; 2. 基于负载特性分类的动态供电调节策略, 可实现不同工况下电场强度的精准匹配, 降低运行能耗 12%-22%; 3. 极板清灰协同优化策略通过动态调整清灰周期与强度, 解决“清灰不足”与“过度清灰”问题, 进一步提升能效 5%-8%; 4. 工业现场验证表明, 该策略可使电除尘器能耗降低 18%-23%, 除尘效率稳定在 99.5% 以上, 具备良好的工程应用价值。

未来研究可进一步拓展负载特性参数范围(如高比电阻粉尘、腐蚀性烟气), 结合人工智能算法优化控制模型, 提升策略的适应性与智能化水平; 同时, 探索电除尘器与其他烟气净化设备(如脱硫塔、脱硝装置)的协同能效优化, 构建全流程烟气处理系统的节能方案。

参考文献

- [1] 张磊, 王建国, 李娜. 电除尘器负载波动对能效的影响及调节方法[J]. 环境工程学报, 2023, 17(5): 1623-1631.
- [2] 中国环境保护产业协会. 中国工业节能发展报告(2024)[M]. 北京: 中国环境出版集团, 2024.
- [3] 李明, 赵伟, 陈晓峰. 基于模糊PID的电除尘器动态供电控制策略[J]. 电力科学与工程, 2022, 38(8): 65-71.
- [4] GB 13223-2011, 火电厂大气污染物排放标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- [5] Wang Y, Li J, Zhang H. Energy Efficiency Optimization of Electrostatic Precipitator Based on Load Characteristics[J]. Journal of Environmental Sciences, 2023, 128: 412-421.

Construction and optimization strategies for the quality system of public health and medical environment

Zhengjia Wu Han Cao

Hubei Pulin Standard Technical Service Co., Ltd., Wuhan, Hubei, 430000, China

Abstract

The quality system of public health and medical environment is the core support for ensuring public health and improving the level of medical services. Its construction and optimization are directly related to the emergency response capability of public health, the safety of medical services, and the well-being of the people. This article is based on the practical needs of the public health and medical environment, and analyzes from three dimensions: the basic elements of system construction, the core direction of optimization, and the improvement of guarantee mechanisms. It clarifies key contents such as standard system construction, infrastructure upgrading, and personnel capacity building, and proposes optimization paths such as dynamic adjustment mechanism, diversified collaboration mode, and digital empowerment. The aim is to provide theoretical reference and practical guidance for the continuous improvement of China's public health and medical environment quality system, and to help enhance the scientificity, systematicity, and efficiency of public health services.

Keywords

public health, medical environment; Quality system; System construction; Optimization strategy; safeguard mechanism

公共卫生医疗环境质量体系构建与优化策略

吴正家 曹汉

湖北省普林标准技术服务有限公司，中国·湖北 武汉 430000

摘 要

公共卫生医疗环境质量体系是保障公众健康、提升医疗服务水平的核心支撑，其构建与优化直接关系到公共卫生应急响应能力、医疗服务安全性及民生福祉。本文基于公共卫生医疗环境的现实需求，从体系构建的基础要素、优化的核心方向、保障机制的完善三个维度展开分析，明确了标准体系搭建、基础设施升级、人员能力建设等关键内容，提出了动态调整机制、多元协同模式、数字化赋能等优化路径，旨在为我国公共卫生医疗环境质量体系的持续完善提供理论参考与实践指引，助力提升公共卫生服务的科学性、系统性与高效性。

关键词

公共卫生医疗环境；质量体系；体系构建；优化策略；保障机制

1 引言

公共卫生医疗环境质量是评估社会治理成效与民生保障程度的关键尺度，包含环境安全、服务流程、健康监测等范围，直接影响着医疗服务的质量和可获取性。我国已初步搭建起这一体系，然而在标准统一、资源均衡和应急响应等方面依旧存在短板，系统整理其构建要素并探究优化策略，既是应对公共卫生风险的实际需求，也是推动健康中国建设的必要举措。本文聚焦体系的基础、优化方向及保障机制开展研究，目的是为完善此体系提供思路。

2 公共卫生医疗环境质量体系构建的基础要素

构建公共卫生医疗环境质量体系，要依靠坚实的基础要素，从标准、设施、人员这三个维度架构框架，保证体系运行具备规范性与稳定性。

2.1 统一规范的质量标准体系

质量标准堪称公共卫生医疗环境管理的“标尺”，应包含环境安全、服务流程、监测评估等诸多领域，要结合国家公共卫生政策以及医疗行业规范，界定医疗场所空气质量、水质安全、废弃物处理等的硬性指标，如门诊区域PM2.5浓度要控制在国家标准以内，医疗废水须处理达标后排放；设定服务质量规范，涵盖公共卫生咨询响应时长、健康体检流程规范等内容，保证服务过程具备标准化与可追溯性。标准体系要兼顾共性与个性，为基层医疗机构、专科医院等不同场景量身打造差异化标准，杜绝“一刀切”式管理

【作者简介】吴正家（1988-），男，中国湖北武汉人，本科，工程师，从事质量检测研究。

模式。

2.2 完善的基础设施与设备配置

公共卫生医疗环境质量管理体系的运行依赖基础设施与设备这一“硬件支撑”，会直接左右服务效能^[1]。在基础设施建设过程中，应着重对医疗场所的空间布局加以优化，比如恰当划分诊疗区、候诊区、隔离区，保证人员和物资的有序流通，降低交叉感染概率；强化公共卫生应急设施的搭建，比如在二级以上医院开设独立的发热门诊以及应急隔离病房，配置必要的通风与消毒设备。针对公共卫生服务需求的设备配置，要按照公共卫生服务需求，配备先进的健康监测（如便携式体检仪）、应急救援（如呼吸机）和环境监测（如空气质量检测仪）设备，还应构建设备定期维护与更新体系，保证设备一直处于良好运转状态。

2.3 专业人员队伍建设

人员作为公共卫生医疗环境质量管理体系的“核心执行者”，其专业水平直接影响体系运行成效。应加大公共卫生与医疗专业人才培养力度，通过优化高校专业设置、开展在职人员培训等途径，提高人才队伍专业素养，如培育拥有公共卫生监测、流行病学调查、环境质量评估等综合能力的复合型人才；应优化人员考核与激励机制，把环境质量指标引入医护人员及管理干部的绩效考核范围，比如，把医疗场所消毒合格率、患者对环境的满意度等当作考核指标，并且设立合理的薪酬激励制度，提升人员参与环境质量管理积极性。加强对人员责任意识的培养，通过定时开展公共卫生安全培训与应急演练，提高人员应对突发环境质量状况的能力。

3 公共卫生医疗环境质量管理体系优化的核心方向

基于已构建的体系，要契合时代发展需要与现实难题，从动态调整、多元协同、数字化赋能这三个方面开展优化工作，增强体系适配性与高效性。

3.1 建立动态调整与评估机制

公共卫生医疗环境质量管理体系应具备“自我完善”能力，借由动态调整和评估机制来应对外部环境的变化^[2]。要构建常态化的评估系统，按时对公共卫生医疗环境质量做全面性评估，评估涵盖标准执行情况、基础设施运行效能、服务质量满意度等方面，可采用第三方评估和内部评估相组合的形式，保障评估结果的客观真实性；按照评估结果与外部需求的改变（例如突发公共卫生事件、居民健康需求增加），迅速调整体系内容，比如疫情防控期间，需临时调整医疗场所的隔离规范和消毒次数，疫情结束后则要优化日常的环境管理流程；构建评估结果反馈与应用体系，把评估所发现的问题列入整改清单，界定整改责任主体和时间界限，将整改成效作为下一轮评估的关键参考，达成“评估—调整—再评估”的闭环管理。

3.2 构建多元协同的治理模式

公共卫生医疗环境质量管理体系的优化，需突破单一主体

管理局限，打造政府、医疗机构、社会力量与公众多元协同治理模式。政府应担当主导角色，加强政策指引与资源整合，如制定针对公共卫生医疗环境质量的扶持政策，增加对基层医疗机构基础设施建设的投入力度；医疗机构作为核心实施主体，要强化内部管控与开展跨机构合作，比如不同医院构建环境质量信息共享模式，一同应对区域内公共卫生环境难题；环保组织、第三方服务机构等社会力量能够凭借专业特长，参与到环境质量的监测与评估中，比如环保组织能助力医疗机构进行空气质量检测，第三方机构可开展设备维护和人员培训服务；公众需投身监督与互动工作，借助开设投诉举报通道、普及健康知识等举措，提高公众对公共卫生医疗环境质量的关注与参与，构建“政府主导、机构负责、社会协同、公众参与”的治理格局。

3.3 推进数字化与智能化赋能

数字化和智能化是提高公共卫生医疗环境质量管理体系效能的关键途径，可让环境管理变得精准且高效^[3]。构建统一的公共卫生医疗环境质量信息平台，融合医疗场所的环境监测数据，借助大数据分析达成环境质量的实时监控与预警，比如某区域医疗场所空气质量超出标准时，平台会自动发出预警并给出整改建议；推进智能化设备的普及，如在医疗场所设置智能消毒机器人、自动感应洗手设备，提高环境清洁与消毒效率；运用互联网技术开展远程公共卫生服务项目，如线上健康答疑、远程环境质量评测，扩大服务覆盖范围，提高服务的可获得性。此外，应加大数据安全力度，设立严格的数据加密及访问权限规则，保障环境质量数据的安全与隐私。

4 公共卫生医疗环境质量管理体系优化的保障机制

为使公共卫生医疗环境质量管理体系构建与优化工作得以顺利实施，要从政策、资金、监督三方面打造完善保障机制，为体系运转提供坚实保障。

4.1 健全的政策法规保障

政策法规作为公共卫生医疗环境质量管理体系运行的“制度基石”，应借助系统性的立法及政策改进，为各主体明确责任框架和管理要求^[4]。要加速开展公共卫生医疗环境质量相关法律法规的制定和修订事宜，促进《公共卫生医疗环境质量管理条例》出台，界定政府部门监管职责、医疗机构主体责任以及社会力量参与义务。同时针对环境质量不达标、违规排放等行为设定清晰法律责任，为整个体系规范运作提供坚实法律保障和执法凭据。

应出台配套的政策文件与可操作细则，如环境质量评估标准执行细则、监测技术规程、数字化建设指引等，进一步优化管理流程和技术路径，提升政策的可操作性。在政策颁布后，需强化宣传与阐释工作，利用政府门户网站、行业协会组织的培训、新闻媒体等多样渠道，把政策内容传达给社会公众和相关机构，提升政策的知晓度与认同感。要构建

常态化的监督检查与评价机制，追踪政策落实情况并追究责任，保证各项制度真正落地发挥实效，持续带动公共卫生医疗环境质量迈向高水平发展。

4.2 稳定的资金投入保障

资金作为公共卫生医疗环境质量体系建设与优化的“经济支撑”，需搭建稳定、可持续且多元的资金投入平台，保障体系建设能够顺利推进并长期运行。此外，需持续强化政府财政投入，将公共卫生医疗环境质量体系建设纳入各级政府日常财政预算范围，设立专门的发展基金。资金需重点向基层与薄弱之处倾斜，扶持涵盖偏远地区乡镇卫生院与社区卫生服务中心的基础设施升级、老旧设备换新、专业人员技能培训等具体事项，为经济欠发达地区医疗机构发放环境改善专项补贴，切实提高其基础服务水平。

此外，需积极引导社会资本参与投入并给予鼓励。政府可借助税收减免、贷款贴息、建设运营补贴等优惠政策，撬动企业、慈善组织、公益基金等社会力量投向医疗废弃物处理、环境监测技术研发、智慧医院建设等领域^[5]。各级医疗机构应当合理调整内部资金分配，按一定比例从业务收入中提取资金用于改善院内环境质量，如改造候诊区域、采购高效消毒器材、升级医疗废水处理体系等。需构建严谨的资金使用全程监管体系，强化预算绩效管控、专项审计以及公开监督，保障所有资金专用于特定项目且精准高效，精准高效地起到支撑保障功效。

4.3 严格的监督管理保障

监督管理是保障公共卫生医疗质量体系规范高效运行的“核心约束手段”，需搭建起全方位、层次分明、内外协同的长效监督体系。增强政府层面的强力监管，以卫生健康主管部门为牵头力量，联合生态环境、市场监督管理等部门组建长期稳定的联合监督团队，制订并落实定期与不定期相结合的监督检查规划。检查要聚焦于医疗机构环境标准的执行情况、污水处理和医疗废物管理设施的运行状态、重点部门的消毒隔离措施以及相关人员的培训和实操水平等关键环节。针对检查过程中所发现的问题，应立即提出整改要求并明确整改时间；针对未在规定时间内完成整改或整改效果不佳的单位，依照法律法规实施警告、罚款、通报直至暂停相关业务等递进式惩处手段，以保障监督的权威性和威

慑力。

应充分重视并大力引入社会监督力量，构建多元共治治理格局。让医疗行业协会充分发挥引导与自律效能，通过出台更精细的行业环境管理准则、举办培训交流活动、开展“医疗环境质量示范单位”评选等举措，树立优质标杆，推动行业内部良性竞争与自我进步。全面打通公众监督反馈途径，如建立统一的监督热线、在政务平台开设便利的投诉举报窗口，鼓动患者和公众对就诊环境的清洁、安全等问题予以反映，必须及时对每一起投诉进行登记、核实和处理，再把结果反馈给投诉人。定时借助政府官网、媒体等渠道，向社会公布主要医疗机构环境质量评估结果和监督检查报告，借公开推动规范，以透明增强公信力，最终达成体系运行质量的持续提升。

5 结语

综上所述，公共卫生医疗质量体系搭建与完善是一个系统项目，要以标准体系、基础设施和人才队伍为根基。以动态调整、多元协同和数字化为核心指引，且以政策法规、资金支持和严格监督作为保障，实施多维度建设，能增强该体系的科学性、适配性与效能，由此提升公共卫生应急能力、维护医疗安全，还能契合居民健康需求。未来需契合社会与技术的演进，持续挖掘创新方式，像打造绿色医疗环境和开展跨区域协同管理，进而不断提高体系综合效能，为公众健康筑牢保障。

参考文献

- [1] 陈雯.基于“信息化+公共卫生”的医院档案管理优化策略分析[J].办公室业务, 2024:169-171.
- [2] 马芸,杨帆.大数据背景下公立医院公共卫生事业管理的挑战与策略研究[J].中文科技期刊数据库(文摘版)社会科学, 2024(10):0168-0171.
- [3] 席琳.基层卫生健康系统中人力资源优化配置策略研究[J].商业文化, 2025(1):137-139.
- [4] 王丹.新医疗改革背景下公立医院内部控制体系构建策略探究[J].质量与市场, 2023(10):85-87.
- [5] 范思敏.公共健康导向下道路路侧绿地景观设计——以文耀路和康全路路侧绿地设计为例[J].现代园艺, 2023, 46(1):151-153.

Research on Risk Prevention and Control of Public Health and Medical Environment Based on Quality System

Fei Yan Wenchen Wang Xiaolu Cheng

Hubei Pulin Standard Technical Service Co., Ltd., Wuhan, Hubei, 430000, China

Abstract

The public health and medical environment is an important barrier to ensure public health and resist the spread of diseases, and its risk prevention and control capabilities are related to the quality of medical care and public safety. This article explores the integration of systematic and standardized quality system concepts and methods into public health and medical environment risk prevention and control work. By constructing a risk prevention and control model with prevention as the main focus and full process control, this paper elaborates on the implementation path of quality system based prevention and control from three core levels: organizational structure and cultural construction, risk identification and assessment warning, and continuous improvement and emergency response. The aim is to enhance the risk resistance and quality management level of medical institutions, and provide theoretical and practical strategies for building a public health defense line.

Keywords

quality system; Public Health; Medical environment; Risk prevention and control; continuous improvement

基于质量体系的公共卫生医疗环境风险防控研究

晏飞 汪文辰 程小璐

湖北省普林标准技术服务有限公司, 中国·湖北 武汉 430000

摘 要

公共卫生医疗环境是保障公众健康、抵御疾病传播的重要屏障, 其风险防控能力关乎医疗质量与公共安全。本文探讨将系统化、标准化的质量体系理念与方法融入公共卫生医疗环境风险防控工作。通过构建预防为主、全过程管控的风险防控模型, 从组织架构与文化建设、风险识别与评估预警、持续改进与应急响应三个核心层面, 阐述基于质量体系的防控实施路径, 以提升医疗机构抗风险能力和质量管理水平, 为构建公共卫生防线提供理论与实践策略。

关键词

质量体系; 公共卫生; 医疗环境; 风险防控; 持续改进

1 引言

公共卫生医疗的相关环境, 如医院、疾控中心、社区卫生服务中心等机构, 是供给医疗服务、应对突发公卫状况的核心场地。此环境呈现人员高度密集、病原体易积聚、服务流程复杂的特征, 让它成为风险滋生与扩散的潜在高风险区域, 传统风险管控常依靠事后补救与零散管理, 缺少系统规划与前瞻考量。现代质量管理体系 (如 ISO9001、JCI 认证标准这类) 着重过程把控、以预防为核心并追求持续优化, 为在复杂环境下系统化解风险问题给出了成熟的理论框架与工具。把质量体系的核心思想与公共卫生医疗环境的风险管理要求相融合, 打造一个架构严密、运转高效、可自我

优化的风险防控系统, 具有重大现实意义且十分紧迫。本研究围绕此开展, 目标是探寻基于质量体系的科学规范防控途径。

2 构建基于质量体系的防控组织架构与文化氛围

风险防控并非单个部门的职责, 其有效开展首要依靠稳固的组织根基和广泛认同的文化环境, 这正是质量体系所强调“领导作用”与“全员参与”原则的直接反映。

2.1 确立顶层设计与领导责任

医疗机构高层管理者需清醒认识到, 环境风险防控绝不仅仅是后勤或院感部门单独承担的职责, 而是涉及患者安全与医疗质量整体状况的战略性工作。应切实把它融入医院质量管理体系的核心层面, 借助制定明确质量方针和可量化的防控指标, 促使全院构建以风险优先为导向的管理文化。积极推动组建由院长或者分管副院长直接引领, 院感控科、

【作者简介】晏飞 (1985-), 男, 中国湖北孝昌人, 本科, 工程师, 从事食品检测, 环境检测, 公共卫生, 医院卫生研究。

医务处、护理部、后勤保障中心以及设备管理等部门共同参与的风险防控管理委员会。该委员会承担审定防控策略、调配资源、审核重要预案以及监督执行效果的职责，从顶层规划保障风险管理的系统与权威。

让“一把手”工程真正落实到位，应构建清晰的责任拆分与传导机制。把总体防控目标逐级下分到科室与岗位，精准明确各层级在风险辨别、过程把控和应急反应中的具体任务，达成权责匹配、全员投入，委员会要定期评估和完善资源配置、人员培训及制度执行状况，保证政策不只是纸上谈兵，而是切实转变为有效行动。只有依靠坚实的组织保障和不间断的资源投入，才能够给医疗机构环境风险防控工作提供坚实后盾，最终全面增强医院整体风险应对能力^[1]。

2.2 明确分工与跨部门协作机制

精准确定各部门、各岗位在环境风险防控链条里的具体职责与权限，是消除管理真空与责任推诿现象的根本。应利用制度文件明确院感控、医务、护理、后勤、设备管理等各部门职能的边界及衔接条件，保障风险识别、评估、控制直至应急响应全流程责任落实到岗、到人。基于这一情况，要设立常态化的跨部门沟通协同体系，如定时开展由多部门代表共同参与的风险防控联席会议，对建筑布局流程、医疗废物处理、洁净区域管理等交叉领域的风险隐患开展“联合会诊”，共同制订综合性防控策略与协调处理方案，提高复杂风险的整体应对本领。

更深入来讲，要依据质量管理体系中的“过程方法”，把门诊、急诊、住院、医技以及后勤保障这些看似相互独立的环节，整合成连贯且封闭的风险管理流程。对患者、物料、气流及器械的跨部门流动路径展开梳理，找出关键控制节点，使风险控制标准和信息传递规范达成一致。借助信息化平台达成风险数据实时共享和预警指令迅速下达，保障全院在风险防控工作中信息互通、决策同频、行动协同，最终构建系统化、一体化的防控合力，大幅提升医疗机构环境风险管控整体效能。

2.3 培育全员参与的风险防控文化

通过系统、持续的教育培训及宣传引导举措，把环境风险防控和质量意识转变为每位员工的自觉信念与行为准则，是构建有韧性医疗机构的软性支撑。构建全员覆盖、层次分明、形式多样的培训体系，把风险识别、标准流程和应急处理知识融入岗前培训、在岗持续教育与专项技能再培训，保证每位员工清楚自身岗位在整体防控链条中的定位。定时开展模拟现实场景的应急演练，如微生物污染突发状况的现场处理，持续增强员工的实战应变能力与提升协同处理水准，让他们在日常工作中积极落实防控要求。

尤其关键的是，应大力培育开放、透明、非惩戒性的安全文化风气，激励员工主动报告潜在风险、流程漏洞和不良事件^[2]。构建高效激励体系，对积极上报并提出可行改进建议的个人或团队予以肯定和奖赏，进而提升员工参与的成

就感与使命感。只有使每位员工都化身风险管理的“哨兵”与“参与者”，才可切实营造“人人重视风险、人人负责防控”的集体文化。把防控屏障从制度维度拓展到行为与认知维度，实现医疗机构环境风险防控体系的不断优化与良性运转。

3 实施全过程的风险识别评估与动态预警

风险防控关键要做好“防”，而开展“防”工作的前提是对风险有明确、前瞻性的认知。质量体系中“循证决策”与“关系管理”原则促使我们构建科学且动态的风险管理流程。

3.1 全面识别环境风险源

在公共卫生医疗机构，实施有效防控的前提是全面系统地识别环境风险源。应采用一系列标准化工具与手段，比如进行定期实地巡查、对业务流程实施流程图解构，还有开展前瞻性的失效模式与效应分析；多方面主动排查潜在风险，识别范畴应全方位涵盖物理环境要素，如空气质量、水体卫生状况、物体表面洁净程度以及医疗废物的分类与处理；针对设备设施，消毒灭菌装置性能验证、通风系统过滤效能以及生物安全柜气密性与气流模式；针对不同种类的诊疗举动，如手卫生的依从状况、无菌操作的规范程度、隔离措施的执行成效；针对管理流程，如患者分流规则、清洁与污染物资配送路线等，保证关键环节无一遗漏，进而初步编制风险源清单。

全面识别工作结束后，需进一步对风险源开展分类、评级与持续监测。通过 FMEA 等分析手段对各风险点的发生频次、危害程度和可检测性予以评估，计算出风险优先系数，进而划分管控优先级。把识别出的风险点整合为实施动态管理的风险源清单，界定责任部门以及整改时间，再录入机构常态化的风险管理数据库^[3]。借助这种系统且循环推进的识别与评估方式，可把看似分散的风险点转变为结构化、可管控的控制目标，为后续精准干预措施的制定筑牢根基，最终增强整体环境可靠性与安全性。

3.2 科学进行风险评估与分级

针对已识别的风险源，要系统地基于“发生的可能性”与“后果的严重性”两个维度开展评估，从而科学判定风险等级。可基于历史数据、频率统计或专家经验，对可能性进行定性或定量的分级，而严重性需全面衡量风险对患者安全、医疗质量、环境合规以及机构声誉的影响大小。利用风险矩阵（Risk Matrix）等可视化分析手段，可直观展示不同风险点的等级分布情况，进而优先关注“高可能性 - 高严重性”的重大风险，找准需紧急干预的关键范围。

为提高评估过程的客观程度和结论的可信水平，要组建由感染控制、临床医学、护理管理、设备工程以及数据分析等多学科背景专家构成的团队，经集体研讨降低主观误差。特别是针对复杂、耦合型风险展开深入研讨，按照评估所明确的风险等级，管理者可推出差异化管控策略：针对高

风险点实施工程技术排除、制度强力管控等硬性手段；应对中低风险，更多借助操作培训、流程优化以及周期性监测。该评估结果既为后续防控资源（如预算、人力）的精准投入提供了依据，又让风险管理活动更具针对性和效率，切实达成“基于风险的决策”。

3.3 建立动态监测与预警系统

借助信息化与物联网技术，建立关键风险指标实时连续的监测系统，是达成医疗机构环境风险前瞻管理的关键技术手段。此系统可对多种数据源进行整合，比如在线空气质量微粒监测装置、手卫生依从性智能感应器具、物体表面清洁度 ATP 生物荧光检测装置，以及医院信息系统（HIS）中的耐药菌检出率和感染率的统计数据。利用自动采集和传输手段，这些指标实现动态更新并集中展示在统一的管理驾驶舱，实现对环境风险的全数字化感知。

基于实时监测结果，要进一步运用数据分析模型对所采集数据进行趋势辨认、波动剖析和异常值判别，且为不同指标设置科学合理的预警阈值。当系统检测到数据持续变差、波动超出正常范围或逼近预设阈值时，便会自动通过接口短信、办公系统消息或者让可视化大屏变色等办法发出预警，精准传达给感染管理、护理部或后勤保障等责任部门^[4]。这让管理人员可快速介入，实施根源探究与针对性调控，把风险控制关口从事后弥补提前到事中应对乃至事前防范，切实实现从被动应对向主动预警、前瞻性管理的模式转变。

4 建立持续改进与应急响应融合的长效机制

风险防控属于一个循环不止、动态变化的进程，依据质量体系“持续改进”原则，需构建起从日常维护到应急响应，到事后优化的闭环管理模式。

4.1 强化常态化审核与监督检查

构建内部审核及管理评审机制，按时对风险防控体系的有效性、契合度进行全面审查与评定。开展内部审核以发现体系运行中的不达标项，管理评审从战略角度评估方针目标的合理性，以日常监督检查的结果、不良事件上报的数据、监测预警的信息等作为评审的输入内容，保障管理体系持续维持良好运行态势。

4.2 构建高效应急响应与处置流程

针对评估所得的重大风险以及可能出现的突发公共卫

生事件，事先制定细致、可行的应急预案，清晰界定应急指挥体系、人员职责分工、处置操作流程、资源调配计划以及信息报告渠道^[5]。按周期组织多部门协同的实战化应急演练，验证预案成效并锤炼队伍，保证在真实风险事件出现时，可即刻启动、有效处置，把危害降至最低限度。

4.3 推动闭环管理与持续优化

已发生的各类风险事件、不良事件及应急响应情况，均需开展根本性原因分析，查找系统层面存在的漏洞，而非简单把责任推给个人。依据分析成果，拟定并执行有效的纠正与预防举措，对举措成效进行跟踪核实，达成完整的“计划-实施-检查-处置”闭环。不断重复该过程，把每次事件的经验教训化作体系优化的驱动力，达成风险防控能力的螺旋式增长。

5 结语

运用质量体系的框架与理念开展公共卫生医疗环境风险防控，是让其管理从零散、被动转为系统、主动的关键方法。本文证实了凭借打造稳固的组织文化根基、开展科学的风险评估预警以及构建改进与应急结合的长效机制这三个方面，可有效筑牢风险防控体系。在未来，伴随信息技术进步与质量管理理论持续革新，质量体系下的风险防控研究与实践有待深入推进，从而更精准、智能地保障公共卫生安全底线，全方位提高医疗质量与安全水准。

参考文献

- [1] 周青,陈晓云,单苗苗,等.公立医院内部控制环境风险评价指标体系构建研究[J].中国医院, 2023, 27(2):6-9.
- [2] 皇甫慧慧,周庆誉,张华骅,等.我国公共卫生体系高质量发展的现状、挑战与策略[J].中国公共卫生, 2025, 41(7):802.
- [3] 东赞,史文先,陆亚东,等.突发公共卫生事件下施工现场智慧健康风险防控测报系统研究与应用[J].智能建筑与智慧城市, 2023(10):81-83.
- [4] 房亚明,王佳宝.空间韧性:城市社区公共卫生风险治理的机制优化[J].社会工作与管理, 2023, 23(3):69-79.
- [5] 陈明红,麦洁雯.错失焦虑视角下突发公共卫生事件健康风险信息搜寻行为研究——基于混合方法的实证[J].情报科学, 2023, 41(6):113-124.

Design and research on new energy engineering cost management information system based on AI technology

Jian Zhao

Shandong Electric Power Engineering Consulting Institute Co., Ltd., Jinan, Shandong, 250000, China

Abstract

To address the challenges in engineering cost management arising from the rapid development of the new energy industry, this paper proposes an AI-powered cost management information system for renewable energy projects. The system aims to overcome limitations of traditional cost estimation tools, including single-function systems, isolated data silos, and inefficient collaboration. By integrating three core modules—the design input system, cloud-based cost estimation platform, and cost database—it achieves comprehensive data integration and cross-departmental coordination throughout project lifecycle. The study highlights the application of key AI algorithms such as intelligent pricing systems and semantic recognition technology, enabling automated document generation and smart proofreading capabilities. This system significantly enhances cost management efficiency and decision-making support for renewable energy projects, providing enterprises with a robust tool for digital transformation.

Keywords

Artificial Intelligence; AI; Renewable Energy Engineering; Cost Management; Intelligent Pricing; System Design

基于 AI 技术的新能源工程造价管理信息系统设计研究

赵健

山东电力工程咨询院有限公司，中国·山东 济南 250000

摘 要

为应对新能源产业的快速发展而面临的工程造价管理挑战，本文设计了一套基于AI的新能源工程造价管理信息系统。系统的目的是打破传统造价工具存在的系统功能单一、造价数据孤立和协作效率低下等痛点，通过构建设计提资系统、云造价系统和成本库系统三个核心模块，实现项目全生命周期的数据贯通和业务协作。研究重点介绍了新能源造价领域智能组价、语义识别等关键人工智能算法的应用，赋予造价文件自动编制和智能校审功能。该系统可以大幅度提高新能源项目的造价管理水平和决策支持能力，为企业数字化转型提供强有力的工具。

关键词

AI；人工智能；新能源工程；造价管理；智能组价；系统设计

1 引言

在“双碳”战略的引导下，新能源工程建设规模大幅增长，工程造价管理因项目复杂性和阶段数据离散性而面临严峻挑战。传统模式依靠人工操作和离线软件应用，呈现出效率低、协同难、数据不贯通等缺点，不符合现代工程造价精细化管理的要求。人工智能技术在数据处理、智能分析和语义识别等方面的优越性，为造价管理的革新提供了一种新的渠道。本文旨在研究人工智能技术与新能源造价管理的深度融合，设计出一个智能化信息系统，来提高造价全过程中自动化、协作化、智能化的水平，协助企业完成降本增效以及数字化转型的任务。

2 系统设计背景与目标

2.1 新能源工程造价管理的现状与挑战

新能源工程造价在当下的行业实践中面临多重严峻的挑战。主要的问题在于传统的造价管理软件功能存在局限性，绝大多数软件只能提供基础的计价功能，并没有系统化的管理项目全寿命期间数据的能力，在智能组价分析、多阶段数据贯通等环节的支持也不足。再者，数据孤岛现象比较普遍，编制概算、测算成本、分标段等关键环节的数据相互隔绝，无法有效地共享和互动，造成信息割裂和不必要的重复劳动。除此之外，协同工作机制欠缺，由于缺乏规范化的提资过程和有效的版本管理，不同专业、部门间合作时就会出现混乱或者延误，影响项目推进效率和费用控制准确性。以上问题成为制约新能源工程造价管理质量和效率提升的主要瓶颈。

【作者简介】赵健（1985—），女，中国山东新泰人，硕士，高级经济师，从事电力工程研究。

2.2 人工智能技术在造价管理中的应用潜力

人工智能在赋能工程造价管理转型升级方面有巨大应用前景。从数据处理角度,人工智能的自然语言处理和机器学习技术可以把不规范的设计内容转化成结构化的、自动化的格式,提供高质量的数据来源,为概算编制及投标报价做准备。在核心业务环节,智能组价算法根据语义识别、历史数据比对,自动应用合适定额或类比价格,大大提高了编审效率和准确性。在分析和决策方面,AI 技术可以深度发掘历史项目的相关数据并建立成本预测模型,并做多维度的、跨项目投资比对分析,给管理者提供更为精确的科学化决策支撑,从而使造价管理释放出更大的潜在价值。

3 系统总体架构设计

3.1 系统技术架构与模块划分

该系统采用分层和模块化的技术架构来设计,以保证系统的灵活性、可扩展性和可维护性。整体可划分为数据层、服务层、应用层。数据层完成各种数据结构化、非结构化数据的集成存储,包括定额库、材料价格库、历史项目库、实时信息价等。服务层是整个系统的核心,封装了全部的业务逻辑和 AI 算法能力,向最上方应用层提供强大而且基础的服务接口,比如智能出价服务、数据检索服务、流程引擎服务。应用层是面向不同用户角色提供的具体功能模块,包括设计提资管理系统、云造价系统、成本/信息价格库系统。各个系统模块之间使用标准接口来进行数据交换和功能调用,形成一个完整的业务闭环。

3.2 数据流与业务逻辑集成设计

系统的数据流设计是围绕着项目整个生命周期开展,从设计提资模块的结构化数据录入开始。提资数据经过审核通过后会推送给云造价系统,触发概算自动或者半自动的编制流程。编制时根据既定的规则从定额库、信息价库里自动获取到价格的数据,并且通过智能组价技术完成编制。生成的概算文件流转批准之后,其结果又被成本库系统利用,来生成清单及对比成本。招标分包时,还可自动划分工程标段。整条数据流从设计一直贯通到概算、成本、招标等环节,再从招标等环节反馈到概算编制,这种双向补充与反馈设计,保证了数据的一致性和时效性。业务逻辑的集成通过工作流引擎实现,把任务分派、版本管理、多人协同编辑、审批流程等逻辑固化在系统里,保障业务操作的规范性和高效性。

4 核心功能模块设计

4.1 设计提资管理模块

设计提资管理模块是整个系统的入口点,它主要是把设计数据标准、结构化、高效地采集并协同。这个模块有很完善的任务管理功能,允许管理员根据预定义的任务模版,给不同的专业设计师分派提资任务,明确校对、审核的步骤,做到将每个步骤的责任到人。系统提供给设计人的提资单界

面,是经过精心调研与设计,能够适应可研、初设、成本测算、招标分包等各个阶段数据的需求,项目的基本信息、特征属性及工程量的填写也清晰明了。模块的创新性在于其具有智能化分析功能,可以自动审查提资清单各项资料的规范性以及完整性,并且可以跟历史上典型的工程量数据做对比,然后自动生成关键数值的数据,例如单瓦工程量等,从源头上保证数据质量,为后续造价的自动化编制奠定坚实的基础。

4.2 云造价计算与分析模块

云造价计算分析模块是系统的主体计算分析引擎,担负着自动生成造价文件的任务。此模块能从提资模块获取结构化数据,按照最新版新能源行业概算编制规程,自动完成套定额、计取费用和生成单价等一连串复杂的计算任务,在结束时输出符合规范要求的概预算表。该模块支持多人在线共同编辑和审核,编制人和审核人可以在同一份文件上标注、修改以及反馈,并且所有操作都会被留下记录,文档的版本会非常清楚,能够查询。其强大的分析功能不止于单一项目的编制,可以将同一个项目的不同发展阶段造价纵向对比,也可把同一个类型的多个项目造价横向对比,通过投资数据多重对比分析,为造价控制、决策提供科学支持,使得造价管理的战略价值大大增加。

4.3 成本库与数据管理模块

成本库和数据管理模块作为系统的数据基础和知识库,为项目的历史数据积累和沉淀提供支持并使之有效应用。这个模块分类建立了主材价格库与单价成本库。主材价格库通过对接外部信息价和内部采购数据,建立一个实时更新、权威可信的价格参考系统。单价成本库就是将完成成本测算的工程数据进行结构化入库,形成了企业自有的历史项目造价数据库。所有库中的数据均可被云造价模块、智能组价功能调用并作为新项目造价编制的参考数据。此模块不仅解决数据复用问题,还持续积累数据和定向学习,使得企业的报价变得更准确,最后形成企业珍贵的数字资产及核心竞争力。

5 AI 关键技术实现

5.1 智能组价与定额匹配算法

智能组价是系统赋能提效的核心 AI 技术。其算法首先利用自然语言处理技术,从清单项目的名称、特征和备注中提取出关键参数。然后,系统用多模式融合的组价方式:定额组价模式将提取的特征跟定额库里的规则做精细化匹配,从而给出最优的定额子目;类比组价模式则从技经大数据库里面搜寻结构化的历史项目数据,找到相似项目,以它的价格作为参照。系统允许用户灵活配置组价方式和优先级,包括“定额优先”、“类比优先”,未配上的工程量给人工介入。该算法让人工脱离了繁重的定额套用与组价工作,提高了组价的效率与准确度。

5.2 多源数据融合与语义识别技术

系统的高效率运行离不开多种异构数据融合处理的能

力。该技术需要打通内部提资数据、定额数据、历史成本数据、外部数据等来源，并处理其标准、格式、语义不一致等问题。语义识别技术起决定性作用，在此可以理解设计人员非标准口语化的文字说明，并将之映射为系统可用的标准用语以及特性参数，这之前已经经过预设好的语言料库的校准。例如，把“光伏组件”、“风机基础”、“镀锌扁钢”用不同的描述方式进行标准化后，以保证后面的查询与匹配能够准确。

5.3 造价审查与差异分析机制

AI技术在造价审查环节上的应用主要是智能对比及差异分析。审核协同模式下系统可以比对送审稿与审定稿、或者不同版本的数据差值，精准确定数量、单价、金额的差异。通过预设的规则库，系统可以自动给变动异常（如单价偏离历史数据太多、主材的量价不正常等）加上标志和告警，提示审核人员要重点关注。所有的审查意见、所有的修改记录都结构化的保存，并可以自动生成规范的审查报告，清晰反应造价变更情况与审查内容。不但提高了审查效率，将审核经验固定成可复用的算法模型，使得审查过程更加客观、周全。

6 系统应用与效能评估

6.1 系统测试方法与指标

为了评估系统的性能必须使用多方面测验方式。功能测试需要覆盖核心业务场景，验证数据录入、智能组价、报表生成以及多级审批全流程的正确性以及稳定性。性能测试主要评估系统高并发访问以及大规模项目数据的处理情况下的响应、消耗资源情况以及系统是否稳定，并保证满足企业级应用的需求。对智能组价算法的准确性、召回率、语义识别的准确性设定量化的标准，并用大量的测试用例进行不断的优化。此外，用户接受度测试十分重要，需要收集设计、造价、管理等各个角色用户的反馈来评价系统的易用性和实用价值。

6.2 实际业务场景效能分析

在实际应用中，本系统的效率能够得到很大的提升。从效率层面看，采用自动化数据流转和智能运算，可以让造价编制人员摆脱繁重的手工劳作，将概预算文件的编制及审核周期大大缩短。从质量角度来讲，基于结构化数据和AI算法，能够有效降低由于人员疏忽造成的误差，提升造价文件的准确性和合理性。在线上化流程和清晰的版本管理的协同下，改变了传统串行、低效的协作模式，实现了跨部门、跨专业的实时高效协同。从决策层来说，数据驱动多角度对比分析，给企业提供的决策力前所未有，可以用来更加精准的成本控制和投标策略的制定。

6.3 系统优化与扩展方向

系统的发展是一个不断的迭代和优化过程。未来优化方向主要应集中于：提升AI算法精度以及覆盖范围、扩充语料库去识别更多的非标准表述、增强机器学习模型给造价的精确预测上。在扩展性上，系统可以考虑和BIM设计模型进行深度集成，在三维设计模型直接获取工程量并完成造价计算更高阶的应用。系统能力还可以延伸到项目施工过程中的动态成本管理及工程竣工决算中去，从而真正的实现全生命周期的成本闭环管理。并且要与物联网技术相结合，实现对施工现场人工、设备、材料等实时数据的采集，用来驱动成本控制，这是未来重要的扩展方向。

7 结语

本文针对新能源工程造价管理的核心需求，设计了一套结合了AI技术的信息管理系统。该系统通过一体化的平台架构，有效的破解了传统造价软件功能单一、造价数据存在孤岛、造价工作协同效率低等行业痛点，实现自设计提资到概算编制、成本测算以及分包招标全流程的智能化管理。着重突破的智能组价、语义识别等核心技术，让造价管理走向自动化与精准化的目标得以实现。本系统的应用可大大改善造价工作效率及质量，利用数据累积及智能分析得出的有效数据，可作为支撑企业战略发展及价值创造的金钥匙，最终助力新能源行业高质量发展。

参考文献

- [1] 易晓亮,欧阳海瑛,郭大朋.新能源项目造价智能辅助评审系统研究[J].项目管理评论,2021,(06):54-56.
- [2] 彭雷雷.基于人工智能的工程造价估算系统优化设计[J].信息记录材料,2025,26(07):122-124.
- [3] 郝同金.人工智能技术与工程造价的融合应用[J].中国建筑金属结构,2025,24(12):193-195.
- [4] 张羽洋.基于人工智能的工程造价自动计算系统设计[J].信息记录材料,2025,26(05):41-43+46.
- [5] 王曙铭.能源工程造价管控要点[J].煤气与热力,2023,43(08):32-34.
- [6] 徐洁.造价管理在新能源发电工程成本控制中的应用[J].内蒙古煤炭经济,2022,(06):135-137.
- [7] 陈路路,黄斌,颜红.可持续发展目标下新能源电力工程造价控制策略[J].电气时代,2025,(03):112-115.
- [8] 李岚,易晓亮.新能源项目造价智慧管理研究及应用[J].企业管理,2022,(S1):434-435.
- [9] 易晓亮,欧阳海瑛,郭大朋.新能源项目造价智能辅助评审系统研究[J].项目管理评论,2021,(06):54-56.
- [10] 徐潇洁.工程造价信息化管理研究[J].房地产世界,2023,(21):103-105.

Intelligent Diagnosis and Adaptive Correction System Design for Fuel Belt Deviation Faults in Thermal Power Plants

Weiguo Zhou

Guoneng Jilin Longhua Thermal Power Co., Ltd. Jilin Thermal Power Plant, Jilin, Jilin, 132021, China

Abstract

The fuel belt transportation system is the core component of fuel delivery in thermal power plants. Belt deviation, the most common and highly hazardous fault, can lead to equipment wear, tearing, and system shutdowns. Traditional correction methods rely heavily on manual inspections and passive adjustments, making it difficult to promptly and accurately address deviation issues under complex operating conditions. This paper systematically analyzes the causes and characteristics of belt deviation faults, proposes an intelligent diagnostic method integrating multi-source sensing, image recognition, and deep learning, and designs an adaptive correction system based on intelligent perception and control. Through multi-parameter fusion and data-driven modeling, the system achieves real-time early warning and hierarchical identification. Integrated with intelligent actuators and adaptive algorithms, it automatically adjusts correction devices to enhance intelligent and autonomous correction capabilities. Engineering applications demonstrate that this system effectively reduces deviation accident rates, minimizes equipment wear, improves fuel delivery continuity and safety, providing technical support for intelligent operation and maintenance as well as equipment upgrades in thermal power plants.

Keywords

Thermal power plant; Fuel belt; Deviation fault; Intelligent diagnosis; Adaptive correction; Deep learning; Intelligent operation and maintenance

火电厂燃料皮带跑偏故障的智能诊断与自适应纠偏系统设计

周维国

国能吉林龙华热电股份有限公司吉林热电厂，中国·吉林 吉林 132021

摘 要

燃料皮带运输系统是火电厂燃料输送的核心环节，皮带跑偏是最常见且危害性极大的故障，易导致设备损耗、撕裂及系统停机。传统纠偏方式多依赖人工巡检和被动调整，难以及时、精准应对复杂工况下的跑偏问题。本文系统分析了皮带跑偏故障成因及特征，提出集成多源传感、图像识别和深度学习的智能诊断方法，设计了基于智能感知与自适应控制的自动纠偏系统。通过多参数融合与数据驱动模型，实现实时预警和分级识别，系统集成智能执行器与自适应算法，可自动调节纠偏装置，提升纠偏智能化和自主性。工程应用表明，该系统有效降低跑偏事故率，减少设备损耗，提高燃料输送连续性和安全性，为火电厂智能运维和设备升级提供技术支撑。

关键词

火电厂；燃料皮带；跑偏故障；智能诊断；自适应纠偏；深度学习；智能运维

1 引言

随着能源行业自动化、智能化水平的不断提升，火电厂对燃料输送系统的安全性、稳定性与高效性的要求日益严苛。燃料皮带运输系统作为连接燃煤接收、储存与锅炉燃烧的桥梁，是火电厂连续发电生产的基础保障。皮带机运行过程中，因设备磨损、结构变形、安装不当、负载不均、环境扰动等多种因素，极易发生皮带跑偏故障。皮带跑偏不仅威

胁设备安全，还可能造成燃料溢撒、环境污染、能耗增加，严重时会导致整条皮带撕裂、系统停机、经济损失巨大。

长期以来，火电厂皮带纠偏主要依赖人工巡检与传统机械限位装置，这些方法响应滞后、纠偏效果有限，难以满足大规模、高负荷、无人值守等现代生产需求。近年来，随着人工智能、传感技术、机器视觉和自适应控制等新技术在工业领域的广泛应用，基于智能感知与自主控制的皮带跑偏故障诊断与纠偏系统成为行业研究与工程创新的热点。智能诊断系统通过多维数据感知、图像分析与模式识别，可实现皮带跑偏的早期预警和分级管理；自适应纠偏装置结合自动执行机构与智能算法，可实现对皮带轨迹的连续、动态、精

【作者简介】周维国（1974—），男，中国山东安丘人，本科，工程师，从事机车检修、燃料皮带研究。

准调节，极大提升了皮带运输系统的安全性与智能化水平。

本文聚焦火电厂燃料皮带跑偏故障的智能诊断与自适应纠偏系统设计，围绕故障机理、诊断技术、系统架构、智能算法与工程应用等关键环节展开研究，为火电厂数字化、智能化运维升级提供理论支撑与技术路径。

2 火电厂燃料皮带跑偏故障成因与危害分析

2.1 燃料皮带跑偏的主要成因

皮带机跑偏是由多种因素综合作用下产生的复杂动态过程。首先，设备本身结构变形、滚筒轴线不平行、托辊组装不正、张紧装置失效等机械因素，会导致皮带横向受力失衡，造成皮带在运行中逐步偏离中心。其次，皮带机基础沉降、支架松动、地面不平等外部环境变化，会使皮带轨迹产生不可预知的偏移。再次，物料分布不均、燃料湿度变化、局部堆积等工艺操作问题，也会影响皮带受力和运动轨迹。此外，皮带老化、接头质量不良、外部异物卡阻等因素均可诱发跑偏。随着皮带运行距离延长与负载变化增大，跑偏现象的发生概率与严重程度进一步加剧。

2.2 皮带跑偏故障对火电厂生产的危害

皮带跑偏是影响火电厂燃料输送系统可靠性的重要隐患。轻度跑偏会导致皮带与托辊、挡板等部件产生非正常摩擦，加速设备磨损，降低输送效率；严重跑偏可能引起皮带边缘撕裂、燃料溢散、堆积堵塞，甚至损坏托辊、滚筒等关键部件，造成系统故障停机。跑偏故障还会带来安全生产风险，增加现场检修维护压力和运行成本。对于高负荷运行和自动化水平较高的火电厂，皮带跑偏事故具有较强的突发性和链式放大效应，若不能及时发现和有效纠偏，将严重威胁厂区燃料保障和安全生产。

2.3 传统纠偏方式的局限性

当前火电厂皮带机纠偏多采用限位开关、被动托辊、机械杠杆等装置，主要依靠人工定期巡检和现场调整。受限于人员巡检效率、故障发现时效性以及设备自适应能力，传统纠偏方式存在响应滞后、调节幅度有限、重复劳动量大等问题，难以应对复杂动态工况和高强度输送任务。部分自动纠偏装置受制于单一传感信号，灵敏度与精准度不足，对多点、多参数、多场景下的跑偏状态识别能力较弱，无法实现精细化、智能化管理。新型智能诊断与自适应纠偏技术亟须推广与应用。

3 皮带跑偏智能诊断系统设计与关键技术

3.1 多源传感与信息融合技术

高效、精准的跑偏智能诊断依赖于多源传感信息的实时采集与融合。系统采用红外、激光、超声、力敏、加速度、压力等多种传感器，布设于皮带关键节点（如驱动滚筒、导向托辊、回程段、张紧装置等），实现对皮带边缘位置、张力分布、振动状态、负载变化等参数的高频采集。同时，结合视频监控与机器视觉技术，获取皮带运行全景图像，实时

分析皮带轨迹和边缘状态。通过传感器网络与工业总线，将各类数据上传至中央处理单元，实现多参数同步采集、多维信息协同感知，为智能诊断与决策提供数据基础。多源数据融合可提升故障识别的鲁棒性和准确性，支持对复杂工况的全面感知。

3.2 基于深度学习的跑偏识别与分级预警

传统基于阈值的故障判别难以适应动态、多变的运行环境。本文引入基于深度学习的智能诊断模型，利用卷积神经网络（CNN）、时序网络（LSTM）等算法，对采集到的传感器数据与图像信号进行特征提取与模式识别。通过对皮带正常与异常状态样本的训练，模型可自动学习跑偏的时空特征，实现对不同类型、不同程度跑偏的分级识别与预警。深度学习模型可实现早期、轻微跑偏的快速检测和严重跑偏的即时报警，为后续纠偏提供决策支持。系统可结合历史数据与实时数据进行自我学习和模型优化，不断提升诊断精度与适应能力。

3.3 智能数据处理与异常趋势分析

在皮带机运行过程中，系统需应对大量高速变化的数据流，这对数据处理与趋势分析技术提出了更高要求。为此，智能诊断系统采用边缘计算与云端协同架构，将前端采集的各类传感器数据在边缘侧进行初步预处理、特征提取与状态判别，大幅提升数据响应速度与本地异常识别能力。通过集成异常检测算法，系统能够对跑偏信号中的微小变化进行高灵敏捕捉，及时甄别和定位潜在故障隐患。趋势分析模块基于历史和实时数据，对跑偏幅度、变化速率及重复发生频次等关键指标进行动态监控和智能预测，为设备健康状态的全周期管理提供数据支撑。智能数据处理不仅显著提升了故障诊断与预警的效率和准确性，还为维护人员提供了故障发展趋势与优化建议，为运维决策和系统持续优化提供了科学依据，极大提升了燃料皮带运输系统的智能化管理水平。

4 自适应纠偏系统的架构与实现路径

4.1 自适应纠偏装置的系统构成

自适应纠偏系统主要由智能控制器、执行机构、反馈传感器、现场操作面板等部分组成。智能控制器作为系统“大脑”，负责接收诊断系统的故障信息，实时计算最优纠偏策略并输出控制指令。执行机构包括电动、液压、气动等多类型纠偏装置，可对托辊、滚筒、张紧器等部件进行动态调节，实现皮带轨迹的自动复位。反馈传感器实时监测纠偏效果，并将运行数据反馈给控制器，形成闭环调节。系统可根据不同运行工况和故障级别，自主选择纠偏幅度、速度和调节方式，保证纠偏动作的灵敏性和可靠性。

4.2 自适应控制算法设计

为实现高效、精准的皮带纠偏控制，系统采用基于模型预测控制（MPC）与自学习优化算法的复合自适应控制策略。MPC 算法根据系统当前状态和未来运行趋势，预测

最优调节路径,实现对多参数、多约束的动态控制。自学习算法则通过对历史纠偏数据和效果的实时反馈,动态优化控制参数,提升系统自适应能力和鲁棒性。纠偏算法支持多级响应和分步纠偏,既能实现对轻度跑偏的快速修正,也能对重度跑偏采取渐进式、分段式精细调节,确保皮带运行的连续性和安全性。系统具备在线参数调整和异常自我修复功能,支持远程诊断与自我升级。

4.3 系统集成与现场部署优化

智能诊断与自适应纠偏系统需与现有 DCS、SCADA 等自动化平台深度集成,实现数据互联、指令协同和信息共享。系统部署前应根据火电厂具体现场工况,合理选择传感器类型与布置方式,优化执行机构布局和控制线路,确保全流程数据流畅与控制高效。系统应具备防尘、防爆、防腐蚀等工业环境适应能力,确保在高温、高湿、高粉尘等恶劣工况下长期稳定运行。通过现场调试与多工况测试,完善系统自适应参数,提升系统兼容性与工程应用价值。

5 系统工程应用与运行效果评估

5.1 智能系统在典型火电厂的工程部署

以某大型火电厂为试点,本文对智能诊断与自适应纠偏系统进行了工程化部署与应用验证。系统在主燃料皮带输送线上布设多组激光位移传感器与高分辨率工业视觉单元,前端集成边缘计算网关实现数据的快速采集与初步处理,后端配套智能控制终端对各类异常状态进行实时响应与远程控制。通过端—边—云协同架构,系统实现了对皮带跑偏状态的全流程实时监控和自动调节。试运行阶段,智能系统有效覆盖了皮带输送主线各关键节点,实现了自动报警、动态纠偏和远程可视化运维。用户可借助智能运维平台远程访问皮带状态、故障预警与历史日志,便于数据追溯、故障分析及运维决策支持。该工程部署显著提升了燃料输送系统的运行智能化、自动化水平,为火电厂高效、可持续运维提供了坚实技术支撑。

5.2 系统运行效果与经济技术评价

智能纠偏系统投入运行后,试点厂区的皮带跑偏事故发生率较传统人工巡检系统下降 70% 以上,极大降低了因跑偏导致的设备损伤与停机风险。设备全生命周期管理数据显示,皮带及相关部件的使用寿命延长,燃料输送的中断率明显减少,全年设备维护与更换成本同比下降超过 30%。系统可实现 24 小时全天候无人值守,自动适应不同负载、气候与物料特性,纠偏响应速度快且调节幅度精准,提升了设备运行的稳定性和生产效率。用户反馈表明,系统兼容性强,既可无缝接入现有自动化平台,也支持与其他智能装备集成,为后续全厂区甚至多厂区的规模化推广奠定了良好基

础。该智能系统的经济与技术效益显著,有效减轻了人工运维压力,提升了火电厂生产的安全性与经济性。

5.3 智能诊断与纠偏系统的局限性与改进方向

尽管智能诊断与自适应纠偏系统极大提升了燃料皮带运输的智能化与自动化水平,但在系统应用中仍存在一定局限。首先,多源传感器数据融合的实时精度和一致性在极端工况、强干扰环境下仍有提升空间,对传感器稳定性与算法鲁棒性提出更高要求。其次,边缘计算资源的分配和利用效率有限,部分高频数据或复杂模型推理仍需依赖后端服务器,影响了系统的响应速度和自治能力。第三,针对新型皮带材料、复杂运输场景及突发故障的模型迁移学习和泛化能力有待加强。未来,应进一步优化 AI 算法的自适应与迁移学习能力,提升系统对多样化设备和工况的适应性。建议加大工业互联网与大数据分析的深度融合,实现多厂区、多环节的智能联动运维。推进系统模块化、标准化建设,降低部署和运维成本,提升智能纠偏技术的行业适配性与推广应用能力,为火电厂智慧运维体系的持续升级提供坚实保障。

6 结语

火电厂燃料皮带跑偏故障的智能诊断与自适应纠偏系统,是推动电力企业运维智能化、生产安全化、管理高效化的重要技术创新。本文从跑偏故障机理出发,构建了基于多源感知、深度学习和自适应控制的智能系统架构,系统性阐述了核心技术实现路径与工程应用成效。实际应用表明,智能系统显著提升了故障诊断的准确性与及时性,降低了设备损耗和人工成本,增强了燃料运输系统的安全性和智能化水平。随着智能制造、工业互联网和人工智能技术的持续进步,智能诊断与自适应纠偏系统将在火电厂乃至更广泛工业领域发挥更大作用。未来,应加强智能系统的多场景适配能力、持续优化算法模型、深化数据协同与智能决策,推动燃料皮带运输系统全面升级,为火电厂智慧运维和高质量发展提供坚实保障。

参考文献

- [1] 李虎,王哲.火电厂输卸煤燃料系统多维度无人值守综合监控平台设计研究[J].中国高科技,2025,(14):13-15.
- [2] 宋小红.火力发电厂输煤系统安全控制与运行管理[J].中国科技信息,2025,(13):156-158.
- [3] 胡伟.火电厂燃煤输送系统机械设备维护工艺研究[J].现代制造技术与装备,2025,61(02):142-144.
- [4] 姜尧,张艳宾,马文韬,等.智慧化巡检技术在火电厂输煤栈道的应用与优化设计[J].中国高科技,2024,(21):120-122.
- [5] 刘仕林.火电厂输煤传送带故障巡检系统设计研究[D].大连海事大学,2024.

Detection and Maintenance Strategy Optimization for Steam Turbine Condenser Tube Leakage in Thermal Power Plants

Feng Gao

National Energy Jilin Electric Power Engineering Technology Co., Ltd., Changchun, Jilin, 130114, China

Abstract

As the core component of thermal power plant heat systems, steam turbine condenser tubes are prone to leakage and perforation under prolonged exposure to high temperatures, humidity, and corrosive environments, significantly impacting unit efficiency and safety. This study systematically analyzes the mechanisms and detection technologies for condenser tube leakage, reviews mainstream diagnostic methods including negative pressure testing, tracer gas detection, acoustic emission, and infrared thermography, and evaluates their engineering applicability. Through case studies, it examines limitations of traditional maintenance approaches and proposes optimized strategies including intelligent online monitoring, scheduled maintenance, preventive repair, and full lifecycle management. Practical results demonstrate that these optimization measures enhance early leakage detection rates, extend equipment lifespan, and reduce operational costs. The research provides theoretical and engineering support for condenser pipeline management and fault prevention in thermal power plants, promoting equipment intelligence and safe operation.

Keywords

Thermal power plant; Steam turbine; Condenser; Tube leakage detection; Maintenance; Intelligent monitoring; Strategy optimization

火电厂汽轮机凝汽器管泄漏检测与检修维护策略优化

高峰

国能吉林电力工程技术有限公司, 中国 · 吉林 长春 130114

摘 要

汽轮机凝汽器作为火电厂热力系统核心, 其管道长期在高温、湿热与腐蚀环境中易发生泄漏、穿孔等问题, 严重影响机组效率与安全。本文系统分析了凝汽器管泄漏的机理与检测技术, 梳理了负压法、示踪气体法、声发射、红外热成像等主流诊断手段, 并评估其工程适用性。结合案例, 剖析传统检修局限, 提出智能在线监测、定期维护、预防性修复与全寿命管理等优化策略。实践表明, 优化措施可提升泄漏早期发现率、延长设备寿命、降低运维成本。研究为火电厂凝汽器管道管理与故障防控提供理论与工程支撑, 促进设备智能化与安全运行。

关键词

火电厂; 汽轮机; 凝汽器; 管泄漏检测; 检修维护; 智能监测; 策略优化

1 引言

在火电厂热力系统中, 凝汽器承担着将汽轮机排汽冷却凝结为水的关键功能, 其管系数量庞大、结构复杂、工作环境恶劣, 是全厂最为薄弱的部位之一。凝汽器管道的任何泄漏都会直接破坏真空环境, 影响汽轮机的运行效率和机组的经济性, 严重时还会引发循环水串入汽侧、引发金属腐蚀、污染冷凝水等连锁反应。随着火电厂机组容量的增大和运行工况的复杂化, 凝汽器管道泄漏的隐蔽性和突发性日益突出, 给运行维护带来了极大挑战。

长期以来, 火电厂对凝汽器管泄漏的管理主要依赖人工巡检、停机试压和被动抢修, 存在检测灵敏度低、响应速度慢、检修周期长等问题。部分厂区虽然引进了局部自动检测设备, 但受制于技术条件和管理水平, 往往难以实现全覆盖、全过程的泄漏监控和预防性维护。随着智能检测、数据分析和材料修复等新技术的发展, 构建科学、高效的凝汽器管泄漏检测与维护体系已成为提升火电厂设备管理水平和运行安全的核心诉求。本文围绕火电厂凝汽器管泄漏的成因、检测与维护技术展开研究, 提出针对性优化策略, 并通过工程实践验证其有效性和可推广性。

【作者简介】高峰 (1980-), 男, 中国吉林长春人, 本科, 工程师, 从事火电厂汽轮机检修研究。

2 凝汽器管泄漏机理及故障特征分析

2.1 泄漏的主要成因与发展过程

凝汽器管泄漏的发生通常由多种内外部因素共同作用。首先,管材本身的耐腐蚀性能是影响泄漏风险的关键。常用的不锈钢、黄铜、钛合金等管材在长期服役过程中,受电化学腐蚀、应力腐蚀、点蚀、缝隙腐蚀等多种机制影响,会逐渐出现局部变薄、穿孔。其次,循环水中含有的杂质、氯离子等腐蚀性物质,易加剧管壁的腐蚀速率,尤其在换季负荷波动、开停机频繁等情况下,局部应力与腐蚀环境耦合作用更加明显。此外,机械振动、流体冲刷、水锤冲击等因素也易导致管道机械损伤与疲劳裂纹。局部堵塞或水垢沉积则会引起流速异常和温差应力,加剧薄弱部位损伤。管道一旦出现微小裂纹或穿孔,泄漏水流在真空吸力作用下迅速扩大,极易发展为大面积故障。

2.2 泄漏故障的主要表现与影响

凝汽器管泄漏故障在实际运行过程中具有较为典型的表现形式,首先表现为凝汽器真空度的显著下降,这直接影响机组的热效率与输出功率。同时,冷凝水的电导率会明显升高,表明非冷凝水介质如循环水或杂质已经渗入凝汽系统,导致冷凝水品质劣化。当泄漏进一步加重时,排汽压力异常升高,汽侧水位也出现波动,严重威胁机组的安全稳定运行。若循环水大量泄漏至汽侧,不仅导致锅炉补给水系统受到污染,还可能引发整个热力系统的协同失效。此外,泄漏点局部往往发生金属腐蚀与结垢,长期运行下极易形成堵塞,进一步降低管道流通能力。更为严峻的是,泄漏引起的负荷降低与非计划停机,将造成电厂巨大的经济损失。由于早期泄漏信号微弱且分散,导致故障难以及时诊断和精准定位,极大地增加了设备健康管理的难度,并提升了运行维护的风险与压力。因此,加强泄漏故障的在线监测与快速诊断,成为提升火电厂运行可靠性的重要课题。

2.3 常见故障案例剖析

以某600MW火电厂为例,其在高负荷运行期间突遇凝汽器真空度急剧下降,同时冷凝水电导率短时间内迅速升高。事故发生后,运维人员实施紧急停机检修,发现多根凝汽器换热管存在点蚀穿孔,沿焊缝部位亦检测出微小裂纹,并伴有局部腐蚀剥落现象。进一步检测发现,泄漏点集中在水流冲击较强且杂质沉积严重的管段。通过对管材成分与微观结构的分析,发现局部金属元素分布不均和组织缺陷,是诱发应力腐蚀及穿孔的关键内因。本案例表明,凝汽器管泄漏故障通常由多种因素共同作用,包括水质恶化、材料劣化、应力集聚及运行管理疏漏等。此案例暴露出设备运行和材料选型环节的薄弱点,凸显了强化运行参数监控、提升管材品质和规范检修维护的重要性,也为同类型机组的故障预防与管理提供了有益参考。

3 凝汽器管泄漏检测技术与适用性分析

3.1 传统检测方法及其局限性

火电厂凝汽器管泄漏的传统检测方法主要包括人工巡检、真空保持测试、压差法和注水法等。这些方法通常依赖于设备停机和冷却,检测过程耗时较长,且对人员经验依赖较大。在实际操作中,人工巡检难以发现管道早期微小泄漏,存在较大的漏检概率。真空保持和注水法虽然能够在一定程度上判断系统密封性,但对微小裂纹和隐蔽缺陷的灵敏度有限,易出现误报和漏报。此外,压差法受限于工况变化,容易受到外部环境扰动影响,导致检测结果不稳定。总体而言,传统检测方法检测周期长、覆盖面有限、实时性和准确性不足,无法有效应对现代火电厂对设备安全、运行效率和智能化管理的高标准要求。这些局限性使得传统方法在实际应用中难以满足凝汽器管泄漏早期预警和快速处置的需求,亟须引入先进检测技术实现突破。

3.2 智能化与无损检测技术应用

针对传统检测手段的不足,火电厂逐步引入以智能化和无损检测为代表的新型技术体系。声发射检测技术利用传感器实时捕捉泄漏产生的高频声波信号,能够在设备运行状态下实现对微小泄漏的在线监控;红外热成像技术通过监测管道表面的温度异常区域,快速锁定潜在泄漏点,适合大面积、多回路的泄漏排查;示踪气体法通过注入安全惰性气体并检测其在凝汽器内的浓度变化,实现对泄漏点的高灵敏度定量定位;超声波检测技术则可有效识别管道壁厚减薄和微小裂纹等早期损伤。多种智能检测手段的协同应用,大幅提升了凝汽器泄漏早期发现率和定位准确性。无损检测技术还可在不停机条件下开展,极大缩短了维护周期,降低了非计划停机风险,为设备健康管理和预防性维修提供了坚实的数据基础。

3.3 数据融合与在线监测系统构建

伴随着工业物联网、智能传感和数据分析技术的发展,火电厂逐步构建起基于多源数据融合的凝汽器管泄漏在线监测系统。系统集成真空度、电导率、振动、声发射、温度等多类型传感器,结合数据采集终端与智能诊断平台,实现对凝汽器运行状态的全过程、全方位实时监控。通过大数据分析 with 智能算法,系统可自动判别设备健康状况,动态识别泄漏风险趋势,并支持远程报警、故障溯源及预防性维护决策。在线监测系统不仅提升了故障诊断的灵敏度和响应速度,还能够有效整合海量运行数据,支撑设备全生命周期管理和数字化转型。该平台已成为提升火电厂运行智能化水平、保障系统安全高效运行的重要基础,对实现火电厂设备管理的现代化与智能化具有深远意义。

4 凝汽器管检修与维护工艺优化路径

4.1 定期检修与风险评估机制

为有效延长凝汽器管道使用寿命、降低突发泄漏风险,

火电厂应建立科学的定期检修与风险评估机制。首先,应充分利用设备状态监测和历史运行数据,开展管道健康评估,精准识别高风险管段和重点监控对象,实现检修工作的有序化和精细化。结合定期停机检修与在线监测系统,针对性开展管道的清洗、堵漏、补焊或更换等维护措施,有效提升隐患治理效率。同时,推行基于失效模式的风险分级管理,根据不同类型的潜在故障制定差异化维护策略,合理配置检修资源,优化维护流程。定期风险评估不仅有助于早期发现潜在隐患、降低设备故障率,还能为检修计划的动态调整与科学决策提供数据支撑,为电厂安全稳定运行提供坚实保障。

4.2 新型修复材料与工艺推广应用

针对凝汽器管道普遍存在的腐蚀和磨损问题,火电厂应积极推广新型防腐合金管材、复合涂层以及自愈合堵漏材料等前沿技术手段。新一代防腐合金和多功能复合涂层能够有效阻隔腐蚀介质,延缓管道表面材料的劣化进程。自愈合堵漏材料在微裂纹或局部穿孔出现时能迅速封堵缺陷,显著提升系统的应急保障能力。在管道维修过程中,采用高性能焊接材料及先进焊接工艺,有助于提升补焊区域的结构完整性,减少热影响区的二次损伤。部分电厂还探索激光熔覆、冷喷涂等表面强化工艺,这些技术可显著增强管道的耐腐蚀与耐磨耗性能。对于已出现局部穿孔的管段,则可采用弹性堵漏剂、管内补衬或机械夹具进行修复,快速恢复凝汽器系统的运行能力。上述新型材料和工艺的持续推广,为提升凝汽器管道整体可靠性和延长服役寿命提供了有力的技术支撑。

4.3 精细化维护与全生命周期管理

现代火电厂需推进凝汽器管道的精细化维护与全生命周期管理。结合大数据平台建立设备健康档案,记录每次检修、修复、材料更换等全过程信息,实现可追溯的数字化管理。通过分析运行数据和失效案例,持续优化检修工艺和维护策略,提升决策的科学性和前瞻性。推动智能化远程监控、专家在线指导和检修流程标准化,提升整体运维效率。加强运维人员培训和技能考核,增强团队的专业能力和质量意识。以全生命周期理念为引领,实现设备健康运行、经济高效和本质安全的有机统一。

5 工程实践与管理成效分析

5.1 典型案例应用与效果评估

某大型火电厂在应用智能化泄漏检测与维护优化策略后,凝汽器管道故障率显著下降。通过多源数据在线监测与声发射系统结合,提前发现微小泄漏点,避免了多起大面积失效事故。新型修复工艺在现场快速堵漏和补焊后,设备恢复周期缩短 40%,年运维成本下降 15%。机组运行真空度

稳定,冷凝水品质提升,设备整体运行效率明显提高。工程实践证明,智能检测与精细化维护体系有效提升了设备本体健康水平和运维管理效能。

5.2 经济与安全性提升分析

实施泄漏检测与维护优化策略后,火电厂凝汽器的运行经济性和安全性同步增强。智能监测系统减少了人工巡检和非计划停机次数,提升了设备利用率和全厂发电量。先进材料和修复技术降低了材料采购和维护费用,延长了设备使用寿命。安全风险得到有效控制,重大事故发生率明显下降。全周期经济测算显示,优化策略下的设备管理模式可为企业带来可观的经济效益和社会效益,推动火电厂实现安全、高效、绿色发展。

5.3 管理建议与未来发展方向

为持续提升凝汽器管道泄漏检测与维护管理水平,建议火电厂深化智能化监控和数字化管理平台建设,扩大数据覆盖范围与分析深度。加强运维队伍的专业培训和技能储备,推进先进材料和修复工艺的标准化应用。重视与科研机构、设备厂商的合作创新,推动检测、修复与管理技术持续迭代升级。未来可进一步引入人工智能、大数据分析、数字孪生等前沿技术,实现凝汽器管道的全周期智能健康管理,助力火电厂设备本质安全与高质量运行目标的全面实现。

6 结语

凝汽器管泄漏作为火电厂设备管理中的核心难题,其检测与维护水平直接决定了机组的安全性与经济性。本文系统梳理了泄漏的机理、检测技术与维护工艺,提出了基于智能监测、数据分析和精细化管理的优化策略。工程应用表明,优化措施能显著提升泄漏早期发现和高效修复能力,降低故障率和运维成本,增强设备本体的健康和可持续运行能力。未来,火电厂应持续推进智能化、数字化和全生命周期管理,不断创新检测与维护技术,为我国电力行业的安全、经济和绿色发展提供坚实保障。

参考文献

- [1] 朱鹏,赵晟,刘潮立,等.凝汽器除垢技术在电厂节能减碳降污中的应用分析[J].上海节能,2024,(02):311-315.
- [2] 代雨辰.基于机器学习的凝汽器设备故障分类方法研究[D].东南大学,2022.
- [3] 韩建.新型凝汽器胶球清洗系统数值模拟及控制系统研究[D].华北电力大学,2019.
- [4] 桑秀军,张若龙,吴伟.汽轮机凝汽器换热管腐蚀泄露的研究与分析[J].电力设备管理,2018,(01):75-77.
- [5] 谭聪,金俊忠.燃气-蒸汽联合循环汽轮发电机组凝汽器真空下降分析[J].燃气轮机技术,2018,31(01):56-59.

Optimization of Dust Pollution Control Technology and Assessment of Energy Conservation and Emission Reduction in Coal Conveying Systems at Thermal Power Plants

Dongsheng Xu

Guoneng Jilin Longhua Thermal Power Co., Ltd. Jilin Thermal Power Plant, Jilin, Jilin, 132021, China

Abstract

The coal conveying systems in thermal power plants generate substantial coal dust during fuel transportation, which not only endangers workers' health but also accelerates equipment wear, causes environmental pollution, and creates safety hazards. With increasingly stringent environmental policies and growing pressure for energy conservation and emission reduction, optimizing dust control technologies in coal conveying systems has become a focal point of industry attention. This paper systematically examines the primary sources and hazards of dust pollution in thermal power plant coal conveying systems, analyzes the applicability and limitations of existing dust suppression and collection technologies, and focuses on integrated optimization pathways for advanced techniques such as high-efficiency mist suppression, enclosed negative-pressure conveying, and intelligent dust collection. Through case studies from typical engineering projects, this study evaluates their actual energy-saving and emission-reduction effects. Research findings indicate that through coordinated application of multiple technologies, coal conveying systems in thermal power plants can significantly reduce both dust emissions and energy consumption levels, providing strong support for the green and low-carbon transformation of the power industry.

Keywords

thermal power plants; coal conveying systems; dust pollution; dust suppression technology; energy conservation and emission reduction; system optimization

火电厂输煤系统粉尘污染控制技术优化及节能减排效果评估

徐东升

国能吉林龙华热电股份有限公司吉林热电厂，中国·吉林 吉林 132000

摘 要

火电厂输煤系统在燃料输送过程中易产生大量煤尘，不仅威胁作业人员健康，还加剧设备磨损、引发环境污染及安全隐患。随着环保政策趋严与节能减排压力增大，输煤系统粉尘治理技术的优化成为行业关注的焦点。本文系统梳理了火电厂输煤系统粉尘污染的主要来源与危害，分析了现有抑尘与收尘技术的适用性与局限性，重点探讨了高效抑尘喷雾、密闭负压输送、智能收尘等先进技术的集成优化路径，并结合典型工程案例，评估其节能减排的实际效果。研究表明，通过多技术协同应用，火电厂输煤系统粉尘排放与能耗水平可显著降低，为电力行业绿色低碳转型提供有力支撑。

关键词

火电厂；输煤系统；粉尘污染；抑尘技术；节能减排；系统优化

1 引言

火电厂作为我国电力供应的主力军，其燃料系统的绿色化与清洁生产水平直接关系到国家能源结构调整与环保目标的实现。输煤系统作为燃料供应链条中的核心环节，常年高负荷运行过程中会产生大量煤尘，造成作业区空气污染，影响设备健康并威胁作业人员安全。粉尘排放还易诱发爆炸、火灾等安全事故，成为火电厂安全管理与环保治理中

的突出难题。随着“双碳”目标和环境标准的日益严格，输煤系统粉尘污染控制与节能减排已成为提升电厂核心竞争力、实现可持续发展的关键环节。当前，行业内普遍应用喷雾抑尘、密闭输送、机械收尘、负压除尘等多种技术，但仍存在治理效果不稳定、能耗高、维护复杂等痛点。本文在梳理粉尘污染成因的基础上，分析了主流治理技术的优势与不足，提出了面向绿色低碳目标的系统集成优化路径，并通过实际运行数据，对节能减排效果进行科学评估，为火电厂燃料系统粉尘治理提供理论与工程参考。

【作者简介】徐东升（1978-），男，中国吉林吉林人，本科，工程师，从事燃料输煤研究。

2 火电厂输煤系统粉尘污染的成因与危害

2.1 粉尘污染的主要来源与分布特点

火电厂输煤系统在燃料卸车、转运、筛分、落煤及皮带运输等多个环节，因煤炭物料的破碎、扬撒、振动及气流扰动，易产生大量可吸入煤尘。卸车口、转运站、落煤管、皮带机头尾等位置，成为粉尘污染最为集中的高发区域。尤其是在落煤管下部与皮带机交界面，煤尘因重力落体和气流扰动复合作用，呈现高浓度悬浮和迅速扩散的趋势。煤尘粒径分布广，轻质细微颗粒极易随气流飘散，不仅污染范围广、悬浮时间长，还大大增加了治理难度。设备高速运行和频繁启停进一步促进了粉尘的二次扬散，细粒煤尘通过通风系统进入厂区其他区域，恶化整体空气质量。不同煤种的含尘量、含水率、粒度分布等物理特性，也会直接影响粉尘的生成强度与防控难度，对治理技术提出更高要求。

2.2 粉尘污染的危害分析

长期高浓度煤尘暴露对火电厂健康、安全和可持续发展造成多重威胁。对作业人员而言，煤尘吸入可诱发尘肺病等职业病，严重影响身体健康与生产安全。粉尘堆积在厂区和设备表面，不仅成为二次污染源，加重环境治理负担，还导致设备密封件、轴承等部件磨损加剧，缩短设备寿命、增加检修和维护频次。煤尘遇明火极易发生火灾或爆炸，成为火电厂安全管理重大隐患。部分细粒粉尘随雨水冲刷形成含煤废水，进一步加剧水环境污染。粉尘的持续堆积还会降低设备传动效率、增加运行阻力，导致能耗上升，间接削弱火电厂绿色低碳发展的实际成效。

2.3 相关环保政策及行业标准趋严

随着环境保护政策日益严格，国家和地方对火电厂大气污染物排放的监管持续加码。粉尘排放限值不断收紧，《火电厂大气污染物排放标准》《煤炭行业粉尘防治规范》等法规对煤电企业粉尘治理提出了具体要求。多数大型火电厂已在主要污染环节配置了较为完善的粉尘治理设施，实现了覆盖全流程的污染防控。但在治理系统智能化、节能化及运行稳定性方面，仍存在较大提升空间。行业发展趋势倒逼火电厂持续引入高效、低耗的新型抑尘和收尘技术，积极构建全过程、分层级、多节点的粉尘污染防控体系，为电力行业实现绿色转型和高质量发展提供坚实支撑。

3 输煤系统常用粉尘治理技术及其局限

3.1 机械抑尘与喷雾抑尘技术

机械抑尘主要依赖挡尘帘、挡风板、封闭罩等刚性结构，通过物理隔离和气流导向，减缓煤炭从落料口或筛分区域的自由下落及扬撒过程中的紊流生成，将粉尘局限在较小范围内，降低大气中粉尘浓度。封闭罩可配合自动升降装置，根据实际运行工况动态开启或闭合，实现灵活防尘。喷雾抑尘则采用高压泵将水介质经多级喷头雾化，生成 $5 \sim 50 \mu\text{m}$ 的水雾颗粒，与煤尘通过碰撞凝结后增重沉降，显著提升了

对大粒径粉尘的捕集效率。实际工程表明，喷雾系统在落煤点和转运台面可将粉尘浓度降低60%以上。然而，机械抑尘结构长期受煤流冲击和磨损影响，易出现密封失效、变形或裂纹，需定期维护与更换密封件；喷雾系统对水质（硬度、悬浮物含量）、泵压稳定性及喷头布局有严格要求，水泵堵塞、喷嘴滴漏等故障易导致抑尘不均匀，且高压雾化耗电量大，运行能耗和维护成本不容忽视。为提高可靠性，可引入在线监测与智能控制，实现喷雾喷洒量与粉尘浓度联动。

3.2 密闭输送与负压除尘技术

密闭输送系统通过对输煤通廊、皮带机头尾及落料装置进行全封闭设计，将物料与外界空气隔离，最大限度抑制煤尘逸散。常用的密闭方式包括钢构板房、活动滑板门及软连接帘，模块化设计便于扩展与维护。负压除尘则在卸车口、落煤管口、皮带机转接点等高扬尘风险区域安装集尘罩，通过抽风管道将含尘气体引入布袋除尘器或高效滤筒除尘器，利用脉冲反吹技术定期清灰，实现对煤尘的高效收集。两者结合可在封闭空间内形成可控负压环境，粉尘被集中抽取处理，排放达到环保标准。尽管该技术组合在长距离、大流量输送中表现突出，但密闭结构施工与维护成本高昂，密封件老化或安装偏差易导致漏风；负压除尘设备功率大，滤袋及风机等易损件更换频繁，需专业人员定期检修，系统对自动化、智能化运维平台依赖度高，以确保长期稳定运行。

3.3 机械收尘与静电除尘技术

机械收尘器利用离心力、重力沉降或惯性碰撞原理，在气流进入除尘器瞬间便将大颗粒煤尘分离捕集，适用于初级粉尘处理，与喷雾或布袋除尘配合使用，可减少后端除尘压力。结构简单、占地面积小，易于在输煤系统末端或旁路灵活布置；但对 $<10 \mu\text{m}$ 细颗粒的捕集效率不足，需要与其他抑尘手段联动。静电除尘技术则基于高压电场作用，使煤尘带电后被极板吸附，处理效率可达99%以上，尤其擅长捕集细悬浮尘。实际上，静电除尘器对气体密封性、电场均匀性及入口气流分布要求极高，任何泄漏或电极污染均会导致效率波动；此外，设备投资及维护成本较高，极板清灰系统和电源系统需定期检修。综合来看，单一机械或静电除尘技术难以覆盖输煤系统多点、多源、动态复杂的粉尘产生特点，必须通过机械抑尘、喷雾抑尘、密闭负压、机械收尘、静电除尘等多种技术的协同优化，实现全过程、全环节的精细化、智能化粉尘治理。

4 输煤系统粉尘治理技术的集成优化路径

4.1 多元协同抑尘系统构建

针对火电厂输煤系统点多源、颗粒分布广的粉尘特点，构建“机械+喷雾+密闭+负压”多元协同抑尘系统，可有效提升整体治理效能。各环节采用定制化组合措施：如在卸车及转运处采用高压喷雾与密闭罩协同，在皮带转接点和落煤管下部布置负压抽风与局部喷雾，末端增设挡尘帘和

集尘槽,实现分级、分区防控。智能化控制平台对各类抑尘设备运行状态、粉尘浓度、煤流变化等参数实时监测,自动联动开启抑尘设施,提升治理的实时性与精细化水平。集成系统具备可扩展性与柔性配置能力,能适应不同规模、不同煤种和气候条件下的治理需求。

4.2 高效低耗喷雾及智能水雾抑尘技术

高效喷雾抑尘装置采用多级压力可调、超细雾化喷头,结合自适应调节系统,根据煤流量、风速、粉尘浓度动态调控喷雾强度,实现资源精准投放与能耗最优。部分电厂引入超声波水雾发生器和自动循环供水系统,有效降低用水量和运维负担。智能喷雾系统集成粉尘浓度在线监测、远程控制与故障报警功能,可实时根据环境变化调整工作参数,提升系统智能化水平。水雾粒径、分布均匀性和气液接触效率的提升,使得对细粒悬浮煤尘的捕集率大幅提高,显著减少作业区可吸入颗粒物浓度。

4.3 绿色密闭与高效负压收尘系统

结合绿色密闭结构与高效负压收尘,可进一步提升系统整体抑尘水平。密闭输送通廊采用模块化装配设计,便于维护和升级,密封性能优良。关键扬尘点设置高效负压集尘罩及高压脉冲滤袋除尘器,对煤尘实现就地、高效收集。部分项目引入变频风机与智能风量调节系统,依据实际粉尘浓度动态调整抽风强度,兼顾节能与抑尘效果。高效滤袋采用耐高温、抗腐蚀材料,延长使用寿命并降低运维成本。绿色密闭与高效负压技术的集成应用,实现了煤尘“源头控制—过程收集—末端治理”的全流程闭环,满足更高环保标准要求。

5 节能减排效果评估与案例分析

5.1 节能减排综合评价指标体系

为科学评价输煤系统粉尘治理措施的节能减排效益,需构建涵盖粉尘排放浓度、捕集效率、能耗水平、系统可用率及维护成本等五大核心指标的评价体系。首先,通过厂区环境空气质量监测数据,量化粉尘排放浓度变化;结合抑尘系统运行台账,计算捕集效率的提升幅度;其次,采集除尘设备及辅助系统的用电量和水耗,统计能耗水平与运行成本;同时记录系统可用率和故障停机时长,评估稳定性;最后,汇总滤袋、喷头、风机等易损部件的更换频次与费用,量化维护成本。基于上述数据,开展定量对比与趋势分析,并对节能降耗效果显著的技术方案,引入碳减排因子和生命周期成本(LCC)分析,综合评估全生命周期的环保与经济效益。这一多维度量化评价方法,可为电厂优化抑尘治理策略、实现环境效益与经济效益的双重提升提供决策支持。

5.2 典型工程案例成效分析

以某沿海大型火电厂为例,在输煤主系统实施多技术集成优化改造后,作业区 PM10 和 PM2.5 平均浓度较改造

前下降 70% 以上,远优于同期同类型电厂。喷雾系统采用智能自适应控制,较传统喷雾降低用水量 30%,年均节省运行用水及能耗费用近百万元。高效负压除尘设备投运后,集尘效率提升至 99% 以上,设备维护周期显著延长,备品备件消耗降低。治理后系统综合能耗下降 10% 以上,单位发电量碳排放强度明显降低。多环节的自动化与信息化升级,实现远程监控与智能运维,减少了人工投入,提升了设备利用率和故障响应速度。工程案例充分说明,系统集成优化是火电厂输煤系统粉尘治理与节能减排的有效路径。

5.3 环境与社会效益分析

系统性粉尘治理措施显著改善了厂区及周边空气质量,作业环境粉尘浓度大幅降低,员工呼吸健康风险和职业病发生率明显下降,安全生产得到有效保障。煤尘二次扬散减少,厂区及周边生态环境水土污染压力减轻,植被和土壤质量逐步恢复。抑尘系统用水量和除尘设备能耗持续下降,运行成本降低,与绿色低碳政策高度契合。抑尘设施的自动化和智能化升级,实现了远程监控、数据分析与预测维护,提升了系统可用率和运维效率,加快了电厂向智能化管理模式转型。该模式不仅为火电厂自身可持续发展奠定坚实基础,也为能源行业绿色制造、循环经济和区域社会可持续发展提供了可复制的示范经验。

6 结语

火电厂输煤系统粉尘污染防治是保障企业安全、高效、绿色运行的重要基础。面对愈发严格的环保标准和节能减排压力,单一治理技术已难以满足复杂多变的实际工况需求。本文梳理了输煤系统粉尘成因及危害,分析了主流治理技术的优劣,提出了多元集成与智能优化的系统性解决方案。工程实践与数据评估表明,多技术协同可有效降低粉尘排放、能耗与运维成本,实现节能减排和环境质量同步提升。展望未来,随着大数据、物联网与智能制造的深入应用,火电厂输煤系统的粉尘治理将步入高效智能与绿色低碳的新时代,为我国能源行业可持续发展贡献更大力量。

参考文献

- [1] 陈永鑫.发电厂输煤系统粉尘综合治理技术分析[J].电力设备管理,2025,(02):255-257.
- [2] 黄天健,黄晓明,李旭.国能九江燃煤转运皮带机高压自动微雾降尘系统应用[J].能源与环境,2024,(03):120-123.
- [3] 黄建新,赵开功,黄婷,等.燃煤电厂输煤系统粉尘治理方法[J].中国安全科学学报,2024,34(S1):52-58.
- [4] 邓中一.火电厂输煤系统粉尘治理技术措施[C]//中国智慧工程研究会.2024智慧施工与规划设计学术交流会议论文集.国家能源集团辽宁电力有限公司沈西热电厂;2024:455-456.
- [5] 范嘉良.火力发电厂运煤系统煤尘治理探讨[J].当代化工研究,2023,(21):122-124.

Research on Thermal System Efficiency Diagnosis and Energy Conservation Optimization Strategies for Subcritical Units in Thermal Power Plants

Yu Zhipu

Guoneng Jilin Jiangnan Thermal Power Co., Ltd., Jilin, Jilin, 132011, China

Abstract

In the context of global energy transition and the “Dual Carbon” strategic goals, improving thermal efficiency and reducing energy consumption have become key priorities for thermal power plants. Subcritical units, due to their long operational history and outdated technologies, commonly suffer from low thermal system efficiency and significant energy losses. This study examines the composition and operational characteristics of subcritical unit thermal systems, analyzes major factors affecting energy efficiency, and explores multi-dimensional diagnostic methods using operational data. Based on these findings, the paper proposes energy-saving strategies including process optimization, equipment upgrades, and improved operational management. Research demonstrates that enhanced energy efficiency diagnosis and targeted measures can significantly boost overall unit efficiency, reduce coal consumption, and accelerate green and low-carbon transitions. Through case studies, practical optimization experiences and shortcomings are summarized, providing valuable references for energy conservation and carbon reduction efforts in thermal power plants.

Keywords

thermal power plants; subcritical units; thermal systems; energy efficiency diagnosis; energy conservation optimization; system retrofitting; operational management

火电厂亚临界机组热力系统能效诊断与节能优化策略研究

于志璞

国能吉林江南热电有限公司, 中国 · 吉林 吉林 132011

摘 要

在全球能源转型与“双碳”战略目标背景下,火电厂能效提升与节能降耗成为行业重点。亚临界机组因投运年代久、技术落后,普遍存在热力系统效率低、能量损失大的问题。本文梳理了亚临界机组热力系统构成与运行特征,分析影响能效的主要因素,并结合运行数据探讨多维度能效诊断方法。在此基础上,提出系统流程优化、设备升级改造、运行管理提升等节能策略。研究表明,通过完善能效诊断并实施针对性措施,可显著提升机组综合效率,降低煤耗,推动绿色低碳转型。结合案例,总结优化实践经验与不足,为火电厂节能降碳工作提供参考与指导。

关键词

火电厂; 亚临界机组; 热力系统; 能效诊断; 节能优化; 系统改造; 运行管理

1 引言

近年来,随着国家能源结构转型步伐加快以及环保政策的日益严格,火电厂在实现安全、经济、高效运行的基础上,面临更高的能效提升与节能减排压力。亚临界机组作为我国火电行业的重要组成部分,因其机组容量适中、运行分布广泛,在电力系统调峰和区域供能保障中具有不可替代的作用。然而,受限于设计年代、装备水平及管理理念等多方面因素,亚临界机组热力系统普遍存在能量利用效率不高、运行能耗大、节能潜力尚未充分挖掘等问题,制约了火电行

业的高质量发展。

本文在梳理亚临界机组热力系统基本结构与运行特点的基础上,结合典型机组能效运行现状,运用定量与定性相结合的诊断方法,深入剖析了系统能效低下的内外部成因。针对诊断中发现的薄弱环节,提出了涵盖系统优化、设备改造、智能管控等多层面的节能措施,探讨其在实际生产中的应用效果与推广价值。文章旨在为行业同仁提供可复制、可推广的节能降耗路径参考,促进火电厂亚临界机组能效水平整体提升。

2 亚临界机组热力系统结构与运行特征

2.1 亚临界机组热力系统的组成与功能分工

亚临界机组作为火电厂常见的主力发电设备,其热力

【作者简介】于志璞(1980-),男,中国吉林通化人,本科,工程师,从事热能与动力工程研究。

系统一般包括锅炉、汽轮机、凝汽器、加热器、抽气系统、给水系统、疏水系统等多个环节。锅炉作为核心热源，通过燃煤等化石燃料将化学能转化为热能，为汽轮机提供高温高压蒸汽。汽轮机则将蒸汽能转化为机械能，带动发电机组发电。凝汽器则完成蒸汽的冷凝回收，提高热循环利用率。各加热器与给水系统协同配合，有效提升循环热效率，降低不可逆损失。整个系统结构相对复杂，各环节间能量交换与转化关系密切，任一环节能效下降均会影响整体能耗表现。

2.2 亚临界机组的运行工况及能效特性

亚临界机组多投运于上世纪末至本世纪初，设计参数一般为主蒸汽压力在 17MPa 以下，主蒸汽温度 540℃ 左右。该类机组运行灵活性较强，适合中小负荷调节，但受限于热力循环参数、设备老化及自动化水平，运行能耗普遍高于超（超）临界机组。热效率受锅炉燃烧、汽轮机抽汽、给水回热等多因素影响，部分机组实际供电煤耗长期处于高位。运行过程中，若调节方式不合理、设备维护不到位，将进一步加剧能量损失，导致供电能耗与排放指标持续恶化。

2.3 影响亚临界机组能效的典型因素

影响亚临界机组热力系统能效的因素较为多元，既包括设计层面的结构与参数限制，也涉及运行维护、管理体制等外部条件。具体而言，锅炉受热面结垢、燃烧调整不及时、空气预热器泄漏等均会导致燃烧效率下降。汽轮机通流部分磨损、密封失效，抽汽压力异常，会直接影响循环热效率。给水加热器热端差大、疏水系统运行不畅、凝汽器真空度波动等问题也较为常见。管理层面，缺乏系统化能效监测与诊断机制，运行参数调整滞后，均会加重能效损失。

3 亚临界机组热力系统能效诊断技术及应用

3.1 能效诊断的理论基础与关键指标

热力系统能效诊断的核心在于系统性、量化地识别能量损失环节，明确节能改进方向。理论上，亚临界机组能效诊断主要基于能量平衡分析、熵增理论、系统效率分析等方法。关键诊断指标包括：锅炉热效率、汽轮机内效率、发电煤耗、厂用电率、给水加热器热端差、凝汽器真空、抽汽参数等。通过采集与分析关键节点运行参数，可全面反映热力系统能量流动与损失特征，为后续节能优化提供科学依据。

3.2 能效诊断流程与数据采集方法

亚临界机组热力系统能效诊断一般分为前期准备、参数采集、数据分析、问题识别与优化建议等步骤。前期需根据机组结构特点，制定详细的诊断参数表，涵盖燃烧系统、汽轮机通流、给水回热、疏水系统等关键环节。运行数据可通过 DCS 系统、在线监测设备及人工巡检相结合的方式获得，要求数据的实时性与准确性。采集到的数据需统一校核、过滤，剔除异常波动与误差。采用能量平衡法、特征曲线法、系统对比分析法等多元诊断手段，对能效偏差进行定量剖

析，挖掘系统潜在的节能空间。

3.3 典型案例分析与诊断实践

以某大型亚临界机组为例，系统采集锅炉、汽轮机、凝汽器等运行数据，结合能效对标体系，发现锅炉排烟温度偏高、空气预热器漏风严重，导致锅炉热效率低下。汽轮机部分通流环节存在漏汽现象，内效率下降，抽汽参数波动较大。给水加热器多台并联运行不合理，造成热端差大、疏水系统异常。通过系统诊断，逐一锁定影响能效的薄弱环节，结合运行工况调整、设备检修与参数优化，能耗指标明显改善。该案例说明，完善的能效诊断体系不仅能发现问题，更为后续节能改造提供科学支撑。

4 亚临界机组节能优化策略与实施路径

4.1 系统流程优化与工艺调整

亚临界机组热力系统由于其流程环节众多、各系统间能量耦合复杂，流程优化成为提升整体能效的基础性手段。在流程优化中，首先应针对锅炉燃烧过程进行精细化调控，结合燃料特性和实时负荷，采用分层燃烧、风煤比智能调节等方式，确保燃烧完全性，降低不完全燃烧损失。通过引入先进的燃烧诊断系统，对火焰形态、炉膛温度分布、排烟含氧量进行动态监控，实现燃烧状态的持续优化。此外，汽轮机系统需根据不同负荷阶段动态调整抽汽点与抽汽量，优化给水回热系统，减少抽汽能量损失，并通过调整加热器串并联方式，使回热系统工作点始终处于高效区间。给水加热器布置优化方面，应注重缩小各级加热器间的热端差，避免局部过冷或过热现象，提升回热系统整体热经济性。凝汽器则要通过精准调节循环水量、改善冷却水分布、消除局部真空波动等措施，保证蒸汽冷凝过程稳定高效。流程优化还需与负荷调节、季节变化联动，依托 DCS（分散控制系统）平台，建立流程参数智能优化模型，实时校正运行参数，使机组在不同负荷下始终保持最优热力循环状态。通过流程与工艺的持续优化，能够显著提升亚临界机组的热效率，降低单位发电能耗，为节能降耗奠定坚实基础。

4.2 设备升级与节能改造

设备性能是制约亚临界机组能效水平提升的关键因素之一。由于部分机组长期运行，存在设备老化、效率下降、能耗偏高等问题，因此必须结合机组实际工况，有针对性地推进设备升级与节能改造。锅炉方面，采用高效低氮燃烧器不仅有助于提升燃烧效率，还能显著降低氮氧化物排放；烟气余热回收装置可利用排烟中的热能加热给水或助燃空气，回收潜在能量，减少热损失。汽轮机通流部分的密封系统和叶片材质升级，能有效减小泄漏和摩擦损失，提升内部效率。对于回热系统中的加热器，推广新型螺旋翅片管等高效换热元件，能够缩小热端差，提升换热效率；同时，应加大疏水系统的自动化改造，实现加热器疏水量的精准调控，避免结垢与效率损失。凝汽器则应应用联控真空泵和高效在线清洗

系统,维持高真空度,抑制换热管污垢增长,保障蒸汽冷凝效率。厂用电系统的节能同样不可忽视,高效电机、变频调速装置及智能照明、通风系统的推广应用,能够在不影响生产安全的前提下,最大限度降低厂用电率。设备升级与改造需分阶段有序推进,优先实施能效提升幅度大、技术成熟度高的项目,逐步覆盖全系统。对于资金压力较大的单位,可结合合同能源管理等创新融资模式,降低改造门槛,保障节能项目的顺利落地和可持续运行。

4.3 运行管理与智能化提升

现代火电厂节能降耗不仅依赖于设备与流程优化,更需要科学高效的运行管理体系和智能化手段的融合应用。亚临界机组应以标准化、精细化的管理为核心,建立健全能效监测、分析、考核与激励四位一体的管理体系。运行参数应通过能效管理平台实现 24 小时实时采集与动态分析,利用能量平衡、熵增分析等方法,持续追踪各环节能量流动和损失变化。对于异常能耗事件,系统可通过 AI 算法实现故障自动预警和智能诊断,辅助运行人员迅速定位并处置问题。推行能效对标和目标绩效评价,按月度、季度分解能效指标,定期开展运行优化评比,调动一线操作人员主动性与责任感。此外,应高度重视运行人员技能提升,通过定期组织节能新技术培训、实操演练及经验交流,提升全员的节能意识和应急处理能力。运行管理还应紧密结合信息化、数字化发展趋势,逐步建设智慧电厂,推动能效管理平台与 DCS、MIS、CMMS 等多系统融合,实现数据流通、资源共享和管理一体化。通过管理创新与智能化手段的深度融合,能够持续巩固和提升机组热力系统的运行能效,为火电厂迈向高效、绿色、低碳转型提供坚实支撑。

5 节能优化措施应用成效与典型案例分析

5.1 节能优化措施的应用成效

在实际生产过程中,通过系统性实施流程优化、设备改造与管理提升等措施,亚临界机组热力系统能效水平得以显著提升。以某 300MW 亚临界机组为例,经过锅炉燃烧优化、汽轮机密封改造、加热器结构调整及智能管理平台建设,机组供电煤耗由原来的 320g/kWh 降至 302g/kWh,锅炉热效率提高 3 个百分点,厂用电率下降 0.6%。系统能耗结构进一步优化,单台机组年节约标准煤约 8000 吨,减排二氧化碳 2 万吨。节能措施的实施不仅带来显著经济效益,更对环境友好、绿色发展起到积极推动作用。

5.2 典型案例的经验总结

在推广节能优化过程中,需注重项目的科学规划与分步实施。以某电厂为例,项目组优先对锅炉空气预热器实施余热回收改造,解决了漏风与能量流失难题,随后针对汽轮机抽汽系统进行在线参数优化,实现负荷动态调整。运行管

理团队积极引入智能诊断系统,实现能效数据的全流程跟踪与自动报警,有效防范了能效下降的风险。实践证明,系统性节能优化需管理、技术、人员三者协同发力,才能实现预期目标。项目团队还将典型经验形成制度化、流程化文件,推动节能措施的标准化与可复制化。

5.3 应用推广中存在的问题与对策建议

尽管节能优化取得了显著成效,但在推广过程中仍面临部分问题。一是部分机组受限于设计参数,节能潜力有限;二是设备改造资金投入较大,部分企业存在观望情绪;三是管理理念滞后,运行团队对智能化手段应用不足。为此,建议国家出台针对亚临界机组的专项节能改造支持政策,降低企业投入风险;加强行业交流与培训,提升运维人员的智能化管理能力;推动设备制造商加大新技术研发,拓展节能产品适配性。多措并举,有助于行业整体能效水平的提升与绿色转型的加速。

6 结语

火电厂亚临界机组作为我国能源结构中的重要一环,提升其热力系统能效、推进节能降耗,是实现行业高质量发展和“双碳”目标的重要举措。本文系统梳理了亚临界机组热力系统的结构特征及能效现状,探讨了能效诊断的理论与实践方法,并从流程优化、设备改造、运行管理等多个层面提出了切实可行的节能优化策略。案例分析显示,系统性实施节能措施可显著提升机组运行能效,降低能耗与排放,实现经济与环境效益的双赢。

展望未来,随着智能制造、大数据分析等新兴技术在火电行业的深入应用,亚临界机组的能效提升将更加依赖于数字化、智能化手段的融合创新。企业应强化节能改造的顶层设计,注重科技创新与管理协同,逐步建立起系统化、标准化的能效提升长效机制。各级政府与行业协会亦应加大政策支持与行业引导,为企业节能降耗营造良好外部环境。通过多方协作和持续努力,火电厂亚临界机组有望在未来的能源转型大潮中实现高效、清洁与可持续发展目标,为我国能源行业绿色低碳转型贡献更大力量。

参考文献

- [1] 朱开轩.内燃机与燃煤发电机组热力系统耦合特性研究[D].北京建筑大学,2023.
- [2] 方路林.火电厂锅炉燃烧优化调控技术在降低煤耗中的应用研究[J].锅炉制造,2025,(05):33-35.
- [3] 韩彦廷.基于自动化技术的火电厂集控运行节能降耗系统设计探析[J].模具制造,2025,25(08):210-212+215.
- [4] 何鹏锐.火电厂热控系统电源可靠性优化研究[J].中国设备工程,2025,(15):131-133.
- [5] 钟雷,高一搏.火电厂高压加热器出口温度变化率监测及应用[J].电工技术,2025,(07):258-259+263.

Analysis on technical quality management of large volume concrete nuclear power engineering construction

Xuyang Zhang¹ Lili Wu^{2*}

1. Shanghai Heyun Engineering Consulting Co., Ltd., Shanghai, 200233, China

2. Rongcheng Tengjian Construction Engineering Co., Ltd., Rongcheng, Shandong, 264300, China

Abstract

Nuclear power engineering projects inherently involve complex design requirements, particularly with the widespread application of large-volume concrete structures in nuclear and conventional island construction, which imposes higher demands on quality management of construction techniques. The implementation of quality control measures for large-volume concrete construction significantly impacts the overall construction quality and effectiveness of nuclear power projects. Construction units need to conduct in-depth analysis of these quality management approaches, optimize construction workflows based on structural characteristics and technical specifications, thereby achieving comprehensive improvement in project quality. This paper analyzes and discusses the application of quality management techniques in large-volume concrete construction for nuclear power projects, aiming to provide valuable references for enhancing construction standards and optimizing overall project efficiency.

Keywords

large volume concrete; nuclear power engineering construction; construction technology quality management; application

大体积混凝土核电工程施工技术质量管理分析

张旭阳¹ 吴丽丽^{2*}

1. 上海和运工程咨询有限公司, 中国·上海 200233

2. 荣成滕建建筑工程有限公司, 中国·山东 荣成 264300

摘 要

核电工程项目本身设计复杂,尤其是核岛、常规岛大体积混凝土结构施工的广泛应用,对核电核电建筑工程施工技术质量管理的应用提出了更高要求。大体积混凝土施工技术质量管理的应用在较大程度上影响着整个核电建筑工程的施工质量与施工效果,需要施工单位加强对大体积混凝土施工技术质量管理应用的深入分析,结合大体积混凝土结构施工的特点、要求等进行施工流程的合理优化,实现核电建筑工程整体施工质量的有效提升。基于此,文章对大体积混凝土核电建筑工程施工技术质量管理的应用及其相关进行了分析、探讨,希望能够为提高大体积混凝土结构施工水平,实现核电建筑工程整体施工效益提升提供有益参考。

关键词

大体积混凝土; 核电建筑工程; 施工技术质量管理; 应用

1 引言

社会、经济发展水平的不断提升,对核电建筑工程的建设水平提出了更高要求,尤其是城市的现代化建设背景下建筑需求不断增长,核电建筑工程项目施工的复杂性也在不断增加,对施工技术质量管理的应用提出了更高要求。核电建筑、地下工程、水利水电、桥梁隧道等工程的施工过程中,大体积混凝土施工因其具备施工效率高、结构成型效果好、

可塑性强等显著优势,得到了广泛应用。然而,大体积混凝土核电建筑工程施工技术质量管理也较为复杂,尤其是在结构固化过程中极易受到结构内外因素的影响而产生结构裂缝,对核电建筑工程整体施工质量产生不良影响,严重时还会造成极大安全隐患。

2 核电建筑工程大体积混凝土施工相关概述

在核电建筑工程中,大体积混凝土结构应用十分普遍,尤其是在大型核电建筑工程施工中更是不可或缺。核电建筑工程中的大体积混凝土结构指的是单体结构的最小体积在 1m³ 以上的混凝土结构。大体积混凝土结构的固化、硬化过程在水化反应放热的影响下会出现内部温度集中且大幅上升的现象,而大体积混凝土的体积大、断面面积大、表面系

【作者简介】张旭阳(1989-),男,中国山东荣成人,本科,工程师,从事核电核岛土建质量管理研究方向的工作。

【通讯作者】吴丽丽(1988-),女,中国山东荣成人,本科,工程师,从事建筑工程管理研究。

数小,在自然条件下无法将水化放热的热量快速释放到外部环境当中,温度在结构中过度积聚出现了较大的内外温差,进而产生较大的材料内部热应力直至超出其抗裂性能,此时则会产生温度裂缝[1]。虽然在大型核电建筑工程施工过程中大体积混凝土结构施工表现出了明显的便利性和经济性效益,但是也正因为其施工规模较大,性能要求较高,所以难以采用传统的混凝土施工技术质量管理进行施工,特别是在温度控制与裂缝问题防治方面,需要从施工技术质量管理应用的整体进行优化调整,实施精细化的温度管理和裂缝防控措施,如选择低热水泥、优化材料配比、冷却控制、做好保温保湿等措施,以确保大体积混凝土核电建筑工程施工的较好质量。

3 大体积混凝土核电建筑工程施工特点分析

大体积混凝土结构施工的体量极大,且结构较为厚实,必须在实际施工过程中采取特殊技术质量管理措施以及做好后续的特殊养护,才能实现理想的结构功能。较之普通的混凝土结构施工,大体积混凝土施工最为明显的特点就是会产生大量的水化热量。在浇筑施工之后,随着混凝土固化进程的推进,水泥与水之间产生的水化放热现象也越来越明显,混凝土的水化热温度甚至会超过 25°C ,进而使得混凝土结构产生较大的内外温度差,引发混凝土结构的温度变形。若是未能采取有效的温度控制措施,大体积混凝土结构极易出现结构损伤、裂缝等问题,进而削弱核电建筑工程整体施工质量[2]。除此之外,较大的平面尺寸使得大体积混凝土结构在受热时受到的结构约束作用不断增加,内部的温度应力也在不断增强。若是大体积混凝土的内部应力处理不当极易出现裂缝问题,特别是在混凝土温度快速变化的情况下,裂缝问题尤为明显。因此,大体积混凝土核电建筑工程施工需要重视做好对温度应力的有效控制,确保大体积混凝土较好的结构性能。

4 大体积混凝土核电建筑工程施工技术质量管理的应用

4.1 对原材料进行科学选择

大体积混凝土结构施工,原材料的选择至关重要,甚至会直接影响整体的施工成效。大体积混凝土施工中粗骨料的选择需要结合核电建筑工程的实际情况与具体要求,选择类型、规格合适的粗骨料,并需要确保骨料配级的较好连续性,确保混凝土结构施工较好的紧密度与力学性能。大体积混凝土核电建筑工程施工需要结合实际施工条件对粗骨料的粒径进行灵活选择,以满足不同结构的施工要求。在细骨料的选择方面,需要尽可能地选择细度模数较高的中砂,降低空隙率,提高结构的耐久性,有助于提高大体积混凝土结构整体性能。在外加剂的选择方面,则需结合大体积混凝土施工特点选择合适的缓凝剂与减水剂。借助缓凝剂的作用来增加水泥凝结时长,达到控制水化放热的速度与体量,降低

温度应力导致的裂缝问题发生概率。减水剂的使用则主要是通过降低水泥浆用水量,优化混凝土流动效果与密实性,同时也有助于水化放热的抑制。对于矿渣粉、粉煤灰等掺合料的选择,则需要结合其与骨料的兼容效果考虑,选择合适的掺合料,以此来达到降低水泥使用量,优化结构耐久性等良好效果[3]。

4.2 对材料配比进行合理设计

大体积混凝土施工中材料配比设计的合理性会对结构的强度、耐久性等施工效果产生直接影响,需要对材料配备进行优化设计以实现较好的结构整体性能,满足工程的实际需求。大体积混凝土的材料配比设计需要确保混凝土的坍落度小于 180mm ,避免后续浇筑施工因混凝土工作性不足而出现浇筑不均匀的问题。在混凝土绝热温升值控制方面,也需要从材料的合理选择与比例设计上进行调控,如水胶比需要低于 0.45 才能有效降低孔隙率,实现结构较好的抗渗性与耐久性。无论是出于降低成本考虑,还是降低水化放热防裂,掺合料的使用都是十分必要,但是粉煤灰、矿渣粉等的使用需要控制在水泥总量的 50% 以内,以避免对结构强度造成不良影响。在一些大体积混凝土施工中,适当添加片石有助于提高结构的总体强度,获得较好的抗冻效果。但是片石的厚度需要控制在 15cm 以上,使用总量小于结构总体体积的 20% ,且需要确保片石材料无裂缝、无夹层,特别是在低温施工环境中与受拉结构条件下,需要注意对热胀冷缩产生应力的把控,以免出现应力裂缝。

4.3 做好浇筑施工控制

大体积混凝土浇筑施工需要重视对混凝土入模温度的合理控制,避免混凝土在固化过程中产生较大的热应力,以及削弱结构的稳定性。水化放热升温的控制需要将混凝土入模温度控制在 $5^{\circ}\text{C} \sim 30^{\circ}\text{C}$ 以内,浇筑模板的表面温度也需要控制在 25°C 以下,结合实际情况合理选择分层浇筑、推移连续浇筑的施工方法。其中,分层浇筑包括了全面分层浇筑、分段分层浇筑、斜面分层浇筑这三种施工方式,需要结合具体施工设计选择合适的施工方式,并做好浇筑细节的精准控制,才能实现对浇筑温度的有效控制,提高混凝土结构浇筑的完整性[4]。比如,横断面积小于 200m^2 、 300m^2 ,浇筑分段分别应控制在2段、3段以内。在实际施工中应尽可能地将竖向施工缝设置在截面较小的模板上,并采用相邻施工缝错开设置的方式避免出现裂缝集中、传递等现象。浇筑过程中混凝土的泵送厚度需要确保小于 500mm ,不需要泵送的结构施工也需要将浇筑厚度控制在 300 以内,确保混凝土得到均匀固化,降低温度分布不均的内部应力影响。

4.4 加强振捣施工控制

大体积混凝土结构施工的致密性、整体性会受到振捣施工的直接影响。大体积混凝土的振捣施工需要遵循“快插慢拔”的施工原则,才能确保充分振实。出于施工均匀效果考虑,可采用直径为 500mm 的内嵌式振动锤沿着浇筑施工

方向进行均布设置,确保整个施工区域得到充分振捣。对于新旧结合位置的振捣,需要深入到交接处旧混凝土的50cm处向新混凝土方向振捣,确保新旧浇筑较好的结合效果,实现混凝土体的均匀、无缝连接。每一处的振捣时间需严格控制在20~40秒以内,在混凝土无明显沉降且表面溢出灰浆之后停止振捣,避免过度振捣。每完成一层混凝土的浇筑振捣,需要对表面进行二次抹压、平整、收光等处理,然后采用塑料薄膜进行覆盖、保湿,避免初凝阶段水分蒸发过快而出现裂缝问题。待混凝土结构全部开始初凝之后才能进行新一层的浇筑,以确保层间浇筑结合牢固,避免钢筋错位、预埋件出现位移等现象,取得较好的整体施工效果。

4.5 优化温度控制与裂缝防治

大体积混凝土核电建筑工程施工过程中,温度控制避免热应力引发裂缝问题的关键。合理选择水化低热类型的水泥,以及合理使用掺合料都是降低混凝土水化放热的重要措施。在做好骨料、用水量等的配比优化之后,还需严格按照施工温控要求对混凝土的入模温度进行严格控制,并在浇筑过程中采用冰水混合物、冷却剂等做好相应的冷却处理,实现对混凝土温度的有效调节。若是施工结构规模较大可采用在混凝土内部安装冷却管,利用循环冷却水进行冷却的方式降低混凝土内部温度。或者采用合理设置伸缩缝、后浇带等方式减少结构约束,降低温度应力[5]。优化配筋设计也是大体积混凝土温度裂缝防控的重要措施,通过适当增加构造配筋的方式来提高混凝土的抗裂性能。一般采用细而密的钢筋分布,如直径较小、间距较密的钢筋网片,能约束混凝土的变形,减少裂缝问题的产生。此外,还可通过布置温度传感器的方式,对浇筑过程中混凝土内部温度变化情况的实时监测,结合监测结果采取调整保温层、内部降温等温控措施,降低内外温差,避免裂缝问题。对于大体积混凝土裂缝问题的处理,需要结合裂缝的类型、宽度、深度等进行合理选择。对于宽度小于0.3mm的裂缝,可采用表面涂抹法或者表面贴条法进行处理,利用裂缝修复剂、活缝剂进行处理;对于宽度大于0.3mm的裂缝,可采用开槽填充、压力注浆等方式进行修复。

4.6 落实有效的养护措施

在大体积混凝土施工过程中,养护措施的科学落实直接影响混凝土结构的耐久性及工程质量。首先,大体积混凝土的施工养护关键在于水分与温度的合理把控,避免出现水分蒸发过快、温度变化等引起的裂缝问题。保湿养护需要从浇筑完成、硬化初期开始,采用薄膜覆盖、湿布覆盖表面的

方式进行为期1个月的保湿养护,期间需要避免结构直接裸露。其次,保温养护的关键在于降温与保温。其中,降温养护主要是通过设置冷却管道系统的方式来降低内部温度,减缓混凝土内部的热量释放速度。整个过程需要做好对冷却水温度、流量的精准控制,逐渐降低混凝土结构的内外温差。保温养护的核心在于减缓混凝土表面温度的流失,如采用覆盖保温材料、使用加热垫等,配合对温度传感器等监测设备的使用,延长散热时间,实现表面温度的均匀、缓慢下降,实现最佳的养护效果,获得较好的施工强度。再者,结合环境条件动态调整养护策略。夏季高温和干风环境下,可适当增加覆盖厚度与喷水频次;冬季低温环境下,则需采用加温或保温措施,确保混凝土在低温下不发生早期冻结裂缝。对于关键结构节点,如梁柱交接部位和大体积板块转角区域,应加强局部养护,采取局部覆盖、定期洒水或局部加温等措施,以控制应力集中。最后,建立详细的养护日志,记录温度、湿度、养护方式及持续时间,便于施工管理人员对养护效果进行评估和调整。同时,应配合早期强度检测,验证养护措施的实施效果,确保混凝土整体结构在养护期间得到充分湿润与温度控制,从而减少裂缝风险,提高工程整体施工质量。

5 结语

综述可知,大体积混凝土核电建筑工程施工技术质量管理的应用具备较强的复杂性,需要施工单位在准确把握大体积混凝土施工特点的基础上,对各个施工环节进行有效把控,尽可能地排除不良因素影响,采用科学、合理、准确的施工技术质量管理措施,确保大体积混凝土核电建筑工程施工的较好整体效果,为核电建筑工程施工提供有效保障。

参考文献

- [1] 胡严藤.基于土木核电建筑工程中的大体积混凝土结构施工技术质量管理分析[J].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术质量管理, 2023.
- [2] 关昊,李兆博.大体积混凝土核电建筑工程施工技术质量管理分析[C]//建筑科技发展论坛.中国智慧工程研究会, 2024.
- [3] 阮成意.探究大体积混凝土核电建筑工程施工技术质量管理[J].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术质量管理, 2023.
- [4] 贺浩科.大体积混凝土浇筑施工技术质量管理在核电建筑工程中的应用[J].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术质量管理, 2024(003):000.
- [5] 黄耀英,付雨晨,庄维,等.大体积混凝土上下层温差监控方法探讨[J].长江科学院院报, 2025, 42(8):153-161.

Research on the Application of Smart Monitoring System for Gas-Extinguishing Cylinders in Rail Transit

Wang Jungang¹ Xu haojun¹ Xia Huijun² Liu Yihan²

1.Changzhou Metro Group Co., Ltd, Changzhou 213000, China;

2.Jiangsu Rongxia Safety Technology Co., Ltd, Changzhou 213000, China

Abstract

This study addresses the safety and maintenance challenges of the core component of the gas fire extinguishing system for underground enclosed spaces in rail transit - gas extinguishing steel cylinders. Based on relevant standards, an innovative smart monitoring system consisting of “deformation monitoring pressure monitoring intelligent management platform” was constructed to achieve dynamic integration, risk warning, and remote control of the entire lifecycle data of steel cylinders. Taking the “Intelligent Detection and Management System for the Whole Life Cycle Operation of Gas Extinguishing Cylinders in Urban Rail Transit” project of Changzhou Metro as a case study, the feasibility of the system operation and its effectiveness in key indicators were verified. The research results provide theoretical and practical support for the intelligent transformation of fire protection facilities in rail transit, and have important engineering application value in reducing the risk of steel cylinder explosion and improving the overall safety management level.

Keywords

gas extinguishing cylinder; Smart monitoring system; rail transit; Intelligent fire protection

气灭钢瓶智慧监测系统在轨道交通的应用研究

王军港¹ 徐浩军¹ 夏慧钧² 刘益晗²

1. 常州地铁集团有限公司, 213000 常州;

2. 江苏荣夏安全科技有限公司, 213000 常州

摘 要

本研究针对轨道交通地下封闭空间气体灭火系统核心组件——气灭钢瓶的安全运维难题,依据相关标准,创新构建了“形变监测-压力监测-智能管理平台”三位一体的智慧监测系统,实现钢瓶全生命周期数据的动态整合、风险预警与远程管控。以常州地铁“城轨气灭钢瓶全寿命周期运营工况智慧检测管理系统”项目为案例,验证了系统运行的可行性和在关键指标上的有效性。研究成果为轨道交通消防设施的智能化转型提供了理论与实践支撑,对降低钢瓶爆裂风险、提升全周期安全管理水平具有重要工程应用价值。

关键词

气灭钢瓶; 智慧监测系统; 轨道交通; 消防智能化

引言

轨道交通作为城市公共交通的骨干系统,其消防安全直接关系到公众生命财产安全。气体灭火系统作为地下封闭空间的核心消防设施,其钢瓶长期承受高压环境,易因腐蚀、疲劳、误操作等因素引发失效风险。当前行业普遍依赖人工巡检模式,存在诸多难点和痛点,难以满足轨道交通高密度运营与全周期安全管理的需求。随着物联网、传感器技术的快速发展,智慧监测系统为实现钢瓶状态实时感知、风险精

准预警提供了技术可能。

1 轨道交通行业内气灭钢瓶维保的现状

1.1 维保面临的客观环境

气体灭火系统是轨道交通消防安全的核心保障之一,气体灭火系统的灭火剂通常以高压形式贮存于钢瓶中,钢瓶内长期贮存 15.0MPa 的高压气体^[1],是保障地下车站、车辆段等封闭空间消防安全的关键设备。当前维保模式以定期人工巡检为主,设备检测与维护存在如下困难:

(1) 空间限制: 钢瓶分布于地铁车站的设备区(如配电间、通信机房等区域),地下车站空间狭窄、管线密集,部分设备间仅能容纳 1-2 人作业,大型维保设备(如气瓶搬运工具)难以进入;部分开通较早的地铁城市存在钢瓶间设

【作者简介】王军港(1977-)男,汉,河南省西华县,本科,高级工程师、技术管理部长,主要研究方向:轨道交通运营管理,应急指挥以及科技创新等。

置在隧道内轨道侧的情况,进入房间巡查需经调度许可,且存在人车冲突风险。

(2) 时间受限:轨道交通需保障全天候运营安全,钢瓶维保(尤其是拆卸、检测、充装)需在非运营时段完成,且需避免影响相邻设备(如与火灾报警系统、BAS系统联动测试需在非运营时段模拟火灾场景)。

(3) 环境干扰:地下车站湿度大(相对湿度常>80%)、存在渗水风险,钢瓶易受电化学腐蚀;部分设备间靠近牵引供电设备(如整流变压器室),存在电磁干扰^[2],可能影响钢瓶压力传感器的准确性;夏季高温(设备间无窗、散热差)可能导致钢瓶内压力异常升高,需加强温度监测。

1.2 维保现状中存在的痛点

安全隐患难以及时发现:钢瓶爆炸的主要原因包括使用时间过长、产品缺陷、灭火剂杂质腐蚀、充装失误、未定期检验等,而人工巡检仅能捕捉表面问题,无法实时监测钢瓶内部压力变化和微观形变,难以提前预警潜在爆裂风险。国内已发生多起消防钢瓶爆炸事故^[3],对人员安全和运营秩序造成严重影响。

检验周期与实时需求脱节:根据《气瓶安全技术规程(TSG 23-2021)》,IG541钢瓶定期检验周期为3年,但若在检验周期内出现压力异常或形变,人工巡检难以覆盖,存在“检验空窗期”的安全漏洞。且定检需要进行水压测试、内壁检查等流程^[4],并存在三大问题:

- 1) 送检过程需拆卸、运输钢瓶,增加风险;
- 2) 检验周期长,期间需备用瓶组替代,增加管理成本;
- 3) 残留杂质可能加剧内壁腐蚀,形成“越检越险”的恶性循环^[5]。

人力成本高且效率低:每周一次的人工巡检需投入大量人力,巡检人员需逐个记录数据,不仅劳动强度大,还可能因人为疏忽导致数据误差,无法满足高密度、高精度的监测需求。

2 国家及行业对气灭钢瓶管理的相关要求

2.1 国家标准与行业规范解读

近年来,国家及行业已出台多项标准规范,明确要求加强气灭钢瓶的安全管理,推动智能化监测技术的应用。

国标 GB/T51314-2018《数据中心基础设施运行维护标准》规定采用气体灭火系统的数据中心,可以配置消防钢瓶爆裂预警探测系统,以实时在线监测消防钢瓶自身的安全状态。

《数据中心消防技术白皮书》(2021年)第六章《灭火技术》指出消防钢瓶设置消防钢瓶爆裂预警探测装置,对钢瓶进行实时在线监测预警,以防止钢瓶的爆裂爆炸。

2.2 智能化转型的迫切性

气灭钢瓶作为压力容器与消防系统的核心部件,其失效(如腐蚀泄漏、阀门卡阻、压力不足)可能直接导致灭火

失效。若瓶内介质泄漏,不仅影响灭火效能,还可能在封闭空间积聚有毒气体(如七氟丙烷分解产生 HF)或导致人员窒息(IG-541泄露可能造成氧气浓度降低,二氧化碳浓度升高)^[6]。因此,全面而细致的维保工作的重要性不言而喻。

传统人工巡检模式效率低且易漏检,已无法满足标准规范对“实时性、精准性、全周期”的要求。一方面,钢瓶数量庞大与人工效率有限的矛盾日益突出;另一方面,地下空间的高风险环境对“提前预警”提出了更高需求。而运营单位需在“合规成本”(如第三方检测费、配件更换费)与“安全冗余”(如备用钢瓶配置)间权衡,面临长期的成本压力。

因此,推动气灭钢瓶管理从“人工巡检”向“智能监测”转型,是落实国家及行业要求、降低安全风险的有效方法。

3 气灭钢瓶智慧监测系统实施方案可行性分析

气灭钢瓶智慧监测系统通过整合“形变监测、压力监测、智能平台”三大核心模块,实现对钢瓶全寿命周期的实时监管,其技术方案具备成熟性和可操作性。

3.1 钢瓶形变监测

钢瓶形变是爆裂前的关键预警信号,系统通过“线性传感器+数据转换”技术实现精准监测。

监测原理:在钢瓶外壁规律缠绕变形量探测线,感知钢瓶因内压变化产生的微观形变(如材料屈服、裂纹扩张等)。当形变达到1%时,探测线将物理变化转化为电参数信号,通过 RS485 总线传输至数据采集器,触发预警。

3.2 钢瓶压力监测

压力异常是钢瓶安全的直接反映,系统采用“高精度传感器+实时传输”技术实现压力监控。

监测方式:在钢瓶上安装高精度压力传感器(如 RXQM-P 型钢瓶压力探测装置),实时采集压力值(精度可达 0.1MPa),并通过 RS485 总线传输至数据采集器,确保压力数据与形变数据同步分析。

3.3 智慧监测管理平台架构

平台作为数据整合与决策中枢,实现了“监测-预警-管理”全流程智能化。

(1) 数据监测:将形变、压力数据通过网络传输至监控主机,再汇总至管理平台,形成钢瓶全生命周期数据库(包括制造信息、检验记录、实时状态等)^[7]。

(2) 功能预警:当瓶体发生屈服(爆炸之前),变形量探测线能感受到气瓶外壁局部的微量变形,可提前预警,并通过短信、终端弹窗等方式通知管理人员。

(3) 远程管理:管理人员可通过平台远程查看钢瓶实时状态(压力值、形变状态、位置信息等),定位具体问题钢瓶,实现“精准维保”。

(4) 维保优化:平台自动记录钢瓶状态变化,生成维保建议(如“压力异常需补气”、“形变超标需更换”),

推动维保模式从“计划修”（按固定周期巡检）向“状态修”（按实际状态按需维保）转型^[8]。

4 案例与效果评估——以常州地铁项目为例

4.1 项目概况

常州地铁于2024年启动“城轨气灭钢瓶全寿命周期运营工况智慧检测管理系统”项目，试点对控制中心30个瓶组（IG541钢瓶）安装智慧监测系统，涵盖系统安装、试运行、效果验证等阶段。

4.2 实施方式

系统部署采用“空间适配-分阶段施工-联动调试”的三阶实施策略。设备选型遵循“环境适配优先”原则，采用高精度、抗电磁干扰能力强、绝缘性能高的集合压力监测、形变预警功能的探测器。系统联调阶段创新性采用“虚拟调试+物理验证”双轨模式。在数字孪生平台中完成90%的逻辑校验，现场仅需针对通信延迟、数据同步等关键指标进行实测优化，联调效率提升40%。同时借助预留光纤通道实现钢瓶实时状态数据与消控室操作终端同步，实现远程监控的目的。



4.3 实施效果评估

气灭钢瓶智慧监测系统运行以来，运维效率的显著提升主要源于四个维度的优化。

（1）监测模式升级：从“每周人工巡检”转为“24小时实时监测”，解决了人工巡检的“阶段性盲区”。

（2）管理效率提高：管理人员通过平台可随时查看30个瓶组的压力值和形变数据，无需去现场即可掌握钢瓶状态。

（3）运维成本降低：试点后，减少了该区域钢瓶巡检人力投入，原每周2人/次降至每月1人/次。

（4）安全等级提升：系统通过形变与压力双参数监测，将钢瓶安全系数从传统模式的“依赖人工判断”提升至“数据化精准预警”，有效规避了爆裂风险，减少因爆炸导致的经济损失和人员恐慌。

5 未来展望

气灭钢瓶智慧监测系统在常州地铁的试点验证了其技术可行性与应用价值，提供了可复制的技术范式，系统将从单一监测工具向“预测-决策-处置”全链条解决方案升级，

推动安全管理模式从被动响应向主动防御转型。未来在轨道交通行业的推广可从以下方面展开：

（1）既有线路推广：对已运营线路的气灭钢瓶分批加装监测系统，优先覆盖客流量大、环境复杂的车站（如换乘站等），逐步实现全网钢瓶智能化管理。

（2）新线规划整合：在新线设计阶段将智慧监测系统纳入消防工程，实现“钢瓶出厂-安装-运营-报废”全周期数据贯通，避免后期改造的额外成本。

气灭钢瓶智慧监测系统的成熟，绝非单一主体的“独角戏”。各方通过“需求反哺-技术攻关-产品验证-标准完善-规模推广”的闭环协作，最终推动系统从“可用”向“好用、耐用”升级，为轨道交通消防安全提供更可靠的保障。未来，随着各方协同机制的进一步深化（如建立跨行业创新联合体），智能监测系统有望成为轨道交通消防的“标配”，引领行业向“主动预防、智慧运维”的新阶段迈进。



参考文献

- [1] 国家市场监督管理总局, 中国国家标准化管理委员会. GB 25972-2024 气体灭火系统及部件[S]. 北京: 中国标准出版社, 2024.
- [2] 齐万明, 陈琳, 穆晓彤. 复杂电磁环境下轨道交通车辆整车抗电磁干扰设计[J]. 西华大学学报: 自然科学版, 2021.
- [3] 李国华, 濮春干, 尹杰. 从一起气瓶爆炸事故谈在用消防气瓶的检验与维护管理[C]//2015 中国消防协会科学技术年会议论文集, 2015.
- [4] 国家市场监督管理总局. TSG R0006-2014 气体安全技术监察规程[S].
- [5] 姜勇, 巩建鸣, 涂善东. 37 Mn 高压消防气瓶爆炸原因分析及对策[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2009, 21(1): 4.
- [6] 东靖飞. 气体灭火系统安全评估技术的研究[J]. 消防科学与技术, 2009, 28(9): 5.
- [7] 胡威龙. 基于RFID技术的消防气瓶全生命周期管理系统研究与设计[J]. 信息与电脑, 2022(002): 034.
- [8] 何国才. 浅谈IG541气体灭火系统在地铁施工及维保中的问题[J]. 中文科技期刊数据库(引文版)工程技术, 2022(1): 4.
- [9] 王磊, 李鑫, 张宇. 物联网技术在地铁气体灭火系统中的应用研究[J]. 现代城市轨道交通, 2022(5): 45-49.

Application practice of cofferdam technology in farmland water conservancy construction

Junwei Li

Taian Daiyue District Comprehensive Administrative Law Enforcement Bureau, Taian, handong , 271000, China

Abstract

In agricultural development, farmland water conservancy projects play a crucial role by providing drought and flood prevention while optimizing water resource allocation and improving utilization efficiency. To enhance construction quality and efficiency in these projects, modern cofferdam technology should be optimized to strengthen structural integrity and stability, thereby promoting high-yield, stable production, and sustainable agricultural development. This paper first examines common types of cofferdam technology used in farmland water conservancy construction, then analyzes practical application methods to effectively improve the functionality of such projects and advance the sustainable development of the agricultural sector.

Keywords

farmland water conservancy construction; cofferdam technology; application practice

农田水利施工中围堰技术的应用实践

李均伟

泰安市岱岳区综合行政执法局, 中国 · 山东 泰安 271000

摘 要

在农业发展中, 农田水利工程占据重要地位, 既可以抗旱防涝, 且还能够优化水资源配置, 提高水资源利用率。在农田水利工程施工中, 为了提升工程施工质量与效率, 需要对现代化的围堰技术进行优化应用, 从而强化水利工程结构牢固性和稳定性, 促进农业实现高产稳产和可持续发展。基于此, 本文首先探讨了农田水利施工中围堰技术的常见类型, 然后主要对农田水利施工中围堰技术的应用方法进行分析, 从而有效提升农田水利工程功能作用, 促进农业行业的可持续发展。

关键词

农田水利施工; 围堰技术; 应用实践

1 引言

围堰施工技术在农田水利工程施工中发挥重要作用, 可以提高农田水利工程施工效率和质量, 并对水利工程产生良好的保护作用, 保障整体水利工程安全性。当前, 农田水利工程施工中常见的围堰技术有草土围堰技术、木板桩围堰技术、钢板桩围堰技术、土石围堰技术等。在具体施工中, 需要做好前期准备工作, 并优化施工导流、围堰连接、围堰填筑、围堰拆除等作业, 促进整体围堰施工的高质量进行。

2 农田水利施工中围堰技术类型

2.1 草土围堰技术

该技术应用中, 需要按照一定方法把分散的草料捆成圆柱形, 通过草捆和土料堆筑成挡水结构。在上层草土体自身的重量作用下, 促进下层草土体下沉, 进而形成围堰结构。

草土围堰结构的断面为矩形, 通常情况下, 断面宽度为水深的 3 倍^[1]。在施工前, 需要彻底清理堤岸, 把两包草包捆成一包, 且草绳需长度符合设计要求, 通常情况下, 长拉绳长度为水深的 3 倍; 然后将草包垂放在堤岸上。草包浸入到水体一半以后, 需要把草绳固定在岸边。继续以上操作, 直到草包铺设高度在水平面以上一米。水下草包需要以 40° 的坡度状态进行堆放。完成曹查理堆放作业后, 需要在上方铺设一层 28 厘米厚的土壤, 并对其进行压实, 以便对松散的材料孔隙进行填充。

2.2 木板桩围堰技术

木板桩包含立柱和挡板, 该方法可以就地取材, 造价成本较低, 且方便施工, 能够强化防治流沙效果。该技术方法主要在河床透水性较强且水深在 5 米以下、流速不超过 5m/s 的工程中进行使用。在具体施工中, 需要按照相关技术标准, 把 3 块模板进行规范性拼接, 形成一组, 并将其插打在现场指定位置, 在此过程中要保障板缝密实度, 一旦缝隙过大会降低围堰施工效果^[2]。在插打木板桩过程中, 如果木板桩较短, 需要把一个导框放置在水面上; 如果木板桩

【作者简介】李均伟(1979-), 男, 中国山东泰安人, 本科, 工程师, 从事水利工程研究。

较长,需要在水面设置两个导框,然后才能开展垂直插打安装作业。通常情况下,需要先插后打,或者分块插打,进而提高木板桩合拢效果,提高整体木板桩围堰施工效率。

2.3 土围堰施工技术

该技术主要在河床透水性较差、流速不超过 0.3m/s、水深在 2 米以下的农田水利工程中进行使用。该技术主要利用土围堰自身重力,有效预防围堰结构沉陷现象。当河床为沙土土质时,综合考量围堰施工类型,避免围堰含水量大等因素引起围堰沉陷现象。在具体施工作业中,要结合工程特点,明确土围堰顶部宽度,通常情况下宽度在 200 厘米以内,并在宽度界限位置标记,然后利用反铲挖掘机开挖基础部分,但是不要出现超挖现象^[3]。在围堰修筑前,要彻底清除底部杂物;在筑堰施工作业中,需要选择黏性土进行施工,并使用振动压力机夯实,做好压实度检测试验,进而增加围堰填筑密实度。

2.4 钢板桩围堰施工技术

该技术主要在河床透水性强、水深在 5 米以上、土质为风化岩或者砂性土的工程中进行使用。钢板桩是带有锁口的型钢,截面样式有构体式、双层式、单层式,能够重复使用。该围堰结构能够强化挡土、防水作用,入土深度需要超过河床上部长度。在具体施工中,需要结合农田水利工程施工需求,优化设计钢板桩围堰结构,明确整体结构承载能力极限状态,减少围堰结构变形现象。通常情况下,围堰结构需要高出河段最高水位 0.6 米,并在外坡设置防冲刷设施^[4]。在钢板桩围堰施工作业中,需要将其设计为圆形(如图 1 所示)、矩形等形状,严格设计尺寸对钢板切割,将其焊接到角钢上。结合围堰级别、周边环境、地质条件等情况,确定围堰结构安全等级。在施工作业中,要结合围堰施工特点,优化选择打桩机,保障打桩锤重量超过钢板桩;在布设钢板桩围堰时,要结合地形、地质等条件,明确围堰轴线,确保围堰高度、长度与设计标准保持契合性。安装围堰时,要做好现场测量定位工作,使其原理岸边,利用前方交会法测量定位,进而保障安装位置准确性。在钢板桩插打作业中,要结合现场实际情况,选择使用功能插打钢板桩或者逐块插打方式。为了提高插打速度,需要利用吊船、吊机等进行作业。此外,还需要在外部添加导框,进而保障钢板桩插打垂直性,避免出现倾斜问题,提高合拢效果。在钢板桩围堰施工作业中,需要加大防渗漏措施,抽出围堰底部积水,并施工板条、棉絮封堵内侧,有效封堵漏缝。完成以上作业后,需要依次拔出水下支撑系统、板桩,进而提高钢板桩围堰施工质量。

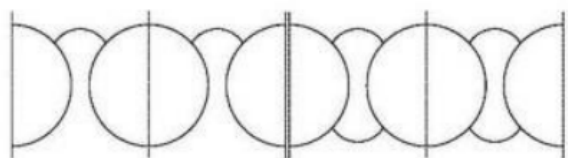


图 1 圆形钢板桩围堰平面示意图

2.5 套箱围堰技术

该技术主要在河床平坦、没有覆盖层且水深正常的工程中进行施工。在具体操作中,套箱围堰包含底套箱、无底套箱等类型。前者在水位较浅的部位进行使用,后者在水位较深的部位进行使用。套箱主要由钢筋、混凝土、木材等材料构成,在箱内设置支撑结构,将其制作成装配式套箱、整体式套箱等形式。在套箱接缝部位设置防渗漏措施,避免出现渗漏水现象。

2.6 双壁钢围堰技术

该技术主要在水深度较大的工程中进行使用,施工作业前,需要提前测量现场数据,进而确定双壁钢围堰尺寸。该围堰结构较为简单,且安全性较好,施工效率高^[5]。在具体施工作业中,要确保岩面上支撑钢壳刃角的平稳性;钻孔作业中,要对护筒顶面高度进行合理控制,使其超出封顶混凝土 1 米左右,并把护筒下方固定到岩面上,使其彼此串联,形成坚固整体。完成灌注封顶作业后,需要潜入水下,拆除连接螺栓,并吊出固定支架。

3 农田水利施工中围堰技术的应用实践

3.1 前期准备工作

在围堰技术施工前,需要做好施工现场环境勘察作业,保障施工规范性,尤其要确认围堰制高点,明确观测间隔时间,并对每次观测时间进行详细记录,进而优化围堰施工流程,完善现有施工方案,保障农田水利工程围堰施工方案的可行性与合理性^[6]。在专业人员勘测作业中,需要详细测量河床深度、河水流速等参数,并以此为依据绘制施工图纸,明确施工方案。此外还需要明确各个关键的施工要点,保障施工现场实际情况与设计图纸的契合性。要细化设计图纸各项参数,精准竖井长度、支撑结构、护角等参数,进而保障围堰结构稳固性,减少安全事故的出现几率。

3.2 施工导流

在农田水利施工中,要利用围堰技术对河道中的水流绕出施工场地,为后续围堰施工创建良好条件,即施工导流。在具体作业中,要结合水流走向、流速、水位等因素,优化选择围堰形式和位置,进而提高导流效果。为了保障导流水平,需要做好围堰结构监测工作,提高整体结构防渗性能;并定期清理导流渠道,避免出现堵塞、淤积问题;要优化安排施工进度,提高各类资源利用率,尽量减少破坏河道生态环境。

3.3 围堰连接

在围堰施工中,需要做好围堰连接工作,确保围堰牢固连接,强化整体围堰结构的防渗性能,减少围堰崩溃、坍塌问题。为了提高围堰连接稳定性,需要选择合适的围堰材料,尤其要选择土、石、混凝土等强度较高的材料;要提升填筑材料的压实度,避免出现围堰材料变形、移位等现象。特别是要做好围堰接头部位的牢固性和密封性,避免水流进

入到围堰内部。其中,接头部位就是围堰与其他建筑物的连接部位,通常情况下使用斜墙加垂直防渗墙的方式,提高整体围堰建筑的防渗性能,增加各个接头部位的牢靠性。为了增加连接牢固性,需要在在外围焊接钢制围堰结构,并开展结构承压测试作业,增加围堰结构组合密实度。

3.4 围堰填筑

在填筑前,需要精细处理基础,保障基础结构始终处于牢固、稳定状态。在基础处理作业中,需要做好地质勘察和土壤测试作业,帮助工作人员详细掌握地下地质构造,并精准了解土壤特性,一旦发现地基软弱层、洞穴等不良地质现象,需要采取针对性的加固措施。尤其需要采取科学合理的地基加固措施,优化排水处理,进一步强基础承载力。完成以上作业后,需要结合实际情况,优化选择围堰形式,当前常用的围堰形式有土围堰、石围堰、木围堰等,在选择时需要结合工程需求、水文条件等因素针对性使用^[7]。此外围堰填筑材料有土、石、木等材料,要结合工程物理性质、工程性质等优化选择,如土料的防渗性较好且具有较高的可塑性;石料强度、稳定性较好;木料抗腐蚀性、耐久性较好。在土围堰填筑作业中,要结合设计图纸要求严格控制填筑的土质、压实度、厚度等参数。通常情况下需要选择防渗性能较好的土壤进行填筑,并严控每层填筑厚度,利用压实机械增加土料密实度。在填筑作业中,要时刻观察周边环境变化,一旦发现水位上升、水流速度过快等现象,需要采取合理措施进行积极应对,如增加排水设施、加强围堰防护等。

3.5 基坑排水

在围堰基坑施工中,要做好排水作业,以便对地表水、地下水进行科学处理,避免基坑出现积水问题。其中,基坑排水类型包含:一次性排水,主要是围堰施工作业中中的基坑水、日常民用废弃水等;经常性排水,主要针对基坑内渗透水、内积水、雨水等,要始终坚持经常性排水原则,针对性排除基坑内的所有水源。在具体排水环节中,需要依次排除基坑内的渗水、天然降水、施工弃水等^[8]。在具体作业中,

需要结合基坑排水量、排水内容,选择合适的排水处理措施,有效提升围堰基坑排水作业实施效果。

3.6 维护与拆除

完成围堰施工后,需要定期组织开展围堰结构检查、修复与加固工作,及时修补围堰损害部位,加固受压力较大的部分,保障围堰结构的正常运行。在围堰拆除作业中,需要利用水泵箱四周注水,然后沿着导流洞轴线方向清除弃渣,并将其运输到河道上游;及时清理围堰正面的土石杂物,防止注水过程中对围堰结构造成负面冲击作用力。完成拆除作业后要坡底范围的杂物进行彻底清理,保障围堰施工效果。

4 结语

综上所述,在农田水利工程施工中,需要结合实际情况,优化选择围堰技术类型,并结合围堰施工标准、技术要求,强化施工质量控制,进而提升围堰施工水平,强化农田水利工程价值作用。

参考文献

- [1] 谷爱玲. 围堰施工技术在农田水利工程中的应用 [J]. 农村科学实验, 2025, (10): 108-110.
- [2] 赵焯. 围堰施工技术在农田水利工程中的应用实证研究 [J]. 数字农业与智能农机, 2024, (10): 79-82.
- [3] 闫鑫. 农田水利施工中围堰技术的运用 [J]. 农业机械, 2024, (06): 107-109. [4]王天长. 农田水利工程的围堰施工技术 [J]. 新农业, 2023, (13): 60-62.
- [5] 鞠玉婷. 基于农田水利工程的围堰施工技术分析 [J]. 价值工程, 2022, 41 (13): 38-40. [6]李纪明. 基于农田水利工程的围堰施工技术分析 [J]. 湖南水利水电, 2021, (05): 71-73.
- [7] 平丹艳. 围堰技术在农田水利水工工程中的应用 [J]. 长江技术经济, 2020, 4 (S1): 57-58.
- [8] 罗西灵. 试析农田水利工程中围堰设计要素及施工方法 [J]. 福建农业, 2015, (08): 181.

Research and application of technology big data and cost index management system

Qingfeng Wang Xiaofei Qu Yanli Li Ruinan Chang Luning Li

Cost Control Center Shandong Electric Power Engineering Consulting Institute Co., Ltd., Jinan, Shandong, 250013, China

Abstract

In recent years, China's economy has demonstrated remarkable resilience and growth potential amidst global economic fluctuations and domestic demand shortages, maintaining stable growth in a complex and volatile environment. To support economic development, China is establishing a new-type power system to achieve high-quality development in the power industry and serve the objectives of the new development paradigm. This study leverages extensive cost data from thermal power and renewable energy projects, analyzes technical and economic data of various projects, and innovatively develops a big data system for power engineering cost management. This system significantly enhances the efficiency and quality of cost management in power construction projects, thereby facilitating high-quality development across corporate operations.

Keywords

Power engineering cost management; Big data platform; Data analysis; New-type power system

电力工程造价大数据系统的应用与研究

王庆峰 曲孝飞 李延丽 常瑞楠 李鲁宁

山东电力工程咨询院有限公司费用控制中心, 中国·山东 济南 250013

摘 要

最近几年, 我国经济在全球经济波动和国内需求不足的背景下, 展现出强劲的韧性与增长潜力, 在复杂多变的内外部环境保持了稳定增长。为适应经济发展, 我国正构建新型电力系统, 以实现电力行业高质量发展, 服务新发展格局的目标。本文依托大量火电、新能源工程建设造价资料, 通过分析各项目技术经济数据, 创新性的研究了电力工程技经大数据系统, 该系统可明显提升电力建设工程项目造价管理工作效率和质量, 助力公司各项业务高质量发展。

关键词

电力工程造价; 大数据平台; 数据分析; 新型电力系统

1 引言

随着各行业数字化转型的深入推进, 大数据技术正深刻改变着工程造价管理的传统模式。本文旨在探讨电力工程造价大数据平台在项目全生命周期中的关键应用, 重点分析其在项目前期投标报价、勘察设计阶段, 项目实施阶段两个核心环节的价值与实现路径。研究表明, 大数据平台通过整合海量历史数据、市场动态信息与实时项目数据, 能够为投标报价提供精准、科学的决策支持, 显著提升中标率与盈利水平; 同时, 在工程管理过程中, 该系统实现了对成本、进度、质量与安全的多维度、全过程动态监控与预警, 有效提升了项目管理的精细化水平和风险防控能力。

2 研究背景

2.1 研究的目的及意义

我国电力能源需求呈现持续稳步增长态势, 电力工程建设速度逐步加快。传统的电力工程造价管理模式存在过度依赖个别造价人员的经验、企业内部有限的历史数据、电力定额等, 数据分散在各项目、各参与方(前期部、EPC部、项目控制部)、成本控制人员手中, 形成“数据孤岛”, 缺乏对宏观市场行情和竞争对手的全局洞察, 缺乏定量数据的支撑, 存在数据割裂、信息滞后、决策主观性强等弊端。难以适应现代工程规模大、周期长、技术复杂的新特点。

2.2 研究的主要内容

本文研究内容主要包括三部分, 首先, 根据电力行业发展的趋势, 建立了技经大数据系统, 数据采集范围包括燃煤、燃机、生物质、光热、化学储能、陆上光伏、陆上风电、海上风电等多能源领域。其次, 将收集到的涵盖可行性研究、初步设计、投标报价、项目实施、竣工结算等全过程成本动

【作者简介】王庆峰(1983-), 男, 中国山东费县人, 本科, 工程师, 从事电力工程造价研究。

态管理的工程造价数据，对产生的数据缺失值、异常值、重复值等进行清洗，将不同来源的数据转换为统一的格式和编码体系，按工程类型、项目名称、单项工程等维度对数据进行聚合，生成高维度的经济技术指标。最后，通过信息化技术手段，创建一个数据安全、可扩展、易维护、具备 AI 分析功能的技经大数据平台。

3 数据的收集

3.1 工程造价数据管理现状

在公司的经营活动中，积累了大量的工程造价数据（含 Excel、Word、PDF、图片等各种格式），涵盖了火电、陆上风电、陆上光伏、屋顶光伏和海上风电等十多个专业，但造价数据主要存在以下现状：造价数据分散在各造价人员客户端电脑中存储，形成数据孤岛；文件格式多且造价数据内容表达形式不统一，版本多，查阅难；造价关键指数指标汇总需耗费大量人力；查询和使用数据仅能依靠在电子表格中使用关键字搜索查阅，造价数据资产无法充分发挥价值。

为加强工程造价数据的积累和数据资产的管理，发挥工程造价数据的价值，建立企业级的工程造价数据库迫在眉睫。利用人工智能、大数据分析等信息化技术手段将非标准化工程造价数据结构（含 Excel、Word、PDF 文本）转换为标准数据结构，实现各类造价数据的快速查询、对比、计算、分析，为投标报价、概算编制、成本测算等提供参考依据。

3.2 应用领域分析

目前公司主营业务包括火电、新能源、电网、核电、智慧能源、水利水电、生态环保等 7 大板块，尤其以设计为龙头的电力建设工程总承包业务量占比最大。工程造价数据在总承包项目最重要的应用阶段为投标报价阶段和项目实施阶段。

投标报价阶段，可利用于建立的历史项目数据库，包含主要工程量、项目特征、地理信息、经济指标、最终造价等数据。与拟投标项目进行全方位对比分析，结合当前市场竞争行情、政策法规、材料价格趋势等外部数据，可快速、准确地测算出本项目成本数据，为投标报价提供科学的决策

依据，提高市场的竞争力。

勘察设计阶段，此阶段决定了项目 70% ~ 80% 的成本，因此是大数据应用价值最高的环节。平台内可集成海量已完工程的历史经济技术指标（如：不同设计时间、不同结构类型、不同地区的单方造价、钢筋含量、混凝土含量等）。在设计初期，输入项目特征（如：干燥棚、跨度、投影面积、钢材市场价等），系统可自动生成合理的造价限额，作为设计控制的目标。也可在方案必选阶段，参考历史数据，选择技术先进且经济合理的最优方案，实现“价值工程”最大化。

实施阶段主要进行设备材料、施工、技术服务等采购工作。此阶段决定了项目 50% ~ 60% 的成本，大数据能有效破解“价格不准”和“时机不对”等难题。将当前项目的设备材料、施工、技术服务等报价与历史数据库中的同类项目采购价进行多维度对标（如按时间、地区、采购量进行修正对比），可准确识别出显著偏离历史价格区间的异常报价。在评标阶段快速发现“不平衡报价”或可能存在的“围标”迹象，有效控制采购成本。

大数据平台除适用于上述阶段外，还可扩展到项目可行性研究、初步设计、竣工结算、经济纠纷处理等阶段提供数据支持。

3.3 数据采集范围

工程造价数据依托公司已实施或同行业实施的典型工程，包括新能源、火电、智慧能源、海上风电等项目的数据指标，数据收集范围主要包括以下内容：

首先对数据的采集范围进行筛选，当前阶段主要选在在设备材料成本中占比较高的设备材料价格，在建安成本中占比较高的典型工程量及造价数据，待大数据平台开发完善后，可实时对新的功能、模块进行扩展。

数据采集范围包括总承包合同、设备材料采购合同、建安分包合同、技术服务合同、实际施工图等不同实施阶段的各项造价数据。利用 OCR（光学字符识别）、NLP（自然语言处理）技术从扫描的图纸、PDF 合同、纸质单据中提取结构化信息。必要时可通过软件数据库，从各类造价软件（如广联达、木联能）、ERP 系统、BIM 模型中抽取数据。

工程造价大数据平台数据采集范围

工程类型	数据来源	设备、材料	建安及技术服务
火力发电	已实施的 300MW、600MW、1000MW 级燃煤发电厂、燃气蒸汽联合循环机组	三大主机、主要辅机、其他辅机、四大管道、电缆、甲供阀门、风门补偿器、耐磨管件、钛钢复合板、弹簧隔振	锅炉本体、汽轮发电机组、除尘装置、汽轮机辅助及附属设备、地基处理、厂前区、干燥棚、脱硫系统 EPC、专项验收、特种设备检验等
新能源	已实施的陆上风电、光伏、渔光互补、农光互补等新能源项目	风机、塔筒、光伏组件、支架、逆变器、箱变、电缆	风机基础、桩基础、组件及支架安装、风机吊装、集电线路、升压站建安、专项验收等
智慧能源	已实施的磷酸铁锂、全钒液流、余热回收、多能互补等新型储能项目	储能系统设备、变压器、配电装置、电缆	储能电池舱基础、升压站、电缆沟道、综合楼建安、专项验收等
海上风电	已实施的单桩、导管架、吸力筒等不同基础形式的风电项目	风机、塔筒、海底电缆、单桩及导管架基础制作、海上升压站	基础及风电机组吊打、冲刷防护、海缆敷设、海上升压站吊装、施工措施项目、专项验收等

4 数据挖掘与处理

4.1 工程造价数据的特点

多源性：数据来自不同项目的招标文件、投标书、采购合同、变更签证、施工图纸、零星采购、BIM 建筑模型、政府主管部门发布的定额和信息价、市场询价平台等。

多态性：包括结构化数据（如 Excel 表格、数据库中的定额）、半结构化数据（如 XML、JSON 格式的招标文件）和非结构化数据（如图纸扫描件、合同文本、工程照片、聊天记录）。

时序性：人材机价格、指数等数据随时间变化，具有强烈的时间标签。

海量性：一个大型项目即可产生 GB 甚至 TB 级的数据，所有已实施的项目数据量巨大。

4.2 数据分类

按阶段分：按项目不同的实施阶段，可分为可研估算数据、初步设计概算数据、投标概算数据、分包招标数据、竣工结算数据等。

按内容分：按数据包含的内容，可分为典型工程量、设备材料价格、典型模块指标、其他费用、分包合同概算下浮系数、总成本（不同容量的脱硫系统 EPC、特殊消防 EPC）、主要经济技术指标（如干煤棚、厂前区单平造价）等基础数据。

4.3 数据处理

数据清洗：处理缺失值、异常值、重复值（如同一材料不同名称、“圆钢 $\phi 10$ 以内” VS “圆钢 $\phi 10$ 以外” VS “普通钢筋”等）。

数据转换与集成：将不同来源的数据转换为统一、标准的格式和编码体系（如统一的材料编码、项目编码）。将如“吨”、“公斤”、“米”等不同单位统一为标准单位。

关键信息提取：从非结构化文本中提取关键信息（如从项目描述中提取项目特征、结构类型、建筑面积、高度等指标）。

5 技经大数据平台的构建及应用

5.1 技术架构

具有有独立、自主的 java 技术开发平台，开发平台采用目前主流设计思想和技术，基于企业级应用的 B/S 开发框架，多层体系架构，采用开源技术，保障新创国产化。依托新创国产服务器、操作系统、数据库、中间件等搭建技经大数据及造价指标管理系统基础平台，实现技经大数据及造价指标管理信息化。

5.2 平台可实现的功能

数据加工、处理功能：具有对原始数据进行清洗、转换、计算，使其变成可用的信息的功能。各模块数据可自 Excel 表导入也可在线录入、图片信息自动识别，并形成结构化数据自动归类存储，以便其他模块进行数据展示、分析应用。

数据查询、对比功能：典型工程量、价格库支持按工程专业、类型、项目划分等字段进行多条件组合查询，并支

持对相同查询条件下的数据进行对比、分析。可以设置基准项目，计算对比项目与基准项目的工程量增加以及变化比例，并导出数据对比结果 Excel。

数据可视化功能：将处理后的数据通过图表、仪表盘、报表等直观形式展现出来，让业务人员也能轻松理解数据。系统同步开发移动端应用，移动端功能以 H5 页面的形式，移动端支持与企业微信（电投壹）中的移动门户集成，用户可在手机端通过电投壹进入本系统移动端首页，首页界面简洁、清晰、美观、大方，操作简单方便。通过账号、密码及权限登录使用技经数据库系统移动端功能。

强大的扩展功能：用户可以根据工程进展情况，实时将过程中产生的工程造价数据录入数据平台，对平台数据进行扩展。必要时，也可对数据平台的功能模块进行扩展或调整，以适应工程造价管理工作需求。

5.3 平台的应用前景

技经大数据平台是以各项目工程造价数据为依托，利用大数据、人工智能等技术挖掘数据价值，实现工程造价管理的数字化、信息化、智能化，通过系统化的架构设计和聚焦核心业务的应用场景，能够有效解决当前电力工程造价管理中的痛点。该平台的应用将实现从“经验驱动”到“数据驱动”的转变，显著提升投标报价的准确性与效率，加强项目全过程成本的精细化管理水平，最终为企业降本增效、提升市场竞争力提供强大支撑。

未来，随着物联网（IoT）技术的普及，平台可进一步集成现场传感器数据，实现更自动化的进度和成本数据采集；同时，结合更先进的 AI 算法，向“智能造价顾问”的方向演进，提供更深度的决策支持。

6 总结

总体而言，大数据也好、人工智能也好、工业互联网也好，在电力行业的应用，具有广阔的前景而且得到了充分的支撑与重视，但是目前其所处的阶段，仍然是需要各方的大量投入，且是一项长期的战略性工作。

平台的成功应用并非一蹴而就，它需要企业从战略层面推动数字化转型，打破数据孤岛，培育数字文化，并持续投入资源解决数据质量、安全和人才等问题。未来，随着 BIM、物联网和人工智能技术的进一步融合，工程造价大数据系统将朝着更加集成、智能和自动化的方向发展，最终为建设项目的全生命周期价值最大化提供核心支撑。

参考文献

- [1] 薛术红,张海波.电力工程造价管理的发展趋势研究[J].市场瞭望,2024,(23):166-168.DOI:CNKI:SUN:SHLW.0.2024-23-056.
- [2] 朱梦慧.应用大数据技术的电力工程造价数据挖掘分析方法[J].中华建设,2023,(07):152-154.DOI:CNKI:SUN:CJJA.0.2023-07-056.
- [3] 罗运宝.电力工程建设全过程造价数字赋能体系研究[J].建筑经济,2023,44(12):87-92.DOI:10.14181/j.cnki.1002-851x.202312087.

Distributed collaborative control method for active power of wind farm clusters considering uncertainty

Zetao Sun¹ Jie Zhang²

1. Gansu Nonferrous Metallurgy Vocational and Technical College, Jinchang, Gansu, 737100, China

2. State Grid Jinchang Power Supply Company, Jinchang, Gansu, 737100, China

Abstract

Wind farm clusters have become an important carrier of new energy consumption in the power system, but factors such as wind speed fluctuations and uncertain model parameters result in significant uncertainty in their active power output, increasing the difficulty of system scheduling and operation. To address the above challenges, this paper proposes a wind farm cluster active power control method based on distributed multi-agent collaboration mechanism, and constructs a complete control system of wind power prediction uncertainty modeling distributed decision collaboration. By using robust optimization and probability constraint methods to handle wind speed prediction errors and unit performance fluctuations, adaptive allocation of active power among wind farms within the cluster is achieved. The simulation results show that this method can effectively improve the controllability of wind power and the collaborative response speed of the cluster, significantly reduce the risk of active power fluctuations in the system, and provide theoretical basis and technical support for large-scale grid connection of new energy and safe and stable operation of the power grid.

Keywords

wind farm cluster; Active power; Uncertainty; Distributed collaborative control; robust optimization

考虑不确定性的风电场集群有功功率分布式协同控制方法

孙泽涛¹ 张杰²

1. 甘肃有色冶金职业技术学院, 中国·甘肃 金昌 737100

2. 国网金昌供电公司, 中国·甘肃 金昌 737100

摘 要

风电场集群在电力系统中已成为新能源消纳的重要载体, 但风速波动、模型参数不确定等因素导致其有功功率输出存在较大不确定性, 增加了系统调度和运行的难度。为应对上述挑战, 本文提出了一种基于分布式多智能体协同机制的风电场集群有功功率控制方法, 构建了风功率预测-不确定性建模-分布式决策协同的完整控制体系。通过鲁棒优化与概率约束方法处理风速预测误差和机组性能波动, 实现集群内各风电场间的有功功率自适应分配。仿真结果表明, 该方法能有效提升风电功率的可控性与集群协同响应速度, 显著降低系统有功波动风险, 为新能源大规模并网与电网安全稳定运行提供理论基础与技术支持。

关键词

风电场集群; 有功功率; 不确定性; 分布式协同控制; 鲁棒优化

1 引言

随着风能资源开发规模不断扩大, 风电场集群逐步成为电力系统中重要的可再生能源主体。风电并网规模的迅速增长, 不仅为电力系统绿色低碳转型提供了有力支撑, 也对电网调度和运行安全带来了前所未有的挑战。风能固有的间歇性和不确定性, 使得风电场输出功率波动较大, 影响电网平衡与安全稳定。此外, 风电机组间的异构性、地理分布

广泛与局部气象差异等因素, 进一步加剧了集群调控的复杂性。

当前传统的集中式控制方法难以兼顾大规模风电场集群的实时性、柔性和鲁棒性, 亟须构建能够适应不确定性、具备分布式决策能力的新型控制体系。分布式协同控制作为面向未来智能电网的核心调控策略, 已被广泛应用于多能源互补、分布式储能及微电网等领域。针对风电场集群的不确定性和协同控制问题, 本文基于多智能体分布式决策理论, 提出一种融合鲁棒优化与概率约束的有功功率分布式协同控制方法, 并通过典型风电场集群的仿真分析, 验证其在提升功率可控性和响应能力方面的有效性。研究旨在为大规模

【作者简介】孙泽涛(1985-), 男, 中国甘肃永昌人, 本科, 从事电气自动化研究。

风电消纳与系统安全调控提供理论依据和工程实践参考。

2 风电场集群有功功率不确定性建模

2.1 风速与功率预测不确定性分析

风速的变化受复杂气象条件、局部地形差异以及季节性周期影响，呈现出明显的空间异质性与时间波动性。作为风电场输出的主要驱动因素，风速的不确定性直接导致功率输出存在瞬时大幅波动与短期预测偏差的叠加效应，进而增加电网调度与功率平衡的难度。本文在分析风速变化机理的基础上，采用概率统计方法对长期历史风速序列进行建模，并结合物理模型与机器学习预测手段，对风速预测误差分布进行量化描述。同时，利用风电机组功率曲线的灵敏度分析，揭示风速微小扰动对输出功率的放大效应，从而明确预测精度对集群调控的重要性。仿真结果表明，预测误差不仅影响单机输出的可控性，也会在集群层面放大功率波动风险。因此，不确定性建模与管理成为提升风电消纳能力、增强系统运行稳定性的核心环节。

2.2 风电机组性能参数不确定性建模

风电场集群内机组型号差异显著，运行环境多变，导致其性能参数（如最大功率输出、响应速率及爬坡约束）存在不确定性。随着运行时间增加，设备老化、故障概率提升及维护策略差异等因素也会进一步加剧性能波动。为应对这一问题，本文提出基于鲁棒参数集的区间建模方法，对机组的输出上下限及动态调节能力进行边界约束。通过结合现场运行数据与历史维护记录，对模型进行校准与修正，使得建模结果更具现实可靠性。与此同时，构建多维参数不确定性表征方法，将机组性能的波动性纳入控制模型中，并在策略设计中设置安全裕度，以避免极端工况下的运行失效。这一方法不仅增强了分布式控制在复杂条件下的适用性，也为集群调控策略的鲁棒性与工程落地提供了理论支撑。

2.3 集群系统层面不确定性描述

在更大范围的集群尺度上，风电场之间的气象相关性、调度耦合性及电网运行波动共同作用，使系统层面的不确定性更为复杂。例如，不同区域风速的相关性会导致集群输出出现同步波动，加剧对电网稳定性的冲击；调度层面的耦合关系使得单场异常可能通过功率分配传递到全局；而电网负荷波动及备用容量不足，则可能放大风电功率波动带来的影响。为此，本文采用马尔科夫链对风速时序相关性建模，并结合蒙特卡洛仿真方法构建联合不确定性分布，定量评估极端气象事件、局部设备失效等对集群整体输出能力的影响。通过建立不确定性场景集，为后续鲁棒优化与概率约束控制提供了基础数据支撑。研究表明，在系统层面进行全面不确定性描述，是提升集群协同调控效果、增强电网稳定性的重要前提。

3 分布式协同控制理论与框架

3.1 多智能体系统结构设计

针对风电场集群地理分布广泛、机组异构性强以及运行环境复杂的特点，本文设计了一种多智能体（MAS）分布式控制结构，以实现集群的自治运行与全局协同。该结构中，每个风电场均配置一个本地智能体，负责实时采集风速、功率及设备状态等关键数据，并结合预测模型生成本地有功调度指令。同时，本地智能体还可在局部范围内快速响应风速突变与设备异常，保障风电场运行的灵活性与安全性。主控智能体则位于集群层面，承担跨场协同与全局目标分解的任务，确保区域内功率平衡与电网调度需求的一致性。

3.2 分布式有功功率协同优化模型

为了实现集群内部多风电场间的有功功率优化分配，本文提出了基于分布式优化理论的协同调控模型。该模型以最小化集群总功率波动和最大化风能利用率为目标，充分考虑风电机组运行约束条件，包括单机有功输出上下限、爬坡速率限制、集群整体功率需求以及必要的安全裕度。在算法实现方面，采用增广拉格朗日方法与交替方向乘子法（ADMM）进行分布式求解，使各智能体能够在本地完成独立计算，仅需通过有限次信息交换即可逐步逼近全局最优解。这种求解方式有效避免了集中式优化中通信瓶颈与计算复杂度过高的问题，显著提升了系统的计算效率与实时性。数值实验结果表明，该模型在应对异常工况与高风速波动时仍具备良好的稳定性与可控性，且在系统扩展性方面表现优于传统集中式调控方法。

3.3 鲁棒优化与概率约束策略

针对风速预测误差、机组运行参数波动及电网运行状态不确定性等多重因素，本文提出了一种融合鲁棒优化与概率约束的混合控制策略。在鲁棒优化层面，方法通过设定最坏场景下的功率调整边界，确保在极端气象扰动或设备失效情况下，系统仍能维持安全稳定运行。概率约束策略则以满足一定置信水平为前提，允许功率分配在统计意义上满足约束条件，从而在保证安全性的同时提升风能利用率与经济性。二者的结合使控制策略在安全性与灵活性之间实现平衡，不仅增强了对不确定性的适应能力，也提升了集群整体的鲁棒性与运行效率。该方法可根据不同运行环境与电网需求进行参数调整，展现出较强的通用性和工程推广价值。

4 风电场集群分布式协同控制策略实现

4.1 本地智能体预测与自适应调控

在风电场集群的分布式协同控制框架下，本地智能体承担了预测与自适应调控的关键任务。其主要功能是基于风速短期预测与机组运行状态监测，动态生成并调整本场有功输出指令。为提高预测精度，本地智能体引入机器学习与数据融合算法，将历史风速序列、气象特征与实时监测数据相

结合,建立非线性预测模型。同时通过自适应机制,对预测误差进行动态修正,使得输出指令更符合实际运行状态。机组级控制单元依托这些指令,可在实时测量与预测数据的协同作用下实现灵活调节,从而最大化利用可用风能,并有效抑制风速突变引起的功率波动。该模式增强了单场的自治性与抗扰能力,为集群层面的稳定运行奠定基础。

4.2 集群间智能体协商与全局优化

在本地调控实现的基础上,各风电场智能体通过邻域通信与状态共享机制,开展跨场协商与协同优化。通过信息交换,智能体能够感知其他场站的功率出力与运行约束,从而在集群范围内实现动态任务分配。主控智能体在此过程中扮演全局协调角色,根据区域功率平滑、电网需求响应及备用容量约束等目标,发布优化指令。

4.3 异常工况下的自愈与鲁棒响应

风电场集群在运行过程中不可避免会遭遇风速突变、机组故障或通信链路中断等异常工况。为应对这些挑战,智能体系统具备双层自愈与鲁棒响应能力。其一,局部智能体通过本地监测与快速诊断,可在异常发生后立即进入鲁棒运行模式,自主收缩输出功率边界,避免功率冲击传递至电网。其二,主控智能体通过全局状态评估,能够快速识别异常范围,并切换至应急协同策略,重新分配功率任务,同时执行故障隔离方案,确保非故障区域运行的稳定性。

5 仿真分析与工程应用验证

5.1 仿真平台与参数设定

为验证所提分布式协同控制方法的有效性,本文基于MATLAB/Simulink平台搭建了风电场集群仿真系统。平台中设置了多个风电场单元及其下属风电机组,并引入智能体模块分别承担本地预测、功率调节和通信协调等功能,构建了完整的分布式协同控制架构。为了提升仿真的准确性与工程可操作性,平台导入了不同地区的实测风速数据,考虑了气象条件的区域差异性与时序波动性;同时引入了典型风电机组的性能参数,包括输出功率曲线、爬坡速率限制以及响应时延等。调度约束方面,平台模拟了集群有功平衡需求、电网频率约束和备用容量约束,确保结果能够反映实际运行特性。通过上述设置,仿真平台不仅能够准确再现风电场集群运行特征,还为后续工况测试与策略验证奠定了坚实基础。

5.2 典型工况仿真与结果分析

在所构建的仿真平台上,本文选取高风速波动、机组参数扰动与系统异常三类典型工况进行测试。结果表明,在

高风速频繁波动场景下,分布式协同控制方法能够有效平抑功率输出,总体波动幅度较集中式控制下降约30%,显著改善了系统稳定性。在机组性能参数发生扰动时,智能体依托本地自治与全局协同机制,能够快速调整分配策略,保证集群输出与电网需求的匹配度。面对系统异常(如通信链路中断或部分风电场失效),所提控制方法可实现快速切换至鲁棒模式,保障集群整体功率调控的稳定性。仿真结果进一步显示,响应时间缩短,风能利用率明显提升,大面积弃风现象得到有效缓解,验证了所提方法在复杂运行环境下的优越性。

5.3 工程应用前景与优化建议

结合国内多个风电场集群工程实践案例,本文提出的分布式协同控制方法在工程应用中展现了较强的适应性与扩展性。其分布式架构能够有效适应风电场数量和规模的动态变化,减少对集中调控中心的依赖,提高了系统的灵活性和鲁棒性。未来推广中,应重点加强智能体本地感知与通信能力的建设,提升对风速、负荷及电网状态的实时监测水平。同时,需要建立完善的鲁棒优化模型参数库,以适应不同气象环境与设备特性的差异。

6 结语

本文针对风电场集群有功功率调控中的不确定性与分布式管理难题,提出了融合不确定性建模、鲁棒优化与多智能体分布式协同机制的控制方法。仿真分析与工程案例验证表明,所提方法能有效提升风电场集群的有功输出可控性、协同响应速度和异常自愈能力,为大规模风电消纳与电网安全运行提供了有力支撑。未来可进一步拓展多源异构新能源场站的协同优化,推动分布式智能控制在智能电网中的实际落地。

参考文献

- [1] 蔡昌春,程兴荣,朱俊伟,等.考虑风机出力不确定性的海上风电场无功/电压快速跟踪优化[J/OL].电网技术,1-13[2025-09-27].
- [2] 程雪婷,张家瑞,刘新元,等.考虑风机排序的风电集群分层有功控制策略[J].电力工程技术,2021,40(02):26-32+85.
- [3] 连金达.考虑不确定性的新能源电力系统随机优化调度[D].华北电力大学,2022.
- [4] 邱旺盛.考虑风电不确定性的风—水—储联合优化调度研究[D].西安理工大学,2020.
- [5] 郑惠萍,曾鹏,刘新元,等.基于误差前馈预测的多时空尺度风电集群有功功率分层控制策略[J].电力建设,2020,41(08):120-128.

Analysis of overcurrent alarm caused by electromagnetic compatibility

Wei Yao

Siemens Gamesa Renewable Energy Technology (China) Co., Ltd., Tianjin, 300384, China

Abstract

In early 2024, rotor overcurrent alarms occurred in wind turbine units in Sweden and other regions as well as on the test bench of the Valencia factory Benisano. The analysis shows that the root cause is related to electromagnetic compatibility. The noise source is the common-mode voltage, the transmission channel is the relevant cable group, and the disturbed equipment is the control unit (CCU). EMC tests found that installing ferrite cores on DB9 cables and disconnecting the grounding of relevant shields can improve the situation, while ferrite has little impact on DB25 cables. Field measures have verified that disconnecting the grounding of the MP to driver cable shield is effective. It is recommended to remove the grounding of the relevant cable shield, add ferrite to DB9 cables, and improve the design of the MP board.

Keywords

electromagnetic compatibility; overcurrent alarm; common mode current; MP board (multi-purpose board)

关于电磁兼容引发的过流误报警分析

姚威

西门子歌美飒可再生能源科技（中国）有限公司，中国·天津 300384

摘要

2024年初，瑞典等地风电机组及瓦伦西亚工厂 Benisano 测试台出现转子过流误报警。分析显示，根本原因与电磁兼容相关，噪声源为共模电压，传输通道为相关电缆组，受扰设备为控制单元（CCU）。EMC 测试发现，DB9 电缆装铁氧体磁芯、断开相关屏蔽层接地可改善情况，铁氧体对 DB25 电缆影响小。现场措施验证，断开 MP 至驱动器电缆屏蔽层接地有效。建议移除相关电缆屏蔽层接地、给 DB9 电缆加铁氧体、改进 MP 板设计。

关键词

电磁兼容；过流误报警；共模电流；MP 板（多功能板）

1 引言

2024 年初，在瑞典等地的特定风电机组现场，尤其是处于调试阶段的斯卡斯琼 Skalsjon 及其他风电场，多次出现因转子短路报警导致的误跳闸情况。这些跳闸并非由真实短路引发，报警在系统达到并网状态后立即触发，致使风机无法持续运行。尽管较为罕见且孤立，但瓦伦西亚功率变流器（Benisano）工厂的 SG5.x 变频器常规测试台也报告了此类报警的误跳闸现象。尽管测试台的电磁噪声环境与现场不同，但这一情况仍值得关注或可为未来解决方案提供参考。

转子短路问题出现于不同风电场，报警 272、273、274 触发时常伴 SkiiP 错误信号，被归为转子过流误报警。排查发现：可能是控制单元（CCU）信号闪烁触发过流报警；对 SkiiP 错误信号滤波后出现额外停机错误信号；修改阈值

水平（参数 A458）只是临时解决方案；审查装配流程等未获结果；数据追踪器分析显示 CCU 与多用途卡（MP）间有虚假斩波器触发信号，需全面分析相关部件；对曾触发报警的变流器的 MP 卡分析未得明确结果；审查电压测试流程未发现导致 MP 卡损坏的环节；Falcon 公司称 MP 卡生产物料清单相同，不同版本均会出现误报警。还提出了相关测试建议。

2 电磁兼容相关问题根本原因

噪声相关故障根本原因可能是噪声过量、易传输至受扰设备、受扰设备抗扰度不足或三者兼具。噪声源为直流母线与 CCU 接地间及不同接地点间的共模电压，传输通道为斩波级到 CCU 的电缆组等。受扰设备为 CCU，其现场可编程门阵列读取 SkiiP 信号等未滤波，这是潜在弱点，而数字信号滤波是提升抗扰度的标准做法。

【作者简介】姚威（1981-），男，中国天津人，本科，助理工程师，从事变频器，电力电子，EMC，认证等研究。

3 首轮测试总结

2024 年 4 月现场发现，两条 DB9 斩波电缆上安装铁氧体磁芯，以及将多用途（MP）卡至斩波驱动电缆的屏蔽层不接地后，情况均显著改善，直流母线电压（Udc）读数得以改善，消除了 4V 的快速尖峰。同时进行了接地电压测绘，测量不同接地点之间的电压峰值。

2024 年中期马德里 SFH 12CD SG5x 测试台发现，对现场故障多用途（MP）板检测，其 Udc 读数噪声更大（峰值 4V），但在该测试台中未出现报警。

在 Agustinos 现场的发现，对现场板卡样本分析，发现存在一些非理想制造问题且有改进空间，但这些问题无法明

确解释或与误报警相关联。

2024 年末 SFH 12CD SG5x 测试台发现，在接地测绘显示，IGBT 区域是变流器中噪声最大且是最高频率成分来源处，SFH 测试台变流器中 MP 卡至斩波驱动电缆屏蔽层接地柱之间的电压水平仅为现场测量值的一半。测量证实铁氧体磁芯在 1MHz 至数 MHz 频率范围内可衰减斩波 DB9 电缆上的共模电流。去除多用途电缆屏蔽层的接地与在 DB9 电缆上添加铁氧体效果相似。在测试台上尝试多种操作，均未成功引发误报警。

初始与当前多用途（MP）板的物料清单对比，未发现导致报警或 Udc 读数差异的明显偏差或原因。首轮测试及其结论为后续测试奠定了基础。

Test	State	Meas. point	Ferrite	Shield	EFT	Joined cables	ALARM	Freq res (MHz)	Max dB(uA)
1	Connected	DB9-X19	Yes vs No	Earthed	No	No	No	2 - 3	50 (without ferrite) 30 (with ferrite)
2	Connected	DB9-X19	No	Earthed vs Unearthed	No	No	No	2 - 3	50 (earthed shield) 27 (unearthed shield)
3	Connected	DB25	Yes vs No	Unearthed	No	No	No	7 - 8	35 (with and without ferrite)

基准测试总结结果，得出的结论摘要：

- a. 使用铁氧体磁芯可使共模电流幅度降低约 30 分贝
- b. 对 DB9 电缆影响显著。
- c. 铁氧体磁芯对 DB25 电缆的影响可忽略不计。
- d. 去除多用途（MP）卡至驱动器电缆屏蔽层的接地，其效果与安装铁氧体磁芯相似。

4 故障 MP 板检查

2024 年 9 月，VPC 常规测试台上的一台 5x 变流器出现转子短路误报警，仅在更换两块多用途（MP）板后报警才停止。这两块板被送至 SFH 5X 测试台，未引发报警，且直流母线电压（Udc）读数未出现异常。建议将其运回 VPC，在即将进行常规测试的 5x 变流器机组上再次检查。若再次引发报警，将重新核查这些板卡与其他样本之间的差异或偏差，并评估正在考虑的解决方案。

重新检查绝缘测试或其他可能造成损坏的常规测试，需要重新梳理 VPC 的常规测试流程，在绝缘测试期间测量多个元件（主要是 MP 板的去耦电容）上的电压，确认电压是否可能达到损坏元件的水平。

使用电快速瞬变（EFT）发生器注入噪声，以触发报警并评估解决方案。

5 测试正在考虑的解决方案

在现场可编程门阵列（FPGA）中对 SkiiP 通用输入输出（SkiiP 错误）和 SkiiP 停机信号进行滤波。断开多用途（MP）卡至斩波驱动器屏蔽层的本地接地。

初步制定改进措施，提高 MP 板去耦电容的额定电压。于是在 VPC 工厂对故障 MP 板的检查，测试于 10 月 15 日和 16 日在变流器 S/N 5300270427 上进行。

首先在一台发生过流报警的故障变流器上进行测试，将两块多用途板更换为新的。

使用新 MP 板进行测试，总共执行四项测试：其一，对 X19 连接器的 DB9 电缆进行常规工况测量（无铁氧体、无脉冲施加、电缆屏蔽层接地），作为后续测试的基准对比；其二，采用扎带将三相交流电缆与斩波驱动器至 MP 板的电缆进行捆束；其三，在 X19 连接器电缆上加装特定铁氧体（伍尔特电子 74271211），验证其可降低 1MHz-3MHz 频段电流峰值及低频振幅；其四，断开 MP 板至斩波驱动器电缆屏蔽层接地，且不加装铁氧体。这对比下图曲线产生了显著影响。

在对比了多用途板（MP 板）至斩波驱动器电缆屏蔽层接地与不接地的影响。注意，多用途板至驱动器的电缆仍与转子 3 相的交流电缆捆扎在一起。

使用新 MP 板的结论

Test	State	Measurement point	Ferrite	Shield	EFT	Joined cables	ALARM	Freq res (MHz)	Max dB(uA)
1	Synchronized	DB9-X20	No	Earthed	No	No	No	3	60
2	Synchronized	DB9-X19	No	Earthed	No	Yes	No	3	63
3	Synchronized	DB9-X20	Yes vs No	Earthed	No	Yes	No	1 - 3	63 (without ferrite) 50 (with ferrite)
4	Synchronized	DB9-X19	No	Unearthed	No	Yes	No	3 - 4	63 (unearthed shields) 40 (earthed shields)

6 结论

将交流电缆与多用途板至驱动器电缆捆扎对共模电流无影响。使用铁氧体可使共模电流幅度降低约 13 分贝。断开多用途板至驱动器电缆屏蔽层的接地，共模电流可降低约 23 分贝。DB9-X19 电缆中测得的共模电流与 DB9-X20 电缆中测得的相似。断开多用途板至驱动器电缆屏蔽层的接地，其效果与安装铁氧体相似。

然后，使用原始 MP 板进行测试

在同台变流器上换用曾引发过流故障的原始多用途板

(MP 板)，配置为：MP 板至驱动器电缆屏蔽层接地，电缆与转子三相交流电缆分离，未加装铁氧体。测试显示：DB9 到 X19 电缆共模电流与新 MP 板相近；3MHz 左右接地电缆电流无明显异常；三相交流电缆与斩波驱动器至 MP 板电缆捆扎时触发过流报警，表明原始 MP 板对交流电缆更敏感；DB9 到 X19 电缆加装铁氧体则无报警；多次试验中，除加装铁氧体或使用电流探头，过流报警会系统性触发；断开 MP 板至 X19 电缆屏蔽层接地，五次测试均无报警，且此时共模电流降低；恶化柜体接地连接、将 MP 板至斩波驱动器电缆屏蔽层接噪声更大接地点，均无报警。

Test	State	Measurement point	Ferrite	Shield	EFT	Joined cables	ALARM	Freq res (MHz)	Max dB(uA)
1	Synchronized	DB9-X19	No	Earthed	No	No	No	3	62
2	Synchronized	Ground cable	No	Earthed	No	No	No	aprox 3MHz	35
3	Synchronized	DB9-X19	No	Earthed	No	Yes	YES	-	-
4	Synchronized	DB9-X19	Yes	Earthed	No	Yes	No	-	-
5	Synchronized	DB9-X19	No with CM probe	Earthed	No	Yes	No	-	-
			No without CM probe				YES	-	-
			No with CM probe				No	-	-
			No without CM probe				YES	-	-
			No with CM probe				No	-	-
6	Synchronized	DB9-X19	No without CM probe	Unearthed	No	Yes	No	-	-
7	Synchronized	DB9-X19	No with CM probe	Unearthed	No	Yes	No	aprox 3.5MHz	63 (unearthed shields) 40 (earthed shields)
8	Synchronized	DB9-X19	No without CM probe	Earthed	No	Yes	No	-	-
9	Synchronized	DB9-X19	No without CM probe	Earthed	No	Yes	No	-	-

结论总结：

接地电缆中 3MHz 左右的电流水平不显著。

该组 MP 板相较于之前的版本，对交流电缆的 proximity 更为敏感。

使用铁氧体有助于避免过流报警触发。

铁氧体可使共模电流幅度降低约 30dB。

共模电流探头有助于防止过流报警激活。

断开 MP 板至驱动器电缆屏蔽层的接地，其效果与安装铁氧体相似。

恶化变流器柜体之间的接地连接不会产生过流报警。

将 MP 板至驱动器电缆的屏蔽层连接到噪声更大的接地点，不会产生过流报警。

7 重新检查绝缘测试或其他潜在破坏性常规测试

重新检查旨在验证这些测试是否可能随机损坏板卡，使其更敏感而产生过流报警。DB9 的 3 号引脚与外壳间电容约 800pF，接地电容未显损坏（额定电压 100V）。

绝缘测试时，电压施加于 UL 连接器引脚（CCU 的 X2A 连接器）与地之间。UL 电压读数分压器的 MΩ 电阻直接连 X2A 引脚，但其旁电路均悬浮不接地。因 Skiips 通过 0V 与 DB25 外壳连接，将内部电路 0V 接地，而 DB25 外壳经电缆屏蔽层在 CCU 侧接地。若绝缘测试时断开 DB25 电缆与 CCU 的连接，内部电路会与地断开，且因 MP 板的 DB9 电缆仍连 CCU，测试电压会抵达 MP 板，施加于 MP

板和 CCU 的去耦电容上。

为评估解决方案，在 SFH 工厂用 EFT 发生器对常规 MP 板测试，脉冲群施加于铝箔包裹的 MP 板至驱动器电缆。基于此进行三大项 17 小项测试

第一项测试（未装铁氧体，屏蔽层接地）：施加 1500V、2000V 脉冲群均未触发报警。第二项测试（屏蔽层不接地）：施加 200V、1000V、1500V 脉冲群，电流振幅变化，未超常规配置，接地状态影响电流高频分布。第三项测试（验证噪声源）：变流器应急及关闭状态下，在 DB9、DB25 电缆施脉冲群均未触发报警，明确噪声源在 Skiips。

所有测试未触发过流报警，明确了噪声源及接地对共模电流的影响

得出的结论总结：

所有这些测试均在未安装铁氧体且未将 MP 板至驱动器电缆与交流电缆捆扎的情况下进行，因为测试重点在于 MP 板至驱动器电缆屏蔽层的接地点。

电缆屏蔽层在常规位置接地时：

- 施加脉冲群时，较高的共模电流振幅偏移至 2.2MHz。
- 脉冲群振幅越大，共模电流振幅越高。

电缆屏蔽层不接地时：

- 较高的共模电流水平出现在 3.2MHz 处。
- 脉冲群振幅越大，共模电流振幅越高。

电缆屏蔽层通过 1 米长电缆连接至 CCU 接地点时：

- 较高的共模电流振幅偏移至 1.4MHz。
- 脉冲群振幅越大，共模电流振幅越高。

Test	State	Measureme nt point	Ferrite	Shield	EFT	Joined cables	ALARM	Freq res (MHz)	Max dB(μV)	Perturbatio n point	Vpk (V)	f(Hz)	tr(ms)	td(ms)	time(min)
1	Emergency	DB9	No	Earthed	No	No	No	-	60	-	-	-	-	-	-
			No	Earthed	Yes	No	No	2.2	65	MPP-driver	1500V	5kHz	300ms	300ms	1min
			No	Earthed	Yes	No	No				2000V	5kHz	300ms	300ms	1min
2	Off	DB9	No	Unearthed	No	No	No	-	60	-	-	-	-	-	-
			No	Unearthed	Yes	No	No	3.2	65	MPP-driver	200V	5kHz	300ms	300ms	1min
			No	Unearthed	Yes	No	No	3.2	85	MPP-driver	1000V	5kHz	300ms	300ms	1min
3	Emergency	DB9	No	Unearthed	Yes	No	No	3.2	90	MPP-driver	1500V	5kHz	300ms	300ms	1min
			No	CCU earth	Yes	No	No	1.4		MPP-driver	200V	5kHz	300ms	300ms	1min
			No	CCU earth	Yes	No	No	1.4		MPP-driver	1000V	5kHz	300ms	300ms	1min
			No	CCU earth	Yes	No	No	1.4		DB25	200V	5kHz	300ms	300ms	1min
	Off	DB9	No	Unearthed	Yes	No	No	1.4		DB25	1000V	5kHz	300ms	300ms	1min
			No	CCU earth	Yes	No	No	1.4		DB25	1000V	5kHz	300ms	300ms	1min
			No	CCU earth	Yes	No	No	1.4		DB25	1500V	5kHz	300ms	300ms	1min
			No	CCU earth	Yes	No	No	1.4		DB25	2000V	5kHz	300ms	300ms	1min
	Connected 1120rpm without power	DB9	No	CCU earth	Yes	No	No	1.4		DB25	2000V	5kHz	300ms	300ms	1min
			No	Unearthed	Yes	No	No	1.4	52	DB25	2000V	5kHz	300ms	300ms	1min
			No	MPP earth	Yes	No	No	1.4	80	DB25	2000V	5kHz	300ms	300ms	1min

无论 MP 板至驱动器电缆屏蔽层的连接点如何，均有共模电流通过 DB9 电缆。因此，这些电缆中的噪声源与 CCU 接地点和 MP 接地点之间的电压降无关，而与 Skiips 区域有关。

8 无额外外部电容器的测试

测试在变流器停止状态下进行，测量 DB9-X19 电缆共模电流，组合条件包括是否用铁氧体、MP 板至驱动器电缆

屏蔽层是否接地、干扰施加位置（MP 板至驱动器电缆或 DB25 电缆），共进行 12 项测试。测试 1-12 分别对应不同条件下的测量，结果已汇总。测试在变流器停止状态下进行，测量 DB9-X19 电缆上的共模电流，测试组合包括：是否使用铁氧体、MP 板至驱动器电缆屏蔽层是否接地，以及干扰施加在 MP 板至驱动器电缆还是 DB25 电缆上。

执行上述测试，以便得到共模电流数据

Test	State	Measureme nt point	Ferrite	Shield	EFT	Joined cables	ALARM	Freq res 1 (MHz)	Max dB(μV)	Freq res 2 (MHz)	Max dB(μV)	Perturbatio n point	Vpk (V)	f(Hz)	tr(ms)	td(ms)	time(min)
1	Off	DB9-X19	No	Earthed	No	No	No	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	Off	DB9-X19	Yes	Earthed	No	No	No	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	Off	DB9-X19	Yes	Earthed	Yes	No	No	1.4	50	8-10	50	MPP-driver	2000V	5kHz	300ms	300ms	1min
4	Off	DB9-X19	No	Earthed	Yes	No	No	2.2	60	8	60	MPP-driver	2000V	5kHz	300ms	300ms	1min
5	Off	DB9-X19	No	Earthed	Yes	No	No	2.2	70	7.5	75	DB25	2000V	5kHz	300ms	300ms	1min
6	Off	DB9-X19	Yes	Earthed	Yes	No	No	1.4	60	7.5	70	DB25	2000V	5kHz	300ms	300ms	1min
7	Off	DB9-X19	No	Unearthed	No	No	No	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	Off	DB9-X19	Yes	Unearthed	No	No	No	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	Off	DB9-X19	Yes	Unearthed	Yes	No	No	-	72	-	80	MPP-driver	2000V	5kHz	300ms	300ms	1min
10	Off	DB9-X19	No	Unearthed	Yes	No	No	-	70	-	83	MPP-driver	2000V	5kHz	300ms	300ms	1min
11	Off	DB9-X19	No	Unearthed	Yes	No	No	-	-	7.5	80	DB25	2000V	5kHz	300ms	300ms	1min
12	Off	DB9-X19	Yes	Unearthed	Yes	No	No	-	-	7.5	72	DB25	2000V	5kHz	300ms	300ms	1min

DB9 屏蔽层接地时，铁氧体可降共模电流，其不接地时，铁氧体无效，且无铁氧体时两电缆施脉冲群，电流水平相近。

9 结语

MP 板报警差异原因不明，可能与元件容差、环境噪声、布线路由有关。主要结论包括：铁氧体可降 DB9 电缆共模电流约 30dB，对 DB25 电缆影响小；移除 MP 至驱动器电缆屏蔽层接地，共模电流降幅与铁氧体相近；接地连接恶化、屏蔽层接至噪声点均不引发报警；脉冲群振幅与共模电流振幅正相关，屏蔽层接地状态影响共模电流高频分布；DB9 电缆噪声源与 Skiips 区域相关。

从电磁兼容（EMC）及过流报警避免角度总结：铁氧体可使 DB9 电缆共模电流降约 30dB，对 DB25 电缆影响甚微；移除 MP 至驱动器电缆屏蔽层接地，共模电流降幅与加铁氧体相近，且恶化柜体接地、接噪声更大接地点不引发过流报警，3MHz 左右接地电缆电流水平不显著。脉冲群方面，

电缆屏蔽层接地情况影响共模电流振幅偏移频率，铁氧体仅在屏蔽层接地且干扰施加于特定电缆时，能降低共模电流；屏蔽层不接地时，铁氧体无作用，且施加脉冲群后共模电流水平相近。DB9 电缆噪声源与 Skiips 区域相关。现场在瑞典风电场两台变流器上断开 MP 至驱动器电缆屏蔽层接地，UDC 电压改善，两周无过流报警。综上，为避免过流误报，建议移除 MP 至斩波器驱动器电缆屏蔽层接地、每根 DB9 电缆加铁氧体或改进 MP 板设计

参考文献

- [1] MPP BOARD ELECTRICAL SCHEME
- [2] D2051686_006-SG5x ICD Converter
- [3] D2051678_005_RD CONVERTER SG 5.X_21102020
- [4] ID8437 ROTOR SHORTCIRCUIT ALARM INVESTIGATION REPORT
- [5] CONVERTER SG 5.X PARAMETERS LIST
- [6] CONVERTER SG 5.X ALARM LIST

Green Performance Enhancement Approaches for Building Envelopes of Tibetan Dwellings in Heritage Conservation

Wei Xiong

Lhasa Municipality Design Group Co., Ltd., Lhasa, Xizang, 850032, China

Abstract

Tibetan vernacular dwellings, as unique cultural heritage in plateau regions, hold significant importance for heritage conservation and sustainable development through enhancing the green performance of their building envelopes. This study integrates heritage conservation theory with green building criteria to systematically analyze the thermal performance characteristics and regionally adaptive design strategies of Tibetan dwelling envelopes. It proposes multidimensional enhancement pathways spanning material upgrades, structural optimization, and technological integration. Furthermore, to balance cultural continuity and performance improvement, a layered retrofit strategy of «core structural preservation + peripheral system modernization» is advocated. The research establishes a tripartite evaluation framework encompassing thermal performance, cultural compatibility, and economic viability, and develops a parametric design methodology for building envelopes based on regional climatic parameters.

Keywords

Tibetan Dwellings; Heritage Conservation; Building Envelopes; Green Performance Enhancement Approaches

面向遗产保护的藏式民居围护结构绿色性能提升路径

熊卫

拉萨市设计集团有限公司, 中国 西藏 拉萨 850032

摘 要

藏式民居作为高原地区独特的文化遗产, 其围护结构的绿色性能提升对遗产保护与可持续发展具有重要意义。研究结合遗产保护理论与绿色建筑标准, 系统分析了藏式民居围护结构的热工性能特征及地域适应性设计策略。研究提出在材料、结构、技术集成等多维度层面提升路径; 同时, 以兼顾文化传承与性能提升, 需采用“核心构件保护+外围系统升级”的分层改造策略, 构建了包含热工性能、文化契合度、经济可行性的三维评价体系, 提出基于地域气候参数的围护结构参数化设计方法。

关键词

藏式民居; 围护结构; 绿色性能; 遗产保护; 技术路径

1 引言

藏式民居作为高原地区独特的文化遗产, 其建筑形态与地域文化深度融合, 展现了藏族人民适应高寒环境的智慧结晶。在气候条件严苛、建材技术受限的高原环境中, 藏式民居围护结构的热工性能与节能潜力尚未得到充分挖掘。在全球气候变暖与可持续发展理念深化的背景下, 提升藏式民居围护结构的绿色性能已成为文化遗产保护与生态协同发展的重要命题。本研究立足于遗产保护视角, 结合绿色建筑、建筑节能技术、可持续发展等理论, 旨在探索围护结构性能提升与文化传承的协同路径。

2 当前技术措施的问题与矛盾

针对藏地民居的绿色性能提升, 当前主流技术提升措施有: 新型复合保温体系包括新型保温装饰一体化构造、优化开窗比例与遮阳构造、太阳能-地热能复合供能系统与围

护结构优化结合、本地烧制粘土砖与掺入牦牛粪的改良夯土墙等新型复合夯土墙、本地建材的就地取材, 被动式通风廊道、双层中空夯土墙等。

传统建筑材料与构造方式的局限性, 是制约绿色性能提升的核心问题。藏式民居普遍采用夯土、木材与石材等天然材料, 虽具有良好的地域适应性与文化延续性, 但其热工性能与气密性存在明显不足, 尤其在严寒气候条件下, 围护结构的保温隔热能力难以满足现代节能标准。夯土墙体的导热系数较高, 导致冬季热损失显著, 而现代轻质材料的替代虽能改善热工性能, 却可能破坏建筑的历史肌理与文化表征^[1]。

在相关技术集成路径中, 光伏-储能-地暖联供系统相较于独立太阳能热水系统, 能源综合利用效率显著提升, 但初期投资成本增加; 地源热泵系统在海拔 3500 米以上区域的适用性显示, 垂直埋管换热效率较水平埋管提升, 但需特别考虑冻融循环对管道材料的耐久性要求; 智能控制系统的

引入使建筑综合能耗降低,但对运维人员专业素养的要求成为技术推广的主要瓶颈。

藏区高原具有显著的昼夜温差大、日照时间长、紫外线强烈等气候特点,这要求围护结构需兼顾冬季保温、夏季通风与遮阳的多重功能。传统藏式民居通过深檐、小窗与厚重墙体实现被动式热调节,但面对极端气候波动与室内热舒适需求升级,现有构造方式已显不足。通过增设外遮阳系统、优化开窗比例及引入相变蓄热材料,可有效改善围护结构的热稳定性,但容易因过度干预导致建筑立面效果及历史文化特征的弱化。

遗产保护与绿色改造的技术协调性,是制约提升路径选择的重要因素。根据《文化遗产保护国际宪章》原则,任何技术干预都应遵循“最小干预”与“可逆性”准则,这与绿色改造中可能需要的结构加固或系统性更新形成矛盾。例如,屋顶光伏板的安装虽能提升能源自给率,但若破坏原有的建筑形制,则违背遗产保护原则。因此,需建立多目标优化模型,量化评估不同改造方案对文化遗产价值与绿色性能的综合影响,优先选择对建筑本体干扰最小、能产生协同效益的技术措施,如利用传统彩绘颜料的热反射特性,或改良夯土中黏土与碎石配比,以提升围护结构的保温性能。

技术经济可行性与地域建造传统的适配性亦构成现实制约。藏区地广人稀、建材运输成本高昂,且本地工匠多依赖传统营造技艺,这对新技术的推广与实施形成挑战。比如采用本地取材的改良夯土复合墙体,其建造成本低,且可依托传统夯筑工艺实现,显示出显著的经济与社会可行性。

3 解决策略

在面向遗产保护的前提下,单一技术措施难以实现建筑绿色性能与文化遗产价值的双重目标。材料改良类措施在文化延续性方面优势显著,但需通过现代工艺提升性能;结构优化措施具有较好的经济性,但需与传统建筑形制有机结合;技术集成方案虽能显著提升能效,但需建立适应高原环境的技术标准体系。本研究建议采用“核心构件保护+外围系统升级”的分层改造策略,优先在非核心区域应用新技术,建立包含技术、管理、政策的三位一体提升体系。

4 提升路径

4.1 技术路径

4.1.1 墙体构造

针对夯土墙热工性能不足的问题,可采用复合保温技术,通过在墙体内部嵌入轻质气凝胶板或纤维增强石膏板形成保温夹层,在保持原有承重结构与外观特征的同时提升保温性能。对于石砌墙体,可结合矿物基相变材料喷涂技术,利用其在昼夜温差较大的高原环境中实现蓄热调节。此外,通过在夯土中掺入牦牛毛纤维或玄武岩纤维进行材料改性,既能增强墙体抗剪切强度,又能改善孔隙率分布以优化保温性能^[2]。

4.1.2 屋顶体系

针对传统平屋顶易积雪导致结构荷载过大的问题,可采用预应力钢筋网加固技术,在屋面结构层设置预应力筋网以分散荷载,并在保温层中嵌入导热系数低的发泡水泥板。为改善冬季室内热舒适性,可在屋顶坡度适宜的建筑物中增设倒置式保温层,将憎水性挤塑聚苯板置于防水层上方,通过数值模拟确定保温层厚度与屋面通风口尺寸的最优组合。对于传统彩画装饰的屋顶,可利用透光性光伏瓦片与传统纹样结合的复合材料,在不改变建筑风貌前提下实现太阳能利用。

4.1.3 门窗系统

针对木格窗传热系数过高的问题,可采用双层中空玻璃与传统木框结合的复合窗型,通过窗框冷桥缝隙填充硅酮密封胶,并设多道密封条实现气密性提升;为维持室内自然通风,可在窗框上部设可调节穿孔板通风器;对于开敞式门廊,可引入智能调光玻璃技术,通过电致变色涂层,实现透光率的实时调节,同时结合风速传感器与自动控制系统,形成自适应遮阳体系。

4.1.4 材料选择

材料选择与构造技术的协同优化是提升围护结构绿色性能的关键。应优先采用本地可再生材料,如利用青稞秸秆、牦牛粪等农业废弃物制备轻质保温砖,其导热系数低且具有良好的防火性能。对于传统黏土砖,可通过添加粉煤灰或火山灰矿物掺合料改善烧结性能,在降低生产能耗的同时提升材料抗冻融能力。

4.1.5 施工工艺

在施工工艺方面,需建立传统匠作技艺与现代建造技术的衔接标准,例如采用3D打印技术复刻传统砖雕纹样,既保证装饰构件的形制精度,又减少手工雕刻的材料损耗;在保持藏式民居文化特质的基础上,构建具有地域适应性的围护结构绿色提升体系。

4.2 管理路径

政府应建立系统化的政策法规体系,明确围护结构绿色改造的技术标准与文化遗产保护要求,制定地方性规范文件;需建立跨部门协同机制,整合住建、文旅、民族宗教等部门职能,形成规划审批、施工监管、效益评估的全流程管理闭环,避免因部门职能交叉导致的改造标准冲突^{[3][4]}。

同时,政府应构建基于全生命周期的管理机制。在改造实施阶段,需建立传统工艺与现代技术的融合管理机制,要求设计单位在采用新型保温材料或节能技术时,通过文化部门组织的专家论证,确保对建筑肌理与地域特色的最小干预;在施工过程中,应实施全过程监理制度;在运营维护阶段,需建立居民参与的长效管理机制,通过定期培训,提升使用者对绿色技术的维护能力;建立能耗与碳排放的动态监测档案,为后续性能优化提供数据支撑。

政府可通过设立专项基金与税收减免政策,引导企业

参与绿色建材研发与改造工程；在社区层面，建立居民利益共享机制，增强其参与改造的主动性；同时引入第三方专业机构，开展绿色性能认证，通过市场化激励推动改造项目的标准化实施；对于具有突出文化价值的遗产建筑，可探索“保护性改造+文化展示”的复合管理模式^{[5][6][7]}。

通过建立动态优化的监测评估体系，形成管理路径闭环；结合居民满意度调查，构建多维度评估指标；基于数据分析结果，定期修订技术标准与管理规范，形成“评估-反馈-优化”的迭代机制。对于改造后出现的文化特征弱化或性能衰减等问题，应及时启动修复预案，确保绿色改造与遗产保护目标的动态平衡。

4.3 政策路径

政策引导与制度保障是推动技术转化和模式创新的核心动力。政府及相关机构需从顶层设计出发，构建多层次、多维度的政策体系，以系统性思维破解现存瓶颈。首先，应建立差异化财政补贴与税收减免机制，针对不同海拔、气候分区及经济条件的地区制定精准扶持政策。例如，对采用被动式节能技术、可再生能源系统的民居改造项目提供阶梯式资金补贴，并对使用本地环保建材的企业给予增值税优惠。此外，可设立专项绿色建筑发展基金，通过政府引导、社会资本参与的模式，为低收入家庭提供低息贷款或以工代赈机会，降低居民改造经济压力。

政府需从顶层设计出发，构建多层次、多维度的政策体系，以系统性思维破解现存瓶颈，建立差异化财政补贴与税收减免机制，针对不同海拔、气候分区及经济条件的地区制定精准扶持政策；同时，需不断推动建立区域性建材数据库与技术推广平台，并通过示范工程验证技术适配性，形成可复制的高原民居绿色技术清单；强化跨部门协同治理与长效管理机制，由住建部门牵头，联合文化、生态、能源等部门成立专项工作组，统筹协调民居保护与绿色升级中的规划审批、文化遗产保护、生态补偿等事项；在项目实施阶段，推行“政府+科研机构+工匠协会”的三方协作模式，确保传统建造技艺与现代绿色技术有机融合；注重政策宣传与社区参与能力建设，通过编制通俗易懂的绿色改造手册、组织工匠培训与技能竞赛等形式，提升基层技术人员的专业水

平。此外，需建立改造项目全生命周期评估制度，通过物联网监测系统实时采集民居热工性能、能耗数据，定期评估政策实施成效并动态调整技术路线与补贴标准。

5 结语

藏式传统民居的围护结构具有显著的地域适应性特征，但受限于传统材料性能与建造技术的局限性，其保温隔热、气密性及采光通风等方面仍有提升空间。藏式民居围护结构的绿色性能提升，需遵循“传统智慧与现代技术融合”的核心原则，通过“技术、管理、政策”三大体系，构建多层级的被动式节能体系，达到材料创新、构造优化、系统协同的综合提升。另外，地域气候适应性与文脉保护应贯穿优化全过程，文化价值与技术性能的平衡是关键挑战；通过加强政策引导与多方协同机制建设，可以推动传统建筑保护与绿色建筑标准的衔接。未来可进一步研究建立长期性监测数据库，以评估改造技术的耐久性；开发适用于高原地区的“围护结构热工-环境-文化”复合评价体系，以及探索基于可再生能源的围护结构一体化系统，为藏式民居的绿色可持续发展提供系统性支撑，最终实现藏式民居在文化遗产与生态可持续发展之间的动态平衡。

参考文献

- [1] 许月.西藏林芝传统民居气候适应性研究——以夏季实测数据为主作为分析依据[D].华中科技大学, 2014.
- [2] 冷木吉.地域适应下农区藏式传统民居建筑环境与节能潜力研究[D].天津大学, 2017.
- [3] 李浩林.川西北地区传统藏式民居室内热环境对比优化分析[D].四川农业大学, 2024.
- [4] 程静月.基于外围护结构优化的川西北藏式民居室内热环境改善及节能研究[D].四川农业大学, 2024.
- [5] 余艳川.西北嘉绒藏式民居室内热环境优化研究[D].四川农业大学, 2018.
- [6] 杨玉严,李强,董学卓等.基于太阳能技术的西藏负能耗绿色建筑节能设计[J].建筑节能, 2018(01):66-70.
- [7] 陈永爱.拉萨地区住宅光伏光热一体化系统设计与性能研究[D].天津大学, 2025.

Quality control strategy in construction project management

Kun Cao Yating Fan

Shaanxi Coal Industry Chemical Construction (Group) Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi, 710000, China

Abstract

Quality control in construction projects serves as the cornerstone for ensuring engineering safety, durability, and compliance with design specifications. This paper provides a systematic exploration of comprehensive quality control strategies throughout the construction lifecycle. The study first establishes the foundational role of developing standardized quality management systems and optimizing organizational structures. It then elaborates on dynamic control methodologies across three phases: pre-construction, during construction, and post-construction, encompassing quality pre-control, process monitoring and correction, as well as evaluation and rectification. Subsequently, the paper examines end-to-end management strategies for critical elements including personnel, materials, and equipment. Finally, it proposes establishing root cause analysis-based quality improvement mechanisms and pathways to integrate technological innovation into quality control practices.

Keywords

construction; project management; quality control; quality management system; process control

建筑施工项目管理中质量控制的策略

曹琨 范雅婷

陕西煤业化工建设（集团）有限公司，中国·陕西 西安 710000

摘 要

建筑施工项目的质量控制是确保工程安全、耐久和符合设计功能要求的核心环节。本文系统探讨了建筑施工项目全过程中的质量控制策略。论文首先阐述了构建标准化质量管理体系和优化质量管理组织架构的基础性作用。随后，详细分析了施工前、施工中、施工后三个阶段的动态控制方法，包括质量预控、过程监控与纠偏、评估与整改。进而，论文深入讨论了对人员、材料设备等关键要素的全流程管理策略。最后，提出了建立基于根源分析的质量改进机制和推动技术创新在质量控制中应用的途径。

关键词

建筑施工；项目管理；质量控制；质量管理体系；过程控制

1 引言

在建筑工程项目施工过程中，相应的施工人员必须要首先保障该施工项目具备着较高的质量水平，才能够促使其在后期发挥出应有的作用，这一点是毋庸置疑的，基于此，相应的管理人员也应该着重加强对于这种质量方面的管理和控制^[1]。针对当前我国现阶段建筑工程施工项目中质量管理的现状进行分析可以发现，虽然其管理的效率和水平正在不断提升，但是相对应的影响因素增加，这也就对于具体的质量管理工作的提出了更高的要求和挑战，这些问题的克服和解决也就成了今后今后建筑工程施工项目管理人员需要克服的一个重要问题所在^[2]。

2 建筑施工项目质量管理体系构建

2.1 质量管理体系的标准化设计

项目质量控制的有效实施，依赖于质量管理体系的标准化设计。该制度体系需全程覆盖项目从启动到竣工验收的各个环节，为各质量活动明确行为规范与评判标准，项目质量管理体系需精准界定建设单位、勘察单位、设计单位、施工单位及监理单位等各责任主体在质量方面的责任与义务。打造清晰的权责界限，制度需细致规定材料、构配件与设备的进场验收步骤、抽样送检规则 and 不合格品的处理办法，保障投入项目的资源质量达标。制度还需纳入工序质量的自检、互检和交接检相关规定，规定每道工序完成且验收合格后才可开展下一道工序。

2.2 质量管理组织架构优化

高效的质量管理组织架构为质量管理体系的顺畅运行提供了有力依托^[3]。项目需构建以项目经理作为首要责任人，以技术负责人和质检人员为核心支撑，各专业工长和班组为

【作者简介】曹琨（1996-），男，中国陕西岐山人，本科，助理工程师，从事建筑工程研究。

支撑的质量管理体系,此组织架构要保障指令传递毫无阻碍、信息反馈迅速准确。项目经理肩负着对项目质量开展全面管理与决策的终极责任,需保障质量管理所需资源投入并开展组织协调,技术负责人需应对施工进程中的技术难题。编写并审定施工方案,通过技术手段保障工程质量,专职质检人员独立开展质量检查、监督与验收工作,工作不被生产进度干扰,直接向项目经理反馈情况,各专业工长与班组长承担所管范围内日常质量把控与自检任务,优化后的组织架构需设立定期的质量例会机制,利于各方交流质量情况、协同处理质量问题。

3 施工过程质量动态控制策略

3.1 施工前阶段的质量预控措施

施工前期的质量预控充分展现了主动管理理念,目的在正式施工前消除质量隐患。预控工作首先要做的是安排所有相关技术人员仔细会审施工图纸,迅速找出图纸里的错、漏、碰、缺等问题,进而与设计单位沟通处理,保证施工依据精准性。鉴于此状况,项目应编写具备针对性与可操作性的施工组织设计及专项施工方案,方案要明确关键工序的施工方式、技术手段、质量准则和验收条件。技术交底作为预控的核心步骤,施工方案编制人员要向作业层管理与操作人员详尽交底,让他们透彻掌握设计意图、技术要点和质量标准。对材料供应商的考察与挑选也是预控的重要方面,要预先明确合格供应商名单,对进场施工的机械设备开展性能检查,保证其运行状况良好。经过精心的施工前期筹备,可为后续施工活动打造优质的质量开端,最大程度减少因准备不充分导致的质量问题。

3.2 施工中的过程监控与纠偏

施工进程中的实时监测和及时矫正偏差是质量控制的核心要点,着重于即时管理工序质量^[4]。过程监控需要管理人员,尤其是质检员与工长,要亲临作业现场,对施工操作展开巡查,检查关键看操作人员有无严格依照技术交底和施工规范开展作业,施工工艺参数是否契合方案要求。针对隐蔽工程,诸如地基基础、钢筋的绑扎、预埋管线的设置等,需实施严格的旁站监控,且在覆盖前邀监理方或建设方一同验收,完成隐蔽工程验收手续办理,若在监控进程中发现存在不符合的情况,要马上开出质量整改通知单,清晰界定整改内容、时间限制与责任人。针对具有普遍性或倾向性特征的质量问题,应即刻分析缘由,采取举办现场会议、补充技术交底甚至停止施工等纠偏办法,过程监控需借助必要的检测工具和仪器,像靠尺、水准仪、回弹仪等,经实地测量获取客观数据,跟质量标准作比对,实现数据化的质量把控,实时的过程监控保障施工活动一直处于受控状况。

3.3 施工后阶段的质量评估与整改

施工结束阶段开展的质量评估与整改,是对已完工部分质量的最终认定和优化,还能为后续工作积累经验与教

训。每完成一个检验批或分项工程,均需依照现行质量验收规范组织正规验收,验收工作要依照设计文件与施工合同,对工程实体在观感质量、几何尺寸及功能性能方面开展全面检查评价。针对所发现的质量缺陷,不管是视觉上的瑕疵还是影响使用功能的故障,均要分类登记,制定周全的修补办法,整改工作需由专业施工人员依照方案执行,完成后要开展复查,保证问题被彻底处理。施工结束后,仍需着重做好成品保护工作,制订并实施有效的保护办法,避免已完成部分在后续施工里受到污染或破坏,分部分项工程的各类验收资料,像测量记录、试验报告、验收记录这类,需及时收集、整理、存档,保证质量记录真实、完整且可追溯。该阶段工作是对前期质量把控效果的核查,更是交付合格产品的最后一道防线。

4 质量相关要素的全流程管理

4.1 人员管理的质量控制策略

人员是影响工程质量最关键且最具主动性的要素。质量控制全程都涉及对人员的管理,管理策略的关键起始点是提升全员的质量认知,通过不间断的教育与宣传,让“质量第一”的理念深入人心。依据不同岗位对人员,开展有差别的培训与考核,针对管理人员,培训着重于质量管理方法、施工规范标准以及组织协调能力;针对一线操作工人,尤其是特种作业人员,要坚决落实持证上岗制度,强化实际操作技能与工艺纪律培训。项目需构建切实有效的激励体系,把质量绩效和个人收入、评优评先等关联起来,对质量贡献大的人给予奖励,对引发质量事故的实施相应惩处。创建和谐的团队氛围与良好的工作环境,维护工人合法权益,也利于稳定人员队伍,增强他们的工作责任感与积极性。通过提升人的素养,管控人的行动,可最大程度减少人为差错,从根本上保障工程质量。

4.2 材料设备的质量管控要点

材料和设备作为构建工程实体的物质根基,其质量直接关乎工程的内在优劣。管控的要点是从严格的采购环节开始,需挑选信誉佳、质量稳的合格供应商,且在采购合同里明确材料技术标准、验收方式和质量责任,材料设备进场之际,质检人员需核对出厂合格证、质量证明文件等资料,按规范开展外观检查和抽样复试,复试合格才可投入使用。对于关乎结构安全与使用功能的关键材料,诸如钢筋、水泥、防水材料之类,需执行见证取样送检制度。材料的存储与保管同样关键,应按照材料特性提供适宜场地和条件,像水泥防潮、钢筋防锈、装饰材料防碰撞损坏等,且执行先进先出原则,杜绝因保管不佳造成质量降低,施工机械设备性能状态对工程质量同样存在影响。要定期开展维护保养工作,保证其精度和稳定性符合施工需求,严格管控材料设备的整个流程,是杜绝质量问题根源的关键举措。

5 质量改进与持续创新机制

5.1 质量问题的根源分析与改进措施

构建系统的质量问题根源剖析与改进体系是达成质量持续提高的核心^[5]。遇到质量问题,不应只停留在表面处理,要深入挖掘其根源。项目可借助“五个为什么”分析法、因果分析图(鱼骨图)等质量工具,从人员、机器、材料、方法、环境、测量等多维度展开剖析,探寻问题背后管理与技术层面的系统性漏洞。依据根源分析结论,拟定具针对性的纠正与预防举措,纠正措施的目的是消除当前问题的影响,阻止其即刻再度发生,预防措施则聚焦于对制度、流程或系统进行优化,杜绝类似问题在其他部分或未来项目里再次出现。项目需搭建质量信息数据库,把出现的质量问题、分析环节、采取手段和效果检验等信息予以记录,积累为有价值的组织过程资产,按时组织质量分析研讨活动,交流成功与失败的经验,把有效的改进办法转化为标准作业流程,基于闭环管理构建的持续改进机制,带动项目质量管理水平不断呈螺旋状攀升。

5.2 技术创新在质量控制中的应用

积极促进技术创新能显著增强质量控制的效率和精准度。现代信息科技为质量管控带来了新途径,建筑信息模型(BIM)技术能在施工前开展三维可视化设计与碰撞检查,预先找出并解决潜在的设计冲突,对施工方案加以优化,从根本上减少返工现象。

借助移动互联网与物联网技术,质检人员能凭借手持设备实时记录和上传检查数据、抓拍现场影像,达成质量信息的即时采集、共享及追溯,大幅提升管理效率,利用无人机巡检可轻松对高大模板支架、大型基坑边坡等开展空中监测,取得人工无法触及的视角。

3D 激光扫描技术可迅速、精确地对复杂结构或大型构件开展测量工作,构建高精度点云模型,同设计模型进行对照,高效实现质量验收,采用新型检测仪器和自动化施工设备,可显著增强检测数据的客观性与施工工艺的稳定性,积极接纳技术创新,应用于质量控制工作,是建筑业迈向高质量发展的必然走向。

6 结语

建筑施工项目质量把控属于复杂的系统工作,要搭建科学管理体系,实行全过程动态监控,加强关键要素把控,且构建持续改进机制。标准化质量管理制度与清晰组织架构

构成质量控制的基础框架,质量形成的核心链条由施工前、施工中、施工后三个阶段的动态控制策略构建而成。对人员以及材料设备实施管理,是保障工程质量的根本要素,开展根源剖析以改进质量,同时积极引入技术创新,为质量管理的不断升级注入持久活力,这些策略彼此关联、相互协作,合力构成一个完整的质量控制闭环。伴随建筑技术进步与管理理念革新,质量控制策略需持续改进与完善,最终目的是持续交付符合甚至超出各方期望的优质建筑成果。

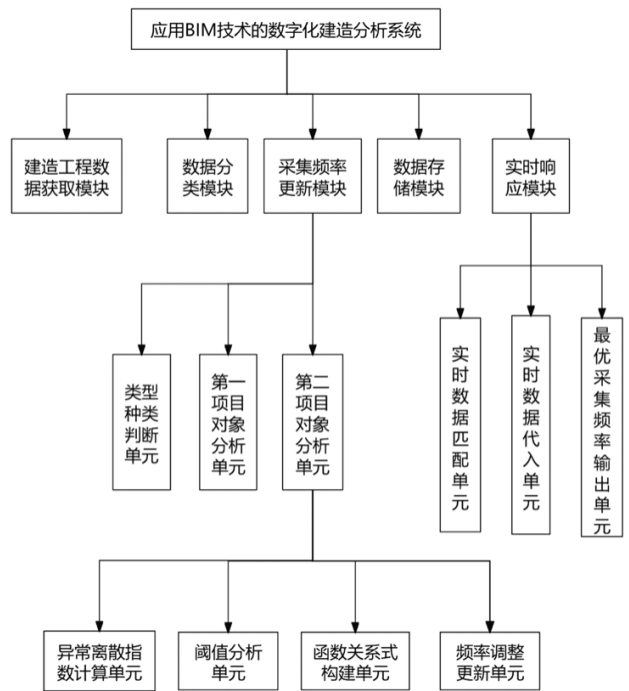


图 1 建筑信息模型 (BIM) 系统应用流程图

参考文献

- [1] 鄢文龙.建筑工程项目管理及施工质量控制策略探析[J].建设机械技术与管理,2024,37(06):30-32.
- [2] 周子涵.建筑工程项目管理及施工质量控制探讨[J].建筑与预算,2024,(05):28-30.
- [3] 代简.建筑工程项目管理及施工质量控制有效策略的探讨[J].粮食与食品工业,2022,29(05):24-25.
- [4] 邹镜亮.浅论建筑工程项目管理在施工技术质量控制中的应用价值[J].门窗,2019,(12):211.
- [5] 梁西君.建筑工程项目管理中施工质量控制策略[J].城市建设理论(电子版),2018,(15):46.

The value and application of digital technology in construction quality control

Ziqi Liang

Xi'an Aerospace Test Technology Institute, Xi'an, Shaanxi, 710000, China

Abstract

In recent years, China's rapid economic growth has driven remarkable advancements in digital technologies. These innovations have been increasingly adopted across industries, emerging as a vital catalyst for sectoral development—with the construction industry being a prime example. Today, digital technologies play a pivotal role in all aspects of construction project implementation, particularly in quality control. This paper explores the value of digital technologies in construction quality management and proposes practical implementation strategies, aiming to provide actionable insights for industry professionals.

Keywords

digital technology; construction engineering; construction quality control; value; application countermeasures

数字化技术在建筑工程施工质量控制中的价值与运用对策

梁子琦

西安航天动力试验技术研究所, 中国·陕西 西安 710000

摘 要

近年来, 随着我国经济的快速发展, 数字化技术得到了日新月异的发展。与此同时, 数字化技术在各行业中的应用也越来越广泛、越来越深入, 成为了促进行业发展的重要力量, 建筑行业就是其中之一。现如今, 数字化技术在建筑工程施工的各个方面都有着重要应用, 施工质量控制就是其中的一个重要方面。在此基础上, 文章针对数字化技术在建筑工程施工质量控制中的价值与运用对策进行了探讨, 旨在为相关工作提供一定的参考。

关键词

数字化技术; 建筑工程; 施工质量控制; 价值; 运用对策

1 引言

在我国经济迅速发展的社会背景下, 各地区的建筑工程项目正在如火如荼地开展中。建筑工程项目包括的环节众多, 施工质量控制是其中的一个重要环节, 只有做好施工质量控制工作, 建筑工程项目才能达到预期的经济效益和社会效益。当前, 数字化技术在很多建筑工程项目的施工质量控制中都有着重要应用, 成为提升施工质量控制水平的重要手段。对于数字化技术在建筑工程施工质量控制中的价值与运用对策进行探讨具有重要的意义, 能够有效促进数字化技术在建筑工程施工质量控制中的进一步应用。

2 数字化技术概述

数字化技术通常也被称为数字控制技术、计算机数字技术等, 该技术能够将文字、图片、声音等信息转化为二进制数据, 以便进行运算、加工、存储、传送和传播。数字

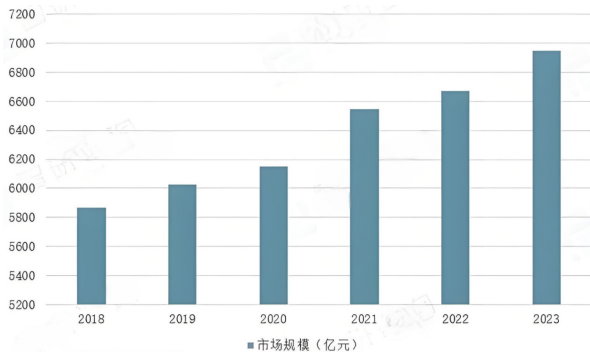
化技术与电子计算机技术密切相关, 与电子计算机技术相伴相生。与普通技术相比, 数字化技术具有鲜明的特点, 主要包括通常采用二进制、抗干扰能力强、保密性比较好等。大数据、云计算、物联网、区块链、人工智能等都属于数字化技术的范畴。

3 数字化技术在建筑工程施工质量控制中的运用价值

数字化技术在建筑工程施工质量控制中具有重要的运用价值, 主要体现在以下三个方面: 第一, 能够提升施工质量控制的效率。通过数字化技术的应用, 能够实时采集到施工质量控制中的关键数据, 从中及时发现施工质量控制中存在的具体问题, 进而及时采取措施解决问题, 施工质量控制的效率因此能够得到大幅提高; 第二, 便于对施工质量进行追溯。数字化施工管理系统能够详细记录施工过程中的每一项操作, 一旦施工过程中出现质量问题, 可以快速找到质量问题产生的原因, 进而采取改进措施。另外, 工作人员能够通过历史质量数据的分析, 不断地总结质量管控的经验教

【作者简介】梁子琦 (1994-), 男, 本科, 中国山东郓城人, 工程师, 从事土建工程及管理研究。

训,从而使施工质量管控制度不断地得到完善;第三,提升施工质量控制中的协同工作效率。从事施工质量控制的工作人员能够通过数字化平台实时查看质量记录、检测报告等,进而就有关问题进行及时沟通。在这个过程中,施工质量控制中的协同工作效率能够得到明显提升。



2018—2023 年中国建筑智能化工程市场规模

4 数字化技术在建筑工程施工质量控制中的运用对策

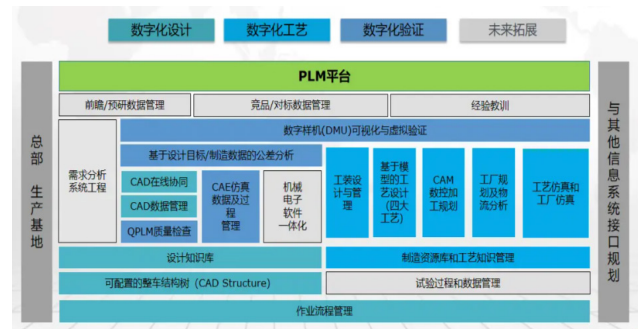
4.1 大数据技术在建筑工程施工质量控制中的运用对策

施工企业通过系统收集材料性能检测数据、施工工艺参数、环境监测记录以及历史质量缺陷案例等海量信息,构建起多维度的工程质量数据库。这些数据经过专业分析模型的深度挖掘,能够揭示出各类质量指标之间的内在联系,比如不同配合比的混凝土在不同养护条件下的强度发展规律,或是特定施工班组操作习惯与构件安装精度之间的相关性。管理人员借助数据可视化工具,可以直观掌握质量趋势,对潜在风险实现早期预警。更为重要的是,基于机器学习算法,系统能够不断优化质量控制的关键节点设置,自动生成针对性的检测方案。这种数据驱动的质量管理方式,使质量控制从传统的结果验收转向全过程预测性管理,显著提升了质量决策的科学性和前瞻性。

4.2 物联网技术在建筑工程施工质量控制中的运用对策

物联网技术是一种能够通过感知设备、网络传输、数据处理等手段的应用,实现物与物、人与物之间的互联互通的技术体系。在建筑工程施工过程中,可以为施工人员配备智能手环、智能安全帽等设备,然后通过物联网技术的应用,实时掌握施工人员的具体施工位置、实际的施工状态、具体的生命体征等信息。一旦某些施工人员存在违规操作的行为或者疲劳作业的情况,系统就会给出相应的预警提醒,在这个过程中能够有效减少人为因素对于工程质量的影响。另外,可以在施工现场设置各类传感器,如温度传感器、扬尘传感器、噪声传感器等,在此基础上对施工环境参数进行实时监测。当施工现场的环境参数偏离了预设的标准时,系

统就会给出相应的提示信息,从而便于及时采取措施进行处理。在这个过程中,能够有效降低环境因素对于施工质量的影响。



数字化技术在建筑工程中的应用

4.3 云计算技术在建筑工程施工质量控制中的运用对策

云计算技术的深度融合为施工质量管理搭建了高效的协同工作平台。基于云计算架构的质量管理系统能够整合设计单位、施工单位、监理单位及业主方等各个参与主体,实现质量信息的实时共享与业务协同。现场质量检查人员通过移动终端即时上传验收记录、检测报告及现场影像资料,这些信息会同步更新至云端数据库,确保所有参与方获取的信息完全一致。云平台还提供了统一的质量文档管理中心,对施工图纸、技术规范、变更通知等文件进行版本控制,有效避免了因文件版本不一致导致的质量问题。在技术支撑层面,云计算强大的弹性计算能力能够支持复杂的质量分析模拟,例如对异形结构施工过程进行力学仿真,为制定科学的质量控制方案提供理论依据。这种基于云平台的质量管理新模式,打破了传统质量管理中的信息壁垒和时间延迟,构建起透明、高效、协同的现代化质量管理体系。

5 数字化技术在建筑工程施工质量控制中应用的有效保障

5.1 制定企业级数字化质量管理标准

数字化技术若想在建筑工程施工质量控制方面切实发挥出效能,离不开一系列系统化的保障措施。企业制定统一的数字化质量管理标准是最为基础的前提条件,其可为技术应用提供清晰明确的执行框架。当前诸多企业在引入BIM、物联网等数字化工具时,大多时候遭遇各项目标准不一致、数据格式混乱的难题,致使信息难以实现互通共享。企业应当从顶层设计着手,构建囊括数据采集、传输、存储以及分析的全流程标准体系,明确各类质量检查点的数字化验收规范。这套标准还需要规定不同参建方之间的数据交换协议,以此保证监理、施工等各方可在统一平台上协同开展工作。唯有借助标准化建设,数字化质量管控才可以摆脱碎片化应用的状态,形成贯穿项目全生命周期的管理体系。

5.2 组建复合型质量管控技术团队

保证数字化质量控制成效的最关键的是人才支持，构建通晓建筑工程又熟练掌握数字技术的复合型团队颇为关键。现场质量管理人员不能只局限于传统检查方式，还需掌握智能检测设备操作、数据解读以及系统维护等技能。企业应有规划地开展内部培训，推动现有质量监督人员更新知识架构，同时积极引进有信息技术背景的专业人才。在实际操作中，这支复合型团队可更精准地理解数字化系统输出的质量评估结果，及时察觉数据异常背后的工程问题。他们还可以依据现场实际状况优化数字化检测方案，保证技术应用不偏离工程实际，这种人才队伍的结构转变为数字化质量控制提供了最为活跃的要素。

5.3 加大智能检测设备与系统投入

对智能检测设备以及系统进行持续投入，乃是夯实数字化质量控制的物质基础所在。随着技术不断进步，像各类智能传感器、无人机以及三维扫描仪等设备，为质量监测给予了更为丰富的手段。施工企业应当合理规划资金投入，循序渐进地配备契合项目特点的智能检测装备，举例来说，在大型项目当中引入混凝土温度监测系统，于复杂钢结构施工过程中应用激光扫描检测技术。这些设备可获取借助传统方法难以捕捉到的质量数据，达成从依靠人眼观察朝着依靠仪器精准检测的转变。最关键的是，企业不能仅仅关注硬件采购，还需配套建设数据集成分析平台，把分散的检测数据整合成为完整的质量信息库，以此为持续改进质量控制提供数据方面的支撑。

5.4 建立与数字化匹配的考核激励机制

构建契合数字化管控要求的考核激励机制是促使技术得以落地的关键举措。要是依旧采用传统的质量考核办法，就很难调动各方积极主动运用数字化手段的热情。企业得重新规划评估体系，把数字化平台记录的质量数据以及问题整改时效等归入考核指标，以此形成正向引导。对于那些可熟练使用数字化工具且主动发觉质量隐患的人员，应该给予适度奖励，对于在数字化管理方面创新成果的项目团队，可以在企业内部推广其经验。这种机制实际上是要营造重视

数据、崇尚精准的质量文化，使得数字化管控不再是额外的负担，而是成为提升工作效能的有效办法。只有当参与者从数字化应用中真正获得益处，这项变革才可拥有持久的生命力，全面提高建筑工程的质量控制水准。

6 结语

综上所述，数字化技术在近些年中得到了迅猛发展，并且在各行业中的应用力度也在不断地加大，极大地促进了各行业的发展。在建筑行业中，数字化技术在建筑工程施工中的多个环节都有着重要的应用。在建筑工程施工质量控制环节，通过大数据技术、物联网技术、云计算等数字化技术的应用，能够显著提升质量控制的效率以及质量控制的水平。在建筑工程施工质量控制的过程中，相关工作人员需要不断探索数字化技术的运用对策，以提升数字化技术的应用效果。

参考文献

- [1] 赵翠, 冯扬. 基于数字化背景的建筑工程技术专业群人才培养模式的探索与实践[J]. 科技风, 2025, (20): 132-134.
- [2] 侯贺猛. 基于数字化技术的公建建筑工程精细化管理研究——以合肥星泓金融创新城C地块为例[J]. 住宅与房地产, 2025, (14): 65-67.
- [3] 苏英强, 刘颖, 孙伟, 徐建坤. 基于知识图谱的个性化学习模型构建方法研究——以建筑工程技术专业群为例[J]. 江苏科技信息, 2025, 42 (03): 60-64.
- [4] 蔡利博, 周驰, 徐张, 邱晓磊, 杨蜀梅. 浅议建筑工程领域“新咨询”服务模式定义、要点与实践——基于全过程工程咨询的升级和优化[J]. 中国工程咨询, 2024, (12): 35-40.
- [5] 何忠政, 丁磊, 滕亚鹏, 马东, 杨宗怀. 数字化测量技术在住宅建筑工程室外管网土方开挖工程中的应用与研究[J]. 居舍, 2024, (31): 18-21.
- [6] 杨伟, 张羽, 吴晓静, 郑通城, 夏坚. 数字化技术在文物建筑预防性保护中的应用与工程实践——以全国重点文物保护单位马尾轮机厂为例[J]. 福建建设科技, 2024, (05): 131-135.
- [7] 鲁玲, 邓鼎. 数字驱动, 创效增值 数字化设计在异形建筑EPC工程中的全过程应用[J]. 中华建设, 2024, (05): 86-89.

Processing and Performance of Brazed Joints Between Ti(C,N)-Based Cermet and 40Cr Steel

Shuzhu Zhou Fuchang Wang Yanhong Ding*

School of Materials Science and Engineering Hunan University of Technology, Zhuzhou, Hunan, 412000, China

Abstract

A systematic investigation was conducted on brazing Ti(C,N)-based cermet to 40Cr steel with an AgCuZn active filler metal in a high-frequency induction setup. The microstructure of the fabricated joints was thoroughly characterized using SEM and EDS, and their mechanical performance was assessed via shear testing. This study aimed to determine the optimal brazing parameters and their effect on joint integrity. It was found that sound joints, free of defects and with excellent interfacial bonding, were produced. An optimal brazing temperature of 850 °C yielded the highest shear strength of 220 MPa. Microstructural analysis revealed that the cermet interface was dominated by Ag-based and Zn-based solid solutions, and the failure mode was identified as predominantly brittle fracture.

Keywords

Ti(C,N)-based cermet; AgCuZn filler; induction brazing; interfacial structure

Ti(C,N) 基金属陶瓷与 40Cr 焊接的工艺及性能研究

周书助 王福昌 丁燕鸿*

湖南工业大学材料科学与工程学院, 中国 · 湖南 株洲 412000

摘 要

本研究采用AgCuZn活性钎料, 在高频感应钎焊炉中成功实现了Ti(C,N)基金属陶瓷与40Cr钢的连接, 制备出Ti(C,N)基金属陶瓷/AgCuZn/40Cr钎焊接头。利用扫描电子显微镜(SEM)和能谱分析(EDS)等手段, 系统表征了接头的微观组织结构, 并评估了其力学性能。通过实验确定了金属陶瓷与钢材钎焊的最佳工艺温度, 重点分析了钎焊工艺参数对接头剪切强度及微观形貌的影响规律。研究结果表明, 所获钎焊接头组织均匀、无明显缺陷, 钎料与两侧母材间润湿性良好, 并在界面处形成了明显的反应层。当钎焊温度为850℃时, 接头剪切强度达到最大值220 MPa。微观分析显示, 金属陶瓷侧界面区域主要由Ag基和Zn基固溶体组成, 断口分析表明其断裂模式以脆性断裂为主。

关键词

Ti(C,N)基金属陶瓷; AgCuZn钎料; 感应钎焊; 剪切强度; 界面结构

1 引言

金属陶瓷是一种由陶瓷相和金属粘结相组成的复合材料。其中, Ti(C,N)基金属陶瓷兼具陶瓷与金属的优良特性, 拥有高硬度、高耐温性、优异的耐腐蚀性与耐磨性, 在模具制造和石油化工等领域展现出巨大的应用潜力^[1-2]。然而, 该材料可加工性差, 难以直接制造复杂形状零件, 且通过粉末冶金方法获得的尺寸受限。因此, 将其与40Cr钢等金属进行可靠连接, 以制造结构复杂的零部件, 成为扩大其应用的关键。40Cr钢作为一种应用广泛的合金结构钢, 具有优

良的综合机械性能和可加工性, 被行业广泛认可^[3]。它属于超高强度钢, 具备高强度和韧性, 淬透性良好, 经调质处理后疲劳极限高、抗冲击能力强, 低温韧性亦表现良好, 非常适合用于制造要求高强度和韧性的大中型塑料模具^[4]。高频感应钎焊利用工件在高频交流磁场中产生的感应电阻热进行焊接, 是一种高效、低成本的连接技术。该技术利用趋肤效应实现快速、局部的选择性加热, 热影响区小, 对母材性能影响轻微, 且过程易于控制、热效率高、污染小^[5], 因而在工业连接中应用日益广泛。基于此, 本文采用AgCuZn合金作为钎料, 开展Ti(C,N)基金属陶瓷与40Cr钢的高频感应钎焊研究, 旨在优化工艺参数, 并系统分析所得接头的界面组织与断裂形貌。

2 实验方案

将Ti(C,N)基金属陶瓷加工成尺寸为100mm×50mm×30mm的立方体, 并将40Cr钢加工成

【作者简介】周书助(1966-), 男, 中国湖南浏阳人, 博士, 教授, 从事粉末冶金材料研究。

【通讯作者】丁燕鸿(1968-), 女, 中国湖南攸县人, 博士, 副教授, 从事新能源材料研究。

150mm×200mm×40mm 的立方体,在其顶端预留出与金属陶瓷尺寸相匹配的缺口(如图 1 所示)。感应钎焊前进行如下预处理:对真空烧结后的 Ti(C,N) 基金属陶瓷试样进行表面磨平,并去除待焊表面的氧化层。随后使用喷砂机对其待焊面进行喷砂处理,以增加表面粗糙度,从而有效提高钎料与母材的接触面积。最后,将 Ti(C,N) 基金属陶瓷试样置于丙酮溶液中,利用超声波清洗器清洗后晾干。对 40Cr 钢母材同样进行喷砂处理,适当提高其表面粗糙度,随后进行超声波清洗。试验中使用的钎料为片状,厚度为 0.1 ~ 0.3mm。感应钎焊前,先用金相砂纸打磨钎料表面以去除氧化皮,再将其剪成与钎焊面形状和大小相近的小片,最后置于丙酮中经超声波清洗。

中频感应钎焊试验采用对接接头形式。操作时,先将钎剂均匀涂覆在钢母材表面,然后依次放置钎料片和 Ti(C,N) 基金属陶瓷母材,并在钎料与金属陶瓷之间再涂一层钎剂。将装配好的母材、钎料与钎剂置于感应加热线圈中,启动中频感应焊机进行加热。钎焊温度设定为 750 ~ 900℃,当温度升至 700℃时,在工件表面涂撒焊粉以去除高温形成的氧化膜。随后用铝棒对钎焊结构施加一定压力,并在边缘处使用铝夹固定,采用 20Ag 钎料沿焊缝进行填充。填充完成后保压 5~10 秒,以排除焊缝中多余的钎料和熔渣。钎焊完成后,将试件迅速移入保温箱中进行缓冷(保温冷却 12 小时),直至冷却至室温。随后采用机械方式清理表面残留的钎剂及接头附近加热区的氧化膜。利用剪切强度测试仪对连接件进行剪切强度测试,以评估接头强度;并采用扫描电镜(SEM)观察界面形貌,结合能谱分析(EDS)对局部区域进行成分分析。

3 结果与讨论

3.1 感应钎焊接头的强度分析

采用 Ag20CuZn 钎料感应钎焊 Ti(C,N) 基金属陶瓷与 40Cr 时,Ag20CuZn 钎料的熔化温度为 690 ~ 810℃,感应钎焊温度选择为 810 ~ 900℃,为了确定 Ti(C,N) 基金属陶瓷与 40Cr 的高频感应钎焊过程中钎焊温度对接头界面强度的影响。其中,采用万用剪切强度测试仪检测接头剪切强度,其检测结果如图 1 所示。图 1 可以看出钎焊温度与钎焊接头界面强度之间的关系,钎焊温度较低时,接头强度不高,这是由于钎料的熔化温度(680 ~ 750℃)区间较大,温度较低时钎料熔化不充分,流动性差,接触面积小,导致钎焊接头的强度较低。随着钎焊温度的升高,钎焊接头的剪切强度和抗弯强度均增大。这是因为随着钎焊温度的升高,液态钎料的表面张力逐渐降低,钎料对母材的润湿角逐渐减小,润湿性能提高;同时温度的升高增强了钎料金属的流动性,熔融钎料能充分填满母材表面的凹坑,从而增大钎焊接头界面的有效接触面积;钎焊温度继续升高,在 850℃时,接头强度达到最大值,其剪切强度达到 220MPa。然而,钎焊温度

超过 850℃后,母材和钎料的氧化加剧,易造成夹渣等缺陷,而且钎料合金中 Zn 等元素急剧蒸发易产生裂纹和气孔,同时,钎焊温度的提高也使接头残余应力迅速增加,因此钎焊接头结合强度的开始降低。

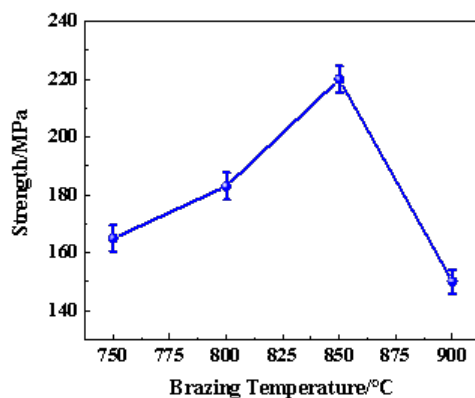


图 1 钎焊温度与钎焊接头界面强度之间的关系

3.2 感应钎焊接头的界面结构分析

在钎焊温度为 850℃时,采用 Ag20CuZn 钎料感应钎焊 Ti(C,N) 基金属陶瓷与 40Cr 材料,对其接头界面组织进行微观形貌分析。图 2 为 Ti(C,N) 基金属陶瓷/AgCuZn/40Cr 钎焊接头的微观形貌背散射电子图像,可以看出,钎焊接头中 Ag20CuZn 钎料与两侧母材润湿良好,并形成致密的界面结合,钎料中间层形成密集的银铜共晶花纹,并分布均匀,且在金属陶瓷一侧形成了一条银铜共晶纹路。

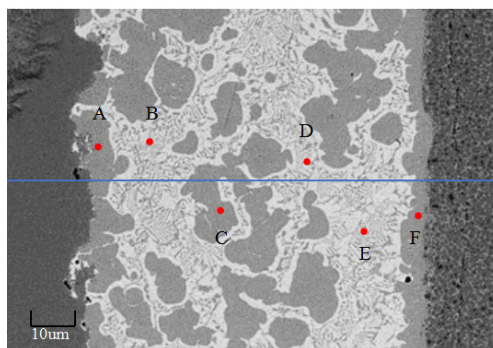


图 2 Ti(C,N) 基金属陶瓷/AgCuZn/40Cr 钎焊接头的微观形貌背散射电子图像

图 3 为钎焊温度 850℃下的接头线扫描能谱分析图。结果表明,界面上各元素分布均匀,Cu、Ag、Zn 元素分布在整个焊缝中,Ni、Co 元素向焊缝扩散,其中 Cu 元素向金属陶瓷侧有一定的偏析。图 4 为感应钎焊界面主要元素的面扫描能谱图,可以看出,Ti、Fe 的分布情况与线分布测试结果基本吻合。

为了确定 Ti(C,N) 基金属陶瓷/AgCuZn/40Cr 钎焊接头的反应产物和界面结构。对钎焊温度为 850℃的接头反应区进行能谱点分析,结果如表 1 所示。结合图 4 和表 1 中点 A 可知,40Cr 反应区侧主要由 Ni、Cu 和 Zn 3 种元素组成。

由于 Ti (C, N) 基金属陶瓷中的 Ni 元素扩散能力强,所以在钎焊时 Ni 元素从陶瓷基体中扩散到钎料反应区,并参与反应。中间区主要为钎料成分区,根据图 3 和表 1 中 B、C 点能谱分析结果可知,其主要成分为银基固溶体 / 铜基固溶体。从点 F 中,结合能谱和面分析结果可以发现:感应钎焊由于连接时间短,钎料和母材之间原子扩散和界面反应不很充分,即界面上钎料和母材均没有明显的相互作用。研究表明^[6],反映界面反应程度和界面接合性能的反应层厚度,是影响接头强度的重要参量。由于它受钎焊工艺参数如温度和时间等的影响,易于测量和控制,因而从理论上探讨它与界面微观结构和界面强度的关系具有十分重要的工程应用价值。

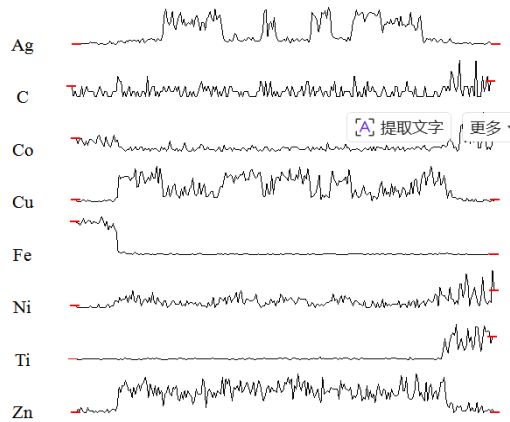


图 3 各元素线扫结果

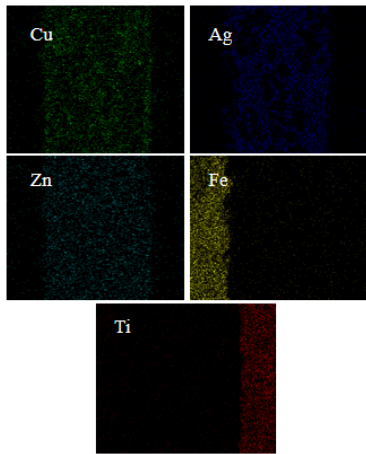


图 4 感应钎焊界面主要元素的面分

3.3 感应钎焊接头的断口分析

图 5 为钎焊温度 850℃时 Ti(C,N) 基金属陶瓷与 40Cr 感应钎焊连接接头剪开后金属陶瓷侧面断口形貌,在陶瓷侧面断口上呈现了晶间断裂的特征,还有“韧窝”存在,出现了混合花样,整个断口主要特征为脆性断裂。

4 结语

采用 AgCuZn 钎料实现了 Ti(C,N) 基金属陶瓷与 40Cr

钢的高频感应钎焊连接。研究了钎焊温度对感应钎焊接头强度的影响,在本试验中,当钎焊温度为 850℃时得到的接头界面强度达到最大值,其剪切强度达到 220Mpa。利用 SEM、EDS 等微观分析手段,探讨了钎焊界面的微观结构和断口形貌,在金属陶瓷侧,主要为 Ag 基和 Zn 基固溶体,金属陶瓷侧整个断口主要特征为脆性断裂。

致谢: 本工作感谢湖南省自然科学基金(项目编号: 2023JJ50195)的支持。

表 1 特性点能谱测试结果

测试点	Fe	Ni	Cu	Zn	Ag
A	1.70	5.99	49.69	31.69	7.18
B			9.32	21.69	68.99
C	0.93	5.62	52.88	31.59	8.97
D			8.63	20.80	70.56
E	1.55	8.73	51.18	31.61	6.94
F		4.19	51.38	32.04	12.39

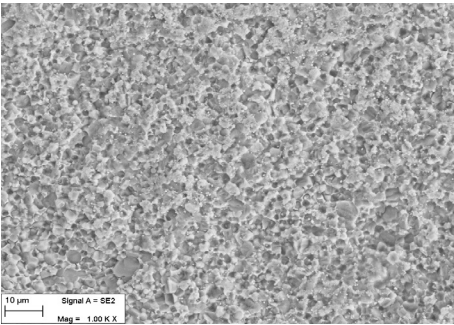


图 5 Ti(C,N) 基金属陶瓷 /Ag20CuZn/ 40Cr 感应钎焊接头断口形貌 (金属陶瓷侧面形貌)

参考文献

- [1] Rajabi A,GhazaliMJ,DaudAR.Chemical composition, microstructure and sint-ering temperature modifications on mechanical properties of TiC-based cermet-A review[J]. Materials and Design, 2015, 67: 95-106.
- [2] 王全兆, 刘越, 张玉政, 等. TiC /NiCr金属陶瓷与Cr13不锈钢的真空钎焊[J]. 焊接学报, 2006, 27(8): 43-46.
- [3] 张帅坤, 张超勇, 吴剑钊, 等. 40Cr钢滚刀织构表面激光淬火的数值模拟[J]. 金属热处理, 2024, (05): 21-25.
- [4] 高鹤芯.40Cr齿轮钢激光淬火过程多场耦合数值模拟及实验研究[D].辽宁科技大学,2022
- [5] 李先芬, 徐道荣, 刘宁. Ti(C,N)基金属陶瓷与45号钢火焰钎焊试验研究[J]. 硬质合金, 2003, 20(02): 91-94.
- [6] 陈铮. 陶瓷和陶瓷(金属)部分瞬间液相连接的界面反应模型和连接强度研究[D]. 杭州: 浙江大学, 199

Comparative Analysis on Film Pressure of Mechanical Seal Face in Changing Conditions

Hongguo Xu¹ Wen Luo²

1. Sichuan Kehong Oil and Gas Engineering Co., Ltd., Chongqing, 404100, China

2. Southwest Oil and gas Field Cost Center Luzhou cost station Luzhou, Sichuan, 646000, China

Abstract

Based on the motion characteristics of mechanical seal faces under variable operating conditions, this study conducted comparative analysis of membrane pressure displacement under two scenarios: identical temperature/rotation speed with different medium pressures, and identical temperature/medium pressure with different rotation speeds. Results demonstrate that changes in medium pressure during operational variations significantly affect seal stability. The expanded boiling zone and intensified evaporation under variable conditions lead to greater fluctuations in membrane pressure. Both sealing fluid pressure and rotational speed are critical factors influencing face opening during variable operating modes. Medium pressure directly impacts the intensity of evaporation during pressure changes. Higher sealing medium pressure results in larger boiling zones, more intense evaporation, and greater membrane pressure variations. The combined effects of face opening/closing and dry friction induce seal tilting, which causes dynamic ring oscillation under dynamic pressure influence.

Keywords

mechanical seal; variable working condition; flash; end membrane pressure; rotational speed

变工况条件下机械密封端面膜压对比分析

徐红果¹ 罗雯²

1. 四川科宏石油天然气工程有限公司, 中国 · 重庆 404100

2. 西南油气田造价中心泸州造价站, 中国 · 四川 泸州 646000

摘 要

根据变工况机械密封端面运动情况, 通过对相同温度相同转速不同介质压力、相同温度相同介质压力不同转速两种情况下端面抽空膜压压力位移对比分析, 结果表明, 工况变化时介质压力的变化是影响机械密封端面稳定性的重要因素。变工况后沸腾区越大闪蒸越剧烈, 端面膜压的变化幅度也越大; 密封流体的压力和转速是影响变工况条件下端面开启的重要因素。介质压力对工况变化后闪蒸的剧烈程度有直接的影响。密封介质的压力越高, 变工况后沸腾区越大闪蒸越剧烈, 端面膜压的变化幅度也越大。在端面开启、闭合以及出现的干摩擦的共同影响, 导致密封端面的倾斜, 在动压力的影响下密封动环发生振荡。

关键词

机械密封; 变工况; 闪蒸; 端面膜压; 转速

1 引言

机械密封的失效形式与密封的工作状态有关, 在变工况发生时, 端面间液膜发生闪蒸与否, 对密封的稳定性有很大影响, 端面间液膜因瞬时汽化发生闪蒸, 使端面间比压发生变化, 导致机械密封的工作处于不稳定状态。当变工况情况发生时, 密封腔压力急剧降低, 引起密封端面压力分布发生变化, 由于密封端面压力变化使密封相变半径变化, 使端面发生闪蒸, 从而把密封动环沿轴向推开。当密封腔压力恢复正常后, 如密封动环不能及时复位, 则密封开启失效。

【作者简介】徐红果(1986-), 男, 中国重庆人, 硕士, 工程师, 从事油气储运研究。

2 正常工况下机械密封端面状况

根据变工况机械密封理论, 机械密封在正常工作状况下, 根据其相变半径的不同, 存在三种不同的工作相态: 液相密封、汽相密封和汽液混相密封。其中汽液混相密封又可分为似液相密封和似汽相密封^[1]。其基本工作结构如图 1 所示。当 $r_b < r_1$ 时, 机械密封处于液相工作状态; 当 $r_b > r_2$ 时, 机械密封处于汽相工作状态; 当 $r_1 < r_b < r_2$ 时, 机械密封处于汽液混相密封。根据汽化半径 r_b 的不同, 当 r_b 比较接近密封面内径 r_1 时, 机械密封处于似液相密封; 当 r_b 比较接近密封面外径 r_2 时, 机械密封处于似汽相密封。

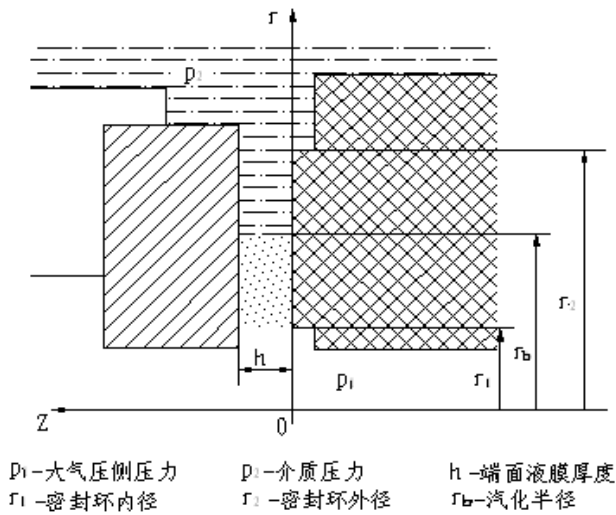


图 1 工况变化时机械密封端面物理模型

表 2 机械密封计算参数

轴套外径	动环内径	动环外径	抽空后压力	介质粘度	汽化潜热	动环导热系数	静环导热系数
(mm)	(mm)	(mm)	(MPa)	(kg.s/m ²)	(J/Kg)	(W/m.℃)	(W/m.℃)
70	72.80	80.80	0.03	1.0×10^3	2260000	6.28	46.52

实验基本条件如表 3 所示：

表 3 实验条件

密封介质	实验室温度 (℃)	大气压 (MPa)	电源	实验时间
水	18.5	0.101	220V 50Hz	2007.1.4

为了研究抽空瞬间机械密封端变化状况，本文测试了介质压力为 0.13MPa、0.23MPa，温度为 75℃、79℃、84℃，转速为 2611 r/min、2704 r/min、2811 r/min 下密封端面膜压的分布情况。为了尽量减小实验中液膜动压效应的影响在实验前对密封端面进行研磨，装配时严格控制密封端面的平行度以及密封端面也旋转轴的垂直度，在每次实验后都对密封端面进行了研磨，装配时都对密封端面的平行度进行了严格的校准。实验前首先让机械密封在 0.12MPa 的压力和转速为 1000 r/min 下跑合 1 小时并对实验的仪表和传感器进行标定。本次实验真空罐压力定为 0.03MPa（可以保证低于实验各测试温度的饱和蒸汽压）。

3.2 实验结果对比分析

3.2.1 同转速、同温度不同介质压力端面抽空膜压对比分析

本组实验对比了机械密封端面抽空瞬时到持续抽空后端面四点压力分布变化。

$$\rho \cdot \frac{p_2 - p_b + \frac{3\rho\omega^2}{20}(r_2 - r_b)}{\ln r_2 - \ln r_1} = \frac{(p_b^2 - p_1^2)}{2RT \ln(r_b/r_1)} \quad (1)$$

式中 p ——压力，MPa

r ——端面半径，m

3 变工况条件下机械密封端面膜压实验

3.1 实验条件准备

本实验中，静环单独加工，为了测量端面膜压的分布以及发生闪蒸时候端面膜压的变化，考虑到过多的测量微孔将会影响端面粗糙度，进而影响实验的准确，所以在静环的径向不同位置处设置 4 个测点其分布如图 2 所示，测点位置见表 1：

由于受到密封端面结构尺寸的限制传感器不能够直接安置与密封端面处，本实验在不同半径处开 4 个直径 1mm 的引压孔，在密封腔体外设置压力传感器测量端面处的膜压，由于传感器距离测试端面距离很小且导压铜管的直径较大，因此可以忽略由此产生的压力损失。机械密封计算参数见表 2：

表 1 膜压传感器测点位置

序号	测点 1	测点 2	测点 3	测点 4
测点位置半 (mm)	37.56	38.92	39.70	40.08

μ ——介质粘度，kg·s/m²

h ——端面间液膜厚度，m

ω ——动环旋转角速度，rad/s

根据公式 (1) 可以算得在此工作条件下相变半径 r_b [2,3]，其中 $r_b < r_1$ ，即此时机械密封端面为全液相。

根据变工况下密封流体压力为 0.13MPa 时密封端面膜压变化中可以得到，在抽空前四测点膜压近似直线分布，抽空前机械密封端面间流体处于全液相。在抽空瞬间密封端面外径压力骤降，测点 3、测点 4 两点的压力已经低于此温度下的饱和蒸汽压，测点 3、测点 4 处于汽相区，而测点 1、测点 2 压力变化很小，说明此处密封端面间的液膜没有发生相变仍然保持液相，经过理论计算得出相变半径为 $r_{b1} = 39.04\text{mm}$ 。持续抽空后在该区域的液膜发生闪蒸 [4]。通过以上分析可以得出，工况变化瞬时，液膜压力失稳，由于压力降低导致汽化半径瞬时增大。汽化半径的瞬时增大致使密封端面液膜瞬时闪蒸，其闪蒸压力大幅超过工况变化前端面膜压。当密封流体压力为 0.23MPa 时，端面膜压已经不再服从线性分布。在此工况下经理论计算所得相变半径为 $r_b = 38.32\text{mm}$ ，即此时机械密封端面处于汽液两相。在抽空瞬时，测点 1 压力有小幅下降，而在液相区 $r > r_{b1}$ 的测点压力降远大于汽相区。在持续抽空后，经理论计算可得抽空后的相变半径 $r_{b2} = 39.54\text{mm}$ ，抽空后 r_{b1} 、 r_{b2} 之间的液体瞬时汽化使得在闪蒸区压力骤升。

对比压力为 0.13MPa、0.23MPa 端面膜压的变化可以得到变工况前密封流体的压力对工况变化后闪蒸的剧烈程度有直接的影响。在介质温度、转速以及抽空压力相同的条件

下,密封介质的压力越高,变工况后沸腾区越大闪蒸越剧烈,端面膜压的变化幅度也越大。

3.2.2 相同温度、相同介质压力不同转速端面抽空压力位移对比分析

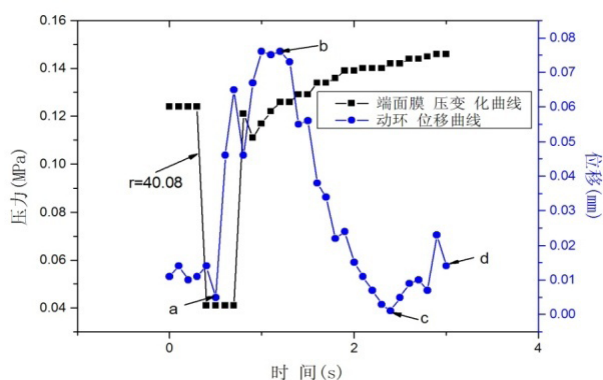


图 3 变工况下温度 79℃密封流体压力 0.13MPa、转速 2704r/min 压力位移关系图

在本组实验中分析了工况发生变化时,密封端面在相同密封流体温度、相同介质压力,不同转速条件下端面运动情况。

图 3 为温度 79℃密封流体压力 0.13MPa 转速 2704r/min 下,变工况发生时压力位移关系图。从图中可以看出,机械密封动环在变工开始到持续的过程中,密封动环的运动仍然分为三个阶段,即密封端面开启阶段、密封端面闭合阶段和密封动环的振荡阶段。在正常工况下膜厚为 9 微米左右,在抽空瞬时端面膜压降到 0.041MPa,此时动环位移向闭合方向运动了 7 个微米。随后由于端面液膜的闪蒸,端面开启力大于闭合力端面开启并达到最大位移处。从图中可以看出动环位移的变化滞后与端面膜压的变化,这也说明动环位移的变化从动于端面膜压的变化。动环位移曲线的最高点 b 处的值为 0.76mm 为正常工况下膜厚的 80~90 倍,最低点位移为 0mm,在 c-d 段由于在端面开启和闭合以及出现的干摩擦的共同影响,导致密封端面的倾斜,在动压力的影响下密封动环发生振荡。

图 4 为转速 79℃密封流体压力 0.13MPa 转速 2966r/min 下,变工况发生时压力位移关系图。

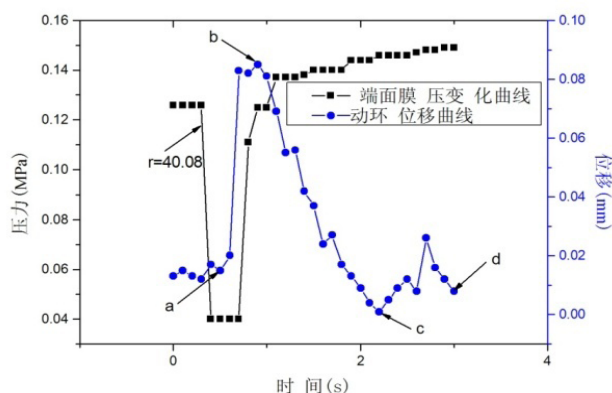


图 4 变工况下转速 79℃密封流体压力 0.13MPa、转速 2966r/min 压力位移关系图

在图中密封动环由于端面发生闪蒸开启的最大位移为 0.85mm,与 2704r/min 条件下相比,由于转速的增加密封动环开启的最大位移大约增大 10 微米,可以看出转速也是影响变工况条件下端面开启的因素之一,转速越高端面闪蒸越剧烈。根据公式 (2) 可知,密封端面的温升与动环角速度的平方成正比,端面温度影响密封端面的相变半径同时也影响闪蒸压力的大小,端面温度越高,变工况发生时液膜的闪蒸压力越大,因此开启力也越大、动环开启的最大位移也越大,符合变工况密封理论。

3.2.3 图像数据分析

在对变工况条件下机械密封端面运动实验研究上,本论文在国内首次应用了可视化技术。记录了变工况发生时,密封端面闪蒸的全过程,得到更为直观的图像数据。直接证明了在变工况(抽空)条件下,机械密封端面必将发生闪蒸。图 5 为经过图像处理后的闪蒸过程图:

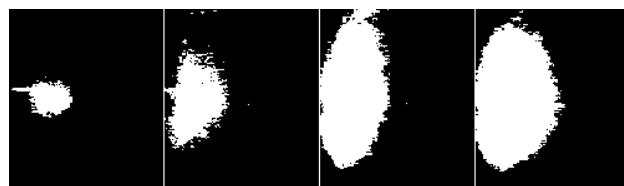


图 5 密封端面闪蒸图

从图中可以看出在端面开始抽空时密封端面附近液体开始汽化,随着抽空的持续,液膜的闪蒸逐渐剧烈。

4 结语

工况变化瞬时,液膜压力失稳,汽化半径的瞬时增大致使密封端面液膜瞬时闪蒸,其闪蒸压力大幅超过工况变化前端面膜压。端面膜压的剧烈变化导致端面失稳,密封端面开启失效。

介质压力对工况变化后闪蒸的剧烈程度有直接的影响。密封介质的压力越高,变工况后沸腾区越大闪蒸越剧烈,端面膜压的变化幅度也越大。在端面开启、闭合以及出现的干

$$T_{(r)} - T = \frac{\mu \omega^2 r^3}{2kh} \left\{ \sum_{n=0}^{\infty} B_n \left[1 - \left(\frac{r_1}{r} \right)^{2n+4} \right] - \sum_{n=0}^{\infty} B_n \left[1 - \left(\frac{r}{r_2} \right)^{2n-3} \right] \right\} \quad (2)$$

其中:

$$A_n = \frac{1}{2(n+4)} \cdot \frac{[(2n)!]^2}{(n!)^4 \cdot 2^{4n}}, \quad B_n = \frac{1}{2(n-4)} \cdot \frac{[(2n)!]^2}{(n!)^4 \cdot 2^{4n}}$$

式中 T ——被密封液体进入密封面前的体积平均温度;

k ——两固体表面导热率的平均值;

摩擦的共同影响,导致密封端面的倾斜,在动压力的影响下密封动环发生振荡。

转速和温度也是影响变工况条件下端面开启的因素。转速越高端面闪蒸越剧烈;端面温度影响密封端面的相变半径同时也影响闪蒸压力的大小,端面温度的增大导致液膜的闪蒸压力增大,因此开启力也越大、动环开启的最大位移也越大。

参考文献

- [1] 刘录,董守平等.变工况机械密封端面运动实验分析[J],润滑与密封,2006,11:116-118
- [2] 刘令勋,刘英贵.动态密封设计技术,中国标准出版社.1993
- [3] Summers-Smith JD. Mechanical Seal Practice for Improved Performance, MEP, 1988
- [4] 刘录,张学忠.变工况条件下机械密封端面稳定性实验研究[J].润滑与密封.2009,4:64-66

Study on standardization of power engineering cost data and intelligent audit method

Cun Li

Beijing Jianzhida Engineering Management Co., Ltd., Beijing, 230001, China

Abstract

Cost management in power engineering is a critical component for ensuring rational project investment and efficient resource allocation. This paper examines the current status and challenges of cost data management in power projects, analyzes the significance and implementation pathways of data standardization, and explores innovative applications of intelligent auditing technologies. Through case studies, it discusses methodologies and outcomes of leveraging information technologies like big data and artificial intelligence to enhance cost data governance and smart auditing, while proposing integrated strategies combining standardization with intelligent solutions. The research concludes that establishing a unified standard system with interconnected data and intelligent processes in cost management can improve audit efficiency, control risks, optimize decision-making, and provide robust support for high-quality construction and refined management of power projects.

Keywords

Power engineering; Cost data; Standardization; Intelligent auditing; Big data; Artificial intelligence

电力工程造价数据标准化与智能化审计方法探索

李存

北京建智达工程管理股份有限公司，中国·北京 230001

摘 要

电力工程造价管理是保障项目投资合理性和资源配置效率的关键环节。本文梳理了电力工程造价数据管理的现状与难点，分析数据标准化的重要意义与建设路径，探讨智能化审计技术的创新应用。结合案例，论述了大数据、人工智能等信息技术赋能造价数据治理和智能审计的方法与成效，并提出标准化与智能化融合的对策建议。研究认为，构建标准统一、数据互通、流程智能的造价管理体系，有助于提升审计效能、管控风险、优化决策，为电力工程高质量建设和精细化管理提供有力支撑。

关键词

电力工程；造价数据；标准化；智能审计；大数据；人工智能

1 引言

电力工程造价管理贯穿于项目全生命周期，是保障投资合理性与工程效益的关键环节。随着行业高质量发展和精细化管控要求提升，数据分散、标准不一、审计效率低等问题日益突出，制约了管理效能。新一代信息技术的发展为造价管理与审计创新带来新机遇，数据标准化与智能化审计已成为行业数字化转型的重要趋势。本文系统探讨电力工程造价数据标准化建设与智能审计方法，旨在为管理与实践创新提供理论支撑和实现路径，促进行业科学化、智能化发展。

2 电力工程造价数据管理现状与存在问题

2.1 造价数据类型多样与分散管理的现实困境

电力工程造价数据贯穿于项目全生命周期，包括立项、设计、招投标、采购、施工、竣工结算等多个核心环节，涉及预算、合同、变更、结算等多维度信息。这些数据不仅类型繁多、结构复杂，而且来源广泛，既有项目管理系统中的结构化数据，也包含各类文档、报表等半结构化乃至非结构化数据。受限于行业长期形成的管理体制与技术水平，造价数据往往分散存储在不同部门和业务系统之间，缺乏统一的数据标准和接口规范。各系统间数据格式、粒度、统计口径不一，导致信息孤岛现象突出，数据难以汇总分析与高效利用。重复录入和人工转换频繁发生，既增加了数据处理成本，也埋下了错误和遗漏的隐患。这些问题严重影响了企业的造价数据整合、业务流通及管理决策的科学性和时效性，亟须通过数据标准化和平台一体化予以根本性改善。

【作者简介】李存（1990-），女，中国安徽合肥人，本科，测试电力领域工程造价研究。

2.2 数据标准化水平不足对审计效率的影响

行业造价数据标准化水平的滞后，是当前制约电力工程智能审计效率提升的核心障碍之一。缺乏权威统一的数据标准，导致各项目单位和从业者在数据采集、录入、存储和传输过程中各行其是，标准不一。数据规范性、完整性、准确性难以保障，造价数据在多个环节的流转和整合过程中常出现信息遗漏、口径不统一、重复计算等问题。尤其在智能化、自动化审计系统对接时，数据口径和结构的不一致，严重阻碍了数据的高效交互与模型算法的准确应用。审计周期被大幅拉长，人工核查和修正成本高企，造价管控和风险识别效率大打折扣。更为严重的是，缺乏标准化基础还可能导致审计风险的隐性累积，损害项目投资的透明度与安全性。行业亟须加快推进数据标准化体系建设，为智能化审计和大数据应用打牢根基。

2.3 传统审计方式难以适应工程复杂化发展需求

伴随电力工程投资规模持续扩大、项目类型与管理模式的不断创新，传统依靠人工抽查和经验判断的造价审计方式已难以应对项目精细化和全过程风险管控的要求。面对海量凭证资料 and 复杂的数据流转关系，人工比对和核查不仅效率低下，且极易受到主观因素影响，导致漏查、误判和滞后响应等问题。复杂项目中的数据交互关系和多变的业务流程，远超传统手工审计的承载能力，使得异常风险难以及时发现与精准防控。此外，缺乏自动化、数据化的审计手段，导致审计结果难以实现科学量化和动态跟踪，项目各环节的风险预警与过程管控难以落地。传统审计方式亟须向数字化、智能化转型升级，以适应现代电力工程日益复杂化、动态化的管控需求。

3 电力工程造价数据标准化建设的内涵与实现路径

3.1 造价数据标准化的核心内涵

造价数据标准化是在工程管理数字化背景下提出的关键举措，其核心在于以统一的业务标准、数据格式和管理规范，对工程项目全过程涉及的各类造价信息进行结构化、编码化和规范化处理。标准化不仅包括对数据项的精确定义、分类编码、数据格式的统一，还涉及接口规范与数据质量要求的细化。通过标准化建设，可实现数据在设计、采购、施工、结算等不同环节、系统和部门之间的无障碍流转和高效共享，突破信息孤岛，实现数据集成和全过程贯通。数据标准化的最终目标，是提升造价信息的规范性、完整性和可用性，为大数据分析、智能审计和科学决策提供坚实的数据基础。只有实现造价数据标准化，才能真正赋能电力工程项目的精细化管理和全生命周期智能化管控。

3.2 标准化体系建设的关键环节

构建完善的造价数据标准化体系，是推动行业数字化和智能化转型的前提。首先，应制定覆盖项目全过程、各业

务环节的数据标准和管理规范，包括基础项目数据、预算清单、合同条款、工程量计算、变更记录、结算审核等关键数据项，并明确数据定义、分类、录入和管理规则。其次，需推动这些标准在各级管理信息系统中的落地应用，确保各平台、各部门间数据采集、传递与汇总的标准统一，实现跨系统数据的高效流通与无缝衔接。再次，建设统一的造价数据管理平台，对多源异构数据进行自动整合与标准化处理，提升数据治理能力。最后，建立健全数据质量监控与治理机制，通过自动检测和纠偏，确保数据的完整性、一致性和准确性，为后续智能化分析和科学审计奠定坚实基础。

3.3 数据标准化建设的行业协同与推广路径

造价数据标准化是一项系统工程，需要行业主管部门牵头，汇聚行业协会、工程咨询、设计、施工、造价、审计等多方专业力量，形成上下游协同共建的良性机制。要加大政策引导和标准推广力度，推动国家或行业级造价数据标准的制定与实施，强化政策、资金和技术支持，提升全行业数据治理和智能管理水平。行业内应以试点示范为先导，通过项目落地和经验推广，不断完善标准细则和应用指南。配套开展技术培训、经验交流与案例推广，提升从业人员的标准化意识和能力。通过多元合作与协同创新，加快标准化在不同企业和项目中的落地应用，推动电力工程造价管理模式持续向智能化、精细化方向发展，最终形成行业健康可持续发展的良性循环。

4 智能化审计方法在电力工程造价管理中的创新应用

4.1 智能化审计方法的技术基础

智能化审计方法的技术基础源于大数据、人工智能、区块链等新一代信息技术的深度融合与创新应用。大数据平台可自动汇集工程管理、合同、采购、财务、结算等各业务环节的海量造价数据，实现全过程、全环节的动态监控与数据追溯，为审计对象提供精准、实时、完整的数据基础。人工智能算法通过机器学习与规则推理，能够高效识别造价数据中的异常信息、逻辑矛盾和潜在风险，实现对复杂业务关系的深度挖掘和自动化判断，显著提升风险预警与审计决策的科学性。区块链技术则为数据的防篡改、过程可追溯和责任溯源提供了安全保障，通过分布式账本、智能合约等机制，确保所有造价数据的流转和操作均有迹可循。三类技术相互补充、协同赋能，为智能化审计的高效、精准、透明提供坚实技术支撑，有效推动电力工程造价管理数字化、智能化水平的整体跃升。

4.2 智能化审计系统的关键功能与流程

智能化审计系统通常包括数据自动采集、标准化处理、智能分析和结果反馈等核心功能模块，构建起完整、闭环的审计流程。系统通过 API 接口或数据中台，与工程项目管理、财务、采购等业务系统实时对接，自动获取和汇聚造价数据，

校验其规范性、完整性和一致性。基于行业标准、企业规则 and 智能算法，系统能够对大批量、多维度的业务数据进行自动化分析与异常识别，准确发现违规操作、逻辑冲突和潜在风险。智能化审计平台可根据预设模型和规则，自动生成审计报告、风险提示和管理建议，及时反馈给相关业务部门，实现风险快速响应与闭环管理。此外，系统还能与项目管理、财务结算等平台联动，实现数据、流程和业务的一体化协同，提升审计干预的实时性和有效性。整个流程高度自动化和智能化，大幅度降低人工干预，提高审计效率和科学性。

4.3 智能化审计应用的成效与案例分析

在实际应用中，部分大型电力企业已率先探索将智能化审计系统引入工程造价全过程管理。通过数据标准化集成与智能审计平台，项目预算、变更、结算等造价数据能够实现自动比对、数据穿透和风险预警，大幅提升了审计工作的及时性与准确率。案例表明，智能化审计不仅有效减少了人工干预与主观误判，而且能够通过多维度数据挖掘发现传统方式难以识别的隐性问题，实现全过程、全要素的风险监控。以某省级电网公司为例，系统上线后审计人力投入减少 40%，审计周期缩短一半，异常风险响应率大幅提升。智能化审计平台的推广，不仅支撑了项目投资决策和成本管控，也为企业构建了高效、科学、透明的造价风险防控体系，推动了行业数字化和智能化转型升级。

5 推进电力工程造价数据标准化与智能审计深度融合的保障措施

5.1 政策制度保障与标准体系完善

推进电力工程造价数据标准化与智能审计深度融合，首要任务是健全政策法规体系和标准规范。应推动造价数据标准化和智能化管理要求纳入行业主管部门制定的管理办法和招标投标制度，明确数据采集、报送、归档与使用的规范流程，强化全过程标准化管控。企业层面要建立覆盖项目全生命周期的数据管理与审计制度，完善内控制度和质量考核机制，将标准化、智能化应用成效纳入项目绩效考核和奖惩体系，形成有效的制度约束与激励并重的闭环。通过政策引导和行业监管，营造标准化、智能化发展的良好环境，推动各参与方提升标准化意识与执行力。同时，应支持标准化工作委员会、行业协会等组织联合发布国家或行业级造价数据标准和技术规范，为数字化、智能化转型提供统一的制度和标准保障。

5.2 技术平台建设与系统集成优化

实现造价数据标准化与智能审计深度融合，离不开先进数字基础设施和高水平系统集成的支撑。要加快造价数据

标准化管理平台、智能化审计系统的开发与部署，推动工程管理、财务、审计等多业务系统的数据壁垒打通，消除信息孤岛。应积极引入微服务架构、云计算、大数据分析、区块链等新兴技术，提升平台弹性扩展能力和数据处理安全性，支持智能化分析与自动化审计功能的集成。加强各系统间接口标准化设计，实现多源异构数据的无缝衔接与实时共享，提高各业务环节协同效率，降低系统维护和升级成本。重视平台运维和数据安全保障，持续优化系统性能，确保造价数据流转高效、精准和可追溯，为智能化审计和全流程管理提供强大技术支撑。

5.3 人才培养与能力提升

造价数据标准化与智能化审计的深入推进，依赖于具备跨学科知识与创新能力的高素质人才队伍。应系统加强对项目管理、数据治理、智能审计、信息技术等相关岗位人员的专业培训，提升其标准化思维和智能化应用能力。鼓励工程、造价、信息化等多领域团队协作创新，促进不同学科背景的人才融合，打造懂业务、精技术、强管理的复合型人才队伍。企业应建立持续学习与经验交流机制，积极参与行业标准化和技术培训、学术研讨、案例分享等活动，推动内外知识、技术和最佳实践共享。通过完善激励机制和职业发展通道，增强人才的归属感和创新活力，为电力工程造价管理数字化、智能化转型提供坚实的人力保障。

6 结语

电力工程造价数据标准化与智能化审计是行业高质量发展的必由之路。面对工程复杂化、投资规模扩大和管理数字化转型新趋势，必须加快推进数据标准体系建设与智能审计方法创新。通过政策制度引导、技术平台建设和人才队伍培养，形成标准统一、流程规范、智能高效的造价管理和审计新模式。未来，应持续完善标准化体系，深化智能化应用，推动管理模式创新，为电力工程投资效益提升、风险防控与行业可持续发展提供坚实基础。

参考文献

- [1] 耿潇,吴奕萱,李修琳,等.人工智能大模型在电力系统工程造价中的应用现状与展望[J].吉林电力,2025,53(04):27-33.
- [2] 朱菁,杜方超.电力工程概预算编制与预结算审计优化策略探讨[J].企业改革与管理,2025,(13):133-135.
- [3] 刘议文.智能化技术在电力工程信息化建设中的应用研究[J].张江科技评论,2025,(06):54-56.
- [4] 李欣,陈晓科,吴国卿.基于数字化转型的电力工程全过程造价管理研究[J].中国管理信息化,2025,28(11):106-109.
- [5] 袁克峰,张振宇,赵晓晨,等.电力工程造价管理的现状与发展趋势分析[J].电站系统工程,2025,41(03):65-66.

Research on the Application of Artificial Intelligence in the Optimization of Railway Locomotive Maintenance Schemes and Decision Support

Ming Lu Zunqi Hu Zhidao Liu

Jinan West Locomotive Depot Jinan Bureau Group Co., Ltd., of China Railway, Linyi, Shandong, 276004, China

Abstract

The traditional locomotive maintenance mode based on fixed cycles is difficult to meet the demands of railway modernization for safety and efficiency. This paper systematically studies the application of artificial intelligence technology in the field of locomotive maintenance, aiming to achieve the optimization of maintenance plans and the intelligence of decision support. The article analyzes key technologies such as fault prediction based on machine learning and visual inspection based on deep learning, and elaborates on how they construct a complete technical framework from data perception to intelligent decision-making. Research shows that artificial intelligence can drive the maintenance mode to strategically transform from “planned maintenance” to “predictive maintenance”, thereby significantly enhancing maintenance accuracy and optimizing resource allocation, providing a core solution for the intelligent upgrade of railway locomotives.

Keywords

Artificial Intelligence; Locomotive maintenance; Prediction and Health Management; Decision support; Repair as needed

人工智能在铁路机车检修方案优化与决策支持中的应用研究

陆鸣 胡尊起 刘执道

中国铁路济南局集团有限公司济南西机务段, 中国·山东 临沂 276004

摘 要

传统基于固定周期的机车检修模式难以满足铁路现代化发展对安全与效率的需求。本文系统研究了人工智能技术在机车检修领域的应用, 旨在实现检修方案的优化与决策支持的智能化。文章分析了基于机器学习的故障预测、基于深度学习的视觉检测等关键技术, 阐述了其如何构建从数据感知到智能决策的完整技术框架。研究表明, 人工智能能驱动检修模式从“计划维修”向“预测性维修”战略转型, 从而显著提升检修精度、优化资源配置, 为铁路机务智能化升级提供核心解决方案。

关键词

人工智能; 机车检修; 预测与健康管理; 决策支持; 视情维修

1 引言

铁路机车作为铁路运输系统的核心动力装备, 其技术状态直接关系到整个路网的安全与效率。长期以来, 我国铁路机务部门主要遵循计划预防修的检修制度, 即基于固定的运行里程或时间周期对机车进行不同等级的集中检修。这种模式在特定历史阶段为保证机车可靠性发挥了重要作用。然而, 其固有的“过度维修”与“维修不足”并存的问题日益凸显: 一方面, 状态良好的部件被提前更换, 造成人力、物力和备件资源的巨大浪费; 另一方面, 某些突发性、隐蔽性故障无法在固定周期内被及时发现, 酿成运行安全事故

隐患。

随着传感器技术、物联网和大数据技术的成熟, 机车运行过程中产生的海量数据为检修模式的变革提供了宝贵的数据基础。人工智能技术, 特别是其分支如机器学习、深度学习和自然语言处理, 具备从复杂、高维数据中自动提取特征、识别模式并进行精准预测的强大能力。将 AI 技术与机车检修业务深度融合, 构建智能化的检修方案优化与决策支持系统, 已成为行业发展的必然趋势。本研究旨在系统地梳理 AI 技术在机车检修全流程中的应用场景, 构建其技术实现框架, 并深入分析其对提升检修工作安全性、经济性与科学性的深远影响。

2 传统机车检修模式面临的挑战

当前主流的计划预防修模式主要面临以下几大挑战:

【作者简介】陆鸣(1987-), 男, 中国山东临沂人, 本科, 高级技师, 从事机车电器方向研究。

2.1 检修经济性低下

固定周期检修无法准确反映部件的个体化损耗差异。导致许多尚有很长剩余寿命的部件被“一刀切”地更换，产生了不必要的备件采购成本、仓储成本以及人力成本。据统计，在传统检修模式下，近 30% 的维修活动可能是非必要的，造成了巨大的资源浪费。

2.2 安全隐患识别滞后

机车的部分故障，如轴承的早期疲劳、电气线路的绝缘老化等，具有隐蔽性和渐进性。在固定的检修窗口期内，这些潜在缺陷可能尚未发展到足以被常规检查手段发现的程度，从而被遗漏。这些“漏网之鱼”将成为机车在线运行时的重大安全隐患，可能导致途中故障甚至严重事故。

2.3 检修资源配置刚性

集中式的计划检修会导致机务段在特定时段内的工作负荷剧增，对技术人员、检修台位、专用工具等资源形成挤兑，易因赶工而影响检修质量。而在非检修期，这些资源又可能处于闲置状态，整体利用率不高。

2.4 知识传承与决策依赖个体经验

检修方案的有效性高度依赖于技术专家和老师傅的个人经验。这种经验是宝贵的，但同时也是模糊的、难以量化和标准化的，且面临着随着老职工退休而“失传”的风险。缺乏基于数据的客观、标准化决策支持工具，使得检修策略的制定存在主观性和不确定性。

3 人工智能关键技术及其在检修优化中的应用

人工智能是一个技术集群，其在机车检修中的应用由多项关键技术共同驱动。

3.1 基于机器学习的预测与健康管理

PHM 是实现预测性维修的核心。其基本思想是通过数据驱动的方法，对机车的关键部件进行健康状态评估和剩余有用寿命预测。数据来源：包括机车车载传感数据（如振动、温度、压力、电流、电压）、运行工况数据（如速度、载荷、线路条件）以及历史维修记录。

模型与应用：

故障预测：使用时序预测模型（如 ARIMA、LSTM 长短期记忆网络）对振动信号、温度趋势等进行分析，预测其未来发展趋势，并在超出安全阈值前发出预警。例如，通过分析牵引电机轴承的振动频谱特征，利用支持向量机或卷积神经网络识别其早期故障特征。

剩余寿命预测：通过对历史失效数据与运行数据的关联分析，构建退化模型，使用回归算法或深度生存分析模型来预测部件从当前状态到功能失效的剩余时间。这为精准安排维修窗口提供了直接依据。

3.2 基于深度学习的视觉智能检测

机车外部和内部许多部件的状态检查依赖于视觉，AI 计算机视觉技术可以极大提升此项工作的自动化水平和准确率。

应用场景：

车顶关键部件状态识别：利用安装在检修库内的固定摄像头或无人机，自动采集受电弓、绝缘子等部件的图像。通过训练好的目标检测模型和图像分类模型，自动识别碳滑板磨耗超限、绝缘子破损、污秽等缺陷。

走行部故障检测：对转向架、轮对等部件的图像进行自动分析，识别裂纹、剥离、擦伤等表面损伤。

内部腔镜检查：对发动机气缸、涡轮叶片等内部复杂结构，利用结合了深度学习算法的腔镜视频分析系统，辅助技术人员发现肉眼难以察觉的细微缺陷。

优势：实现了 7x24 小时不间断、高一致性的检测，避免了人眼疲劳和主观判断差异带来的漏检、误检。

3.3 基于自然语言处理的维修报告分析

机务段积累了海量的非结构化文本数据，如乘务员交接班记录、检修工单描述、故障处理报告等。NLP 技术可以从中挖掘出宝贵的知识。

应用场景：

故障知识图谱构建：利用命名实体识别技术从文本中自动提取故障部件、故障现象、可能原因、处理措施等实体，并利用关系抽取技术建立它们之间的关联，最终形成一个可查询、可推理的故障知识图谱。当新的故障现象出现时，系统可以快速推荐相关的历史案例和解决方案。

群体性故障挖掘：通过文本聚类 and 主题模型，发现不同机车、不同时期报告中描述的相似故障模式，从而提前识别出潜在的、普遍性的设计缺陷或批次性质量问题，为源头治理提供决策依据。

4 人工智能驱动的决策支持系统构建

构建一个集成的智能决策支持系统，其核心架构分为四层：①数据层：负责汇集多源异构数据，包括实时传感器数据、历史维修数据、图像 / 视频数据、文本报告数据等，并进行清洗、标注与存储管理。②算法层：是系统的智能核心，集成了前述的 PHM 预测模型、计算机视觉模型、NLP 模型以及多目标优化算法等。③应用层：封装了面向不同用户的核心功能模块，如健康状态评估、维修预警、维修方案推荐、资源调度优化等。④交互层：通过 Web 界面、移动终端等方式，为机务段管理人员、技术工程师和现场作业人员提供可视化的数据展示和交互式决策支持。

4.1 智能维修方案生成

当系统预测到某部件即将发生故障或检测到某一缺陷时，决策支持系统的工作流程如下：

故障诊断与根因分析：系统综合实时数据、历史数据和知识图谱，对故障进行精准定位，并分析其根本原因。

维修策略推荐：根据故障类型、严重程度和剩余可用时间，系统会从知识库中匹配多个可行的维修策略（如：在线调整、小范围修复、部件更换、总成返厂等）。

多目标优化决策：系统将每个维修策略量化为一个多目标优化问题。优化目标通常包括：安全性：维修后系统的可靠度。经济性：维修直接成本与因机车停时而产生的间接

成本之和。时效性: 维修所需总时间。资源可行性: 所需备件、工具、人员的可用性。

利用多属性决策理论或进化算法, 系统可以对各方案进行综合评价与排序, 最终向决策者推荐一个或数个帕累托最优方案。

4.2 维修资源动态调度

基于精准的维修任务预测, 系统能够对未来中长期的维修需求进行滚动预报。据此, 可以动态地、前瞻性地优化检修资源的配置:

人力规划: 预测未来每周/每月所需的不同工种(如机械、电气、制动)的技术人员数量, 实现弹性派工。

备件库存优化: 将备件需求预测与库存管理模型结合, 实现关键备件的精准采购和库存控制, 在保证维修需求的同时, 大幅降低库存资金占用。

台位计划优化: 对检修库的台位使用进行智能排程, 平衡工作负荷, 减少机车等待时间, 提高台位周转率。

5 实施挑战与对策

尽管前景广阔, 但 AI 系统的实施仍面临诸多挑战, 需要系统性的对策予以解决:

数据质量与完整性的挑战: 机车运行环境恶劣, 传感器数据易受干扰, 存在大量噪声、缺失值和标注不一致问题。历史维修记录多为非结构化文本, 标准化程度低。对策: 建立贯穿数据全生命周期的治理体系。在数据采集端, 采用更可靠的工业级传感器和边缘计算节点进行初步滤波。在数据平台层, 制定统一的数据标准与编码规范, 并利用生成对抗网络等技术对缺失数据进行高质量填补。对历史文本数据, 启动大规模的数字化与结构化清洗工程, 为 NLP 应用奠定基础。

模型可解释性与信任危机的挑战: 深度学习等复杂模型如同“黑箱”, 其决策逻辑难以理解。当系统给出一个反直觉的维修建议时, 现场经验丰富的工程师难以信任和采纳。

对策: 推行“可解释性 AI”理念。在算法选型上, 对于安全苛求场景, 优先采用决策树、逻辑回归等内在可解释性强的模型。对于必须使用的深度学习模型, 则利用 LIME、SHAP 等事后解释工具, 以热力图、特征重要性排序等直观方式, 向技术人员展示是哪些数据特征(如“某频率段的振动幅度异常升高”)主导了模型的决策, 从而建立人机之间的信任桥梁。

技术与人才壁垒的挑战: 机务段的核心业务是机械工程与铁道运输, 现有技术人员普遍缺乏数据科学和 AI 算法知识。而外部 AI 专家又不熟悉机车检修的具体业务逻辑, 导致模型与需求脱节。对策: 实施“双向奔赴”的融合战略。一方面, 对内部技术人员开展“AI 扫盲”培训, 重点讲解 AI 的能力边界与基本原理, 培养其数据思维。另一方面, 与 AI 公司或高校合作, 要求其算法工程师深入检修一线,

理解业务痛点。最终目标是培养既懂检修又懂数据的“桥梁型”人才。

系统集成与流程再造的挑战: 智能决策支持系统并非孤立存在, 必须与既有的检修管理信息系统、资产管理系统、安全监控系统等深度集成。这涉及到复杂的接口开发与数据打通。更重要的是, 新系统的引入必将改变原有的工作流程和组织职责, 可能面临组织惰性甚至隐性抵制。对策: 技术集成上, 采用微服务架构和标准化 API, 实现松耦合、渐进式的系统融合。管理变革上, 需要最高管理层的坚定支持和亲自推动, 将系统使用效果纳入部门 KPI 考核。同时, 通过试点项目打造成功样板, 让员工亲眼看到 AI 带来的效率提升和工作减负, 从而主动拥抱变革。

6 结论与展望

本文系统论述了人工智能技术在优化铁路机车检修方案与提供决策支持方面的应用价值与实现路径。研究表明, 通过深度融合机器学习、计算机视觉和自然语言处理等 AI 技术, 能够构建一个数据驱动、智能预警、科学决策的新型检修生态系统。该系统能够有效克服传统计划预防修模式的弊端, 实现从被动响应到主动预测、从经验主导到数据驱动的根本性转变, 最终在保障运行安全的前提下, 达成检修成本显著降低、资源利用效率大幅提升的战略目标。

展望未来, 人工智能在机车检修领域的应用将呈现三大趋势:

边缘智能的普及: 随着芯片算力的提升, 更复杂的 AI 模型将得以部署在机车内部的边缘计算单元上, 实现关键故障的毫秒级实时诊断与预警, 极大减少对云端通信的依赖, 提升响应速度与可靠性。

数字孪生的深度融合: 未来将为每台主力机车创建高保真的数字孪生体。它不仅是数据的镜像, 更是物理实体的动态仿真模型。维修方案可以在数字孪生体上进行反复模拟、验证与优化, 确保其在真实世界执行前已达到最佳效果, 实现“先试后修”。

人机协同的进阶模式: AI 的终极目标并非取代人类专家, 而是成为其强大的“外脑”。未来的检修现场将是“人类智慧”与“机器智能”的完美协作。AI 负责处理海量数据、发现隐性规律、提供量化建议; 人类专家则负责把握宏观方向、处理极端异常情况、并赋予决策以人文关怀和价值判断。这种深度融合的人机协同模式, 将是铁路运维智能化发展的最高形态。

参考文献

- [1] 李志强, 王伟, 张鑫. 基于深度学习的动车组故障预测与健康管理框架研究[J]. 铁道学报, 2022, 44(5): 78-85.
- [2] 国家铁路局. 机车统计年鉴2023[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2023.
- [3] 高桥, 史密斯. 工业人工智能: 概念、技术与应用[M]. 刘震, 译. 北京: 机械工业出版社, 2021.

Practical Application of Precise Pressure Control Drilling in Narrow Density Window Formations

Feng Yan

Western Drilling Engineering Technology Research Institute, Karamay, Xinjiang, 83400, China

Abstract

The growth in global energy demand has driven oil and gas exploration into complex narrow density window formations, where conventional drilling struggles to maintain bottom hole pressure, often leading to well leakage and blowouts. This paper, through a combination of literature review and case analysis, explores the application of fine pressure-controlled drilling technology in such formations, delves into its principles, and elaborates on the practices in the Tazhong Block of the Tarim Oilfield and the Fuman Oilfield - by precisely predicting pressure, selecting high-precision equipment, and real-time parameter adjustment, both oilfields have achieved reduced well leakage, shortened drilling cycles, lower costs, and improved reservoir quality. At the same time, it identifies three major challenges including formation complexity, and proposes three countermeasures including technological innovation. It also analyzes the development trends towards intelligence, automation, and integration of the technology, and points out its potential and value in multiple application scenarios. The research clarifies the core mechanism of the technology, supporting its promotion and the enhancement of China's oil and gas exploration capabilities. It also acknowledges the limitations such as the limited number of cases and the unverified status of some technologies, and looks forward to the need for expanded research and deepened development in the future.

Keywords

Managed Pressure Drilling (MPD); narrow density window formation; formation pressure control; response strategies

精细控压钻井在窄密度窗口地层的应用实践

闫峰

西部钻探工程技术研究院, 中国·新疆 克拉玛依 834000

摘 要

全球能源需求增长推动油气勘探向复杂窄密度窗口地层迈进, 常规钻井难稳井底压力, 易引发井漏、井涌。本文以文献研究结合案例分析, 探究精细控压钻井技术在该类地层的应用, 剖析其原理, 详述塔里木油田塔中区块、富满油田实践—通过精准预测压力、选高精度设备及实时调控参数, 两油田实现井漏减少、周期缩短、成本降低、储层改善。同时梳理地层复杂性等三大挑战, 提技术创新等三方面对策, 分析技术向智能化、自动化及融合发展趋势, 指出其多场景应用潜力与价值。研究明确技术核心机制, 支撑其推广与提升我国油气勘探水平, 也指出案例有限、部分技术未验证的局限, 展望未来需拓展研究与深化研发。

关键词

精细控压钻井; 窄密度窗口地层; 地层压力控制; 应对策略

1 引言

全球能源需求增长推动油气勘探向复杂地层拓展, 窄密度窗口地层因孔隙、坍塌、漏失压力差值小, 常规钻井难稳井底压力, 易引发井漏、井涌等问题(如准噶尔盆地南缘案例), 制约开采效率。精细控压钻井技术集成井下测量与地面控压系统, 能精准控环空压力稳井底压力, 在国内外(北海、塔里木油田等)应用成效显著, 为解决该难题提供路径。本研究聚焦其在窄密度窗口地层的应用, 探究技术原理、剖

析典型案例(高探1井等)、梳理设备可靠性等难题并提对策。方法上用文献研究奠定基础, 案例分析总结规律, 结合理论与实践提多维度应对策略, 旨在为技术推广、提升我国油气勘探水平及保障能源安全提供支持。

2 精细控压钻井在窄密度窗口地层的应用案例分析

2.1 案例一: 北疆南缘区块的应用实践

北疆南缘区块地处准噶尔盆地南缘, 地质构造极复杂, 多期强烈构造运动致地层倾角 $15^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 、断裂广布。目的层为侏罗系头屯河组, 上部泥页岩水敏性极强, 伊利石含量 45%、蒙脱石 25%, 遇水膨胀率 $18\% \sim 22\%$; 下

【作者简介】闫峰(1981-), 男, 本科, 助理工程师, 从事精细控压钻井技术研究。

部砂砾岩互层，裂缝密度 3-5 条 / 米、溶洞直径 0.5-2 米。地层压力异常，孔隙压力梯度 1.85-2.05MPa/m，安全密度窗口仅 0.03-0.08g/cm³，属窄密度窗口地层。前期常规钻井问题多，如高探 XX-1 井钻至 5230-5280 米时严重井漏，漏液 120m³，处理耗时 8 天、增成本 120 万元。为应对难题，应用精细控压钻井技术：借高精度三维地震资料与压力预测模型，用等效深度法、Eaton 法算安全窗口，定钻井液密度 1.82-1.88g/cm³；选高精度设备（压力传感器精度 ± 0.02 MPa，节流管汇响应 ≤ 0.8 s），钻进中 10 秒更新监测数据，自动调节参数控井底压力波动 ± 0.03 MPa，特殊作业时调回压稳压力，如高探 XX-2 井钻至 5320 米孔隙压力上升，15 秒内提回压防井涌。该技术应用于 12 口井后成效显著：井漏从 3.2 次 / 井减至 0.3 次，钻井周期缩 22 天，单井降本 350 万元，储层损害降 30%。经验为：地层压力预测误差需 $\leq 5\%$ ，设备遵“日检周护月调”，人员经 300 小时模拟 + 50 小时实操培训，建三方每日沟通机制^[1]。

2.2 案例二：达巴松区块的应用实践

达巴松区块位于准噶尔盆地西部，地质构造复杂，多期构造运动致挤压褶皱强烈、断裂广布。主要目的层为石炭系，上部泥页岩遇水易井壁失稳，下部火山岩裂缝孔洞发育成漏失通道。地层压力系统复杂，孔隙压力梯度 1.7-1.95MPa/m，坍塌压力梯度 1.6MPa/m，漏失压力梯度 2.0MPa/m，安全密度窗口仅 0.05g/cm³，过往钻井因井底压力难控常发井漏、井塌，如盆北 23C 井处理井塌耗时 12 天。对此，引入精细控压钻井技术：借三维地震资料与压力预测模型定安全窗口，选智能控压系统并严检调试；钻进中传感器实时采数据传至控制系统，自动调节参数控井底压力，异常时快速响应，结合随钻导向调参数，盆北满深 1 井借此成功控漏。

应用后成效显著：井漏减 70%、井塌降 80%，机械钻速提 60%，钻井周期缩 30 天，井身质量改善。经验为：前期地质研究是基础，系统自动化与响应速度关键，需优化软硬件，加强团队协作、应急培训，联动科研机构与设备商提升技术适应性^[2]。

3 精细控压钻井在窄密度窗口地层应用面临的挑战与应对策略

3.1 面临的挑战

精细控压钻井技术在应用中面临多重挑战，首先是地层复杂性带来的技术难题，在窄密度窗口地层中，地层压力受地质构造运动、地层流体性质与分布及钻井作业工况影响而复杂多变，如钻进时钻头破碎岩石引发地层应力重分布、接单根等作业产生抽汲与激动压力，均会加剧压力波动，使得精确预测和控制井底压力极为困难，易引发井漏、井涌等问题，且裂缝发育破坏地层完整性、改变渗流特性，既为钻井液漏失提供通道又增加井涌风险，加之裂缝形态等具有随机性，现有勘探技术难准确探测，像碳酸盐岩地层中裂缝与

溶洞交织形成复杂网络，常规堵漏方法失效；其次是设备与工艺的适应性问题，该技术对设备性能和稳定性要求高，在高温高压环境下，设备密封件易老化变形导致密封失效、电子元件易故障影响数据采集与控制，高含硫地层还会腐蚀金属部件，现有工艺也有局限，处理大段泥页岩地层时难抑制水化膨胀维持井壁稳定，应对多压力系统地层时难快速调整井底压力，在大位移井、水平井作业中控制环空压力分布、减少摩阻也面临挑战；最后是成本与效益的平衡问题，该技术应用成本高，核心设备价格昂贵，维护需专业人员与工具，人员培训及偏远地区、海上平台的设备运输安装与技术服务均增加成本，而钻井企业对经济效益期望高，实际应用中受地质条件、设备故障、操作失误等影响，技术效果可能不理想，难以达预期效益，甚至出现井漏、井涌导致钻井周期延长、成本增加，这种矛盾制约了技术推广^[3]。

3.2 应对策略

为应对精细控压钻井技术应用中的挑战，需从多方面推进改进：在技术创新与优化上，针对地层复杂性难题，研发基于多物理场耦合的地层压力预测模型，结合人工智能和大数据技术分析钻井数据，实现地层压力实时监测与动态预测，同时发展微地震监测、核磁共振成像等高精度地球物理探测方法，研发随钻成像测井仪等井下智能工具以提升裂缝识别描述能力，还需改进控制算法，采用自适应控制算法并引入模糊控制、神经网络控制等先进理论，提高系统响应速度与控制精度；在设备与工艺改进方面，为增强设备适应性与稳定性，研发耐高温、高压、耐腐蚀的新型材料制造密封件、电子元件等关键部件，优化设备结构，采用模块化设计提升可维护性，加强冗余设计保障可靠性，工艺上则针对不同地层与作业需求优化方案，如在泥页岩地层研发油基、聚合醇等新型钻井液，多压力系统地层采用分段控压技术，大位移井、水平井作业研发旋转导向钻井技术及利用水力振荡器改善环空流态；在成本控制与管理措施上，为平衡成本与效益，设备购置前充分调研评估以选高性价比产品，与供应商建立长期合作争取优惠，制定科学维护计划延长设备寿命、降低故障率，优化人员配置避免冗余，加强培训提升人员技能并建立激励机制，作业中通过优化施工方案、安排并行作业缩短周期，利用信息化技术实时监控管理，同时加强与其他企业合作交流共享资源，降低研发与应用成本。

4 精细控压钻井在窄密度窗口地层应用的前景与展望

4.1 技术发展趋势

精细控压钻井技术正朝着智能化、自动化方向快速发展，并积极与其他先进技术融合。智能化方面，井下部署大量传感器，实时采集地层压力、温度、岩性及钻井液性能等多维度数据，经人工智能算法快速分析处理，系统可自动识别井漏、井涌、井壁失稳等井下复杂情况，迅速调整节流阀

开度、钻井液排量、井口回压等参数,实现井底压力精准智能控制。同时,借助机器学习,系统能积累不同地层钻井经验,持续优化控制策略,提升应对复杂工况能力。自动化领域,自动化设备将广泛应用于钻井全流程,实现钻进、接单根、起下钻到完井的自动化操作。如自动接单根设备可快速完成作业,减少人为误差与操作时间,降低抽汲压力、激动压力对井底压力的影响;自动化起下钻设备按预设程序精确控制钻具速度与位置,避免操作不当引发井下问题;自动化钻井液调配系统能依实时工况调整钻井液配方与性能,满足作业需求^[4]。技术融合上,该技术与旋转导向钻井技术结合,可精准控制井眼轨迹,同时维持井底压力稳定,在大位移井、水平井钻井中减少摩阻扭矩,防止井漏井涌;与随钻测井技术融合,能实时获取地层电阻率、声波时差等参数,分析地层岩性、孔隙度等信息,为精细控压提供准确数据支持,助力实时调整钻井参数,实现更精准压力控制。

4.2 应用前景与推广价值

精细控压钻井技术在不同类型油田及复杂地层展现出巨大应用潜力。在海上油田,因其作业环境恶劣、平台空间有限,对技术安全性与高效性要求严苛。该技术能有效降低复杂情况发生率,减少井漏、井涌,提升作业安全系数,精确控制井底压力,降低储层损害,进而提高油气采收率。例如,在南海某海上油田,应用后复杂情况发生率降低了40%,钻井周期缩短了15天,油气产量提高了20%。深层油田作为我国油气资源勘探的重要方向,面临着地层压力高(部分区块孔隙压力梯度超2.0MPa/m)、井底温度高(超150℃)及地质构造复杂(多断层、裂缝发育)的三重挑战。常规钻井技术因压力控制精度不足,在钻进过程中极易突破漏失压力引发井漏,或低于坍塌压力导致井壁失稳,如塔里木油田部分深层井曾因井塌问题被迫中途停钻,单井额外成本超500万元。精细控压钻井技术通过耐高温、耐高压的特种设备(如耐200℃高温的压力传感器、耐压35MPa的节流管汇),结合动态压力预测模型,实现了对井底压力的实时监测与精准调控。以塔里木油田满深3-H11井为例,该井目的层位于8000米以深,安全密度窗口仅0.04g/cm³,常规钻井技术难以突破。应用一体化精细控压钻井技术后,通过实时调整井口回压与钻井液排量,将井底压力波动控制在±0.02MPa内,成功攻克窄安全密度窗口难题,仅用78.5天便钻穿8143米地层,较同区块邻井钻井周期缩短42天,刷新了国内8000米以深井的最快钻井周期纪录,为我国深层油气资源规模化开发提供了技术范本。对于页岩气、煤层气这类非常规油气藏,因其储层渗透率低,对储层保护要求

极高。精细控压钻井技术可维持井底压力稳定,减少对储层扰动,保护原始结构与渗透性。涪陵页岩气田应用后,有效降低钻井液对页岩储层污染,单井产量提高了30%以上。

推广精细控压钻井技术对提升我国油气勘探开发整体水平具有不可替代的意义。从经济效益来看,该技术能减少复杂情况处理时间,缩短钻井周期,降低设备损耗与材料浪费,据统计,应用该技术的井均钻井成本可降低15%-20%;从资源利用角度,其对储层的有效保护能提高油气采收率,延长油气田开发寿命,为油气田长期稳定生产筑牢根基;从技术发展层面,该技术的推广能推动我国钻井装备、控制算法等领域的创新突破,提升我国在国际油气勘探开发领域的技术竞争力,助力我国实现能源安全自主保障目标。

5 结语

本研究剖析了精细控压钻井技术在窄密度窗口地层的应用,明确其通过精准控制环空压力剖面维持井底压力于安全窗口的核心机制,提供理论支撑。以两个油田为案例,通过地层压力预测、装备调试与参数调控,大幅减少复杂情况,降低井漏、井塌发生率,缩短钻井周期,提升效率与井身质量。针对应用挑战,提出应对策略:技术上研发多物理场耦合压力预测模型、高精度裂缝探测技术并改进控制算法;设备工艺上采用耐极端环境新材料、优化结构及研发新型钻井液与分段控压工艺;成本管理上通过选高性价比设备、加强维护与优化人员及施工方案平衡成本效益。未来需拓展案例研究,深化技术研发与现场验证,推动该技术与大数据等融合实现智能管理,探索其在非常规油气及地热能开发中的应用。

参考文献

- [1] 廖新伟,胡挺,戴勇,等.准噶尔盆地南缘呼探1井深部窄密度窗口地层精细控压固井技术应用探讨[C]/陕西省石油学会;中国石油新疆油田分公司(新疆砾岩油藏实验室);西安石油大学.2022油气田勘探与开发国际会议(2022IFEDC)论文集.中国陕西省西安市,2022:1-8.
- [2] 刘金璐,李军,李宁,等.窄密度窗口地层分段控压下套管参数优化设计方法[J].钻采工艺,2025,48(04):81-91.DOI:10.3969/J.ISSN.1006-768X.2025.04.09.
- [3] 周英操,郭庆丰,蔡骁,等.精细控压钻井技术及装备研究进展[J].钻采工艺,2024,47(04):94-104.DOI:10.3969/J.ISSN.1006-768X.2024.04.13.
- [4] 李中,陈浩东,刘和兴,等.深水窄密度窗口地层封堵承压钻井液技术[J].钻井液与完井液,2021,38(04):428-434.DOI:10.12358/j.issn.1001-5620.2021.04.005.

Innovative practice of building information model in construction management

Li Xiao

Guangdong Xin Sen Construction Engineering Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong, 518000, China

Abstract

As the construction industry undergoes digital and intelligent transformation, Building Information Modeling (BIM) has emerged as a core technology to overcome traditional construction management bottlenecks, leveraging its advantages in visualization, collaboration, and parametric design. This article analyzes BIM's optimization of construction management processes across four dimensions: schedule, cost, quality, and safety. Through 3D modeling that integrates design drawings with construction plans, it enables pre-construction simulation of work sequences. The collision detection feature identifies pipeline and structural conflicts, while parametric data collaboration facilitates real-time cost control and material usage tracking to prevent waste. For quality assurance, acceptance criteria are embedded in models to verify construction precision and improve compliance rates. Critical areas and safety regulations are marked in BIM models, complemented by risk warnings from field inspection data to reduce accidents. These innovative applications of BIM provide practical solutions for construction entities to enhance management efficiency and lower control costs.

Keywords

Building Information Modeling (BIM); construction management; schedule control; cost optimization

建筑信息模型在施工管理中的创新实践

肖立

广东鑫森建设工程有限公司, 中国 · 广东 深圳 518000

摘 要

随着建筑业向数字化、智能化转型, 建筑信息模型 (BIM) 凭借可视化、协作化、参数化优势, 成为突破传统施工管理瓶颈的核心技术。文章从施工管理创新实践, 分析BIM从工期、成本、质量、安全四大维度优化管理流程: 通过三维建模整合设计图纸与施工方案, 提前模拟施工工序, 结合碰撞检测功能排查管线、结构冲突, 利用参数化数据协同实现成本动态管控, 实时关联材料用量与进度, 避免超耗浪费; 在质量管控上, 将验收标准嵌入模型, 对照模型核查施工精度, 提升质量合格率; 同时, 在模型中标注高危区域与安全规范, 结合现场巡检数据预警风险, 降低安全事故发生率。BIM的创新应用为建设单位提升管理效率、降低管控成本提供了切实可行的实践路径。

关键词

建筑信息模型 (BIM); 施工管理; 进度控制; 成本优化

1 引言

近年来, 我国建筑业规模不断扩大, 而传统的施工管理模式却面临着许多挑战: 依靠二维图编制进度计划、可视化程度不高、工序衔接混乱、项目平均延误率高达 25% 以上。成本核算主要依靠人工统计, 数据滞后, 材料浪费严重, 超支率一般在 10% 以上; 质量控制主要依靠现场巡视, 很难发现隐蔽工程的缺陷, 返工率高达 8-12%; 安全管理主要依靠经验预判, 对高风险区域的风险辨识不够全面, 导致安全事故的发生率较高。

【作者简介】肖立 (1982-), 男, 中国湖南洪江人, 本科, 一级建造师, 从事建筑工程研究。

2 BIM 在施工管理中的核心创新应用

2.1 进度管理: 动态模拟与工序优化

传统的施工进度管理主要采用 2D 图和甘特图作为核心工具, 存在着可视度不高、过程逻辑难以呈现、空间冲突难以预测等问题, 造成施工过程中工序衔接混乱、窝工待料现象普遍存在。BIM (BIM) 以 4D-BIM (3D-BIM) (3D-BIM,3D-BIM) 动态仿真为基础, 在开工前将施工进度计划和三维模型相关联, 建立可视化进度模型, 实现超高层核心筒施工、大型钢结构安装、机电管线集成布置等关键工序的全过程推演。在预演过程中, 直观地识别各工序之间的逻辑冲突和空间冲突, 如某商业综合体项目, 采用 BIM 4D-BIM 仿真技术, 提前发现 3 个空间重叠、混凝土浇筑、钢筋绑扎等工序衔接漏洞, 及时调整施工顺序和工作面分

配,避免15天工期延误。施工期间,现场管理人员通过平板电脑等移动设备,将每一个部件的实际施工进度记录下来,并与BIM平台进行实时同步,系统会对计划和实际进度进行自动比对,形成偏差分析报告,如果某个工序的延误超过预警阈值(例如3天),则会自动推送预警信息给相关负责人,帮助他们快速制定赶工方案。在此基础上,针对复杂施工场景(如深基坑、异型构件浇筑等),利用BIM技术对施工机械参数、人员配置等数据进行资源优化仿真,保证各工序之间的高效衔接,大幅提高工程进度的可控性^[1]。

2.2 成本管理:数据协同与动态核算

传统的施工成本管理存在着依靠造价人员手工统计工程量、材料采购独立进行、费用报销等“数据孤岛”问题,数据流转滞后,容易出现差错,造成成本超支率高达10%以上,材料浪费率高达12%-15%。BIM技术以参数化建模和数据协同的优势,建立全过程的成本控制系统。首先,在成本预算阶段,BIM模型包含所有建筑部件的尺寸、材料、数量、单价等详细参数,能够自动抽取工程量,并与广联达、鲁班等软件进行无缝对接,生成精确的工程量清单和成本预算,避免人为计算错误;某住宅项目采用BIM技术,工程量计算效率提高60%,预算偏差率由8%降低到3%。在施工过程中,将BIM平台和材料管理系统连接起来,当材料进场时,管理者只需要扫一下产品的二维码,就完成验收。在施工期间,系统会根据模型中预先设定的构件消耗量和现场实际消耗数据进行比较,生成材料消耗偏差报告,当某一种材料消耗超过10%时,就会提醒管理者查找浪费的原因^[2]。

2.3 质量管理:可视化巡检与问题追溯

传统的施工质量管理主要采用“现场巡视+纸质记录”的方式,主要依靠管理者的经验判断,对隐蔽工程(如管道埋设、钢筋绑扎、墙体砌筑等)质量问题往往因为巡检不彻底或记录不清晰而造成隐患遗留,返工率高达8%-12%,不仅增加成本,还影响工期。BIM技术以“可视化巡检+数字化可追溯”为核心,构建一套完整的质量管理系统。现场巡检时,管理者通过手机获取相应构件的BIM模型,对照模型中的质量标准逐一检查,发现问题(如钢筋间距超标、管线接口渗漏等)后,直接在模型上标记缺陷位置,拍照拍照,填写整改要求,实时上传到BIM平台上,系统会自动生成质量问题记录,并向施工班组推送整改通知^[3]。

2.4 安全管理:风险预控与虚拟交底

高风险区域风险辨识不全面,安全交底形式单一是施工安全管理核心难点,传统模式主要依靠管理人员的经验对风险进行预判,安全交底以“口头讲解+纸质文件”为主,施工人员缺乏对风险的认识,造成深基坑、高空作业、起重吊装等高危场景安全事故发生率居高不下,年均每万平米事故率超0.8起。BIM技术以“风险预控+虚拟交底”为基础,以“风险预控+虚拟交底”为手段,在风险辨识阶段,将BIM模型嵌入《建筑施工高处作业安全技术规范》和《深

基坑工程施工安全技术规范》中,自动识别高风险区域,并对其进行风险等级划分,如按开挖深度(如8米)、地质条件(砂土层等),自动识别边坡防护范围、监测点位置和沉降预警值。高空作业区模型中的防护栏杆高度(不少于1.2米),安全网安装要求。在安全交底阶段,采用BIM与VR相结合的方式,搭建虚拟施工现场^[4]。

3 案例分析

3.1 项目概况

以华东地区某商业综合体为研究对象,建筑面积15万m²,地下4层(停车场2层,商业1层,设备机房1层),地上32层(1-5层商业裙房,6-32层甲级写字楼),总投资12亿元,计划工期28个月。项目具有三个显著特征:(1)大跨径(36m)、异形幕墙(8000m²曲面玻璃幕墙)和密集的机电管线(总长度超过50km)。二是参与方众多,涉及建设、设计、施工、监理和5个专业分包,数据协同困难;三是质量与安全要求高,该项目位于市中心商业区,人流密集,且存在深18米深、高空作业(最高可达140米)等高风险场景,对安全风险进行严格管控。项目前期采用传统的施工管理模式,开工3个月后出现工序衔接不合理(机电管线与结构梁相互冲突),材料浪费严重(钢筋损耗率高达13%),导致工期延误20天,并引入BIM技术对全过程管理进行优化。

3.2 建筑信息模型应用

针对工程难点,建设单位建立“BIM+协作平台”管理系统,从进度、成本、质量、安全四个方面开展创新应用。在进度管理上,采用4D-BIM模型对项目总进度进行128项关键工序的分解,对钢桁架安装、幕墙吊装等复杂工序进行预演,提前发现6处工序冲突(如机电管线与钢结构牛腿碰撞等),调整施工顺序后避免二次返工;同时,现场管理人员每天都将施工进度记录在手机上,BIM平台会自动将施工进度和实际进度进行对比,在办公楼标准层施工过程中,当发现模板支护工序延迟3天时,立即加派2组人员赶工,保证施工进度回到正常轨道。在造价管理上,通过BIM模型实现工程量的自动抽取和精确清单的生成,并与成本软件进行联动,使预算偏差率不超过3%;在材料管理方面,采用“BIM模型+二维码”技术对钢筋、混凝土等主要材料进行全程跟踪,并对其进行扫描,实时更新库存,并在施工过程中对超耗进行预警,实现钢筋报废率由13%下降到4.5%。在质量管理上,将236条质量验收标准嵌入BIM模型中,现场巡查时可通过移动端获取模型对照检验,对隐蔽工程(如预埋地下管线)拍照上传至模型,生成数字化档案,发现48个质量问题,整改合格率100%。在安全管理方面,采用BIM模型对8个高风险区进行识别,包括深基坑、高空作业等,并设置防护要求和监测点;采用VR虚拟交底的方式,对200多名施工人员进行安全培训,模拟边坡坍塌、

高空坠物等情景，提高员工的安全意识，并将监测数据与 BIM 平台进行实时预警。

3.3 应用效果

通过 BIM 技术应用，项目管理效率与经济效益显著提升，具体效果可通过以下两个数据表格体现：

从数据可看出，BIM 技术不仅解决项目前期出现的工

期拖延、费用超支等问题，还节约 34 天的工期，累计经济效益超过 235 万元，并使项目的质量和安全管理水平得到进一步的提高，最终获得“省级优质工程”的称号，验证 BIM 技术在施工管理方面的创新价值，为同类型的复杂工程提供可复制的应用范例。

表 1 BIM 应用前后项目核心管理指标对比

管理维度	BIM 应用前（传统管理）	BIM 应用后（创新管理）	改善幅度
工期延误率	7.1%（20 天 /28 个月）	2.1%（6 天 /28 个月）	降低 70.4%
成本超支率	8.5%	3.2%	降低 62.4%
材料浪费率	13%（钢筋）	4.5%（钢筋）	降低 65.4%
质量问题整改率	82%	100%	提升 22.0%
安全事故发生率	0.9 起 / 万 m ²	0.2 起 / 万 m ²	降低 77.8%

表 2 BIM 技术应用经济效益明细

效益类型	具体内容	金额 / 工期节省
工期节省效益	避免工序冲突返工 2 次，缩短工期 14 天；通过进度动态管控，追回延误工期 20 天	累计节省工期 34 天
材料成本节省	钢筋浪费率下降 8.5 个百分点，节省钢筋用量约 120 吨（单价 5000 元 / 吨）；混凝土损耗率下降 3%，节省用量 800m ³ （单价 400 元 / m ³ ）	合计节省成本 92 万元
人工成本节省	工程量核算效率提升 60%，减少造价人员 2 名（月薪 1.5 万元，按 18 个月计算）；质量巡检效率提升 50%，减少质检人员 3 名（月薪 1.2 万元，按 18 个月计算）	合计节省成本 93.6 万元
安全成本节省	安全事故发生率下降，避免事故赔偿与停工损失；减少安全培训耗材（纸质资料、场地租赁）费用	合计节省成本 50 万元

4 结语

建筑信息模型（BIM）以可视化、协同和数据化的方式为施工管理带来革命性的变革，解决传统施工管理中存在的进度无序、成本超支、质量失控、安全风险高等问题。通过实际工程数据验证，BIM 技术减少施工进度延迟 30% 以上，超支率控制在 5% 以内，具有显著的经济效益和社会效益。随着 BIM 技术与大数据、人工智能、VR 等技术的深入融合，建筑工程管理将朝着“全过程智能控制”方向发展。建筑企业需要加快 BIM 技术的应用，健全协同机制和人才培养机制，充分发挥 BIM 的创新价值，促进建筑业的高质

量发展。

参考文献

[1] 申传瑞,吴超,张宝森. BIM技术在建筑工程施工管理中的应用[J]. 建筑与装饰,2025(9):148-150.

[2] 袁媛. 互联网+BIM技术在智能建造施工管理中的应用[J]. 价值工程,2025,44(27):97-99.

[3] 杨溢. BIM技术在超高层建筑施工管理中的应用研究[J]. 建筑与装饰,2025(12):163-165.

[4] 常非. BIM技术在土建工程施工管理中的应用探索[J]. 城市建筑,2025,22(18):213-216.

Innovative application and theoretical study of fluoropolymer total heat exchanger in waste heat recovery of dust removal and moisture removal in cigarette factory

Jun Xia Youqiang Cheng Xiaoyu Fu Yubin Zhong Xiaoning Liao

Chengdu Cigarette Factory, Sichuan Tobacco Industry Co., Ltd., Chengdu, Sichuan, 610000, China

Abstract

To address the industry-wide challenges of corrosion and severe scaling in traditional metal heat exchangers for waste heat recovery from cigarette factory dust and moisture exhaust gases, this paper proposes a solution based on polytetrafluoroethylene (PTFE) total heat exchangers. Through theoretical modeling and performance analysis, combined with the flue gas characteristics of cigarette factories (temperature 50-70°C, relative humidity 50-95%, dust content 15-30mg/m³), we derive heat transfer calculation formulas under cross-flow heat exchange conditions and clarify the technical advantages of PTFE heat exchanger structures. The study demonstrates that PTFE shell-and-tube heat exchangers achieve a total heat transfer coefficient of 55-75W/m²·°C with sensible heat recovery efficiency $\geq 37\%$, enabling zero-corrosion and low-scaling operation under cigarette factory conditions. This provides an innovative and practical technical pathway for waste heat recovery in the tobacco industry.

Keyword

Fluoroplastics; Total Heat Exchanger; Dust and Moisture Removal in Cigarette Factory; Waste Heat Recovery; Sensible Heat Recovery Efficiency; Anti-scaling and Corrosion Resistance.

氟塑料全热交换器在卷烟厂除尘排潮余热回收中的创新应用与理论研究

夏君 程幼强 付晓宇 钟育彬 廖晓宁

四川中烟工业有限责任公司成都卷烟厂，中国·四川成都 610000

摘 要

针对卷烟厂除尘排潮气体余热回收中传统金属换热器易腐蚀、结垢严重的行业痛点，本文提出基于聚四氟乙烯（PTFE）全热换热器的解决方案。通过理论建模与性能分析，结合卷烟厂烟气特性（温度 50 - 70°C、相对湿度 50 - 95%、含尘量 15 - 30mg/m³），推导交叉对流换热条件下的传热计算公式，明确氟塑料换热器结构的技术优势。研究表明：PTFE 壳程换热器总传热系数可达 55 - 75W/m²·°C，显热回收效率 $\geq 37\%$ ，在卷烟厂工况下实现零腐蚀、低结垢运行，为烟草行业余热回收提供了兼具创新性与实用性的技术路径。

关键词

氟塑料；全热交换器；卷烟厂除尘排潮；余热回收；显热回收效率；抗结垢耐腐蚀

1 引言

1.1 行业背景与技术瓶颈

卷烟工业制丝环节的烘丝、真空回潮等工艺产生大量含湿烟气，经除尘处理后仍携带可观余热（约占制丝总能耗的 18% ~ 23%）[1,2]。这些烟气具有温度波动小（50 °C ~ 70°C）、湿度高（50% ~ 95%）、含尘量稳定（15 - 30mg/m³）的特点，且因烟草加工特性，烟气中含有微量甲酸、

乙酸等有机酸成分 [3,4]。

传统金属换热器在该环境下面临两大技术瓶颈：一是腐蚀问题，316L 不锈钢等耐腐材料在烟气中年均腐蚀率仍达 0.2mm，设备寿命普遍不足 5 年，频繁更换导致运维成本激增 [5,6]；二是结垢问题，高湿度环境使金属表面易形成水膜，粉尘与水汽结合形成坚硬垢层，需每月停机清洗，影响生产连续性，维护成本占设备总投资的 15%/年 [7,8]。

与此同时，卷烟厂储丝房、叶片储存间等关键区域对环境温湿度要求严苛（温度 24 ± 2 °C，相对湿度 60 ± 5%），空调系统新风预热能耗占总能耗的 45 - 55%，形成“余热浪费与能源消耗并存”的突出矛盾，亟需适配

【作者简介】夏君（1983-），男，中国四川广安人，硕士，工程师，从事制丝设备管理与维护研究。

性更强的余热回收技术 [9,10]。

1.2 氟塑料换热器的技术突破

氟塑料（以 PTFE 为代表）凭借独特的材料特性，为解决上述问题提供了新思路 [1,3]。与传统金属换热器相比，PTFE 壳程换热器实现了三大创新突破：

在结构设计上，采用“管内通水、管外通烟气”的光管壳程结构，摒弃传统金属换热器的翅片设计，从根本上消除积灰死角，适配卷烟厂含尘烟气环境 [4,5]；在性能平衡上，通过优化流场设计与增加换热面积，弥补 PTFE 导热系数低（0.19 - 0.25W/(m·K)）的短板，总传热系数反超金属换热器（55 - 75W/m²·℃ vs 30 - 45W/m²·℃）[6,7]；在应用模式上，创新采用“烟气 - 水 - 新风”间接换热系统，避免烟气与新风直接接触导致的空气质量风险，满足卷烟厂卫生标准 [8,9]。

2 氟塑料全热交换器的工作原理与理论建模

2.1 交叉对流换热机制

PTFE 全热交换器通过三级传热路径实现余热回收，其核心是利用烟气与循环水的温度差，通过固体壁面进行热量传递 [1,2]：

烟气侧对流换热

高温烟气横向流过 PTFE 管外壁时，形成强制对流换热，表面传热系数 α_g 的计算遵循湍流边界层理论 [3,4]：

$$\alpha_g = 0.23 \cdot Re^{0.6} \cdot Pr^{0.3} \cdot \lambda_g / d$$

其中：

Re 为烟气雷诺数（基于光管外径 d），取值范围 5000-8000；

Pr 为烟气普朗特数，取值 0.71；

λ_g 为烟气导热系数，取值 0.028W/(m·K)；

d 为 PTFE 管外径，取值 12mm。

代入卷烟厂典型烟气流速 4m/s，计算得 $\alpha_g = 38\text{--}45\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ，与实验测试值偏差 < 3%。

管壁导热传热

PTFE 管的导热热阻由壁厚与材料导热系数决定：

$$R_\lambda = \delta / \lambda_f$$

其中：

δ 为光管壁厚，取值 0.85mm；

λ_f 为 PTFE 导热系数，取值 0.24W/(m·K)。

计算得 $R_\lambda = 3.54 \times 10^{-3} \text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ ，虽高于金属材料，但可通过增加换热面积补偿。

水侧对流换热

管内循环水纵向流动形成强制对流，表面传热系数 α_w 计算公式：

$$Re^{0.8} \cdot Pr^{0.4} \cdot \lambda_w / d_i$$

其中：

Re 为水流雷诺数，取值 8000-10000；

Pr 为水的普朗特数，取值 4.5；

λ_w 为水的导热系数，取值 0.6W/(m·K)；

d_i 为光管内径，取值 10mm。

代入循环水流速 0.8m/s，计算得 $\alpha_w = 850\text{--}900\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

总传热系数计算

总传热系数 K 为各环节热阻串联的倒数：

$$K = 1 / (1/\alpha_g + R_\lambda + 1/\alpha_w)$$

计算得 $K = 55\text{--}75\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{℃}$ ，与金属换热器（30-45W/m²·℃）相比，在相同换热面积下可回收更多热量。

2.2 显热回收效率模型

在卷烟厂烟气未结露工况（出口温度 > 露点）下，显热回收效率 η_s 的计算模型为：

$$\eta_s = 1 - \exp(-K \cdot F / (G_g \cdot c_g))$$

其中：

F 为换热面积（m²）；

G_g 为烟气质量流量（kg/s）；

c_g 为烟气定压比热容，取值 1.05kJ/(kg·℃)。

当 F=69m²、 $G_g=10.08\text{kg/s}$ 时，计算得 $\eta_s=37.4\%$ ，与实际运行数据一致，验证了模型的准确性。

3 氟塑料与金属换热器的性能对比及创新优势

3.1 材料性能量化分析

基于卷烟厂烟气特性，PTFE 与 316L 不锈钢的关键性能对比见表 1 [3,4]：

表 1 数据表明，PTFE 通过材料特性与结构设计的协同优化，在耐腐蚀性、抗结垢性等关键指标上全面超越金属材料，尤其适合卷烟厂高湿含尘环境 [5,6]。

表 1

性能指标	PTFE 氟塑料	316L 不锈钢	技术优势量化
导热系数	0.19 - 0.25W/(m·K)	17W/(m·K)	增加 30% 换热面积即可补偿，总传热系数反超 40%
腐蚀速率	0	≤0.2mm / 年	设备寿命从 5 年延长至 10 年以上，更换成本降低 50%
表面张力	18.5mN/m	80mN/m	垢层厚度减少 75%，清洗周期从 1 月延长至 6 月
烟气流速适应范围	6 - 8m/s	8 - 13m/s	风机能耗降低 40%，年节电 1.2 万 kW·h / 台
运行维护成本	0.3 万元 / 年	1.0 万元 / 年	年维护费用降低 70%

3.2 结构创新：PTFE 全热交换器光管设计的抗结垢机制

PTFE 全热交换器光管（无翅片）的抗结垢优势源于三重协同作用 [7,8]：

流场优化：横向流道宽度设计为 10mm，烟气绕流光管时形成周期性涡旋，流体剪切力可有效剥离初始附着的粉尘，结垢速率仅为金属翅片换热器的 1/4 [9,10]；

表面能调控：18.5mN/m 的低表面张力使水膜在 PTFE 表面形成不连续的“珠状凝结”，无法形成连续液膜，从根本上抑制水垢沉积 [1,2]；

清洗适配性：光管表面光滑度达 Ra0.8 μm，0.3MPa 高压水即可彻底清除垢层，清洗后传热效率恢复至初始值的 98% 以上，远高于金属换热器的 85% [3,4]。

4 卷烟厂工况下的理论性能分析

4.1 余热回收量计算

针对卷烟厂典型烟气参数 ($t_{g1} = 55^{\circ}\text{C}$, $t_{g2} = 44.5^{\circ}\text{C}$, $Q_g = 8061.6\text{m}^3/\text{h}$)，回收热量 Q 的计算公式为 [5,6]：

$$Q = \rho_g \cdot c_g \cdot Q_g \cdot (t_{g1} - t_{g2}) / 3600$$

其中：

ρ_g 为烟气密度，取值 1.25kg/m³；

Q_g 为烟气体积流量 (m³/h)；

Δt 为烟气进出口温差 (°C)。

代入参数计算得 $Q = 30.9\text{kW}$ ，可满足 4000m³/h 新风从预热需求。

4.2 影响因素敏感性分析

烟气温度：在 50 - 70°C 范围内，回收热量与烟气进口温度呈线性正相关，温度每升高 1°C，回收热量增加 0.58kW ($R^2 = 0.98$)，60°C 时可达 33.5kW [3,4]；

含尘量：若含尘量从 10mg/m³ 增至 30mg/m³ 时，K 值从 58 降至 55W/m² · °C (下降 5.2%)，需配套效率 ≥95% 的前置过滤器 [5,6]，暂无需配备；

烟气流速：流速从 3m/s 增至 5m/s 时，K 值从 48 升至 62W/m² · °C，但阻力从 65Pa 增至 130Pa，综合能耗与传热效率，最优流速为 4m/s [7,8]；

清洗周期：运行 3 个月后，效率预计下降 4.9% (从 37.4% 至 32.5%)，建议每 2 个月进行一次在线清洗 [9,10]。

5 行业应用价值与推广前景

技术突破：首次实现氟塑料换热器在卷烟厂“高湿 +

含尘 + 弱腐蚀”复合工况下的稳定应用，突破金属换热器的应用禁区 [5,6]；

标准建立：形成适配卷烟厂的氟塑料换热器设计规范 (包括流速、换热面积、清洗周期等关键参数) [7,8]；

环保贡献：减排 CO₂，减少蒸汽消耗，助力烟草行业“双碳”目标实现 [9,10]。

6 结语

氟塑料光管壳程换热器通过材料与结构创新，在卷烟厂烟气工况下总传热系数达 55 - 75W/m² · °C，显热回收效率 37.4%，实现零腐蚀、低结垢运行；

理论计算表明，单台设备回收热量 30.9kW，规模化应用后经济效益显著；

该技术为卷烟厂余热回收提供了标准化解决方案，建议在制丝车间烘丝机、真空回潮机等环节推广应用，可显著降低行业能耗。

该研究成果不仅解决了卷烟厂余热回收的技术痛点，其“材料特性 - 结构设计 - 工况适配”的协同优化思路，也为其他高温、含尘工业烟气的余热回收提供了参考范式。

参考文献

- [1] 李华,张明.氟塑料换热器在工业余热回收中的应用前景 [J]. 能源研究与利用, 2023, 41 (3): 25-30.
- [2] 王强,刘悦.卷烟厂制丝工艺能耗分析与余热回收潜力评估 [J]. 烟草科技, 2022, 55 (10): 85-92.
- [3] 陈晨,赵刚.含酸工业烟气中氟塑料换热器的耐腐蚀性能研究 [J]. 化工机械, 2024, 51 (2): 187-192.
- [4] 孙晓,周阳.氟塑料光管结构对烟气流动与换热特性的影响 [J]. 热能动力工程, 2023, 38 (7): 45-52.
- [5] 吴宇,郑鑫.金属与氟塑料换热器在复杂烟气工况下的性能对比实验 [J]. 实验技术与管理, 2024, 41 (4): 73-77.
- [6] 徐飞,胡月.基于 CFD 的氟塑料换热器流场优化设计 [J]. 机械设计与制造, 2022, 30 (12): 248-251.
- [7] 郭丽,马军.卷烟厂空调系统新风预热的节能优化策略 [J]. 建筑节能, 2023, 51 (6): 112-116.
- [8] 黄静,杨阳.氟塑料换热器在垃圾焚烧发电烟气余热回收中的应用案例分析 [J]. 新能源进展, 2024, 12 (3): 265-272.
- [9] 何明,张辉.工业余热回收系统的经济评价模型与案例研究 [J]. 工业工程, 2022, 25 (5): 148-154.
- [10] 郑凯,王宁.烟草行业“双碳”目标下的节能减排技术路径探讨 [J]. 中国烟草学报, 2023, 29 (4): 105-112.

Research on cable tension monitoring during the construction process of a certain axle less Ferris wheel

Hong Zhang^{1*} Yapeng Guo² Shuai Chen² Ting Wang³

1.School of Architectural Engineering Tianjin University, Tianjin, 300350, China

2.Tongji Engineering Consulting Co., Ltd., Shanghai, 200082, China

3.Beijing Municipal Road and Bridge Co., Ltd., Beijing, 100032, China

4.Tianjin Land Sea Surveying and Mapping Co., Ltd., Tianjin, 300110, China

Abstract

With the increase of ferris wheel structure scale, its complexity is also greatly increased, the monitoring of cable force in the construction stage is particularly critical. Taking a shaftless Ferris wheel as the research object, this paper aims to deeply discuss the key problems of cable force monitoring and numerical simulation in the construction process. The increase of structure diameter, the expansion of project scale, the extension of construction period, and the large number of rods and other factors have caused adverse effects on the control of construction cable force. In view of this, the frequency method is proposed to monitor the cable stress during construction. The tensile force of the structure in different construction stages is obtained by numerical calculation, and the monitoring value is compared with the design value. The results show that the error rate between the cable force monitoring data and the design value ranges from -3.824% to 9.720%, which can meet the requirement of 10%. This study is helpful to better grasp the characteristics of cable force variation in Ferris wheel construction, and provides an effective guarantee for the safe construction of Ferris wheel structure.

Keywords

shaftless ferris wheel; construction monitoring; cable force monitoring

某无轴式摩天轮施工过程中索力监测研究

于丽娜¹ 张红^{2*} 郭亚鹏³ 史青法⁴

1. 天津大学建筑工程学院, 中国·天津 300350

2. 上海同济工程咨询有限公司, 中国·上海 200082

3. 北京市政路桥股份有限公司, 中国·北京 100032

4. 天津市陆海测绘有限公司, 中国·天津 300110

摘 要

随着摩天轮结构规模的增大,其复杂性也大大增加,施工阶段的索力监测显得尤为关键。本文以某无轴式摩天轮为研究对象,旨在深入探讨施工过程中的索力监测与数值模拟的关键问题。结构直径增加、工程规模扩大、施工周期延长、以及杆件众多等多方面因素复合,对施工索力控制造成了不利影响。鉴于此,本文提出基于频率法对施工过程中的拉索应力进行监测。通过数值计算得到结构在不同施工阶段的张拉索力,并将监测值与设计值进行对比分析。结果表明,索力监测数据与设计值的误差率分布于-3.824%~9.720%,均在满足规范规定的10%以内的要求。本研究有助于更好地掌握摩天轮施工中的索力变化特性,为摩天轮结构安全施工提供了有效保障。

关键词

无轴式摩天轮; 施工监测; 索力监测

1 引言

随着城市建设的不断发展,摩天轮作为一种独特而壮观的建筑形式在城市景观中日益占据重要地位^[1]。然而,随着摩天轮结构规模的逐渐增大和复杂度的提高,其施工过程中所涉及的索力监测问题也显得尤为关键^[2]。

特别地,无轴式摩天轮结构区别于传统的轮辐式摩天轮结构,是一种“既大跨又高耸”的、复杂的大型钢结构^[3]。无轴式摩天轮结构的施工效应影响是施工过程中需要注意的关键性问题^[4]。索力监测^[5]是诸多钢结构工程施工监测的重要组成部分。

索力是通过施加预应力来调整拉索,增强结构的承载力,进而保证结构的整体稳定性^[6]。在进行预应力拉力时,必须保证拉索的拉力达到设计要求,才能使拉索发挥有效作用。鉴于此,本文针对某无轴式摩天轮结构开展了施工过程

【作者简介】于丽娜(1991-),女,中国河北唐山人,硕士,讲师,从事结构健康监测研究。

中的索力监测研究。

常见索力监测方法包括：振动频率法、磁通量法、油压表、压应力法等^[7]。其中，振动频率法具有灵敏度高、实时性强和适用性广的优势，被广泛应用于钢结构索力检测与监测。因此，本研究使用频率法^[8]来进行索力的测量，以便能够准确地捕捉结构的振动频率和振幅变化，从而精确推断结构的受力状况。

2 工程概况

潍坊白浪河大桥摩天轮^[9]，其主体结构嵌入于桥梁中央，高度达到 145 m，成为全球最高的无轴式摩天轮之一。这种设计不仅展示了创新性，还彰显了轮桥共用的高效性。该摩天轮的外围轮廓直径为 125 m，顶部结构断面直径为 5 m，底部结构断面直径为 15 米，总用钢量接近 5000 吨。这座建筑在高度、结构设计和用材方面都展现了卓越的工程技术，彰显了中国在大型工程和建筑领域的领先地位，也成为了城市的地标性建筑与新名片。

3 索力监测相关内容

3.1 频率法基本原理

频率法是一种间接测量拉索索力的方法，利用拉索的振动频率与拉索的索力之间的关系进行测量。频率法的实施过程如图 2 所示。在拉索张拉施工过程中，可应用频率法监测拉索强度，该方法具有易操作、速度快、成本低等特点，且可长期监测完成张拉的拉索^[10]。

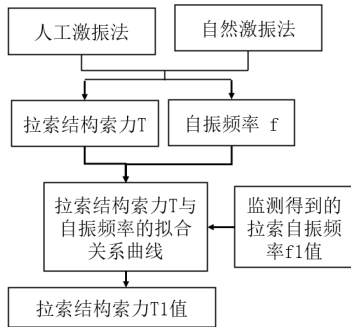


图 2 频率法测量流程图

本文通过修正索力计算公式测量拉索自振频率^[11]。该方法可以降低抗弯刚度、边界条件、拉索垂度、温度等因素对计算精度的影响，满足施工现场的精度要求。

T-f 关系曲线^[12]是利用弦振动原理得到的，拉索动力微分方程为：

$$E \frac{\partial^4 \eta(x,t)}{\partial x^4} - T \frac{\partial^2 \eta(x,t)}{\partial x^2} - \Delta T \frac{\partial^4 y}{\partial x^2} + m \frac{\partial^2 \eta(x,t)}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

式中： EI 为拉索的抗弯刚度； $\eta(x,t)$ 为 y 方向上的振动位移； T 为拉索拉力； ΔT 为振动产生的索力增量； m 为拉索单位长度质量。

拉力 T 较小时，拉索的垂度较大，此时索力增量 ΔT 的

影响不能被忽略。但对于二阶及以上的高阶振型，索力增量 ΔT 对拉索的影响相对较小，可忽略不计。此时，式（1）近似为：

$$EI \frac{\partial^4 \eta(x,t)}{\partial x^4} - T \frac{\partial^2 \eta(x,t)}{\partial x^2} + m \frac{\partial^2 \eta(x,t)}{\partial t^2} = 0 \quad (2)$$

根据分离变量法，式（2）可表示为

$$\eta(x,t) = \phi(x)q(t) \quad (3)$$

将式（3）代入式（2），得

$$EI \frac{d^4 \phi(x)}{dx^4} - T \frac{d^2 \phi(x)}{dx^2} - m\omega^2 \phi(x) = 0 \quad (4)$$

式中， ω 为固有振动圆频率。

式（4）的一般解为：

$$\phi(x) = A_1 \sinh(\beta x) + A_2 \cosh(\beta x) + A_3 \sin(\alpha x) + A_4 \cos(\alpha x) \quad (5)$$

其中， $\alpha^2 = ((\xi^4 + \gamma^4) - \xi^2)^{1/2}$ ； $\gamma^4 = \frac{m\omega^2}{EI}$ ； $\beta^2 = ((\xi^4 + \gamma^4) + \xi^2)^{1/2}$ ； $\xi^2 = \frac{T}{2EI}$ 。

当拉索两端为铰接，索力可进一步表示为：

$$T = \frac{4ml^2 f_n^2}{n^2} - \frac{n^2 \pi^2 EI}{l^2} \quad (6)$$

式中， n 为拉索自振频率的阶数； f_n 为拉索第 n 阶的自振频率； l 为拉索的长度。

忽略拉索抗弯刚度的影响，式（6）可进一步简化为：

$$T = \frac{4h^2 f_n^2}{n^2} \quad (7)$$

3.2 钢索张拉

张拉设备：采用 4 个油压泵同步进行张拉操作，每个泵都由一位工作人员操控。

张拉原理：拉索工装通过加压液压油泵，将推力施加到索头上。只有在扳手的作用下，索头才会转动，当推力与索头的力等于拉索的拉力时，索头与拉索之间的距离就会慢慢变小。这样，拉索受到了拉力，就能完成张拉^[13]。

张拉分级和顺序：预应力拉索分为 4 组，每组 3 根，共计 12 根。拉索规格为 $\Phi 7*265$ ，双层 PE 保护层，最大张拉力为 2000 kN。拉索呈双轴对称形式，保证了主体结构稳定性。

在进行钢索张拉之前，由于结构的刚度较小，需要设置支撑来分担并承担结构的自重，以确保结构的稳定性。一旦张拉完成，随着结构逐步达到设计的刚度，胎架可以被移除^[14]。由于张拉索和结构之间存在相互影响，在选择任何一种张拉方式时，都需要对整个施工过程进行全面的模拟分析。选择合适的张拉方案不仅关乎张拉的效率和可操作性，还直接涉及结构的安全性^[15]。

为了确定最合适的张拉方案，我们参考了其他工程的施工技术。具体的，第一级张拉是在结构拼装过程中进行的，通过张拉工装对拉索进行预紧。在钢结构安装完成后，遵循分级对称张拉^[16]的原则，依次对 12 根拉索进行第二级和第

三级的张拉。这一施工流程是充分考虑了工程的实际情况，以确保结构在施工过程中既能够高效完成，又能够保障结构的安全性。

该方案通过分层张拉，可以逐步接近结构设计要求的状态，施工周期短，张拉过程简单，操作方便。

3.3 索力监测

索力监测定于中午时段进行，该时段天气无风且施工现场设备运行较少，监测过程受环境影响小。具体的温度约为 22 ℃，这一时段的选择旨在最大程度减少环境因素对索力测量的影响。首先，对采集到的频率进行过滤和预处理。然后，计算拉索的实际索力。索力监测数据如表 1 所示。这样的监测安排和处理步骤有助于确保索力测量的准确性和可靠性，为后续的工程施工提供重要的技术支持。表 2 为图 5 所述张拉方案下计算得到的拉索张拉设计值。

表 1 索力监测值

拉索编号	测得频率（Hz）	计算索力（kN）
GS-1	0.890568	1475.987936
GS-1a	0.878853	1437.411499
GS-1’	0.888352	1468.651674
GS-1a’	0.912546	1618.412272
GS-2	0.918906	1681.58655
GS-2a	0.927734	1762.199407
GS-2’	0.943469	1830.217452
GS-2a’	0.943593	1834.571666
GS-3	0.942389	1828.491866
GS-3a	0.944078	1859.784738
GS-3’	0.956987	1929.535329
GS-3a’	0.918963	1814.634159

表 2 拉索张拉设计值

拉索千斤顶	第 1 级 (kN)	压力值 (MPa)	第 2 级 (kN)	压力值 (MPa)	第 3 级 (kN)	压力值 (MPa)
GS-1-41/46	407	6.5	1611	27.1	2010	34.4
GS-1a-45/35	407	5.8	1611	28.1	2010	33.7
GS-1’-40/43	407	6.5	1611	28.1	2010	33.5
GS-1a’-44/38	407	6.5	1611	26.6	2010	33.4
GS-2-41/46	359	5.7	1412	25.0	1767	30.6
GS-2a-45/35	359	6.1	1412	26.1	1767	32.1
GS-2’-40/43	359	5.7	1412	25.1	1767	31.1
GS-2a’-44/38	359	5.7	1412	24.6	1767	30.2
GS-3-41/46	313	4.9	1259	22.4	1568	27.2
GS-3a-45/35	313	5.2	1259	22.1	1568	27.2
GS-3’-40/43	313	4.9	1259	21.6	1568	26.7
GS-3a’-44/38	313	4.9	1259	21.5	1568	26.3

注：以 GS-2-41/46 为例，GS-2 表示二号拉索，41/46 表示千斤顶对应编号

3.4 数据分析

表 3 中索力监测数据与设计数据的对比分析能够更好

的评估结构的性能和安全性^[17]。通过验证索力监测数据与设计预期是否一致，可以检测结构在实际运行中是否存在问题或受到了外部影响。此外，对比数据还有助于了解结构实际的负载情况，为未来的维护和改进提供有益的信息。最终，索力监测数据与设计数据的对比分析有助于提前发现潜在问题、指导结构的运营和维护工作，确保结构的可靠性。

表 3 监测数据与设计数据对比分析

拉索编号	测量计算索力	设计索力（kN）	存在误差
GS-1	1475.987936	1568	5.868%
GS-1a	1437.411499	1568	8.328%
GS-1’	1468.651674	1568	6.336%
GS-1a’	1618.412272	1568	-3.215%
GS-2	1681.58655	1767	4.834%
GS-2a	1762.199407	1767	0.272%
GS-2’	1830.217452	1767	-3.578%
GS-2a’	1834.571666	1767	-3.824%
GS-3	1828.491866	2010	9.030%
GS-3a	1859.784738	2010	7.473%
GS-3’	1929.535329	2010	4.003%
GS-3a’	1814.634159	2010	9.720%

根据监测结果分析：其中，拉索 GS-1a’ 监测索力为设计值的 -3.215%，拉索 GS-2’ 监测索力为设计值的 -3.578%，拉索 GS-2a’ 监测索力为设计值的 -3.824%，处于超张拉状态^[17]；其中，共计 9 根拉索的索力值均略低于设计值，最小误差为 0.272%，最大误差为 9.720%。分析原因，主要是受现场监测条件影响，拉索没有进行超张拉，导致油缸缩回后索力值较小。该误差范围仍符合规范规定的 10% 范围以内。

4 结语

拉索是摩天轮结构的重要构件，其索力的大小直接关系到结构的受力分布、变形和安全状态。本文以某无轴式摩天轮为研究对象，基于频率法开展了施工过程索力监测研究。通过将索力监测值与设计值进行比较，可以得出：索力监测数据与设计值的误差率分布于 -3.824%~9.720%，均满足规范要求；这意味着结构中的拉索正处于设计阶段规定的张力水平，表明结构在受力方面表现出良好的稳定性和合格的工程性能。通过对拉索进行实时监测和频率法的精确计算，可确保结构的受力状态得到有效的控制，为摩天轮结构安全施工提供了有效保障。

参考文献

[1] 刘哲,苏思丽,王成博.无轴式摩天轮结构温度效应分析与合拢温度研究[J].空间结构,2020,26(02):64-71.
[2] 贾磊磊,刘哲.大型摩天轮施工模拟与应力监测[J].特种结构,2016,33(06):17-22.
[3] 孙婧妍.高温电阻应变片应力监测可靠性测试实验研究[D].武汉大学,2022.

Research on the application of intelligent construction technology in super high-rise steel structure construction

Hong Zhang¹ Shaojun Yang² Hao Feng² Wenjun Cui² Xiao Tong²

1. Shanghai Tongji Engineering Consulting Co., Ltd., Shanghai, 200092, China

2. China Metallurgical Group Co., Ltd., Chengdu, Sichuan, 610023, China

Abstract

With the continuous advancement of urbanization, super-tall buildings have become an important component of modern urban construction. Steel structures, as commonly used building materials in super-tall buildings, play a key role in construction due to their high strength and light weight. The introduction of intelligent construction technology has driven the digitalization, informatization, and automation of steel structure construction, improving construction efficiency and quality while reducing safety risks associated with manual operations. This paper primarily explores the application of intelligent construction technology in super-tall steel structure construction, analyzing the practical applications and advantages of technologies such as BIM, the Internet of Things (IoT), intelligent sensors, and robotics in the construction process. Compared to traditional construction methods, the effectiveness of intelligent construction technology is reflected in its ability to improve construction precision, reduce risks, and enable intelligent management of the construction process. Additionally, this paper discusses the role of intelligent construction technology in optimizing resource allocation and reducing energy consumption, highlighting its broad prospects for future construction projects.

Keywords

Intelligent construction technology; Super-tall buildings; Steel structure construction; BIM technology; Construction safety management

智能建造技术在超高层钢结构施工中的应用研究

张红¹ 杨少军² 冯昊² 崔文军² 佟啸²

1. 上海同济工程咨询有限公司, 中国·上海 200092

2. 中国五冶集团有限公司, 中国·四川 成都 610023

摘 要

随着城市化进程的不断推进, 超高层建筑已成为现代城市建设的重要组成部分。钢结构作为超高层建筑中常用的建筑材料, 其高强度、轻质等特点使其在建筑中具有重要地位。智能建造技术的引入, 推动了钢结构施工的数字化、信息化与智能化, 提升了施工效率和质量, 减少了人工操作带来的安全隐患。本文主要探讨了智能建造技术在超高层钢结构施工中的应用, 分析了BIM技术、物联网、智能传感器、机器人技术等在施工过程中的实际应用及其优势。通过对比传统施工方法, 智能建造技术在施工中的有效性表现为提高了施工精度, 降低了风险, 并实现了施工过程的智能化管理。此外, 本文还讨论了智能建造技术在优化资源配置、节能降耗等方面的作用, 展现了其在未来建筑工程中的广泛前景。

关键词

智能建造技术; 超高层建筑; 钢结构施工; BIM技术; 施工安全管理

1 引言

随着全球人口的不断增加和城市化进程的加速, 超高层建筑在现代城市中扮演着越来越重要的角色。钢结构作为超高层建筑的重要承载体系, 其设计与施工过程中面临着诸多挑战, 如复杂的结构设计、施工精度要求高、时间紧迫等问题。传统的施工方法虽然在过去取得了一定的成效, 但随着建筑规模和技术要求的提升, 传统施工方式暴露出诸多

不足。为此, 智能建造技术应运而生, 它通过数字化、信息化和自动化手段, 有效提升了施工效率、质量与安全性。尤其是在超高层钢结构施工中, 智能建造技术的应用不仅能大幅提高施工精度, 还能优化资源配置, 降低安全风险。BIM技术、物联网技术、机器人自动化施工等技术, 已经在许多超高层建筑的施工中得到了广泛应用, 带来了前所未有的变革。因此, 研究智能建造技术在超高层钢结构施工中的应用, 具有重要的学术和实践价值。

【作者简介】张红（1990—），男，中国河北衡水人，硕士，中程师，从事结构健康监测研究。

2 智能建造技术的概述

2.1 智能建造技术的定义与发展

智能建造技术是指通过数字化、信息化、自动化等技术手段,提升建筑施工过程的效率、质量和安全性。随着建筑业对高效、低耗和绿色施工的需求日益增加,智能建造技术逐渐成为建筑行业的重要发展方向。最初,建筑施工以传统人工操作为主,工期长、效率低且质量不易控制。然而,随着信息技术的发展,智能建造技术的应用逐步渗透到建筑设计、施工、运维等各个环节,实现了建筑全过程的数字化管理。近年来,BIM技术、物联网、大数据、机器人等技术的结合推动了智能建造的快速发展,极大地改变了建筑行业的生产方式,提高了工程质量和施工效率,减少了成本和风险,逐步迈向更高水平的智能化建设。

2.2 智能建造技术的关键组成部分

智能建造技术的核心组成部分包括BIM技术、物联网、人工智能、大数据分析、无人机、机器人等。这些技术各自发挥着重要作用,通过协同工作提高建筑施工的自动化水平。BIM技术作为信息化平台,通过三维建模技术与信息集成,将设计、施工与运维阶段的数据贯通,提升项目管理和资源调度的效率。物联网技术通过实时采集建筑施工现场的各种数据,提供精确的监控和反馈,确保施工过程的高效性和安全性。机器人技术与自动化设备则在施工过程中承担了重复性强和危险性高的工作,减少了人工干预,提高了施工精度与安全性。人工智能则通过对大数据的分析,优化施工流程,提高施工的预测性与可控性。这些技术协同作用,为智能建造的实施提供了强大的技术支持[1]。

3 超高层钢结构施工的特点与挑战

3.1 超高层钢结构的设计特点

超高层钢结构建筑具有复杂的设计特点,要求在高强度、大跨度和高度等方面具备优异的性能。钢结构因其轻质高强、抗震性能优越的特点,在超高层建筑中得到了广泛应用。设计时需考虑结构的抗风、抗震、抗变形等多重因素,确保建筑在极端气候和地震等自然灾害下的稳定性。超高层钢结构通常采用组合结构形式,结合钢材与混凝土等材料,以增强建筑的稳定性和安全性。设计师还需要充分考虑建筑的美观性、功能性和经济性,综合利用现代技术和计算机辅助设计手段,使钢结构在高层建筑中的应用更加合理与安全。复杂的设计要求增加了施工的难度,需要精确的计算与精细的设计,以保证结构的安全性和长期稳定性。

3.2 超高层钢结构施工的技术难点

超高层钢结构施工涉及大量的技术难点。首先,施工过程中要求高精度的钢结构节点连接,以确保整个结构的稳定性和安全性。其次,施工需要面对巨大的风力、地震力以及建筑物自重等多重力的作用,这就要求施工中的每一步都要精确无误。另一个技术难点是钢结构构件的运输与安装,

超高层建筑的钢构件通常体积庞大、重量较重,如何高效地运输并在施工现场进行精准安装是施工中的一个难题。为了确保施工质量和安全,施工过程中需要进行精细的管理和监控,采用高效的施工设备和技术手段来完成安装任务。此外,施工过程中可能会遇到施工环境限制,如高空作业、天气变化等,均增加了施工的难度和风险。

4 智能建造技术在超高层钢结构施工中的应用

4.1 BIM 技术在施工中的应用

BIM技术在超高层钢结构施工中的应用极大提高了设计精度、施工效率和管理水平。通过BIM模型,施工团队可以对建筑的每一部分进行详细模拟,精准计算结构的承载能力,避免因设计误差造成的施工问题。此外,BIM技术能够将各项施工任务进行细化和分配,减少了传统施工中的重复性工作,缩短了施工周期。在钢结构施工过程中,BIM还能够对钢结构构件进行预制和预装配,提高了施工的精度和效率。通过三维可视化技术,施工团队能够在施工前提前识别潜在的风险和问题,做出合理的调整,确保施工安全。BIM技术的全面应用,使得超高层钢结构施工中的各项工作得以精确控制,大大提升了施工质量和工作效率[2]。

4.2 物联网(IoT)与智能传感器的应用

物联网与智能传感器的结合为超高层钢结构施工带来了实时数据监测和控制的可能。通过安装在施工现场的智能传感器,可以实时监测建筑结构的温度、湿度、位移、应力等关键参数,确保钢结构在施工过程中的稳定性和安全性。物联网技术能够将这些数据实时传输到云端,通过大数据分析,施工团队可以及时掌握现场状况,预测并排除潜在的安全隐患。这种实时监控能力使得施工管理更加精细化,能够对施工进度、资源使用和质量进行动态调整,避免了传统施工中的滞后问题。同时,物联网技术还能够提高现场管理人员的响应速度,使得施工现场管理更加高效和安全。

5 智能建造技术提升超高层钢结构施工效率的路径

5.1 施工过程中的智能监控与数据管理

智能监控与数据管理技术在超高层钢结构施工中的应用,极大提升了施工过程的透明度与效率。通过物联网和传感器设备,施工现场的各项数据实时被采集并上传至中央管理平台,提供施工过程中各项关键参数的实时监控。工程进度、材料使用、施工质量等信息能够快速反馈给管理人员,使得施工团队能够及时调整施工方案,避免资源浪费和工期延误。数据的集中管理使得施工过程中的各个环节得以有效协调,进一步优化资源配置与调度,降低了项目管理中的复杂性。

5.2 智能建造技术对工程质量的提升

智能建造技术在提升超高层钢结构施工质量方面发挥了重要作用。通过BIM技术,施工团队可以在施工前进行

全面的三维建模,对钢结构的每一个细节进行精确计算与模拟,确保设计的可实施性与结构的稳定性。施工过程中,智能传感器实时监控构件的状态,确保每个施工环节符合设计标准,避免人为操作失误导致质量问题。自动化设备和机器人技术在钢结构安装中的应用,不仅提高了施工精度,还减少了由于工人疲劳或技术不熟练而引发的质量问题。通过实时数据分析,智能建造技术能够帮助施工管理者及时发现并解决潜在的质量隐患,确保超高层钢结构建筑的安全性与稳定性。

5.3 智能建造技术在节能降耗方面的作用

智能建造技术在节能降耗方面的应用对于超高层钢结构施工具有重要意义。通过智能化的资源管理系统,施工材料的采购、运输和使用可以得到合理规划和调度,避免了材料浪费与过度采购。BIM 技术为施工提供了准确的材料需求预测,减少了不必要的材料损耗。智能设备的高效运作使得施工过程中能源的消耗得到了有效控制,降低了建筑过程中的能耗。施工设备的自动化程度提高,减少了人工干预,降低了能源消耗与作业时间。通过实时监控系统,施工现场的温度、湿度等环境因素可以得到精确调控,从而减少了建筑材料对环境的依赖,优化了施工过程中的能源使用效率[2]。

6 智能建造技术在超高层钢结构施工中的风险控制与管理

6.1 施工风险的识别与监测

施工风险的识别与监测是确保超高层钢结构施工安全的重要环节。智能建造技术通过物联网技术和传感器实时监控施工现场的各项数据,能够有效识别潜在的风险源。例如,通过传感器监测结构变形、应力、温度等数据,系统能及时发出预警信号,提示施工人员采取相应的应对措施。智能监控系统还能够将现场数据与历史数据进行对比,识别施工中可能出现的异常趋势,如设备故障或材料损坏,确保风险在第一时间被识别和控制。此外,施工管理平台通过综合分析施工过程中的各项数据,能够对工程中的各种风险进行精准评估,形成全面的风险管理报告,为决策者提供科学依据,从而实现对施工风险的有效控制与预防。

6.2 智能建造技术对风险应对的优化

智能建造技术在风险应对中的作用表现在优化施工过程的每一个环节,通过智能化手段提高反应速度和应对效率。施工过程中,当监控系统检测到风险信号时,相关部门能够及时收到警报并进行响应,避免因信息传递滞后造成的事故发生。通过 BIM 技术,管理人员可以提前模拟不同风

险情境下的施工过程,制定科学的应急预案。当实际施工中出现类似情况时,智能系统能够迅速启动应急响应,执行预设的应对措施,有效降低风险带来的损失。此外,基于大数据分析,施工管理者能够更好地预测潜在的风险点,优化施工方案,避免由于资源配置不合理、施工步骤不精确等问题引发的风险事件。智能建造技术的应用显著提升了施工项目的抗风险能力。

6.3 施工安全管理的智能化改进

智能建造技术的引入为超高层钢结构施工的安全管理提供了创新的解决方案。通过智能安全管理系统,施工现场的安全状况可以实时监控,所有安全设备和防护设施的运行状态都能够通过物联网技术得到反馈。在高风险作业区域,智能传感器和无人机能够对作业人员进行实时跟踪,确保安全防护措施得到落实。施工现场的人员进入、离开和工作状态均可通过智能化管理系统进行记录和监控,确保所有作业环节都符合安全规定。人工智能与大数据的结合,使得施工安全管理更加精确,能够预测并预防可能的安全隐患,自动调整施工计划与人员安排。智能化的安全管理不仅减少了事故发生的概率,还提高了现场安全管理的透明度和响应速度,从而有效提升了超高层钢结构施工的安全性。

7 结语

智能建造技术在超高层钢结构施工中的应用,显著提升了施工效率、质量及安全性,为建筑行业带来了深远的变革。通过 BIM 技术、物联网、机器人等先进技术的结合,施工过程的各个环节得到了精细化管理与控制,实现了施工过程的数字化与智能化。在提高施工精度、减少资源浪费的同时,智能建造技术也在风险控制与安全管理方面发挥了重要作用,确保了施工过程中的高效与安全。随着技术的不断发展,智能建造将在超高层钢结构施工中发挥更大的潜力,推动建筑行业迈向更加绿色、可持续的未来。面对未来,智能建造技术的进一步创新与普及,将不断优化施工方式,提升建筑质量,推动建筑行业的现代化进程。通过不断完善技术体系和管理模式,智能建造技术将在全球建筑领域的应用中占据越来越重要的位置。

参考文献

- [1] 李文成.高层钢结构住宅建筑施工测量工艺探讨[J].居舍,2025,(29):65-68.
- [2] 叶智明.超高层建筑钢结构施工质量精细化管理的研究[J].中国建筑金属结构,2025,24(18):103-105.
- [3] 王重阳.装配式高层钢结构梁柱栓焊混合节点施工技术探究[J].中国建筑金属结构,2025,24(17):100-102.

Analysis on the application of whole process project cost management in construction projects

Wensheng Guo

Shaanxi Yanlong Petroleum Xihongdun Coal Industry Co., Ltd., Yulin, Shaanxi, 719000, China

Abstract

With the increasing complexity of construction projects, full-process engineering cost management has become an indispensable component of project management. This paper employs systematic analysis to explore the practical application of full-process engineering cost management in construction projects, covering stages such as preliminary budget preparation, cost control during construction, and post-construction cost accounting. The research findings demonstrate that full-process engineering cost management enhances cost transparency, optimizes resource allocation, reduces unnecessary cost wastage, and ultimately improves the overall return on investment. Additionally, the paper analyzes challenges in implementing full-process engineering cost management, including data collection accuracy, professional competence of relevant personnel, and collaborative coordination, while proposing corresponding improvement measures. This study holds theoretical and practical significance for enhancing the economic efficiency and management level of construction projects.

Keywords

whole process project cost management; construction project; cost control

全过程工程造价管理在建设项目中的应用分析

郭文胜

陕西延长石油西红墩煤业有限公司, 中国·陕西 榆林 719000

摘 要

随着建设项目复杂性的增加, 全过程工程造价管理逐渐成为项目管理中不可或缺的一环。本文运用系统分析的方法, 探讨了全过程工程造价管理在建设项目中的具体应用, 包括前期预算编制、施工期间成本控制以及后期费用核算等环节。研究结果表明, 全过程工程造价管理有助于提升造价信息的透明度, 优化资源配置, 降低不必要的成本浪费, 从而提高项目的整体投资回报率。此外, 本文还分析了实施全过程工程造价管理面临的挑战, 包括数据收集的准确性、相关人员的专业能力及合作默契等, 最后提出了相关的改进措施。本研究对于提升建设项目的经济效益和管理水平具有一定的理论和实践意义。

关键词

全过程工程造价管理; 建设项目; 成本控制

1 引言

随着社会经济与基础设施需求的发展, 建设项目规模和复杂性提升, 对工程项目管理要求更高。在工程造价管理领域, 高效管理成本、避免浪费成为项目顺利推进的核心。全过程工程造价管理作为一种涵盖项目全周期的成本管理策略, 重视预算、成本计划, 也涵盖施工及后期费用核算, 其重要性获广泛认同。但实际应用中, 它面临诸多挑战, 如信息准确性、人员专业技能、团队协作等问题, 影响管理效果与成本控制精度。通过系统分析研究其应用情况, 可明确实际操作中的优缺点, 并提供可操作的改进策略。此研究有助于深化对全过程工程造价管理的理解, 提升建设项目经济

效益与管理水平, 为工程项目管理提供精准实用的策略与措施。

2 全过程工程造价管理概述

2.1 全过程工程造价管理定义及重要性

全过程工程造价管理是为在建设项目的全生命周期之中, 自项目建议书阶段到竣工验收阶段, 针对项目费用实施灵活监管和合理治理的一类体系化方法。

这种管理方式的目标是打通项目从策划、设计、建设到运营的各个环节, 保证项目费用控制的全面性和及时性, 争取让投资收益达到最大效果。整个工程造价管理过程非常重视前期工作, 依靠科学的预算编制, 精确计算出需要的资金量。执行期间, 随时关注和控制每个阶段的实际花费。项目完成后, 对所有费用进行详细的结算和分类整理, 建成完整的成本管理记录, 力求数据清楚准确, 确保以后可以参考

【作者简介】郭文胜(1996-), 男, 中国陕西榆林人, 本科, 助理工程师, 从事工程造价、管理研究。

使用^[1]。随着建设项目越来越复杂,规模越来越大,造价管理面临如何优化资源分配和控制成本的重大问题。普通的造价管理方式往往只关注某个阶段或某个环节的控制,容易造成信息不准确和资源损失,进而影响到整个项目的顺利进行和经济回报。

全过程工程造价管理能做好全面监管和引导,信息化技术合并项目成本数据,项目管理获得高效率判断依据。管理方式能减少项目变更、资源失控外部环境波动带来的成本风险,能提高造价信息透明度以及项目投资回报率。全过程工程造价管理不仅包括项目经济效益,还是建设项目达成高质量的重要基础。它对于资源的恰当配置、资金利用效率的提高,以及可持续发展的规划拥有关键意义,于现代工程项目管理中担负着极其重要的角色。

2.2 建设项目对造价管理的需求

建设项目对造价管理的需求首先要来自项目执行进行中对经济效益最大化的寻求。于复杂的建设项目运作环境里,造价管理不仅作为成本控制的极其重要工具,也作为核心手段。建设项目一般涉及多方主体,包含投资方、设计方、施工方与监理方等,该运作周期比较长,动态因素变动多变,成本风险较高,对于全过程工程造价管理的需求更加迫切。利用严格、准确的造价管理,可以高效减少预算偏差与资金浪费,确保项目资金的妥当运用。建设项目对于造价管理的需求此外体现于对于信息透明度的期待,利用详细的造价数据收集与分析,可以实现各环节的成本可视化,降低管理中的信息不对称问题,并且提升各方的合作效能。

3 全过程工程造价管理应用阶段

3.1 前期预算编制

早期预算编制为全过程工程造价管理中的关键阶段,对项目后续实施拥有基础性作用。于建设项目起步阶段,借助预算编制能够清晰项目的资金需求,构建造价管理的基准依据。预算编制必须参照项目的设计方案、施工工艺、市场行情等因素,恰当预测项目的成本构成及资金分配。不只如此,准确的预算有利于管理项目总投资,并且可以为各环节的造价管理给予参考目标。于编制过程中,应当全面思考风险因素和不确定性,完成费用的储备规划,用以面对可能的变更或突发状况。预算编制依靠详尽的数据收集与分析,借助运用科学的方法和软件工具提升预算的精准性。高质量的预算不但反映了造价管理的专业水平,还为施工阶段的成本控制给予了有力的支持。借助全面详尽的预算编制,可以增进建设项目的经济效益,保障资金使用的合理性与有效性,为达成项目最终目标筑就坚实基础。

3.2 施工期间成本控制

建设期间的成本管理为整个工程造价管理中尤为关键的一部分。制定一套有效的成本约束办法,能够确保工程项目不致超出预算,可以顺利地达成任务。建设过程中,必须

建立一套完善的成本监控体系,及时掌握工程进度和费用的开销情况。运用前沿的信息管理工具,使造价数据的刷新速度提升,核算出来的结果更为精确。加强施工现场的平时管理力度,合理调配工人、材料和机械设备的使用,避免资源发生浪费和多余的开支。借助细致的成本分析和仔细地斟酌,迅速优化施工的详细方案和时间计划,竭力减少成本超额的风险。沟通和团队合作格外关键,务必准时举行协作会议,保障所有相关人员全清楚成本管理的要求,而且协调一致,一起达成任务。做好施工期间的成本管理,可以有效减少项目的总花费,明显提高项目的经济回报和整体执行效果。成本管理还需关注细小环节,比如材料采购要精打细算,机械设备的保养要做到位,确保项目运行稳定,减少额外的费用支出^[2]。

3.3 后期费用核算

末期费用核算在整个工程造价管理中是一个非常重要的阶段,主要目的是对项目建设完工后的实际开支进行详细的计算和总结分析。这个阶段的工作重点包括把所有数据收集整理好,将成本分门别类地归纳,还要对各项费用进行认真审核,确保每一笔支出的真实可信和符合规定。采用非常严格的核算步骤,可以清楚地了解项目成本的组成情况,及时发现隐藏的费用问题,评估资金使用的效果如何。最终的核算结果能为以后项目的成本估算提供重要的参考信息,帮助提升造价管理的精确程度和规范水平,从而助力实现项目整体经济效益达到最好状态。

4 全过程工程造价管理的效益

4.1 提升造价信息的透明度

提高造价信息的透明度是为全过程工程造价管理的关键效益之一。透明的造价信息可以高效降低信息传播期间的偏差和误解,为建设项目的决策给予可信依据。于全过程工程造价管理内,借助健全的信息系统和明了的记录,能达成造价信息的即时监督与共用。该透明化管理模式有益于各个参与方快速取得工程造价相关数据,避免由于信息不对称引起的资源浪费或者资金流失。从项目立项到竣工验收,各阶段的造价信息都能进行即时更新,这对项目预算的合适调整和风险的及时预警具有重大价值^[3]。提升造价信息的透明度可以使各方参与者更信赖互相,降低由于沟通不顺利并且造成的种种矛盾和纠纷,因此使项目的执行效率成为更高级。造价信息的透明化和标准化记录还可以为其它相似工程供给实用的参考与指导,援助工程管理水平持续获取提高。透明度的改进使信息管理流程更流畅,同时也为建设项目的科学决策和长远发展目标奠定了牢固的基础。

4.2 优化资源配置

全过程工程造价管理里面,资源优化配置的目标是采用精确的造价分析和管理方法,来实现资源的合理分配和充分利用,尽量避免资源的浪费和重复投入的情况发生。核心

想法是把项目各个阶段的信息数据和资金流动数据整合起来,制定出严格又合适的资源使用计划方案。预算编制阶段,要全面分析和论证工程的实际需求,防止资源投入过多或者不够用的情况出现。施工阶段,采用灵活的成本控制方法,认真监督资源的使用状况,根据实际情况合理调整分配方式。工程完工后,进行详细的费用核算,确保资源分配既科学又节约。优化资源配置可以减少建设成本的支出,提高建设项目的运营效率水平,推动资源利用走向可持续发展的道路。全流程资源配置优化是实现项目投资价值最大化的关键路径,帮助资源管理和造价控制实现协同发展的目标。

4.3 提高项目投资回报率

工程造价管理全过程,需要依靠精确的成本预测和详尽的监控措施,避免出现资源浪费以及预算超过预期的问题,这样可以提高资金使用的全面效率。加强费用控制和风险预警的详细方法,可以提升项目全面的经济效益水平。使用合理的造价规划和灵活性高的调整策略,推动资源的恰当分配,增强项目的投资回报效果,确保工程能够顺利实施。

5 面临的挑战及改进措施

5.1 数据收集的准确性问题

数据收集的精确性是全过程工程造价管理的关键根本,直接关系到管理质量和决策效率的高低好坏^[4]。数据来源种类多样,采集环境显得烦琐,采集过程不够规范,数据的精确性问题往往成为限制管理效率提升的关键阻碍。造价数据通常包括多方参与,涉及设计单位、施工单位、供应商等多个主体,数据标准和记录方式的不同常导致统计口径不一致,进而影响数据的汇总和比较结果。现场数据的动态性和繁琐性增加了即时记录和监督的困难,尤其在信息化管理水平较差的环境下,人工记录出现错误的情况非常多。

部分历史数据没有系统保存,造成类似项目的成本参考价值受到很大限制。为了让数据收集变得更加准确,可以采取多种有效方法。需要大力改进信息化管理系统的搭建工作,依靠先进的数字化工具来完成数据的快速收集和多方共同操作。还要优化数据录入的具体步骤,制定出统一且标准的记录要求。定期对数据进行核对和质量检查,确保重要信息准确无误。重视人员的专业培训工作,提升所有相关人员的技能水平和责任心,让大家都能更好地参与到数据管理中。以上方法对整个工程造价管理的科学性和工作效率有非常积极地推动作用^[5]。

5.2 专业能力与合作默契的挑战

专业技能和团队配合的难题是整个工程造价管理从头

到尾实施时的最大拦路虎。实际操作中,想要把这种管理方式搞好,必须要有来自不同专业领域的人员一起出力,涵盖了工程设计、财务计算、合同处理等多个方面,对每个人的专业背景和实际能力都有很高的标准。如果有些人的专业知识不够扎实,就很容易在数据分析和做决定时出错。不同部门在配合上的好坏会直接干扰信息传递的速度和决定的落实情况。职责分配和目标方向如果不统一,就会让部门之间的交流变得困难重重,最终影响到整个造价管理的协调性和最后的结果。要解决这样的问题,必须通过加大人员技能培养、制定统一的工作规则、还有增强团队合作能力等方法,采取切实可行的措施来进行优化,确保整个管理体系能够顺畅运转,取得理想的成果,力求每个环节都更加完善,确保管理过程没有明显的漏洞。

5.3 改进措施的提出

关于全过程工程造价管理执行内的挑战,能凭借引进前沿的信息化管理工具,提升数据收集准确性。加强造价管理人员的专业技能培训。建立高效率的跨部门协作机制,提高团队执行力和沟通效率,保证各环节合作完善,达成管理效能最大化。

6 结语

研究运用系统分析方法,详细分解了全过程工程造价管理在建设项目中的应用,涵盖预算、施工成本管理及费用结算等关键步骤。该管理方式可增强造价信息透明度,提高资源利用效率,减少浪费,提升项目投资收益。但实际应用中,存在数据收集不精确、人员技能不足、团队配合不佳等问题,研究针对这些问题给出了具体改进建议。不过实际操作还需考虑政策、市场等外部因素影响。未来可深入研究不同项目的高效实施策略,借助大数据、人工智能等技术解决难题,从宏观层面考察政策作用,为政策制定提供依据,为建设项目造价管理提供更高效策略与工具。

参考文献

- [1] 龚焱.全过程工程造价在建设项目的控制[J].房地产世界,2021,(10):64-66.
- [2] 李哲宇.建设项目全过程工程造价管理[J].四川建材,2022,48(09):206-208.
- [3] 林秀梅.建设项目工程造价的全过程管理[J].建筑设计管理,2022,39(10):37-41.
- [4] 岑立.建设项目全过程工程造价管理和控制[J].中文科技期刊数据库(引文版)工程技术,2022,(06).
- [5] 杨育青.建设项目工程造价全过程管理与控制[J].建筑技术开发,2021,48(06):111-112.

Discussion on the application of value engineering in cost optimization of engineering management

Ke Wang

Shaanxi Yanchang Petroleum Fuxian Power Generation Co., Ltd., Fuxian, Shaanxi, 727500, China

Abstract

Value Engineering (VE), a management methodology focused on enhancing product, project, or service value, has been extensively applied in engineering management, particularly in cost control and optimization. This study examines the application of VE in cost optimization through its conceptual framework, distinctive features, and implementation processes. The research demonstrates that VE effectively identifies potential cost-saving opportunities during engineering design and execution by following three core steps: functional analysis, cost evaluation, and innovative solution generation. Case studies further reveal that VE not only reduces operational costs but also enhances resource allocation efficiency and project management effectiveness. The findings provide both theoretical and practical guidance for engineering managers in making informed decisions regarding cost control and optimization strategies.

Keywords

value engineering; cost optimization; engineering management

价值工程在工程管理成本优化中的应用探讨

王轲

陕西延长石油富县发电有限公司, 中国 · 陕西 富县 727500

摘 要

价值工程作为一种旨在改善产品、项目或服务价值的管理技术,已被广泛应用于工程管理领域,特别是在成本控制和优化方面。本文通过分析价值工程的概念、特点及其在工程管理中的应用过程,探索其在成本优化中的具体实施策略。研究发现,通过功能分析、成本评估和创新解决方案的生成三个步骤,价值工程能有效挖掘工程设计和实施过程中的潜在节约空间,从而实现成本的最优化。此外,通过几个具体案例分析,结果表明价值工程不仅帮助企业降低了成本,还促进了资源的合理配置和项目管理效率的提升。本研究的结论可为工程项目管理者在成本控制和优化决策中提供理论与实践的指导。

关键词

价值工程; 成本优化; 工程管理

1 引言

在现今工程管理领域,成本控制与优化是企业 and 项目管理者关注的核心。因资源稀缺及追求经济效益,如何高效降低成本并维持或提升项目价值,是关键问题。价值工程作为一种科学管理技术,旨在使产品或服务功能达完美状态的同时,实现成本最佳化。自 1947 年 Lawrence D. Miles 提出价值工程概念后,该方法广泛应用于多个领域,在工程管理中成效显著。本文研究了价值工程在工程管理中降低成本的具体做法,分析了其核心思想、基本特点与操作流程。通过功能分析、成本评估及创新解决方案,价值工程既重视缩减成本,也努力提升项目整体价值。大量案例表明,价值工程在分析成本效益和合理分配资源上作用明显。研究聚焦

执行策略与操作步骤,旨在归纳规范方法,助力管理者有效管理成本。通过具体案例分析,证实其实际效果,为今后工程管理中压低成本提供恰当经验与方向指引,解决成本控制难题。

2 价值工程的基本概念及特点

2.1 价值工程的定义

价值工程 Value Engineering, 简称 VE 是为一种用提升目标对象价值作为中心的体系化管理技术。其中心理念是借助针对目标对象必要功能的体系分析,尽力用最低的全生命周期成本达成目标对象预定功能,因此在确保质量和性能不被干扰的前提下,改善资源配置和成本支出。价值工程的定义中,价值得到表达为功能与成本之中的比值,也就是价值 = 功能 / 成本,这一公式阐明了增强价值的两条关键途径,一是增强功能,二是减少成本^[1]。

价值工程集中于功能的达成,用准确剖析各项功能的

【作者简介】王轲(1997-),男,中国陕西铜川人,本科,助理工程师,从事工程管理研究。

必要性和重要性作为方法,去除不必要功能和过分设计,借助指引革新思维和改善方法以完善设计和实施流程。价值工程可以在资源受限的条件下,寻求经济性和实用性兼具的整体最优方案,对于项目全生命周期的成本控制与完善拥有重要引领意义。这一定义为价值工程的实践运用确立了理论基础,亦保证了其在工程管理领域中普遍运用的管理价值。

2.2 主要特点及实施原则

价值工程的主要特点包含系统性、创新性、用功能为核心以及用价值为目标。系统性体现在其借助全局视角对项目开展综合分析,突出整体优化而不是局部改进。创新性反映在其借助创造性思维探寻新的解决方案,用达成功能的改进或成本的降低。用功能为核心规定在成本优化中集中功能目标,借助功能分析清晰必需功能与非必要功能,从而更为精准地调配资源。用价值为目标则着重功能价值最大化与成本最小化的平衡,意在提高项目的综合效益。实施价值工程必须遵守科学性、团队协作以及动态调整等等原则^[2]。科学性要求必须严格按照严谨的方法来进行,利用可靠的数据开展相关研究工作。团队合作非常看重不同学科专家的加入和交流。动态调整的意思是针对项目进展情况进行改进,适应实际环境的变化。以上特点和基本原则共同确保价值工程在工程管理成本控制中发挥实用作用。

2.3 价值工程的核心方法论

价值工程的核心方法论包括以功能为导向的分析、全面的成本控制以及创新性解决方案的生成。这些方法通过优化功能与成本的关系,促进工程项目价值的最大化和资源利用的效率提升。

3 成本优化中价值工程的角色

3.1 价值工程与成本管理的关系

价值工程成为一种系统化、合理化的管理方法,于成本管理中担当着极其关键的角色。其核心在于借助功能解析以改进资源分配,用达成最少成本环境中的最高价值。成本管理的核心在于对于成本的高效管理与分配,并且价值工程借助详尽解析产品或项目的功能需求,辨别多余的成本损耗,为成本管理给予了合理依据。价值工程突出成本与功能的协调,防止仅仅寻求便宜成本引发功能的减少,因此提高全部效率与质量。在工程管理中,价值工程可以指导决策者自功能实现角度着手,采用系统化的思路研究成本与收益之中的关系,保证资源利用的合宜性。借助成本分解与评价,价值工程为发掘潜在成本节约机会供给了平台,明显提高了成本管理的针对性与有效性^[3]。价值工程与成本管理不只在理论逻辑上极度契合,亦在实践操作中互为补充,对达成工程项目的成本优化拥有战略意义。

3.2 成本优化的主要方法

成本优化为工程管理中的核心目标,其方法多样,包含了技术、经济与管理等多个领域。主要方法囊括目标成本

法、生命周期成本分析和基于活动的成本管理等。目标成本法借助制定清晰的成本控制目标,迫使相关环节开展成本缩减,达成资源配置的合理化^[4]。生命周期成本分析关注于工程全过程,自设计、建设至使用和维护,评估长期成本变化,用达成综合成本的最少化。基于活动的成本管理用活动为核算对象,辨别高成本消耗环节,改进资源分配,从而提升项目效率。在这些方法中,价值工程依靠其功能成本分析的独特性,给予了成本优化有力工具,有利于保证成本优化的严谨性与决策的合理性。

3.3 价值工程在成本优化中的应用框架

价值工程于成本优化中的应用框架借助系统分析达成对于资源配置效率的彻底提高,且于工程管理的全周期内施展功效。该框架涵盖目标制定、功能分析、成本与功能关系评定以及方案改善等关键步骤。依据项目详细需求与约束条件,辨别关键功能,且面向功能目标明确适当的最少成本,因此改善资源投入。借助多学科合作与创新手段,创造拥有实用性与高性能的解决方案,用协调功能达成与成本管理。于这一过程中,保障数据灵活调节和决策依据的严谨性,因此确保最佳价值的达成。

4 价值工程在工程管理中的实施策略

4.1 功能分析的方法与实施

功能分析为价值工程执行之中的关键步骤,意在详尽探讨工程项目中各组成部分的功能特性,用确认功能的重要性且发掘优化潜力。功能分析的重点取决清楚项目目标和各功能单元的具体作用,使用条理化的方法辨识功能、归类功能并评定其价值。借助构建功能结构图,能够明了地展现系统内部各功能之中的关系,发现冗余或无效的部分,给更深入优化给予依据。在执行过程中,必须整合考量功能的重要性与成本之中的协调。一般运用功能分析法,也就是将功能分成基本功能和辅助功能,对功能的逻辑性与关联性开展审定。

运用功能成本矩阵,针对每一功能单元的成本分配开展测算,用辨别成本资源分配不恰当的环节。于分析结果的根基之上,对于成本偏高或者功能重叠的部分建议改进建议。功能分析的实施不但可以提高资源利用效率,并且给后期创造革新解决方案供给严谨依据,为工程管理的成本改进确立关键基础。高效的功能分析有利于企业在达成项目目标的管理成本,达成更优的整体经济效益。

4.2 成本评估的步骤与技术

成本评估为价值工程于工程管理中达成成本改善的关键环节,借助严谨的方法辨别和研究各项功能的成本为改善给予依据。其步骤涵盖制定成本目标、拆分功能成本、研究组成要素和对比效益。成本目标的制定必须整合项目整体要求及资源配置,保证合宜性和实用性。功能成本拆分就借助系统梳理,把总成本分配到各功能单元,因此清晰关键成本

点。研究组成要素时,应用数据分析技术考量各部分成本针对整体的作用,辨别大成本但小价值的环节以开展改善。效益对比借助衡量成本与功能价值之中的关系,挑选出拥有可能提升机会的模块,以辅助后期革新设计或者工艺提升。

4.3 创新解决方案的生成

革新解决方案的生成是为价值工程执行之中的核心环节,借助群策群力和多领域合作,提升方案的独特性和实用性。借助对工程项目功能的详尽探讨,融合成本改进需要,研制出拥有优价值且成本适当的解决方案。运用脑力激荡法、TRIZ 理论等工具,达成资源分配完善和设计完善,从而促进工程项目在质量、成本和效率等方面的整体增强。革新解决方案的生成不只重视技术革新,还突出可持续进步理念,用持久价值极致化。

5 价值工程应用的效果评估

5.1 成本控制与节约的实例

价值工程在工程管理中的应用可以明显提高成本控制效果,并达成节省目标。自实践而言,其核心在于借助功能分析辨别各项工程设计和施工环节中的非必要成本,并借助技术优化或设计改进减少整体费用。某住宅建设项目中借助价值工程的应用,工程团队对设计方案中的装饰材料实施了功能分析,察觉部分高成本材料在实际应用中没能达成预期功能,并且对整体工程价值作用较小。不但达到了设计需求,而且实现了材料成本的明显减少。另一项市政工程的道路建设中,施工团队运用价值工程技术改进了路基结构,借助整体考量不同施工方案的功能和成本,挑选了性价比更优的一种方案。该项目节约了接近 20% 的预算。价值工程的执行还促进了工程方案改进,使资源配置更加妥当^[9]。这些实践案例显示,价值工程可以高效发掘潜在节约空间,规避多余的成本支出,为工程管理给予了关键的经济效益保障。

5.2 资源配置优化与项目效率提升的案例分析

通过分析资源配置优化和项目效率提升的实际案例,能够证明价值工程对于工程管理的实用价值。某个大型基础设施建设项目中,专门使用了价值工程的方法来改进资源的分配方式,同时提升整个项目的运行效率。经过对项目各个功能部分的详细研究,发现了资源重复分配以及设计多余的不少问题。为了解决这些具体问题,提出了一些创新的解决办法,包括整合资源和简化工作流程,从而降低了物料的浪费,改进了施工的具体步骤。实施这些办法之后,通过数据对比发现,项目总成本节约了 15% 左右,施工所需时间也缩短了 10%。整个项目的效率得到了很大改进,资源分配

的合理程度也有了提升,这样既减少了资源的浪费,也让各个部门之间的合作变得更加顺畅,效率更高。这个案例非常清楚地展现出价值工程在优化资源方面的独特好处,对于提升项目管理的科学水平和经济效益起到了非常重要的作用。

5.3 对企业管理实践的影响评价

价值工程对企业管理实践的影响主要表现在成本控制、资源配置和效率提高这些关键方面。利用功能分析和成本评估的方法,可以让决策过程变得更加科学合理,从而有效减少资源浪费,同时让项目的执行能力变得更强。工程实践当中运用价值工程,能够推动管理方式的创新,让经济效益变得更好,组织竞争力也得到增强,同时为企业的长期稳定发展提供有力的技术支持和可靠保障。

6 结语

研究聚焦价值工程在工程管理中改善成本的作用,清晰阐述了其核心理念、执行步骤与具体方案,并以真实案例展现其在成本管理和效果提升上的实际影响。价值工程通过功能深入研究、成本仔细评估及创新解决方案,能有效助力项目减少开支、实现经济效益最大化,使资源分配更科学合理,提升项目管理整体效率,确保项目按时达成目标。研究虽为工程管理提供了实用指导意见与原理基础,但也存在不足。执行价值工程需较强专业技能和完善管理方法,面对不同项目和环境,实际应用效果与适用程度有差异。成本改进与时间、质量等方面关联紧密,如何妥善规划这些方面,还需详尽研究和实际操作探究。后续研究可拓宽行业范围,涵盖各类大小项目,深入探究价值工程在不同场景的运用成果,寻找提升其适配范围和操作实用性的方法。同时,可深入研究价值工程与现代信息技术的融合,如利用大数据、人工智能等前沿技术,探寻更快捷、精准的成本改进方式与实施方案,丰富其在工程管理中的运用讨论,为实际操作带来关键价值与深远影响。

参考文献

- [1] 李霞.价值工程在公路工程成本控制中的应用[J].运输经理世界,2022,(13):46-48.
- [2] 陆帆.基于价值工程的建筑工程成本优化与价值提升研究[J].中文科技期刊数据库(全文版)经济管理,2023,(06):0008-0011.
- [3] 高坚张晏荣.价值工程在建筑工程成本管理方面的应用[J].中国科技期刊数据库 工业A,2023,(05):0086-0089.
- [4] 王克诚.价值工程在项目成本管理中的应用[J].油气田地面工程,2023,42(07):11-14.
- [5] 兰文臣.价值工程在公建类项目成本优化中的应用[J].价值工程,2023,42(01):143-145.