

现代工程学

Modern Engineering



ART AND DESIGN PRESS INC.

(626 810 4480)

119 S Atlantic Blvd, Suite 300D

Monterey Park, CA 91754

Copyright © 2025 by ART AND DESIGN PRESS INC.

Complimentary Copy



Editorial Board Member

Xiaoli He

Zhejiang Tongfang Engineering Management Consulting Co., Ltd.

Xiaoshi Yan

Chifeng Saige Architectural Planning and Design Co., Ltd.

Jiaming Li

North CMA Technology Co.,Ltd.

Xiao Yu

Chongqing Zongheng Engineering Design Co., Ltd.

现代工程学

Modern Engineering

第2卷 第5期 2025年5月刊

主管 ART AND DESIGN PRESS INC.

主办 ART AND DESIGN PRESS INC.

编辑 《现代工程学》编辑部

ISSN(O): 2996-6981

ISSN(P): 2996-6973

地址: 119 S Atlantic Blvd, Suite 300D Monterey
Park, CA 91754

网址: <https://www.artdesignnp.com>

本刊说明:

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

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



建筑工程 | ARCHITECTURAL ENGINEERING

- 001 地铁站运营安全管理与风险控制策略研究 耿连庆
Research on Operational Safety Management and Risk Control Strategies for Subway Stations Geng Lianqing
- 004 新背景下建筑工程施工技术分析及其项目管理探讨 李帅
Analysis of Construction Technology in Building Engineering and Discussion on Project Management under the New Background Li Shuai
- 007 建筑工程管理中的房屋建筑工程质量控制技术 刘铭丰
Quality Control Technology of Housing Construction in Engineering Construction Management Liu Mingfeng
- 010 探究工程监理视角下建筑市政工程质量保障体系构建 房军
Probe into the Construction of Quality Assurance System of Building Municipal Engineering from the Perspective of Engineering Supervision Fang Jun
- 013 老龄社区洪涝灾害应急疏散时间窗模型研究——以平江县某小区为例 文拙, 田兆君, 张术琳, 鲁义
Research on the Emergency Evacuation Time Window Model for Aging Communities during Flood Disasters: A Case Study of a Residential Community in Pingjiang County Wen Zhuo, Tian Zhaojun, Zhang Shulin, Lu Yi
- 016 尾矿库回采方案安全设计及管理 闫鹏
Safety Design and Management of Tailings Pond Recovery Schemes Yan Peng
- 020 AI时代背景下的建设工程法规学习 张旭, 张辅霞, 朱琳, 方子然
Study of Construction Project Regulations in the Context of the AI Era Zhang Xu, Zhang Fuxia, Zhu Lin, Fang Ziran
- 025 影响建筑工程管理的主要因素与优化措施探析 周志明
Analysis of the Main Factors Affecting Construction Project Management and Optimization Measures Zhou Zhiming
- 028 复杂地形下道路工程设计的安全性及经济性研究 李旭
Research on the Safety and Economy of Road Engineering Design in Complex Terrain Li Xu

机械工程 | MECHANICAL ENGINEERING

- 031 超设计使用年限的压力容器检验及安全评估 李伟光
Inspection and Safety Assessment of Pressure Vessels Exceeding Their Design Service Life Li Weiguang
- 034 三相分离器的故障与处理措施研究 杨密, 刘杨, 许雯婷, 袁国钧
Research on Fault and Treatment Measures of Three-phase Separator Yang Mi, Liu Yang, Xu Wenting, Yuan Guojun
- 037 船舶设备故障预测和维护管理方法分析 梁军
Analysis of Fault Prediction and Maintenance Management Methods for Marine Equipment Liang Jun
- 041 船舶耐波性提升措施对机舱设备可靠性的影响研究 马佳雪, 陈小月, 兰子坤, 王天茨
Study on the Influence of Ship's Wave Resistance Improvement Measures on the Reliability of Engine Room Equipment Ma Jiaxue, Chen Xiaoyue, Lan Zikun, Wang Tianci

| | | |
|-----|---|--|
| 044 | 基于深度学习的特种设备裂纹超声检测技术研究 Research on Ultrasonic Crack Detection Technology for Special Equipment Based on Deep Learning | 朱涛平, 蔡福磊 Zhu Taoping, Cai Fulei |
| 047 | 厨余垃圾高负荷干式厌氧消化工艺控制研究 Study on Control of High Load Dry Anaerobic Digestion Process of Kitchen Waste | 邹锦林, 王艳明, 张栋, 石广甫 Zou Jinlin, Wang Yanming, Zhang Dong, Shi Guangfu |
| 051 | 转炉炼钢的自动化控制技术分析 Analysis of Automatic Control Technology for Converter Steelmaking | 张洪来 Zhang Honglai |

能源工程 | ENERGY ENGINEERING

| | | |
|-----|---|--|
| 054 | 常压油气储罐在役检验技术与应用研究 Research on In-Service Inspection Technology and Application of Atmospheric Oil and Gas Storage Tanks | 韩西成, 张锐, 王智 Han Xicheng, Zhang Rui, Wang Zhi |
| 058 | 绿色节能理念下的暖通工程水源热泵技术应用 Application of Water Source Heat Pump Technology in HVAC Engineering under the Concept of Green Energy Conservation | 陈策 Chen Ce |
| 061 | 原子吸收光谱仪在地下水中铜、锌检测中的干扰因素及对策 Interference Factors and Countermeasures in the Detection of Copper and Zinc in Groundwater Using Atomic Absorption Spectrometry | 邓富强 Deng Fuqiang |
| 064 | 煤炭企业加快推进安全治理体系和治理能力现代化的探索与实践 Exploration and Practice by Coal Enterprises to Accelerate the Modernization of Their Safety Governance Systems and Governance Capabilities | 郭伟伟 Guo Weiwei |
| 068 | 锑对铅酸蓄电池端子强度的影响 The Influence of Antimony on the Terminal Strength of Lead-Acid Batteries | 刘洪海, 李从根, 许乃平, 林贤清, 魏晓磊, 李帅 Liu Honghai, Li Conggen, Xu Naiping, Lin Xianqing, Wei Xiaolei, Li Shuai |
| 070 | 基于改进 ADMM-GS 的配电网与微电网双层协同优化调度研究 Research on Double-Layer Collaborative Optimal Scheduling of Distribution Network and Microgrid Based on Improved ADMM-GS | 史黎阳, 高玟生, 张石刚, 武家辉 Shi Liyang, Gao Jiusheng, Zhang Shigang, Wu Jiahui |
| 073 | 浅谈危化品使用安全管理 A Brief Discussion on the Safety Management of Hazardous Chemicals Use | 王文佳, 吴帅锋, 陈长营 Wang Wenjia, Wu Shuaifeng, Chen Changying |
| 076 | 交流输变电工程建设期间环境管理监督与竣工环境保护验收调查工作技术研究 Technical Research on Environmental Management Supervision and Completion Environmental Protection Acceptance Investigation During the Construction Period of AC Transmission and Transformation Projects | 吴益舟 Wu Yizhou |
| 080 | 防止锅炉受热面结焦技术措施 Technical Measures to Prevent Coking on the Heating Surfaces of Boilers | 詹冀安 Zhan Ji'an |
| 083 | 石壕煤矿覆岩隔离注浆充填减沉技术研究与应用 Research and Application of Grouting Filling and Depressions Reduction Technology for Rock Cover Isolation in Shihao Coal Mine | 张书勤 Zhang Shuqin |
| 086 | 低速无感可升降自供电减速带研究 Research on Low-Speed, Non-Intrusive, Height-Adjustable Self-Powered Speed Bumps | 张真银, 王昭宁, 王梦涵, 陈宇轩, 高兴亚, 何永明 Zhang Zhenyin, Wang Zhaoning, Wang Menghan, Chen Yuxuan, Gao Xingya, He Yongming |
| 089 | 浅谈热动力设备金属的腐蚀与保护探析构建 A Brief Discussion on the Analysis and Construction of Corrosion and Protection of Metals in Thermal Power Equipment | 孙道坤 Sun Daokun |

信息工程 | INFORMATION ENGINEERING

| | | |
|-----|---|---|
| 092 | 地下水监测设备运行维护成本核算与管理模式创新 Cost Accounting and Management Model Innovation for the Operation and Maintenance of Groundwater Monitoring Equipment | 陈海涛, 刘学, 任广智 Chen Haitao, Liu Xue, Ren Guangzhi |
| 095 | 基于物联网与智能控制技术的压风机房无人值守系统研究 Research on Unattended Compressor System Based on Internet of Things and Intelligent Control | 赵立龙 Zhao Lilong |
| 098 | 火电厂边缘计算实时数据采集与分析平台 Real-Time Data Acquisition and Analysis Platform for Edge Computing in Thermal Power Plant | 马战南, 张宝宏, 侯伟 Ma Zhennan, Zhang Baohong, Hou Wei |
| 101 | 深度学习驱动的污水处理厂出水水质预测与工艺优化 Deep Learning-Driven Prediction of Effluent Quality and Process Optimization in Wastewater Treatment Plants | 程果 Cheng Guo |
| 105 | 区域、文化、宇宙观——大理地区坝子空间研究层次探讨 Region, Culture and Cosmology — Discussion on the Research Level of Bazi Space in Dali area | 张子恒, 张馨蕾, 朱瑛琦, 陈虹羽 Zhang Ziheng, Zhang Xinlei, Zhu Yingqi, Chen Hongyu |
| 108 | 面向应急救援的无人机多模态数据知识图谱构建与智能决策系统 Construction of a UAV Multimodal Data Knowledge Graph and Intelligent Decision-Making System for Emergency Rescue | 董思屏, 钮芮楠, 刘轩, 朱亚婷, 郑庆阳, 魏青 Dong Siping, Niu Ruinan, Liu Xuan, Zhu Yating, Zheng Qingyang, Wei Qing |
| 115 | 时空大数据与人工智能助力地学领域复杂系统研究 Advancing Geoscience Complex-Systems Research with Spatiotemporal Big Data and AI | 于龙龙, 李根 Yu Longlong, Li Gen |
| 118 | 基于边缘计算对驾驶人状态监测系统的优化设计 Optimal Design of a Driver Condition Monitoring System Based on Edge Computing | 刘若涵, 李战东, 刘思源, 韦周慧, 赵安阳 Liu Ruohan, Li Zhandong, Liu Siyuan, Wei Zhouhui, Zhao Anyang |

地铁车站运营安全管理与风险控制策略研究

耿连庆

身份证号: 12010919920325351X

DOI:10.61369/ME.2025050006

摘 要： 地铁车站运营安全管理是保障乘客生命安全、提高运营效率的重要措施。通过分析车站的运营风险和安全隐患，结合实际运营经验，提出了一系列风险控制策略，包括完善的安全监管机制、智能化监控系统的应用、应急预案的优化等。这些策略的实施能有效识别潜在的安全风险，减少事故发生的概率，提高车站运营的稳定性和安全性。同时，注重员工安全意识的提升和安全文化的建设，进一步增强整个车站的安全防控能力。通过上述措施，能够为地铁运营提供更加科学、精准的安全保障，确保乘客和员工的安全。

关 键 词： 地铁车站；安全管理；风险控制；智能监控；应急预案

Research on Operational Safety Management and Risk Control Strategies for Subway Stations

Geng Lianqing

ID: 12010919920325351X

Abstract： Operational safety management in subway stations is a crucial measure for ensuring passenger life safety and improving operational efficiency. By analyzing operational risks and potential safety hazards in stations and integrating practical operational experience, a series of risk control strategies have been proposed. These include the establishment of a comprehensive safety supervision mechanism, the application of intelligent monitoring systems, and the optimization of emergency response plans. The implementation of these strategies can effectively identify potential safety risks, reduce the likelihood of accidents, and enhance the stability and safety of station operations. Additionally, emphasis is placed on improving employees' safety awareness and fostering a safety-oriented culture to further strengthen the overall safety prevention and control capabilities of the station. Through these measures, more scientific and precise safety guarantees can be provided for subway operations, ensuring the safety of both passengers and staff.

Keywords： subway station; safety management; risk control; intelligent monitoring; emergency plan

引言

地铁作为现代城市交通的重要组成部分，其安全运营直接关系到城市公共安全和交通效率。随着地铁网络的不断扩展，车站的运营安全问题日益突出，如何有效识别并控制运营风险，已成为亟待解决的课题。近年来，智能化监控技术和先进的应急管理机制为地铁安全管理提供了新的思路。通过深入分析地铁车站的安全管理现状和潜在风险，探索出一套行之有效的风险控制策略，不仅有助于提升运营安全性，也能为其他城市交通系统提供有益借鉴。

一、地铁车站运营安全管理现状分析

（一）运营安全管理体系现状

地铁车站的运营安全管理体系主要包括安全组织架构、管理流程和安全措施。随着地铁建设规模的不断扩大，运营安全管理体系逐步完善，但仍面临一些管理盲区。在国内，主要城市的地铁公司普遍已建立了专门的安全管理部门，配备专业的安全管理人员，并制定了相应的安全管理规程。根据2019年国内地铁行业统计数据，80%以上的地铁公司采用了综合安全管理模式，即

结合运营、技术、设备等多个领域的管理进行全面安全控制。然而，部分城市地铁车站的安全管理制度仍存在较大的差异，尤其是对新兴线路或新建车站的安全管理尚未完全落实，安全管理体系在各地的适应性和执行力存在差距。

在管理流程上，地铁公司通常设立了从站长到各岗位职员层级管理制度，确保安全信息能够及时反馈并迅速响应。然而，现实中仍存在一些管理漏洞，如岗位责任不明确，部分安全流程执行不规范等问题。尤其在突发事件的应急响应和风险监控上，部分车站尚缺乏细化的应急预案和标准化操作，造成了应急处理

反应迟缓，影响了安全管理的有效性。

（二）主要安全管理问题与挑战

地铁车站安全管理面临的主要问题之一是设备设施的老化与故障风险。随着地铁线路运营年限的增加，设备设施的老化逐渐成为影响安全的重要因素。其中，电力、供水、通风等关键设施出现故障的频率明显增高。设备故障和技术性问题不仅影响乘客的正常出行，还可能带来较大的安全隐患^[1]。

此外，车站人员操作不当或人为失误也时常引发安全事故。约30%的安全事故源于操作人员的不当行为，如站务人员未按规范操作自动售票机、门禁系统出现失误等。这些问题不仅表现在日常运营中，还体现在应急管理和安全培训方面，特别是新员工的岗前培训及对新技术、新设备的适应能力不足，造成了部分隐患未能及时发现并处理。

（三）车站安全文化建设现状

地铁车站的安全文化建设对于提升员工安全意识和社会公众的安全感至关重要。目前，许多地铁公司已逐步意识到安全文化建设的重要性，并在车站运营中融入安全文化理念。例如，通过定期开展安全教育培训、进行安全文化宣传活动，强化员工和乘客的安全意识。然而，在部分城市地铁车站，安全文化建设的落实仍存在欠缺，特别是在员工的日常行为规范和乘客的安全意识上，依然存在较大提升空间^[2]。

根据2018年到2020年的相关调查，约有35%的地铁乘客未能充分理解和遵守地铁安全规定，导致安全事件的发生。为了弥补这一缺陷，部分车站已经引入了智能安全引导系统，如智能显示屏、语音提示等，提高乘客的安全意识。同时，加强员工的安全培训和对车站安全行为的监管，推动形成以“安全为本”的整体安全文化，逐渐成为地铁运营的重要内容之一。

二、地铁车站常见风险类型与隐患识别

（一）设备故障与技术性风险

地铁车站的设备设施，包括电力系统、通风系统、供水系统、轨道设备和自动售票机等，一旦发生故障，将直接影响车站的正常运营及乘客的安全。设备故障的发生率通常与设备的使用年限、维护保养程度及技术更新密切相关。数据显示，2019年至2021年，某市地铁车站的设备故障率年均增长3%，尤其是电力系统和供水系统的故障发生较为频繁。由于设备技术的不断更新换代，老旧设备在技术支持和备件供应方面逐渐面临困境，故障难以及时排除，这增加了地铁运营中的技术性风险。此外，自动化设备和信息系统的高度集成，使得系统间的技术依赖性增加，任何一环节的故障都可能引发连锁反应，导致整个车站的运营出现安全隐患^[3]。

（二）人为失误与操作风险

人为失误是地铁车站常见的一类风险，尤其是在高压环境下，操作人员的疏忽或失误可能导致较为严重的安全事故。例如，工作人员未能及时关闭电梯门、未按规定检查信号设备等，都可能造成事故发生。根据2019年的统计，地铁运营中的人为失误占到了全部安全事件的40%以上。车站人员在紧急情况下的反应不及时或错误决策，也容易加剧事故的后果。此类风险不仅存在于地面工作人员，还包括驾驶员和后台操作人员等不同岗位。尤其是在紧急事件处理时，操作人员的决策和应急反应能力

直接决定了安全事故的处理效果。

（三）外部环境因素引发的风险

地铁车站的运营安全同样会受到外部环境因素的影响，包括自然灾害、天气变化、地质条件、外部恐怖活动等。地震、洪水、暴雨等自然灾害可能对地铁站的结构安全和设备设施造成直接破坏，增加了外部风险的复杂性。例如，2018年某城市地铁车站在暴雨期间因排水系统不畅，造成积水积压并影响设备运转，导致车站停运数小时，造成经济损失的同时，也对乘客安全造成潜在威胁。另一个外部风险来源是恐怖活动和安全事件的威胁，尤其是在大城市的地铁系统中，恶意破坏、恐怖袭击等可能导致安全事故的发生，给车站的安全管理带来了前所未有的挑战。防范外部环境因素的影响需要地铁公司制定完善的应急预案，并建立与相关部门的紧密合作机制^[4]。

（四）安全隐患的检测与评估方法

有效的安全隐患检测和评估是确保地铁车站安全运营的关键。常见的隐患检测方法包括定期设备检查、系统监控、实时数据分析和事故案例复盘等。随着科技的进步，智能化技术在安全隐患检测中得到了广泛应用，传感器、无人机、智能监控系统等技术可以实时监测车站设备和环境状况，及时发现潜在的风险点。通过大数据分析，可以对设备运行情况进行精准预测，提前发现潜在故障^[5]。例如，电力设备的热成像技术已广泛应用于电气设备的隐患检测，可以通过温度变化监测设备是否存在过热现象，减少火灾等事故的发生。此外，风险评估模型的应用也能够有效识别和量化安全隐患的风险程度，通过对潜在危险的评分和评估，为安全决策提供科学依据。

三、智能化监控系统在运营安全中的应用

（一）智能监控技术发展趋势

智能监控技术在地铁车站的应用起初主要集中在视频监控领域，随着人工智能（AI）、大数据和物联网技术的不断发展，智能监控逐渐涵盖了设备监控、环境监测以及安全预警等多个领域。早期的监控系统主要依赖人工分析视频，处理效率低且响应时间长。近年来，AI技术在视频分析中的应用显著提高了监控效率。2020年，某地铁公司引入了基于AI的实时视频分析系统，通过人脸识别、行为分析等技术，实现了对车站内各类安全隐患的自动识别和预警。此外，随着5G技术的推广，车站监控系统的带宽和响应速度大幅提升，传输延迟降低至毫秒级别，从而提高了监控系统的实时性和准确性。

未来，智能监控技术将向更加集成化、自动化的方向发展。例如，AI算法将不断进化，能够通过对车站历史数据的深度学习，提前预测设备故障、运营风险等情况。结合云计算平台，监控系统将不再局限于单一的车站，而是实现跨区域、跨系统的综合管理，为大规模地铁网络的安全保障提供技术支持。

（二）智能监控在安全管理中的功能

智能监控系统在地铁车站的安全管理中发挥着多重功能。首先，监控系统可以实时监测车站内外的关键区域，如进出站口、票务区、设备间等，确保人员和设施的安全。通过集成的高精度传感器和视频分析系统，能够即时发现异常行为，如非法闯入、设备故障等，系统会自动发出警报并推送至管理人员的终端设

备,实现远程实时监控与处理^[6]。

其次,智能监控系统能够与其他安全系统进行联动,形成综合预警机制。比如,当监控系统识别到设备故障或危险环境时,系统可自动调度其他安全设施,如紧急广播、自动门控制、火灾报警系统等,及时采取措施降低事故发生的风险。这种联动功能不仅提升了车站的安全防范能力,还在很大程度上提高了乘客的安全保障感^[7]。

（三）智能化系统提升应急响应能力

智能化监控系统对地铁车站应急响应能力的提升起到了关键作用。传统应急响应依赖于人工判断和现场指挥,容易受到信息传递不畅和人员分散等因素的影响,响应时间长,处理效率低。而智能监控系统则通过自动化决策和实时数据分析,极大缩短了应急响应时间。通过与车站内外的各种感知系统进行实时数据共享,系统能够迅速获取事故现场的具体情况,从而支持决策者快速做出反应。

此外,智能监控系统还可通过模拟演练、数据分析等手段,优化应急预案。通过对历史数据的分析,系统能够评估各类突发事件的发生概率,并根据不同情况制定相应的应急措施。随着 AI 技术的不断发展,未来的智能化应急响应系统将更加精确,能够实现“预测-预警-响应”的闭环管理,从而显著提高地铁车站的应急响应能力^[8]。

四、地铁车站风险控制策略与应急管理优化

（一）风险评估与控制模型

地铁车站的风险评估与控制是保障安全运营的核心。通过构建科学的风险评估模型,能够系统地识别潜在的风险源,评估其可能性和危害程度,从而制定有针对性的控制策略。常见的风险评估模型包括故障树分析(FTA)、事件树分析(ETA)和模糊综合评判法等。在实际应用中,通过结合历史事故数据与实时监控信息,风险模型能够动态评估车站内外的各类风险。例如,基于故障树分析方法,可以详细分析设备故障的根源,并计算发生故障的概率和其可能引发的后果,从而针对性地制定维护和预防措施。模型的优化需要根据车站运营特点和技术发展动态调整,确保风险评估能够实时反映车站的运行状态。

（二）安全监管机制的完善

为了有效控制地铁车站的安全风险,完善的安全监管机制至关重要。通过建立多层次的安全监管体系,确保每一项安全工作都能够落实到具体责任人,并且能够实时进行监督和反馈。在实际操作中,地铁公司通常设有专门的安全管理部门,负责全站的

安全巡查和隐患排查^[9]。此外,随着信息化技术的应用,许多地铁车站已引入了智能化监管系统,实现了对设备、人员和环境的全天候监控。例如,实时监控系统能够在发生安全事件时自动报警,提醒相关人员及时处理。通过建立以风险控制为核心的动态监管模式,能够实现安全问题的快速响应和精准解决,提高了车站整体安全管理水平。

（三）应急预案的优化与演练

应急预案的优化是确保车站应对突发事件时能够迅速高效响应的关键。通过定期对应急预案进行评审与调整,确保其适应不同类型的紧急情况,例如设备故障、自然灾害、恐怖袭击等。优化过程中,应对不同事件的应急响应流程、资源调配以及人员分工等方面进行细化,确保每个环节能够协同作战。为了提高预案的实效性,还需要进行定期的应急演练,确保车站员工能够熟练掌握应急响应的具体操作。演练的内容应包括常见突发事件的模拟,如火灾、停运等,结合实际情况开展桌面演习与现场演练。通过这些演练,不仅能够检验应急预案的可行性,还能够发现其中的不足并加以改进,提高车站面对突发事件时的处理能力^[10]。

（四）员工安全意识与培训体系建设

员工安全意识和培训体系是提升地铁车站安全水平的重要保障。首先,建立完善的安全培训体系,确保员工从入职到岗后,能系统学习与安全相关的知识和技能。这不仅包括操作规程、紧急处理流程等基本内容,还应包括对新技术和设备的掌握。根据岗位的不同,培训内容应具有针对性。例如,操作员需要掌握设备的使用和故障处理,安保人员则要熟悉突发事件的处置方法。此外,为了保持员工的安全意识,应定期组织安全知识竞赛、培训班和安全文化活动,提升员工对安全管理的重视程度。通过这种持续性的培训与安全意识培养,能够使员工在实际工作中迅速应对各种潜在风险,从而有效减少因人为疏忽而导致的安全事故。

五、结语

地铁车站的安全管理关系到城市交通的顺畅与公众安全,面对复杂多变的风险环境,必须采取综合性的风险控制策略。通过智能化监控系统的应用、完善的安全监管机制、应急预案的优化以及员工安全意识的持续提升,可以有效防范和应对各类潜在风险,确保车站运营的安全性与稳定性。随着技术的不断发展和管理模式的优化,未来地铁车站将更加高效地应对各类突发事件,提升整体安全管理水平,为市民提供更加安全可靠的出行环境。

参考文献

- [1] 陈芷欣. 基于区块链技术的地铁运营安全隐患评估与预警 [D]. 武汉科技大学, 2024.DOI:10.27380/d.cnki.gwkju.2024.000151.
- [2] 罗青. 地铁隧道运营安全风险辨识及评估方法研究 [D]. 华东交通大学, 2024.DOI:10.27147/d.cnki.ghdju.2024.000709.
- [3] 郑天龙. 地铁运营期车站维保作业风险评估模型与管控策略研究 [D]. 大连海事大学, 2023.DOI:10.26989/d.cnki.gdlhu.2023.000733.
- [4] 谭海燕. 基于突变理论的北京市城市轨道交通运营安全风险评价 [D]. 大连交通大学, 2023.DOI:10.26990/d.cnki.gsltc.2023.000332.
- [5] 袁健. 城市地铁车站运营系统脆弱性评价研究 [D]. 南昌大学, 2023.DOI:10.27232/d.cnki.gnchu.2023.004474.
- [6] 秦艺高, 姚悦, 刘秉政. 地铁运营安全与风险分析评价 [J]. 交通科技与管理, 2023, 4(04): 17-19.
- [7] 赵腊梅. 北京 P 地铁车站运营突发事件风险智能预控方法研究 [D]. 石家庄铁道大学, 2023.DOI:10.27334/d.cnki.gstdy.2023.000507.
- [8] 刘亚光. W 公司地铁运营安全管理对策研究 [D]. 苏州大学, 2022.DOI:10.27351/d.cnki.gszhu.2022.000675.
- [9] 苗文文. 装配式地铁车站运营安全风险评价及对策研究 [D]. 青岛理工大学, 2022.DOI:10.27263/d.cnki.gqudc.2022.000555.
- [10] 王娅娟. 地铁全自动驾驶系统运营安全风险评估研究 [D]. 山东建筑大学, 2024.DOI:10.27273/d.cnki.gsajc.2024.000304.

新背景下建筑工程施工技术分析及其项目管理探讨

李帅

山东省枣庄市滕州市城镇土地投资开发有限公司, 山东 滕州 277500

DOI:10.61369/ME.2025050012

摘 要： 在社会经济快速发展与建筑行业不断革新的新背景下，建筑工程施工技术与项目管理水平对建筑工程的质量、安全、成本和进度起着决定性作用。本文深入分析了建筑工程施工技术的主要内容，包括基地施工技术、桩基施工技术、钢柱结构施工技术、预应力混凝土施工技术以及先进辅助科技技术；同时，对新背景下建筑工程施工项目管理进行了全面探讨，涵盖人员管理、材料管理、机械设备管理、投资管理和工程质量管理等方面，旨在为提升建筑工程整体效益提供理论参考与实践指导，促进建筑行业在新背景下的可持续发展。

关 键 词： 新背景；建筑工程；施工技术；项目管理

Analysis of Construction Technology in Building Engineering and Discussion on Project Management under the New Background

Li Shuai

Tengzhou Urban Land Investment and Development Co., Ltd. of Zaozhuang City, Shandong Province, Tengzhou, Shandong 277500

Abstract： Against the backdrop of rapid social and economic development and continuous innovation in the construction industry, the construction technology and project management level of construction projects play a decisive role in the quality, safety, cost and schedule of construction projects. This article conducts an in-depth analysis of the main contents of construction technology in building engineering, including base construction technology, pile foundation construction technology, steel column structure construction technology, prestressed concrete construction technology, and advanced auxiliary science and technology. At the same time, a comprehensive discussion was conducted on the project management of construction projects under the new background, covering aspects such as personnel management, material management, mechanical and equipment management, investment management, and engineering quality management. The aim is to provide theoretical references and practical guidance for improving the overall benefits of construction projects and promote the sustainable development of the construction industry under the new background.

Keywords： new background; construction engineering; construction technology; project management

引言

随着社会的进步和城市化进程的加速，建筑行业面临着新的发展机遇与挑战。建筑工程规模不断扩大，功能日益复杂，人们对建筑的质量、安全性和使用性能提出了更高要求。与此同时，新技术、新材料、新工艺不断涌现，为建筑工程带来了新的变革。在这样的新背景下，深入分析建筑工程施工技术，探讨科学有效的项目管理方法，成为建筑行业实现高质量发展的关键。施工技术是保障建筑工程顺利实施、达到预期质量标准的核心要素，而项目管理则是对施工过程进行全面统筹、协调和控制，确保工程在规定的时间内、成本范围内高质量完成的重要手段。二者相辅相成，共同影响着建筑工程的最终成果。因此，对新背景下建筑工程施工技术与项目管理展开研究具有重要的现实意义^[1]。

一、建筑工程施工技术的主要内容

（一）基地施工技术

基地施工技术是建筑工程施工的基础环节，其施工质量直接关系到整个建筑的稳定性和安全性。基地施工前，需要对施工现

场的地质条件进行详细勘察，通过地质钻探、土壤分析等手段，获取土壤类型、承载力、地下水位等关键信息，为后续施工方案制定提供依据。在基地开挖过程中，需根据地质情况和设计要求，合理选择开挖方式，如机械开挖或人工开挖，并严格控制开挖深度和坡度，以防止边坡坍塌。基地开挖完成后，要进行地基

处理，常见的地基处理方法有换填法、强夯法、排水固结法等。换填法是将软弱土层挖除，换填强度较高、压缩性较低的材料，如砂石、灰土等，以提高地基承载力；强夯法则是利用重锤从高处自由落下产生的冲击力，夯实土层，改善地基土的物理力学性质；排水固结法通过设置排水通道，加速地基土中孔隙水的排出，使地基土在自重或附加荷载作用下逐渐固结，提高地基强度^[2]。此外，地基施工还包括基础垫层施工、基础钢筋绑扎和混凝土浇筑等工作，每一个环节都需要严格按照施工规范和设计要求进行操作，确保地基施工质量满足建筑工程的要求。

（二）桩基施工技术

桩基施工技术在建筑工程中应用广泛，尤其是在高层建筑、大型桥梁等工程中，对于提高建筑物的承载能力和稳定性起着至关重要的作用。桩基根据施工方法的不同，可分为预制桩和灌注桩。预制桩是在工厂或施工现场预先制作好桩体，然后通过锤击、静压等方式将桩体沉入地基中。锤击沉桩法是利用桩锤的冲击力将预制桩打入地基，该方法施工效率高，但噪音较大，对周边环境的影响较大；静压沉桩法则是通过液压装置将预制桩缓慢压入地基，具有噪音小、无振动等优点。灌注桩是在施工现场的桩位上成孔，然后放入钢筋笼，浇筑混凝土形成桩体。常见的灌注桩成孔方法有钻孔灌注桩、挖孔灌注桩和冲孔灌注桩。钻孔灌注桩是利用钻机在地基中钻出桩孔，然后进行清孔、下放钢筋笼和浇筑混凝土；挖孔灌注桩则是通过人工挖孔的方式形成桩孔，该方法适用于地质条件较好、桩径较大的情况，但存在一定的安全风险；冲孔灌注桩是利用冲锤的冲击力将桩孔中的土石冲碎并排出，形成桩孔。在桩基施工过程中，需要严格控制桩的垂直度、桩长和桩径等参数，确保桩基的承载能力符合设计要求^[3]。同时，要做好桩基的检测工作，通过低应变检测、超声波检测等方法，检测桩身的完整性和质量，保证桩基施工的可靠性。

（三）钢柱结构的施工技术

钢柱结构以其强度高、自重轻、施工速度快、抗震性能好等优点，在现代建筑工程中得到了越来越广泛的应用。钢柱结构的施工主要包括钢柱的制作、运输、安装和连接等环节。在钢柱制作过程中，首先要根据设计要求选择合适的钢材，钢材的质量必须符合国家标准和设计规范。钢材的加工包括切割、焊接、矫正等工序，切割要保证尺寸精度，焊接要确保焊缝质量，避免出现气孔、夹渣、裂纹等缺陷，焊接完成后需要对构件进行矫正，使其符合设计的形状和尺寸要求。钢柱运输过程中，要采取有效的保护措施，防止钢柱表面受损和变形。钢柱安装是钢柱结构施工的关键环节，安装前要对基础进行验收，确保基础的轴线、标高、平整度等符合要求。钢柱安装通常采用起重机进行吊装，在吊装过程中要控制好钢柱的垂直度和位置，确保安装精度。钢柱之间的连接主要有焊接连接和螺栓连接两种方式，焊接连接要保证焊缝的强度和質量，螺栓连接要确保螺栓的拧紧力矩符合设计要求，保证钢柱结构的整体稳定性和可靠性^[4]。

（四）预应力混凝土的施工技术

预应力混凝土施工技术是在混凝土构件承受荷载之前，预先在混凝土中施加压应力，以提高构件的抗裂性能、刚度和耐久性。预应力混凝土施工可分为先张法和后张法。先张法是在台座上张拉预应力筋，然后浇筑混凝土，待混凝土达到一定强度后，放松预应力筋，通过预应力筋与混凝土之间的粘结力，使混凝土

构件产生预压应力。先张法适用于生产中小型预应力混凝土构件，如空心板、屋面板等。后张法是先浇筑混凝土构件，待混凝土达到一定强度后，在构件预留孔道中穿入预应力筋，然后进行张拉，并通过锚具将预应力筋锚固在构件端部，最后进行孔道灌浆，使预应力筋与混凝土形成整体。后张法适用于大型预应力混凝土构件和现场施工的预应力混凝土结构。在预应力混凝土施工过程中，预应力筋的张拉控制是关键环节，要严格按照设计要求控制张拉应力和伸长值，确保预应力施加的准确性。同时，要注意混凝土的浇筑质量和养护条件，保证混凝土的强度和密实度，以充分发挥预应力混凝土的性能优势^[5]。

（五）先进的辅助科技技术

在新背景下，先进的辅助科技技术在建筑工程施工中得到了广泛应用，极大地提高了施工效率和质量。例如，建筑信息模型（BIM）技术通过建立三维数字化模型，将建筑工程的各种信息集成在一起，实现了对施工过程的可视化模拟和优化。利用BIM技术，施工人员可以提前发现设计中的问题和施工中的冲突，优化施工方案，减少施工变更和返工。此外，BIM技术还可以用于施工进度管理、成本控制和质量检测等方面，提高项目管理的精细化水平。无人机技术在建筑工程中也发挥着重要作用，无人机可以用于施工现场的地形测绘、进度监测和安全巡查等工作。通过无人机拍摄的高清图像和视频，管理人员可以及时了解施工现场的情况，发现潜在的安全隐患和施工问题，提高施工管理的效率和准确性。还有智能监测技术，通过在建筑结构中安装各种传感器，实时监测结构的应力、应变、位移等参数，及时发现结构的异常情况，为建筑结构的安全性评估和维护提供数据支持。这些先进的辅助科技技术的应用，推动了建筑工程施工向智能化、信息化方向发展^[6]。

二、新背景下建筑工程施工项目管理

（一）人员管理

人员是建筑工程施工项目的核心要素，人员的素质和工作效率直接影响着工程的质量和进度。在人员管理方面，首先要做好人员的招聘和选拔工作，根据工程的特点和需求，招聘具有相应专业技能和工作经验的施工人员、技术人员和管理人员。对于施工人员，要确保其具备熟练的操作技能和安全意识；对于技术人员，要具备扎实的专业知识和创新能力；对于管理人员，要具备良好的组织协调能力和管理经验。其次，要加强人员的培训和教育，定期组织施工人员参加技能培训和安全教育培训，提高其操作技能和安全意识；为技术人员和管理人员提供专业知识更新和管理能力提升的培训机会，使其能够适应建筑行业的发展变化。此外，建立科学合理的绩效考核制度也是人员管理的重要环节，通过对人员的工作表现、工作成果进行考核，将考核结果与薪酬、晋升等挂钩，激励人员积极工作，提高工作效率和质量。同时，要注重营造良好的团队氛围，加强人员之间的沟通与协作，提高团队的凝聚力和战斗力^[7]。

（二）材料管理

材料是建筑工程的物质基础，材料质量的好坏直接关系到建筑工程的质量和安

的供应商，严格按照设计要求和质量标准进行采购。采购前要对市场进行调研，了解材料的价格、性能和供应情况，在保证质量的前提下，合理控制采购成本。材料验收是确保材料质量的关键环节，验收人员要严格按照验收标准对进场材料进行检验，检查材料的规格、型号、数量、质量证明文件等是否符合要求，对不合格的材料要坚决退货，严禁使用。材料储存过程中，要根据材料的性质和特点，采取合适的储存方式，如防潮、防雨、防火等措施，防止材料损坏和变质。同时，要建立材料储存台账，做好材料的收发记录，确保材料的可追溯性。在材料使用环节，要严格按照施工规范和设计要求进行使用，避免浪费和误用。加强对材料使用过程的监督和管理，及时发现和解决材料使用中出现的問題，确保材料的合理使用和工程质量^[9]。

（三）机械设备的管理

机械设备是建筑工程施工的重要工具，其性能和运行状况直接影响着施工效率和质量。机械设备管理包括机械设备的选型、采购、安装、使用、维护和报废等全过程。在机械设备选型和采购时，要根据工程的施工要求和特点，选择合适的机械设备，确保机械设备的性能满足施工需求。同时，要综合考虑机械设备的價格、能耗、维护成本等因素，选择性价比高的设备。机械设备安装要严格按照操作规程进行，安装完成后要进行调试和验收，确保机械设备能够正常运行。在机械设备使用过程中，操作人员要严格遵守操作规程，正确使用机械设备，严禁违规操作。定期对机械设备进行检查和维护，及时发现和排除设备故障，延长设备的使用寿命。建立机械设备维护档案，记录设备的维护情况和故障处理情况，为设备的管理和维护提供依据。当机械设备达到使用寿命或无法满足施工要求时，要及时进行报废处理，确保施工现场的安全。

（四）投资方面的管理

投资管理是建筑工程施工项目管理的重要内容，其目的是在保证工程质量和进度的前提下，合理控制工程成本，提高项目的经济效益。在投资管理方面，首先要做好投资估算和预算编制工作，根据工程的规模、设计方案和市场价格等因素，准确估算工程的投资总额，并编制详细的工程预算，为投资控制提供依据。在施工过程中，要严格按照预算进行成本控制，加强对工程变更和签证的管理，对于必要的工程变更，要进行严格的审批和评

估，分析其对投资的影响，避免因工程变更导致投资失控。同时，要加强对工程价款支付的管理，按照合同约定和工程进度支付工程价款，防止超付和误付。定期对工程成本进行核算和分析，对比实际成本与预算成本的差异，找出成本超支或节约的原因，采取相应的措施进行调整和控制。通过有效的投资管理，确保工程投资在预算范围内，实现项目的经济效益目标^[9]。

（五）工程质量的管理

工程质量是建筑工程的生命线，直接关系到人民群众的生命财产安全和建筑企业的声誉。工程质量管理贯穿于建筑工程施工的全过程，包括施工准备阶段、施工过程阶段和竣工验收阶段。在施工准备阶段，要做好图纸会审和技术交底工作，组织施工人员熟悉施工图纸，了解设计意图和施工要求，及时发现和解决图纸中存在的问题。同时，要制定详细的施工组织设计和质量计划，明确施工工艺、质量标准和质量控制措施。在施工过程阶段，要加强对施工工序的质量控制，严格执行“三检”制度，即自检、互检和专检，上一道工序不合格，严禁进入下一道工序施工。加强对原材料、构配件和设备的质量检验，确保其符合质量标准。采用先进的施工技术和工艺，提高施工质量。定期对施工质量进行检查和评估，及时发现和纠正质量问题。在竣工验收阶段，要严格按照验收标准对工程质量进行验收，对存在的质量问题要及时整改，确保工程质量符合设计要求和相关标准规范，为用户提供高质量的建筑产品^[10]。

三、结束语

在新背景下，建筑工程施工技术和项目管理面临着新的机遇和挑战。通过对建筑工程施工技术的深入分析，包括基地施工技术、桩基施工技术、钢柱结构施工技术、预应力混凝土施工技术以及先进辅助科技技术的应用，能够不断提升建筑工程的施工水平和质量。同时，科学有效的项目管理，涵盖人员管理、材料管理、机械设备管理、投资管理和工程质量管理等方面，是确保建筑工程顺利实施、实现工程目标的重要保障。建筑行业应不断关注新技术、新方法的发展，加强施工技术创新和项目管理优化，提高建筑工程的整体效益，推动建筑行业在新背景下持续健康发展，以满足社会日益增长的建筑需求。

参考文献

[1] 吴玉光. 建筑工程施工管理存在问题及创新策略研究 [J]. 智能建筑与工程机械, 2024, 6(12): 55-57.
[2] 欧阳剑清. 建筑工程管理技术控制要点和改进措施分析 [J]. 经济技术协作信息, 2024(5): 0256-0258.
[3] 刘红梅. 信息化背景下建筑工程档案管理路径探索 [J]. 四川建筑, 2025, 45(01): 260-261+264.
[4] 黄克鹏. 新时代背景下建筑工程管理中的进度管理分析 [J]. 广州建筑, 2022, 50(06): 77-80.
[5] 徐刚. 新时代背景下建筑工程造价管理研究 [J]. 房地产世界, 2022, (23): 122-124.
[6] 李炳玉. 新时代背景下建筑工程现场管理模式创新应用 [J]. 工程建设与设计, 2020, (14): 223-224.
[7] 宫钦寿. 高层房屋建筑工程施工技术要点分析 [J]. 建设机械技术与管理, 2025, 38(01): 118-120.
[8] 于柯. 建筑工程项目管理中 BIM 技术的应用研究 [J]. 城市开发, 2024, (12): 137-139.
[9] 徐格. 住宅建筑装饰装修工程项目管理和施工新技术的应用探析 [J]. 居舍, 2024, (35): 70-73.
[10] 刘晶. 浅谈建筑工程施工技术质量控制措施 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2024, (17): 52-54.

建筑工程管理中的房屋建筑工程质量控制技术

刘铭丰

中昌新智国际工程咨询有限公司，江西 南昌 330001

DOI:10.61369/ME.2025050015

摘 要： 在房屋建筑工程管理工作中，针对质量要素的管控技术内容比较丰富，其中不乏某些关键管控技术要点。例如，在前期策划与设计阶段，房屋建筑工程质量控制技术主要围绕技术交底、BIM、材料设备选型等展开。另外就是施工准备阶段的质量控制，其中测量控制网络复核质量控制技术是关键。最后，重点开展施工过程阶段的质量控制技术论述，主要包括工序质量控制技术、无损检测质量控制技术以及信息化质量控制技术。上述技术可以切实提高房屋建筑工程整体建设质量，值得深入研讨。

关 键 词： 房屋建筑工程；质量控制；建筑工程管理；BIM；测量控制网络；无损检测

Quality Control Technology of Housing Construction in Engineering Construction Management

Liu Mingfeng

Zhongchang Xinzhi International Engineering Consulting Co., LTD., Nanchang, Jiangxi 330001

Abstract： In construction project management, quality control encompasses diverse technical approaches with critical implementation strategies. During the planning and design phases, key measures include technical briefings, BIM integration, and material/equipment selection. The construction preparation phase emphasizes quality control through survey control network verification. The construction process phase focuses on three critical techniques: procedure quality control, non-destructive testing (NDT) quality control, and digital information management (DIM) quality control. These methodologies collectively enhance overall construction quality and warrant thorough exploration in practical applications.

Keywords： housing construction engineering; quality control; construction engineering management; BIM; measurement control network; nondestructive testing

前言

建筑工程管理注重全阶段、全过程实施，从前期策划、设计、施工准备、到最后的施工过程。在全程管理过程中，也融入了各种质量控制技术，应该从房屋建筑工程的前期策划与设计阶段谈起，为房屋建筑工程质量控制工作良好赋能。

一、前期策划与设计阶段的房屋建筑工程质量控制技术

（一）设计审查与技术交底质量控制技术

在前期策划与设计阶段，房屋建筑工程质量控制注重安全耐久与经济性，这一点在《全国建筑质量安全分析报告》中有被提及。报告中要求房屋建筑施工质量返工率至少降低30%，减少安全事故率25%左右，这就需要设计审查工作发挥作用。传统设计审查方法已经难以满足当代房屋建筑施工需求，因此采用信息化、智能监测以及数据分析技术工具是关键，这些都归属于设备

设计审查范畴。例如智能传感器、远程监测设备工具可以大幅度提升结构变形控制精度高达20%，避免发生施工误差。而信息化管理平台则能够提升施工质量合格率高达12%。进一步来讲，设计审查与技术交底质量控制技术还包含以下3点：

第一，提出高质量的设计文件，这是设计审查与技术交底的关键前提。必须保证审查严格，为后续施工质量管理环节找到安全隐患，在设计文件中有所体现。

第二，把握技术交底环节，追求做到精准交底。在设计转化施工操作环节，通过设计交底来影响施工质量以及效率，设计交底不清楚可能导致发生现场施工质量问题，出现二次返工^[1]。

第三，可以在设计审查与施工质量管理工作中提出具体解决方案，反馈设计方修改意见，将其作为技术交底的核心内容。例如可以采用专项设计审查，对建筑工程项目基坑支护、幕墙、框架结构、智能化系统等展开专项设计，体现项目建设合理性与协调性。另外是协调性审查，对设计图纸中可能存在的冲突问题进行审查，例如结构梁高影响管线空间、设备机房位置冲突或者预留洞口尺寸不一致等等。检查设计文件与图纸、说明书、计算书等是否保持一致。另外就是设计深度是否满足国家规范标准，是否进行了深度设计等等。

（二）BIM质量控制技术

前期策划设计阶段的 BIM 质量控制技术主要是利用 BIM 模型进行三维可视化的设计图纸审查，审查过程中直观发现某些空间冲突问题。再采用 BIM 模型中的 Revit 软件进行碰撞检测，自动检查存在于项目不同专业模型之间的物理冲突，比较常见的是管道与穿梁冲突、设备与结构碰撞冲突等等。可以利用 BIM 模型规范检查建筑工程项目净高以及疏散距离等，建立相对规范的设计变更流程。这一过程要评估变更对质量、成本以及工期所产生影响，确保变更后设计文件及时更新并能够通过审查，完成技术交底工作内容。

（三）材料与设备选型质量控制技术

房屋建筑工程项目材料的质量控制技术主要采用见证取样送检技术，对材料提出一些强制性要求。主要对涉及结构安全、核心功能的关键材料进行检查，思考其节能环保价值，严格执行见证取样的送检制度。在材料检查与质量控制流程中，主要由监理单位见证员现场见证，并且由施工单位取样员按照规范、数量提取样品，送至第三方检测机构进行检测。相关的检测项目包括力学性能检测、导热系数检测、环保指标检测等。在结果判定阶段，主要依靠检测报告判定材料是否合格，能否被应用于现场施工环节^[3]。

国内的材料控制主要保证全国建筑材料抽检合格率达到96.5%左右，杜绝部分水泥与钢筋质量不达标情况发生。所以可以考虑引入智能化材料管理工作系统，保证材料损耗率至少降低15%左右，大幅度提高施工工作效率。目前许多房屋建筑工程多采用环保建材，应用比例已经大幅度提升30%以上，绿色环保材料也是项目施工质量控制的一大重要质量保障。

施工设备选型的质量控制要点主要充分考量工程特征、施工条件以及各项技术要求。如果是针对高层建筑施工，则需要选择可以满足高空作业的塔吊，并且在塔吊经常时进行设备测试。同理，选择大功率挖掘设备可以提高房屋建筑土方工程的挖掘效率。另外，设备选型的通用性以及可维护性也要被考量其中，以便于设备在后续出现故障后被及时维修以及保养。

二、施工准备阶段的质量控制技术

（一）施工材料与设备质量控制技术

施工准备阶段的材料与设备质量控制技术则截然不同，要根据房屋建筑工程施工要求做好材料进场检查，主要是“三证”核查。包括材料出厂合格证、质量检验证以及试验证，要体现“三

证”检查的真实性、有效性，并确保现场批次一一对应^[3]。

施工准备阶段的材料见证取样复测也很重要，它的具体工作包含4点，参考表1。

表1 施工材料见证取样复测验项目主要内容

| 施工材料见证取样复测验项目 | 测验内容 |
|---------------|--|
| 按照规范取样处理 | 参考施工质量验收规范与设计要求，对涉及结构安全、使用功能以及绿色环保要求的施工材料进行见证取样。具体包括钢筋、水泥、砂浆试块、防水卷材、装饰装修材料等，对它们的有害物质限量情况进行分析 |
| 送检 | 将施工材料样品送到有资质的第三方检测机构进行复试测验 |
| 结果判定 | 给出复试报告，证明材料允许进场施工。复试测验是继设计阶段后对材料的第二次检查测试，不合格材料严禁进场参与施工 |
| 台账建立 | 详细记录材料名称以及规格，包括生产日期以及出厂厂家、合格证明等，确保所有施工材料可追溯 |

施工设备的质量控制工作需要在施工开始前进一步优化，优化匹配需求，参考施工工程项目组织设计与方案、工程量与现场条件确保设备技术能够满足施工工艺及质量要求。另外是性能考察，主要对关键设备进行性能评估，并对提供设备的供应商、租赁商等进行资质审查，做好进场验收工作。某些特种设备还要进行性能验证，对设备的安装监督检验内容进行有效报告，同时做好安装、调试、验收工作，检查设备灵敏性与安全可靠^[4]。

（二）测量控制网络复核质量控制技术

测量控制网络复核属于房屋建筑工程项目的核心质量控制技术，具体包括过程质量控制，即外业复核以及内业数据处理与平差，即核心质量控制技术。以内业数据处理与平差工作为例，它的核心质量控制技术具体参考如下：

第一，开展数据整理与检查工作，将数据准确输入到平差软件中，确保数据无错误，不遗漏。

第二，设计房屋建筑工程项目的闭合差计算，做好相关检核工作。例如计算建筑导线、方位角、水准路线的闭合差，同时判断闭合差是否满足施工质量规范限差要求，如果出现超限情况必须分析原因并组织返工设计，满足要求后再进行复测。

在平差计算中，主要采用验证可靠的平差软件如 LGO、COSA 等，参考控制网类型与观测值进行平差方法应用，正常输入准确已知点坐标、高程坐标来完善精度信息，提高测量控制水平，确保网络复核质量控制技术有所优化。在复核成果方面，需要根据平差后的控制点与高程原始成果进行逐点对比分析。例如，在计算坐标差时，它的计算公式具体如下^[5]：

$$\Delta X + \Delta Y + \Delta Z = \Delta X^2 + \Delta Y^2 + \Delta Z^2$$

在分析规范设定阈值时，确保控制网本身点位中误差控制在特定限差以内，大约为10mm ~ 15mm。

三、施工过程阶段的质量控制技术

（一）工序质量控制技术

在房屋建筑施工过程阶段，需要采用工序质量控制技术。例

如采用 PDCA 循环工序质量控制技术，这一技术主要围绕“三检制”展开，包括自检、互检以及交接检，确保每一道工序都有质量责任制完成技术交底。例如，在大面积房屋建筑施工中，首先制作样板或者第一个构件定位，在质量检查合格后再进一步展开施工工作。工序质量控制技术主要围绕施工测量控制技术展开，确保建立稳固基点形成基准点网，严格执行测量复核制度，确保三级复核与换手测量控制工作实施到位^[6]。

考虑到房屋建筑工程工序质量控制非常讲求系统性，因此需要采用过程控制与验证控制两种技术方法，将质量控制工作落实到每一道施工工序环节中。再配合现代信息技术如 BIM、大数据、物联网来提升工序质量控制效率，满足施工高精度要求。

（二）无损检测质量控制技术

房屋建筑工程施工追求使用无损检测质量控制技术，例如采用 X 射线进行检测。它的工作原理是高能 X 射线束直接穿透被测量材料，根据建筑施工材料的不同密度、厚度等对射线进行吸收以及转化，达到检测材料以及建筑结构内部缺陷的目的。例如目前检测建筑结构墙体裂缝、空洞等问题都是适用的。另外还有超声波检测技术，该技术通过发送大量的超声波脉冲并接收反射信号确定材料厚度，明确定位缺陷，保证检测混凝土中的裂缝问题，或者检测钢筋粘结质量问题等^[7]。

（三）信息化质量控制技术

最后还有信息化质量控制技术，可以通过信息化管理追溯工程施工质量，并对施工技术进行持续性改善。该技术中大量记录并保存了建筑施工各个环节的实时数据以及处理状况，确保信息化管理工作建立质量数据库，优化统计分析相关系统。质量追溯可以保证信息化监控房屋建筑工程项目的整体质量水平，为提升项目建设水平创造利好条件。为保证施工质量水平提升，对工程进度进行监控，确保项目管理系统实时监控施工进度，通过对比实际进度与计划进度分析提升施工质量方法，做好价值信息提取工作^[8]。

四、总结

综上所述，在房屋建筑工程项目施工过程中，要结合优秀先进的各项技术全过程贯穿质量管理工作，确保施工现场从设计图纸审核与技术交底、材料设备进场到施工过程全过程采用各种技术做好质量管理工作，及时发现各种施工技术问题与安全隐患。同时，房屋建筑工程更要追求信息化技术水平提升，围绕工程质量核心引入项目管理软件、大数据分析技术以及物联网、云计算等前沿学科，不断提高房屋建筑工程项目的建设水平。

参考文献

- [1] 金凡宇. 房屋建筑工程施工质量管理及质控措施分析 [J]. 2024(18): 63-65.
- [2] 马步锋. 新时期房屋建筑工程施工质量管理的优化路径 [J]. 工程设计与施工, 2024, 6(8): 58-60.
- [3] 马宇翔. 房屋建筑混凝土施工质量管理研究 [J]. 建材与装饰, 2024, 20(29): 109-111.
- [4] 李金龙, 李明雪. 房屋建筑工程质量管理风险与防范措施 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2024(18): 65-68.
- [5] 林海文. 房屋建筑工程质量管理中存在的问题及对策——基于建设单位管理视角 [J]. 建材发展导向, 2024, 22(20): 91-93.
- [6] 刘建波. 房屋建筑人防工程施工技术质量管理研究 [J]. 现代工程科技, 2025, 4(1): 49-52.
- [7] 张光杰. 房屋建筑工程施工质量管理问题及解决措施 [J]. 散装水泥, 2024(1): 127-129.
- [8] 张立明, 韩鲁青, 黄树利, 等. 浅谈房屋建筑施工项目的质量管理 [J]. 门窗, 2024(3): 177-179.

探究工程监理视角下建筑市政工程质量保障体系构建

房军

德城区城乡建设局, 山东 德州 253000

DOI:10.61369/ME.2025050017

摘 要 : 市政工程作为城市施工建设基础工程, 建设质量将会直接关系到城市形象以及社会群众的日常生活, 因此引起了人们的广泛重视。为了保证建筑市政工程质量, 应当充分认识到工程监理的重要性, 实现对整个市政施工过程的全面且细致化监督与把控。然而市政工程监督与管理工程比较复杂, 施工周期比较长, 且需要消耗大量的资金, 对应的监督管理难度比较大, 因此还需要进一步研究与探索, 形成完善的工程质量保障体系, 为城市经济以及社会发展奠定坚实基础。

关 键 词 : 工程监理; 建筑; 市政工程; 质量保障体系

Probe into the Construction of Quality Assurance System of Building Municipal Engineering from the Perspective of Engineering Supervision

Fang Jun

Decheng District Urban and Rural Construction Bureau, Dezhou, Shandong 253000

Abstract : As the basic project of urban construction, the quality of municipal engineering will be directly related to the image of the city and the daily life of the social masses, which has aroused people's extensive attention. In order to ensure the quality of building municipal engineering, we should fully realize the importance of engineering supervision and realize comprehensive and meticulous supervision and control of the whole municipal construction process. However, the supervision and management of municipal engineering is more complicated, the construction period is longer, and a lot of money is needed, so the corresponding supervision and management is more difficult. Therefore, further research and exploration are needed to form a perfect engineering quality assurance system and lay a solid foundation for urban economic and social development.

Keywords : project supervision; architecture; municipal engineering; quality assurance system

市政工程由政府部门进行筹划与投资, 属于公益性项目, 同时市政产品的服务对象为广大群众, 是形象工程, 直影城市居民生产以及日常生活。目前国家大力发展城镇化建设, 对市政工程建设要求显著提升。为了保证市政施工质量, 工程监理至关重要。传统的建筑行业管理体系无法满足新时代市政建筑监理需求, 在施工中依然会出现各种各样的问题。因此相关部门还需要进一步完善质量保障体系, 规范施工各项环节, 保证市政施工顺利开展, 质量也得到保障。

一、建筑市政工程质量保障体系现状分析

大部分市政建筑工程规模都比较大, 需要经历漫长建设时间, 通过完善的质量保障体系, 将会促使监理跟踪全面落实, 全方位了解建筑现场施工情况, 及时发现施工中存在的问题, 并且采取措施去解决, 以免后续返工, 浪费资源同时还会影响整体的施工进度。除此之外, 监理人员通过对已经完成施工的环节进行质量检验, 保证整个建筑项目的质量^[1]。在建筑施工现场, 监理人员与施工人员将会站在不同的角度去分析问题, 将会更好的发现市政施工细节方面内容, 实现对各个施工环节的全面把控, 进而使施工可以达到国家建筑要求。然而目前建筑市政工程质量监

理存在以下问题, 下面将进行详细分析:

(一) 质量管理体系过于表面

大部分建筑市政企业在施工建设中都深刻提升了质量的重视程度, 构建了质量管理体系, 但是并没有真正的落实到实际工作中。质量手册以及程序文件知识为了应对上级部门的检查, 并没有真正的融入到管理与建设阶段^[2]。比如, 一些企业在内部质量审核的过程中, 只是一带而过的走形式, 并不会真正的分析与探究问题, 依旧存在各种安全隐患与质量问题。虽然市政施工过程中也制定了科学且完善的组织设计以及质量计划文件, 但是施工人员并没有严格的执行与落实, 企业对这一方面的监督与管理不到位, 导致质量管理体系并没有发挥出真正的价值。

（二）企业资源投入有待优化

大部分建筑市政企业在资源分配方面缺少科学性与有效性。受到各方面条件的限制，无法为建筑施工配备充足的设备，并且设备维修不到位。老旧设备已经无法满足目前施工对精度以及效率方面的要求，并且在出现问题后还会影响整个施工进度。比较常见的包括了起重机以及混凝土搅拌设备等，为整个市政工程施工质量埋下了一定的安全隐患^[3]。除此之外，一些企业对人力资源方面的投入不充足，为了自身的经济效益，选择一些文化程度不高的农民工，并没有雇佣专业技术人员以及高端人才，整个施工队伍素质参差不齐，在面对复杂工艺或者发生突发情况时，无法采取有效的解决措施与手段，导致工程质量受到了严重影响。

（三）企业人员管理有待强化

目前市政建筑企业忽视了内部人员管理方面，岗位划分不明确，导致工程质量得不到保障。项目管理团队内工作人员对自身职责岗位认识比较模糊，在市政工程出现质量问题后，无法追究到个人责任，实现互相推脱。主要是因为项目经理并没有明确施工现场责任第一人，对施工现场的控制不到位。而质量管理人员职责以及工作能力有限，无法全方位且系统化的分析与把握在施工存在的不合理行为，监督与管理不到位^[4]。企业也缺少科学且有效的激励以及约束机制去管理内部工作人员，导致工作人员对工作缺少积极性，工作态度不认真，在混凝土配比时与规定比例存在明显差距，不按照施工秩序施工等，使工程质量受到了严重影响。

二、工程监理视角下建筑市政工程质量保障体系建设的实践策略

（一）明确职责划分，完善管理架构

工程监理在建筑市政工程质量保障体系中起到了至关重要的作用。工程监理需要明确自身的工作职责，实现对市政施工与设计等工作内容的综合全面监管^[5]。在此过程中，还应当明确质量管控职责划分。因此监理单位应当全面且细致化分析市政工程建设特点，制定责任说明书，包括建设单位工程总体质量目标以及资金投入把控中的职责。施工单位在建设过程中应当严格按照设计要求去执行，提升施工工艺的合理性，从而保证现场质量。设计单位应当结合市政施工需求设计合理的方案，并且为施工人员提供技术方面的支持。监理则应当充分发挥出自身的组织与协调作用，通过对现代化信息技术的灵活运用，搭建线上交流平台，实现信息共享，同时还方便各方进行信息交流，提升沟通的时效性，上级领导通过这一平台发放质量管控指令，信息传递将会更加准确^[6]。在这一质量管理组织架构内，各主体权责明确，协同配合，从工程建设一直到结束，工程质量得到全面保障。

（二）优化监理标准，符合工程质量

建筑市政工程涉及范围比较广泛，并且不同领域对应的需求也有所不同。市政道路工程需要保证道路能够承担大量车流，具有较强的耐久性，进而才能够保证交通安全以及道路使用的年

限。因此道路施工中应当提升对路面所用材料的耐磨性以及路基的稳定性等方面的要求，明确质量标准。而建筑结构作为整个建筑的核心，从基础选型到主体结构设计，都应当全面且系统化的思考。工程监理需要具有坚实的专业基础以及丰富的经验，与设计部门合作，实现对整个项目施工的合理规划。与建筑单位合作，根据项目的地理位置与功能定位，完善质量标准。比如建筑地区频繁发生地震，如果建筑高度超过了两百米，应当提升对抗震以及防风方面的要求以及标准。监理单位可以与设计团队共同商讨，研究超过国家标准要求的结构施工质量要求，在钢材选择过程中，使用一些抗震性较强的材料，并且还需要严格把控关键节点的焊接工艺与质量^[7]。在现代化背景下，各种先进技术以及材料层出不穷，包括了高强度混凝土、新型保温材料、装配式建筑等工艺以及智能化施工等技术得到了广泛运用。作为新时代优秀的监理人员，需要关注市场发展趋势，督促施工部门引入新技术、新材料以及工艺，促使市政工程质量标准显著提升。而监理工作也应当秉持着精准、适配的基本原则，实现精准的管理与把控。

（三）规范监理流程，完善管控体系

工程监理主要负责对整个建筑工程施工全过程的质量控制。从市政工程策略阶段，监理单位就需要全面且系统化的分析，构建完善的质量管控体系。在进入工程设计阶段后，分析设计方案是否满足质量要求以及标准，保证建筑结构更加科学合理，明确市政施工项目的关键点。监理单位需要详细分析施工图纸，使施工方案能够符合实际情况以及法律规定，具有一定的学性，为后续施工顺利开展奠定坚实基础^[8]。施工单位能力直接关系到最终的施工质量，因此，监理单位还需要进一步分析单位内部人员素养以及施工经验，审查施工单位资质，将市政建筑工程交给可靠单位进行。施工现场的地质条件、周边环境以及基础设施将会影响建筑的开展，监理人员需要及时发现潜在的风险与隐患，提前采取措施进行预防或者处理。而施工阶段作为监理单位质量控制的关键部分，监理单位需要全方位把控施工基础内容、主体结构浇筑以及装饰装修等不同阶段的质量控制核心，避免工程出现问题出现二次返工等情况。监理人员通过不定期巡视，检验施工工艺以及材料的使用情况。同时还需要建立起与业主、设计单位以及施工单位之间的沟通与联系，协调好目前施工中存在的问题。并且监理人员应当做好施工现场资料记录，其中包括了施工日志、会议记录以及变更通知等等，反馈给各个单位，同时也为后续验收工作的开展奠定坚实基础^[9]。并且监理人员需要综合分析项目需求以及合同的要求，制定科学且精细化的施工进度计划，定期的巡视与检验施工现场，使施工在计划内有序开展。在出现问题后，也需要及时的与承包单位、施工单位商讨，调整后续的计划。在市政工程建设结束后，监理单位也需要按照质量要求以及标准进行验收。

（四）创新监理模式，实现高效化质量监督

在目前各种先进技术迅猛发展背景下，监理单位可以将先进技术手段作为辅助工具，构建信息化监理管理平台，促使工作方式呈现出高效化与智能化的特点，全方位且动态化的监理整个建

建筑工程过程监理人员可以灵活运用云计算、大数据、人工智能等技术手段，进行现场施工数据的储存与处理。随后通过传感器与监控设备，将采集到的施工进度、施工质量以及安装情况等数据传输到平台中，平台将会进行统一整理与归纳，生成施工数据库。而监理人员可以在数据库内输入关键词，随时随地的查询信息，进行可视化控制。根据施工数据，分析市政项目发展趋势。并且在信息化监理管理平台上，能够做到实时监控与远程巡查，监理人员通过采集到的现场图像、视频等数据信息，动态化跟踪与采集设备于物料的动态，实现远程操作。除此之外，监理单位还可以灵活运用 BIM 技术，通过三端一云的方式，将以往市政建筑工程施工中所产生的安全数据全面整理与归纳到一起，在这一基础上构建数学模型，使监理人员能够利用移动终端智能设备，动态化的掌握建筑施工安全生产的信息^[10]。通过智能化管控体系，将会实现对整个施工过程的高效监督与管理，可以及时发现隐藏的质量问题，采取有效的措施进行处理，为整个工程质量提供全面保障。

三、结束语

根据文章叙述，目前广大群众对市政工程施工质量要求显著提升。为了保证工程建筑质量，应当充分认识到监理工作的重要性。目前监理单位的质量监督体系有待完善，存在各种各样问题，导致最终的市政工程质量受到了严重影响。为了优化这一现象，监理单位需要明确职责划分、明确监督标准、规范管理流程、创新监理手段，保证工作更加高效且有序的开展，取得良好的监理成果，对应的市政工程质量得到全面保障。

参考文献

- [1] 黄华武. 市政工程监理现场规范化管理困境与对策研究 [C]// 《中国招标》期刊有限公司. 新质生产力驱动第二产业发展与招标采购创新论坛论文集 (一). 广西硕恒工程项目管理有限公司, 2025: 57-58.
- [2] 张晓龙. 市政工程监理现场规范化管理的困境与对策分析 [J]. 建设监理, 2024, (S1): 32-33+55.
- [3] 黄建军. 论市政公用工程监理中存在的问题与对策 [C]// 中国智慧工程研究会. 2024 新技术与新方法学术研讨会论文集. 宁波民安工程管理有限公司, 2024: 222-224.
- [4] 董昕阳, 亓歆. 全产业链融合发展 提升综合咨询价值——济南市政设计集团全过程工程咨询业务实践与思考 [J]. 中国勘察设计, 2023, (09): 47-51. DOI:CNKI:SUN:KCSJ.0.2023-09-010.
- [5] 张毅良. 市政工程施工质量控制监理思路探析 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2023, (25): 175-177. DOI:10.19569/j.cnki.cn119313/tu.202325055.
- [6] 吕大明. 吉林省建设工程咨询有限公司工程监理业务营销策略研究 [D]. 吉林大学, 2022.
- [7] 姜怡宏. 房屋市政工程监理管理的问题及策略 [C]// 中国智慧工程研究会智能学习与创新研究工作委员会. “2022 智慧规划与管理” 学术论坛论文集. 山东中盛项目管理有限公司, 2022: 63-69. DOI:10.26914/c.cnkihy.2022.011691.
- [8] 马勇. 浅议房屋市政工程监理管理现状存在的问题及对策 [J]. 中国建筑金属结构, 2021, (12): 9-11. DOI:CNKI:SUN:ZJJS.0.2021-12-006.
- [9] 许海涛. 市政工程监理现场规范化管理中的困难与策略 [J]. 住宅与房地产, 2021, (05): 176-177.
- [10] 李志坚. 市政工程监理现场规范化管理面临的困难与策略分析 [J]. 科技创新与应用, 2020, (36): 191-192.

老龄社区洪涝灾害应急疏散时间窗模型研究

——以平江县某小区为例

文拙, 田兆君, 张术琳*, 鲁义
湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201
DOI:10.61369/ME.2025050020

摘要 : 本研究以平江县某老龄化小区为对象, 构建洪涝灾害应急疏散时间窗模型。采用 Pathfinder 仿真分析不同场景下的疏散效率。结果显示, 积水 $\leq 0.6\text{m}$ 时疏散时间增幅平缓, 超 0.7m 后效率骤降, 0.7m 可作为应急响应关键指标; 楼梯间因“漏斗效应”成核心瓶颈, 疏散出口选择随积水深度变化。据此提出“蓝-黄-红”三级动态响应策略与“硬件升级+软件完善”的系统优化措施, 为提升老龄社区防洪韧性、响应国家应急体系规划提供参考。

关键词 : 应急疏散; Pathfinder 仿真; 分级响应策略

Research on the Emergency Evacuation Time Window Model for Aging Communities during Flood Disasters — A Case Study of a Residential Community in Pingjiang County

Wen Zhuo, Tian Zhaojun, Zhang Shulin*, Lu Yi
School of Resource & Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, Hunan 411201

Abstract : This study takes an aging community in Pingjiang County as the research object, uses the "BIM+Pathfinder" technology to construct an emergency evacuation time window model, and simulates the evacuation process under 7 waterlogging scenarios within 0–1.0m. Results show: 0.7m is the threshold for a sharp drop in evacuation efficiency; when waterlogging exceeds this depth, the 100% evacuation time is 2.8 times longer than that without waterlogging. Stairwells show a "funnel effect", and the peak density at entrances/exits exceeds 2.5 people/m^2 , which is prone to secondary accidents. The study proposes a "blue–yellow–red" three–level response strategy and software–hardware optimization measures.

Keywords : emergency evacuation; Pathfinder simulation; graded response strategy

引言

近年来, 极端暴雨事件增多增强, 引发的洪涝灾害在各地不断出现^[1], 给城市社区造成了严重的经济损失和人员伤亡^[2]。2023年洪涝灾害共造成5278.9万人次不同程度受灾, 因灾死亡失踪309人, 直接经济损失2445.7亿元^[3]。

2024年6月18日至7月2日, 岳阳市平江县出现持续性极端强降雨, 引发了2024年“7·1”特大暴雨洪水灾害。此次灾害暴露出传统应急管理体系在应对老龄化小区突发洪涝灾害的适应性上的严重不足^[3]。

目前已有学者在社区应急疏散领域展开了研究: 黄丽蒂^[4]等基于东北地区814个社区的 Pathfinder 仿真实验, 发现方形路网较其他形态疏散效率可提升37.3%; 张蕾^[5]等通过对比实验指出, 老年人对标识系统的识别能力较年轻人低35%。

然而, 现有研究较少将洪涝灾害的动态演进过程与老龄化社区人员的特殊行为特征进行耦合分析。为此, 本研究以湖南省平江县某典型老龄化小区为例, 构建洪涝灾害应急疏散时间窗模型, 并运用 Pathfinder 软件对不同积水场景下的疏散过程进行仿真模拟, 量化分析积水深度对疏散效率的影响。本研究深度契合国家战略与社会需求, 积极响应《“十四五”国家应急体系规划》中“提升基层防灾能力”的要求^[6]。

一、模型构建与仿真设定

（一）研究区域

根据湖南省洪涝灾害综合风险评估，风险高发带主要集中于湘北地区，而本文研究地岳阳市平江县正是典型的高风险区域之一。这种自然环境的脆弱性，为研究老龄化社区在突发洪涝下的应急疏散问题提供了极具代表性的现实场景。

研究小区建于上世纪90年代，地处平江县中心城区。整个小区由4栋住宅楼组成，小区面积约1950m²。目前小区内共有48户居民，常住人口184人，其中老年人口占比高达40%，人口老龄化特征明显。

（二）参数设定

研究小区主干道宽度为9.4m，设有一个宽度为6.5m的主出口和一个宽度为2.5m的辅助出口。建筑内部，单元门、入户门、房间门宽度等均按实测尺寸在模型中精确设定，以保证疏散空间的真实性。

人员参数的设定综合了《中国成年人人体尺寸（GB10000-88）》标准与实测数据。考虑到当前疏散仿真软件在模拟积水水位动态上涨及其对人员速度实时影响方面的局限性，本研究采用静态多场景模拟的方法，以更可靠地分析不同灾害等级下的疏散瓶颈。基于速度衰减实验的关键节点，共设定了7种典型的积水深度场景：0m（无积水，作为基准对照）、0.3m、0.6m、0.7m、0.8m、0.9m和1.0m。在每个场景的模拟中，直接为相应的人员赋予该积水深度下衰减后的行走速度，从而模拟积水对全体疏散人员的阻碍作用。

（三）仿真模型构建与场景设定

本研究采用“BIM+疏散仿真”的技术路线，基于小区的CAD平面图与实地勘测数据，在Revit软件中构建精确的三维参数化建筑信息模型（BIM）。将Revit模型导入Pathfinder软件中进行识别（图1），并定义疏散出口。在Pathfinder中，共设置184名疏散人员，与小区常住总人口一致。人员的初始位置采用随机分配的方式，模拟灾害发生时居民位于各自户内的场景，使其平均分布在4栋住宅楼的各楼层中。将模拟人员参数设定好完成，最终疏散模型示意图如图2所示。

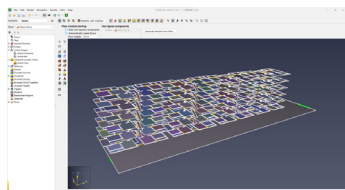


图1 完成识别调整后的模型图

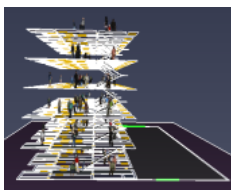


图2 疏散模型示意图

二、仿真结果与分析

（一）不同积水场景疏散效率分析

通过设置相同的初始条件和环境参数，确保了各情境模拟结果的可比性。经过对模拟数据的详细整理与分析，得到了不同积水深度条件下的疏散时间（如表所示）。

表1 不同积水情境下的疏散效率（s）

| 积水深度 (m) | 疏散80% | 疏散90% | 疏散95% | 疏散100% |
|----------|-------|-------|-------|--------|
| 0 | 115.9 | 126.6 | 137.1 | 157.3 |
| 0.3 | 116.9 | 129.6 | 135.6 | 158 |
| 0.6 | 123.9 | 136.9 | 152.7 | 189.3 |
| 0.7 | 134.2 | 146.3 | 165.4 | 212.8 |
| 0.8 | 148.5 | 162 | 180.4 | 255.3 |
| 0.9 | 172.3 | 194.7 | 211.8 | 342.3 |
| 1.0 | 254.9 | 299.8 | 335.1 | 599.3 |

通过分析可知：首先，随着积水深度的增加，各阶段的疏散时间均呈现显著上升趋势；其次，前期的疏散效率明显高于后期，这可能是因为少数人员未能及时接收到疏散预警信息；最后，当积水深度超过0.7m时疏散效率的下降幅度显著增大，说明积水深度与疏散效率之间存在明显的阈值效应。

（二）疏散过程拥堵节点分析

1. 楼梯间拥堵分析

楼梯间作为多层住宅中垂直疏散的唯一通道，是整个疏散链条中的核心瓶颈。

模拟结果精准地再现了拥堵的形成过程：由于上层居民持续涌入，而底层的疏散速度因积水受阻，形成了典型的“漏斗效应”，这种阻滞效应如同一道“水坝”，其压力反向传递至整个楼梯系统，最终导致了楼梯间内人群的严重滞留和堆积。

从服务水平来看，多个楼层的楼梯通行效率在高峰时段多次降至E级以下，意味着楼梯在关键时刻几乎丧失了其作为快速疏散通道的功能。对个体间距的分析发现，拥挤区域内人员之间的最小距离多次出现低于0.2m的极端情况（图3）。对于行动不便、平衡能力较差的老年人而言，如此狭小的物理空间和频繁的肢体接触，极易引发连锁性的摔倒乃至踩踏事故，造成严重的二次伤害。

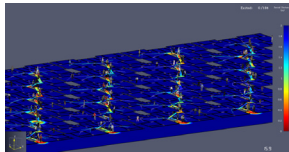


图3 楼梯间疏散人员间距图

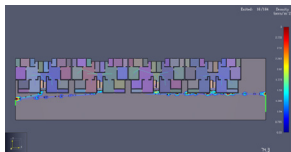


图4 0.9m积水疏散过程中的人群密度图

2. 小区出入口拥堵分析

小区前后出入口疏散模拟结果如图，分析发现，在疏散高峰期，小区前后门出入口附近区域会出现明显的人群聚集现象，且该区域的人群密度在疏散波峰时段会间歇性达到2.5人/m²以上。这种高密度状态导致行人移动速度显著降低，形成拥堵，不仅延长了整体疏散时间，还增加了踩踏等安全事故发生的风险。

3. 措施与对策

基于仿真分析，从应急响应与系统优化两方面提出措施，以提升老龄化社区防洪韧性：

应急响应方面，构建以积水深度为核心的“蓝-黄-红”三级动态响应策略。蓝色预警（水深≤0.3m）：通过广播、微信群发布预警，志愿者协助独居、行动不便老人优先转移；黄色预警（0.3-0.6m）：启动强制疏散，保障应急通道畅通，优先撤离低楼层居民；红色预警（>0.6m）：社区进入紧急状态，动用应急浮

桥、冲锋舟等设备，联合消防、医疗力量开展全面救援转移。

系统优化方面，从软硬件推进常态化防灾减灾建设。硬件上，升级改造排水系统、加固建筑、拓宽疏散出口，集成物联网水文监测与大数据分析技术，建智能预警与资源调度系统；软件上，建权责清晰、训练有素的社区应急队伍，为老年人等建“一人一档”，制定个性化帮扶方案，提供定制应急包与通俗防灾教育，补强应急薄弱环节。

三、结论

本研究以湖南省平江县某老龄化小区为对象，通过“BIM+Pathfinder”仿真框架，分析洪涝灾害下老龄社区应急疏散规律，提出优化策略，主要结论如下：

1.7种积水场景（0–1.0m）模拟显示，积水 $\leq 0.6\text{m}$ 时疏散时间增幅平缓，100%人员疏散时间从无积水的157.3s延长至

189.3s；积水超0.7m后效率骤降，1.0m积水时100%人员疏散时间达599.3s（较无积水延长2.8倍）。0.7m可作为应急响应关键判定指标。

2.空间上，楼梯间因“上层涌入–底层受阻”呈漏斗效应，高峰服务水平降至E级以下，人员最小间距不足0.2m，易引发老年人二次事故；出入口选择随积水变化， $\leq 0.6\text{m}$ 时居民选后门（最短路径）， $> 0.7\text{m}$ 时因后门（2.5m宽）容量不足转至大门（6.5m宽）。人群上，40%老年人口（行动弱）与15%–20%流动人口（环境不熟），加剧疏散系统脆弱性。

3.以积水深度为核心的“蓝–黄–红”三级响应（蓝： $\leq 0.3\text{m}$ 、黄：0.3–0.6m、红： $> 0.6\text{m}$ ），实现资源精准调度；“硬件升级（改造排水、拓宽出口）+软件完善（建老人‘一人一档’）”的系统优化，补强防灾短板，二者形成“应急–日常”闭环。

参考文献

- [1] 冷红, 陈天, 翟国方, 等. 极端气候背景下的思考: 城乡建设与治水 [J]. 南方建筑, 2021(6): 1–9.
- [2] 宋钦澄, 张博骞, 马东辉, 等. 社区雨洪韧性量化评估方法研究综述 [J]. 灾害学, 2024, 39(02): 212–219.
- [3] 杨铭威, 胡可, 谭军, 等. 湖南平江县2024年“7·1”特大暴雨洪水灾害分析及启示 [J/OL]. 中国防汛抗旱, 1–6[2025–03–22].
- [4] 黄丽蒂, 许欣欣, 刘莹, 等. 东北老龄化小区路网疏散仿真模拟及优化 [J]. 中国安全科学学报, 2020, 30(07): 127–132.
- [5] 张蕾. 寒地城市“老年社区”外环境改造设计研究 [D]. 吉林建筑大学, 2016.
- [6] 中华人民共和国国务院. “十四五”国家应急体系规划 2021.

尾矿库回采方案安全设计及管理

闫鹏

中蓝长化工程有限公司, 湖南 长沙 410116

DOI:10.61369/ME.2025050022

摘 要： 为了解决尾矿库回采过程中的安全问题，本文首先介绍了工程概况，然后详细阐述了安全设施设计，包括尾矿坝、挡水坝、防排洪设施、监测设施及干式尾砂安全措施等，最后提出了安全管理要求，包括安全机构设置、尾矿库回采安全生产管理、安全度汛、应急管理及主要控制指标等。通过全面细致的设计与规划，为尾矿库回采工程的安全实施提供了有力保障和技术参考。

关 键 词： 尾矿库；销库回采；坝体稳定性

Safety Design and Management of Tailings Pond Recovery Schemes

Yan Peng

Zhonglan Changhua Engineering Co., LTD, Changsha, Hunan 410116

Abstract： To address the safety issues during the tailings pond mining process, this paper first provides an overview of the project, then elaborates in detail on the design of safety facilities, including tailings DAMS, retaining DAMS, flood control and drainage facilities, monitoring facilities, and safety measures for dry tailings, etc. Finally, it puts forward safety management requirements This includes the establishment of safety institutions, safety production management for tailings pond mining, safe flood control, emergency management, and key control indicators, etc. Through comprehensive and meticulous design and planning, it provides a strong guarantee and technical reference for the safe implementation of the tailings pond mining project.

Keywords： tailings pond; inventory clearance and procurement; stability of the dam body

引言

尾矿库安全是矿山企业持续运营和周边居民生命财产安全的重要保障，尤其在矿产资源开发利用日益增长的背景下，尾矿库的安全管理显得尤为重要。然而，尾矿库的复杂地形、地貌及尾砂特性给其安全管理带来了巨大挑战。因此，科学合理地设计尾矿库安全设施，提升尾矿库防洪、排洪及坝体稳定性能，是实现尾矿库安全运行的关键。其中，综合应用多种安全设施和技术手段，形成系统性的安全保障体系，对于提高尾矿库整体安全水平具有重要意义。

一、工程概述

案例项目位于湖南省株洲市茶陵县高陇镇境内。南距高陇镇约10km，西距茶陵县约50km，交通较便利。该尾矿库地貌单元属低山地貌单元，地势总体西高东低，海拔234 ~ 679m。地形坡度较陡，尾矿库左岸斜坡角度一般为 28° ~ 35° ，局部地段达到 45° ；右岸斜坡坡角一般为 30° ~ 35° ，地形切割中等。沟谷呈“U”字型，山顶呈次棱—次圆山脊，山坡形态一般呈直线形或凸形。山体基岩零星出露，第四系覆盖厚度较厚，植被较为茂密，覆盖率达80%以上，多为灌木丛。

二、安全设施设计

（一）尾矿坝

1. 初期坝

尾砂回收完成后该尾矿库仅剩下初期坝，对浆砌石坝及压坡体进行保留，但是库内已经没有尾砂。

2. 堆积坝

回采过程中堆积坝坝坡排水沟、位移监测点、浸润线观测孔和绿化设施相应拆除，外坡覆土可运至指定区域堆存，回采结束后可用于尾矿库复垦。回采工程完成后，尾矿库堆积坝不复存

在^[1]。

3. 拦洪坝

在库尾已经垮塌的浆砌石挡墙位置新建 C20 混凝土拦洪坝，拦洪坝坝顶标高 349.0m，坝底标高 343.0m，坝高 6.0m，上游坡比 1:0.2，下游坡比 1:0.5，顶宽 1.5m，坝轴线长 46.0m。

拦洪坝清基至中风化层，在该拦洪坝上游坡脚及两侧山坡设混凝土齿槽，齿槽深度为 1.0m，齿槽两侧边坡均为 1:0.5，底宽 1.0m。

4. 尾矿坝稳定安全分析

(1) 尾矿坝渗流计算方法

渗透计算选用有限单元法，设置边界条件，计算浸润线位置、坝体和坝基的渗流量。

有限单元法是用有限个单元的集合体代替连续的渗流场，单元间的结合点称结点。选择简单的函数关系近似地表示单元上的水头分布，最后解得渗流场节点处满足一定精度的水头值^[2]。

(2) 计算软件及参数选取

计算软件采用 Autobank 水工结构分析系统，主要用于分析不同工况运行时的浸润线及出口渗透坡降，岩土层所采用的渗透系数根据勘察报告物理力学性质指标取得，计算参数见表 1。

表 1 渗流分析渗透系数表

| 岩土名称 | 水平渗透系数 (cm/s) | 垂直渗透系数 (cm/s) |
|--------|----------------------|----------------------|
| 尾中砂 | 6.0×10^{-3} | 3.0×10^{-3} |
| 尾粉砂 | 4.0×10^{-4} | 2.0×10^{-4} |
| 尾粉土 | 6.0×10^{-5} | 3.0×10^{-5} |
| 尾粉质黏土 | 2.0×10^{-6} | 1.0×10^{-6} |
| 碎块石压坡体 | 1.8×10^{-1} | 9.0×10^{-2} |
| 粉砂 | 1.6×10^{-2} | 8.0×10^{-3} |
| 碎石 | 2.0×10^{-3} | 1.0×10^{-3} |
| 强风化砂岩 | 2.0×10^{-6} | 1.0×10^{-6} |
| 中风化砂岩 | 2.0×10^{-6} | 1.0×10^{-6} |
| 全风化花岗岩 | 2.0×10^{-6} | 1.0×10^{-6} |

(3) 坝体渗流稳定分析

尾矿库现状正常运行工况下浸润线取工程地质勘察报告提供的浸润线，洪水工况下坝体的浸润线通过计算求得。

正常运行工况和洪水运行工况下的坝体浸润线见坝体稳定计算简图，渗流计算分析表明堆积坝坡的浸润线不会在堆积坝坝坡逸出，堆积坝的渗透安全可满足要求。

(二) 挡水坝稳定计算

挡水坝的稳定安全系数参照《砌石坝设计规范》(SL25-2006)，在本文中见表 2 抗滑稳定安全系数^[3]。挡水坝稳定计算方法采用抗剪方法，坝体与地基的摩擦系数为 0.5。

表 9 调洪演算分析表

| 洪水频率 | 坝顶标高 (m) | 死水位 (m) | 洪峰流量 (m³/s) | 最大下泄流量 (m³/s) | 最高洪水位 (m) | 调洪库容 (m³) | 调洪水深 (m) | 安全超高 (m) | 干滩长度 (m) |
|--------|----------|---------|-------------|---------------|-----------|-----------|----------|----------|----------|
| P=0.2% | 329.0 | 327.0 | 14.32 | 7.4 | 328.19 | 15481 | 1.19 | 0.81 | 70.0 |
| P=0.2% | 295.0 | 293.0 | 14.32 | 10.31 | 294.49 | 8706 | 1.49 | 0.51 | 51.0 |

表 2 抗滑稳定安全系数

| 安全系数 | 计算方法 | 荷载组合 | 2、3 级坝 |
|------|------|------|--------|
| K' | 抗剪断 | 基本 | 3.00 |
| | | 特殊 1 | 2.50 |
| | | 2 | 2.30 |
| | | 基本 | 1.05 |
| K | 抗剪 | 特殊 1 | 1.00 |
| | | 2 | 1.00 |

尾矿库抗滑稳定安全系数为 1.19，抗倾覆稳定安全系数为 1.95，压应力为 103.192Kpa，拉应力为 0，因此该挡水坝可以满足规程、规范要求。

在坝体清基过程中，应根据实际情况决定清基深度，具体应清至中风化基岩 0.5m，且表面应做混凝土垫层，垫层厚度 0.5m。

(三) 防排洪设施

尾矿库构筑物的级别见表 5。

表 5 尾矿库构筑物的级别

| 等 别 | 构 筑 物 的 级 别 | | |
|-----|-------------|-------|-------|
| | 主要构筑物 | 次要构筑物 | 临时构筑物 |
| 一 | 1 | 3 | 4 |
| 二 | 2 | 3 | 4 |
| 三 | 3 | 5 | 5 |
| 四 | 4 | 5 | 5 |
| 五 | 5 | 5 | 5 |

该尾矿库为三等库，随着回采作业的进行，尾矿库等别由三等库变为四等库，本次回采全过程均按照 500 年一遇的防洪标准进行设计，尾矿库等别变化及防洪标准见表 6。

表 6 尾砂回采过程防洪标准

| 滩顶标高 | 尾矿库等别 | 防洪标准 |
|---------------|-------|---------|
| 345.0m-329.0m | 三等库 | 500 年一遇 |
| 329.0m-库底 | 四等库 | 500 年一遇 |

(四) 库内防洪分析

1. 库内调洪计算

回采期间的洪水计算见表 7。

表 7 尾砂回采过程洪水计算

| 汇水面积 (单位: km²) | 排洪方式 | 尾矿库等别 | 防洪标准 | 洪峰流量 (m³/s) |
|----------------|------------------------|-------|---------|-------------|
| 库外 F=0.464 | 溢流井 + 拦洪坝 + 排水管 + 排洪隧洞 | 三等库 | 500 年一遇 | 17.56 |
| 库内 F=0.266 | 溢洪道 | | 500 年一遇 | 14.32 |

回采期间尾矿库的防洪标准及管理要求见表 8 所示。

表 8 尾砂回采过程中防洪标准及管理要求

| 滩顶标高 | 尾矿库等别 | 洪水频率 | 干滩长度 | 安全超高 |
|----------------|-------|---------|------|------|
| 345.0m-329.0m | 三等库 | 500 年一遇 | 70m | 0.7m |
| 329.0m-库底 269m | 四等库 | 500 年一遇 | 50m | 0.5m |

该尾矿库回采过程中，尾矿库等别从三等库过渡到四等库，在三等库期间，滩顶标高为 329.0m 时调洪库容最小；在四等库期间，滩顶标高为 295.0m 时调洪库容最小，因此，回采期间防洪最不利滩顶标高分别为 329.0m 和 295.0m，本次回采期间只对这两个滩顶标高进行洪水计算。

从表9可以看出,该尾矿库库内排洪系统在整个回采过程中均能满足规程规范要求。

b)溢洪道洪水计算

根据新建溢洪道的断面尺寸,进行防洪分析。

a)进口段进水口宽度计算

进口段流态为堰流,故按照堰流进行水力计算。

堰型选用无底坎宽顶堰,堰上水头1.49m,坎宽由无坎宽顶堰流量公式计算:

$$b = Q / (m \varepsilon \sigma_s \sqrt{2gH_0^{3/2}})$$

式中: m —流量系数, $b/B \approx 0$ 时, $m=0.32$,因为单孔,无底坎宽顶堰的侧收缩系数已经考虑在流量系数中,可以不必再考虑收缩影响^[4]。

式中: m' —流量系数;

H_0 —堰上水头,忽略行进水头;

Q —下泄流量;

b —控制堰宽。

求得 $b=4.0\text{m}$,泄流能力 $11.02 \text{ m}^3/\text{s}$,可以满足进水口过流要求。

采用渐变流进行水力计算,得出进口段最大宽度4.0m,长10.0m,高1.5m,坡度13.5%,出口宽度为1.5m,出口高度为1.5m,可以满足进水口过流要求^[6]。

2.明渠段计算

明渠段按照明渠均匀流公式计算:

$$Q = AC\sqrt{Ri}$$

式中: Q —下泄流量;

A —过水断面面积;

R —水力半径;

i —底坡坡率,取1.0%。

明渠段净断面尺寸:形状为矩形,底宽为1.5m,高度为1.8m,坡比为1.0%。

溢洪道糙率系数 n 取混凝土的糙率系数0.016。

设计流量:

$$Q = 11.02 \text{ m}^3/\text{s} > 10.31 \text{ m}^3/\text{s}$$

故该明渠段可以满足规程规范要求。

(五) 监测设施

根据《尾矿库安全监测技术规范》(AQ2030-2010)要求:“四等及四等以上的尾矿坝,应设置坝体位移和坝体浸润线的观测设施”,本工程尾矿库属三等库,按要求需设置观测设施。

该尾矿库已经设置了在线监测设施,但是大部分的监测设施由于管理不到位已经被破坏。考虑到本次回采工程回采周期为8年,且回采完后该尾矿库已经不复存在,因此本次设计仅要求完善原有的人工监测设施,在回采的工作面和库内、库外排洪系统的进水口处分别设置一个摄像头,共设三个摄像头,实时监测采砂工作面。

在尾砂分层剥采的过程中,随着尾矿库滩顶标高和死水位标高的降低,依次拆除人工监测设施(浸润线观测管、坝体位移观

测点等)^[6]。

(六) 干式尾砂安全措施

1.工作面照明设施

为了保证夜间巡视以及尾矿库应急情况下的安全,在回采区域四周需设置探照灯,探照灯的间距不大于30m。

2.安全警示牌

在配电柜处设置“防止触电!”;在库区道路沿线醒目的地方设置“注意来车!”“限速20km/h”“连续急弯”;在回采区域入口处设置“无关人员禁止入内!”;在回采区域边缘设置“注意防止坠落!”;在溢洪道附近设置“本区域禁止施工设备进入!”;回采期间,需在采坑边沿附近放置“危险、请勿靠近!”等安全警示牌^[7]。

3.尾砂回采后的尾砂将运输至尾砂综合利用厂,运输距离较长,沿途可能会出现掉渣漏渣的现象,对环境造成污染,设计采取以下措施:要求选用专业渣土车,为了防止雨水冲刷,可在渣土车顶部设置雨棚,防止尾砂沿途撒落;在尾矿库的转运平台出口,设置一洗车坪^[8]。

4.尾砂回采过程中应对正在使用的排洪系统采取保护措施避免钢筋混凝土结构受到机械设备破坏,库内排洪系统两侧各15m范围内的尾砂不能采用机械回采。

5.尾砂回采过程中应保证库内两侧裸露边坡稳定性,局部欠稳可采用削坡、喷锚支护等方式进行治理。

6.回采作业过程中所有机械设备应保持与临空面至少3m的安全距离,以保证设备作业安全。

三、安全管理

(一) 安全机构及人员设置

原湘东钨矿4号尾矿库尾砂回采工程实施后,尾砂回采期间的安全管理由湖南省凯兴矿业有限公司负责。湖南省凯兴矿业有限公司负责需在现行尾矿库安全生产管理小组基础上补充管理人员,加强对尾矿库尾砂回采作业的安全管理。

管理单位应安排安全管理人员负责尾矿库和尾砂回采作业管理的具体技术工作,其人员应具备尾矿库安全管理方面的基本专业知识,掌握尾矿库尾砂回采设计文件及有关规定,熟悉国家或部门有关标准及规定、规范等^[9]。

尾矿库安全检查主要是定期进行浸润线和位移观测,在每年汛前、汛后对尾矿库的安全进行一次彻底的检查,以及当发生特大洪水、暴雨、强烈地震及重大事故灾害后,对尾矿库的安全状态进行的全面大检查。

尾砂回采的安全检查主要是对回采作业中,回采施工是否严格按照设计要求进行回采作业。

(二) 尾矿库回采安全生产管理要求

1.回采工程严格按照设计要求回采。

2.回采期间每年汛期前应进行防汛安全检查,发现异常,及时消除安全隐患。

3.回采期间应加强尾矿库及周边和尾矿回采区域的安全巡

视、检查和监测,做好安全生产记录,消除隐患^[10]。

4.企业应编制应急救援预案,并组织演练。

5.回采结束的尾矿库应进行复垦,恢复原有生态。

6.排洪构筑物安全检查主要内容:构筑物有无变形、位移、损毁、淤堵,排水能力是够满足要求等。

(三)应急管理

尾矿库应设置值班室及仓库,值班室供管理人员休息,仓库用于存放照明设施,通讯设备、水域救生器材、必要的工具和备用材料等,以便应急使用。公司应编制应急救援预案并组织抢险演练,做好排洪抢险的准备,避免发生重大安全事故。

四、结束语

综上所述,为保障该尾矿库在回采过程中安全稳定性,预防安全事故发生,应时刻掌握回采过程中尾矿坝及库内采坑边坡的安全状况,严格按设计要求进行回采,并加强坝体监测数据分析,定期对尾矿坝进行稳定性复核,从根本上预防安全事故的发生。

参考文献

- [1]张恒瑜.某尾矿库尾矿开采方案研究[J].世界有色金属,2024,(10):80-82.
- [2]张众华,曾霄祥,刘涛,等.某尾矿库销库工程回采设计及稳定性研究[J].现代矿业,2024,40(02):92-95+99.
- [3]肖容,韩追,袁利伟,等.尾矿库资源回采过程中坝体的稳定性分析[J].有色金属(矿山部分),2023,75(05):11-16.
- [4]王新岩.尾矿库回采技术路线研究[J].中国矿业,2023,32(S1):55-57.
- [5]刘斌,王迅,曾霄祥,等.某多雨地区尾矿库防洪安全及排洪能力研究[J].现代矿业,2023,39(04):206-209.
- [6]张岳安,邓书申等,尾矿库内外联合合并防洪安全研究[J].科学技术与工程,2014,18:188-193.
- [7]《尾矿设施设计参考资料》编写组,尾矿设施设计参考资料[M].北京:冶金工业出版社,1980.
- [8]张修照,陈章友,刘石桥,尾矿库工程洪水计算方法探讨[J].工程建设,2011.43(2):29-32.37.
- [9]戚毅婷.尾矿库洪水计算方法的应用分析[J].科学技术与工程,2012.12(2):418-421.
- [10]陈家琦,张恭肃,小流域暴雨洪水计算[M].北京:水利水电出版社,1985.

AI时代背景下的建设工程法规学习

张旭¹, 张辅霞^{1*}, 朱琳², 方子然³

1. 云南农业大学 国际学院, 云南 昆明 650051

2. 云南农业大学 水利学院, 云南 昆明 650051

3. 云南农业大学 建筑工程学院, 云南 昆明 650051

DOI:10.61369/ME.2025050025

摘 要 : 笔者聚焦建设工程法规传统学习在内容、互动和实践方面的短板, 探索借助技术工具优化学习路径, 以提升知识应用能力。通过构建法规知识框架整合条文与案例, 利用虚拟仿真技术模拟工地实务场景开展演练, 借助法律分析工具针对前沿问题进行专项训练, 并同步通过实践验证效果。传统学习模式存在内容更新滞后、互动实践环节不足、案例解析不够等问题, 导致在理解复杂工程场景中的法律关系与应用时面临困难。经技术工具介入后, 知识框架帮助梳理了权利义务关系, 虚拟仿真强化了实务应对能力, 工具训练提升了处理前沿问题的技能, 个人学习效率与合规意识均得到显著改善。技术工具能够有效弥补传统学习的缺陷。作为学生, 期待学校与行业加强协同, 共建包含最新实践案例的教学资源库, 引入兼具工程实践与法律背景的复合型师资, 并建立课程内容动态更新机制, 以更好地适配智能建造时代的法规学习需求。

关 键 词 : 建设工程法规; 人工智能; 智能化教育

Study of Construction Project Regulations in the Context of the AI Era

Zhang Xu¹, Zhang Fuxia^{1*}, Zhu Lin², Fang Ziran³

1. International College, Yunnan Agricultural University, Kunming, Yunnan 650051

2. College of Water Conservancy, Yunnan Agricultural University, Kunming, Yunnan 650051

3. College of Civil Engineering, Yunnan Agricultural University, Kunming, Yunnan 650051

Abstract : The author focuses on the shortcomings of traditional learning of construction project regulations in terms of content, interaction and practice, and explores the optimization of learning paths with the help of technical tools to enhance the ability to apply knowledge. By constructing a framework of regulatory knowledge to integrate provisions and cases, using virtual simulation technology to simulate practical scenarios on construction sites for drills, and leveraging legal analysis tools to conduct specialized training on cutting-edge issues, the effects are simultaneously verified through practice. The traditional learning mode has problems such as lagging content updates, insufficient interactive practice links, and inadequate case analysis, which lead to difficulties in understanding legal relationships and applications in complex engineering scenarios. After the intervention of technical tools, the knowledge framework helped sort out the rights and obligations relationship, virtual simulation strengthened the practical response ability, tool training improved the skills to handle cutting-edge issues, and both personal learning efficiency and compliance awareness were significantly improved. Technical tools can effectively make up for the shortcomings of traditional learning. As students, we look forward to the school and the industry strengthening collaboration to jointly build a teaching resource library containing the latest practical cases, introduce compound teachers with both engineering practice and legal background, and establish a dynamic update mechanism for course content, so as to better meet the legal learning needs of the intelligent construction era

Keywords : regulations on construction projects; artificial intelligence; intelligent education

引言

2024年政府工作报告着重指出, 要大力推进现代化产业体系建设, 将加快新质生产力发展作为关键任务。报告突出创新在推动社会生产力实现质的飞跃中的主导地位, 倡导借助科技创新来引领产业创新, 其核心目的在于提升全要素生产率, 高效推动新型工业

化进程^[1]。

2024年1月的国务院常务会议明确将人工智能与制造业的深度融合确立为关键主线，旨在加速新质生产力的形成。这些政策举措为我国建设制造强国和数字中国提供了清晰的指引。在当前科技飞速发展的背景下，人工智能作为前沿科技的核心驱动力，其与制造业的深度融合正有力推动着产业向高端化、智能化、绿色化方向转型，显著提升产业竞争力并优化结构，为实现国家战略目标奠定了坚实基础。

如图1所示，人工智能企业的迅猛增长反映了AI技术在各行业的加速渗透与应用深化，建筑业作为国民经济支柱产业也正处于智能化转型的关键阶段^[1]，这种广泛的技术应用浪潮正是推动建设工程领域法律环境变革、催生新型法律问题并进而对法规教育提出智能化转型需求的宏观背景。

工程法规学习的重要性

随着工程项目规模持续扩大和技术飞速发展，工程活动涉及的法律关系日益复杂，其中涵盖着包括合同管理、招投标、施工许可、质量安全还有环境保护等多个不同方面，作为工程领域的学习者和未来的从业者，我们深刻认识到，掌握与运用相关法规，不仅是履行自身职责、确保其合法合规推进的基本要求，更是防范法律风险、解决纠纷和维护各方权益的重要手段^[2]。

研究目的与意义

本研究立足于学生视角，目的在于探索如何强化自身对建设工程领域相关法律法规的理解与运用能力，提升建设工程管理者在人工智能应用场景中的法律素养和风险防范意识，保障项目实施的合法性与合规性，推动工程行业智能化转型中的高质量发展。这对我们完善建设工程法规体系、提升项目实施的合法合规性具有重要意义。

一、建设工程法规学习的现状与挑战

（一）传统法规教育的局限性

在传统法规学习中，我们主要经历的模式是线下教师讲授，常常处于知识被动接受的状态。这种授课方式的效果很大程度上依赖于课堂质量和我们主动学习的积极性。实践中，我们发现传统模式存在以下明显局限：

| 表1 传统法规教育的局限性 Tab.1 Limitations of Traditional Regulatory Education | | |
|--|----------------------------------|--------------------------------|
| 方面 | 具体表现 | 影响 |
| 教学内容 | 侧重法规条文讲解，缺乏与AI、智能建造等新技术相关的法律问题覆盖 | 学习内容与行业发展脱节，难以指导实际工程中的法律问题 |
| 实践应用 | 缺少真实工程案例和模拟法律事务的实践环节 | 导致学生重知识轻素养，难以形成合规思维和风险防范意识 |
| 教学方式 | 传统以教师讲授为主，互动性弱 | 学习参与度低，难以激发主动学习和批判性思维 |
| 师资力量 | 部分教师法律与工程背景融合不够 | 难以有效讲解跨学科法律问题，尤其是AI技术引发的新型法律风险 |
| 法规更新滞后 | 教材更新周期长，缺乏对最新法律法规和政策的实时跟进 | 教学内容滞后于行业法律实践，削弱学习的时效性和应用价值 |
| 法律意识培养不足 | 教育重知识传授，轻法律素养和合规意识的塑造 | 教学内容滞后于行业法律实践，削弱学习的时效性和应用价值 |

（二）AI技术带来的新挑战

人工智能技术在建设工程行业的深度应用，正带来一系列前所未有的法律挑战，这些挑战也直接关系到我们未来的工作实践，急需在学习中理解和应对。

首先，是责任归属的难题。广泛应用于设计、施工管理、质

量监测等环节的AI系统，使得工程决策不再完全由人掌控。一旦AI决策失误导致工程事故或损失，由于现有法律尚未明确界定人工智能行为的责任归属，确定责任主体变得异常困难。

其次，数据安全风险凸显。依赖海量数据进行决策的AI系统^[3]，需要实时采集和处理施工现场。这引发了严峻的数据隐私和信息安全风险。然而，现行法规在工程数据的使用范围、存储合规性及跨部门流通等方面，仍缺乏具体的规范细则。

此外，新技术对传统法律框架构成冲击。智能合约、无人施工设备、远程操控等技术的引入，提出了新的挑战。作为学习者，我们在理解和处理这些新兴问题时常常感到困惑和准备不足^[4]。

| 表2 AI技术在建设工程中引发的新型法律挑战 Tab.2 New legal challenges brought about by AI technology in construction projects | | |
|--|-------------------|---------------------------------|
| 挑战类型 | 具体问题 | 法律影响 |
| 责任划分问题 | AI决策引发工程事故 | 难以界定由谁承担法律责任 |
| 数据安全 问题 | 工程现场与人员数据的大规模采集处理 | 涉及隐私泄露、数据合规风险 |
| 合同执行 问题 | 智能合约在工程履行中的应用 | 智能合约法律效力尚不明确，自动执行可能引发争议 |
| 劳动关系 变化 | 智能合约在工程履行中的应用 | 挑战传统劳动合同关系界定、工伤认定规则及员工技能要求 |
| 法规更新 滞后 | 智能合约在工程履行中的应用 | 出现法律空白（如智能合约效力、无人设备责任），难适应新技术实践 |

（三）政策与技术双轮驱动

政策层面：政府工作报告提出“人工智能+”行动，推动AI

在建筑全产业链的应用。住房城乡建设部布局 AI 审图试点，并上线《人工智能审图规范》。

技术层面：AI 与物联网（IoT）、大数据、云计算等技术融合，实现工地数据实时采集与处理。如智慧工地“三脑系统”通过视觉中枢（无人机+CV 算法）监控进度，误差精确到厘米级。

双驱动下 AI 审图使审查周期缩短 70%，合规成本降低 60%；生成式设计使设计返工率下降 83%；同时 AI 合规审查系统减少 90% 以上因设计违规导致的行政处罚，如某深圳超高层项目通过 AI 审查，避免因消防疏散模拟不达标导致的整改。

但目前仍面对一些如下的核心挑战：

数据隐私：建筑项目涉及大量商业秘密（如结构参数、材料成本），AI 模型训练需防范数据泄露。政策要求敏感数据不得上传至第三方云端，企业需建立数据分级保护制度。

算法偏见：若 AI 训练数据集中缺乏少数民族地区或特殊气候区的建筑案例，可能导致合规审查存在地域偏见。解决方案包括收集多样性数据、公开算法逻辑并接受第三方审计。

责任界定：当 AI 生成的施工图纸导致质量问题时，需明确开发者、使用者、建筑设计师等主体的责任比例。政策要求 AI 应用保留人工复核流程，关键环节需专业工程师签字确认。

（四）智能化法规教育的转型需求

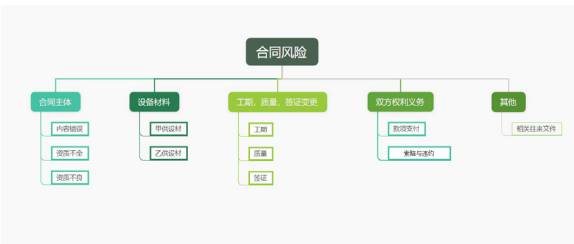
在 AI 等智能技术广泛应用的背景下，我们深感建设工程法规教育便面临着一种急需实现转型的特别迫切需求，而传统那种主要以条文讲授作为核心的教学模式，已难以满足我们在智能化建设环境下成长为复合型人才的需求。我们不仅需要学习现有的法律制度，更需要将人工智能、BIM 等技术相关的法律问题（如算法责任、数据合规、智能合约等新兴领域）纳入学习范围^[9]。

二、AI 技术赋能建设工程法规教育的路径

（一）智能化法规知识建构

利用建设工程法规知识图谱这一智能化教育的核心基础设施，我们能更好地结构化理解工程法律实体（如合同主体、工程行为、法律责任、风险点等）及其复杂关系。

如图二这是一张建设工程合同风险的鱼骨图，从合同主体、设备材料、双方权利义务、工期质量签证变更及等维度，梳理合同执行中存在潜在风险点，是建设工程法规知识图谱在合同风险场景的呈现。通过整合法规、案例（特别是 AI 应用判例）、BIM 模型合规信息等，我们可以进行精准查询、获取相似案例推送、进行风险可视化，从而构建更系统化、情境化的法律知识体系。



图一合同风险思维导图

（二）教学模式与学习方式创新

技术革新为我们突破传统学习模式的局限提供了多元路径：借助智能问答系统可即时解答对法规条文和案例的疑惑；通过自适应学习平台获取根据自身知识掌握程度和兴趣定制的学习内容和路径；利用 VR/AR 技术构建的虚拟工程场景，在沉浸式环境中模拟处理合同纠纷、质量安全事故调查等复杂法律情境。同时 AI 时代打破了传统建设工程法规学习的时间与空间限制，衍生出了多样化的学习模式。

如图三所示智慧工地安全事故 VR 沉浸式体验，能让我们真实感受建筑施工安全事故的严重后果。并且可以实现多维度互动，带来身临其境的真实感，提升安全培训的质量。



图二智慧工地安全事故 vr

（三）合规能力的数字化实践训练

通过以下数字化工具，我们得以在模拟环境中进行有效的合规实践训练：

基于真实数据的法律模拟系统：我们可以在这类系统生成的动态工程案例中，沉浸式地演练合同审查、招投标合规性核查、安全事故责任认定等关键流程，并能即时获得操作反馈和风险提示。

如图四模拟法庭审判流程。学习者可沉浸式演练建设工程安全事故责任认定等关键环节，过程中知识图谱支撑即时操作反馈与风险提示，助力理解工程法律实体（如责任主体、法律责任）及复杂关系。



图三建设工程法规法律模拟系统

法律顾问实训平台（CLA）：借助模拟数字法律顾问，我们能互动式地应对工程现场中的数据隐私问题、智能合约执行争议、AI 决策责任归属等前沿法律挑战，从而增强处理复杂新型法律实务的技能。

数据驱动的合规分析工具：利用海量工程合同、裁判文书

和监管数据，这类工具帮助我们学习运用技术方法识别行业风险点，并掌握最佳合规实践模式。

（四）加强法规与伦理建设

针对 AI 应用带来的法规与伦理问题，相关部门需加强相关制度建设。政府应制定《人工智能在建设工程法规教育中的应用规范》，明确在数据使用、版权保护等方面的要求。例如，规定 AI 生成内容需标注“AI 辅助创作”，数据收集需征得用户明示同意，并禁止使用未经授权的案例数据进行训练。必须完善人工智能大模型的评估、监督机制，并积极采纳城市数字治理各方主体的意见和建议，防范数据泄露和滥用风险，建立健全的监管机制和风险预警体系。学校和教育机构要加强对学生的法规与伦理教育，将 AI 伦理课程纳入建设工程专业必修模块，内容涵盖数据隐私保护、算法偏见识别、AI 责任归属等。此外，建立 AI 系统的监督和评估机制，设立“建筑 AI 伦理委员会”，成员包括法律专家、技术人员和行业代表，对智能学习平台进行定期审计，重点检查数据合规性、算法透明度和内容版权问题，及时发现并解决 AI 应用中存在的问题。

（五）师资能力提升与生态构建

针对 AI 和建筑法规于高等教育的现阶段融合的各类问题分析，应首先制定教师 AI 素养培训计划：高校开设“AI+ 法学”“数字法学”课程，培训教师运用 AI 进行备课、学情分析。例如，清华大学人工智能赋能教学试点覆盖 12 个院系，教师备课效率提升 50%。其次人机协同教学机制：教师聚焦批判性思维培养，AI 处理标准化工作。例如，中国人民大学“未来课堂 AI 助手”实现“轻量级部署 + 深度教学融合”，教师通过触控电子黑板调用课件批注、作业分发等功能。最后进行产教融合平台建设：企业与高校共建实训基地。以此打通“理论 - 实践 - 创新”的全链条。

三、未来展望与对策建议

（一）法规教育智能化发展趋势

AI 等技术的日益成熟，正推动建设工程法规教育向智能化方向深刻转型。法规教育与工程实践密不可分，我们尤其依赖真实案例（特别是融合 AI 应用的判例）来加深对法律的理解。技术赋能的案例分析与生成工具，能为我们高效处理海量实例提供支持，显著增强学习的针对性和实践价值。同时，随着 AI 应用深化带来的新型法律问题不断涌现，我们迫切需要将这些内容纳入学习范畴。因此，我们期待法规教育紧密对接智能时代的法律实践需求，积极运用案例模拟、风险推演等智能化教学方法，核心在于培养我们有效应对新型复杂法律场景的能力。

（二）教育体系与产业协同路径建议

为推动建设工程法规教育的智能化转型，更好地服务于我们的学习需求，我们期待并建议深化产教融合：

1. 打造“双师型”队伍：鼓励教师参与工程法律实务项目，引进兼具工程、法律和 AI 背景的产业专家参与教学，为我们提供更贴近实践的指导；
2. 建立协同研发平台：聚焦 AI 应用引发的工程法律新闻

题，开展校企联合研究，推动法规、标准与实践的同步更新从而确保我们所学知识的时效性；使我们的学习更符合未来职业发展要求。

3. 利用 AI 优化人才需求对接：通过大数据分析行业对工程法律人才能力需求的变化，动态调整培养方案和课程内容。

（三）个性化互动学习及智能推荐

在 AI 辅助学习工具的设计中，应强调个性化学习的理念。通过应用自适应学习算法，该工具能够根据学习者的特点和进度，自动调整学习内容和难度。这一过程不仅能够满足不同学习者的需求，还能增强其自主学习的积极性。例如，一项针对法学专业学生的案例研究显示，使用个性化学习平台的学生在法规理解测试中的表现显著高于传统教学模式下的学生（Smith et al., 2022）^[6]。

AI 辅助学习工具的核心功能应着重于智能推荐（Intelligent Recommendation）和互动学习（Interactive Learning）^[7]。智能推荐系统能够运用机器学习技术，分析学习者的历史行为和偏好，从而推送相关的法规文本、案例分析及实时更新的法律动态。同时，互动学习功能通过模拟法庭辩论、角色扮演等方式，使学习者在真实的法律实践情境中，不断锤炼自己的法律思维和逻辑推理能力。

（四）后续研究方向展望

教育部等多部门在发布《关于“双一流”建设高校促进学科融合加快人工智能领域研究生培养的若干意见》的通知中提到，要以产业行业人工智能应用为导向，拓展核心技术和创新方法，实现人工智能对相关学科的改造，形成“人工智能 + X”的复合发展新模式^[1]。数据及其运用对经济发展、社会治理和政府管理均产生巨大的影响，引发了一系列新的法律问题，需要在学习层面进行深入研究。但在人工智能融入到法规教育当中也面临不小的挑战，作为关注此领域的学生，我们认为后续研究应该着重于，在实际应用过程中如何更好的利用人工智能来促进建筑工程法规教育的更好发展

四、结论

数字技术的快速发展，既为建设工程法规教育开辟了新的可能，也带来了全新的挑战。本文从学生学习的视角出发，探讨了数字化时代法规教育的现状、挑战与转型方向，着重剖析了构建数字化法规知识体系、创新教学模式以及实现实践训练数字化这三方面的核心价值及我们的实践体验。借助数字技术，法规内容动态更新、结构化呈现，同时为我们提供了高度个性化和沉浸式的学习体验，从而有效提升了学习效果与实际法律应用能力。

法规教育的数字化转型，要求教育体系与产业界深度融合，整合工程管理、法学及信息技术，打造多元化、实践导向的教学平台。从而培养我们成为适应数字时代的复合型法律人才。我们期待法规教育在个性化学习、虚拟现实应用及智能辅助等领域持续深化，同时需警惕并解决数字技术应用带来的法律伦理与责任

问题。我们相信,通过不断创新与完善,建设工程法规教育将为行业的法治化、规范化发展筑牢根基。推动数字化建设工程健康有序发展,并为我们未来的职业发展奠定坚实的法律基础。

目前 AI 技术正以“智能教学系统、虚拟现实、动态法规更

新、智能审查、师资培训”五大路径,重塑建设工程法规教育模式。未来,需通过“政策引导、技术规范、教育创新”三管齐下,推动 AI 与建设工程法规教育的深度融合,最终实现“让法规从纸上一条文变为行业高质量发展的护航利剑”的愿景。

参考文献

- [1] 邱斌,易昱玮,孙少勤.AI 创新、新质生产力形成与外贸高质量发展[J].开放导报,2024,(04):7-18.
- [2] 陈朝.建设工程竣工结算审核工作要点研究[J].低碳世界,2023,13(03):166-168.
- [3] 蒋洁,吴新悦,吕扬.面向不同教育情境的全球人工智能素养政策研究[J].图书与情报,2024,(06):86-94.
- [4] 孔繁松.信息化时代建筑工程管理信息化建设研究[J].房地产世界,2024,(21):59-61.
- [5] 王强,张喆,许天航.移动互联网背景下《建设工程法规》教学改革探讨[J].砖瓦,2024,(02):168-170.
- [6] 黄灵.破局为先:AI 法规的“上海方案”[J].检察风云,2023,(01):11-13.
- [7] ChenMan.EngineeringEthicsintheContextofNewEngineeringConstruction[A].2022:

影响建筑工程管理的主要因素与优化措施探析

周志明

东莞市常平镇水务工程运营中心，广东 东莞 523000

DOI:10.61369/ME.2025050028

摘 要： 本文聚焦建筑工程管理，剖析责任不清晰、监督不足、材料设备标准不严、预判欠缺四大主要因素的影响，对应提出三级责任划分、强化监理监督、规范材料设备管理、动态风险预判等优化操作流程，为提升建筑工程管理质量提供切实可行的参考，助力解决工程管理中的实际问题。

关 键 词： 建筑工程管理；责任分工；监督管理；材料设备标准；提前预判

Analysis of the Main Factors Affecting Construction Project Management and Optimization Measures

Zhou Zhiming

Water Conservancy Engineering Operation Center of Changping Town, Dongguan, Guangdong 523000

Abstract： This article focuses on the management of construction projects, analyzing the influence of four major factors: unclear responsibilities, insufficient supervision, lax standards for materials and equipment, and lack of prediction. It correspondingly proposes optimization operation processes such as three-level responsibility division, strengthening supervision and inspection, standardizing the management of materials and equipment, and dynamic risk prediction, providing practical and feasible references for improving the quality of construction project management. Help solve practical problems in engineering management.

Keywords： construction project management; division of responsibilities; supervision and management; standards for materials and equipment; predict in advance

建筑工程管理质量关乎工程安全、成本与进度，然而实践中常受多因素制约。责任边界模糊引发管理混乱，监督机制弱化导致漏洞频现，材料设备标准松散影响品质，风险预判不足使管理被动。这些问题不仅阻碍工程推进，还可能引发安全事故与经济损失。因此，深入探析这些影响因素及对应优化措施，对推动建筑工程管理提质增效意义重大。

一、影响建筑工程管理的主要因素

（一）责任不清晰造成管理混乱的影响

责任边界的模糊会直接导致工程管理流程的阻滞与断裂，从管理链条的源头削弱整体管理效能。在多主体协作的建筑工程中，各参与方及内部岗位若责任不明，会使各项管理指令无法精准传递与执行，出现“指令下达后无人响应、问题出现后无人负责”的僵局。在工程质量问题整改环节，若未明确施工单位、监理单位及建设单位各自的整改督促责任，施工单位可能因缺乏外部压力而拖延整改，监理单位因未被明确要求跟踪复查而放任问题留存，建设单位因未清晰知晓自身监督职责而无法及时介入，最终导致质量隐患长期堆积，从局部问题演变为系统性风险。责任不清晰会引发内部管理的内耗，各部门及岗位间为规避潜在责任，会过度强调自身职责范围的局限性，对需要跨部门协作的工作采取“被动应对”态度，在施工进度协调中，工程部与物资部若责任划分不清，工程部可能因物资供应滞后而指责物资部采购

不力，物资部则以工程部未提前提交准确需求计划为由推诿责任，双方的争执会浪费大量沟通时间与管理精力，导致进度协调效率低下，延误工期。

（二）监督不足引发管理存在漏洞的影响

监督机制的缺失或弱化，会使管理体系的约束作用形同虚设，从根本上动摇工程管理的质量与安全根基。在施工过程管理中，监督不足会导致关键工序的质量控制失控，施工单位可能为追求进度或降低成本，擅自简化施工流程、降低施工标准，如在混凝土浇筑时减少水泥用量、在钢筋绑扎时缩短搭接长度等，这些违规行为若未被及时发现与制止，会直接影响建筑结构的承载能力与耐久性，为工程后期的使用埋下安全隐患。同时，监督不足会加剧工程成本的无序扩张，由于缺乏有效的监督约束，部分施工人员可能存在虚报工程量、浪费施工材料等行为，而管理人员因监督不到位无法及时察觉，导致工程实际成本远超预算，造成建设资金的严重浪费。监督不足会破坏工程管理的公平性与规范性，施工单位内部若监督机制失效，会出现“人情管理”“利益

倾斜”等现象，如对关系户负责的施工班组放宽质量要求，对普通班组则严格管控，这种不公平的管理方式会引发班组间的矛盾与不满，破坏施工现场的管理秩序，甚至可能引发罢工、投诉等事件，进一步扰乱工程管理节奏。

（三）材料、设备标准不严影响管理质量

材料与设备作为建筑工程的核心物质基础，其标准的不严格会从根本上制约工程管理质量的提升，引发一系列连锁性的管理问题，降低工程的整体品质与使用价值。在材料管理层面，标准不严会导致不合格材料进入施工环节，这些材料的性能与质量无法满足工程设计要求，使用强度不达标的钢材会降低建筑结构的抗震能力，使用耐候性差的外墙涂料会缩短建筑外观的使用寿命，不仅会增加后期维修维护的成本，还会影响建筑工程的安全性与耐久性。材料标准不严会打乱施工进度计划，由于不合格材料需要重新采购、检测或更换，会导致施工工序被迫中断，墙体砌筑因砖块质量不合格需全部返工，会使后续的抹灰、装修工序无法按时开展，造成工期的大幅延误，而工期延误又会引发人工窝工、设备闲置等额外成本，加剧管理成本压力^[1]。在设备管理层面，标准不严会导致施工设备的运行效率与安全性下降，老旧、故障设备的频繁使用会增加设备故障率，塔式起重机因未达到安全标准而在运行中出现制动失灵，不仅会导致施工停滞，还可能引发设备倾覆、人员伤亡等安全事故，对施工现场的人员生命安全造成严重威胁。

（四）预判欠缺导致管理主动性不足的影响

对工程管理中潜在风险的预判能力不足，会使管理工作始终处于“被动应对”的状态，无法提前规避风险、优化管理策略，导致管理效率与效果大打折扣，增加工程管理的不确定性与风险成本。在外部环境适应层面，预判欠缺会使工程管理难以应对政策法规、市场环境等外部因素的变化，未能提前预判环保政策的收紧，可能导致施工现场因未达到新的环保要求而被责令停工整改，不仅需要投入额外资金完善环保设施，还会造成工期延误。未能预判原材料价格的大幅上涨，会使工程成本预算严重失衡，若无法及时调整资金计划，可能导致资金链断裂，使工程陷入停滞状态^[2]。在内部管理协调层面，预判欠缺会导致施工计划与资源配置的脱节，如未能提前预判施工高峰期的人员与设备需求，会出现“人员不足、设备短缺”的情况，影响施工进度。未能预判不同施工工序间的衔接风险，会导致工序交叉冲突，如机电安装与装修工程在时间与空间上的安排矛盾，需要重新调整施工顺序，造成管理资源的浪费。

二、优化建筑工程管理质量的有效措施

（一）明确责任分工化解管理混乱的操作流程

构建“三级责任划分体系”，在项目启动阶段，由建设单位牵头，联合施工、监理、设计等参与方召开责任划分专题会，第一级，明确各主体核心责任，例如建设单位负责资金保障与政策对接，施工单位承担施工质量与安全主体责任，监理单位履行全过程监督职责，形成《项目责任主体清单》并由各单位负责人签

字确认^[3]。第二级，细化各单位内部部门责任，施工单位需明确工程部、质量部、安全部的具体职责，工程部负责施工进度调度，质量部承担材料验收与工序质检，安全部负责现场安全培训与隐患排查，制定《部门责任说明书》并纳入项目管理制度。第三级，落实岗位个人责任，针对项目经理、施工员、质检员等关键岗位，制定《岗位责任卡》，明确岗位职责、工作标准与考核指标，例如施工员需每日记录施工日志，标注当天工序完成情况与问题整改进度，确保责任到人。建立“责任衔接机制”，针对工程变更、交叉作业等易出现责任模糊的环节，制定专项流程，如工程变更时，由建设单位的工程管理部牵头，组织设计单位出具变更图纸、施工单位编制变更施工方案、监理单位审核方案可行性，形成《工程变更责任衔接表》，明确各环节责任人与完成时限，避免推诿。完善责任考核与追溯机制，每月开展责任履行情况考核，结合施工进度、质量合格率、安全事故发生率等指标，对责任主体与个人进行评分，考核结果与绩效挂钩^[4]。建立“责任追溯台账”，对工程中出现的问题，通过查阅责任清单、施工日志、验收记录等，精准定位责任人，既便于问题整改，也为后续类似项目提供借鉴。

（二）强化监督填补管理漏洞的操作流程

优化监理单位监督模式，建设单位在监理招标阶段，需明确监理人员配置标准，要求派驻的监理工程师需具备5年以上同类型项目经验，且每个项目的专职监理人员数量与施工面积匹配，避免“一人多监”^[5]。建立“监理人员履职打卡制度”，通过定位打卡与现场影像记录，确保监理人员每日驻场时间不少于8小时，关键工序需全程在场监督，并填写《关键工序监理记录表》，记录施工参数与质量情况。完善施工单位内部监督体系，施工企业需赋予质量安全部门独立决策权，明确其在质量与进度冲突时拥有“一票否决权”，当施工进度滞后时，质量安全部门发现构件安装偏差超标，有权要求停工整改，整改合格后方可继续施工。推行“交叉监督”机制，组织不同项目部的质量监督员进行互查，每月开展一次跨项目监督检查，形成《交叉监督报告》，共享监督经验与问题案例^[6]。健全政府监管与社会监督结合的机制，政府监管部门需增加施工过程中的巡查频次，重点关注隐蔽工程，采用无人机航拍、回弹仪检测等技术手段，提升监督精准度，每季度开展一次专项检查，对发现的问题下达《整改通知书》并跟踪整改情况。引入第三方检测机构，对材料质量、结构安全等进行随机抽检，检测结果向社会公示，接受公众监督。

（三）规范材料、设备标准，提升管理质量的操作流程

严格材料采购与供应商管理流程，施工单位需建立“合格供应商名录”，通过招标筛选供应商，审核其营业执照、生产许可证、产品检测报告等资质，对供应商进行分级评价，优先选择信誉好、质量稳定的供应商。材料采购时，签订详细的采购合同，明确材料的规格、型号、质量标准、验收方式与违约责任^[7]。推行“采购人员轮岗制”，每两年对采购人员进行岗位调整，避免长期任职形成利益共同体。完善材料验收流程，材料进场时，由施工单位的质量部、监理单位的验收专员共同验收，核对材料的外观、规格是否与合同一致，委托第三方检测机构对防水卷材的

厚度、耐热度，混凝土的抗压强度等关键指标进行检测，检测合格后出具《材料验收合格证》，方可投入使用。对不合格材料，填写《不合格材料处理记录表》，注明处理方式，并追究供应商责任。规范设备选型、租赁与维护流程，设备选型时，根据施工需求与技术标准，选择符合安全性能与效率要求的设备，避免选用老旧、报废设备^[9]。租赁设备时，审核租赁公司的资质与设备检测报告，签订租赁协议，明确设备维护责任。施工过程中，制定《设备维护计划表》，每周对设备进行一次常规保养，每月进行一次全面检修，记录设备运行状态与维护情况，确保设备正常运行。

（四）提前预判变管理被动为主动的操作流程

建立动态风险因素监测与分析机制，组建专业的风险预判团队，成员包括工程管理人员、造价师、法律顾问、气象专员等，团队需定期收集政策法规、原材料价格、气象数据等信息，每月召开一次风险分析会，运用数据分析工具，对信息进行整理分析，识别潜在风险，分析近3年的水泥价格波动趋势，预判未来价格走势。关注地方政府发布的环保、安全政策，提前了解政策对项目的影 响，形成《风险预判报告》，明确风险类型、发生概率与影响程度^[9]。强化项目前期调研工作，在项目立项阶段，组织地质勘察单位对项目场地进行详细勘察，采用钻探、物探等技术

手段，全面掌握地质条件，是否存在地下溶洞、软土地基等。调研周边环境，包括交通状况、居民分布、基础设施配套等，编制《项目前期调研报告》，为项目设计与施工方案制定提供依据。构建供应链风险应对机制，与2-3家备选供应商建立合作关系，签订《备选供应商协议》，明确在主供应商无法供货时，备选供应商的供货周期与价格。建立原材料库存预警系统，根据施工进度与材料消耗速度，设定库存下限，当材料库存低于下限时，自动发出预警信号，及时启动采购或切换供应商流程^[10]。制定应急预案，针对极端天气、政策变动、供应链中断等预判出的风险，制定专项应急预案，明确应急处置流程、责任人与资源调配方案，针对暴雨天气，制定《暴雨应急施工方案》，包括施工现场排水措施、设备防护方法、人员撤离路线等，并定期组织应急演练，提升团队应急处置能力。

三、结束语

通过上述分析可知：责任、监督、材料设备、预判是影响建筑工程管理的关键维度，其存在的问题会对工程产生多方面负面影响。文中提出的针对性优化操作流程，为解决这些问题提供了清晰路径。

参考文献

[1] 张晓峰. 建筑工程管理与绿色建筑工程管理研究 [J]. 建筑·建材·装饰, 2025(5): 64-66.
[2] 张延云. 建筑工程管理中进度管理的研究 [J]. 建筑与装饰, 2025(12): 50-52.
[3] 刘宇倬. 建筑工程管理策略优化 [J]. 建材与装饰, 2025, 21(14): 73-75.
[4] 阴蕾. 建筑工程管理探析 [J]. 河南建材, 2024(2): 149-150.
[5] 邹超群. 建筑工程管理中项目管理理念的应用 [J]. 智能建筑与工程机械, 2025, 7(2): 71-73.
[6] 郭帅. 精细化管理在建筑工程管理中的应用 [J]. 建筑·建材·装饰, 2025(6): 13-15.
[7] 王志明. 建筑工程管理创新及绿色施工管理 [J]. 建筑与装饰, 2025(6): 61-63.
[8] 汪利辉. 精细化管理在建筑工程管理中的应用 [J]. 工程设计与设计, 2025(1): 246-248.
[9] 陈宏芸. 建筑工程管理中 BIM 技术应用研究 [J]. 工程机械与维修, 2025(2): 109-111.
[10] 王杨, 刘金兰. 建筑工程管理中的风险管理 [J]. 建筑与装饰, 2024(22): 100-102.

复杂地形下道路工程设计的安全性 with 经济性研究

李旭

重庆晨彬建筑设计咨询有限公司, 重庆 400000

DOI:10.61369/ME.2025050034

摘 要： 复杂地形条件下的道路工程建设既是现代交通基础设施发展的必然趋势。也是工程技术领域面临的重大挑战，本文基于安全性与经济性双重目标导向，系统分析了山区陡坡、软土地基、跨河跨谷以及防灾减灾等复杂地形条件下道路工程设计的技术要点与优化策略。通过采用智能化路线设计、创新性地基处理、模块化桥梁结构以及预防性防灾工程等技术手段，能够在确保行车安全的前提下显著降低工程造价与运维成本，为复杂地形道路工程的可持续发展提供理论支撑与实践指导。

关 键 词： 复杂地形；道路工程；安全性设计；经济性优化

Research on the Safety and Economy of Road Engineering Design in Complex Terrain

Li Xu

Chongqing Chenbin Architectural Design Consulting Co., LTD, Chongqing 400000

Abstract： Road engineering construction under complex terrain conditions is an inevitable trend in the development of modern transportation infrastructure. It is also a major challenge in the field of engineering and technology. Based on the dual goal orientation of safety and economy, this paper systematically analyzes the technical key points and optimization strategies of road engineering design under complex terrain conditions such as steep slopes in mountainous areas, soft soil foundations, crossing rivers and valleys, and disaster prevention and mitigation. By adopting intelligent route design, innovative foundation treatment, modular bridge structure and preventive disaster prevention engineering and other technical means, the project cost and operation and maintenance cost can be significantly reduced under the premise of ensuring driving safety, providing theoretical support and practical guidance for the sustainable development of complex terrain road engineering.

Keywords： complex terrain; road engineering; safety design; economic optimization

引言

随着国家“一带一路”倡议的深入推进与区域协调发展战略的全面实施，我国道路交通网络建设正向纵深发展。越来越多的工程项目不得不穿越山川峡谷、跨越江河湖泊、贯通丘陵台地等复杂地形区域，这些地质条件复杂、地貌形态多样、气候环境恶劣的区域，不仅给道路工程设计带来前所未有的技术挑战，更对工程安全性与经济性提出了严苛要求，传统的道路设计理念往往侧重于技术可行性分析。而忽视了安全性与经济性的协调统一，面对新时代高质量发展的客观要求与人民群众对安全出行的迫切期盼，如何在复杂地形条件下实现道路工程设计的安全性 with 经济性双重优化，已成为当前道路工程领域亟待破解的重大课题。

一、复杂地形下道路工程设计安全性 with 经济性的意义

（一）保障行车安全减少事故风险

复杂地形条件下道路工程安全性设计的首要目标在于最大程度保障行车安全，有效降低交通事故发生概率与伤亡损失。山区

道路因其坡陡弯急、视线受阻、气候多变等特点，历来是交通事故高发区域，据统计数据显示，山区道路交通事故率比平原地区高出35%以上，其中因道路线形不良、防护设施缺失、排水系统不完善等设计缺陷导致的事故占总数的48%，软土地基路段由于地基承载力不足、路面沉降不均等问题。极易引发路面开裂、桥

头跳车等安全隐患，严重威胁行车安全，跨河跨谷桥梁作为道路工程的控制性构筑物，其结构安全性直接关系到整条道路的通行能力与服务水平，一旦发生结构性损坏或功能性失效，不仅会造成巨大的经济损失，更可能导致重大人员伤亡。

（二）降低工程建设与维护成本

复杂地形道路工程经济性优化不仅体现在初期建设投资的合理控制，更重要的是通过全生命周期成本管理实现长远经济效益的最大化。在山区陡坡路段，传统的大挖大填施工方式不仅破坏生态环境，更会大幅增加土石方工程量与边坡防护成本，而采用桥隧结合、顺应地形的设计理念，虽然初期投资相对较高，但能够显著减少后期维护费用与环境治理成本。软土地基处理方面，盲目采用高强度地基处理方案会造成投资浪费，而通过精准的地质勘察与科学的处理方案选择，能够在满足承载力要求的前提下实现成本优化^[1]。

（三）提升道路使用寿命与效益

道路工程作为重要的基础设施投资，其使用寿命与综合效益直接影响国民经济发展与社会民生福祉。复杂地形条件下，恶劣的自然环境与频繁的气候变化对道路结构性能提出了严峻考验，如何通过科学的设计理念与先进的技术手段延长道路使用寿命、提升综合效益，是衡量工程设计水平的重要标准，在材料选择方面，针对不同地质条件与气候特点选用适宜的路面结构与材料组合。能够有效提高路面抗疲劳性能与耐久性^[2]。通过合理的荷载分析与应力计算，确保结构在设计使用年限内保持良好的服务状态；在排水系统设计方面，建立完善的路面排水与路基防护体系，有效防止水损害对道路结构的侵蚀破坏。

二、复杂地形下道路工程设计技术种类

（一）山区陡坡路段设计技术

山区陡坡路段作为复杂地形道路工程的典型代表，其设计技术的核心在于通过科学的线形设计与合理的工程措施。在确保行车安全的前提下最大程度适应地形条件，减少工程量与环境影响，现代山区道路设计技术主要包括三维线形优化设计技术、智能化选线技术以及生态适应性设计技术等，三维线形优化设计技术通过建立数字化地形模型与约束条件数据库，运用遗传算法、粒子群算法等智能优化方法，在满足技术标准与安全要求的前提下寻求土石方工程量最小、工程造价最低的最优线形方案^[3]。该技术能够综合考虑纵坡、平曲线半径、竖曲线长度等多重约束条件，通过多目标优化实现安全性与经济性的协调统一，智能化选线技术基于地理信息系统 (GIS) 与遥感技术，构建包含地质条件、水文环境、生态敏感区等多维信息的空间数据库，通过人工智能算法自动识别最优路径走向，避开地质灾害易发区、生态保护区等敏感区域，降低工程建设风险与环境影响成本。

（二）软土地基处理设计技术

软土地基因其含水量高、压缩性大、强度低、渗透性差等不良工程特性，给道路工程建设带来沉降控制、稳定性保证、工期延长等诸多技术难题。现代软土地基处理设计技术体系日趋完

善，主要包括预压固结技术、复合地基技术、置换技术以及加筋技术等多种处理方式，预压固结技术通过在软土地基上施加预压荷载并设置排水系统，加速土体固结过程，提高地基承载力并减少工后沉降，该技术具有处理效果可靠、工程造价相对较低的优点^[4]。但处理周期较长，适用于工期要求不紧迫的工程项目，复合地基技术通过在软土中设置桩体、置入加劲材料等方式，形成由桩体、加劲材料与天然软土组成的复合承载体系，显著提高地基承载力与变形控制能力，该技术处理效果显著、适应性强，但技术复杂、造价相对较高，适用于承载力要求高、沉降控制严格的重要工程。

（三）跨河跨谷桥梁设计技术

跨河跨谷桥梁作为复杂地形道路工程的关键控制性构筑物，其设计技术水平直接决定工程的安全性、经济性与美观性。现代桥梁设计技术呈现出大跨径化、轻型化、标准化、智能化的发展趋势，主要技术类型包括高性能材料应用技术、先进结构分析技术、施工工艺创新技术以及全寿命周期设计技术^[5]。高性能材料应用技术通过采用高强度混凝土、高性能钢材、新型复合材料等，在保证结构安全的前提下减少材料用量、降低结构自重，提高桥梁的跨越能力与经济性，先进结构分析技术基于有限元方法、非线性分析理论以及动力学分析技术，能够精确计算复杂荷载条件下桥梁结构的应力分布与变形特征，为优化结构设计、确保安全储备提供科学依据，施工工艺创新技术包括节段预制拼装、顶推法施工、支架现浇等多种施工方法，通过优选施工工艺能够缩短建设工期、降低施工风险、减少环境影响。

（四）防灾减灾工程设计技术

复杂地形条件下道路工程面临的自然灾害风险类型多样、影响程度严重，包括滑坡、泥石流、洪涝、冰雪、地震等多种灾害类型。防灾减灾工程设计技术的完善程度直接关系到道路的安全运营与可持续发展，现代防灾减灾工程设计技术体系包括灾害风险评估技术、工程防护技术、监测预警技术以及应急管理技术等多个层面，灾害风险评估技术基于历史灾害数据、地质勘察资料、气象水文信息等多源数据，运用概率统计方法、数值模拟技术、专家评判系统等手段，定量评估不同灾害类型的发生概率、影响范围与危害程度，为防灾工程的标准确定与方案选择提供科学依据^[6]。工程防护技术针对不同灾害类型采取相应的工程措施，如边坡防护工程、排水防涝工程、雪崩防护工程、抗震加固工程等，通过主动防护与被动防护相结合的方式，最大程度降低灾害对道路工程的破坏影响。

三、复杂地形下道路工程设计优化策略

（一）山区陡坡路段的安全性设计与经济性优化方案

山区陡坡路段的安全性设计与经济性优化必须建立在深度融合现代信息技术与传统工程经验的基础之上^[7]。通过构建多维度、多层次的设计决策体系实现双重目标的协调统一，在安全性设计方面，应当基于驾驶行为学理论与交通心理学原理。针对山区道路视距受限、纵坡较大、弯道密集等特点，采用渐进式线形

设计理念,通过合理设置缓和曲线长度、优化超高设置、完善视线诱导设施等措施,为驾驶员提供连续、舒适、可预期的行车环境,同时,结合山区气候多变、路面附着条件复杂等实际情况,在路面材料选择方面应优先考虑抗滑性能优异、耐久性强的高性能沥青混合料,并设置完善的路面排水与防滑设施,确保恶劣天气条件下的行车安全。应当充分运用数字化设计技术与大数据分析技术,建立包含地质条件、水文环境、生态因素、社会经济条件等多维信息的综合数据库,通过多目标优化算法寻求在满足技术标准与安全要求前提下的最优解。

（二）软土地基处理的技术创新与成本控制策略

软土地基处理技术的创新发展与成本控制策略的制定必须紧密结合工程实际需求与技术发展趋势。通过系统性的技术集成与管理创新实现处理效果与经济效益的双重优化,在技术创新方面,应当积极推广应用新材料、新工艺、新设备,如高效固化剂、智能压实设备、数字化监测系统等,通过技术手段的不断升级提升处理效果与施工效率。应当加强产学研合作,深入开展软土地基处理机理研究与技术攻关,重点突破深厚软土处理、复杂环境条件下施工、处理效果长期稳定性等关键技术问题,在成本控制方面,应当建立精细化的成本管理体系,通过优化设计方案、改进施工工艺、加强质量控制等手段降低工程造价,具体而言,在方案设计阶段应当充分利用既有地质勘察资料与相似工程经验,通过数值模拟分析与现场试验相结合的方式,精确确定地基处理范围、处理深度与处理参数,避免过度设计与重复处理。

（三）跨河跨谷桥梁的结构优化与投资效益提升

跨河跨谷桥梁的结构优化与投资效益提升是复杂地形道路工程经济性优化的关键环节,需要通过系统性的技术集成与管理创新实现结构性能与经济效益的协调发展。应当基于现代桥梁设计理论与计算方法,充分考虑地形条件、地质特征、水文环境、施工条件等多重因素,通过多方案比选与多目标优化确定最优的桥型方案与结构参数,具体而言,对于跨径较小、地质条件较好的河谷地段,可采用简支梁桥、连续梁桥等常规结构形式,通过标准化设计与工厂化预制降低建设成本。对于跨径较大、地质条件复杂的深谷地段,可采用拱桥、斜拉桥、悬索桥等大跨径结构形

式,通过结构优化与材料创新实现跨越能力与经济性的统一,在投资效益提升方面,应当建立基于全生命周期成本分析的投资决策模型,综合考虑建设投资、运营维护、更新改造、残值回收等各阶段成本与效益,通过量化分析确定最优的投资方案^[8]。

（四）防灾减灾工程的系统规划与成本效益平衡

防灾减灾工程的系统规划与成本效益平衡是确保复杂地形道路工程安全运营与可持续发展的重要保障,需要通过科学的风险评估与精准的投资配置实现安全目标与经济效益的有机统一。应当建立基于多灾种耦合分析的综合风险评估体系,通过历史灾害统计、数值模拟计算、专家咨询评判等多种手段,定量评估不同灾害类型的发生概率、影响程度与损失规模,为防灾减灾工程的标准确定与方案选择提供科学依据。应当统筹考虑工程防护与生态防护的协调发展,通过采用生态护坡、植被恢复、生物工程等绿色防护技术,在实现防灾减灾目标的同时促进生态环境的修复与改善,在成本效益平衡方面,应当建立基于风险分析的投资决策模型,通过量化分析防灾减灾工程的投资成本与预期效益,确定最优的投资规模与配置方案,具体而言,对于发生概率较高、影响程度较大的灾害类型,应当采用高标准的工程防护措施,确保道路运营安全。对于发生概率较低、影响程度有限的灾害类型,应当采用经济适用的防护措施,避免过度投资与资源浪费。

四、结语

复杂地形下道路工程设计的安全性研究是当代交通基础设施建设领域的前沿课题,其理论探索与实践创新对于推动我国道路交通事业高质量发展具有重要的战略意义。通过本文的系统分析可以看出,安全性与经济性并非对立的两极,而是相互促进、协调发展的统一整体,科学合理的设计理念与先进适用的技术手段,不仅能够有效保障道路运营安全,更能够在全生命周期内实现投资效益的最大化。随着新材料、新工艺、新设备的不断涌现,人工智能、物联网、大数据等新兴技术的深度应用,复杂地形道路工程设计将迎来更加广阔的发展空间。

参考文献

[1] 聂士达,刘辉,廖志昊,等.考虑复杂地形的越野环境无人车辆路径规划研究[J].机械工程学报,2024,60(10):261-272.
[2] 刘承,刘憬.贵州农村客运交通运输安全风险分析与对策措施探究[J].中国水泥,2024(S01):143-145.
[3] 叶文坤,欧泽锋.复杂地形区域水利工程进场道路和桥隧方案设计研究[J].广东水利水电,2023(10):102-105.
[4] 黄佳威,王永前,吴小娟.顾及地形差异的高速公路结冰预报模型研究[J].大气科学,2024,48(4):1499-1510.
[5] 陈思齐.浅析复杂地形下道路与桥梁工程的挑战与对策[J].汽车周刊,2024(6):0095-0097.
[6] 宋贞金.湿陷性黄土地区深V形沟路基填筑技术[J].中国地名,2024(5):0133-0135.
[7] 孟家玮,沈嘉诚,刘勇,等.山地风电场路堑边坡稳定性影响因素分析[J].中阿科技论坛(中英文),024(11):93-97.
[8] 刘锋刚,张为,罗进,等.复杂地形污水管网工程设计案例[J].给水排水,2024,50(7):130-135.

超设计使用年限的压力容器检验及安全评估

李伟光

身份证号: 21011419881225601X

DOI:10.61369/ME.2025050001

摘 要 : 压力容器是化工厂、炼油厂等工程盛放气体、液体的密封容器,在长期使用后,尤其是超出设计使用年限后,往往会出现各类故障与风险。为此,文章将从超设计使用年限的压力容器角度,探讨检验及安全评估,提出一些建议,希望能提升检验及安全评估成效,为压力容器安全、可靠使用奠定基础。

关 键 词 : 超设计使用年限;压力容器;检验检测;安全评估

Inspection and Safety Assessment of Pressure Vessels Exceeding Their Design Service Life

Li Weiguang

ID: 21011419881225601X

Abstract : Pressure vessels are sealed containers for holding gases and liquids in chemical plants, oil refineries and other projects, which tend to have various kinds of failures and risks after long-term use, especially after exceeding the design service life. In this regard, the article will discuss the inspection and safety assessment from the perspective of pressure vessels exceeding the design service life, and put forward some suggestions, hoping to improve the effectiveness of inspection and safety assessment, and lay the foundation for the safe and reliable use of pressure vessels.

Keywords : beyond the design life; pressure vessel; inspection; safety assessment

引言

特种设备关系着民众的生命及财产安全,会影响社会安全运转。比如截至2019年年底,全国特种设备共计1525.47万台。包括:锅炉38万余台、压力容器419万余台、起重机械244万余台、电梯709万余台、客运索道1089条、大规模游乐设施2万余台、场(厂)内专用机动车辆100万余台,气瓶1.64亿只、压力管道56.13万公里。压力容器常被应用于化工厂、加工厂以及炼油厂中,是相关行业的重要设施。压力容器有自身的使用年限,随着时间的推移,一些超出设计使用年限的压力容器可能在运行中发生各种隐患问题,给相关行业的生产带来极大隐患。因此,对于超出设计使用年限的压力容器,需要做好检验及安全评估工作,使其能满足压力容器的要求。从检验及安全评估的重要性来看,其能及时发现一些存在隐患的压力容器,通过对相关部件进行更换或者修复,能进一步降低安全事故发生概率,达成安全生产的目标。同时通过检验及安全评估,也能掌握超出设计使用年限压力容器的各项性能指标以及状态的情况,有助于制订运维措施来延长压力容器的使用寿命,保障压力容器能够稳定、可靠的运行。因此,文章从超设计年限的压力容器角度探讨检验及安全评估具有非常重要的价值,能避免相关压力容器在使用过程发生安全事故,达成安全生产的目标^[1]。

一、压力容器与检验安全评估

压力容器是化工厂、炼油厂生产中的关键设施,有传热、反应、分离以及储运等用途。从压力容器的特点来看,主要包括安全性、专业性、结构稳定性等,相关行业在使用压力容器之前,需要做好压力容器使用分析,以便消除压力容器在使用过程的安全隐患。

压力容器长期使用之后,可能会超出设计使用年限,进而对压力容器的使用带来风险。比如压力容器可能在超出设计年限后发生强度失效、刚度失效、失稳、腐蚀失效等问题,比如压力容

器承受应力超过材料屈服强度;压力容器超出正常范围,导致压力容器失效;压力容器使用可能会失去平衡、稳定的状态等。这些因素都会影响压力容器的正常使用,出现各种风险隐患。为了解决这一问题,相关企业需要做好定期检验,及时发现压力容器运行中的风险隐患,以便制定针对性的防控措施,延长压力容器的使用寿命,保障压力容器长期使用。以压力容器无损检验为例,在对超出设计使用年限压力容器的检验过程,可以引入无损检测技术,包括磁粉检测、渗透检测、射线检测、超声检测以及涡流检测等。比如在压力容器表面缺陷检测中,可以应用磁粉、渗透等无损检测方式,在实际检测中,应围绕压力容器应力集中

部位，比如球形储罐的支柱角焊缝、易造成环境开裂和机械损伤的部位、焊缝丁字口区域等，这些是压力容器可能发生风险隐患的关键位置，都应作为无损检测的重点。在压力容器内部检测方面，可以应用射线检测、超声波检测等技术，相关技术常用于压力容器制造、安装过程，检出率较高。在实际应用中，检测人员需要结合压力容器的壁厚、结构等方面信息，设计检测流程方案，发挥射线、超声波检测的优势。比如中厚壁容器（壁厚大于20mm）可优先选用超声波检测；薄壁容器（壁厚小12mm）对接焊缝优先选用射线检测。在检验要点方面，应关注修理、补焊的部位以及应力集中部分等，这些位置都可能再次出现问题，影响压力容器的正常使用^[9]。

对于超出设计使用年限的压力容器，除了利用检验方式找出问题以外，也需要做好压力容器的安全评估，这样能明确压力容器的使用要点，制定针对性的运维措施，延长压力容器的使用寿命。在实施安全评估时，一般参照 GB/T19624《在用含缺陷压力容器安全评定》等标准过程进行评估。GB/T19624主要内容包括对评定对象的状况调查（工况、历史、环境等）、缺陷检测及缺陷成因分析、材料检验（损伤、退化与性能等）等，在实际评估过程，需要相关人员按照要求进行评估。除了 GB/T19624 标准以外，GB/T35013也可以用于压力容器的安全评估，比如该标准主要评估多种损伤模式和缺陷，包括腐蚀减薄（局部减薄、均匀减薄和点蚀）、氢鼓包、氢致开裂和应力导向氢致开裂等。通过安全评估方式，可以掌握压力容器的运行状态以及各项性能，以便企业根据压力容器的实际情况以及评估结果，拟定针对性运维方案，以消除压力容器使用中的风险隐患，延长压力容器的使用寿命，保障压力容器安全、可靠的运行^[9]。

二、超设计使用年限的压力容器检验及安全评估面临的问题

对于超设计使用年限的压力容器，检验及安全评估是保障压力容器长期使用的关键，能及时找出压力容器使用中的隐患与问题，以便制定针对性的运维措施。但在实际应用过程，可能会面临一些问题，影响超设计使用年限的压力容器检验及安全评估效果。本章节将探讨超设计使用年限的压力容器检验及安全评估所面临的问题，以下将进行详细阐述。

（一）检验方案不完善

超设计使用年限的压力容器的检验过程，可能会面临检验方案不完善的问题，导致检验结果无法满足要求，比如超设计使用年限的压力容器的检验过程，会存在一些误差因素，包括计算误差、测量误差、不可避免误差等，主要原因包括检测设备、检测人员、检测环境以及检测技术等。比如在压力容器检验过程，检验设备是关键，如果检验设备在使用之前未进行测试，可能会存在检测精度不高等问题，导致压力容器检验出现误差。同时检验设备长期使用后还可能出现故障问题，如果相关企业缺乏定期运维，可能会导致后续检验的结果出现偏差，进而影响超设计使用年限的压力容器的检验成果。再如超设计使用年限的压力容器的检验过程会受到环境因素的影响，包括环境温度、环境湿度，如果检验环境控制不合理，就容易出现误差问题，影响超设计使用年限的压力容器的检验成果^[10]。

（二）安全评估过程不合理

在超设计使用年限的压力容器安全评估中，可能会面临不合理的问题，比如安全评估的内容及流程不合理，同时安全评估过程可能缺乏针对性的监督与管控，这可能导致安全评估过程出现不合理的问题。

（三）检验及安全评估队伍建设不足

在超设计使用年限的压力容器的检验及安全评估过程，队伍素质关系着检验与安全评估的效果，比如在超设计使用年限的压力容器的检验过程，检验人员对整个检验流程不熟悉，或者检验过程出现不规范的问题，就会影响超设计使用年限的压力容器的检验准确度。再如安全评估过程，评估人员对各类安全评估标准不了解，可能会影响安全评估的准确性^[10]。

（四）检验及安全评估实施缺乏保障

在超设计使用年限的压力容器的检验过程，保障措施关系着检验及安全评估的效果，比如内控建设保障、技术投入保障等。比如在超设计使用年限的压力容器的检验中，检验技术落后，未引入先进的检验技术或者设备，这就会影响检验成果。

三、超设计使用年限的压力容器检验及安全评估建议

对于超设计使用年限的压力容器，一般需要通过检验以及安全评估方式找出可能存在的问题及隐患，以便制定针对性的措施，延长压力容器的使用寿命，保障压力容器安全、可靠的运行。为此，本章节将根据上述问题，提出一些建议，希望能提升超设计使用年限的压力容器检验及安全评估水平，保障压力容器安全、可靠的运行。

（一）完善检验方案

对于超设计使用年限的压力容器检验工作，相关企业要完善检验方案，以保障检验过程顺利进行。一是检验准备。在超设计使用年限的压力容器检验之前，需要做好准备工作，包括技术准备、设备准备、环境准备等，避免检验过程出现误差。比如在设备准备方面，相关企业要安排专业人员在检验之前对涉及的设备进行检查，排除设备的功能故障，以保障设备能满足检验要求。在技术准备方面，相关企业应根据超设计使用年限的压力容器实际情况，合理选择检验技术，比如无损检测技术中，射线、超声等检测方式主要用于压力容器内部检测，而磁粉、渗透等无损检测技术主要用于压力容器外部检测。因此，在检验之前，要先明确检验的目标，之后再从适宜性、合理性以及经济等角度合理选择检验技术，以提升检验的准确度，减少检验误差。在环境准备方面，相关企业要根据所选择的检验技术，分析检验环境中的主要影响因素，包括温度、湿度等，之后再针对性调整，使其能满足超设计使用年限的压力容器检验要求。二是检验过程。在超设计使用年限的压力容器检验过程，检验人员应根据压力容器的实际情况，按照规范性、标准性的原则开展检验工作，比如定期对压力容器的资料进行审查，包括压力容器设计资料（强度计算书、设计图纸等），生产制造资料（产品合格证、监督检验证书、质量证明书），同时也要检查压力容器的结构、焊缝等。在压力容器壁厚测定方面，可以采用超声无损检测技术^[10]。

（二）做好安全评估

安全评估是保障超设计使用年限的压力容器长期使用的关键，

评估人员需要按照现行标准对压力容器进行评估，以便找出压力容器使用中的问题，为压力容器管理及运维提供参考。一是做好安全评估分析。在超设计使用年限的压力容器安全评估之前，评估人员需要做好安全评估分析，比如结合现行不同标准进行分析，明确安全评估的主要内容，以便制定合理的安全评估方案，保障超设计使用年限的压力容器安全评估效果。二是加强安全评估管控。基于超设计使用年限的压力容器安全评估过程，相关企业要做好安全评估管控工作，比如基于安全评估内容以及流程，设计针对性的管控与监督体系，这样可以及时发现超设计使用年限的压力容器安全评估中的问题，有助于不足的地方进行优化与完善，从而提升超设计使用年限的压力容器安全评估水平^[7]。

（三）建设专业队伍

基于超设计使用年限的压力容器的检验及安全评估要求，相关企业要组建专业化队伍，以提升压力容器检验及安全评估水平。一是人才引进。在超设计使用年限的压力容器的检验过程，相关企业要做好人才引进分析，结合常见人才引进要素，制订人才引进方案。比如分析人才引进要点，包括检验过程的人才需求、安全评估环节的人才需求等，同时也要根据自身实际情况，进行综合分析，以便制订适宜性、针对性的人才引进方案，实现组建高素质队伍的目标。在人才引进的选聘环节，相关企业要转变以往人才选聘理念，可以从人才对现代化技术的应用程度、人才的职业素质、人才的创新创造能力角度出发，以选出高素质的检验及安全评估人才。在人才引进之后，相关企业也要了解人才的一些需求，比如对薪酬、绩效方面，不同人才的需求也会存在差异，企业应根据人才需求，进行针对性调整与优化，以激发人才的工作积极性与主动性，进一步提升超设计使用年限的压力容器的检验及安全评估水平。第二，人才培养。在超设计使用年限的压力容器的检验及安全评估过程，相关企业可以从人才培养出发，根据现有检验人员以及安全评估人员实际情况制定针对性的培训教育方案，以提升相关人员的素质。以超设计使用年限的压力容器的检验培育为例，先对现有检验人员进行调研，了解当前检验人员的能力素养情况以及提升需求之后再搜集教育素材，制定针对性的人才培育方案，这样可以提升检验人员的素养能力，避免检验过程出现误差。当然，在人才培养过程，相关企业也要转变传统人才培养理念，可以推进线上线下培育模式，比如将超设计使用年限的压力容器的检验及安全评估的要点设计成线上视频课程，让检验人员与安全评估人员在业余时间到线上进行观看与学习，以此提升相关人员的素养能力，使其满足超设计使用年

限的压力容器的检验及安全评估的要求^[8]。

（四）制订保障措施

在超设计使用年限的压力容器的检验及安全评估过程，相关企业要制订保障措施，包括内控保障、技术投入保障等。一是内控保障。相关企业应根据超设计使用年限的压力容器的检验及安全评估要点，明确内控目标，将内控目标分解到检验及安全评估的各个环节，通过这种方式规范检验及安全评估工作，避免相关工作开展过程出现问题。同时，企业也可以从超设计使用年限的压力容器的检验及安全评估角度出发，营造良好的内控氛围，让所有人员参与其中，通过这种方式可以提升检验及安全评估效果。二是技术投入保障。在超设计使用年限的压力容器的检验及安全评估过程，相关企业要注重技术投入保障，比如根据超设计使用年限的压力容器的检验要求，拟定技术投入规划，加大资金投入力度，引进先进的检验技术及设备，以提升检验的准确度，同时企业也要注重数字化建设，加大大数据分析、物联网等技术的投入力度，以辅助超设计使用年限的压力容器的检验及安全评估，及时发现压力容器使用中的风险隐患，以便制定针对性的运维方案，保障压力容器能安全、可靠的运行^[9]。

四、结语

综上所述，压力容器在长期使用后，可能会发生超出设计使用年限的问题，这也会导致压力容器使用过程出现各类风险问题，严重影响压力容器的使用效果。为了解决这一问题，文章将探讨超设计使用年限的压力容器，分析检验及安全评估，提出一些建议，比如相关企业要安排专业人员在检验之前对涉及的设备进行检查，排除设备的功能故障，以保障设备能满足检验要求；检验人员应根据压力容器的实际情况，按照规范性、标准性的原则开展检验工作；基于安全评估内容以及流程，设计针对性的管控与监督体系，这样可以及时发现超设计使用年限的压力容器安全评估中的问题；将超设计使用年限的压力容器的检验及安全评估的要点设计成线上视频课程，让检验人员与安全评估人员在业余时间到线上进行观看与学习，以此提升相关人员的素养能力；注重数字化建设，加大大数据分析、物联网等技术的投入力度，以辅助超设计使用年限的压力容器的检验及安全评估，及时发现压力容器使用中的风险隐患等^[10]。希望上述探讨与分析能为超出设计使用年限的压力容器检验与安全评估提供参考，保障压力容器长期使用。

参考文献

- [1] 牟龙龙. 超服役压力容器定期检验安全评估分析 [J]. 品牌与标准化, 2024, (03): 130-132.
- [2] 苏明, 赵乾成, 张磊, 等. 浅析超设计使用年限压力容器的检验与安全评估 [J]. 中国设备工程, 2024, (05): 196-198.
- [3] 殷小明. 超设计使用年限的压力容器检验及安全评估方法探讨 [J]. 西部特种设备, 2024, 7(01): 20-24.
- [4] 雷艳. 压力容器检验中的可靠性与安全性评估研究 [J]. 产品可靠性报告, 2024, (01): 131-133.
- [5] 汪杰, 李建锋. 压力容器监督检验中不符合项的处理方法探讨 [J]. 特种设备安全技术, 2023, (06): 16-18+22.
- [6] 李斌. 工业锅炉和压力容器检验存在的问题与优化策略 [J]. 化纤与纺织技术, 2023, 52(12): 96-98.
- [7] 雷艳. 压力容器检验中的腐蚀与疲劳损伤评估与预测 [J]. 冶金管理, 2023, (21): 76-78.
- [8] 秦应鹏, 戚振, 李娜. 超服役压力容器基于风险评估的定期检验探讨 [J]. 化工装备技术, 2023, 44(01): 57-60.
- [9] 戚振, 程和新, 武军. 超服役压力容器定期检验安全评估探讨 [J]. 中国特种设备安全, 2021, 37(08): 68-70.
- [10] 陈学东, 范志超, 陈永东, 等. 我国高端压力容器设计制造与维护技术进展 [J]. 机械工程学报, 2023, 59(20): 18-33. DOI: 10.3901/JME.2023.20.018.

三相分离器的故障与处理措施研究

杨密¹, 刘杨², 许雯婷¹, 袁国钧¹

1. 安徽职业技术大学, 安徽 合肥 230011

2. 科威尔技术股份有限公司, 安徽 合肥 230094

DOI:10.61369/ME.2025050003

摘 要 : 三相分离器在原油处理等领域应用广泛, 其稳定运行对生产至关重要。本文深入剖析三相分离器常见故障, 如油中含水 / 水中含油超标、压力异常、液位异常等, 详细阐述每种故障产生的原因, 涵盖设备自身问题、操作不当以及外部工况波动等方面。同时, 针对不同故障提出具体且有效的处理措施, 旨在为相关操作人员提供全面的故障排查与解决思路, 保障三相分离器高效、稳定运行, 提升生产效率与经济效益。

关 键 词 : 三相分离器; 故障分析; 处理措施

Research on Fault and Treatment Measures of Three-phase Separator

Yang Mi¹, Liu Yang², Xu Wenting¹, Yuan Guojun¹

1. Anhui University of Applied Technology, Hefei, Anhui 230011

2. Kewell Technology CO.,LTD., Hefei, Anhui 230094

Abstract : Three phase separator is widely used in crude oil treatment and other fields, and its stable operation is crucial to production. This paper deeply analyzes the common faults of three-phase separator, such as excessive water content in oil/oil content in water, abnormal pressure, abnormal liquid level, etc., and expounds the causes of each fault in detail, including the problems of the equipment itself, improper operation and external working condition fluctuation. At the same time, specific and effective treatment measures are proposed for different faults, aiming to provide comprehensive troubleshooting and solution ideas for relevant operators, ensure the efficient and stable operation of three-phase separator, and improve production efficiency and economic benefits.

Keywords : three phase separator; failure analysis; treatment measures

引言

三相分离器作为油气田生产中的关键设备, 主要作用是将原油、水和天然气进行高效分离, 使原油得到初步处理, 降低集输站点生产过程中的油气损耗, 提高原油处理效率, 同时保证采出水回注水质达标, 对环境保护和节能降耗意义重大。然而, 在实际运行过程中, 三相分离器常常会出现各种故障, 影响其正常功能的发挥, 甚至导致生产中断^[1]。因此, 深入研究三相分离器的故障与处理方法具有重要的现实意义。

一、三相分离器常见故障及原因分析

(一) 油中含水 / 水中含油超标

油水界面调整不合适: 油水界面是三相分离器正常工作的关键参数之一。若油水界面调整过高, 会导致油室进水, 使油中含水超标; 若调整过低, 则会使水中含油超标。这通常是由于操作人员对设备运行状况判断不准确, 未能及时根据来液性质和流量等因素合理调整油水界面高度。

药品型号、加药浓度和方式不合适: 在原油脱水过程中, 需要添加破乳剂等药品来促进油水分离。如果药品型号选择不当, 无法有效破坏油水乳化状态; 加药浓度过低, 达不到破乳效果; 加药方式不合理, 如加药点位置不准确、加药不均匀等, 都可能导致油水分离不彻底, 造成油中含水或水中含油超标。

脱水温度较低: 原油的黏度受温度影响较大, 温度较低时, 原油黏度增加, 油水分离难度增大。如果三相分离器进口原油温度未达到合适范围, 会导致油水分离效果变差, 使油中含水或水

基金项目: 安徽省2024年自然科学研究项目“基于VB平台针对三相分离器工程应用软件的设计”(2024AH050898); 安徽省2024年自然科学研究项目“环保型缓蚀剂的设计、制备及缓蚀性能研究”(2024AH050905)。

作者简介: 杨密(1990-), 女, 四川营山人, 硕士研究生, 讲师, 研究方向: 化工过程机械、化工设备。

中含油超标。

来液量不稳定：来液量的剧烈波动会破坏三相分离器内部的稳定流场，影响油水的正常分离。当来液量突然增大时，设备来不及充分分离，可能导致油中带水或水中带油；而来液量突然减少，则可能使设备内部液位波动，同样影响分离效果^[2]。

（二）压力异常

压力过低或压力过高都将导致三相分离器生产的异常。

1.压力过低 三相分离器的压力维持部分依赖于来液中的伴生气。当来液原油伴生气量较少时，无法提供足够的气体压力，导致分离器内压力过低，影响设备正常运行。如果生产流程中存在一些小的泄漏点，如管线、阀门、法兰等部位若出现密封不严，发生泄漏，会使气体逸出，从而降低分离器内的压力。自动式压力调节阀用于调节分离器内压力，若其阀芯磨损、密封件损坏或出现卡滞等问题，导致关闭不严，会使气体持续排出，造成压力过低^[3]。浮球阀在分离器中起到控制液位和压力的作用。若浮球阀关闭不严，会导致液体泄漏，破坏分离器内的压力平衡，使压力降低。

2.压力过高 导致分离器内部压力超高的原因大致可以分为以下几点：当来液量超过三相分离器的设计处理能力时，设备内部液体增多，气体空间被压缩，导致压力升高；如果站内天然气系统压力整体偏高，会影响三相分离器内气体的排出，使分离器内压力升高；出口管线堵塞、阀门故障未完全打开等原因，会导致分离器内的油、水、气排出受阻，从而使压力升高；自力式压力调节阀若出现故障，无法正常开启，会使气体无法及时排出，导致分离器内压力持续上升。

（三）液位异常

分离器系统工作压力过高或过低：系统压力异常会影响液体在分离器内的流动和液位平衡。压力过高时，液体受到较大压力作用，可能导致液位下降；压力过低时，液体流动不畅，液位可能升高^[4]。

浮球阀关不严或打不开：浮球阀故障会直接影响液位控制。关不严会导致液体泄漏，使液位降低；打不开则无法正常控制液位，导致液位异常升高。

来液量过大：来液量过大超出设备处理能力时，会使三相分离器内液位迅速上升，出现液位异常，影响后续分离工作。

（四）其他故障

1.油水混层 在添加破乳剂等药品时，若药品型号、加药浓度和添加方式不合适，都会导致油水不能有效分离，出现混层现象。三相分离器在长期运行过程中，原油中的泥沙、杂质等会在罐内积累，如果排沙不及时，影响油水分离效果，导致油水混层^[5]。同时前续工艺导致来液量不稳定，不稳定的来液量极易破坏分离环境，使油水不能按正常流态分离，容易造成油水混层。

2.水室进油 沉降室是油水分离的重要区域，若在此处出现油水混层，会导致水室进油。药品添加不当、泥沙等杂质含量较多、来液量不稳定等因素都可能引发沉降室油水混层。除此之外，油水界面调节不当，也会使得油水界面混乱，油相进入水室，从而影响分离效果。

3.三相分离器积砂 根据来源不同，原油中含有的砂石量也不同。原油进入三相分离器之前需要先进行除砂预处理，如果未进行充分有效的除砂预处理，泥沙会跟随来液进入分离器内部，逐渐沉积，造成分离器底部积砂问题，影响设备正常运行。

二、三相分离器故障处理措施

（一）油中含水 / 水中含油超标处理措施

调整油水界面：根据实际运行情况，通过液位控制系统，合理调整油水界面高度，使油水分界清晰，确保油中含水和水中含油在合格范围内。在调整过程中，需密切关注分离器出口油、水的质量指标。

优化药品使用：选择适合原油性质的破乳剂等药品，根据来液量和油水乳化程度，精确计算并调整加药浓度^[6]。同时，优化加药方式，确保药品均匀分散在原油中，提高破乳效果。例如，可以通过实验确定最佳加药点和加药时间间隔。

提高脱水温度：检查和调整原油加热设备，使三相分离器进口原油温度达到合适的范围，一般根据原油性质和工艺要求，将温度控制在一定区间内，以降低原油黏度，促进油水分离。

稳定来液量：与上游输油部门协调，调整输油方式和排量，尽量保持来液量的稳定。也可以采用缓冲罐等设备，对来液进行缓冲和调节，减少来液量波动对三相分离器的影响。

（二）压力异常处理措施

1.压力过低处理措施

增加气源或补气：如果来液伴生气量不足，可考虑从其他气源补充气体，提高分离器内压力。例如，可以引入站内其他装置的剩余气体或使用压缩空气进行补气。

检查并修复泄漏点：对整个流程进行全面检查，包括管线、阀门、法兰等部位，使用检漏仪等工具查找泄漏点。发现泄漏后，及时进行密封处理，如更换密封垫、修复管线裂缝等^[7]。

维修或更换压力调节阀：对于自动式压力调节阀关闭不严的问题，拆卸调节阀，检查阀芯、密封件等部件的磨损情况，进行修复或更换。修复后，需对调节阀进行调试，确保其正常工作。

维修或更换浮球阀：检查浮球阀的密封性能和动作灵活性，如有损坏或故障，及时更换浮球阀。安装新浮球阀后，进行密封性测试，确保其能有效控制液位和压力。

2.压力过高处理措施

控制来液量：适当开启旁通阀门，将部分来液分流，控制进入三相分离器的液量，使其在设备设计处理能力范围内。同时，与上游部门沟通，协调降低来液量。

协调降低天然气系统压力：与站内天然气系统相关部门联系，共同分析系统压力高的原因，采取相应措施降低系统压力，如调整其他用气设备的流量、优化天然气输送管网等。

检查并疏通出口工艺：对三相分离器出口管线、阀门等进行检查，清除堵塞物，修复故障阀门，确保出口工艺畅通。例如，可以使用管道疏通工具或高压水冲洗等方法清理管线堵塞。

维修或更换自力式压力调节阀：若自力式压力调节阀打不

开, 检查其驱动装置、阀芯等部件, 判断故障原因。对于无法修复的调节阀, 及时更换新的调节阀, 并进行调试和校准。

(三) 液位异常处理措施

调节系统压力: 检查自力式压力调节阀等压力控制设备的工作状态, 合理调节分离器系统工作压力, 使其恢复到正常范围, 从而稳定液位。在调节过程中, 密切关注液位变化。

控制来液量: 当来液量过大导致液位异常时, 采取与压力过高时控制来液量相同的措施, 即开启旁通阀门分流来液, 协调上游部门降低来液量, 使液位恢复正常。

(四) 其他故障处理措施

1. 油水混层处理措施

优化药品使用和加药方式: 同油中含水 / 水中含油超标处理措施中关于药品的部分, 通过优化药品相关因素, 改善油水分离效果, 消除油水混层现象。

排污或清罐: 定期对三相分离器进行排污操作, 排出罐内积累的泥沙、杂物等。当罐内积沙杂物较多影响分离效果时, 进行清罐作业, 彻底清理罐内沉积物, 恢复设备正常分离性能。

稳定来液量: 采取与稳定来液量相关的措施, 减少来液量波动, 为油水分离创造良好的条件, 避免油水混层。

2. 水室进油处理措施

调整操作和排污: 关闭水室出口阀门, 防止油进一步进入水室。调整上游输油方式和排量, 使来液稳定。同时, 进行排污操作, 排出水室中的油和杂质, 降低水室进油对设备的影响。

合理调节油水界面: 根据实际情况, 调高油水界面, 使油水分离恢复正常。在调节过程中, 密切观测出口水化验指标, 直到水质达标。

3. 三相分离器积砂处理措施

对三相分离器进行定期排污除砂, 制定合理的排污除砂计划, 定期打开三相分离器的排污口, 排出积砂。排污时, 注意观察排出的砂量和性质, 根据实际情况调整排污周期和时间。对于积砂严重的分离器, 可以采用高压水冲洗等方式进行更彻底的除砂。

三、预防措施

(一) 定期维护保养

建立完善的三相分离器定期维护保养制度, 定期对设备进行

全面检查和维护。包括检查设备的外观、管线、阀门、仪表等部件是否有损坏、泄漏等情况; 对液位计、压力计等仪表进行校准, 确保其测量准确; 清理设备内部的沉积物、杂质等, 防止积砂、积垢影响设备运行。同时, 定期对设备的易损件, 如密封件、阀门等进行更换, 保证设备的密封性和正常动作。

(二) 优化操作流程

加强操作人员的培训, 使其熟悉三相分离器的工作原理、操作流程和注意事项。制定详细且合理的操作规程, 要求操作人员严格按照规程进行操作。在操作过程中, 密切关注设备的运行参数, 如压力、液位、温度、流量等, 及时发现并处理异常情况。同时, 根据来液性质和生产要求, 合理调整设备的运行参数, 确保设备在最佳工况下运行。

(三) 加强监测与预警

安装先进的监测系统, 对三相分离器的运行状态进行实时监测。通过传感器采集设备的压力、液位、温度等参数, 并将数据传输至监控中心进行分析处理。当监测到参数异常时, 及时发出预警信号, 提醒操作人员采取相应措施。例如, 可以设置压力、液位的上下限报警值, 当参数超出设定范围时, 系统自动报警, 以便操作人员及时调整或进行故障排查。

四、结语

三相分离器在原油处理等工业生产中扮演着重要角色, 其运行状况直接影响生产效率和经济效益。通过对三相分离器常见故障, 如油中含水 / 水中含油超标、压力异常、液位异常等的深入分析, 明确了故障产生的原因, 涵盖设备自身问题、操作不当以及外部工况波动等多方面因素。针对不同故障提出了相应的处理措施, 包括调整油水界面、优化药品使用、维修或更换故障部件、控制来液量等。同时, 强调了预防措施的重要性, 通过定期维护保养、优化操作流程和加强监测与预警等手段, 可以有效降低故障发生概率, 保障三相分离器的稳定、高效运行, 为工业生产的顺利进行提供有力保障。在未来的生产实践中, 还应不断总结经验, 持续改进设备维护和操作管理方法, 进一步提高三相分离器的运行可靠性和生产效益。

参考文献

- [1] 李政杰. 三相分离器的常见故障与处理措施研究 [J]. 中国设备工程, 2024(21): 175-177.
- [2] 田德鹏. 卧式三相分离器水室收油技术研究与应用 [J]. 设备管理与维修, 2023(05): 20-21.
- [3] 崔博. 浅谈三相分离器故障分析及生产措施 [J]. 化工管理, 2020(5): 154.
- [4] 卢雄辉. 海上设施三相分离器旁通生产研究与探索 [J]. 石化技术, 202, 229(4): 93-94.
- [5] 杨树莲. 剖析三相分离器压液故障原因及处理 [J]. 河北企业, 2023(07): 158-160.
- [6] 朱向飞. PID控制参数对重力式三相分离器生产工艺的影响 [J]. 石油科学通报, 2023, 8(02): 179-192.
- [7] 谭然, 王宏超. 某海上平台生产分离器内部改造升级 [J]. 化工管理, 2024(28): 148-150.

船舶设备故障预测和维护管理方法分析

梁军

扬州市港航事业发展中心, 江苏 扬州 225000

DOI:10.61369/ME.2025050013

摘 要 : 船舶设备故障预测及维护管理技术的发展为海运行业带来了革命性变化。传统的定期维护和事后维修模式已无法满足现代船舶高效运营的需求, 恶劣的海洋环境使设备故障风险持续上升。基于条件的监测技术通过实时数据采集, 能够提前识别设备异常状态, 预测性维护技术结合人工智能算法, 可将设备故障率降低37%, 延长大修间隔30%。数字化维护管理系统通过集成传感器网络与云计算和机器学习技术, 实现了设备状态的智能诊断及预警。实验验证表明, 综合应用预测性维护技术的船舶, 维护成本可降低22%, 设备可靠性显著提升, 为船舶行业的智能化发展提供了重要技术支撑。

关 键 词 : 船舶设备; 故障预测; 维护管理; 基于条件监测; 预测性维护

Analysis of Fault Prediction and Maintenance Management Methods for Marine Equipment

Liang Jun

Yangzhou Port and Shipping Industry Development Center, Yangzhou, Jiangsu 225000

Abstract : The development of fault prediction and maintenance management technologies for marine equipment has brought revolutionary changes to the maritime industry. Traditional periodic maintenance and post-failure repair models can no longer meet the demands for efficient operation of modern vessels, as the harsh marine environment continuously increases the risk of equipment failures. Condition-based monitoring technology, through real-time data acquisition, enables the early identification of abnormal equipment states. Predictive maintenance technology, combined with artificial intelligence algorithms, can reduce equipment failure rates by 37% and extend overhaul intervals by 30%. A digital maintenance management system integrates sensor networks with cloud computing and machine learning technologies to achieve intelligent diagnosis and early warning of equipment conditions. Experimental validation demonstrates that vessels incorporating predictive maintenance technologies can reduce maintenance costs by 22% and significantly enhance equipment reliability, providing crucial technological support for the intelligent development of the marine industry.

Keywords : marine equipment; fault prediction; maintenance management; condition-based monitoring; predictive maintenance

引言

船舶设备的复杂性及恶劣的工作环境使得设备故障频发, 严重影响船舶的运行效率及安全性。传统的维护方法, 如定期维护及事后维修, 往往无法及时发现与预防故障, 导致维护成本高昂且效率低下。随着人工智能与大数据及物联网等技术的发展, 船舶设备故障预测及维护管理正逐渐向智能化与自动化方向发展。现代船舶设备维护管理迫切需要建立科学有效的故障预测体系, 以降低运营风险, 提高设备使用效率。智能化维护技术的应用将为船舶行业的安全高效运营提供重要保障。

一、船舶设备故障预测和维护管理概述

船舶设备故障预测及维护管理作为确保海上运输安全的核心技术体系, 在现代船舶技术快速发展及船舶规模不断扩大的背景

下显得尤为关键。船舶设备的复杂性日益增加, 恶劣的海洋工作环境使得设备故障频发, 严重影响船舶的运行效率及安全性, 传统的定期维护及事后维修方法没法及时发现以及预防故障, 导致维护成本高昂且维护效率比较低下。上海海事局的数据显示, 在

134艘发生故障的船舶当中，86%的故障是源于主机问题，剩余14%则是辅机及舵机出现故障，这表明船舶机电设备故障已经成为航行安全的主要隐患。随着人工智能与大数据及物联网等先进技术逐渐得到应用，船舶设备故障预测及维护管理正朝着智能化及自动化方向不断发展，通过整合先进的监测技术与数据分析及智能算法，能够实现对设备状态的实时监控及智能诊断，进而提高故障预测的精准度并提升维护管理的效率。

二、船舶设备故障预测技术方法体系

（一）传统预测方法及其局限性分析

传统的船舶设备故障预测工作主要依靠经验丰富的技术人员，通过观察设备外观与听诊设备声音以及手动检查等一系列方式，来进行设备状态的评估，并且会通过检查设备的振动情况与声音特征及温度变化等物理参数，以此来判断设备工作状态是否处于正常状态。在实际的应用场景当中，技术人员需要对设备的外观进行十分细致的检查，还会通过敲击听音等传统手段，来识别设备内部可能存在的磨损或者松动等方面的问题，然而这种依赖人工感官进行判断的方式，在海洋环境复杂多变的条件之下显现出了比较明显的不足。

因为这种方法高度依赖于技术人员个人的经验积累以及直觉判断能力，所以在面对船舶设备种类繁多与故障模式复杂的现实状况时，很容易出现主观性的误判情况，尤其是在设备故障征兆尚未明显显现出来的早期阶段，传统方法很难提供及时且有效的预警信息^[1]。而且传统的预测方法没有办法实现对设备状态的连续实时监控，通常都是在问题已经显现出来，甚至设备已经发生故障之后才能够发现异常情况，从而错过了最佳的预防性维护时机，导致维护工作存在的被动性及滞后性问题非常突出。

（二）基于条件监测的预测技术

船舶设备状态监测系统通过借助传感器网络，实时收集各项设备的关键参数，以此为设备健康评估奠定数据基础，对这些监测系统收集来的监测数据进行高效处理与深入分析，是精准预测设备可能出现故障的必要环节。

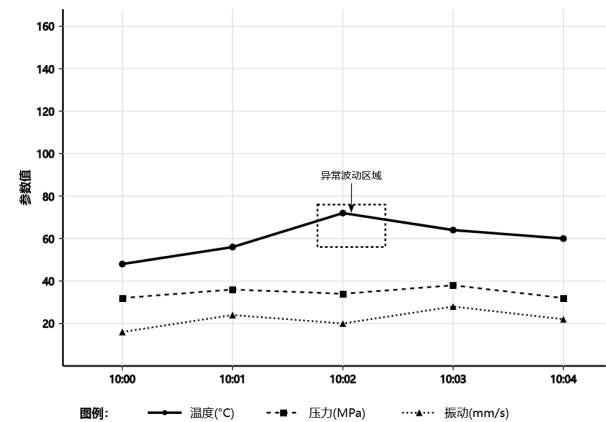


图1 监测数据趋势图

从图1能够看出船舶主机运行关键参数变化有特定规律，温度参数的波动情况十分明显，压力参数相比之下则处于相对稳定状

态，振动参数呈现出周期性的波动特征。监测系统可对这些数据进行实时跟踪，从而及时发现异常状况，要是温度超出了正常范围系统就马上发出预警，并向维护人员发送故障风险提示^[2]。通过数据分析能够揭示出正常工况下，各个参数之间存在着关联，一旦某个参数出现异常波动往往会引发其他相关参数产生连锁反应，监测系统就是利用这种关联性来提高故障预测的准确性与可靠性。

（三）智能预测算法技术实现

人工智能尤其是机器学习算法正在变革船舶设备故障预测领域，它凭借强大数据分析及模式识别能力训练神经网络模型，能够精准识别设备故障复杂特征，哪怕是人难以察觉的细微变化也可捕捉到，进而提前发现故障隐患^[3]。这种智能预测算法及物联网技术紧密结合，构建智能化船舶设备监控管理系统，通过在关键设备上安装高精度传感器网络，可实时收集设备运行数据，然后将其上传到中央监控平台进行统一处理。决策树算法在船舶设备故障预测中扮演着重要角色，其核心的信息增益计算公式为：

$$G(A)=I(s_1,s_2,...,s_m)-E(A) \quad (1)$$

式中：G(A)指的是属性A划分样本集合S时所产生的信息增益， $I(s_1, s_2, \dots, s_m)$ 代表着对样本进行分类所需要的期望信息总量，E(A)的意思是属性A所带来的期望信息量。

人工智能系统依靠深度学习与决策树等算法，对大量运行数据开展深入分析及挖掘工作。一旦检测到设备运行参数出现异常波动情况，系统就会立刻启动预警机制，并且提供有针对性的维护建议方案。智能预测算法具备自学习的功能，能够依据设备的历史运行数据不断调整及优化预测模型的精度，还能通过反复迭代学习持续提升故障识别的准确性及预警的及时性。机器学习算法在处理复杂的非线性关系方面有着出色表现，能够从多个维度的设备参数当中，提取出关键特征并且构建出精确的故障预测模型。

三、船舶设备维护管理策略分析

（一）维护策略制定优化

制定船舶设备维护策略，需要综合权衡设备重要程度与运行环境特点以及故障可能造成的后果，应建立基于风险评估的分层维护体系，来优化维护资源配置并持续提升管理效率。选择维护策略时对于主机与舵机以及通信系统等关键设备，优先采用状态监测维护，也就是通过实时监控设备运行状态来决定最佳维护时间，对于非关键设备可采用定期维护以降低成本并简化管理。维护计划必须充分考虑船舶的运营环境及使用状况，常在恶劣海况下运行的船舶要制定更频繁的维护周期及更严格的监测标准，主要在近海或港口运行的船舶可适当延长维护间隔，但仍需定期检查以确保设备正常运行。维护策略的制定还应基于设备制造商推荐的维护周期及历史故障记录，通过数据分析确定设备的最佳维护频率，并建立有效的数据收集及分析系统，及时捕捉设备状态的细微变化，要确保维护计划能够根据实时运行数据及环境变化

进行灵活调整。

（二）维护资源优化配置

船舶维护资源配置涉及人力与备件及设备以及信息系统等多方面需统筹协调，这些资源的合理分配直接关联维护效率与成本控制情况，其优化程度更是决定维护管理体系能否实现长期稳定发展。

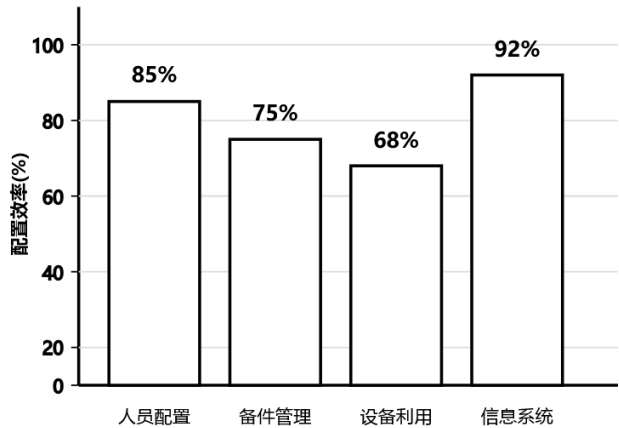


图2 维护资源配置分析图

从图2能够看出各类维护资源的配置效率存在很大差别，信息系统配置效率高达92%充分说明数字化管理系统，在提高维护效率方面效果显著且作用关键。人员配置效率为85%，表明专业维护团队是船舶设备维护的核心力量，合理的人员配置及技能培训可有效提升维护效率。备件管理效率为75%说明科学的备件库存管理，对保障维护工作连续性至关重要，适当的备件储备能有效缩短故障修复时间^[4]。设备利用效率为68%相对较低，说明维护设备及工具的配置利用还有提升空间，需要改进配置策略提高使用效率来提升整体维护效能。资源配置效率的差异化，表现反映出不同维度资源在维护管理体系中的重要程度及发展潜力，信息系统的高效率表现为数字化转型提供了有力支撑，而设备利用效率的相对滞后，则为未来优化工作指明了重点方向。通过建立资源配置的动态调整机制及持续改进体系，船舶维护管理能够实现各维度资源的协同发展及整体效能的最大化。

（三）数字化管理系统构建

把先进信息技术及智能化理念整合起来，去打造一个数字化的维护管理系统，其目的是实现船舶设备从头到尾的数字化监控与智能决策支持，以此来彻底改变船舶维护管理的方式并大幅提高效率^[5]。新一代船舶维护管理软件融合了高级算法及大数据分析能力，能够实时分析船舶上大量传感器所采集的数据，通过捕捉设备性能的细微变化来实现对设备状态的全面监控，它有着友好的图形界面设计，即使不是专业人员也能快速掌握，并轻松查看设备状态与历史维护记录及故障报告。软件集成了故障诊断工具，使其成为强大的决策辅助工具，在设备出现问题的时候，能提供可能的原因清单与建议的维修方案以及更换零件的建议，从而显著缩短故障诊断及维修时间。数字化系统通过构建设备故障预测模型，实现对设备运行状态的智能评估，这里面设备健康指数的计算方法如下：

$$H = \frac{\sum (W_i \times P_i)}{\sum (W_i)} \tag{2}$$

式中：HI指的是设备运行状况的健康程度， W_i 表示第*i*个监控指标的重要性程度， P_i 是第*i*个监控指标经过标准化处理后的数值，*n*代表监控指标的总个数。

数字孪生可视化系统借助三维数字化技术以直观方式呈现船舶各类场景信息，为航运公司提供从整体船舶到各个系统再到具体元件的全面信息展示，以此实现船舶运营与维修及保养一体化的智能管理模式。该系统运用虚拟现实技术构建船舶设备的数字化模型，让维护人员能在虚拟环境中，进行设备状态分析及维护操作预演，进而显著提高维护工作的精确性及安全性。

四、故障预测和维护管理技术方法效果分析

（一）实施效果量化评估

船舶设备故障预测及维护管理技术的实施效果，需要通过科学的量化评估体系进行客观衡量，通过对比实施前后的关键性能指标变化来验证技术应用的实际价值及改进效果。

| 表1 船舶设备智能维护系统实施效果对比 | | | |
|---------------------|--------|--------|--------|
| 评估指标 | 传统维护模式 | 智能维护模式 | 改进幅度 |
| 故障预测准确率 (%) | 65.2 | 98.15 | +32.95 |
| 设备故障率 (%) | 58.7 | 37.0 | -37.0 |
| 维护成本降低 (%) | - | 22.0 | -22.0 |
| 大修间隔延长 (%) | - | 30.0 | +30.0 |
| 设备可靠性提升 (%) | - | 25.8 | +25.8 |

通过表1可以发现，智能化维护管理系统在多个关键指标上实现了显著改善，故障预测准确率从传统维护模式的65.2%大幅提升至98.15%，提升幅度达到32.95个百分点，这一显著改进充分证明了人工智能算法及机器学习技术，在设备状态识别及故障预警方面的技术优势。设备故障率的大幅降低更是直接体现了预测性维护技术的实际效果，从58.7%降低至37%的改进幅度达到37个百分点，有效减少了设备意外停机及维修频次。维护成本的降低及大修间隔的延长，进一步证明了智能维护技术在经济效益方面的突出表现，22%的成本降低及30%的大修间隔延长为船舶运营商带来了可观的经济收益。

（二）经济效益与成本控制分析

船舶设备故障预测及维护管理技术的经济效益分析，表明综合应用预测性维护技术的船舶在维护成本方面，实现了22%的显著降低，这一成本控制效果主要源于设备故障率，从传统模式下的高频发生状态降低37%，有效减少了紧急维修及备件更换的费用支出。智能化维护管理系统通过将故障预测准确率提升至98.15%的高水平，使维护人员能够在设备发生故障之前制定科学合理的维护计划，避免了传统被动维修模式下，因设备突发故障而产生的高额抢修费用及停航损失。大修间隔的延长幅度达到30%为船舶运营企业带来了直接的经济效益，通过减少大修频次及优化维护资源配置，企业能够将更多资金投入核心业务发展及技术升级改造中，实现资源配置的最优化及投资回报的最大

化。预测性维护技术的投资回报周期相对较短，通过设备可靠性的显著提升及运营效率的持续改善，智能维护系统产生的经济效益能够在短期内覆盖技术投入成本，为船舶企业的可持续发展及市场竞争力提升奠定了坚实的经济基础。

五、结语

船舶设备故障预测及维护管理技术的综合应用为海运行业带来了显著效益。通过运用基于条件的监测与预测性维护及人工智

能等先进技术，船舶设备的可靠性得到显著提升，维护成本有效降低。实验验证表明，智能化维护管理系统能够将故障预测准确率提升至98.15%，维护成本平均降低22%，设备故障率减少37%。未来随着传感器技术与边缘计算以及5G通信等技术的进一步发展，船舶设备维护将更加智能化及精准化。船运企业应加快数字化转型步伐，建立完善的数据采集及分析体系，培养专业技术人才，为实现船舶设备的全生命周期智能管理奠定坚实基础。

参考文献

- [1] 刘震, 李佳佳, 俞灵旻. 船舶设备故障预测和健康管理产业发展现状及趋势研究 [J]. 船舶工程, 2023, 45(5): 55-58.
- [2] 徐雪慧, 陈柳. 物联网技术在船舶电子设备故障诊断中的应用 [J]. 舰船科学技术, 2021(22): 160-162.
- [3] 汪益兵, 韩志豪, 站翌婷. 面向智能船舶的设备故障预测与管理系统 [J]. 船舶工程, 2025, 47(03): 93-98.
- [4] 万云. 基于云服务支持下的船舶设备远程故障维护研究 [J]. 船舶物资与市场, 2024, 32(09): 107-109.
- [5] 徐飞. 云服务支持下的船舶设备远程故障维护分析 [J]. 中国设备工程, 2024, (06): 80-82.

船舶耐波性提升措施对机舱设备可靠性的影响研究

马佳雪, 陈小月, 兰子坤, 王天茨

重庆交通大学, 重庆 400074

DOI:10.61369/ME.2025050016

摘 要 : 针对复杂波浪环境下船舶机舱设备故障率升高的问题, 本研究探究耐波性提升措施对设备可靠性的影响机制。分析结构型减摇技术、系统型稳定性控制及智能控制策略三类措施特性, 建立包含振动阈值与失效模式的机舱设备可靠性评价体系。采用多体动力学耦合模型仿真典型工况下措施实施效果, 结合设备抗冲击改造与运维策略调整提出优化路径。结果表明减摇措施显著降低设备动态载荷, 但部分系统增重可能反向增加主机负荷, 需依据航区特性针对性选用智能主动减摇技术以平衡耐波性与可靠性需求。

关 键 词 : 船舶耐波性; 机舱设备; 可靠性; 减摇技术

Study on the Influence of Ship's Wave Resistance Improvement Measures on the Reliability of Engine Room Equipment

Ma Jiaxue, Chen Xiaoyue, Lan Zikun, Wang Tianci

Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074

Abstract : To address the issue of increased failure rates in ship engine room equipment under complex wave environments, this study investigates the impact mechanism of wave resistance improvement measures on equipment reliability. The characteristics of three types of measures—structural anti-heeling technology, system-level stability control, and intelligent control strategies—are analyzed. A reliability evaluation system for engine room equipment is established, incorporating vibration thresholds and failure modes. A multi-body dynamic coupling model is employed to simulate the effectiveness of these measures under typical operating conditions. Optimization pathways are proposed by integrating equipment impact-resistant modifications with operational maintenance strategy adjustments. The results show that the sway reduction measures can significantly reduce the dynamic load of the equipment, but the weight increase of some systems may increase the load of the main engine in reverse. Therefore, intelligent active sway reduction technology should be selected according to the characteristics of the navigation area to balance the requirements of wave resistance and reliability.

Keywords : ship seakeeping; engine room equipment; reliability; anti-heeling technology

引言

内河船舶在复杂风浪环境中航行时, 耐波性不足引发的剧烈横摇与垂荡运动长期威胁机舱设备运行安全。主机异常振动、辅机密封失效等故障频发, 亟需结合智能化监测手段实现动态优化。当前减摇措施多聚焦船体运动控制, 其附加载荷对精密仪表的传导效应尚未系统化。本文结合智能仿生协同探测系统中的动态避障算法与波浪预测技术, 揭示耐波性改造与设备寿命的耦合机制。亟需揭示结构减摇技术、主动控制系统与智能算法三类措施对机舱关键设备动态响应的差异化影响规律, 为高可靠性船舶设计提供理论支撑。

一、船舶耐波性提升措施分类

(一) 结构型减摇技术

结构型减摇技术通过优化船体几何构型或附加装置直接抑制波浪扰动能量传递, 减摇鳍作为典型代表采用机翼剖面设计, 其工作原理依赖液压驱动系统实时调整鳍角, 利用流体动力学原理产生与横摇力矩反向的升力。鳍片展弦比与后掠角的精细化设计

可提升 25% 以上力矩输出效率, 但高航速下空化效应会削弱实际减摇效果。舦龙骨则通过焊接于船体舦部的纵向板状结构增加横摇阻尼, 其优化方案集中于截面形状迭代与材料轻量化, V 型截面相比传统矩形截面在湍流中能额外产生 8%–12% 的涡流耗散。

(二) 系统型稳定性控制

系统型稳定性控制通过流体与机械的协同重构船舶质量分布实现耐波性提升。压载水动态调配系统的核心技术在于高精度流

量传感器与模糊 PID 控制器的深度耦合，该系统实时采集横倾角信号与波浪频率数据，通过闭环控制算法驱动大功率双向泵组在 10 秒内完成数千吨压载水的跨舱调拨。泵组采用轴向柱塞式结构配合变频电机，流量调节精度达 $\pm 2\%$ ，但高压管路产生的 120dB 流体噪声需通过亥姆霍兹共振器抑制。主动式减摇水舱创新性地利用 U 型管道内自由液面振荡特性，当船舶横摇周期与波浪周期接近时，通过气动阀门精准调节水锤效应强度，使液面振荡相位与船体运动反相。在遭遇周期 6–10 秒的规则波时，该系统通过调节 U 型管截面积比实现 40% 减摇率，但水舱固有频率需避开主机 4.8Hz 的激振频率带以防诱发共振。液压执行机构的工程挑战集中于空间布局优化，直径 300mm 的主供油管路沿机舱顶部敷设需穿越电缆托架区，占用高度空间 0.8 米导致主机吊装通道宽度从 1.5 米缩减至 0.98 米，大修时需额外拆卸上部管路增加 16 工时。液压冲击引发的压力脉动具有 5–15MPa 幅值、20–150Hz 频宽特征，其能量通过管夹传导至仪表盘柜引发压力表指针持续颤振，误差最高达量程的 12%。解决方案包括在传感器接口处安装容积式脉动阻尼器，其不锈钢膜片与充氮腔体设计可将脉动幅值衰减至 0.3MPa 以下，同时采用卡套式连接替代法兰连接消除 80% 的管路结构噪声传递。系统运行期间液压油温升达 45℃，需在机舱顶部增设专用风冷散热通道避免高温导致密封件加速老化。

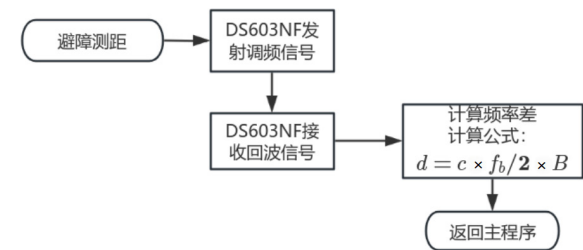


图1 避障测距流程图

（三）智能控制策略

智能控制策略通过数据驱动实现耐波性措施的动态优化。基于浪高预测的自适应 PID 算法融合 X 波段雷达监测数据，构建时间序列模型提前预判运动趋势。当雷达检测到波浪频率接近主机固有频率时，系统自动抑制减摇鳍行程，避障测距流程图如图 1 所示。核心控制逻辑采用动态稳定性保障机制，当雷达检测到波浪谐振频率接近主机固有频率 5.2Hz 时，控制系统自动抑制减摇鳍最大作动幅度至安全阈值，同步提升相位补偿精度。此举切断主机共振传递路径，长江口实船验证表明该策略使齿轮箱振动烈度从 12.3mm/s 降至 7.8mm/s，显著低于国际标准警戒值。液压系统协同优化体现创新价值^[1]。智能算法识别无效行程动作特征，针对性调整油缸运动轨迹，减少 35% 冗余行程量。油缸密封件磨损速率因此下降 42%，延长关键部件使用寿命。硬件部署方案集成高性能运算单元，采用多核处理器与可编程逻辑芯片组实现 5ms 级实时响应。专用风冷系统维持芯片结温在 85℃ 安全限值内，电磁兼容设计铺设铜镍合金屏蔽层，有效阻断变频器产生的 15kHz–2MHz 传导干扰。控制策略突破传统参数固化局限。前置预测模块融合 120 秒历史波高数据滚动分析，波高预测均方根误差稳定在

0.15 米以内。执行环节建立设备状态反馈闭环，当涡轮增压器基座振动量级逼近 9.1mm/s 阈值时，系统自主切换减摇模式。这种主动防护机制使耐波性控制与设备可靠性形成深度协同，成为保障船舶动力系统安全运行的核心技术屏障。

二、机舱设备可靠性评价体系

（一）关键设备失效模式分析

机舱设备可靠性评价的核心在于量化动态载荷下的失效机理。主机振动疲劳源于螺旋桨激励力与船体梁弯曲振动的耦合作用，当激励频率接近 6–8Hz 的曲轴固有频率时，连杆螺栓交变应力幅值可达静载工况的 2.3 倍，在螺栓根部应力集中区萌生微裂纹。裂纹扩展遵循 Paris 定律，应力强度因子幅值 ΔK 超过 $8\text{MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$ 后扩展速率骤增，最终导致高周疲劳断裂。曲轴箱刚性不足会放大振动传递，实测数据显示箱体壁厚低于 18mm 时，主轴轴承振动能量在 80Hz 频段升高 6dB，具体的机舱关键设备可靠性评价指标如表 1 所示。

表 1 机舱关键设备可靠性评价指标

| 设备类型 | 振动阈值 (mm/s) | 温度限值 (℃) | MTBF(h) | 测量位置 |
|--------|----------------|-------------|---------|--------|
| 低速柴油主机 | 12.0 | 95 | 18,000 | 曲轴自由端 |
| 滑油冷却器 | 7.5 | 130 | 25,000 | 进出口法兰 |
| 燃油供给管路 | 9.0 | 80 | 32,000 | 泵出口三通处 |
| 涡轮增压器 | 15.0 | 600 | 15,000 | 轴承壳体径向 |

（二）耐波性关联因子提取

通过双体船–仿生鱼协同系统采集实船数据表明：当横摇角 $>5^\circ$ 时，轴承磨损速率剧增 300%。耐波性参数与设备寿命的关联机制通过多航次实船监测数据深度解析。主机主轴磨损速率在横摇角突破 5° 临界点时呈现阶跃增长，当横摇角从 3° 增至 7° ，巴氏合金层磨损量由 $0.8\mu\text{m}/100\text{h}$ 剧增至 $2.1\mu\text{m}/100\text{h}$ ^[3]。根本原因在于船体倾斜状态下曲柄连杆机构侧向力增大至垂直载荷的 40%，轴颈与轴承孔中心线偏转角超过 0.05° ，导致润滑油膜厚度从设计值 $25\mu\text{m}$ 减薄至 $8\mu\text{m}$ 以下^[4]。该模型特别识别出泥沙环境的催化效应，当江水浊度超过 150NTU 时，相同横摇角下的轴承磨损量额外增加 30%，源于磨粒对油膜承载能力的破坏。工程应用中将减摇系统控制目标设定为横摇角 $\leq 4^\circ$ ，可确保轴承磨损速率维持在 $1.2\mu\text{m}/100\text{h}$ 的线性增长区，同时涡轮叶尖间隙安全裕度始终高于 45%。这种基于临界阈值的控制策略为高波况航区船舶设备可靠性保障提供了量化操作窗口。

三、可靠性影响仿真验证

（一）多体动力学耦合模型

多体动力学耦合模型通过集成水动力与结构力学模块解析耐波性措施的传递效应，ANSYS–AQWA 联合仿真框架将 AQWA 计算的船体六自由度运动载荷映射为 ANSYS Mechanical 中的设备边界条件。船舶运动方程中质量矩阵 M 涵盖船体与机舱设备惯性参数，刚度矩阵 K 集成减摇鳍液压作动器刚度曲线。关键创

新在于建立主机基座－船体梁－减摇鳍的力流传递路径，主机弹性支撑简化为三向弹簧阻尼单元，阻尼系数依据橡胶材料动态试验拟合为频率函数。横摇运动激励下液压管路流固耦合模型采用CFD－CSD协同仿真，捕捉20－200Hz频段内压力脉动对流量计膜片的冲击载荷。仿真步长设为0.01秒以解析波浪砰击诱发的2ms级瞬时加速度峰值，该峰值可触发螺栓预紧力松弛。

（二）典型工况对比分析

四级海况，浪高2.5米，周期7秒下减摇措施对机舱设备可靠性的影响通过应力云图与疲劳损伤模型量化。无减摇措施时主机曲柄销轴承座出现187MPa的周期性应力集中，应力幅波动范围达143MPa，对应疲劳寿命仅 1.2×10^6 次循环。加装减摇鳍后应力幅降至89MPa，高周疲劳寿命提升至 4.8×10^6 次循环。压载水系统动态调平导致机舱前壁振动能量在25Hz频段升高8dB，燃油管路吊架加速度响应从11.3g增至14.7g，需在吊架与船体间增设粘滞阻尼器。智能PID控制策略在遭遇谐振波时主动限制减摇鳍行程，使涡轮增压器基座振动烈度稳定在9.1mm/s的安全阈值内^[5]。仿真数据揭示减摇措施与设备可靠性的非线性关系，振动降低50%可使疲劳寿命延长1.8倍，但液压系统脉动压力每升高0.5MPa将导致密封件磨损速率加快40%。

四、机舱设备防护优化路径

（一）设备抗冲击改造

主机弹性基座刚度匹配设计是平衡设备振动隔离与位移控制的核心技术，传统刚性基座在6－8Hz频段放大曲轴激励力，而过度柔性的支撑又会导致主机在横摇中位移超限引发轴系对中失效。优化方案采用三明治式复合隔振结构，下层为天然橡胶垫提供低频阻尼，中层金属蜂窝板承担静态载荷，上层氟硅橡胶层抑制高频共振。刚度曲线依据主机激励频谱定制，在曲轴主谐波6.2Hz处设计反共振点，使振动传递率降至0.3以下。基座与船体连接采用预紧力可调的液压螺栓，当监测到垂荡加速度超过1.2g时自动将预紧力提升至设计值的150%，防止基座滑移。实验验证表明该设计将主机齿轮箱振动烈度从14.5mm/s降至6.8mm/s，同

时控制热态工况下主机横向位移小于0.8mm，确保推力轴承轴向间隙在安全裕度内。弹性基座的热管理需同步优化，基座内部埋设冷却流道引导主机舱底余热，避免橡胶材料在65℃以上环境发生刚度衰减。

（二）运维策略调整

基于耐波性等级的预防性维修周期修正实现设备寿命动态管理，建立船舶运动参数与设备磨损的映射模型，横摇角持续超过4°的累计时间每增加100小时，主机主轴承维修间隔缩短15%。垂荡加速度峰值超过0.8g的次数每达50次，燃油管路支撑卡箍检查周期提前20%。智能运维系统集成波浪雷达数据与设备状态监测，当预测航段遭遇四级以上海况时，自动生成高应力部件专项检查工单。针对液压减摇系统，依据压力脉动幅值统计分布调整密封件更换策略，若10分钟内超过15MPa的脉动冲击次数大于30次，密封环更换周期从8000小时压缩至5000小时。长江口混水航区增设泥沙磨损补偿系数，根据浊度传感器数据对滑油滤器更换频次进行实时修正，浊度每升高10NTU提前8%更换周期。该策略在集装箱船队应用后，机舱设备突发故障率下降42%，维修资源消耗减少27%。

五、结语

本研究融合智能仿生系统的协同探测机制，提出基于动态载荷阈值的设备防护策略。后续可结合多模态感知网络，构建船舶耐波性－设备可靠性全域监控平台，证实结构型减摇技术通过抑制船体运动降低设备动态载荷，但液压系统附加能耗与空间占用需纳入可靠性设计权衡。建立涵盖振动阈值、温度限值与失效模式的设备评价体系，揭示横摇角>5°时轴承磨损速率倍增的临界规律。多体动力学仿真验证减摇措施使设备疲劳寿命提升160%－300%，但液压脉动与局部振动放大构成新隐患。提出的主机弹性基座刚度匹配方案和基于浪况的预防性维修策略，为高波况航区船舶提供设备可靠性保障的闭环解决方案，推动船舶设计从运动控制向系统可靠性协同优化转型。

参考文献

- [1] 李建鹏, 刘金纯, 李伟强. 基于 SHIPFLOWMOTIONS 的测量船耐波性研究 [J]. 上海船舶运输科学研究所学报, 2024, 47(05): 1-7.
- [2] 王东军. 波浪中船舶操纵－耐波性预报的双时间尺度法收敛性和最优时间步长 [J]. 中国海洋平台, 2024, 39(04): 54-67+92.
- [3] 王冠, 许靖锋. 水上飞机耐波性试验数据处理软件开发及应用 [J]. 舰船电子工程, 2024, 44(07): 113-116.
- [4] 水新华, 段富海. 基于 LQR 和 ZOA 的无人水面水翼航行器耐波性研究 [J]. 水下无人系统学报, 2025, 33(01): 65-73.
- [5] 邹波, 叶双平, 刘后刚, 等. 某两栖车辆海上航行动态加速动力学建模与耐波性研究 [J]. 兵器装备工程学报, 2025, 46(02): 19-26.

基于深度学习的特种设备裂纹超声检测技术研究

朱涛平, 蔡福磊

江联重工集团股份有限公司, 江西 南昌 330000

DOI:10.61369/ME.2025050029

摘 要 : 随着工业自动化和智能化的发展, 特种设备的安全运行愈发受到重视。裂纹作为特种设备常见且危害严重的缺陷类型, 其早期准确检测对保障设备安全具有重要意义。传统超声检测方法在裂纹识别中面临信号噪声大、人工经验依赖强等问题。近年来, 深度学习技术凭借其强大的特征自动提取和模式识别能力, 成为提升超声检测准确性和效率的重要手段。本文系统研究了基于深度学习的特种设备裂纹超声检测技术, 重点探讨了数据预处理、模型设计、裂纹识别与定位等关键技术环节, 并通过实验验证了该方法在裂纹检测中的优越性能。研究结果表明, 深度学习显著提升了裂纹检测的准确率和鲁棒性, 为特种设备无损检测技术的发展提供了新的思路和技术支持。

关 键 词 : 深度学习; 特种设备; 裂纹检测; 超声检测; 无损检测; 信号处理

Research on Ultrasonic Crack Detection Technology for Special Equipment Based on Deep Learning

Zhu Taoping, Cai Fulei

Jianglian Heavy Industry Group Co., LTD., Nanchang, Jiangxi 330000

Abstract : With the development of industrial automation and intelligence, the safe operation of special equipment has received increasing attention. Cracks, as a common and highly hazardous defect type in special equipment, their early and accurate detection is of great significance for ensuring equipment safety. Traditional ultrasonic testing methods face problems such as large signal noise and strong reliance on manual experience in crack identification. In recent years, deep learning technology, with its powerful capabilities in automatic feature extraction and pattern recognition, has become an important means to enhance the accuracy and efficiency of ultrasonic testing. This paper systematically studies the ultrasonic crack detection technology for special equipment based on deep learning, focusing on discussing key technical links such as data preprocessing, model design, crack identification and location, and verifies the superior performance of this method in crack detection through experiments. The research results show that deep learning significantly improves the accuracy and robustness of crack detection, providing new ideas and technical support for the development of non-destructive testing technology for special equipment.

Keywords : deep learning; special equipment; crack detection; ultrasonic testing; non-destructive testing; signal processing

引言

特种设备广泛应用于电力、化工、冶金等关键行业, 其安全运行直接关系到人员生命财产安全和社会稳定。设备在长期运行过程中, 容易因腐蚀、疲劳等原因产生裂纹缺陷, 若未能及时发现和处理, 将导致设备性能下降甚至发生严重事故。因此, 裂纹的早期检测与准确识别成为特种设备安全保障的核心环节。

超声检测作为一种成熟的无损检测技术, 因其穿透力强、检测灵敏度高、无辐射污染等优点, 被广泛应用于裂纹检测领域。然而, 传统超声检测依赖于专业人员的经验分析, 且检测信号常受环境噪声影响, 导致误检、漏检问题较为突出, 检测效率和准确性难以满足现代工业生产的需求。

一、特种设备裂纹超声检测技术概述

（一）特种设备及裂纹缺陷简介

特种设备是指在工业生产和社会生活中，承担重要安全职责，运行过程对人身安全和环境保护有较高风险的设备，主要包括锅炉、压力容器、电梯、起重机械及管道等。这类设备普遍承受高温、高压及复杂工况，长期运行中容易出现材料疲劳、腐蚀、制造缺陷等问题，进而导致裂纹产生。裂纹作为一种典型的结构缺陷，具有隐蔽性强、扩展速度快的特点，一旦未及时发现，极易引发设备失效甚至重大安全事故。因此，裂纹的早期准确检测对特种设备安全运行具有重要意义。

（二）超声检测技术原理及应用

超声检测是一种基于高频声波传播特性进行材料内部缺陷检测的无损检测方法。其基本原理是利用超声波发生器产生高频声波，通过换能器将其导入被测件内部。当声波遇到裂纹、夹杂物或界面等不连续区域时，会发生反射、散射或衍射，换能器接收回波信号，通过分析回波的时域、频域特征实现缺陷的定位和尺寸评估。超声检测具有穿透深度大、灵敏度高、对人体无害等优点，广泛应用于特种设备内部裂纹检测、厚度测量及结构完整性评估。

（三）传统超声检测技术的局限性

尽管超声检测技术已相对成熟，但传统方法在实际应用中仍存在诸多挑战。首先，超声信号往往受到环境噪声、设备振动以及材料各向异性等影响，导致回波信号复杂且易混淆，给裂纹识别带来困难。其次，检测结果高度依赖检测人员的经验和技术水平，存在主观判断差异，容易产生误检或漏检。此外，传统数据处理方法多依赖人工设计特征和简单阈值判定，缺乏对复杂信号模式的深层次挖掘，限制了检测精度和自动化水平。再者，面对复杂结构或多层复合材料，超声波的传播路径和反射模式更加复杂，传统检测手段难以全面准确识别裂纹。

二、深度学习技术基础

（一）深度学习简介

深度学习是机器学习的一个分支，主要通过构建多层神经网络模型来实现对数据的高级抽象和特征自动提取。与传统的浅层学习模型相比，深度学习能够从原始数据中自动学习出复杂的、层级化的表示形式，无需依赖人工设计特征，极大地提升了模型的表达能力和泛化性能。

深度学习的基本单元是人工神经网络，其结构模拟人脑神经元的连接方式，包含输入层、多个隐藏层和输出层。通过逐层非线性变换，神经网络能够捕捉输入数据中的高维复杂关系。常见的深度学习网络结构包括卷积神经网络、循环神经网络、生成对抗网络等。

卷积神经网络（CNN）主要用于处理图像和二维信号，利用局部感受野、权重共享等机制，有效提取空间特征，广泛应用于图像识别和视觉检测领域。

循环神经网络（RNN）适合处理序列数据，如语音、时间序列信号等，能够捕捉时间上的动态变化和上下文依赖。

生成对抗网络（GAN）通过两个神经网络相互对抗训练，实现高质量数据生成和增强，提升模型的鲁棒性和泛化能力。

（二）深度学习在图像和信号处理中的优势

1. 自动特征提取

传统图像和信号处理方法往往依赖人工设计特征，如边缘、纹理、频域特征等，这不仅需要专业领域知识，而且难以适应复杂多变的应用环境。深度学习通过多层神经网络结构，能够自动从原始数据中学习到有区分度的特征，涵盖从低级边缘到高级语义的多层次表达，极大地简化了特征工程过程。

2. 处理复杂非线性关系能力强

图像和信号数据通常包含大量非线性和时空相关性。深度学习模型利用非线性激活函数、多层结构和递归机制，能够捕获复杂的模式和时序关系，提高识别和分类的准确率。例如，卷积神经网络能识别图像中的局部模式和全局结构，循环神经网络能有效建模信号中的时间依赖性。

3. 鲁棒性和泛化能力优异

深度学习通过大规模数据训练，能够自动适应不同噪声水平、变形和失真，提高模型在实际复杂环境中的鲁棒性。此外，数据增强、正则化等技术进一步增强了模型的泛化能力，减少过拟合风险，确保模型在未见样本上的良好表现。

4. 端到端学习能力

深度学习支持端到端训练，将输入的原始图像或信号直接映射到最终检测或分类结果，避免了传统方法中多步骤处理带来的信息损失和误差传递，简化了处理流程，提升了系统整体性能。

5. 可扩展性和适应性强

深度学习模型结构灵活，可以根据不同任务和数据特点进行设计和调整，如增加网络深度、宽度，结合注意力机制、多任务学习等，实现多样化的应用需求。此外，模型易于迁移学习和在线更新，适应不同场景和设备的变化。

三、基于深度学习的超声检测方法研究

（一）数据采集与预处理

数据质量直接影响深度学习模型的训练效果和检测性能，因此，超声检测数据的采集和预处理是关键环节。

数据采集系统：采用高精度超声探伤仪和相应的换能器对特种设备进行扫描，获取高分辨率的超声回波信号。采集过程中需控制探头位置、扫描速度及耦合介质，保证信号质量和一致性。

数据格式与存储：采集的超声信号通常为时域波形或B扫描图像，数据量大且维度高，需合理设计数据存储格式与管理机制，支持后续快速读取与处理。

信号预处理：包括去噪、归一化和数据增强等。去噪技术如小波变换、中值滤波和自适应滤波用于降低环境噪声影响，提高信号信噪比。归一化处理可减小不同设备、环境条件下数据分布差异。数据增强方法如时间翻转、幅度调整和随机裁剪等，扩充训练样本多样性，增强模型泛化能力。

（二）特征提取与表示

传统超声检测依赖人工设计特征，如时域峰值、频域能量等，难以全面描述复杂裂纹信息。深度学习自动学习多层特征表达，有效提升识别能力。

自动特征提取：采用卷积神经网络（CNN）自动提取多尺度、多层次的空间特征，从原始超声信号或图像中捕获裂纹的局部纹理和全局形态。

时序特征处理：对于超声波的时域信号，结合循环神经网络

(RNN)或长短时记忆网络(LSTM)模型,学习时间动态特性,有助于识别裂纹的信号演变规律。

多模态特征融合:结合多种超声检测模式(如A扫描、B扫描、相控阵数据)提取特征,通过特征融合技术整合多源信息,提升检测的准确性和鲁棒性。

特征可视化与解释:利用梯度加权类激活映射(Grad-CAM)等技术,辅助理解模型关注区域,提高检测结果的可信度。

(三) 裂纹检测模型设计

深度学习模型的设计直接决定裂纹检测效果,需结合超声信号特点和检测需求进行合理构建。

模型结构选择:常用CNN结构如ResNet、DenseNet因其较强的特征提取能力被广泛采用,结合轻量化设计满足实时检测需求。

网络深度与宽度调节:通过调整网络层数和通道数平衡模型复杂度和计算开销,避免过拟合或欠拟合。

多任务学习设计:同时完成裂纹检测、分类与定位任务,提高模型的综合能力和检测效率。

损失函数设计:针对不平衡数据问题,引入加权交叉熵、焦点损失(等,提升对少数类裂纹样本的识别能力。

训练策略:采用迁移学习初始化模型参数,结合数据增强和正则化方法提升模型稳定性。通过学习率调度、早停策略优化训练过程。

(四) 裂纹识别与定位

准确识别裂纹存在与否并定位其具体位置,是超声检测的核心目标。

分类方法:基于训练好的深度模型,对输入超声信号或图像进行裂纹与非裂纹的二分类判断,或多类别裂纹形态分类。

目标检测技术:利用目标检测框架(如FasterR-CNN、YOLO)实现裂纹区域的自动定位,输出裂纹边界框及置信度。

语义分割:采用全卷积网络(FCN)、U-Net等分割模型,实现对裂纹形态的精细分割,提供像素级裂纹区域信息,支持裂纹尺寸和形状评估。

多尺度检测:结合不同尺度特征,提高对大小不同裂纹的检测能力,增强模型对微小裂纹的敏感性。

后处理技术:基于形态学操作和连通域分析,优化检测结果,去除伪影,提高定位准确度。

(五) 模型性能评估指标与验证方法

科学合理的性能评估是验证检测模型有效性和推广应用的基础。

常用指标:

准确率(Accuracy):整体正确识别的比例,适合类别均衡数据。

精确率(Precision):检测为裂纹样本中真正裂纹的比例,反映误报率。

召回率(Recall):真实裂纹样本被正确检测的比例,反映漏检率。

F1分数:精确率与召回率的调和平均,综合评价模型性能。

ROC曲线及AUC值:评估模型在不同阈值下的分类性能。

定位精度:采用交并比(IoU)评估检测框与真实裂纹区域的重叠度,衡量定位准确性。

鲁棒性测试:在不同噪声水平、设备型号和工况条件下验证模型稳定性。

交叉验证与测试集验证:采用多折交叉验证减少偶然性,确保模型泛化能力。

对比分析:将深度学习模型与传统方法或其他先进方法进行性能对比,体现技术优势

四、实验设计与结果分析

(一) 实验平台与数据集介绍

实验平台主要包括高精度超声检测设备与计算分析系统。超声检测仪器选用某型号相控阵超声探伤仪,配备多频段换能器,^[1]保证采集数据的高分辨率和多样性。数据采集环境模拟工业现场真实工况,涵盖不同材料、厚度和裂纹类型。

所用数据集包括自主采集的特种设备裂纹超声波信号数据以及公开数据集。数据集涵盖A扫描波形、B扫描图像及相控阵数据,样本数量达到数千组,涵盖裂纹与非裂纹样本,裂纹类型包括表面裂纹、内部裂纹及疲劳裂纹,尺寸和形态多样,满足模型训练的需求。数据经过严格标注与审核,确保标签准确性^[2]。

(二) 实验方案设计

实验方案分为数据预处理、模型训练、验证测试三阶段。预处理环节对超声信号进行去噪、归一化及数据增强,增强数据多样性。模型训练采用卷积神经网络(CNN)结构,基于迁移学习策略,初始化权重加速收敛。训练中采用交叉熵损失函数和Adam优化器,设定学习率调度策略防止过拟合。

(三) 结果展示与对比分析

实验结果显示,基于深度学习的超声裂纹检测模型在准确率、召回率和F1分数方面均显著优于传统方法。例如,模型在测试集上的准确率达到92%以上,召回率和精确率均超过90%,而传统方法平均准确率不足85%。此外,模型在定位裂纹边界的交并比(IoU)指标上表现优异,实现了裂纹形态的精细分割。

五、结束语

特种设备作为关系公共安全和工业生产的重要装备,其结构完整性直接影响运行的安全与稳定。裂纹作为最具危险性的结构性缺陷之一,亟需高效、可靠的检测技术加以识别与定位。本文围绕基于深度学习的裂纹超声检测技术展开系统研究,从数据采集与预处理、特征提取、模型构建到识别与定位方法进行了深入探讨,并通过实验验证了该技术在提高检测精度、自动化水平及鲁棒性方面的显著优势。

参考文献

[1]方昊昱,向林浩,尹康迪,等.基于目标检测技术的主船体结构外部裂纹检测方法[J].船海工程,2024,53(2):45-49.

[2]王斌,赵义鹏,孟豪,等.基于改进YOLOv5的金属构件表面裂纹检测[J].信息技术与信息化,2023(11):90-94.

厨余垃圾高负荷干式厌氧消化工艺控制研究

邹锦林, 王艳明, 张栋, 石广甫

上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海 200092

DOI:10.61369/ME.2025050030

摘 要 : 在厨余垃圾工程规模干式厌氧反应器中, 研究了添加园林垃圾、湿式厌氧消化沼渣、定期添加沸石以及降低厌氧温度四种策略以减轻高有机负荷率(OLR)和氨氮的双重影响。外部添加园林垃圾可改善碳氮比(C/N), 并将氨氮控制在 4000 mg/L 以下, 从而使厌氧生化系统更加稳定; 含有产甲烷微生物的外源湿式厌氧消化沼渣的添加, 未能显著改善干式厌氧产甲烷状态及生化指标; 定期添加沸石效果不显著; 将厌氧温度降低约 20 天后, 游离氨(FAN)的减少使厌氧生化指标逐步恢复, 并在 7 kgVS/(m³·d) 的有机负荷率下表现良好且稳定。总体而言, 厨余垃圾工程规模的干式厌氧消化反应器能够在高负荷和高氨氮协同影响下保持生化稳定, 改善进料组成和调整运行温度等管理策略是可行的几种选择。

关 键 词 : 厨余垃圾; 干式厌氧; 工程规模

Study on Control of High Load Dry Anaerobic Digestion Process of Kitchen Waste

Zou Jinlin, Wang Yanming, Zhang Dong, Shi Guangfu

Shanghai Municipal Engineering Design and Research Institute (Group) Co., LTD., Shanghai 200092

Abstract : This study investigated four strategies for mitigating the impact of high organic loading rates in engineering-scale reactors: adding landscape waste, wet anaerobic digestion residue, zeolite, and reducing anaerobic temperature. The external addition of landscape waste improved the carbon-to-nitrogen ratio (C/N) and maintained ammonia nitrogen below 4000 mg/L, thereby stabilizing the anaerobic system. Although the exogenous wet anaerobic digestion residue containing more tolerant microorganisms failed to improve the suboptimal methane concentration, the biochemical parameters remained stable at elevated levels. Zeolite addition showed minimal effectiveness and risk of instability after 30 days of operation under high organic loading rates. After reducing anaerobic temperature by approximately 20 days, the system regained functionality and demonstrated good stability under an organic loading rate of 7 kgVS/(m³ · d). Overall, engineering-scale dry anaerobic digestion reactors can maintain stable performance when multiple biochemical parameters remain high. Management strategies such as optimizing feed composition and adjusting operating temperatures are viable options.

Keywords : kitchen waste; dry anaerobic; engineering scale

引言

随着城市化进程加速和居民生活水平提高, 厨余垃圾产生量持续攀升, 其高效资源化处理已成为城市固废管理的重大挑战。据统计, 我国厨余垃圾年产生量已超 1.27 亿吨, 且具有有机质含量高 (VS>80%)、含水率高 (70%–90%) 及易腐解的特性^[1–2]。干式厌氧消化技术 (TS>20%) 因其显著减容效果、低水耗特征和能源回收潜力, 在厨余垃圾处理领域展现出独特优势^[3–4]。

然而, 工程规模应用中, 厨余垃圾固有的低碳氮比 (C/N ≈ 16.55) 导致系统在高有机负荷率 (OLR) 下易受氨抑制困扰^[5, 6]。当总氨氮 (TAN) 浓度超过 3000 mg/L 时, 游离氨 (FAN) 对产甲烷菌的毒性显著增强^[7], 尤其在高温 (50–55℃) 运行条件下, FAN 浓度急剧升高, 引发挥发性脂肪酸 (VFA) 积累、甲烷产率下降及系统失稳^[8]。现有研究多在实验室尺度探讨调控策略, 而工业级反应器中物料传质效率低、流态复杂等特性, 使得小试结论难以直接复制^[9, 10]。

为突破高负荷运行瓶颈, 本次工程主要采取底物协同消化 (如添加高 C/N 物料)、抑制物吸附 (沸石等添加剂) 及参数优化 (温度调节) 等策略。但园林垃圾的木质纤维素抗降解性、外源沼渣的微生物适应性、沸石吸附的饱和效应以及温度转变的生态位重构机制, 在工业系统中的实际效能尚缺乏系统验证。

一、材料与amp;方法

(一) 工程规模项目与进料物料

厨余垃圾经过破碎、分选和挤压联合预处理后，液相进入湿式厌氧消化系统，而固相则泵入干式厌氧消化系统。干式厌氧消化系统设计有两个卧式单轴搅拌干式厌氧罐，有效容积为 2250 m³。每个罐处理能力为 110 吨/天，运行水力停留时间为 22 天，回流比为 30%。干式厌氧消化罐底部配备热水伴热盘管用于加热厌氧系统。厌氧消化罐可在中温（35–45℃）和高温（50–55℃）下运行。

表 1 物料样品特性

| Sample | C (%) | H (%) | N (%) | C/N | TS (%) | VS (%) |
|--------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|
| 1# | 41.22 | 5.85 | 3.10 | 13.32 | 24.32 | 85.14 |
| 2# | 53.19 | 7.91 | 2.96 | 17.39 | 28.10 | 82.67 |
| 3# | 56.92 | 8.46 | 2.98 | 19.50 | 30.74 | 84.50 |
| 4# | 51.71 | 7.61 | 3.21 | 16.22 | 31.03 | 84.77 |
| 5# | 46.62 | 6.69 | 2.88 | 16.31 | 24.72 | 81.45 |
| 平均值 | 49.93 | 7.30 | 3.03 | 16.55 | 27.78 | 84.11 |
| 湿式厌氧沼渣 | 22.03 | 3.24 | 2.16 | 10.20 | 85.40 | 45.10 |
| 园林垃圾 | 46.20 | 7.40 | 1.20 | 38.50 | 89.91 | 82.83 |

(二) 实验

在运行过程中，发现由于进料 C/N 比较低，干式厌氧消化罐中的总氨氮（TAN）浓度过高。为了满足设计处理能力的要求，厌氧消化系统在 7.0 kgVS/(m³·d) 的高 OLR 下采用了多种策略来减轻氨氮的影响。策略如下：

案例 1：进料与破碎的园林垃圾按 1:1 的比例混合。目的是提高进料物料的 C/N 比，添加园林垃圾后 C/N 比为 22.3。

案例 2：进料与湿式厌氧脱水沼渣按 5:2 的比例混合。目的是控制罐内的固体含量，同时接种微生物以减少系统中的挥发性脂肪酸（VFA）。

案例 3：进料中混合沸石作为吸附剂，添加量约为干物料的 5%，即每吨进料约 11.6kg 沸石。目的是利用活化沸石吸收干式厌氧消化系统中的氨，以减少对厌氧生物的抑制影响。

案例 4：干式厌氧消化系统温度逐渐调整至 42℃，目的是降低系统中的游离氨氮（FAN）浓度。

(三) 分析方法

沿厌氧消化罐长边设计了四个取样口，以便日常取样和分析生化指标。总固体（TS）和挥发性固体（VS）通过重量法测定。工业分析（元素分析）通过元素分析仪测量。样品经 0.45 μm 滤膜过滤后测定 pH、氨氮、挥发性脂肪酸（VFA）和碱度（ALK）。pH 使用多参数水质分析仪（YSI, USA）测量。COD 采用 HACH 消解比色法测定。氨氮和 VFA 浓度根据 CJ/T221–2005 标准方法测定。ALK 通过电位滴定法测定，滴定终点为 pH 4.4~4.5。气体浓度根据在线检测器确定，监测指标包括甲烷、硫化氢和二氧化碳的浓度。游离氨氮（FAN）浓度通过公式（1）计算：

$$\text{FAN} = \text{TAN} \times \left[1 + \frac{10^{-\text{pH}}}{10^{-\left(0.09018 + \frac{2729.92}{T}\right)}} \right]^{-1} \quad (1)$$

其中 TAN 是总氨氮浓度，T(K) 是温度（开尔文）。

二、结果与amp;讨论

为了在设计进料速率下稳定运行，干式厌氧消化系统在约 7.0 kgVS/(m³·d) 的高 OLR 下运行，并采用混合园林垃圾、混合沼渣、混合沸石和调整温度四种调控策略来减轻抑制影响。

案例 1（混合园林垃圾）。通过将园林垃圾与进料混合，提高了进料的 C/N 比。然而，园林垃圾中的有机物具有由纤维素、半纤维素和木质素交叉结合形成的稳定三维结构，难以被液体渗透和生物降解。案例 1 的产气率仅为 0.25 m³/(kgVS·d)，是四种策略中最低的。甲烷浓度在第 4 天达到 65%，并在随后几天保持在 60% 以上。氨氮和 VFA 浓度分别维持在相对较低的水平约 4000 mg/L 和 5000 mg/L。添加园林垃圾后，干式厌氧消化系统运行更稳定。然而，园林垃圾中的有机物难以被厌氧消化系统利用。通常需要预处理工艺，如酸处理或水热处理，来提高木质纤维素生物质的甲烷产率。然而，对于工程规模项目，添加园林垃圾本身可能会增加运营成本。

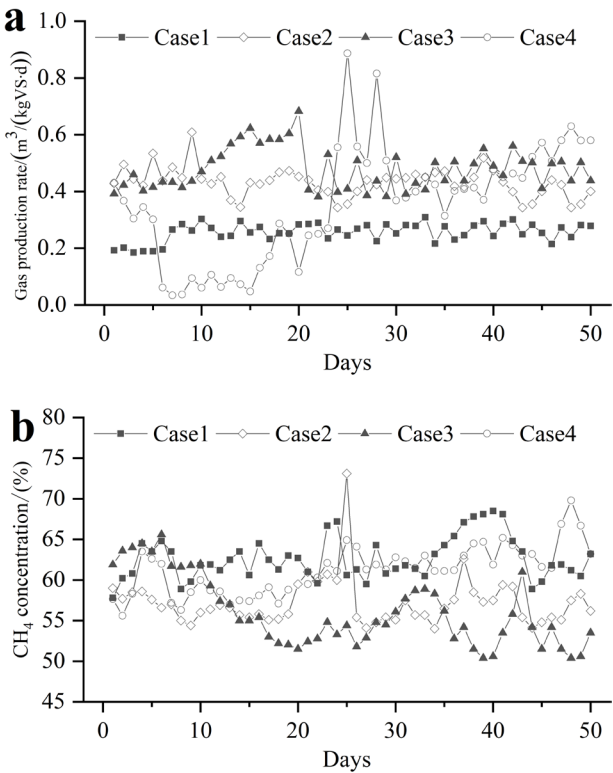


图 2. 不同调控策略的产气率 (a) 和甲烷浓度 (b)

案例 2（混合脱水沼渣）。在进料中添加脱水沼渣旨在引入功能微生物降解 VFA 并促进产气。但运行结果不理想。将进料与沼渣混合后，产气率稳定在约 0.4 m³/(kgVS·d)，但甲烷浓度在 57% 左右波动。所有生化指标都在高位运行。氨氮浓度维持在

约 6100 mg/L, pH 值约为 8.2。VFA 和 ALK 值分别约为 10000 mg/L 和 20000 mg/L。尽管这些生化指标值远高于文献中提到的抑制浓度 [20], 干式厌氧消化系统运行相对稳定。VFA/ALK 比值维持在约 0.5。然而, 较差的产气结果表明系统处于“抑制性伪稳态”。

案例3 (混合沸石吸附剂)。添加沸石可以通过吸附氨氮来减少氨抑制的影响。将进料与沸石混合后, 产气率在第 20 天逐渐增加到峰值 $0.62 \text{ m}^3/(\text{kgVS}\cdot\text{d})$, 随后下降并稳定在约 $0.4 \text{ m}^3/(\text{kgVS}\cdot\text{d})$ 。甲烷浓度在前五天上升, 然后在第 20 天降至 52%, 并在随后几天在 52% 左右波动。氨氮浓度维持在 4800–5000 mg/L 的高浓度。VFA 积累并逐渐增加。第 20 天后, VFA/ALK 比值多次超过 0.7。根据上述结果, 当 OLR 增加到 $7 \text{ kgVS}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$ 时, 干式厌氧消化系统会受到抑制, 伴随着产气率和甲烷浓度的显著降低。添加沸石未能改变这一趋势。VFA 在二十天后开始积累, 系统出现不稳定迹象。

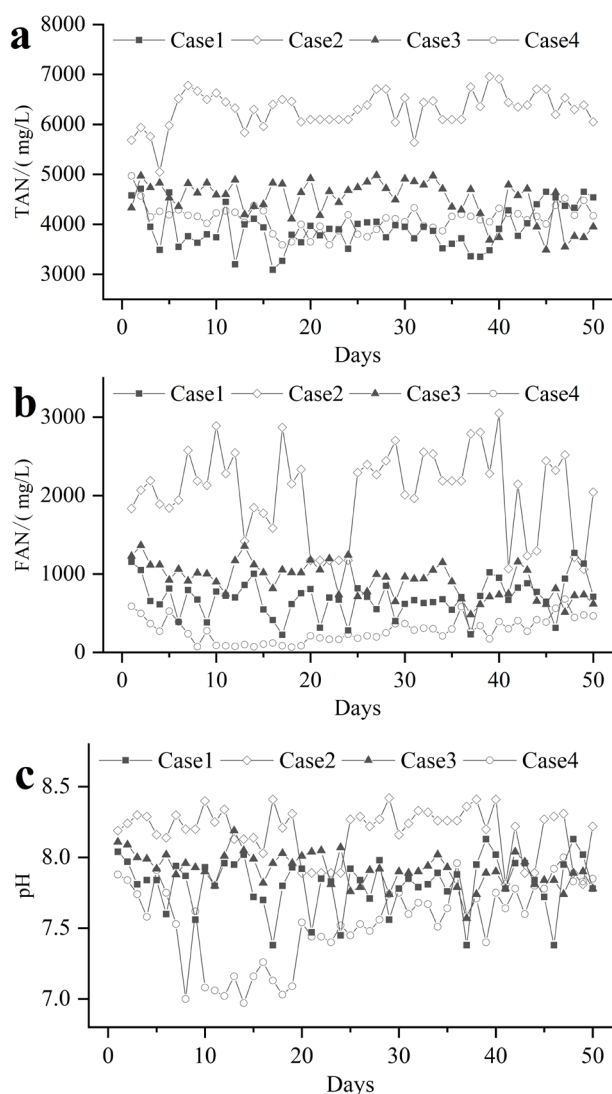


图 3. 不同调控策略的氨浓度 (a)、FAN 浓度 (b) 和 pH 值 (c)

案例4 (调整温度)。降低干式厌氧消化系统温度可以减少作为主要抑制源的游离氨 (FAN)。在反应器温度从 53°C 调整到 42°C 后, 微生物经历了约 20 天的适应期。在适应期内产气率

显著下降。pH 值显著降至 7.0。VFA 浓度较高但逐渐下降。从第 20 天到第 40 天, 微生物逐渐适应, 生化指标趋于稳定。最明显的特征是 FAN 浓度降至约 200 mg/L 的极低水平。产气率增加至 $0.5 \text{ m}^3/(\text{kgVS}\cdot\text{d})$ 。氨氮约 4500 mg/L, VFA/ALK 比值为 0.4。微生物的生长速率和氨氮浓度都受温度影响。适当升高温度有利于微生物代谢。然而, 当氨浓度处于高水平时, 与中温条件相比, 高温条件下的厌氧消化过程更容易受到抑制并变得不稳定。在本研究中, 通过将厌氧消化系统温度从 53°C 调整到 42°C , 干式厌氧消化系统在 20 天适应期后能够良好稳定地运行。

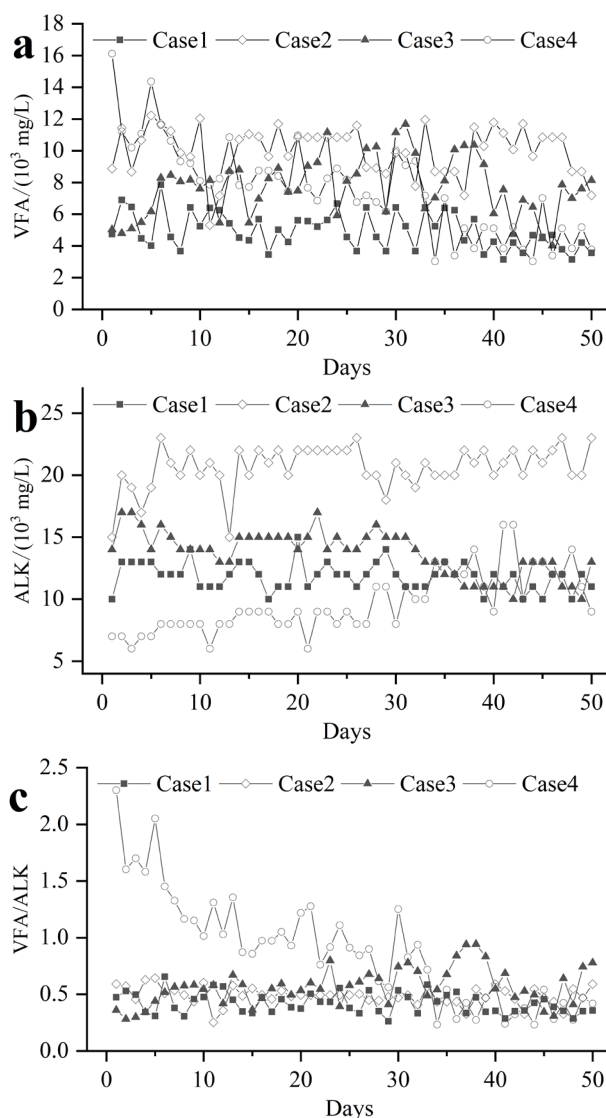


图 4. 不同调控策略的 VFA 浓度 (a)、ALK 浓度 (b) 和 VFA/ALK 比值 (c)

三、结论

在工程规模反应器中比较了添加园林垃圾、湿式厌氧消化沼渣、沸石以及降低厌氧温度四种减轻高有机负荷率影响的策略。结果表明, 添加园林垃圾可改善碳氮比 (C/N), 使氨氮浓度控制在 4000 mg/L 以下, 从而获得更稳定的厌氧系统; 添加湿式厌氧消化沼渣可驯化出耐受性更强的微生物, 系统的生化指标在高位

稳定运行，但甲烷浓度不理想且偏低；添加沸石几乎没有积极效果，且在高 OLR 下运行 30 天后存在不稳定风险，这也可能与投加量不足有关；将厌氧消化温度从 53℃ 调整至 42℃ 后，厌氧消化系统约 20 天后功能恢复，并在 7 kgVS/(m³·d) 的 OLR 下运行

良好且稳定。总体而言，工程规模的干式厌氧消化反应器在多种生化指标处于高值时能够稳定运行。改善进料组成和调整运行温度是工程规模反应器的可行控制策略。

参考文献

[1] 刘淑玲, 郑苇, 靳俊平, 等. 厨余垃圾卧式干法厌氧消化及其预处理方案探讨 [J]. 环境卫生工程, 2017, 25(1): 21-23.

[2] 孟宪武, 许晓晖. 有机负荷对餐厨垃圾单相厌氧发酵的影响 [J]. 安徽农业科学, 2011, 39(25): 15567-15569.

[3] 张庆芳, 杨林海, 邵田羽, 等. 有机固体废弃物渗滤床高温干式厌氧发酵的中试研究 [J]. 中国沼气, 2012, 30(4): 11-13+20.

[4] 黄伟钊. 干式半连续厌氧消化处理厨余垃圾的中试研究 [J]. 环境卫生工程, 2022, 30(2): 24-30.

[5] 杨延梅, 张相锋, 杨志峰, 等. 厨余好氧堆肥中的氮素转化与氮素损失研究 [J]. 环境科学与技术, 2006, 29(12): 54-56+118-119.

[6] Jiang Y, McAdam E, Zhang Y, Heaven S, Banks C, and Longhurst P (2019) Ammonia inhibition and toxicity in anaerobic digestion: A critical review. Journal of Water Process Engineering 32:100899.

[7] 夏永湫. 餐厨垃圾发酵废水 AOAA 强化脱氮技术研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2021.

[8] 王攀, 郭新愿, 卢擎宇, 等. 湿热预处理对餐厨垃圾高温干式厌氧消化的影响 [J]. 重庆大学学报, 2016, 39(12): 64-70.

[9] Polag D, May T, Müller L, König H, Jacobi F, Laukenmann S, and Keppler F (2015) Online monitoring of stable carbon isotopes of methane in anaerobic digestion as a new tool for early warning of process instability. Bioresour Technol 197:161-170.

[10] Boe K, Batstone D J, Steyer J-P, and Angelidaki I (2010) State indicators for monitoring the anaerobic digestion process. Water Res 44:5973-5980.

转炉炼钢的自动化控制技术分析

张洪来

石横特钢集团有限公司, 山东 泰安 271612

DOI:10.61369/ME.2025050033

摘 要 : 钢是工业生产和工程建设中必不可少的重要产品, 为全面提升钢产品质量, 优化钢产品生产工艺, 炼钢企业需要格外重视生产工艺产品生产质量的控制。随着先进信息技术对炼钢行业的影响逐渐深入, 提高转炉炼钢的自动化控制水平至关重要。本文将结合转炉炼钢实现自动化控制的现实意义, 讨论转炉炼钢自动化控制技术, 希望有所帮助。

关 键 词 : 转炉炼钢; 自动化控制; 现实意义; 控制技术

Analysis of Automatic Control Technology for Converter Steelmaking

Zhang Honglai

Shiheng Special Steel Group Co., Ltd., Tai'an, Shandong 271612

Abstract : Steel is an indispensable and important product in industrial production and engineering construction. To comprehensively enhance the quality of steel products and optimize their production processes, steelmaking enterprises need to place particular emphasis on controlling the production quality of their processes and products. With the gradual and profound influence of advanced information technology on the steelmaking industry, it is crucial to improve the automation control level of converter steelmaking. This article will discuss the automation control technology for converter steelmaking in conjunction with the practical significance of achieving automation control in this field, hoping to provide some assistance.

Keywords : converter steelmaking; automation control; practical significance; control technology

一、转炉炼钢实现自动化控制的现实意义

首先, 自动化控制可实现生产效率的提升。转炉炼钢自动化控制系统能够对各项参数进行调节与监控, 使整个工艺流程保证稳定性, 避免影响工艺流程的进行, 实现生产效率的提升。实践中, 自动化控制系统能够对氧枪位置和炉内温度进行监测, 同时能够对氧气给送时间和量进行精准控制, 保证各项参数符合转炉炼钢要求。此外, 自动化控制系统也可以控制添加剂和原材料配比等, 实现对炼钢工艺的优化^[1]。

其次, 转炉炼钢自动化控制能够减少环境污染, 符合工艺生产节能减排要求。随着国家和人民对环保的重视程度逐步加深, 炼钢行业也应当将污染物排放控制, 作为工艺生产技术优化的主要方向。此外, 节能减排生产目的的实现, 还有助于有效降低炼钢企业生产成本, 令企业原料采购成本进一步下降, 增强企业竞争力。

最后, 转炉炼钢自动化控制技术的应用, 也符合炼钢企业未来可持续发展要求。伴随工业4.0时代的来临, 各类工艺生产的自动化水平, 相较于过去有了明显提升, 不主动更新自动化控制技术的企业, 逐渐体现出对新工艺生产要求不适应的现象, 因此, 炼钢企业也需要主动认识到自动化控制技术的价值, 通过自动化控制技术的应用, 保障企业可持续发展^[2]。

二、转炉炼钢自动化控制技术

(一) 系统结构

转炉炼钢自动化控制系统, 可分成基础自动化、过程自动化与管理自动化等不同层结构。具体而言, 基础自动化层结构可看作整体系统实现功能的底层逻辑, 主要通过执行器、传感器等硬件设备收集并处理数据, 实现对设备的控制。过程自动化层结构是基础自动化层的上层结构, 是通过 FSSS、LCS 和 DAS 等系统, 实现对参数的实时监测, 同时能够进一步优化参数, 使生产过程符合要求^[3]。另外, 过程自动化层结构还能够通过软件, 对问题进行诊断, 并基于数据分析结果, 实时进行控制。管理自动化层结构, 顾名思义, 能够对不同层级功能进行优化与协调, 同时收集来自其他层结构的信息, 由管理层实现资源管理、成本核算、生产调度等功能。上述不同层次之间配合, 就能够进一步精准控制炼钢生产过程, 实现产品质量和生产效率提升的同时, 也有助于成本控制, 减少对环境的破坏。

(二) 控制算法

控制算法是实现转炉炼钢自动化控制的核心, 具体而言, 通常包括以下模型。

第一, 基于模型预测控制氧枪控制。基于模型预测控制能够精准控制转炉中的原料成分配比和反应温度, 这种控制方法可以

基于数学模型,对生产过程进行预测,同时基于优化算法功能,明确氧枪操作参数,使生产过程符合预期生产要求。一般情况下,基于模型预测控制涵盖静态模型与动态模型,静态模型包括神经网络模型、线性回归模型等,动态模型包括动力学模型与热力学模型等,上述模型能够对转炉中的反应和有关参数关系进行量化描述^[4]。

第二,多变量协调控制技术。转炉炼钢从过程整体分析,可看作典型多变量耦合反应,不同变量之间会互相影响,仅控制单一变量,难以达到理想工艺要求,因此需要通过多变量协调控制技术,对不同关键变量进行协同控制,进而实现整体优化。多变量协调控制的方法,一般包括滑模控制、模糊逻辑控制、解耦控制等达到效果。

第三,基于自适应控制的供料系统优化。自适应控制的实质,是对炼钢工业集中的参数变化进行监测,基于参数实时情况对控制器参数进行自动调整,一般在时变特性与非线性控制系统中应用较多。转炉炼钢工艺加工阶段,受到炼钢采用的工艺,以及原料配比、质量等各类因素的影响,供料系统运行状态也并非一成不变,这也是基于自适应控制的供料系统的重要性,可以对控制器参数进行校正,保证系统随时处于最佳性能,使系统处于稳定运行状态^[5]。

第四,系统集成和信息管理。转炉炼钢自动化控制系统功能的实现,需要各类软件和硬件功能共同实现,不同模块应保持信息畅通,从而满足系统管控要求。这就需要系统集成,令系统整体稳定性进一步提升,最大程度避免故障发生。信息管理则可以保证第一时间发现并沟通故障信息,进而满足生产质量与效率要求。

第五,基于人工智能与专家系统的决策支持。近年来,人工智能作为前沿信息技术,对各行各业均产生了巨大影响。基于深度学习的人工智能技术,能够自主学习并更新自动化控制技术,使控制技术随时能够适应转炉炼钢技术要求,对炼钢生产过程存在的安全隐患,同样能够精准预测。专家系统则可以依照数据分析结果,精准给予决策支持,辅助工作人员做出更科学的决策,减少生产风险^[6]。

(三) 模型构建

建立并应用模型,是转炉炼钢自动化控制功能实现的核心,可以预测并模拟计算炼钢工艺过程涉及的反应,进而实现对生产阶段的精准控制。转炉炼钢自动化控制模型,大致可分成动力学和热力学模型。动力学模型的建立,可以监测转炉炼钢工艺中的反应速率。相关公式说明,反应原料温度、浓度和反应压力,都会对反应速率产生影响,监控上述参数,并完成建模,就能得到炼钢工艺动力学模型,从而实现对炼钢工艺的优化。基于对动力学模型,工作人员可以对反应速度变化规律进行预测和分析,即使反应条件和环境不同,预测结果也不会受到影响。实践中,动力学模型一般在脱磷、脱硫和脱碳等工艺过程中应用较多,对成分控制、反应终点温度和反应时间等,都可以实现精准调控,进而实现钢产品质量和产量的双重提升^[7]。

热力学模型的建立,是因为炼钢工艺中化学反应较多,且需

要理想的反应温度,因此,如何精准控制动力学因素,保证整个反应过程的平衡,就是热力学模型建立的重要意义。热力学模型本质是数学模型,能够阐明物质、压力和温度等参数之间的关系,模型建立的底层逻辑是能量守恒与熵增原理定律,一般可通过吉布斯自由能最小化原则,求得最终结果。实践中,铁水预处理、给氧、生铁冶炼等不同工艺阶段,都会用到热力学模型,可最大程度减少能源消耗,达到降本增效的生产目的。

除了热力学和动力学模型,还包括工艺流程模型。工艺流程模型,顾名思义,能够对整体模拟炼钢工艺,可以说,转炉炼钢各道工序,都可以用到工艺流程模型。该模型的使用,需要将设备性能、能量传递和原料流动等不同因素纳入考量范畴中,保证动态系统的完整性。除了转炉炼钢生产阶段,工艺故障诊断、参数优化、炼钢设备检修与保养等,也可以使用工艺流程模型。在能源与物料消耗、生产污染等因素的监测上,以及设备投资和生

产计划的确定上,工艺流程模型也能实现定量评估,从而为企业提供量化数据,保证决策的科学性^[8]。

随着人工智能技术在炼钢行业应用不断推广,基于人工智能也能够建立相应模型。人工智能模型的建立,一般可会用到模糊逻辑、遗传算法和神经网络等技术,能够加强模型的智能化和精准化程度。此外,人工智能模型自适应能力较强,可结合炉内实时反应环境情况,对模型参数进行自动调整,且能够对不确定性、非线性等问题进行处理,令模型预测精度进一步提升。工艺实践中,人工智能模型可控制温度与原料配比及成分等,提高炼钢的精细化与智能化水平。

(四) 数据采集

转炉炼钢自动化控制技术,需要涉及大量数据采集,这就需要传感器元件的参与。磁力计、超声波探伤仪、红外线测温仪和热电偶等传感器,能够收集炉中原料成分、反应压力和反应温度等参数,通过电信号输出,可以对反应阶段实时参数进行监测,进而实时监控转炉炼钢工艺生产过程。实践中,一般可通过现场总线技术、高速数字信号处理器等达到数据采集的目的。现场总线技术能够保证通信的实时性,进而实现远程监控,保障系统稳定性。高速数字信号处理器则可以保障数据处理的高效性和精准性。人工智能模型还能够最大程度发挥大数据、云计算等技术优势,深度挖掘数据,并加强数据的智能分析,从而彰显数据的价值^[9]。

(五) 故障诊断

故障诊断可以对转炉炼钢工艺过程各项参数进行监测,结合正常工艺生产要求进行比对,判断机器是否发生故障,工艺生产是否有异常表现,还可以明确问题发生的位置与原因。故障诊断功能实现的基础是数据采集,一般会通过气体检测器、压力传感器和温度传感器等达到目的,上述传感器收集数据之后,可实时向控制系统发送,分析并处理数据之后,可以由控制系统发出指令。控制系统一般会结合传感器传输的数据,以及预设算法等,对炼钢设备状态进行自动调节,避免生产阶段稳定性受到影响^[10]。专家系统作为辅助系统的一种,可提供确切数据,帮助诊断故障。专家系统可基于历史数据和经验,通过模型的建立,对

生产过程进行模拟。系统一旦发现异常情况，专家系统可结合模型完成推理，辅助工作人员对问题进行定位。故障诊断可令转炉炼钢质量与效率进一步提升，对问题的快速定位，可避免炼钢设备长时间停机，减少工作人员维修的时间和人力成本。故障诊断同样可实现生产流程的优化，保证钢产品质量达到预期。

（六）系统集成

自动化控制系统，可监控并调节软件与硬件，一般可分成数据采集、处理、控制、决策等不同模块，各模块可对炼钢阶段数据进行采集，并在之后的工序中，完成处理与分析数据的任务。执行机构和传动装置，能够依照控制质量，对设备状态进行调整，使生产符合预期要求。欲保证自动化控制运行的效率，应当注意以下要素的控制^[11]。首先，系统设计上，应将炼钢工艺流程作为整体考虑要素，保证系统之间工作的协同性，对资源分配进

行优化。技术选择上，应以标准化通信协议，以及先进软件和硬件为主，保证系统可靠性与稳定性达到要求。系统同时需要加强管理维护，通过维护体系的持续完善，由专人每隔一段时间对设备进行检查，防止发生故障^[12]。

三、结束语

综上所述，转炉炼钢自动化控制技术的应用，对企业产品质量提升，节能减排有重要意义。实践中，企业应从系统结构、控制算法、模型构建、数据采集、故障诊断和系统集成等方面入手，提高控制系统的自动化水平，保证转炉炼钢工艺的稳定性。

参考文献

[1] 范毛毛, 吕亚, 王小平, 张志明. 100 t 转炉炉衬维护的工艺优化与生产实践 [J]. 河南冶金, 2022, 30(4): 30–32.
[2] 王杰, 曾加庆, 杨利彬, 汪成义. 转炉炼钢过程的精细化控制及协同优化 [J]. 钢铁, 2022, 57(5): 55–63.
[3] 吴钦鑫, 甘菲芳. 转炉用镁碳质耐火材料的应用技术及发展趋势 [J]. 武汉工程职业技术学院学报, 2022, 34(3): 30–34.
[4] 刘爱军, 杨小明. 转炉钢渣一次处理现状及发展趋势 [J]. 冶金标准化与质量, 2022, 60(4): 43–47.
[5] 王念欣, 董德明, 田超, 陈万福, 李海峰. SPHC 钢种转炉冶炼的生产实践 [J]. 山东冶金, 2022, 44(3): 9–10.
[6] 薛瑞, 张燕超, 张彩军, 王重君, 刘志远. 转炉底吹供气方式对熔池混匀效果的数值模拟 [J]. 中国冶金, 2020(3): 13–20.
[7] 王嘉, 富志生, 杨新龙, 杨军. 转炉冶炼高碳钢高拉碳深脱磷工艺优化 [J]. 甘肃冶金, 2023, 45(4): 52–55.
[8] 段兴亚, 万庆明, 黄伟, 耿明山. 不同钢材和耐材在转炉烟道内的应用性能对比分析 [J]. 冶金能源, 2023, 42(3): 40–43.
[9] 包向军, 陈凯, 酆秀萍, 杨筱静, 刘骁, 陈光. 基于深度学习的转炉煤气发生量预测模型 [J]. 钢铁, 2024, 59(1): 67–74.
[10] 张弛, 李晓刚, 李毅挺, 王燕伟, 李亚男. 唐钢新区转炉智能出钢系统的研究与应用 [J]. 冶金自动化, 2024, 48(2): 125–130.
[11] 王昊, 包向军, 周剑波, 汪晶, 张超. 基于差分进化算法的热轧板坯工艺参数优化 [J]. 冶金能源, 2024, 43(4): 48–53.
[12] 周军, 潘军, 赵滨, 沈思宝, 张文英. 活炉底转炉炉衬砖高效拆除的生产实践 [J]. 宽厚板, 2024, 30(5): 18–22.

常压油气储罐在役检验技术与应用研究

韩西成, 张锐, 王智

汉正检测技术有限公司, 四川 广汉 618300

DOI:10.61369/ME.2025050004

摘 要 : 本文旨在系统探讨常压油气储罐在役检验的核心价值、技术体系及工程应用实践。通过整合外观检查、无损检测、厚度测量、基础沉降测量等传统检验手段, 结合智能化检测技术发展趋势, 详细阐述各技术的原理、操作要点; 同时引入多案例分析, 验证检验技术在缺陷识别、安全风险预警、全生命周期管理中的关键作用, 为常压油气储罐的精细化维护管理提供技术支撑与实践参考, 最终保障石油化工行业的安全生产、环境安全及稳定运营。

关 键 词 : 外观检测; 无损检测; 厚度测量; 基础沉降测量

Research on In-Service Inspection Technology and Application of Atmospheric Oil and Gas Storage Tanks

Han Xicheng, Zhang Rui, Wang Zhi

Hanzheng Testing Technology Co., LTD., Guanghan, Sichuan 618300

Abstract : This paper aims to systematically explore the core value, technical system, and engineering application practice of in-service inspection for atmospheric oil and gas storage tanks. By integrating traditional inspection methods such as visual inspection, non-destructive testing, thickness measurement, and foundation settlement measurement, and combining with the development trend of intelligent testing technology, it elaborates on the principles and key operation points of each technology in detail. Meanwhile, multiple case studies are introduced to verify the key role of inspection technologies in defect identification, safety risk early warning, and full-life-cycle management. This study provides technical support and practical reference for the refined maintenance and management of atmospheric oil and gas storage tanks, and ultimately ensures the safe production, environmental safety, and stable operation of the petrochemical industry.

Keywords : visual inspection; non-destructive testing (NDT); thickness measurement; foundation settlement measurement

引言

常压油气储罐是石油化工行业核心存储设备, 广泛用于原油、成品油、液化石油气及化工中间体存储, 单罐容积数百至十万立方米, 多集中于大型储备库、炼化厂区。因储存介质多易燃易爆、强腐蚀, 且储罐长期服役面临环境腐蚀、力学损伤、老化劣化等问题, 易出现壁板减薄、焊缝裂纹、基础开裂、附件失效等缺陷^[1]。若未及时发现, 可能引发介质泄漏、火灾爆炸等事故。据统计, 近十年国内石化领域因储罐缺陷导致的泄漏事故中, 约 68% 与未有效开展在役检验相关, 年均直接经济损失超亿元, 还伴随严重环境污染风险。因此, 开展常态化、高精度在役检验^[2], 是发现潜在缺陷、评估结构完整性与安全裕度的关键, 也是制定维护策略、实现储罐全生命周期安全管理的关键。在石化行业向大型化、集约化发展的背景下, 储罐在役检验技术的规范化、智能化^[3], 对提升行业本质安全水平意义重大。

一、常压油气储罐在役检验方法

(一) 外观检查

外观检查是在役检验的基础环节, 以目视检测为核心, 辅以卷尺、水平仪、内窥镜等工具, 实现对储罐整体及关键部位的快

速筛查, 重点覆盖以下维度, 且需结合储罐结构特点与服役环境制定差异化检查方案:

1. 罐体结构检查

(1) 罐壁: 查看表面是否存在局部变形、鼓包、褶皱以及涂层破损情况——若防腐层出现大面积起皮、脱落或锈蚀, 需标记

为高风险区域，后续需结合无损检测确认基体损伤；同时检查罐壁接管与罐体连接部位是否存在渗漏痕迹。

(2) 罐顶：对固定顶储罐，重点检查顶板与承压环连接焊缝是否有开裂、渗漏，内浮顶储罐需检查浮盘密封装置的完好性、浮舱有无鼓包或泄漏，以及导向管、量油孔的直线度与垂直度。

(3) 罐底基础：采用水平仪检测基础平整度，查看混凝土环梁是否有开裂、沉降，散水坡是否破损；对钢结构基础，需检查支撑构件的腐蚀与螺栓紧固情况。

2. 安全附件检查

(1) 压力调节类：呼吸阀需检查阀体有无腐蚀、阀盘密封面是否完好，通过现场测试确认其开启压力与关闭压力是否正常；安全阀需核查校验有效期，确保铅封完好，且排放口无堵塞。

(2) 计量监测类：液位计需检查显示是否准确、连接部位有无泄漏；温度传感器、压力传感器需确认数据传输正常，无漂移或故障。

(3) 应急防护类：紧急切断阀需测试开关动作是否灵活，关闭响应时间是否满足规范要求；牺牲阳极、阴极保护系统需检查阳极损耗情况、保护电位是否处于有效范围。

(二) 无损检测

无损检测是深入识别储罐内部及表面缺陷的核心技术，需根据检测部位、缺陷类型及材料特性选择适配方法^[4]，具体技术要点如下：

1. 超声波检测技术

原理：利用超声波在金属材料中传播时的反射、折射特性，当超声波遇到缺陷或界面时，会产生反射波，通过接收并分析反射波的传播时间、幅度与波形，确定缺陷的位置、深度、长度及性质^[5]。

操作要点：检测前需对罐壁、底板表面进行预处理，去除涂层、锈蚀及油污；采用纵波探头检测内部缺陷，横波探头检测焊缝缺陷，对罐壁下三层需加密检测点，每块壁板检测点数不少于5点，接管部位需在上下左右4个方向各布置1个检测点；检测过程中需采用标准试块进行校准，确保检测灵敏度满足要求。



图1. 超声波检测设备图

2. 磁粉检测技术

原理：基于铁磁性材料的磁导率差异，对检测部位施加磁

场，使材料磁化，若存在表面或近表面缺陷，缺陷处磁导率会显著低于基体，导致磁力线发生畸变并产生漏磁场，此时施加磁粉，磁粉会在漏磁场处聚集，形成可目视观察的缺陷显示。

操作要点：检测前需将焊缝及应力集中区域表面打磨至露出金属光泽，打磨范围应覆盖焊缝两侧各50mm区域；根据检测部位选择磁化方式，罐壁纵焊缝、环焊缝宜采用磁轭法，小型附件宜采用触头法；检测后需彻底清除磁粉，避免剩磁影响储罐正常运行。

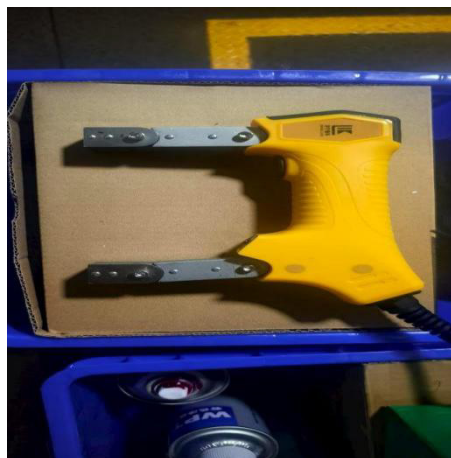


图2. 磁粉检测设备图

3. 声发射检测技术

原理：声发射技术基于“材料损伤时的能量释放”原理，利用高灵敏度声传感器捕捉储罐部件在受力或环境作用下产生的弹性波。当储罐存在裂纹萌生与扩展、焊缝开裂、腐蚀产物剥离、金属塑性变形等损伤时，内部原子间结合能会以弹性波形式释放，传感器将该机械振动信号转换为电信号，经前置放大器放大、数据采集系统处理后，通过分析信号的幅值、计数、上升时间、持续时间等特征参数，可定位损伤源位置、判断损伤类型，并评估损伤严重程度。

操作要点：(1) 检测前准备传感器布置：根据储罐结构与风险区域确定传感器数量与位置，罐壁检测通常沿圆周均匀布设，间距 $\leq 3m$ ，高度方向覆盖上、中、下三层壁板；传感器与罐体表面需通过耦合剂紧密贴合，耦合层厚度 $\leq 0.2mm$ ，确保信号传输效率，必要时采用磁性吸附或机械夹持方式固定传感器，避免检测过程中位移。(2) 系统校准：采用标准声发射源对检测系统进行灵敏度校准，确保各传感器响应一致性，校准误差 $\leq 5\%$ ；同时进行背景噪声测试，关闭储罐周边干扰源后，背景噪声幅值应 $\leq 20dB$ ，若超标需排查电磁干扰或机械振动。(3) 加载方案确定：根据储罐实际工况制定加载程序，如常压储罐可采用“充气加载-保压-排水卸载”循环，压力储罐可按设计压力的25%、50%、75%、100%分级升压，每级保压30min，通过加载过程中的信号变化捕捉损伤动态发展。(4) 检测过程控制信号采集：数据采样率 $\geq 1MHz$ ，信号阈值设定为背景噪声幅值的1.5~2倍，避免误触发；实时监测并记录各传感器的信号特征，对幅值 $> 80dB$ 、计数 > 50 次/min的异常信号，标记为“可疑损伤源”，并通过多传感器时差定位法确定其具体位置。



图3. 渗透检测设备图

4. 漏磁检测技术

原理：基于铁磁性材料的磁泄漏效应，通过磁化装置对储罐底板、壁板等铁磁性构件进行整体磁化，使构件内部产生均匀磁场；当构件存在表面或近表面缺陷时，缺陷处的磁阻增大，磁力线无法顺畅通过，会从缺陷处“泄漏”形成漏磁场；利用磁敏传感器采集漏磁场信号，经数据处理后转化为可视化图像，从而确定缺陷的位置、面积及严重程度。

操作要点：（1）预处理：检测前需清除构件表面的大型杂物，若表面存在涂层，需确认涂层厚度 $\leq 2\text{mm}$ ，避免涂层对磁场强度产生干扰；对于罐底检测，需先排空罐内介质并清理积水，确保检测区域干燥。（2）设备校准：采用与被检构件材质、厚度相同的标准试块进行校准，调节磁化强度、传感器灵敏度及数据采集参数，使设备能准确识别标准试块中的人工缺陷，且缺陷定位误差 $\leq 5\text{mm}$ 。（3）检测实施：罐底检测采用自动扫查装置，扫查速度控制在 $50\text{mm/s} \sim 100\text{mm/s}$ ，扫查间距重叠率 $\geq 10\%$ ，确保无检测盲区；罐壁检测可搭配爬壁机器人，实现垂直方向连续扫查，重点关注下三层壁板及焊缝区域；检测过程中实时记录漏磁场信号，对信号强度超过阈值的区域进行标记。

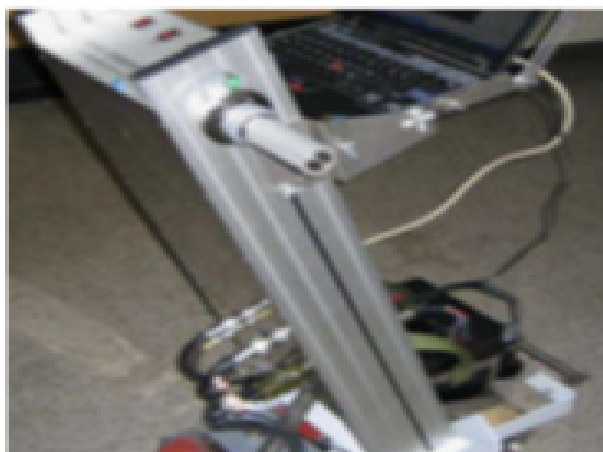


图4. 漏磁检测设备图

（三）厚度测量

厚度测量是评估储罐腐蚀程度、预测剩余寿命的关键手段，核心采用超声波测厚仪，结合储罐腐蚀规律与服役年限制定科学

的测量方案，具体要求如下：

1. 测量点规划

罐壁：根据腐蚀风险分级布置测点，下三层壁板每块板布置不少于8个测点，上三层壁板每块板布置不少于3个测点；对于介质含硫量 $> 1\%$ 或含氯量 $> 500\text{mg/L}$ 的储罐，需在液-气界面区域额外加密测点。

罐底：重点检测边缘板、中心板及底板与罐壁连接的边缘区域，边缘板每块布置不少于6个测点，中心板采用网格法布置；对曾发现过腐蚀减薄的区域，需扩大测量范围。

接管：对 $\text{DN} \geq 50\text{mm}$ 的接管，需在进口端、出口端及弯管处各布置4个测点（上下左右方向），尤其关注介质冲刷严重的部位（如接管入口处）。

2. 数据处理与评估

厚度对比：将实测厚度与储罐设计厚度、上次检验厚度进行对比，计算腐蚀速率，若腐蚀速率 $> 0.1\text{mm/年}$ 或 $> 0.05\text{mm/年}$ ，需分析腐蚀原因并制定针对性措施。

剩余寿命预测：根据剩余壁厚与腐蚀速率，计算储罐剩余寿命，当剩余寿命 < 5 年时，需缩短检验周期；当剩余壁厚 $<$ 设计厚度的80%时，需评估结构强度，必要时采取局部更换或加固措施。



图5. 厚度测量设备图

（四）基础沉降测量

基础沉降是影响常压油气储罐结构稳定性的核心因素，需通过全站仪高精度测量结合数据动态分析，精准评估沉降速率、沉降均匀性及对罐体的影响。该技术可同步获取监测点平面位移与高程变化，兼顾沉降量与罐体倾斜变形双重监测需求，具体技术要点与实施流程如下：

1. 监测点与测站布设方案

基础环梁监测点：沿储罐基础混凝土环梁外侧均匀布设，数量依储罐直径确定；采用不锈钢强制对中标志，确保稳固无位移，标志顶部刻十字丝作为全站仪照准目标，每个监测点需标注编号、布设日期及初始三维坐标。

罐壁监测点：在罐壁底部、中部、顶部对应环梁监测点位置，用磁性吸附式棱镜座布设，同步测量不同高度水平位移与沉降量以计算罐壁倾斜率；浮顶储罐需在浮顶边缘增设2~4个监测点，评估浮顶卡滞风险。

基准点与测站布设：在储罐影响范围外布设3个以上平面高程

基准点，形成三角控制网；基准点采用混凝土墩式结构，顶部装强制对中装置，定期用二等水准测量校准高程。测站需满足“通视良好、无遮挡”，每个测站至少观测8个以上监测点，大型储罐需布设2~3个测站形成闭合观测网，避免盲区。

2. 全站仪检测操作要点与频次

检测前准备：设备选型与校准：选用高精度全站仪，检测前按规范校准2C值、指标差、视准轴误差，确保角度测量偏差 $\leq \pm 1''$ 、距离测量偏差 $\leq \pm 1\text{mm}$ ；棱镜需用高精度对中棱镜，并核对棱镜常数与全站仪匹配性。

现场环境控制：选择无风、无强光直射、温度稳定时段检测；清除罐壁监测点表面油污、锈蚀，确保棱镜座安装牢固；全站仪架设在测站强制对中装置上，精确对中整平后静置15分钟，待仪器与环境温度一致再测量。

检测实施流程：1) 定向与设站：以2个基准点为已知点，用“后方交会法”设站并计算测站三维坐标，设站后观测第3个基准点检核，坐标差值 $\leq \pm 2\text{mm}$ 即为合格；对每个监测点采用“多测回观测法”，观测2个测回，记录水平角、垂直角及斜距，通过三角高程公式算高程，极坐标公式算水平坐标。2) 数据记录与检核：用全站仪配套软件实时记录数据，每个测站观测完成后计算闭合差，高程闭合差 $\leq \pm 4\sqrt{n}\text{mm}$ 、水平坐标闭合差 $\leq \pm 2\sqrt{n}\text{mm}$ ，超限需重新观测至合格。

监测频次：1) 新建储罐：投用后前3个月每月1次，3~12个月每3个月1次，1年后沉降稳定则每6个月1次；若沉降速率 $> 1\text{mm/月}$ 或水平位移量 $> 8\text{mm/月}$ ，加密至每15天1次。2) 在用储罐：正常服役期每6个月1次；遭遇极端天气、周边施工或历史数据异常时，需在72小时内开展应急监测，并连续监测1个月捕捉沉降动态。



图6. 基础沉降测量设备图

3. 数据处理与风险评估

数据处理：用专业测量软件对观测数据平差计算，剔除粗

差，生成各监测点“沉降量-时间”“水平位移-时间”“倾斜率-时间”曲线；结合罐壁不同高度监测点数据，计算罐壁弯曲变形值，评估沉降是否导致罐体局部应力集中。

风险评估：1) 沉降稳定判断：连续2次监测沉降速率 $\leq 0.3\text{mm/月}$ 、水平位移量 $\leq 3\text{mm/月}$ ，且不均匀沉降差无明显增大趋势，判定基础沉降稳定；若沉降速率持续 $> 1\text{mm/月}$ 或不均匀沉降差 $> 3\text{‰}$ ，需结合有限元分析模拟罐壁应力，判断焊缝开裂风险。2) 倾斜影响评估：罐壁倾斜率 $> 0.8\text{‰}$ 时，需检查浮顶导向管与浮盘配合间隙，用内窥镜检测罐底与基础接触状态，防止底板局部悬空；水平位移量 $> 10\text{mm}$ 时，排查基础滑动风险。

二、在役检验案例分析

以某石油储备库的一座10万立方米常压原油储罐为例。在定期在役检验中，外观检查发现罐顶局部有轻微凹陷变形，可能是由于长期承受内部压力波动及积雪等外部荷载所致。采用超声波检测对罐壁焊缝进行检测时，发现一处焊缝存在内部未熔合缺陷，长度约50mm。经磁粉检测进一步确认，该缺陷位于焊缝表面以下约5mm处。厚度测量结果显示，罐底边缘板局部区域由于长期受介质和土壤腐蚀，厚度减薄较为明显，最薄处已接近设计厚度的80%。根据检验结果，对罐顶凹陷部位进行了修复和加固处理；对于焊缝缺陷，采用挖补修复工艺，确保焊缝质量；针对罐底边缘板厚度减薄问题，制定了局部更换计划，并加强了罐底的防腐措施。通过及时的在役检验和有效修复措施，保障了该储罐的安全运行，避免了潜在事故的发生。

三、结论

常压油气储罐在役检验是保障其安全运行的“生命线”，通过综合运用外观检查、无损检测、厚度测量等技术，可实现对储罐从表面到内部、从结构到附件的全面检测，及时发现变形、裂纹、腐蚀减薄等缺陷，为安全风险评估提供精准数据支撑。结合上述案例可知，基于检验结果制定的修复与维护策略，能够有效遏制缺陷扩展，降低事故风险，延长储罐使用寿命，同时减少非计划停机时间，为企业创造显著经济价值。此外，在役检验还需注重“差异化”与“常态化”：针对不同介质、不同结构的储罐，需制定个性化检验方案；同时建立“年度常规检验+季度专项检查+月度附件巡检”的三级检验体系，确保储罐全生命周期处于有效监控范围内。

参考文献

- [1] 张永山. 储油罐腐蚀与检测技术研究 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2025, 45(03): 64-66+73
- [2] 李斌. 大型常压储罐性能检测方法的分析 [J]. 实验室检测, 2025, 3(05): 93-96.
- [3] 孙博, 张云卫, 崔强, 等. 液化天然气 (LNG) 储罐外罐完整性检测及监测技术研究现状 [J]. 工程质量, 2025, 43(S1): 158-162.
- [4] 李帅. 无损检测技术在原油储罐中的应用分析 [J]. 中国设备工程, 2025, (03): 206-208.
- [5] 韩庆, 赵杰, 仇东泉, 等. 基于声发射检测的储罐腐蚀检测及定位研究 [J]. 清洗世界, 2025, 41(01): 66.

绿色节能理念下的暖通工程水源热泵技术应用

陈策

河北建筑工程学院, 河北 张家口 075132

DOI:10.61369/ME.2025050008

摘 要： 在“双碳”战略引领下，建筑节能与绿色暖通技术发展面临新要求。本文立足绿色节能理念，系统阐释水源热泵技术原理与工程优势，重点探讨其在建筑暖通系统中的集成应用路径，包括运行调控、水体热源采集、系统协同对接与冷热负荷平衡等关键技术，一起为水源热泵系统的高效运行与工程推广提供理论依据与实践指导。

关 键 词： 绿色节能理念；暖通工程；水源热泵技术

Application of Water Source Heat Pump Technology in HVAC Engineering under the Concept of Green Energy Conservation

Chen Ce

Hebei University of Architecture and Engineering, Zhangjiakou, Hebei 075132

Abstract： Under the guidance of the "dual carbon" strategy, the development of building energy efficiency and green HVAC technology is facing new requirements. This article is based on the concept of green energy conservation and systematically explains the principles and engineering advantages of water source heat pump technology. It focuses on exploring its integrated application path in building HVAC systems, including key technologies such as operation regulation, water source collection, system coordination and docking, and cold and hot load balancing. Together, they provide theoretical basis and practical guidance for the efficient operation and engineering promotion of water source heat pump systems.

Keywords： green energy-saving concept; HVAC engineering; water source heat pump technology

引言

在节能减排与绿色建筑持续推进的背景下，传统暖通系统普遍存在能耗高、效率低、排放大等问题，亟需引入清洁、高效、可持续的能源利用技术。水源热泵以其依托水体热能实现冷热双向供给、年均运行效率高、环境适应性强等优势，成为绿色暖通系统建设的重要路径。然而，在实际工程中仍面临运行控制复杂、系统对接难度大、水体采热技术要求高等问题。因此，深入研究绿色节能理念下水源热泵技术的运行机制与系统集成策略，具有重要的现实意义与推广价值。

一、水源热泵技术原理

水源热泵技术是一种基于热力学第二定律原理、借助高效传热工质与机械能驱动实现低位热能转移与利用的冷热转换技术，其核心机制在于通过热泵主机制冷剂的相变循环过程，将分布广泛、温度相对稳定的水体热能进行高效提取与释放，进而实现建筑物的供热与供冷功能^[1]。具体运行过程中，系统通过水侧换热器将江河水、湖泊水、地下水或工业废水中的热量转移至冷媒系统，在压缩机作用下使低温低压气态冷媒被压缩为高温高压状态后进入冷凝器释放热量，并通过膨胀阀节流后再次蒸发吸热，形成连续稳定的逆卡诺循环。冬季运行时，系统从水体中提取热量，经冷媒循环加热后通过空调末端系统向室内供热；夏季则通过室内热量吸收后释放至水体中，实现供冷功能^[2]。由于水体热

源全年温度波动小，热泵系统运行稳定性高，能效比远优于传统空调与锅炉系统，同时具有较高的经济性与环境友好性。该技术在热源形式、传热效率、系统控制与能源综合利用等方面具有高度可调性与工程适配性，成为绿色建筑及节能型暖通系统发展的重要技术支撑，也是推动建筑能源系统低碳化、可再生化的关键途径。

二、水源热泵技术在暖通工程中的应用优势

水源热泵技术在暖通工程中的应用优势主要体现在能源利用效率高、运行成本低、环境友好性强、系统稳定性优良与适应性广泛等多个方面，充分契合现代建筑节能减排与绿色低碳发展需求。在能源效率方面，由于水体热源全年温度波动较小，热泵系

统在相对稳定的热源环境中运行，其制热或制冷性能系数远高于空气源或地源热泵，尤其在严寒或酷热地区表现出明显的能效优势，能够显著降低单位供热或供冷所需电能消耗^[3]。在运行成本方面，水源热泵通过采用可再生自然水体或工业余热作为热源，减少了对传统高能耗设备如锅炉和冷却塔的依赖，降低了系统运行中的燃料消耗与维护成本，具有较高的经济性与长期投资回报率。在环境效益方面，该系统在运行过程中无直接燃烧过程，不排放烟尘、氮氧化物与二氧化碳等污染物，可有效减少建筑运行过程中的碳排放总量，是实现绿色建筑能耗“双控”与环境“零污染”的重要支撑手段^[4]。在系统稳定性方面，由于水源热泵具有热源温度恒定、换热效率高、主机运行平稳等特点，可在全年范围内实现连续稳定的冷热负荷调节，满足复杂工况下对温湿度环境的精准控制需求。此外，水源热泵系统适用于多种类型建筑，包括办公楼、医院、学校、住宅小区与工业厂房等，且可与市政供水系统、中水回用系统及工业余热回收系统协同整合，实现资源循环利用与能源梯级利用，体现出良好的系统兼容性与工程推广价值。

三、绿色节能理念下的暖通工程水源热泵技术应用

（一）水源热泵系统运行调控技术

水源热泵系统运行调控技术是保障其高效、稳定、节能运行的核心技术环节，主要涉及热泵主机启停逻辑、换热系统动态调节、水泵变频控制、系统负荷预测与智能运行策略等多个方面。为实现系统在不同季节与工况下的能效最优运行，需构建基于冷热负荷动态响应的自适应调控机制，通过监测室内外温湿度、水源进出水温、末端设备供回水温差等关键参数，实时调整系统运行状态与能效输出水平^[5]。在水系统调节方面，需配置高精度变频水泵，通过优化水流分配控制策略，确保冷凝器与蒸发器两侧流量与换热能力匹配，提升系统换热效率并减少能源浪费。同时，为防止水侧系统出现热源温度过低或流量不足等非正常运行情况，还需在控制逻辑中嵌入限温保护、缺水报警与联动切换程序，保障系统运行安全。在主机运行调度方面，可依据建筑冷热负荷变化趋势，采用主辅机联动、多模块分级启停与时间段运行策略，实现冷热量精准输出与系统负荷平衡。

（二）水源热泵与建筑暖通系统对接技术

水源热泵系统与建筑暖通系统的有效对接是保障整体系统稳定性、舒适性与节能性的重要技术保障，其对接技术涵盖水系统连接模式、热湿环境匹配机制、末端设备适配性与系统集成等多个方面。在水系统连接方面，应根据建筑冷热负荷特性选择直接供水型或中间换热型连接方式，前者可实现较高的能效输出，后者则在保障系统隔离性与运行安全性方面具有优势^[6]。在末端设备适配方面，应合理选择风机盘管、地板辐射系统、新风机组等不同形式终端，结合水源热泵出水温度范围设计供回水温差与水力平衡系统，确保水力系统稳定与热量传递效率。在热湿环境适配方面，需通过精准调控室内供水温度与风量变化，实现对不同功能空间温湿度要求的差异化响应，同时有效避免系统在

夏季除湿效率下降或冬季供热不足等问题的发生。在系统集成方面，应实现水源热泵主机、水泵、阀门、末端设备与建筑能源管理系统的集中联动控制，采用分区控制、远程监控与动态调节策略，实现温度、湿度、时间、区域多维度的智能协同调控^[7]。

（三）水体热源采集与输送技术

水体热源采集与输送技术是水源热泵系统高效运行的基础保障环节，其技术核心在于稳定、高效、低阻力地将水体中的低位热能输送至热泵系统换热装置，实现冷热量的充分转移与利用。在采集端，应依据水源类型（如地下水、地表水、工业废水等）及工程环境条件，合理选择井式取水、水下管道取水或换热器换热取能等方式，并配套防腐蚀、防结垢、防淤堵措施，确保系统长期稳定运行。在输送系统方面，应结合热泵机组负荷要求与输送距离设计合适的管径、扬程与流量参数，优选高密度聚乙烯管、复合保温管等高耐压、低热损材料，减少热能损耗与系统压降。同时，为提升系统智能化水平与节能效率，需在输送系统中设置变频调速泵组、压力维稳装置与温差控制单元，构建动态调节水量、维持水温稳定、保障供回水压差均衡的闭环控制机制^[8]。在寒冷地区或水源条件波动较大的区域，还需设置换热缓冲装置、防冻回流系统与备用热源接口，提升系统的环境适应性

与运行安全性。

（四）热泵主机与系统集成技术

热泵主机作为水源热泵系统的核心设备，其性能水平与系统集成度直接决定整个暖通系统的运行效率与能耗水平。热泵主机与系统集成技术主要包括机组选型适配、冷热源系统匹配、换热系统优化与控制系统一体化等关键内容。在主机选型方面，应依据建筑冷热负荷特性、水源温度变化范围与运行周期需求，选择具备高能效比、宽温区运行能力与低噪声特性的螺杆式、离心式或模块化热泵机组，并充分考虑机组冗余度配置与负荷调节能力，确保运行安全与节能稳定。在系统集成方面，需科学配置冷凝器与蒸发器换热模式，优化换热效率，避免冷热侧换热不平衡带来的能耗增加；同时通过集成缓冲水箱、三通切换阀、旁通平衡管路等技术手段，实现冷热工况的快速切换与稳定运行^[9]。在自动控制系统方面，应构建以主机为核心的智能协同平台，实现对水源侧、水系统侧与空调末端系统的联动控制，依据实时负荷变化动态调整机组启停状态、压缩机转速、水泵流量与阀门开度，最大限度提升整体系统运行效率。

（五）冷热负荷平衡技术

冷热负荷平衡技术是水源热泵系统实现高效能量管理与稳定运行的核心保障机制，其关键在于通过调控系统供热与供冷能力与建筑实际热负荷之间的动态匹配，防止出现系统能量输出冗余、冷热侧不平衡、水体热污染与设备运行效率下降等问题。在系统设计阶段，应通过详细的建筑能耗模拟分析与负荷预测计算，合理配置主机容量、末端设备布置与调节系统响应速度，确保冷热系统的热力参数协调一致。在运行过程中，可采用冷热储能联合调节策略，通过设置蓄热蓄冷水箱，实现负荷峰谷之间的能量转移与平衡，同时缓解短时用能波动对热泵系统运行的冲

击。针对冷热负荷变化频繁的建筑环境，还应设置负荷预测模型与实时调度算法，结合天气数据、使用率变化与历史负荷趋势，动态调整热泵运行参数与负荷分配策略，保障系统始终处于能效最优区间运行。此外，在冷热源侧，应加强换热器通流能力与热交换效率的控制，防止因热源侧换热不良导致冷热输出端压力不平衡与能效降低^[10]。在多热源联合供能模式下，还可引入智能能量管理平台，根据不同热源能效与成本动态进行切换调度，实现系统整体冷热输出能力的柔性匹配与调和运行。

四、结语

水源热泵技术作为绿色节能理念在暖通工程领域的重要实践

形态，不仅契合可再生能源高效利用的发展趋势，也有效回应了建筑节能降耗与生态环境保护的现实诉求。通过运行调控优化、系统集成创新、热源采集升级与冷热负荷平衡机制构建，水源热泵系统在节能性、经济性与可靠性方面具有显著优势。未来应进一步推动核心技术突破与系统协同设计，强化智能控制平台建设，实现绿色节能理念在建筑全生命周期中的深入嵌入，全面提升暖通工程系统能效与可持续发展水平。

参考文献

- [1] 王德海. 热回收技术在暖通工程中运用分析 [J]. 中国设备工程, 2024, (12): 4-6.
- [2] 齐立宝, 张芹芹, 聿洁. 地源热泵技术在暖通工程中的应用 [J]. 工程技术研究, 2022, 7(16): 197-199.
- [3] 单卓. 水源热泵技术在暖通工程中的应用 [J]. 中阿科技论坛 (中英文), 2022, (04): 89-92.
- [4] 冯涛. 农村地区太阳能耦合水源热泵热电联产应用分析 [J]. 农村电工, 2025, 33(02): 32-33.
- [5] 柯进祥, 胡显芝. 地下空间暖通系统的热环境调控策略研究 [J]. 大众标准化, 2024, (24): 83-84+87.
- [6] 洪青春. 岳阳市某图书馆暖通空调设计 [J]. 制冷与空调 (四川), 2024, 38(06): 853-859+869.
- [7] 张传潭. “双碳”背景下暖通专业绿色智慧节能建筑优化设计策略 [J]. 住宅与房地产, 2024, (17): 86-88.
- [8] 张丁元. 建筑环境与设备工程节能施工技术 [J]. 建材发展导向, 2024, 22(05): 117-119.
- [9] 赵家楠. 空气源—水源热泵蓄供联合系统的应用研究 [D]. 长春工程学院, 2023.
- [10] 陈晓贤. 节能技术在暖通空调安装施工中的应用 [J]. 建材发展导向, 2023, 21(20): 196-198.

原子吸收光谱仪在地下水中铜、锌检测中的干扰因素及对策

邓富强

江门公用检测科技有限公司, 广东 江门 529000

DOI:10.61369/ME.2025050010

摘 要 : 地下水是重要水资源, 其重金属污染受关注。铜 (Cu) 和锌 (Zn) 是地下水中常见重金属, 原子吸收光谱法 (AAS) 因操作简便、灵敏度高、选择性好, 被广泛用于二者检测。但实际检测中, 地下水基质复杂, 易产生多种干扰, 影响检测结果准确性和可靠性。本文分析了原子吸收光谱仪检测地下水中铜、锌的干扰因素, 包括物理、化学、光谱和背景干扰, 并针对各类干扰提出消除或抑制对策, 如优化仪器参数、用化学改进剂、基体匹配、背景校正技术等, 为提高检测准确性提供参考。

关 键 词 : 原子吸收光谱仪; 地下水; 干扰因素

Interference Factors and Countermeasures in the Detection of Copper and Zinc in Groundwater Using Atomic Absorption Spectrometry

Deng Fuqiang

Jiangmen Public Testing Technology Co., Ltd., Jiangmen, Guangdong 529000

Abstract : Groundwater is an important water resource, and its heavy metal contamination has drawn significant attention. Copper (Cu) and zinc (Zn) are common heavy metals found in groundwater, and Atomic Absorption Spectrometry (AAS) is widely used for their detection due to its simple operation, high sensitivity, and good selectivity. However, in practical detection, the complex matrix of groundwater can easily produce various interferences, affecting the accuracy and reliability of detection results. This paper analyzes the interference factors in the detection of copper and zinc in groundwater using Atomic Absorption Spectrometry, including physical, chemical, spectral, and background interferences. It also proposes countermeasures to eliminate or suppress these interferences, such as optimizing instrument parameters, using chemical modifiers, matrix matching, and background correction techniques, providing references for improving detection accuracy.

Keywords : atomic absorption spectrometer; groundwater; interference factors

引言

地下水是水资源重要组成部分, 在维持生态等方面有关键作用。工业化和城市化加快, 重金属污染对地下水质量威胁增大。铜和锌虽为人体必需微量元素, 但过量摄入有害, 准确检测地下水中铜、锌含量意义重大。原子吸收光谱法基于气态基态原子对特征谱线吸收程度定量分析, 有检出限低等特点, 是水环境监测中重金属检测常用手段。不过, 地下水样品成分复杂, 含大量无机离子等, 检测中基质成分易与目标元素相互作用, 影响原子化过程, 使检测结果出现偏差。所以, 研究该法检测地下水中铜、锌的干扰因素并采取对策, 是确保检测数据准确科学的前提, 对地下水环境质量评价等有重要价值。本文将围绕原子吸收光谱仪检测地下水中铜、锌的主要干扰类型讨论并提出解决措施。

一、原子吸收光谱仪测定地下水铜、锌的干扰因素分析

(一) 化学干扰及其在地下水检测中的表现

化学干扰源于待测元素在溶液或原子化器中与其他组分反

应, 生成难挥发或难解离化合物, 降低原子化效率, 使吸光度下降。地下水中多种共存离子可引发干扰, 如磷酸根、硫酸根、碳酸根离子及某些高浓度阳离子与铜、锌反应, 生成的化合物在高温下不易分解为基态原子, 干扰测定。实验中, 化学干扰常使校准曲线非线性弯曲, 测定灵敏度降低。

（二）物理干扰及其在地下水检测中的表现

物理干扰主要因样品物理性质改变，如粘度、表面张力、密度和雾化效率等，影响进入原子化器的试样量或雾化、传输和原子化效率，导致吸光度波动。地下水检测中，样品基体特性（高盐度、高浊度）、前处理引入的溶剂种类和溶液酸度变化等，会改变样品物理状态，使进入火焰的试样量不稳定或雾化效率不一致。物理干扰表现为吸光度读数不稳定或测定值与标准溶液吸光度值有系统性偏差^[1]。

（三）电离干扰及其在地下水检测中的表现

电离干扰是在高温火焰中，待测元素基态原子吸收能量变成离子，使基态原子数量下降，吸光度降低。需分析铜、锌在常用火焰温度下是否易电离，同时考虑地下水中其他易电离元素（如钾、钠），它们会改变火焰电子浓度，影响铜、锌电离平衡。电离干扰使工作曲线向吸光度轴弯曲。

（四）光谱干扰及其在地下水检测中的表现

光谱干扰指待测元素分析线光谱区域内的其他光谱信号干扰，成因有二：一是共存元素分析线与待测元素分析线重叠；二是非待测元素吸收引起的背景吸收（分子吸收和光散射）。地下水中需考察其他元素分析线与铜、锌特征吸收线是否重叠，原子化阶段生成的分子吸收和固体颗粒光散射会造成背景吸收，使总吸光度偏高。光谱干扰表现为测定灵敏度降低、选择性变差、仪器基线漂移，背景扣除困难或不准确^[2]。

二、针对地下水铜、锌检测干扰的对策探讨

（一）化学干扰的消除对策

针对化学干扰，可采用释放剂消除。加入镧离子（ La^{3+} ）或锶离子（ Sr^{2+} ）等金属离子，与干扰性共存离子如磷酸根离子（ PO_4^{3-} ）形成稳定化合物，“释放”待测的铜、锌离子使其顺利原子化。在地下水铜、锌检测中，当磷酸根离子为主要干扰源时，向标准、空白及样品溶液中定量添加镧盐或锶盐，能补偿负干扰。也可使用保护剂，如乙二胺四乙酸（EDTA）或8-羟基喹啉，与铜、锌离子形成气相稳定络合物，阻止其与干扰组分反应，尤其适用于干扰物浓度高时。还可改变火焰条件，调整燃气与助燃气比例，采用富燃或贫燃火焰分解难解离化合物，减少干扰。标准加入法也是常用策略，将不同量待测元素标准溶液加入等量样品溶液，测吸光度，绘制曲线外推求样品中待测元素原始浓度，能补偿样品基体效应及部分化学干扰^[3]。

（二）物理干扰的消除对策

对于物理干扰，配制匹配的空白和标准溶液很关键。标准和空白溶液主体成分应模拟待测地下水样品基体组成，使样品与标准物理性质一致，抵消进样量和原子化效率变化。对于盐度或浊度高的地下水样品，适当稀释可降低粘度、减少固体颗粒影响，减轻物理干扰。标准加入法也适用于补偿物理干扰，通过增加待测元素浓度观察响应变化，消除基质物理性质差异带来的系统误差。此外，优化雾化条件，检查清洁雾化器，调整燃烧器高度和角度，确保样品溶液高效稳定雾化并引入火焰，维持进样状态一致。

（三）电离干扰的消除对策

消除电离干扰可添加消电离剂，向样品溶液中加入钾（K）、

钠（Na）或铯（Cs）的盐类等易电离元素，增加火焰局部电子浓度，抑制待测铜、锌元素电离，保证测定准确性。在地下水检测中应用时，需考虑消电离剂引入是否带来其他干扰或增加背景吸收，确定合适添加量。调整火焰类型和燃气比，选择空气-丙烷火焰或调空气-乙炔火焰至富燃状态，降低火焰温度，减少待测元素电离程度。

（四）光谱干扰的消除对策

针对光谱干扰，可选择合适分析线，若其他元素吸收线与待测元素分析线重叠，查阅谱线表选用待测元素其他不受干扰的吸收线。例如，检测铜时，除常用的324.7nm谱线外，若存在干扰，可选用327.4nm等谱线；检测锌时，若213.9nm谱线受干扰，可考虑206.2nm谱线。

减小光谱通带宽度，提高单色器分辨率，排除邻近谱线干扰。对于铜、锌的检测，通常将光谱通带宽度设置在0.2-0.5nm，既能保证有足够的光强，又能有效分离邻近的非特征谱线。

使用背景校正技术处理光谱干扰，在火焰原子吸收法中，常用氘灯背景校正技术。该技术利用氘灯发射的连续光谱，通过交替测量氘灯（连续光源）和空心阴极灯（锐线光源）的信号，计算两者的差值来扣除背景吸收值。其优势在于对紫外区的背景校正效果较好，能有效应对地下水中因分子吸收和光散射产生的背景干扰。

需要注意的是，塞曼效应背景校正主要应用于石墨炉原子吸收法，火焰原子吸收法中一般不采用该技术。实际应用中，需根据地下水样品的基体复杂程度、干扰类型及火焰原子吸收法的特点，优先选择氘灯背景校正技术，以确保背景扣除的准确性，提高检测结果的可靠性^[4]。

三、地下水铜、锌检测干扰对策的实践考量

（一）样品前处理对干扰控制的影响

地下水样品的采集过程直接影响后续检测的干扰水平，需严格遵循规范操作，如使用聚乙烯瓶采集样品，避免容器材质对铜、锌离子的吸附。采集时应充分混合水样，确保样品代表性，减少因水样不均导致的干扰误差。保存环节中，酸化处理是控制干扰的关键步骤，通常加入硝酸使样品pH<2，这一操作可有效抑制微生物活动，防止铜、锌离子形成沉淀或被生物吸附。有实验数据表明，未经酸化的地下水样品在室温下保存7天后，铜、锌检测值分别下降12%和8%，而酸化处理后的样品在相同条件下检测值变化均小于2%。

过滤处理能去除水样中的悬浮颗粒物，这些颗粒物可能吸附铜、锌离子，或在原子化过程中产生物理干扰。对于浊度较高的地下水样品，采用0.45μm滤膜过滤可显著降低基体干扰。直接测定法适用于基体简单、干扰物质少的地下水样品，操作简便且能快速获得结果，但在基体复杂（如高盐度、含有机物较多）的情况下，干扰较为明显。萃取富集法则通过有机溶剂将铜、锌离子从水相转移到有机相，实现分离和富集，能有效减少基体中其他离子的干扰。例如，采用吡咯烷二硫代氨基甲酸铵（APDC）-甲基异丁基酮（MIBK）体系萃取地下水样品中的铜、锌，可使共存离子的干扰率降低60%以上，尤其适用于低浓度铜、锌且基体

复杂的水样检测。

选择前处理方法时，需综合考虑样品特性和检测需求。对于高盐度地下水，若采用直接测定法，大量盐分在火焰原子化时会产生电离干扰和物理干扰，此时萃取富集法更具优势；而对于低浊度、低干扰的水样，直接测定法可提高检测效率。

（二）仪器参数优化与日常维护

火焰原子化器参数的优化对减少物理和光谱干扰至关重要。燃气与助燃气比例会影响火焰温度和性质，对于铜、锌检测，通常采用乙炔-空气火焰，当乙炔与空气比例为 1:4 时，火焰处于化学计量状态，能有效减少电离干扰和化学干扰。燃烧器高度的调整可使光源发出的特征光通过原子浓度最高的区域，铜元素的最佳燃烧器高度一般为 7-9mm，锌元素为 5-7mm，此高度下检测灵敏度最高，干扰最小。灯电流过大会导致灯的使用寿命缩短，且可能产生自吸效应，而过小则会使光强不足，信噪比降低，铜灯和锌灯的最佳工作电流通常为 3-5mA。光谱带宽的选择需根据元素特征谱线情况，铜的特征谱线为 324.7nm，锌为 213.9nm，选择 0.2-0.5nm 的光谱带宽可有效避免邻近谱线的光谱干扰。

仪器的日常清洁是保持检测稳定性的基础，燃烧器缝隙若被盐类或颗粒物堵塞，会导致火焰形态异常，影响原子化效率，需每周用专用工具清理一次。空心阴极灯的检查与更换不容忽视，当灯的发光强度明显下降或出现杂散光时，会增加检测干扰，应及时更换，一般铜、锌空心阴极灯的使用寿命在 500 小时左右。雾化器的维护需定期进行，通过调节雾化器流量使雾化效率达到最佳状态，若发现雾化器堵塞，可用稀硝酸浸泡并超声清洗，确保样品均匀雾化，减少因雾化不均导致的干扰。

（三）对策选择的原则与综合应用

在实际检测中，对策的选择需紧密结合地下水样品的具体特性。对于盐度较高的地下水，如某些滨海地区的地下水，其中含有大量钠离子、氯离子等，单独采用仪器参数优化难以完全消除干扰，此时可结合萃取富集法，先将铜、锌离子从高盐基体中分离出来，再进行测定。对于浊度较高的样品，过滤处理是基础步骤，若过滤后仍存在干扰，可进一步优化燃烧器高度和燃气比例。当水样中存在高浓度共存离子，如铁、锰离子时，可通过选择合适的光谱带宽或采用背景校正技术来减少光谱干扰。

同时，检测要求也是对策选择的重要依据。若需快速获得检测结果，且样品基体简单，直接测定法结合仪器参数优化即可满足需求；若对检测精度要求较高，尤其是低浓度铜、锌的检测，需采用萃取富集法，并配合严格的仪器维护，以降低干扰。经验

积累在对策选择中发挥重要作用，长期从事地下水检测的人员可根据水样外观、来源地等信息，初步判断可能存在的干扰类型，从而快速确定初步的对策组合，再通过实验验证进行调整。例如，对于工业污染区的地下水，可预判可能存在复杂有机物干扰，优先采用萃取富集法结合背景校正技术。

（四）方法学验证的重要性

方法学验证是确认所选干扰对策有效性的关键环节。线性范围的测定需配置一系列不同浓度的铜、锌标准溶液，通过原子吸收光谱仪测定吸光度，绘制标准曲线，要求相关系数 $r \geq 0.999$ ，以确保在检测范围内浓度与吸光度呈良好的线性关系。检出限是衡量方法灵敏度的指标，通过对空白样品进行多次测定（一般为 11 次），计算标准偏差，再根据一定置信水平（通常为 99.7%）确定检出限，铜、锌的检出限一般应分别低于 0.01mg/L 和 0.005mg/L。

精密度验证通过对同一均匀样品进行多次重复测定（通常为 6 次），计算相对标准偏差（RSD），要求 $RSD \leq 5\%$ ，以反映方法的重复性。准确度验证可采用标准物质对照法，如使用国家一级地下水标准物质（编号 GBW08607），测定结果与标准值的相对误差应 $\leq 10\%$ ；也可采用加标回收实验，在样品中加入已知量的铜、锌标准溶液，计算回收率，通常要求回收率在 90%-110% 之间。某环境监测站 2022 年对地下水铜、锌检测方法进行验证时，铜的加标回收率为 95%-105%，锌为 92%-108%，均符合要求，表明所选干扰对策有效，方法可靠。只有通过全面的方法学验证，才能确保检测结果准确可靠，为地下水环境评价和污染治理提供科学依据^[5]。

四、结语

原子吸收光谱仪在地下水铜、锌检测中虽面临化学、物理、电离和光谱等多种干扰，但通过针对性的消除对策和实践考量，可有效降低干扰影响，确保检测结果的准确性。在实际应用中，需根据地下水样品的具体特性和检测要求，综合运用各种对策，并重视方法学验证。只有这样，才能为地下水环境评价和污染治理提供可靠的数据支持，为保护地下水资源贡献力量。未来，随着检测技术的不断发展和创新，有望进一步提高原子吸收光谱仪检测地下水铜、锌的准确性和效率，更好地满足环境监测和保护的需求。

参考文献

- [1] 叶翠情，甘颖. 火焰原子吸收光谱法测定铜冶炼烟尘中的锌 [J]. 山西冶金, 2021.
- [2] 徐佳佳. 火焰原子光谱同时测定土壤中铜锌铅镉 [J]. 黑龙江环境通报, 2019, 043(002): 34-36.
- [3] 王虹，魏秉炎，杨金坤. 火焰原子吸收光谱仪测定锰矿中杂质元素方法探讨 [J]. 中国口岸科学技术, 2022(12): 47-51.
- [4] 沈晓艳. 原子吸收光谱仪在生活饮用水中的应用 [J]. 健康忠告, 2022(21): 181-183.
- [5] 黄丹宇，陶美娟. 微波消解—火焰原子吸收光谱法测定锰铁合金中 7 种微量元素 [J]. 分析仪器, 2022(6): 5.

煤炭企业加快推进安全治理体系和治理能力现代化的探索与实践

郭伟伟

陕西华电榆横煤电有限责任公司，陕西 榆林 719000

DOI:10.61369/ME.2025050011

摘 要： 本文聚焦煤炭企业安全治理体系和治理能力现代化，剖析当前存在的思想观念落后、制度碎片化、基础薄弱等问题，结合行业特点探索实践路径。通过新思想武装头脑、新观念指导发展，发挥党组织引领作用，强化灾害治理、基础设施建设与技术保障，构建“制度 + 技术 + 人员”协同治理模式。以智能化监测、大数据预警等技术赋能安全治理，通过案例验证措施有效性，为煤炭企业实现从被动防控到主动治理的转型提供理论与实践参考，助力行业在能源转型中筑牢安全防线。

关 键 词： 煤炭企业；安全治理体系；治理能力；探索与实践

Exploration and Practice by Coal Enterprises to Accelerate the Modernization of Their Safety Governance Systems and Governance Capabilities

Guo Weiwei

Shaanxi Huadian Yuheng Coal and Electricity Co., LTD., Yulin, Shaanxi 719000

Abstract： This paper focuses on the modernization of the safety governance system and governance capacity of coal enterprises, analyzes the current problems such as backward ideas and concepts, fragmented systems, and weak foundations, and explores practical paths in combination with the characteristics of the industry. Arm the mind with new ideas and guide development with new concepts, give full play to the leading role of the Party organization, strengthen disaster control, infrastructure construction and technical support, and build a collaborative governance model of "system + technology + personnel". Empower safety governance with intelligent monitoring, big data early warning and other technologies, verify the effectiveness of measures through cases, provide theoretical and practical references for coal enterprises to transform from passive prevention and control to active governance, and help the industry build a solid safety defense line in the energy transition.

Keywords： coal enterprises; safety governance system; governance capability; exploration and practice

引言

煤炭作为我国主体能源，其安全生产是能源安全与社会稳定的重要基石。当前，智能化开采转型与绿色发展要求对传统安全治理模式提出挑战，瓦斯、水害等灾害风险仍存，治理体系碎片化、技术装备滞后等问题制约企业可持续发展。推进安全治理体系和能力现代化，既是落实“人民至上、生命至上”理念的必然要求，也是煤炭企业适应高质量发展的关键举措。本文通过分析现状与问题，结合实践探索，构建适配煤炭行业的现代化治理路径，为破解安全治理难题、提升本质安全水平提供思路，具有重要的理论与现实意义。

一、煤炭企业加快推进安全治理体系和治理能力的重要性

煤炭作为我国能源安全的“压舱石”，其安全生产不仅关系到产业链供应链的稳定，更直接关联千万矿工的生命福祉与社会公共安全。当前，井下作业面临瓦斯突出、顶板垮塌等多重风

险，传统“事后处置”模式已难以应对智能化开采带来的新挑战。加快推进安全治理体系现代化^[1]，能通过制度重构明确从管理层到班组的责任链条，破解“重生产轻安全”的惯性思维；而治理能力的提升，则可借助智能监测系统实现风险实时预警，将事故隐患消灭在萌芽状态。这一过程既是企业履行社会责任的必然要求，也是适应“双碳”转型、提升核心竞争力的关键路径，

只有筑牢安全防线，才能为绿色开采技术应用、产业结构升级提供稳定环境，最终实现从“被动合规”到“主动防控”的质变，^[2]为能源行业高质量发展树立安全标杆。

二、煤炭企业加快推进安全治理体系和治理能力存在的问题

（一）思想观念落后

部分煤炭企业仍深陷“重产量轻安全”的传统思维泥沼，将安全治理视作生产流程的附加环节，未能意识到其对企业长远发展的核心支撑作用。管理层对现代化治理理念的认知存在明显滞后，在资源分配时往往将安全投入归为“非必要成本”，当生产指标与安全要求产生冲突时，常以牺牲安全保障为代价换取产量提升。一线班组则普遍存在“经验主义”惯性，老矿工对智能化监测设备、数字化操作规范持本能抵触，认为“凭手感、靠经验”比复杂的新规程更可靠，甚至为缩短作业时间擅自简化敲帮问顶、瓦斯检测等关键流程。这种观念偏差导致安全治理始终停留在“应付上级检查”的被动状态，难以形成从管理层到作业面的全员主动防控氛围，^[3]与智能化时代对风险预判、系统思维、动态响应的要求严重脱节，成为制约安全治理现代化的根本性障碍。

（二）制度碎片化

煤炭企业安全治理制度体系存在显著的“头痛医头、脚痛医脚”式碎片化问题，缺乏系统性顶层设计。一方面，国家层面与企业内部制定的实施细则衔接不畅，部分条款存在重复交叉，而井下特殊作业场景的安全规范又存在执行盲区，如采掘面交接班时的安全确认流程缺乏统一标准。另一方面，企业内部的生产、机电等部门各自为政，分别制定本领域的安全管理规范，导致同一作业环节出现多套标准，基层班组执行时无所适从。更突出的是制度“悬浮”现象，责任划分仅停留在文件条款中，未能形成从决策层到操作层的闭环管理链条，例如隐患排查制度与考核奖惩机制严重脱节，查出的问题常因“整改难度大”“影响生产”而被搁置，“查而不改”成为普遍现象。^[4]

（三）基础设施建设薄弱

部分煤炭企业尤其是中小型矿井的安全基础设施建设存在长期“欠账”，难以支撑现代化治理需求。井下安全避险设施建设滞后，紧急避难硐室数量不足且分布不均，部分硐室内的供氧系统、应急食品因维护不到位处于失效状态，无法满足突发事件时的避险需求；监测监控网络覆盖存在明显短板，采掘面、回风巷等高危区域的瓦斯、一氧化碳传感器布设密度不够，部分老旧矿井的数据传输因线路老化经常中断，实时监测形同虚设。地面配套设施同样薄弱，安全培训基地的模拟设备多为淘汰的老旧机型，无法模拟智能化开采场景下的复杂工况，导致培训内容与现场需求脱节；应急物资储备库布局分散且规模不足，重要的自救器、灭火设备因管理混乱出现过期失效情况，难以实现事故发生后的快速调配。更关键的是基层班组建设滞后，班组长多由经验丰富的老工人担任，缺乏系统的安全管理培训，班前会常流于

“念文件、喊口号”的形式，^[5]未能有效发挥现场安全管控“最后一道防线”的作用，使基础安全措施在终端执行时严重衰减。

（四）技术装备水平有待提升

尽管煤炭行业智能化转型已逐步推进，但多数企业的安全技术装备水平仍处于较低层次，存在“三多三少”的结构性问题：传统机械式设备多、智能感知装备少，单机独立运行设备多、系统集成联动少，事后监测设备多、超前预警设备少。具体来看，瓦斯浓度监测仍以人工手持仪器巡检为主，智能传感器覆盖率不足30%，且采集的数据仅用于生成报表供事后追溯，未能与通风系统联动实现实时预警；井下巷道巡检、设备维护依赖人工，虽有部分企业引入巡检机器人，但因井下粉尘大、信号弱、地形复杂，设备故障率高，实际应用率不足20%。技术应用还存在严重的“重硬件轻软件”倾向，部分企业斥资购置的智能监控系统，因缺乏专业运维人员和数据分析师，仅发挥简单的视频监控功能，大量设备状态、环境参数数据被闲置。各系统间的数据壁垒森严，通风、瓦斯、顶板等监测数据无法实现联动分析，难以构建全方位的风险预判模型，导致安全治理始终处于“事故发生后处置”的被动局面，与现代化治理要求的“超前防控、精准施策”存在明显差距。

三、煤炭企业加快推进安全治理体系和治理能力现代化探索与实践的措施

（一）用新思想武装头脑

煤炭企业要把安全发展新思想作为治理现代化的思想引擎，构建分层分类的认知提升体系。企业党委牵头开展“安全思想铸魂行动”，通过理论学习中心组季度专题研讨、中层干部封闭式轮训，系统解读“人民至上、生命至上”的内涵，将安全治理成效纳入管理层绩效考核核心指标，权重不低于30%，从决策层面扭转“重产轻安”的惯性思维。针对一线矿工，创新采用“事故案例VR重现+井下实景教学”模式，每月组织一次沉浸式培训，用透水、瓦斯爆炸等模拟场景冲击固有认知，破除“经验主义”误区。建立“安全观察员”制度，由党员矿工担任观察员，每日记录工友操作时的思想动态，对出现麻痹倾向的及时谈心疏导。同时开展“安全理念金句征集”“我为安全献一策”等活动，让新思想转化为矿工的自觉行动，推动安全认知从“要我安全”向“我要安全”“我会安全”深度转变。

（二）用新观念指导发展

以“智能化驱动安全升级”为核心观念，重构企业发展战略规划。在生产布局上，打破“规模优先”的传统思维，将“安全冗余度”作为新矿井设计、老矿井改造的刚性指标，例如在采掘面规划中预留智能监测设备安装空间，确保技术改造可行性。推行“安全效能成本观”，建立安全投入与生产效益的动态平衡模型，通过大数据分析证明智能预警系统对减少停机损失的量化价值，改变“安全投入是负担”的错误认知。鼓励基层班组开展“安全金点子”创新活动，对采用数字化工具优化操作流程的建议给予专项奖励，让新观念转化为可落地的治理举措。

（三）发挥党组织领导作用

构建“党委统筹、支部攻坚、党员带头”的安全治理党建体系。企业党委成立安全治理现代化领导小组，将安全制度修订、重大技术改造等事项纳入党委会前置研究议程，确保方向把控。在井下作业面设立“党员安全责任区”，要求党员矿工佩戴专属标识，承担现场安全巡查、新员工传帮带等职责，每月开展“安全先锋岗”评选。建立“党建+隐患整改”机制，由党支部牵头跟踪重大隐患治理，通过“清单式管理+销号制落实”确保整改到位。利用主题党日活动组织党员深入家属区开展安全宣讲，构建“企业+家庭”协同监督网络，将党组织的政治优势转化为安全治理效能。

（四）强化灾害治理

推行“地质透明化+风险精准化”的灾害治理新模式。依托三维地震勘探、巷道超前钻探等技术，构建井下地质模型，对断层、涌水点等风险源进行动态标注，实现“一矿一图、一面一策”的精准防控。建立“瓦斯治理实验室”，针对高瓦斯矿井研发定向钻进抽采技术，结合智能抽采系统实时调节负压，将瓦斯浓度控制在安全阈值的60%以内。创新“水害联防机制”，与周边矿井共享水文监测数据，在临界水位时启动联合排水预案。每月开展“无脚本”应急演练，模拟灾变时的通风系统切换、人员定位救援等场景，通过实战化训练提升快速响应能力，变“被动救灾”为“主动治灾”。

（五）加强基础建设

实施“安全基础提质工程”，从硬件升级与管理优化两方面筑牢治理根基。井下重点推进避险系统智能化改造，按最新安全标准翻新30个紧急避难硐室，增设物联网环境监测终端，实时传输氧气浓度、温湿度等数据至地面指挥中心，配备应急物资智能盘点系统，确保自救器、食品等储备始终处于完好状态。在采掘面、运输巷等关键区域新增200套抗干扰传感器，构建覆盖“采、掘、机、运、通”全流程的监测网络，数据传输延迟控制在5秒内。地面升级安全实训基地，引入4套井下场景模拟器和8台VR实操设备，开发“智能装备操作”“透水应急处置”等12个模块化课程，实行“理论考核+模拟实操+井下实战”三维评价体

系，保障矿工年均培训时长不低于120学时。强化班组建设，推行班组长“双证上岗”制度，通过理论考试与现场答辩选拔复合型人才，规范班前会“三必讲”流程，建立班组安全积分制，积分与薪酬晋升直接挂钩，让基层单元成为安全治理的坚实基石。

（六）落实技术保障

构建“产学研用”深度协同的安全技术创新体系，系统突破装备适配性与场景应用瓶颈。联合高校矿业工程学院、科研院所安全技术中心共建“智能安全实验室”，针对井下高湿、高尘、高电磁干扰环境，定向研发防爆型巡检机器人、本安型5G基站及抗干扰传感器，通过3000小时井下实测优化设备参数，确保智能装备在回采面、掘进头等高风险区域的稳定运行率提升至80%以上。搭建企业级安全大数据中台，打通通风、瓦斯、顶板、机电等12个系统的数据接口，日均处理监测数据超50万条，运用深度学习算法构建“设备状态-环境参数-作业行为”三维风险预警模型，实现异常数据15秒内自动识别、隐患等级智能判定及处置方案推送的全流程闭环。创新“技术人才双通道”培育机制，选拔10%的优秀矿工进入“智能运维班”，通过“4个月高校理论+6个月井下实操”的定制化培养，掌握智能装备调试与数据分析技能；同时设立每年2000万元的技术创新专项基金，对成功转化的安全专利，按市场价值的15%给予研发团队奖励，推动“卡脖子”技术攻关与成果落地，以技术迭代持续激活安全治理现代化的内生动力。

四、结束语

煤炭企业安全治理现代化是一项系统工程，需思想、制度、技术多维度协同发力。本文提出的新思想引领、党组织赋能、技术保障等措施，为突破治理瓶颈提供了可行方案。实践表明，只有将安全理念深植全员意识，以智能化技术强化风险防控，靠扎实基础筑牢基层防线，才能实现安全治理质的飞跃。未来，需持续深化产学研协同，推动治理模式与能源转型深度融合，让现代化治理成为煤炭行业高质量发展的坚实保障。

参考文献

- [1]王辉,邢伟,曹帅,阴鹏飞,史梦瑶.煤炭企业元数据采集与治理系统建设研究[J].中国标准化,2023,(19):112-117.
- [2]崔希国,陆永生,陈伟,宋元龙,杨小栋.煤炭企业数字化转型中数据治理的探索与研究[J].采矿技术,2021,21(S1):145-147.
- [3]张立申,荀志国,李仲博,王醒,白云,孙思维,苏敬轩,康焱.大型供热企业数据治理体系建设与实践[J].国企管理,2021,(16):20-31.
- [4]姜军.供应链集成下的企业物资采购管理与对策研究[J].现代商业,2024,(01):116-119.
- [5]郝随军.防范煤矿生产安全事故助推企业高质量发展[J].煤炭加工与综合利用,2023,(09):71-75.

锑对铅酸蓄电池端子强度的影响

刘洪海¹, 李从根¹, 许乃平², 林贤清², 魏晓磊², 李帅¹

1. 启征新能源汽车(济南)有限公司, 山东 济南 250000

2. 浙江吉利汽车有限公司宁波杭州湾分公司, 浙江 宁波 315000

DOI:10.61369/ME.2025050014

摘 要 : 低铅-锑合金已经成功应用在铅酸蓄电池生产过程中^[1], 低铅-锑合金可以降低硫酸腐蚀, 提高铅酸蓄电池寿命。通过金相分析发现锑含量在接近3%时: 铅锑合金的金晶粒更加细致, 排列更加规则; 通过压力测试发现锑含量在接近3%时: 铅锑合金的韧性、延展性更好; 通过拉力测试发现锑含量在接近3%时: 铅锑合金的延展率、抗塑性更好。

关 键 词 : 铅锑合金; 锑; 漏液; 延展性; 抗塑性

The Influence of Antimony on the Terminal Strength of Lead-Acid Batteries

Liu Honghai¹, Li Conggen¹, Xu Naiping², Lin Xianqing², Wei Xiaolei², Li Shuai¹

1. Qizheng New Energy Automobile (Jinan) Co., LTD., Jinan, Shandong 250000

2. Ningbo Hangzhou Bay Branch of Zhejiang Jirun Automobile Co., LTD., Ningbo, Zhejiang 315000

Abstract : Low-lead-antimony alloys have been successfully applied in the production process of lead-acid batteries^[1]. Low-lead-antimony alloys can reduce sulfuric acid corrosion and increase the service life of lead-acid batteries. Through metallographic analysis, it was found that when the antimony content is close to 3%, the gold crystal grains of the lead-antimony alloy are more fine and the arrangement is more regular. Through pressure tests, it was found that when the antimony content is close to 3%, the toughness and ductility of the lead-antimony alloy are better. Through tensile tests, it was found that when the antimony content is close to 3%, the ductility and plasticity resistance of lead-antimony alloys are better.

Keywords : lead-antimony alloy; antimony; leakage; ductility; anti-plasticity

引言

研究发现: 铅锑合金中锑含量小于3.5%时: 锑主要以固溶体的形式存在于铅基体中, 通过固溶强化提高合金的强度和硬度, 随着锑含量的增加, 合金的强度和硬度线性上升^[2]; 锑含量在3.5%~10%时: 锑含量超过溶解度后, 形成第二相(如 Sb_3Pb_4), 进一步强化合金, 合金的强度和硬度继续增加, 但增速减缓^[3]; 锑含量高于10%时: 过高的锑含量会导致合金脆性增加, 延展性和韧性下降^[4], 虽然强度和硬度可能继续提高, 但合金的综合性能会变差。

铅锑合金经广泛应用于电缆护套、减摩轴承、焊料和铅酸蓄电池等工业制造^[5], 铅酸蓄电池制造过程中, 铅锑合金中的锑含量大多在2.5%~6%之间, 铅锑合金具有易于铸造、机械强度高等优点。但是由于锑加速了电池中正极板栅的腐蚀和电池的自放电, 缩短了电池的使用寿命。对铅锑合金的研究几乎全部集中在正极板栅上, 关于铅锑合金铸造的铅酸蓄电池端子强度的报道很少。

根据国际能源署(IEA)的数据, 截至2023年底, 全球轻型汽车保有量约为14.74亿辆。作为车辆启动电源与12V用电器电源, 铅酸蓄电池质量问题依然是车辆使用过程中的重要问题。根据某车企统计数据, 2022年由某蓄电池生产厂家(下述由厂家1代替)提供的铅酸蓄电池发生128起蓄电池端子漏液问题, 针对该问题某车企联合厂家1进行如下改善:

一、市场调研

针对电池生产厂家1蓄电池漏液问题, 对某车企另外两家蓄电池提供生产厂家(下述由厂家2与厂家3代替)开展横向调查,

2022年除去由于外力破坏影响厂家2&3铅酸蓄电池本身发生漏液问题基本没有, 而厂家1铅酸蓄电池本身发生漏液问题有128起, 厂家2&3铅酸蓄电池漏液问题数量远远低于厂家1:

调查发现: 1. 厂家1&2&3铅酸蓄电池端子生产工艺都是浇铸

作者简介: 刘洪海(1988-), 男, 山东沂水人, 硕士, 研究方向: 主要从事蓄电池研发、制造、应用及管理工作。已发表论文3篇。

+冷轧工艺；2.相同类型（T2）端子，厂家1&2&3设计相同，如图1；3.厂家1制造铅酸蓄电池端子使用的铅锑合金（1#铅锑合金）与厂家2&3制造铅酸蓄电池端子使用的铅锑合金存在锡含量差异，厂家1端子铅锑合金中锡含量高于厂家2&3，厂家1现有铅锑合金与厂家2&3铅锑合金对比分析如下表1：

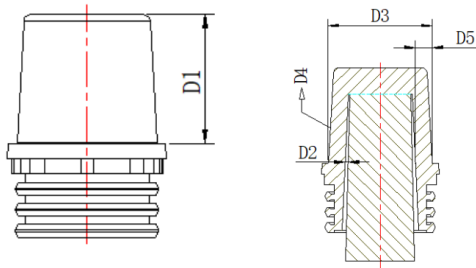


图1 铅酸蓄电池 T2端子设计图

D1：端子高度，D2：极柱与铅套间隙，D3：底部直径，
D4：端子锥度，D5：端子壁厚

表1：各厂家端子合金成分

| 厂家 | 项目 | 化学成分 | | | |
|-------------|----|-----------------|-----------------|-------------------|-------------------|
| | | 锑 (Sb) | 锡 (Sn) | 砷 (As) | 铜 (Cu) |
| 厂家2 | 标准 | 2.7 ± 0.2% | 0.25 ± 0.02% | 0.15 ± 0.05% | ≤ 0.01% |
| | 正极 | 2.9 | 0.235 | 0.108 | 0.002 |
| | 负极 | 2.9 | 0.236 | 0.115 | 0.001 |
| 厂家3 | 标准 | 3.05 ± 0.15% | 0.2 ± 0.05% | 0.225 ± 0.075% | 0.075 ± 0.025% |
| | 正极 | 2.97 | 0.2 | 0.207 | 0.0602 |
| | 负极 | 3.03 | 0.199 | 0.211 | 0.0633 |
| 厂家1 1#合金 | 标准 | 3.7 ~ 3.9% | 0.25 ~ 0.35% | 0.15 ~ 0.18% | 0.04 ~ 0.05% |
| | 正极 | 3.79 | 0.207 | 0.169 | 0.0456 |
| | 负极 | 3.71 | 0.211 | 0.164 | 0.0437 |
| 厂家1 2#合金 | 标准 | 2.65 ~ 2.9% | 0.15 ~ 0.3% | 0.145 ~ 0.18% | 0.035 ~ 0.05% |
| | 正极 | 2.78 | 0.28 | 0.168 | 0.041 |
| | 负极 | 2.76 | 0.277 | 0.17 | 0.035 |

（一）金相分析

根据厂家2&3端子合金组成对比，厂家1使用其公司锡含量与厂家2&3相近的2#铅锑合金（2#铅锑合金与1#铅锑合金对比如表1）进行生产制造铅酸蓄电池端子套，对改善前后端子进行金相分析对比如图2，通过金相分析：2#铅锑合金比1#铅锑合金晶粒更加细致，排列更加规则，金相结果证明2#铅锑合金延展性要优于1#铅锑合金。

根据霍尔-佩奇关系（Hall-Petch Relationship）：

$$\delta y = \delta_0 + k_y / \sqrt{d}$$

σ_y = 材料屈服强度，

δ_0 = 摩擦应力（材料对位错运动内在阻力），

k_y = 霍尔-佩奇斜率（取决于材料的常数），

$$\sqrt{d} = \text{平均粒径}$$

2#铅锑合金屈服强度优于1#铅锑合金。

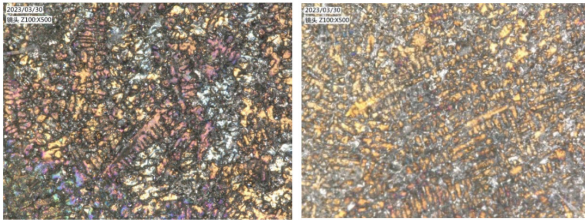


图2：厂家1 1#铅锑合金与2#铅锑合金对比

1#铅锑合金

2#铅锑合金

（二）耐压测试

厂家1使用1#&2#铅锑合金进行生产制造铅酸蓄电池端子，使用万能试验机对改善前后端子套进行耐压测试对比如图3：

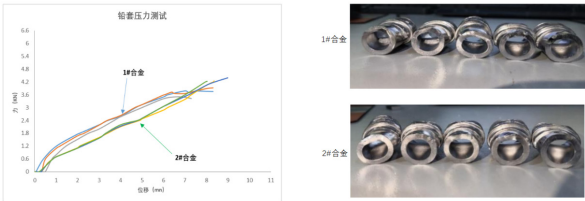


图3：厂家1 1#铅锑合金与2#铅锑合金端子耐压测试

通过测试发现：

a、1#铅锑合金端子在受到3.5~4KN压力值后，端子内部出现不同程度的开裂现象，从压力曲线图中能明显看出应力明显变化；

b、2#铅锑合金端子在整个4~4.5KN受压过程中，端子没有出现开裂现象，从压力曲线图中也能明显看出应力基本无变化；

结果表明：2#铅锑合金的韧性、延展性相对高20%。

（三）拉力测试

厂家1使用1#&2#铅锑合金制作长60mm*宽20mm*厚3mm的浇铸样件铅条，使用万能试验机对其进行抗拉强度、屈服强度测试，测试结果如图4：

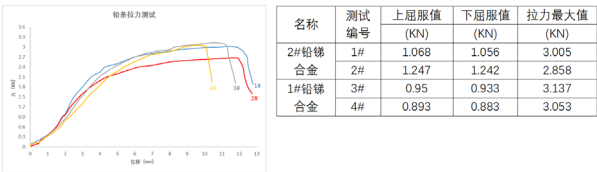


图4：厂家1 1#铅锑合金与2#铅锑合金端子拉力测试

通过测试发现：

a、1#、2#样件位移较大，说明2#铅锑合金延展率较好；
b、3#、4#样件拉伸值较大，说明1#铅锑合金抗拉强度较好；

c、1#、2#样件抗屈服值较大，说明2#铅锑合金抗塑性变形较好；

总之，2#合金延展率、抗塑性变形高20%

二、改善效果

通过测试厂家1的2#铅锑合金性能优于1#铅锑合金，厂家1使用2#铅锑合金生产铅酸蓄电池端子给某车企进行供货，蓄电池电能与市场表现如下：

(一) 电性能测试

如表2:

厂家1使用2# 铅锑合金的端子制造的电池进行性能测试结果

表2 2# 铅锑合金蓄电池电性能表现

| 序号 | 项目 | 标准 | 样品序号 | | | | | | | | | |
|----|---|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-----|
| | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 1 | 1st Capacity,Ce (第一次容量检测) | ≥ 65Ah | 68.5 | | 69.5 | 69.7 | | 67.8 | | 69.8 | 69.4 | |
| 2 | 1st Capacity,Cr,e (第一次容量检测) | ≥ 108min | | 126 | | | 123 | | 127 | | | 122 |
| 3 | 1st Cold crank SAE (-18℃) (第一次启动测试 SAE, -18℃) | U10s ≥ 7.5V | 7.762 | 7.795 | 8.005 | 7.701 | 7.815 | | | | | |
| | | U30s ≥ 7.2V | 7.517 | 7.58 | 7.768 | 7.46 | 7.595 | | | | | |
| | | U90s ≥ 6.0V | 8.907 | 8.97 | 9.108 | 8.853 | 8.987 | | | | | |
| 4 | 1st Cold crank SAE (-29℃) (第一次启动测试 SAE, -29℃) | U10s ≥ 7.5V | | | | | | 8.14 | 8.031 | 8.161 | | |
| | | U30s ≥ 7.2V | | | | | | 8.023 | 7.866 | 8.021 | | |
| | | U90s ≥ 6.0V | | | | | | 9.301 | 9.18 | 9.303 | | |
| 5 | Vibration (震动测试) | U30s ≥ 7.2V | | | 合格 | | | | | 合格 | | |
| 6 | Terminal strength test (端子强度试验) | 施加 14.7N · m 扭力, 端子不存在端子滑牙、端子与盖子配合松动、中盖破损现象 | | | | | | | | | 合格 | |

实验结果表明: 使用2# 铅锑合金端子制造的电池满足电池电性能要求。

(二) 市场表现

自2023年9月改善后至今, 市场上厂家1生产的蓄电池未出现铅酸蓄电池端子漏液问题, 证明改善有效。

量接近3.8%的铅锑合金制造的端子延展性、抗拉强度、抗塑性变形、韧性等性能好;

2.使用 Sb 含量接近3%的铅锑合金制造的端子在市场上表现良好, 未出现除外力影响的漏液问题。

总之, 锑含量高低影响铅酸蓄电池端子的延展性、抗拉强度、抗塑性变形、韧性等性能。

三、结论

1.使用 Sb 含量接近3%的铅锑合金制造的端子比使用 Sb 含

参考文献

[1]Pavlov, D. (2011). "Lead-Acid Batteries: Science and Technology", Chapter 5 ("Grid Alloys").
[2]《Constitution of Binary Alloys》(2nd Supplement, 1969),Section Pb-Sb, P.665
[3]Massalski, T.B. et al. (1990). "Binary Alloy Phase Diagrams" (2nd ed.),Pb-Sb System" (Vol.3, p.2874)
[4]《Brittle Fracture in Antimonial Lead Alloys》(Journal of Materials Science, 1988) ,Vol.23, P2215-2222
[5]《Lead and Lead Alloys: Properties and Technology》(Joseph R. Davis, 2001),Chapter 7 "Commercial Applications" (P. 145-172)

基于改进 ADMM-GS 的配电网与微电网双层协同优化调度研究

史黎阳¹, 高玖生^{2*}, 张石刚³, 武家辉¹

1. 新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830049

2. 国网新疆电力有限公司克州供电公司, 新疆 克孜勒苏柯尔克孜自治州 845350

3. 新疆龙源新能源有限公司, 新疆 乌鲁木齐 830054

DOI:10.61369/ME.2025050018

摘要：随着分布式能源大规模接入，配电网在电压安全、新能源消纳及多主体利益协调方面面临严峻挑战。本文构建配电网运营商（DSO）与微电网运营商（MGO）双层协同优化调度模型：上层 DSO 通过电价调控实现系统效益与电压安全双重目标；下层 MGO 以功率购售为决策变量，优化微电网经济性与可再生能源利用率。针对传统 ADMM 求解效率不足的问题，提出融合 Gauss-Seidel 顺序更新机制的改进交替方向乘法（ADMM-GS），通过自适应惩罚参数策略显著提升分布式求解性能。基于改进 IEEE-33 节点三微网算例验证，所提方法在电压安全、负荷平抑和算法性能方面均优于对比方案，调度效果接近集中式最优，为主动配电网多主体协同调度提供了可行路径。

关键词：配电网；微电网；主从博弈；双层优化；ADMM-GS 算法；优化调度

Research on Double-Layer Collaborative Optimal Scheduling of Distribution Network and Microgrid Based on Improved ADMM-GS

Shi Liyang¹, Gao Jiusheng^{2*}, Zhang Shigang³, Wu Jiahui¹

1. School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi, Xinjiang 830049

2. State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd. Kizilsu Power Supply Company, Kizilsu Kirghiz Autonomous Prefecture, Xinjiang 845350

3. Xinjiang Longyuan New Energy Co., Ltd., Urumqi, Xinjiang 830054

Abstract： With the large-scale integration of distributed energy resources, distribution networks face critical challenges in voltage security, renewable energy accommodation, and multi-stakeholder benefit coordination. This paper establishes a bi-level collaborative optimization model between the distribution system operator (DSO) and microgrid operators (MGOs): the upper-level DSO regulates electricity prices to achieve both system efficiency and voltage security, while the lower-level MGOs optimize economic performance and renewable utilization through power trading decisions. To address the limited efficiency of conventional ADMM, an improved Alternating Direction Method of Multipliers with Gauss-Seidel sequential updates (ADMM-GS) is proposed, incorporating an adaptive penalty parameter strategy to significantly enhance distributed computation performance. Case studies on a modified IEEE-33 bus system with three microgrids demonstrate that the proposed approach outperforms benchmark methods in voltage security, load smoothing, and algorithm efficiency, achieving near-centralized optimal scheduling and providing a practical pathway for collaborative scheduling in active distribution networks.

Keywords： distribution network; microgrid; leader-follower game; bi-level optimization; ADMM-GS algorithm; optimal scheduling

基金项目：新疆维吾尔自治区重点研发计划 项目编号：2023B01025-2

作者简介：

史黎阳 (1996—)，男，河南安阳人，博士研究生，研究方向：为电力市场、电力系统规划与可靠性；

张石刚 (1976—)，男，新疆乌鲁木齐人，大学本科，工学学士，高级工程师，研究方向：风力发电与储能技术应用；

武家辉 (1988—)，女，新疆乌鲁木齐人，博士，教授，研究方向：可再生能源发电与并网技术。

通讯作者简介：高玖生 (1980—)，男，甘肃平凉人，大学本科，工学学士，副高级工程师，研究方向：电力系统运行。

引言

随着“双碳”目标的深入推进，我国新能源装机渗透率持续增高。风电与光伏等分布式能源在配电网中的大规模接入推动了能源结构的低碳化转型，但也带来了电压波动、潮流反转和功率平衡困难等技术挑战。博弈论已成为解决多主体协同调度问题的重要工具。文献 [1] 针对共享储能经济效益差和可再生能源利用率低的问题，提出基于主从博弈的优化调度方法，通过主体调价和从体调容求解租赁容量与调度策略，提高了储能利润和利用效率。文献 [2] 结合并网型微电网的多层级、多主体特征，提出基于主从博弈的“配电网 - 微电网 - 用户”三层能量管理优化策略，通过 KKT 条件将三层模型重构为双层求解，有效提升了各主体经济效益。文献 [3] 针对多微网系统中各市场主体利益平衡问题，提出基于斯塔克尔伯格博弈的点对点交易策略，通过最优成交价格激励合作交易。

随着大规模分布式能源接入，模型计算复杂度和通信负担显著增加，分布式优化算法在配电网与微电网协同调度中得到广泛应用。ADMM 作为经典的分布式优化算法，通过将优化问题分解为多个子问题并在本地求解，能够有效处理大规模分布式优化问题。文献 [4] 针对主动配电网中分布式能源消纳和运行经济性问题，提出基于 ATC 的区域多主体自治协同优化方法，通过解耦系统实现整体与局部目标协同优化。文献 [5] 提出基于 ADMM 的分层优化经济调度方法，构建上下两层优化模型，实现配电网整体运行成本最小化。文献 [6] 基于同步型 ADMM 和模型预测控制提出分布式优化调度策略，该策略降低了系统运行成本，分布式优化算法收敛性良好且与集中式算法结果一致。

综上所述，本文构建 DSO-MGO 双层协同优化调度模型，创新性地将电压安全与新能源消纳纳入优化目标，并提出 ADMM-GS 分布式求解方法，以同步提升系统电气安全性、经济性与计算效率。

一、基于主从博弈的协同调度模型

（一）博弈框架

主从博弈作为一种分层的非合作博弈模型，其核心在于构建具有层级关联的决策主体结构。在博弈过程中，领导者依据对跟随者反应前瞻性的预判来制定策略，以实现自身利益的最大化；而跟随者则需在领导者既定策略的约束下，通过求解约束优化问题实现自身的局部最优。

基于上述博弈机制，本研究提出了一种基于 Stackelberg 博弈框架的双层规划模型。模型上层以 DSO 作为决策主体，通过全局优化生成调度基准策略；下层则由 MGO 作为响应主体，基于上层策略进行分布式资源协同优化配置。这样在保障各主体自主决策权的前提下，实现了双方协同优化，从而提升能源系统的整体运行效能与经济性。

（二）DSO 优化模型

DSO 需面向多维目标体系开展协同优化，目标函数涵盖经济性指标和系统稳定性参数等多个优化维度。本文将 DSO 的时段电价信号作为上层博弈的决策变量。目标一：DSO 运行效益最大；目标二：DSO 网络损耗最小。DSO 优化模型的约束条件主要包括配电网潮流约束、线路功率容量约束和节点电压约束等常规约束和电价保护约束。与 DSO 有所不同，MGO 优化目标主要集中在降低运行成本和净负荷波动上，也就是说 MGO 需要在满足微电网内部需求的同时与 DSO 进行有效的功率交互，以实现效益最大化。MGO 的决策变量为微电网购电功率。MGO 优化模型的约束条件包括充放电功率约束、功率平衡约束和储能状态约束等。

二、基于 ADMM-GS 的分布式求解

在多变量问题中，变量之间的复杂耦合关系可能导致 ADMM

算法陷入局部最优解，难以保证全局最优性。固本文将采用的基于串行更新的分布式求解算法，简称为 ADMM-GS 算法。

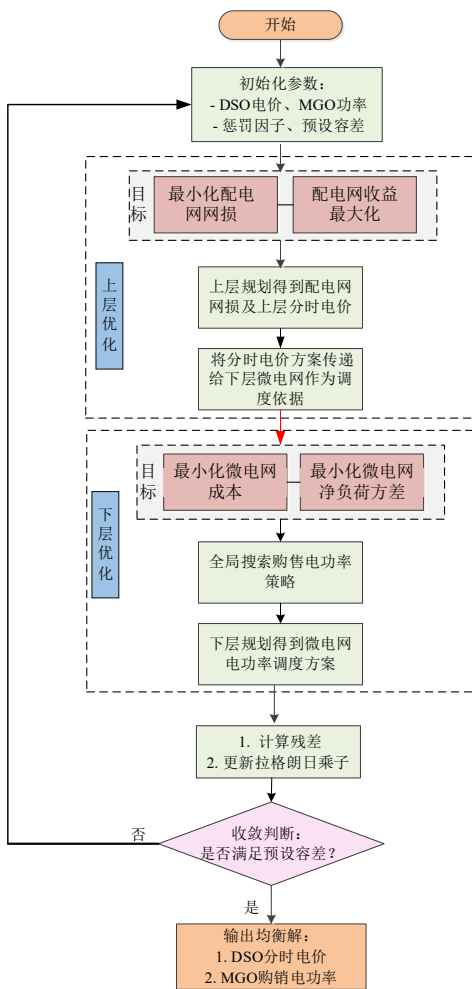


图 1 DSO-MGO 博弈求解流程图

Fig1. Solution flowchart of the DSO-MGO game

图1呈现了配电网运营商（DSO）与微电网运营商（MGO）的双层协同优化机制。该机制的运行流程如下：首先对初始参数进行设置，包括DSO的电价基础数据、MGO的功率初始值、负荷需求以及各类设备的约束条件；随后，上层的DSO以最小化电网网损和最大化电网收益为核心目标，制定分时电价方案并将其传递至下层；下层的MGO则以最小化购电成本和平抑净负荷波动为优化方向，依据接收的电价方案开展功率分配与调度工作。在此基础上，上下层通过交替迭代进行优化：每次迭代后计算残差并更新拉格朗日乘子，若未达到收敛条件则继续迭代，直至满足收敛要求。最终输出的均衡解为：DSO确定的分时电价方案与MGO的购售电功率调度方案。

三、算例分析

（一）算例设置

本研究在Matlab软件仿真环境中对IEEE33节点主动配电网系统进行算例验证。系统中含有DG、柔性负荷、储能装置、重要负荷等主体。对原配电网系统中含有负荷、储能、DG的节点划分为三个集群。设置以下三个场景进行研究：场景1：配电网与各微电网之间独立运行，无双层优化策略；场景2：配电网同微电网间采用双层优化模型运行并采用标准ADMM算法进行求解；场景3：在场景2的基础上改为采用ADMM-GS算法求解。

（二）优化调度结果分析

微电网1在负荷低谷及电价低时段通过购电与风电出力储能，在负荷高峰及电价较高时段优先利用储能和燃机满足需求，并在晚高峰将富余电能外售；微电网2、3主要依赖光伏出力，在日间光伏高峰时段实现自给并将余电外售，低谷及晚高峰则通过储能、燃机及外购电协同供能。整体上，三微网在不同电价和出力条件下实现了风光优先消纳与储能调节，显著降低了对高价外购电的依赖。

（三）协同优化策略有效性分析

场景3的主动配电网电压偏移量和电压偏移率均显著低于场景1和场景2。具体而言，与场景1相比，场景3的电压偏移量降低了32.64%，电压偏移率降低了20.51%。这表明采用配微主从博弈模型进行优化可以有效降低主动配电网的电压偏移量，提高系统电压稳定性。与场景2相比，场景3的结果也稍有提升，其采用的

ADMM-GS算法收敛速度与精度更高，在提升了信息处理效率的同时也提高了求解精度。

从各微电网的多目标优化结果来看，场景1相对于场景3，微电网1、微电网2和微电网3的净负荷均方差分别降低了30.50%、25.29%和29.65%，证明了本文的配微主从博弈策略可以有效平抑净负荷波动，有力促进了可再生能源就地消纳。

（四）求解算法性能分析

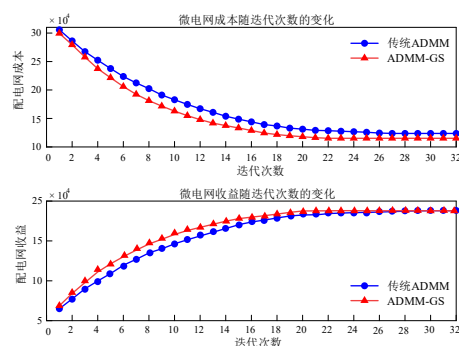


图2 各主体迭代策略

Fig. 2. Iterative Strategies of Each Stakeholder

由图2可得出，ADMM-GS相较于传统ADMM，能够以较少的迭代次数收敛于精度较高的解。本文算法迭代至19代时基本趋于稳定。配电网的成本随着迭代次数的增加而逐渐降低，这体现了其在主从博弈架构中的领导地位。配电网在求解最优定价策略时迭代方向始终朝着有利于自身利益最大化的方向调整；同时多目标的设置保证了微网的成本与配电网收益最大这两个目标的博弈过程并非零和博弈，双方均可在博弈过程中不断提高自身收益。

四、结论

本文构建了基于领导者-跟随者关系的双层优化框架，提出改进型ADMM-GS算法并将其应用于IEEE 33节点系统。通过该框架与算法的协同作用，有效实现了多主体利益协调与新能源高效消纳，在运行经济性提升、电压稳定性增强及算法收敛效率优化三方面均取得显著效果。”

参考文献

- [1] 吕荣胜, 黄正伟, 魏业文, 等. 基于主从博弈的多微网共享储能优化调度研究 [J]. 现代电子技术, 2024, 47(20): 46-50.
- [2] 谢元皓, 林声宏, 朱建全. 基于双重博弈的含多微网配电网分层协调能量管理 [J/OL]. 电测与仪表, 1-12 [2025-03-06].
- [3] 周步祥, 彭昊宇, 臧天磊, 等. 基于Stackelberg博弈的多微网系统点对点交易策略 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2023, 35(02): 103-111.
- [4] 王家武, 赵佃云, 刘长锋, 等. 基于目标级联法的多主体主动配电网自治协同优化 [J]. 中国电力, 2024, 57(7): 214-226.
- [5] 李军徽, 马得轩, 朱星旭, 等. 基于ADMM算法的主动配电网分层优化经济调度 [J]. 电力建设, 2022, 43(08): 76-86.
- [6] 吴成辉, 林声宏, 夏成军, 等. 基于模型预测控制的微电网群分布式优化调度 [J]. 电网技术, 2020, 44(02): 530-538.

浅谈危化品使用安全管理

王文佳¹, 吴帅锋², 陈长营³

1. 济宁市圣奥精细化工有限公司, 山东 济宁 272000

2. 如鲲(山东)新材料科技有限公司, 山东 济宁 272000

3. 山东辰龙药业有限公司, 山东 济宁 272000

DOI:10.61369/ME.2025050019

摘 要 : 危险化学品作为工业生产的重要原料, 因其易燃、易爆、有毒、腐蚀等特性, 在使用过程中潜藏巨大安全风险。近年来, 危化品安全事故频发, 暴露出管理体系不完善、人员素质不足、应急能力薄弱等问题, 严重威胁生命财产安全与生态环境。加强危化品使用安全管理, 需从风险识别、制度建设、储存使用规范到应急处置构建全链条防控体系, 通过法规完善、监管强化、技术升级与素质提升, 筑牢安全防线, 保障化工行业安全发展。

关 键 词 : 危化品; 使用安全; 管理

A Brief Discussion on the Safety Management of Hazardous Chemicals Use

Wang Wenjia¹, Wu Shuaifeng², Chen Changying³

1. Jining Sheng'ao Fine Chemical Co., LTD. Jining, Shandong 272000

2. Rukun (Shandong) New Materials Technology Co., LTD. Jining, Shandong 272000

3. Shandong Chenlong Pharmaceutical Co., LTD. Jining, Shandong 272000

Abstract : Hazardous chemicals, as important raw materials in industrial production, pose significant safety risks during use due to their flammability, explosiveness, toxicity, and corrosiveness. In recent years, hazardous chemicals safety accidents have occurred frequently, exposing problems such as an imperfect management system, insufficient personnel quality, and weak emergency response capabilities, which seriously threaten life and property safety as well as the ecological environment. To strengthen the safety management of hazardous chemicals, it is necessary to establish a full-chain prevention and control system covering risk identification, system construction, storage and usage norms, and emergency response. Through the improvement of regulations, the strengthening of supervision, technological upgrading and quality enhancement, a solid safety defense line should be built to ensure the safe development of the chemical industry.

Keywords : hazardous chemicals; safe to use; management

一、危化品概述

危险化学品是指具有毒害、腐蚀、爆炸、燃烧、助燃等性质, 对人体、设施、环境具有危害的剧毒化学品和其他化学品。这类物质在生产、储存、运输、使用和废弃处置等环节中, 若管理不当极易引发安全事故, 对生命财产安全和生态环境构成严重威胁。我国通过《危险化学品安全管理条例》等法规对危险化学品实施严格管控, 明确其生产、经营、储存、运输等环节的安全要求。

危险化学品具有复杂多样的危险特性, 主要包括易燃性、易爆性、毒性、腐蚀性和放射性等。易燃性化学品如汽油、乙醇等, 其闪点低、易挥发, 与空气混合后达到一定浓度, 遇火源即会引发燃烧甚至爆炸。某化工厂乙醇泄漏后遇静电引发爆炸, 造成车间设备大面积损毁。易爆性化学品如硝化甘油、叠氮化合物等, 受到撞击、摩擦或高温作用时会发生剧烈化学反应, 释放大

量能量和气体, 形成爆炸冲击波。

毒性是危险化学品最隐蔽也最持久的危害特性, 通过呼吸道、皮肤接触或消化道进入人体后, 会损害神经系统、造血系统、呼吸系统等。剧毒化学品如氰化物、砷化物等, 仅微量即可致人死亡; 而甲醛、苯等化学品则可能导致慢性中毒, 引发癌症等疾病。腐蚀性化学品如硫酸、氢氧化钠等, 会对皮肤、黏膜及金属设备造成腐蚀破坏, 硫酸泄漏可在短时间内腐蚀混凝土结构, 造成设备穿孔和人员灼伤^[1]。

根据危险特性和分类标准, 危险化学品可分为八大类: 爆炸品, 如硝酸炸药、雷管等, 具有强大的爆破威力; 压缩气体和液化气体, 包括易燃气体(如氢气、乙炔)、不燃气体(如氮气、二氧化碳)和有毒气体(如氯气、氨气), 储存于压力容器中, 受热易发生超压爆炸; 易燃液体, 按闪点分为低闪点、中闪点和高闪点液体, 如乙醚、汽油、柴油等; 易燃固体、自燃物品和遇湿易燃物品, 如红磷、白磷、金属钠等, 白磷在空气中易自燃,

作者简介: 王文佳(1990.07-), 男, 山东鱼台人, 本科, 中级, 研究方向: 化工安全。

金属钠遇水会发生剧烈反应产生氢气；氧化剂和有机过氧化物，如高锰酸钾、过氧化苯甲酰等，具有强氧化性，易与其他物质发生氧化还原反应引发火灾；毒害品，如砒霜、农药等，对生物体具有毒害作用；放射性物品，能释放射线危害人体健康；腐蚀品，如硫酸、硝酸、氢氧化钠等，具有强腐蚀性^[2]。

二、危化品使用安全管理问题

危险化学品使用安全管理是化工安全生产的关键环节，当前在制度建设、人员素质、操作环节和应急能力等方面仍存在诸多问题，这些问题相互交织，形成安全隐患。

（一）安全管理制度不健全

部分企业未根据自身使用的危险化学品特性制定针对性管理制度，照搬通用模板导致制度缺乏可操作性。制度内容存在漏洞，对采购验收、领用登记、废弃处置等环节规定模糊，如未明确剧毒化学品的双人双锁管理流程^[3]。更严重的是制度执行流于形式，虽制定完善文件但未建立监督机制，“有制度不执行”现象突出。

（二）人员安全意识与技能不足

企业对从业人员的安全培训不到位，培训内容笼统，未结合具体岗位的危化品特性和操作风险开展针对性培训。新员工未经系统培训即上岗，对所使用危化品的危险特性、应急处置方法一无所知。部分员工安全意识淡薄，存在侥幸心理，为提高效率违规操作，如未按规定佩戴防护用品、擅自更改操作步骤等。

（三）储存与使用环节的隐患

储存条件不达标问题普遍，危化品仓库未按规定分类存放，性质相抵触的强酸与强碱混存，易发生化学反应引发火灾；仓库通风不良导致挥发性气体聚集，电气设备未采用防爆型存在点火源风险；储存量超过核定容量，堆垛间距不足，影响疏散和应急处置。使用环节操作不规范，如未按操作规程控制反应温度、压力等参数，随意倾倒残液废料，设备管线未定期检测导致泄漏。某化工厂在使用氯气时未检查阀门密封性，导致微量泄漏累积引发人员中毒。

（四）应急管理能力薄弱

应急预案不完善，未针对不同危化品特性制定专项处置方案，内容千篇一律缺乏实用性；预案未明确各岗位应急职责，发生事故时职责不清、处置混乱。应急演练不足，演练频次低、形式化严重，仅进行桌面推演未开展实战演练，员工未掌握应急处置技能。应急物资配备不足或失效，如灭火器过期、防毒面具损坏、急救药品缺失，无法应对突发事故。某企业发生氨气泄漏时，因应急防护用品不足，救援人员无法近距离处置，导致泄漏时间延长。

三、危化品使用安全管理要点

（一）风险评估与识别

风险评估与识别是安全管理的基础，需贯穿使用全过程。企业应定期开展危化品使用风险评估，采用 JSA、HAZOP 等方法，全面识别采购、储存、使用、废弃等各环节的风险点。针对每种危化品，分析其危险特性、可能引发的事故类型及后果，如易燃液体泄漏可能引发火灾爆炸，有毒气体泄漏可能导致人员中毒^[4]。建立风险分级机制，根据风险等级制定管控措施，对高危

险环节如剧毒化学品使用设置双重防护措施。

（二）安全管理制度建设

安全管理制度建设需形成闭环管理体系。健全覆盖全流程的管理制度，包括危化品采购验收制度，明确供应商资质审核、物料检验要求；领用管理制度，实行“双人领料、双人记账”；使用操作规程，详细规定操作步骤、参数控制和防护要求；废弃处置制度，规范残液废料处理流程。建立责任追究机制，将安全责任落实到每个岗位和人员，明确奖惩措施。加强制度执行监督，成立专项检查组定期检查制度落实情况，对违规行为严肃处理^[5]。

（三）储存与使用安全管理

储存与使用安全管理需严格规范操作行为。储存管理应遵循“分类存放、标识清晰”原则，不同类别危化品分开存放，腐蚀性物品单独存放于防腐仓库，剧毒化学品存放于专用保险柜；仓库设置明显安全警示标志，标明危化品名称、危险性、应急措施等信息；定期检查储存设施，确保通风、防爆、防雷、防静电等设施完好。使用环节严格执行操作规程，操作人员必须佩戴相应防护用品，如耐酸碱手套、防毒面具等；关键设备如反应釜、储罐等设置安全附件并定期校验；使用过程中加强巡检，及时发现泄漏、超温等异常情况。

（四）应急管理

应急管理需提升快速响应和处置能力。制定科学实用的应急预案，针对不同危化品特性制定专项处置方案，明确报警程序、疏散路线、处置措施和责任人；预案需经专家评审并根据实际情况动态修订。定期开展应急演练，每年至少进行2次实战演练，模拟泄漏、火灾、中毒等场景，检验预案有效性和员工处置能力；演练后进行评估总结，完善预案和处置流程。配备充足有效的应急物资，根据危化品种类配备相应的灭火器材、防护装备、泄漏处理工具和急救药品，并定期检查维护，确保随时可用^[6]。

四、危化品使用安全管理的改进措施

（一）完善法规标准体系

法规标准体系需增强针对性和可操作性，细化不同类型企业的管理要求。针对中小企业危化品使用量小、种类多的特点，制定简化但不减安全的专项管理规范，避免因标准过高导致企业难以执行；针对大型化工企业，制定更严格的风险管控标准，强化过程安全管理要求。

加强法规标准的衔接协调，消除标准冲突和空白。梳理现行危化品安全管理相关法规标准，对相互矛盾的条款进行修订，对重复规定进行整合，对未覆盖的领域如新型危化品的管理制定补充标准。建立法规标准数据库，及时更新法规动态，为企业提供查询服务。某行业协会组织专家编写了《危险化学品法规标准汇编》，梳理整合了120余项相关法规标准，方便企业查阅执行。

推动法规标准与新技术应用相适应。随着物联网、人工智能等技术在危化品管理中的应用，及时将信息化管理、智能监测等要求纳入标准体系。制定危化品数字化管理标准，规范数据采集、传输、存储等要求；制定智能监测设备安装标准，明确不同危化品的监测参数和设备技术要求^[7]。

（二）加强企业安全管理

落实企业主体责任需建立全员安全生产责任制。企业主要负责

人对危化品安全管理全面负责，签订安全生产承诺书，定期向董事会和监管部门报告安全管理情况；分管负责人具体负责分管领域的安全管理工作；一线员工履行岗位安全职责，严格执行操作规程。将安全责任纳入岗位说明书，明确每个岗位的安全职责、工作标准和考核要求，形成“人人有责、各负其责”的责任体系。

加大安全投入是提升本质安全水平的保障。企业每年提取不低于营业收入1.5%的安全生产费用，专项用于安全设施改造、检测检验、应急物资配备、培训教育等。优先投入本质安全技术改造，如采用自动化控制系统替代人工操作，减少人为失误风险；安装紧急停车系统，在发生异常时自动切断物料；采用防爆型设备，降低火灾爆炸风险。

推行信息化管理手段提升管理效率。建立危化品管理信息系统，实现从采购、入库、领用、使用到废弃处置的全流程信息化管理，物料流向实时可查。利用物联网技术对储存场所、关键设备进行实时监测，安装温度、压力、液位、气体浓度等传感器，数据异常时自动报警。某企业通过危化品智能管理平台，实现了剧毒化学品领用的电子审批、库存自动预警、使用记录自动追溯，管理效率提升60%。

（三）强化监管力度

创新监管方式需实现精准监管。监管部门建立危化品企业分级分类监管机制，根据企业规模、危化品种类、风险等级等因素，将企业划分为不同等级，实施差异化监管。对高风险企业每季度至少检查1次，对中风险企业每半年至少检查1次，对低风险企业每年至少检查1次。采用“双随机、一公开”检查与重点检查相结合的方式，对群众举报、风险预警的企业及时开展针对性检查。

加强重点环节监管执法。聚焦危化品储存、使用、特殊作业等关键环节，严查违法违规行为。对储存环节重点检查分类存放、设施条件、限量储存等情况；对使用环节重点检查操作规程执行、防护措施落实、设备维护等情况；对动火、进入受限空间等特殊作业，重点检查作业许可审批、安全措施落实等情况。对检查发现的违法违规行为，依法予以处罚，情节严重的责令停产停业整顿^[8]。

建立失信联合惩戒机制。将危化品企业违法违规行为纳入信用记录，建立“黑名单”制度，对列入黑名单的企业实施联合惩

戒，在项目审批、融资信贷、政府采购等方面予以限制。定期向社会公开企业违法信息和信用等级，形成“一处违法、处处受限”的失信约束机制。

（四）提高人员安全素质

构建分层分类培训体系提升培训针对性。针对企业主要负责人和安全生产管理人员，开展法规标准、风险管理、应急指挥等内容的培训，提高决策和管理能力；针对一线操作人员，开展危化品特性、操作规程、防护技能、应急处置等内容的培训，提高操作安全性；针对特种作业人员，开展专业技能培训，确保持证上岗。培训内容与岗位风险相匹配，如对硝化反应操作人员重点培训温度控制和防爆措施，对有毒气体操作人员重点培训防毒和泄漏处置技能^[9]。

创新培训方式方法增强培训效果。采用理论授课与实操训练相结合的方式，理论培训注重法规标准和风险知识讲解，实操训练设置模拟操作场景，如模拟泄漏处置、防护用品穿戴等。引入虚拟现实（VR）技术开展沉浸式培训，通过模拟火灾、泄漏等事故场景，让学员在虚拟环境中练习应急处置技能，提高培训体验感和实效性。

建立培训考核与激励机制。培训结束后必须进行考核，考核不合格的不得上岗，补考仍不合格的调离岗位。将培训考核结果与绩效考核挂钩，考核优秀的给予奖励，考核不合格的进行待岗培训。鼓励员工参加安全技能竞赛、知识竞赛等活动，对表现突出的给予表彰奖励，营造“学安全、懂安全、会安全”的良好氛围。

五、结语

危化品使用安全管理是系统性工程，需以风险评估为前提，以制度建设为基础，以规范操作为核心，以应急能力为保障。通过完善法规标准、落实企业主体责任、强化精准监管、提升人员素质，可有效降低事故风险^[10]。企业需将安全理念贯穿全流程，结合信息化技术实现动态管控；监管部门需创新方式形成长效机制。唯有多方协同、标本兼治，方能遏制危化品事故，推动化工行业向更安全、更绿色的方向可持续发展。

参考文献

- [1]何阳宇.危险化学品使用安全现状与对策分析[J].化工管理,2020,(33):88-89.
- [2]陈余彩.危化品安全与环境保护措施研究[J].环境与发展,2020,32(10):204-205.
- [3]钱宾佳,张志俊,魏紫东,等.浅谈危化品使用安全管理[J].冶金管理,2020,(01):92+102.
- [4]杨海燕.化工企业危化品安全管理探究[J].全面腐蚀控制,2016,30(02):50-52+72.
- [5]黄涛.浅议危化品生产使用的安全管理办法[J].中国有色金属,2012,(S1):90-91.
- [6]覃茂明.危化企业的电气防爆危险性分析与对策[J].工程技术研究,2025,10(02):174-176.
- [7]韦婵婷.港口危化品突发事件应急管理研究[D].广西大学,2024.
- [8]赵军,文蓬涛,彭贵,等.1988—2023年新疆危险化学品事故分析研究[J].中国安全生产科学技术,2025,21(01):153-160.
- [9]朱胜杰,翟良云.危险化学品全生命周期追溯体系建设进展[J].安全、健康和环境,2024,24(10):1-5.
- [10]赵杨.粉状危化品包装系统双层包装套箱装置的设计[D].武汉轻工大学,2023.

交流输变电工程建设期间环境管理监督与竣工环境保护验收调查工作技术研究

吴益舟

湖北君邦环境技术有限责任公司, 湖北 武汉 430000

DOI:10.61369/ME.2025050021

摘 要 : 随着城市化进程加快, 输变电工程建设对环境管理的要求日益增加。本文围绕输变电工程建设期间的环境管理与竣工环保验收技术展开深入研究。首先, 探讨了输变电工程在建设过程中可能产生的环境影响及其管理对策, 强调了建设期间环保监督管理的重要性; 其次, 总结了环境影响评价和验收调查的关键要点, 通过对输变电工程的全过程环境管理进行系统研究, 旨在为提高工程建设的环保意识和管理水平、确保项目顺利通过环保验收提供理论依据与实践参考, 以促进电力工程的可持续发展。

关 键 词 : 输变电工程; 环境管理; 环保验收; 环境影响

Technical Research on Environmental Management Supervision and Completion Environmental Protection Acceptance Investigation During the Construction Period of AC Transmission and Transformation Projects

Wu Yizhou

Hubei Junbang Environmental Technology Co., LTD., Wuhan, Hubei 430000

Abstract : With the acceleration of urbanization, the requirements for environmental management in power transmission and transformation engineering construction are increasing day by day. This article conducts an in-depth study on environmental management during the construction period of power transmission and transformation projects and the technology of environmental protection acceptance upon completion. Firstly, the possible environmental impacts during the construction of power transmission and transformation projects and their management countermeasures were discussed, emphasizing the significance of environmental supervision and management during the construction period. Secondly, the key points of environmental impact assessment and acceptance investigation were summarized, and a systematic study on the environmental management throughout the entire process of power transmission and transformation projects was conducted. It aims to provide theoretical basis and practical reference for enhancing the environmental awareness and management level of engineering construction and ensuring the smooth passing of environmental protection acceptance of projects, so as to promote the sustainable development of power engineering.

Keywords : power transmission and transformation projects; environmental management; environmental protection acceptance; environmental impact

前言

输变电工程作为国家能源战略的重要基础设施, 在优化能源配置、促进经济社会发展中发挥着不可替代的作用。然而, 其建设与运营过程不可避免地会对沿线生态环境、电磁环境、声环境等产生一定影响。因此, 实施全过程环境管理, 强化事中监管 (施工期环境管理监督) 与事后核查 (竣工环保验收), 是践行“绿水青山就是金山银山”生态理念、实现电网建设与环境保护协调发展的重要保障。

目前, 虽已有相关法规标准对建设项目环保“三同时”制度提出了要求, 但在具体实践中, 施工期环境管理仍存在监管不到位、措施落实打折扣等问题, 而验收调查阶段也常面临调查内容不全面、重点不突出、与施工期管理脱节等挑战。本研究旨在梳理并解决这些问题, 将施工期环境管理与竣工环保验收视为一个有机整体, 系统研究其技术内涵与工作方法, 对提升行业整体环境管理水平具有重要的现实意义。

一、环境管理政策方向

（一）环保政策动态

党的二十届三中全会提出进一步全面深化改革的总目标，明确聚焦建设美丽中国、加快经济社会发展全面绿色转型、健全生态环境治理体系、推进生态优先、节约集约、绿色低碳发展，促进人与自然和谐共生。

在此背景下，随着国家生态环境领域“放管服”改革不断深入，简审批、强监管、严追责的管理模式全面形成。生态环境部、水利部不断推进监督管理改革，“双随机、一公开”监管工作全覆盖、常态化，事中事后监督更加严格，企业生态环保主体责任不断强化。

（二）环保规范管理

在环保管理大趋势环境推进下，环境保护工作面临主体责任更加突出、工作要求更加严格、深入实施电网建设项目环境保护全过程管控，构建生态环保常态化监督新模式，用更高质量的环境保护管理推动电网发展与环境保护“三同时”的有效落实。输变电工程环境规范管理已形成多层次、全覆盖的标准体系^[1]：

1. 国家、部委标准层面：《电磁环境控制限值》（GB 8702-2014）明确了工频电场和磁场的公众暴露限值；《声环境质量标准》（GB 3096-2008）明确了不同功能区的噪声限值；《输变电建设项目重大变动清单（试行）》，对复核项目是否发生重大变动提供依据；《建设项目竣工环境保护验收暂行办法》规范建设项目环境保护设施竣工验收的程序和标准，强化建设单位环境保护主体责任。

2. 行业标准层面：《建设项目竣工环境保护验收技术规范 输变电》（HJ 705-2018）细化了验收调查要求；《输变电建设项目环境保护技术要求》（GB/T 51316-2018）提供了详细的技术指引。

3. 国家电网公司层面：《国家电网有限公司环境保护管理办法（国家电网企管〔2019〕429号）》，响应国家、部委及行业标准，全方面细化电网工程环境保护管理要求；《国家电网有限公司电网建设项目环境影响评价管理办法（国家电网基建〔2023〕687号）》，针对输变电工程前期环评阶段的各项规章制度及流程作出详细指导；《电网建设项目施工项目部环境保护与水土保持标准化管理手册》，针对输变电工程施工阶段的环保管理要求提出详细指导，规范建设期间环保措施作业及落实；《国家电网有限公司电网建设项目竣工环境保护验收管理办法（国家电网基建〔2023〕687号）》，针对输变电工程竣工环保验收调查阶段的各项规章制度及流程作出详细指导。

二、输变电工程建设期间的环境管理

（一）输变电工程的环境影响

电网工程在施工期和运行期会产生多方面的环境影响，具有多样性、阶段性和可逆性等特点。输变电建设项目，施工期的主要环境影响因素有：施工噪声、施工扬尘、施工废污水、施工固

体废物、生态影响等^[2]。具体环境影响表现如下：

1. 生态环境影响：(1)对土地利用的影响：输电线路项目建设会临时和永久地占用一定面积的土地，使评价范围内的各种土地现状面积发生变化，对区域内土地利用结构产生一定影响；(2)对植被的影响：建设期间对区域植被环境会造成一定的破坏；(3)对动物影响：施工噪声对周边鸟类栖息、繁殖的干扰会迫使鸟类离开原有栖息场所。工程施工过程中需要占用土地，对原有的野生动物栖息与活动的范围造成扰动。

2. 噪声影响：施工期塔基在挖土方、基础施工、设备安装等阶段中，可能产生施工噪声对环境的影响。

3. 施工扬尘影响：施工扬尘主要来自于输电线路塔基在施工中的土方挖掘、线路拆除、建筑装修材料的运输装卸、施工现场内车辆行驶时道路扬尘等。

4. 固体废物影响：包括建筑垃圾、生活垃圾和危险废物。其中废变压器油、废蓄电池等危险废物的处理尤为重要，若处置不当将造成长期环境污染。

5. 水环境影响：施工废污水包括施工生产废水及施工人员的生活污水，若处理不当，可能对周边环境造成严重影响。

运行期则主要表现为电磁环境影响、噪声影响等。

（二）环境管理对策与方法

针对输变电工程的环境影响，应采取全过程、多层次的管控对策^[3]。对施工活动进行全程监督；开展环境监测、环境监理^[4]，定期巡视检查现场环保作业执行情况，发现违规作业及时制止并提出相应整改措施。运行期重点控制电磁辐射和噪声。这些对策的综合应用可有效降低工程的环境影响。关键环节环保管控措施：

1. 健全环保管理长效机制

压实管理责任，落实《电网建设项目施工项目部环境保护与水土保持标准化管理手册》及责任清单要求，完善组织机构，加强人员配置。将各项环保措施要求纳入项目管理实施规划，压实施工班组责任，严格落实环保措施。坚持施工与恢复协同推进，加大技术指导，解决现场实际问题，提高施工专业能力水平。

2. 开工环节管理

开工准备经常出现的问题是环保策划通篇原则性，实施细则缺少针对性（如针对生态敏感区、表土剥离、机械化施工道路等），“先破坏后治理、施工完毕再治理”的错误理念。

3. 强化过程管理

(1) 关键环节放行。监理单位对施工单位的环保措施落实工作进行关键环节管控，实行关键环节放行制度，一个环节未完成、严禁进入下一环节。

(2) 定期巡查。压实环境监理责任，加强环保现场监督与主体工程监督协同，强化生态敏感区等重点区域的月度或季度巡查和重点施工环节抽查。采取卫星遥感、无人机航拍、视频监控、在线监测等监督手段，提升监管质效^[5]。

(3) 整改核查。施工单位完成整改后，由建管单位或监理单位组织核查，符合要求视为整改完成。

(4) 分阶段预验收。为避免现场问题累积，建设单位组织建管

单位和环保服务单位针对阶段性的环保措施开展预验收，不合格的限时整改整改不到位的不准进入下个工作环节。

(5) 环保宣传。建管单位组织开展施工期环保宣传工作。在施工场地附近设置环保宣传栏，施工一线人员以培训班、宣传册、宣传单的形式进行环保宣传培训。

(三) 监督管理的实践应用^[6]

1. 建立数字化监管平台：集成物联网传感器、无人机航拍、卫星遥感等技术，实现环境影响的实时监控。目前电网公司已建立有完整的环保监控平台，可实时监控建设项目的作业情况，发现违规作业发出预警警告。

2. 实施分级巡查制度。建设单位每月巡查，监理单位每周检查，施工单位每日自查。重点检查环保措施落实情况，建立问题整改台账。

3. 环境监理机构设立：工程建设阶段设立环境监理项目部，并配备专职人员进行环保管理，制定环境监理细则、环境监理规划方案等，开展环境保护培训交底工作，完善环境保护管理。对施工全过程进行监督，通过严格检查确保施工中的每一道工序满足环保要求，使施工期环境保护措施得到全面落实，竣工后编制的环境监理总结报告作为竣工验收的重要依据。

4. 环保验收单位配合管理：环保验收单位在工程建设期间与各参建单位取得密切沟通极为重要，通过研读项目环评报告及批复中的内容，重点识别建设期间采取的环保措施及设施建设情况，提出相应的管理要求。

(1) 开工前，针对项目特点，对各参建单位组织开展环境保护培训交底，增强管理及施工人员环保意识。

(2) 建设期间，实行全过程环境管理，配合工程监理单位定期对现场环保问题进行巡查，发现问题及时汇报，并要求施工单位按期进行整改；对设计图纸进行审核，按照《输变电建设项目重大变动清单（试行）》，复核项目是否发生重大变动，保证三同时有效落实。

5. 推行环保信用评价。将施工单位环保表现纳入信用体系，与招投标挂钩。建立“红黑榜”制度，对环保违规行为实行联合惩戒。这一机制有效提升了施工单位的环保意识。

通过上述环境监督管理可有效落实“三同时”制度，为项目竣工环境保护验收调查打下良好的基础。

三、竣工环保验收的技术及实践

(一) 环保验收的基本原则

在工程竣工，各项环保设施（措施）得到有效落实后，调查运行阶段开始实行验收调查工作，竣工环保验收应当遵循以下基本原则：

1. 依法依规原则。严格按照《建设项目环境保护管理条例》《建设项目竣工环境保护验收暂行办法》等法规要求，验收程序、内容、标准都必须符合法律规定。特别要注意环评批复中的各项要求的落实情况。

2. 实事求是原则。验收结论必须建立在客观调查和科学监测

的基础上，确保数据真实可靠。对发现的问题要如实反映，不得隐瞒或篡改数据。所有监测数据应当具有可追溯性。

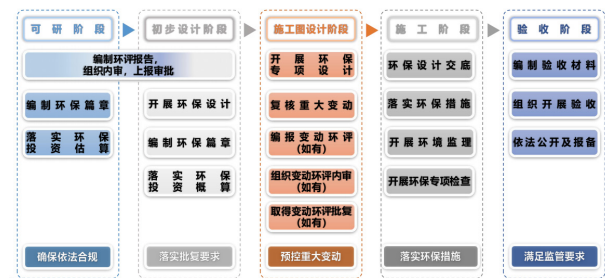
3. 全面系统原则。验收范围应覆盖工程设计、施工、试运行各阶段，内容包括环保手续完备性、环保设施建设情况、环保措施落实效果、环境管理实施情况等各个方面。

4. 公众参与原则。除按照国家需要保密的情形外，建设单位应当通过其网站或其他便于公众知晓的方式，向社会公开工程信息。

5. 持续改进原则。对验收中发现的问题要求限期整改，确保工程最终满足环保要求。

(二) 电网建设项目全过程环境保护工作流程

电网建设项目全过程环境保护工作是一个系统化、精细化的管理过程，贯穿于项目可研阶段、初设阶段、施工图设计阶段、施工阶段和验收阶段^[7]。这一流程体现了“预防为主、防治结合、全过程控制”的现代环境管理理念，通过各阶段的协同管理，实现工程建设与生态环境保护的协调发展。以下从五个关键阶段详细阐述电网建设项目全过程环境保护工作的具体内容和实施要点。



1. 可研、初设阶段：(1) 在可行性研究阶段，开展初步的环境影响分析；(2) 在初步设计中，必须编制专门的环境保护篇章、开展环保设计与环保投资概算。对此，根据设计文件编制环境影响报告，组织内审、专家评审，并报生态环境主管部门审批。

2. 施工图设计、施工阶段：应开展环保专项设计工作，输电线路工程实行环水保“一塔一图”设计，通过设计文件对比环评报告中提出的环境保护设施（措施）建设任务，《输变电建设项目重大变动清单（试行）》，复核项目是否发生重大变动，如有发生重大变动情况，应及时向建设单位汇报，并向环境主管部门上报重新环评，如有发生一般变动情况，应向环境主管部门上报变动情况说明。施工期间应监督落实环保措施，实行环境监理，定期开展环保专项检查，保证“三同时”有效落实。

3. 验收阶段：按照《建设项目竣工环境保护验收暂行办法》、《建设项目竣工环境保护验收技术规范 输变电》等其它标准要求开展验收调查工作。调查内容包括环保手续落实情况、环保设施建设情况、环保措施效果等，全面评估环境保护工作的有效性，并依法公开项目建设情况，在“全国建设项目竣工环境保护验收信息系统”上填报验收信息。

(三) 验收调查的关键要点

输变电工程竣工环保验收调查是验证工程建设是否符合环保要求的核心环节，应重点关注以下关键内容和技术要点^[8]：

1. 工程实际建设内容核查：对比环评批复和实际建设情况，

包括：电压等级、线路长度、回路数等是否发生变化；变电站规模、主设备配置是否调整；线路路径是否发生重大偏移（特别是是否新增穿越敏感区）。根据《输变电建设项目重大变动清单》，上述变化可能需要重新报批环评。

2.电磁环境影响调查：这是验收调查的重中之重。监测内容包括：工频电场强度、工频磁感应强度，监测方法采用《交流输变电工程电磁环境监测方法（试行）》（HJ 681—2013）》进行。

3.声环境影响调查：监测变电站厂界噪声和线路附近敏感点噪声。技术要点：使用符合 GB 3785 要求的声级计；测量应在无雨雪、风速小于 5m/s 的条件下进行；厂界噪声执行 GB 12348 相应功能区标准（如 2 类区昼间 60dB（A）、夜间 50dB（A））；敏感点噪声参考《声环境质量标准》（GB 3096-2008）。特别注意：雨天、雾天等潮湿条件下电晕噪声可能显著增大。

4.生态影响调查：调查施工期及运行期生态保护措施落实情况 and 生态恢复效果。

5.环境敏感目标调查：调查变电站与输电线路评价范围内的环境敏感目标是否发生变动，是否因输变电工程路径、站址等发生变化，导致进入新的自然保护区、风景名胜区、饮用水水源保护区等生态敏感区；是否因输变电工程路径、站址等发生变化，导致新增的电磁和声环境敏感目标超过原数量的 30%。这是竣工环境验收调查的重要内容。

6.环保设施与措施核查：根据输变电工程的环保设施建设特点，环保设施的建设主要集中在新建变电站，主要的环保设施有：污水处理设施、固体废物处理设施、事故油池、事故集油坑、降噪隔音设施。因此在开展验收调查工作期间应检查变电站废水处理设施、事故油池等环保设施建设情况，核查施工期现场环境保护措施落实情况及环境内业资料完整性。

（四）常见问题及解决策略

验收中常见问题包括：环保措施未落实、监测数据超标、环保设施复核不清晰等问题。针对这些问题，可采取以下策略^[9]：

对未落实的措施限期整改，验收期限可以适当延期，但最长不超过 12 个月；对超标情况分析原因，优化方案；对于环保设施复核不清晰，主要有事故油池有效容积核算以及污水处理方式等^[10]。

1.事故油池有效容积核算：根据 GB 50229-2019《火力发电厂与变电站设计防火标准》规定：总事故贮油池的容量应按其接入的油量最大的一台设备确定并设置有油水分离措施。意思就是这个事故油池应该能放得下油量最大的一台变压器 100% 的油。那么就让我们来算一算：例如：某 750kV 变电站 3# 主变油量为 98.1t，按照变压器油密度 0.895t/m³ 进行估算，根据公式： $p=m/V$ 可知 98.1t 的油体积极约为 109.61m³。那么事故油池最高贮油体积应设计不小于 109.61m³ 的有效容积，则符合标准。

2.污水处理设施系统：目前，除接入市政污水管网外，变电站的生活污水处理有两种工艺流程：(1) 无人值班变电站，只有少人值守，污水很少。工艺流程：生活污水→化粪池→环卫车定期清理；(2) 有人值班的集控中心变电站，工艺流程：生活污水→化粪池→污水生化处理→达标回用作站区场地浇洒（回用水执行《城市污水再生利用 城市杂用水水质》（GB/T18920-2020）中“道路清扫用水”标准限值要求）。

四、结束语

输变电工程环境管理监督与竣工环保验收是电力行业绿色发展的重要保障。本文研究表明，通过健全政策标准、强化全过程管理、严格验收调查，可有效控制工程的环境影响。只有持续改进环境管理工作，才能实现电力基础设施建设与生态环境保护的协调发展。

参考文献

- [1] 陈冰晶, 顾曦华. 试论电网建设项目环保法律关系 [J]. 企业管理, 2016, (S1): 244-245.
- [2] 黄白凡. 浅谈输变电的环境污染 [J]. 皮革制作与环保科技, 2023, 4(11): 98-100.
- [3] 李建伟, 黄磊, 李广军, 姚金雄. 浅谈输变电工程的环保监督管理 [J]. 电力科技与环保, 2019, 35(05): 40-42.
- [4] 门娟, 王静, 袁一方. 建设项目实施环境监理研究 [J]. 天津科技, 2018, 45(06): 16-19.
- [5] 殷媛, 王璇, 许超, 毛怡彬. 电网建设项目环保监督管理研究 [J]. 黑龙江环境通报, 2023, 36(08): 66-68.
- [6] 陈韶宇, 李旋, 傅玉美. 电网建设全过程中环境保护精益化管理的思考 [J]. 科技创新与应用, 2024, 14(15): 159-162.
- [7] 濮文青, 李志青, 余寒, 等. 输变电环境影响评价及竣工环保验收相关要点分析 [J]. 电力科技与环保, 2011, 27(04): 5-8.
- [8] 贾凡. 输变电工程环保验收技术要点与常见问题分析 [J]. 资源节约与环保, 2018, (11): 4-5+7.
- [9] 刘建国, 雷佳明, 张勇, 鲁涛, 贾海娟. 低电压等级输变电项目环保验收常见问题探讨 [A]. 中国环境科学学会 (Chinese Society for Environmental Sciences), 2019 中国环境科学学会科学技术年会议论文集 (第四卷) [C]. 中国电力工程顾问集团西北电力设计院有限公司; 国网新疆电力有限公司; 中国环境科学学会, 2019: 634-638
- [10] 温舜茜. 输变电工程竣工环保验收调查工作中的常见问题分析 [J]. 山东工业技术, 2017, (20): 171.

防止锅炉受热面结焦技术措施

詹冀安

国能（泉州）热电有限公司，福建 泉州 362800

DOI:10.61369/ME.2025050023

摘 要： 根据目前机组设计参数，机组改造情况，以及多年 运行经验，参考 DLT 611-2016《300MW ~ 600M 级机组煤粉锅炉运行导则》、NB / T 10127-2018《大型煤粉锅炉炉膛及 燃烧器性能设计规范》、DLT 831-2015《大容量煤粉燃烧锅炉炉膛选型导则》设计规范，为了有效控制和防止锅炉 发生大面积结渣、结焦，采取以下锅炉防结焦控制措施^[1-3]。

关 键 词： 结焦；氧量；灰熔点；配风

Technical Measures to Prevent Coking on the Heating Surfaces of Boilers

Zhan Ji'an

Guoneng (Quanzhou) Thermal Power Co., LTD, Quanzhou, Fujian 362800

Abstract： Based on the current design parameters of the unit, the progress of its renovation, and years of operational experience, Refer to the design specifications DLT 611-2016 "Operation Guidelines for Pulverized Coal Boilers of 300MW ~ 600M Class Units", NB/T 10127-2018 "Design Specifications for Furnace and Burner Performance of Large Pulverized Coal Boilers", and DLT 831-2015 "Selection Guidelines for Furnace of Large Capacity Pulverized Coal Combustion Boilers". To effectively control and prevent large-scale slagging and coking in boilers, the following anti-coking control measures for boilers are adopted .

Keywords： coking; oxygen content; ash melting point; air distribution

一、锅炉结焦成因

（一）煤种原因

1. 易结焦煤种判定：

（1）灰熔点判定（判定准确率83%）：ST灰熔点小于1190℃；

（2）结渣指数判定（判定准确率90%）：R_z大于2.5；

（3）碱酸比指数判定（判定准确率69%）：B/A大于0.4。

2. 不同煤种结焦特性：

（1）印尼煤： 结焦特性：易结焦，多为低灰熔点煤种，灰熔点多分布在1100 ~ 1200℃； 焦块特性：燃烧器喷口形成多为流动性熔融焦，焦块硬而脆，在水冷壁易形成板状焦块，在炉膛出口分隔屏、屏过、末过等易挂焦，掉落冷渣斗易破碎。

（2）神华煤： 结焦特性：石炭3、神混等煤种，煤种混杂，属于多煤种混煤，容易结焦，灰熔点多分布在1200 ~ 1260℃。焦块特性：燃烧器喷口、结焦量略小于印尼煤，在炉膛出口分隔屏、屏过、末过等易挂焦，掉落冷渣斗较印尼煤难以破碎。水冷壁挂焦特性较强，易形成板状焦块。

（3）内蒙煤： 结焦特性：灰熔点在1050 ~ 1200℃，部分煤种难磨、灰分大，燃尽率偏低。结焦倾向严重。焦块特性：容易结焦，焦块硬度高于以上两种煤，结焦危害性也大于以上煤种。

（二）氧量原因

1. 整体氧量偏低 整体炉膛氧量偏低，一是还原性气氛降低煤炭灰熔点。炉膛处于还原性气氛，煤粉结渣、结焦温度也随之降

低100 ~ 200℃。二是氧量偏低，燃烧不完全，粘附在水平烟道或炉膛出口水冷壁上，出现二次燃烧，形成粘结性强的焦渣，难以清除。

2. 局部氧量偏低 局部氧量偏低，主要体现在燃烧器区域，燃烧区域氧量不充分，燃烧不完全，强还原性气氛，导致燃烧器喷口结焦^[4]。

（三）煤粉细度原因

1. 煤粉细度过粗 煤粉细度过粗，一方面，在煤粉重力作用下，煤粉掉落到冷渣斗，沉积在冷渣斗，当遇到高温源后再次燃烧，煤粉在冷渣斗二次燃烧，烧结形成焦渣，粘附力极强，将形成焦渣，并将炉膛掉下来的灰渣拦截在冷渣斗，聚集后将可能堵住冷渣斗。另一方面，煤粉细度过粗，随着烟气从炉膛出口出去，燃烧的粗颗粒煤粉遇到管壁，粘附在管壁，再次燃烧，形成结焦^[5]。

2. 煤粉均匀性差 煤粉均匀性差，粗颗粒煤粉将导致煤粉形成粘附性二次燃烧，导致结焦，同时煤粉均匀性差，不利于合理配风，低灰熔点灰在二次燃烧中，被包裹烧成熔融灰渣，粘附形成结焦。

（四）配风原因

1. 局部配风不足 局部形成还原性气氛，形成局部结焦，如在燃用高硫煤情况下，同时可能形成高温腐蚀。

2. 一次风速过低 （1）一次风速过低，煤粉气流刚度不足，一方面，煤粉聚集在燃烧器附近，燃烧器口造成集中燃烧，导致喷口温度升高，另一方面，由于煤粉过度集中，氧量补充不及时，

形 成缺氧燃烧，导致燃烧器喷口结焦，燃烧器喷口烧损。

（2）切圆燃烧锅炉，可能导致火焰中心偏移，贴壁燃烧。

3.二次风速过低

（1）二次风速过低，燃烧器氧量补充不及时，形成局部缺氧，局部富氧燃烧的情况。

（2）切圆燃烧锅炉，可能导致火焰中心，贴壁燃烧。

（3）旋流燃烧器，可能导致外层旋流二次风强度不够，煤粉包裹、卷吸能力下降，煤粉可能发现沉降。

（4）二次风速过低出现贴壁燃烧，烧损燃烧器以及燃烧 器喷口结焦。

（五）磨煤机组合方式原因

1.对冲炉底层磨未运行 对冲炉底层燃烧器未运行，煤粉沉积到冷渣斗，可能导 致冷渣斗煤粉二次燃烧，形成结焦^[6]。

2.顶层磨运行 顶层磨运行，煤粉停留在炉膛燃烧时间短，煤粉细度过 粗，燃烧火焰加长，炉膛出口温度升高，水平烟道烟温水平上升，导致水平烟道结焦、结渣。

3.前后墙高低热值煤种分配 前墙火焰强度强于后墙，整体炉膛温度分布，前墙高于 后墙100~200℃（前墙1400~1500℃，后墙1300~1400℃），前墙结焦倾向明显高于后墙，因此前墙高灰融点煤种，后墙低灰熔点煤种，有利于减小结焦。

4.上下层高低热值煤种分配 炉膛温度场分布，四角切圆底层温度 1100℃左右，上层到燃烬风层温度1300~1400℃。因此，上层燃烧器水冷壁温度高，结焦倾向比较明显。

（六）设备原因

1.燃烧器喷口烧损

2.磨煤机出力下降：磨辊磨损、风环磨损、叶轮磨损、折向挡板磨损、分离器转速下降。

3.吹灰器故障：吹灰压力不足、枪头破裂、提升阀开 不到位，疏水不充分。

二、锅炉结焦程度判定

1.轻度结焦 转向室温度、空预器入口排烟温度在对应锅炉负荷设计 值范围内，捞渣机捞出焦块 < 30cm 大小的焦块，焦块量 < 1%。

2.一般结焦 转向室温度、空预器入口排烟温度在对应锅炉负荷设计 值范围内，捞渣机捞出焦块在30~50cm 大小，焦块量 < 5%。

3.中度结焦 转向室温度、空预器入口排烟温度较对应锅炉负荷设计 值温度高10℃以内，捞渣机捞出焦块在50~100cm 大小，焦块量5~8%。

4.严重结焦 转向室温度、空预器入口排烟温度较对应锅炉负荷设计 值温度高10℃以上，两侧温度出现偏差，并通过燃烧调整无 法调平，捞渣机捞出焦块在50 ~ 100cm 大小或以上，焦块量 > 8%。

三、锅炉结焦控制措施

（一）控制原则

锅炉结焦的形成，与燃用煤种和运行控制有密切关系，对于易结焦煤种的燃用，运行控制措施得当，对结焦的控制 有极大的抑制作用，即使无法根治，也可以从最大限度控制 结焦生成，或结焦生成后及时清理，防止结焦大面积形成， 威胁机组安全^[7]。

1.在防止结焦生成方面：合理配煤、配风、优化煤粉细度，减弱还原性气氛。

2.在结焦清除方面：每班通过吹灰，清除即时生成的焦、渣，防止进一步扩大，定期通过启停制粉系统、升降负荷、炉膛负压扰动等方式来清除炉膛内吹灰无法吹到区域的焦渣。

（二）控制结焦措施

1.原煤管理

（1）来煤灰熔点 ST 高于设计值 1190℃，结焦综合判定指数 $R_z < 2.0$ （> 2.5 位严重结焦），硅酸比 < 1.87。

（2）热值相近、同结焦性煤种同堆堆放，易结焦性煤种 务必单独堆放，单独堆取。

2.掺烧管理

（1）试烧管理：新到煤船，逐仓试烧，试烧新煤种，务必跨班检验结焦性能，试烧正常后，方可增加试烧比例。试烧时现场检查结焦情况，冷灰斗挂焦情况，底渣情况，锅炉偏烧情况，磨煤机出力情况，石子煤量情况，制粉系统粘堵情况，电除尘、湿除收尘情况（出力影响等），NO_x 变化情况等。试烧到一仓，观察 4~8 小时正常后，方可继续加第二仓，以此类推。

（2）正常掺配：当燃煤试烧正常后，印尼和国燃煤进行混配掺烧，当特殊需要单独掺烧国燃煤时，务必确保国燃煤试烧正常，方可单独全烧。

（3）新到煤船确定堆放位置、覆盖区域和煤种，试烧方案，取煤、堆煤方式和部位。总结上条船试烧情况，接卸情况。

（4）各台炉掺烧低灰熔点煤种量不超过40%，且低灰熔点煤种放下层制粉系统掺配，高灰熔点煤种放上层制粉系统^[8]。

3.配风管理

（1）一次风

风煤比控制在1.8~2.0，但风量、风煤比是参考，最终以取样化验出的最佳煤粉细度靠近目标煤粉细度、燃烧组织 调整最佳为调整原则。需认真做好制粉系统参数监控，关注煤粉细度化验情况。若发现煤粉细度偏离正常值立即安排调 整风量及分离器转速，煤粉细度偏粗的降低风煤比、提高分离器转速；煤粉细度偏细的降低分离器转速、适当提高风煤比。

（2）二次风

1）易结焦煤种，在保证 NO_x 合格前提下，适当提高氧量 0.2%。

2）一二期二次风配风，按照运行中总结，以及电科院试 验综合总结的配风卡。

试验配风卡：

| 二次风配风卡 | | | |
|---------------|---|----------|---|
| SOFA（燃尽风）风门开度 | | | |
| SOFA4 层 | % | 10 | 脱硝入口 NO _x 控制在190mg/Nm ³ （折后）以内，防止逃逸率高 |
| SOFA 3 层 | % | 10 ~ 30 | |
| SOFA 2 层 | % | 50 ~ 60 | |
| SOFA1 层 | % | 80 ~ 100 | |

| 主燃烧器各风门开度 | | | |
|---|---|----------|--------------------------------|
| OFAG 层（二次 +贴壁风） | % | 80 | |
| F 层周界风 | % | 75—28 | |
| EF 层（油二次风） | % | 35—50 | |
| E 层周界风 | % | 75—28t/h | (磨煤机停运时关至 15%) |
| DE 层（二次 +贴壁风） | % | 35—50 | |
| D 层周界风 | % | 75—28t/h | (磨煤机停运时关至 15%) |
| CD 层（油二次风） | % | 35—50 | |
| C 层周界风 | | 75—28t/h | (磨煤机停运时关至 15%) |
| BC 层（二次 +贴壁风） | % | 35—50 | （ A、B 磨煤机均停时开至 80% ） |
| B 层周界风（等离子） | % | 75—28t/h | (磨煤机停运时关至 15%,) |
| AB 层（油二次风） | % | 45—65 | （ A 磨煤机停运时或 A、B 磨煤机均停时开至 80% ） |
| A 层周界风 | % | 75—28t/h | (磨煤机停运时关至 15%) |
| AA 层二次风 | % | 100 | （ A 磨煤机停运时关至 15% ） |
| 1.该区域辅助风均投入自动，此对应开度 煤 量为 28t/h。 2.热一次风母管压力始终保 持 在 6.7KPa ~ 7.0KPa 之间运行。 3.风门挡板偏差值 ±10%，控制。 4.原则上将火焰中心往下调整，降低炉膛出口烟温 | | | |
| 注意事项： 1.加强捞渣机检查，是否存在大焦卡塞链条、链条偏斜、捞渣机液压油压过高或不加载等情况。 2.结焦情况检查，按照检查卡执行。 | | | |

4.煤粉细度管控

(1)煤粉细度取样周期:每台炉每周一次,确保煤粉细度取样的规范性,由于煤粉在管内分布不均,确保煤粉取样氧量控制标准,负荷(MW)氧量(%) (纯 印尼煤) 氧量(防结焦、国燃和 印尼煤混配) (%) 300 3.0 3.0 250 3.0 3.1 200 3.2 3.5 150 3.7 3.9 时整根粉管都能采到样,除了按《煤粉取样操作卡》进行取样外,粉管取样时要把粉管分为 5 等分,分别在等分点停留取样 1 分钟,从取样口开始算分别在伸入长度约 30cm、40cm、50cm、60cm 点停留(如下图)。

(2)煤粉细度要求:R90 在规定值(加仓方式上为准)以内,R90=0.5nVdaf (n 取 1.1)。

(3)化验班按规定周期定期取样化验煤粉细度,并及时将化验报告发给各值和专业,以便于运行调整。

(4)当班值及时分析煤粉偏差原因,如磨煤机出力不足,及时填写缺陷,设备进行检查处理。

(5)底层磨煤机停运时,最靠下运行制粉系统煤粉细度控制较正常更加严格,R90 较正常低 5%。

(6)磨煤机分离器转速控制不低于 50rpm,折向挡板放在 10 格。

5.吹灰控制吹灰管理,严格按照《吹灰管理规定》执行,并严格控转向室温度和空预器入口温度^[9]。

6.运行控制

(1)低负荷运行,煤粉细度控制在正常范围,R90 控制在规

定值的 ±5%。

(2)禁止通过降低分离器转速,牺牲煤粉细度方式长时间顶负荷,特殊工况事故处置期间,原则不超过 2 小时。

(3)锅炉动态扰动:通过制粉系统倒换、升降负荷等方式,清除炉膛结焦。

(4)锅炉长期高负荷的静态扰动:预锅炉有掉焦情况时,每班两次炉膛负压扰动(−500Pa~0Pa)、每天的晚班安排制粉系统煤种的切换(高热切低热,低热切高热),一二次风速配比的扰动。

(5)锅炉掉大焦如切实做好记录,并记录掉焦时的现象及相关操作,受热面温度及烟温的变化情况,现场结焦检查情况,特别是冷灰斗积焦及捞渣机运行情况,初步判断掉焦的位置。

(6)运行每个班做好锅炉看焦定期工作,除观火孔看焦外,每个班对比水冷壁壁温、过热器/再热器减温水量变化趋势、炉膛烟温,同负荷下,当出现以下各异常时,如壁温变化 ≥ 5℃、减温水量上涨 > 10t/h、空预器入口烟温上涨 ≥ 5℃,各监视段烟温超过防结焦控制值,判断结焦大致区域,增加该区域吹灰及进行负压扰动,若未有明显好转,向调度申请降负荷进行扰动,确保锅炉安全运行^[10]。

(7)做好锅炉吹灰工作,吹灰过程发现炉膛负压、捞渣机电流和油压异常变化立即安排人员现场检查。若发现掉落焦块尺寸大于 30cm,立即组织进行清焦。

参考文献

[1] DL/T 611-2016, 300MW ~ 600MW 级机组煤粉锅炉运行导则 [S].北京:中国电力出版社,2016.
[2] NB/T 10127-2018, 大型煤粉锅炉炉膛及燃烧器性能设计规范 [S].北京:中国电力出版社,2018.
[3] DL/T 831-2015, 大容量煤粉燃烧锅炉炉膛选型导则 [S].北京:中国电力出版社,2015.
[4] 邓策.防止锅炉受热面产生沉积物和锅炉爆管的措施 [J].中国石油和化工标准与质量,2024,44(15):85-87.
[5] 范志刚.浅析如何防止锅炉受热面受损 [J].应用能源技术,2022,(05):20-22.
[6] 胡杰.锅炉受热面爆管原因分析及防范措施 [J].通讯世界,2019,26(03):285-286.
[7] 罗大勇.锅炉受热面喷涂黑体材料防结焦性能试验研究 [D].哈尔滨工业大学,2017.
[8] 林钊.浅谈电厂锅炉受热面超温爆管原因及预防措施 [J].中国高新区,2017,(12):100-101.
[9] 邓策.防止锅炉受热面产生沉积物和锅炉爆管的措施 [J].中国石油和化工标准与质量,2024,44(15):85-87.
[10] 李彦辉,王亮亮.DG2025/25.4-II 6 型锅炉高温再热器区域结焦问题分析及建议 [J].山西电力,2024,(02):56-59.

石壕煤矿覆岩隔离注浆充填减沉技术研究与应用

张书勤

河南大有能源股份有限公司石壕煤矿，河南 三门峡 472121

DOI:10.61369/ME.2025050024

摘 要： 本文针对石壕煤矿采掘接替脱节、12070工作面地质复杂及传统开采方案缺陷等问题，开展覆岩隔离注浆充填减沉技术研究与应用。通过明确关键层破断步距计算、隔离煤柱作用机制及复合支撑体系构建的原理，搭配注浆参数设计、钻孔布置、岩移监测等措施，解决开采难题，实现地表建（构）筑物保护、资源回收提升、开采安全保障及生态效益，为同类“三下”采煤矿井提供参考。

关 键 词： 石壕煤矿；覆岩隔离注浆充填；减沉技术；“三下”开采；资源回收

Research and Application of Grouting Filling and Depressions Reduction Technology for Rock Cover Isolation in Shihao Coal Mine

Zhang Shuqin

Henan Dayou Energy Co., LTD. Shihao Coal Mine, Sanmenxia, Henan 472121

Abstract： This study investigates and applies rock-sealing grouting technology to mitigate subsidence in Shihao Coal Mine, addressing critical challenges including mining transition discontinuity, complex geological conditions in the 12070 working face, and deficiencies in conventional mining methods. By establishing key principles for determining critical strata fracture intervals, analyzing isolation pillar mechanisms, and constructing composite support systems, the research integrates grouting parameter design, optimized borehole layout, and rock displacement monitoring. These measures effectively resolve mining challenges while ensuring surface infrastructure protection, resource recovery efficiency, operational safety, and ecological benefits. The findings provide valuable references for similar underground coal mines with three types of underground structures (three-under) in China.

Keywords： Shihao coal mine; rock cover isolation grouting filling; sinkage reduction technology; "three underground" mining; resource recovery

引言

随着煤炭开采深度增加与“三下”开采需求凸显，矿井在产量保障、地表建（构）筑物保护及生态环保间的矛盾愈发突出。石壕煤矿作为重要煤炭生产矿井，受采掘接替紧张、复杂地质条件制约及传统开采方案缺陷影响，现有开采模式难平衡资源开发与安全环保需求。针对12070工作面开采难题，开展覆岩隔离注浆充填减沉技术研究与应用，探索适配该矿地质条件的高效减沉路径，为同类矿井“三下”开采问题解决提供实践参考。

一、石壕煤矿覆岩隔离注浆充填减沉技术现状问题

（一）矿井采掘接替脱节倒逼技术应用

石壕煤矿14区补勘后无煤带扩大，原煤含硫量约5%且煤层赋存不稳定，仅余下山煤柱工作面2019年停采封闭，致14区无法布置接替工作面。近五年矿井转至12区、13区回采，当前13区上山仅13040工作面单面生产，煤层呈串珠状鸡窝煤分布，煤质难保障、商品煤产出率低，直接影响产量达标^[1]。13区上山后续仅13100接替面（2024.03–2025.04），下一接替为13区下山13290工作面（2027.03–2029.03），矿井面临工作面脱节，产量与效益

受影响，需通过12区12070工作面合理开采缓解，覆岩隔离注浆充填减沉技术成关键，应用需求迫切。

（二）12070工作面复杂地质条件增加技术实施难度

12070工作面施工范围附近发育3条正断层，f133断层曾影响12区上山皮带辅助运输巷掘进，F103、F109断层位于12121采空区附近，虽预计对回采有一定影响，但隐伏地质构造存在可能性未排除，具体位置需进一步揭露。工作面北部、东部为采空区，即便巷道与采空区保持最小35m间距，仍可能改变覆岩应力分布与离层发育规律，给注浆减沉带来不确定性。施工期间还可能促使采面顶板形成离层水，处置不当会干扰注浆作业、埋下安全隐

患,多重复杂地质条件叠加,增加覆岩隔离注浆充填减沉技术实施难度。

(三) 传统开采方案缺陷凸显技术选择紧迫性

12070工作面对应地表的石壕村是历史名村,河南省耕地管控亦严苛,村庄搬迁面临用地手续繁琐、新址难选、工农协商不易等问题,推进需投9270万元,实际利润仅1126.46万元。充填开采需1.65亿元建矸石充填系统,作业与开采相互干扰致产量下滑,最终亏损5899.54万元。留设保护煤柱开采使采出量降至38万吨、压覆66万吨资源,还引发地表沉陷、采掘接替中断10个月,波及效益。传统方案不足凸显,选择覆岩隔离注浆充填减沉技术紧迫性极强。

二、石壕煤矿覆岩隔离注浆充填减沉技术原理

(一) 基于关键层初次破断步距的工作面长度计算

覆岩离层注浆充填减沉技术中,关键层是覆岩内控制岩层移动的坚硬岩层,其初次破断步距直接决定工作面开采后覆岩离层的发育范围与稳定性,也是计算工作面合理长度的核心依据。精准测算该步距可明确覆岩有效离层空间范围,避免工作面过短致资源开采不充分,或过长引发关键层过早破断、离层空间坍塌,无法满足注浆需求^[2]。12070工作面应用中,以此步距为基础,结合煤层埋深220~352m、平均倾角9.5°等参数,算出适配长度,为注浆作业构建稳定离层环境,保障减沉效果。

(二) 稳定隔离煤柱防离层区贯通的作用机制

稳定隔离煤柱在覆岩隔离注浆充填减沉技术中,承担阻隔上下区段离层区贯通的关键职能,依靠自身承载能力维系覆岩结构局部稳定。12070工作面北部、东部有采空区,若不设隔离煤柱,开采时上下区段离层空间易连通,致注浆浆液流失,无法在目标离层区形成有效填充体,丧失支撑上覆岩层作用^[3]。该工作面隔离煤柱需足够宽度抗岩层压力防破坏,且与采空区保持最小35m间距,阻断采空区干扰,确保离层空间独立封闭,为浆液填充、形成稳定支撑提供前提。

(三) “关键层+注浆填充层+煤柱”复合支撑体系构建

“关键层+注浆填充层+煤柱”复合支撑体系构建,依托各结构协同作用成为覆岩稳定与地表减沉核心。关键层作为覆岩坚硬岩层,承载上覆大部岩层重量,凭高强度维系覆岩不垮塌,为离层空间形成与注浆提供稳定环境^[4]。注浆填充层经地面钻孔注入注采比0.4的粉煤灰浆液形成,凝固后填离层空隙,同时支撑关键层、挤压下部岩层阻下沉。稳定隔离煤柱横向分隔开采区段防离层贯通,辅助承岩层压力,三者共构立体支撑,控覆岩移动保地表建(构)筑物安全。

三、石壕煤矿覆岩隔离注浆充填减沉技术措施

(一) 注浆参数设计与系统建设

12070工作面注浆参数紧扣开采需求设计:采出量预计104万吨,按注采比0.4算,总注浆量(粉煤灰)约41.6万t,设9个

注浆钻孔,单孔约4.62万t。注浆压力依钻孔层位深度126~216m分阶段控制:前期不低于1.3~2.3MPa保障浆液入层,中期孔口压力大于0确保注浆量达标,后期按地层自然压力1.4倍控制在1.8~3.2MPa提升密实度,需据现场试验调整。注浆浓度50%~70%,兼顾流动性与凝固效果^[5]。注浆系统建设匹配井下2500t/d产量,地面注浆站日能力需1200~1500t,含供料、搅拌等模块。电厂粉煤灰经罐车运至一级注浆站立罐,经两级搅拌细化后,由注浆泵加压压入管路,通过钻孔注入离层空间,配套管路、阀门等保障输送稳定连续。

(二) 注浆钻孔布置与保护煤柱留设

12070工作面注浆钻孔结合开采范围与地表建(构)筑物分布,采用两排交错形式:一排沿工作面南侧(临近石壕村)推进方向布设,另一排设于推进方向地表最大下沉主断面附近,间距85m、排距74m、交错错距15m,可规避注浆盲区、提升充填效率。因地表为丘陵低山地貌,钻孔深度126~216m不等,总深度约1532m,设计9个钻孔,与单孔约4.62万t注浆量需求适配。保护煤柱留设经多方案对比:20m需10个钻孔且9座民房达Ⅱ级损害,50m虽控民房损害为Ⅰ级但减采出量,最终确定留设30m。此宽度既保煤柱承载力防离层区贯通,又维持104万吨采出量,还控民房大部分损害为Ⅰ级(仅5座达Ⅱ级),兼顾资源回收与地表保护^[6]。

(三) 地表岩移观测站布设与建(构)筑物监测

地表岩移观测站布设围绕12070工作面开采影响范围展开,结合291m的平均开采深度,将测点间距设定为20m,除控制点外共埋设94个测点,核心布设两条关键观测线。沿工作面倾斜方向布设一条780m长的观测线,可布置40个测点,沿推进方向布设一条1060m长的观测线,可布置54个测点,借两条观测线协同监测,全面捕捉开采过程中地表移动变形规律^[7]。针对地表建(构)筑物监测,石壕村区域额外布置专项测站,沿贯穿村庄的南北道路布设800m长观测线、设41个测点,在工作面开切眼附近村庄区域布设400m长观测线、设21个测点,实时追踪道路及两侧民房移动变形情况。对受开采影响的3个养殖场与1个牛肉加工厂单独布设针对性测站,动态监测厂房结构受采动影响的变化,为井下开采调整与地面注浆参数优化提供实时数据支撑,保障地表建(构)筑物安全见图1。



图1: 地表村庄及重要建(构)筑物测站布置示意图

四、石壕煤矿覆岩隔离注浆充填减沉技术实施效果

（一）地表建（构）筑物损害等级有效控制

12070工作面对应地表石壕村区域，有242户住户、3个养殖场及1个牛肉加工厂。若不采取减沉措施，工作面正常采动预计会使约32座民房院落损害等级达Ⅳ级及以上，需拆除重建。采用覆岩隔离注浆充填减沉技术并留设30m保护煤柱后，通过地面钻孔注入粉煤灰浆液形成填充体，结合“关键层+注浆填充层+煤柱”复合支撑体系，有效控制了覆岩移动与地表沉陷。从预期效果来看，地表民房大部分损害等级被控制在Ⅰ级，仅约5座达Ⅱ级，完全规避了Ⅳ级及以上严重损害。同时，3个养殖场与1个牛肉加工厂的厂房结构稳定性得到保障，不会因采动出现影响正常使用的问题，避免了因建（构）筑物严重损坏引发的搬迁或大额维修补偿^[8]。

表1：12070工作面覆岩离层注浆费用概算

| 序号 | 项目 | 单位 | 工程量 | 单价/元 | 总价/万元 | 备注 |
|----|----------------------------|----|--------|---------|---------|---------------|
| 1 | 注浆孔打钻费用（钻孔9个，深度126～216m不等） | 米 | 1532 | 1400 | 214.48 | |
| 2 | 材料供应（粉煤灰） | 吨 | 416000 | 60 | 2496 | 根据市场情况据实结算 |
| 3 | 钻孔密封及孔口在线监测 | 个 | 9 | 50000 | 45 | |
| 4 | 注浆站建设（含设备） | 个 | 1 | 2000000 | 200 | 据实结算 |
| 5 | 注浆费用 | 吨 | 416000 | 60 | 2496 | |
| 6 | 水电供应 | 项 | 1 | 750000 | 75 | |
| 7 | 工农关系协调费、房屋加固补偿、青苗补偿等 | 项 | 1 | 1200000 | 120 | 预计费用，由矿方协调、负责 |
| 8 | 地表沉降及建筑物测站建立与变形观测 | 项 | 1 | 800000 | 80 | |
| 9 | 工程设计费 | 项 | 1 | 1320000 | 132 | |
| 合计 | | | | | 5858.48 | |

（三）安全开采保障与生态环保效益达成

在安全开采方面，覆岩隔离注浆充填减沉技术借助“关键层+注浆填充层+煤柱”复合支撑体系，有效管控12070工作面覆岩移动，避免采动引发的顶板垮塌、离层水突涌等隐患^[9]。同时，无需搬迁地表石壕村及周边养殖场、牛肉加工厂，消除了搬迁带来的工农矛盾与施工安全风险，保障了井下开采作业和地面人员生产生活的双重安全。生态环保层面，该技术以电厂粉煤灰为注浆原料，总注浆量约41.6万t，实现工业固废无害化处置与资源化利用，避免粉煤灰堆积占用土地、污染土壤及地下水。同时借由地表沉陷控制减少工作面上方耕地破坏，保护当地农业生产环境，避免传统开采可能诱发的山体滑坡、植被破坏等生态问题，

（二）煤炭资源回收与经济效益实现

采用覆岩隔离注浆充填减沉技术并留设30m保护煤柱，12070工作面走向长215m、倾向长503m，煤层平均厚度4.8m，采出量预计达104万吨，对比留设保护煤柱开采方案38万吨的采出量，大幅减少66万吨煤炭资源压覆，显著提升资源回收率^[9]。经济效益层面，该工作面预计单位完全成本706.09元/吨，总完全成本51403.69万元，经洗选加工可产出精煤31.2万吨、煤泥及中煤41.6万吨，商品煤合计收入60688.14万元，扣除成本后利润9284.46万元。再减去覆岩离层注浆设备及工程投入的5858.48万元，实际仍可实现利润3425.98万元，远超村庄搬迁开采方案1126.46万元的实际利润，更规避充填开采方案5899.54万元的亏损，保障资源充分回收的同时为矿井创造稳定经济收益，缓解采掘接替脱节带来的效益压力见表1。

五、结语

石壕煤矿针对采掘接替脱节、12070工作面地质条件复杂及传统开采方案存在的缺陷等现实问题，系统研发并应用覆岩隔离注浆充填减沉技术。明确关键层破断步距计算、隔离煤柱作用机制及复合支撑体系构建的技术原理，搭配精准注浆参数设计、科学钻孔布置与岩移监测等配套措施，有效破解矿井开采难题。该技术实现地表建（构）筑物有效保护，提升煤炭资源回收效率与矿井经济效益，保障开采作业安全，达成工业固废资源化利用与生态环境保护的协同效果，为同类“三下”采煤矿井提供可借鉴的技术路径，助力煤炭资源开发与生态安全的协调发展。

参考文献

[1] 许家林, 轩大洋, 李建. 覆岩隔离注浆充填技术实践与研究展望 [J]. 中国煤炭, 2024, 50(06): 74–80.
[2] 韩磊. 覆岩离层注浆充填现状与展望 [J]. 山西焦煤科技, 2022, 46(12): 4–8.
[3] 轩大洋, 许家林, 王秉龙. 覆岩隔离注浆充填绿色开采技术 [J]. 煤炭学报, 2022, 47(12): 4265–4277.
[4] 赵辉. 覆岩离层注浆充填开采方案及应用分析 [J]. 煤炭技术, 2021, 40(03): 12–14.
[5] 马军. 淮北矿区注浆充填开采地面沉降规律及分析研究 [J]. 矿山测量, 2020, 48(02): 23–26.
[6] 秦小云. 寺河煤矿2305工作面覆岩离层注矸石充填减沉技术研究 [J]. 能源技术与管理, 2020, 45(06): 72–73+150.
[7] 李涛. 阳泉矿区铁路隧道下覆岩隔离注浆充填开采实践 [J]. 煤矿安全, 2020, 51(02): 155–158.
[8] 高美科. 煤矿充填开采技术现状及未来发展探讨 [J]. 能源与节能, 2024, (06): 1–5.
[9] 巩建雨. 覆岩离层注浆充填分带模型及工程应用 [J]. 陕西煤炭, 2023, 42(03): 104–108+176.

低速无感可升降自供电减速带研究

张真银, 王昭宁, 王梦涵, 陈宇轩, 高兴亚, 何永明
东北林业大学 土木与交通学院, 黑龙江 哈尔滨 150040
DOI:10.61369/ME.2025050026

摘 要 : 针对传统减速带在保障道路安全时采用的强制降速, 造成驾驶舒适性差及车辆机械损耗大等问题, 论文提出一种低速无感可升降自供电减速带系统。该系统通过测速感知子系统、智能数据处理中枢、自适应升降动力系统, 实现了基于车速的智能化控制。

关 键 词 : 交通安全; 自供电; 升降减速带; 驾驶员舒适度; 车辆使用寿命

Research on Low-Speed, Non-Intrusive, Height-Adjustable Self-Powered Speed Bumps

Zhang Zhenyin, Wang Zhaoning, Wang Menghan, Chen Yuxuan, Gao Xingya, He Yongming
School of Civil Engineering and Transportation, Northeast Forestry University, Harbin, Heilongjiang 150040

Abstract : Aiming at the problems such as poor driving comfort and large mechanical wear of vehicles caused by the forced speed reduction adopted by traditional speed bumps when ensuring road safety, this paper proposes a low-speed, non-intrusive, height-adjustable self-powered speed bump system. This system realizes intelligent control based on vehicle speed through a speed perception subsystem, an intelligent data processing center, and an adaptive lifting power system.

Keywords : traffic safety; self-powered; speed bumps for lifting and lowering; driver comfort; vehicle service life

一、研究背景

(一) 应用背景

在复杂的交通环境中, 传统减速带的局限性日益凸显。《城市交通设施安全评价导则》(2020年) 研究显示, 设计不合理的减速带间接导致了2% ~ 5%的低速路段事故。强制减速设计不仅严重影响驾驶舒适性, 更对车辆底盘造成持续性损害。随着电动汽车的普及, 这一问题愈发严重——较低安装的电池组^[1]在频繁通过减速带时更易受损, 既影响电池寿命又埋下安全隐患。

(二) 国内外研究

鉴于这种情况, 国外学者已经开展了一系列研究工作。邹鸿翔^[2]等提出一种单向车道的抗冲击车路能量减速带, 通过“顺势运动”吸纳车辆滚压能量, 但存在低交通流量时段可能供电不足; 吴子英^[3]等提出一种双稳态减速带振动能量俘能装置, 能够有利于减速带振动能量的收集, 但未说明低车速(< 20km/h)时的发电能力(可能接近零输出)。张明远^[4]首次结合 EEG 脑电实验(n=50)量化驾驶员通过不同高度减速带时的应激反应, 但未考虑不同年龄段驾驶员差异(样本均为20~40岁)。李红岩^[5]提出“吸音-智能升降”复合型减速带, 通过材料与结构优化实现安全与降噪协同, 但在极端天气下响应会延迟。论文创新融合智能升降与自供电技术, 通过自适应调节有效缓解车辆颠簸, 降低

底盘磨损, 同时实现车辆振动回收利用, 完美契合我国绿色智慧交通发展理念。

二、解决方案

(一) 智慧升降

为提高人员密集区域人车通行的安全性和舒适性, 针对传统减速带存在的固有缺陷, 团队在原有减速带的基础上增加了智慧升降系统。该系统通过多模块协同工作实现智能化速度管控, 主要由以下核心组件构成: 测速感知子系统、智能数据处理中枢、自适应升降动力系统。各子系统通过物联网技术有机集成, 形成完整的智能交通管控系统^[6]。

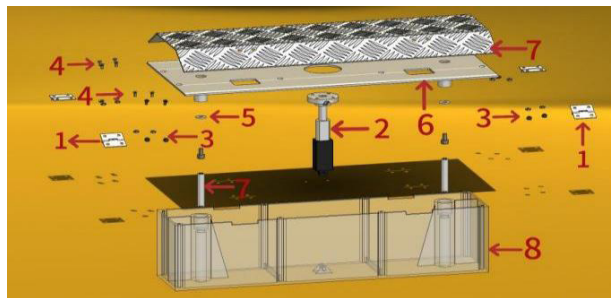


图1 减速带结构图

测速子系统是整套系统的前端感知模块，主要负责车辆速度的实时监测与数据采集。该系统采用高性能雷达测速装置，配合高精度电信号传输单元组成。数据处理系统作为整个系统的控制中枢，由三大核心组件构成：高灵敏度电信号接收器、双色 LED 指示灯阵列以及单片机控制单元。

1. 合页；2. 助推杆；3. 六角螺母；4. 十字槽沉头螺钉；5. 垫片；6. 封板；7. 光杆；8. 下箱体

升降动力子系统作为系统的执行机构，采用机电一体化设计，集成高性能电动推杆、精密行程开关、机械限位保护装置及高防护等级密封箱体。

(二) 升降原理

该减速带设置在路面上，距离其 L 处设置限速牌，其中设置雷达的测速区间为 M_0 ，使得其能实时检测到距离限速牌小于等于 M_0-L 处任意位置车辆的瞬时速度，并将其转化为电信号通过双绞线传输方式将采集数据实时传送至数据处理系统^[7]。

当车辆以速度 V 行驶在路上，此时与雷达的距离为 M_0 ，并设定此时刻为 0s，当前路段限速为 V_0 ，若车速 $V > V_0$ 时，雷达通过电信号传输装置将信号传输给升降动力系统中的电信号接收装置，系统做出反应从而使得指示灯变红，提醒驾驶人减速，若到达限速牌处还未降至规定速度，那么减速带保持升起状态，迫使车辆减速。

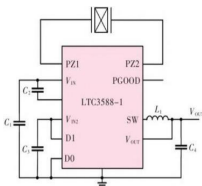
(三) 减速带供电

升降系统采用高效节能的自供电系统，该系统采用创新性的能量回收技术，主要由能量收集模块和电机驱动模块两大部分组成。

能量收集模块作为整个自供电系统的核心组件，采用了先进的压电能量转换技术。该模块包含压电传感层、能量转换器和智能储能电路等关键部件。当车辆通过减速带时，产生的机械振动会驱动压电能量收集器中的悬臂梁结构产生形变，附着在其表面的压电材料随即发生正压电效应，将机械能转化为电能^[8]。能量转换器将产生的交流电经过高效整流电路转换为直流电，并通过智能充放电管理系统存储于专用蓄电池中。

(四) 供电原理

本装置中车辆与减速带振动过程，在压电能量收集器的作用下，可以将其等效为一个机电耦合动力学模型，该模型以“质量块-弹簧-阻尼”为核心构建参数模型。



3. 能量回收与自供电能力上, 系统依托压电能量转换技术, 车辆通过时可将机械振动转化为电能。车速 30km/h 单次发电 12J, 40km/h 时达 27J, 且车速越快发电越多, 所发电量能满足减速带升降及传感器工作需求, 实现自供电, 契合绿色智慧交通理念^[10]。

综上, 该减速带系统有效平衡安全、舒适与节能, 为解决传统减速带问题、推动交通设施智能化绿色化升级提供了可行方案, 具备较高的实际应用价值与推广前景。

参考文献

- [1] 王振宇, 李志强, 张雨辰等. 电动汽车底盘通过性与减速带兼容性优化设计 [J]. 汽车工程, 2023, 45(2): 210–218.
- [2] 邹鸿翔, 李猛, 赵林川等. 抗冲击车路能量收集减速带设计与自供能交通管控 [J]. 机械工程学报, 2022, 58(20): 72–82.
- [3] 吴子英, 严涵, 李永越, 赵伟等. 一种双稳态减速带振动俘能装置发电性能研究 [J]. 工程科学与技术, 2022, 54(02): 205–212.
- [4] 张明远, 李华强, 王思睿. 基于驾驶员心理生理特性的减速带优化设计研究 [J]. 中国公路学报, 2023, 36(2): 215–226.
- [5] 李红岩, 张伟, 王静等. 智能减速带在校园区的降噪与安全协同优化 [J]. 交通运输工程学报, 2022, 22(8): 112–123.
- [6] 何远义. 基于物联网的智能监控系统在交通建设中的应用研究 [J]. 运输经理世界, 2024(18): 151–153.
- [7] 陈玺兆. 基于深度学习的路面橡胶减速带识别与缺陷检测系统研究 [D]. 浙江科技大学, 2024.
- [8] 王子雄. 基于 Simulink 的汽车通过减速带振动响应分析 [J]. 汽车零部件, 2025, (02): 48–51.
- [9] 徐迎, 滕燕, 胡万兴, 李兴旺. 基于驰振的压电能量收集器的仿真与试验 [J]. 机床与液压, 2024, 52(23): 112–117.
- [10] 李启朗, 邢红晟. 减速带对双巡航控制模型瞬时交通排放的影响 [J]. 安徽理工大学学报 (自然科学版), 2025, 45(01): 35–41.

浅谈热动力设备金属的腐蚀与保护探析构建

孙道坤

石横特钢集团有限公司, 山东 泰安 271612

DOI:10.61369/ME.2025050032

摘 要 : 为了实现对热动力设备金属腐蚀问题的防治,要从环境、规范化操作等多个层面,加强对热动力设备金属的安全保护,降低腐蚀风险。分析引起热动力设备金属腐蚀的原因,实施热动力设备金属的保护措施,在明确金属腐蚀原因的基础之上,优化设备运行环境,加强对外化防腐物质的合理运用,采取真空除氧技术方法等,提高了对热动力设备安全的保护效果,促使设备设施的稳定运行。

关 键 词 : 热动力; 设备; 金属; 腐蚀; 保护

A Brief Discussion on the Analysis and Construction of Corrosion and Protection of Metals in Thermal Power Equipment

Sun Daokun

Shiheng Special Steel Group Co., Ltd., Tai'an, Shandong 271612

Abstract : In order to realize the prevention and control of metal corrosion of thermal power equipment, it is necessary to strengthen the safety protection of thermal power equipment metal and reduce the corrosion risk from multiple aspects such as environment and standardized operation. Analysis of the causes of thermal power equipment metal corrosion, the implementation of thermal power equipment metal protection measures, on the basis of clear metal corrosion cause, optimize equipment operation environment, strengthen the rational use of external anticorrosive material, vacuum oxygen technology, etc., improve the protection effect of thermal power equipment safety, prompting the stable operation of the facilities.

Keywords : thermal energy power; equipment; metal; corrosion; protection

在热动力设备的运行过程中,受到了多种因素的影响,会出现金属腐蚀的问题,此类腐蚀现象不仅会威胁热动力设备的运行安全,而且还将逐渐形成累积效应,给工作人员的生命安全造成影响,诱发了设备安全事故风险。因此在对热动力设备金属腐蚀情况进行判断和早期防治的过程中,要明确腐蚀原因,制定可行的防治措施,实现安全生产,创造理想的热动力设备运行效益目标。

一、热动力设备金属腐蚀的原因

(一) 材料密度小

在热动力设备日常的运行和管理工作中,对影响热动力设备金属的各项因素进行分析,其中材料的密度决定了热动力设备的金属性能情况,因为热动力设备中应用到的金属材料防腐能力具有明显的不同。通常情况下,金属材料防腐能力会受到材料密度的影响,与材料密度值成正比,材料密度水平越高,热动力设备金属的防腐能力越强。但是在热动力设备中,部分材料的选择和应用中存在一定的缺陷,材料密度小,因此降低了热动力设备金属的防腐能力,这对热动力设备的运行和安全生产产生了直接的影响。

(二) 腐蚀性介质因素

腐蚀性介质在热动力设备的运行过程中,产生了不可忽视的影响,因为使用热动力设备的过程中,难免会有腐蚀性介质的存在,例如酸性液体、酸性气体,碱性的液体、气体,除此之外,还包含具有腐蚀性的氧化物等。此类腐蚀性的介质接触到热动力设备的金属材料,会对金属材料产生长期积累的影响,在长时间接触下,金属材料不可避免的会发生腐蚀问题。

(三) 热动力设备内部残留杂质

在热动力设备的内部存在残留杂质的现象,如果工作人员没有发现杂质并将其清理干净,将会引发热动力设备金属材料腐蚀的问题,甚至腐蚀问题会逐渐加重,影响热动力设备的安全稳定运行。

（四）合理维护因素

在使用热力动能设备的过程中，操作人员需要具备一定的养护观念，注重对热力动能设备金属材料的合理维护、科学维护。如果工作人员忽视了这一点，没有定期进行对金属材料腐蚀问题的查看、防治，采取可行的防范措施，将会引发金属腐蚀现象愈演愈重的情况，加重腐蚀的扩散、蔓延，增加了热力动能设备运行安全事故问题的发生几率，破坏了安全生产的环境^[1]。

二、热力动能设备金属的保护措施

（一）优化设备运行环境

热力动能设备处于室内或室外环境中，在裸露状态下会受到环境的影响，尤其是水分会增加热力动能设备腐蚀的风险，因此在使用热力动能设备的过程中，要注重对设备金属腐蚀问题的防范，做好保护工作，从环境着手，保持良好的设备运行环境，增强热力动能设备的防腐能力。工作人员要对空气中的水分进行监测、控制，使空气中水分含量指标保持在一定的规范范围，在脱除溶解的环节，要防范水中的氧增加腐蚀风险，预防中性水引起的碳钢腐蚀问题。采取机械脱气法的方式，降低腐蚀风险，也可以将脱氧剂添加到水中，例如亚硝酸钠等材料，可以有效地降低中性水引起的碳钢腐蚀问题。

为了保持生产安全和热力动能设备的稳定运行，降低热力动能设备金属的腐蚀几率，也可以将添加剂防腐剂等运用其中，目的是改善外在环境，降低腐蚀几率。使用化学药剂，抑制金属腐蚀的速度，形成保护膜，增强防腐效果，将铬酸盐、亚硝酸盐等应用于金属表面，可以形成起到保护作用的氧化膜。使用合磷酸盐、锌盐、苯并三唑，在金属表面沉淀起到保护作用，将中和剂添加到生产过程中，有效地降低酸性腐蚀风险，因为使用中和剂可以调整 pH 值，防范热力动能设备的金属腐蚀现象。

（二）加强对外化防腐物质的合理运用

在企业生产过程中，使用热力动能的设备设施，需要在防治金属的过程中利用外化防腐物质，增强热力动能设备的耐腐蚀性能，企业可以结合自身的经济情况、运行效益、发展目标，使用具备耐腐的物质材料进行喷涂作业，在设备表面进行喷漆处理。这是一种直观的防腐方法，也是很常见的一种保护措施，目前应用到外化防腐中的材料最常见的为油料涂漆、环氧树脂，邻苯二甲酸树脂也是较为常见的应用材料。

在喷涂过程中，工作人员需要了解此类物质的特性和使用要求，重点关注金属焊接的位置和转接的位置，要使用覆盖物，增强化工设备的整体性能，提高其耐腐蚀性。在使用外化防腐物质的过程中，可以使用无机衬底的方法或有机衬底方式，减少腐蚀侵蚀的风险，选择环氧树脂或聚四氟乙烯、聚氯乙烯树脂等进行衬底处理。选用此类物质时，要注意此类物质是否具有耐腐蚀的良好性能和一定的经济适用性，以增强耐腐蚀管理和保护的效果，促使热力动能设备安全保护工作的经济性和有效性^[2]。

（三）真空除氧技术方法

真空除氧技术和其他类型的除氧技术相比，具有一定的温和

性，是在改善加热条件的基础之上进行除氧的改善，加热条件会显著减少热力动能设备的自耗氧量，因此实现除氧和防腐的目的。在利用真空除氧技术方法的过程中，该技术应用对设备有着较高的要求，应利用高位布置的方式，使用喷泉泵、加压泵等设备设施，利用低位布置的方式时，也要合理的利用高度差，实现有效的技术应用效果，强调技术应用的高效性。真空除氧技术应用中。工作人员要选择将真空设备，安置在设备的高位，该做法的目的是提高真空度，实现顺利的抽气过程，在高位布置中有效避免在水中产生气泡，提高气体抽取的效率。高位布置的真空系统运行过程中，应借助喷泉泵和加压泵等设备的辅助功能，增强真空除氧的效果，例如在喷泉泵的使用中，采取喷射水柱的方式增加气液接触面积，使气体被抽除，加压泵的使用于维持系统的正压状态，迅速排除水体中的氧气。

由于设备的限制或其他因素，无法将真空系统完全布置在高位，此面临一定的特殊情况下，要合理利用设备的高度差，设计合理的管路和连接方式，发挥出真空除氧设备的最优效果。设计设备中的管道要考虑气体流通的畅通性，在真空系统的运行中，有效地抽出水中的氧气，优化系统的性能。值得注意的是，在真空系统的应用中，要特别注意安全措施，注重系统的操作安全，维护设备正常运行，在高位布置的真空系统中，要注意防止真空泵在操作中发生失效，因为真空泵失效会导致水回流问题的发生。利用真空除氧技术时，要设置实时监测系统，监测真空度和水中氧气浓度，根据实际情况，工作人员要分析各项参数，以此作为调整系统运行参数的依据，保证除氧效果的稳定性和可靠性。利用循环水箱和换热设备，将系统产生的余热充分的利用起来，使用射流加热器，提高软化水的温度，并进行分级安装，真空除氧技术的运行过程简单，效果可靠性强，目前已经在热力动能设备领域内得到了广泛的运用。

（四）给水系统除氧技术

为了降低热力动能设备的金属腐蚀风险，保证设备设施的稳定运行，要利用热力动能给水系统进行除氧，该过程中给水系统需要对水中溶解氧进行清除，防范热力动能设备零部件金属材料腐蚀和大量氧化化的问题。因为给水系统中有大量的水中溶解氧存在，增加了设备零部件金属材料的腐蚀风险，发生腐蚀问题后，氧化铁产物还会在物理作用下移动到热力动能设备的内部，在管壁位置产生大量的堆积。

由于金属材料和氧化铁存在明显的导热性能差异，管道的受热均匀性不足，氧化铁的溶解难度大，还会使得管道的内壁出现较大的阻力。在点坑的作用下，阻力系数值增加，进一步加重了管道安全事故风险，热力动能设备中的管道有可能发生起火甚至爆炸^[3]。

（五）化学除氧技术方法

使用化学除氧的方式，可以借助亚硫酸钠的作用进行除氧，也可以使用钢屑除氧方法，其中亚硝酸钠除氧的方式原理是利用水中的溶解氧，对亚硫酸钠进行氧化处理，转化成硫酸钠，实现除氧的目标。该方式的应用中使用的药量数值通常高于计算获得的理论值，升高反应温度之后，将会形成更强的除氧效果，水环

境 pH 值为 60，有着最理想的储氧状态，pH 值逐渐增加，除氧效果则随之下降。

钢屑除氧法是借助水中的溶解氧，对钢屑进行氧化处理，该方式可以分为两种，第一种是独立式除氧方法，第二种是附设式的除氧方式，使用钢屑除氧法的过程中，水温要达到一定的要求，最好不超过 70℃，如果温度处于 20–30℃ 之间，除氧效果较差，水温为 80–90℃ 时，则有着最佳的储氧效果。使用钢屑除氧法时，需要对水流速度等进行控制，采取压紧处理的措施，对水中溶解氧的含量进行调整，含量过高就要降低水流速度，充分的去除水中的溶解氧。但是近些年来该方式的应用没有实现技术进步，而且在培养过程中，受到了多种外界因素的干扰，因此该技术的应用体现出了一定的局限性，只在锅炉房等位置进行使用，作为一种辅助技术存在，而不能进行单独的使用^[4]。

（六）解析除氧法

解析除氧法是近些年来一种应用到热动力设备中的新型除氧方式，使用不含氧的气体，充分接触热动力设备中的水，解析水中的溶解氧，在循环进行接触的环节，去除水中的溶解氧。采用不含氧气的气体与水充分接触，基于物理和化学手段从水中去除溶解氧，作为新型的除氧方式，广泛应用于热动力设备，有效的防止了金属腐蚀，减少了设备损伤，提高了设备运行效率。解析除氧法离不开稳定、可靠的气体供应系统，工作人员要选择采用不含氧气的气体，如氮气或其他惰性气体，借助专用的设备供给到热动力设备中的水体中。

设计合理的设备结构，利用设备中的散装填料，将不含氧气体引入水中，也可以借助气液接触器的作用，促使气体与水充分接触。不含氧气体在接触水的过程中，采取物理和化学的方式，对水中的溶解氧进行解析，氧气被吸附到气体中，降低水中的氧浓度。解析除氧法采取了循环方式进行运作，气体与水的接触不断往复，保持水中的氧浓度低水平，降低了金属腐蚀的问题发生几率。在解析除氧法的应用中，设置实时监测系统，监测水中氧气浓度，获取准确、全面的监测结果，调整气体供应速率、调整设备操作参数，目的是保持水中的氧浓度在合适的范围内。解析除氧法的适用性较强，在动力设备，包括锅炉、冷却水系统、蒸汽发生器的使用中发挥了优势，有效地减少氧气带来的腐蚀影响，提高了设备的运行效率，延长了使用寿命。该技术不需要预热处理水，因此有效的降低了能耗，体现出了一定的经济性，使用过程中要调整装置，对管道系统和除氧水箱加强密封处理^[5]。

（七）加强规范化操作

在热动力设备的操作和应用中，加强规范化建设，提高热

能动力设备的操作规范性，可以降低热动力设备金属的腐蚀风险，因为所处的环境较为恶劣，热动力设备工作强度高，容易在长期运转之后形成腐蚀。工作人员要做好日常的管理维护，加强操作规范化建设，定期制定和实施维护修理的计划，做好资料存档工作，将设计、制造、施工、安装阶段的原始资料保留下来。详细的记录维护修理工作的信息，对防腐检查工作的成果和具体的方案进行记录，要求工作人员规范自身的操作，加强对热动力设备的安全保护。工作人员应定期进行设备巡检，检查设备的运行状况、油液、冷却水等系统的状态，及时发现和解决异常情况，特别关注设备暴露在恶劣环境中的部位，动态了解外露的金属表面、密封件等具体情况。制定并加强操作规程，要求操作人员按照规定的程序和方法操作设备，特别是注意操作过程中，实施科学的维护保养工作，防止不当操作引发的腐蚀问题。

制定定期的维护修理计划，维修中要做好清理、润滑、紧固、更换易损件等工作，定期对设备进行检查和维护，目的是降低腐蚀问题的发生几率。详细做好记录，贯穿设计、制造、施工、安装阶段，收集和保管好原始资料，存档设备图纸、材料清单、施工记录资料，为后续维护修理工作和问题追溯提供可靠的依据。对每一次维护修理工作进行详细的记录，了解维护的具体内容，明确更换的零部件、使用的润滑油等，建立设备使用档案，为未来的维护提供参考。记录防腐检查的工作成果，将具体方案体现在文本记录中，更新相关数据，包含腐蚀程度、腐蚀部位、采取的防腐措施等信息，以便依据具体的参数情况，调整防护方案。要求工作人员规范自身的操作，穿戴适当的防护设备，按规定程序进行相关操作，严禁擅自更改设备参数，切忌自行调整操作方式，预防事故和设备损坏。加强对热动力设备的安全保护，使用设备的防护罩，做好安全标识工作，制定应急处理方案等，在操作和维护过程中，有效避免安全风险^[6]。

三、结论

综上所述，在热动力设备的运行和使用过程中，引起金属腐蚀的问题的原因较为复杂，因此要制定可行的预防和保护措施，切忌掉以轻心，应从多方面进行综合化的防治。引进新技术，运用新材料，与时俱进，提高热动力设备的保护水平、保护效果。

参考文献

- [1] 邹超. 热动力设备金属的腐蚀问题及预防措施 [J]. 设备管理与维修, 2021(16): 106–107.
- [2] 徐力刚. 大型燃煤锅炉水冷壁高温腐蚀机理及缓解方案研究 [D]. 江苏: 东南大学, 2021.
- [3] 唐靖轩. 扩散吸收式热变换器的气泡泵性能研究 [D]. 浙江: 浙江大学, 2021.
- [4] 金弘琨. 介孔羧基疏水解催化剂的制备与性能研究 [D]. 江苏: 东南大学, 2021.
- [5] 王学有. 火电厂热动力设备金属腐蚀原因及预防措施 [J]. 数码 – 移动生活, 2021(4): 390.
- [6] 英格瓷 (浙江) 铝业股份有限公司. 一种用于锆英砂精矿碱熔水洗连续生产设备的反应装置: CN202020050120.3[P]. 2021–07–16.

地下水监测设备运行维护成本核算与管理模式创新

陈海涛^{1,2}, 刘学^{1,2}, 任广智^{1,2*}

1. 中国地质调查局哈尔滨自然资源综合调查中心, 黑龙江 哈尔滨 150086

2. 自然资源部哈尔滨黑土地地球关键带野外科学观测研究站, 黑龙江 哈尔滨 150086

DOI:10.61369/ME.2025050002

摘 要 : 本文聚焦地下水监测设备运行维护成本核算与管理模式创新, 剖析了地下水监测设备体系, 深入探讨运维成本的构成要素, 包括人工、设备更换与维修、能源、通信等, 并分析了其持续性、不确定性等特征。基于全生命周期成本理论构建运维成本核算模型, 涵盖框架设计与具体实现步骤, 诊断传统运维管理模式的弊端, 提出“智慧化、社会化、集约化”三位一体的创新管理模式, 旨在提升运维效率、降低成本、保障设备稳定运行, 为地下水监测设备的科学管理提供依据。

关 键 词 : 地下水监测设备; 运维成本; 成本核算; 全生命周期成本

Cost Accounting and Management Model Innovation for the Operation and Maintenance of Groundwater Monitoring Equipment

Chen Haitao^{1,2}, Liu Xue^{1,2}, Ren Guangzhi^{1,2*}

1. Harbin Comprehensive Survey Center for Natural Resources, China Geological Survey, Harbin, Heilongjiang 150086

2. Harbin Field Scientific Observation and Research Station for the Critical Zone of Black Soil, Ministry of Natural Resources, Harbin, Heilongjiang 150086

Abstract : This paper focuses on cost accounting and management model innovation for the operation and maintenance of groundwater monitoring equipment. It analyzes the groundwater monitoring equipment system, delves into the constituent elements of operation and maintenance costs—including labor, equipment replacement and repair, energy, communication, etc.—and examines their characteristics such as sustainability and uncertainty. Based on the total life-cycle cost theory, an operation and maintenance cost accounting model is constructed, encompassing framework design and specific implementation steps. The paper diagnoses the drawbacks of traditional operation and maintenance management models and proposes an innovative "intelligent, socialized, and intensive" trinity management model. This model aims to enhance operational efficiency, reduce costs, ensure stable equipment operation, and provide a scientific basis for the management of groundwater monitoring equipment.

Keywords : groundwater monitoring equipment; operation and maintenance costs; cost accounting; total life-cycle cost

引言

地下水监测作为掌握地下水动态变化的关键手段, 其设备的稳定运行是保障监测数据准确、连续的基础。然而随着地下水监测网络的不断扩大, 监测设备的运行维护工作面临着诸多挑战。传统的运维管理模式在成本控制、效率提升等方面逐渐显现出局限性, 运维成本的构成复杂且存在诸多不确定性, 难以实现精细化管理。在此背景下, 如何科学核算地下水监测设备的运维成本, 创新管理模式以提高运维效率、降低成本, 成为当前地下水监测领域亟待解决的问题。全生命周期成本理论为运维成本的全面核算提供了新思路, 而“智慧化、社会化、集约化”等现代管理理念与技术的融合, 则为管理模式创新指明了方向。本文旨在深入分析地下水监测设备运维成本的构成与特征, 基于全生命周期成本理论构建运维成本核算模型, 并探讨管理模式创新路径, 以期提升地下水监测设备运维管理水平提供理论支持和实践参考。

一、地下水监测设备运维成本构成与特征分析

（一）地下水监测设备体系概述

地下水监测研究工作是国民经济建设的一项基础工作，是水利、水文事业的重要组成部分。地下水位监测的准确性是对地下水资源进行评价和开发利用的基础依据，对地下水动态进行长期监测是科学管理地下水资源的重要基础工作^[1]。地下水监测设备体系是复杂精密的综合系统，旨在实时准确获取地下水信息，为其开发、保护和管理提供科学依据。该体系由多部分协同构成，涵盖数据采集、传输、处理及终端展示全过程，数据采集层含多种直接接触地下水的传感器，是获取一手数据的关键；数据传输设备负责将数据及时稳定发送至处理中心；数据处理中心由服务器、处理软件等组成，对原始数据进行筛选、校验、分析和存储，转化为有价值信息；供电设备提供持续电力支持，辅助设备保护监测设备免受环境破坏以延长寿命。

（二）运维成本构成要素深度剖析

地下水监测设备的运维成本是一个多维度的总和，涵盖了多个方面的支出，每一项要素都对整体成本有着重要的影响^[2]。人工成本在运维成本中占据较大比重，包括定期巡检人员的薪酬，设备故障维修人员的费用，还有数据处理与分析人员的工资。设备更换与维修成本也是不可或缺的一部分，传感器、传输模块、供电设备等部件都有一定的使用寿命，达到使用年限后需要进行更换，这就产生了设备购置费用；在设备运行过程中，难免会出现零部件损坏等情况，需要进行维修和更换，由此产生维修材料费用和维修工时费用^[3]。能源成本主要体现在为设备提供电力的过程中，对于采用太阳能供电的设备，太阳能电板的维护和更换会产生一定费用；而对于使用市电的设备，则需要支付相应的电费；蓄电池作为备用能源，其定期更换也会增加能源成本。通信成本是确保数据能够顺利传输的必要支出，使用无线传输方式时，需要向通信运营商支付数据流量费用或套餐费用；对于一些特殊区域采用的卫星传输等方式，其通信费用相对更高。其他成本还包括设备的定期校准费用，以保证监测数据的准确性；设备保护设施的维护费用，如保护井的修缮、设备箱的更换等；以及相关的管理费用，如运维方案的制定、人员培训等费用。

（三）运维成本的主要特征

地下水监测设备运维成本具有多方面显著的特征，这些特征与设备的运行环境、自身特性以及运维工作的要求密切相关^[4]。成本的持续性是其首要特征，地下水监测是一项长期的工作，只要设备在运行，就需要持续投入运维成本，这种持续性贯穿于设备的整个使用寿命周期。成本的不确定性较为突出，设备运行环境复杂多变，如极端天气、地质灾害等不可抗力因素，可能导致设备损坏的概率增加，从而使维修和更换成本大幅上升；通信费用、能源价格等市场因素的波动，也会使运维成本出现不确定性。成本与设备性能的关联性较强，高性能的设备通常具有更高的稳定性和更长的使用寿命，能够减少故障发生的频率，从而降低维修和更换成本；但高性能设备的购置成本和初期运维成本可能相对较高，而性能较差的设备则可能在后期运维中产生较高的

费用^[5]。区域差异性明显，不同地区的地质条件、气候环境、通信基础设施等存在较大差异，导致运维成本各不相同。规模效应特征也有所体现，当监测设备的数量达到一定规模时，在设备采购、人员培训、运维方案制定等方面能够形成规模效应，降低单位设备的运维成本。

二、基于全生命周期的运维成本核算模型构建

（一）全生命周期成本理论概述

全生命周期成本理论是贯穿产品或系统从规划到报废处置全过程的成本管理理论，强调综合考量全周期所有相关成本，而非局限于某一阶段^[6]。在地下水监测设备领域，该理论要求将设备选型采购、运行维护、更换及报废处理等各阶段成本纳入核算。其核心是通过分析和优化全生命周期成本，实现资源最优配置，以最低总成本保障设备有效运行。该理论打破传统成本管理局限，能全面反映设备真实成本消耗，为设备选型、运维策略制定及长期成本规划提供科学依据，例如选型时需综合考虑购置价、运行能耗、维护成本及寿命等，选择全生命周期成本最低的设备。

（二）运维成本核算模型框架设计

基于全生命周期成本理论，地下水监测设备运维成本核算模型框架围绕运维阶段成本展开，兼顾与其他生命周期阶段的关联，以实现全面准确核算。成本要素识别层为基础，识别人工、设备更换维修、能源、通信等所有运维成本要素。数据采集与处理层收集相关数据并进行整理、校验和标准化，为核算提供可靠支持。成本核算层作为核心，运用合适方法计算各项运维成本^[7]。成本分析与输出层分析核算结果并以直观形式输出，辅助决策。此外，框架考虑与设备全生命周期其他阶段的接口，保证核算连贯性和完整性。

（三）成本核算模型的具体实现

成本核算模型的具体实现需结合实际业务流程和数据情况，通过系列步骤将框架转化为可操作的核算系统。成本要素量化方面，为各项成本要素确定量化指标和计算方法，如人工成本、车辆成本、通行油耗成本、施工材料成本等，设备更换成本按“购置价格 ÷ 更换周期”得年均值^[8]。搭建数据支撑体系，建立数据库存储各类成本数据，制定采集规范和流程，明确责任主体，还可借助物联网等技术自动采集数据，提升效率与准确性。设计核算公式与算法，如总成本为各成本要素之和，对不确定性成本采用概率统计估算。最后进行模型验证与优化，将计算结果与实际成本对比，若有偏差则调整优化，使模型更贴合实际。

三、传统运维管理模式诊断与创新模式设计

（一）传统运维管理模式及其弊端分析

传统地下水监测设备运维管理模式以人工为主导，采用分散化、经验化管理。巡检依赖人工定期现场进行，周期固定，难以设备实际状况灵活调整；数据收集处理靠人工记录整理，效率

低且易出错或遗漏^[9]。管理架构上,存在部门分割、权责不清问题,不同部门负责不同设备运维,缺乏有效沟通协作,资源无法优化配置,重复劳动和浪费突出,如同一区域不同监测点由不同部门巡检,浪费人力时间。成本控制方面,因缺乏科学核算和监控机制,难精准管理运维成本,往往只关注购置、维修等直接成本,忽略人工、通信、能源等间接成本,导致总成本高;且对设备故障预测不足,多为事后维修,增加成本还可能影响监测数据连续性。此外,该模式对运维人员专业素质依赖高,人员流动或技能不足会影响工作质量效率;且缺乏有效监督评估机制,难客观评价运维效果,部分工作流于形式,无法确保设备稳定运行。

(二) 管理模式创新的总体思路与目标

管理模式创新以提升地下水监测设备运维效率和质量为核心,结合现代信息技术与管理理念,打破传统局限,构建科学、高效、经济、智能的运维管理体系^[10]。思路,要从被动运维转向主动运维,引入先进技术掌握设备状态、提前处理故障;打破部门壁垒,加强协同以整合共享资源;建立全生命周期成本管理理念,精细化核算控制成本;注重人才培养和技术创新,提升人员素质与技术水平。创新目标包括:提高运维效率,优化流程、采用智能手段缩短故障处理时间,提升巡检维护效率;提升监测数据质量,确保数据准确、完整、连续,为决策提供可靠依据;降低运维成本,通过科学核算和资源优化,在保证质量前提下减少支出;增强设备运行稳定性和可靠性,减少故障、延长寿命;实现运维管理规范化和标准化,建立完善制度流程,提高管理科学性和有效性。

(三) “智慧化、社会化、集约化”三位一体管理模式创新

“智慧化、社会化、集约化”三位一体管理模式是在传统模式基础上,结合现代管理思想和技术发展形成的创新模式,三者相互支撑、协同作用,共同提升地下水监测设备运维管理水平。智慧化是该模式的技术核心,主要通过引入物联网、大数据、人

工智能等先进技术,实现对设备运行状态的实时监测和智能分析。利用物联网技术将各类传感器与监测设备相连,实时采集设备的运行参数、环境数据等信息,并通过无线网络传输到数据中心。大数据分析平台对收集到的数据进行深入挖掘和分析,识别设备的运行规律和潜在故障风险,实现故障的提前预警。人工智能技术则可以辅助制定最优的巡检和维护方案,根据设备的实际状况自动调整巡检周期和维护内容,提高运维的精准性和效率。在人员管理上,对运维人员进行统一培训和调度,根据不同地区的运维需求合理分配人力资源,避免人员闲置或短缺。“智慧化、社会化、集约化”三位一体管理模式通过技术赋能、资源拓展和资源整合,形成了一个高效、协同、经济的运维管理体系,能够有效解决传统运维管理模式存在的弊端,为地下水监测设备的稳定运行提供有力保障。

四、结束语

本文围绕地下水监测设备运维成本核算与管理模式创新展开了系统研究,通过对地下水监测设备体系的梳理,明确了运维成本的构成要素及特征,基于全生命周期成本理论构建了运维成本核算模型,并针对传统管理模式的弊端提出了“智慧化、社会化、集约化”三位一体的创新管理模式。研究表明,科学的成本核算与创新的管理模式相结合,能够有效提升地下水监测设备的运维效率、降低运维成本,保障设备稳定运行和监测数据质量。然而地下水监测环境复杂多变,不同地区的实际情况存在差异,相关模型和模式在具体应用中还需根据实际需求进行调整优化。未来可进一步结合更多实际案例,对核算模型和管理模式进行验证与完善,探索更具适应性和操作性的实施方案,为推动地下水监测事业的可持续发展提供更坚实的支撑。

参考文献

- [1]王捷音,李岩,丁福敬.菏泽市国家地下水监测工程运行维护措施[J].山东水利,2020,(07):47-48.DOI:10.16114/j.cnki.sdsl.2020.07.022.
- [2]陈梅,沈晓娟,杨翠翠等.浅议地下水自动监测站的维护与管理[C]//全国水文监测新技术应用学术研讨会论文集.2015:384-387.
- [3]蒋镇涛.贵州省地下水监测站网运行维护实践探讨[J].地下水,2022,44(6):85-86,135.DOI:10.19807/j.cnki.DXS.2022-06-027.
- [4]任妹娟,张磊,庞丽丽等.基于C/S模式的地下水监测信息管理系统开发[J].中国水利,2018,(15):63-64.DOI:10.3969/j.issn.1000-1123.2018.15.019.
- [5]杨春生,英爱文.国家地下水监测工程自动监测仪器的质量控制和运行维护[J].地下水,2020,42(6):51-53.DOI:10.19807/j.cnki.DXS.2020-06-017.
- [6]李洋,周盈,鄂建等.浅谈江苏省自动化水位监测站点的运行与维护[J].地下水,2022,44(4):62-64.DOI:10.19807/j.cnki.DXS.2022-04-019.
- [7]侯智瀚.地下水位监测设备运行现状及对策探讨[J].山西水利,2013,(9):13-14.
- [8]朱珊珊,钱健,成宣宇等.地下水监测设备常见故障及成因分析[J].水利信息化,2021,(3):66-69,85.DOI:10.19364/j.1674-9405.2021.03.014.
- [9]云霏.地下水监测设施设备及运行维护探析[J].内蒙古水利,2024,(11):52-53.
- [10]王燕河,赵倩,马河宽.济南市地下水监测体系构建与应用[J].电大理工,2023,(02):7-11.DOI:10.19469/j.cnki.1003-3297.2023.02.0007.

基于物联网与智能控制技术的压风机房无人值守系统研究

赵立龙

靖煤集团景泰煤业有限公司白岩子煤矿，甘肃 白银 730400

DOI:10.61369/ME.2025050005

摘 要： 针对传统压风机人工值守存在的效率低、能耗高、运维成本大等问题，本论文提出一种基于物联网与智能控制技术的压风机无人值守系统解决方案。通过构建多层次系统架构，融合传感器技术、边缘计算与云计算平台，实现压风机运行参数实时采集、智能调节、故障预警等功能。经实际应用测试，该系统有效降低人工干预频率，提升设备运行稳定性与能源利用效率，为工矿领域压风机智能化升级提供理论与实践参考。

关 键 词： 压风机；物联网；智能控制；无人值守；故障诊断

Research on Unattended Compressor System Based on Internet of Things and Intelligent Control

Zhao Lilong

Baiyanzi Mine, Jingtai Coal Industry Co., Ltd., Jingmei Group, Baiyin, Gansu 730400

Abstract： Aiming at the problems of low efficiency, high energy consumption, and high operation and maintenance costs in the traditional manual attendance mode of compressors, this thesis proposes a solution for an unattended compressor system based on Internet of Things (IoT) and intelligent control technologies. By constructing a multi-level system architecture that integrates sensor technology, edge computing, and cloud platforms, functions such as real-time parameter collection, intelligent adjustment, and fault early warning for compressors are realized. Practical application tests show that the system effectively reduces the frequency of manual intervention, improves equipment operation stability and energy efficiency, providing theoretical and practical references for the intelligent upgrading of compressors in industrial and mining fields.

Keywords： air compressor; internet of things (IoT); intelligent control; unattended compressor system; fault early warning;

引言

在煤矿生产中，压风机作为提供压缩空气动力的核心设备，传统压风机运行依赖人工巡检与手动调节，存在响应滞后、操作误差、人力成本高等问题。随着物联网、大数据、人工智能等技术的发展，压风机无人值守成为行业发展趋势。实现无人值守不仅能减少人为因素导致的设备故障，还能通过智能调控降低能耗，提升煤矿生产的智能化水平。本文通过设计并验证一套完整的无人值守系统，探索压风机智能化管理的有效路径。

一、压风机房无人值守系统的关键技术

（一）物联网技术

物联网可以有效地解决现有设备之间存在的“信息孤岛”问题，使设备之间能够进行互联和协同运行。在煤矿机电设备智能化的过程中，各个设备已经不是单独工作了，它们已经被集成了

一个智能系统，可以相互协作，共同完成任务。移动终端可以实时地进行数据分享与工作协作，达到高效的资源配置与提升运营效率。这种协作方式提高了企业的生产效率，成为企业实现能源节约、减排和安全的关键。通过物联网，专家可以通过网络远程获取设备的实时信息，并进行实时监测与分析，当发现异常状况或装置失效时，将自动启动预警机制，形成深度分析报告，帮助

运维人员快速找到问题所在，并制定有针对性的对策。这种远程监测和故障诊断的能力提高了维修的效率和精度，有效减少因设备失效而造成的停机风险。

（二）工业自动化与变频技术

工业自动化与变频技术是现代工矿企业生产的核心组成部分，两者紧密结合，显著提升了生产效率、节能降耗和智能化水平。工业自动化与变频技术的融合，在技术维度上有以下特点：驱动控制优化：变频技术通过精准调节电机转速，实现了空压机运行过程中的柔性控制（可根据设定的供气压力值，自动控制卸荷或加载；空气压缩机采用变频调速控制且实现通过自动倒机调节空压机风压）。节能降耗：

工业自动化系统通过传感器实时采集负载数据，联动变频器调整电机功率（如空压机“按需供能”）。设备监控与诊断：压力容器配备温度传感器，具备温度监控功能，对温度超限进行预警等；实现高、低压配电柜远程分合闸控制、故障复位、状态监控等，变频技术内置故障检测功能（如过流、过热保护），接入工业自动化监控系统（SCADA）实现远程预警，使其具备无人值守功能。系统集成：变频器通过 Modbus、EtherCAT 等工业总线协议，与 PLC、工业机器人等自动化设备互联，构建全流程智能控制系统。

（三）人工智能技术

人工智能通过对生产过程中的实时信息进行分析，可以对生产过程中的各种工况进行自动调节，保证生产过程中一直处于最优的工作状况，不断地获得最优的性能。这种智能化的控制方法提高装置的运行效率，达到节约能源、减少排放的目的。利用智能辅助决策体系，提出设备运行的最优方案，帮助企业实现精细化的管理，提升企业的运行效率和利润。在设备失效预报和预警体系建设过程中，人工智能利用先进的计算模式，通过对设备的各种信息进行深度挖掘，实现对潜在失效的准确辨识与预报，实现早期预警，提高装置的预防维修效率。利用数据分析技术实现的失效预报和预警体系，提高装置的工作可靠性和安全性能，降低维修费用，提高设备的使用年限，具有重要的经济效益和长期价值。将人工智能技术引入到矿井中，为矿井的安全生产提供了一个智能化的管理体系。通过智能化的安全监测体系，可以实现对生产过程中的安全状况进行连续、实时监测，快速识别和处理存在的安全隐患和问题，保证企业的正常运转和安全保护。这种智能的设计，防止了意外事件的发生，在增强员工的安全意识，保护员工的生命和财产安全中扮演着重要的角色^[1]。

二、压风机房无人值守系统智能化改造的实践案例

在白岩子煤矿增加一套压风机房智能化改造系统：实现数据采集、运行监测功能；实现空压机房、配电室视频图像监视、视频联动功能；实现空压机房主要通道门禁控制功能；通过自动化集中控制，实现压风机运行无人值守功能。

（一）PLC 集控柜

现场增加或升级 PLC 集控柜实现空压机和制氮机的远程控制功

能，以及现场电动阀门的控制，同时通过与空压机的通信采集空压机运行参数，故障信息等传至远程集控平台。PLC 集控柜通过接口模块，采集电机的电压、电流、故障、状态及温度等信息。PLC 集控柜通过通信协议采集风机开关的运行状态参数和报警信息，并通过 PLC 输出点实现对空压机开关的启停运行控制。PLC 通过配置模拟量输入接口，采集空压机电机的振动、轴承和绕组温度等参数。当系统出现故障或需要应急警告时，通过声光报警器进行报警。

（二）变频控制

空压机机房内配置五套 10KV/315KW 的高压变频柜，实现空压机的变频启动和运行。

（三）电力系统

高压配电开关柜开关均需实现远程及就地合分闸、故障复位、联络柜远程就地切换，并能采集显示记录配电回路电压、电流、电量、开关状态等信息。故障时具备声光报警等功能，且配合综合管控平台厂家完成集控室平台控制及监视。

（四）传感器

增加现场设备运行监测传感器（振动传感器、温度传感器、流量传感器等），统一接入压风机 PLC 控制柜。

（五）轴流风机

现场机房布有轴流风机，需对机房内的轴流风机进行温度控制。支持就地控制，远程启停机。

（六）风包部分

增加风包温度、压力传感器；改造排污、泄压等阀门为电动阀门，实现风包自动监测；超温或超压时具备声光报警功能，且将报警信息传至集控平台，并在平台报警模块中显示，并能够远程仿真试验风包的超温故障、过压故障等。

（七）供风管路部分

压风机出口阀门和管路阀门均更换为电动阀门，电动阀门均采用 4-20mA 或 RS485 通讯信号接入阀门控制柜，可通过 PLC 控制柜触摸屏、远程集控平台或系统自动运行模式下控制。

（八）远程监控部分

压风机远程控制系统，能够实现压风机远程控制，根据需风量自动开停压风机，软件平台提供完善的身份、权限和操作验证管理的手段来保障系统的安全。支持用户按照分组进行管理，分组可指定名称、描述、密码和权限；支持根据不同的安全级别指定用户具有的操作权限，权限类别由开发人员根据生产要求自定义创建权限组。

（九）安全保护部分

门禁功能，非持卡工作人员无法进入压风机房工作区域，若想要进入工作区域可以通过门禁装置上的远程通话按钮呼叫远程人员进行通话，此时可以通过控制器摄像头进行人员身份识别，远程监控人员可以远程操作开启门禁使其进入（人脸识别、刷卡识别、密码开启和授权开启）。

对压风机房内的重要地区部分安装视频监控进行实时监控，如果发生紧急情况，远程监控人员可以及时通过监控画面了解现场情况^[2]。

三、压风机房无人值守系统智能化改造的能效提升策略

（一）优化设备运行参数

压风机房无人值守系统可以对设备的工作状况及操作参数进行实时监控，并据此对设备进行微调。1.可以监控压风机排气压力、排气温、管道流量、管内压力等参数并将数据实时传输到调度计算机监控中心，并提供以上数据的历史数据查询、报警信息查询及报表打印功能；2.可以提供电机电压、电机电流、电动机功率、压风机运行状态等主要监测数据的报表打印功能；3.能绘制各参数随时间变化曲线，如电机电压、电机电流、电机功率、压风机出口压力等时间曲线；4.能在线显示压风机风量曲线、压力曲线、温度曲线等，以观察它们的变化趋势；实时显示、记录所监测的各个温度、压力值绘制曲线，并提供历史数据查询；5.监测参数和技术指标：三相电流、三相电压、有功功率、无功功率、有功电量、无功电量、功率因数、频率等参数，并根据各个参数的实际情况具有报警、超高报警、延时停机等功能；6.显示系统的实时报警信息，实时报警打印，并提供历史报警信息查询；以上所有的数据监测都为设备的运行参数设定提供了可靠的参考依据^[3]。

（二）实现设备的智能控制

在煤矿企业，将先进的控制算法与辅助决策系统相结合，使智能化程度得到提高，保证了煤矿企业运行的高效与安全，为工业可持续发展打下技术基础。利用人工智能，建立了一套具有较强自主知识产权的智能控制体系。系统可对监测数据进行实时分析，精确地预估工作状况，并据此进行智能管理与优化。通过物联网的运用，可以有效地将各种终端连接起来，使得不同的终端可以一起工作，一起完成各自的工作，达到更好的资源配置与使用效率。通过这种智能控制方式，可以有效提高生产过程中的工作效能与稳定度，对于节能减排具有重要意义。通过使装置处于最优工作条件，可以很好地控制不需要的能量消耗，使由于工艺问题造成的生产中断现象降低，提高煤矿工业的经济效益。

（三）加强设备的维护与保养

利用智能科学技术，可以对设备的工作状况和维护要求进行

实时监测，可以及时发现设备的各种缺陷和隐患。这种方法可以在系统出现重大错误前，进行检测和处理。研究成果为解决由于设备失效造成的生产过程无法正常进行的问题，提高总体产能及设备工作的可靠性。传感器是智能控制的重要组成部分，可以对部件的振动、温度等重要性能指标进行在线检测，保证整个系统的工作效率。如果这些参数出现不正常的改变，就有可能是装置的隐患，需要立即进行检修。大数据是设备运营中的关键环节，可以对设备的历史数据进行采集与分析，准确地预估设备的使用寿命和维护要求，为设备的检修和检修工作提供参考。新型的智能化维修与维护方法，可提高设备使用寿命，减少维护费用，为煤矿企业长远发展提供可靠支撑。

（四）推广使用新能源和节能设备

在加快推进矿井机电设备的智能化改造过程中，必须充分关注和推动新能源和节能设备的推广和应用，对保障煤矿长远发展有着重要的作用。将太阳能、风能等可再生资源应用于矿井作业，可以减少对常规矿物资源的依赖，降低二氧化碳的排放量，有利于环保。采用高性能的电动机和变频调速装置，实现对能耗的本质控制，提高能量利用效率。新型能量与节能设备的集成，极大地改善煤矿工业的能量供应结构，对提高煤矿企业的生产效率、减少运行费用具有重要作用。要继续强化新能源与节能设备的研究与推广，使煤矿工业走上绿色高效的发展之路^[4]。

四、结语

随着矿山自动化、网络化、信息化建设的不断推进，白岩子煤矿对压风机房进行无人值守智能控制系统的设计与应用研究。通过以 PLC 控制为核心，以物联网技术为基础，以变频控制为辅助的设计与应用，能有效实现多台空压机的按频率、按需启动，可实现多台压风机的自动运行，自动倒机，实现自动调节，闭环控制。保证了井下用气的安全稳定。据统计改造无人值守智能压风机后可节约电能约 20%，减少压风机房值守人员 4 名，间接或直接的降低白岩子煤矿压风机房的费用^[5]。

参考文献

- [1] 槐利，谭一川，程玉龙. 基于 PLC 的煤矿压风机自动控制系统 [J]. 工矿自动化. 2012, 38(04): 13-16.
- [2] 杨振东. 基于信息化和智能化的煤矿机电设备故障诊断与预测分析 [J]. 信息系统工程. 2024, (11): 72-75.
- [3] 闫焦. 煤矿地面压风机无人值守智能控制系统的设计与应用 [J]. 自动化应用. 2024, 65(11): 96-98+101.
- [4] 杨如坤. 煤矿压风机远程自动控制系统的设计 [J]. 机械管理开发. 2022, 37(11): 255-257.
- [5] 吕瑞腾，查守华. 基于 PLC 的煤矿压风机自动控制系统研究与应用 [J]. 山东工业技术. 2017(17): 90.

火电厂边缘计算实时数据采集与分析平台

马战南, 张宝宏, 侯伟

国能山西河曲发电有限公司, 山西 忻州 036500

DOI:10.61369/ME.2025050007

摘 要 : 火电厂作为能源系统核心单元, 其运行效率与智能化水平直接影响国家能源战略实施。传统集中式架构在数据传输延迟、处理能力及实时性方面存在显著局限, 难以满足新型电力系统对海量实时数据的响应需求。本文提出基于边缘计算的火电厂实时数据采集与分析平台, 通过 "边缘采集—云端调度—本地控制" 三层架构, 实现数据本地化处理与云端协同优化。研究采用多源异构传感器网络与分层冗余传输设计, 结合 IEEE 1588v2 时间同步协议与前向纠错编码机制, 确保数据采集的时空精度与传输可靠性。硬件层面构建模块化边缘计算终端, 集成 FPGA 预处理单元与嵌入式分析平台, 支持毫秒级响应的本地化数据处理。实验结果表明, 该架构使控制响应时间缩短 40% 以上, 数据丢包率控制在 0.1% 以下, 显著提升系统实时性与可靠性。

关 键 词 : 火电厂; 边缘计算; 实时数据采集; 数据分析平台; 预测性维护

Real-Time Data Acquisition and Analysis Platform for Edge Computing in Thermal Power Plant

Ma Zhennan, Zhang Baohong, Hou Wei

Guoteng Shanxi Hequ Power Generation Co., LTD. Xinzhou, Shanxi 036500

Abstract : As the core component of the energy system, the operational efficiency and intelligentization level of thermal power plants directly affect the implementation of national energy strategies. The traditional centralized architecture has significant limitations in data transmission latency, processing capacity, and real-time performance, making it difficult to meet the response requirements of massive real-time data in the new power system. This paper proposes a real-time data acquisition and analysis platform for thermal power plants based on edge computing. Through a three-tier architecture of "edge collection, cloud-based scheduling, and local control", the platform achieves localized data processing and cloud-based collaborative optimization. The study employs a multi-source heterogeneous sensor network with hierarchical redundant transmission design, integrated with IEEE 1588v2 time synchronization protocol and forward error correction (FEC) coding mechanism, ensuring spatiotemporal accuracy and transmission reliability in data acquisition. The hardware architecture incorporates modular edge computing terminals integrating FPGA preprocessing units with embedded analysis platforms, enabling millisecond-level localized data processing. Experimental results demonstrate that this configuration reduces control response time by over 40% while maintaining a packet loss rate below 0.1%, significantly enhancing system real-time performance and operational reliability.

Keywords : thermal power plants; edge computing; real-time data acquisition; data analytics platform; predictive maintenance

引言

火电厂作为电力系统的核心单元, 其运行效率、安全性和智能化水平直接影响国家能源战略的实施。在传统模式下, 火电厂数据采集与分析依赖于集中式架构, 存在数据传输延迟高、处理能力不足、实时性差等突出问题。随着新型电力系统建设的推进, 海量实时数据的产生对火电厂监测与控制系统的响应速度提出了更高要求。在此背景下, 边缘计算技术因其低延迟、高带宽、本地化处理等特性, 为火电厂实时数据采集与分析提供了新的解决方案。

一、火电厂边缘计算实时数据采集方案设计

（一）数据采集模块设计

火电厂边缘计算实时数据采集模块的设计需兼顾传感器部署的全面性、数据传输的实时性及边缘计算终端的高效处理能力。在传感器布置方面，采用多源异构传感器网络架构，覆盖锅炉、汽轮机、发电机等核心设备的关键参数监测点。传感器节点根据监测目标的物理特性选择不同的传感类型，例如温度传感器采用高精度热电偶实现锅炉壁面温度的连续监测，振动传感器则通过加速度计采集汽轮机轴承箱的振动频谱特征。为确保数据采集的时空同步性，所有传感器均配置时间戳生成模块，并通过 IEEE 1588v2 协议实现微秒级时间同步。

数据传输通道设计遵循分层冗余原则，物理层采用光纤以太网与工业无线 Mesh 网络的混合架构。光纤链路用于连接关键设备的高带宽传感器节点，其传输速率可达 1Gbps 且支持全双工通信，确保实时数据流的无损传输；无线网络则采用 TDMA 时隙调度机制，通过动态调整信道带宽与发射功率实现低延迟数据包传输，有效降低多径干扰对边缘节点间通信的影响。为应对复杂工业环境中的电磁干扰问题，传输协议层引入前向纠错编码（FEC）与自动重传请求（ARQ）机制，使数据丢包率控制在 0.1% 以下^{[3][4]}。

（二）边缘计算节点设计

边缘计算节点作为火电厂实时数据采集与分析平台的核心单元，其设计需兼顾计算能力、存储容量及通信效能，以满足工业场景下高并发、低延迟的实时处理需求。在硬件架构层面，节点通常采用工业级嵌入式计算设备作为基础载体，集成多核处理器与专用协处理器以支持实时数据处理任务。根据工业现场需求分析，边缘节点需具备对 PLC、传感器等设备数据的实时采集能力，例如通过工业网关在 S7-1200 PLC 中同步获取温度、湿度等模拟量数据，并配置组网模式与 IP 地址实现网络接入。此类设计通过硬件资源的合理配置，既保证了数据采集的实时性，又为边缘计算算法提供了算力支撑。在存储方面，节点采用分布式存储架构与本地缓存技术，结合非易失性存储介质实现关键数据的快速读写与持久化保存，有效应对工业环境中的断电、网络波动等突发情况^[5]。

软件架构设计则需围绕数据预处理、协议转换与边缘智能分析展开。节点内部部署嵌入式数据滤波算法与时频域特征提取模块，通过实时消除噪声干扰并提取设备运行特征参数，可显著降低无效数据传输量。例如，针对火电厂锅炉温度、压力等关键参数，边缘节点采用基于时频分析的异常检测算法，在数据源头完成初步判断，仅将异常数据或统计结果上传至云端。这种设计模式既降低了云平台的计算负载，又通过减少冗余数据传输实现了网络带宽的优化利用。此外，边缘节点软件层还集成容器化技术，如基于 Docker 构建的虚拟化服务模型，能够灵活部署轻量化应用与服务组件。通过 Python 语言开发的边缘计算服务，可动态分配计算资源，支持图像处理、状态识别等多样化功能的快速实现，例如在电力网关中准确获取接地刀具的坐标位置与旋转角度

参数。

动态功耗调节机制：根据负载自动切换工作模式（正常 / 节能 / 高性能）

$$P_{avg}=Tl[0T[k\cdot f3(t)+Pstatic]dt$$

其中 k 为动态系数，f 为实时频率，PstaticP 为静态功耗。

二、火电厂实时数据分析平台构建

（一）数据分析平台架构设计

火电厂实时数据分析平台的架构设计以边缘计算为核心，采用分层解耦的体系结构，通过模块化设计实现数据采集、处理、分析与应用的全流程协同。整体架构分为感知层、边缘层、云平台层和应用层，其中数据处理层与分析层主要部署于边缘层与云平台层，通过实时流处理与分布式计算技术支撑高并发、低延迟的分析需求。数据处理层包含数据清洗、特征提取与流式计算三个子模块，负责对来自传感器、DCS 系统及 SCADA 系统的多源异构数据进行实时预处理^[7]。在数据清洗阶段，采用基于滑动窗口的异常值检测算法，结合统计学阈值与动态模型预测方法，消除噪声数据并校正传感器漂移误差。特征提取模块通过时频分析与小波变换等技术，从原始时序数据中提取设备运行状态的关键特征参数，为后续分析提供结构化数据支撑^[6]。流式计算引擎选用 Apache Flink 框架，实现基于事件时间窗口的实时聚合与计算，支持微秒级延迟的数据流转。

（二）数据预处理与清洗

在火电厂实时数据分析平台的构建过程中，数据预处理与清洗是保障数据质量与分析可靠性的核心环节。针对发电机组运行过程中产生的多源异构实时数据，需通过系统化的预处理流程消除噪声干扰、修正异常值并完善数据完整性。首先，数据采集系统获取的原始数据包含传感器噪声、通信干扰及设备故障导致的异常信号，需通过滤波算法进行初步筛选。针对温度、压力等连续传感器数据，采用滑动窗口均值滤波或卡尔曼滤波技术，有效抑制随机噪声对数据特征的干扰。对于振动、位移等高频信号，则结合小波变换实现多尺度分解与重构，分离有效成分与噪声成分^{[8][9]}。其次，缺失值处理需根据数据缺失模式选择恰当的插补策略，对随机缺失的工况参数采用线性插值或时间序列预测模型补全，对系统性缺失的异常数据段则通过邻域样本均值或相似机组数据进行关联推断。在异常值检测环节，基于统计学的 Z-score 方法与机器学习的孤立森林算法相结合，建立多维度异常判定模型。

三、实验与分析

（一）实验环境与数据集

本实验构建了覆盖火电厂关键设备的边缘计算实时数据采集与分析实验平台，采用分层架构设计。硬件环境配置了基于工业级边缘节点的分布式系统，包含 12 个部署在汽轮机、锅炉等核心区域的工业物联网网关，配备 Intel Core i7 处理器、16GB 内存及 512GB SSD 存储。各网关通过千兆以太网与主控中心的边缘服务

器（搭载 2×24 核 CPU、256GB 内存、4TB RAID 存储）构成星型网络拓扑，确保数据传输带宽稳定在 900Mbps 以上^[10]。软件层采用 Kubernetes 容器编排系统实现边缘节点的动态资源调度，集成 Python 3.8 开发环境与实时数据处理框架 Apache Flink，部署了基于 TensorFlow Lite 的轻量化机器学习推理模块。所有设备均通过 Modbus RTU 协议与现场 400 余台温度、压力、振动传感器及 DCS 系统实现数据交互，确保采集周期控制在 100ms 以内。

（二）实验方法与步骤

本实验采用分层递进的验证方法，围绕火电厂实际运行环境开展系统部署与性能验证。实验平台采用“边缘节点-云端协同”架构，在某燃煤发电厂汽轮机发电机组现场部署 6 个边缘计算节点，节点硬件配置为 Intel Core i7 处理器、16GB 内存及固态硬盘，操作系统采用 Ubuntu 20.04 LTS。数据采集层配置 32 个工业传感器，包括温度传感器（型号 PT100）、压力变送器（HART 协议）、振动监测仪（IEPE 标准）等，采样频率统一设置为 100Hz 以满足实时性要求。边缘节点通过工业以太网与传感器阵列形成星型拓扑，网络传输层采用 OPC UA over TLS 1.2 协议确保数据安全。

系统部署流程遵循三阶段实施策略：首先进行硬件安装调试，包括传感器校准与节点散热优化；其次配置边缘计算环境，部署 Docker 容器实现应用程序隔离，安装 Python 3.8 开发环境及实时数据分析库（Pandas、NumPy）；最后构建数据管道，利

用 Apache Kafka 实现实时数据流处理，通过 Flask 框架搭建本地 Web 服务接口用于数据可视化。

四、结论

本研究针对火电厂工业物联网环境下的实时数据采集与分析需求，提出了一种基于边缘计算架构的平台设计与实现方案。通过构建分布式边缘节点与云中心协同的混合计算模式，有效解决了传统集中式架构在数据传输时延、带宽占用及实时性保障方面的瓶颈问题。研究团队在平台功能模块划分、数据流处理机制、边缘智能算法部署等方面开展了系统性探索，形成了以下主要研究成果：首先，设计了分层异构的边缘计算架构，将数据预处理、特征提取等计算任务下沉至靠近数据源的边缘节点，结合轻量化机器学习模型实现关键参数的实时分析与异常检测。实验数据显示，该架构将数据处理端到端延迟降低至 200ms 以内，较传统方案提升 3-5 倍。其次，研发了面向火电厂多源异构设备的协议解析与标准化接口，通过 OPC UA、Modbus 等工业协议的动态适配，成功实现了锅炉、汽轮机、发电机等关键设备的传感器数据毫秒级采集与标准化存储。针对火电厂环境噪声干扰强、数据波动大的特点，提出了基于滑动窗口的动态滤波算法，数据采样准确率提升至 99.2% 以上。

参考文献

- [1] 成佳慧. 基于物联网技术的火电厂高频电源智能监测系统研究 [D]. 南京信息工程大学, 2012.
- [2] 杜赢. 基于物联网的火电厂设备实时监测系统设计 [J]. 自动化应用, 2025, 66(03): 201-203.
- [3] 蔡俊龙. 基于边缘计算的某大型火电厂机组运行安全在线监测方法 [J]. 机电技术, 2024, (06): 79-82+120.
- [4] 朱伟. 基于移动边缘计算的火电厂分散控制系统改造 [J]. 电气时代, 2024, (02): 84-87.
- [5] 刘晓东, 黄生文. 基于边缘计算的火力发电厂振动专家系统研究与应用 [J]. 机电信息, 2021, (30): 5-7.
- [6] 赵博石, 赵俊杰, 朱振武, 李磊. 边缘计算在智慧火力发电厂中的应用 [J]. 集成电路应用, 2021, 38(06): 140-141.
- [7] 邢健. 基于云计算的火电厂电气二次设备状态监测方法 [J]. 电气技术与经济, 2024, (06): 147-149.
- [8] 张继伟. 基于边缘计算的输电线路监测物联网多路数据协同采集方法 [J]. 微型电脑应用 2024 10.3969/j.issn.1007-757X.2024.09.008
- [9] 龚广京, 周光, 郑涛, 陈时熠. 基于线性回归与 BP 神经网络的火电厂燃煤碳排放计算研究 [J]. 热能动力工程, 2024, 39(03): 73-81.
- [10] 孙娜, 张勤, 吴娜, 谷薇. 改进火电厂锅炉热效率反平衡计算研究 [J]. 节能, 2023, 42(11): 14-17.

深度学习驱动的污水处理厂出水水质预测与工艺优化

程果

湖北省工程咨询股份有限公司, 湖北 武汉 430000

DOI:10.61369/ME.2025050009

摘 要： 伴随城市化不断推进以及工业废水排放数量的攀升，污水处理厂遭遇了提高出水水质以及运行效率这两重难题。以往的水质预测手段在应对繁杂的非线性数据时，存在精准度欠佳、及时性不够等状况，难以契合现代污水处理精细化的要求。深度学习作为一种高效率的数据处理手段，能够自行探寻数据里的复杂特性以及潜藏规律，给污水处理厂出水水质的预测及工艺的优化提供了全新的解决办法。本文就深度学习在污水处理这一领域的运用展开研究，首先剖析它在提升预测精准程度、探寻工艺内在联系、优化资源分配以及强化水质安全等方面的关键价值；紧接着探究深度学习目前在污水处理厂当中的应用实际情况，涵盖数据驱动的建模、多源数据的融合、实时的优化管控以及与传统工艺相结合的情形；最后从模型架构、数据管理、控制算法以及人机协作等多个方面提出具有针对性的优化举措，目的在于为污水处理厂达成智能化的升级以及可持续发展给予理论层面的支撑与实践方面的参考。

关 键 词： 深度学习；污水处理厂；出水水质预测

Deep Learning-Driven Prediction of Effluent Quality and Process Optimization in Wastewater Treatment Plants

Cheng Guo

Hubei Engineering Consulting Co., LTD, Wuhan, Hubei 430000

Abstract： With the continuous advancement of urbanization and the increasing volume of industrial wastewater discharge, sewage treatment plants have encountered two major challenges: improving the effluent quality and operational efficiency. Previous water quality prediction methods had problems such as poor accuracy and insufficient timeliness when dealing with complex nonlinear data, making it difficult to meet the refined requirements of modern sewage treatment. Deep learning, as an efficient data processing method, can independently explore the complex characteristics and hidden patterns in data, providing a brand-new solution for the prediction of effluent quality and the optimization of processes in sewage treatment plants. This article conducts research on the application of deep learning in the field of wastewater treatment. Firstly, it analyzes its key values in enhancing the accuracy of prediction, exploring the intrinsic connections of processes, optimizing resource allocation, and strengthening water quality safety. Next, explore the current practical application of deep learning in sewage treatment plants, covering data-driven modeling, fusion of multi-source data, real-time optimization and control, as well as the combination with traditional processes. Finally, targeted optimization measures are proposed from multiple aspects such as model architecture, data management, control algorithms, and human-machine collaboration, with the aim of providing theoretical support and practical references for the intelligent upgrade and sustainable development of sewage treatment plants.

Keywords： deep learning; wastewater treatment plant; effluent water quality prediction

引言

污水处理作为确保水资源循环利用以及生态环境安全的关键部分，其出水水质稳定达标这件事，和受纳水体的环境质量以及人类健康是紧密相连的。由于水质标准持续提升，污水处理工艺也愈发繁杂，所以，精确预估出水水质并且依据这一预估来优化工艺参数，就成为提高污水处理厂运行效果的核心要点。以往传统的水质预测手段，像回归分析、时间序列模型等，要依靠人工去设定特征，并且只建立简单的数学关系，很难去抓住污水处理过程里众多变量所具备的非线性、时变性以及耦合性这些特点。而深度学习因为具备强大的非线性拟合能力，还有自动提取特征的优势，能够从海量的历史数据当中学习到复杂的模式及规律，这就为精确预测出水水质、优化工艺运行提供了强有力的支持。对深度学习在污水处理厂出水水质预测与工艺优化方面展开研究，是具备重要的理论意义和实际应用价值的。

作者简介：程果（1993.10-），女，河南南阳人，硕士，工程师，研究方向：给排水、环保节能。

一、深度学习在污水处理厂出水水质预测与工艺优化中的核心价值

（一）提升水质预测精度与实时性

污水处理流程包含着大量物理、化学以及生物方面的反应。像化学需氧量（COD）、氨氮（ $\text{NH}_3\text{-N}$ ）、总磷（TP）这类水质指标的变动，会被进水水质、水量、温度、溶解氧（DO）等多种要素综合作用，呈现出很强的非线性及时变性特点。深度学习模型之中，循环神经网络（RNN）、长短时记忆网络（LSTM）等，它们可以凭借多层神经元的相互连接以及权重的调整，自动地去学习数据里的时间序列特征和长时段依赖关系。就比如说，LSTM网络能对长时间序列数据有效处理，捕捉到水质指标在不同时间规模上的变化规则，进而对未来的出水水质展开精准预估。和传统模型对比而言，深度学习模型在处理复杂数据时，具备更高的预测准确性，能够给污水处理厂的运营管理给出更可靠的支撑。而且呢，深度学习模型可以实现实时数据的输入跟输出，搭配在线监测体系，能够实时追踪水质的变化走向，及时察觉到异常状况并且发出警报，为污水处理厂的实时调控给予助力。这种实时预测能力，能让操作人员快速做出回应，对工艺参数进行调整，防止出现水质超标以及运行事故。

（二）挖掘复杂工艺关联关系

污水处理工艺涵盖众多处理单元，像格栅、沉砂池、生化池、二沉池等。各个单元彼此之间，运行参数和水质指标存在着相互关联与相互作用的关系。以往采用的办法，很难全方位地揭示这些复杂关系，使得工艺的优化缺少系统性和针对性。深度学习凭借对大量以往运行数据的学习，能够挖掘出不同工艺参数和出水水质之间潜藏的联系，以及各处理单元相互间的协同作用原理。比如说，在生化处理阶段，进水负荷、污泥浓度、DO含量等参数，与COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的去除成效紧密相关，深度学习模型能够辨别出这些参数之间的非线性关系，进而确定最适宜的运行参数组合。另外，深度学习还能够发现某些传统办法不易察觉的因素对水质产生的影响，例如微生物群落结构的变动、水温的微小波动等，这就为深层次理解污水处理过程的内在机制，提供了全新的视角。依据这些挖掘出的关联关系，污水处理厂可以制定更为科学合理的工艺优化方案，达成从依靠经验驱动向依靠数据驱动的决策转变，提升工艺运行的稳定性与效率。

（三）优化资源配置与运行成本

污水处理厂开展运作时，往往要耗费诸多如能源、药剂以及人力之类的资源。而对资源予以合理配置，实乃达成降低运行成本这一目标的核心要点。深度学习凭借对出水水质的精准预估以及对工艺运行状况的实时监测，能够为资源的优化配置提供相应依据^[1]。就能源消耗层面而言，生化池的曝气系统属于污水处理厂内的主要耗能设备之一，该设备的运行功率和DO含量之间存在紧密关联。深度学习模型能够依据水质预测的结果以及当下的运

行状态，自动对曝气强度作出调整，从而在确保处理效果的基础上，最大程度地削减能源消耗。从药剂投加的角度来讲，借助对进水水质和处理目标展开分析，^[2]深度学习能够确定最为适宜的药剂投加量，如此便能够防止因药剂浪费或者过度投加而给环境带来二次污染。

二、深度学习在污水处理厂的应用现状分析

（一）数据驱动建模的技术演进

早期关于污水处理的数据驱动建模工作，大多是以传统统计学习手段为依托，像多元线性回归以及支持向量机（SVM）之类的方法。在应对简单线性数据或者低维度数据的情形下，这些方法能展现出一定程度的成效。不过，一旦面临复杂的污水处理过程所产生的数据，其构建模型的能力就会遭遇局限。伴随着深度学习技术逐步发展，越来越多的研究人员开始把卷积神经网络（CNN）、循环神经网络（RNN）以及长短时记忆网络（LSTM）等模型运用到污水处理这一领域。其中，CNN能够从数据当中提炼出空间特征，比较适合用来处理与图像或者空间分布有联系的数据，比如对污水处理厂设备的监控图像加以分析，从而辨别设备的运行状况。而RNN和LSTM在处理时间序列数据方面有着突出表现，能够掌握水质指标随着时间推移而变化的规律，^[3]所以在出水水质预测环节得到了广泛运用。最近一些年，Transformer模型在污水处理数据建模方面也开始初现端倪。它所具备的自注意力机制，可以切实有效地捕捉到数据中存在的长距离依赖关系，进一步提高了模型的预测精准度。这些深度学习模型处于持续发展演变之中，为污水处理厂进行数据驱动建模提供了更为强劲有力的工具，有力地促使该领域从运用简单模型朝着运用复杂模型的方向转变。

（二）多源数据融合的实践探索

污水处理厂在运转期间所产生的数据呈现出多源头、不一样结构以及数量庞大等特性，涵盖水质监测方面的数据、设备运转的数据、环境参数相关的数据等等。单一种类的数据通常没办法全方位展现污水处理流程的实际情形，所以，多种来源数据的融合就变成了提高模型性能以及工艺优化成效的关键办法。^[4]在实际操作当中，研究人员尝试把不同来源的数据加以整合。举例来讲，把在线监测得到的水质数据跟实验室分析的数据结合在一起，让数据的准确度与完整性得到提升；把设备的传感器数据和工艺运行参数数据相融合，深入探究设备运行状态对水质产生的影响。除此之外，还能够融合外部环境数据，像是天气数据、水文数据等，把外部因素对污水处理流程的影响考虑进去。多种来源数据的融合不仅要解决数据格式转变、时间同步等技术层面的问题，而且还得设计恰当的融合策略，比方说早期融合、晚期融合或者中间融合等，从而充分发挥不同数据具备的优势。通过多种来源数据的融合，深度学习模型能够获取更为丰富的输入信

息,增强对污水处理流程的理解能力与建模能力,为精准预测以及优化给予更为有力的支撑。^[5]

（三）实时优化控制的系统构建

以基于深度学习而得出的出水水质预测成果为基础,构建实时优化控制系统,此乃达成污水处理厂智能化运作的重要步骤。实时优化控制系统一般涵盖数据采集单元、模型预测单元、优化决策单元以及执行控制单元。数据采集单元主要负责及时获取污水处理流程里的各类数据,并将这些数据传递至模型预测单元;模型预测单元借助深度学习模型来预估出水水质;优化决策单元依据预测的结果以及预先设定的优化目的,比如降低能源损耗、提升水质达标比率等,制定出最佳的工艺参数调整方案;执行控制单元把这个调整方案传达到现场的设备,从而实现了对污水处理工艺的实时操控。在实际运用当中,实时优化控制系统需要拥有较高的可靠性、较快的响应速度以及较强的抗干扰能力,以此确保在繁杂的工业环境下稳定运行。比如说,在曝气控制方面,实时优化控制系统能够依据 LSTM 模型对 DO 浓度以及出水水质的预测情况,自动调节曝气风机的频率,让 DO 浓度维持在最佳区间内,这样既保障了微生物的活性,又减少了能源的消耗。通过搭建实时优化控制系统,污水处理厂得以实现从预测到决策再到控制的闭环式管理,提升工艺运行的自动化与智能化程度。

三、基于深度学习的污水处理厂工艺优化策略

（一）模型架构优化

为促使深度学习模型于污水处理数据处置环节的效能得以提升,须依据污水处理流程的特性,对模型架构加以优化。针对时间序列数据的预估难题,能够运用混合模型架构,将长短期记忆(LSTM)网络与卷积神经网络(CNN)相融合,充分施展 LSTM 在处理时间序列以及 CNN 在提取空间特征方面的长处。举例而言,在处置水质监测数据时,CNN 可针对数据的空间分布特性进行提取,诸如不同监测点之间的关联等,而后把所提取的特性输入至 LSTM 网络,开展时间序列的预估,以此提高模型对于复杂数据的处置能力。除此之外,还可引入注意力机制,使模型在处理数据期间,更为关注关键的时间节点与特性,提升模型的预估精准度。针对多输出预估问题,像同时预估化学需氧量(COD)、氨氮(NH₃-N)、总磷(TP)等多个水质指标的情况,可设计多任务学习模型,共用底层的特征提取层级,针对不同的水质指标设定独立的输出层级,达成多个指标的联合预估,提高模型的效率与泛化能力。在模型训练进程中,还需合理挑选损失函数与优化算法,按照实际的预估需求与数据特性予以调整,保障模型能够收敛至最优解。

（二）数据治理强化

深度学习模型得以成功应用,离不开高质量的数据做支撑,所以必须强化污水处理厂的数据管理工作。首先来讲,要让数据

采集体系更加完备。于污水处理厂的各个关键点位,安装高精度的感应器,务必要能够及时且精确地收集到进水的水质、水量,还有设备运行的参数、环境参数等各类数据。与此同时,搭建数据校准及验证机制,对收集来的数据实施预处理。像是消除数据中的干扰因素、补齐缺少的数据值、修正异常的数据,以此提升数据质量与可信度。其次,应当构建统一的数据管控平台,对多种来源、不同形式的的数据加以整合和存储,达成数据的集中管控与分享。借助数据清理、数据转换、数据集成等技术手段,把不同格式、不同出处的数据转变成统一的标准格式,为后续的数据解析以及模型训练提供便利。另外,还得建立数据安全防护机制,防范数据出现泄露以及被篡改的情况,切实保障数据的安全以及完整。通过加强数据治理工作,为深度学习模型提供丰富且高质量的数据保障,提升模型训练成效以及应用价值。

（三）控制算法创新

以往的污水处理控制算法,大多依据固定不变的控制方式以及凭借经验得出的参数来运作。这种方式在面对复杂且变化无常的运行环境时,往往显得力不从心。通过借助深度学习所具备的优势,推进控制算法的革新,这是达成工艺优化的关键手段。可以把深度学习模型和模型预测控制(MPC)融合在一起,从而构建出基于模型的预测控制算法。模型预测控制(MPC)以未来某段时间内的预测输出作为依据,运用滚动优化的方法,计算得出最为适宜的控制序列。这样一来,就能够有效地应对约束条件以及多目标优化方面的问题。而深度学习模型则为模型预测控制(MPC)提供精准的预测模型,增强控制算法的适应能力以及鲁棒特性。比如说,在污水处理中的曝气控制环节,借助深度学习模型对溶解氧(DO)浓度以及出水水质的变化走向进行预测,模型预测控制(MPC)依照预测结果以及预先设定好的优化目标,像是将能耗降至最低并且确保水质符合标准等,算出最为理想的曝气风机控制参数,进而实现对曝气系统的动态优化管控。

（四）人机协同机制构建

在污水处理厂实施运行管理工作期间,人员所具备的经验以及做出的决策依旧占据关键地位。鉴于此情形,就必须搭建起人机协同的相关机制,充分把操作人员与深度学习系统各自所拥有的优势给展现出来。从一方面来讲,深度学习系统能够向操作人员供给水质实时预测的成果、工艺优化给出的提议以及设备故障预先的警告等诸多信息,以此助力操作人员做出相关决策;从另一方面来说,操作人员可将自身积累的经验以及专业知识录入到系统当中,针对模型所预测的结果以及优化方案展开验证与调整,以此提升系统的可靠程度与实用性能。例如,当深度学习模型给出调整某一项工艺参数的建议后,操作人员可依据实际运行过程中的经验以及现场的具体状况,对建议是否合理进行判断,进而决定是不是要去执行。与此同时,操作人员还能够透过人机交互的界面,针对系统的参数与模型实施调整与优化,使得该系统更好地和污水处理厂实际运行情况相契合。

四、结语

深度学习作为一项具备强大数据处理能力的技术手段，为污水处理厂的出水水质预测以及工艺优化带来了全新的思路与方式。本文自核心意义、应用现实状况以及优化举措这三个层面，对深度学习于该领域的运用展开了深入探究。研究成果显示，深度学习可以切实有效地提高水质预测的精准程度，挖掘出工艺之间的关联联系，对资源配置加以优化，并增强水质安全的保障力度，在污水处理厂朝着智能化方向升级的进程中，有着至关重要的应用价值。深度学习在污水处理厂的应用已然取得了一定程度

的进步，不过也遭遇了数据治理、模型可解释性以及与传统工艺融合等方面的难题。借助优化模型架构、加强数据治理、创新控制算法以及构建人机协同机制等策略，能够进一步提升深度学习在污水处理厂中的应用成效，推动污水处理行业朝着高效、智能且可持续的方向迈进。展望未来，鉴于深度学习技术的持续发展以及污水处理需求的不断改变，需要持续进行相关研究工作，不断探寻新的应用模式与优化办法，以便为解决水资源环境问题贡献更为显著的力量。

参考文献

- [1] 吴婧. 基于 SSAG-ALSTM 的污水处理厂出水水质预测研究 [D]. 武汉轻工大学, 2024.
- [2] 樊慧芸. 基于 LSTM 的污水处理厂出水水质的预测研究 [D]. 江苏: 江苏大学, 2024.
- [3] 李亮亮. 城镇污水处理厂出水水质提升技术研究 [J]. 山西水利科技, 2024(4): 48-50. DOI: 10.3969/j.issn.1006-8139.2024.04.016.
- [4] 索伟, 方勇, 邢峰杰. 浅谈污水处理厂出水对白浪河断面水质影响情况 [J]. 山东化工, 2024, 53(18): 279-281. DOI: 10.3969/j.issn.1008-021X.2024.18.072.
- [5] 彭定华, 张辉, 马雪菲, 等. 基于减污降碳和水质目标约束下的黄河干流兰州段城区污水处理厂出水排放限值研究 [J]. 环境科学研究, 2024, 37(1): 202-211. DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2023.10.15.

区域、文化、宇宙观 ——大理地区坝子空间研究层次探讨

张子恒, 张馨蕾, 朱瑛琦, 陈虹羽*

昆明学院建筑工程学院, 云南 昆明 650000

DOI:10.61369/ME.2025050027

摘 要 : 坝子空间的各类研究已着先鞭。论文以大理地区坝子空间为研究对象, 对大理坝区空间社会相关研究进行梳理, 籍此进行考证。文章提出: 区域、文化、宇宙观是坝子空间研究的三个层次。每一个研究层次采用具体的研究方法。区域层次包含载体地理区划、文化地理方面的研究, 文化层次包括文化区、文化差异方面的研究, 宇宙观研究作为未来研究的主要方向, 建立在多维度学科的交叉上, 结合文化宇宙观念等要素进行综合研究。

关 键 词 : 坝子空间; 区域; 文化; 宇宙观

Region, Culture and Cosmology — Discussion on the Research Level of Bazi Space in Dali area

Zhang Ziheng, Zhang Xinlei, Zhu Yingqi, Chen Hongyu*

School of Civil Engineering and Architecture, Kunming University, Kunming, Yunnan 650000

Abstract : All kinds of research on bazi space have been done. Taking the bazi space in Dali as the research object, this paper sorts out the relevant research on the space society in Dali dam area, so as to make a textual research. The article points out that region, culture and cosmology are three levels of bazi space research. Each research level adopts specific research methods. The regional level includes the study of carrier geographical division and cultural geography, and the cultural level includes the study of cultural areas and cultural differences. As the main direction of future research, the study of cosmology is based on the intersection of multi-dimensional disciplines and combined with the concept of cultural cosmos to conduct comprehensive research.

Keywords : Bazi space; regional ; culture; cosmovision

引子——从坝子社会到坝子空间的研究追溯

在中国云南滇西北地区, 地貌形态最为显著的特点就是“坝子”, 即通常的山间盆地以及河谷冲积平原。“坝子”在方言中经常使用, 地区各民族对此类地形的习称常称为“××坝”。如今的坝子是“区域性的政治、经济中心, 也是云贵高原与高地东南亚交通体系的枢纽”^①。从1989年, 中国科学院彭清针对云南地区坝子文化研究提出“坝子文化”的概念, 初步揭示了云南文化圈的人地关系并与地理环境的关系联系起来^①。1999年, 再到曾广权根据生态学原理可以简单地将坝子一个相对独立的“人类—环境—经济”系统^②。至2010年, 香港科技大学成立“坝子社会”研究团队, 由廖迪生、赵敏组织牵头, 就云南地方大理地区多个坝子地区展开深入细致的研究, 以地方文化观念中有关“坝子作为一种社会共同体”的理解作为出发点, 努力揭示“坝子”空间建构的文化诠释。揭示坝子之间在文化上的综合性整合的路径^③。从这一刻起, 建立起关于坝子空间的文化空间研究体系。

以笔者的观点, 文章选取大理地区“坝子空间”相关既有研究作为研究对象进行整理, 即因它具有特殊地理区位的人地关系, 文化物质具有丰富性与复杂性, 也因在云南大理国民经济发展历史中, 也在城乡经济建设中, 坝子空间的发展起到重要作用。选择大理“坝子空间”作为研究对象即企图将它作为坝区“范本”式研究进行既有研究整理, 探求目前的研究在各个层面的发展前景, 接下来笔者将从地理场域研究、社会文化研究、宇宙观念研究三个层面对大理地区坝子社会的研究予以归纳并解析。因为地理场域研究是对坝区空间的样态区域研究, 社会文化研究则上升到了各种基本区域文化与人文事件、背景之间组织关系的研究; 而宇宙观研究又是在更广阔研究范围内, 讨论空间环境、观念(意识形态)之间的相互关系。

基金项目: 云南省教育厅大学生创新创业训练计划项目(项目编号: 202411393077、202411393019、202411393004)

作者简介:

张子恒(2004.03—), 男, 云南开远人, 高中, 本科在读, 研究方向: 都是建筑设计及其理论;

张馨蕾(2004.09—), 女, 云南昆明人, 本科在读, 研究方向: 都是建筑设计及其理论;

朱瑛琦(2004.10—), 女, 山东泰安人, 本科在读, 研究方向: 都是建筑设计及其理论;

通讯作者: 陈虹羽(1986.11—), 女, 上海人, 硕士研究生, 讲师, 研究方向: 都是建筑设计及其理论

一、地理区域研究

以坝子所在的自然场域环境而言，以山地为基底构成的自然场域，自然地理构成要素非常复杂，这一复杂性凸显了地区独特的地形和地理位置，也来源于地区独特多样的气候。坝子的形成是一种独特的自然地理现象，20世纪初，已有一些自然地理学家对其进行了初步的研究。云南坝子的研究始于20世纪40年代，但由于受当时的条件所限，研究成果不多，成果文献也很难见^②。根据坝子的形状特征、构造基础对其进行简单分类。在1964年，为了了解作为农业基础条件的坝子状况，做出农业机械化区划，由唐乃焕、陈永森、王霞斐等人对坝子进行了系统研究：当时的研究按坝子的海拔高度、沉积物类型、形态等分类方法，以云南省1：50000地形图为基础勾画坝子范围，统计坝子数量，度量坝子面积，对坝子做出分类。当时的研究成果被广泛运用的主要有从数量、分类方法等（表一），1998年《云南省志·地理志》出版并刊登了1964年的研究的部分成果。1964年后，坝子研究工作有一段时间处于停滞状态。

| 表一：1964年坝子部分研究成果整理 | | |
|--------------------|--------|--|
| 成果1 | 统计坝子数量 | 统计了面积大于等于1km ² 的坝子数量。共计1442个，占云南省总面积的6% |
| 成果2 | 坝子分类方法 | 按坝子的海拔高度分类、按沉积物类型分类、按形态和成因分类三种粗略的分类方法，此方法还在应用。 |
| 成果3 | 坝子分布研究 | 提出云南坝子主要分布在云南高原面及断陷平台上，有东部多西部少，东部大坝子多、西部大坝子少的分布规律。 |

根据文献所述，自1984年以来，针对云南坝子的研究主要聚焦于地理空间和空间结构等方面^④。这些研究涵盖了坝子规模的各个层次，从坝子尺度逐步深入，探讨坝区空间的各个层面。曹洪刚基于乡村地理学理论，对明代大理山区坝子的空间分布特性进行了研究^⑤。张磊则从坝区空间的尺度调控角度进行了研究，并对大理市海西地区高原湖泊平坝区农村居民点空间格局的演变进行了预测分析^⑥。邱孝高运用GIS空间分析方法，探究了大理宾川县山地空间的分布特点与演化模式，并对山地镇村体系的构建提出了新的思路^⑦。总的来说，地理区域方面的研究主要关注坝区地理空间的分布特性，众多研究采用GIS等软件进行坝区空间的定量分析，从宏观到微观层面，从坝区地理环境、环境空间结构到空间内部要素，结合环境特征和人居需求，既有研究主要集中于分析坝区空间的格局变迁、空间体系演变的过程，探求其发展规律和区域型制模式。

二、社会文化研究

当地人观念中的“坝子”，不仅是与“山区”相对的地理区域，而且还是一个在特有地理空间内生存、生产及生活中长期累积起来的社会文化系统。这个系统之网，称为“坝子社会”^⑧。自1989年起，云南文化圈——“坝子文化”提出以来^①，揭示出云南山地文化圈的人地关系，研究通过系统分析方法，探索出文化要素的复杂与多元性；地因高山峻岭的阻隔，内聚力因地域割

据所导致的降低，导致文化的封闭以及文化传播缓慢。坝区文化特点的研究发展随即而来：车文辉对云南少数民族生育文化形成与变迁进行了从地理学解释并进一步对少数民族生育文化形成的影响做出诠释，他提出云南少数民族人口生育文化变迁机制是因为人们的生产生活均以坝子为中心，而坝子之间的相互交往受到极大的限制，各民族之间人口迁移发生频率不高。在这样的区域里居住的云南少数民族生育文化表现为“百里不同俗”的特点，久而久之造就了各具特点的民族文化事象^⑨。上述研究指出了坝子文化的封闭性特点，诚然，因坝子民族处于较为隔绝的状态，各民族之间、民族内部的文化交流与沟通收到限制，从而难以发生相对的民族融合，导致民族文化的冲突并发生嬗变，形成这种内向的封闭性，来源于一定范围内的文化聚集导致的文化定向积淀。

然而，部分研究揭示出坝区文化因族群的通婚等要素打破了文化的边界：赵卫东在《大理邓川坝子“白回”族群成因探析》中指出坝区族群文化边界的改变成因，由于元明时期，在白族为主的世居民族，当回人进入邓川坝子，以通婚作为主要交往方式发生了族际文化交融，回民逐渐接受了诸多白族文化特质，虽然他们坚守着固有的伊斯兰信仰并不断维系族群的内部边界，普遍认为自己是“回族穆斯林”的族群意识。但是因为族群交往，形成了一个兼有明显伊斯兰文化和白族文化特征的“白回”族群^⑩。

三、宇宙观念研究

前文提出，坝子空间的研究集于在地理区域研究（例如从自然地理人文等方面揭示坝区空间的布局及成因，运用实地调研和GIS数据分析平台结合的方法）。在大中尺度的研究框架下，还有部分学者将研究对象聚焦到坝区空间结构及构成要素的分析上，通过符号学、类型学等理论与方法，对坝区空间的进行空间分析，并总结其特征。

坝子是一个地方民众共享的社会活动空间^⑪。在特殊的坝区空间格局自然环境的约束下，坝区民族传统聚居区选择一般都选择靠山避风、防水、藏风聚气等方便生活的地域作为首要下的宇宙观息息相关。选址，聚集方式多与民族游牧和农耕的生产方式息息相关，也与族群的认知方式与意识形态背后的宇宙观息息相关。马健雄提出：在州县或土司体制之下，以“坝子社会”为中心的地方社群在道路与运输网络中的积极参与，体现在明清国家的宇宙观（“天下体制”）在地方的实践^⑫。

四、结论

通过对坝子空间研究层次的分层架构，可知对坝子空间的研究必须结合其所处的区域地理文化环境。既要地理、文化区域的角度探究坝区空间的区位特征和变化局势，又要进行宇宙观研究：内容包括①信仰：不仅仅是从书本中探求民间传说方面的文献，而是以坝区民族分布进行细致田野考察提出问题，考察观念

的变化带来的一系列影响；②认知：在时空变化的历时性背景下，族群有一定生存经验积累，有了自己相对模式化的空间认知状态，并将这种认知作用于外在世界，即考察坝区空间物质形式的内在变化渊源；③宗教：在不同坝区地域环境中出现不同的宗教形成与表现的模式，形成不同宗教层面上的理解引发不同微观宇宙观。才能既分析其静态特点，又考察其动态成因。

从地理场域、社会文化、到宇宙观念的三个层次的研究内容与方法共同构成了坝区空间研究的层次。三个层次旨在未来需在

大量直接面对研究对象的田野调查的基础上，不断找寻坝区空间的变化特征，进而探讨坝区空间的内部特征或者不同文化的差异。研究的三个层面：“地点”到“场所”，“文化”到“宇宙观”，实际上是由小到大、从下自上层层拨开的关系。文化区域划分的方案不是研究的目的，而只是帮助了解坝区空间特征的一种方式，根本的目的是持续挖掘坝区空间内部空间环境本身的特质及微观研究并作出解释。

参考文献

[1] 彭清. 文化圈研究——云南文化圈透视 [J]. 地理研究, 1989(01): 101.

[2] 曾广权, 邓晴, 代丽. 云南可持续发展中的城市化进程 [J]. 云南环境科学, 1999(02): 5-7.

[3] 寸云激, 马健雄. 云贵高原坝子社会研究的方法与问题 [J]. 广西民族大学学报 (哲学社会科学版), 2020, 42(06): 2-5.

[4] 童绍玉 陈永森 云南坝子研究 [M] 云南大学出版社出版, 2007.

[5] 曹洪刚. 明代大理山城空间格局研究 [J]. 原生态民族文化学刊, 2013, 5(04): 84-88.

[6] 张磊, 武友德, 李君. 高原湖泊平坝区农村居民点空间格局演变及预测分析——以大理市海西地区为例 [J]. 中国农业大学学报, 2018, 23(02): 126-138.

[7] 邱孝高, 方芳, 徐坚. 浅析 GIS 在完善山地镇村体系构建中的运用——以大理宾川县为例 [J]. 中华建设, 2019(11): 84-85.

[8] 马健雄. 超越学科与社会的“边界”——从中缅边疆的拉祜族人类学田野工作到“坝子社会”研究 [J]. 大理民族文化研究论丛, 2019(00): 3-18.

[9] 车文辉. 地理环境与文化生成——云南少数民族生育文化形成与变迁的地理学解释 [J]. 人口研究, 2003(06): 82-86.

[10] 寸云激, 马健雄. 坝子社会：一种历史人类学的视角 [J]. 开放时代, 2022(04): 215-223+11.

面向应急救援的无人机多模态数据知识图谱构建 与智能决策系统

董思屏, 钮芮楠, 刘轩, 朱亚婷, 郑庆阳, 魏青

北方工业大学, 北京 100043

DOI:10.61369/ME.2025050031

摘 要 : 为破解传统洪灾监测“信息滞后、语义贫乏、数据孤岛”三大瓶颈, 本文提出“图像驱动-知识图谱赋能”框架 (Image-KG4Flood)。首先, 利用无人机与社交媒体多模态图像, 基于 PyTorch/OpenCV 构建分钟级在线学习管线, 将遥感周期由小时级压缩至 5-10 分钟; 其次, 以 YOLOv5 / Faster R-CNN 联合检测“人-车-房-船-树”5 类目标并估算洪水覆盖度, 构建覆盖 0%-90% 洪水梯度的 1 255 目标数据集; 再次, 设计 Neo4j 时空知识图谱统一水利 IoT、交通路网、气象预报等多源异构数据, 提出“规则逻辑特征+余弦相似度”的图嵌入方法, 实现 A-E 五级智能预警与“受困人员-最近安全点-可用救援艇”可解释决策路径。实验表明: 系统在 15% 覆盖度/3 目标场景下 0.95 以上相似度输出 A 级预警, 70% 覆盖度场景准确触发 E 级预警及大规模疏散建议, 单次响应时间 < 5 s。本研究不仅为洪灾应急提供了可复制、可推广的 AI+KG 技术范式, 也为台风、山火等极端气候事件的智能化响应提供方法学借鉴。

关 键 词 : 知识图谱; 目标检测; 洪水预警; 图嵌入; YOLOv5; Neo4j; 多模态融合

Construction of a UAV Multimodal Data Knowledge Graph and Intelligent Decision-Making System for Emergency Rescue

Dong Siping, Niu Ruinan, Liu Xuan, Zhu Yating, Zheng Qingyang, Wei Qing

North China University of Technology, Beijing 100043

Abstract : To overcome the three major bottlenecks of traditional flood monitoring, namely "information lag, semantic poverty, and data silos," this paper proposes an "Image-Driven-Knowledge Graph Empowerment" framework (Image-KG4Flood). Firstly, leveraging multimodal images from unmanned aerial vehicles (UAVs) and social media, a minute-level online learning pipeline is constructed based on PyTorch/OpenCV, compressing the remote sensing cycle from hours to 5-10 minutes. Secondly, using YOLOv5/Faster R-CNN for joint detection of five target categories ("people-vehicles-houses-boats-trees") and estimating flood coverage, a dataset of 1,255 targets covering a flood gradient of 0%-90% is constructed. Thirdly, a Neo4j spatiotemporal knowledge graph is designed to unify multi-source heterogeneous data from water conservancy IoT, transportation networks, and weather forecasts. A graph embedding method combining "rule logic features + cosine similarity" is proposed to achieve five-level (A-E) intelligent early warnings and interpretable decision paths for "trapped individuals-nearest safe points-available rescue boats." Experiments show that the system outputs Level A warnings with over 0.95 similarity in scenarios with 15% coverage/3 targets, accurately triggers Level E warnings and large-scale evacuation recommendations in 70% coverage scenarios, and achieves a single response time of <5 seconds. This study not only provides a replicable and scalable AI+KG technical paradigm for flood emergency response but also offers methodological insights for intelligent responses to extreme climate events such as typhoons and wildfires.

Keywords : knowledge graph; target detection; flood warning; graph embedding; YOLOv5; Neo4j; multimodal fusion

一、研究背景

过去十年, 全球极端气候事件呈指数级增长, 洪涝灾害成为最具破坏力的自然灾害之一。据《中国水旱灾害公报 (2023)》,

2023 年我国洪灾直接经济损失达 1 842 亿元, 受灾人口 5 436 万。传统以遥感-统计模型为核心的洪灾监测与决策支持系统, 存在三点瓶颈: ① 信息滞后, 卫星重访周期与云雨天气常导致关键数据缺失; ② 语义贫乏, 像素级影像难以直接支撑应急指挥所

需的“谁-在哪里-需要什么”三元组决策；③ 数据孤岛，水利、交通、民政、社交媒体等多源异构数据缺乏统一建模框架，导致“数据海量、知识稀缺”。计算机视觉与知识图谱技术的交叉融合，为破解上述瓶颈提供了新思路：一方面，深度学习模型可从社交媒体、无人机、监控视频中实时提取受灾实体与情景；另一方面，知识图谱以图结构统一表示实体、关系与时空动态，支撑复杂推理与决策。然而，现有研究仍停留在“图-文”双模态对齐层面，缺乏针对洪灾场景高动态、高噪声、高时效特点的图像-知识图谱深度融合范式，亟需构建面向应急指挥的端到端框架。

二、研究意义

本研究提出“图像驱动-知识图谱赋能”(Image-KG4Flood)框架：利用 Python 生态(PyTorch、OpenCV)完成图像实体识别与关系抽取；基于 Neo4j 构建可扩展的时空知识图谱；面向抗洪救灾场景，设计图谱查询与推理接口，实现灾情感知、资源调度与影响评估一体化。该框架的创新价值体现在三方面：一是“分钟级”灾情更新，将社交媒体与无人机实时视频流接入在线学习管线，把传统小时级遥感周期压缩至 5-10 分钟，显著提升预警时效；二是“语义级”决策支持，通过将检测到的实体(人、车、堤坝)与图谱中的领域知识(脆弱性指数、救援资源分布)进行对齐与推理，自动生成“受困人员-最近安全点-可用救援艇”三元组路径，为指挥员提供可解释的行动方案；三是“开放型”数据生态，以图模式统一水利 IoT 水文时序、交通路网、气象预报等多源异构数据，打破部门壁垒，实现跨域知识共享。最终，本研究不仅为洪灾应急管理提供一套可复制、可推广的 AI+KG 技术范式，也为其他极端气候事件(台风、山火)的智能化响应提供方法学借鉴。^{[1][2]}

三、文献综述

洪灾场景下的图像理解任务可分为受灾区域分割、受灾对象检测与情景识别三类。

① 区域分割：早期研究依赖多光谱遥感指数(NDWI、MNDWI)阈值法，易受混合像元影响。2018 年，Xu et al. 提出 FloodNet，首次将 U-Net 引入高分二号影像水体提取，IoU 达 0.91；随后 TransUNet、Swin-Unet 通过 Transformer 增强全局上下文，进一步提升精度。

② 对象检测：无人机与街景图像分辨率提升至厘米级，使检测“被困人员、车辆、船只、救生艇”成为可能。2021 年，Guo et al. 发布 FloodDrone 数据集，含 21 337 张无人机图像与 7 类目标；YOLOv5 在该数据集 mAP@0.5 为 0.745。最近，Li et al. 引入 CLIP 文本先验，实现零样本洪灾物体检测。

③ 情景识别：为回答“发生了什么”而非“有什么”，Chen et al. 提出 FloodSituationGraph，将图像解析为<主体，行为，客体>三元组，准确率 82.3%。但现有工作多停留在视觉层面，

缺乏与外部知识库的深度耦合。

四、基于深度学习和图嵌入的洪水灾害分级预警系统研究与实现

(一) 洪水场景目标检测数据集的构建

1. 数据集构建的背景与目标

现有洪水相关公开数据集存在样本规模场景单一，未关联洪水覆盖程度的缺陷，无法满足“目标-覆盖度”协同检测的需求。本研究针对“房屋(财产损失)、人(人员安全)、树(地形标识)、车辆(财产损失)、船(水上救援)”5 类核心目标，构建覆盖 0%-90% 洪水覆盖度的数据集，为 YOLOv5 模型训练提供支撑，数据集制作流程如图 1 所示。



图1 数据集制作的主要流程

2. 原始数据集采集与预处理

(1) 数据采集与筛选

通过互联网公开图像资源平台(如百度图片、Google Images 等)以“洪水淹没”“洪涝灾害”“城市内涝”等为关键词进行定向检索，通过分辨率 $\geq 220 \times 220$ ，目标遮挡率 $<70\%$ ，含明显洪水特征三重筛选，最终采集 296 张高质量图像。

(2) 数据预处理与分类

遵循“保持原貌”原则，未额外进行像素级修改，最大程度保留原始洪水场景的真实性与目标特征的完整性。将数据集按功能划分为 images(存储图片文件)和 labels(存储标注标签文件)两大文件夹，且均进一步细分为 train(训练集，274 张)、val(验证集，17 张)、test(测试集，5 张)子文件夹

3. 目标标注规范与实施

(1) 标注工具与规则

选用 LabelImg 工具标注，标签格式为“flood coverage X%-类别”(如“flood coverage 50%-people”洪水覆盖度 50% 的人员)。围绕 5 类核心目标与 0%-90% 洪水覆盖度(10% 间隔)，设计 45 种差异化标签。标注过程如图 2 所示。



图2 LabelImg 标注过程

(2) 标注文件格式

为适配 YOLOv5 算法输入要求,采用 YOLO 模式生成的 txt 文件来承载标注信息,且标注数据与图像文件一一对应,文件存储目录如图3所示。

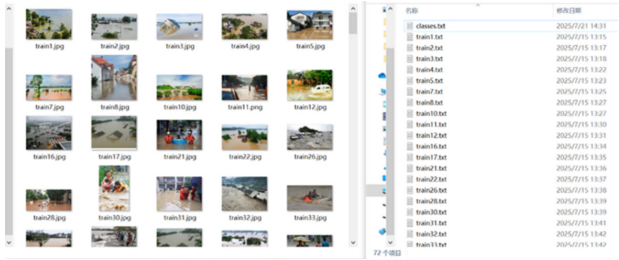


图3 LabelImg 标注生成 txt 文件存储目录

4. 数据集统计与质量评估

最终标注目标总计1255个,各类分布如表4所示,目标总体分布较为均衡,涵盖了各类关键物体,其中数据集中“树”类样本最多,因树木为洪水场景中“淹没范围边界”的关键标识;“船”类样本最少,因水上洪水场景样本获取难度较高,但仍可满足模型对水上目标的识别需求。

表4 洪水勘测数据集各类样本分布表

| | 人 | 车 | 树 | 房 | 船 |
|-----|-----|-----|-----|-----|----|
| 训练集 | 296 | 225 | 364 | 174 | 49 |
| 验证集 | 31 | 17 | 25 | 8 | 7 |
| 测试集 | 35 | 19 | 1 | 1 | 3 |
| 总计 | 362 | 261 | 390 | 183 | 59 |

(二) 洪水灾害目标检测算法研究

1. 核心算法原理

(1) Faster R-CNN 算法

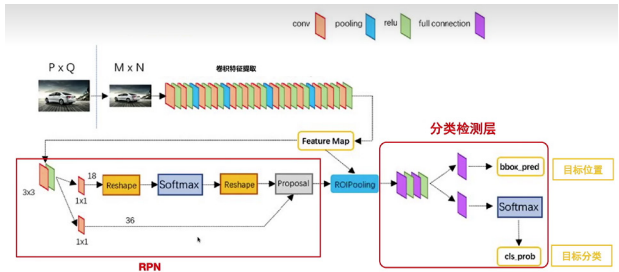


图5 Faster r-cnn 算法流程架构图

Faster R-CNN 是一种经典的两阶段目标检测算法,其核心创新在于引入了区域提议网络 (Region Proposal Network, RPN), 实现了端到端的训练,解决了传统 R-CNN 系列候选框生成满的问题。算法流程如图5所示。Faster R-CNN 经过 Conv layers 进行特征提取、RPN 生成检测框、Roi Pooling 和 Classification 对候选检测框进行分类,并微调候选框坐标输出结果。其损失函数为 RPN 损失与分类回归损失的加权和,公式如下

$$L(p_i, t_i) = \frac{1}{N_{cls}} \sum_i L_{cls}(p_i, p_i^*) + \lambda \frac{1}{N_{reg}} \sum_i p_i^* L_{reg}(t_i, t_i^*)$$

(2) YOLOv5 算法

YOLOv5 采用单阶段检测架构,将目标检测任务视为回归问题,在单个网络中同时完成目标定位和分类。如图6所示,其网络结构基于 CSPDarknet53 主干网络,结合路径聚合网络

(PANet) 实现多尺度特征融合。Backbone 采用 CSPDarknet53 作为特征提取主干网络,通过跨阶段局部连接增强梯度流,在保持精度的同时显著降低计算复杂度;Neck 使用 PANet 结构实现自上而下和自下而上的多尺度特征融合,增强对不同尺度目标的检测能力;Head 输出层采用锚点框机制,在三个不同尺度的特征图上进行预测,分别负责大、中、小目标的检测。^{[3][4]}

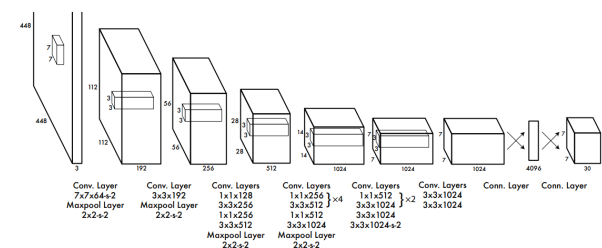


图6 yolo 的网络结构

yolo 损失函数:

$$\begin{aligned} \lambda_{coord} \sum_{i=0}^{S^2} \sum_{j=0}^B \mathbb{1}_{ij}^{obj} \left[(x_i - \hat{x}_i)^2 + (y_i - \hat{y}_i)^2 \right] \\ + \lambda_{coord} \sum_{i=0}^{S^2} \sum_{j=0}^B \mathbb{1}_{ij}^{obj} \left[(\sqrt{w_i} - \sqrt{\hat{w}_i})^2 + (\sqrt{h_i} - \sqrt{\hat{h}_i})^2 \right] \\ + \sum_{i=0}^{S^2} \sum_{j=0}^B \mathbb{1}_{ij}^{obj} (C_i - \hat{C}_i)^2 \\ + \lambda_{noobj} \sum_{i=0}^{S^2} \sum_{j=0}^B \mathbb{1}_{ij}^{noobj} (C_i - \hat{C}_i)^2 \\ + \sum_{i=0}^{S^2} \mathbb{1}_i^{obj} \sum_{c \in classes} (p_i(c) - \hat{p}_i(c))^2 \end{aligned}$$

损失函数也是多个不同种类损失的加权和,也图像识别问题最终转换成了回归问题,而且是端到端的,只要构建好正确的标签直接训练就训练网络了。

2. 算法实验与性能对比

(1) 实验设置与结果

1) Faster R-CNN 图像处理

基于 PyTorch 框架构建了一套完整的图像分析系统。选用 COCO 数据集预训练模型,在精度和速度间取得良好平衡,针对高分辨率图像处理,设计自适应压缩模块:当图像超过2MB 阈值时,自动将最长边缩放至1024 像素,显著降低显存消耗,提升系统鲁棒性。

核心推理阶段,标准化后的图像输入模型,获得带置信度的检测框,采用0.5 置信度阈值滤除不可靠预测。进一步基于几何规则进行空间关系推理:通过计算边界框中心点相对位置判定方位关系;通过重叠面积判断包含关系;通过欧氏距离与图像尺寸的比值判定邻近程度。

最终,系统将检测结果可视化标注于图像上,并自动生成包含检测结果和空间关系分析的 word 报告,如图7所示。



物体数量：21^[4]

1. bus - far_from - car^[4]
2. car - far_from - bus^[4]
3. bus - left_of - car^[4]
4. car - right_of - bus^[4]
5. bus - left_of - person^[4]
6. person - right_of - bus^[4]
7. bus - contains - person^[4]
8. person - inside - bus^[4]
9. car - far_from - person^[4]
10. car - right_of - person^[4]

图7 程序自动生成的 word 报告例图

2) 基于 YOLOv5 的目标检测系统

本系统基于 YOLOv5 构建，处理流程包含四个核心阶段：系统初始化、数据预处理、模型推理与后处理。最终输出可视化检测图像、结构化 Excel 数据及 Word 汇总报告。

系统首先验证输入路径（支持单张图像或整个目录），无效路径将报错终止。自动适配 GPU/CPU 硬件。通过 LoadImages 类进行标准化预处理：保持原始宽高比进行等比例缩放；将颜色通道由 BGR 转换为 RGB；将图像数据转换为 float32 类型的 Tensor，并进行归一化处理至 [0.0, 1.0] 范围，以满足模型输入要求。

核心推理在 `detect_image()` 函数中完成：将预处理后的 Tensor 输入 YOLOv5 模型，通过置信度阈值和交并比（IoU）阈值过滤低质量预测框，去除冗余检测结果。最后将预测框坐标映射回原始图像尺寸，并将检测结果（类别、置信度、坐标）解析存储至结构化字典中。运行结果如图8所示。



检测的目标^[4]

| 目标类别 ^[4] | 置信度 ^[4] | 位置 ^[4] | 坐标 ^[4] |
|--|---------------------|------------------------|------------------------------------|
| flood coverage 10%-car ^[4] | 0.25 ^[4] | 左上 - 右下 ^[4] | 1139.244 - 1919.713 ^[4] |
| flood coverage 10%-car ^[4] | 0.30 ^[4] | 左上 - 右下 ^[4] | 0.147 - 597.615 ^[4] |
| flood coverage 20%-car ^[4] | 0.31 ^[4] | 左上 - 右下 ^[4] | 0.167 - 592.560 ^[4] |
| flood coverage 50%-people ^[4] | 0.45 ^[4] | 左上 - 右下 ^[4] | 769.224 - 1074.712 ^[4] |

图8 程序自动生成的 word 报告例图

(2) 实验结果分析

实验结果显示：Faster R-CNN 的平均精度普遍高于 YOLO，尤其在小目标检测中更具优势，如人物在车内也能够很好的识别，所以更适合高精度应用场合；YOLO 的检测速度远超 Faster R-CNN，对固定组合关系经过训练也能很好的识别，但是比起 faster r-cnn 的精度还是有一定的差距，但是其训练和使用相对简易，通过预先训练好标注好的训练图和淹没百分比可以迅速判断洪水的实时淹没情况。

(三) 基于图嵌入的洪水分级预警系统原理

1. 系统架构

系统以 Neo4j 图数据库为核心，接收 YOLOv5 或 Faster R-CNN 目标检测算法输出的结构化结果（Excel 格式），通过数据解析、图谱构建、图嵌入计算与相似度匹配，最终输出 A - E 五级预警及应急措施。流程图如图9所示。

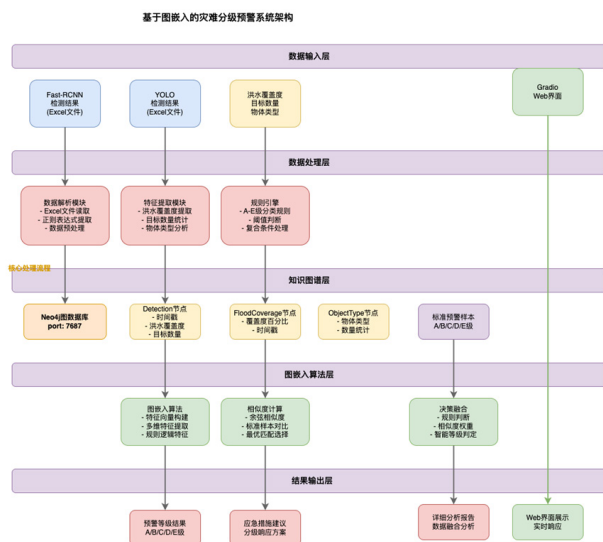


图9 系统整体架构图

2. 预警等级定义

预警等级分为 A 到 E 五个级别。A 级代表低风险，洪水覆盖度 $\leq 20\%$ 且目标数量 < 5 个；B 级为较低风险，洪水覆盖度 $\leq 20\%$ 但目标数量 ≥ 5 个；C 级属中等风险，洪水覆盖度在 $20\% - 40\%$ 范围；D 级为较高风险，洪水覆盖度在 $40\% - 60\%$ 范围；E 级属高风险，洪水覆盖度 $> 60\%$ 。

3. 知识图谱构建

在 Neo4j 中设计多层次节点类型体系。Detection 节点作为主节点，承载着每次检测的核心信息，包括精确的时间戳、提取的洪水覆盖度数值和统计的目标数量。FloodCoverage 节点专门存储洪水覆盖度相关数据，不仅包含百分比数值，还记录了对应的的时间戳。TargetCount 节点专注于目标数量信息的存储。ObjectType 节点不仅存储检测到的物体类型，还记录每种类型的具体数量。

图结构中的关系设计体现了数据间的逻辑关联。如图10所示 Detection 节点通过 HAS_FLOOD_COVERAGE 关系与 FloodCoverage 节点建立连接，明确表达了检测结果与洪水覆盖度之间的从属关系。HAS_TARGET_COUNT 关系则连接

Detection节点和 TargetCount节点，建立了检测结果与目标计数的关联。DETECTED关系连接 Detection节点和各个 ObjectType节点，形成了一对多的关系结构，完整记录了单次检测中发现的所有物体类型。

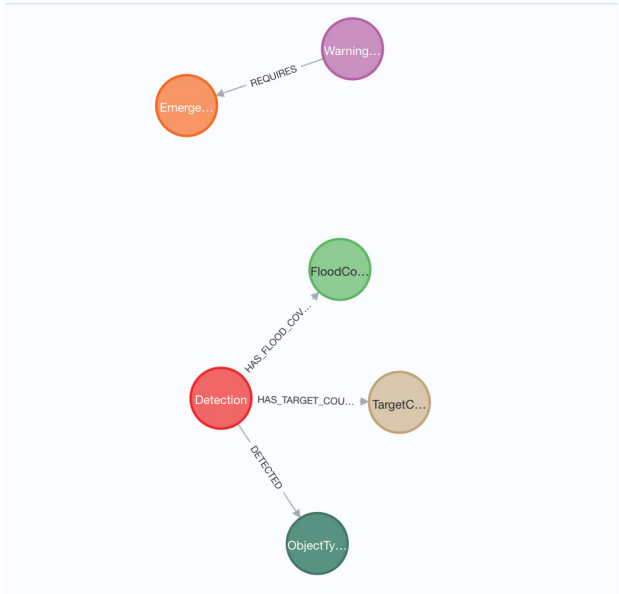


图 10 Neo4j 知识图谱结构示例

4. 图嵌入与相似度计算

(1) 图嵌入向量设计

图嵌入算法将复杂的图结构转化为 8 维的数值向量。基础特征维度包括归一化的洪水覆盖度和目标数量，确保了不同量级数据的可比性。

规则逻辑特征的引入是算法的创新之处。针对 A 级和 B 级预警的区分难点，我们设计了专门的边界特征。当洪水覆盖度不超过 20% 时，目标数量是否达到 5 个成为关键的判别因素。这种设计将专业的预警规则直接嵌入到了算法特征中，提高了分类的准确性。

(2) 相似度匹配

采用余弦相似度算法，有效衡量高维向量间的相似程度，不受向量长度影响。新的检测数据会与预先建立的五個标准样本逐一计算相似度，形成相似度向量。系统选择相似度最高的样本对应的预警等级作为最终判定结果。巧妙结合了规则判断的确定性和机器学习方法的灵活性，实现了智能化的预警等级判定。

(四) 系统实现与测试分析

1. 开发环境与依赖库

在本地计算机上部署完整的开发和测试环境。Neo4j 图数据库作为核心存储组件，运行在默认的 7687 端口，Python 运行环境选择 3.8 版本，确保与所有依赖库的兼容性。

系统依赖库的选择经过仔细考虑。pandas 库负责 Excel 文件的读取和数据处理，gradio 框架提供了快速构建 Web 界面的能力，py2neo 库作为 Neo4j 的 Python 客户端，提供了完整的图数据库操作接口。scikit-learn 库则为相似度计算提供了成熟的算法实现。

2. Web 界面与数据处理流程

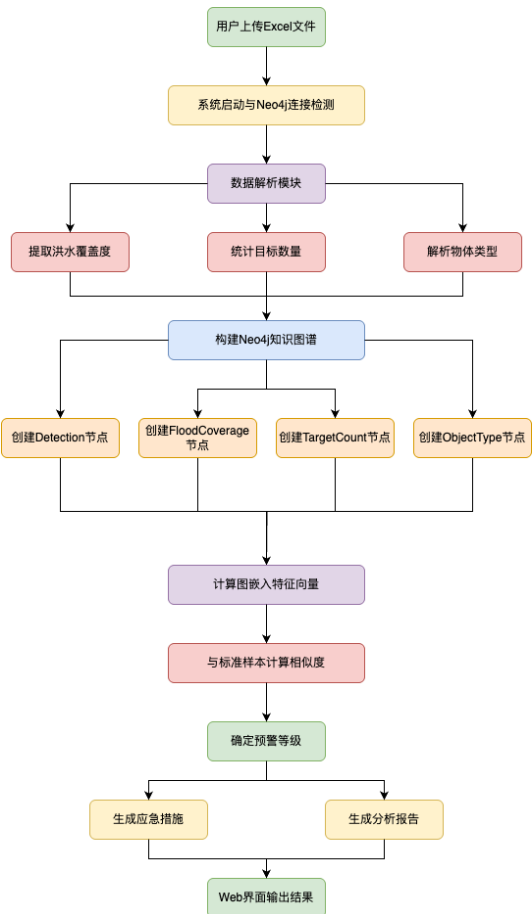


图 11 系统流程图

系统流程遵循“用户交互 - 数据解析 - 图谱构建 - 预警输出”逻辑，如图 11 所示：用户通过 Web 界面上上传 Excel 文件，系统自动检测 Neo4j 连接状态，解析数据后构建图谱，生成图嵌入向量并匹配预警等级，最终输出预警结果、应急措施与详细报告。Web 界面设计简洁，支持“拖放上传”与“格式说明”，降低用户操作门槛，界面如图 12 所示。



图 12: Web 界面截图

3. 测试结果与性能

系统测试使用包含不同场景的数据集。测试数据涵盖各种洪水覆盖度和目标数量组合。结果显示系统能够准确识别不同风险等级。

洪水覆盖度 15%、检测目标数 3 个的场景中，系统正确判定为 A 级预警。相似度计算显示与 A 级标准样本相似度达 0.95 以上。

对应急措施包括居民准备雨衣雨伞、减少外出、救援方推砂沙袋拦水。

洪水覆盖度18%但检测目标数增至7个时，系统调整为B级预警。这体现了系统对复合风险因素的敏感性。洪水覆盖度较低，但受影响人员增加提升了整体风险等级。

洪水覆盖度30%被正确识别为C级预警。系统生成的应急措施更全面，包括居民准备漂浮物、救援方准备抽水器和救生衣等设备。

洪水覆盖度达70%时，系统给出E级高风险预警。应急措施涵盖大规模疏散、向高处转移、加固河堤等关键行动。快速准确判定对实际救援工作具有重要意义。

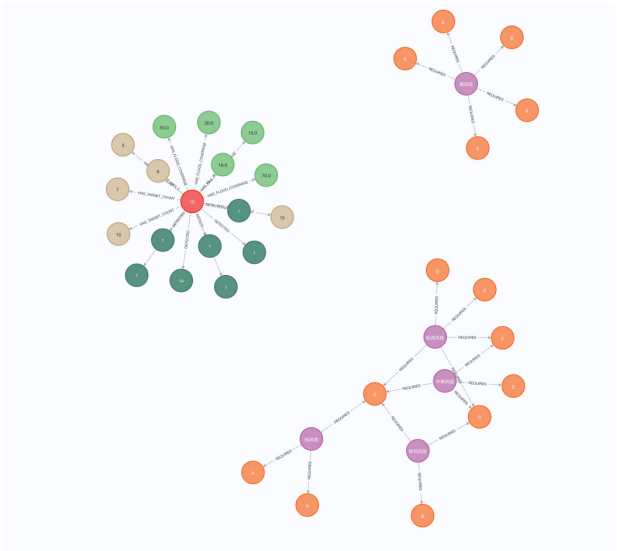


图 13: Neo4j 数据库中的实际数据图

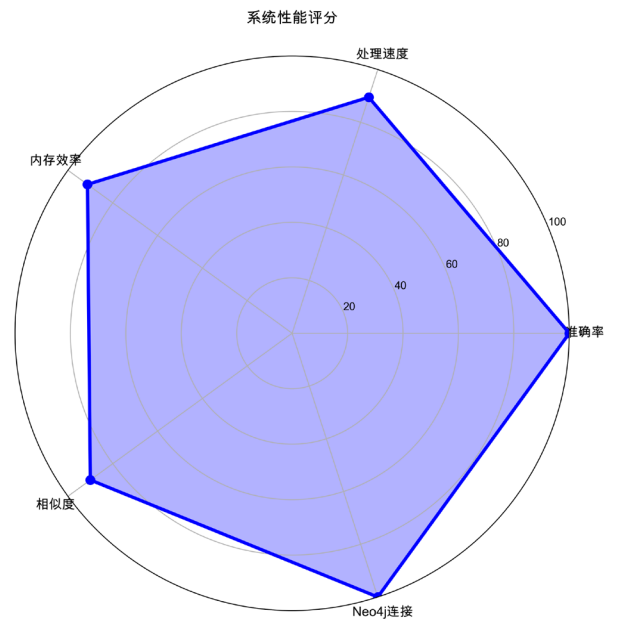


图 14: 系统性能测试结果

4. 系统核心优势与研究价值

（1）系统设计优势

Web界面设计简洁，三个输出区域分别显示预警结果、应急措施和详细分析报告，信息层次清晰。方便用户快速获取关键

信息。

系统实时性表现良好。文件上传到结果输出通常在几秒内完成。快速响应能力对应急场景具有重要价值。灾情发生时，每秒时间都可能关系生命安全。

模块化架构使添加新检测算法数据源相对简单。预警规则可根据实际需求调整优化。灵活性确保系统长期适用性。

本研究验证了图嵌入技术在灾难预警领域的应用潜力。不同来源检测数据整合到统一知识图谱中，提供更准确风险评估。相似度计算方法有效结合规则判断和数据驱动方法，实现智能化预警等级判定。

（2）研究应用价值

本研究首次将图嵌入技术与 Neo4j 知识图谱结合，实现 Faster R-CNN/YOLOv5 多源检测数据的结构化整合，解决传统系统“数据碎片化、风险评估模糊”的问题，为灾难预警领域提供可复用的“数据-算法-系统”技术框架；

采用“规则逻辑特征+余弦相似度计算”的混合判定方法——既通过规则特征确保预警标准的专业性，又通过数据驱动的相似度匹配提升复杂场景适应性，实现“精准性+灵活性”的双重保障，为后续其他灾害（如泥石流、地震次生灾害）预警系统设计提供参考。

五、 结论与展望

（一）研究结论

本研究通过对无人机技术在洪涝应急响应中的实际应用，并搭建了“图像驱动-知识图谱赋能”(Image-KG4Flood)框架：结合使用多模态数据处理和知识图谱构建技术，开展了针对洪涝灾情快速分析以及相关应急措施的研究，取得以下关键结论：

（二）多模态数据采集

运用无人机搭载多类型传感器设备，实现在洪涝应急救援现场对灾害图象等多模态数据的高效、立体化采集，为灾情分析提供全面、实时的数据基础，并为灾情应急决策提供了坚实的数据支撑。

（三）多模态数据处理

本研究使用 Python生态(PyTorch、OpenCV)技术，对灾害图片进行自动化快速信息处理；通过 Labellmg 高效完成图像标注，与作为目标检测工具的 YOLOv5模型相配合，并利用 Fast-RCNN和 YOLO算法精准识别检测受灾区域中的目标信息（如道路淹没区域、受困人员等关键要素）、提取洪水淹没范围及其覆盖度，并还原关键地物之间的位置关系，最后生成一目了然的检测结果图，实现灾情关键信息的智能化处理，大幅提升了信息提取的处理效率，增强了灾情评估的客观性与准确性。^[5]

（四）知识图谱应用

借助 Neo4j图数据库，利用 pandas库对前期处理得出的结构化灾情数据（如洪水覆盖度、目标数量、物体类型）生成的 Excel结果表的进行读取与处理，构建 Neo4j知识图谱，依托图谱的查询与推理接口，将分析结果与系统初始化的标准样本的相似度进

行计算，从而实现智能输出灾害预警等级（从 A 到 E 共五个等级）以及应急措施的智能匹配与分析报告的输出，为指挥决策提供科学、直观的处理依据，有效推动应急响应从经验化转向为更加精确的数据化。

（五）研究的局限性

尽管本研究取得了一定成果，但在实际应用的过程中仍然发现若干局限性，具体包括：

（六）目标识别能力有限

当前无法识别出场景中除目标信息、洪水覆盖度以及相关位置关系以外的其他信息，此外，在高密度目标场景下，有时无法识别出所有目标，识别完整性以及高精度性有待提高。

（七）洪水覆盖度测算精度不足

经过多模态数据处理后所获取的洪水覆盖度精确度低，无法输出分度值在 10% 以下的值，限制了对轻微淹没情形的判断能力。

（八）知识图谱应急措施生成的实用性存在不足

知识图谱构建后得到的应急措施还不够具体，未能实现与地方应急预案的深度融合，不能大范围使用。

上述局限性在一定程度上影响了本研究结论的普适性与可靠性，也为后续研究指明了改进方向，未来需通过算法优化、多种信息融合与真实场景验证等手段进一步加以完善。

（九）研究展望

基于本研究的结果与发现，我们初步构建了一个利用多模态数据进行洪水灾害应急分析的技术框架。然而，这仅仅是利用智能技术进行灾害救援的开始，未来的研究还有更广阔的发展空间，可以从对以下几个关键方面深入展开，推动该技术在多维度的发展。

（十）在数据采集的维度上

应解决数据采集的局限问题。未来，在采集多模式数据时，可以极大地增加传感器类型与数据源，引入视频、音频、热成像、无人机摄影等的传感器网络，使得构成一个天地一体化的

立体感知的体系。视频数据能提供洪水流速、流向的动态直观信息；音频数据可用于识别求救呼叫、洪水冲击建筑物的异常声响，为判断灾情严重程度提供辅助线索；同时部署于救灾现场的无人机群，能够深入危险区域并且传回实时的高清影像。通过融合这些数据，我们可以实现高度逼真地重现灾害场景，为高层决策提供更深度信息。

（十一）在数据处理的维度上，实现从“识别”到“精确量化”的跨越

目前的技术只能较好的识别出洪水覆盖度，但在覆盖深度、流速流量、淹没体积等关键参数的处理上还有较大提升空间。随着深度学习的领域发展，未来研究需致力于提高数据处理的自动化水平与准确性，这依赖于新的人工智能算法的突破，特别是深度学习与物理模型相结合的探索，可尝试更新的如 YOLO11 或基于 Transformer 的一些模型，使得在识别精度上和速度上实现更大的突破。^[6]

（十二）在应用场景的维度上，应从“单一灾种”拓展到“全灾种应急”

本研究聚焦于洪水灾害，但其核心技术——多模态数据处理、构建知识图谱具有较强的迁移性与通用性。未来研究可以打破技术壁垒，将成熟的解决方案向地震、山体滑坡、森林火灾、台风等各类自然灾害延伸。通过各种跨灾种的技术拓展与适配，最终目标是构建一个“智慧大应急”平台，实现从灾前预警、灾中响应到灾后恢复的全过程、多灾种智能化管理。

所有的研究将朝一个共同的方向努力：构建一个更智能、更全面、更精准的下一代自然灾害应急救援技术体系。这一体系能够依托强大的算法，在大量多模态数据中自动挖掘关键信息，生成最优的救援方案与资源调度策略；能够为现场指挥员、政府决策者乃至社会公众提供个性化、可视化的决策支持与预警信息，最终极大提升全社会的防灾减灾救灾能力，最大限度地保护人民的生命财产安全。^[7]

参考文献

[1] 谭平, 刘惠娜, 韦昌法. 基于 BiLSTM-CRF 和 Neo4j 的脾胃病知识图谱构建 [J]. 科学技术与工程, 2025, 25(22): 9436-9444.
[2] 马婷. 基于 Neo4j 图数据管理系统的清热类中成药知识图谱的建立及应用 [D]. 宁夏医科大学, 2025. DOI: 10.27258/d.cnki.gnxyc.2025.000332.
[3] 史政一, 吕君可, 黄弘. 基于 Neo4j 的城市地下管道信息知识图谱构建研究 [J]. 中国安全生产科学技术, 2024, 20(06): 5-10.
[4] 李宗柱, 宋绍剑, 李修华. 一种基于 YOLOv5 的农业害虫检测方法 [J]. 植物保护, 2025, 51(01): 111-122. DOI: 10.16688/j.zwbh.2024089.
[5] 孙华宇. 基于深度学习电动车驾驶员头盔佩戴检测研究 [D]. 沈阳理工大学, 2023. DOI: 10.27323/d.cnki.gsgyc.2023.000530.
[6] 蒋润康. 基于深度学习的电动车骑行人员头盔佩戴检测系统 [D]. 宁夏大学, 2022. DOI: 10.27257/d.cnki.gnxhc.2022.001825.
[7] 翁云龙. 基于深度学习的水面漂浮物检测方法研究 [D]. 浙江科技大学, 2024. DOI: 10.27840/d.cnki.gzjkj.2024.000163.

时空大数据与人工智能助力地学领域复杂系统研究

于龙龙, 李根

成都大学 计算机学院, 四川 成都 610106

DOI:10.61369/ME.2025050035

摘 要 : 人类正面临全球气候变化与资源能源紧缩等“地学复杂系统”的叠加挑战。时空大数据在多源要素、跨尺度耦合与过程表征方面具有天然优势,但其价值释放仍受数据孤岛、质量不稳和算力门槛所限。本文系统梳理了时空大数据与人工智能在地学复杂系统研究中的应用现状、关键挑战与发展趋势,重点阐释从时空数据驱动到智能分析、再到平台化整合的技术迭代逻辑。针对数据瓶颈、协同门槛与工程实施等问题,提出以高性能计算、云计算与时空大数据平台为支撑的解决思路,并展望以时空图神经网络为代表的前沿技术融合方向。研究旨在为依托时空大数据的地学复杂系统研究提供可操作的理论框架与实践路径,推动其战略价值的充分释放。

关 键 词 : 时空大数据; 高性能计算技术; 机器学习; 时空图神经网络

Advancing Geoscience Complex-Systems Research with Spatiotemporal Big Data and AI

Yu Longlong, Li Gen

College of Computer Science, Chengdu University, Chengdu, Sichuan 610106

Abstract : Humanity faces compounding challenges in “geo-complex systems,” including global climate change and tightening resource and energy constraints. Spatiotemporal big data offers inherent advantages for integrating multi-source factors, linking processes across scales, and characterizing system dynamics, yet its potential remains constrained by data silos, quality instability, and computational barriers. This paper provides a systematic review of the current applications, key challenges, and emerging trends of spatiotemporal big data and artificial intelligence in geo-complex systems. We emphasize the technological progression from data-driven spatiotemporal analysis to intelligent modeling and, ultimately, platform-level integration. To address bottlenecks in data quality, cross-domain collaboration, and engineering deployment, we propose solution pathways grounded in high-performance computing, cloud computing, and spatiotemporal data platforms, and we outline convergence directions involving frontier methods such as spatiotemporal graph neural networks. The study offers an operational theoretical framework and practical roadmap for research anchored in spatiotemporal big data, facilitating fuller realization of its strategic value.

Keywords : spatiotemporal big data; high-performance computing; machine learning; spatiotemporal graph neural networks

引言

数据的根本使命在于消除不确定性。相较传统数据,时空大数据兼具时间与空间属性,在刻画地学系统的多尺度耦合过程方面更具优势,可以更为显著地消除地学复杂系统的不确定性。时空大数据、人工智能与物联网等技术的协同爆发为人类解决地学复杂系统中与自身命运紧密相关的重大问题提供了前所未有的基于。然而,时空大数据在地学复杂系统的应用当前仍面临数据、算力与技术的多维制约和关键挑战。本文系统探讨了时空大数据与人工智能在地学复杂系统研究中的应用现状、关键挑战和发展趋势,重点分析了从时空大数据驱动到智能分析再到时空大数据平台整合的技术迭代逻辑。同时,针对数据瓶颈、协同门槛以及技术实施等挑战,提出高性能计算、云计算和时空大数据平台等技术解决方案,并展望了时空图神经网络等前沿技术的融合趋势。

作者简介:

于龙龙,男,汉族,四川成都人,博士,成都大学计算机学院,数据科学与大数据系讲师。研究方向:时空大数据分析;

李根,男,汉族,四川成都人,博士,成都大学计算机学院,数据科学与大数据系讲师。研究方向:时间序列分析与人工智能应用。

一、时空大数据发展的新趋势

（一）时空大数据的巨大潜能

1. 时空大数据的爆发

广义上讲，具有时间和空间属性的数据就属于时空大数据，这一类数据体量极其巨大。从狭义上讲，时空大数据是带有时间信息的地理数据，包括长达40余年的遥感观测数据、地理空间数据集、生态监测数据等。随着带有时空属性的监测和数据记录平台、终端设备、传感器和物联网设施的爆发式增长，时空大数据会以越来越惊人的速度持续堆积。目前来看，时空大数据的潜能远远未能充分释放，特别是在地学极复杂系统的研究方面，例如全球碳循环响应机理结构、极端气象事件预测以及地球资源智能管控方面，这些已积累的时空大数据是解决这些领域关键挑战的战略性资源^[1]。

2. 既有模式的挖掘

通过学习已有的时空大数据中蕴含的特定模式和规律，可以为我们了解地学系统的复杂机理和演变规律提供指导，从而在关系人类命运的一系列地学复杂系统关键科学问题上提供重要的借鉴和参考，这种参考意义不仅包括对历史数据的研究得出模式、对现有数据分析得出现状，更包括对未来趋势的预判、事件的预测以及现实决策的指导。例如，研究人员通过研究新型的叶绿素荧光信号数据，了解全球植被生产力动态，进一步研究植被—气候响应机制，从而助力全球碳循环机理的研究以及双碳目标的实现^[2]。

3. 与大数据前沿技术的整合

时空大数据具有体量大、模态多、更新快与空间结构复杂等特征，超出了传统集中式与批处理范式的承载能力。近年来，分布式与并行计算、云原生与容器编排、以及流批一体的计算框架，为高效处理提供了可行路径：在存储层，数据湖/湖仓一体与列式存储结合时空索引（如空间填充曲线与瓦片化策略），显著缩短检索与扫描路径；在计算层，Flink/Spark 等支持增量计算与窗口化聚合，可在事件发生时保持模型与特征的在线更新，并通过 GPU/TPU 加速缩短训练—推理闭环；在治理层，元数据目录、语义本体与数据血缘使跨源数据“可发现、可解释、可追溯”，为跨任务复用与结果审计奠定基础。与此同时，云计算的弹性供给与边缘侧“近源计算”可按需调度算力，降低回传与等待成本，配合无服务器（Serverless）与按量计费机制，在时效与预算之间取得可验证的平衡。进一步地，特征库与模型注册中心强化了特征—模型—服务的一致性，支撑从离线验证到在线发布的 MLOps 流程；而联邦学习与差分隐私等合规技术，为跨机构、跨区域的数据协作提供了可执行的安全边界。综合来看，这些前沿技术的协同应用，使“数据—算法—平台”形成可迭代的闭环，从而将时空大数据的“可用性”转化为面向复杂地学问题的“可用能力”。

（二）人工智能和图神经网络的应用

人工智能助力时空大数据分析，并在数据质量改善、深层特征提取、复杂模式捕获等方面表现突出。在地学极复杂系统的研

究方面，二者的联合使得一些在单一学科和传统数据分析模式中很难解决的问题迎来空前的机会。如重大气象灾害预测，碳循环响应机制分析等。其中，图神经网络是一种能够处理图结构和时空大数据的深度学习模型，近年来已成为新型非显式特征学习的研究热点。与传统神经网络主要处理规则化数据不同，图神经网络擅长处理具有复杂拓扑结构的非欧几何数据，例如社交网络、知识图谱、生物分子结构和交通网络等。图结构中的节点表示实体，边表示实体间的关系，图神经网络通过学习节点与其邻居节点之间的相互作用，充分利用图的结构信息，从而实现对复杂数据的有效建模。早期的图神经网络主要包括图卷积网络和图注意力网络等。在时空大数据领域，图神经网络被用来分析遥感图像中地物的空间关系。随着时空数据的重要性不断提升，研究者们开始将图神经网络应用于时空数据分析中，发展出时空图神经网络等前沿技术，进一步推动了时空大数据在地学复杂系统研究中的应用。

二、时空大数据潜能充分释放的挑战

时空大数据在破解地学复杂系统的关键重大问题上的价值日益凸显，但其价值开发和潜力释放的速速明显不及其数据量的爆发速度。重要原因在于如下几方面的挑战。

（一）数据质量瓶颈

时间分辨率、空间分辨率、时间跨度与空间覆盖的不匹配，直接影响单源数据的应用可行性与多源数据的时空一致性；云雨遮挡、轨道漂移与器件老化会在数据生成端引入系统误差；地表异质性与观测噪声进一步放大不确定性；人类活动数据还伴随隐私约束与抽样偏倚。若不在数据源与治理环节及时处置，后续建模将不可避免地积累偏差并传导至决策层。可行对策包括：跨传感器交叉定标与偏差订正、在物理/统计一致性约束下的时空插补与重建、质量标注与置信度评估，以及对关键要素实施持续的漂移监测与再采样校正。此外，针对现有数据集，依托人工智能和高性能计算进行数据质量优化也是一大迫切需求。

（二）数据协同门槛

不同数据在组织模式与格式上的差异显著，且常伴随坐标基准/投影不一致、时间基准与采样策略不统一、接口协议异构，以及数据许可与访问控制体系各自为政等问题。这些因素叠加，造成语义断裂与流程碎片化，使跨域协同成本长期居高、经验难以迁移。为此，在技术层面需要建立统一的要素本体与中间语义层，完善元数据编目、特征/标签接口、数据血缘与版本化管理，并实现跨库可发现与权限协同；在制度层面需要明确共享协议、合规边界与评价激励，形成稳定的协作机制。更为关键的是，面向地学复杂系统的综合问题，研究者需具备问题拆解与跨语域映射能力，并能在学科模型与工程实现之间完成有效整合。

（三）时空大数据高效驱动的技术和成本问题

时空大数据面向采集、预处理、统计学习、智能建模与结果分析的全生命周期提出海量且连续的计算需求，传统集中式方案难以同时满足低延迟与高吞吐。实践中，“时效—稳定—成本”

的权衡成为首要约束：一方面，在线更新、漂移监测与多源对齐要求弹性算力与可观测机制；另一方面，长期存储与频繁重算又显著抬高预算。此外，跨学科地学模型与 AI 算法的工程化落地存在较高门槛，实时性要求（例如分钟级预警）进一步放大了调度、容错与一致性控制的复杂度。

三、未来发展趋势与战略建议

（一）时空图神经网络

时空数据具有复杂的空间和时间依赖性，例如气象数据、交通流量、遥感观测等，传统机器学习方法难以充分捕获这种复杂的时空关联性。随着时空数据资源战略价值的不断提升与日益凸显，研究者们发展出时空图神经网络（Spatiotemporal Graph Neural Networks, ST-GNN）。ST-GNN 通过在图神经网络中引入时序建模机制，如循环神经网络、长短时记忆网络以及时序卷积网络，可以更好地捕获数据的时空动态特征。ST-GNN 模型利用注意力机制更好地捕获时空数据中的关键特征。这些模型在交通预测、环境监测、空气质量预报等领域取得了优异的效果。ST-GNN 在环境、生态系统监测等领域的成功应用，表明其在多源数据融合、时空数据建模和数据重建等方面具备巨大潜力。时空图神经网络在未来时空大数据分析，特别是在地学复杂系统关键重大问题的解决中，必然发挥越来越重要的作用^[3]。

（二）高性能计算技术的快速发展

并行计算、分布式计算、云计算平台和超级计算资源的使用门槛降低，越来越普及。Google colab、阿里云、国家超算中心等，为海量时空大数据的高效处理、人工智能技术的应用提供了计算实现框架。极端事件对延迟与吞吐提出并行要求。可行策略包括：构建弹性算力池，将按需 / 抢占式实例与本地 / 云端算力统一编排；实施成本感知调度，以紧迫度、SLA 与预算为多目标优化约束；推进数据近源计算与流批一体，在边缘侧完成预处理与快速筛选，核心计算在云 / 超算侧完成；建立可观测性体系，将延迟、吞吐、错误率与模型漂移纳入统一监控，并支持灰度发布与滚动升级^[4]。

（三）时空大数据平台

将时空大数据资源、高性能计算框架、云计算环境和先进的

人工智能技术进行平台化整合，不断降低时空大数据智能分析的门槛，已成为一大必然趋势。以 GEE 为代表的云计算平台，已经显示出了突破传统时空大数据分析模式和技术瓶颈的巨大优势，极大促进了对地学复杂系统关键问题的研究。LuoJia-net 等新兴时空大数据平台进一步整合了地学算子与模型库，能更好地服务于地学复杂问题的解析。在时空大数据平台的工程化落地方面，如下的问题需进一步优化。一是接口标准化（OGC/WMS/WFS），以解决接入与编排的一致性。二是生态分层（数据—算子—模型—应用），以支撑能力复用与组合创新；三是可追溯治理（血缘与版本化管理），以确保结果审计与合规。在多租户、多任务场景下，还需提供更加智能的资源隔离、配额与成本感知能力。时空大数据平台不仅需要引入人工智能模型接口和应用场景，其本身的构建和运行也可以借助人工智能模型来优化^[5]。

（四）更为紧密的学科交叉

地学复杂系统本身具有高度的学科交叉性，单一视角和单一领域的的数据难以有效结构其中的复杂机理，因此学科的进一步交叉融合是必然趋势。通过各学科领域数据集的协同以及前沿的人工智能方法如时空图神经网络的应用，以及高性能计算和云计算平台的赋能，时空大数据这一战略资源才能更好地为人类解决地学复杂系统中与自身命运密切相关的重大问题服务。

四、结论与展望

时空大数据的爆发式增长与人工智能的快速演进，为地学复杂系统研究提供了前所未有的机遇。伴随高性能计算、云计算与时空大数据平台的迭代升级，数据获取、治理与分析的时间与工程门槛持续下降，方法体系日趋成熟并可复制到更多场景。尽管数据质量、跨域协同与实时部署仍构成关键挑战，三者与算力调度、隐私合规的协同优化，有望在“时效—稳定—成本”之间形成可验证的平衡。面向未来，应推进机理—数据融合的算法体系、建立跨区域可复现开放基准，完善从数据到服务的可追溯工具链与人才 / 组织协作机制。可以预期，时空大数据、人工智能与高性能计算的深度整合，将显著提升人类在气候变化、极端灾害与资源紧缩等重大议题上的主动性与应对能力。

参考文献

- [1] 王家耀, 王利军, 程士源. 时空大数据及其应用 [J]. 测绘科学技术学报, 2024, 40(04): 331-337+391.
- [2] Yu L, Wen J, Chang C Y, et al. High-resolution global contiguous SIF of OCO-2[J]. Geophysical Research Letters, 2019, 46(3): 1449-1458.
- [3] Wu Z, Pan S, Chen F, et al. A comprehensive survey on graph neural networks[J]. IEEE transactions on neural networks and learning systems, 2020, 32(1): 4-24.
- [4] 李宇航, 徐志伟, 刘燕华, 等. 人工智能时代的地理科学前沿问题探析 [J]. 地理学报, 2024, 79(10): 2409-2424. DOI:CNKI:SUN:DLXB.0.2024-10-001.
- [5] Tamiminia H, Salehi B, Mahdianpari M, et al. Google Earth Engine for geo-big data applications: A meta-analysis and systematic review[J]. ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing, 2020, 164: 152-170.

基于边缘计算对驾驶人状态监测系统的优化设计

刘若涵¹, 李战东¹, 刘思源², 韦周慧¹, 赵安阳¹

1. 沈阳航空航天大学民用航空学院, 辽宁 沈阳 110136

2. 沈阳航空航天大学材料科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110136

DOI:10.61369/ME.2025050036

摘 要 : 针对我国道路交通安全中疲劳驾驶引发事故的严峻问题, 本文设计了一套基于边缘计算的驾驶人监测优化系统。该系统以头面部特征为核心监测依据, 通过改进的 MTCNN 模型实现人脸关键点精准定位, 结合轻量化 AlexNet 模型与 Informer 框架完成驾驶人状态识别与疲劳检测, 并依托 ErgoAI Server 边缘服务器实现数据实时处理与预警。实验基于 NTHU-DDD 数据集验证, 实验验证表明, 系统在复杂驾驶环境下仍具备高准确率与快速响应能力, 能为驾驶安全提供有力保障, 同时为绿色智慧交通发展提供技术支撑。

关 键 词 : 驾驶人监测; 边缘计算; 疲劳检测; MTCNN 模型; Informer 框架

Optimal Design of a Driver Condition Monitoring System Based on Edge Computing

Liu Ruohan¹, Li Zhandong¹, Liu Siyuan², Wei Zhouhui¹, Zhao Anyang¹

1. School of Civil Aviation, Shenyang Aerospace University, Shenyang, Liaoning 110136

2. School of Materials Science and Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang, Liaoning 110136

Abstract : Given the significant safety risks posed by fatigue driving in road traffic within China, this study proposes a driver condition monitoring and optimization system leveraging edge computing technology. The system utilizes head and facial features as primary indicators for monitoring, achieving precise localization of facial key points through an improved Multi-task Cascaded Convolutional Neural Network (MTCNN) model. By integrating a lightweight AlexNet model with the Informer framework, the system enables efficient driver state recognition and fatigue detection. Real-time data processing and early warning functionalities are implemented using the ErgoAI Server, an edge computing platform. Experimental validation was conducted using the NTHU-DDD dataset, demonstrating that the proposed system maintains high accuracy and rapid response performance even under complex driving conditions. These capabilities offer robust support for enhancing driving safety and provide technical insights for the advancement of green and intelligent transportation systems.

Keywords : driver monitoring; edge computing; fatigue detection; MTCNN model; Informer framework

引言

截至2024年6月底, 我国机动车保有量达4.4亿辆, 汽车3.45亿辆, 机动车驾驶人5.32亿人, 道路交通安全风险随机动车保有量增长持续上升。尽管道路交通事故死亡人数逐年下降, 但基数大、绝对死亡人数多的问题仍未根本解决, 其中疲劳驾驶是重要诱因之一。疲劳会使驾驶人反应时间从正常的0.3-0.5秒延长至1秒以上, 导致制动距离大幅增加, 同时引发注意力分散、路况判断失误等问题, 严重威胁生命财产安全。

目前国内外针对驾驶人状态监测方法主要分为以下几类:

基于机动车行为特征的监测方法: 李伟等^[1]将驾驶员参与模拟驾驶试验时产生的方向盘操作数据及车辆道路偏移量数据作为模型训练的数据集, 采用 BP 算法对神经网络模型进行训练, 最终实现对驾驶员疲劳驾驶行为的判别。

基于驾驶员生理特征的监测方法: 驾驶员生理特征包括心电信号 (ECG)、心率、脑电信号等, 马世伟等^[2]通过综合分析被试者的脑电信号数据, 并结合问卷调查结果以降低个体差异带来的影响, 证实采用脑电检测技术能够客观判定驾驶员的疲劳状态。

基于面部表情和图像处理技术监测的方法试验成本低, 对驾驶员的干扰程度也低。胡习之等^[3]从实车运行数据集中提取驾驶员面部特征参数, 随后采用优化后的 SSD 算法与连续自适应均值漂移跟踪算法, 完成对人脸区域的精准检测。SESHADRI 等^[4]通过视频画面

提取面部感兴趣区域特征，并根据头部姿势变化，使用原始像素和方向梯度直方图（Histogram of oriented gradient, HOG）特征结合各种分类器。RAHMAN等^[9]为规避传统有线传感器的局限性，采用非接触式摄像机采集人脸视频图像以提取生理参数。Bai等^[10]提出基于双流时空图卷积网络的驾驶人疲劳检测方案，该方案先通过面部标志检测技术从实时视频中提取驾驶人面部特征点，再利用双流时空图卷积网络进行分析处理，输出疲劳检测结果，准确率可达92.70%。Tamanani等^[7]的研究则采用基于 Haar 特征的 Cascade 分类器，从输入视频流中截取人脸图像并捕获眼睛、嘴巴等关键面部特征，随后通过 LeNet-5 模型进行二分类运算，确定驾驶人是否处于疲劳状态。基于机动车行为特征方法易受外部环境与驾驶水平影响；基于生理特征方法需专业设备，对驾驶人干扰较大；基于面部表情与图像处理方法虽成本低、干扰小，但在实时性与鲁棒性上仍有提升空间。为此，本文融合边缘计算、人工智能与大数据技术，设计优化驾驶人监测系统，旨在实现疲劳驾驶的精准、实时预警，降低交通事故发生率，为智能交通发展提供新路径。

一、系统设计基本思路

（一）监测依据确定

在众多可用于监测驾驶人状态的信息中，选择面部特征作为主要监测依据，相较于采集心电信号、脑电信号等生理特征需要专业且复杂的设备，通过摄像头采集头部图像更为简便，成本更低，对驾驶员的干扰也更小。

（二）数据采集与特征选取

我们将通过模拟驾驶试验得到具有明显规律的驾驶员面部特征。本试验将搭建具备环绕屏幕、转向盘、油门踏板、制动踏板、离合器踏板、换挡操纵杆、可调节座椅、透明封闭舱、采集摄像头的模拟驾驶室，并按照真实车型设定了模拟驾驶系统的加速度、可视范围、反馈力度等相关参数，以保证接近真实的驾驶体验。试验招募的被试人员均为驾龄超过3年、具备丰富驾驶经验的人员，并有过疲劳驾驶的经历。试验选用简单场景，驾驶环境参考了沈阳某试验场的道路，其中直道长度为100 km，模拟驾驶车速限制为最高100 km/h，样本可保持长达1 h的直线行驶。

（三）人脸关键点定位与区域提取

驾驶人面部关键点的定位工作，依托经调整的 MTCNN 模型开展，该模型包含三个关联子网络。结合驾驶人面部在视频画面中的像素占比情况，运用图像金字塔相关技术实现不同尺度下的人脸检测。完成关键点定位后，根据三庭五眼的人脸比例关系^[8]划分面部区域。其中，“三庭”是将人脸横向大致分为三个均等部分，对应从额头到下巴的不同区域；“五眼”则是把人脸纵向大致分为五个均等部分，对应从面部左侧到右侧的不同区域。设左眼坐标为 $m_1(x_1, y_1)$ ，右眼坐标为 $m_2(x_2, y_2)$ ，双眼间距为 $d_1 = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}$ ，眼部区域宽度与高度均设为 $0.5d_1$ ；设左嘴角坐标为 $n_1(\alpha_1, \beta_1)$ ，右嘴角坐标为 $n_2(\alpha_2, \beta_2)$ ，嘴角间距 $d_2 = \sqrt{(\alpha_1 - \alpha_2)^2 + (\beta_1 - \beta_2)^2}$ ，嘴部区域宽度与高度均设为 d_2 。

（四）模型训练及初始化

为保证模型训练所用数据的可靠性，实验设计了多组驾驶模拟测试，每组测试持续一定时长，过程中通过摄像设备收集驾驶人的面部图像信息。测试发现，驾驶人出现疲劳状态时，部分面部行为相关的指标会发生明显改变，这一现象的合理性得到确认后，这些指标便被用作模型训练的初始输入数据。

（五）状态识别

在车辆本地的相关设备中，部署了轻量级的神经网络模型^[9]，用于实时处理驾驶人的面部特征信息，该模型是在原有 AlexNet 基础上优化而来。考虑到面部中眼睛、嘴巴等区域在图像中像素占比较小，对模型的输入尺寸进行了压缩；同时调整了卷积核的规格，优化了池化操作的相关参数，避免特征提取过程中出现尺寸异常问题。

（六）疲劳检测

Informer^[10]是 Transformer 的改进模型，疲劳检测工作主要基于 Informer 相关框架实现，该框架是对原有 Transformer 模型的优化版本，包含编码与解码两个核心部分，分别承担序列依赖关系捕捉与序列检测的任务。具体流程上，先通过检测网络获取驾驶人面部的空间信息，再将其输入框架中进行时序数据分析，让模型通过学习面部特征的时空关联，判断驾驶人是否处于疲劳状态。由于眼部特征与嘴部特征的时空变化存在差异，使用 Informer-A 和 Informer-B 模型进行组合^[11]，二者分别处理眼部特征与嘴部特征，形成并行结构。

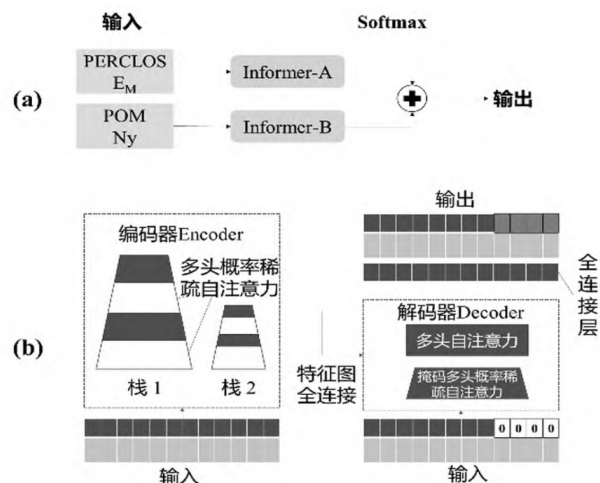


图1 模型框架

（七）预期实验数据集

实验选用公开的 NTHU-DDD^[12]数据集，用于人脸关键点定位相关测试。该数据集包含多位不同背景受试者在模拟驾驶场景下的视频信息，涵盖了不同光照条件下，驾驶人正常驾驶及出现

打哈欠、眨眼等多种行为的相关数据，能够为模型验证提供多方面的测试样本支持。

二、边缘计算技术应用

（一）边缘计算架构搭建

本项目选用津发科技的 ErgoAI Server 人因智能边缘服务器搭建边缘计算架构。该服务器单核心模组算力最高达每秒 3958 万亿次运算，具备强大计算与数据处理能力。在车辆端部署此服务器，能实时收集车内摄像头、传感器获取的驾驶人面部图像、生理数据等。其高速接口可接入各类传感器，确保数据快速稳定传输，为后续实时分析处理提供有力支撑。

（二）数据处理与分析优化

借助边缘服务器的强大算力，运用先进的机器学习、深度学习算法，对采集的多源数据进行实时处理。通过优化算法，能更精准地识别驾驶人闭眼、打哈欠、表情变化等细微动作，提升状态监测的准确性与可靠性。同时，服务器每秒高达 3958 万亿次的运算速度，可实现对大量数据的快速处理，满足系统实时性要求。

（三）与云端协同工作

边缘计算与云端采用协同工作模式。边缘端负责实时处理和分析驾驶场景中的关键数据，进行初步的驾驶人状态判断和预警。对于一些复杂的分析任务，如长期驾驶行为趋势分析、跨车辆数据综合研究等，边缘端将经过筛选的关键数据上传至云端。云端利用其强大的存储和计算资源，进行深度数据挖掘和分析，为交通管理、车辆设计优化等提供决策支持。

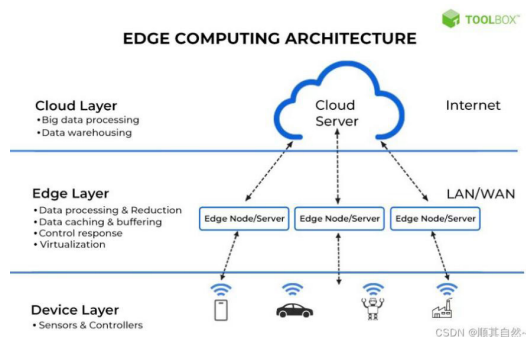


图2 边缘计算流程

三、系统创新点

（一）技术融合创新

边缘计算实现数据就近处理，减轻云端负担，降低传输延迟，保障视线追踪实时性。人工智能算法（改进 MTCNN、轻量化 AlexNet、Informer）实现驾驶人状态精准识别。大数据分析为监测模型优化与交通管理决策提供依据，多技术协同突破传统监测方法的局限，提升系统整体性能。

参考文献

- [1] 李伟, 何其昌, 范秀敏. 基于汽车操纵信号的驾驶员疲劳状态检测 [J]. 上海交通大学学报, 2010, 44 (2): 292-296.
- [2] 马世伟, 王泽敏, 吕宝粮. 基于脑电信号的动车组司机疲劳状态评估技术研究 [J]. 铁路节能环保与安全卫生, 2021, 11 (4): 43-49.

（二）模型优化创新

改进 Informer 模型用于疲劳检测，利用稀疏自注意力机制结合面部特征时间特性进行判别，更贴合疲劳发生的动态过程；采用两组 Informer 模型并行处理眼嘴特征，提升检测准确性。

（三）应用领域拓展创新

探索新质生产力赋能绿色交通，通过精准监测驾驶人状态，及时预警疲劳、分心情况，避免驾驶失误导致的能源浪费，降低燃油消耗；将监测数据与智能交通系统融合，优化交通信号灯配时，引导车辆合理行驶，提高道路通行效率，减少污染排放；为智能网联汽车提供关键状态信息，助力智能协同驾驶与自动驾驶功能升级，推动汽车产业绿色智能化转型。

四、系统应用说明与前景

（一）使用说明

系统通过摄像头、传感器自动采集驾驶员面部表情、眼部动作等信息，无需用户额外操作；采集的数据传输至车辆端部署的 ErgoAI Server 边缘服务器，经前述算法处理后判断驾驶员状态；若判定为疲劳或分心，系统通过车内警报装置及时提醒驾驶员，全程自动化运行，操作便捷。

（二）技术特点与优势

改进 MTCNN 实现面部区域精准定位，轻量化 Informer 框架分析时空特征，疲劳检测准确率高，能有效区分正常与疲劳驾驶状态。边缘计算架构下，高算力服务器实现数据本地实时处理，减少传输延迟，系统响应迅速，可在驾驶员出现疲劳迹象时立即预警。系统能适应不同光照、驾驶场景，多模态数据融合解决单一特征监测的局限性。

（三）适应范围与推广前景

适用于各类民用车辆，包括轿车、客车、货车等，可保障日常出行、公路物流运输安全；同时可应用于智能网联汽车研发测试，为自动驾驶功能的安全验证提供驾驶员状态数据支持。随着汽车智能化、网联化发展，市场对驾驶安全监测系统的需求持续增长。未来，系统可进一步拓展至航空、航海等领域的人员状态监测，推广前景广阔。

六、结论与展望

本文设计的基于边缘计算的驾驶人监测优化系统，通过改进的图像处理算法与边缘计算架构，实现了驾驶人疲劳状态的精准、实时监测与预警，有效解决了传统监测方法在实时性、鲁棒性上的不足。实验验证表明，系统在复杂驾驶环境下仍具备高准确率与快速响应能力，能为驾驶安全提供有力保障。未来，将进一步优化模型算法，提升系统在极端天气、复杂路况下的适应性；加强与汽车企业、交管部门的合作，推动系统产业化应用，助力智能交通体系建设，为道路交通安全贡献更多力量。

- [3]胡习之, 黄冰瑜. 基于面部特征分析的疲劳驾驶检测方法[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(4): 1629-1636.
- [4]SESHADRI K, JUEFEI-XU F, PAL D K, et al. Driver cell phone usage detection on strategic highway research program (shrp2) face view videos [C]//Computer Vision and Pattern Recognition. Proceedings of the IEEE Conference, California: the Computer Vision Foundation, 2015: 35-43.
- [5]RAHMAN H, AHMED M U, BARUA S, et al. Non-contact-based driver's cognitive load classification using physiological and vehicular parameters[J]. Biomedical Signal Processing and Control, 2020, 55(10): 1-13.
- [6]BAI J, YU W, XIAO Z, et al. Two-Stream Spatial-Temporal Graph Convolutional Networks for Driver Drowsiness Detection[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2021, 52(12): 13821-13833.
- [7]TAMANANI R, MURESAN R, AL-DWEIK A. Estimation of Driver Vigilance Status Using Real-Time Facial Expression and Deep Learning[J]. IEEE Sensors Letters, 2021, 5(5): 1-4.
- [8]CHEN L J, PAPANDREOU G, KOKKINOS I, et al. Semantic image segmentation with deep convolutional nets and fully connected CRFs[C]//Proceedings of the 3rd International Conference on Learning Representations. San Diego, USA: [s. n.], 2014: 1-14.
- [9]姜平, 杨欣, 胡辑伟, 等. 基于边缘计算的疲劳驾驶检测方法[J]. 计算机工程, 2021, 47(7): 13-20+29. LOU P, YANG X, HU J W, et al. Fatigue Driving Detection Method Based on Edge Computing[J]. Computer Engineering, 2021, 47(7): 13-20+29.
- [10]廖冬杰. 基于 Dlib 和变种 Transformer 的哈欠检测方法[J]. 汽车技术, 2023(3): 42-48. LIAO D J. Yawn Detection Method Based on Dlib and Variant Transformer[J]. Automobile Technology, 2023(3): 42-48.
- [11]刘强, 谢谦, 方玺, 等. 基于并行短时面部特征的驾驶人疲劳检测方法研究[J]. 汽车技术, 2024, (05): 15-21. DOI:10.19620/j.cnki.1000-3703.20230617.
- [12]WENG C H, LAI Y H, LAI S H. Driver Drowsiness Detection via A Hierarchical Temporal Deep Belief Network[C]// ACCV Workshops. Taipei, China: Springer International Publishing, 2017.

