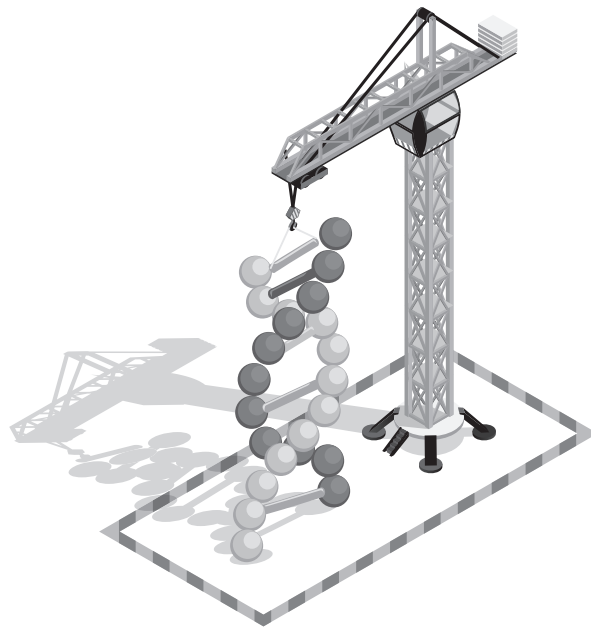


工程 研究与应用

Engineering Research and Application



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

Editors-in-Chief

Xiaolei Ju

China Architectural Design and Research Institute, China

Meilian Chao

Heze Dehe Construction Engineering Group Co., LTD.

Editorial Board Member

Xianbo Tu

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

Neda Abbasi

School of Engineering and Technology

Tanvir Ahamed

School of Engineering and Technology

Zhen Xu

Zhongtong Bus Holding Co., LTD.

Yang Li

Wuhan Aviation Port Development Group Co., Ltd.

工程研究与应用

Engineering Research and Application

第3卷 第11期 2025年11月刊

主管 ART AND DESIGN PRESS INC.

主办 ART AND DESIGN PRESS INC.

编辑 《工程研究与应用》编辑部

ISSN(O): 2993-2742

ISSN(P): 2995-3154

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。



工程科学 | ENGINEERING SCIENCE

- | | | |
|-----|--|---|
| 001 | 公路工程交通安全设施的施工质量管理分析
Analysis of Construction Quality Management for Traffic Safety Facilities
in Highway Engineering | 卢金元
Lu Jinyuan |
| 004 | 高原地区公路施工适应性技术研究
Research on Adaptive Construction Technologies for Highway Projects
in Plateau Regions | 姚尧
Yao Yao |
| 007 | 特殊地质条件下支护结构的变形特点研究
Research on the Deformation Characteristics of Support Structures under Special
Geological Conditions | 代立伺
Dai Lisi |
| 012 | 电解铝用残极回收再利用过程中有害杂质控制技术研究
Research on the Control Technology of Harmful Impurities in the Recycling and Reuse
Process of Residual Electrodes for Electrolytic Aluminum | 米文龙
Mi Wenlong |
| 015 | 高参数再热技术助力生物质能与垃圾发电
High-parameter Reheating Technology Aids Biomass Energy and
Waste Power Generation | 孙慧丽
Sun Huili |
| 019 | 压力容器设计及制造过程中降低应力集中的策略
Strategies for Reducing Stress Concentration in the Design and Fabrication
of Pressure Vessels | 李伟光
Li Weiguang |
| 023 | 佳木斯EBZ-260型掘进机在固体钾盐矿井的优化改进
Optimization and Improvement of Jiamusi EBZ-260 Roadheader
in Solid Potash Mine | 尹川邦, 杨俊华
Yin Chuanbang, Yang Junhua |
| 026 | 桥梁预应力施工技术控制的探讨
Discussion on Technical Control of Bridge Prestressed Construction | 李锐
Li Rui |
| 029 | 基于智慧工地系统的施工围挡全周期管理研究
——基于鄂尔多斯市东胜区城市管理研究
Research on the Full-Cycle Management of Construction Fencing Based
on Smart Construction Site Systems — A Study on Urban Management
in Dongsheng District, Ordos City | 单新龙
Shan Xinlong |
| 033 | 船体结构优化设计与强度分析研究
Research on Optimized Design and Strength Analysis of Hull Structure | 聂广宁
Nie Guangning |
| 036 | 企业供电网电压暂降快速补偿技术研究
Research on Rapid Compensation Technology for Voltage Sags in Enterprise Power
Supply Networks | 王永华, 张亚超, 高凯晨, 于尧
Wang Yonghua, Zhang Yachao, Gao Kaichen, Yu Yao |
| 039 | 电气工程及其自动化技术在工业雷管生产线智能化改造中的应用研究
Application Research of Electrical Engineering and Automation Technology in the
Intelligent Transformation of Industrial Detonator Production Line | 潘文生
Pan Wensheng |
| 042 | 化工企业智能监控系统在安全管理中的应用
Application of Intelligent Monitoring Systems in Safety
Management for Chemical Enterprises | 黄大勇, 胡海英
Huang Dayong, Hu Haiying |
| 045 | MOSS罐型FSRU压载舱牺牲阳极设计与研究
Design and Research of Sacrificial Anode for FSRU Ballast Tank | 何凡
He Fan |
| 049 | BIM技术在施工过程中的应用
The Application of BIM Technology in the
Construction Process | 卢佳伟, 李婉君, 廖红玉, 陈旺
Lu Jiawei, Li Wanjun, Liao Hongyu, Chen Wang |
| 052 | P70型棚车左门右框组成低成本
自动焊工艺研究
Research on Low-Cost Automatic Welding Process for the Left Door and Right Frame
Assembly of P70 Boxcars | 李春琴, 文红全, 甘俊林, 李晓娜
Li Chunqin, Wen Hongquan, Gan Junlin, Li Xiaona |

055	钢铁冶金设备维修过程中绿色润滑技术的选型与应用效果分析 Analysis of Selection and Application Effects of Green Lubrication Technologies in the Maintenance Process of Iron and Steel Metallurgical Equipment	吴佛琼 Wu Fuqiong
058	公路工程高填方路基施工技术要点分析 Analysis of Key Construction Technical Points for High Embankment Subgrade in Highway Engineering	柴家发, 杜雅楠 Chai Jiafa, Du Yanan
061	大数据的高速公路机电设备智能运行检测技术探究 Exploration of Intelligent Operation Detection Technology for Electromechanical Equipment on Highways Based on Big Data	张萍 Zhang Ping
064	双碳目标下汽轮机变工况运行优化与能耗管控策略研究——基于深度调峰需求的实践 Research on Operation Optimization and Energy Consumption Control Strategies for Steam Turbine Units under Variable Operating Conditions amid the Dual Carbon Goals— A Practice Based on Deep Peak-shaving Requirements	岳伟, 陆志强, 郇利强 Yue Wei, Lu Zhiqiang, Tai Liqiang
067	SDTGA6000型全自动工业分析仪在煤质分析中的应用 SDTGA6000 Fully Automatic Industrial Analyzer Application in Coal Quality Analysis	应凯 Ying Kai
071	火电厂智能吹灰优化控制系统研究 Research on Intelligent Soot Blowing Optimization Control System for Thermal Power Plant	马战南, 邬惠佳, 于腾飞 Ma Zhannan, Wu Huijia, Yu Tengfei
074	稳固剂在阳极组装过程中的应用及效果分析 Application and Effect Analysis of Stabilizer in the Anode Assembly Process	李成元, 谢玉彦, 张坤, 王攀, 练新强 Li Chengyuan, Xie Yuyan, Zhang Kun, Wang Pan, Lian Xinqiang
077	数字化测绘技术在水利工程测量中的应用策略 Application Strategies of Digital Surveying and Mapping Technology in Water Conservancy Project Surveying	曹小伟, 张书萍, 梁居明 Cao Xiaowei, Zhang Shuping, Liang Juming
080	分析公路沥青路面裂缝产生原因及防治措施 Analysis of the Causes and Preventive Measures for Cracks in Highway Asphalt Pavements	毛远东 Mao Yuandong
083	GPS 测量技术在工程测量中的应用研究 Research on the Application of GPS Surveying Technology in Engineering Surveying	邱镇鸿 Qiu Zhenhong

建筑科学 | BUILDING SCIENCE

086	“数智营建·筑教融合”——建筑类专业数字化教学新生态探索与实践 "Digital and Intelligent Construction · Integration of Architecture and Education" —Exploration and Practice of a New Digital Teaching Ecosystem for Architectural Majors	刘笑 Liu Xiao
089	大跨度空间钢结构屋盖吊装方案优化与施工力学行为分析 Optimization of Hoisting Schemes and Analysis of Construction Mechanical Behavior for Long-Span Spatial Steel Structure Roofs	马腾, 王栋 Ma Teng, Wang Dong
092	基于 BIM 的钢结构建筑支撑体系虚拟预拼装技术研究 Research on Virtual Pre-assembly Technology of Steel Structure Building Support System Based on BIM	朱冠煜, 姚胜红, 吴大鹏, 沈如明 Zhu Guanyu, Yao Shenghong, Wu Dapeng, Shen Ruming
095	高层建筑城镇燃气安全供应技术与隐患排查方法研究 Research on Safe Gas Supply Technology and Hidden Danger Investigation Methods for High-rise Buildings in Urban Areas	柴冰艳, 曹凯 Chai Bingyan, Cao Kai
098	绿色建筑评价体系在工程咨询决策中的量化应用方法 Quantitative Application Methods of Green Building Evaluation Systems in Engineering Consulting Decision-Making	谭江玲 Tan Jiangling
102	装配式混凝土结构施工阶段节点连接性能优化与质量管控机制实践 Practice of Performance Optimization and Quality Control Mechanism for Joint Connections in Prefabricated Concrete Structures During Construction	陆锟 Lu Kun

水利与港口工程 | WATER CONSERVANCY AND PORT ENGINEERING

106	水闸施工工艺流程及质量控制分析 Analysis of Construction Process Flow and Quality Control for Sluice Gates	梁骏宇, 张良群 Liang Junyu, Zhang Liangqun
109	智慧水务背景下供水管网漏损监测的物联网技术集成与漏点定位精度提升 Integration of Internet of Things (IoT) Technologies and Enhancement of Leak Point Location Accuracy for Water Supply Network Leakage Monitoring Under the Background of Smart Water Management	任静 Ren Jing
112	基于数值模拟的水库溃坝洪水演进研究 Research on Dam-Break Flood Routing Based on Numerical Simulation	王旭, 王蓓, 姜静静, 朱明, 张闯, 李康 Wang Xu, Wang Bei, Jiang Jingjing, Zhu Ming, Zhang Chuang, Li Kang
115	农田水利工程设计中的渠道设计与施工管理分析 Analysis of Canal Design and Construction Management in Farmland Water Conservancy Project Design	孙鸿琴 Sun Hongqin

电子与通信工程 | ELECTRONIC AND COMMUNICATION ENGINEERING

118	人工智能在高速公路信息化安全预警中的应用 Application of Artificial Intelligence in Information Security Warning of Expressway	杨育忠 Yang Yuzhong
121	遥感影像在土地利用动态监测中的测绘应用 Surveying and Mapping Applications of Remote Sensing Imagery in Dynamic Monitoring of Land Use	朱江 Zhu Jiang
124	人工智能辅助下机械制图个性化教学模式构建 Construction of an AI-Assisted Personalized Teaching Model for Mechanical Drawing	马琨, 郭峰 Ma Kun, Guo Feng
127	无线远传技术在 DCS 报警优化中的应用 Application of Wireless Remote Transmission Technology in DCS Alarm Optimization	任保同 Ren Baotong

公路工程交通安全设施的施工质量管理分析

卢金元

湖北楚维工程咨询监理有限责任公司，湖北 荆门 448000

DOI:10.61369/ERA.2025110003

摘 要： 本文聚焦于公路工程交通安全设施的施工质量管理研究，先阐述了交通安全设施质量管理的重要性，如有利于降低交通事故发生的概率、有利于延长交通安全设施的使用寿命、有利于推动交通运输行业可持续发展、有利于规范公路工程建设市场秩序等，然后又提出了几点切实可行的管理措施，主要包括明确公路交通安全设施质量管理要点、建立健全完善的质量管理体系、加大原材料质量控制力度、做好安装质量和安装工序管理，通过上述的措施，不仅能为公路工程交通安全设施施工管理提供重要的实践参考，还能推动公路交通发展。

关 键 词： 公路工程；交通安全设施；施工质量安全管理

Analysis of Construction Quality Management for Traffic Safety Facilities in Highway Engineering

Lu Jinyuan

Hubei Chuwei Engineering Consulting and Supervision Co., Ltd., Jingmen, Hubei 448000

Abstract： This paper focuses on the research of construction quality management for traffic safety facilities in highway engineering. It first elaborates on the importance of quality management for traffic safety facilities, such as reducing the likelihood of traffic accidents, extending the service life of traffic safety facilities, promoting sustainable development in the transportation industry, and standardizing the market order of highway engineering construction. Subsequently, it proposes several practical management measures, mainly including clarifying key points of quality management for highway traffic safety facilities, establishing and improving a comprehensive quality management system, strengthening quality control over raw materials, and ensuring proper management of installation quality and procedures. By implementing these measures, not only can valuable practical references be provided for the construction management of traffic safety facilities in highway engineering, but they can also facilitate the development of highway transportation.

Keywords： highway engineering; traffic safety facilities; construction quality and safety management

引言

公路工程作为我国基础设施建设最主要的组成部分，其安全性能会关系到人民群众生命财产安全。而交通安全设施作为公路工程安全体系最重要的环节，承担着关键的功能，如交通流、分隔车、警示危险等，是确保公路顺利通行和行车安全重要生命线。近年来，随着我国公路里程的增长和交通流量的增加，交通安全设施的施工质量问题日益凸显。所以在今后有必要深入探讨公路工程交通安全设施的施工质量管理措施，完善质量管理流程，建立健全完善的质量监督体系，提高交通安全设施施工质量管理效率，避免发生交通事故。

一、公路工程交通安全设施施工质量管理的重要性

（一）有利于降低交通事故发生的概率

实施公路工程交通安全设施施工质量管理这项工作有利于降低发生交通事故的概率。其核心价值在于通过保障设施功能性和可靠性，为道路通行构建坚实的安全防线。交通标志和标线是引导车辆有序行驶的“导航系统”，其施工质量会给驾驶员判断和决策造成影响。如果标志版面模糊，反光效果不好，驾驶员难以

对道路信息进行识别。但加强对标志标线质量管理，确保其质量，能清晰的对车道划分和限速以及转向等关键信息进行传递，帮助驾驶员事先的对预判路况进行判断，避免由于信息误差造成操作失误，在源头上规避风险发生。加强对防撞护栏等公路工程交通安全设施施工质量管理，确保合格，它具备足够的强度和缓冲性能，在车辆失控时能阻挡并引导车辆，防止和对向车辆发生碰撞的现象。严格公路工程交通安全设施施工质量管理，确保各类设施稳定作用的发挥，形成连贯的安全防护体系^[1]。通过加强材

料管理,规范材料选用,严控施工工艺,进行质量检测,防止由于质量问题发生安全隐患,确保道路交通安全。

(二) 有利于延长交通安全设施的使用寿命

管理人员通过加强公路工程交通安全设施施工质量管理,确保交通安全设施正常的使用,延长其使用寿命,降低后期维护成本。质量没有问题的交通安全设施耐久性和抗损坏能力强,在各种复杂的自然环境和交通荷载下,能保持良好的工作状态,避免增加维修和更换成本。如果公路工程施工质量较为恶劣,交通安全设施可能造成损坏,这就需要投入资金维修,还能因为交通设施质量问题导致交通终端,给公路通行效率造成影响^[2]。除此之外,落实公路工程交通安全设施施工质量管理措施,提升公路形象,提高道路通行能力,吸引更多的车辆通行。

(三) 有利于推动交通运输行业可持续发展

交通安全设施施工质量管理是行业发展的必然要求。随着我国交通运输事业不断发展和公路里程的增加,交通流量日加大,这无形之中提高了对交通安全设施质量的要求。唯有做好公路工程交通安全设施施工质量管理,确保施工的质量,对增长的交通需求,才能更好地适应,确保交通运输更加的顺畅^[3]。与此同时,进行公路工程交通安全设施施工质量管理,利用先进的工艺,引进先进的技术,提高施工的管理能力。这对产业升级和交通运输行业的发展也具有重要的意义。

(四) 有利于规范公路工程建设市场秩序

管理人员通过实施公路工程交通安全设施质量管理工作,建立健全完善的体系,有效监督全面检查整个施工过程,营造出公平竞争的市场环境。再加上施工企业要求施工人员在具体施工操作的过程中严格按照设计规范和施工标准,不仅能规范施工人员的施工行为,还能形成优胜劣汰的市场机制,提高企业质量管理意识,促进公路工程建设市场有序发展^[4]。

总之,公路工程交通安全设施施工质量管理特别的重要,这除了是确保行车安全和实现公路工程经济效益内在要求以外,还是推动交通运输行业发展的保障。需要施工企业和管理人员在今后给予高度的重视,并采取有效的措施实施公路工程交通安全设施施工质量管理工作,以取得良好的管理效果。

二、公路工程交通安全设施的施工质量管理措施

(一) 明确公路交通安全设施质量管理要点

1. 交通标志

不管是交通标志的施工要点,还是相关注意事项,在进行公路工程交通安全设施施工质量管理的过程中,管理人员要特别的注意,并提高交通安全设置有效性。因为这是引导和警示驾驶员最主要的一项工具,其施工质量会影响到道路使用者的生命安全。

第一,明确含有标志牌材料选取和尺寸规格等交通标志要点,确保材料反光性能和耐久性良好,和我国的标准相符。根据交通流量,结合道路条件,明确尺寸规格,确保驾驶员具备足够的反应时间。在搭配颜色这方面,和交通标志国际标准要相符,

避免发生颜色混淆的现象。也要正确规划安装位置,并在具体规划的过程中,根据道路设计和交通流通,以提高标志牌的可视性^[5]。第二,对于标志牌的安装角度和高度,在施工的期间要特别的注意。通常在设置标志牌安装角度这方面,要保障在正常行驶状态下驾驶员能清晰的将标志内容看到,高度适中,保障能及时传达标志信息。

2. 护栏

护栏施工步骤比较多,不仅有测量放线和基础开挖,还有钢筋绑扎和模板安装。这在今后要想确保施工工作顺利的实施,实现施工质量管理,需要施工人员严格的按照设计图纸,严格的遵循技术规范进行护栏施工,保障护栏结构安全,和相关要求相符。比如,运用精密仪器进行测量放线,确保位置更加准确。要求施工人员根据地质条件,按照设计要求做好基础开挖工作,保障基础的承载力和稳定性与要求相符^[6]。按照操作流程做好钢筋绑扎和模板安装工作,确保结构稳定性。在进行混凝土浇筑的过程中,注意对混凝土配比和浇筑速度的控制,避免出现质量问题,提高板面平整度。

(二) 建立健全完善的质量管理体系

1. 明确质量管理目标

要想做好公路工程交通安全设施质量管理工作,需要管理人员明确质量管理目标,确定质量管理范围,保障交通安全标志和护栏、路面标线等所有安全交通设施维护都在其范围内,确保其各个方面和预定的质量要求相符。第一,对于施工现场布局规划,要确保更加合理,和要求相符,并将施工区域和交通流线安排好,防止施工和交通造成严重的冲突。第二,安排专门人员加大检查和维护力度,不定期的检查和维护现有的施工设备,确保施工设备正常的使用,处于良好的运行状态。第三制定现场监督制度,落实安全措施。将围栏和隔离带合理的在施工区进行设置,防止无关人员进入到危险区域当中。对夜间施工作业要特别的注意,在这方面要注意对照明设备和反光材料的利用。第四制定应急预案,确保在发生紧急情况时能及时的应对^[7]。

2. 建立健全质量检测和评估体系

第一制定含有材料检验和监控整个施工过程以及竣工验收环节等质量检测程序。第二,加大检验力度,利用先进的技术,运用检测设备检验交通安全设施每项性能。第三,根据检测得到结果,系统分析存在的不足,并制定解决方案尽快的解决。第四,完善质量评估体系,实时跟踪评估公路工程交通安全设施的性能,确保公路工程交通安全设施的安全。

3. 定期维护检查交通安全设施

管理人员在具体维护检查的期间,对所有标志和标线要特别的注意,确保清晰可见,重点对护栏和隔离带等物理隔离设施进行检查,检查该设施是否牢固。借助测试工具测试信号灯等电子设备,确保能正常工作。也需要做好对路面减速带和振荡标线检查工作,看是否受到磨损,必要的情况下更换新的。检查交通标志牌是否牢固,标志牌上的文字和图案是否清晰,若是遇到恶劣的天气,要不断的检查维护,做好相应的记录。这样如果存在问题,能及时的发现处理。

（三）加大原材料质量控制力度

在进行公路工程交通安全设施施工质量管理工作的过程中，管理人员有必要加强原材料质量控制。

1. 严格筛选材料供应商

材料供应商所提供的材料与行业标准要相符。在这方面要严格的审查供应商生产整个过程，保障工艺流程更加完善，并实施材料入库检验制度，重点检测材料的质量，确保材料的质量，其性能和要求相符。同时，做好供应商售后服务管理工作，以便在出现材料质量问题时及时更换材料。和材料供应商多沟通交流，建立合作关系，鼓励供应商不断的对产品质量进行完善。

2. 建立原材料检测体系

第一，建立原材料追溯体系，保障每批材料的质量合格，每次材料都有去向可查。第二，强化原材料检测人员各个方面能力，提高原材料检测人员的综合素质，使他们在今后能主动的做好原材料检测工作^[8]。

3. 定期抽检

通过抽检公路工程交通安全设施材料，确保材料的质量，能投入到公路工程施工中。但在具体抽检的期间，对以下几个方面要特别的注意：首先，安排专门的人员实施公路工程交通安全设施材料检查工作，确保检测结果的准确性。要求工作人员严格的遵循标准和规范进行抽检，保障材料的质量没问题；其次记录好抽检得到结果，构建档案管理系统，为日后的管理和跟踪打下良好基础；然后，如果抽检出有的材料不符合标准，要禁止使用，尽快的纠正；最后，完善抽检流程，确保材料使用的安全性。

（四）做好安装质量和安装工序管理

这是实现交通安全设施功能的最重要环节，需要通过精准化施工和规范化流程管控实现质量闭环。具体可以从以下几个方面入手：首先安装前需要完成技术交底和现场复核。施工人员需要将设计图纸向班组详细的解读，并对护栏线形和标志牌角度等关键参数合理的明确，借助全站仪对路基中线和高程等基准数据进

行复核，保障安装基准和设计相一致。注意曲线段和桥梁衔接处等复杂部位，针对这些部位对专项施工方案进行制定，详细的做好对施工难点和应对措施标注，防止由于对技术不理解造成较大的安装误差；然后关键设施安装需要执行精细化标准。在进行护栏安装的过程中，对于波形梁拼接处要利用螺栓对称紧固，保障板面平整无错台，线形和道路走向更加吻合，以实现对平面偏差控制。在安装标志标牌的前期，需要对杆件垂直度进行检查，横杆和竖杆连接部位加固，牌面和道路中线夹角和视距要求相符。在标线施工的前期，做好对路面杂物清理工作，用划线机确保标线宽度和厚度均匀，和路面粘结更牢固；最后工序衔接实行“交接检”制度。在完成每道工序后，施工班组要自行的检查是否有问题，尤其是对护栏签署工序交接单和标牌紧固度等指标检查，确保合格后，在对工序交接单进行签署。如果验收没有达到合格的标准，禁止实施下道工序。在进行交叉作业的过程中，对各工种施工顺序合理的明确，如在护栏安装完成后在标线施工，防止由于工序冲突的问题造成设施破坏。与此同时，将成品保护工作做到位，对已安装的标牌覆盖防护膜，护栏涂刷防锈漆，设置警示标识，避免发生碰撞。

通过重点的对安装精度和工序衔接进行把控，保障交通安全设施的安全，确保和设计标准相符，对现场环境能更好地适应，以为公路通行安全筑牢防线。

三、结束语

综上所述，通过落实公路工程交通安全设施施工质量管理，不仅能提高施工质量，还能确保公路交通安全。未来在智慧交通技术不断发展下，质量管理会逐步向数字化转型，实现物联网监测和BIM技术应用与传统管理模式结合，建立健全完善的质量管控体系，以为公众出行保驾护航。

参考文献

- [1] 杨丽红. 公路工程交通安全设施的施工质量管理分析 [J]. 现代职业安全, 2025, (05): 38-39.
- [2] 柳建龙. 公路工程交通安全设施施工质量管理 [J]. 运输经理世界, 2024, (15): 113-115.
- [3] 魏巍. 公路交通安全设施工程常见质量问题及防治对策 [J]. 运输经理世界, 2023, (22): 145-147.
- [4] 李丽萍. 公路工程交通安全设施的施工质量管控体系研究 [J]. 科技创新与生产力, 2023, 44(07): 68-71.
- [5] 曹志宇. 公路交通工程安全设施施工技术研究 [J]. 运输经理世界, 2021, (29): 139-141.
- [6] 郑锐. 公路工程交通安全设施的施工质量研究 [J]. 黑龙江交通科技, 2020, 43(11): 157-160.
- [7] 肖洪智. 公路工程交通安全设施的施工质量管理探究 [J]. 运输经理世界, 2020, (07): 105-106.
- [8] 陈永泽. 公路工程交通安全设施的施工质量管理分析 [J]. 建材与装饰, 2020, (05): 266-267.

高原地区公路施工适应性技术研究

姚尧

河北光太路桥工程集团有限公司, 河北 邯郸 056000

DOI:10.61369/ERA.2025110004

摘 要：高原地区由于地质条件复杂、气候环境恶劣，公路施工面临诸多挑战，如冻胀、滑坡、低氧及季节性施工限制等问题，严重影响工程进度与质量。为提升施工适应性与工程效率，需结合高原特有环境，采取科学合理的施工技术与管理措施。通过优化施工工艺、应用适宜的材料与装备、加强环境保护与安全管理，能有效提高高原地区公路工程的适应能力，确保施工质量，推动区域交通基础设施可持续发展。

关 键 词：高原地区；公路施工；适应性技术；施工管理；环境影响

Research on Adaptive Construction Technologies for Highway Projects in Plateau Regions

Yao Yao

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

Abstract：Due to complex geological conditions and harsh climatic environments in plateau regions, highway construction faces numerous challenges, such as frost heave, landslides, hypoxia, and seasonal construction constraints, which significantly impact project progress and quality. To enhance construction adaptability and project efficiency, it is essential to adopt scientifically sound construction techniques and management measures tailored to the unique environmental conditions of plateau regions. By optimizing construction processes, utilizing appropriate materials and equipment, and strengthening environmental protection and safety management, the adaptability of highway projects in plateau regions can be effectively improved, ensuring construction quality and promoting sustainable development of regional transportation infrastructure.

Keywords：plateau regions; highway construction; adaptive technologies; construction management; environmental impact

引言

高原地区地势起伏大、气候多变，地质构造复杂，公路施工面临着严峻的自然环境考验。随着国家对西部地区交通基础设施投入的不断加大，高原公路建设步伐日益加快，其施工技术的适应性问题愈发凸显。如何在高寒、低氧、冻融频繁等极端条件下实现高效、安全、环保的施工，成为工程实践中的核心议题。探索并推广具有针对性的适应性技术，对提升施工质量、保障工程进度及促进区域发展具有重要意义。

一、高原地区公路施工面临的环境挑战

高原地区地处海拔较高地带，普遍存在氧气稀薄、气压低、昼夜温差大等极端气候特征，这些自然环境因素对公路施工活动构成了全方位的挑战。首先，空气稀薄导致施工人员在高原作业时容易出现高原反应，工作效率明显下降，施工强度难以持续。其次，强烈的紫外线辐射和多变的气候条件，如暴雪、强风和突发性降雨，也极易破坏施工现场的工作环境，造成设备损坏和人员伤害。此外，高原地区的冬季时间较长、气温极低，冻结和融化循环频繁，对路基稳定性、混凝土强度及施工周期产生显著影

响，增加了项目的复杂性和不确定性^[1]。

在地质方面，高原区域广泛分布着冻土、软土、滑坡体及岩溶地貌，地质结构极其不稳定。特别是多年冻土区，土体受温度变化影响剧烈，容易引起冻胀和融沉现象，严重影响路基的稳定性和耐久性。在施工过程中，一旦未能合理预测和处理这些地质异常情况，极可能造成边坡失稳、路面沉降甚至隧道坍塌等重大质量和安全事故。同时，由于高原地区生态环境较为脆弱，一旦发生水土流失、植被破坏等问题，恢复难度大，对工程建设与环境保护形成双重压力。这些地质与生态因素，要求施工单位具备高度精准的地质勘查与风险预判能力。

交通不便与物资供应困难也是高原公路施工面临的现实问题。高原地区多处于偏远山区，道路通行能力弱，施工材料、机械设备和劳动力的运输成本高、周期长，影响工程进度和施工效率。在复杂多变的自然环境中，常规施工技术及设备往往难以发挥应有效能，必须针对性地进行技术改良和设备适配。此外，高原地区居民点分散、基础设施薄弱，也给生活保障、医疗救护与突发事件应对带来挑战。因此，高原公路施工需构建科学系统的适应性技术体系，以应对多重挑战，保障工程顺利实施^[2]。

二、高原特殊地质与气候条件对施工的影响

高原地区以其独特的地质构造和复杂的气候条件闻名，这些因素直接关系到公路施工的可行性与施工过程的技术选择。首先，在地质方面，高原地区常见的多年冻土、活动断裂带、软弱土层和滑坡体，对施工提出了极高的要求。特别是多年冻土的存在，在温度变化时容易出现冻胀与融沉，对路基稳定性构成严重威胁。一旦设计与施工不当，将导致路面开裂、下沉甚至整体结构失稳。此外，频繁的地质运动带来的地震风险也不容忽视，要求工程在结构抗震设计和基础加固方面做出充分准备。同时，软土层的承载力低、压缩性强，易造成路基沉降不均，对桥梁与隧道等结构物安全构成隐患。滑坡体和崩塌区域更是建设中的高危点，需通过深入的勘探和加固工程进行处理，否则易引发施工中断或安全事故^[3]。

气候条件方面，高原地区普遍存在低气压、低氧、高辐射、昼夜温差大等特点，对施工活动产生深远影响。首先，氧气稀薄使得施工人员体能消耗加快，作业效率下降，尤其在高强度施工任务中，容易诱发高原反应，增加健康风险。此外，气温波动剧烈，特别是早晚温差过大，导致混凝土、水泥等材料养护困难，施工质量难以保障。冻融交替则是影响高原地区路基稳定的关键因素，在融化期水分渗入土体，在冻结期产生膨胀，反复作用下会破坏结构整体性。强烈的紫外线和频繁的强风，也对施工设备和人员造成影响，减少设备使用寿命，增加维修频次。暴雨、冰雹和雪灾等突发性天气也极易造成施工现场淤积、设备受损甚至工期延误，对施工组织 and 资源调配提出更高要求^[4]。

高原地区的特殊气候与地质条件往往叠加出现，造成施工风险叠加放大。在多年冻土区施工过程中，气候变化不仅影响施工工期，还会改变冻土分布与深度，加剧地质不稳定性。例如，夏季气温升高可能使原本稳定的冻土层发生融化，造成地基沉降；而冬季极端严寒又使施工难以持续，甚至需要完全停工。此外，地质灾害的突发性也与气候密切相关，降雨集中期极易诱发山体滑坡、泥石流等灾害。因此，高原公路施工需动态监测地质气候，科学预测并制定灵活策略，确保建设安全、连续、可持续。

三、高原公路施工适应性技术体系构建

构建适应高原环境的公路施工技术体系，是提升工程质量、保障施工安全的关键途径。面对高原地区独特的地质和气候条

件，施工技术体系必须从整体出发，统筹规划、科学部署，涵盖勘察设计、施工工艺、材料选择、设备配置等多个方面。在前期勘察设计阶段，应重点强化对多年冻土、滑坡体、软弱土层等特殊地质的识别与分析，结合气候数据，合理安排工程选线与结构形式，避免穿越高风险地段。设计中还应充分考虑地质活动性和温差影响，通过灵活的结构设计提高工程的适应能力，如采用可调式桥墩、柔性加固结构等，以增强整体稳定性和延展性^[5]。

在施工工艺方面，需因地制宜采用具有针对性的技术措施，最大限度降低环境对施工质量的影响。例如，在多年冻土区，应采用换填、保温或冷却等技术控制冻土层的温度变化，避免因冻胀和融沉引发的路基破坏。在软弱地基区域，可以通过强夯、预压排水、注浆加固等方式提高土体承载力。在边坡施工中，结合锚杆支护、格构梁与植被恢复技术，既能防止滑坡和水土流失，又兼顾生态保护。同时，针对高原气候变化剧烈、气象灾害频发的特点，施工周期应充分考虑气候窗口期，合理安排施工节奏，确保关键工程节点能够避开极端天气的影响。在具体作业操作中，应引入信息化施工管理平台，实时监控气象、地质变化，提升工程应急反应能力。

在材料与设备应用方面，也需进行系统优化。高原低气压、低温环境对材料性能提出了更高要求，应优先选用耐冻、抗裂、高强度的建筑材料，并加强施工过程中材料的储存与养护管理，如对混凝土进行加热搅拌、低温养护等工艺处理。同时，引进专为高原环境设计的机械设备，如低温启动型挖掘机、保温型搅拌运输车、高原动力系统，不仅提高作业效率，也提升了施工机械的耐用性与安全性。此外，施工技术体系的构建还应融合绿色施工理念，注重生态保护与资源节约，如推广节水型施工工艺、使用环保型材料、建设临时排水系统等，减少对高原脆弱生态的干扰^[6]。通过构建全面、科学、可持续的适应性施工技术体系，能够有效应对高原地区复杂的自然环境，为高质量完成公路建设任务提供坚实技术支撑。

四、关键施工工艺与装备的优化应用

高原地区的公路施工对施工工艺提出了更高的适应性要求，传统平原地区常用的技术在高寒、低压、冻土频发的环境下常常无法达到预期效果。因此，优化关键施工工艺，成为保障工程质量与施工效率的核心举措。在路基处理方面，应采用适合高原地区冻融特性的工艺手段，如在多年冻土区域采用换填砂砾、设置保温层或铺设冷却管道，以有效调控地温，防止路基因冻胀或融沉而失稳。对于滑坡地带或软弱地基，则需采用注浆加固、抗剪挡墙与排水系统相结合的综合处理措施，以提高土体强度与排水能力，确保路基稳定。隧道施工方面，可引入超前地质预报技术与冷凝防水施工技术，提升施工安全性与效率^[7]。

沥青路面施工是高原公路建设中的另一关键环节。在低温和氧气稀薄的条件下，沥青混合料的拌和、运输、摊铺和碾压都面临技术挑战。为此，应选择适应高原低温环境的改性沥青材料，合理调整配合比，并在拌和站增加加热保温装置，确保混合料出

厂温度稳定。运输过程中采取保温车或保温覆盖措施，减少热量损耗。摊铺作业要在温度窗口期内进行，严格控制摊铺厚度与碾压时间，防止低温造成压实度不足和早期裂缝。此外，为提高施工质量和效率，可使用摊铺自动找平系统、智能温控系统等先进技术，实现精细化管理。桥梁施工则需考虑高空作业安全、结构抗冻性能与构件预制质量，采用工厂化预制与高原专用运输装配技术，有效提升施工效率和安全保障水平^[8]。

在施工装备方面，高原环境对设备性能与使用可靠性提出了严峻考验。为适应低气压和大温差等环境，应对施工机械进行定制化改进，例如选用具备高原动力系统的挖掘机、推土机和装载机，确保在低氧环境下也能维持稳定功率输出。对关键部件进行保温、防冻和高原润滑优化，延长设备寿命并减少故障率。同时，强化设备的智能化与信息化管理，采用GPS定位、远程监控、运行数据分析等系统，提高设备运行效率和运维水平。针对特定工艺还需配套专业设备，如混凝土加热搅拌站、低温沥青运输车、坡面绿化喷播机等，确保施工工艺与装备相互协同。通过优化施工工艺与装备应用，不仅提升了工程质量与进度控制能力，也为高原地区交通基础设施建设提供了有力支撑。

五、提升高原地区施工适应性的管理策略与保障措施

高原地区公路施工不仅对技术提出高要求，更对施工管理策略与保障体系构建提出挑战。首先，应从项目规划层面强化统筹管理，依据地质、气候和生态数据进行科学评估，制定差异化的施工计划。合理安排施工时序，避开严寒与多雨时段，确保关键工程节点处于适宜的气候窗口期。同时，建立完善的风险预警与应急机制，对可能发生的地质灾害、极端天气等进行动态监测与快速响应，保障施工连续性与人员安全。强化项目组织协调能力，优化资源配置，提升工程整体运行效率^[9]。

在现场管理方面，需特别注重人员与物资的保障措施。高原施工人员面临低氧、强紫外线等生理挑战，应定期组织健康体检，配备高原反应药品与氧气供应装置，合理安排作息时间，减轻高原反应带来的影响。施工现场应配备临时营地、食堂与卫生设施，保障人员生活条件。物资供应则应建立完善的后勤支持系统，提前储备关键材料与易耗品，缩短运输周期，防止因交通中断或供应延误影响工程进度。此外，针对高原生态环境脆弱的特点，应严格执行环保标准，落实水土保持、噪声控制与植被恢复等环保措施，保障生态安全^[10]。

制度建设与技术培训是提升高原施工适应性的重要保障。在管理体系上，应建立健全适应高原施工特点的质量、安全、环境一体化管理体系，加强标准化流程建设与执行力监督。在人员培训方面，应定期开展高原施工专项培训，涵盖高原气候下的技术操作规范、安全防护要点与应急处置技能，提升一线施工人员与管理人员的专业能力。鼓励技术创新与工艺优化，推动高原施工实践经验转化为标准指南，实现管理科学化、规范化、精细化。通过多层次的管理策略与全方位的保障措施，能有效提升高原公路施工的适应能力与工程品质。

六、结束语

高原地区特殊的地质构造与严峻的气候条件，对公路施工提出了前所未有的挑战。通过深入分析环境影响，构建适应性施工技术体系，优化关键工艺与装备，并辅以科学的管理策略与保障措施，能够有效提升施工的安全性、适应性与可持续性。高原公路建设不仅是工程技术的考验，更是对施工组织与管理能力的全面检验。面向未来，需持续推动技术创新与标准化建设，为高原交通发展和区域经济振兴提供坚强支撑。

参考文献

[1] 王波. 云贵高原地区高速公路软岩高填方路堤填筑施工技术 [J]. 工程设计与设计, 2021, (01): 168-170.DOI: 10.13616/j.cnki.gcjsysj.2021.01.065.

[2] 苗祥达, 陈泽盟, 王豪, 等. 高原冻土地区公路边坡稳定性及加固施工技术 [J]. 中外公路, 2021, 41(04): 1-5.DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2021.04.001.

[3] 黄明文. 高原高海拔地区特长公路隧道施工的通风技术探究 [J]. 低碳世界, 2023, 13(03): 145-147.DOI: 10.16844/j.cnki.cn10-1007/tk.2023.03.010.

[4] 伍超. 高原大跨段隧道 CRD 法施工技术研究 [J]. 运输经理世界, 2023, (32): 115-117.

[5] 王南, 刘有为, 王浩楠. 高原地区公路机电项目电气设备施工技术研究 [J]. 运输经理世界, 2023, (33): 140-142.

[6] 李杨留. 高原地区对公路工程造价的影响研究 [J]. 运输经理世界, 2024, (02): 53-55.

[7] 陈惠光. 高原大风地段公路施工中地质灾害防治技术研究 [J]. 交通科技与管理, 2024, 5(07): 60-62+59.

[8] 卢锋. 高原公路施工隧道增氧数值模拟与实验研究 [D]. 昆明理工大学, 2024.DOI: 10.27200/d.cnki.gkmlu.2024.000265.

[9] 丁姣月, 张耀宗, 王若晨. 基于挣值法的高原冻土地区公路施工进度及成本管理 [J]. 科技与创新, 2024, (17): 90-92.DOI: 10.15913/j.cnki.kjycx.2024.17.023.

[10] 孙引浩. 基于生命周期的高原地区公路施工碳排放评价体系研究 [J/OL]. 铁道建筑技术, 1-4[2025-07-11].http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3368.TU.20250708.1004.010.html.

特殊地质条件下支护结构的变形特点研究

代立伺

华设计集团股份有限公司, 江苏 南京 210000

DOI:10.61369/ERA.2025110006

摘 要 : 软土地基主要由淤泥、淤泥质粘土等软弱土层组成, 具有压缩性高、承载力低等特点。在工程建设中, 大部分建筑基坑的开挖都处在淤泥层中, 由于该特殊的地质构造, 基坑施工中支护结构的设置和变形就成了施工安全的重点, 对工程施工的安全、生命财产安全造成较大影响, 需要特别注意软土地基的处理和加固, 以确保工程的安全性和稳定性。因此, 必须重视支护结构的设置和施工过程中结构变形情况, 为施工做出必要的安全警示和防范作用, 为后续同类工程的施工提供指导经验, 经可能避免安全事故的发生。

关 键 词 : 基坑监测; 钢板桩支护; 型钢支撑; 淤泥地质; 深层水平位移监测

Research on the D eformation Characteristics of Support Structures under Special Geological Conditions

Dai Lisi

China Design Group Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu 210000

Abstract : Soft soil foundation is mainly composed of soft soil layers such as silt and silty clay, which have the characteristics of high compressibility and low bearing capacity. In engineering construction, the excavation of most building foundation pits is located in the silt layer. Due to this special geological structure, the setting and deformation of support structures in foundation pit construction have become the focus of construction safety, which has a significant impact on the safety of engineering construction and the safety of life and property. Special attention should be paid to the treatment and reinforcement of soft soil foundation to ensure the safety and stability of the project. Therefore, it is necessary to pay attention to the setting of supporting structures and the deformation of structures during the construction process, to provide necessary safety warnings and prevention measures for construction, and to provide guidance and experience for the construction of similar projects in the future, in order to avoid the occurrence of safety accidents.

Keywords : foundation pit monitoring; steel sheet pile support; section steel support; silt geology; deep horizontal displacement monitoring

引言

我国的浙江省沿海平原地区广泛分布着软土地基。通过对位于苍南县的三澳核电厂环境监测前沿站项目地下室基坑的监测, 研究黏土层中拉森钢板桩 + 型钢支撑的结构随施工的进展而产生的变形特点。

一、地质条件与支护结构设置

(一) 设计开挖深度

拟建地下室底板板面标高为 -5.05m, 地下室底板厚 350mm, 承台厚 600/1000mm。垫层为 150mm 厚, 基坑设计开挖深度为 4.20~4.60m。

(二) 场区内工程地质及水文地质情况

根据岩土工程勘察报告, 基坑开挖深度影响范围内土层自地面向下分别为: (1)0 素填土: 全场地分布, 层厚 0.30~1.10m; (1)1

粘土: 全场分布, 层厚 0.60~2.00m; (2)1 淤泥: 全场分布, 层厚 12.90~14.20m, (4)2 淤泥: 全场分布; 层厚 8.10~9.60m。具体描述详见工程地质勘察报告, 各土层物理力学指标见表 1。

表 1 土层物理力学指标

地层名称	含水量	重度 (kN/m ³)	粘聚力 (kpa)	内摩擦角 (度)
10 素填土		18.00	(5.0)	(15.0)
11 粘土	43.0%	16.80	22.0 (19.8)	10.3 (9.3)
21 淤泥	67.0%	16.50	10.7 (8.6)	7.5 (6.0)
22 淤泥	58.7%	16.50	11.0 (8.8)	7.3 (6.0)

作者简介: 代立伺 (1991.05—), 男, 汉族, 江苏涟水人, 本科学历, 工程师, 研究从事工程测量工作。

注 c 、 Φ 值为勘察报告提供的直剪固快标准值，括号内为根据工程经验后的折减值。

勘察期间测得稳定水位在地表以下 0.30~1.50m（高程为 2.96~3.15m），地下水位年变化幅度约为 1.0~2.0 米^[1]。

（三）支护结构类型

本工程为一层地下室，基坑开挖深度 4.20~4.60m，围护结构采用拉森钢板桩 +H 型钢支撑的支护形式。

基坑围护材料采用 400X170 型号拉森钢板桩进行支护，钢板桩长度为 15.0m。桩位水平偏差 $\sim 50\text{mm}$ 垂直度偏差不得大于桩长的 0.5%。钢结构构件均采用 Q235B 级钢，焊接采用 E43 型焊条^[2]。

本工程围檩和内支撑均采用单拼 400X400X13X21H 型钢。

本工程的基坑维护桩及围檩和内支撑的具体设置如图 1、图 2 所示。

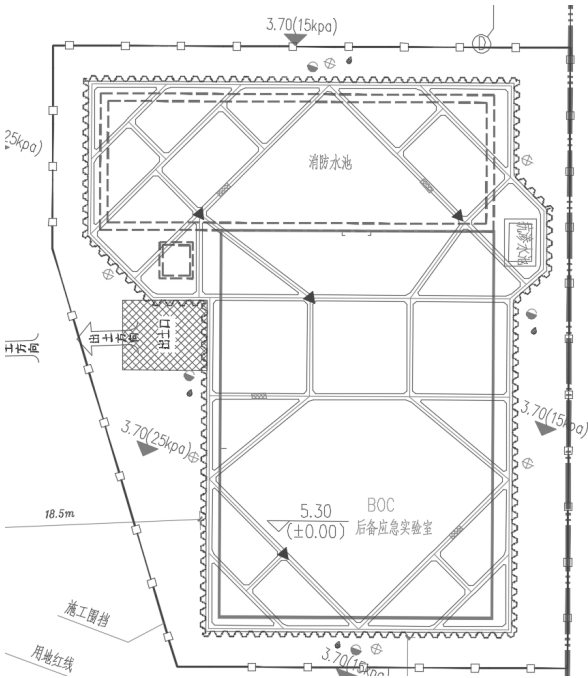


图 1 基坑维护桩及围檩和内支撑结构图

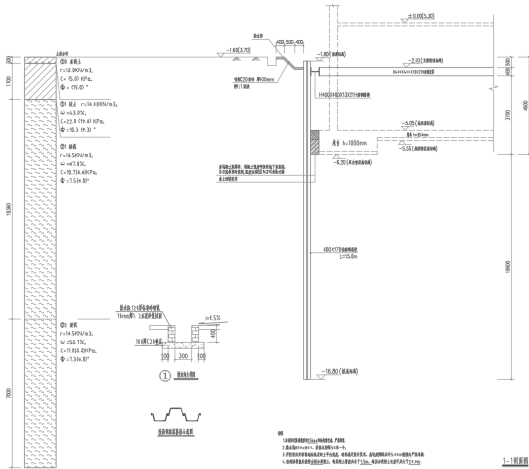


图 2 基坑维护桩及围檩和内支撑结构图

二、钢板桩支护结构变形机理分析

（一）变形影响因素

1. 土压力作用

主动土压力：开挖侧土体松弛，压力向桩体传递。

被动土压力：桩后土体抵抗变形的反力，受土质密度影响大。

水压力：地下水位变化（降水）加剧压力波动^[3]。

2. 结构自身因素

桩体刚度（EI）：钢板桩截面模量（如 U 型、Z 型）、材质强度（Q235/Q345）直接影响抗弯能力。

嵌固深度：嵌固不足易导致“踢脚”破坏，过深则经济性差。

支撑 / 锚固系统：支撑间距、预加轴力、锚杆长度等设计参数是否合理^[4]。

3. 外部荷载

施工荷载：机械振动、堆载超限。

邻近荷载：周边建筑物或交通动载传递应力。

（二）变形过程与规律

1. 侧向位移（挠曲变形）

表现形式：桩身向基坑内侧凸出，呈“鼓肚”状。

成因：土压力不平衡（主动土压力 > 支护抗力）；

桩体刚度不足或嵌固深度不够；

开挖卸荷导致土体应力释放^[5]。

2. 竖向沉降 / 隆起

基坑底部隆起：软土区因开挖卸荷引发塑性回弹。

桩顶沉降：支撑系统松动或锚固失效导致整体下沉。

3. 转动变形

表现形式：桩体绕底部或某支点旋转倾斜。

常见于：单锚式支护或悬臂式支护中锚固力不足时^[6]。

三、淤泥质地质钢板桩支护条件下变形特点研究

根据监测数据，结合基坑开挖、型钢支撑搭建 / 拆除及周边荷载变化（尤其是北侧荷载持续增加）等施工活动，以下为关键分析结论，如图 3 所示。

（一）周边地表沉降分析

1. 总体趋势：所有测点均呈现沉降，北侧（DBC05）沉降最显著。

2. DBC05（北侧）：累计沉降达 122.3mm，与北侧荷载持续增加直接相关。

3. 突变点：支撑拆除后，各监测点均出现了沉降量突然增大的情况，需警惕支撑拆除后的土体回弹风险^[7]。

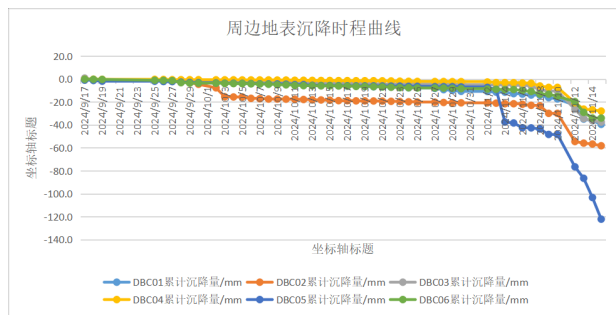


图3周边地表沉降数据时程曲线

（二）水平变形特点

1. 所有监测点均向基坑内侧偏移；
2. 在内侧钢支撑拆除后，各监测点均向基坑内侧方向出现较大位移量；
3. 由于基坑北侧地表荷载持续增加，且该处荷载显著大于其它方位，因此，DBP05的累计位移量达70.1mm，也显著大于基坑的其它方向^[9]。

如图4所示

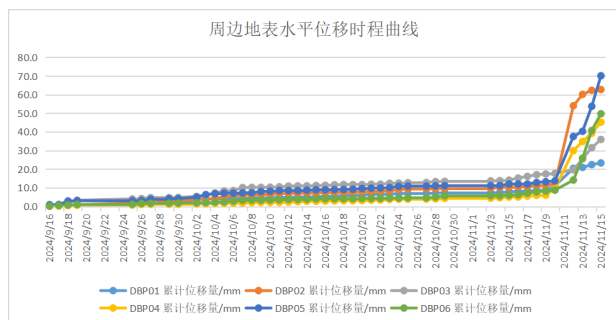


图4周边地表水平位移时程曲线

（三）立柱竖向变形特点

1. 立柱4个监测点在立柱施工完成后，均出现了不同程度沉降；
2. 随着基坑开挖的进行，立柱均出现不同程度的抬升现象，基坑立柱抬升顺序与开挖区域范围呈现关联现象；
3. 基坑开挖完成，底板施作后，立柱各监测点沉降监测数据均出现缓慢下沉特点，并随底板成型时间的推移和其它结构的施作，立柱沉降趋于平稳状态，如图5所示。

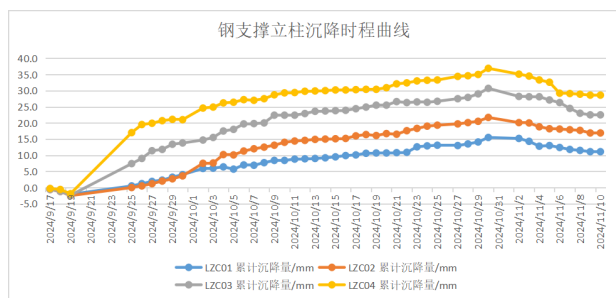


图5钢支撑立柱竖向位移时程曲线

（四）周边土体深层水平位移变形特点

1. 总体分析

所有测点都显示最大位移发生在中部深度（5-6米处），这是

淤泥地层的典型滑移面位置。0-5米浅层位移较小，验证了钢板桩顶部约束有效；15米以下基本无位移，验证了设计支护深度满足现场生产要求^[9]。

2. 分点分析特点

CX-1（西侧，时常受到机械荷载影响）

前期变化：随着基坑开挖，CX-1的累计位移逐渐增大，最大位移深度集中在5-6m（如5m深处累计位移达53.19mm），且增长速率较快。这与基坑西侧存在大型机械荷载，导致土体受到较大的侧向压力的现场工况相符。

中期变化：在基坑开挖到一定深度后，累计位移的增长速率有所放缓，但仍保持增长趋势（44-50mm）。这证明了随着开挖深度的增加，围护结构的支撑约束作用逐渐显现，对土体的侧向位移起到了一定的限制作用。

型钢支撑拆除后：型钢支撑拆除后（2024年11月10号后），CX-1的累计位移出现了较为明显的增长，11月12日：5m深处位移从49.89mm→51.27mm（+1.38mm）。11月30日：5m深处达59.64mm（较拆除前增约20%）。深层位移加剧：15m以下位移增幅显著（如16m深处从1.68mm→6.72mm），表明型钢支撑的拆除对基坑西侧的土体稳定性产生了较大影响，导致侧向位移显著增加。累计位移达63mm。在机械荷载叠加支撑拆除的双重效应叠加下，出现明显突变，从44mm跳到51mm，单日增量超7mm。与现场实际生产工况相符，如图6所示。

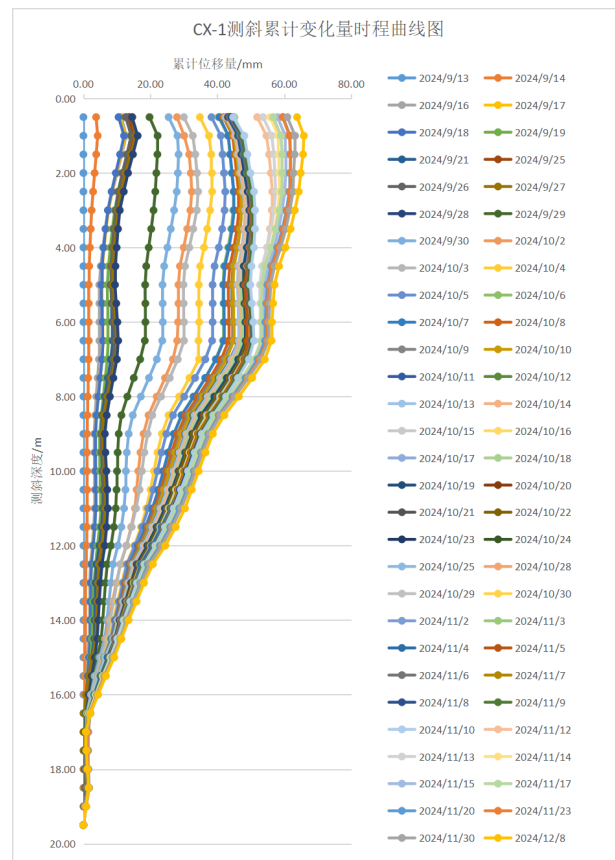


图6测斜累计变化量曲线

CX-2（南侧，有较小荷载影响）

前期变化：与CX-1类似，CX-2的累计位移也随着基坑开挖

逐渐增大,但增长速率相对较慢,最大位移深度3~4m(如3m深处累计位移45.68mm)。10月位移增速稳定(日均0.5~1mm)。这与南侧的地表荷载较小的实际工况相符。

中期变化:在基坑开挖过程中,CX-2的累计位移增长较为平稳,没有出现突增的情况。此变化证明了南侧围护结构能够有效地控制土体的侧向位移^[10]。

型钢支撑拆除后:型钢支撑拆除后,CX-2的累计位移也有所增长,但增长幅度相对较小,11月10日后位移小幅跳增(如4m深处48.6mm→50.36mm)。11月下旬趋稳(如4m深处维持52.76mm),反映南侧土体自稳性较好。此现象与南侧地表荷载较小的施工工况相符,也证明了围护结构本身具有较好的稳定性,如图7所示。

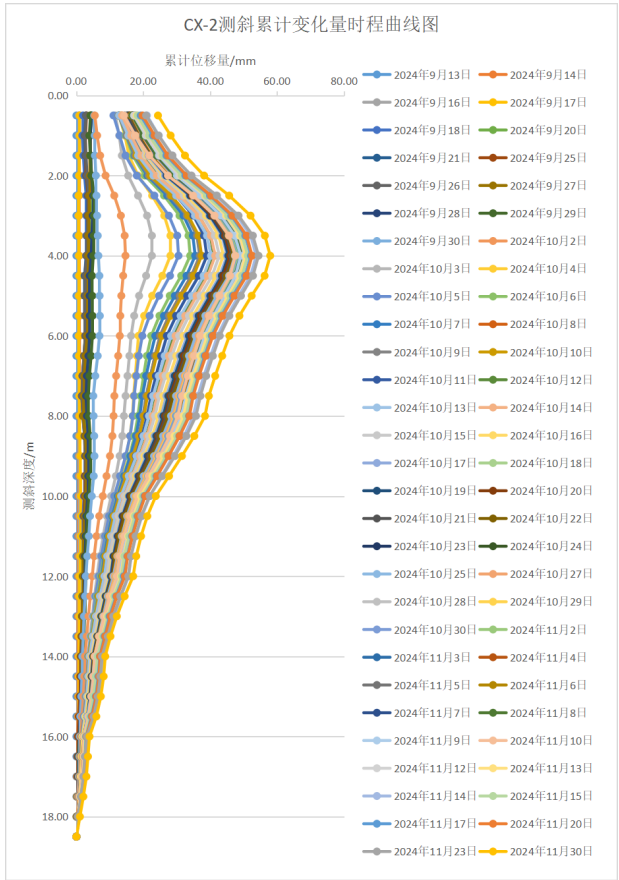


图7 CX-2测斜累计变化量曲线

CX-3(东侧,无荷载)

前期变化:由于基坑东侧无荷载,CX-3的累计位移在前期增长较为缓慢,甚至在某些时间段内出现负值(即向基坑内侧位移),这可能是由于测量误差或土体自然固结等原因造成的。

中期变化:随着基坑开挖的深入,CX-3的累计位移逐渐转为正值,并呈现缓慢增长的趋势。这可能是由于东侧围护结构在承受一定侧向压力后产生的位移。

型钢支撑拆除后:型钢支撑拆除对CX-3的累计位移影响较小,没有出现明显的增长,11月10日后位移无显著突变(如6m

深处:35.42mm→36.35mm),深层位移几乎无变化(如18m深处始终≤1.48mm)。这进一步证明了东侧无荷载条件下,围护结构本身具有较好的稳定性,与基坑东侧无周边地表荷载的工况相匹配,如图8所示。

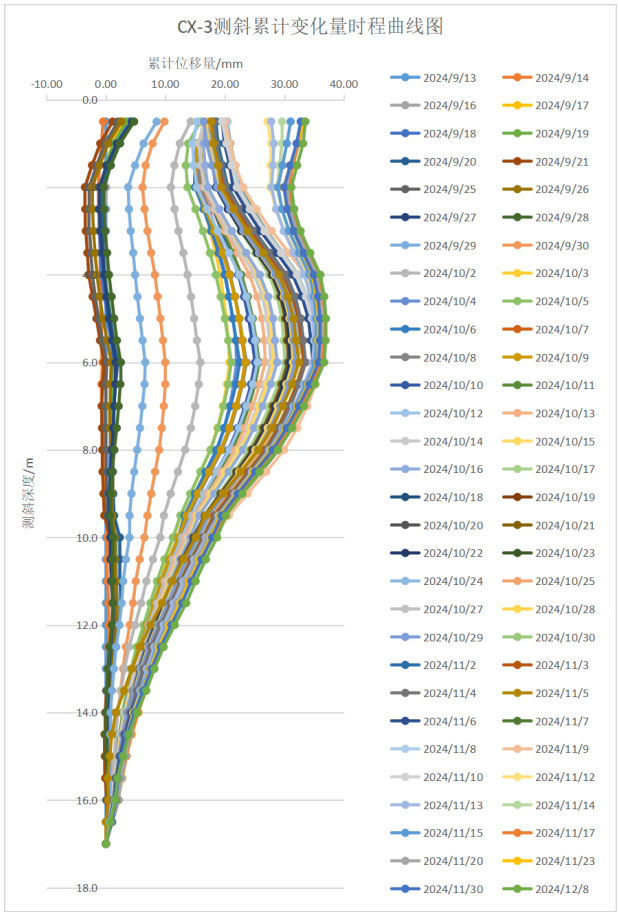


图8 CX-3测斜累计变化量曲线

CX-4(北侧,地表荷载持续增加)

前期变化:由于基坑北侧周边地表荷载一直不断增加,CX-4的累计位移在前期就呈现出较快的增长趋势。初始位移极大:9月13日0.5m深处已达52.82mm(远超其他点同期的0~5mm)。持续快速增长:10月底0.5m深处达62.87mm,反映荷载叠加效应。

中期变化:随着基坑开挖的深入和北侧地表荷载的持续增加,CX-4的累计位移增长速率进一步加快。这表明北侧围护结构在承受较大侧向压力时,其控制土体位移的能力相对较弱。

型钢支撑拆除后:型钢支撑拆除后,CX-4的累计位移出现了显著的增长。11月10日:0.5m深处61.3mm→77.2mm(+15.9mm,单日增幅26%)。12月8日:145.56mm(较拆除前增长137%)。全深度位移失控:浅层(0.5m)和深层(17m)同步大幅位移,表明整体失稳。这可能是由于北侧地表荷载较大,且型钢支撑的拆除进一步削弱了围护结构的稳定性,导致土体侧向位移显著增加,如图9所示。

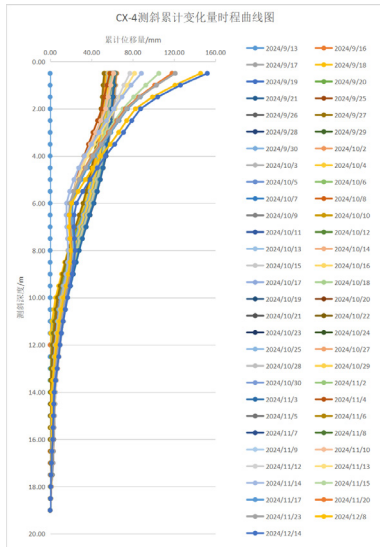


图9 CX-4 测斜累计变化量曲线图

四、钢板桩支护结构变形控制技术研究

（一）支护结构设计优化

增加嵌固深度（通常 ≥ 1.2 倍开挖深度）。

采用多道支撑或斜锚减少跨中弯矩。

施工条件允许的情况下，可采用其他基坑围护结构。例如混凝土搅拌桩墙，SMW 工法桩、混凝土板桩等，以增加围护桩墙的整体刚度。

（二）施工工艺改进

分层分段开挖，避免一次性卸荷过大。

及时施作基坑底板，减少基底土体涌起幅度，增加钢板桩中部支撑强度，抵抗钢板桩中部的土压力，抑制基坑外土体位移，以增加围护桩墙的整体刚度。

（三）变形控制措施

监测支撑轴力并及时复加预应力。

软土区采用注浆、搅拌桩改良被动区土体。

设置降水井或止水帷幕，降低孔隙水压力影响。

五、结论与展望

（一）研究结论

基坑开挖施工：随着基坑开挖的深入，各测斜点的累计位移

均呈现出不同程度的增长趋势。其中，受荷载影响较大的测斜点（如 CX-1 和 CX-4）增长速率较快，而无荷载或荷载较小的测斜点（如 CX-3）增长速率较慢。

型钢支撑拆除后：型钢支撑的拆除对各测斜点的累计位移均产生了一定影响，其中受荷载影响较大的测斜点（如 CX-1 和 CX-4）影响更为显著，出现了较为明显的位移增长。这表明型钢支撑在维持基坑稳定性方面起到了重要作用。

拉森钢板桩在开挖面深度范围内的测斜数据均出现了不同程度的“鼓肚子”现场，说明钢板桩的自身的刚度在该地质条件下相对较弱。

最后补充三个技术细节：

- 所有点在支撑拆除后都出现位移速率变化，证明拆除作业本身就是扰动源
- 淤泥地层表现出典型的时间效应，即使施工结束仍持续蠕变
- 位移曲线形态反映钢板桩 + 支撑体系对浅层约束较好，但未能完全控制深层滑移

（二）研究不足

本次研究的特殊地质条件下支护结构的变形特点也存在诸多不足方面，主要体现在以下几个方面。

- 基坑面积较小，难以与大型基坑做相应对比，研究范围代表性较小；
- 基坑监测点布设较晚，基坑开挖前监测数据较少；且现场施工干扰大，基坑钢支撑拆除后，基坑未能完全回填前的监测工作开展困难，监测数据相对较少，难以完全反应全面、完整的基坑施工过程的各监测测项的变化情况；
- 基坑监测中缺少钢支撑轴力方面的监测数据，无法反映基坑各施工阶段型钢支撑的轴力变化情况，确实相应数据指导现场施工安排和调整。

（三）后期研究展望

对于类似地质条件的基坑工程支护结构的变形研究，能有更大更深的基坑监测数据用于研究分析；应尽可能从基坑施工前期阶段介入监测工作，以掌握基坑施工支护结构的全过程变形监测情况，全面分析支护结构的变形特点；加强施工协调共组，尽可能减少施工对监测过程的干扰，采用合理监测方式，确保监测数据准确；同时应采集更为全面的监测数据，尤其是钢支撑轴力监测方面数据，能够更全面的分析施工各环节支撑结构的受力情况，更好的分析成因，指导施工，确保支护结构应用得当，施工过程安全。

参考文献

- [1] 郝增明, 闫楠, 白晓宇, 张立, 张启军, 林西伟. 杂填土地层深基坑微型桩-锚-撑组合支护体系受力特性原位试验 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2024(02): 755-77.
- [2] 史宏博, 袁棒, 王安明, 陈泰霖, 康文献, 费应春. 地层厚度非均匀性对基坑支护结构稳定性的影响研究 [J]. 建筑结构, 2023(S2): 2608-2615.
- [3] 鲁海涛, 刘世安, 刘雪颖. 特深基坑排桩支护连续破坏受有限元数值模拟研究 [J]. 中国建筑金属结构, 2023(06): 8-10.
- [4] 赵成江, 张世径, 玄超群, 于凯同, 程磊. 锚索布置对长短双排桩的受力影响分析研究 [J]. 建筑结构, 2022(S1): 2819-2825.
- [5] 吕松梅, 夏敏, 任光明, 范荣全, 梁永闪. 富水砂卵石层地区桩锚支护深基坑变形特性 [J]. 成都理工大学学报 (自然科学版), 2022(03): 347-357.
- [6] 曹程明, 时铁磊, 龙照, 叶帅华, 王宁. 桩锚支护上土下岩地层深基坑沉降与变形分析 [J]. 科学技术与工程, 2022(10): 4120-4126.
- [7] 余建民, 冯翠红, 闫银刚. 止水型复合土钉墙支护的研究与应用 [J]. 建筑技术, 2009(02): 132-135.
- [8] 李象范, 徐水根. 复合型土钉挡墙的研究 [J]. 上海地质, 1999(03): 1-11.
- [9] 孙林娜, 徐福宾. 水泥土墙复合土钉墙的协同作用机理数值模拟 [J]. 华侨大学学报 (自然科学版), 2020(03): 314-322.
- [10] 胡敏云, 欧阳维杰, 陈乾浩, 肖斌, 徐晓兵. 复合土钉墙工作特性的细观数值模拟研究 [J]. 浙江工业大学学报, 2021(04): 442-448.

电解铝用残极回收再利用过程中有害杂质控制技术研究

米文龙

国家电投集团铝电公司青铜峡分公司, 宁夏 青铜峡 751603

DOI:10.61369/ERA.2025110007

摘 要 : 尽管电解铝用残极具有较高回收再利用价值, 但其中富集的钠、氟化物、金属氧化物及硫、氮等有害杂质会影响再利用的效果与环境安全。本文则阐述了这些杂质的来源与危害, 在文中从预处理、净化处理到再利用过程, 系统地介绍机械清理、热解处理、浮选法、高温焙烧法等控制技术及应用情况。最终的研究表明, 经过合理地选择与优化技术, 可有效地降低杂质含量, 提升残极的利用价值, 进而为电解铝行业的绿色发展提供支持。

关 键 词 : 电解铝残极; 回收再利用; 有害杂质; 控制技术; 联合工艺

Research on the Control Technology of Harmful Impurities in the Recycling and Reuse Process of Residual Electrodes for Electrolytic Aluminum

Mi Wenlong

Qingtongxia Branch, Aluminum and Power Company, State Power Investment Corporation,

Qingtongxia, Ningxia 751603

Abstract : Although spent anodes used in electrolytic aluminum production possess significant recycling and reuse value, the harmful impurities they contain, such as enriched sodium, fluorides, metal oxides, sulfur, and nitrogen, can adversely affect the effectiveness of reuse and pose risks to environmental safety. This paper elucidates the sources and hazards of these impurities and systematically introduces control technologies and their applications, ranging from pretreatment and purification processes to reuse, including mechanical cleaning, pyrolysis treatment, flotation, and high-temperature roasting methods. The final research findings indicate that by reasonably selecting and optimizing technologies, the impurity content can be effectively reduced, enhancing the reuse value of spent anodes and thereby supporting the green development of the electrolytic aluminum industry.

Keywords : residual electrode of electrolytic aluminum; recycling and reusing; harmful impurities; control technology; joint process

引言

在电解铝行业中, 残极作为电解槽更换下来的废旧电极含有一定量的碳质成分, 它具有较高的回收再利用价值。然而残极在使用和存放过程中, 会吸附和富集多种有害杂质, 比如电解质成分(钠、氟化物等)、金属氧化物(铁、硅、钙等)以及硫、氮等元素, 若对这些杂质若不加以有效地控制, 则会对再利用过程中的产品质量、生产效率及环境安全造成极其严重的影响。因此研究和应用残极回收再利用过程中的有害杂质控制技术, 对于提高残极资源利用率、降低生产成本、减少环境污染具有非常重要的意义^[1]。

一、残极中有害杂质的来源与危害

电解铝用残极中的有害杂质来源广泛, 主要包括了电解生产过程中的混入、与外界环境的接触以及自身化学反应产生的物质。若从来源上看, 电解质成分中的钠和氟化物通常来自电解槽中的熔融电解质, 由于残极在电解的过程中与电解质产生了直接的接触, 此时便会吸附大量的 NaF、AlF₃ 等物质; 金属氧化物如

铁、硅、钙等则可能来自于原材料(如阳极糊中的杂质)、电解槽内衬磨损产生的碎屑以及生产过程中的机械混入; 而硫元素一部分来自焦炭原料, 另一部分是在电解的过程中与其他物质反应生成的硫化物; 氮元素一般均来源于空气, 因为残极在高温下会与氮气发生反应生成氮化物。

上述这些有害杂质的危害不容忽视。具体来说: 钠和氟化物的存在会降低再利用残极的导电性和抗氧化性, 甚至在高温下还

可能会与其他物质发生反应,进而影响产品的物理化学性能。而金属氧化物会增加残极的灰分含量,致使再制阳极的体积密度降低、孔隙率增加,最终会降低电解过程中的电流效率。硫和氮在电解过程中则会释放出有害气体(如 SO_2 、 NO_x 等),不仅会腐蚀设备,还会污染环境,危害着操作人员的身体健康。此外杂质的积累还会缩短再利用残极的使用寿命,使得生产过程中的能耗和成本被迫增加。因此必须有效地控制残极中的有害杂质,以实现其高效回收与再利用^[2]。

二、残极回收预处理过程中的杂质控制技术

残极回收再利用的预处理环节为控制有害杂质的第一道防线,它需要通过物理、化学等方法去除残极表面及孔隙中的部分杂质,进而为后续的净化处理和再利用奠定基础。在目前,常用的预处理技术有机械清理、热解处理和化学清洗等,对于上述技术的详细阐述如下。

(一) 机械清理技术

机械清理技术主要利用了机械力去除残极表面附着的电解质和粉尘等杂质,实践中常用的设备有振动筛、滚筒清理机和高压水枪等等。其中,振动筛能通过高频振动使残极表面的松散杂质脱落,比适用于去除颗粒较大的电解质块和粉尘;滚筒清理机则经由残极在滚筒内的相互碰撞和摩擦,达到清理表面杂质的效果,该设备对于形状不规则的残极具有较好的清理效果;高压水枪需要利用高压水流的冲击力去冲洗残极表面,它能够有效地去除附着较紧的电解质和油污等杂质。因为该技术具有操作简单、成本低的特点,所以在实际生产中得到了广泛地应用,可去除残极表面30%~50%的杂质,但对于残极内部孔隙中的杂质去除效果有限。

(二) 热解处理技术

热解处理技术原理是将残极置于高温惰性气氛中进行加热,使其中的挥发性杂质(如部分有机杂质、硫和氮的低沸点化合物)挥发出来,从而达到去除杂质的目的。一般热解温度需要控制在600~1000℃,而加热的过程中残极中的有机物质便会发生分解,将硫和氮的化合物转化为气态物质(如 H_2S 、 NH_3 等),再通过气体收集系统进行处理即可。但热解处理不单单可以去除部分有害杂质,还有助于提高残极的固定碳含量,能够改善其性能。某电解铝厂就采用热解处理技术对残极进行了预处理,结果显示,残极中的硫含量降低了20%~30%,且氮含量降低了15%~25%,可是该技术的能耗较高,需要严格地控制加热温度和气氛,以避免残极发生氧化。

(三) 化学清洗技术

所谓化学清洗技术,就是利用化学试剂与残极中的杂质发生化学反应,将其转化为可溶物或易挥发物质,以此去除杂质。现阶段常见的化学试剂有稀盐酸、稀硫酸、氢氟酸等等,面对不同的杂质往往需要采用不同的试剂。例如,氢氟酸可以与氟化物和硅氧化物反应,从而生成易挥发的 SiF_4 和可溶的 NaF 等物质;稀盐酸则可以溶解铁、钙等金属氧化物。结合实践来说,化学清洗技术对杂质的去除效率较高,尤其是对于残极内部的杂质具有较

好的去除效果^[3]。在某次实验数据当中表明,若采用合适的化学试剂和工艺参数,就能去除残极中80%以上的氟化物和60%以上的金属氧化物。然而该技术需要消耗大量的化学试剂,且产生的废液需要进行处理,否则将会造成二次污染,因此在应用过程中需要做好环保措施。

三、残极净化处理过程中的深度除杂技术

经过预处理后的残极依然含有一定量的有害杂质,还需要进行深度净化处理,以满足再利用的要求。而在当前,深度除杂技术主要涵盖了浮选法、磁选法、高温焙烧法和溶剂萃取法等等。

(一) 浮选法

浮选法是一种基于残极与杂质表面物理化学性质差异而形成的方法,经由添加浮选药剂,使杂质附着在气泡上并浮出水面,随后实现残极与杂质的分离。如果残极中含有金属氧化物等疏水性较差的杂质,则建议添加捕收剂(如黄药类、脂肪酸类等)使其表面疏水,然后在浮选机中通入空气产生气泡,接着杂质便会附着在气泡上被刮出。总的来说,浮选法对于细颗粒杂质的去除效果较好,可有效地降低残极中的铁、硅等金属氧化物含量,但需要根据杂质的类型选择合适的浮选药剂,且浮选后的废水也需要进行一定的处理。

(二) 磁选法

如今磁选法主要被用于去除残极中的铁磁性杂质,如铁屑、氧化铁等等。其原理是利用磁场的作用,使铁磁性杂质被磁选设备吸附,从而与残极分离。在实际当中,常用的磁选设备有永磁滚筒、磁选机等,一般根据残极的粒度和杂质的磁性强弱,可以选择不同的磁选强度和设备类型。该方法具有效率高、成本低、无污染等优点,对于含铁量较高的残极处理效果非常显著,可将残极中的铁含量直接降低至0.1%以下。

(三) 高温焙烧法

高温焙烧法需要将预处理后的残极在更高的温度(一般为1200~1500℃)和惰性气氛下进行焙烧,使得残极中的杂质进一步得到分解或挥发。基于高温条件,残极中的氟化物会与碳发生反应生成气态的 CF_4 等物质,而硫和氮的化合物会进一步被分解为气态物质,金属氧化物则会与其他物质反应生成低熔点的化合物,再通过挥发或沉降即可去除。实际上,高温焙烧法不单单可以深度地去除残极中的有害杂质,还能促进残极内部的石墨化,能有效地提高其导电性和抗氧化性。可是该技术对设备要求较高,它需要耐高温的窑炉和严格的气氛控制,且能耗也相对较高^[4]。

(四) 溶剂萃取法

溶剂萃取法即使使有机溶剂与残极中的杂质发生萃取反应,以此将杂质转移到有机相中,进而实现除杂的目的。该技术比较适用于去除残极中的一些可溶性金属离子和有机杂质,且对于特定的杂质具有较高的选择性。例如采用磷酸三丁酯(TBP)作为萃取剂,就可以有效地萃取残极中的铁、铝等金属离子。虽然溶剂萃取法的除杂效率高、选择性好,但有机溶剂的回收和处理成本也比较高,且可能会对环境造成一定的污染,因此在应用中需

要谨慎地选择萃取剂和工艺参数。

四、残极再利用过程中的杂质控制技术

残极经过预处理和净化处理之后,将会进入到再利用环节,例如用于制备再生阳极、碳砖等产品。但在再利用的过程中,仍需要采取相应的技术措施控制杂质的影响,以此确保产品质量。

就再生阳极的制备而言,残极作为原料之一,其杂质含量一定会直接影响到再生阳极的性能。因此为了控制杂质的影响,首先需要严格地控制残极的加入比例,一般情况下,残极的加入量不宜超过30%,以避免杂质积累的过多。其次是在配料过程中,可适当地添加一些改性剂(如抗氧化剂、黏结剂等),目的是改善再生阳极的性能,进而降低杂质的危害。例如添加适量的SiC可以提高再生阳极的抗氧化性,如此便能减少因钠、氟等杂质引起的氧化腐蚀。又或者说将添加沥青作为黏结剂,从而提高再生阳极的体积密度和强度,使孔隙率得到降低,以减少杂质的渗透。另外是在焙烧的过程中,要通过控制焙烧温度和时间,来促进杂质的进一步挥发和分解,促使再生阳极的质量得到提升。

当残极用于制备碳砖时,则需要控制其中的杂质含量,如此才能保证碳砖的耐高温性、抗腐蚀性和导电性。那么在生产的过程中,第一步是对残极进行精细化地破碎和筛分,该操作的目的是去除较大的杂质颗粒;然后再采用高温石墨化处理,使残极中的碳元素被进一步地石墨化,同时去除部分杂质;接着在成型和焙烧过程中,一定要严格地控制工艺参数,如成型压力、焙烧温度等,从而减少杂质对碳砖性能的影响。此外还可以在碳砖的表面涂覆一层防腐蚀涂层,如SiC涂层、BN涂层等等,旨在阻止杂质的渗透和腐蚀。

除了上述的应用领域之外,残极还可以用于制备活性炭、石墨电极等产品。同样地,在这些产品的应用中,杂质控制技术也至关重要。例如在制备活性炭时,通过活化处理(如蒸汽活化、化学活化等),不仅可以提高活性炭的比表面积和吸附性能,还能有效地去除部分杂质;而在制备石墨电极时,则可以通过多次提纯和石墨化处理,来降低杂质的含量,进而提高电极的导电性和机械强度。

五、结语

电解铝用残极回收再利用过程中的有害杂质控制是一项极为复杂的系统工程,它需要从预处理、净化处理到再利用过程进行全程控制。目前机械清理、热解处理、化学清洗、浮选法、磁选法、高温焙烧法等技术均已在实际生产当中得到了广泛的应用,并且取得了较好的除杂效果。经由上述这些技术的联合应用,就能够有效地降低残极中的钠、氟化物、金属氧化物、硫、氮等有害杂质含量,进而提高残极的再利用价值,对于资源浪费和环境污染也将得到减少。然而现有的技术仍存在一些不足之处,如部分技术能耗较高、处理成本较大、可能产生二次污染等等。因此,在未来,应加强对于新型高效杂质控制技术的研究与开发,比如新型吸附材料的应用、生物除杂技术、智能化在线监测与控制技术等。其中新型吸附材料如纳米吸附剂、多孔碳材料等,它具有比表面积大、吸附性能强等优点,有望实现对残极中微量杂质的高效去除;生物除杂技术则利用了微生物的代谢作用来去除杂质,该技术具有成本低、无污染等优点,是一种绿色环保的除杂方法;而智能化在线监测与控制技术主要是通过实时监测残极中的杂质含量和处理过程中的各项参数,实现自动化地调节,有利于提高处理效率和稳定性。同时还应加强残极回收再利用产业链的整合与优化,积极地建立从残极收集、运输、处理到再利用的一体化体系,以此提高整体的资源利用效率。以及加强政策支持和标准制定,为残极回收再利用过程中的杂质控制界定规范与要求,进而推动行业的健康可持续发展。相信随着技术的不断进步和应用的不断深入,往后电解铝用残极回收再利用过程中的有害杂质控制技术将变得更加成熟、高效、环保,终将为电解铝行业的绿色发展做出更大的贡献。

参考文献

- [1] 眉山市博眉启明星铝业有限公司. 电解铝残极热量回收系统:CN201922237194.8[P].2020-07-14.
- [2] 许晶, 刘伟, 关文斌, 等. 优质铝用预焙阳极制造技术的探索与实践[C]// 第二届国际铝用炭素技术会议论文集.2006:92-98.
- [3] 毛胜国. 浅论铝用预焙阳极高温混捏成型新技术[J]. 四川有色金属, 2009(3): 1-4.
- [4] 刘总兵. 电解铝生产过程中的危险和有害因素分析[J]. 中国金属通报, 2019(1): 250, 253.

高参数再热技术助力生物质能与垃圾发电

孙慧丽

上海市机电设计研究院有限公司，上海 200040

DOI:10.61369/ERA.2025110010

摘 要： 在生物质能与垃圾焚烧发电行业电价补贴退坡的背景下，提升汽轮机发电效率成为企业降本增效的核心路径。本文聚焦小型汽轮机高参数再热技术（涵盖蒸汽再热、烟气再热等技术类型），通过对工程热力学原理进行分析与技术研究，揭示其通过优化蒸汽循环或引入中间再热过程，可使朗肯循环效率较常规高温高压技术提升4–5个百分点，热耗率降低7%–8%。研究表明，该技术在发电效率提升、燃料成本降低及碳减排方面具有显著优势，但其规模化应用面临初始投资高、运维技术壁垒及行业标准体系缺失等挑战。

关 键 词： 小型汽轮机；再热技术；垃圾焚烧；能效提升；实证分析

High-parameter Reheating Technology Aids Biomass Energy and Waste Power Generation

Sun Huili

Shanghai Electro-Mechanical Design Institute Co., Ltd., Shanghai 200040

Abstract： Against the backdrop of a gradual reduction in electricity price subsidies for the biomass energy and waste-to-energy incineration power generation industries, enhancing the power generation efficiency of steam turbines has become a core approach for enterprises to reduce costs and increase efficiency. This paper focuses on high-parameter reheat technologies for small steam turbines (including steam reheat, flue gas reheat, and other technical types). Through analysis and technical research based on engineering thermodynamics principles, it reveals that by optimizing the steam cycle or introducing intermediate reheat processes, the efficiency of the Rankine cycle can be increased by 4–5 percentage points compared to conventional high-temperature and high-pressure technologies, with a corresponding reduction in heat consumption rate by 7%–8%. The study indicates that this technology offers significant advantages in terms of enhancing power generation efficiency, reducing fuel costs, and achieving carbon emission reductions. However, its large-scale application faces challenges such as high initial investment, technical barriers in operation and maintenance, and a lack of industry standard systems.

Keywords： small steam turbine; reheat technology; waste incineration; energy efficiency improvement; empirical analysis

一、概述

随着生物质能发电和垃圾焚烧发电产业竞争加剧及产业升级，电价补贴退坡或取消，企业对投资收益比愈发重视，经济性成为企业生存的关键。高参数再热技术作为一种新兴技术路线，可以使小型汽轮发电机组的发电效率得到显著提高，降低厂用电率，增加售电收入。尽管工程投资增加，但回报明显高于投资，较常规高温高压技术更具经济性。因此，提高汽轮发电机组的发电效率、研发高参数再热发电系统成为生物质发电和垃圾焚烧发电产业技术发展的必然趋势。

二、高参数再热汽轮机设备发展现状

（一）小汽轮机发展状况简述

能源日益紧缺及能源利用效率要求提高背景下，煤电系统自上世纪末开始逐步关停50MW以下小机组。小机组转型进入余热利用、可再生能源、工业自备电站等领域。新世纪前十年，余热利用成为小机组应用的重点领域，产品和参数不再标准化，强调设备稳定性和对工艺的适应性。近五年，随着经济发展放缓、节能减排要求提高及国家对可再生能源的支持，小型汽轮机应用领域发生了变化，对发电效率要求也更高^[1]。

作者简介：孙慧丽（1982.4.26—），女，汉族，山东聊城人，大学本科，传统动力系统与设备优化 & 新能源与可再生能源技术。

（二）再热汽轮机发展现状

汽轮机技术的不断进步及对经济效益的追求，促使小型机组也开始采用再热技术。2013年，国内首台65MW 高温超高压再热机组在唐山建龙钢铁投运，开启了小型再热汽轮机在国内的应用先河。随后，2017年，国内首台50MW 超高温超高压再热机组在津西钢铁投运，进一步推动了该技术在小型机组中的发展。目前，小型再热汽轮机已广泛应用于垃圾发电、生物质发电、钢铁行业煤气回收发电以及太阳能光热发电等多个领域（见表2-1），展现出良好的应用前景和经济价值^[2]。

表2-1 部分采用小型再热发电汽轮机工程示例

项目名称	领域	汽轮机功率 /MW	汽轮机蒸汽参数 (MPa/°C /°C)	汽轮机转速 (r/min)
光大江阴三期垃圾发电	垃圾发电	25	6.3/445/425	5000
光大苏州垃圾焚烧发电	垃圾发电	40	12.6/425/405	5000
安徽国祯明光生物质发电	生物质发电	33	13.2/538/538	5025
深能源泗县生物质发电	生物质发电	40	13.2/538/538	5025
河北津西钢铁	钢厂余气利用	40	13.2/566/566	5025
吉林建龙钢铁	钢厂余气利用	65	13.2/538/538	3000
中广核太阳能德令哈项目	太阳能光热	50	10/381/381	6000+3000
西北院哈密光热发电项目	太阳能光热	50	14/550/550	6000+3000

小型再热发电汽轮机结构紧凑，多采用单缸单轴或双缸双轴设计。在转速设计方面，50MW 以下高温超高压机组一般采用高转速方案，而50MW 及以上机组则多采用常规转速。对于垃圾发电汽轮机，由于锅炉出口蒸汽温度的限制，参数多为中温中压或中温次高压，因此再热技术成为提升其发电效率的关键措施。

三、高参数再热技术分类

（一）烟气再热技术

烟气再热法是常见的再热技术，其原理是利用锅炉烟道中的再热器，把汽轮机已做过部分功的蒸汽加热，再送入汽轮机中、低压缸继续做功。该技术可使蒸汽温度加热到550℃~600℃，总热经济性提高约7%，但管道压损会使经济效益降低1.0%~1.5%，且汽轮机甩负荷时可能导致超速。因此，需配置高灵敏度和可靠性的调节系统及旁路系统，烟气中间再热流程图见图3-1。

烟气中间再热按传热方式分为对流、辐射及半辐射三种形式。对流式再热器一般设置在水平烟道或尾部竖井内，通过获取烟气对流释放的热量来实现蒸汽的再热，烟速需适中。辐射式再热器主要吸收炉膛热辐射，有屏式和墙式两种结构。壁式再热器位于炉膛水冷壁的上部，承担低温段功能，需限制炉膛出口烟温^[3]。

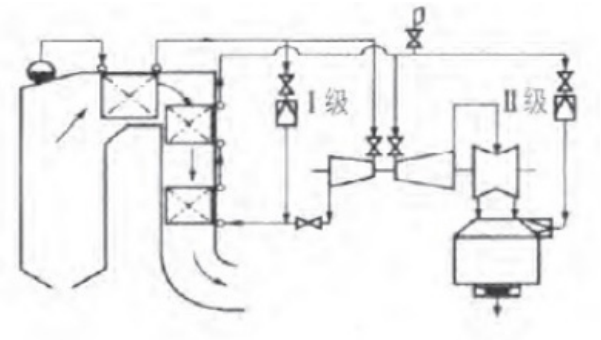


图 3-1 烟气中间再热流程图

（二）蒸汽再热技术

炉外蒸汽再热技术规避了烟气腐蚀风险，利用其他热源对汽轮机高压缸乏汽进行再热。其原理是锅炉出口的主蒸汽进入汽轮机高压缸做功，随后进入炉外再热器，通过其他热源加热后的蒸汽再次进入汽轮机，实现二次做功见图3-2。该技术依据加热汽源不同，分为多种类型，如汽水分离再热技术、汽包再热技术等。

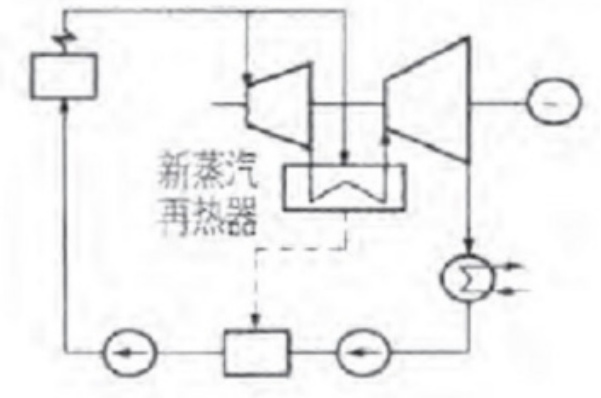


图 3-2 蒸汽中间再热流程图

汽水分离再热器（MSR）技术在核电机组中广泛应用，其原理在于通过汽水分离装置去除高压缸排汽中的水分，并利用再热管束对去湿后的蒸汽进行加热，从而提升蒸汽的品质和温度。汽包中间再热系统利用汽包中的饱和蒸汽对高压缸排汽加热后再进入低压缸，提高循环热效率。主汽中间再热/抽汽中间再热系统则利用主蒸汽或汽轮机中间抽汽作为加热汽源^[4]。

（三）两种再热技术对比

炉内再热凭借成熟的技术和简洁的系统架构，具有显著优势，一旦攻克烟气腐蚀这一关键难题，极有可能跃升为主流技术。与之形成对比的炉外再热技术虽然成功规避了烟气腐蚀风险，但其系统构造复杂，且在国内尚未积累足够的技术实践经验，实际应用中面临诸多不确定性。不同项目的再热循环方式见表3-1。

表3-1 不同项目的再热循环方式

项目名称	主蒸汽压力 /MPa	主蒸汽温度 /°C	再热方式	再热蒸汽温度 /°C	备注
荷兰 AEB 电厂	13.0	420	炉外再热	320	2007 年投运
光大江阴三期	6.3	445	炉内再热	425	2018 年投运
光大苏州项目	12.6	425	炉内再热	405	2019 年投运
广环投从化项目	12.5	480	炉内再热	415	2022 年投运
康恒三河项目	13.3	445	炉外再热	190	2021 年投运
宝山再热能源项目	13.0	450	炉外再热	205	2023 年投运
光大环保博罗三期	12.6	425	炉内再热	405	2022 年投运

四、再热汽轮机设备

再热蒸汽参数与机组效率紧密相关。理论上，再热蒸汽温度的提升能有效提高机组的经济性，实现更高效的能源转化。但实际应用中，再热温度的设定受到金属材料耐高温性能的制约。考虑到材料的承受极限，为确保机组安全稳定运行，通常将再热蒸汽温度设为与初蒸汽温度一致。再热蒸汽压力与循环初终参数、再热温度等因素有关，还需考虑回热抽汽压力、材料消耗、投资费用等问题，存在最佳值，不同设备厂家选取的再热蒸汽参数略有不同。

小型再热汽轮机与传统小型汽轮机配置基本相似，冷却方式可采用湿冷或空冷，排汽方向多样，功率范围 25 ~ 100MW，主汽参数范围 6 ~ 14MPa(a)/380~540°C。各设备厂家在转速选择、进汽方式、通流设计、本体结构等方面有自身特点。

五、再热技术应用国内外案例

（一）江阴三期垃圾发电

江阴三期垃圾焚烧发电项目设计总规模为日处理生活垃圾 1000 吨，配置 2 台 500t/d 的焚烧炉和一台 25MW 的汽轮机。该项目汽轮机采用东方汽轮机有限公司设计制造的 N25-6.3/445/425 型垃圾发电汽轮机，机组型式为单缸单轴，采用冲反结合、高转速设计，其原则性热力系统图见图 4-1。

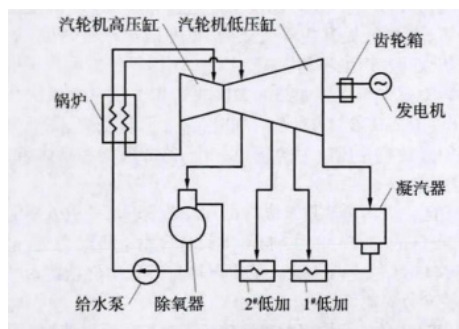


图 4-1 江阴三期项目原则性热力系统

该项目采用炉内再热工艺，将汽轮机高压缸排汽导入锅炉尾部再热器实现烟气再热。针对再热器高温腐蚀风险，通过喷涂防护层加以防范。采用再热技术后，全厂发电效率可达 27%，其炉内再热技术原理与小型再热机组相似，使得厂房规划与汽机设计更易实现^[5]。

（二）苏州市垃圾焚烧发电厂提标改造项目

苏州市垃圾焚烧发电厂提标改造项目一期装设 3 台中温超高压再热蒸汽锅炉和 2 台 40MW 汽轮机组。该项目汽轮机组采用东方汽轮机有限公司设计制造的型垃圾发电汽轮机，机组型式为双缸双轴，采用冲反结合、高转速设计，项目原则性热力系统图见图 4-2。

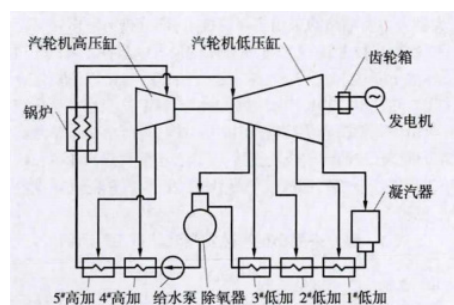


图 4-2 苏州项目原则性热力系统

本项目借助再热技术，主蒸汽参数能够在 425°C 温度保持条件下，将压力提升至超高压水平。这不仅提高了汽轮机效率，还避免了末几级出现蒸汽湿度偏大的问题。此外，该项目优化回热配置，采用“2 高加 + 1 除氧 + 3 低加”的多级回热系统，显著提升了蒸汽循环效率。与江阴三期项目相比，汽轮机热耗降低约 10%。需要指出的是，该技术由于采用炉内再热方式，为应对高温腐蚀，需在再热器表面喷涂防护层，或选用特殊耐高温材料制造。

（三）荷兰阿姆斯特丹 AEB 焚烧厂项目

荷兰阿姆斯特丹 AEB 焚烧厂始建于 1969 年，原有 4 条垃圾焚烧线。2007 年新增 2 条焚烧线，并采用炉外饱和蒸汽加热的再热循环系统工艺，将发电效率提高到 30% 以上，项目再热循环系统图见图 4-3。

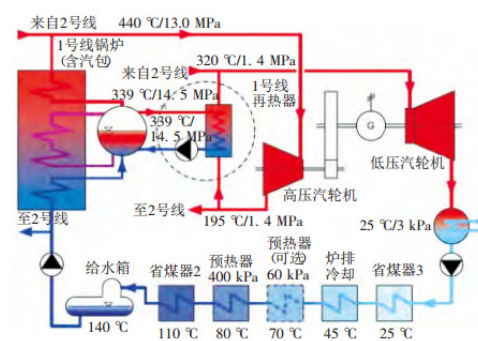


图 4-3 荷兰 AEB 焚烧厂项目再热循环系统图

新建的 2 条焚烧线采用以下工艺：

1. 在锅炉受热表面的关键部位采用耐高温耐腐蚀的 Inconel 625 保护层。这种镍镉合金材料是提高发电效率的各种设计之基础，能使锅炉和水 - 蒸汽循环达到一个较高水平。

2. 新建焚烧线主蒸汽参数为13MPa/440℃，再热蒸汽参数为1.4MPa/320℃，锅炉在高温腐蚀防护和磨损控制方面进行优化设计，腐蚀和磨损较小。

3. 将主蒸汽压力提高到13MPa（超高压等级），综合考虑设备材料、系统设计及安全运行等多方面因素，保证机组的安全稳定运行。

4. 采用烟气再循环，降低燃烧过程的氧含量水平，从通常的8%～11%降低至6%。不仅烟气体积降低了40%，而且烟卤损失的热量也降低了。

5. 汽轮机采用分缸方式，高压缸部分采用高速汽轮机，高压缸排汽进入蒸汽式再热器再热后进入低压缸继续做功，从而进一步提高汽轮机的效率。

气腐蚀问题一直是再热技术推广的一大障碍。一种有效的解决方案是改变热源路线，避免烟气直接接触再热器。如采用汽包再热和外置再热系统，可以有效规避这一问题，不仅提高了系统的稳定性和安全性，还为再热技术在焚烧发电领域的广泛应用提供了新的可能性。

在生物质与垃圾焚烧发电产业中，再热技术的应用是提高电厂经济效益的有效手段。如能有效解决烟气腐蚀问题，则炉内再热技有望成为主流技术。相比之前，汽包再热与外置再热虽然避开了烟气腐蚀，但系统复杂，国内运行经验不足，工程实践中存在风险。在不同系统中，应根据不同的边界条件选择合适的汽轮机配置方案，以提升全厂经济效率。

六、存在问题及前景展望

再热技术在焚烧发电厂中的使用取得了显著的经济效益，因此受到越来越多业主方的关注。然后，传统炉内再热的再热器烟

参考文献

- [1] 中国城市生活垃圾焚烧发电年度报告2023.
- [2] 国家发改委《生物质能发展“十四五”规划》.
- [3] 国家发展改革委《生物质发电项目建设管理办法》[Z].2021.
- [4] 王松岭等《汽轮机原理及节能技术》[M].2020.
- [5] ASME Standard.Power test code-Part 6: Steam turbines[S].2019.

压力容器设计及制造过程中降低应力集中的策略

李伟光

辽宁 沈阳 110141

DOI:10.61369/ERA.2025110011

摘 要： 压力容器主要用于化工厂、炼油厂盛放气体、液体等物质，其在使用过程中是否稳定、可靠，将直接关系着行业的安全生产。在压力容器使用过程中，可能会出现应力集中问题，影响压力容器使用效果。为此，文章从压力容器设计及制造角度进行应力集中问题的分析，并提出一些解决建议，希望能减少或消除应力集中问题，保障压力容器可靠、安全的使用。

关 键 词： 压力容器；设计及制造；应力集中；降低

Strategies for Reducing Stress Concentration in the Design and Fabrication of Pressure Vessels

Li Weiguang

Shenyang, Liaoning 110141

Abstract： Pressure vessels are mainly used in chemical plants and oil refineries to hold gases, liquids and other substances, and whether they are stable and reliable in the process of use will be directly related to the safe production of the industry. During the use of pressure vessels, stress concentration problems may occur, affecting the use of pressure vessels. For this reason, the article will analyse the stress concentration problem from the perspective of pressure vessel design and manufacturing, and put forward some solution suggestions, hoping to reduce or eliminate the stress concentration problem and guarantee the reliable and safe use of pressure vessels.

Keywords： pressure vessel; design and manufacture; stress concentration; reduction

引言

压力容器有圆柱体、椭圆体、球体等不同形式，常被应用于化工厂、加工厂以及炼油厂中，主要是盛放液体、气体，内直径一般 $\geq 0.15\text{m}$ ，容积 $\geq 0.025^3$ ，属于密闭设备。压力容器实际应用中，会承载静态、动态载荷，设计人员需要考虑多方面因素，使压力容器应力状态符合要求。随着压力容器的不断发展，高压压力容器受到广泛关注，常会应用于水射切割设备、聚乙烯管反应器等方面。在压力容器应用过程，气体、液体的出入口区域会发生应力集中情况，与封头的形式有关，比如在压力容器中，螺纹塞根本会出现发生应力集中。应力集中是压力容器的常见问题，会直接影响压力容器的使用，比如压力容器应力集中时，容易缩短压力容器的构件寿命，导致压力容器构件出现变形或者不均匀的问题，甚至会导致压力容器构件失效，同时应力集中还有可能导致裂纹、断裂等问题发生，增加压力容器的使用风险。因此，如何降低压力容器的应力集中问题，是压力容器安全、可靠使用的关键。在降低应力集中方面，可以从设计、制造等方面着手，减少应力集中的问题。比如设计人员在压力容器设计中，可以引入一些合适的材料，并考虑应力分布情况，避免应力集中；设计人员也可以对压力容器的结构进行优化，消除、减轻应力集中的问题。当然，制造环节也可以消除压力容器应力集中的问题，比如对压力容器的生产工艺进行优化，可以有效控制应力产生，避免应力集中。因此，文章从压力容器设计、压力容器制造过程角度探讨降低应力集中的措施具有非常重要的价值，一方面可以保障压力容器有效应用，另一方面也能避免压力容器使用过程中发生安全问题^[1]。

一、压力容器

压力容器广泛应用于化工、炼油厂以及加工厂中，用于盛放气体、液体。从压力容器的用途来看，其包括传热、反应、分离以及储运等，具有多方面用途。为此，本章节将详细介绍压力容器，分析压力容器的特点，以下将进行详细阐述。

（一）压力容器介绍

压力容器常被用于盛放化工厂、炼油厂中的气体、液体，包括反应、传热、分离、储运等类型。比如反应类型的压力容器，其用于物理、化学方面的反应；传热类型的压力容器，常被应用于液体、气体物料的存放、运输等。从压力容器的应用形状来看，其有圆柱体、球体、椭圆体等不同类型。以球形、圆柱形压

力容器为例，其中球形压力容器由顶部平台、盘梯、中间平台等部件构成，罐体的尺寸较大，安装过程会采用由下向上的顺序进行焊接固定。圆柱形压力容器由筒体、封头、支座、人孔、接管法兰、管口等部分构成，同时也包括计量装置、仪器仪表等部分，共同组成了进压力容器^[2]。（图1为球形压力容器基本结构）

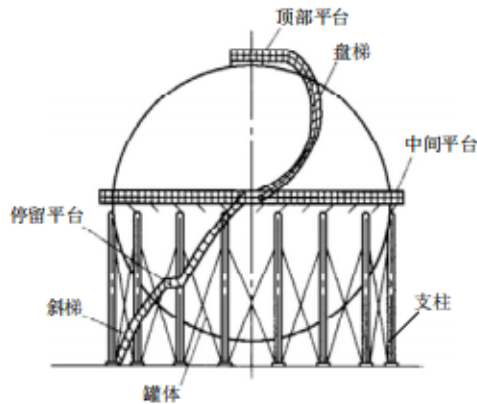


图1 球形压力容器基本结构

压力容器是化工厂、炼油厂的常用设备，其基本参数关系着压力容器可靠、安全的使用，是压力容器设计、制造以及检测等重要依据。从容器的基本参数来看，主要包括工作压力、设计压力、计算压力、公称压力、设计温度、公称直径、许用应力、安全系数、厚度、设计寿命、焊接接头系数等。工作压力是指压力容器在正常运行过程所能产生的最高压力；设计压力是指压力容器设计时，所设定的最高压力，一般要求设计压力超过工作压力；计算压力是确定元件厚度的压力值，计算压力一般等于设计压力；公称压力主要为压力容器设计、制作以及使用过程，压力划分标准分为美洲、欧美两个体系；设计温度是指压力容器在工作中的温度情况，一般设计时的温度超过压力容器实际运行中的最高温度；公称直径是指压力容器及其零部件在设计、制造过程，将容器及零部件的尺寸划分为若干标准等级，以 DN+ 数字的形式表示，比如 DN1500 表示内径是 1500mm 的压力容器；许用应力是指材料失效的应力大小；安全系数是指压力容器材料的安全系数，设置过程需要参考各种因素，以保障安全系数符合要求；厚度是压力容器壁厚，包括设计厚度、计算厚度、有效厚度等，其中计算厚度是指压力容器元件计算的最小厚度、设计厚度是指设计中加入腐蚀量的厚度；有效厚度是指压力容器实际作用中的厚度；设计寿命是指压力容器在使用过程中，会考虑使用环境、载荷情况、材料性能等，确保元器件的有效使用寿命；焊接接头系数是压力容器焊接头的系数，具体是指焊接金属与焊接母材强度比值^[3]。

（二）压力容器特点

压力容器有圆柱体、椭圆体、球体等不同形式，常被应用于化工厂、加工厂以及炼油厂中，用于气体、液体的盛放，属于密闭容器设备。从容器的特点来看，其具有密封性、专业性、

结构稳定性等。一是安全性。压力容器具有安全性的特点，由于压力容器常被用于化工厂、加工厂的物质存放，很多物质本身具有易燃易爆的特性，如果存放的容器安全性不高，就可能会发生泄漏、爆炸等安全问题，严重影响企业的运营及发展。由于压力容器存放的物质通常比较危险，安全性成为压力容器设计、制作的关键指标，设计人员往往会在容器的安全性方面下功夫，消除容器的安全隐患，保障容器安全、可靠的使用。二是专业性。压力容器具有专业性特点，比如容器所存放的物质都具有腐蚀性，一般要求容器拥有较高的抗腐蚀性，同时也需要容器具有较高的密封性，这样能避免相关物质泄漏，造成更为严重的安全事故。三是结构稳定性。容器在设计、制造过程，一般会根据使用要求，采用不同技术工艺，以提升容器的结构稳定性。在设计与制造过程，一般需要避免由于技术工艺所引发的应力集中问题，避免发生爆炸等安全事故^[4]。

（三）压力容器用途

压力容器是炼油厂、化工厂的常用设施，主要用于储存气体、液体等工业物质，用途分为反应、传热、分离、储运。反应压力容器是指用于物理、化学反应的容器；传热压力容器是指用于介质热量交换的容器；分离压力容器是用于固体、液体、气体分离的容器；储运压力容器是用于液体、气体物料存放与运输的容器。不同类型的容器作用不同，一般需要相关行业结合自身实际情况进行选择，以发挥容器的作用，保障企业生产稳定运行^[5]。表1为容器基本信息。

表1 压力容器基本信息

类别	内容
用途分类	反应容器、传热容器、分离容器和储运容器
压力等级	低压为 $0.1\text{MPa} \leq p < 1.6\text{MPa}$ ； 中压为 $1.6\text{MPa} \leq p < 10.0\text{MPa}$ ； 高压为 $10.0\text{MPa} \leq p < 100.0\text{MPa}$ ； 超高压为 $p \geq 100.0\text{MPa}$ 。
内直径	$\geq 0.15\text{m}$
容积	$\geq 0.025^3$

二、压力容器设计及制造过程中的应力集中问题及原因

容器常被用于盛放化工厂、炼油厂的液体、气体，内直径一般 $\geq 0.15\text{m}$ ，容积 $\geq 0.025^3$ ，具有良好的专业性与安全性。容器实际应用中，会承载静态、动态载荷，设计人员需要考虑多方面因素，使容器应力状态符合要求。

（一）应力集中问题

容器在使用期间，可能会遇到应力集中的问题，容易缩短容器的构件寿命，导致容器构件出现变形或者不均匀的问题，甚至会导致容器构件失效。同时，容器发生应力集中后，其稳定性、安全性将受到威胁，比如容器局部性

能下降，会引发压力容器疲劳，甚至还会导致压力容器出现爆炸等安全事故，影响行业正常生产^[6]。

（二）应力集中问题原因

压力容器是化工厂、炼油厂等行业的重要生产设施，常用于反应、传热等环节，关系着行业的生产成效。应力集中是压力容器的常见问题，在应力集中的影响下，压力容器安全性、稳定性将遭受威胁，可能导致裂纹、断裂等问题发生，增加压力容器的使用风险。从导致应力集中问题的原因来看，包括结构设计、生产制造以及操作工序等方面。一是结构设计。结构设计是压力容器发生应力问题的原因之一，主要原因在于封头设计方面，如果设计人员在压力容器中的封头设计不合理，就容易发生应力集中的问题，比如，压力容器设计中通常采用回转壳体和成型的封头。如果在结构设计方面采用平盖封头，会大幅降低压力容器的应力分布，出现应力集中的问题。二是生产制造。生产制造是压力容器应力集中的原因之一，比如压力容器生产制造过程，缺乏对压力容器棱角方面的关注，如果棱角处理方面不符合要求，就容易影响压力容器的密封性，发生应力集中的问题。三是操作工序。操作工序是压力容器制造过程的关键，可能会由于操作工序失误以及未按照要求标准进行操作，就会影响生产效果，导致压力容器发生应力集中的问题，比如焊接点、切割点等方面的操作不符合要求，就容易出现应力集中的问题，造成较大的安全事故^[7]。

三、压力容器设计及制造过程中的应力集中降低措施

压力容器是化工、炼油等行业的关键设施，常用于生产过程的反应、传热等环节。压力容器的使用稳定及安全尤为重要，但使用过程可能由于设计、制造等方面原因，出现应力集中的问题，进而影响压力容器的使用效果。本章节将结合上述分析的压力容器应力集中原因，对压力容器设计及制造过程提出一些建议，希望能为降低压力集中提供参考，保障压力容器有效应用。

（一）降低应力集中分析

第一，合理选择封头。从上述分析来看，封头是影响压力容器密封性的关键，合理选择封头，关系着压力容器的安全性、密封性。因此，压力容器设计中，设计人员需要根据压力容器的用途进行合理选择，比如压力容器的封头包括半球形、平封头等类型，在压力容器实际的结构设计过程中，通过采用回转壳体和成型封头，提高压力容器的密封性。第二，减少刚度差。在应力集中方面，可以从减少刚度差方式降低应力集中的问题，进一步提高压力容器使用过程的安全性及稳定性。比如在设计环节，设计人员可以通过调整刚度差方式降低容器压力，避免压力容器发生不平衡的问题。同时在压力容器设计方面，可以不断优化压力容器周围结构的设计，对局部做出调整并优化工艺，不断强化局部

的各项性能指标，这样可以避免发生应力集中的问题。第三，增加圆角半径。在应力集中发生方面，可能由于棱角问题发生应力集中，为了解决这一问题，可以从焊接工艺出发，比如注重焊接操作要点，保证焊接过程的平稳性，避免发生应力集中的问题。同时压力容器接口端等位置，都通过增加圆角半径，将接口处打磨成圆角，减少棱角产生。第四，焊接工艺。焊接工艺是发生应力集中问题的因素之一，在焊接过程一般要避免点焊，操作人员应从焊接工艺及技术方法出发，避免发生应力集中的问题，同时在焊接过程也要控制焊缝余高的数值，以提高压力容器结构性能与质量，避免应力集中问题发生^[8]。

（二）完善设计及制造方案

压力容器设计及制造过程会产生应力集中问题，相关行业要完善压力容器设计及制造方案，减少应力集中问题发生。一是设计及制造目标。根据降低应力集中的问题，相关行业要分析设计、制造环节发生应力集中的问题原因，明确设计流程以及制造流程的标准要求，减少应力集中问题发生。二是加强设计及制造过程的管控。相关行业应从降低应力集中问题出发，完善设计及制造过程的管控措施，比如基于焊接生产过程的应力集中控制，相关行业要制定针对性的控制目标，严格监督压力容器焊接过程，以避免由于焊接不到位所引发的应力集中问题。三是不断优化设计及制造方案。设计环节与制造环节是引发应力集中问题的原因之一，相关行业要做好设计、制造环节的优化与调整，避免发生应力集中的问题^[9]。

（三）制订配套措施

在压力容器设计及制造过程，相关行业要制订配套措施，以实现设计、制造过程的控制，降低应力集中。第一，制订检测方案。在压力容器生产制造完成后，一般需要对压力容器进行检测，以便找出其中的问题或瑕疵。基于降低应力集中的问题，相关行业可以将生产制造中引发应力集中的要素加入检测范围，通过检测方式及时找出问题，提升压力容器生产制造的质量，降低压力集中。第二，组建专业队伍。设计、制造是压力容器出现应力集中的原因之一，与人员素质有着直接关系，比如设计人员对应力集中问题不了解，在实际设计中就可能出现考虑不周的情况，发生应力集中的问题；生产人员在压力容器生产加工过程，由于操作不符合要求，可能导致压力容器使用过程出现应力集中的问题。为此，相关行业在降低压力容器应力集中方面，可以从专业化队伍组建的角度出发，比如做好人才引进工作，结合一些优秀的引才方案，组建高素质的设计队伍、生产队伍，以保障设计、生产阶段的规范性，实现降低应力集中目标。从人才培养出发，对现有设计人员、生产人员进行针对性培训教育，帮助设计人员、生产人员掌握降低应力集中的要点与方法，这样能避免设计、生产中出现问题，实现降低压力容器应力集中，保障压力容器的稳定、可靠使用^[10]。

四、结束语

综上所述，压力容器是化工、炼油等行业的关键设施，但使用过程可能由于设计、制造等方面原因，出现应力集中的问题，进而影响压力容器的使用效果。为此，文章从压力容器应力集中原因角度，提出一些建议，比如压力容器设计中，设计人员需要根据压力容器的用途进行合理选择封头；设计人员可以通过调整刚度差方式降低容器压力，避免压力容器发生不平衡的问题；相

关行业要分析设计、制造环节发生应力集中的问题原因，明确设计流程以及制造流程的标准要求，减少应力集中问题发生；相关行业可以将生产制造中引发应力集中的要素加入检测范围，通过检测方式及时找出问题，提升压力容器生产制造的质量；相关行业要对现有设计人员、生产人员进行针对性培训教育，帮助设计人员、生产人员掌握降低应力集中的要点与方法，这样能避免设计、生产中出现等问题。希望上述探讨与分析能为降低压力容器应力集中提供参考，保障压力容器的有效应用。

参考文献

[1] 王晓飞, 刘林. 浅析如何在压力容器设计制造过程中降低应力集中问题 [J]. 中国设备工程, 2024, (13): 88–90.

[2] 张翔兮. 压力容器设计及制造过程中降低应力集中的措施 [J]. 现代制造技术与装备, 2023, 59(09): 174–176.

[3] 薛光磊, 陈璐, 范国伟, 等. 压力容器设计及制造过程中降低应力集中的策略 [J]. 产业与科技论坛, 2023, 22(17): 54–55.

[4] 蒋?. 浅析如何在压力容器设计制造过程中降低应力集中问题 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2022, 42(18): 104–105.

[5] 杨丽霞. 压力容器设计及制造过程中降低应力集中的措施 [J]. 流体测量与控制, 2022, 3(03): 5–7+18.

[6] 党亚茹, 张满航. 压力容器设计及制造过程中降低应力集中的措施 [J]. 石化技术, 2021, 28(02): 166–167.

[7] 沈愚, 刘科明. 压力容器设计及制造过程中降低应力集中的措施 [J]. 化工设计通讯, 2020, 46(06): 110–111.

[8] 朱沙沙, 史艳梅. 降低压力容器设计制造应力集中的措施 [J]. 化工设计通讯, 2016, 42(09): 62+83.

[9] 胡志肖. 浅析降低压力容器应力集中的措施 [J]. 中国科技信息, 2013, (03): 99.

[10] 段亚平. 降低压力容器设计制造应力集中的措施 [J]. 应用能源技术, 2010, (05): 39–40.

佳木斯 EBZ-260 型掘进机在固体钾盐矿井的优化改进

尹川邦, 杨俊华

金诚信矿业管理股份有限公司, 云南 昆明 650000

DOI:10.61369/ERA.2025110012

摘 要 : 随着国内外固体钾盐矿采掘行业的发展, 掘进机的应用愈发广泛。我国从20世纪60年代起便开始研制和运用掘进机, 经过持续的自主创新、与实际工况的结合以及不断吸收国外先进技术, 其制造技术已趋于成熟。不过, 在面对一些特殊工况时, 仍存在一定的不足之处。本文聚焦佳木斯 EBZ-260 型掘进机在固体钾盐矿井中的应用情况, 围绕其优化改进建议展开论述, 重点针对该设备在现场使用中存在的问题及高发故障, 就如何有效对设备进行结构优化完善、降低设备故障率、提高设备实际运行效率等内容进行综合探讨。

关 键 词 : 固体钾盐矿; 掘进机; 优化改进; 铲板星轮; 一运驱动装置; 风冷散热器

Optimization and Improvement of Jiamusi EBZ-260 Roadheader in Solid Potash Mine

Yin Chuanbang, Yang Junhua

JCHX Mining Management Co., Ltd., Kunming, Yunnan 650000

Abstract : With the development of the solid potash mining industry both domestically and internationally, the application of roadheaders has become increasingly widespread. China began developing and utilizing roadheaders in the 1960s, and through continuous independent innovation, integration with practical working conditions, and the absorption of advanced foreign technologies, their manufacturing technology has reached maturity. However, certain shortcomings still exist when facing some special working conditions. This paper focuses on the application of the Jiamusi EBZ-260 roadheader in solid potash mines and discusses recommendations for its optimization and improvement. It comprehensively explores how to effectively optimize the equipment's structure, reduce its failure rate, and enhance its actual operational efficiency, with a particular emphasis on addressing the problems and high-frequency failures encountered during on-site use.

Keywords : solid potash mine; roadheader; optimization and improvement; scraper conveyor star wheel; first-stage drive unit; air-cooled radiator

引言

钾盐是人类社会不可或缺的战略资源, 已被广泛的应用于农业、化工、医药等重要领域, 且需求与日俱增, 其供应保障与否将直接关乎中国工农业、特别是农业的可持续发展。钾盐矿机械化的开采方法与煤矿巷道掘进有着极其相似的工艺流程, 且对支护的要求较低, 因此掘进机在固体钾盐矿井开拓得到广泛的应用, 其中 EBZ-260 型掘进机占据了主要的设备地位。但由于固体钾盐矿井特性, 经过现场的实际运用, 出现了一些新的问题需要改进^[1]。

一、佳木斯掘进机的现状分析

佳木斯掘进机作为国内主流掘进设备之一, 在矿山、隧道等工程及固体钾盐矿井领域发挥着重要作用。但其在使用过程中, 经常出现液压系统泄漏、一运故障、星轮故障、电气系统故障以及关键部件磨损过快等问题。这些问题不仅影响了设备的正常运

行, 也增加了维修成本和时间成本。

在维护成本方面, 佳木斯掘进机由于设备故障率较高, 导致维修频繁, 加之部分关键部件的更换成本较高, 使得整体维护成本居高不下。这不仅增加了企业的运营负担, 也限制了佳木斯掘进机在市场竞争中的优势。

为了解决以上这些问题, 提升佳木斯掘进机的性能和效率,

降低维护成本,有必要对其进行深入的优化改进研究。通过针对液压系统、电气系统以及关键部件等方面的优化改进,有望提高佳木斯掘进机的整体性能,推动其在钾盐矿井领域的更广泛应用^[2]。

二、佳木斯掘进机使用过程中的突出问题及优化措施

佳木斯 EBZ260 型掘进机主要用于探矿巷及运输巷的开拓施工,巷道断面为三星拱,宽 6 m,高 3.5m,现场环境温度较高,粉矿有较强的腐蚀性,矿石主要成分为光卤石,硬度约为 f2.5,但是部分区域有钾石盐及石盐,硬度约为 f4。该机型项目前在用两台,自项目部开工以来已使用两年多,实际运行时间已超过 10000 小时,在探矿巷掘进期间,截割光卤石段效率高,机器运行性能相对稳定,但是在截割钾石盐和石盐段期间,设备截割效率极低,机身振动较大,故障率较高。通过不断的总结分析,该机型用于钾盐矿井采掘施工,结合现场工况,针对高发故障提出以下优化改进措施,前三项已现场改装试运行^[3]。

(一) 铲板星轮部分优化改进

煤科院及佳木斯的 EBZ-260 型掘进机选用的星轮马达均为力士乐 MCR15-1500 型,唯一不同在于:煤科院使用的是 A 系列(全马达),佳木斯使用的是 H 系列(半马达,不带驱动座)。2024 年 1-10 月,佳木斯 EBZ-260 型掘进机共发生故障 79 次,因该结构件故障导致设备停机时间 410h,平均每次 5 个小时,约大半个班时间,其中,星轮漏油故障发生 63 次,且漏油位置位于铲板内部,运行过程中难以发现,导致液压油损耗严重,对项目部的经营成本造成了较大损失,由于星轮结构特性,检修十分繁琐,故障停机检修时间较长。经统计,本年度该型号掘进机本年度消耗抗磨液压油合计 19040kg,其中由于星轮漏油导致的异常消耗约 9600kg,约占了总消耗的一半。经分析是浮动密封座磨损,浮动密封和座子配合间隙过大,导致液压油泄漏,需要更换整个星轮驱动装置才能修复,经咨询佳木斯的备件价格约 9.8 万元。驱动座内部有高压油经过,更换同样的驱动座后,使用一年多还会出现同样的故障,且备件费用高昂。而煤科院的 EBZ260 掘进机使用的全马达,驱动座内部无高压油通过,只要马达不损坏,就不会出现驱动座漏油的情况。因此,为了彻底解决该问题,利用现场现有的备件和材料改装为同型号的 A 系列驱动的星轮总成。经现场测绘和材料备件核实,现场具备改装的条件,经和厂家沟通确认和经验核算液压系统的流量和压力能满足要求。经现场改装后运行平稳,故障率较低,有效降低了设备运行成本和故障率^[4]。

(二) 一运驱动装置优化改进

第一运输机驱动装置原配置为:Italgroun AIM-H4-800 型径向柱塞马达,主要故障为驱动马达和驱动轴花键啮合打滑,更换花键轴期间,轴承拆卸难度较大,轴承未到正常损坏,但是经过拆解均已无法使用,维修成本及高,故障周期约为 1.5-2 个月/次,对设备均衡生产有很大负面影响。原因分析为:驱动轴和一运马达啮合的花键深度太浅,花键数为 8 齿,深度仅有 2mm,且强

度不高,单个花键齿承受的扭矩较大,导致马达花键和驱动轴内花键磨平打滑,马达变为易损件,平均一年需更换 4-5 个/机台,花键轴 6-7 根/机台。

优化改进方案:使用 Rexroth 的 MCR5A750 型径向柱塞马达,该马达花键齿数为 55 齿,每个花键承受的扭矩相对较小,花键不易磨损,该马达流量比之前的小了 50L/min,在该液压系统中不作任何改装,泵和阀组供应的流量满足马达正常运转需求量。图 1 中的 4(轴承座)、5(1 轴)组件需要定做,轴承座按以下马达尺寸进行加工即可。目前已按照方案定做相关组件,改装后安装于 4# 掘进机,已运行两个多月,运行稳定,后续继续跟踪使用情况^[5-6]。

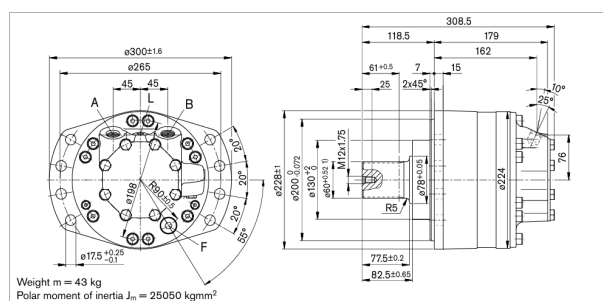


图 1 MCR5A750

(三) 冷却系统优化改进

佳木斯掘进机安装的水冷却器主要对截割电机和液压油箱进行冷却,同时利用冷却水对工作面进行除尘、降尘,改善工作环境。水系统分内、外喷雾水路,外供水压力 1-2Mpa,水流量 80-150L/min。外来水经一级过滤后分为三路,第一路,经进水直接通往喷水架,由雾状喷嘴喷出,第二路,经二级过滤、减压、冷却(冷却液压系统用油)再分为二路,一路经截割电机(冷却电机)后喷出。另一分路经水泵加压后,由截割头内喷出,起到冷却截齿及灭尘作用。

该设备主要是针对煤矿设计开发的机型,在钾盐矿实际运用中,优于钾盐矿井环境温度普遍偏高的特性,对液压系统的冷却效果不太理想,尤其是在截割石盐期间,截割效率极低,冷却水开大的话会导致矿石较稀,容易陷机,若水开太小及易导致液压系统高温,随之而来的爆管,油缸、泵阀及马达等液压元件密封损坏,导致内外泄漏的一系列故障^[7]。

采掘设备由于设备本身自重大,设备液压系统额定压力较高(20-25MPa),长期重负荷连续作业,很多油管安装于机架内部,泄漏不便于发现,一旦发生爆管泄漏,单次造成的损失高达万元,加之液压元件泵、阀组等均为进口件,价格高昂,损坏后修复价格高达数万元。

根据现场钾盐矿井特性,结合设备液压系统回路,在回油管路上安装一套风冷式油冷却器(简称风冷却器),辅助液压系统散热。风冷却器是一种以空气为冷却源的铝合金板翅式热交换器,其特点是热交换器芯体的油通道和风通道均设换热翅片,同体积比换热面积大,传热效率高,以空气为介质进行热量交换。与水冷式散热器相比,不仅安装维护简便,更可避免铜管爆裂造成的油水混合,对系统造成严重的毁坏。其次,对于需要变换工

作地点的设备（如工程机械）来说，不需考虑水源的供应，不存在水循环系统的拆装和重建。风冷却器属于压力容器，在液压系统中，只适合用于回路的回油冷却，所以要根据回路的最大压力来选用风冷却器。就风冷却器本身而言，其散热主体（换热芯）的耐压能力是有限度的，板式翅铝合金换热芯的耐压能力取决于其材质物理性能、结构和加工工艺。比方说，结构和加工工艺相同，材质也一样，油通道材料的厚度不同，耐压能力也不同，越厚耐压力越高。板式翅铝合金风冷却器的设计压力一般小于3.5Mpa，基于成本和实用性等原因通常是小于2.0Mpa，国外同行设计压力多为1.6 Mpa，均远小于油路的最大工作压力。显然，压力过高会导致换热芯爆裂损坏。耐压等级越高，相应的价格也越贵，经过综合考虑，选用一款国产散热器，考虑到液压回路的流量和压力，还需安装一款液压马达调速阀，以控制马达转速，防止马达转速过快，导致使用寿命降低^[8]。

（四）叉形架优化改进建议

掘进机叉形架的断裂是影响设备安全性和施工效率的关键问题。项目部在用的两台掘进机，均不同程度的出现叉形架开裂、断裂的情况，以下结合现场实际情况从设计、材料、载荷、制造及工况等方面进行综合分析。

1. 叉形架是掘进机一个非常重要的结构件，截割电机安装的基座，回转台和截割臂连接的载体。

其主要作用：（1）支撑与固定截割部。叉形架通常位于掘进机前端，直接连接刀盘和机身，负责承载刀盘的重量和掘进过程中产生的巨大反作用力。（2）传递推力和扭矩。叉形架将液压系统或电机产生的推进力传递给截割部，驱动刀盘旋转截割。同时将刀盘的旋转扭矩反向传递至机身，保持掘进方向的稳定性，避免机身偏移。（3）调整掘进方向。通过调整叉形架的受力角度，辅助控制掘进机的掘进方向和纠偏，确保隧道轴线精度。（4）分散载荷与减振在硬岩或断层地质中，叉形架通过刚性结构将截割头受到的冲击力均匀分散至机身，减少局部应力集中，以降低振

动对设备的损害^[9]。

2. 叉形架断裂的原因：

（1）叉形架材料强度较低，尤其在承受大扭矩或突变载荷时，材料易发生塑性变形或疲劳失效；（2）掘进机作业时，叉形架需承受截割头的反向冲击载荷及振动，若截割岩层硬度较高或地质条件突变，载荷波动加剧，加速裂纹扩展；（3）销轴断裂后导致叉形架受力不均，导致撕裂；（4）液压系统压力不稳定或流量分配不均，可能导致截割部受力异常，间接加剧叉形架负载，最终导致疲劳损坏。

3. 优化改进建议

（1）选用高强度合金钢：如42CrMo等材料，结合表面淬火（如无软带表面硬化技术）提升耐磨性和抗疲劳性能；（2）采用三维仿真优化结构设计，并通过精密铸造或锻造减少内部缺陷；焊接时采用多层多道焊工艺，避免焊缝处应力集中；（3）增加结构件钢板厚度；（4）增加叉形架与回转台连接的铰接销轴直径至150mm，避免销轴疲劳断裂后撕裂叉形架。该项优化措施现场无法实现，建议厂家考虑实施^[10]。

三、结束语

综上所述，钾盐矿井掘进机的优化需聚焦稳定性、可靠性与适应性的协同提升。鉴于其作业环境为复杂的光卤石、钾石盐、石盐地层，通过优化机身结构、部件及液压系统减少振动偏移，是保障作业安全的基础；选用高质量零部件、加强维保与检测以提升可靠性，能降低故障与成本，延长设备寿命；优化设计与增强结构强度来提高适应性，则可使其更好应对恶劣盐层条件。三者结合，可全面提升掘进机性能，助力钾盐开采效率与安全水平提升，为行业发展提供有力支撑。

参考文献

- [1] 宋明江. 固体钾盐矿井开采掘进装备应用现状与关键技术研究 [J]. 化工矿物与加工, 2020, 49(02): 27-29.
- [2] 周茂普, 石亮. 新工艺、新技术、新装备在固体钾盐开采中的应用 [J]. 化肥工业, 2016, 43(03): 69-71+103.
- [3] 焦宏章, 王赞. 煤矿机械在固态钾盐地下开采中的应用研究 [J]. 化工矿物与加工, 2014, 43(11): 31-33.
- [4] 李浩. 智能化掘进机电控系统开发与实践分析 [J]. 机械管理开发, 2024, 39(10): 247-248+251.
- [5] 杨春海. 掘进机在钾盐矿的应用及改进 [J]. 科技与创新, 2015, (15): 10-11.
- [6] 朱进. 悬臂式掘进机发展初探 [J]. 中小企业管理与科技 (上旬刊), 2011, (12): 147.
- [7] 李钦彬. 现代设计方法在 EBZ200 型掘进机升级改造中的应用研究 [J]. 煤矿机械, 2025, 46(01): 134-138.
- [8] 崔宽宽. 全断面掘进机的分析与防护措施 [J]. 机械制造, 2024, 62(11): 23-24+22.
- [9] 张常青. 悬臂式掘进机在钾盐矿开采中的应用 [J]. 煤矿机械, 2013, 34(04): 214-216.
- [10] 王想, 肖鑫, 崔涵. 悬臂式掘进机破岩产生、能耗控制及性能评估 [J]. 有色金属 (矿山部分), 2024, 76(06): 141-151.

桥梁预应力施工技术控制的探讨

李锐

中冶（云南）工程投资建设有限公司，云南 昆明 650000

DOI:10.61369/ERA.2025110013

摘 要： 随着我国路桥建设规模拓展，预应力混凝土技术应用愈发广泛，通过对钢筋（或钢绞线）施加预拉力，使混凝土产生预压应力抵消结构服役应力，可提高结构抗裂性延长构件寿命。本文分析该技术特点，包括提升实用功能（节省材料、减小截面、降低成本）、优化桥梁受力、增强耐久性；探讨施工中裂缝、波纹管与孔道堵塞、工艺不当及张拉力控制等问题；阐述其应用，如优化钢绞线（低松弛型为主流）与锚具选型，以及加固技术（高效提升承载力、节省成本）。研究为路桥工程质量与成本控制提供支撑，助力工程稳定服役。

关 键 词： 路桥工程；预应力技术；应用

Discussion on Technical Control of Bridge Prestressed Construction

Li Rui

MCC (Yunnan) Engineering Investment and Construction Co., Ltd., Kunming, Yunnan 650000

Abstract： With the expansion of China's road and bridge construction scale, the application of prestressed concrete technology has become increasingly widespread. By applying pre-tension to steel bars (or steel strands), pre-compressive stress is generated in concrete to offset the service stress of the structure, which can improve the crack resistance of the structure and extend the service life of components. This paper analyzes the characteristics of this technology, including improving practical functions (saving materials, reducing cross-sections, and lowering costs), optimizing bridge stress, and enhancing durability. It also discusses problems in construction such as cracks, blockage of corrugated pipes and ducts, improper processes, and control of tension force. In addition, it elaborates on its applications, such as optimizing the selection of steel strands (low-relaxation type as the mainstream) and anchors, as well as reinforcement technologies (efficiently improving bearing capacity and saving costs). The research provides support for quality and cost control of road and bridge projects and helps ensure the stable service of the projects.

Keywords： road and bridge engineering; prestressed technology; application

引言

随着我国桥梁工程建设规模的持续拓展，预应力混凝土施工技术的应用范围亦随之大幅拓展^[1]。该技术核心应用于钢筋混凝土结构骨架的预制环节，依据结构不同部位所承受应力的方向与幅值，通过预设应力构建钢筋混凝土结构，以抵消其在抵抗荷载过程中产生的全部或部分工作应力^[2]。此技术可显著延长钢筋混凝土结构的服役寿命，凭借其优异的结构性能与工程适用性，在桥梁工程建设领域已获得广泛应用^[3]。

一、预应力混凝土施工技术特点解析

（一）预应力钢筋混凝土在桥梁工程中的实用效能

作为桥梁工程领域的常用设计施工技术，其在施工过程中，对预应力钢筋、混凝土、工作锚具、施加预应力工具等材料工具

均有相关国家标准，目的是保障预应力的有效和耐久性。实施预应力技术后不仅能减少钢筋、混凝土等建材的用量，还可缩减构件的截面面积，降低桥梁设计高度，同时有效降低桥梁恒载，对应基础承载力要求也随之降低，使得工程造价及施工成本系统性下降。而预应力的长期稳定有效可延长桥梁使用年限^[4]，保障运营

中的桥梁结构安全。

（二）常规预应力梁桥梁受力状况分析

设计过程中，应根据实际工程需求和地理环境等因素，系统剖析桥梁结构的受力状况，合理确定桥梁的几何参数、材料性能和施工工艺^[6]，以保证桥梁的受力性能和安全性，通过预应力筋与混凝土的协同作用，改善结构受力性能，其设计需综合考虑结构形式、荷载条件及材料特性等多因素进行预应力钢束的设计计算，并考虑预加力引起的结构次内力及混凝土收缩徐变次内力，根据需要计算的荷载进行多次内力组合以取定相关参数。

（三）桥梁耐久性特征

桥梁耐久性指工程结构抵抗荷载与环境因素长期侵蚀的性能。在建造过程中，需对材料强度和耐久性作出更高要求，以提升桥梁结构抵抗反复荷载疲劳损伤的性能，以及开裂削弱抗外部环境因素侵蚀后结构强度下降。而耐久性问题可通过预应力结构的精密制作来解决。

二、预应力混凝土施工中的常见问题分析

在桥梁预应力混凝土施工过程中，部分施工技术环节易出现质量问题，不仅影响施工效率，更对结构安全与耐久性构成隐患，具体问题如下：

（一）裂缝问题

裂缝是预应力混凝土构件施工阶段及服役期的典型问题^[6]，核心诱因之一为温度应力作用。施工期间，预应力构件在张拉前需经历养护、转运等环节，若环境昼夜温差较大或季节交替时温度波动剧烈，构件内部会因热胀冷缩产生不均匀温度应力。当该应力超过混凝土早期抗拉强度时，便会引发裂缝；尤其对于公路桥梁的钢筋混凝土承重结构，其截面尺寸较大、散热速率慢，温度应力更易累积，即使进入使用阶段，车辆荷载反复作用与环境温湿度变化叠加，也会导致裂缝持续萌生或扩展，直接削弱结构完整性与抗渗能力。

（二）波纹管堵塞问题

波纹管作为预应力筋的防护与定位载体，其堵塞问题多由施工操作不规范及质量管控疏漏导致^[7]。其一，施工人员若未按设计要求精准定位波纹管（如测量偏差、固定间距超标），或违反施工规范随意弯折、扭曲管材，易造成波纹管轴线偏移、接头松动，为后续堵塞埋下隐患；其二，浇筑混凝土时，若振捣棒距离波纹管过近或振捣力度失控，会导致波纹管局部破裂，混凝土水泥浆渗入管内并凝结，形成堵塞；此外，若波纹管进场验收未严格执行外观检查、密封性试验及尺寸复验等规定，使用存在壁厚不均、接口密封不良等质量缺陷的管材，也会引发漏浆堵管问题，而堵塞或漏浆将造成锚下张拉力部分抵消超量管道摩阻，造成结构安全冗余度下降。

（三）孔道堵塞问题

预留孔道堵塞主要源于抽芯工艺时机把控不当。采用橡胶抽拔管成孔时，需严格依据混凝土强度发展规律确定抽芯时间：若在混凝土冷却凝固前（强度未达设计要求的70%）过早抽芯，混

凝土尚未形成足够承载能力，易导致孔道坍塌、内壁剥落，造成堵塞；若抽芯过晚，混凝土已与橡胶抽拔管紧密粘结，抽拔阻力增大，易导致抽拔管断裂在孔道内，不仅阻碍预应力钢筋顺利穿束，还会使张拉时应力传递不均，影响预压效果，同时给后续孔道压浆施工带来困难，导致压浆不密实，降低结构抗腐蚀能力。

（四）单端张拉工艺方面的问题

在大跨度连续箱梁及单柱墩盖梁底板预应力束张拉施工中，经常因施工空间影响使用单端张拉工艺，具体是通过单端张拉使一束钢绞线张紧拉直。连续箱梁往往跨数多、孔道长度大，一般为3跨~5跨，每跨长度在30~50m，其摩擦阻力需通过试验才能确定^[8]。而跨度超30m的预应力桥梁，单端张拉所形成应力受孔道摩阻影响应力传递损失后，被动端与主动端锚下张力不一，同时也存在对称部位主动抵抗弯矩能力不一致的状况。

（五）夹片回缩的问题

夹片回缩多发生在千斤顶卸荷时，规范明确单端回缩量不得超过4mm，该回缩量包含弹性回缩与塑性回缩两部分。现场施工中，常因忽视对这一回缩量的精准测量，导致预应力损失，甚至未能及时发现存在缺陷的夹片，进而形成后续锁锚部分失效的安全隐患。

（六）后张预应力结构中张拉力与伸长量的控制

如张拉力未进行精准的控制，同时其伸长量又与标准弹性计算值出现较大偏差，可能是预应力筋已部分失效、工作锚锁锚有误、孔道堵塞严重、材料不合格等多个不良因素造成。故在张拉力施工环节，伸长值及锚下张拉力必须实施有效管控及计算复核，不对应时停止作业，分析以上因素影响并采取措施排除后再继续作业，以切实保障双控指标的吻合。

综上所述，张拉施工粗疏操作，极易导致预应力与设计模型计算未能完全符合，而且，确保预应力构件得到高效应用并充分发挥效用。

三、桥梁施工中预应力混凝土技术的应用

在公路桥梁工程建设与运维全周期中，预应力混凝土技术是保障结构安全、提升服役性能的核心手段。其应用需围绕“源头材料工具管控”与“结构加固效能提升”两大核心，通过科学选型与精准施工，实现工程质量与经济性的平衡，为路桥工程长期稳定服役奠定基础^[9]。

（一）优化选择施工材料与工具

1. 预应力钢绞线的选型优化

钢绞线作为预应力传递的核心载体，其类型选择需紧密结合路桥结构的受力特征与服役环境。目前工程中常用的钢绞线主要分为四类：低松弛性钢绞线、矫直回火性钢绞线、普通钢绞线及预应力钢筋。其中，低松弛性钢绞线因综合性能均衡，在路桥工程中的实际使用率超80%，成为主流选择，其核心优势体现在三方面：一是力学性能稳定，抗拉强度标准值普遍达1860MPa，1000h松弛率≤2.5%（远低于普通钢绞线的8%-10%），长期使用中应力损失小，能持续维持构件预压效果，避免裂缝萌生；二

是施工适配性强，常用 15.2mm 规格线材直径均匀、柔韧性优异，便于盘卷运输与现场穿束，构件成型后外观平整，减少后期表面修饰成本；三是经济性突出，相较于矫直回火钢绞线（成本高达 30% 以上，多用于异形构件）与普通钢绞线（长期松弛率高易引发裂缝），低松弛钢绞线全生命周期综合成本更低。

2. 预应力锚具的选型优化

锚具是后张法预应力构件的关键受力部件，其性能直接决定预应力传递稳定性，需根据张拉吨位、钢绞线规格及结构受力要求精准选型。锚具按锚固原理分为机械型（夹片式、支撑式、锥塞式）与粘结型，其中机械型锚具因锚固效率高（锚固效率系数 ≥ 0.95 ）、拆装便捷，成为路桥工程主流选择。

选型需遵循“受力匹配”原则：主梁、盖梁等核心构件承受高强度应力，优先选用夹片式锚具（如 QM 型、XM 型），通过楔形咬合锚固 1860MPa 级钢绞线，单孔张拉吨位达 250kN 以上；连续梁支座等对预应力损失敏感的节点，选用自锁式夹片锚具减少变形损失；人行道板等中小吨位场景，选用支撑式锚具平衡成本与效果。

（二）加固作业中的预应力技术应用

路桥工程长期服役中，易因荷载升级（如超限货车通行）、环境侵蚀（冻融、碳化、盐雾）或初始施工缺陷（配筋不足、浇筑不密实），出现承载力下降、裂缝扩展、刚度衰减等问题，严重威胁通行安全^[10]。此时，预应力加固技术凭借“主动受力、高效补强、低附加自重”的核心优势，成为最优解决方案——其原理是通过对受损结构施加预压应力，主动抵消部分服役工作应力（弯矩、剪力），减少裂缝宽度甚至使其闭合，同时降低原结构配筋应力，显著提升承载能力与耐久性。

相较于传统加固方法（粘贴钢板、外包混凝土），预应力加固优势显著^[11]：承载力提升幅度达 30%–50%（远超粘贴钢板的 15%–20%），且避免“被动受力、易剥离”弊端；成本节省 20%–30%，施工周期缩短 40%，对交通干扰小。

此外，加固后需加强质量管控：通过“超张拉（ $\leq 5\%$ ）+ 持

荷 $\geq 5\text{min}$ ”抵消应力损失；1 年内每 3 个月检测锚具、裂缝与应力；发现锈蚀或裂缝需及时修补，确保加固效果长期稳定，成为路桥运维核心手段，对推动既有路桥资产保值增值具有重要意义。

四、结束语

预应力混凝土技术作为路桥工程建设与运维的核心技术，对提升结构安全性能、延长服役寿命及控制工程成本具有不可替代的作用，其应用价值与技术优势在实践中已得到充分验证^[12–14]。

从技术特点来看，该技术不仅能通过优化材料用量与构件截面，降低桥梁设计高度与自重，减少施工成本并提升企业市场竞争力，还能通过精准受力分析改善桥梁结构受力体系，同时增强抗裂、抗渗性能以抵御自然环境侵蚀，显著提升桥梁耐久性，为路桥工程长期稳定使用奠定基础。然而，施工过程中仍存在诸多质量隐患，如温度应力引发的裂缝、操作不规范与质量管控疏漏导致的波纹管及孔道堵塞、超长束张拉工艺不当、张拉力与伸长量控制误差等问题，这些问题不仅影响施工效率，更直接威胁结构安全与耐久性，需重点关注并解决。

在技术应用层面，通过科学优化施工材料与工具选型（如优先选用低松弛性钢绞线与机械型锚具），可从源头保障预应力构件性能；而预应力加固技术凭借“主动受力、高效补强、经济环保”的优势，能有效解决路桥服役中的承载力下降、裂缝扩展等问题，其承载力提升幅度与成本效益均优于传统加固方法，是既有路桥资产保值增值的关键手段。

综上，为充分发挥预应力混凝土技术的价值，需加强施工人员专业培训，引入专业技术指导，强化施工全过程质量管控与后期监测维护。未来推广该技术，可进一步推动我国路桥工程建设向高质量、可持续方向发展，为交通基础设施安全稳定运行提供有力保障。

参考文献

[1] 孔祥泉. 浅谈道路施工存在的质量问题和解决措施 [J]. 科技咨询导报, 2007, (20): 46.
[2] 石峰. 探讨城市道路工程施工中的质量问题与解决措施 [J]. 科技创新导报, 2009, (25): 75.
[3] 王海波. 桥涵预应力混凝土的施工要点探析 [J]. 黑龙江科技信息, 2007, (14): 205.
[4] 甄旭明. 高速公路桥梁养护加固中预应力技术的应用 [J]. 交通世界, 2024, (36): 137–139.
[5] 彭韬. 预应力混凝土桥梁施工技术要点研究 [J]. 交通世界, 2024, (35): 148–150.
[6] 李晨. 道路桥梁施工中预应力的应用及存在的问题解析 [J]. 地产, 2019, (24): 137.
[7] 刘月金. 预应力技术在桥梁工程中的应用 [J]. 交通世界 (运输·车辆), 2015, (12): 36–37.
[8] 石磊. 公路桥涵预应力混凝土施工的探讨 [J]. 商品与质量 (建筑与发展), 2014(4): 195–195.
[9] 周永军. 有关公路桥涵预应力混凝土施工研究 [J]. 建筑工程技术与设计, 2015(11): 779.
[10] 许修亮, 黎建生. 预应力混凝土管桩在小桥涵软基处理中的应用 [J]. 公路交通技术, 2006(1): 71–73.
[11] 李贵峰. 基于新版《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》的桥梁抗倾覆设计分析 [J]. 渤海大学学报 (自然科学版), 2019, 40(3): 263–268.
[12] 高旺. 高墩大跨度现浇预应力混凝土箱梁桥施工关键技术 [J]. 混凝土世界, 2024(8): 59–63.
[13] 钟菁. 桥梁施工中预应力技术施工工艺与质量控制 [J]. 运输经理世界, 2023, (31): 41–43.
[14] 陈飞, 朱春东, 王勇. 先张自平衡预应力技术在桥面板构件中的应用 [J]. 混凝土与水泥制品, 2023, (11): 41–46.

基于智慧工地系统的施工围挡全周期管理研究

——基于鄂尔多斯市东胜区城市管理研究

单新龙

鄂尔多斯市东胜区城市管理综合行政执法局，内蒙古 鄂尔多斯 017000

DOI:10.61369/ERA.2025110014

摘 要： 本论文聚焦城市管理中施工围挡管理难题，基于鄂尔多斯市东胜区城市管理中施工围挡管理问题，深入剖析传统管理模式的系统性缺陷，创新性提出基于智慧工地系统的施工围挡全周期管理方案。通过融合“北斗+LoRa”混合组网架构、多源数据感知技术与制度创新，构建覆盖规划、建设、使用、拆除全流程的智能化管理体系，为城市基层治理与管理执法提供可复制的实践样本与理论参考。

关 键 词： 智慧工地系统；施工围挡；全周期管理；城市基层治理

Research on the Full-Cycle Management of Construction Fencing Based on Smart Construction Site Systems — A Study on Urban Management in Dongsheng District, Ordos City

Shan Xinlong

Dongsheng District Urban Management Comprehensive Administrative Law Enforcement Bureau, Ordos, Inner Mongolia 017000

Abstract： This thesis focuses on the challenges of construction fencing management in urban settings. Drawing on the specific issues encountered in construction fencing management within Dongsheng District, Ordos City, it provides an in-depth analysis of the systemic shortcomings of traditional management approaches. An innovative full-cycle management solution for construction fencing, based on smart construction site systems, is proposed. By integrating a "Beidou + LoRa" hybrid networking architecture, multi-source data sensing technologies, and institutional innovations, an intelligent management system covering the entire lifecycle—from planning and construction to usage and dismantling—is constructed. This system offers a replicable practical model and theoretical reference for grassroots urban governance and management law enforcement.

Keywords： smart construction site system; construction fencing; full-cycle management; grassroots urban governance

引言

在国家新型城镇化战略与资源型城市转型政策的双重驱动下，鄂尔多斯市东胜区作为内蒙古自治区城市建设的典型样本，经历了从依赖煤炭资源向多元化城市发展的深刻转变。2020–2024年期间，东胜区城市建设投资以年均18%的增速高速推进，累计投入超400亿元，涵盖交通枢纽、商业综合体、生态治理等重点项目。大规模城市建设背景下，施工围挡作为保障施工安全、隔离施工区域的必要设施，其数量与规模呈爆发式增长^[1]。然而，同期市民关于施工围挡的投诉量却逆势上升37%，涉及围挡破损、安全隐患、扬尘污染、噪音扰民等多方面问题，这一矛盾现象暴露出传统管理模式在应对快速城市化进程中的局限性^[2]。

施工围挡管理是城市基层治理的重要组成部分，直接关系到城市运行安全、市容市貌与市民生活质量。传统管理模式，监管依赖人工巡查、技术标准执行松散、部门协同机制缺失等问题，导致管理效率低下、资源浪费严重。基于智慧工地系统的施工围挡全周期管理研究，旨在通过技术赋能与制度创新，构建智能化、精细化的管理体系，破解当前管理困境，为城市治理提供新思路与新方法^[3]。

国外在施工围挡智能化管理领域起步较早，美国、日本等发达国家依托物联网、大数据技术，实现了施工围挡的远程监测与智能预警。例如，美国部分城市通过在围挡部署压力传感器、位移传感器，实时监测围挡结构稳定性，并与市政管理系统联动，实现问题的快

速响应^[4]。日本则注重施工围挡的标准化与环保设计，将围挡管理纳入城市建设的全流程监管体系。

国内相关研究近年来逐渐增多，主要集中在智慧工地技术应用与施工安全管理方面。部分学者提出利用物联网技术实现工地设备的实时监控，但针对施工围挡全周期管理的系统性研究仍显不足。现有研究多聚焦单一技术应用或管理环节，缺乏从规划到拆除的全流程整合，且在资源型城市特殊地理环境与管理需求下的适应性研究较少。基于鄂尔多斯市东胜区的研究，将填补这一研究空白，为国内同类城市或其他城市提供实践参考^[5]

一、鄂尔多斯市东胜区施工围挡管理现状剖析

（一）城市建设与施工围挡管理的矛盾背景

东胜区城市建设的高速发展，带动了施工围挡数量的急剧增加。据统计，2024年全区在建项目施工围挡总长度达382公里，较2020年增长近2倍。大规模的围挡建设在保障施工安全的同时，也带来了诸多管理难题。市民投诉数据显示，围挡相关投诉主要集中在三个方面：一是围挡结构安全问题，如倒塌、破损等，占投诉总量的42%；二是环境影响问题，包括扬尘污染、噪音扰民，占比35%；三是围挡设置不合理导致的交通堵塞与通行不便，占比23%。

这一矛盾现象背后，反映出城市建设速度与管理能力的失衡。快速城市化进程中，传统管理模式未能及时适应新形势，导致施工围挡管理滞后于城市发展需求，不仅影响市民生活质量，也对城市形象与投资环境造成负面影响。

（二）传统管理模式的核心痛点

1. 监管力量严重不足

东胜区施工围挡监管面临着人员与任务量的严重失衡。东胜区城市管理综合行政执法局现有一线执法人员260余名负责东胜城区大型建筑施工工地围挡及各类公益性围挡的日常巡查工作，人均巡查长度达3.3公里。以传统人工巡查方式，单次全覆盖巡查需耗时4-5天，问题平均发现周期长达3.7天。在实际工作中，曾出现某路段围挡因大风倒塌，2天后才被巡查人员发现的情况，期间造成交通堵塞与行人受伤。这种超负荷的工作状态，使得监管人员难以对围挡进行精细化管理，安全隐患与违规行为无法得到及时处置。

2. 技术标准执行滞后

技术标准执行不力是东胜区施工围挡管理的突出问题。2023年质量抽检数据显示，46%的围挡未达到国家规定的抗8级风标准，商业密集区不合格率更是高达61%。商业密集区通常人流量大、车流量多，一旦围挡出现问题，后果不堪设想。这些未达标的围挡，不仅反映了施工单位在建设过程中对技术标准的忽视，也暴露出管理部门在监管过程中存在的漏洞。管理部门没有建立有效的质量监督机制，对围挡建设的过程监管不到位，导致很多不符合标准的围挡得以建成并投入使用。而且，在发现问题后，整改措施也往往不够及时和有力，使得问题长期存在，严重影响了城市的安全和形象。此外，部分围挡在噪音隔离、扬尘防护等方面也未达到环保标准，导致施工区域周边居民生活受到严重影响。

3. 跨部门协同机制缺失

住建、城管、环保等部门在施工围挡管理中存在严重的协同

不足问题。各部门数据相互独立，形成“数据孤岛”。这种跨部门协同机制的缺失，使得问题处理流程繁琐，责任界定不清，降低了管理效率，也容易滋生监管漏洞。同样，城管部门在发现围挡存在安全隐患或违规设置问题时，也可能无法及时与其他部门沟通协调，共同采取有效的解决措施。这种跨部门协同机制的缺失，使得对施工围挡的管理无法形成合力，各个部门的监管优势无法充分发挥，问题难以得到全面、有效的解决。不仅降低了管理效率，还增加了管理成本，使得施工围挡管理陷入了混乱和无序的状态。

二、智慧工地系统下施工围挡全周期管理的理论基础

（一）全周期管理的概念与内涵

全周期管理理论强调对管理对象进行从初始规划到最终退出的全过程、系统性管理。施工围挡全周期管理涵盖规划、建设、使用、拆除四个阶段：规划阶段需结合城市功能布局与施工需求，科学规划围挡位置与形式；建设阶段严格把控施工质量，确保符合技术标准；使用阶段通过实时监测与动态管理，保障围挡安全运行；拆除阶段规范作业流程，做好环境恢复工作。通过全周期管理，实现资源优化配置，提升管理效率，降低管理成本与风险。

（二）智慧工地系统的构成与技术原理

智慧工地系统以“北斗+LoRa”混合组网架构为基础，融合物联网、大数据、人工智能等技术。“北斗+LoRa”组网特别适配城市开阔地形，北斗系统提供高精度定位服务，LoRa技术实现远距离、低功耗的数据传输。系统通过在围挡部署应变传感器、倾角传感器、噪声监测模块、视频监控设备等智能终端，实时采集围挡结构应力、倾斜角度、噪音分贝、周边环境等数据。

采集的数据传输至云平台后，利用大数据分析与深度学习算法进行处理。例如，基于深度学习的围挡结构健康监测算法，通过融合风速、沙尘浓度、结构应力等多源数据，能够准确预测围挡在恶劣天气下的安全状态，实现对8级以上大风和沙尘暴的智能预警，准确率达92.3%。同时，系统可根据数据分析结果，自动生成管理决策建议，实现智能化管理。

三、基于智慧工地系统的施工围挡全周期管理方案

（一）规划阶段：智能规划与审批联动

1. 电子档案与工程审批联动机制

建立施工围挡电子档案与工程审批联动机制，推行“一码

通”管理模式。施工单位在申请围挡建设时，通过系统提交设计方案、施工计划、安全措施等资料，系统自动生成唯一电子编码。该编码关联围挡全生命周期信息，从审批流程到建设、使用、拆除的所有数据均记录在案。审批部门通过系统在线审核，实现多部门并联审批，将审批周期从14天大幅压缩至3天，较传统模式效率提升显著。

2. 基于多源数据的智能选址与规划

利用地理信息系统（GIS）、交通流量监测数据、人口分布数据等多源信息，结合人工智能算法，对施工围挡选址与规划进行智能决策。通过对这些多源数据的分析和挖掘，可以利用智能算法生成多个围挡选址和规划方案。这些方案会综合考虑各种因素的影响，评估每个方案的优缺点。然后，通过可视化的方式将这些方案展示给相关部门和建设单位，方便他们进行比较和选择。最终，选择出最优的方案，实现施工围挡的合理选址和规划，提高围挡的使用效率，减少对城市环境和居民生活的负面影响。

（二）建设阶段：标准化建设与实时监测

1. 智能终端部署与实时监测

在施工围挡建设过程中，严格按照设计标准安装智能终端设备。应变传感器每隔10米部署一个，实时监测围挡结构应力变化；倾角传感器安装在围挡立柱顶部，监测围挡倾斜角度；噪声监测模块与视频监控设备则用于环境监测与现场管理。所有设备通过“北斗+LoRa”网络将数据实时传输至智慧工地系统平台。

平台对数据进行实时分析，一旦发现异常立即发出预警。例如，当应变传感器检测到围挡结构应力超过阈值时，系统自动向施工单位与监管部门发送预警信息，并定位问题位置。

2. 技术标准的严格执行与质量管控

智慧工地系统内置国家与地方施工围挡技术标准，在建设过程中对施工质量进行实时监控。系统自动比对施工参数与标准要求，如围挡高度、抗风等级、材质规格等。当发现不符合标准的情况时，立即暂停施工并要求整改。同时，监管部门可通过系统查看施工进度与质量数据，远程进行质量验收，确保围挡建设符合规范。

（三）使用阶段：动态监管与信用评价

1. “围挡信用积分”动态评价体系

创立“围挡信用积分”动态评价体系，将施工单位围挡管理表现量化为具体指标，可以包括围挡完好率、维护及时性、环境影响控制、公众投诉处理等。每项指标设定相应分值，根据日常监管与市民反馈情况进行积分加减，实行“红黄绿”三色分级监管。

积分较高的施工单位被评为绿色等级，这类施工单位在后续的项目审批、招投标等方面会给予一定的优惠政策，如优先审批、加分等，以鼓励他们继续保持良好的管理表现。积分中等的施工单位为黄色等级，对于这类施工单位，会加强日常监管，督促他们进一步改进管理措施，提高围挡管理水平。而积分较低的施工单位则被列为红色等级，这类施工单位会面临严格的监管和

处罚，如责令限期整改、上报住建主管部门限制招投标等。

2. 基于多源数据融合的智能预警与应急处理

通过融合气象数据、传感器数据、视频监控数据等多源信息，系统实现对围挡安全风险的智能预警。当监测到8级以上大风、沙尘暴等恶劣天气时，系统自动评估各围挡风险等级，向高风险区域的施工单位与监管部门发送预警信息，并提供加固建议。同时，系统根据应急预案模板，自动生成应急处理流程，指导相关人员进行抢险救援。相关部门和施工单位在收到预警信号后，会立即启动应急预案，采取相应的措施进行处理。组织人员对围挡进行加固，增加支撑结构，确保围挡的稳定性；对于存在严重安全隐患的围挡，及时疏散周边的行人，设置警示标志，避免发生安全事故。

（四）拆除阶段：高效拆除与环境恢复

1. 拆除计划的智能制定与执行

智慧工地系统根据围挡建设信息、周边环境数据，智能制定拆除计划。系统考虑拆除时间、顺序、设备调配、交通疏导等因素，生成最优拆除方案。施工单位按照系统方案进行拆除作业，通过移动终端接收任务指令与安全提示。拆除过程中，系统实时监控进度与安全情况，如发现违规操作或安全隐患，立即发出警示。

2. 拆除后的环境恢复与监管

拆除工作完成后，系统通过无人机航拍、地面巡检等方式，对场地环境恢复情况进行评估。检查内容包括建筑垃圾清理、地面平整、植被恢复等。若发现环境恢复不达标，系统自动生成整改清单，要求施工单位限期整改。监管部门通过系统跟踪整改进度，确保拆除区域恢复至施工前状态。

四、对城市基层治理及执法工作的启示

（一）对城市基层治理的借鉴意义

智慧工地系统与全周期管理理念的结合，为城市基层治理提供了新范式。在技术层面，通过物联网、大数据等技术实现城市管理的智能化、精细化；在制度层面，创新管理机制，打破部门壁垒，实现协同治理；在公众参与层面，搭建便捷的沟通平台，激发市民参与城市治理的热情。这些经验可为其他城市在城市建设、环境治理、安全管理等领域提供参考。

（二）对城市管理执法工作的优化作用

智慧工地系统为城市管理执法工作带来了显著优化。智能监测与预警功能提高了执法的精准性与及时性，减少了执法人员的工作强度；信用评价体系为执法提供了量化依据，增强了执法的公正性与权威性；跨部门数据共享实现了执法信息的实时互通，提升了执法效率与协同能力。

五、结论

本研究以鄂尔多斯市东胜区为研究对象，深入分析施工围挡管理问题，构建了基于智慧工地系统的全周期管理方案。通过技术创新与制度创新，实现了施工围挡管理从传统模式向智能化、精细化模式的转变，有效解决了监管力量不足、技术标准执行滞后、跨部门协同缺失等问题，提升了城市治理水平与市民满意

度。未来，可进一步深化人工智能技术应用，提高风险预测与决策的准确性；加强与智慧城市平台的融合，实现与交通、环保等系统的互联互通；探索绿色环保型围挡材料与技术，推动施工围挡管理的可持续发展。同时，希望本研究成果能在更多城市推广应用，为城市治理现代化贡献力量。

参考文献

- [1] 焦甲元. 陶瓷. 基于绿色建筑背景下装配式建筑施工技术的应用研究 [J]. 2024(11): 179-181.
- [2] 蒲正霖, 彭瑞. 新型装配式自动化抗风施工围挡系统设计与应用研究 [J]. 居舍, 2024(23): 76-78+82.
- [3] 陈业芬. 装配式垂直绿化围挡在市政工程中的应用——以白马河杨路桥路桥梁改造工程为例 [J]. 福建建材, 2022(10): 85-87.
- [4] 董可可, 汤文蕴, 杨震, 王伟, 黄洁. 施工围挡区交通流特性与仿真分析 [J]. 物流科技, 2019(11).
- [5] 赵龙. 基于智慧工地系统的建筑施工现场管理策略 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2025(14): 38-40.

船体结构优化设计与强度分析研究

聂广宁

上海中远海运重工有限公司, 上海 201913

DOI:10.61369/ERA.2025110017

摘 要 : 船体结构优化设计与强度分析是提高船舶安全性与经济性的重要途径。通过建立合理的结构模型, 结合有限元方法对关键部位进行应力分布和强度评估, 能够有效识别潜在薄弱环节。在优化设计过程中, 采用轻量化与高强度材料, 提高结构利用率并降低能耗。研究结果显示, 合理的优化设计不仅提升整体强度与稳定性, 还显著改善船体服役性能与使用寿命, 为现代船舶工程提供了科学支撑。

关 键 词 : 船体结构; 优化设计; 强度分析; 有限元方法; 安全性

Research on Optimized Design and Strength Analysis of Hull Structure

Nie Guangning

COSCO Shipping Heavy Industry (Shanghai) Co., Ltd., Shanghai 201913

Abstract : Optimized design and strength analysis of hull structures are crucial for enhancing the safety and economic efficiency of ships. By establishing rational structural models and employing finite element methods to evaluate stress distribution and strength in key areas, potential weak points can be effectively identified. During the optimization process, the use of lightweight and high-strength materials enhances structural utilization and reduces energy consumption. The research findings indicate that reasonable optimized designs not only improve overall strength and stability but also significantly enhance the service performance and lifespan of the hull, providing scientific support for modern ship engineering.

Keywords : hull structure; optimized design; strength analysis; finite element method; safety

引言

船舶作为现代海上运输与资源开发的重要载体, 其结构设计直接关系到安全性、经济性和使用寿命。随着航运需求增长和海洋环境复杂化, 传统船体结构设计在强度与效率方面面临新的挑战。优化设计与强度分析不仅有助于提升船体承载能力和抗疲劳性能, 还能在降低能耗和材料成本的同时实现轻量化目标。探索科学的设计方法与先进的分析手段, 已成为船舶工程发展的关键方向。

一、船体结构优化设计的理论基础与方法

船体结构优化设计的理论基础主要建立在船舶力学、结构力学和材料科学等多学科的交叉融合之上。船体在海洋环境中长期承受波浪、风力、货载及自身重量的综合作用, 其结构设计不仅要满足强度、刚度和稳定性等基本要求, 还需兼顾经济性与实用性^[1]。传统船体结构设计多以经验公式和安全裕度为依据, 虽然能够保证一定的安全性, 但往往存在材料利用率低、结构重量过大等问题。随着计算力学和有限元分析方法的发展, 研究者逐渐将优化理论应用于船体设计中, 通过建立数学模型和目标函数, 对船体结构进行系统化改进。这一转变使得设计者能够在满足安全性的前提下, 最大限度地提高材料利用率和结构效率, 从而实现轻量化、节能化与高效化的综合目标。

在具体方法上, 船体结构优化设计通常包括结构建模、约束

条件设定、目标函数选择与优化算法应用等步骤。首先需要建立船体的合理模型, 该模型不仅要反映船体的整体几何特征, 还要细化到关键受力部位, 以确保分析结果的准确性。随后, 设计者会根据实际需求设定约束条件, 如结构强度不低于规范要求、结构变形不得超过安全极限、船体重量需控制在合理区间等。在此基础上, 通过构建目标函数来引导优化方向, 常见的目标函数包括最小化结构重量、最大化强度利用率、降低建造成本或提升整体稳定性等。优化过程中, 通常借助有限元分析技术对船体在不同工况下的应力分布和应变情况进行仿真, 从而识别潜在薄弱环节^[2]。与此同时, 各类智能优化算法如遗传算法、粒子群优化以及多目标优化方法的引入, 使船体结构优化设计具备更强的适应性和精细化特征, 有效提高了设计效率与可靠性。

随着海洋运输规模不断扩大以及绿色航运理念的提出, 船体结构优化设计的方法体系也在不断演进。近年来, 轻量化材料的

应用为优化设计提供了新的方向,诸如高强度钢、复合材料和铝合金等的使用,使船体在保证强度的前提下实现重量大幅降低,进而提高燃油效率与航速。此外,数字化与智能化技术的广泛应用,使得设计过程从单一的静态计算走向动态与全生命周期优化。通过大数据分析 with 多学科协同仿真,可以在设计初期预测船体在不同环境下的服役表现,为设计方案的优劣提供科学依据。绿色设计理念逐渐成为优化方法的重要组成部分,强调在满足结构强度与安全的同时,实现节能降耗与环境友好。这些新兴方法为未来船体结构的优化设计提供了广阔的应用前景与学术价值。

二、强度分析的关键技术与应用实践

强度分析作为船体结构设计中的核心环节,其主要目标是确保结构在复杂海洋环境下能够长期稳定运行而不发生失效。船体在服役过程中会受到波浪冲击、货物载荷、船体自重、风力以及偶发碰撞等多重作用,这些复杂工况对船体强度提出了极高要求。传统的强度分析方法主要依赖船体整体平衡计算与局部经验公式,但难以全面反映实际工况下的应力状态。随着计算力学的发展,有限元方法逐渐成为船体强度分析的主要工具,它能够将复杂船体划分为有限数量的单元,通过数值模拟计算出不同工况下的应力、应变与位移分布,从而识别薄弱部位并为设计改进提供数据支撑。在此基础上,研究者提出了线性与非线性有限元分析方法,前者多用于常规静态强度分析,而后者则能更真实地反映大变形、塑性失效以及疲劳损伤等复杂问题,使船体结构强度的计算结果更加可靠^[3]。

在关键技术方面,船体强度分析逐渐引入多种先进手段以提高准确性和适用性。首先是疲劳强度分析,它通过分析船体在周期性波浪载荷下的应力历程,预测关键结构部位的疲劳寿命,从而避免因累积损伤导致的突发性断裂。其次是屈曲分析,针对薄板与长细比结构,研究其在压缩或弯曲作用下的临界失稳条件,确保在高压和复杂环境下不发生屈曲破坏。此外,动态响应分析也是近年来的重要发展方向,它通过时域与频域方法研究船体在风浪载荷、冰载荷和碰撞冲击下的瞬态响应,为抗冲击与安全评估提供了科学依据^[4]。与此同时,断裂力学方法也逐步应用于船体强度评估,利用裂纹扩展模型和断裂韧性理论预测局部损伤的演化过程,从而为维修和寿命管理提供依据。这些关键技术的不断完善,使得船体强度分析从单一静态计算逐渐发展为全面、多维度的系统化研究,能够更好地指导设计和服役管理。

在应用实践中,强度分析已广泛应用于船体设计、建造和服役全生命周期管理。设计阶段,通过有限元模拟与试验验证相结合的方式,可以在早期识别潜在风险并进行针对性优化,显著减少后期修改与维修成本。在建造阶段,强度分析结果可为焊接工艺、材料选择和构件安装提供参考,确保施工质量满足强度要求。在服役阶段,借助结构健康监测系统实时采集应力和变形数据,再结合疲劳寿命预测模型,能够实现对船体运行状态的动态评估与预警,大幅提高安全性和可靠性。同时,强度分析在特殊船舶中的应用价值更加突出,例如液化天然气运输船、极地破冰

船和海洋工程平台等,由于其服役环境更加严苛,强度分析需要综合考虑低温脆性、冲击载荷与长时间疲劳累积等多种因素。在实践案例中,基于强度分析优化的设计方案不仅显著提升了船体抗波浪冲击和抗疲劳能力,还有效降低了材料冗余和能耗,实现了安全与经济的双重目标^[5]。可以说,强度分析技术的持续发展与实践应用,为现代船舶工程提供了坚实保障,也为未来高性能、绿色化船体结构设计奠定了重要基础。

三、优化设计在船体安全性与经济性提升中的作用

船体结构优化设计的核心目标之一是提升整体安全性。船舶在复杂多变的海洋环境中长期运行,不仅要承受持续的波浪载荷和风力作用,还要应对偶发的碰撞冲击和极端气候带来的风险。通过优化设计,可以有效改善船体受力分布,使关键结构部位的强度与刚度更加合理,避免因局部应力集中而导致的裂纹或疲劳损伤。例如,通过优化舱壁和纵横骨架的布置,可以降低甲板和底板的应力峰值,提高抗弯曲和抗扭转能力。同时,采用有限元分析与优化算法的结合,可以在设计阶段准确预测潜在失效模式,从而及时调整结构参数,实现对整体安全性能的前置性控制。实践证明,优化后的船体不仅在常规运行条件下具有更高的安全裕度,在突发情况下也具备更强的抗风险能力,为船舶的长期服役提供可靠保障。

在提升经济性方面,船体结构优化设计同样发挥着至关重要的作用。船体重量是影响燃油消耗与运营成本的关键因素之一,过度保守的设计往往导致材料冗余,增加建造成本和航行能耗^[6]。通过优化设计,可以在保证强度和稳定性的前提下,减少不必要的结构重量,实现轻量化目标。高强度钢、铝合金和复合材料的合理使用,使得船体在满足安全需求的同时显著降低了重量,从而提高燃油效率和运输能力。此外,优化设计还可在建造阶段提升经济效益。通过合理规划构件尺寸与连接方式,可以降低焊接与装配的复杂度,减少施工误差和返工成本。对于船东而言,优化设计不仅意味着降低建造和运营费用,更意味着在激烈的航运市场竞争中获得更强的成本优势与经济回报。

船体优化设计对安全性与经济性的提升具有协同作用,而非单一取舍。过去,安全性与经济性常常被视为对立目标,过度追求安全会增加重量和成本,而过度追求经济性又可能削弱结构强度。但随着优化方法与计算技术的进步,二者之间的矛盾逐渐得到缓解。现代多目标优化设计能够在不同指标之间实现平衡,既保障船舶在极端环境下的安全运行,又在全生命周期内降低能耗与维护成本。例如,利用多学科优化方法,可以同时考虑强度、稳定性、疲劳寿命和燃油效率等因素,从整体上提升船舶性能。更进一步,随着绿色航运和智能制造的推进,优化设计还将扩展到环保与可持续性领域,使船体在降低碳排放和提高资源利用效率方面发挥更大作用。这种基于系统性思维的优化路径,使得船体结构设计真正实现了安全性与经济性的双重提升,为未来船舶工程发展指明了方向。

四、船体结构优化与强度分析的发展趋势

船体结构优化与强度分析的发展趋势首先体现在数字化与智能化技术的深入应用。随着计算机技术和工程软件的不断进步，船体设计已经逐渐摆脱单纯依赖经验和简化计算的阶段，进入基于高精度数值模拟与智能优化的新阶段。三维建模、有限元分析和多学科协同仿真技术的成熟，使设计者能够在虚拟环境中对船体进行全方位性能评估，从而大大缩短设计周期，提高方案的可靠性。同时，大数据和人工智能的引入，为船体优化提供了新的方法。例如，基于机器学习的预测模型能够快速筛选出潜在的设计缺陷，遗传算法、粒子群优化等智能算法可以在多目标优化问题中找到更加合理的结构参数组合^[7]。未来，随着数字孪生技术的发展，船舶在设计、建造和服役过程中都可以通过虚拟模型与真实船体的互动，实现全生命周期的动态优化与强度监控，这将极大提升船舶工程的智能化水平。

绿色化与可持续发展成为船体结构优化与强度分析的重要趋势。在全球能源紧张和环保法规日益严格的背景下，航运业正面临节能减排与降低碳排放的双重压力。优化设计不仅要考虑传统的强度与安全性，还要兼顾环境影响和资源利用效率。轻量化设计理念在未来将更加突出，高强度钢、铝合金、复合材料的广泛应用能够在保证强度的前提下降低船体重量，从而减少燃油消耗与运营成本。此外，基于优化设计的绿色航运方案将更加关注结构的长寿命与低维护特性，延长船舶的服役周期，减少因维修或更换而带来的额外资源消耗。与此同时，强度分析方法也会结合环保要求进行改进，例如在疲劳寿命预测和断裂力学分析中加入

全寿命周期的能耗与排放评估指标，使结构设计与绿色目标紧密结合，为航运业实现可持续发展提供有力支撑。

跨学科融合与智能监测技术的结合将推动船体优化与强度分析向更加系统化和前瞻化的方向发展。未来的船体设计不再仅仅依赖单一学科，而是需要船舶工程、材料科学、流体力学、信息技术等多领域的协同创新。通过多学科优化设计方法，可以在强度、稳定性、经济性、能效和环境影响等多重目标之间实现平衡^[8]。随着传感器与物联网技术的普及，船舶在服役阶段能够实现实时监测与数据回传，为强度分析提供动态数据支持。这些数据不仅能够用于验证设计的合理性，还能通过智能算法进行预测性维护和风险预警，大幅提升船体结构的安全性和可靠性。未来，随着自动化航运和无人船的发展，优化设计与强度分析还将更多关注极端海况和特殊任务需求，以确保船体在复杂环境下的自适应能力。可以预见，数字化、绿色化与智能化将成为推动船体结构优化与强度分析持续进步的核心动力，为船舶工程的未来发展奠定坚实基础。

五、结束语

船体结构优化设计与强度分析是现代船舶工程发展的核心内容。通过理论基础与方法的完善，结合先进的强度分析技术，能够有效提升船体的安全性与可靠性。在优化设计的推动下，船体不仅实现轻量化和经济性提升，还满足绿色环保和可持续发展的需求。未来，数字化、智能化和多学科融合将成为主要发展方向，为船舶结构的科学设计和高效运行提供更加坚实的技术支撑。

参考文献

[1] 叶超锦, 陈先锡. 船体结构强度分析与优化设计 [J]. 船舶物资与市场, 2024, 32(09): 24–26. DOI: 10.19727/j.cnki.cbwzysc.2024.09.008.
[2] 李茂胜. 船体结构设计及优化措施分析 [J]. 船舶物资与市场, 2025, 33(03): 1–3. DOI: 10.19727/j.cnki.cbwzysc.2025.03.001.
[3] 王玲玲, 沈大亮. 船体结构生产设计要点探究 [J]. 船舶物资与市场, 2024, 32(12): 49–51. DOI: 10.19727/j.cnki.cbwzysc.2024.12.015.
[4] 毕斌, 刘忠伟. 船体结构形式要点与优化设计研究 [J]. 船舶物资与市场, 2024, 32(09): 36–38. DOI: 10.19727/j.cnki.cbwzysc.2024.09.012.
[5] 盛婷, 李晓文, 朱兆一, 等. 船体结构优化技术研究进展 [J]. 船舶工程, 2024, 46(07): 26–35. DOI: 10.13788/j.cnki.cbge.2024.07.04.
[6] 郝钟昊. 船体结构集成优化设计研究 [J]. 船舶物资与市场, 2024, 32(01): 20–22. DOI: 10.19727/j.cnki.cbwzysc.2024.01.006.
[7] 熊永亮, 张磊. 船体结构形式要点分析及优化设计 [J]. 船舶物资与市场, 2023, 31(06): 27–29. DOI: 10.19727/j.cnki.cbwzysc.2023.06.009.
[8] 丁健亮, 康煜哈, 张亮, 等. 船体结构极限强度优化设计 [J]. 武汉理工大学学报 (交通科学与工程版), 2023, 47(04): 639–643.

企业供电网电压暂降快速补偿技术研究

王永华, 张亚超, 高凯晨, 于尧
北京首钢国际工程技术有限公司, 北京 100072
DOI:10.61369/ERA.2025110018

摘 要 : 本文立足于工业生产现场实际面临的电压暂降问题, 通过梳理相关文献, 深入剖析了电压暂降的成因与传播机理, 并系统评估了其对各类生产敏感设备的影响程度。在此基础上, 重点研究了动态电压恢复器的监测与补偿配置技术, 并结合具体项目案例验证了所提方案的有效性与应用价值。

关 键 词 : 电压暂降; 分级补偿; 动态电压恢复; 闭环控制

Research on Rapid Compensation Technology for Voltage Sags in Enterprise Power Supply Networks

Wang Yonghua, Zhang Yachao, Gao Kaichen, Yu Yao
Beijing Shougang International Engineering Technology Co., Ltd., Beijing 100072

Abstract : This paper addresses the practical challenges of voltage sags encountered in industrial production. By reviewing existing literature, it conducts an in-depth analysis of the causes and propagation mechanisms of voltage sags, and systematically evaluates their impact on various types of sensitive production equipment. Furthermore, it focuses on the research of dynamic monitoring and Dynamic Voltage Restorer (DVR) compensation configuration technologies, and the effectiveness and application value of the proposed scheme are verified through specific project cases.

Keywords : voltage sag; graded compensation; dynamic voltage restoration; closed-loop control

引言

随着现代工业生产向着自动化、智能化方向飞速发展, 企业对电能质量的依赖性日益增强, 其中电压暂降问题已成为影响企业稳定生产的关键因素之一。为追求更高的生产效率与设备性能, 大量对电压波动极为敏感的高新技术电子设备被广泛应用于产线, 这使得企业对供电可靠性的要求达到了前所未有的高度。电压的任何微小波动都可能导致敏感设备停机, 进而引发连锁生产事故, 造成巨大的经济损失。大量研究表明, 在各类电能质量问题中, 电压暂降的发生频率居于首位。近年来, 随着高灵敏度负载的普及, 由电压暂降引发的直接和间接经济损失正逐年攀升。在工业领域, 电压暂降是造成生产线意外停机的主要原因之一, 因此, 如何有效防治电压暂降, 已成为当前电力技术与工业控制领域亟待解决的重要课题^[1-3]。

输配电网络中的突发短路故障是引发电压暂降最主要的原因。短路故障类型多样, 可能发生于相与地、相与相之间, 甚至多相与地之间。故障发生时, 短路点电压会急剧下降, 甚至为零, 而距离故障点越近, 暂降程度越严重, 随着距离的增加, 电压水平逐步恢复。继电保护装置动作并切除故障后, 非故障区域的电压能迅速恢复正常水平, 但故障区域将失电。多数短路故障可通过自动重合闸清除, 从而快速恢复供电。例如, 当变电站某条出线发生短路并被切除时, 其连接的网络便会监测到电压暂降。据统计, 单相、两相、两相接地点及三相短路的占比分别约为70%、15%、10%和5%, 由短路故障引起的电压暂降事件占总数的70%以上, 且极易造成严重的暂降, 导致巨大的经济损失^[4]。

此外, 大容量负荷的投切、变压器空载合闸以及大型电动机的直接启动等操作, 也会产生类似短路冲击的大电流, 进而引发电压暂降。以电动机全压启动为例, 其启动电流可达额定电流的5至8倍, 巨大的冲击电流在网络阻抗上产生显著压降, 形成电压暂降。此类暂降持续时间相对较长, 若暂降幅度过大, 同样会使敏感设备无法正常工作, 甚至引发事故。

一、快速补偿技术（DVR）研究

（一）DVR 概述

动态电压恢复器是一种基于电力电子技术的快速电压补偿装置。其硬件系统主要由逆变器、储能单元（如蓄电池）、滤波器和变压器四部分构成。DVR 的核心功能是在电网电压发生暂降或暂升时，能够以极快的速度向系统注入补偿电压，从而维持负载侧电压的稳定。同时，它还能有效抑制电压中的谐波、闪变等扰动，是解决动态电压质量问题的重要设备，其快速的响应特性保证了为敏感负载提供高质量的正弦波电能^[5-6]。

当前，国内外关于 DVR 的研究主要集中在提升其经济性与可靠性，主要涵盖三个方向：

- （1）DVR 拓扑结构及储能系统优化；
- （2）DVR 补偿控制策略研究；
- （3）电压暂降快速检测方法研究。

DVR 的电路拓扑结构直接影响其补偿效果和系统可靠性。目前主流的拓扑结构有两种：主要应用于中压系统的串联变压器型和主要用于低压系统的无变压器（或串并联混合）型。串联变压器型方案通过升压变压器接入电网，优点是可以降低直流逆变侧的电压等级，实现电气隔离。然而，其缺点也十分明显：变压器造价高、占地面积大，且其非线性特性会引入谐波问题，对变压器容量设计提出挑战，导致成本上升。因此，在低压场合，通常采用无串联变压器的 DVR 方案，以简化结构、降低成本^[7-8]。

（二）动态电压恢复器 DVR 的数学模型

建立精确的数学模型是研究 DVR 控制策略的基础。三相 DVR 系统结构复杂，数学建模难度较大。为简化分析，本文以单相 DVR 为例建立其数学模型，该模型同样适用于对控制策略的初步研究。

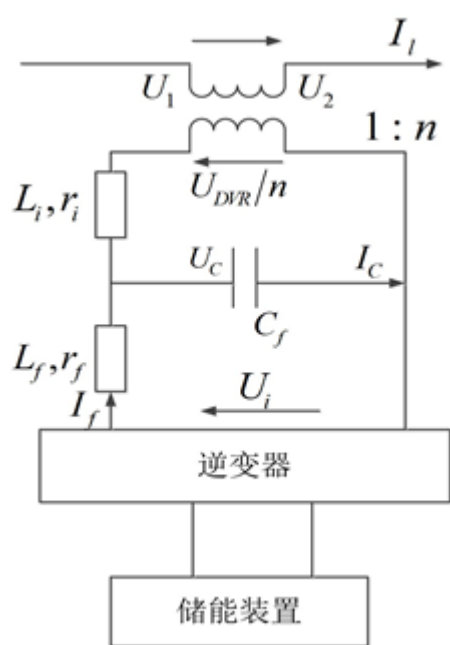


图2-1 单相 DVR 串联于电网的等效电路图

如图2-1所示，该电路描述了一个单相 DVR 与配电路串

联的工作模型。图中，图中 U_1 为系统中的依靠电源来供给电能电压值， U_2 表示的为负载的电压， U_i 为逆变元器件的输出电压值， U_{DVR} 为 DVR 输出的用来去补偿的电压值， I_l 表示的是负载的电流，滤波器的电感电流就用 I_f 来表示，滤波电容的电流就用 I_c 来表示，滤波器的电感就用 L_f 来表示，滤波器的电容那就用 C_f 来表示，滤波电感的阻抗就用 r_f 来表示，变压器的电感就用 L_i 来表示，为变压器的电阻就用 r_i 来表示，假如变压器变比是 $1:n$ 。依据基尔霍夫 KVL 和 KCL 定律，于是我们可以得到如下的方程组：

$$U_i = U_c + I_f \cdot r_f + L_f \frac{dI_f}{dt} \quad (2-1)$$

$$I_f = I_c + n \cdot I_L \quad (2-2)$$

$$I_c = C_f \frac{dU_c}{dt} \quad (2-3)$$

$$U_{DVR} = n \left[U_c - n \left(r_i \cdot I_l + L_i \frac{dI_l}{dt} \right) \right] \quad (2-4)$$

$$U_2 = U_1 + U_{DVR} \quad (2-5)$$

联立上述方程，可求解出系统的传递函数，从而构建 DVR 的数学模型。

（三）动态电压恢复器 DVR 的检测算法

检测算法是 DVR 系统的核心技术之一，其性能直接决定了补偿的及时性与准确性。该算法需实时捕捉电压暂降的幅值、相位跳变、持续时间和发生频次等信息，并快速准确地分离出需要补偿的电压畸变分量，是实现精确补偿的前提。

目前，常用的电压暂降检测方法包括：有效值算法、基波分量法、基波正序分量法、小波变换法等。其中，三相瞬时无功功率 dq 检测法应用广泛。该方法首先通过 Park 变换将三相电压转换到 d-q 旋转坐标系，然后利用移动平均法或低通滤波器提取 d-q 轴下的直流分量。通过计算这两个直流分量的幅值，并与标准电压幅值进行比较，即可判断是否发生电压暂降，暂降的幅值大小即为判断依据。

二、DVR 应用研究

（一）DVR 产品市场应用状况

工业生产流程的连续性要求极高，任何环节的供电异常都可能导致整个生产线的停滞。这种对电压暂降的高度敏感性催生了巨大的市场需求，使得 DVR 产品市场参与者众多。市场调研显示，现有 DVR 产品多应用于低压侧，其补偿容量相对有限，且产品价格随容量增加而显著上升^[9-10]。以某品牌产品为例，其额定电压等级覆盖 208V、400V、690V，补偿范围为 0%–130%，输出频率为 50/60Hz ± 10%，全响应时间小于 2ms，补偿精度误差小于 1%，补偿时间可在 0.4 至 30 秒之间定制，额定容量从 10KVA 至 5000KVA 不等，价格从数万元到数百万元。

市场上主流 DVR 产品的工作原理基本一致：在电网稳定运行

时, DVR 处于热备用模式, 双向 DC/AC 逆变器通过算法为储能单元浮充电, 并持续监测电网电压。一旦检测到电压跌落 (通常在 500 微秒内), 系统立即切换至补偿模式, 利用储能能量, 通过逆变器输出与跌落前电压同频同相的补偿电压, 保障敏感负载的电能质量。电网电压恢复后, DVR 再无缝切换回正常供电模式。

不同工业负载对电压暂降的耐受能力和影响机理各不相同。根据设备特性, 可将其分为三类进行分析:

普通低压负载, 其控制回路与主回路通常取自同一母线。电压暂降会导致两者电压同时下降。主回路电压降低可能引发电机低电压保护或因电流激增而触发过流保护。控制回路电压下降则可能导致接触器线圈释放, 造成电机跳闸。

高压电动机, 其控制回路通常由直流屏供电, 不存在接触器释放问题。但为了避免恢复供电时多台电机同时启动造成母线电压骤降, 通常设有低电压保护。暂降时, 为维持功率, 电机电流会迅速上升, 若超过定值, 则会触发过流保护。

变频器负载, 内部含有大量电力电子元件, 对电压变化极为敏感, 普遍设有直流母线欠压、过压、整流 / 逆变过流等多重保护, 极易因电压暂降而停机, 是电压暂降治理的重点对象。

(二) 研究成果及创新方法措施

基于上述分析, 针对工业生产中频发的电压暂降问题, 可采取以下综合治理措施:

1. 优化 10kV 系统继电保护定值

针对 10kV 电动机, 应根据生产工艺的实际需求, 审慎评估其低电压保护的必要性。若确需保留, 则应适当调整保护定值并增加延时 (通常 0.5 秒即可抵御绝大多数暂降故障), 避免保护误动。

2. 调整低压变频器欠电压保护定值

低压变频器的欠电压保护旨在防止整流和逆变模块因过流而损坏。分析表明, 电压暂降的持续时间通常在 200 毫秒以内, 短时电压波动一般不会损坏模块。因此, 可将欠压保护的故障判定延时增加至 0.2-0.3 秒, 以提高其抗暂降能力。

3. 增设低压控制回路抗晃电措施

为解决电压暂降导致接触器释放的问题, 可采用两种方案:

a. 加装防晃电装置。在接触器线圈回路中串联该装置。发生晃电时, 装置能迅速切断市电, 转由内部超级电容为线圈供电, 维持吸合。来电后自动切换回市电。

b. 更换为抗晃电接触器。对接触器进行改造, 内置储能元件和逻辑控制电路, 实现延时释放。但此方案因低压电机回路数量庞大, 改造成本较高。

4. 创新性应用动态电压恢复装置

传统 DVR 主要用于 400V 低压系统, 单台容量可达 2500kVA, 但成本随容量急剧上升, 难以用于整段母线补偿。考虑到企业中最敏感的负荷是低压电机控制回路, 本文提出一种低成本、高效益的创新方案:

a. 设置独立控制母线。通过专用的控制变压器将 380V 主母线电压降至 220V, 形成独立的控制电源母线, 所有电机的控制电源均取自此母线。

b. 配置小容量单相 DVR。在控制变压器与控制母线之间, 仅需安装一台小容量 (通常 5kVA 即可满足需求) 的单相 DVR。该 DVR 仅需补偿控制回路的功率, 却能达到与在主回路串联大容量三相 DVR 相同的保护效果。

此方案以极小的投入, 实现了对核心生产环节的有效保护, 极大地提升了企业的投入产出比。

三、结束语

电压暂降治理是一项复杂的系统工程, 涉及电力部门、电力用户及设备制造商的协同合作。本文通过研究电压暂降对敏感设备的影响机理, 并提出了针对性的解决方案, 对评估暂降影响和制定缓解策略具有重要的参考价值。同时, 在当前电能质量监测网络尚不完善的背景下, 研究电压暂降的传播特性、分析低压设备承受能力以及开发动态监测与分级补偿配置技术, 对于保障工业生产的电能安全具有显著的工程意义。

参考文献

- [1] 肖湘宁. 电能质量分析与控制 [M]. 中国电力出版社, 2010.
- [2] 肖湘宁, 徐永海. 电能质量问题剖析 [J]. 电网技术, 2001(03): 68-71.
- [3] 马钊, 周孝信, 尚宇炜, 等. 未来配电系统形态及发展趋势 [J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(6): 1289-1298.
- [4] 何仰赞, 温增银. 电力系统分析 (下册) [M]. 华中工学院出版社, 1985.
- [5] 赵芳, 杜兆斌. 敏感负荷对含新能源网规划的影响 [J]. 电力工程技术, 2018, 37(05): 62-69.
- [6] 句符兵. 配电网电能质量敏感负荷分析 [J]. 机电信息, 2014(24): 13-14.
- [7] 张文亮, 汤广福, 查鲲鹏, 等. 先进电力电子技术在智能电网中的应用 [J]. 中国电机工程学报, 2010(04): 3-9.
- [8] 能源评论. 打造“泛在电力物联网”应规划先行 [J]. 物联网技术, 2019, 9(03): 11-13.
- [9] 汪颖, 禹华西, 马明, 等. 基于余弦相似度的电压暂降 / 暂升类型模式匹配方法 [J]. 水电能源科学, 2020, 38(04): 171-175.
- [10] 吕金炳, 卢文清, 刘创华, 等. 基于能量指标的电压暂降严重程度评估方法研究 [J]. 现代电力, 2019, 36(1): 79-87.

电气工程及其自动化技术在工业雷管生产线智能化改造中的应用研究

潘文生

福建省民爆化工股份有限公司永春分公司，福建 泉州 362609

DOI:10.61369/ERA.2025110021

摘 要： 工业雷管是一种特殊的爆炸物品，其生产过程具有高危险性、高精密性的特点，传统生产线存在着效率低、安全性差、质量不稳定等问题。但随着电气工程及其自动化技术的不断发展，为工业雷管生产线的智能化改造提供了有力的支撑。本文主要探讨的是电气工程及其自动化技术在工业雷管生产线智能化改造中的应用方法，其中包括了生产流程自动化控制、智能传感与检测技术的应用、安全监控系统的智能化升级、人机协作模式的构建以及数据驱动的生产优化等几个方面。

关 键 词： 电气工程；自动化技术；工业雷管；生产线；智能化改造

Application Research of Electrical Engineering and Automation Technology in the Intelligent Transformation of Industrial Detonator Production Line

Pan Wensheng

Yongchun Branch of Fujian Civil Explosives Chemical Industry Co., Ltd., Quanzhou, Fujian 362609

Abstract： Industrial detonators are a special type of explosive materials, and their production process is characterized by high risk and high precision. Traditional production lines have such as low efficiency, poor safety, and unstable quality. However, with the continuous development of electrical engineering and its automation technology, it provides strong support for the intelligent transformation of industrialator production lines. This paper mainly discusses the application methods of electrical engineering and its automation technology in the intelligent transformation of industrial detonator production lines, including the automatic control of the process, the application of intelligent sensing and testing technology, the intelligent upgrading of the safety monitoring system, the construction of human-machine collaborative mode, and data-driven production optimization.

Keywords： electrical engineering; automation technology; industrial blasting caps; production line; intelligent transformation

引言

工业雷管是工业生产中不可或缺的爆破器材，它被广泛地应用于矿山开采、建筑拆除、水利工程等领域。但由于其自身的特殊性，工业雷管的生产一直受到了严格的安全管控。在传统的工业雷管生产线之中，大多数都依赖于人工操作，可此方法的生产效率低下，且人为因素容易导致安全事故的发生，同时产品质量也难以得到有效的保证。

因为科技的进步，智能化成为了制造业发展的必然趋势，为落实《民用爆炸物品安全、销售企业安全管理规程》和《加快推进民用爆炸物品行业转型升级实施意见》，加强数字基础设施建设，加大信息化建设力度，持续实施“机械化换人、自动化减人”工程，提升本质安全水平，推动安全、成熟、可靠人工智能技术及装备在生产线的应用，工业雷管行业也面临着智能化改造的迫切需求。目前电气工程及其自动化技术融合了电力电子技术、控制理论、计算机技术等多学科知识，已然能够实现生产过程的自动化、智能化控制，该技术在提高生产效率、保障生产安全、提升产品质量等多个方面都具有显著的优势。若将该技术应用于工业雷管生产线的智能化改造，不但能够解决传统生产线存在的诸多问题，还能推动整个行业朝向高效、安全、智能的方向发展。为此本文重点在于研究电气工程及其自动化技术在工业雷管生产线智能化改造中的具体应用方法，希望能够为相关企业的生产线改造提供实践层面的指导。

一、生产流程自动化控制技术的应用

工业雷管的生产流程非常复杂，其中涵盖了药剂制备、雷管装配、检验包装等多个环节，且每个环节的操作精度和稳定性都影响着产品质量和生产安全。而电气工程及其自动化技术中的自动化控制技术能够实现对于生产流程的精准把控，因此成为了生产线智能化改造的核心。

（一）药剂制备环节

目前在药剂制备环节常用的传统人工配料方式，不仅效率低，而且还存在着因配料比例误差导致的质量问题和安全隐患。对此应该采用可编程逻辑控制器（PLC）结合变频调速技术，进而实现药剂配料的自动化控制^[1]。展开来说：通过在配料罐上安装重量传感器和流量传感器，以实时地采集物料的重量和流量信息，然后将数据传输至 PLC 控制系统。PLC 会根据预设的配方比例，来控制给料电机的转速和阀门的开度，实现精确地控制各种原料的加入量，直接保证了配料比例的准确性。同时利用触摸屏实现人机交互，操作人员就可以在触摸屏上设置配方参数、监控配料过程，当出现异常情况时，系统还会自动报警并停止给料，保障了生产安全。

（二）雷管装配环节

雷管装配环节是工业雷管生产之中最关键、最危险的环节之一，可传统的人工装配方式劳动强度大、效率低，且容易因操作不当引发安全事故。若采用机器人自动化装配技术，就能够实现雷管零件的自动抓取、定位、装配等操作。该技术是在机器人上安装视觉识别系统和力传感器，利用了机器视觉技术，对于雷管零件的位置和姿态进行识别和定位，再引导机器人准确地抓取零件。力传感器则能够实时地检测装配过程中的作用力，一旦作用力超过预设阈值，机器人就会自动调整自己的动作，进而避免了因过度用力导致零件损坏或者是引发安全事故。

（三）检验包装环节

传统的人工检验方式在检验包装环节存在着漏检、误检等问题，严重地影响了产品的质量^[2]。如果采用了自动化检验设备结合机器视觉技术，便能够实现对于雷管外观、尺寸、药剂填充量等参数的自动检测。即借助高清摄像头采集雷管的图像信息，再利用图像处理算法对图像进行分析和处理，进而判断雷管是否存在外观缺陷、尺寸超差等问题。基于此，再采用射线检测技术对药剂填充量进行检测，便能确保药剂填充符合要求。

二、智能传感与检测技术的应用

工业雷管实际生产的过程中，一定要对于温度、湿度、压力、浓度等参数进行实时地监测，因为这些参数的异常变化可能会引发安全事故或影响产品质量。恰好智能传感与检测技术能够实时、准确地采集这些参数信息，可以为生产线的智能化控制提供数据方面的支持^[3]。

比如在药剂制备车间之中，温度和湿度的变化会影响到药剂的性能和稳定性。因此需要采用温湿度传感器对车间内的温度和

湿度进行实时地监测，此时传感器可以将采集到的数据通过无线通信技术传输至中央控制系统。中央控制系统再对数据进行分析和处理，发现温度或湿度超过预设范围时，就会自动地启动降温、除湿等设备进行调节，使得车间内的温湿度一直能够保持在适宜的范围内。同时还可以在原料储存罐上安装压力传感器和液位传感器，用于实时监测储存罐内的压力和原料液位，当压力过高或液位过低时，系统则会自动地发出报警信号，并且还会采取相应的保护措施，以防止发生泄漏或爆炸等事故。

就雷管装配的过程来说，一定要对雷管的零部件尺寸和装配精度进行严格的检测，那么激光传感器和图像传感器就成了最好的选择，原因是二者能够对零部件进行非接触式检测。其中，激光传感器能够精确地测量零部件的尺寸，图像传感器则能够对零部件的外观和装配位置进行检测。随后检测数据会被实时地传输至控制系统，控制系统会将检测结果与预设标准进行对比，对于不合格的零部件，将自动地发出信号控制分拣机构将其剔除，进而避免了不合格零部件流入下一道工序。

此外还可以在生产线的关键设备上安装振动传感器和电流传感器，因为振动传感器能够检测设备的振动频率和振幅，电流传感器能够检测设备的工作电流，而通过对这些数据的分析，可以判断出设备是否存在故障隐患。如果设备出现了异常，系统将会提前发出预警，提醒维修人员及时地进行检修，此举有效地避免了设备故障而导致的生产线停机，有助于提高生产线的运行可靠性。

三、安全监控系统的智能化升级

传统的安全监控系统主要依赖于人工巡检和简单的报警装置，当中存在监控不全面、响应不及时等问题。但工业雷管生产线的安全是至关重要的，所以需要利用电气工程及其自动化技术对安全监控系统进行智能化的升级，旨在实现对生产线全方位、全天候的安全监控。

一方面可以采用视频监控系统结合智能分析算法，对于生产线的关键区域进行实时地监控。该过程的原理是通过在车间内安装高清摄像头，进而实现对生产现场的全覆盖监控，视频图像会实时地传输至监控中心^[4]。基于智能分析算法，便可以对视频图像进行实时地分析，识别出生产过程中的异常行为，如人员进入危险区域、违规操作等，并且还会自动地发出报警信号。

另一方面是完善防火设备设施，可以安装烟雾传感器，以此对车间内的烟雾进行实时地监测。一旦检测到烟雾时，传感器就会立即将信号传输至控制系统，此时控制系统将自动地启动灭火装置等，还会切断相关区域的电源，有效地防止了火灾、爆炸事故的发生。同时系统还会将报警信息发送至管理人员的手机终端，以管理人员能够及时地了解到现场情况，为其采取相应的处理措施提供依据。

与此同时，还应该建立安全联锁系统，借助该系统将生产线的各个设备、工序与安全监控系统进行联锁控制。当某一环节出现安全隐患时，安全联锁系统能够立即切断相关设备的电源，直

接地停止该环节及相关环节的生产，从而防止事故的扩大。

四、人机协作与自动化物流系统的构建

尽管有了电气工程及其自动化技术的帮助，可工业雷管生产线的部分环节依然需要人工的参与，但传统的人工操作模式存在着效率低、安全性差等问题。而构建人机协作模式，结合自动化物流系统，即可实现人机之间的高效协作，进而提高生产的效率和安全性^[5]。

像雷管装配等危险环节，就可以选择采用人机协作的方式进行，也就是机器人辅助人工进行操作。由于人机协作机器人具有灵敏的传感器和安全保护装置，它能够感知到人体的存在和动作，在人与机器人发生碰撞或接近危险距离时，机器人便会自动地减速或停止运行，为人员安全提供了保障。或者是，操作人员通过手持控制终端向机器人发出指令，要求机器人完成一些重复性、高精度的操作，比如雷管零件的搬运、定位等等，但操作人员需要对机器人的操作进行监督和调整，才能实现人机协同工作，促使装配效率和质量得到提高。

而自动化物流系统也是实现生产线智能化的重要组成部分之一，该系统能够实现原材料、半成品和成品的自动运输和存储。即在工业雷管生产线当中，采用自动化导引车（AGV）作为物流运输工具，AGV 可以基于激光导航或二维码导航技术，按照预设的路径在车间内进行行驶，完成将原材料从仓库运输至生产工位、将半成品从一个工位运输至下一个工位，以及将成品运输至成品仓库等过程。若 AGV 与中央控制系统进行通信，还能实时地反馈自身的位置和运输状态，中央控制系统便能根据生产计划对 AGV 的运行进行调度，确保了物料运输的及时性和准确性。

五、数据驱动的生产优化技术应用

实际在工业雷管生产线智能化改造中，经过对生产过程中产生的大量数据进行采集、分析和挖掘，就能够实现生产过程的优化和决策的智能化，此时就可以提高生产的效率和产品质量。具体阐述如下：

首先利用数据采集系统对生产线的各个环节进行全面的数据采集，当中包括生产设备的运行参数、原材料的消耗数据、产品的质量检测数据、人员的操作数据等等。而这些数据会通过工业以太网传输至数据中心，数据中心负责对数据进行存储和管理。

然后采用大数据分析技术对数据进行分析，从中挖掘出数据中隐藏的规律和趋势。例如通过分析设备的运行参数和故障数据，能够找出设备故障的高发时段和原因，以此为设备的维护保养提供了依据；又比如通过分析原材料的消耗数据和产品的质量数据，可以优化原材料的配方和用量，在降低生产成本的同时还提高了产品质量。

基于数据分析的结果，工程可以实现生产计划的智能优化。即中央控制系统根据市场需求、原材料库存、设备运行状态等数据，自动地制定生产计划，且根据生产过程中的实际情况对计划进行动态的调整。比如，当某一设备出现了故障时，系统就会自动地调整生产计划，将生产任务分配给其他设备，进而确保生产计划的顺利完成。同时经由对生产过程的能耗数据进行分析，还有助于优化能源的分配和使用，进而降低生产能耗，实现了绿色生产^[6]。

最后利用数据可视化技术，得以将分析结果以图表、报表等形式直观地展示给管理人员，管理人员可以在监控大屏上实时地了解了解到生产线的运行状态、生产进度、产品质量等信息，为其进行管理决策提供了数据支持。一旦生产过程中出现了异常情况，系统还会自动地向管理人员发出预警，并为其提供相应的处理建议，旨在帮助管理人员快速地解决问题。

六、结束语

基于上述所有内容来看，电气工程及其自动化技术在工业雷管生产线智能化改造中的应用，在极大程度上提升了生产线的自动化水平、安全性和生产效率，使得产品质量的稳定性得到了保障。为此需要通过生产流程自动化控制技术的应用，实现各环节的精准把控；基于智能传感与检测技术，为生产过程的实时监测提供可靠的数据；加之安全监控系统的智能化升级，用于全方位地保障生产安全；人机协作与自动化物流系统的构建则可以提高生产的协同性和物流效率；数据驱动的生产优化技术有助于实现生产过程的持续改进。

但因为工业雷管行业具有特殊性，所以在智能化改造过程中还面临着一些挑战，像技术安全性、数据保密性、技术适配性、高成本投入等问题。未来随着技术的不断发展，还需要进一步地加强技术创新，并完善相关的标准和规范，以此推动电气工程及其自动化技术在工业雷管生产线智能化改造中的更加深入的应用。

参考文献

- [1] 陈金杰. 基于新质生产力的电气工程及其自动化在工厂安全生产中的应用 [C]. 2025 年第一届工程领域数字化转型与新质生产力发展研究学术交流会议论文集. 中国广西省南宁市, 2025: 36-37. DOI: 10.26914/c.cnkihy.2025.004125.
- [2] 张大江. 电气工程自动化中智能化技术的应用研究 [J]. 智能城市应用, 2024, 7(09): 87-89. DOI: 10.33142/sca.v7i9.13419.
- [3] 冯军民, 郭庆贺, 佟西伟. PLC 技术在电气工程及其自动化控制中的应用 [J]. 工程技术与管理 (香港), 2025, (10): 19-21.
- [4] 周兴祥. 智能化技术在电气工程自动化中的应用研究 [J]. 新潮电子, 2023, (12): 55-57.
- [5] 张瑞雪, 任亚丹. 智能化技术在电气工程自动化控制中的应用策略研究 [J]. 四川水泥, 2021, (01): 59-60.
- [6] 杜锡彬. 智能化技术在电气工程及其自动化中的应用研究 [J]. 工程技术研究, 2025, 10(05): 219-221. DOI: 10.19537/j.cnki.2096-2789.2025.05.072.

化工企业智能监控系统在安全管理中的应用

黄大勇¹, 胡海英²

1. 青岛灵符安全技术咨询服务有限公司, 山东 青岛 266199

2. 安德烈斯蒂尔动力工具(青岛)有限公司, 山东 青岛 266113

DOI:10.61369/ERA.2025110023

摘 要 : 本文聚焦化工企业智能监控系统在安全管理中的应用, 系统阐述了化工企业智能监控系统的核心价值与必要性, 深入剖析了其四层技术架构, 并详细探讨了该系统在生产过程安全监控、重大危险源管控、人员作业行为管理、环境与消防安全监控以及应急指挥与事后追溯等五大核心场景的具体应用。研究表明, 智能监控系统通过集成物联网、大数据、人工智能等新一代信息技术, 实现了对化工生产全要素、全过程的实时感知、智能分析、精准预警和高效协同, 能够变被动响应为主动预防, 显著提升安全管理的科学化、智能化水平, 为化工企业的安全、稳定、可持续发展提供了强有力的技术支撑。

关 键 词 : 化工安全; 智能监控; 物联网; 大数据

Application of Intelligent Monitoring Systems in Safety Management for Chemical Enterprises

Huang Dayong¹, Hu Haiying²

1.Qingdao Lingfu Safety Technology Consulting Service Co., Ltd., Qingdao, Shandong 266199

2.Andreas Stihl Power Tools (Qingdao) Co., Ltd., Qingdao, Shandong 266113

Abstract : This paper focuses on the application of intelligent monitoring systems in safety management for chemical enterprises. It systematically elaborates on the core value and necessity of intelligent monitoring systems in chemical enterprises, provides an in-depth analysis of their four-tier technical architecture, and discusses in detail the specific applications of these systems in five key scenarios: safety monitoring of production processes, management and control of major hazard sources, personnel operation behavior management, environmental and fire safety monitoring, as well as emergency command and post-incident tracing. Research indicates that by integrating new-generation information technologies such as the Internet of Things (IoT), big data, and artificial intelligence, intelligent monitoring systems enable real-time perception, intelligent analysis, precise early warning, and efficient collaboration across all elements and processes of chemical production. This transforms passive responses into proactive prevention, significantly enhancing the scientific and intelligent levels of safety management, and providing strong technological support for the safe, stable, and sustainable development of chemical enterprises.

Keywords : chemical safety; intelligent monitoring; Internet of Things; big data

引言

随着我国工业化的快速推进, 化工行业规模持续扩大, 生产复杂度日益增加, 传统的以人工巡检、定期检查和事后处理为主要特征的安全管理模式, 已难以适应新形势下对安全生产的更高要求。在此背景下, 以物联网、大数据、云计算、人工智能为代表的新一代信息技术迅猛发展, 为化工安全管理模式的变革带来了历史性机遇。本文旨在系统研究化工企业智能监控系统的构建与应用, 分析传统安全管理模式的痛点, 阐明智能监控系统应用的必要性与核心价值; 详细解读智能监控系统的四层核心技术架构; 结合具体场景, 深入探讨其在化工安全管理各环节的实践应用; 总结智能监控系统的应用成效, 并展望其未来发展方向, 以期为我国化工企业的智能化安全建设提供理论参考和实践指导。

一、化工企业安全管理面临的挑战与智能监控的必要性

（一）传统安全管理模式的痛点分析

化工行业作为国民经济的重要支柱之一，涵盖了从原料生产、化学合成到产品加工等多个环节^[2]。其在现代工业和民生中的作用不可忽视，但由于化学品的高危特性和复杂的生产过程，化工企业的安全管理一直是社会关注的焦点^[1]。传统化工安全管理以人工为主、设备为辅，在复杂环境下短板明显。监测覆盖上，因厂区大、高危区域多，人工巡检受时间、空间、人力限制，无法全区域全时段覆盖，细微隐患易长期处于未监测状态^[3]。风险预警层面，依赖定期检查+故障报修，侧重已发生的异常，预警有延迟，且缺少历史数据关联分析，难以预判故障。数据管理方面，多部门数据存于独立系统，无统一平台，数据难以实时共享，影响决策效率。人员管理上，靠现场监督与事后考核，难以实时管控人员行为，人员定位依赖纸质登记，事故发生时难以快速定位被困人员。

（二）智能监控系统的核心价值与必要性

针对传统管理痛点，智能监控系统借技术创新实现主动预防、精准管控、高效协同。监测覆盖上，依托传感器、摄像头等设备，24 小时监测关键参数与人员信息，消除安全盲区，灵敏度远超人工^[4]。风险预警方面，集成大数据分析 with AI 算法，动态建模分析数据，参数超标时即时报警，还能通过历史数据预判风险，大幅缩短预警响应时间、降低事故发生率。数据与决策协同上，构建统一数据平台整合多维度数据，形成一张图管理界面，可同步显示关键信息、自动生成处置方案与安全报表，提升管理效率。

二、化工企业智能监控系统的核心技术架构

（一）感知层：全面的数据采集网络

感知层作为系统的神经末梢，负责采集各类数据为后续分析奠基^[5]。核心设备上，部署温度、压力、液位、流量等工艺参数传感器，实时保障工艺稳定；高危区域，设有毒/可燃气、火焰、烟雾等安全状态传感器，及设备振动、温度传感器，预防隐患与故障；人员管理方面，关键区域布高清防爆夜视摄像头识别违规行为，人员配高精度 UWB 定位标签，越界即报警；环境监测上，厂区内外设气象站及噪声、粉尘、水质传感器，实时监测指标，为应急处置提供支持。

（二）网络层：稳定可靠的数据传输

网络层作为系统的通信中枢，负责将感知层数据实时安全传输至平台层，满足高可靠性、安全性与广覆盖需求^[6]。厂区核心区域用工业以太网，实现设备与平台高速传输，且抗干扰、稳定性强，保障数据不中断；偏远区域或移动设备用 5G 工业专网、LoRaWAN、Wi-Fi 6 等无线技术补充覆盖，适配不同数据传输需求；同时构建多重安全防护，通过加密协议、VLAN 划分、工业防火墙及入侵检测系统，确保数据传输安全。

（三）平台层：智能分析与数据处理中心

平台层作为系统的大脑中枢，负责数据存储、清洗、分析建模，实现数据-信息-决策转化。数据存储管理上，构建分布式架构，用实时与关系型数据库分别存储高频实时数据和静态、统计数据，并设容灾备份机制防数据丢失；数据处理方面，通过 ETL 工具清洗、标准化、融合多格式数据，形成结构化数据资产；分析建模上，集成大数据与 AI 算法，建安全预警、行为识别、风险评估等模型，实现预警、违规识别与风险评级；同时提供标准化 API 接口，对接企业现有系统与第三方应用，打破信息孤岛、扩展功能。

（四）应用层：面向用户的安全管理功能

应用层作为系统的交互窗口，基于平台层分析结果，通过 Web 端、移动端、大屏等形式，为不同角色提供个性化功能^[7]。实时监控中心以厂区电子地图整合多类信息，实现一张图可视化，管理人员可实时掌握设备、区域安全、人员状态；隐患触发时启动多维度报警，按严重程度分级推送、多渠道通知，并跟踪处置形成闭环；隐患管理实现从上报、分派、整改到验收的全流程数字化，留存台账；设备管理基于数据优化维护，生成提醒、记录档案并辅助故障分析；人员管理统计作业时长、记录违规，还提供移动端安全培训与考试；事故时，应急指挥可快速定位、评估事故、调度资源、规划疏散路线，事后追溯数据形成报告。

三、智能监控系统在化工安全管理中的具体应用场景

（一）生产过程安全监控

化工生产中，智能监控系统通过实时监测与智能分析保障安全稳定^[8]。工艺参数监测调控上，关键设备部署传感器采集数据，与安全阈值对比，接近阈值时预警调整，超阈值则自动联动系统紧急操作；物料泄漏监测定位方面，易泄漏部位设传感器与探测器，泄漏时快速检测并通过多传感器融合定位，触发报警；异常工况诊断上，平台层基于历史数据建诊断模型，出现异常时识别类型与原因，推送报告及处置建议。

（二）重大危险源智能监控

化工重大危险源（储罐区、反应装置等）管控中，智能监控系统通过全方位监测与评估实现精准管控^[9]。储罐区监控上，多设备协同监测储罐液位、温度、压力等状态，部署泄漏探测器与消防设施监控，确保风险早发现、设施可用；反应装置管控构建参数监测-风险评估-应急联动体系，除常规参数外还监测搅拌速度等关键项，动态评估风险等级，极高风险时自动联动紧急停车系统；同时系统可自动采集数据生成标准化报表，对接政府应急监管平台，实现政企数据互通，形成企业自主管控与政府监督的双重保障。

（三）人员作业安全与行为管理

智能监控系统通过定位、识别与管理，实现人员作业安全全流程管控。人员定位与电子围栏方面，为人员配备防爆、防水 UWB 定位标签，实时追踪位置并划定电子围栏，人员未经授权进入高危区域（禁止围栏）或靠近预警围栏时，分别触发报警与提

醒,管理人员可及时干预;作业行为识别上,作业区域部署高清防爆摄像头,通过算法识别人员是否规范佩戴防护装备、有无吸烟等违规行为及特种作业流程是否合规,违规时抓拍报警并通知整改;作业许可管理实现数字化,作业人员移动端提交申请,系统自动流转审批,作业时监控监护人员在岗情况,超时前推送提醒,避免超时风险。

（四）环境与消防安全监控

化工企业的生产活动易对周边环境造成影响,且火灾、爆炸事故频发,智能监控系统通过环境监测与消防设施管控,实现环境安全+消防安全双重保障。环境污染物实时监测与预警方面,在厂区内与周边敏感区域部署环境监测设备,实时监测大气污染物、水污染物、噪声与振动,系统将监测数据与国家环保标准对比,若超标则触发预警,同时自动联动环保处理设施,并生成环保监测报表,辅助企业应对环保监管^[10]。消防设施状态监控与联动上,化工企业的消防设施是应对火灾事故的关键,设施状态监测在消防水泵房部署压力传感器监测消防水压,在泡沫罐部署液位传感器监测泡沫储量,在灭火器、消防栓上粘贴 RFID 标签,通过巡检人员的手持终端读取设施状态,确保设施完好有效。火灾自动报警与联动在火焰传感器、烟雾传感器检测到火灾时,系统立即触发火灾报警,同时自动联动消防设施:开启消防水泵、启动泡沫灭火系统、关闭事故区域的通风阀门、切断易燃物料输送管道的阀门,防止火势蔓延。消防疏散引导根据火灾位置与风向,生成人员疏散路线,通过厂区 LED 屏、APP 推送至人员,指导人员快速撤离。系统还支持消防演练的数字化组织与预案管理,演练计划制定环节管理人员通过系统制定消防演练计划,并推送至参与人员,演练过程记录通过视频监控与人员定位,记录演练过程中的人员行动、设施启动情况,演练结束后生成演练评估报告,分析存在的问题,应急预案管理将企业的消防应急预案录入系统,当发生火灾时,系统自动调取对应预案,辅助指挥人员决策。

（五）应急指挥与事后追溯

化工安全事故的应急处置效率直接影响事故后果,智能监控系统通过数据支撑与流程优化,提升应急指挥能力,同时实现事故的事后追溯。事故快速定位与态势评估方面,当发生事故时,系统基于传感器数据与视频监控,快速确定事故位置与范围,并

在电子地图上标注,平台层整合事故区域的参数数据、人员分布、环境数据,生成事故态势图,预测事故发展趋势,通过人员定位确定被困人员位置与数量,通过视频监控观察设备损坏情况,为指挥人员制定救援方案提供依据。应急资源智能调度上,系统构建应急资源数据库,存储企业内部与外部的应急资源信息。当发生事故时,系统根据事故类型与需求,自动匹配最优资源,如泄漏事故调度堵漏队伍与防护用品,火灾事故调度消防队伍与灭火设备,并通过 APP 推送调度指令至资源负责人,同时实时跟踪资源运输进度,确保资源快速抵达现场。应急处置流程化管理中,系统将应急处置流程录入平台,当发生事故时,系统自动推送处置步骤至指挥人员与现场人员,指导人员按流程操作,避免因慌乱导致的处置失误,同时系统实时记录处置过程中的关键信息,形成应急处置台账,处置结束后自动生成应急处置报告,总结经验教训。事故事后追溯与分析环节,事故发生后,系统调取事故发生前后的所有数据,包括实时参数变化、视频监控录像、人员行动轨迹、处置步骤记录,还原事故发生过程。平台层通过数据分析,辅助调查人员确定事故原因,根据人员行动轨迹与操作记录,明确事故相关人员的责任;基于事故原因,系统生成改进建议,辅助企业完善安全管理体系,避免同类事故再次发生。

四、结束语

通过在生产过程、重大危险源、人员作业行为、环境与消防及应急指挥等关键场景的深度应用,智能监控系统不仅实现了对安全风险的实时监测、精准预警和快速响应,更重要的是构建了一个数据驱动、协同高效的安全管理新范式。它将分散的监测数据转化为有价值的决策信息,将被动的应急处置流程优化为主动的风险防控体系,将孤立的岗位管理整合为全局的协同作战平台,从而显著提升了企业的本质安全水平和综合防灾减灾救灾能力。企业应充分认识其战略价值,结合自身实际,科学规划、分步实施,持续推进系统的迭代升级与深化应用,从而构筑起坚实可靠的安全生产防线,为我国化工行业的健康、可持续发展保驾护航。

参考文献

[1] 朱磊,李帅,邬永利,等.化工企业安全管理存在的问题及对策[J].内蒙古石油化工,2025,51(4):53-56.DOI:10.3969/j.issn.1006-7981.2025.04.011.
[2] 刘素艳,迟峻嵩,张笑萌.化工企业安全管理困局及对策[J].现代企业文化,2024(15):22-24.DOI:10.3969/j.issn.1674-1145.xdqywh202415008.
[3] 徐保林.大数据技术在化工企业安全管理中的应用[J].中国公共安全,2025(2):184-186.DOI:10.3969/j.issn.1672-2396(x).2025.02.062.
[4] 李玉光.大型化工企业安全管理智能化建设实践[J].化工管理,2024(11):4-6.DOI:10.19900/j.cnki.ISSN1008-4800.2024.11.002.
[5] 赵海清.浅谈化工企业安全管理[J].化工管理,2015(23):266.DOI:10.3969/j.issn.1008-4800.2015.23.216.
[6] 张春迎,张英.计算机控制系统在现代化工企业安全管理中的应用与创新[J].天津化工,2025,39(4):142-145.DOI:10.3969/j.issn.1008-1267.2025.04.037.
[7] 赵冰.智能监控系统在化工企业中的应用研究[J].中国新通信,2018,20(6):214.DOI:10.3969/j.issn.1673-4866.2018.06.171.
[8] 朱小杨.物联网技术在化工企业智能消防监控系统中的应用[J].化工管理,2023(28):117-120.DOI:10.19900/j.cnki.ISSN1008-4800.2023.28.034.
[9] 颜作标.智能化技术在化工企业安全管理中的应用探究[J].安徽化工,2024,50(4):91-94.DOI:10.3969/j.issn.1008-553X.2024.04.022.
[10] 姚達.智能监控在石化企业数字化转型中的应用[J].化工管理,2024(13):64-66.DOI:10.19900/j.cnki.ISSN1008-4800.2024.13.017.

MOSS 罐型 FSRU 压载舱牺牲阳极设计与研究

何凡

上海中远船务工程有限公司，上海 200231

DOI:10.61369/ERA.2025110025

摘 要：FSRU 作为浮式储存和再汽化装置，其一般长期靠泊码头，源源不断的为岸上提供清洁能源。因此，无论 FSRU 兼做航行船与否，船级社均会要求使用水下检验代替坞检，即 FSRU 将在服役年限内不进坞做特别检查。基于此，FSRU 压载舱牺牲阳极将无法及时得到检测和更换，因此牺牲阳极设计寿命需满足 FSRU 服役年限要求。

关 键 词：FSRU；压载舱；牺牲阳极；设计寿命

Design and Research of Sacrificial Anode for FSRU Ballast Tank

He Fan

COSCO (Shanghai) Shipyard Co., Ltd., Shanghai 200231

Abstract：As a storage and re-vaporization installation, FSRU usually berths at the jetty for a long time, continuously providing clean energy to the shore. Therefore, regardless of whether FSRU serves as a seagoing vessel or not, the classification society will require using of underwater inspections instead of dock inspections, meaning that FSRU will not conduct special inspections during its service life. Based on this, the sacrificial anode of the FSRU ballast tank will not be able to be inspected or replaced in a timely manner, and its design life needs to meet the service life requirements of the FSRU.

Keywords：FSRU; ballast tank; sacrificial anode; design lifespan

引言

FSRU 在运行过程中，需保证其空载吃水和满载吃水变化不能过大，避免卸料臂因高差较大变化而脱落造成泄漏事故。因此，FSRU 在因卸货吃水减少时，需在压载舱打压载水来平衡其吃水，这将导致压载舱在 FSRU 服务年限内频繁使用。

由于压载舱打入的是湿度较大、盐分较高的海水，其对压载舱金属结构会产生严重的腐蚀。而 FSRU 一般需要连续服役 15 到 20 年以上，因此，需要在压载舱安装数量足够、位置合理的锌基阳极或铝基阳极，以保护压载舱内部结构。本文将基于某 FSRU 压载舱结构特点及服务海区状况，进行压载舱牺牲阳极的设计与研究，

一、FSRU 压载舱牺牲阳极计算

（一）牺牲阳极选择及参考标准

本文涉及的 FSRU 为一艘大型的球罐型液化天然气船改装而成，改装后设计寿命 20 年，共有 23 个压载舱，舱内钢结构表面积约 5500 m²^[1]。

考虑到单位重量铝基牺牲阳极电化学性能优于锌基牺牲阳极，优先选取铝阳极为压载舱牺牲阳极材质。在同等设计年限下，铝阳极可减少额外重量，对于对载重要求比较敏感的 FSRU 尤为重要。但同时需要注意到，铝阳极高处坠落撞击后会产生火花，而 FSRU 压载舱又紧邻危险区域的货舱干隔舱，因此，对于安装位置较高的阳极，需要增加额外防坠落措施^[2]。

牺牲阳极计算参考世界权威广泛使用的挪威船级社标准：

DNVGL-RP-B401 阴极保护设计

DNVGL-RP-B101 浮式生产与储存装置的防腐要求

（二）基本参数要求

1. 压载舱基本参数

本船服务海区为地中海东部港口，根据当地气象条件，压载舱内压载水正常温度 16℃，最高 27℃，压载舱浸透率取值 0.5，压载舱牺牲阳极设计年限为 20 年，使用铝基牺牲阳极进行保护。

2. 牺牲阳极化学成分

不同种类的牺牲阳极化学成份区别详见表 1，本项目拟采用铝基牺牲阳极。

作者简介：何凡（1981—），男，湖北荆门人，工程师，本科，主要从事船舶结构舾装机装设计。

表1 牺牲阳极化学成分表

合金 / 杂质 元素	锌基	锌基 (高于50°C)	铝基	铝钙合金
Zn	主要材质	主要材质	2.5-5.75	≤ 0.20
Al	0.10-0.50	0.10-0.25	主要材质	主要材质
In	N/A	N/A	0.015-0.040	≤ 0.005
Cd	≤ 0.07	≤ 0.001	≤ 0.002	
Si	N/A	N/A	≤ 0.12	≤ 0.10
Fe	≤ 0.005	≤ 0.002	≤ 0.09	≤ 0.07
Cu	≤ 0.005	≤ 0.001	≤ 0.003	
Pb	≤ 0.006	≤ 0.006	N/A	
Mg		0.05-0.15		
Ga				≤ 0.09-0.15
其他		≤ 0.1		

3. 阳极电阻率

对于流体盐度与电阻率之间的关系,参考挪威船级社规范中的参数曲线。考虑到世界海水平局盐度为35g/kg,且本项目服务海区海水温度介于16 °C 和27 °C,根据图1中曲线所示,牺牲阳极电阻率选25 (ohm*cm)。

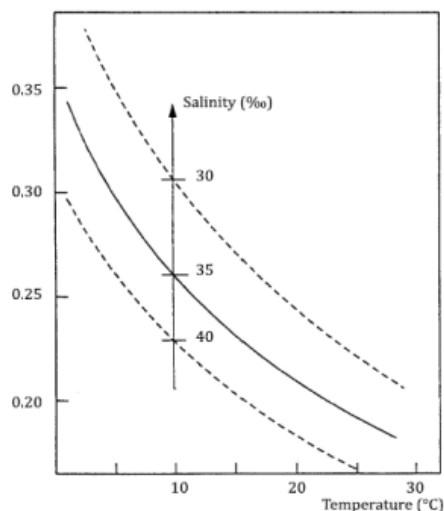


图1 海水电阻率与温度关系 (盐度为30%至40%)

4. 阳极形状特点

阳极形状会影响其电流释放从而影响保护效果,通常考虑两种不同形状的阳极,一种为长条直立形式,一种为扁平形式。其中,扁平形式适用于空间狭小区域,但不利用油漆作业。因此本船压载舱选用长条形牺牲阳极,其长度为800mm,截面为梯形,上宽80mm,下宽100mm,高度80mm,中心嵌入45x8扁铁,并两端延长,用以牢靠固定,固定形式可焊接也可以螺栓连接。阳极净重15kg,总重17.9kg。

(三) 阳极计算方法

1. 需求电流计算

压载舱钢结构表面保护所需的电流采用如下公式计算:

$$I_{cm} = A_c * i_{cm} * f_{cm}$$

$$I_{cf} = A_c * i_{cf} * f_{cf}$$

其中, A_c (m²) 阳极表面积

i_{cm} (A/m²) 设计平均电流密度

i_{cf} (A/m²) 设计最终电流密度

I_{cm} (A) 平均电流需求

i_{cf} (A) 最终电流需求

2. 阳极重量计算

单个压载舱所需阳极总重量采用如下公式计算:

$$M_a = \frac{8760 * t_f * I_{cm} * B_f}{u * \varepsilon}$$

其中, t_f (years) 设计寿命

u 阳极效用系数

ε (Ah/kg) 阳极电化容量

B_f 压载系数

8760 1年总小时数

3. 阳极电阻计算

对于长条型牺牲阳极,其电阻计算采用如下公式:

$$R_{af} = \frac{1.3 * \rho}{2 * \pi * L_f} * \left(\ln \frac{4 * L_f}{r_f} - 1 \right) = 0.275 (ohm)$$

其中, ρ =25(hm*cm) 环境电阻

L_f (cm) 阳极最终长度

r_f (cm) 阳极最终等效半径

4. 单个阳极输出电流计算

铝阳极最终输入电流计算采用如下公式:

$$I_{af} = \frac{Ec - Ea}{R_{af}}$$

其中, I_{af} (A) 最终输出电流

Ec 设计保护电位

Ea 设计闭路阳极电位

根据规范要求,设计保护电位取值为-0.8 V,而铝阳极在海水环境下的设计闭路阳极电位取值为-1.05 V

5. 阳极数量计算

阳极数量计算采用如下公式:

$$N1 = \frac{M_a}{m_a}$$

$$N2 = \frac{I_{cf}}{I_{af}}$$

其中, M_a (kg), 阳极总的净重量

m_a (kg), 单个阳极净重量

牺牲阳极数量需同时满足整个使用寿命内的电流需求和重量需求,即最终阳极数量应为:

$$N = \text{Max} (N_1, N_2)$$

以本船 NO.1 压载舱计算为例,其舱内钢结构物总面积为5630m²,计算过程如下:

$$I_{cm} = A_c * i_{cm} * f_{cm} = 5630 * 0.014 = 78.82A$$

$$I_{cf} = A_c * i_{cf} * f_{cf} = 5630 * 0.031 = 174.53A$$

$$M_a = \frac{8760 * t_f * I_{cm}}{u * \varepsilon} * B_f = \frac{8760 * 20 * 78.82}{0.9 * 2000} * 0.5 = 3836kg$$

$$I_{af} = \frac{Ec - Ea}{R_{af}} = \frac{1.05 - 0.8}{0.275} = 0.91A$$

$$N1 = \frac{M_a}{m_a} = \frac{3836}{15} = 256$$

$$N2 = \frac{I_{cf}}{I_{af}} = \frac{174.53}{0.91} = 192$$

N=Max (N₁, N₂) =256 (块)

根据以上计算，本项目所有23个压载舱总计需要长条形牺牲阳极4954块，总重量约为74.3吨。同等情况下，相较于锌阳极，可以减少重量约130吨。

二、牺牲阳极布置

(一) 阳极固定方式

由于本船改装后要求运行20年不进坞，因此牺牲阳极在其服务年限内无法进行更换，由此可以采用焊接形式将阳极固定在压载舱内结构附件上，可确保电流的有效流动，从而起到较好保护效果。

但由于船东特殊要求，本项目牺牲阳极拟采用螺栓固定形式，并且每个端部需要1组2根螺栓，每个螺栓需要配备2个螺母。为固定阳极，需要在舱内结构附件上预先焊接固定支架，如图2所示。为保证牺牲阳极与结构之间的有效连接，每块阳极安装完成后需测量其与结构间的电阻情况，确保最大值不超过0.1欧姆。

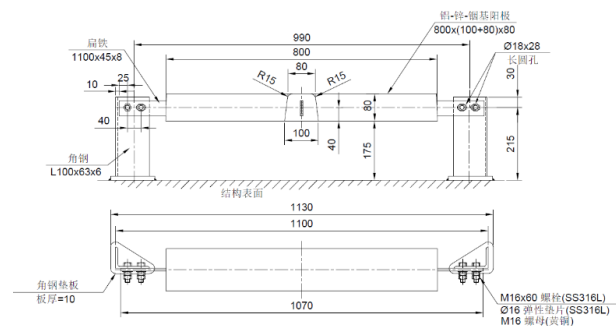


图2 长条形铝基牺牲阳极外形特点

(二) 阳极防坠落保护

FSRU 压载舱紧邻货罐干隔舱，而干隔舱作为本船货舱次屏蔽系统，由于可能存在可燃气体而被划入危险区域，相邻的压载舱理论上也可能存在可燃气体。

考虑到铝阳极撞击时会产生火花，因此，规范对于此类船舶压载舱使用铝阳极有了明确要求，即当阳极势能大于275J时，需额外增加阳极防坠落措施。换算下来，对于本船压载舱，对于高度大于1.87米存在坠落可能的牺牲阳极均需要进行额外保护。水平安装的阳极，拟采用图3所示的防坠落方案，且阳极向内口安装。垂直安装的牺牲阳极，拟采用图4所示的防坠落方案。

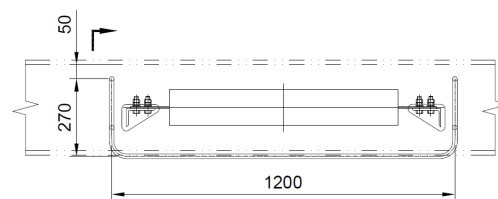


图3 牺牲阳极水平包住罩

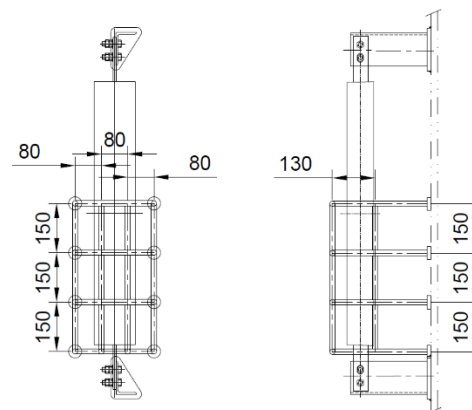


图4 牺牲阳极垂直保护罩

通过上图可以看出，除额外增加的防坠落构件外，铝阳极单边使用双螺栓固定，每个螺栓使用双螺母加弹性片，也可以有效的防止阳极坠落。

(三) 阳极布置要求

根据以上计算出的各舱所需阳极数量以及各舱结构特点，纵向均匀有效的布置牺牲阳极。高度方向上，靠近底部密布，靠近压载舱顶部增大布置间隙。牺牲阳极应固定在外板纵骨、舱壁纵骨的腹板上或者非水密纵桁和水平桁上，避免直接安装在外板和船底板。阳极典型布置如图5所示：

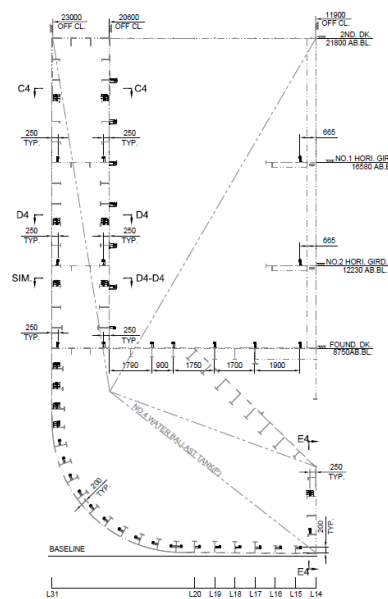


图5 牺牲阳极典型布置

图5中可以看出，基座甲板以下区域布置较密，外板纵骨几乎

每根均有布置，个别两侧有布置。高度大于1.8米且可能坠落的阳极，均增加了防坠落保护罩。绝大部分阳极布置在型材上，少量阳极布置在基座甲板上，反顶有对应的加强筋。基座甲板上方布置较稀，约每隔3档进行布置。

三、结束语

本文通过对某FSRU项目压载舱阴极保护进行分析计算和布置，通过选用铝基牺牲阳极，在保证使用要求前提下，同时极大的减少本船额外增加的重量，从而保证了本船有效的装载量。同

时还核算了海底阀箱处扁平型牺牲阳极的数量和布置，由于计算方法与本文类似，文中不做复述。

阳极腐蚀是个漫长的过程，期间受温度、湿度和盐度影响较大。而铝基阳极在空气中容易形成氧化铝保护膜，从而影响阳极的电流释放，因此，使用前需能确保所选阳极能长期有效释放电流。本项目在实施过程中，原船压载舱安装的锌阳极部分状况良好，对于位置较特殊的，采取保留措施。对于锌基阳极和铝基阳极共同保护效果，有待后续进一步研究。

参考文献

-
- [1] 挪威船级社 DNVGL-RP-B401 Cathodic protection design.2017.
 - [2] 挪威船级社 DNVGL-RP-B101 Corrosion protection of floating production and storage units.2015.

BIM 技术在施工过程中的应用

卢佳伟, 李婉君, 廖红玉, 陈旺

中国一冶集团有限公司, 湖北 武汉 430000

DOI:10.61369/ERA.2025110028

摘 要 : BIM 技术较为有利推动施工发展与管理, BIM 技术已是现代施工不可或缺的一种工具, 有着较好的智能性、先进性特点。可以加快施工速度且保证工程质量, 为进一步说明、梳理 BIM 技术在施工过程的应用价值, 下文对 BIM 技术在 BIM 技术在施工过程中的应用展开分析说明。

关 键 词 : BIM 技术; 施工管理; 应用

The Application of BIM Technology in the Construction Process

Lu Jiawei, Li Wanjun, Liao Hongyu, Chen Wang

China First Metallurgical Group Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430000

Abstract : BIM technology is more conducive to promoting construction development and management. BIM technology has become an indispensable tool for modern construction, with better intelligence and progressiveness characteristics. To further illustrate and clarify the application value of BIM technology in the construction process, which can accelerate the construction speed and ensure the quality of the project, the following article analyzes and explains the application of BIM technology in the construction process.

Keywords : BIM technology; construction management; application

引言

目前, 国内建筑基数依旧处于较高指数, 随着经济发展、政策发展现代施工建筑物的高度、施工难度、施工体量等方面都大大增加, 传统施工、管理技术都存在滞后现象。而 BIM (Building Information Modeling) 技术的推行, 较好优化传统施工、管理问题。BIM 翻译为建筑信息模型, 它自身的三维建模、可视化、模拟施工过程、模拟设备运行、协同办公等功能。整个建设周期 (设计、施工、竣工、运维), BIM 技术均可以与之产生密切联系。BIM 技术在施工中的应用, 不仅能够提高管理质量, 还能够使工程造价得到合理控制。本文通过 BIM 技术在施工过程中的应用的分析, 以突出展示 BIM 技术在施工管理周期的作用与价值。

一、项目背景

应用背景为片区性项目, 项目包含市政道路、房屋建筑、公共建筑多项建筑。BIM 技术主要依托公共建筑, 房屋建筑、市政工程为辅。其中公共建筑建设用地面积 115.46 亩, 总建筑面积 139385.2 m², 计容总建筑面积 119533.19 m²。本工程由 4 个单体组成, 包括乒乓球赛训一体馆、体育科研大楼、运动员接待中心及体育运动学校; 其中, 赛训一体馆建筑面积 49385.93 m², 1、2 层层高 6m, 3 层层高 5.4m, 4、5 层层高 4.5m。科研大楼共 21 层, 高 94.2m, 地上建筑面积 31384.35 m², 1 层层高 6m, 2、3 层层高 5.4m, 4 层及以上层高 4.2m。运动员接待中心共 18 层, 高 82.5m, 地上建筑面积 27120.36 m², 1 层层高 6m, 2、3 层层高 5.4m, 4、5、6 层层高 4.5m, 7 层及以上层高 4.2m^[1]。

二、施工过程中的应用

(一) BIM 技术的“原始深化”

传统 CAD 图纸仅能二维展示, 不能很好的展示结构、机电系统等复杂结构。同时, 对于公共建筑空间布局复杂且可用空间较少、系统繁多, 对设备管线的布置要求高, 进而导致设备管线之间、管线与结构之间容易发生冲突, 给施工造成困难, 或无法满足建筑室内净高, 造成二次施工, 增加项目成本。

BIM 技术, 基于建筑、结构、机电三大专业模型整合, 根据专业规范要求、净空要求, 对图纸进行模型建设并导入专业软件进行碰撞检查, 导出碰撞报告结果。根据报告结果对管线、设备进行调整、避让。同时, 利用 Atuodesk 系列软件对管道的流体阻力进行动态模拟对比分析, 有效减少了水流输送阻力, 进而降低

了机组及水泵运行能耗。从源头减少施工图纸问题，大大降低施工返工率，又能降低竣工交付后返修成本^[2]。

表1 传统图纸与 BIM 的比较

传统施工图纸（CAD）	BIM 深化图纸
设计存在缺陷	模型建设完成后，可自行检查问题
各系统专业无法整体汇总	建筑、结构、机电等模型均可整合
无法多人协同操作	建设、设计、监理、施工单位可多方协同操作
无法模拟设备运行各部分阻力情况	直观、正态模拟设备运行且输出直观数据



图1 BIM 技术碰撞检查

（二）BIM 技术三维可视化

利用 BIM 技术的三维数字化，能最好、直接、准确的将建筑内部结构展现，再利用 BIM 仿真技术，使外观较为真实的模拟出来。与传统 CAD 图纸填充式展示相比，能帮助设计师给业主更好地理解设计的出发点，为项目后期的选择物料、决策提供较为有利的支撑。



图2 精装效果图

通过 BIM 技术的三维可视化功能，能帮助施工单位在一些复杂的位置（如：地下室设备房、地下室拐角、裙楼与地下室交界

处）清晰展示施工细节，直观展示结构与设备管线分布。在 BIM 建模时，也会导出附属图纸（支架图、异性通风管道）结合施工工艺模拟技术，能更好、有效的展示给工人，讲解建筑施工细节，便于工人提前了解施工情况，以及提前加工配件（支架、支管、预埋件等），加快大大降低因为施工错误导致的返工，进而控制施工成本、提高施工管理能力^[3]。

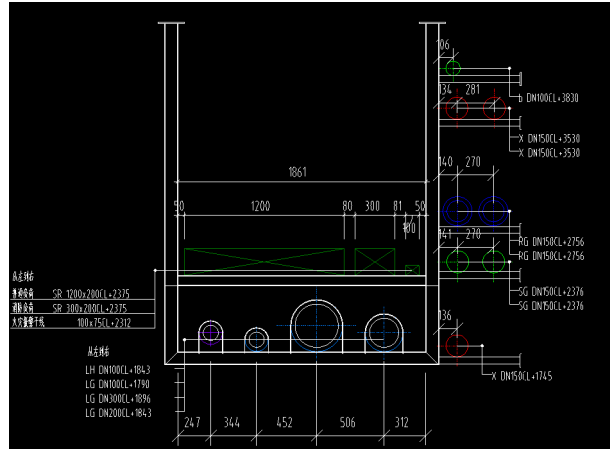


图3 坡面管线定位图

（三）施工场地布置

场地布置是施工前期准备中的重要部分，也是施工的前提与基础。通过 BIM 建模技术，对基础、主体、装饰三大阶段模型导入到三维场布软件中，通过软件内部程序运行，对场地地形、施工周边环境、施工临时道路、材料堆放区（钢筋、木方、加气块等）、安全文明施工进行规划布置和系统分析优化，来达到科学合理的场地布置。完成初步场地布置，可以利用 Atuodesk REVIT 或者其他渲染软件进行漫游视频制作并导出。能让管理人员多角度、多方位了解施工现场的场地布置情况。与二维图纸相比，BIM 技术下的场地布置更加直观。

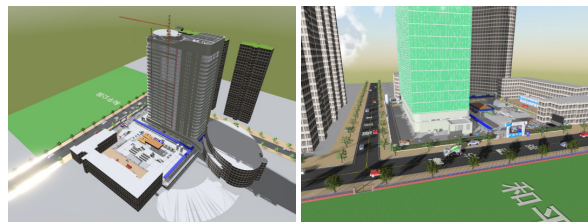


图4 施工布置

（四）智能建造项目数字管理平台（施工现场管理平台）

随着互联网的发展，施工现场赋予智能化，采用 BIM 轻量化技术，将 BIM 与智慧工地平台相结合，为使用者呈现基于 BIM 成果的三维可视化模型视图，使管理者可以从多个角度直观地查看和理解项目细节，包括建筑布局、结构、设备安装等。同时，使用者通过手机客户端、PC 客户端将现场管理信息（安全管理、质量管理、进度管理等）以 BIM 数据为载体，融合时间、成本、环境等数据，实现建设项目的全信息协同应用和交互共享，有效串联参建各方（开通平台权限）业务，实现数据生产、业务流传、信息审核的数字化协同。

（五）BIM 辅助工程造价

BIM 技术在工程造价方面也有着较高的应用价值，通过 BIM 模型的建立，会有初步的工程量，同时，对机电工程进行建模优化，后期利用 BIM 技术导出的图纸进行“算量”，有效缩小计算的工程量与实际施工成本的数额差。通过智能建造项目数字化平台，及时能了解项目施工过程中的工程索赔、变更等事情，及时变更造价。通过 BIM 模型与材料采购、施工计划（施工进度）等信息集成 5D，及时动态获得人、机、料等方面，通过实际成本与目标成本实时对比，能有效调整管控措施，进而保护施工单位成本^[4]。

（六）BIM 增强质量控制

现场管理人员在现场发现存在质量问题的地方，可利用数字管理平台中的 BIM 模型，找到该区域的构件，将问题填写在平台要求位置上，填写完成后通过系统关联部门、人员、整改队伍。通过数字端传递整改要求，简化传递问题流程、缩短传递问题时间。整改人员也可以通过平台传递整改情况，实现人员可不到

场，便可检查问题，有效节约施工周期。

针对 BIM 管理平台，每个构件都可以进行“二维码”赋能，将重点、难点位置，将构件“二维码”张贴在该施工区域内，管理人员可以绕开繁琐的平面图纸、不登录平台，就可以直接扫码查看构件信息（施工要求、验收要求、资料要求），以便现场管理。

三、结束语

随着 BIM 技术的不断成熟和普及，BIM 技术在施工过程中的应用效益越来越明显，同时，BIM 技术可以涉及工程全周期，从设计、施工、交付使用（运维）BIM 技术均有不同体现价值，大大提升我国建筑施工管理水平，有效推动建筑行业发展。不仅仅要施工单位加强 BIM 技术的学习，工程各参建方都应注重 BIM 技术的人员培养^[5]。

参考文献

- [1] 蔡剑文.BIM 技术在建筑工程管理中的应用[J].上海建材,2024,(3):100-101.
- [2] 梁君德.BIM 技术在建筑施工管理中的运用策略[J].工程管理,2024,(8):59-61.
- [3] 张淑芬,宋骏美.BIM 技术在建筑工程造价管理中的应用分析[J].四川建筑,2024,44(02):79-281.
- [4] 何尉铭.BIM 技术在建筑工程施工质量管理中的应用[J].工程技术研究,2024,9(07):207-209.
- [5] 周芳,王恩鹏.数字化技术在住宅建筑施工中的应用及其效益分析[J].居舍,2024,(18):158-161.

P70 型棚车左门右框组成低成本自动焊工艺研究

李春琴¹, 文红全¹, 甘俊林¹, 李晓娜²

1. 四川眉山中车眉山车辆有限公司, 四川 眉山 620032

2. 四川成都纺织高等专科学校, 四川 成都 611730

DOI:10.61369/ERA.2025110029

摘 要 : 针对 P70 型棚车左门右框组成手工焊接效率低、成形差、焊接变形大增加调直工作量等工艺难点, 认真分析, 制定现场改进方案。制作自动焊接生产线, 实现 P70 左门右框组成高质量、高效率、低成本、低劳动强度的生产目标。

关 键 词 : 焊接变形; 自动焊; 反变形; 低成本

Research on Low-Cost Automatic Welding Process for the Left Door and Right Frame Assembly of P70 Boxcars

Li Chunqin¹, Wen Hongquan¹, Gan Junlin¹, Li Xiaona²

1. CSR Meishan Rolling Stock Co., Ltd., Meishan, Sichuan 620032

2. Sichuan Chengdu Textile College, Chengdu, Sichuan 611730

Abstract : Addressing the process challenges of low efficiency, poor forming quality, and significant welding deformation that increase straightening workload in the manual welding of the left door and right frame assembly of P70 boxcars, this study conducted a thorough analysis and developed an on-site improvement plan. An automatic welding production line was established to achieve high-quality, high-efficiency, low-cost, and low-labor-intensity production goals for the P70 left door and right frame assembly.

Keywords : welding deformation; automatic welding; reverse deformation; low cost

引言

P70 左门右框组成是 P70 型棚车的重要部件, 它的焊接质量好坏直接影响到整车的组装质量和开关门功能^[1]。控制焊接变形, 提高生产效率 (由原来的 8 台 / 天提高到 16 台 / 天) 及焊缝成形质量, 确保自动焊生产线操作安全、方便、快捷、可靠是本次自动焊研制的目标。

一、左门右框组成焊接结构与工艺需求

(一) 结构特点分析

左门右框组成是由左门右框和防雨板组成 (见图 1), 每辆车 2 件。内侧焊缝为段焊, 采用手工电弧焊, 焊角为 4mm。外侧焊缝为连续焊, 焊角为 4mm, 焊缝长为 2614mm。由于左门右框 (空心矩型钢) 和防雨板 (板材压弯) 厚度为 4mm, 焊缝长度长, 焊接变形最大为 60mm。如何设计自动焊生产线及采用何种自动焊工艺, 是控制左门右框组成焊接变形的关键^[2]。

该部件焊接难点在于: 门框立柱与横梁焊接时存在空间角度 (30° 倾斜), 需保证焊枪可达性; 加强筋与立柱连接为薄壁件焊接, 易出现烧穿、变形问题; 对接焊缝需全焊透, 对装配精度与焊接参数稳定性要求高^[3]。

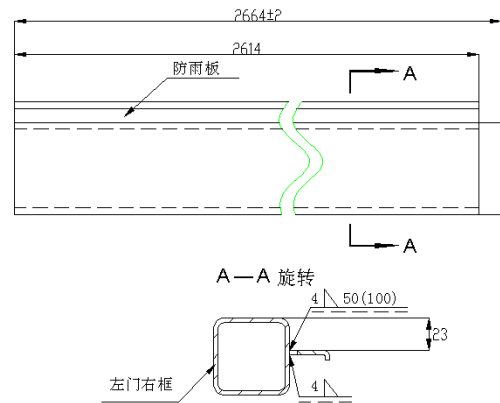


图 1 左门右框结构示意图

(二) 工艺需求指标

根据 TB/T 1580-2020 与企业生产标准^[4], 左门右框组成焊

接工艺需满足以下指标：

质量指标：焊缝外观评分 ≥ 85 分（GB/T 19418-2003），无损检测（UT+MT）合格率 $\geq 98\%$ ，焊缝抗拉强度 $\geq 490\text{MPa}$ ，冲击功（ -40°C ） $\geq 34\text{J}$ ；

效率指标：单台份焊接工时 $\leq 9\text{h}$ （相比手工焊降低40%）；

成本指标：单位焊接成本 ≤ 120 元/台份（相比手工焊降低20%以上），设备初期投入回收期 ≤ 2 年。

二、总体思路

1. 形成一条单班达到16台生产纲领的组装左门右框、防雨板及采用反变形强制自动焊的生产线。

2. 自动焊生产线操作安全、方便、快捷、可靠，改善作业环境、维修方便。

3. 焊接采用：考虑焊接变形应选用热输入更小的富氩混合气体保护焊（80%Ar+20%CO₂），KR-500型气保焊机、NZ-630型自动焊小车^[5]。

4. 焊缝成形美观，焊接变形 $\leq 2\text{mm}$ 。

5. 生产纲领：由原来的8台/天提高到16台/天。

三、设计自动焊生产线

原生产工艺采用手工焊条电弧焊焊接左门右框及防雨板，工件处于自由状态且正反面焊缝长度不对称，焊接变形为60mm（见图2）。原工艺流程：组对→手工焊接反面→手工焊接正面→调直→存放。

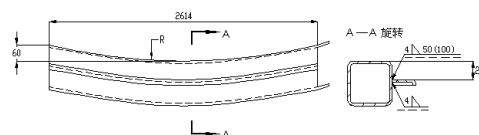


图2 变形示意图

改进后生产线包括组对工装、自动焊强制工装。优化后工艺流程：组对→反变形强制焊接正面焊缝→手工焊接反面段焊→存放。减少了调直工位，缩短工艺流程，提高了生产效率，降低劳动成本。

1. 组对工装（见图3）：由侧定位挡、两个带缺口的后定位挡和工作平台组成。

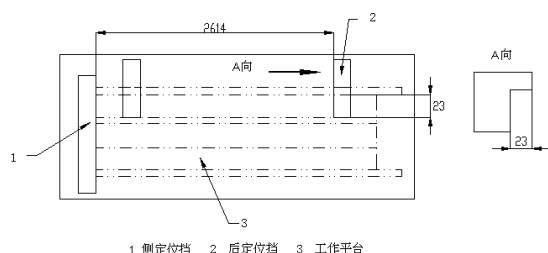


图3 组对工装示意图

2. 反变形强制自动焊工装：由焊接电源、焊接小车、反变形

仿形小车轨道、气动顶紧系统、整体胎模、辅助系统等组成（见图4）。

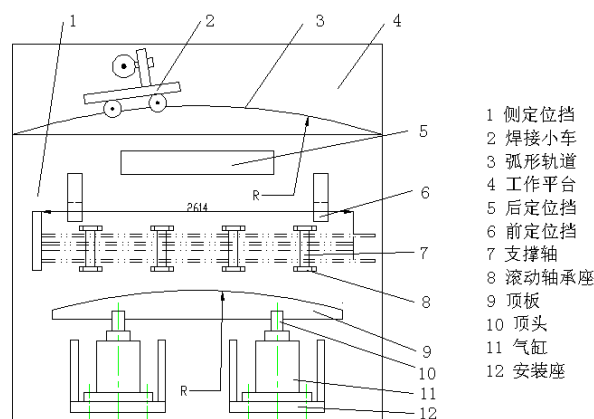


图4 反变形强制焊接工装示意图

（1）焊接电源：一台 KR-500 型自动焊电源，置于小车轨道一侧。

（2）焊接小车：一台 NZ-630 型焊接小车。

（3）小车轨道：水平长度(2614+450)mm（焊缝长度+自动焊小车身位），中心位置与防雨板端头弦高60mm的反变形弧形轨道。

（4）反变形仿形轨道（弧形轨道）

仿形轨道是仿形左门右框组成反变形曲线，为凸形弧形轨道，其曲率半径 R 与反变形曲线半径 R 相同。

（5）气动顶反变形系统

气动系统由两个气缸 QGS200×160、控制阀和管路等组成，主要起顶工件反变形及强制焊接作用^{[6]~[7]}。

气缸的选用：根据现场空间位置和预设反变形60mm，选用 QGS200×160 的气缸，经验证其行程、预压力均满足要求。

①工件的受力简化示意图（见图5）^[8]

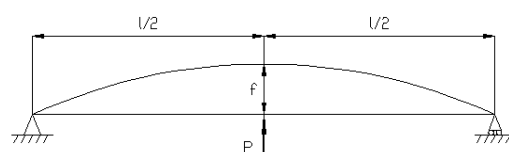


图5 工件的受力简化示意图

②左门右框反变形所需要力 P 的计算：

$$f = \frac{Pl^3}{48EJ}$$

P : 载荷 (N) l : 工件长度 (m)
 E : 弹性模量 (GPa) J : 截面轴惯性矩 (m⁴)

反变形挠度 $f=60\text{mm}$ $J=2.24 \times 10^{12} \text{ mm}^4$ $E=206\text{GPa}$

$$P=1.31 \times F = \frac{Jl}{4} D^2 p \eta 10^5 (\text{N})$$

气缸输出力^[9]：

气缸工作压力—0.63MPa；自动焊生产线工作频率低，基本是匀速动力，载荷率可取0.8，选用两个气缸作动力：

$2 \times F=1.31 \times 10^5$ $D=180\text{mm}$ 选用 $D=200$ 的气缸满足工件反变形要求。

3. 整体胎模

由顶头、弧形顶板组成。弧形顶板是仿形左门右框组成反变形曲线，作用面为凸形弧形曲面，其曲率半径 R 与反变形曲线半径 R 相同。

4. 辅助系统

侧定位挡、两个后定位挡、侧定位块、四个支承轴、八个滚动轴承座、工作平台，安装在滚动轴承座上的支承轴双重作用：自动焊前放工件、工件焊完后下料方便、快捷。

四、自动焊生产线的工作原理

将组对好的工件放在自动焊生产线的支承轴上，将工件靠紧侧定位挡。开启气缸控制开关，两气缸顶板顶靠工件至后定位挡，预制60mm的反变形。调节好焊接参数，启动焊接小车，施焊。焊后，关闭气缸开关，顶板松开回位^[10]。将工件放在料架上，冷却后，焊接变形与强制反变形基本抵消（工件焊接变形 $\leq 2\text{mm}$ ，满足工艺文件要求）。

焊接规范

左门右框组成各件材质均为 09CuCrNi 耐候钢，焊接材料采用 $\Phi 1.2$ 的 H08MnWICuCrNi 耐候钢焊丝。

焊接工艺参数见下表 1：

表 1 焊接规范选择

焊丝直径 (mm)	焊接电压 (V)	焊接电流 (A)	焊接速度 (mm/min)	焊丝伸出 长度 (mm)	保护气体 流量 (L/min)
$\Phi 1.2$	25 ~ 30	200 ~ 220	380 ~ 420	9 ~ 12	20

五、使用效果及特点

（一）提高左门右框组成的焊接质量，减小焊接变形

实施自动焊后，焊缝宽窄均匀，波纹平整细腻，外观整洁光

亮，与以前手工气体保护焊相比，上了一个台阶。同时由于减少了人为因素的影响，焊接质量保持稳定。由于采用强制反变形，焊后不需调直。

（二）操作简便，易学易掌握

使用表明，操作者在经过 2 ~ 3 天学习适用后，即可熟练掌握。

（三）降低劳动强度，改善劳动条件

手工焊接时，操作者需要手举焊枪在工作台进行焊接，劳动强度大，易于疲劳，且飞溅大，易造成烫伤。实施自动焊后，操作者只需在工作台上观察熔池，适当调节焊接小车与焊缝的对中度即可，降低了劳动强度。自动焊飞溅小，改善了劳动条件。

（四）制造成本低，维修方便，便于推广普及

自行研制的自动焊生产线，所需费用仅五万元左右，属于低成本自动焊生产线。如果采用外购，所需费用要高于十万元。另外，在维修方面，焊接设备的易损件与普通气体保护焊机通用，不须专门配备，便于维修。

（五）生产效率高

手工焊接生产能力：8 台 / 天，自动焊生产能力：16 台 / 天。

单台份焊接工时：从 15h（手工焊）降至 8.5h（自动焊），效率提升 43.3%；

返修工时：从 12%（手工焊）降至 1.8%（自动焊），节约返修工时（ $15 \times 12\% - 8.5 \times 1.8\%$ ）= 1.65h/ 台份。

六、结论

近些年通过在 P70 型棚车生产中的应用，结果表明自动焊生产线达到了高质量、高效率、低劳动强度和低成本的预期目标。该方法具有可移植，具有推广价值。

参考文献

[1] 中华人民共和国国家铁路局 .TB/T 1580-2020 铁道货车焊接技术条件 [S]. 北京：中国铁道出版社，2020.
[2] 中国机械工程学会焊接学会，焊接手册（第 3 卷）：焊接方法及设备 [M].4 版 . 北京：机械工业出版社，2021.
[3] 王建军，李刚 .P70 型棚车车门结构强度分析与优化 [J]. 铁道学报，2023, 45(7):142-148.
[4] 刘敏，张昊 .低成本 MIG 焊工艺在 Q355B 薄壁件中的应用 [J]. 焊接学报，2022, 43(11):89-95.
[5]GB/T 8110-2020 气体保护电弧焊用碳钢 . 低合金钢焊丝 [S]. 北京：中国标准出版社，2020.
[6] 西门子工业软件 .ANSYS Workbench 2023 结构分析实例教程 [M]. 北京：电子工业出版社，2023.
[7] 铁道行业发展研究中心 . 铁路装备制造业 " 十四五 " 发展规划解读 [R]. 北京：中国铁道出版社，2021.
[8] 《材料力学》[S]. 高等教育出版社 .
[9] 《机械设计手册》[S]. 第一卷 . 机械工业出版社 .
[10]GB/T 3375-2012 焊接术语 [S]. 北京：中国标准出版社，2012.

钢铁冶金设备维修过程中绿色润滑技术的选型与应用效果分析

吴佛琼

本溪钢铁（集团）设备工程有限公司，辽宁 本溪 117000

DOI:10.61369/ERA.2025110030

摘 要： 本文聚焦钢铁冶金设备维修过程中绿色润滑技术的选型与应用效果分析，针对钢铁冶金设备高温、高负荷、多污染的复杂工况，从工况适配、部位特性、维修目标三维度拆解润滑需求，确立技术有效性、环境友好性、经济合理性与安全兼容性的选型原则，并构建目标层—准则层—指标层三级综合评价模型，通过层次分析法（AHP）与熵权法融合确定权重，结合指标量化评分实现技术量化选型。指出技术推广面临认知、技术、成本、政策四大挑战，并从认知引导、技术突破、成本分摊、政策支持四方面提出对策，为钢铁行业绿色润滑技术应用与可持续发展提供参考。

关 键 词： 钢铁冶金设备；设备维修；绿色润滑技术；技术选型

Analysis of Selection and Application Effects of Green Lubrication Technologies in the Maintenance Process of Iron and Steel Metallurgical Equipment

Wu Fuqiong

Benxi Iron and Steel (Group) Equipment Engineering Co., Ltd., Benxi, Liaoning 117000

Abstract： This paper focuses on the selection and application effects of green lubrication technologies in the maintenance process of iron and steel metallurgical equipment. Addressing the complex working conditions of high temperature, high load, and multiple pollutants in iron and steel metallurgical equipment, it dissects lubrication requirements from three dimensions: working condition adaptability, component characteristics, and maintenance objectives. It establishes selection principles based on technical effectiveness, environmental friendliness, economic rationality, and safety compatibility. Furthermore, it constructs a three-tier comprehensive evaluation model comprising an objective layer, a criterion layer, and an indicator layer. By integrating the Analytic Hierarchy Process (AHP) with the entropy weight method to determine weights, and combining indicator quantification and scoring, it achieves quantitative technology selection. The paper points out four major challenges in technology promotion: awareness, technology, cost, and policy, and proposes countermeasures from four aspects: awareness guidance, technological breakthroughs, cost-sharing, and policy support, providing references for the application and sustainable development of green lubrication technologies in the iron and steel industry.

Keywords： iron and steel metallurgical equipment; equipment maintenance; green lubrication technologies; technology selection

引言

随着环保政策趋严、企业降本增效需求升级，绿色润滑技术凭借其高热安定性、高生物降解率、长使用寿命等优势，逐渐成为解决传统润滑痛点的核心方向。因此，构建科学的绿色润滑技术选型体系，量化分析其应用效果，成为推动钢铁冶金设备维修绿色化、提升企业核心竞争力的关键课题。本文基于钢铁冶金设备的典型工况与维修需求，首先建立三级选型评价模型，明确选型逻辑；从技术、经济、环境与社会维度，结合实际案例量化分析绿色润滑技术的应用价值；针对推广挑战提出针对性对策，旨在为钢铁企业绿色润滑技术选型与应用提供理论支撑与实践参考，助力钢铁行业实现可持续发展。

一、钢铁冶金设备绿色润滑技术选型模型与方法

（一）设备维修润滑需求分析

由于润滑油脂在高温环境下容易被氧化、蒸发而失效，其使用温度很难超越 $-80 \sim 350^{\circ}\text{C}$ ，并且杂质的存在、冲击强度高等因素都会大大降低油脂的润滑性能。在这种工况下，若仍采用普通润滑油脂就很难实现设备的良好润滑，冶金设备可能经常处于干摩擦状态，造成设备的巨大磨损，严重影响生产的正常进行^[1]。钢铁冶金设备涵盖高炉、转炉、连铸机、轧机等数十类核心设备，不同设备的结构特性、运行工况差异显著，其润滑需求需从“工况适配、部位特性、维修目标”三维度精准拆解，为技术选型奠定基础^[2]。设备普遍面临高温、高负荷、多污染环境，如高炉、转炉温度可达 $300\sim 500^{\circ}\text{C}$ ，需高闪点、高热安定性润滑剂；连铸机结晶器近 1000°C ，需石墨基固体润滑；轧机轴承等重载部位要求极压抗磨性。不同部位润滑特性各异，如滚动轴承需中低黏度润滑脂，滑动轴承需高黏度油并增强吸附，齿轮传动需抗泡沫、黏附性好。维修目标上，追求延长部件寿命、降低润滑成本与减少停机，需采用长寿命润滑剂、高效润滑系统及高可靠设计，确保设备在极端工况下稳定运行。

（二）绿色润滑技术选型原则

绿色润滑技术选型需平衡技术有效性、环境友好性、经济合理性与安全兼容性四大原则，避免单一维度决策。技术适配是前提，需根据工况、部位及系统兼容性精准匹配^[3]。环境友好性需从润滑剂全生命周期考量，覆盖生产、使用、废弃三个阶段。经济合理性需通过全生命周期成本分析，综合评估绿色润滑技术的短期投入与长期收益。安全兼容性旨在确保绿色润滑技术不对设备和人员造成安全风险，重点关注材料兼容、操作安全与火灾防控。

（三）构建绿色润滑技术选型综合评价模型

为实现绿色润滑技术的量化选型，构建目标层—准则层—指标层三级综合评价模型，通过多维度指标加权评分筛选最优方案^[4]。目标层为绿色润滑技术选型综合评价，准则层包括技术性能、环境影响、经济成本和安全性能四大维度，每个准则层下细分具体指标层，共20项核心评价指标，每项指标均明确数据来源与说明。权重确定采用层次分析法（AHP）结合熵权法，邀请10位专家使用1-9标度法对指标重要性两两比较构建判断矩阵，并进行一致性检验（ $CR < 0.1$ ），主观权重（AHP）占60%，客观权重（熵权法）占40%，融合得最终权重。指标量化与评分环节中，定量指标采用极值法标准化处理，正向指标得分随值增大而提高，负向指标则相反；定性指标采用5级评分法（1-5分），映射为0-100分^[5]。综合评价与优选采用加权求和法计算各方案综合得分，公式为综合得分等于各项指标权重与对应标准化得分乘积的累加结果，得分最高的方案即为最优绿色润滑技术选型方案。

二、绿色润滑技术应用效果分析

（一）技术效果分析

绿色润滑技术通过优化润滑剂性能与润滑系统设计，显著改

善了钢铁冶金设备的运行稳定性，降低了设备磨损率与故障频次，核心技术效果体现在设备摩擦控制、润滑系统效率及恶劣工况适应性三个方面^[6]。在设备摩擦磨损控制上，绿色润滑技术通过采用高压抗磨性能的润滑剂与精准供油方式，大幅减少了设备关键部件的磨损。润滑系统效率提升是绿色润滑技术的另一核心优势，改造为油气润滑系统后，通过压缩空气将润滑剂雾化成为 $5\sim 10\mu\text{m}$ 的微小油滴，均匀输送至每个润滑点，润滑剂利用率提升至90%以上，且系统配备在线压力、流量监测模块，可实时预警管路堵塞、油位不足等异常，维护方式从“定期拆解”转为“按需检修”，月均维护时间缩短至2小时，系统维护效率提升75%^[7]。此外，针对原料场皮带运输机的润滑改造，采用自动补脂型滚动轴承单元与低黏度合成润滑剂，轴承润滑脂填充量从传统的80%轴承内部空间降至30%-40%，避免了因油脂过多导致的轴承温升过高问题，轴承运行温度从 65°C 降至 45°C ，进一步延长了润滑脂更换周期。在恶劣工况适应性方面，绿色润滑技术展现出显著优势。钢铁冶金设备面临的高温、多粉尘工况对润滑系统的稳定性提出极高要求，传统矿物油在 200°C 以上环境中易发生氧化碳化，形成油泥堵塞管路，而可生物降解合成酯润滑剂的闪点可达 280°C 以上，在轧机工作辊轴承工况下，仍能保持稳定的黏度与油膜强度，氧化安定性指标仅为传统矿物油的 $1/3$ ^[8]。针对转炉烟道支撑轴承的高温润滑难题，采用聚四氟乙烯基固体润滑剂，可在 $300\sim 500^{\circ}\text{C}$ 环境下长期保持润滑性能，解决了传统润滑剂频繁失效的问题。同时油气润滑系统的密封结构优化，有效阻挡了铁鳞、粉尘侵入润滑部位，轧机牌坊轴承润滑系统的污染率从改造前的30%降至5%以下，因杂质导致的轴承卡死故障从每月1-2次降至每季度不足1次。

（二）经济效益分析

从全生命周期成本视角来看，绿色润滑技术虽初期投入高于传统润滑技术，但通过减少润滑剂消耗、降低设备维修成本及减少停机损失，可在短期内实现成本回收，长期经济效益显著。以该钢铁企业2050mm热连轧机与连铸机改造为例，连铸机采用可生物降解合成酯润滑剂及油气润滑系统后，单条生产线初期额外投入约35万元，两条合计70万元；长期运行中，润滑剂月均消耗从500kg降至150kg，年节约成本1.92万元，热连轧机工作辊轴承与结晶器铜板更换频率显著降低，年节约维修成本45.3万元，同时设备停机时间从年均48小时缩短至12小时，年减少停机损失2160万元^[9]。综合计算，年总节约成本约2207.22万元，扣除初期投入70万元后，投资回报周期仅约11天，远低于行业平均水平。此外，随着绿色润滑剂规模化采购，单价可进一步降低，人工成本也间接减少，经济效益持续提升。

（三）环境与社会效益分析

绿色润滑技术在减少环境污染、降低能源消耗的同时，显著改善了车间工作环境，提升了企业绿色形象，契合钢铁行业“双碳”目标与绿色转型需求^[10]。在环境效益方面，绿色润滑系统将润滑剂泄漏量控制在 50kg/年 以下，可生物降解润滑剂28天降解率达95%以上，避免了传统矿物油泄漏带来的土壤修复成本，年节约约2万元；同时通过降低设备摩擦阻力，热连轧机主电机运

行电流从150A降至130A，年节电1.2万度，减少二氧化碳排放3.67吨，润滑剂生产能耗也较传统矿物油低30%，进一步推动碳减排。此外，废油年产生量从800kg降至200kg，处理成本大幅降低，有效减少危险废物对环境的影响。在社会效益方面，绿色润滑技术使车间VOCs浓度降至50mg/m以下，操作人员呼吸道不适投诉率从20%降至5%，噪音也降至60分贝，显著改善了工作环境；企业因此获评“环保示范企业”，获得政府环保补贴10万元，并因“绿色生产”标签赢得下游客户优先采购，市场占有率提升3%。该技术还推动企业与高校合作研发，形成2项实用新型专利，经验被纳入行业指南，促进技术普及，同时通过专项培训培养了一批专业人才，增强了企业的可持续发展能力。

三、绿色润滑技术推广的挑战与对策

（一）推广应用面临的主要挑战

从认知层面看，多数钢铁企业仍存在“重生产、轻环保”“重短期成本、轻长期收益”的思维定式，管理层常将绿色润滑技术视为环保附加项而非降本增效手段，忽视其延长设备寿命、减少停机等长期收益；基层人员则因不熟悉操作规范而存在畏难情绪，执行阻力大。此外，行业缺乏权威案例库与评估标准，企业难以直观判断技术价值，决策顾虑多。技术层面，钢铁设备工况复杂多样，现有绿色润滑剂在极端高温、高负荷等条件下性能不足，如国产耐高温润滑剂使用寿命仅为进口产品的70%；老旧设备改造中润滑系统兼容性差，需额外结构调整，增加复杂度与成本。同时行业缺乏统一的选型、检测与维护规范，导致技术质量参差不齐，企业选型困难。成本层面，绿色润滑技术初期投入高，润滑剂价格是传统矿物油的1.5–3倍，系统改造费用动辄数十万至百万元，中小企业难以承受；且其成本节约需长期显现，与企业短期财务考核冲突。此外，环境效益未转化为直接经济回报，缺乏成本分摊机制，进一步削弱企业推广动力。政策层面，支持体系尚不健全，专项补贴覆盖有限、申请复杂；税收优惠缺失，无法体现政策导向；监管力度不足，传统润滑剂违规使用处罚成本低，导致“守法成本高、违法成本低”现象普遍，企业缺

乏外部压力推动技术转型。

（二）推动绿色润滑技术应用的对策与建议

为推动绿色润滑技术在钢铁行业的广泛应用，需从认知引导、技术突破、成本分摊与政策支持四方面协同发力，构建多方参与的综合推进体系。政府部门应将绿色润滑技术纳入钢铁行业绿色转型重点目录，发布应用指南，强调其“降本增效环保”双重价值；行业组织需搭建技术交流平台，组织龙头企业分享改造经验，建立行业案例库与数据库，举办技术交流与现场观摩活动；企业则应加强管理层与基层人员培训，将推广成效纳入绩效考核，消除畏难情绪，提升执行积极性。在技术层面，需支持企业与高校、科研机构联合攻关高温、高负荷等极端工况绿色润滑剂，提升国产化水平，同时开发适用于老旧设备的模块化润滑系统，并制定绿色润滑剂选型、检测及生物降解率测定等系列标准，规范市场秩序。成本结构优化方面，应扩大专项补贴覆盖范围，推出绿色润滑专项贷款，并将减排纳入碳交易体系，探索环保效益补偿机制。政策体系上，应将绿色润滑技术应用纳入企业绿色评级，强化润滑剂使用与废油处理监管，建立多部门协作机制，避免政策碎片化，同时鼓励润滑剂企业与钢铁企业开展定制化研发与服务，降低技术应用风险与成本。通过多维度、多主体的协同推进，逐步破除推广障碍，助力钢铁行业实现绿色可持续发展。

四、结束语

本文围绕钢铁冶金设备维修场景下绿色润滑技术的选型与应用效果展开系统性研究，旨在为行业突破传统润滑技术瓶颈、推动绿色转型提供理论与实践支撑。研究表明，针对钢铁冶金设备高温、高负荷、多污染的复杂工况，构建“目标层—准则层—指标层”三级综合评价模型，通过层次分析法与熵权法融合确定指标权重，结合定量与定性指标的标准化评分，能够实现绿色润滑技术的科学选型，有效解决“技术错配”问题，为不同类型设备的润滑方案优化提供精准指导。

参考文献

- [1] 丁光玉. 冶金设备用宽温铁基固体自润滑复合材料的研究与制备 [D]. 甘肃：兰州理工大学, 2008.DOI: 10.7666/d.y1292697.
- [2] 王文军. 项目导向型全生命周期液压润滑设备管理研究——以济钢为例 [D]. 天津：南开大学, 2007.DOI: 10.7666/d.j015486.
- [3] 孙志强, 王毓民, 王向中. 绿色环保润滑剂研究技术的进展 [J]. 润滑与密封, 2005(6): 200–203.DOI: 10.3969/j.issn.0254-0150.2005.06.063.
- [4] 贾继欣, 邓娟. 浅析绿色工艺润滑技术发展方向 [J]. 中国化工贸易, 2018, 10(2): 74.DOI: 10.3969/j.issn.1674-5167.2018.02.069.
- [5] 创新产业技术驱动绿色润滑 [J]. 石油商技, 2012, 30(1): 6–11.
- [6] 陆航, 花镜, 胡盟, 等. 甘油基绿色润滑剂的性能与应用研究进展 [J]. 摩擦学学报 (中英文), 2024, 44(11): 1614–1638.DOI: 10.16078/j.tribology.2023217.
- [7] 孙志强. 硫、磷复合极压抗磨添加剂在绿色润滑剂基础油中的摩擦学性能研究 [D]. 陕西：长安大学, 2006.DOI: 10.7666/d.y978517.
- [8] 石琛, 毛大恒. 纳米二硫化钨在绿色润滑油中的应用与机理研究 [J]. 应用基础与工程科学学报, 2009, 17(3): 429–437.DOI: 10.3969/j.issn.1005-0930.2009.03.0013.
- [9] 张海洋. 冶金设备的常见故障及维修管理措施研究 [J]. 冶金与材料, 2024, 44(12): 178–180.DOI: 10.3969/j.issn.1674-5183.2024.12.061.
- [10] 马亮. 冶金机械设备维修管理分析 [J]. 冶金与材料, 2023, 43(4): 76–78.DOI: 10.3969/j.issn.1674-5183.2023.04.028.

公路工程高填方路基施工技术要点分析

柴家发¹, 杜雅楠²

1. 内蒙古路桥集团有限责任公司, 内蒙古 呼和浩特 010051

2. 内蒙古自治区交通运输科学发展研究院, 内蒙古 呼和浩特 010051

DOI:10.61369/ERA.2025110031

摘 要 : 为提高公路工程质量, 本文选择某山区高速公路工程, 介绍该公路工程的基本情况和施工流程, 并且从准备工作、填筑土方路基、填筑土石混填路堤、填筑冲击碾压等方面总结高填方路基施工技术应用要点, 最后提出路基沉降观测方法。通过施工后路基沉降情况和路基稳定性的对比分析, 本文所述高填方路基施工技术具有可行性, 希望能为今后公路工程高填方路基施工提供参考。

关 键 词 : 公路工程; 高填方路基; 施工技术; 沉降观测

Analysis of Key Construction Technical Points for High Embankment Subgrade in Highway Engineering

Chai Jiafa¹, Du Yanan²

1.Inner Mongolia Road and Bridge Group Co., Ltd., Hohhot, Inner Mongolia 010051

2.Inner Mongolia Autonomous Region Transportation Science Development Research Institute, Hohhot, Inner Mongolia 010051

Abstract : To enhance the quality of highway engineering, this paper selects a highway project in a mountainous area, introduces the basic situation and construction process of the project, and summarizes the key technical points for the construction of high embankment subgrades from aspects such as preparation work, earthwork subgrade filling, mixed earth-rock embankment filling, and impact compaction. Finally, it proposes methods for subgrade settlement observation. Through a comparative analysis of subgrade settlement and stability after construction, the high embankment subgrade construction techniques described in this paper are demonstrated to be feasible, providing a reference for future high embankment subgrade construction in highway engineering.

Keywords : highway engineering; high embankment subgrade; construction techniques; settlement observation

高填方路基是公路工程的一种常见结构, 受项目所在地的地形、地貌、线路规划等条件影响, 施工过程中需要大量的路段中填筑土石材料, 直至路基结构达到设计标高。如果路堤高度已经超过前期设定限制, 此为高填方路基。凭借高填方路基的特征, 公路工程施工中的填筑与压实等也被赋予了特殊性, 需要施工人员明确施工技术要点, 保证高填方路基质量。有鉴于此, 为提升高填方路基施工质量, 本文以某山区高速公路工程为例, 总结高填方路基的技术要点, 提高公路工程质量, 降低路基沉降问题的发生率。

一、工程概况

本文分析对象为某山区高速公路, 该公路项目基本数据见表1。该公路工程的 K15+200~K16+500 段为高填方路基, 且填方高度最大值是28m。该路段所在地的地质条件相对复杂, 有软弱土层、风化岩层, 现场施工过程中为避免发生沉降, 总结施工技术要点如下。

表1 山区高速公路基本数据

项目	数值
总长度	20.5 km
路面宽度	30.0 m

车道	双向六车道
最高限速	100.0 km/h
路面材质	沥青路面

二、高填方路基施工技术应用要点

(一) 施工流程

此次针对高填方路基的施工, 从前期施工准备阶段开始, 到下一层填筑结束, 涉及多道工序。施工流程如图1所示。

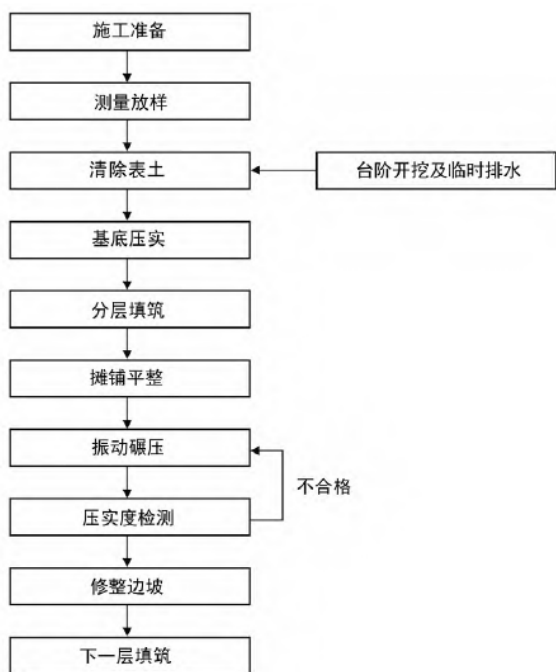


图 1 高填方总体施工流程图

图 1 高填方路基施工流程

(二) 施工要点

1. 准备工作

前期准备阶段施工人员需按规范流程放样，将表面的表土、腐殖土等去除^[1]。正式开始水田段施工之前，施工人员还需进行筑埂作业，并在此位置开挖纵排水沟与横排水沟，按要求设置坡度，与出水沟连接达到疏干表土的目的。开始填方路基的施工之前，施工人员还需展开土工试验，其目的是选择路基填土^[2]。试验在 100 m 路基段选取土样，经压实后进行。如果地表表层土较松散，且厚度不超过 30 cm，施工人员应在清草之后碾压，直至压实度大于 90%；如果松散层厚度在 30 cm 以上，施工人员应将其翻开分层压实。清理地基表面需要按照表土、夯实的顺序进行，清理表土的厚度为 30 cm，压实度应大于 90%，土层夯实的厚度标准为 20 cm。压实路基边缘部分时，施工人员应在路堤的两侧位置分别增加 30 cm 的宽度，随后进行填筑与削坡等环节的施工。

2. 填筑土方路基

(1) 填筑方法与坡度设置。正式开始填筑高填方路基时，如果路堤的填筑高度不足 8 m，此时边坡坡度建议设置为 1:1.5，若填筑高超过 8 m，需采用分层的方式设置边坡高度，第一级高度为 8 m，后续每级边坡高度分别高 10 m，边坡平台宽度大于 2 m。边坡比例同样按不同的层级，第一级坡度 1:1.5，第二与第三级依次是 1:1.7 和 1:2。施工人员选择水平分层填筑法，现场需要应用推土机将填土摊铺平整，随后使用重型压路机完成填土碾压作业，边坡整理需应用挖掘机这一设备。

(2) 分层填筑。分层填筑过程中，施工人员以路基横断面的全宽为依据，将其分割成为水平层次，从最下层开始向上依次填筑、密实，填筑时注意一次填入的填料性质需保持一致。施工人员采集击实、控制压实度等数据，要求各层填料的数值相同^[3]。对于填筑中的虚拟铺设厚度，施工人员采用获取的试验段数据进行

精准控制，铺设的各层宽度对比设计宽度应超出 0.3 m，由此保证填筑的压实度达标。

施工人员在摊铺页岩土的过程中，摊铺厚度最大值小于 300 mm，最小值则要大于 100 mm。施工现场使用的填料总厚度为 500 mm。对于路堤部分的填筑，施工人员应按照土质性质划分层级后逐层填筑，填筑施工中尽可能的减少层数，以免层数过多危及施工质量。如果土方路堤的填筑已经进行到路床顶面的最末层，施工人员检查压实处理后的厚度，确定大于 80 mm 表示符合标准^[4]。

如果自然横坡坡度、沿公路工程路线的纵向坡度超过 1:5，未填筑路基时施工人员需要先开挖原地形成台阶，台阶的宽度应控制在 1.0–2.0 m，坡度要求向内侧倾斜约 2%–4%。地面自然横坡坡度在 1:2.5 以上，此时施工人员需要验算路堤滑动的稳定性，按照施工现场实际需求做出处理，保证路堤稳固。

路堤填筑时在土壤透水性的情况下，施工人员必须控制土壤的含水量，要求土壤含水率始终保持在最佳含水量 $\pm 2\%$ 之间。路堤下层的填筑施工，要求顶部为 4% 双向横坡，而上层的填筑施工中则要全程检查覆盖土的透水性，避免覆盖含水率好的土壤。施工人员横向半挖半填路基、纵向填挖之间交界位置应开挖台阶，要求宽度大于 1 m，向内侧形成反坡，坡度在 2%–4% 之间^[5]。未开挖台阶时施工人员务必要清理现场，土质路基填挖的交界部位建议应用超挖回填法，此方法可以获得更理想的土质路基填挖连接效果。

填筑前高填方路段的基底强度必须符合设计规范，由监理工程师审核确认满足要求后可正式填筑。高填方边坡需参考设计图纸，增强边坡的稳定性。路堤中起到连接作用的结构物，应先检查结构物混凝土强度，确实符合设计规范可展开分层填筑。具体在填筑时施工人员全方位检查填筑路堤是否会对结构物造成影响。各层基底与路堤的施工结束后，施工人员按规定流程整理宽度、填筑与压实的厚度、标高、压实度，将采集的数据反馈给监理工程师，通过了监理工程师的审核后开始上层填筑施工。

(3) 摊铺平整与夯实。施工人员在摊铺填料时，现场需要用到推土机达到平整效果。考虑到此环节需保证排水的流畅性，所以各层压实面必须设置横向排水坡，坡度为 4%^[6]。开始平整施工后，施工人员使用水平仪检查虚铺厚度。碾压黏土填料要全程检查含水量，如果填料含水量过低，施工人员应在填料中洒水，以增加含水量；如果含水量高于标准，施工人员则要在现场开挖沟拉槽，达到降低水位的没接地。另外，施工人员还需使用推土机松土器，在摊铺平整环节拉松晾晒。

土层碾压需使用振动压路机，该设备的自重应大于 20 t，碾压过程中压路机行驶的轮迹必须重叠，施工人员提前规划合理的行驶路线，保证压实均匀性。碾压过程中横向接头轮迹的重叠部分为 50 cm，如果是直线段，则要按照先边缘后中间的顺序处理，曲线段的处理顺序则是先内侧后外侧。如果路肩部分超填了 30 cm，此时施工人员将超填部分刮平，保证路肩边缘压实度符合规范。正式碾压前施工人员与压路机驾驶人员沟通，了解压实顺序、次数以及起讫桩号等重要信息，随后便可开始分段作业，各工段填筑在规定的时间展开，施工人员需要先开始一个地段的填筑施工，以坡度 1:1 为标准分层开挖台阶。如果施工现场具体条件不允许，施工人员必须同步填筑，此时纵向搭接长度应大于 2 m。施工

现场压实设备在压碎处理时，对于一些硬质材料应先将其清除，检查此类材料的尺寸参数小于压实厚度2/3，且粒径分布具有均匀性，代表土层碾压的压实度达标。

3. 填筑土石混填路堤

施工现场使用土石混合料，如果施工人员检查石料抗压强度大于20 MPa，此时石块最大粒径不得超过压实厚度2/3。对于施工现场抗压强度不足15 MPa的软质岩，同样要小于压实厚度，超出部分可进行破碎处理。土石混填路堤的填筑施工人员同样分层工艺，各层厚度小于40 cm，按照试验路段得到层厚进行铺填、压实处理，此阶段注意不得倾倒填料。施工现场使用的土石混合填料，检查石料含量若大于70%，需以填石路堤要求展开施工作业^[7]。施工人员先铺筑大块石料，后铺筑小块石料和石渣等，完成石料铺筑后找平并碾压。如果石料含量不足70%，建议施工人员采用土石混合填路堤的处理工艺，即采用混合铺填方法，提高硬质石块的分散性。

填筑土石混填路堤的过程中，如果土石混合填料岩性、混合比等有明显的区别，建议采用分层填筑或者分段填筑两种方法。土石混合填料在压实处理后渗水性依然有比较明显的区别，同样要采用分层填筑或分段填筑法，严禁使用纵向分幅填筑工艺。

4. 填筑冲击碾压

施工现场的冲击碾压作业，根据现场实际情况决定使用冲击式压路机，设置冲击碾压相关参数见表2。考虑到冲击碾压效果很容易受到设备碾压速度的干扰，所以在冲击碾压之前施工人员需要综合分析，制定合理的碾压方案。

表2 冲击碾压参数

项目	参数
压实宽度	2×1 000 mm
行驶速度	10–15 km/h
有效压实厚度	1 m
压实影响深度	5 m
地表碾压次数	超过20 遍
路堤沉降量	5–7 cm

三、高填方路基施工沉降观测

此次高速公路项目的高填方路基施工结束后，施工人员需制定监测方案，在施工现场架设监测系统，保证所得路基监测数据的精准性，为高填方路基沉降监测工作的有序开展提供参考。结合本文所述项目实际，总结沉降观测有如下要点：

（1）高填方路基的施工过程有诸多影响因素，例如周边环境、地质条件、天气等，具体在制定沉降观测方案时需要重点考虑上述因素。

（2）路基的沉降监测必须使用沉降板，该工具可以在观测中得到测试点位路基下沉的真实数据，综合评估路基沉降变形情况。如果发现不良地质路段，施工人员可以按照现场实际布设相关装置，例如应变计与测斜仪，以应对不良地质带来的影响。

（3）施工人员在沉降观测过程中，如果路基填高和预压值相同，设置观测频率为每层1次。如果施工过程中停工，最佳观测频率为每次7天。预压施工过程中，预压前、预压中和预压后的监测频率分别是每次7天、10天、14天。路面施工过程中需要每层观测1次。当高速公路投入运营后，前期观测频率为每次14天，后期则要每次观测30天。

（4）施工人员按照路基沉降程度的不同，针对性的设置沉降观测级别与精度。对于路基沉降不明显的位置，分别在预压后期、路面施工阶段、后期投入运营阶段设置二级观测，而观测精度则在1.0–2.0 mm 之间，沉降变形量每月小于5.0 mm。在填筑阶段、预压前期，设置为三级观测与四级观测，观测精度要控制在2.0–3.0 mm。

（5）按照施工现场布设的所有沉降观测点所得数值，施工人员分析后总结路基指标的变化规律，并对比施工后的沉降情况和路基稳定性，具体数值见表3。根据以上每个指标所得数据，整理本文分析高速公路路段路基的沉降变形数据见表4。

表3 实施效果对比

指标	设计值	实测值
施工后路基沉降	≤ 15cm	8.2cm
路基稳定性	安全系数≥ 1.3	1.45

表4 路基沉降变形数据

观测时间	每月小于5mm	每月小于2mm
2022年4月	60%	46%
2022年6月	70%	63%
2022年8月	80%	78%
2022年10月	100%	96%

四、结束语

综上所述，公路工程施工过程中高填方路基是一个非常重要的结构形式，为保证公路工程路基的稳定性，避免施工后出现路基沉降问题，本文结合具体案例，针对高填方路基的施工展开分析，总结前期准备阶段、填筑土方路基、填筑土石混填路堤、填筑冲击碾压等关键流程的施工要点，从现场施工细节着手保证路基质量与稳定性。通过后期的路基沉降观测，确定本文提出的高填方路基施工技术具有可操作性，很好的保证了路基的稳定性，降低发生路基沉降的概率，为今后公路工程高填方路基施工积累经验，切实提高公路工程建设质量。

参考文献

[1] 刘利杰. 高填方路基土工格栅加筋土挡土墙施工技术研究 [J]. 工程质量, 2025, 43(07): 79–82+87.
[2] 应王超. 冲击碾压技术在道路工程高填方路基施工中的应用研究 [J]. 交通科技与管理, 2025, 6(12): 123–125.
[3] 邵子强. 高速公路高填方路基质量管控与施工技术要点分析 [J]. 中国住宅设施, 2025, (05): 121–123.
[4] 谷明旺. 公路工程中高填方路基质量病害问题和施工技术 [J]. 建材发展导向, 2025, 23(10): 103–105.
[5] 吕卫东, 曹亚西. 高填方软土路基施工关键技术及沉降控制技术研究 [J]. 建筑机械, 2025, (04): 113–117.
[6] 金俊达. 公路工程中高填方路基病害问题和施工技术研究 [J]. 运输经理世界, 2024, (15): 119–121.
[7] 王伟. 公路工程高填方路基施工技术要点及质量控制措施分析 [J]. 运输经理世界, 2024, (14): 5–7.

大数据的高速公路机电设备智能运行检测技术探究

张萍

山西省交通信息通信有限公司, 山西 太原 030000

DOI:10.61369/ERA.2025110032

摘 要 : 为保证高速公路机电设备运行效率, 减少设备故障发生, 本文将大数据作为基础, 简单了解高速公路机电设备运行检测常见问题以后, 对高速公路机电设备智能运行检测技术进行研究分析, 主要包括: 智能运行检测总体方案、零均值化处理、变分模态分解特征提取、智能运行故障检测、预测性维护以及故障诊断等方面。通过研究分析可知道, 通过利用大数据, 能够构建完善的高速公路机电设备智能运行检测技术系统, 实现机电设备的智能实时监测以及数据分析。根据数据分析结构, 做到及时发现和解决问题, 为后期设备维护提供可靠的数据支持, 以此保证机电设备高效、稳定运行, 满足高速公路稳定运营的需求, 也希望给相关研究人员(工作), 提供参考与借鉴。

关 键 词 : 高速公路机电设备; 智能运行检测技术; 大数据

Exploration of Intelligent Operation Detection Technology for Electromechanical Equipment on Highways Based on Big Data

Zhang Ping

Shanxi Transportation Information and Communication Co., Ltd., Taiyuan, Shanxi 030000

Abstract : To ensure the operational efficiency of electromechanical equipment on highways and reduce equipment failures, this paper utilizes big data as a foundation. After briefly understanding common issues in the operation detection of highway electromechanical equipment, it conducts research and analysis on intelligent operation detection technology for such equipment. The research primarily includes: an overall plan for intelligent operation detection, zero-mean processing, feature extraction through variational mode decomposition, intelligent operation fault detection, predictive maintenance, and fault diagnosis. Through this research and analysis, it is evident that by leveraging big data, a comprehensive intelligent operation detection technology system for highway electromechanical equipment can be constructed, enabling intelligent real-time monitoring and data analysis of the equipment. Based on the data analysis results, issues can be promptly identified and resolved, providing reliable data support for subsequent equipment maintenance. This ensures the efficient and stable operation of electromechanical equipment, meeting the demands for stable highway operations. It is also hoped that this study will provide reference and inspiration for relevant researchers and practitioners.

Keywords : highway electromechanical equipment; intelligent operation detection technology; big data

引言

高速公路属于地区之间连接的重要纽带, 然而机电设备作为保证高速公路稳定运营的重要元素, 机电设备运行状态直接影响高速公路的安全性。因此, 实时检测高速公路机电设备运行状态, 根据运行数据采取合适的维修对策, 以保证高速公路机电设备稳定运行。但是, 传统检测技术以人工巡检、经验判断等方面为主, 不仅效率低下, 准确度也不高, 很多问题难以及时发现。然而, 为解决传统检测技术存在的不足, 将大数据作为基础, 实现智能运行检测技术, 根据高速公路机电设备运行状态, 实时检测、采集和分析数据, 对高速公路机电设备运行故障进行预测, 并提前做出调整, 以此降低故障产生的频次。

一、大数据概述

从高速公路机电设备智能运行检测技术角度来说, 机电设备

运行会产生大量数据, 然而大数据技术的引入, 可对大量运行数据实时采集和分析, 并且根据机电设备运行状态, 快速确定异常情况, 识别潜在隐患, 有助于维修人员及时处理, 避免因因为机电

设备停机,引发高速公路交通事故^[1]。同时,大数据技术根据高速公路机电设备结构,部署温度、压力、速度,以及负载等检测传感器,实现连续、不间断地检测,实时获取和分析数据,为后续一些工作的展开提供支持。

二、高速公路机电设备运行检测常见问题

首先,在高速公路机电设备运行检测期间,经常会受到环境因素的影响,主要因为机电设备长期暴露在外界环境中,很容易受到高温、潮湿等寝室,导致传感器检测精准度下降,或者数据传输异常,以此影响最终的判断。

其次,如果定期巡检不及时,高速公路机电设备很容易因为老化、油污等情况,出现设备运行异常(卡顿、失灵),以此影响高速公路机电设备正常运行。

最后,高速公路机电设备运行检测一般以分段检测范式为主,涉及到远端设备、通信链路等,导致检测难度较大,检测结果准确性较低^[2]。

三、大数据的高速公路机电设备智能运行检测技术要点

(一) 智能运行检测总体方案

1. 技术功能。根据高速公路机电设备特点,通过利用大数据技术,智能运行检测技术应实现几点功能:第一,数据实时采集。主要针对高速公路机电设备运行状态,进行实时数据采集,以便准确掌握机电设备运行状态,以便做出调整;第二,数据采集适应性强。大数据背景下的高速公路机电设备智能运行检测技术应具有数据采集适应性强,主要因为高速公路机电设备种类繁多,生产厂也有所不同,并且通信协议也较为多样化,导致数据无法融合,数据传输难度较大;第三,用户管理。用户管理主要是对注册的信息进行管理,并且根据用户实际需求,分配不同权限,以此实现用户注册,以及登录等功能。

2. 监测技术体系架构。将大数据作为基础,高速公路机电设备智能运行检测技术主要分为物理设备层、数据采集层、核心功能层、交互应用层,以及基础支持层等,先从物理设备层角度来说,该层主要是由诸多高速公路机电设备组成,并且这也是机电设备检测的基础;对于数据采集层,通过利用传感器、计算机通信技术组成,通过利用传感器、数控系统,以及PLC实时采集和传输高速公路机电设备运行数据;核心功能层通过算法实现高速公路机电设备的智能检测,以及故障识别和诊断,并且将物理设备层数据作为基础,将数据传输到服务器或者数据库中,使用调度算法实现预处理、特征提取等功能,可以为高速公路机电设备维护决策提供支撑^[3];交互应用层通过可视化平台,高效完成高速公路机电设备重要零部件检测,以及使用者的交互工作;基础支持层主要是提供高速公路机电设备运行状态,以及检测数据,并且由标准化接口、服务器,以及防火墙等组成。

(二) 零均值化处理

零均值化处理属于大数据的高速公路机电设备智能运行检测技术的重点,可以有效处理直流分量,以此消除干扰成分的影响(图1:零均值化处理前后时域频域对比)。同时,时域图角度来看,整体波形在Y轴会产生平移式变化,但是波形不会有着明显变化^[4]。另外,从频域图角度来说,整体幅值辩护以后,还会变得更加平顺,也保证后续分析的精准性。

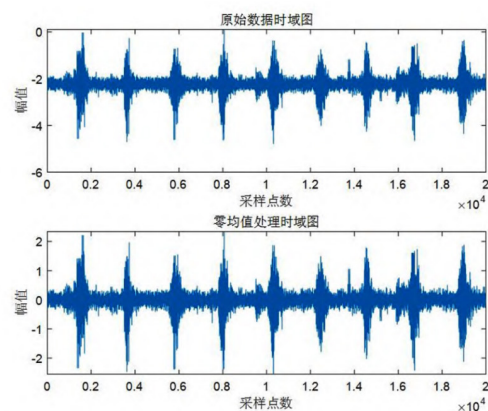


图1: 零均值化处理前后时域频域对比

(三) 变分模态分解特征提取

就目前情况来说,在时频域特征分析的时候,可以使用经验模态分解方式,但该方式应满足以下几个条件,第一,应分析本质模态函数极限值数量与穿过零点数量之间的关系,一般呈现相等的状态,即使相差最多也只能相差1;第二,需要保证局部最大值定义和最小定义包络线之间平均值等于0;

在变分模态分解特征提取期间,需要将原始信号作为基础,以此求信号的极值点。同时,需要拟合包络函数,并且通过三次样条插值与极大构成上包络线,与极小值构成下包络线进行连接,精准计算两条极限值曲线的平均数值,从而获取平均包络线^[5]。另外,需要对原始信号进行充分利用,将平均包络线去除,从而获取中间信号(公式1)。

$$y_k(t) = x(t) - m_k(t) \quad (k=1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

式中:

$x(t)$ —原始信号;

$m_k(t)$ —两条极值曲线的平均数值;

$y_k(t)$ —中间信号;

如果所计算的中间信号存在极大值或者极小值,又或者中间信号满足经验模态分解条件,这样可以充分说明中间信号不属于本征模函数,依旧需要进行分解,将中间信号作为新的原始信号,并且重复分解步骤,一直到残余信号中仅仅包含两个极值。另外,得到第一个本征模函数以后,通过利用原始信号去除本征模函数,并且作为原始信号,再次进行分解处理,以此得到n个本征模函数,以及最终残余信号,根据函数以及残余信号确定高速公路机电设备智能运行检测结果,识别机电设备运行故障。

(四) 智能运行故障检测

大数据在高速公路机电设备智能运行检测中,通过利用机器学习算法,对大量复杂数据进行分析 and 处理,根据处理的数据识别高速公路机电设备故障,并且提取特征,做到在高速公路机电设备故障发生之前,精准识别故障隐患,提供精准预警,做到有针对性进行故障预防,避免高速公路机电设备运行出现异常。

在高速公路机电设备智能运行检测期间,通过利用大数据技术,可根据机电设备运行状态,提供先进的故障诊断和自动化决策方案,并且将模式识别故障诊断概率公式(2)进行解释,根据故障发生概率制定后期定期维护频次,以保证高速公路机电设备稳定运行^[6]。

$$P_a(n) = (1 - P_0(n)) \left[P_s(n) + P_r(1 - \right. \quad (2)$$

式中:

$P_a(n)$ —n次检测以后,识别的精准诊断概率;

$P_0(n)$ —相同运行条件下,高速公路机电设备为识别故障概率;

$P_s(n)$ —高速公路机电设备故障发生以后,检测技术的精准故障诊断概率;

$P_r(1 - P_s(n))$ —高速公路机电设备故障未发生情况下,检测技术的无故障概率;

将获取的温度、压力、振动、电压,以及电流等数据作为基础,通过利用大数据中机器学习算法训练诊断模型,对高速公路机电设备智能运行状态进行分析,确定故障发生后数值变化范围。随后,将此作为基础,通过利用统计算法,或者机器学习模型进行计算,并且反映在特定数据集中,并且利用相关软件,构建预测模型。将预测模型作为基础,计算高速公路机电设备智能运行故障发生概率。另外,通过大数据分析技术,高速公路机电设备智能运行的历史数据和实时数据进行整合,以保证运行故障识别的准确性。

大数据通过利用支持向量机、随机森林,以及梯度提升机等方式,对高速公路机电设备智能运行历史数据进行计算和分析,以此预测和识别高速公路机电设备智能运行中存在的潜在隐患,结合实际需求,在算法和决策层面上进行调整,以保证高速公路机电设备智能运行的稳定性。

决策树是大数据分析中常用的工具,在故障分析方面具有明显优势。决策树在高速公路机电设备智能运行检测期间,将机电

设备中各项运行参数作为基础,构建决策节点,并且用这些决策节点代表设备查询状态,通过利用每一次的查询,都会根据数据特征将问题细化,一直到得出明确的结论为止^[7]。在高速公路机电设备智能运行检测期间,通过利用决策树,可以便于工作人员快速识别故障,并找到成因,有助于故障解决。

(五) 预测性维护以及故障诊断

预测性维护以及故障诊断也是高速公路机电设备智能运行检测的重点,通过利用大数据技术,可以根据运行数据,对机电设备故障发生进行预测,以及故障诊断,以便具体维护工作顺利实施,保证高速公路机电稳定运行,提升高速公路交通的安全性。大数据通过利用集成传感器以及监控设备等,实时获取高速公路机电设备智能运行的关键数据,并且将这些数据传输到中央处理端,再利用AI算法对大数据进行分析和处理,目的是识别出机电设备是否存在性能下降,以及故障等变化趋势。

大数据在预测性维护和故障诊断期间,还应与其他模块相互连接,形成一个综合性智能运行检测系统,这样一旦发生故障,可立即响应以及维护,并且根据实际需求以及情况,对交通流量和路线进行调整,避免产生高速公路交通事故^[8]。另外,高速公路机电设备智能运行检测将大数据作为依托,利用强大的计算能力,以及数据采集能力,能够做到实时掌握高速公路机电设备智能运行变化趋势,以便做出调节。

四、结束语

综上所述,根据以上论述,得出以下几点结论。

将大数据作为,生成高速公路机电设备智能运行检测技术体系,可有效提升高速公路机电设备稳定的稳定性。但是,大数据在高速公路机电设备智能运行检测应用期间,应先明确技术方案,并且通过智能运行检测总体方案、零均值化处理、变分模态分解特征提取、智能运行故障检测、预测性维护以及故障诊断等方式,精准掌握高速公路机电设备智能运行状态,确定故障发生概率,做好预防性维护,以降低故障发生的可能性。

通过本文对高速公路机电设备智能运行检测的研究,通过利用大数据技术,可对大量数据进行分析 and 处理,根据运行数据对机电设备运行状态进行调整,以保证智能运行的效率,以及稳定性,满足高速公路发展需求。

参考文献

- [1] 李金贵,刘薇.智能视频监控在公路机电工程质量检查中的应用探索[J].信息与电脑,2025,37(10):157-159.
- [2] 林圣圣.大数据与人工智能技术在高速公路机电设备运维管理中的应用研究[J].运输经理世界,2024,(35):145-147.
- [3] 安家宏,张羽乾.基于大数据的高速公路机电设备智能运行监测技术研究[J].中国高新科技,2024,(21):63-64+73.
- [4] 李志勇.高速公路机电设备的智能供电技术分析[J].科技视界,2024,14(28):41-44.
- [5] 李昕.高速公路机电设备故障检测智能系统探讨[J].交通世界,2024,(13):196-198.
- [6] 罗如意,代永涛,吕学磊,等.高速公路机电设备节能管控运维平台研究[C]//中国公路学会养护与管理分会重庆高速公路集团有限公司,招商局重庆交通科研设计院有限公司.中国公路学会养护与管理分会第十三届学术年会论文集.湖北交投科技发展有限公司;湖北交投高速公路运营集团有限公司,2024:204-208.
- [7] 牛聪.高速公路机电系统短路故障智能检测技术研究[J].交通世界,2023,(12):196-198.
- [8] 李东博.高速公路智能机电设备运维管理系统的应用初探[C]//上海筱虞文化传播有限公司.Proceedings of 2022 Engineering Technology Innovation and Management Seminar(ETIMS 2022).河北高速公路集团有限公司承德分公司,2022:133-135.

双碳目标下汽轮机组变工况运行优化与能耗管控策略研究——基于深度调峰需求的实践

岳伟, 陆志强, 邵利强

锡林郭勒热电有限公司, 内蒙古 锡林郭勒 026000

DOI:10.61369/ERA.2025110034

摘 要 : 本文聚焦于深度调峰需求, 系统研究了汽轮机组变工况运行优化与能耗管控策略。深入剖析了深度调峰下汽轮机组的热力过程特性变化, 识别出导致供电煤耗率升高的关键因素, 并揭示了其协同放大的能耗机理。以“安全—经济—调峰能力”协同提升为核心目标, 构建了“机理建模 + 数据校正 + 多目标协同”的变工况运行优化模型, 明确了涵盖物理限制、设备安全、环保法规及操作可行性的约束体系。在此基础上, 提出了“数据驱动—模型支撑—分层执行—闭环优化”的四级能耗管控总体框架, 并制定了三大核心策略。本研究旨在为深度调峰工况下的汽轮机组提供一套系统化、精细化的运行优化与能耗管控方案, 对提升火电机组运行经济性、促进电网安全稳定及助力“双碳”目标实现具有重要的理论指导意义和工程应用价值。

关 键 词 : 双碳目标; 深度调峰; 汽轮机组; 变工况运行

Research on Operation Optimization and Energy Consumption Control Strategies for Steam Turbine Units under Variable Operating Conditions amid the Dual Carbon Goals—A Practice Based on Deep Peak-shaving Requirements

Yue Wei, Lu Zhiqiang, Tai Liqiang

Xilingol Thermal Power Co., Ltd., Xilingol, Inner Mongolia 026000

Abstract : This paper systematically investigates the operation optimization and energy consumption control strategies for steam turbine units under variable operating conditions, with a focus on meeting deep peak-shaving requirements. It delves into the changes in thermodynamic process characteristics of steam turbine units under deep peak-shaving conditions, identifies key factors contributing to an increase in the coal consumption rate for power supply, and reveals their synergistic and amplifying energy consumption mechanisms. With the core objective of achieving synergistic improvements in "safety—economy—peak-shaving capacity," an operation optimization model for variable operating conditions is constructed, incorporating "mechanism modeling + data correction + multi-objective collaboration," and a constraint system covering physical limitations, equipment safety, environmental regulations, and operational feasibility is defined. Building on this foundation, a four-tier overall framework for energy consumption control is proposed, following the approach of "data-driven—model-supported—hierarchical execution—closed-loop optimization," along with the formulation of three core strategies. This study aims to provide a systematic and refined operation optimization and energy consumption control solution for steam turbine units under deep peak-shaving conditions. It holds significant theoretical guidance and engineering application value for enhancing the operational economy of thermal power units, promoting grid safety and stability, and facilitating the achievement of the "dual carbon" goals.

Keywords : dual carbon goals; deep peak-shaving; steam turbine units; variable operating conditions

引言

为保障电网安全稳定运行, 承担着基础负荷的火电机组, 尤其是其中的核心设备——汽轮机组, 必须从传统的“基荷运行”模式转向“深度调峰”运行模式, 即频繁、大幅度地调整出力, 以配合新能源消纳, 平衡电网供需。如何有效应对深度调峰带来的变工况运行挑战, 精准识别能耗激增的内在机理, 并据此提出科学的运行优化与能耗管控策略, 已成为当前火电行业亟待解决的重大技术课题。鉴

于此，本文以“双碳”目标为战略导向，以深度调峰的迫切需求为实践背景，聚焦于汽轮机组变工况运行优化与能耗管控策略研究，旨在通过深入剖析深度调峰下汽轮机组的热力过程特性与能耗机理，揭示低负荷运行时效率损失的关键节点与影响因素。在此基础上，构建一套集“主动调控、动态优化、闭环管理”于一体的综合能耗管控策略，以期提升深度调峰工况下汽轮机组的经济性、安全性和灵活性提供理论依据和实践指导，为推动火电行业在新型电力系统中的高质量转型发展贡献力量。

一、深度调峰下汽轮机组变工况特性与能耗机理分析

（一）汽轮机组热力系统与工作原理

汽轮机组热力系统作为火电生产的核心能量转换载体，通过热能—机械能—电能的阶梯式转化实现燃料化学能向电能的高效输出^[1]。整个系统由蒸汽发生、汽轮机组、回热循环和凝汽四大子系统构成闭环热力网络，锅炉将燃料化学能转化为高温高压蒸汽，蒸汽在汽轮机中膨胀做功驱动发电机发电，回热系统利用抽汽加热给水以提升效率，凝汽系统则将排汽冷凝为水并维持真空，完成工质循环。在额定工况下，系统各参数处于最优区间，供电效率可达40%–45%；而进入深度调峰低负荷运行后，系统偏离设计状态，热力特性与能量转换效率显著改变。

（二）深度调峰工况下的热力过程特性变化

深度调峰工况下，机组负荷大幅下降导致热力系统整体从稳定高效转向波动低效。在蒸汽参数方面，主蒸汽压力和温度显著降低，单位蒸汽做功能力下降，需通过增加流量来维持负荷，形成低效循环；再热蒸汽压力下降且温度偏差增大，进一步降低中压缸效率^[2]。回热循环中，各段抽汽压力和流量大幅减少，导致加热器换热效率下降，端差扩大，甚至出现汽塞现象，削弱了回热效果。凝汽器方面，排汽量减少和冷却水流量降低共同导致真空度下降，冷源损失增加，端差扩大，加剧了系统热耗。同时汽轮机内部蒸汽流速降低，易产生气流分离和涡流，使内效率下降，低压缸末级叶片还面临颤振风险，增加了机械损耗和安全隐患。

（三）深度调峰下的能耗关键影响因素识别

在深度调峰工况下，汽轮机组供电煤耗率较额定工况升高50–80g/kWh，主要由热力系统效率下降与辅机电耗占比上升叠加所致^[3]。其中，热力参数偏离贡献最大，主蒸汽压力与温度下降导致蒸汽焓降减少，单位做功能力下降，需增加蒸汽流量维持负荷，从而增加燃料消耗；回热效率下降，加热器端差扩大与汽塞使回热回收减少，锅炉需额外加热给水，同时排烟温度升高加剧热损失；凝汽真空恶化则导致排汽压力升高、做功能力降低，需增加燃料补偿出力损失；辅机电耗占比上升，发电量减少而辅机无法同比例降负荷，其电耗占比显著增加；此外，燃烧效率下降，因稳燃需要，排烟与不完全燃烧损失增加。这些因素并非独立作用，而是存在协同放大效应，形成能耗上升的恶性循环。

二、汽轮机组变工况运行优化模型构建

（一）优化模型构建的总体思路

在保证安全运行的条件下，怎样让机组在变工况运行时依然保持最佳状态，以有效降低供电成本是机组节能降耗工作的研究热点^[4]。汽轮机组变工况运行优化模型以深度调峰下“安全—经

济—调峰能力”协同提升为核心目标，采用“机理建模+数据校正+多目标协同”的一体化构建思路。基于热力循环机理建立反映各子系统动态特性的基础模型框架，确保物理意义明确；引入实际运行数据通过算法校正模型参数，将预测误差控制在5%以内，提升模型准确性；构建多目标协同优化机制，将降低能耗、保障安全与提升调峰响应纳入统一框架，通过动态权重分配与分层迭代求解策略，实现宽负荷波动下的快速优化调控，为机组精准运行提供指导。

（二）约束条件的确定

优化模型的约束条件基于物理限制、设备安全、环保法规和操作可行性四大类制定，确保优化结果可落地执行^[5]。其中，热力参数约束明确了主蒸汽压力、温度、凝汽器真空度等关键参数的合理运行范围；设备安全约束则根据材质与设计标准，为转子热应力、叶片振动、阀门泄漏率等设定安全阈值；环保排放约束严格遵循超低排放标准，对NO_x、SO₂和颗粒物浓度进行限值；操作可行性约束则考虑现场调控能力，限制了负荷变化率、阀门调节速度等^[6]。此外，针对深度调峰等特殊工况，还额外增加了低负荷稳燃等约束，所有条件共同构成了一个完整、严谨的约束体系，保障优化方案的安全性与可行性。

（三）优化变量的选取

优化变量的选取遵循“关键影响、可调控、易测量”原则，基于能耗影响因素与系统特性分析，筛选出对能耗、安全及调峰能力影响显著且可现场调控的参数，分为蒸汽参数、回热系统、辅机运行与阀门控制四大类^[7]。蒸汽参数变量作为影响做功效率的核心，包括主蒸汽压力与温度设定值，通过锅炉侧调节实现，在深度调峰区间压力范围为9–15MPa，温度为480–520℃，并纳入再热蒸汽温度修正值以平衡温差；回热系统变量主要影响回热效率，选取高、低压加热器抽汽阀门开度及除氧器压力设定值，通过调节抽汽量和进汽量优化换热效果与蒸汽损失；辅机运行变量关联电耗与系统稳定性，包括循环水泵转速与真空泵运行台数，通过变频或启停控制以平衡凝汽器真空与辅机电耗；阀门控制变量则直接影响调峰响应速度，选取高压主汽门、调门开度及低压缸喷水阀开度，通过DEH系统快速调节负荷指令并控制排汽温度^[8]。所有变量均配备传感器，通过DCS系统实现“测量–调节–反馈”的闭环控制，为优化模型求解与实际调控提供可靠支撑。

三、基于深度调峰需求的能耗管控策略研究

（一）能耗管控策略的总体框架

为满足深度调峰下汽轮机组“多目标协同、全流程覆盖、动态化适配”的管控需求，构建了“数据驱动—模型支撑—分层执行—闭环优化”的四级能耗管控框架，实现从负荷需求到运行

调整的全链条精细化管控^[9]。该框架以“数据层—模型层—执行层—评估层”为核心架构，各层级相互衔接、动态联动。数据层整合电网调度指令、历史运行数据、实时监测参数及环境数据，经清洗融合后形成标准化数据库；模型层依托变工况优化模型与负荷预测算法，实现“负荷需求—优化参数—能耗预测”的关联计算，输出最优运行方案；执行层将优化方案转化为“预调度—实时调控—应急响应”三级操作指令，确保在不同调峰场景下精准执行；评估层通过对比实际与预测数据，从能耗、安全、调峰三个维度评估管控效果，形成“数据—模型—执行—评估—迭代”的闭环优化机制。此外，框架融入“人机协同”机制，在自动化精准调控基础上保留人工干预权限，兼顾科学性与灵活性，确保机组在复杂工况下安全高效运行。

（二）基于负荷预测的优化运行指导策略

基于负荷预测的优化运行指导策略以“提前预判、精准预测”为核心，通过构建“短期+超短期”双层负荷预测模型，结合机组变工况特性，制定分时段、分场景的运行优化方案，实现从“被动响应”到“主动调控”的转变，降低深度调峰期间的能耗波动^[10]。短期负荷预测融合电网指令、历史数据与气象信息，通过 LSTM 模型将预测误差控制在 $\pm 5\%$ 以内，为次日整体运行计划提供依据；超短期预测则基于实时电网频率和新能源出力变化率，采用 XGBoost 算法滚动更新，误差控制在 $\pm 2\%$ ，为实时调控提供指导。根据预测结果，次日运行被划分为低谷调峰段、平稳过渡段和高峰响应段，并针对各时段制定差异化策略。低谷段以“低耗稳燃”为目标，优化主蒸汽参数并调整辅机运行模式；平稳段以“效率最优”为目标，提前调整回热系统参数；高峰段则兼顾“快速响应”与“低耗”，维持主蒸汽参数在高效区间并预留阀门调节裕度。每日 20:00 生成《优化运行指导手册》，明确各时段关键参数目标值，运行人员据此提前调整机组状态，并通过实时偏差对比启动预测修正，形成“预测—制定—执行—修正”的闭环机制，确保优化策略与负荷变化动态匹配。

（三）实时在线监测与动态优化调整策略

实时在线监测与动态优化调整策略以“实时感知、动态适配、精准调控”为核心，构建多维度监测体系与快速优化算法，解决深度调峰期间负荷频繁波动、参数易偏离最优区间的问题，确保能耗可控。监测体系围绕“热力参数—设备状态—能耗指标—环保排放”四大维度，部署高精度传感器，实现主蒸汽压

力、温度、凝汽器真空度、汽轮机热应力、振动、煤耗率及排放浓度等关键参数的秒级/分钟级实时采集与跟踪。动态优化机制采用“偏差识别—原因分析—参数调整—效果验证”闭环流程，每 5 分钟对比实际值与目标值，偏差超限时触发优化；通过关联分析定位原因，如煤耗升高源于真空下降或回热系统异常；自动输出调整指令，或推送人工建议；调整后 10 分钟内验证效果，确保优化有效。针对负荷骤变等极端场景，设置“紧急优化通道”，优先保障安全与调峰响应，待稳定后再优化能耗，实现动态波动下的安全低耗运行。

（四）运行效果评估与持续改进策略

运行效果评估与持续改进策略是能耗管控体系的闭环保障，通过构建多维度、可量化的评估体系，精准衡量管控策略的实施效果，并建立动态迭代机制，持续优化策略与模型，确保机组在深度调峰下始终处于“安全—经济—高效”状态。该策略分为效果评估与持续改进两大模块，形成“评估发现问题—改进解决问题—再评估验证效果”的循环迭代流程。效果评估以“数据为基、多维度协同、分级量化”为原则，从能耗控制、安全保障、调峰响应、环保合规四个维度设置评估指标，并采用“日统计—周分析—月总结”机制，结合层次分析法（AHP）计算综合得分，生成评估报告，为改进提供依据。持续改进以“问题导向、数据驱动、分层迭代”为核心，针对评估短板从策略优化、模型迭代、设备升级、人员培训四个层面制定改进措施。通过“改进任务跟踪表”明确责任与验收标准，并持续验证效果，形成“问题识别—措施制定—执行跟踪—效果验证—再优化”的闭环迭代，推动能耗管控策略持续完善，实现机组运行性能的提升。

四、结束语

本文围绕双碳”目标下火电机组深度调峰的核心需求，对汽轮机组变工况运行优化与能耗管控策略进行了系统性研究。通过深入剖析深度调峰工况下汽轮机组的热力过程特性与能耗机理，揭示了主蒸汽参数偏离、回热效率下降、凝汽真空恶化以及通流部分效率损失是导致机组能耗急剧攀升的关键因素。针对这些核心问题，本文构建了一套涵盖主动调控、动态优化与闭环管理的综合能耗管控策略体系，旨在为解决深度调峰带来的经济性与安全性挑战提供有效的技术路径。

参考文献

- [1] 狄淑娟. 汽轮机变工况运行对机组的影响 [C]//2006 年中国石化节能技术交流会论文集. 2006:353-356.
- [2] 王晓刚, 胡洪华, 庞顺, 等. 超临界汽轮机组变工况下运行参数目标值的计算分析 [J]. 热力发电, 2006, 35(5): 16-18, 37. DOI: 10.3969/j.issn.1002-3364.2006.05.005.
- [3] 王统, 洪大智, 吴旭, 等. 变负荷工况下燃煤机组汽轮机深度调峰节能优化控制方法 [J]. 能源与环保, 2025, 47(7): 183-188. DOI: 10.19389/j.cnki.1003-0506.2025.07.027.
- [4] 李友良. 汽轮机系统变工况建模及滑压运行优化研究 [D]. 湖北: 华中科技大学, 2017. DOI: 10.7666/d.D01312240.
- [5] 徐敏. 凝汽式汽轮机变工况及回热加热器优化运行试验研究 [D]. 江苏: 东南大学, 2016.
- [6] 聂雨. 大型燃煤发电机组汽轮机系统仿真建模与变工况特性研究 [D]. 湖北: 华中科技大学, 2014. DOI: 10.7666/d.D610401.
- [7] 王金明. 有效控制汽轮机变工况运行 [J]. 热能动力工程, 2001, 16(5): 566-566. DOI: 10.3969/j.issn.1001-2060.2001.05.033.
- [8] 孙友源. 汽轮机组变工况特性分析与优化研究 [D]. 江苏: 东南大学, 2015. DOI: 10.7666/d.Y2921769.
- [9] 王泉, 张艳, 王培红. 汽轮机组动力系数及其变工况特性响应研究 [J]. 华东电力, 2013, 41(10): 2178-2182.
- [10] 闫顺林, 刘帅, 李玉辉. 汽轮机变工况优化运行模型的研究 [J]. 陕西电力, 2009, 37(7): 24-27. DOI: 10.3969/j.issn.1673-7598.2009.07.007.

SDTGA6000 型全自动工业分析仪在煤质分析中的应用

应凯

新疆天隆希望能源有限公司，新疆 昌吉 831700

DOI:10.61369/ERA.2025110035

摘 要：介绍了 SDTGA6000 型全自动工业分析仪的工作原理和试验流程。通过对仪器的精密度和准确度测试分析可知，试验结果精密度高、误差均在标准物质不确定度内。并通过与传统国家标准方法间比较分析，仪器法测试结果与国家标准方法测定结果之间无显著性差异。

关 键 词：全自动工业分析仪；工业分析；测试流程

SDTGA6000 Fully Automatic Industrial Analyzer Application in Coal Quality Analysis

Ying Kai

Xinjiang Tianlong Hope Energy Co., Ltd., Changji, Xinjiang 831700

Abstract： This paper introduces the working principle and experimental procedures of the SDTGA6000 fully automatic industrial analyzer. Precision and accuracy tests demonstrate that the instrument delivers highly reproducible results, with all measurement errors falling within the certified uncertainty ranges of reference materials. Comparative analysis with the conventional national standard method shows no statistically significant difference between the results obtained by the instrumental method and those obtained by the national standard method.

Keywords： fully automatic industrial analyzer; proximate analysis; testing procedure

概述

煤的工业分析是煤炭质量检测的基础项目，通过特定仪器设备在规定时间内检测分析煤的主要组成成分，包括水分、灰分、挥发分和固定碳四项指标。煤的工业分析是煤炭检测的核心环节，其结果直接影响煤炭的利用价值、经济效益、环保合规性，是煤炭生产、贸易、燃烧和深加工的重要依据，对煤炭的运输、储存、加工和使用均有着指导性作用。在煤炭的勘探、生产加工、科研、供销、利用、质检等行业都离不开工业分析数据资料^[1]。

煤的工业分析主要有国家标准法和仪器分析法两种。国家标准法主要是使用电子天平、鼓风干燥箱、智能马弗炉等设备按照《GB/T 212 - 2008 煤的工业分析方法》^[2]，在规定的试验条件测定和计算出煤炭中的水分、灰分、挥发分和固定碳的含量。该方法属于经典方法，主要依靠人工操作，检测时间长，容易出现人为错误。而仪器分析法主要是按照《GB/T 30732 - 2014 煤的工业分析方法 仪器法》^[3]使用全自动工业分析仪，按照设定的测试程序检测煤炭中的水分、灰分、挥发分和固定碳的含量。该方法采用高度自动化的测量流程，不仅有效规避了人工操作带来的主观误差和效率限制，也显著提高了结果的可靠性与重复性，适用于批量样品的检测^[4]。SDTGA6000 型全自动工业分析仪是一种按照国家标准设计生产的煤质分析仪器。可最快在 2h 内同时完成 20 个的水分、灰分样品测定和 26 个挥发分的样品的测定。仪器可按照国家标准方法和美国 ASTM 标准方法实现水分、慢灰、快灰、挥发分的单项测试以及多种组合测试。测试完成后，仪器可自动开盖散热、达到快速冷却。仪器的送样机构能保证样品平稳可靠的送入炉膛内，避免样品出现翻倒下滑。该仪器配备的电子天平集成有外置显示屏，可实时监测称量数据。此设计便于实验人员精准称量样品，从而优化了工作流程，显著提升了工作效率。

一、工作原理

SDTGA6000 型全自动工业分析仪的测量原理为热重分析法。仪器主要由水灰测试仪、挥发分测试仪、供气设备、计算机

（含显示器）及打印机组成。其工作原理是采用双控联机模式，用一台计算机控制水灰测试仪和挥发分测试仪。根据仪器提示完成参数设置和称量后，仪器自动远红外加热开始升温，在标准规定的温度、时间和特定试验气氛下进行试验。当全部加热完成后在

恒温腔内冷却、称量并计算，从而计算出煤样的工业分析指标。

二、试验流程

（一）试验前准备

提前准备好事先经灼烧至质量恒重的干净水灰分坩埚、挥发分坩埚，检查坩埚外观完好，不允许使用破损或有缝隙坩埚。检查挥发分坩埚与坩埚盖匹配密封性完好。准备好试验所需煤样、有效期内的有证煤标准物质和干净的称样勺。煤样称量前，需要充分摇匀至少1分钟。每次更换煤样称量时，需将称样勺擦拭干净。仪器主机要提前开机通电至少应预热30分钟，保证电子天平称量准确。检查仪器控制线路、气路、和电源线路是否紧固完好。

（二）启动电脑及测控程序

启动电脑进入电脑桌面后，双击电脑桌面上的“成分分析仪”快捷图标，即可打开测控软件。进入登陆界面选择相应的用户后输入密码，登陆成功后进入主试验界面。

（三）参数设置

点击主试验界面的“设置”菜单栏，进入参数设置窗口。在“水灰参数设置”中对测试方法、样重范围、称量模式、测试模式、通气方式、煤种和允许空白样进行设置。在“挥发分参数设置”中对测试方法、样重范围、升温时间、进样温度、冷却时

间进行设置。在“高级设置”中对热偶系数、电子天平参数进行设置。

（四）试验测试

单击菜单栏的“水灰称量”或“挥发分称量”快捷键，弹出样品称量窗口。输入“试样个数”“试样编号”，核对“称量项目”是否错误。确认无误后点击“开始”，仪器自动进入称量。检测人员只需根据仪器提示，按照试验编号顺序称量样品。称量结束后，点击“进入试验”，仪器按照参数设定自动开始试验。试验结束后，仪器自动旋转逐个称量加热灼烧后的样品，计算分析试验结果。称量结束后，仪器进入降温冷却。

（五）数据打印

在测控软件主界面上单击“数据管理”菜单或快捷栏“数据管理”按钮即可进入数据管理界面，系统会自动对试验数据进行计算修约。根据实际需要可对报表完成设置后点击“打印”。

三、测试结果

（一）精密度测试

使用 SDTGA6000 型全自动工业分析仪对新疆准东五彩湾煤田不同个矿区煤进行水分、灰分和挥发分的重复试验，以此检查仪器的精密度。精密度测定的结果见表 1、2 和 3。

表 1 水分精密度测定结果

样品名称	水分 Mad / %							
	测值1	测值2	测值3	测值4	测值5	平均值	极差	重复性限
大井矿区 A 矿	7.75	7.77	7.75	7.74	7.76	7.75	0.03	± 0.20
五彩湾矿区 B 矿	12.65	12.60	12.64	12.64	12.63	12.63	0.05	± 0.20
西黑山矿区 C 矿	2.34	2.34	2.33	2.34	2.33	2.34	0.01	± 0.20
将军庙矿区 D 矿	9.89	9.94	9.90	9.89	9.91	9.91	0.05	± 0.20
老君庙矿区 E 矿	4.34	4.32	4.32	4.34	4.33	4.33	0.02	± 0.20

表 2 灰分精密度测定结果

样品名称	灰分 Aad / %							
	测值1	测值2	测值3	测值4	测值5	平均值	极差	重复性限
大井矿区 A 矿	10.30	10.33	10.31	10.29	10.33	10.31	0.04	± 0.20
五彩湾矿区 B 矿	4.32	4.28	4.28	4.30	4.29	4.29	0.04	± 0.20
西黑山矿区 C 矿	5.55	5.58	5.58	5.57	5.55	5.57	0.03	± 0.20
将军庙矿区 D 矿	8.62	8.59	8.60	8.62	8.62	8.61	0.03	± 0.20
老君庙矿区 E 矿	16.31	16.35	16.36	16.37	16.37	16.35	0.06	± 0.30

表 3 挥发分精密度测定结果

样品名称	挥发分 Vad / %							
	测值1	测值2	测值3	测值4	测值5	平均值	极差	重复性限
大井矿区 A 矿	32.45	32.38	32.44	32.41	32.43	32.42	0.07	± 0.50
五彩湾矿区 B 矿	29.32	29.24	29.22	29.24	29.26	29.26	0.10	± 0.50
西黑山矿区 C 矿	33.30	33.35	33.24	33.28	33.37	33.31	0.13	± 0.50
将军庙矿区 D 矿	27.82	27.90	27.92	27.80	27.78	27.84	0.14	± 0.50
老君庙矿区 E 矿	37.88	37.92	37.89	37.95	37.94	37.92	0.07	± 0.50

从表1、2、3可知，对新疆准东五彩湾不同矿区煤样的水分、灰分及挥发分测试结果表明，其极差均在标准方法的重复性限内，证明该仪器精密度高，符合测试要求。

(二) 准确度测试

使用 SDTGA6000 型全自动工业分析仪分别对 5 种煤物理

特性和化学成分分析标准物质 GBW11101x、GBW11102i、GBW11107t、GBW11109f 烟煤、GBW11126h 无烟煤进行灰分、挥发分重复测定 5 次，测定结果见表 4，误差均在标准物质的不确定度范围内。

表 4 标准物质准确度测定和 t 检验结果

实验次数	GBW11101x		GBW11102i		GBW11107t		GBW11109f		GBW11126h	
	灰分 Ad/%	挥发分 Vd/%	灰分 Ad/%	挥发分 Vd/%	灰分 Ad/%	挥发分 Vd/%	灰分 Ad/%	挥发分 Vd/%	灰分 Ad/%	挥发分 Vd/%
标准值	11.75 ± 0.14	23.39 ± 0.32	9.51 ± 0.16	33.84 ± 0.39	13.37 ± 0.14	18.93 ± 0.33	18.25 ± 0.25	29.33 ± 0.36	24.11 ± 0.17	5.14 ± 0.20
1	11.73	23.40	9.53	33.78	13.38	18.90	18.27	29.29	24.05	5.20
2	11.72	23.38	9.55	33.82	13.40	18.88	18.22	29.28	24.06	5.18
3	11.76	23.35	9.62	33.81	13.44	18.96	18.18	29.35	24.09	5.22
4	11.77	23.34	9.55	33.78	13.45	18.95	18.26	29.33	24.06	5.16
5	11.79	23.30	9.58	33.86	13.37	18.88	18.26	29.36	24.07	5.18
平均值	11.75	23.35	9.57	33.81	13.41	18.91	18.24	29.32	24.07	5.19

四、与国标方法对比

《GB/T 212 - 2008 煤的工业分析方法》与 SDTGA6000 型全自动工业分析仪的方法，按照灰分、挥发分进行 2 次重复平行试验，测试结果见表 5 和表 6。

通过新疆准东五彩湾煤田 10 个不同矿区煤样分别用国标方法

表 5 国标法与仪器法按照灰分比较

样品	仪器法 Aad /%				国标法 Aad /%				两方法均值差
	测试 1	测试 2	平均值	平行样之差	测试 1	测试 2	平均值	平行样之差	
1	10.38	10.32	10.35	0.06	10.22	10.26	10.24	-0.04	0.11
2	4.38	4.36	4.37	0.02	4.26	4.28	4.27	-0.02	0.10
3	5.60	5.55	5.58	0.05	5.57	5.54	5.56	0.03	0.02
4	8.66	8.60	8.63	0.06	8.59	8.63	8.61	-0.04	0.02
5	16.36	16.27	16.32	0.09	16.20	16.30	16.25	-0.10	0.06
6	9.32	9.36	9.34	-0.04	9.36	9.38	9.37	-0.02	-0.03
7	3.85	3.91	3.88	-0.06	3.94	3.88	3.91	0.06	-0.03
8	12.25	12.21	12.23	0.04	12.30	12.28	12.29	0.02	-0.06
9	6.02	6.00	6.01	0.02	6.10	6.05	6.08	0.05	-0.06
10	7.33	7.41	7.37	-0.08	7.40	7.36	7.38	0.04	-0.01
仪器法标准差 s ²				0.0025	国标法标准差 s ²				0.0023
差值均值 \bar{d}				0.0016	差值标准差 S _d				0.0610
F				1.087	t				0.829

表 6 国标法与仪器法按照挥发分比较

样品	仪器法 Vad /%				国标法 Vad /%				两方法均值差
	测试 1	测试 2	平均值	平行样之差	测试 1	测试 2	平均值	平行样	
1	27.22	27.26	27.24	-0.04	27.24	27.18	27.21	0.06	0.03
2	33.40	33.33	33.37	0.07	33.28	33.34	33.31	-0.06	0.05
3	29.25	29.21	29.23	0.04	29.24	29.26	29.25	-0.02	-0.02
4	37.43	37.50	37.47	-0.07	37.40	37.46	37.43	-0.06	0.04
5	28.06	27.90	27.98	0.16	27.88	27.94	27.91	-0.06	0.07
6	31.45	31.42	31.44	0.03	31.45	31.39	31.42	0.06	0.02
7	32.08	32.02	32.05	0.06	31.98	32.05	32.02	-0.07	0.03

8	28.46	28.47	28.47	-0.01	28.45	28.41	28.43	0.04	0.04
9	30.62	30.67	30.65	-0.05	30.66	30.70	30.68	-0.04	-0.03
10	29.27	29.29	29.28	-0.02	29.28	29.26	29.27	0.02	0.01
	仪器法标准差 s^2			0.0022	国标法标准差 s^2			0.0013	
	差值均值 \bar{d}			0.0023	差值标准差 S_d			0.033	
	F			1.692	t			2.21	

由表5、表6可知，灰分、挥发分2个项目的 $F < F_{0.024(9,9)}=4.03, t < t_{(0.025,9)}=2.262$ 。说明这2种方法测试精密度较好，且无显著性差异。

五、结束语

SDTGA6000型全自动工业分析仪有效解决了煤质传统分析

方法中存在的操作流程繁琐、耗时较长以及易产生操作误差和计算偏差等问题。仪器操作界面简洁直观，分析速度快、测试准确度高和自动化性能优越等显著特点。在煤质工业分析中的实际应用表明，其不仅大幅度缩短了单次分析时间、提高测试效率，而且精密度、准确度与国家标准方法相比无显著性差异，保证检测结果的可靠性和准确性。

参考文献

[1] 贾淑洁, 吕鑫磊, 贾军萍. SDLA718型全自动分析仪在煤炭工业分析中的应用 [J]. 煤炭加工与综合利用, 2018(07):64-67,9.
[2] GB/T 212-2008, 煤的工业分析方法 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
[3] GB/T 30732-2008, 煤的工业分析方法仪器法 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
[4] 伍秀玲. 煤质工业分析指标传统法与全自动工业分析仪方法的比较 [J]. 煤质技术, 2008, 23(4):35-37.

火电厂智能吹灰优化控制系统研究

马战南, 邬惠佳, 于腾飞

国能山西河曲发电有限公司, 山西 忻州 036500

DOI:10.61369/ERA.2025110036

摘 要 : 火电厂作为我国能源供应的核心, 其运行效率与安全性直接关系到国民经济及环境保护。锅炉受热面积灰结垢问题长期制约机组热经济性与可靠性, 导致传热效率下降、排烟热损失增加及设备寿命缩短。传统吹灰方法依赖人工经验或固定周期模式, 存在吹灰时机不合理、能耗偏高等问题, 难以适应复杂工况。随着过程控制技术的进步, 基于换热器模型的智能吹灰优化控制逐渐成为研究热点。该技术通过实时计算污垢热阻变化, 结合动态吹灰决策机制, 有效提升了主蒸汽温度稳定性及传热性能。

关 键 词 : 火电厂; 智能吹灰; 优化控制; 多源数据融合

Research on Intelligent Soot Blowing Optimization Control System for Thermal Power Plant

Ma Zhannan, Wu Huijia, Yu Tengfei

Guoteng Shanxi Hequ Power Generation Co., LTD., Xinzhou, Shanxi 036500

Abstract : As the cornerstone of China's energy supply system, thermal power plants' operational efficiency and safety directly impact national economic development and environmental protection. The long-standing issue of ash fouling on boiler heat absorption surfaces has constrained unit thermal efficiency and reliability, resulting in reduced heat transfer effectiveness, increased flue gas heat loss, and shortened equipment lifespan. Traditional soot-blowing methods relying on manual experience or fixed-cycle operations suffer from irrational timing decisions and excessive energy consumption, making them inadequate for complex operating conditions. With advancements in process control technology, intelligent soot-blowing optimization based on heat exchanger models has emerged as a research hotspot. This technology enhances main steam temperature stability and heat transfer performance through real-time calculation of fouling thermal resistance changes combined with dynamic soot-blowing decision-making mechanisms.

Keywords : thermal power plant; intelligent soot blowing; optimal control; multi-source data fusion

引言

火电厂作为我国能源供应体系的重要组成部分, 其运行效率与安全性对国民经济和环境保护具有深远影响。在燃煤发电过程中, 锅炉受热面的积灰结垢问题长期制约着机组的热经济性与可靠性。积灰会导致传热效率下降、蒸汽温度异常及压差增大, 进而引发排烟热损失增加、金属壁温超限等安全隐患, 最终造成发电成本上升和设备寿命缩短。传统吹灰操作依赖人工经验或固定周期模式, 普遍存在吹灰时机不合理、能耗偏高等缺陷, 难以适应负荷波动和煤质变化的复杂工况。

随着过程控制技术的进步, 基于换热器模型的智能吹灰优化控制逐渐成为研究热点。简单换热器模型通过分析受热面进出口工质参数, 能够实时计算污垢热阻变化, 有效解决传统方法因结构参数缺失导致的精度不足问题。在此基础上开发的吹灰优化系统已在超超临界直流锅炉中成功应用, 通过动态调整吹灰策略显著提升了主蒸汽温度稳定性^[1]。针对屏式过热器区域, 研究者进一步引入热损失分析与 GA-BP 神经网络技术, 构建了灰垢检测模型并建立动态吹灰决策机制, 验证了其在提高传热性能方面的有效性。

一、相关理论

（一）吹灰控制原理

火电厂锅炉吹灰控制系统的运行原理旨在通过清除受热面沉积的灰垢，维持热交换效率，防止过热器、再热器及空气预热器等关键部件因积灰导致的传热恶化和压损增加。传统吹灰操作通常依赖预设时间或固定程序启动，这种模式难以适应负荷波动、燃料特性变化及结渣动态特性，导致吹灰能耗与效率间的平衡难以实现。现代吹灰控制技术则通过集成自动化系统与智能算法，实现对吹灰过程的精准调控^{[2][3]}。在硬件架构层面，工控计算机与可编程逻辑控制器（PLC）的结合已成为主流方案，例如元宝山发电厂300MW 机组锅炉吹灰系统采用 OMRON C1000H/C200H 系列 PLC 与集散控制系统（DCS）协同设计，分别承担水吹灰、蒸汽吹灰及空气预热器吹灰的执行与监控功能。该架构通过硬件模块化设计实现了吹灰设备的顺序控制、联锁保护及状态监测，软件层面则通过逻辑组态完成吹灰器行程控制、阀门启闭时序及异常工况报警功能的编程实现。

（二）智能控制理论

智能控制理论在吹灰系统中的应用基于多学科技术的深度融合，其核心在于通过实时监测与动态反馈机制实现对吹灰过程的精准调控。闭环控制作为智能控制的重要分支，通过在线采集锅炉受热面的运行参数，如烟气温、压力及积灰程度等数据，结合预设的控制策略形成闭环调节回路。该系统能够根据受热面污染程度的实时变化，自动调整吹灰器的工作频率和强度，有效解决了传统定时定量吹灰模式下资源浪费与清洁不彻底的矛盾。以超超临界对冲燃煤锅炉为例，智能控制系统通过 DCS 平台整合了包括温度场分布、灰分沉积速率等关键参数，利用自适应算法动态优化吹灰周期与压力参数，显著提升了系统运行的经济性与安全性。

智能控制技术的实现依赖于硬件架构与软件算法的协同作用。在硬件层面，PLC（可编程逻辑控制器）作为核心控制单元，通过其模块化设计与高可靠性，为吹灰程控提供了稳定的基础平台^[4]。例如，GE III PLC 系统通过集成输入 / 输出模块、处理器及通信接口，能够精确控制吹灰器的启停、行程及压力输出，并实时接收来自传感器的反馈信号，形成完整的控制闭环。在软件层面，智能算法的引入显著提升了系统的自主决策能力。例如，声波吹灰智能控制方法通过建立压力波动与积灰清除效率的数学模型，结合模糊逻辑或神经网络算法，动态调节声波频率与幅值，从而在减少能耗的同时提高清灰效果。

二、火电厂智能吹灰优化控制系统设计

（一）智能控制策略设计

火电厂智能吹灰优化控制系统的智能控制策略设计以多源数据融合与动态决策为核心，通过构建分层递阶控制架构实现吹灰过程的精准调控。系统首先建立基于物理模型与数据驱动的分析框架，通过热力平衡方程与灰分沉积动力学模型构建基础控制逻辑，结合神经网络算法实现非线性关系建模。在数据采集层

面，系统整合锅炉本体温度场分布、蒸汽压力波动、排烟热损失及灰分沉积速率等多维度实时监测数据，采用小波阈值去噪与卡尔曼滤波技术消除噪声干扰，构建高置信度状态特征向量。

表1 数据采集层

监测维度	传感器类型	采样频率	关键参数
温度场分布	红外热像仪 + 分布式热电偶	10Hz	管壁温差梯度 ΔT_{max}
蒸汽压力波动	压电式压力传感器	20Hz	瞬时压力偏差率 σ_p
排烟热损失	烟气分析仪	1Hz	排烟温度 $T_{exh} \pm 2^{\circ}C$
灰分沉积监测	声波测厚仪 + 激光散射仪	5Hz	沉积速率 $Ash_rate(g/m^2 \cdot h)$

控制逻辑设计采用分层递阶架构，包含感知层、决策层与执行层三级协同机制。感知层通过部署在锅炉受热面的分布式传感器网络，持续采集温度梯度、压差变化及灰分厚度等关键参数，利用改进型粒子群优化算法进行特征参数的权重分配^[5]。决策层基于多目标优化理论，建立吹灰时机、持续时长及吹灰器运行路径的三维决策空间。采用模糊控制与模型预测控制（MPC）相结合的混合策略，其中模糊控制器通过专家经验库建立吹灰强度与灰分沉积速率的隶属函数，模型预测控制模块则基于滚动优化算法预测未来10个采样周期的受热面清洁度与能耗指标，最终通过加权融合策略生成最优控制指令^[6]。

（二）优化算法应用

火电厂智能吹灰优化控制系统的核心目标是通过算法实现吹灰参数的动态优化，以提升锅炉运行效率并降低能耗。传统吹灰控制依赖人工经验或固定周期策略，难以适应负荷波动、煤质变化及设备老化等复杂工况，导致吹灰能耗过高或清洁效果不足。优化算法的应用为解决这一问题提供了技术支撑，通过建立多目标优化模型，实现吹灰参数（如吹灰频率、压力、持续时间、吹灰器启停顺序等）的实时调整。

算法框架

$$\begin{aligned} \min J = & \lambda_1 \cdot \sum_{i=1}^n \delta_i + \lambda_2 \cdot E_{steam} + \lambda_3 \cdot T_{exh} \\ \delta_i = & \Delta \delta_i: \text{第 } i \text{ 号受热面面积灰厚度 (mm)} \\ E_{steam} = & \{E_{steam}\} E_{steam}: \text{蒸汽消耗量 (t/次)} \\ T_{exh} = & T_{exh} T_{exh}: \text{排烟温度 (}^{\circ}C\text{)} \\ \lambda = & \lambda: \text{权重系数 (} \sum \lambda = 1 \text{)} \end{aligned}$$

优化算法在吹灰参数优化中主要分为两大类：传统启发式算法与机器学习驱动算法。遗传算法（GA）通过模拟生物进化过程，将吹灰参数编码为染色体，在交叉、变异和选择操作中寻找全局最优解。其优势在于能处理高维非线性问题，适用于锅炉内复杂热力场与积灰分布的耦合优化^[7]。例如，通过构建锅炉受热面温度场与积灰厚度的关联模型，遗传算法可同时优化吹灰压力与频率，使受热面清洁度达标的同时减少蒸汽消耗。粒子群优化（PSO）算法则通过群体智能搜索最优解，其收敛速度快且易于并行计算，适合实时性要求较高的场景。研究表明，结合锅炉负荷变化率与排烟温度的 PSO 模型，可将吹灰能耗降低12%–15%。

三、实验与分析

（一）实验设计

本研究实验设计基于某600MW 超临界燃煤机组的回转式空预器吹灰系统展开，实验环境搭建充分结合实际工况与仿真平台。实验对象选取机组运行数据与吹灰系统控制参数，同时构建基于数字孪生技术的空预器热力仿真模型作为对比验证平台。实验环境包含物理机组数据采集系统与虚拟仿真系统两部分，其中物理机组采用高精度压力传感器（精度 $\pm 0.5\%$ FS）、温度变送器（分辨率 0.1°C ）及流量计（精度 $\pm 1\%$ 读数）实时监测空预器进出口压差、烟气温、蒸汽压力等关键参数，数据采集系统采用 LabVIEW 开发，采样频率设置为 1Hz，确保动态过程的完整记录。仿真平台则通过 ANSYS Fluent 构建三维空预器流场模型，结合机组运行数据进行参数校准，实现吹灰过程的虚拟仿真^[8]。

实验参数设置遵循以下原则：吹灰频率设定为常规控制策略的 0.5 倍至 2 倍区间，蒸汽压力在 0.8–1.2MPa 范围内分档测试，吹灰器启停时间间隔设定为 15、30、45、60 分钟四个等级^[9]。为确保数据可比性，实验期间机组负荷波动控制在 $\pm 5\%$ 额定负荷范围内，燃煤品质保持恒定。关键控制参数包括空预器进出口差压阈值（设定为 1500Pa）、吹灰蒸汽流量（最大 2.5t/h）、吹灰器运动周期（单次吹灰持续时间 60 秒）等，均通过 DCS 系统进行可编程控制。

（二）实验结果

本研究通过搭建包含神经网络模型与动态调度算法的智能吹灰优化系统，针对某300MW 燃煤机组进行了为期3个月的对比实验。实验期间，系统分别在传统固定周期吹灰模式（基准模式）和智能优化模式下连续运行，同步采集锅炉效率、蒸汽温度、燃料消耗量、排烟温度等关键参数，采用 SPC 统计过程控制方法对数据进行标准化处理。实验数据显示，在基准模式下，锅炉主蒸

汽温度标准差达 $\pm 3.2^{\circ}\text{C}$ ，过热器区域平均积灰厚度为 0.85mm/月，而智能优化模式使温度波动降低至 $\pm 1.1^{\circ}\text{C}$ ，积灰速率下降至 0.42mm/月，积灰控制精度提升 50.6%。在锅炉效率方面，优化系统运行期间平均效率为 91.7%，较传统模式提升 1.2 个百分点，经 t 检验（ $p < 0.01$ ）显示差异具有统计学意义。

针对不同负荷工况的对比分析表明，当机组负荷处于 75%–85% 区间时，智能系统通过动态调整吹灰频率，使省煤器出口氧量波动范围从传统模式的 1.8%–2.5% 缩小至 2.0%–2.2%，燃料消耗降低 0.8%；而在满负荷工况（100%BMCR）下，系统通过多变量耦合控制策略，成功将再热器壁温偏差从 12°C 降至 5°C 以内^[10]，显著减少减温水消耗量。值得注意的是，在冬季低温运行条件下，智能吹灰策略使空预器冷端综合传热系数提升 18%，有效缓解低温腐蚀导致的换热恶化问题。

四、结论

本研究针对火电厂锅炉吹灰系统的优化控制问题，围绕智能吹灰优化控制系统的构建与应用展开了系统性研究，取得了一系列具有理论价值和工程意义的成果。在理论层面，本研究构建了基于多源数据融合的锅炉积灰动态预测模型，通过集成锅炉运行参数、烟气成分、受热面温度场等多维度数据，建立了基于深度学习的积灰程度量化评估体系。该模型采用长短期记忆网络（LSTM）与卷积神经网络（CNN）的混合架构，有效捕捉了锅炉运行过程中的时序特征与空间分布特征，相较于传统人工经验法，预测精度提升达 23.6%。在系统架构方面，提出了一种分层分布式智能吹灰控制系统框架，包含数据采集层、智能决策层和执行控制层三级结构。该架构实现了吹灰策略的实时优化与动态调整，通过引入强化学习算法，系统能够根据实时运行状态自主选择最优吹灰模式，在保证受热面清洁度的同时显著降低吹扫能耗。

参考文献

- [1] 周作发, 于龙, 黄俊. 火电机组吹灰智能控制模块设计与应用 [J]. 内蒙古科技与经济, 2017(19):2.
- [2] 王爱玲. 火力发电厂废水处理回用 [D]. 山东大学, 2004.
- [3] 钱虹, 张栋良, 王啸, 等. 一种火电厂锅炉智能吹灰方法 :CN201610928624.9[P].CN106402910B[2025-09-04].
- [4] 孙亮, 程器. 高声强可变频声波吹灰器在火电厂锅炉中的应用 [J]. 电力设备管理, 2024, (21): 64–66.
- [5] 吴思明, 庄庆佐. 某660MW 亚临界锅炉过热器包墙管吹灰孔让管泄漏故障分析 [J]. 电气技术与经济, 2024, (09): 249–251.
- [6] 施以文. 空预器加装声波吹灰器效果研究 [J]. 锅炉制造, 2022, (05): 29–30+43.
- [7] 黄雪松, 冯美荣, 蒋华, 李容基, 冯泳翔. 燃煤电站锅炉空预器高声强声波吹灰器应用效果分析 [J]. 电力学报, 2021, 36(06): 548–556.
- [8] 梁永. 某火电厂“W”型火焰锅炉折焰角积灰研究 [J]. 自动化应用, 2024, 65(08): 123–126.
- [9] 朱明皓. 火力发电厂锅炉运行优化策略的相关研究 [J]. 机械管理开发, 2023, 38(10): 107–109.
- [10] 梁永. 某火电厂“W”型火焰锅炉折焰角积灰研究 [J]. 自动化应用, 2024, 65(08): 123–126.

稳固剂在阳极组装过程中的应用及效果分析

李成元, 谢玉彦*, 张坤, 王攀, 练新强
云南神火铝业有限公司, 云南 文山 663400
DOI:10.61369/ERA.2025110037

摘 要 : 阳极组装是电解铝生产过程中的关键环节, 其质量直接影响电解槽的运行效率和铝产品的质量。稳固剂作为一种重要的添加剂, 在阳极组装中发挥着至关重要的作用。本文综述了稳固剂在阳极组装中的应用, 探讨了其作用机理、种类及其对阳极性能的影响, 通过与未使用稳固剂浇铸阳极铁碳压降进行对比, 铁碳压降均值降低3.1毫伏, 全面推广使用后, 年产量90万吨公司可节约成本约1039.81万元, 具有较高的经济价值。

关 键 词 : 稳固剂; 阳极组装; 电解铝; 添加剂; 阳极性能

Application and Effect Analysis of Stabilizer in the Anode Assembly Process

Li Chengyuan, Xie Yuyan*, Zhang Kun, Wang Pan, Lian Xinqiang
Yunnan Shenhua Aluminum Co., Ltd., Wenshan, Yunnan 663400

Abstract : Anode assembly is a crucial step in the production process of electrolytic aluminum, and its quality directly affects the operational efficiency of the electrolytic cell and the quality of aluminum products. As an important additive, the stabilizer plays a vital role in anode assembly. This paper reviews the application of stabilizers in anode assembly, explores their mechanism of action, types, and their impact on anode performance. By comparing the iron-carbon voltage drop of anodes cast with and without stabilizers, the mean iron-carbon voltage drop was reduced by 3.1 millivolts. After comprehensive promotion and application, a company with an annual output of 900,000 tons can save approximately 10.3981 million yuan, demonstrating significant economic value.

Keywords : stabilizer; anode assembly; electrolytic aluminum; additive; anode property

前言

铝及铝合金是当今使用范围最广、最经济实用的材料之一^[1-2], 铝在工业中的常见的制备方法为: 以纯净的 Al_2O_3 为溶质, 以冰晶石为溶剂, 碳素材料生产的阳极和阴极充当正极和负极, 通入强大的直流电, 在电解槽中发生电化学反应, 最终生成液体铝^[3]。当前, 节能降耗是我国落实节约资源与保护环境两项基本国策的重要抓手, 也是我国能源发展战略的核心内容^[4]。铝冶炼是铝产业链中高耗能高排放的冶炼环节, 作为电解槽“心脏”的铝用阳极组, 成为关注的重点。阳极组装的过程是通过将磷生铁注入, 使导杆钢爪与阳极炭块浇铸成一体, 供电解槽使用^[5]。铝用阳极组的质量直接影响着电解槽生产的稳定和经济技术指标的好坏。在阳极组装过程中, 稳固剂作为一种重要的添加剂, 能够显著改善阳极的性能, 提高电解铝的生产效率。本文将详细探讨稳固剂在阳极组装中的应用及其作用机理。

一、磷生铁中各元素的作用

磷生铁主要包括碳、硅、锰、磷、硫等元素。

碳元素用来调整磷生铁的熔化温度, 控制磷生铁浇铸的过热程度, 从而直接影响磷生铁浇铸的流动性, 同时碳主要以石墨形态析出, 使铸铁凝固时产生石墨化膨胀, 抵消冷却时的体积收缩, 使钢爪和阳极紧密连接在一起, 消除了产生收缩裂纹的可能性。

硅元素与碳相同, 具有促进碳石墨化、增加铁素体量、减少渗碳体含量的作用; 在固相时其体积膨胀量大, 导致磷生铁液相转变固相时, 磷铁环收缩率低; 磷铁环电阻率随着含硅量增加而增大。

锰元素具有促进铸铁白口的作用, 促进珠光体形成, 从而增加铸铁的强度及其收缩率。

磷元素能降低铁水粘度, 增加铁水流动性; 增加磷生铁冷脆

作者简介: 李成元 (1988—), 男, 黑龙江宁安人, 硕士研究生, 高级工程师, 主要从事电解铝生产技术及管理工作。

通讯作者: 谢玉彦 (1972—), 男, 河南永城人, 工程硕士, 高级工程师, 主要从事金属冶炼安全生产工艺管理和技术研究工作, 邮箱: 13837091368@163.com。

性，易于组装磷铁环压脱，同时 磷元素容易在电解质中不断富积，直接影响铝电解 槽电流效率，电解质中磷元素含量对电解槽效率的影响。

硫元素在铸铁中的溶解度很小，凝固后易在晶界偏析，与铁形成硫化物，使晶界的熔点降低，使铸铁具有热脆性，磷铁环强度降低；硫含 量的增加会降低铁水流动性，恶化浇铸性能^[6-8]

二、稳固剂的作用机理、分类和使用方法

由于磷生铁配比要能补充生铁中烧损的元素量，并调整磷铁的的成分和性能，使之达到使用要求——即在主要使用回炉铁和新生铁以外，还要按要求增加原料硅、锰、磷铁的使用量。磷生铁稳固剂是一种化学物质，主要成分包括碳粉、氧化钙、碳酸钠、硅酸钠、氧化铁、偏铝酸钠、氧化锌和镁粉等。这些成分按照一定的重量份数配比，形状为黑色粉末，在磷生铁熔炼过程使用一般粒度不大于 80 目。

主要作用：使磷生铁成分保持稳定，调节磷生铁成分，增碳脱硫，保证铁水良好的流动性，同时有利于降低铁碳压降；另外添加稳固剂操作安全、简单，可减去所有辅材添加，工人劳动强度大幅降低，可避免配比物料的人员因劳动强度大或责任心不强，配料不标准，导致铁水成分较大偏差。下面对稳固剂的作用机理和分类进行介绍。

（一）稳固剂的作用机理

稳固剂在阳极组装中的作用主要体现在以下几个方面：

第一：提高阳极的机械强度：稳固剂能够增强阳极的机械强度，使其在高温和强腐蚀环境下保持稳定，减少阳极的破损和脱落。

第二：改善阳极的导电性能：稳固剂能够优化阳极的导电性能，降低电阻，提高电流效率，从而减少能耗。

第三：增强阳极的抗腐蚀性：稳固剂能够形成保护膜，防止阳极在电解过程中被腐蚀，延长阳极的使用寿命。

（二）稳固剂的分类

根据化学成分和作用机理的不同，稳固剂可以分为以下几类：

无机稳固剂：如氟化盐、氯化盐等，主要通过形成稳定的化合物来提高阳极的机械强度和抗腐蚀性。

有机稳固剂：如酚醛树脂、环氧树脂等，主要通过高分子材料的粘结作用来增强阳极的机械强度和导电性能。

复合稳固剂：由无机和有机稳固剂复合而成，兼具两者的优点，能够显著提高阳极的综合性能。

（三）稳固剂的使用

稳固剂使用方法：每次出铁后，空炉添加少许磷铁环后再添加稳固剂，一吨铁水添加一袋稳固剂，空炉的时候添加3袋稳固剂（共75 kg，每袋25kg），按照每炉铁水加75公斤稳固剂，将稳固剂加入中频炉底部，之后添加磷铁环至满炉进行熔炼作业，无需加入其它物料，除渣后即可出铁水用于浇铸作业。

三、稳固剂使用优势及经济效益

（一）稳固剂使用优势

将使用稳固剂浇铸的阳极组与未使用稳固剂的阳极组进行对比发现，前者在上槽后的电压以及中频炉的元素控制等方面都具有相对明显的优势，具体情况如下。

1. 阳极组电压降上的优势

通过测量未使用稳固剂浇铸的阳极上槽后铁碳压降与使用稳固剂的阳极组铁碳压降各20组，对比两者之间的差距具体情况如表1。

表1 使用稳固剂与未使用稳固剂浇铸阳极上槽后压降对比情况表 单位：

mv							
使用稳固剂浇铸阳极组				未使用稳固剂浇铸阳极组			
槽号	极号	运行时间 (天)	压降 数值	槽号	极号	运行时间 (天)	压降 数值
3129	A1	10	82	4078	B15	10	68
	A2	10	56		B17	4	86
	A5	2	96		B25	17	54
	A6	2	55		A24	8	79
	A19	4	60		A9	11	69
	A20	4	97		B16	10	72
	B27	5	72		B18	4	100
	B28	5	57		B26	17	59
	B13	3	64		A23	8	73
	B14	3	55		A10	11	62
3129	B5	9	89	4078	A3	4	89
	B6	9	86		B21	5	68
	B19	7	50		A15	7	76
	B20	7	47		B7	9	62
	A25	6	70		B5	11	66
	A26	6	76		A4	4	97
	A24	10	73		B22	5	64
	A23	10	65		A16	7	69
	A12	2	68		B8	9	74
	A11	2	65		B6	11	59
均值			69.2	均值			72.3

从上表可以看出使用稳固剂浇铸的阳极上槽后铁碳电压均值为69.2毫伏，较未使用稳固剂浇铸的阳极组电阻72.3毫伏低3.1毫伏，效果较为显著。

2. 在控制磷生铁各元素方面的优势

据使用稳固剂前后磷生铁成分化验数据进行对比，具体情况如表2。

	C	Si	Mn	P	S
稳固剂使用前各元素情况	1.57	1.93	0.17	1.68	0.385
稳固剂使用7个周期后各元素情况	2.73	2.88	0.71	1.8	0.15

从上表可以明显看出，经过7个周期的使用后，系统中硫元素有了明显的降低，碳含量有了明显的升高，可得出稳固剂可显著降低杂质元素硫的含量；同时提升磷生铁水的含碳量，从而提升磷生铁水的流动性、浇铸性能，磷生铁环的导电性能，从而达到

节能降耗之目的。

（二）稳固剂使用经济效益

将每炉使用稳固剂的成本与未使用稳固剂每炉的成本进行分析，查看两者之间的成本差异，具体情况如表3和表4。

表3使用磷生铁添加生铁及铁合金的成本分析（未使用稳固剂）

添加物资	每炉添加重量 (kg)	单价（元 / kg）	成本 （元）	材料单价
生铁	200	3.1	620	3188元 / 吨
硅铁	23	6.5	149.5	6554元 / 吨
磷铁	8	1.6	12.8	1595元 / 吨
锰铁	4	6.6	26.4	6637元 / 吨
除渣剂	5	1.3	6.5	1300元 / 吨
合计：			814.5	

未使用稳固剂时每炉（3吨）需要添加生铁、硅铁、磷铁、锰铁和除渣剂等材料，总成本约为814.5元。

表4使用磷生铁稳固剂成本分析

添加物资	每炉添加重量 (kg)	单价（元 / kg）	成本（元）	材料单价
稳固剂	25	4.9	122.5	4823元 / 吨
除渣剂	10	1.3	13	1300元 / 吨
合计：			135.5	

使用稳固剂后，添加的材料主要有稳固剂和除渣剂，每炉（3吨）的材料成本约为380.5元。

通过以上数据对比，使用稳固剂每炉（3吨）成本135.5元，磷生铁添加生铁及铁合金每炉（容量3吨）成本814.5元。90万吨满产是，每月浇铸阳极32000组，每炉浇铸43组计算，需要配炉745炉左右，每月可节约生产成本约50.59万元。全年可以节约成本607.08万元。

铁碳压降均值降低3.1毫伏，如全面推广使用稳固剂，全年产量按90万吨计算，全年可节约交流电约 $90 \times 3.3 \times 3.1 = 920.7$ 万度，可节约电费约 $920.7 \times 0.47 = 432.73$ 万元。

全年综合可节约成本约607.08+432.73=1039.81万元。

四、结论

本文详细探讨了稳固剂在阳极组装中的应用及其作用机理，通过对比发现稳固剂在阳极组装应用6个周期后，磷生铁中的碳含量有显著提高同时降低了硫含量，增加了导电性能，每组阳极约降低电压降3.1毫伏，按照全年每年90万吨产量计算全年可节约费用432.73万元。对比分析每炉使用稳固剂和未使用稳固剂的成本发现，每炉约可节约成本679元，按照全年每年90万吨产量计算全年可节约费用约607.08万元，全年节约成本1039万元，经济效益显著。为同行业节能降耗，提质增效供了参考。

参考文献

[1]Adabifiroozjai E,Koshy P,Sorrell CC.Assessment of Non-Wetting Materials for Use inRefractories for Aluminum Melting Furnaces[J].Journal of The Australian Ceramic SocietyVolume,2015,51(1):139-145.

[2]Schneller M.Aluminum production process control: USA, US8052859[P].2011.

[3] 李成元，于议超，李文超，等. 智能打壳系统在电解车间的应用 [J]. 山东冶金, 2023, 45(06): 62-64.DOI: 10.16727/j.cnki.issn1004-4620.2023.06.013.

[4] 张阳，巨建龙，胡红武，等. 石墨化阴极浇铸技术在200 kA 铝电解槽的应用实践 [J]. 轻金属, 2023, (07): 33-36.DOI: 10.13662/j.cnki.qjs.2023.07.007.

[5] 张建华. 降低阳极组装过程中铁炭压降实践 [J]. 冶金与材料, 2019, 39(06): 44+46.

[6] 李贺松，孙盛林，朱晓伟. 铝电解中阳极涂层与磷生铁改性剂的综合优化实验 [J]. 资源信息与工程, 2021, 36(02): 127-130+135.DOI: 10.19534/j.cnki.zyxygc.2021.02.038.

[7] 黄河荣，黄国宏，虞青，等. 磷生铁含量超出控制范围的原因分析及控制 [J]. 云南冶金, 2022, 51(02): 145-149.

[8] 肖述兵. 铝用预焙阳极组浇铸高碳无磷生铁配方研究与试验 [J]. 世界有色金属, 2023, (08): 11-13.

数字化测绘技术在水利工程测量中的应用策略

曹小伟, 张书萍, 梁居明

贵港市润港工程勘察设计有限责任公司, 广西 贵港 537100

DOI:10.61369/ERA.2025110039

摘 要 : 本文聚焦数字化测绘技术在水利工程测量中的应用策略, 旨在解决传统勘测效率低、精度差、管理依赖经验等痛点。文章概述了其核心技术体系, 并结合规划、施工、运营全生命周期提出应用策略, 规划阶段构建“工程规划一张图”实现方案量化比选; 施工阶段通过高精度放样、实时监测与 BIM 协同打造动态管控体系; 运营阶段搭建“空天地一体化”监测网络, 依托 AI 实现智能预警与优化调度。同时从标准规范、人才培养、数据安全与共享、投入效益评估四方面提出保障措施, 并针对技术集成、数据异构等挑战给出应对策略。研究表明, 该技术能显著提升勘测精度、施工效率与运营安全性, 为工程全生命周期的科学决策与效益最大化提供关键支撑。

关 键 词 : 数字化测绘技术; 水利工程测量; 水利工程全生命周期; BIM 技术

Application Strategies of Digital Surveying and Mapping Technology in Water Conservancy Project Surveying

Cao Xiaowei, Zhang Shuping, Liang Juming

Guigang City Rungang Engineering Survey and Design Co., Ltd., Guigang, Guangxi 537100

Abstract : This paper focuses on the application strategies of digital surveying and mapping technology in water conservancy project surveying, aiming to address pain points such as low efficiency, poor accuracy, and experience-dependent management in traditional surveying methods. The paper outlines its core technological framework and proposes application strategies throughout the entire lifecycle of water conservancy projects, including planning, construction, and operation. During the planning phase, a "unified engineering planning map" is constructed to enable quantitative comparison and selection of schemes. In the construction phase, a dynamic control system is established through high-precision setting-out, real-time monitoring, and BIM collaboration. During the operation phase, an "air-space-ground integrated" monitoring network is established, leveraging AI for intelligent early warning and optimized scheduling. Meanwhile, safeguard measures are proposed from four perspectives: standards and norms, talent development, data security and sharing, and investment benefit evaluation. Additionally, strategies are offered to address challenges such as technology integration and data heterogeneity. Research indicates that this technology can significantly enhance surveying accuracy, construction efficiency, and operational safety, providing crucial support for scientific decision-making and benefit maximization throughout the entire lifecycle of water conservancy projects.

Keywords : digital surveying and mapping technology; water conservancy project surveying; full lifecycle of water conservancy projects; BIM technology

引言

随着卫星导航、无人机遥感、三维激光扫描、物联网及人工智能等技术的发展, 数字化测绘技术已形成“空天地一体化”的数据采集与智能决策体系, 为水利工程测量提供了高精度、高效率的解决方案。当前如何将其与水利工程规划、建设、运营全生命周期深度融合, 并破解技术集成难、标准不统一、人才短缺等落地障碍, 是推动工程数字化转型的关键。鉴于此, 本文系统梳理核心技术体系, 针对工程各阶段提出应用策略, 并从标准规范、人才培养、数据安全、效益评估等方面给出保障措施与挑战应对路径, 旨在为技术的规模化、规范化应用提供参考, 助力水利工程实现从“经验管控”向“数据智能”的跨越式发展。

一、数字化测绘核心技术体系概述

（一）空间数据采集技术

数字化测绘技术是一种利用现代化仪器设备和计算机技术，将地理信息转化

为数字形式进行处理分析的测绘方法。相较于传统的测绘技术，数字化测绘技术具有诸多优势^[1]。数字化测绘通过自动化、高精度设备高效获取水利工程所需的多维信息，解决了传统人工采集效率低、精度差、风险高等问题。GNSS 技术依托北斗、GPS 等卫星实现厘米至毫米级定位，静态 GNSS 用于高精度控制网，RTK 技术用于实时放样与监测，效率是传统方法的 3-5 倍^[2]。无人机航测搭载相机或激光雷达，快速生成 DOM、DSM 等成果，一天可覆盖数十平方公里，LiDAR 能穿透植被获取地表信息，适用于大范围地形测绘、隐患识别和库区淤积监测。三维激光扫描通过发射激光生成高密度点云，精度达毫米至厘米级，可无接触获取大坝、水闸等复杂结构的精细三维模型，用于施工质量管控和运营期变形监测^[3]。物联网感知技术通过布设水位、渗压等传感器，实时采集并无线传输动态数据，精度高、更新快，用于水库、河道及灌区的水位、渗流、流量和墒情的实时监控。

（二）数据处理与建模技术

采集的多源数据因格式、精度和冗余问题，需经专业处理与建模，转化为结构化、可视化的工程信息，以连接数据采集与智能决策。数据预处理通过坐标转换、去噪和融合，实现多源数据的标准化与一体化，解决了数据独立、无法复用的问题，使同一数据集能服务于多种工程应用^[4]。在此基础上，三维建模与可视化技术构建工程的数字孪生体，其中 BIM 技术整合几何、属性与监测信息，形成信息富集模型，促进多方协同；DEM/DTM 则将离散地形点转化为连续高程网格，用于洪水模拟与风险评估^[5]。数据可视化技术通过 WebGIS 和数字孪生平台，将复杂模型与实时数据转化为直观的图表与地图，支持在线查询、实时监控和方案模拟，为工程管理与决策提供直观依据。

（三）智能分析与决策支持技术

基于处理后的结构化数据与三维模型，结合大数据与人工智能技术挖掘数据规律，是数字化测绘创造价值的核心环节，推动水利工程管理从经验判断向数据驱动转型^[6]。大数据分析技术通过关联历史与实时数据，挖掘隐藏规律，如在灌区管理中预测灌溉需求，或在水库管理中分析淤积规律以指导清淤规划。AI 算法则利用机器学习和深度学习构建预测与识别模型，实现自动化风险预警与状态评估。决策支持系统整合分析结果、AI 模型与专业知识，形成“多方案对比 - 风险评估 - 最优推荐”的决策流程，如在水库调度中自动生成多种泄洪方案并评估其风险与效益，或在堤防维护中划分风险等级并推荐维护措施，最终输出可视化方案，为科学决策提供依据。

二、数字化测绘技术在水利工程全生命周期的应用策略

（一）规划设计阶段的应用策略

规划设计是水利工程的“蓝图绘制期”，数字化测绘技术通过构建“数据驱动的决策体系”，解决了传统勘测数据碎片

化、方案比选粗放、依赖经验的问题^[7]。先通过融合无人机航测、GNSS、三维激光扫描及 IoT 监测等多源数据，构建覆盖“地形 - 地质 - 水文”的“工程规划一张图”基础数据库，为方案筛选提供直观的可视化依据。其次依托三维建模技术，基于 DEM/DTM 进行水文分析，并结合 BIM 技术将设计要素嵌入地形模型，直观呈现工程与环境的耦合关系，实现多方案的工程量、成本与效果量化对比^[8]。最后利用大数据与 AI 技术评估工程可行性，通过分析历史水文数据模拟不同工况下的淹没损失与发电效益，计算“减灾效益 - 投资比”或投资回报率，为防洪标准确定和方案经济性评估提供量化支撑，确保规划方案兼具技术可行性与经济合理性。

（二）施工建设阶段的应用策略

施工建设是水利工程的“实体落地期”，数字化测绘技术通过构建“实时感知、动态调整的建造管控体系”，解决了放样精度低、质量管控难、进度协同低效的痛点，实现从按图施工到按数据施工的转变。利用 GNSS-RTK 技术进行高精度实时放样，并结合三维激光扫描将现场点云与 BIM 设计模型对比，实时调整参数，保障复杂结构的施工精度^[9]。通过“定期扫描 + 实时监测”的双重机制管控质量，利用三维激光扫描定期比对实体与设计模型的偏差，同时布设 IoT 传感器实时监测沉降与渗流，及时预警并调整施工，防止后期返工或破坏。依托 BIM 协同管理平台优化进度，将进度计划与模型关联，实现工程量、质量验收与设计变更的实时同步，直观识别关键线路延误并动态调整资源配置，避免进度连锁反应，提升整体施工效率。

（三）运营管理阶段的应用策略

运营管理是水利工程发挥效益的“长期服务期”，数字化测绘技术通过构建“全维度感知、智能预警、优化调度的全寿命期管理体系”，解决了安全监测滞后、病害预警不及时、调度依赖经验的问题^[10]。构建“空天地一体化”实时监测网络，通过无人机航测、三维激光扫描和 IoT 传感器网络，实现对库区淤积、结构变形、水位渗流等状态的全面、动态感知，数据实时汇聚至平台，克服传统巡检的局限。依托 AI 驱动的疾病诊断与预警技术，利用深度学习模型分析长期监测数据，自动识别变形、渗流等异常趋势并提前预警，结合图像识别检测设备隐性故障，实现风险的提前管控。通过数据驱动优化调度与预防性维护，结合墒情、气象等数据生成精准灌溉方案以节约水资源，关联 BIM 与设备台账预测故障并制定维护计划，并通过决策支持系统综合评估多种调度方案，实现防洪、发电、灌溉等多目标的协同优化，最大化工程全寿命周期的综合效益。

三、应用策略实施的保障措施与挑战应对

（一）标准规范体系建设

标准不统一是制约数字化测绘规模化应用的核心瓶颈，易导致“数据孤岛”与“质量失控”等问题，因此需构建覆盖“数据 - 技术 - 应用”全流程的标准规范体系。制定统一的数据标准，明确空间基准、数据格式和不同场景的采集精度要求，确保数据准确、可共享、能复用。完善技术应用规范，针对无人机航测、BIM 应用、三维激光扫描等具体场景制定详细的操作流程与质量检验标准，使技术应用有章可循。建立标准动态更新机制，定期评估并吸纳北斗、AI、数字孪生等新技术应用经验，将成熟实践

纳入规范，避免标准滞后于技术发展，确保其时效性与前瞻性。

（二）人才培养与团队建设

数字化测绘技术的应用依赖“懂水利、通测绘、会 IT”的复合型人才，而当前行业人员对新技术掌握不足，存在“设备买得起、用不好”的困境。因此需构建分层分类的人才培养体系。针对一线操作层开展技术实操培训，联合设备厂商进行“理论 + 现场实操”教学，并开展软件应用培训，确保人员能熟练操作设备、准确采集和处理数据。针对技术骨干层开展复合型能力培养，通过高校定向课程、跨专业项目实践和专业认证，培养能衔接工程需求与技术应用的中间力量，提升其数据融合与智能分析能力。搭建行业交流与知识共享平台，定期举办研讨会分享实践经验，并建立内部知识库沉淀案例与解决方案，形成“培训 - 实践 - 交流 - 沉淀”的人才培养闭环，为技术应用提供持续的人才支撑。

（三）数据安全与共享机制

水利工程数据涉及工程安全与国家安全，需在“安全保障”与“数据共享”间找到平衡，构建“安全可控、高效共享”的数据管理体系。在安全保障方面，技术上采用全生命周期加密、精细化访问控制和双备份机制；管理上制定安全管理办法，明确责任主体，定期审计并建立应急预案，确保数据安全“责任到人、管控到位”。在数据共享机制方面，由水利部门牵头建设统一数据共享平台，整合辖区内各类数据，并制定分级共享规则，非涉密数据开放共享，涉密数据仅对授权单位开放。同时打通各单位数据接口，实现“一次采集、多次复用”，避免重复勘测，并通过激励机制鼓励数据上传，打破“数据私有”壁垒，让数据成为支撑工程全生命周期管理的核心资源。

（四）投入与效益评估

为推动数字化测绘技术应用，需科学控制成本并多维度评估效益，以解决部分单位对“投入高、回报不明确”的顾虑。成本控制上，坚持“实用优先、性价比导向”，优先选择适配的国产设备，对低频设备采用“租赁 + 共享”模式，并选用开源或国产低成本软件。效益评估方面，构建“经济 - 社会 - 生态”多维度体系，经济效益上，量化技术带来的成本节约（如 BIM 减少返工）和效率提升（如 GNSS 缩短工期）；社会效益上，评估其对工程安全和公共

安全的提升；生态效益上，测算其在减少生态干扰和节约资源方面的贡献。通过清晰的效益量化，展现技术的长期价值，增强投入意愿，形成“投入 - 效益 - 再投入”的良性循环。

（五）面临的挑战与对策

尽管数字化测绘技术在水利工程中优势显著，但实际落地仍面临技术集成难、数据异构、投入压力大、人员技能不足等挑战，需针对性制定对策以突破瓶颈。针对技术集成难，应推动“产学研用”协同攻关，联合开发一体化应用平台，优先选择开放接口设备与软件，实现数据自动流转与技术无缝衔接。针对数据多源异构，需严格执行标准规范体系，统一数据格式与空间基准，并引入数据中台技术自动化完成数据清洗、转换与融合，提升效率与准确性。针对前期投入高，政府可出台补贴政策降低单位压力，推广集约化应用模式，由地方统一采购设备提供租赁或外包服务，分摊成本。针对人员技能不足，应强化校企合作培养，引入外部技术服务带动内部技能提升，逐步实现自主应用。针对标准滞后，需建立快速修订机制，通过试点工程总结经验并快速转化为行业规范，确保新技术应用有据可依。通过系统应对这些挑战，扫清技术应用障碍，推动数字化测绘技术在水利工程中规模化、规范化落地。

四、结束语

本文系统梳理了数字化测绘核心技术体系，明确了 GNSS、无人机航测、三维激光扫描、物联网及 AI 的协同作用，构建了从数据采集到决策支持的完整技术链条。针对水利工程规划、建设、运营三阶段的痛点，提出了“数据驱动规划”“动态建造管控”“全维度智能运维”的差异化应用策略，并从标准、人才、数据安全、效益评估四方面建立了落地保障体系。未来该技术需与 5G、边缘计算、区块链等深度融合，突破“实时感知 - 智能分析 - 自主决策”闭环瓶颈，推动水利工程从“被动管控”向“主动预见”升级。

参考文献

- [1] 高超. 数字化测绘技术在水利工程测量中的应用 [C]//2024(第十二届)中国水利信息化技术论坛论文集. 2024:1-4.
- [2] 杨李. 数字化测绘技术在水利工程测量中的应用研究 [J]. 河南水利与南水北调, 2023, 52(9): 98-99. DOI: 10.3969/j.issn.1673-8853.2023.09.053.
- [3] 代双飞, 刘蒂鸿. 数字化测绘技术在水利工程测量中的应用 [J]. 中国科技投资, 2018(1): 15. DOI: 10.3969/j.issn.1673-5811.2018.01.010.
- [4] 陶震. 数字化测绘技术在水利工程测量中的应用 [J]. 百科论坛电子杂志, 2020(13): 1855. DOI: 10.12253/j.issn.2096-3661.2020.13.3958.
- [5] 张峰. 数字化测绘技术在水利工程测量中的应用研究 [J]. 科技资讯, 2022, 20(16): 81-83. DOI: 10.16661/j.cnki.1672-3791.2202-5042-5719.
- [6] 杨建虎, 崔凯. 数字化测绘技术在水利工程测量中的应用 [J]. 中国新技术新产品, 2021(20): 117-119. DOI: 10.3969/j.issn.1673-9957.2021.20.037.
- [7] 刘怡清. 数字化测绘技术在水利工程测量中的应用研究 [J]. 中国新技术新产品, 2017(15): 92-93. DOI: 10.3969/j.issn.1673-9957.2017.15.058.
- [8] 王巍. 数字化测绘技术在水利工程测量中的应用 [J]. 科学与信息化, 2022(13): 34-36.
- [9] 周易成. 数字化测绘技术在水利工程测量中的应用 [J]. 黑龙江科学, 2021, 12(8): 110-111. DOI: 10.3969/j.issn.1674-8646.2021.08.048.
- [10] 闫冬. 探究数字化测绘技术在水利工程测量中的应用 [J]. 中国高新区, 2018(24): 222.

分析公路沥青路面裂缝产生原因及防治措施

毛远东

广东能达公路养护股份有限公司，广东 广州 510000

DOI:10.61369/ERA.2025110040

摘 要： 文章系统分析了公路沥青路面裂缝的主要类型及其成因，重点探讨了横向裂缝、纵向裂缝和网状裂缝的形成机理与特征表现。研究从材料特性、施工工艺、结构设计三个维度深入剖析裂缝产生原因，并提出针对性的防治措施。通过优化混合料配合比、强化施工质量控制、完善预防性养护体系等综合手段，可显著提升路面抗裂性能，延长道路使用寿命，为公路工程质量管理提供重要参考。

关 键 词： 公路沥青；路面裂缝；原因及防治

Analysis of the Causes and Preventive Measures for Cracks in Highway Asphalt Pavements

Mao Yuandong

Guangdong Nengda Highway Maintenance Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510000

Abstract： This article systematically analyzes the main types and causes of cracks in highway asphalt pavements, with a focus on discussing the formation mechanisms and characteristic manifestations of transverse cracks, longitudinal cracks, and reticular cracks. The study delves into the causes of cracks from three dimensions: material properties, construction techniques, and structural design, and proposes targeted preventive measures. By employing comprehensive approaches such as optimizing the mix ratio of the asphalt mixture, strengthening construction quality control, and improving preventive maintenance systems, the anti-cracking performance of pavements can be significantly enhanced, thereby extending the service life of roads and providing crucial references for quality management in highway engineering.

Keywords： highway asphalt; pavement cracks; causes and prevention

引言

随着我国公路网络规模持续扩大，沥青路面裂缝问题日益成为影响道路使用寿命和服务质量的关键因素。裂缝不仅直接破坏路面的完整性和平整度，还会加速路面结构性能衰减，增加养护维修成本。深入理解各类裂缝的形成机理，系统分析其影响因素，并制定科学有效的防治策略，对提升公路工程建设质量、保障行车安全舒适、降低全寿命周期成本具有重要现实意义。文章基于工程实践，从技术与管理两个层面系统探讨沥青路面裂缝的防控措施。

一、公路沥青路面裂缝的类型与特征

（一）横向裂缝特征及成因解析

在沥青铺装的道路表面，横向裂缝属于典型的路面病害形式，其走向多与行车方向大致垂直。这类裂缝的产生往往与材料温度应力密切相关，尤其在冬季低温条件下，沥青混合料收缩受到约束，内部形成明显的拉张应力场。当结构层抗拉应力不足以抵抗温度应力时，路面就会产生垂直于行车方向的线性开裂。除了温度收缩这个主要诱因外，持续通行的车辆荷载同样会加剧裂缝发展。车轮反复碾压会使裂缝尖端产生应力集中，导致微裂缝逐渐扩展贯通。虽然初期裂缝宽度通常较小，但在环境因素与交

通荷载的耦合作用下，裂缝宽度和深度都会持续发展，最终影响路面结构的整体性能。

（二）纵向裂缝形成机理与影响

沿道路走向出现的纵向裂缝，多呈现为平行或近似平行于道路中线的纵向开裂。这类裂缝的成因通常与路基支撑力不足密切相关，包括填土压实度不均、基层材料分布差异等施工质量控制不当的情况。在道路拓宽段或路肩结合区域，由于新旧路基刚度差异，更容易因不均匀沉降而产生纵向裂缝。随着路表水分沿裂缝下渗，路基土体会进一步软化，形成沉降-渗水-裂缝扩展的恶性循环。此类裂缝往往沿行车方向持续延伸，严重时可贯穿整条车道，宽度范围从初期发丝状裂缝扩展至数厘米的明显开裂。

裂缝发展至后期不仅会造成路面层间剥离，更会显著削弱道路结构的整体稳定性，对行车安全构成潜在威胁。

（三）蛛网状裂隙

在沥青铺设的道路表面，常常会出现一种形似蛛网的交错裂隙，这类裂隙纵横交织，共同构成了一片复杂的裂缝网络。从成因来看，它们的出现并非偶然，往往是路面材料随着时间推移逐渐老化、在长期车辆荷载反复作用下产生材料疲劳，或是道路基层、面层存在结构性缺陷等问题的直观体现。具体形态上，这些裂隙不再是单一方向的简单开裂，而是由数量不等的横向裂缝与纵向裂缝相互穿插、连接，最终形成如同渔网或蜘蛛网般的复杂结构。一旦出现这种蛛网式裂隙，就意味着沥青路面的性能已进入衰退老化阶段，此时若不及时干预，路面状况会持续恶化，因此必须采取针对性的修复措施，严重时甚至需要对受损路段进行整体更换处理。裂隙的持续扩展会直接破坏路面的完整结构，导致道路整体承载强度降低、结构稳定性下滑，进而使得路面出现坑洼、松散等更严重病害的概率大幅上升，最终不仅增加了路面日常养护维修的频率，还会显著提高道路养护的整体成本投入^[1]。

二、公路工程沥青路面裂缝产生的原因

（一）沥青混合料对路面裂缝的影响

在公路工程建设过程中，沥青混合料作为路面结构的关键组成部分，其性能优劣直接关系到路面的长期使用状况。材料本身的质量与设计若存在缺陷，往往成为诱发沥青路面开裂的内在因素，对路面整体耐久性产生深远影响。具体而言，在混合料的配合比设计阶段以及实际拌和生产过程中，若未能严格执行技术规范，便可能埋下质量隐患。例如，原材料进场前未进行系统检测与评估，或选用了标号不符、质量不稳定的沥青与集料，均会直接影响混合料的均匀性和强度形成。这类材料成型后，其抗拉与抗变形能力下降，在交通荷载与温度变化作用下更易产生应力集中，进而形成早期裂缝。沥青混合料在路面服务期内会随时间逐渐老化，导致其物理力学性能衰退。老化后的混合料黏弹性下降，柔韧性减弱，在季节性温度变化、水分侵蚀等外部环境因素影响下，路面结构的整体稳定性受到削弱。这种性能的衰减进一步加剧了材料脆性，使得路面在温缩与荷载重复作用下更易出现开裂病害。

（二）施工工艺对路面裂缝形成的影响

在公路工程建设过程中，施工工艺水平直接关系到沥青路面的最终质量与长期性能。若施工过程中技术控制不当，极易导致各类裂缝缺陷的产生，严重影响路面的使用寿命。具体而言，当现场施工人员专业素养不足或经验欠缺时，往往难以掌握并应用当前先进的施工工艺，反而沿用传统或相对落后的作业方式。这种做法容易导致摊铺与压实阶段的机械组合配置不合理，进而引发沥青混合料分布不均、压实度不足或出现明显离析等问题。这些施工缺陷会显著降低面层材料的均匀性与密实性，在行车荷载及环境因素反复作用下，路面易形成网状或龟裂型裂缝。此外，施工过程中的接缝处理若不符合规范要求，或选用的碾压工艺参

数设置不当，也会造成潜在质量隐患。特别是在路基填筑及结构层施工中，若土体压实度未能达到设计要求，将导致基层支撑条件不均匀^[2]。

（三）设计因素对路面裂缝的影响

在公路工程建设中，设计方案的科学性与合理性直接影响路面的长期使用性能。若设计阶段考虑不周或存在技术缺陷，往往会为后续路面开裂埋下隐患，成为裂缝产生的重要诱因。具体而言，在路面整体结构设计过程中，若未能根据荷载分布与材料特性合理划分结构层次，就可能导致各层功能无法有效协调。例如，防水层厚度不足或选材不当，以及基层底面设计参数与实际地质条件不匹配，都会影响结构整体稳定性。同时，排水系统设计若未能充分考虑当地水文环境及使用需求，将导致降水难以及时排除，水分滞留基层会加速材料软化与承载力下降。这些设计层面的缺陷会显著降低路面结构的耐久性与抗变形能力，在长期交通荷载与自然环境因素共同作用下，易出现纵向裂缝、网状裂缝等不同类型的破损现象，严重影响道路服务品质与使用寿命。

三、防治公路工程沥青路面裂缝的有效措施

（一）增强路基稳定性防控路面裂缝

路基作为公路工程的核心承载结构，其稳定性能直接决定了路面的整体质量与使用寿命。与建筑工程中地基的作用相似，路基必须具备足够的强度与耐久性，以有效承担并分散来自路面的各类荷载。在车辆行驶过程中，轮胎施加的垂直与水平作用力会通过路面各结构层逐级传递至路基。若路基的密实度与刚度不足，就可能在长期荷载下产生不均匀沉降，进而引发面层反射裂缝等病害。因此，在路基设计与施工过程中，需系统考虑区域交通特征与环境条件。具体而言，路基结构层的厚度与材料组成应结合预测交通量、车型组成及重载车辆比例等参数进行综合设计^[3]。

（二）优化基层混合料配合比设计

在沥青路面施工过程中，科学合理的基层混合料配合比是控制裂缝产生的重要技术措施。施工及设计人员应精确控制粗集料与细集料的掺配比例，并通过及时摊铺上层面层或设置下封层，显著抑制干缩裂缝的形成与发展。工程实践表明，对基层混合料进行规范碾压是提升密实度的关键工序。当混合料含水率接近最佳含水状态时进行碾压作业，可显著提高压实均匀性。需特别注意的是，碾压过程中的含水率控制至关重要——含水过高易导致材料推移，含水过低则会造成压实功不足，这两种情况均会使压实度和结构强度无法满足设计要求，进而增加裂缝风险。通过严格执行配合比设计与碾压工艺标准，可显著提升基层结构的均匀性与抗变形能力，从而在根本上减少沥青路面各类裂缝的发生概率。这种精细化控制方式不仅提升了工程质量，也为公路工程的可持续发展提供了技术保障。

（三）加强原材料质量控制措施

在沥青路面施工过程中，必须系统把握各环节技术要点，其中原材料质量控制是确保工程质量的先决条件。施工方需从材料

源头着手，建立完整的质量管控体系，特别要对沥青混合料进行全过程监督。要实现这一目标，首先需要深入理解沥青混合料裂缝形成的机理与影响因素。在此基础上，应严格规范原材料检验程序，对沥青、集料、矿物填料等各类材料的质量指标实施动态监测。配合比设计阶段需通过系统试验确定最佳材料比例，确保混合料具备良好的抗裂性能。同时，必须精确控制混合料在拌和、运输、摊铺及压实等工序中的温度变化。温度管理不当会直接影响混合料的和易性与压实效果，进而诱发温度裂缝等质量问题。

（四）强化摊铺与碾压工序质量控制

摊铺与碾压作为沥青路面成型的关键工序，其施工质量直接关系到路面的平整度与密实性，必须建立严格的过程控制体系。在施工准备阶段，需根据工程特点与施工条件，科学选配摊铺机与压路机等核心设备，确保其技术参数与施工要求相匹配。施工过程中，作业人员必须严格遵循标准化工艺流程，按照预先确定的铺筑厚度、碾压遍数及工艺顺序展开作业。针对常见的铺筑不均匀、碾压不到位等质量问题，应实施全过程动态监测，通过实时检测铺面温度、压实度等关键指标，及时发现并纠正施工偏差。此外，还需建立完善的质量追踪机制，对每道工序进行详细记录与评估。通过系统化的检测数据反馈，不断优化施工参数与作业方法，确保路面成型质量符合设计规范，有效预防因施工操作不当导致的早期损坏现象^[4]。

（五）沥青路面裂缝处治技术优化

在沥青路面养护过程中，针对不同形态的裂缝需采取差异化的处治方案，以确保修复质量与使用寿命。对于宽度不足2mm的微裂缝，在气温回升的条件下具备自愈特性，通常无需主动干预；当裂缝宽度发展至2~5mm范围时，则需采用专业开槽设备将裂缝扩展至宽度2cm、深度1.5~2cm的标准槽型，为后续填充创造良好条件；若裂缝宽度超过5mm，则应选用改性沥青材料进行压力灌缝处理，作业前须彻底清除缝内杂质与碎屑，灌缝完成后还需在表面均匀撒布粗砂或石屑以增强表面抗滑性能。在

路面结构性修复过程中，及时清除软弱层与不稳定结构层至关重要。当检测发现结构层存在积水现象时，应立即完善排水系统，有效排除渗透水分，随后方可进行新混合料的铺筑作业。对于出现的网状裂缝病害，若确认为沥青面层厚度不足所致，且基层结构强度满足要求，则应彻底铲除网裂区域面层，按设计规范要求重新铺筑满足厚度标准的新混合料。此外，温度应力引起的基层开裂需从材料源头进行防控。在配合比设计阶段，应严格遵循技术规范选择抗裂性能优良的混合料类型，优先采用密实型骨架结构，避免使用易产生温度敏感性的悬浮式混合料^[5]。

（六）实施路面预防性养护策略

在公路运营阶段，科学开展预防性养护是控制沥青路面裂缝发生与发展的关键措施。通过系统化的预防性养护，能够有效改善路面结构性能，显著提升其抵抗荷载与环境因素干扰的能力。实施预防性养护技术时，准确把握处理时机至关重要。养护介入过早可能造成资源浪费，介入过晚则难以遏制病害发展，二者都会影响最终处治效果。因此，需要建立完善的路面状况监测体系，通过定期检测结构强度、平整度、裂缝分布等关键指标，结合弯沉检测等无损评估手段，全面掌握路面性能衰减规律。基于检测数据的综合分析，可建立路面性能预测模型，科学确定最佳养护时机。

四、结束语

公路沥青路面裂缝防治是一项系统工程，需要从设计、施工到养护各环节进行全过程质量控制。在材料方面，应优选抗裂性能良好的混合料，严格控制原材料质量；在施工方面，需规范摊铺碾压工艺，确保基层压实均匀；在设计方面，要合理规划结构层次，完善排水系统；在养护方面，应建立预防性养护体系，把握最佳处治时机。通过构建全方位、多层次的质量保障体系，可有效控制路面裂缝的发生与发展，提升道路工程的耐久性与可靠性，为交通基础设施的可持续发展奠定坚实基础。

参考文献

[1] 陈文字. 公路沥青路面裂缝原因及防治技术要点探析 [J]. 工程技术研究, 2025, 7(13): 160-162.
[2] 郭练忠. 沥青路面裂缝成因及防治措施探究 [J]. 现代工程科技, 2024, 3(4): 13-16.
[3] 孟岩. 沥青路面裂缝成因及防治措施分析 [J]. 工程建设与设计, 2022(16): 68-70.
[4] 王志晓, 刘松博. 公路沥青路面裂缝产生原因与对策 [J]. 百科论坛电子杂志, 2020(3): 934.
[5] 张晓东. 公路沥青路面裂缝产生原因与对策 [J]. 建材与装饰, 2020(5): 276-277.

GPS 测量技术在工程测量中的应用研究

邱镇鸿

广东环粤勘测有限公司, 广东 佛山 528000

DOI:10.61369/ERA.2025110038

摘 要 : GPS 测量技术凭借其高精度、高效率及强适应性等特点, 已成为现代工程测量的核心技术手段。文章系统阐述了 GPS 测量技术在工程测量中的主要特点, 包括操作简便性、定位精准性和无通视要求等显著优势, 并重点分析了静态相对定位、实时动态 (RTK) 定位和动态相对定位等关键应用类型。研究表明, GPS 技术不仅大幅提升了测绘作业的自动化水平和数据质量, 也为复杂环境下的工程测量提供了可靠的技术支撑, 具有重要的工程应用价值和推广前景。

关 键 词 : GPS 测量技术; 工程测量; 应用

Research on the Application of GPS Surveying Technology in Engineering Surveying

Qiu Zhenhong

Guangdong Huanyue Survey Co., Ltd., Foshan, Guangdong 528000

Abstract : GPS surveying technology, with its characteristics of high precision, high efficiency, and strong adaptability, has become a core technical means in modern engineering surveying. This paper systematically elaborates on the main features of GPS surveying technology in engineering surveying, including notable advantages such as ease of operation, precise positioning, and no requirement for line-of-sight communication. It also focuses on analyzing key application types such as static relative positioning, real-time kinematic (RTK) positioning, and dynamic relative positioning. Research indicates that GPS technology not only significantly enhances the automation level and data quality of surveying operations but also provides reliable technical support for engineering surveying in complex environments, demonstrating significant engineering application value and promising prospects for promotion.

Keywords : GPS surveying technology; engineering surveying; application

引言

工程测量作为工程建设的基础性工作, 其技术水平和数据质量直接影响工程设计的合理性与施工的准确性。随着卫星导航技术的迅速发展, GPS 测量技术因其具有高精度、全天候、高效率等优势, 已被广泛应用于各类工程测量任务中。它克服了传统测量方法受通视条件限制、作业周期长、人工依赖度高的问题, 逐渐成为现代测绘工程的核心技术手段。GPS 测量技术在高程测量、变形监测、控制网建立等方面的具体应用方法与效果, 以期对相关领域的技术人员提供参考, 进一步推动 GPS 测量技术在工程实践中的深化应用和创新发展。

一、GPS 测量技术的特点

(一) 简便性

在实际运用 GPS 测量技术开展各项工作时, 该技术所具备的突出自动化优势得以充分展现, 同时其还支持智能化的操作流程管控与系统管理模式。这种特性带来的直接益处在于, 既能显著提升实际操作环节的精准度与整体质量, 又能确保技术应用后达到预期效果, 避免因人为操作误差或流程漏洞影响最终成果。具体到技术应用的实操环节, 工作人员无需进行复杂繁琐的手动测算或现场大量布设测量设备, 只需依托前期采集并整理好的空间

坐标、地理特征等相关信息, 就能够精准定位并记录工程所需的未知点位数据。此外, 若工作人员已明确具体的目标位置, 也可通过在 GPS 系统中准确输入该位置的相关参数, 快速获取包含坐标精度、地形特征、周边环境关联数据等在内的完整测量信息。这些高效获取的精准数据, 能够为后续工程规划设计、现场施工组织以及质量管控等环节提供坚实、可靠的理论依据与数据支撑, 有效减少施工过程中的不确定性。

(二) 精准性

GPS 作为信息化技术的典型代表, 完美承袭了精准定位的卓越特性。在实际作业中, 借助动态化的操作流程, 它能突破传统

测量技术在空间维度与时间范畴上的固有局限。操作人员只需简单操作相关设备,便能在极短时间内,高效获取详尽且精准的高程信息以及精确无误的地理坐标数据。GPS 之所以具备如此强大的精准定位能力,很大程度上得益于人造地球卫星技术的深度融合与应用。这些环绕地球运行的人造卫星,如同一个个精密的信息节点,持续不断地向地面设备传输高精度的定位信号。通过对这些卫星信号的实时接收、精准解析与深度处理,不仅能够确保所获取数据的高度真实性,还能极大程度提升数据的实时性,使得测量结果能够精准反映目标区域的当下状态。在整个数据获取过程中,不仅耗时间极短,有效提升了作业效率,而且在成本管控方面,相较于传统测量手段,也展现出显著优势,有力保障了项目的经济效益^[1]。

(三) 无通视性

相较于传统检测技术,GPS 测量技术展现出鲜明的无通视特性,对测站不存在强烈依赖。在传统测量工作中,测站间的通视条件是保障测量顺利进行的关键因素。一旦遭遇诸如山区地势起伏、城市高楼林立等复杂环境,测站间难以实现良好通视,传统测量技术便会陷入困境,甚至无法正常工作。GPS 测量技术则另辟蹊径,它借助电磁波信号来执行测量任务。与光学信号相比,电磁波信号具有显著优势,其传播不易受自然环境中各类因素的干扰,像雾气、尘埃等对光学信号影响较大的因素,几乎不会对电磁波信号的传播造成阻碍。这使得 GPS 测量技术能够在复杂的环境条件下稳定运行,极大地降低了环境因素对测量结果的不利影响。不仅如此,凭借先进的技术架构,GPS 测量设备能够同时捕捉多个卫星发射的电磁波信号。通过对这些信号的综合分析与处理,实现对多个测量目标的同步测量。

二、GPS 测量技术在工程测量中的应用类型

(一) 静态相对定位技术

当下,静态相对定位技术在工程测量工作中占据着重要地位。一是 GPS1+N 模式,也被称作快捷静态测量模式;二是常规静态测量模式,该模式依靠相对位置来达成定位任务,需要借助两个坐标点,以此实现精准定位以及高效的数据处理。实际操作时,先将 GPS 测量仪接收机安装于基准站,与此同时,另一台或者多台设备作为移动站,移动站与基准站之间始终保持相对位置关系不变。借助已知点的坐标信息,便能顺利获取测量点的绝对位置。现阶段,GPS1+N 观测模式在区域内地形测绘以及工程放样作业中应用广泛。相较于传统测量手段,它不仅测量速度更快,而且在实际测量的精确度上也更胜一筹。静态相对定位技术的应用,通常需要使用三台及以上的 GPS 接收机来共同完成测量工作。既可以选用 2 个已知坐标点,也能够使用未知坐标点。在获取坐标信息之后,同步对 4 颗及以上的卫星展开观测。不过,测量人员设置的观测时间存在一定限制,一般情况下,观测时间需在 45 分钟以上,通过这样的时长保障,能够最大程度地提升观测效率。对比其他模式,常规静态测量模式凭借其高精度的特性,特别适合应用于大范围控制系统当中,例如国家级大地控制

网的构建、地壳运动监测网络的设立等,都离不开常规静态测量模式的有力支撑^[2]。

(二) 实时动态技术

实时动态技术,业界通常简称为 RTK 技术,堪称当下工程测量领域中应用最为广泛的测量定位技术。其最大的优势在于操作便捷性,仅需单人即可顺利完成测量工作。测量人员只需熟练掌握地面终端设备,便能轻松获取所需的测量信息。在实际作业时,测量人员运用 RTK 技术,首先在项目精准设置测量目标点,随后借助先进的信息技术手段,快速获取目标点的精确位置数据。其配套设备体积小、重量轻,便于携带,无论是在地形复杂的野外区域,还是空间有限的城市建筑内部,都能轻松开展测量工作。基于这些突出优势,RTK 技术已然成为当前工程测量的首选技术方案,在各类工程建设项目中发挥着至关重要的作用,为工程的顺利推进与高质量完成提供了坚实保障。例如,在道路桥梁工程建设前期的地形勘测、建筑施工过程中的基础定位放线,以及水利工程中河道地形的精确测量等场景中,RTK 技术都展现出了无可比拟的优越性,极大地提升了工程测量的效率与精度。

(三) 动态相对定位技术

动态相对定位技术主要针对移动物体的测量需求而设计。在实际应用时,会在移动物体上搭载专门的 GPS 定位装置,该装置如同一个敏锐的数据采集器,在物体移动过程中,能够持续不断地精准获取其移动数据,为后续分析与定位提供关键信息。其工作机制在于,移动站接收机充分发挥作用,主动捕捉基站发射的信号。与此同时,借助高效的数据连接手段,移动站接收机将接收到的基站信号进行智能化转化,通过一系列复杂而精密的运算,最终成功获取数据位置信息。在工程建设领域,施工单位可以巧妙地将动态相对定位技术与广为人知的 RTK 技术紧密联系起来。通过整合二者优势,构建起一套兼具综合性与科学性的工程测量系统。该系统能够有效弥补单一技术在测量过程中的局限性,从多维度保障测量效果,为工程建设的精准推进筑牢根基,比如在大型桥梁建设中钢梁的动态安装定位、道路施工中摊铺机的实时位置校准等场景,都能借助该技术实现高效且精准的测量作业^[3]。

三、GPS 测量技术在工程测量中的实践应用

(一) GPS 定位技术在工程测量中的运用

作为现代工程测绘的重要组成部分,GPS 定位技术的实施需基于卫星导航的基本原理,通过接收和处理多源位置信息,综合利用不同类型接收设备的功能,实现从多方位对目标进行精确测定,以此保证所获数据的真实性与可靠性。在实际操作过程中,该技术可结合动态与静态两种测量模式,通过布设地面接收设备并构建静态基线网络,对测区实施同步数据采集,通常持续时长为 45 分钟左右。观测任务结束后,还需对全部数据进行系统整合与处理,充分发挥 GPS 技术高效便捷的特点,实现测量信息的动态监测与分析。在具体应用中,需合理把握观测时段,重视观

测周期的科学安排，提前与气象部门沟通协调，及时了解天气实况，准确判断是否符合外业测量条件，从而提升整体工程测量的质量与效率。此外，还应依托对 GPS 设备性能的深入掌握，科学拟定测量计划与时间节点。

（二）高程测量与工程变形监测中的 GPS 应用

GPS 技术被广泛应用于工程变形监测领域。在施工过程中，工程结构常受到外部环境因素的影响，导致地基出现沉降或位移，严重时甚至可能发生断裂，对道路等设施的长期稳定性构成威胁。为此，需借助 GPS 高精度监测手段，对工程进行实时处理，密切关注测量数据中的微小变化，识别潜在安全风险，从而弥补传统测量方法在精度和连续性上的局限，实现毫米级变形控制，全面提升工程施工质量与安全性。在高程拟合方面，GPS 技术通过测量各空间点之间的高精度高程差，结合平差处理方法，推算出更准确的大地高与高程异常值，进而计算出实际可用正常高。目前常以已知水准点作为高程起算基准，配合曲面拟合法或内插方法，实现对 GPS 高程的高精度解算。

（三）基于 RTK 的碎部测量与施工放样技术

RTK（Real-Time Kinematic）技术，是一种基于载波相位观测值的实时差分定位方法。该系统通常由基准站与移动站共同组成，在工程测量过程中，基准站会持续向移动站发送载波相位观测数据，移动站通过接收并解算这些差分信号，实时计算出高精度的坐标位置。除了基本的定位功能，RTK 技术还广泛应用于地籍测绘和房地产权籍界址点测量等领域。该技术显著降低了传统测绘对人力和物资的依赖，通常仅需一名作业人员即可完成测绘任务：将 GPS 接收机置于待测特征点上，短暂停留约 2 秒并输入相应编码，即可完成一个点的采集。完成某一区域地形特征点的测量后，所有数据需及时传输至计算机进行处理，以避免外界干扰导致数据丢失或误差，最终保障成图精度与可靠性。在工程放样方面，RTK 技术同样表现出高效与精准的优势。作业人员可在现场直接根据设计坐标确定界标点的实际位置，无需传统几何交会方法，并结合解析法进行坐标反算与位置标定，进一步提升放样工作的准确性和工作效率^[4]。

（四）静态测量数据的处理与分析

在使用 GPS 技术进行静态测量后，首先需将接收设备采集的原始观测数据传输至专用存储系统，并执行初步的数据分流操作。这一过程包括对记录的原始观测值进行解析与提取，利用专

业解码方法区分各类观测信息，剔除无效或冗余数据，并将筛选后的有效数据重新整合为标准格式文件，以便后续处理与分析。在处理载波相位观测值时，通常需经过多阶段探测与精确量测，包括对载波相位模糊度的解算与修复，逐步还原完整的相位信息。通过系统分析和精细校正，可准确提取出载波信号中所包含的高精度静态定位数据，为后续控制网平差和坐标解算提供可靠依据。整个处理流程强调数据的完整性与准确性，是实现高等级控制测量的关键环节。

（五）工程控制网的建立与 GPS 技术应用

工程控制网是各类工程项目测量的基准框架，其布设质量与精度水平直接关系到最终测量成果的可靠性。在构建过程中，需特别关注控制网的网形结构及信息精度控制，避免因设计不当对整体测量结果带来系统性偏差。通常情况下，工程控制网覆盖区域相对有限，但控制点分布密度较高，因此对点位精度及其稳定性提出了更为严格的要求。在传统测量方法中，常用的布网手段包括边角网等形式，并借助常规测量仪器实现控制点的定位。尤其在道路工程勘察控制网的建立过程中，由于线路往往呈带状分布，横向宽度较窄，以往作业人员多采用三角锁或导线网等方式进行分段布设，通过限制单段长度以抑制误差的累积。然而，这类传统方法通常作业流程繁琐，工作效率较低。随着 GPS 技术的广泛应用，现代工程控制网的构建方式发生显著变革。利用 GPS 可布设规模更大、长度更长的三角锁状控制网，特别适合于线路工程等延伸距离较长的项目，能够在保证高精度的同时有效避免误差分段积累，显著提升长距离坐标测量的统一性和工作效率，同时简化了传统方法中的复杂操作环节^[5]。

四、结束语

GPS 测量技术已深刻改变传统工程测量的作业方式，其在简便性、精准性和无通视性等方面体现出显著优势，有效提升了测绘工作的自动化程度和成果可靠性。通过静态相对定位、RTK 技术及动态定位等多种应用形式，GPS 能够满足不同工程场景下从控制网构建到变形监测、从地形测绘到施工放样的多样化需求。随着技术持续发展与集成应用不断深化，GPS 测量将在智慧工程、精密测量等领域发挥更为关键的作用，为工程建设的精细化、信息化管理提供坚实支撑。

参考文献

[1] 施志永, 金齐, 叶飞. GPS 测量技术在工程测量中的应用探微 [J]. 建筑·建材·装饰, 2022(10): 187-189.
[2] 侯丽霞. GPS 测量技术在工程测量中的应用 [J]. 信息记录材料, 2022, 23(4): 154-156.
[3] 郑凯. GPS 测量技术在工程测绘中的应用分析 [J]. 工程管理与技术探讨, 2025, 7(18).
[4] 叶惊春. GPS 测量技术在工程测绘中的应用分析 [J]. 世界有色金属, 2021(3): 184-185.
[5] 刘志永. GPS 测量技术在工程测量中的应用研究 [J]. 现代工程项目管理, 2025, 4(10). DOI: 10.37155/2811-0625-0410-24.

“数智营建·筑教融合” ——建筑类专业数字化教学新生态探索与实践

刘笑

百色学院, 广西 百色 533000

DOI:10.61369/ERA.2025110001

摘要： 数字技术深度融入建筑全生命周期，推动建筑类专业人才培养变革。针对传统建筑教育技术滞后、虚实割裂、评价单一等问题，本文提出“数智营建·筑教融合”理念，构建“四维一体”数字化教学新生态。通过打造虚实联动教学环境、重构前沿技术课程体系、创新任务驱动协作方法、建立多元动态评价机制等实践，有效提升学生数字素养、协同与创新能力。该模式为培养数智时代复合型建筑人才提供了可复制路径。

关键词： 数字化转型；数智营建；筑教融合；教学新生态

"Digital and Intelligent Construction · Integration of Architecture and Education"—Exploration and Practice of a New Digital Teaching Ecosystem for Architectural Majors

Liu Xiao

Baise University, Baise, Guangxi 533000

Abstract： Digital technology is deeply integrated into the entire lifecycle of architecture, driving transformations in the cultivation of architectural professionals. Addressing issues such as outdated technology, a disconnect between virtual and real environments, and simplistic evaluation methods in traditional architectural education, this paper proposes the concept of "Digital and Intelligent Construction · Integration of Architecture and Education" and constructs a new "four-dimensional integrated" digital teaching ecosystem. Through practices such as creating a teaching environment that integrates virtual and real elements, reconstructing a cutting-edge technology curriculum system, innovating task-driven collaborative methods, and establishing a diversified and dynamic evaluation mechanism, students' digital literacy, collaboration, and innovation capabilities are effectively enhanced. This model provides a replicable pathway for cultivating versatile architectural talents in the digital and intelligent era.

Keywords： digital transformation; digital and intelligent construction; integration of architecture and education; new teaching ecosystem

引言：数智浪潮下的建筑教育转型必然性

建筑行业正经历以大数据、AI、BIM、IoT、VR/AR、数字孪生等技术为代表的“数智营建”变革，推动设计、生产、施工、管理和运维的全面智能化^[1-2]。这一趋势要求建筑人才不仅具备专业基础，还需掌握数字技术应用、跨学科协同及创新解决复杂问题的能力。然而当前专业教育面临四大挑战：教学内容滞后于技术发展，数字工具应用薄弱；传统教学难以构建全过程工程场景认知；教学方法单一，缺乏深度协作式学习；评价体系片面，忽视过程性能力培养。因此，构建“数智营建·筑教融合”的数字化教学新生态，实现技术与教育的深度耦合，成为推动建筑教育内涵式发展、培养适应行业转型人才的迫切需求^[3]。

一、理念与框架：“数智营建·筑教融合”新生态的内涵构建

“数智营建·筑教融合”理念，强调以数字技术为引擎，以

工程实践能力和创新思维培养为核心，以真实或高度仿真的项目情境为载体，通过教学要素的数字化、智能化、协同化重构，构建一个开放、互动、赋能、可持续发展的建筑类专业教育新体系。其目标是培养具备深厚专业素养、精湛数字技能、卓越协同

能力和强烈创新意识的新时代建筑人才^[4]。基于此理念，我们构建了“四维一体”的数字化教学新生态框架：

维一：数智驱动的智慧教学环境：建设集成 BIM 协同平台、VR/AR/MR 实训室、云端资源库、智能物联网设备、高性能计算集群等软硬件设施的智慧教学空间，打破物理空间限制，营造沉浸式、交互式、可扩展的学习环境。

维二：融合前沿的课程内容体系：将 BIM 技术、参数化设计、数字建造、智能运维、建筑大数据分析、可持续性模拟、生成式 AI 辅助设计等前沿内容深度融入建筑设计、结构、设备、施工、管理等核心课程，形成“专业基础 + 数字技术 + 工程应用”的模块化、项目化课程群。

维三：任务驱动的深度协作模式：以来源于实际工程或精心设计的复杂项目任务为驱动，模拟真实项目团队角色，利用数字化协同平台（如 Autodesk BIM 360, Revit Server, 国产协同设计平台等），开展跨专业、跨年级、跨校甚至跨境的深度协作学习和基于问题的学习。

维四：多元动态的过程性评价：利用数字化平台记录学习过程数据，结合教师评价、同伴互评、企业导师评价、AI 智能分析等多维度评价方式，形成聚焦能力成长、注重过程反馈的动态评价报告^[5]。

这四个维度相互支撑、深度融合，共同构成一个以学生能力发展为中心的闭环生态体系。

二、实践路径：数字化教学新生态的落地探索

（一）打造虚实联动的智慧教学环境

建设 BIM 协同中心：配备高性能工作站和专业软件，建立企业级 BIM 协同平台，支持多专业、异地实时协同设计与模型管理^[6]。

构建沉浸式 VR/MR 实训室：利用 VR 头盔、CAVE 系统、MR 眼镜等设备，开发或引进建筑安全模拟、复杂节点施工工艺模拟、历史建筑虚拟复原、建筑物理环境（光、声、热）体验、大型公共建筑疏散演练等虚拟仿真实验项目，提供“身临其境”的认知和实践平台。

部署云端学习与资源平台：整合优质在线课程（MOOC/SPOC）、案例库、规范图集、软件教程、行业动态，支持学生随时随地学习、分享与协作。利用学习管理系统（LMS）进行课程管理和学习行为初步分析。

引入智能感知设备：在实体模型实验室、材料实验室、构造展示区等部署传感器和物联网设备，实时采集环境、结构、材料性能数据，并与数字模型（Digital Twin 雏形）关联，进行可视化分析与教学演示。

（二）重构融合数智技术的项目化课程体系

基础层融入：在《建筑制图》、《房屋建筑学》、《建筑构造》等基础课中，强化 BIM 作为新的表达语言，替代或补充传统二维图纸，并引入基础参数化概念。

核心层贯通：

设计课程：强调 BIM 正向设计流程，利用参数化工具进行形态生成、性能优化（日照、能耗、结构合理性初步分析）。引入 AI 辅助方案生成、风格迁移等探索性内容。

技术课程（结构、设备、施工）：在结构分析课程中结合 BIM 模型进行结构计算与优化；在设备课程中利用 BIM 进行管线综合与碰撞检测教学；在施工课程中结合 BIM 4D/5D 模拟施工进度与成本，利用 VR 进行复杂工艺可视化教学和安全培训。

管理类课程：融入基于 BIM 的造价管理（5D）、进度管理（4D）、设施管理（FM）以及建筑大数据分析在运维阶段的应用。

综合实践层强化：设置《数字建造综合实训》、《智能建筑系统集成》、《建筑性能模拟与优化》等前沿特色课程 / 实训环节。设立贯穿多个学期的“数字建筑创新项目”，要求学生组队完成从概念设计、技术深化、虚拟建造到智能运维策略制定的全过程，综合运用各项数智技术。

（三）创新任务驱动与深度协作的教学方法

基于复杂项目的 PBL：设计来源于真实工程痛点或具有前瞻性的设计 / 技术挑战题目（如：基于 AI 生成设计的适老住宅改造、利用数字孪生的既有建筑绿色节能改造、模块化集成建筑的智能建造方案等）。项目要求明确、具有挑战性和一定的开放性。

角色扮演与跨专业协作：在项目执行中，模拟设计院或工程公司模式，学生扮演不同专业角色，利用 BIM 协同平台进行设计协同、碰撞检查、问题协商、方案优化。强调沟通、妥协与共同决策。

线上线下混合式教学：理论讲解、软件操作基础采用线上微课、录屏；关键知识点解析、项目推进会、难点研讨采用线下互动课堂或线上实时会议；项目协作主要在线上平台进行，教师在线提供指导与反馈。

引入“双导师制”：校内专业教师负责理论指导与教学组织，聘请企业资深工程师（BIM 经理、数字建造专家、智能建筑设计师等）作为行业导师，参与项目指导、评审，提供真实行业视角和技术前沿信息^[7]。

（四）建立多元动态的过程性评价机制

过程数据留痕：充分利用 BIM 协同平台、LMS、代码托管平台（如用于参数化脚本）、VR 实训系统等，自动或半自动记录学生的模型迭代次数、协作贡献度（评论、修改、协调记录）、问题解决效率、软件操作日志、虚拟实验操作步骤与结果等。

多维度评价主体：

教师评价：关注方案创新性、技术应用的深度与合理性、规范性、报告质量。

同伴互评：侧重协作态度、沟通有效性、任务完成度与质量。

企业导师评价：聚焦方案的可行性、技术路线的先进性、与行业需求的契合度。

AI 辅助评价：利用工具对 BIM 模型规范性（LOD 等级、命名、参数完整性）、代码质量、模拟结果的合规性进行自动化检测评分。

动态反馈与能力画像：基于过程数据和多元评价结果，生成

阶段性学习报告，清晰展示学生在专业知识、软件技能、协作能力、解决问题、创新思维等维度的表现与进步轨迹（能力雷达图 / 成长曲线），为学生提供个性化改进建议。终结性评价（项目成果）权重降低，过程性评价权重显著提高。

三、实践成效与反思

经过数年的探索与实践，“数智营建·筑教融合”数字化教学新生态在多个院校的建筑类专业中取得了初步成效：

学生数字素养与核心能力显著提升：学生熟练掌握主流 BIM 软件及参数化工具，运用数字技术进行设计表达、分析、优化的能力普遍增强。在国家级 / 省级 BIM 大赛、绿色建筑设计竞赛、数字建造创新大赛中获奖数量和等级显著提高。企业反馈毕业生上手快，数字工具应用能力和跨专业协作意识明显优于往届^[8]。

学习主动性与创新意识增强：项目驱动的学习模式和真实（或高仿真）的挑战性任务，极大激发了学生的学习兴趣和内驱力。学生在解决复杂问题过程中展现出更强的自主探究、批判性思维和创新设计能力。

协作能力与工程意识深化：跨专业协作项目有效打破了学科壁垒，学生深刻理解了不同专业在项目中的相互依存关系，沟通协调能力和团队合作精神和整体工程系统观得到实质性锻炼。

教学资源效能优化：虚拟仿真实验有效弥补了实体实验成本高、周期长、危险性大、难以重复的不足，提升了实验教学的覆盖面和效率。云端资源共享打破了时空限制，促进了优质资源的充分利用。

评价科学性增强：过程性、多元化的评价机制更全面、客观地反映了学生的综合能力与成长，评价结果更具说服力，也为教学改进提供了精准的数据支撑^[9]。

反思与持续改进方向：

技术与教学深度融合的深度与广度：如何将 AI、大数据、物联网等更前沿技术更自然、更深入地融入教学内容和项目实践，而非简单工具化，仍需持续探索。生成式 AI 对设计思维和教学模式的冲击需要深入研究与应对^[10]。

师资队伍能力建设：教师自身的数字技术应用能力、跨学科知识储备、项目实战经验和教学创新理念是模式落地的关键瓶颈。需要建立更完善的教师培训、企业实践、激励与评价机制。

平台互通性与数据整合：不同教学平台（BIM 协同、LMS、VR 系统、代码平台）之间的数据孤岛问题依然存在，影响过程性评价数据的全面采集与分析。需要推动平台接口标准化或开发集成化教学管理平台。

企业深度参与的可持续性：吸引并维持高水平企业导师的深度、持续参与，需要探索更灵活、互利共赢的校企合作机制。

伦理与价值观引导：在拥抱技术的同时，需加强对学生在数据安全、隐私保护、技术伦理、人文关怀、可持续发展理念等方面的引导和教育，避免技术至上主义。

四、结论

“数智营建·筑教融合”是建筑类专业教育应对行业数字化转型挑战、实现高质量发展的必由之路。本文提出的“四维一体”数字化教学新生态框架，通过系统性地重构教学环境、课程内容、教学方法和评价机制，有效促进了数字技术与建筑教育的深度耦合。实践证明，该模式能够显著提升学生的数字技术应用能力、复杂工程问题解决能力、跨学科协作能力与创新思维，为培养适应和引领“数智营建”时代的高素质复合型建筑人才提供了有效路径。

参考文献

- [1] 丁烈云. 智能建造推动建筑产业变革 [J]. 中国建设信息化, 2020(06):10-13.
- [2] 马智亮, 邱奎宁等. BIM 技术应用深度与发展趋势 [J]. 土木建筑工程信息技术, 2018, 10(03):1-10.
- [3] 教育部工业和信息化部中国工程院. 关于加快建设发展新工科实施卓越工程师教育培养计划 2.0 的意见 [Z]. 教高〔2018〕3 号.
- [4] 祝智庭, 魏非. 教育数字化转型: 面向未来的教育新生态 [J]. 中国电化教育, 2022(08):1-11.
- [5] 洪明, 林晓枫. 工程教育专业认证视角下的课程目标达成度评价方法 [J]. 高等工程教育研究, 2019(03):122-127.
- [6] 李久林, 马智亮. 数字孪生技术在智能建造教学中的实践探索 [J]. 土木建筑工程信息技术, 2022, 14(02):1-7.
- [7] 李志义, 朱泓. 新工科背景下“双导师制”校企协同育人机制研究 [J]. 高等工程教育研究, 2020(03):52-57.
- [8] 吴刚, 陈以一. 智能建造人才能力标准与培养成效评估 [J]. 高等工程教育研究, 2022(02):67-73.
- [9] 洪明, 林晓枫. 基于 OBE 的过程性评价指标体系构建 [J]. 中国大学教学, 2021(05):82-87.
- [10] 顾佩华. 工程教育数字化转型的挑战与路径 [J]. 高等工程教育研究, 2023(01):1-8.

大跨度空间钢结构屋盖吊装方案优化 与施工力学行为分析

马腾¹, 王栋²

1. 中建三局集团有限公司工程总承包公司山东公司, 山东 济南 250100

2. 山东发展智慧园区投资有限公司, 山东 济南 250100

DOI:10.61369/ERA.2025110005

摘 要 : 本文聚焦大跨度空间钢结构屋盖吊装方案优化与施工力学行为, 概述了常见的吊装工艺, 分析了各工艺的优势与局限, 探讨了吊装方案的影响因素, 并构建了综合评价指标体系。在施工力学分析方面, 阐述了施工力学基本理论, 重点介绍了有限元法在施工模拟中的应用及施工全过程精细化有限元模型的构建方法, 为力学行为分析提供了理论与技术支撑。通过数值模拟技术, 对比分析了不同吊装方案在构件应力分布、变形及设备受力等方面的力学行为差异; 基于多目标决策方法, 综合考量施工安全、成本与效率等目标, 实现了吊装方案的优化。研究成果可为大跨度空间钢结构屋盖吊装方案的科学制定与施工安全控制提供参考, 以保障工程施工的安全、高效与经济。

关 键 词 : 大跨度空间钢结构; 屋盖吊装; 方案优化; 施工力学行为

Optimization of Hoisting Schemes and Analysis of Construction Mechanical Behavior for Long-Span Spatial Steel Structure Roofs

Ma Teng¹, Wang Dong²

1.Shandong Branch of the Engineering General Contracting Company, China Construction Third Engineering Bureau Group Co., Ltd., Jinan, Shandong 250100

2.Shandong Development Smart Park Investment Co., Ltd., Jinan, Shandong 250100

Abstract : This paper focuses on the optimization of hoisting schemes and the analysis of construction mechanical behavior for long-span spatial steel structure roofs. It provides an overview of common hoisting techniques, analyzes the advantages and limitations of each technique, explores the influencing factors of hoisting schemes, and constructs a comprehensive evaluation index system. In terms of construction mechanical analysis, the paper elaborates on the basic theory of construction mechanics, emphasizes the application of the finite element method in construction simulation, and introduces the method for constructing a refined finite element model throughout the entire construction process, providing theoretical and technical support for mechanical behavior analysis. Through numerical simulation techniques, the paper compares and analyzes the differences in mechanical behavior among various hoisting schemes in terms of component stress distribution, deformation, and equipment loading. Based on a multi-objective decision-making approach, it comprehensively considers objectives such as construction safety, cost, and efficiency to achieve the optimization of hoisting schemes. The research findings can provide references for the scientific formulation of hoisting schemes and construction safety control for long-span spatial steel structure roofs, ensuring the safety, efficiency, and economy of engineering construction.

Keywords : long-span spatial steel structure; roof hoisting; scheme optimization; construction mechanical behavior

引言

大跨度空间钢结构屋盖往往具有结构形式复杂、构件重量大、跨度超长等特点, 这使得吊装施工面临着诸多挑战。近年来尽管国内外学者在大跨度钢结构吊装技术与施工力学分析方面已开展了不少研究, 提出了多种吊装工艺和数值模拟方法, 但针对具体工程的方案优化仍缺乏系统的理论指导与量化分析手段, 如何在保证施工安全的前提下, 实现吊装方案的经济性与高效性, 仍是当前工程实践中亟

待解决的问题。基于此,本文聚焦大跨度空间钢结构屋盖吊装方案优化与施工力学行为分析,旨在通过系统研究吊装技术与方案评价体系,结合施工力学理论与有限元模拟方法,揭示不同吊装方案下的结构力学行为规律,并基于多目标决策实现方案的科学优化。研究成果期望为同类工程的吊装施工提供理论参考与技术支持,推动大跨度空间钢结构施工技术的进一步发展。

一、大跨度空间钢结构屋盖吊装技术与方案评价体系

(一) 常见大跨度屋盖吊装工艺概述

初期,我国主要以拱式结构和框架结构为主,其缺点就是只能起到层层传递荷载的作用,不能很好地承受荷载。随着我国技术和材料的不断发展,大跨度的空间体系结构也获得了加快的发展^[1]。大跨度屋盖吊装工艺的选择需结合结构形式、跨度大小、现场环境等因素,常见工艺各有特点。整体吊装工艺是在地面整体拼装后一次性吊装到位,其优势在于减少高空作业、降低风险且便于保证结构整体精度,但对起重设备要求高,需要详细的受力和加固。分块吊装工艺则是将屋盖分成若干单元分别吊装后进行拼接,对起重设备要求较低,施工灵活性高,不过会增加高空作业量和难度,拼接精度控制也较为复杂^[2]。滑移吊装工艺利用轨道和设备将屋盖逐步滑移到位,滑移时结构受力平稳、变形易控,但需要铺设高标准轨道,且设备同步性控制至关重要。提升吊装工艺通过下方提升设备将屋盖逐步提升到位,提升时结构受力明确、变形和位移易控,还可多点同步作业提高效率,只是提升设备布置和承载能力需精确计算,同步性和稳定性控制也比较复杂。

(二) 吊装方案影响因素分析

吊装方案制定受多种因素综合影响,充分考量这些因素是方案科学合理的前提。结构自身因素最为关键,结构形式如网架、网壳、桁架等不同,受力特点和吊装要求差异大;结构的跨度、重量直接决定起重设备选择和工艺采用,大跨度、重重量结构对设备要求更高,可能需特殊工艺;结构刚度和稳定性也有影响,刚度小的易变形,需加固保障安全^[3]。现场环境因素同样重要,场地大小和形状限制设备布置、移动及拼装场地;地形条件如坡度、地基承载力影响设备稳定性和作业安全,地基不足需处理;周边环境中的障碍物会限制设备作业半径和高度,增加难度与风险,交通状况则影响设备和材料运输^[4]。起重设备因素起关键作用,其起重量、起升高度、作业半径等参数需满足要求,不同类型设备适用范围和特点不同,需依情况选择;设备数量影响方案,工程量大、工期紧时可能需多台协同,要考虑配合协调;设备的可靠性和安全性也很重要,性能不稳定可能导致作业中断或事故。施工组织因素影响方案实施效果,施工进度计划要求方案满足工期,合理安排作业顺序和时间;施工人员技术水平和经验关乎作业质量与安全,需配备合格人员;施工组织管理水平如方案执行、现场协调指挥等,也影响方案顺利实施^[5]。成本因素衡量方案经济性,在满足质量、安全和进度的前提下,应选成本较低方案,但不能牺牲质量和安全。安全因素必须优先考虑,吊装属高危作业,方案需符合安全规范标准,采取有效防护措施,保障人员和设备安全。

(三) 吊装方案综合评价指标体系构建

为科学客观评价大跨度空间钢结构屋盖吊装方案,需构建涵

盖技术可行性、经济合理性、安全可靠性和施工效率的综合评价指标体系^[6]。技术可行性是方案实施的基础,包括吊装工艺成熟度、结构受力合理性、起重设备匹配度及施工难度。经济合理性用于衡量成本效益,涉及总成本、单位面积成本及成本控制难易程度。安全可靠性是安全保障关键,包含安全防护措施完善性、结构吊装安全性、起重设备安全性及作业人员安全保障。施工效率反映对工程进度的影响,有吊装工期、吊装作业连续性和施工组织合理性。构建体系时,需结合具体工程特点赋予指标相应权重,可采用层次分析法、模糊综合评价法等进行综合评价,以选出最优方案。

二、施工过程力学行为分析理论与建模方法

(一) 施工力学基本理论

施工力学是研究结构施工过程中力学行为的学科,综合结构力学、材料力学、土力学等理论方法,旨在揭示施工中结构受力、变形、稳定性等力学特性的变化规律。其核心内容包括施工阶段结构体系转换、荷载传递与分布、材料力学性能随时间变化及结构动态响应等^[7]。施工中结构体系随步骤逐步形成最终体系,如大跨度钢结构屋盖分块吊装时,每吊装连接一块构件,受力体系就会变化,导致内力和变形重新分布^[8]。施工力学强调时间因素的影响,施工中结构承受的自重、施工荷载等会随时间变化,材料力学性能也会改变,因此需考虑时间维度动态分析不同施工阶段的力学状态。同时它注重施工工艺与结构力学行为的相互作用,不同工艺会使结构经历不同受力路径和变形过程,需依具体工艺建立力学分析模型以准确预测。施工力学基本理论为施工中结构安全控制提供依据,通过分析可提前发现过大变形、应力集中、失稳等安全隐患,进而采取预防控制措施,保障施工安全可靠。

(二) 有限元法在施工模拟中的应用

有限元法是高效的数值分析方法,通过将连续结构离散为有限个单元,建立并组装单元力学方程,求解结构内力、变形等参数。在大跨度空间钢结构屋盖施工模拟中,因其适应性强、计算精度高而被广泛应用^[9]。其优势主要是能准确模拟复杂结构形式和施工过程,可通过选择合适单元类型精确描述结构特征,还能模拟吊装、滑移等多种工艺的结构行为;可考虑多种因素影响,能将自重、施工荷载、风荷载等纳入模型,分析综合影响;能对施工过程进行可视化展示和动态分析,借助软件直观显示不同阶段内力、变形等,便于发现问题和调整方案,还可进行关键参数敏感性分析,为优化方案提供依据^[10]。应用步骤包括建立几何模型、划分有限元单元、选择材料本构关系、施加边界条件和荷载、求解计算及分析评估结果。实际应用中需结合工程具体情况,合理选择单元类型、网格密度和计算参数,以保证模拟结果

准确可靠。

（三）施工全过程精细化有限元模型构建

施工全过程精细化有限元模型是大跨度空间钢结构屋盖施工精确力学分析的基础，能真实反映施工中结构几何形态、材料性能、荷载作用和边界条件的变化，为施工安全控制和质量保障提供可靠依据。模型构建的精细化体现在多方面，几何建模需精确描述构件尺寸、形状、连接方式及节点构造细节，复杂结构采用三维建模，确保与实际高度一致；材料本构关系选取要契合材料实际性能和施工受力特点，以及材料损伤和破坏准则；荷载和边界条件需精细化处理，准确施加各类荷载并考虑其分布与作用时间，边界条件设置符合实际，包括支撑特性及可移动支撑的运动状态；还应精细化模拟施工步骤，按顺序分解为若干阶段，每个阶段对应分析步，依施工要求激活或钝化构件、施加或移除荷载等；同时要优化网格划分，关键部位用较密网格提高精度，次要部位减小密度提升效率，且保证网格质量。构建该模型是复杂系统工程，需工程师专业知识、工程经验及先进软件技术支持，模型能准确预测施工中结构力学行为，为优化方案、制定安全措施提供科学依据，保障施工顺利进行。

三、基于数值模拟的吊装方案优化与力学行为分析

（一）不同吊装方案的施工力学行为对比分析

不同的吊装方案在施工过程中，其力学行为存在显著差异，这些差异主要体现在构件的应力分布、变形情况、吊装设备的受力状态等方面。通过数值模拟，我们可以对多种吊装方案进行虚拟施工演练。在模拟过程中，重点监测构件在起吊、平移、就位等各个阶段的应力变化。单点吊装时，构件往往会在吊点处产生较大的应力集中，如果应力超过构件材料的许用应力，就可能导致构件变形甚至损坏。而多点吊装通过合理分配吊点，可以有效分散应力，降低应力集中现象的发生概率。同时构件的变形情况也是对比分析的重要指标。在吊装过程中，构件若发生过大的变形，不仅会影响安装精度，还可能对周边结构或设备造成干扰。数值模拟能够精确计算出不同方案下构件的挠度、转角等变形参数。此外，吊装设备的受力状态同样不容忽视，不同的吊装方案会使起重机等设备的起重臂受力、支腿反力等发生变化。通过数值模拟，可得到各种方案下吊装设备关键部位的受力数据，若设备受力超过其额定承载能力，就会存在安全隐患。通过对不同吊装方案的施工力学行为进行全面对比分析，能够清晰地掌握各方

案的优势与不足，为后续的方案优化提供有力支撑。

（二）基于多目标决策的吊装方案优化

在吊装方案优化过程中，往往需要考虑多个目标，基于多目标决策的吊装方案优化就是在综合权衡这些目标的基础上，选出最优方案。施工安全方面，可选取构件最大应力、吊装设备最大受力、构件最大变形等指标，这些指标直接关系到施工过程中人员和设备的安全；施工成本主要包括吊装设备租赁费用、人工费用、材料费用等，不同的吊装方案在成本投入上会有明显差异；施工效率则可通过吊装作业时间、工序衔接顺畅程度等指标来衡量，高效的吊装方案能缩短施工工期，加快工程进度。利用数值模拟技术获取各吊装方案在不同评价指标下的具体数值，将这些数值进行标准化处理，消除不同指标量纲的影响，使各指标具有可比性。采用合适的多目标决策方法进行方案优选，常用的方法有层次分析法、模糊综合评价法、TOPSIS 法等。以层次分析法为例，先建立层次结构模型，将吊装方案优化目标作为顶层，评价指标作为中间层，各备选方案作为底层；然后通过两两比较确定各指标的权重，权重大小反映了该指标在决策中的重要程度；最后计算各备选方案的综合得分，得分最高的方案即为最优方案。在多目标决策过程中，还需要考虑各目标之间的相互关系和约束条件。通过多目标决策，能够在这些相互矛盾的目标之间找到平衡点，使优化后的吊装方案在满足安全要求的前提下，尽可能降低成本、提高效率。基于多目标决策的吊装方案优化，充分考虑了工程实际中的各种因素，能够选出兼顾多个目标的最优方案，为吊装施工提供科学、合理的指导。

四、结束语

本文围绕大跨度空间钢结构屋盖吊装方案优化与施工力学行为展开了系统性研究，通过对吊装技术、方案评价体系、施工力学分析理论及数值模拟应用的深入探讨，形成了一系列具有实践意义的成果。研究表明，科学的吊装方案优化与施工力学行为分析，能够有效平衡大跨度空间钢结构屋盖施工中的安全、成本与效率，为工程实践提供可靠的技术支撑。然而本文的研究仍存在一定局限，例如在有限元模拟中对某些复杂施工环境因素的考虑尚不够全面，后续研究可进一步完善模型的精细化程度，结合更多实际工程案例进行验证与优化。

参考文献

[1] 范凯. 某大跨度钢屋盖结构施工技术的研究 [D]. 江西：南昌大学，2020.
[2] 武浩鹏. 大跨度空间钢结构施工过程监测分析与结构安全性评估 [D]. 甘肃：兰州理工大学，2017.DOI: 10.7666/d.D01248497.
[3] 张胜杰，贾宝荣，陈颖. 超高重型大跨度室内滑雪场钢屋盖建造技术 [J]. 建筑钢结构进展，2024，26(9): 100–106.DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2024.09.011.
[4] 汪韦韦，王强. 大跨度空间钢结构铸钢件和梭形斜柱逆施工技术 [J]. 铁路技术创新，2020(5): 40–45.DOI: 10.19550/j.issn.1672-061x.2020.05.040.
[5] 赵跃港. 某大跨度钢结构施工过程力学模拟及关键技术研究 [D]. 河南：河南大学，2023.
[6] 杨平，罗军伟，汪兴文. 大跨度钢结构建筑改造中的安装施工技术研究 [J]. 建筑技术开发，2023，50(9): 23–25.DOI: 10.3969/j.issn.1001-523X.2023.09.007.
[7] 张富强. 大跨度空间网架结构施工过程优化分析及应用研究 [D]. 陕西：西安理工大学，2011.DOI: 10.7666/d.y2117401.
[8] 柯江华，张宏磊，谢心谦，等. 某改造项目大跨度高空钢结构安装施工技术 [J]. 施工技术（中英文），2022，51(17): 82–85.DOI: 10.7672/sgjs2022170082.
[9] 洪彩玲. 大跨度预应力空间钢结构施工过程分析与索力优化研究 [D]. 河南：郑州大学，2013.
[10] 乔永强，郭泰源，胡清，等. 大跨度屋面桁架吊点布置和支承卸载有限元模拟分析 [J]. 钢结构，2021，36(7): 29–34.DOI: 10.13206/j.gjgS20031801.

基于 BIM 的钢结构建筑支撑体系虚拟预拼装技术研究

朱冠煜, 姚胜红, 吴大鹏, 沈如明
铜陵有色建安钢构有限责任公司, 安徽 铜陵 244000
DOI:10.61369/ERA.2025110009

摘 要 : 钢结构因其优异的承载能力、良好的塑性和韧性以及卓越的抗震效果, 已成为大型建筑工程中的重要选择。对于复杂节点的钢结构而言, 虚拟预拼装是一项重要步骤, 它能够快速识别出存在问题的部件。通过虚拟预装配, 成本得到有效控制, 同时大幅减少了操作的复杂性和安装过程中面临的风险。本研究探讨了将虚拟预拼装技术用于构件组装与预拼装阶段采用精度控制系统拟合纠偏的研究。借助 BIM 技术, 实现了钢结构支撑系统的精确虚拟预拼装。

关 键 词 : 钢结构 BIM 技术; 建筑支撑; 虚拟预拼装

Research on Virtual Pre-assembly Technology of Steel Structure Building Support System Based on BIM

Zhu Guanyu, Yao Shenghong, Wu Dapeng, Shen Ruming
Tongling Nonferrous Metals Construction & Installation Steel Structure Co., Ltd., Tongling, Anhui 244000

Abstract : Due to its excellent load-bearing capacity, good plasticity and toughness, as well as outstanding seismic performance, steel structure has become an important choice in large-scale construction projects. For complex joint steel structures, virtual pre-assembly is an important step, which can quickly identify problematic components. Through virtual pre-assembly, costs are effectively controlled, and the complexity of operations and risks during installation are significantly reduced. This study explores the application of virtual pre-assembly technology in the component assembly and pre-assembly stage, using a precision control system for fitting and correction. With the aid of BIM technology, precise virtual pre-assembly of the steel structure support system has been achieved.

Keywords : BIM technology for steel structure; building support; virtual pre-assembly

一、BIM 虚拟预拼装技术原理

伴随我国钢结构建筑的迅速兴起, 采用钢结构进行建造的建筑实例日益增多。在建筑行业, 钢结构工程已经成为不可或缺的关键组成部分。钢结构工程以其轻便、高强度和耐久性等优越特性, 广泛应用于高楼大厦、跨越性桥梁和体育设施等建筑行业^[1]。然而, 钢结构工程的设计、制造和安装等各个阶段都需要高度精准和严格的工艺把控, 这对工程师及施工人员的技术能力提出了很高的要求。虚拟预拼装的钢结构相比实体预拼装更易于实现, 这是通过利用 PKPM 三维软件、构件信息提取技术以及图片生成软件等先进信息技术, 使得钢结构的设计、制造和现场安装形成一个完整的数据链^[2]。

在钢结构工程的设计阶段, 通常设计详细程度不足; 因此需要对设计进行进一步分解, 以生成加工图, 待工厂完成加工后, 再进行现场安装。采用建筑信息模型 (BIM) 技术来进行 3D 建模, 通过设计图纸连接“构件库”和“节点库”, 并为其提供参数资料。这不但有利于详细化构件和节点的设计, 也能增强钢结构项目的可视化表现和信息管理效率。在组装阶段, 为确保构件的加工准确性, 需要开展模拟精度校核, 从而为现场安装的精确性奠

定基础^[3]。

二、基于 BIM 技术的高精度制造技术

(一) 深化设计

使用软件依据运输和起吊需求将钢构件合理分隔, 构建钢结构模型。随后, 在 PKPM 内进行详细设计模型的开发。将零散要素整合为一个整体, 通过统一标准进行深层次表达。设计深化结束后, 可以利用软件生成用于生产的报告, 包括部件加工图、材料清单以及零件明细等。

1. 模型及构件规格库的建立

首先在软件中生成一个标准化的坐标系统, 并依据结构施工图纸中的钢梁、钢柱、支撑以及楼梯等构件的位置联系构建出一个完整的模型。在软件中构建符合结构构件规格的数据库, 以确保今后能够在自动编号阶段清晰识别各个构件的名称, 从而提高工厂生产和现场安装的效率, 减少时间和劳动力成本。

2. 构件分段及节点设计

按照施工图纸、运输情况、现场安装环境以及技术工艺要求, 对各建筑构件进行适当的分段设计。

作者简介: 朱冠煜 (1991.02—), 男, 汉族, 安徽铜陵人, 本科, 研究方向: 建筑工程。

3. 模型校核及节点计算

请指定专家对模型精度、节点合理性以及加工流程等方面进行审核。使用软件的检测功能对整体模型进行详尽评估，以防止钢结构部件的相互干扰。利用模型验证解决设计图中的节点冲突，提前处理潜在安装障碍，确保工程的顺利推进。

4. 构件编号

在对模型进行校验后，可以利用软件中的编号工具给模型内的各个组件进行标识。程序会按照事先确定的构件名称，将具有相同规格的构件归为一个类别，并将相同的构件统一编号。将编号进行分类和整合有助于工厂更高效地批量生产组件，进而缩短加工时间。同时，这种方法也方便安装，使得工人能够更准确地辨别每个组件的安装位置和方向。

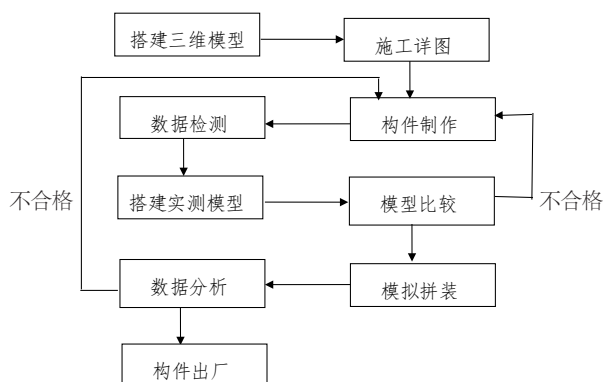
5. 生成报表

通过 PKPM 的报告功能，您可以依据需求创建各类统计报告。使用状态编号功能，可以将已完成的深化图纸导出，以便在紧迫的项目时间内有效指导施工，非常实用。该软件能够根据构件的类别和长度等参数进行综合处理，并在需要时生成构件数量和钢材使用量等重要数据。工厂必须按照生产的设计蓝图进行材料切割以及部件制造。

三、钢结构虚拟预拼装技术

（一）虚拟预拼装的基本原理

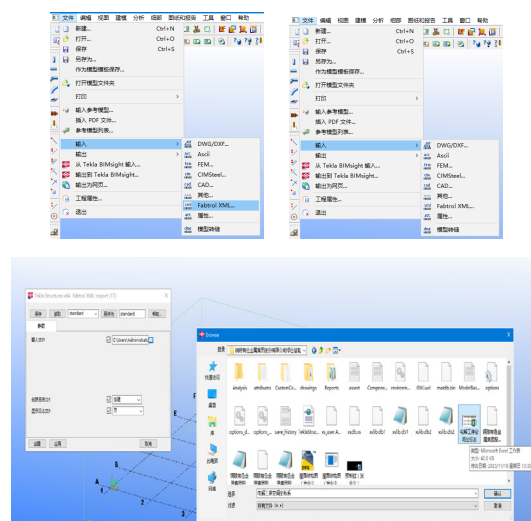
借助计算机三维设计工具，根据设计院提供的图纸构建理论上的三维模型。在现场挑选需要加工的组件，指定质量控制点并进行标记，接着对每个组件进行数据测量。测得的实际数据需录入电脑内，以建立实际测量的三维模型。通过计算机对比实际模型与理论三维模型，并进行装配模拟，以检查装配过程中是否存在干扰，并评估装配准确度，进而获得组件加工时需调整和修正的信息。虚拟预拼装流程如图



（二）预拼装系统

使用经纬仪和水平仪等工具对加工部件进行测量，获取其控制点的坐标数据。随后，将这些数据导入 EXCEL 表格中，将其格式转换为 (x, y, z)。获取组件控制节点的三维坐标数据，并对其进行整理和总结。选择将全部数据进行复本传送，并导入至三维建模软件中。以整体的模型作为参考，根据每个分段构件的几何大小，创建各自的坐标系统。然后，将这些分段构件的控制点的三

维坐标参数输入到相应的坐标系统中。（步骤如下）

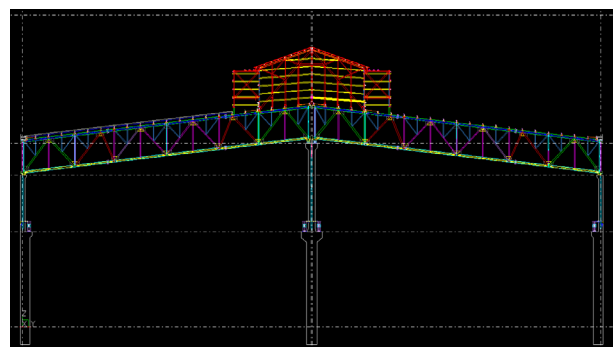
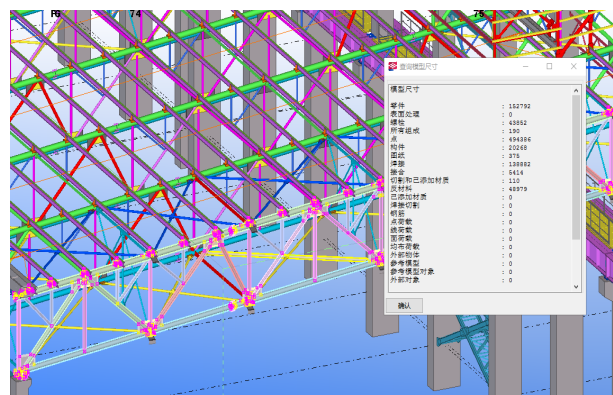


按照制定安装工艺图的要求，模拟设定相关的标高以及各个控制点的位置。

在将分段组件的局部坐标转换至整体坐标后，对各个控制点的坐标进行检查。将测量得到的尺寸转换为线性模型（见下图）并导入 3D 设计软件中，并在预拼装的整体坐标系中进行合理插入。

通过应用拟合技术，将实际构件模拟的装配模型与理论装配图进行比较，以识别段部和接口的加工偏差以及构件之间的连接误差。

对数据进行深入分析，识别不符合规范公差及安装精度要求的组件或零件，需进行调整和纠正。完成后需再度测量与组装，以确保满足预设的精度标准。模块的分析结果自动优化，检查组件组装后的误差情况。若误差过大，则需重新进行手动微调，以确保组装达到最佳状态。



采用拟合方法，将构件实测模拟拼装模型与拼装工艺图的理论模型比对，得到分段构件和端口的加工误差以及构件间的连接误差。统计分析相关数据记录，对于不符规范允许公差和现场安装精度的分段构件或零件，修改校正后重新测量、拼装、比对，直至符合精度要求。

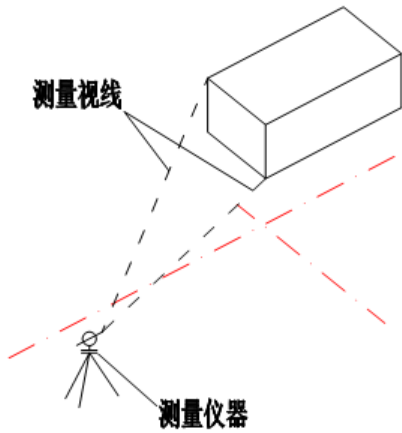


图1：虚拟预拼装测量示意图

模块分析成果自动拟合，分析构件拼装后偏差，如偏差太大，可重新返回至手动微调，指导拼装调整，直至达到最佳拼装状态。

（三）应用范围及其优势

在钢结构工程的施工验收中，需重点关注拼接质量、垂直度以及孔位的精确性。在进行钢结构焊接时，务必要确保实体拼接质量符合设计和规范标准。通过虚拟预拼装技术提前调整加工误差，有效减少现场装配过程中的偏差。虚拟预拼装技术的应用十分广泛，适用于多种钢结构建筑工程，尤其在制造超大型或异形构件时，可满足高精度的安装需求。在缺乏实际预拼装空间和资

源的情况下，该技术尤显重要。下表展示了传统预拼装对比虚拟预拼装的优点。

虚拟预拼装与传统预拼装对比				
项目	场地需求	人员需求	物料及设备需求	工期需求
虚拟预拼装	尺寸最大构件	专业技术人员	测量设备、计算	构件运送
传统预拼装	所能放置场地	人员	机及虚拟预拼装软件	时间
虚拟预拼装	全部拼装完成	起重人员	测量设备、拼装胎架	架体搭设拼装
传统预拼装	的场地	测量及操作人员	全部材料	拼装及拆除

四、结束语

本研究以钢结构屋架为研究对象，深入分析了虚拟预拼装的核心概念，制定了具体的虚拟拼装流程。研究重点放在关键理论模型的建立和测量精度上，最终构建了一个涵盖精度管理和拼装管理两大模块的虚拟预拼装系统。这对钢结构屋架虚拟预拼装技术的应用及普及提供了有益的借鉴。虚拟预拼装技术中的三维测量在模型重建、项目进度管理、结构变形监测以及尺寸调控等领域具有广泛的应用。其特征涵盖零接触、视觉化显示、即时追踪以及高精度等。与传统全站仪点测量相比，三维测量能够更详细地捕捉结构的几何信息，其结果更加直观，同时解决了单点测量的局限性。3D 重建模型能够更准确地呈现物体的空间位置细节。采用三维测量技术收集节段数据，并利用3D 建模软件生成各构件的三维模型，进行虚拟预拼装。这一方法可以有效减少生产成本并缩短制造时间。比较实际模型与虚拟模型拼装的垂直度误差，结果显示虚拟预装的精确度满足构件高精度拼装的要求。

参考文献

[1] 胡泰生, 张明月. 浅谈 BIM 技术在钢结构工程中的应用 [J]. 中国科技博览, 2017(9):7.
[2] 刘晓光, 潘永杰. 虚拟预拼装技术在钢桁梁中的应用研究 [J]. 铁道建筑, 2020, 60(01): 1-6.
[3] 花蕾. 研究 BIM 技术在施工阶段的应用 [J]. Engineering Technology Research, 2018, 26(10): 38-40.

高层建筑城镇燃气安全供应技术与隐患排查方法研究

柴冰艳, 曹凯

禹城华润燃气有限公司, 山东 德州 251200

DOI:10.61369/ERA.2025110020

摘 要 : 随着城市化进程的加速发展, 城市高层建筑数量与日俱增, 而做好城镇燃气安全供应成为保障城市运行和居民生命财产安全的关键。基于此, 本文聚焦于高层建筑城镇燃气安全供应技术和隐患排查两个方面展开探究分析, 旨在提高燃气供应的稳定性和安全性。为及时发现并消除潜在的安全隐患提供科学依据, 从而有效降低高层建筑燃气事故的发生率, 有助于更进一步推动城镇燃气行业的安全、可持续发展。

关 键 词 : 高层建筑; 城镇燃气安全; 供应技术; 隐患排查

Research on Safe Gas Supply Technology and Hidden Danger Investigation Methods for High-rise Buildings in Urban Areas

Chai Bingyan, Cao Kai

Yucheng China Resources Gas Co., Ltd., Dezhou, Shandong 251200

Abstract : With the accelerated development of urbanization, the number of high-rise buildings in cities is increasing day by day. Ensuring the safe supply of urban gas has become the key to safeguarding the operation of cities and the lives and property of residents. Based on this, this paper focuses on the exploration and analysis of two aspects: the safe supply technology of urban gas in high-rise buildings and the hidden danger investigation, aiming to improve the stability and safety of gas supply. To provide a scientific basis for the timely discovery and elimination of potential safety hazards, thereby effectively reducing the incidence of gas accidents in high-rise buildings and contributing to further promoting the safe and sustainable development of the urban gas industry.

Keywords : high-rise buildings; urban gas safety; supply technology; hidden danger investigation

引言

城镇燃气作为清洁、高效的能源, 在高层建筑中的广泛应用能极大提升居民生活的便利性和舒适度。但高层建筑因其独特的建筑结构和复杂的用户分布, 使得燃气供应系统面临着诸多挑战。尽管我国在城镇燃气供应领域目前已取得了显著的成就, 但高层建筑燃气安全供应技术依旧有待进一步完善。为此, 深入探究高层建筑城镇燃气安全供应技术, 并创新隐患排查方法, 对保障城市公共安全以及促进燃气行业的健康发展具有至关重要的现实意义。

一、高层建筑城镇燃气安全供应技术分析

(一) 压力调控与稳定技术

针对高层建筑燃气输配系统压力调控时, 在垂直输配系统中, 静压梯度导致基底层与顶层间存在显著压力差异, 叠加用气时段峰谷波动, 形成非稳态压力场。管网拓扑结构中, 管路当量长度、当量直径及终端设备启闭时序共同构成压力扰动源, 需建立动态压力补偿模型。调压设施布点应遵循“三近三避”原则, 根据《城镇燃气设计规范》(GB50028-2020), 超高层建筑宜采用二级调压方案。首级调压站设于地下二层, 二次调压箱分

布于各分区转换层, 确保出口压力稳定在 $\pm 5\%$ 设计值范围内^[1]。压力调节装置选型需综合考量流量-压力特性曲线, 对200户以上建筑群建议选用带PID调节的电动调压阀, 配套安装200L级缓冲罐以吸收瞬态压力脉动。智能调控系统采用压力-流量耦合控制策略, 通过PLC控制器实时采集16点压力监测数据, 结合历史负荷预测算法动态调整设定值。当检测到压力波动速率 $> 0.2\text{MPa/min}$ 时, 系统自动启动三级响应, 一级预警触发压力平衡调节, 二级预警启动备用调压机组, 三级预警实施区域供气隔离。

(二) 泄漏监测与报警技术

高层建筑燃气泄漏智能监测体系需构建多模态感知网络, 检

测技术体系应包含分布式光纤传感阵列与非接触式光谱分析装置，其中催化燃烧式传感器阵列可实现 ppb 级甲烷浓度检测，配套半导体式传感器补偿低温环境检测盲区。报警控制系统采用边缘计算架构，由分布式探测节点与中央控制单元组成，探测器内置 FPGA 芯片实现本地阈值判断。当检测到异常浓度时，系统通过 Modbus-TCP 协议在 50ms 内完成三级响应，如表 1 所示。多源数据融合模块采用 D-S 证据理论算法，综合催化燃烧、半导体、红外三种传感器数据，将误报率控制在 0.3% 以下，泄漏定位精度提升至 $\pm 0.8\text{m}$ 。

表 1：高层建筑燃气泄漏响应机制表

响应机制	具体数据
响应协议	Modbus - TCP 协议
响应时间	50ms 内完成三级响应
一级预警条件	燃气浓度 < 25%LEL（爆炸下限）
一级预警动作	触发声光警示
二级预警条件	燃气浓度处于 25~50%LEL
二级预警动作	联动电动切断阀
三级预警条件	燃气浓度 > 50%LEL
三级预警动作	启动紧急通风系统并发送 GIS 定位报警

（三）应急切断与防护技术

在紧急工况下，高层建筑供气中断响应时间应控制在 1.5 秒以内，采用“双模态控制 + 分布式执行”架构。基于 5G-MEC 边缘计算平台实现远程指令下发，同步配置本地 PLC 控制器保障断电续控能力。切断装置采用“双冗余设计”，主控单元为磁力驱动蝶阀，备用装置为电磁脉冲截止阀，关键节点设置机械式隔膜阀作为最终保护屏障。切断装置布设遵循“三线布防”原则，第一道防线在用户端安装带扭矩反馈的球阀，第二道防线于楼层立管设置压力 - 浓度双重触发电磁阀，第三道防线在调压站配置 PID 闭环控制的电动调节阀。防护系统集成正压通风装置，采用 ATEX Ex d IIB T4 防爆等级的电气设备，建筑本体需满足 GB50058 规定的泄爆面积比（ $\geq 0.05 \text{ m}^2 / \text{m}^3$ ）要求。

二、高层建筑城镇燃气隐患排查方法

（一）日常巡检方法

高层建筑燃气系统安全巡检工作需建立系统化管理机制，首先应制定科学的巡检方案，明确检查项目及质量标准，如表 2 所示。针对金属管道本体，需重点核查表面锈蚀程度、几何形态变化及焊缝区完整性，特别注意法兰密封面、丝扣连接等关键部位是否存在气体泄漏痕迹。同时需评估周边环境对管道的潜在威胁，及时排除尖锐构件划伤风险及重物压迫隐患^[2]。其次，在设施运行监测方面，应着重核查调压装置启闭性能、阀门密封状况，观察设备运转时的异响及振动情况。仪表类设备如压力监测装置、流量计量器具的示值精度需定期校核，确保数据采集处于合理阈值区间。巡检频次应结合建筑实际使用特性动态调整，对超高层建筑、商业综合体等用气强度大、管网结构复杂的区域，建议实施高频次专项巡检。最后，路径设计应遵循网格化管理原则，确保覆盖所有供气节点，重点区域可设置交叉检查点。巡检

档案管理需建立标准化流程，要求作业人员按照“四查四记”原则完整填写纸质台账，同步建立电子档案实现过程追溯，为后续安全评估提供可靠数据支撑。

表 2：高层建筑燃气安全巡检表

巡检部位	检查项目	检查标准	数据记录
室外引入管	管道外观	无腐蚀、变形、裂纹，保温层完好	变形程度：无明显变形，裂纹数量：0 条
管道连接	连接牢固，无泄漏	使用燃气泄漏检测仪检测 泄漏浓度：0 ppm	检测到泄漏，关闭阀门，通风换气，安排维修。
支架	支架牢固，无松动、移位	松动支架数量：0 个， 移位距离：0 cm	对松动支架进行紧固，移位支架复位并加固

（二）专业检测方法

高层建筑燃气系统专业检测需构建多维度技术体系，检测装备配置应包含可燃气体探测器、红外光谱分析仪等专业仪器。其中，气体浓度监测装置可实时捕捉甲烷类可燃气体扩散轨迹，当环境浓度突破 LEL（爆炸下限）临界值时自动触发声光警示。管道完整性评估则需采用压力衰减测试法，通过压力梯度变化曲线分析管路密封性能，测试压力应达到设计工作压力的 1.5 倍并持续保压 30 分钟，同时结合超声波测厚技术评估金属壁厚腐蚀量。检测流程需建立标准化操作规程，压力试验环节采用阶梯式加载策略，分阶段记录压力 - 时间响应数据。泄漏定位采用网格化扫描模式，沿燃气输送路径设置 50cm 间距检测点，重点监测三通管件、调节阀等应力集中区域。检测数据需导入燃气管网数字孪生系统，通过历史运行参数比对进行趋势分析。当检测结果出现异常波动时，应启动三级响应机制，一级预警（浓度 > 25%LEL）立即实施区域断气，二级预警（压力偏差 > 10%）启动带压堵漏作业，三级预警（腐蚀速率 > 0.3mm/ 年）制定更换周期计划。

（三）用户安全检查方法

高层建筑燃气用户安全检查需构建标准化服务流程，检查体系应包含设备状态评估与用户行为干预两个维度，前者需建立“三核五查”检查机制（核产品合格证、核安装合规性、核使用年限；查灶具密封性、查热水器排烟通道、查软管连接状态、查阀门启闭性能、查计量装置完整性）。检查人员应配备红外热成像仪辅助检测，对嵌入式灶具后方墙体实施温度梯度扫描，同步采用声波共振检测技术识别金属软管微渗漏。用户安全教育应采用“情景模拟 + 案例解析”的立体化培训模式，通过燃气事故三维动画演示，结合建筑内历年典型事故数据库进行对比分析^[3]。同时，建立“检查 - 反馈 - 复核”闭环机制，检查记录需包含设备编号、检测参数、风险等级等 12 项标准化字段，形成用户安全档案库。针对违规行为实施分级管控，对于连接管老化、灶具超期服役等一般性风险，采用“整改通知书 + 现场演示”双轨制处理。对擅自改装管道、私接燃气设备等重大隐患，启动“断气 - 封存 - 司法移送”处置程序。并建立用户信用评价体系，将违规记录纳入社区安全积分管理，通过正向激励提升用户配合度。

（四）基于大数据的隐患排查方法

目前，高层建筑燃气系统智能监测体系正经历数字化转型，数据采集层需构建多源异构信息融合架构，采用光纤光栅传感器实时监测管路应力分布，部署无线射频识别装置追踪燃气表具生命周期。建立“物联感知+人工巡检”双通道数据获取机制，整合压力梯度、瞬时流量、介质温度等动态参数，同步采集管道壁厚衰减曲线、焊缝缺陷图谱等静态数据，形成包含多类特征指标的多维数据集。数据预处理阶段需采用改进型小波阈值滤波算法消除环境噪声，运用主成分分析法提取关键变量，构建燃气系统健康度评估矩阵。在风险预警模型开发中，采用混合型深度学习架构，前端利用卷积神经网络（CNN）提取空间特征，后端结合长短时记忆网络（LSTM）捕捉时间序列规律，通过迁移学习策略在典型事故场景库中进行模型训练。系统集成数字孪生技术，建立三维管网拓扑模型与物理实体的实时映射关系，当检测到压力异常波动或浓度异常聚集时，自动启动多级预警机制，从而有

效支撑了基于风险熵值分析的安全决策体系。而该体系已在超高层建筑群进行了试点应用，实现隐患识别响应时间缩短至30秒内，年度非计划停气事件下降62%，有效支撑了基于风险熵值分析的安全决策体系。

三、结束语

城市高层建筑燃气安全供应是一项长期且艰巨的系统性工程，关系到城市的和谐稳定和人民群众安居乐业。高层建筑燃气安全涉及到燃气企业、物业管理部门和广大用户，只有三者共同参与到燃气安全管理中，才能有效确保燃气设施始终处于良好的运行状态，并为高层建筑城镇燃气安全供应营造良好的政策环境，这对促进城市的发展以及居民幸福生活筑牢出坚实的安全屏障。

参考文献

-
- [1] 汤燕刚,郭华斌,房艳立.高层建筑燃气安全隐患的排查与整治[J].科技视界,2022,(10):67-69.
- [2] 刘飞龙,殷赫然,陈王子.建筑工程中燃气管道安全施工技术研究[J].中华建设,2025,(06):142-144.
- [3] 李江奎.陕西燃气产业基地全生命周期中BIM技术应用[J].建筑施工,2023,45(10):2152-2155.

绿色建筑评价体系在工程咨询决策中的量化应用方法

谭江玲

明科建设咨询有限公司，重庆 400020

DOI:10.61369/ERA.2025110026

摘 要： 本文聚焦绿色建筑评价体系在工程咨询决策中的量化应用，旨在解决评价与实践脱节问题，为项目全周期决策提供科学路径。对绿色建筑评价体系进行量化解析与转化，将评价指标按量化属性分为绝对量化、相对量化、半量化三类，明确权重的动态价值导向作用，并构建“指标－数据－模型”映射关系，形成决策闭环系统。围绕工程咨询全阶段搭建量化决策应用框架，项目策划与可行性研究阶段通过阈值分析、权重预判等确定绿色目标与投资分配；方案设计与初步设计阶段依托比选矩阵、边际效益分析筛选技术方案；施工图设计与招投标阶段细化参数、量化评标标准保障设计落地；施工与运营阶段借助监控平台、衰减预警模型确保性能达标。详解成本效益分析、多目标决策优化、不确定性与风险评估三类核心量化模型，分别解决成本价值平衡、多目标冲突、风险预警问题。研究通过体系量化转化、阶段框架搭建与模型应用，使绿色建筑评价从静态工具升级为动态决策支持系统，助力工程咨询实现项目综合价值最大化。

关 键 词： 绿色建筑评价体系；工程咨询决策；量化应用；指标－数据－模型映射

Quantitative Application Methods of Green Building Evaluation Systems in Engineering Consulting Decision-Making

Tan Jiangling

Mingke Construction Consulting Co., Ltd., Chongqing 400020

Abstract： This paper focuses on the quantitative application of green building evaluation systems in engineering consulting decision-making, aiming to address the disconnection between evaluation and practice and provide a scientific pathway for decision-making throughout the entire project lifecycle. It quantitatively analyzes and transforms the green building evaluation system, categorizing evaluation indicators into three types based on their quantitative attributes: absolute quantification, relative quantification, and semi-quantification. It clarifies the dynamic value-oriented role of weights and constructs a "indicator-data-model" mapping relationship to form a closed-loop decision-making system. A quantitative decision-making application framework is established for all stages of engineering consulting. During the project planning and feasibility study phases, green objectives and investment allocations are determined through threshold analysis and weight prediction. In the schematic design and preliminary design phases, technical solutions are selected using comparison matrices and marginal benefit analysis. During the construction drawing design and bidding phases, parameters are refined, and quantitative evaluation criteria are established to ensure design implementation. In the construction and operation phases, monitoring platforms and degradation early warning models are utilized to ensure performance compliance. Three core quantitative models—cost-benefit analysis, multi-objective decision optimization, and uncertainty and risk assessment—are detailed to address issues of cost-value balance, multi-objective conflicts, and risk early warning, respectively. Through system quantification, stage framework construction, and model application, this study upgrades the green building evaluation from a static tool to a dynamic decision support system, aiding engineering consulting in maximizing the comprehensive value of projects.

Keywords： green building evaluation system; engineering consulting decision-making; quantitative application; indicator-data-model mapping

引言

随着全球可持续发展战略的深入推进与我国“双碳”目标的明确提出，绿色建筑已成为建筑行业转型升级的核心方向，其从理念到实践的落地离不开科学高效的工程咨询决策支撑。工程咨询作为项目全生命周期的核心决策支撑环节，涵盖项目策划、方案设计、施工管控至运营维护等关键阶段，其决策的科学性直接决定绿色建筑目标的落地质量。在此背景下，如何将绿色建筑评价体系的指标、权重等核心要素进行量化解析与转化，构建适配工程咨询全流程的量化决策框架，成为突破行业发展瓶颈的关键议题。本文以此为出发点，聚焦绿色建筑评价体系在工程咨询决策中的量化应用方法展开研究。对评价体系的量化属性、权重导向及“指标－数据－模型”映射关系进行系统解析，解决“评价要素如何转化为决策工具”的核心问题；针对工程咨询全生命周期各阶段的决策需求，搭建分阶段量化应用框架，明确不同阶段的量化重点与实施路径；详解成本效益分析、多目标决策优化、不确定性风险评估等核心量化模型，为决策提供可操作的计算方法。研究旨在推动绿色建筑评价从“静态达标工具”升级为“动态决策支持系统”，为工程咨询提供“有依据、可计算、可落地”的量化路径，最终实现绿色建筑项目经济、环境与社会综合价值的最大化，为建筑行业高质量可持续发展提供理论与实践支撑。

一、绿色建筑评价体系的量化解析与转化

（一）评价指标的量化属性分析

国内的建筑行业一直处于粗放型的方式，在绿色建筑评价体系领域发展的比较晚，到上世纪末我国才把绿色建筑的研究确立为国家的重点项目，以适应我国的可持续发展战略。随后几年时间在绿色建筑相关领域开始逐渐的得到发展，进行了节约能源和相关政策的研究^[1]。在绿色建筑评价体系中，评价指标按量化属性分为三类，协同应用于工程决策。绝对量化指标以具体数值为底线门槛，用于方案合规性筛选，不满足则否决；相对量化指标以比率为效益标尺，对合规方案进行成本－效益排序；半量化指标则以分级评分为综合补充，通过评估舒适度等软性性能对排序结果进行微调^[2]。三者协同运作，先筛选合规方案，再进行效益排序，最后微调优化，从而选出兼顾合规性、效益性与适用性的最优方案，避免单一指标导致的决策片面性。

（二）评价权重的决策意义与应用

绿色建筑评价体系的权重分配，依据国家战略、区域需求和建筑类型，对不同绿色维度的重要性进行量化界定，体现了“价值导向”与“政策优先级”^[3]。在工程咨询决策中，权重的核心作用是明确决策重点，帮助在多目标冲突时优先保障高权重维度，实现资源最优配置。权重并非固定不变，而是随政策导向和区域特点动态调整，决策需首先识别其“价值倾向”，确保与宏观导向一致。国家标准采用“资源节约优先”导向，适用于全国通用项目，地方标准则根据区域特点调整。当多个方案均满足指标要求时，通过“权重加权得分”可筛选出与价值导向最匹配的方案，避免“唯得分论”导致的决策偏差^[4]。权重敏感分析通过模拟权重变化对得分的影响，识别高敏感维度，为政策调整和方案优化提供依据。在工程咨询全流程中，权重应用需遵循“动态调整”原则，根据项目阶段和目标变更灵活调整侧重点，提升决策效率与精准度。

（三）构建面向决策的“指标－数据－模型”映射关系

“指标－数据－模型”映射关系是绿色建筑评价体系转化为工程咨询决策实用工具的核心桥梁，以“决策需求”为导向，将评价指标、数据来源与量化模型精准匹配，形成“指标定维度、数据供依据、模型出结论”的闭环系统，解决评价与实践脱节问题^[5]。构建该映射需从明确决策需求入手，根据技术选型、成本控制、风险评估、等级达标等不同需求匹配相应指标。数据是分析基础，需确保准确性与一致性，绝对量化指标依赖权威模拟或检测，相对量化指标强调统计口径一致，半量化指标则结合客观数据与专家评估，同时建立数据校验机制保障真实有效。模型是分析核心，需具备针对性、可操作性与科学性^[6]。映射关系需动态调整，随标准更新优化指标与数据，并根据项目类型调整细节。落地可依托数字化工具实现可视化与自动化，提升决策效率。通过“指标－数据－模型”映射，绿色建筑评价从静态工具升级为动态决策支持系统，为工程咨询提供“有依据、可计算、可落地”的量化路径，实现项目综合价值最大化。

二、工程咨询各阶段的量化决策应用框架

（一）项目策划与可行性研究阶段

项目策划与可行性研究阶段是绿色建筑“定方向、判可行”的关键环节，核心决策需求包括确定绿色建筑目标等级、评估技术应用的经济与环境可行性、测算绿色投资的成本收益比，以避免后期定位偏差导致的资源浪费^[7]。此阶段以“宏观评估＋可行性论证”为核心，通过指标阈值分析、权重导向预判与效益量化测算，为项目绿色定位提供科学依据。目标等级的确定需结合政策要求、项目定位与成本承受能力，通过“评价得分阈值反推”与“权重敏感分析”实现量化论证。可行性研究阶段需量化预测项目全生命周期的绿色效益，将评价指标转化为经济与环境效益参数。基于评价权重的价值导向，可实现绿色投资的精准分配，

优先向高权重、高“得分提升效率”的领域倾斜，确保投资与权重价值一致，最大化单位投资的绿色得分收益。

（二）方案设计与初步设计阶段

方案设计与初步设计阶段是绿色建筑“定技术、优方案”的核心环节，核心决策需求包括筛选最优绿色技术组合、平衡绿色性能与建设成本、规避技术方案的合规性风险。此阶段以“方案比选 + 性能优化”为核心，通过指标量化对比、多目标决策模型与得分缺口预演，锁定技术方案的最优解^[8]。基于评价指标的量化参数，构建“多维度比选矩阵”，对不同技术方案进行横向对比。针对评价指标的短板维度，通过“得分缺口预演”与“参数微调”实现性能优化。首先测算当前得分与目标得分的缺口，再拆解至具体指标，通过调整技术参数填补缺口。优化过程中需避免“过度优化”，通过“边际效益分析”判断优化临界点，实现“性能 - 成本”平衡。利用绝对量化指标的阈值要求，预判初步设计方案的合规风险，避免后期返工。

（三）施工图设计与招投标阶段

施工图设计与招投标阶段是绿色建筑“定细节、控落地”的关键环节，核心决策需求包括将绿色设计指标转化为施工图技术参数、明确施工单位的绿色履约要求、控制绿色建材与设备的采购成本^[9]。此阶段以“参数落地 + 履约约束”为核心，通过指标参数细化、量化评标标准与成本阈值管控，确保绿色设计意图精准传递至施工环节。将评价指标拆解为施工图中的具体技术参数，避免设计与施工脱节。同时设置“量化检验点”，为施工后检测提供依据。将绿色建筑评价要素纳入评标体系，通过“量化分值”引导施工单位重视绿色履约。设置“绿色施工专项评分”，明确“绿色建材采购率”“施工扬尘控制”“可再生能源安装精度”等评分项，避免主观判断，优选绿色施工能力强的单位。基于成本敏感分析，设定绿色建材与设备的“采购成本阈值”，避免超支^[10]。测算不同品牌产品的“成本 - 性能比”，设定最高采购单价，并在招标文件中明确“成本超阈值否决条款”。通过“批量采购”“长期协议”降低成本，确保在满足指标要求的前提下控制成本在预算范围内。

（四）施工与运营阶段

施工与运营阶段是绿色建筑“保达标、提效益”的落地环节，核心决策需求包括监控施工过程绿色指标达标情况、优化运营阶段资源消耗与维护策略、应对长期性能衰减风险。此阶段以“过程监控 + 动态优化”为核心，通过实时数据监测、得分趋势分析与风险预警模型，确保绿色性能持续达标。在施工阶段，构建“绿色性能监控平台”，实时监测扬尘、噪声、水资源循环利用等指标，自动触发预警并记录整改措施，生成绿色得分周报，及时调整施工方案，避免阶段得分过低影响最终评定。在运营阶段，基于得分趋势分析优化运营策略，通过“得分 - 效益联动分析”实现绿色性能与经济效益协同提升。针对长期性能衰减，建立“指标衰减预警模型”，预判得分下降趋势并提前制定维护或更换

计划，预留专项资金。同时建立“问题追溯机制”，定位得分异常根源并快速响应。通过“多方协同”机制，将量化要求传递给施工单位、运维团队和用户，形成全员参与的绿色管控模式，确保绿色建筑全周期性能稳定达标。

三、核心量化决策模型与方法详解

（一）成本效益分析模型

成本效益分析模型是绿色建筑中实现“成本 - 价值平衡”的核心工具，通过量化项目全生命周期内的绿色增量成本与收益，计算投资回收期、净现值、效益成本比等关键指标，为“是否投入绿色资源”及“投入多少”提供科学依据。该模型以全生命周期为时间维度，区分为实现绿色性能所额外增加的成本与由此带来的经济收益及可货币化的非经济收益。在工程咨询中，该模型广泛应用于项目策划阶段的投资论证、方案设计阶段的技术选型及运营阶段的策略优化。该模型的应用不仅帮助判断绿色技术的经济可行性，还通过参数调整与策略优化，实现绿色投入与经济回报的平衡，确保决策的科学性与全面性。

（二）多目标决策优化模型

在绿色建筑工程咨询中，决策常面临“提升绿色性能”与“控制建设成本”“缩短工期”“保障使用功能”等多目标冲突问题，单一目标的最优解往往不是整体最优。多目标决策优化模型通过量化各目标权重与方案表现，生成最优解，为决策提供“平衡最优”的依据。该模型适用于方案设计阶段的技术组合选型与施工图阶段的参数优化，核心流程包括“目标量化 - 权重赋值 - 方案排序”，常用方法如 TOPSIS 法因其能处理定量与定性目标、逻辑清晰而被广泛应用。TOPSIS 法通过计算方案与“正理想解”和“负理想解”的距离，确定相对贴近度，贴近度越接近 1，方案越优。该模型通过科学量化与系统分析，帮助决策者在复杂目标中找到最优平衡点。

（三）不确定性与风险评估模型

绿色建筑项目全生命周期中存在大量不确定性因素，可能导致绿色性能不达标或成本超支。不确定性与风险评估模型通过量化这些因素的概率分布及其对决策目标的影响，识别高风险因素并计算风险发生概率，为决策提供风险预警与应对策略，适用于项目策划、施工及运营各阶段。该模型的核心流程是“识别不确定性因素 - 量化概率分布 - 分析影响程度 - 评估风险等级”，常用方法包括蒙特卡洛模拟法、故障树分析法和敏感性分析法，其中蒙特卡洛模拟法因能处理多因素、非线性问题而应用最广泛。蒙特卡洛模拟通过为每个不确定性因素设定概率分布，进行大量随机抽样模拟，统计目标值的概率分布，评估风险是否超出容忍阈值。该模型通过科学量化与系统分析，帮助项目在全生命周期中有效识别、评估和应对风险，保障绿色性能与经济目标的双重实现。

四、结束语

本文围绕绿色建筑评价体系在工程咨询决策中的量化应用展开系统性研究，旨在破解传统评价与决策脱节的行业痛点，为绿色建筑全生命周期的科学决策提供可落地的方法论支撑。绿色建筑评价体系的量化应用仍需在实践中不断完善，未来可进一步探

索数字化技术与量化模型的深度融合，提升决策的时效性；同时针对不同建筑类型的差异化需求，可细化量化指标与模型参数，增强方法的适配性。相信随着研究的持续深入与实践的不断检验，绿色建筑评价体系在工程咨询决策中的量化应用将愈发成熟，为推动建筑行业高质量可持续发展注入更强动力。

参考文献

[1] 崔庆飞. 基于 AHP 和结构熵权的公共建筑绿色评价研究 [D]. 河北工程大学 ,2015.

[2] 高蓓超. 绿色建筑方案设计评价与决策体系研究 [D]. 南京林业大学 ,2015.

[3] 汪楠楠. 绿色建筑评价体系发展探讨 [J]. 安徽建筑 ,2014,21(04):178-179.DOI:10.16330/j.cnki.1007-7359.2014.04.098.

[4] 张茶子. 结构体系绿色度的评价标准构建研究及定性分析 [D]. 辽宁工程技术大学 ,2013.

[5] 侯玲. 基于费用效益分析的绿色建筑的评价研究 [D]. 西安建筑科技大学 ,2006.

[6] 刘春江. 绿色建筑评价技术与方法研究 [D]. 西安建筑科技大学 ,2005.

[7] 李军辉. 绿色建筑评价体系在建筑工程中的应用研究 [C]// 中国国土经济学会2024年学术年会(三)论文集 .2025:1-4.

[8] 陈柳钦. 绿色建筑评价体系探讨 [J]. 建筑经济 ,2011(6):48-51.

[9] 范仙明. 绿色建筑评价体系浅析 [J]. 绿色建筑 ,2016(6):45-48.DOI:10.3969/j.issn.1004-1672.2016.06.018.

[10] 王胜玲. 绿色建筑评价体系研究 [D]. 湖南 : 中南大学 ,2013.DOI:10.7666/d.Y2686015.

装配式混凝土结构施工阶段节点连接性能优化 与质量管控机制实践

陆锟

灌阳县住房和城乡建设局, 广西 桂林 541000

DOI:10.61369/ERA.2025110033

摘 要 : 本文围绕装配式混凝土结构施工阶段的节点连接性能与质量管控展开研究,旨在提升节点连接可靠性及结构整体性能。系统剖析了套筒灌浆、浆锚搭接、叠合构件及螺栓连接等主流节点连接技术的施工工艺,并明确了施工阶段节点需满足的承载能力、刚度、延性、耐久性、抗震性能等核心目标与验收标准。基于“人机料法环测”系统工程模型,全面识别了影响节点连接质量的关键因素,并定性评估了灌浆不饱满、钢筋错位、粘结不良等典型质量缺陷对结构性能的负面影响,揭示了质量管控的必要性与紧迫性。在此基础上,创新性地构建了一套覆盖“事前预防—事中控制—事后改进”全流程的节点连接性能优化与质量管控集成机制。实践表明,该集成机制能够显著提升节点连接施工质量,有效预防质量缺陷,保障结构性能满足设计要求,为装配式建筑的高质量发展提供系统性的技术支撑与管理范式。

关 键 词 : 装配式混凝土结构; 节点连接; 性能优化; 质量管控

Practice of Performance Optimization and Quality Control Mechanism for Joint Connections in Prefabricated Concrete Structures During Construction

Lu Kun

Guanyang County Housing and Urban-Rural Development Bureau, Guilin, Guangxi 541000

Abstract : This paper focuses on the joint connection performance and quality control of prefabricated concrete structures during the construction phase, aiming to enhance the reliability of joint connections and the overall structural performance. It systematically analyzes the construction techniques of mainstream joint connection technologies, including sleeve grouting, grout-anchored lap splicing, composite components, and bolt connections. It also specifies the core objectives and acceptance criteria for joint connections during construction, such as load-bearing capacity, stiffness, ductility, durability, and seismic performance. Based on the "man-machine-material-method-environment-measurement" systems engineering model, the paper comprehensively identifies key factors affecting the quality of joint connections and qualitatively assesses the negative impacts of typical quality defects, such as insufficient grouting, steel bar misalignment, and poor bonding, on structural performance. This reveals the necessity and urgency of quality control. On this basis, an innovative integrated mechanism for performance optimization and quality control of joint connections throughout the entire process of "pre-construction prevention—in-process control—post-construction improvement" has been established. Practical applications demonstrate that this integrated mechanism can significantly enhance the stability and reliability of joint connection construction quality, effectively prevent quality defects, and ensure that structural performance meets design requirements. It provides systematic technical support and a management paradigm for the high-quality development of prefabricated buildings.

Keywords : prefabricated concrete structure; joint connection; performance optimization; quality control

引言

随着我国建筑工业化进程的加速和“双碳”战略目标的提出,装配式混凝土结构因其生产效率高、资源消耗低、环境污染少、质量可控性强等显著优势,已成为推动建筑产业转型升级和实现绿色建造的重要发展方向。在装配式混凝土结构体系中,构件间的节点连接

是传递内力、保证结构整体性、刚度和稳定性的“生命线”，其施工质量直接决定了整个建筑结构的安全性能、抗震性能和耐久性能，是装配式建筑从“可装配”迈向“高性能”的关键技术瓶颈。因此对装配式混凝土结构施工阶段的节点连接性能进行优化，并建立科学有效的质量管控机制，具有重大的理论价值和迫切的工程实践需求。鉴于此，本文以解决装配式混凝土结构施工阶段节点连接的实际问题为导向，旨在突破传统研究视角的局限，构建一套性能优化与质量管控双轮驱动的系统性解决方案。

一、装配式混凝土结构节点连接技术体系与性能要求

（一）主流节点连接的施工工艺剖析

装配式建筑节点连接是非常关键的技术，对装配式结构整体性起到了关键

性决定作用，节点连接通常会存在“强节点，强锚固”要求^[1]。装配式混凝土结构工程中，套筒灌浆连接主要用于竖向构件拼接，施工需严格遵循“定位—密封—灌浆—养护”流程，确保吊装定位精准、密封防漏浆、灌浆密实并充分养护；浆锚搭接连接多用于水平钢筋连接，关键在于清理孔道、控制钢筋插入深度、缓慢灌浆保证无气泡并封堵养护；叠合构件连接通过现浇叠合层实现整体受力，核心是新旧混凝土粘结，需对预制构件表面凿毛处理、保证钢筋连接质量、混凝土振捣密实且养护期间避免扰动；螺栓连接主要用于临时固定或钢混组合节点，重点控制预埋件精度、螺栓按设计扭矩分次对称紧固，完成后复检扭矩并防腐，及时拆除临时螺栓。

（二）施工阶段节点连接的性能目标与验收标准

施工阶段节点连接的性能目标需围绕结构安全性、适用性、耐久性展开，验收标准应严格遵循国家与行业规范，确保节点质量满足设计要求^[2]。性能目标涵盖承载能力、刚度、延性、耐久性^[3]及抗震性能，承载能力要求节点在设计荷载下不发生强度破坏；刚度需与整体结构匹配，避免变形超标；延性要求节点在地震等偶然荷载下具备塑性变形能力，避免脆性破坏；耐久性需保证在设计年限内抵抗环境侵蚀，采取防腐、加厚保护层等措施；抗震性能需满足抗震等级要求，确保“强节点弱构件”。验收贯穿施工全过程，分为材料验收、施工过程验收、实体质量验收和性能检测四个环节^[3]。材料验收需核查质量证明文件并抽样检验，确保预制构件、套筒、灌浆料等符合标准；施工过程验收聚焦关键工序，实时检查并记录；实体质量验收通过外观检查、尺寸测量和无损检测验证节点质量，如采用超声波检测灌浆饱满度；性能检测通过静力加载、拟静力试验等验证节点力学性能，由第三方机构实施，确保节点承载能力、延性等达标。

二、施工阶段节点连接性能影响因素与质量缺陷分析

（一）基于系统工程的节点连接质量影响因素识别

从系统工程视角出发，“人机料法环测”模型全面覆盖了装配

式混凝土结构节点连接质量的核心影响因素，各因素相互关联，共同决定节点性能与质量水平^[4]。人是质量管控的核心变量，施工人员的专业能力、责任意识直接影响操作规范性，如未接受系统培训，易出现灌浆排气不当、钢筋插入深度不足等问题；管理人员若质量意识薄弱、巡检不到位，会导致质量问题从施工环节传导至最终节点性能^[5]。机指施工与检测设备的性能精度及运维状况，吊装设备精度不足会导致构件碰撞、钢筋偏移；灌浆泵压力不稳影响灌浆密实度；检测设备未定期校准则数据失真，无法准确识别缺陷。设备维护不到位还会引发故障，中断施工并留下隐患。料是节点性能的物质基础，预制构件尺寸偏差、强度不足影响安装精度与受力性能；套筒、灌浆料、螺栓等连接材料若质量不合格，会直接削弱节点承载力与耐久性。材料进场验收不严，则从源头埋下风险^[6]。法强调施工方法的科学性与规范性，施工方案若未明确流程与参数，或工艺选择不当，会降低节点性能；技术交底不清晰、随意变更流程，也会导致操作失误，影响质量^[7]。环指施工环境对材料操作的影响，温度过高或过低会影响灌浆料强度发展；湿度、大风、暴雨等天气会干扰施工与材料性能；场地狭窄、作业空间受限则间接影响安装精度。测关注质量检测与监测体系的完善性，若检测制度不健全、方法不合理，会漏判隐性缺陷；监测数据收集不及时、分析不到位，则无法实现动态管控，留下安全隐患。通过“人机料法环测”全要素管控，可系统保障装配式节点连接质量，提升结构整体性能与可靠性。

（二）质量缺陷对结构性能影响的定性评估

装配式混凝土结构节点连接的施工质量缺陷会显著削弱结构的承载能力、刚度、延性、耐久性及抗震性能，其中套筒灌浆不饱满、浆锚搭接钢筋错位、叠合梁新旧混凝土粘结不良、螺栓松动及核心区混凝土不密实等问题尤为突出^[8]。套筒灌浆不饱满会破坏钢筋与套筒的粘结传力体系，导致钢筋拔出、节点承载力下降，并加速钢筋锈蚀，形成恶性循环；浆锚搭接钢筋错位则造成应力集中与传力不均，降低节点刚度和延性，增加脆性破坏风险；叠合梁新旧混凝土粘结不良使结合面滑移，削弱梁体整体受力性能，导致挠度增大、抗震能力下降；螺栓松动会降低节点预紧力，引发构件滑移，影响结构稳定性与抗震耗能能力；核心区混凝土不密实则直接削弱节点抗压与抗剪能力，易引发压溃或剪切破坏，威胁结构整体安全^[9]。各类缺陷虽影响侧重点不同，但均可能引发结构性能退化甚至安全事故，因此需针对成因采取严格的质量管控措施，从源头预防缺陷，及时修复，确保节点连接质

量满足设计与规范要求，保障结构安全可靠。

三、节点连接性能优化与质量管控集成机制构建

（一）总体思路与框架设计

为构建装配式混凝土结构节点连接性能优化与质量管控的集成机制，需以“全生命周期管控、多技术融合、风险前置防控”为核心原则，打破传统事后补救模式，形成覆盖施工全流程的闭环管理体系^[10]。总体思路是以节点连接性能目标为导向，整合“人机料法环测”六大影响因素，融合 BIM 技术、精益建造、智能监测等手段，建立“事前预防—事中控制—事后改进”三级管控框架，推动质量管控从被动验收向主动管控转变，保障结构整体性能达标。该机制分为目标层、技术层、实施层与保障层四个维度，目标层依据规范与项目需求制定量化性能指标；技术层整合 BIM、精益建造、智能传感与标准化管理等技术形成协同工具包；实施层分事前审查、事中巡检、事后反馈三阶段落具体管控措施；保障层则通过组织、制度、人员与资源四方面支撑机制有效落地。整体形成“目标引领—技术支撑—分步实施—保障到位”的完整管控框架，实现节点连接质量的主动、动态、全流程管控，为装配式建筑的高质量发展提供系统性支撑。

（二）基于 BIM 与精益建造的技术优化

事前预防是节点连接质量管控的关键环节，通过 BIM 技术与精益建造的深度融合，可在施工前发现潜在风险、优化技术方案，从源头减少质量缺陷。在 BIM 技术应用方面，建立全专业协同的 BIM 模型，实现节点连接设计的可视化与碰撞检查，将预制构件尺寸、钢筋位置、套筒坐标等信息精准录入，形成包含节点细节的三维模型，并通过多专业碰撞检测排查钢筋与套筒位置冲突、构件与现浇部分尺寸偏差等问题，提前解决设计矛盾，避免现场施工时出现钢筋无法插入、构件无法对接等困难。同时利用 BIM 模型进行施工模拟，分析不同施工方案的可行性与效率，优化施工组织设计，例如模拟套筒灌浆顺序、构件吊装路径，确定最优方案，并生成直观的三维交底文件，明确关键参数，减少操作偏差。在精益建造方面，通过流程优化与浪费消除提升施工精细化水平，进行价值流分析识别非增值活动，制定关键工序的标准化作业流程，明确操作步骤与质量标准；采用拉动式生产模式优化材料供应与构件运输，精准调配资源，避免积压或短缺；建立精益化质量预控体系，针对人机料法环测因素制定预控措施，如通过 BIM 交底与培训提升人员技能，建立材料追溯系统，关联气象数据预测环境变化并制定应对措施，从而全面提升节点连接施工质量与效率。

（三）基于标准化与信息化的过程管控

事中控制是确保节点连接质量符合要求的核心环节，通过建立标准化操作流程与信息化监测系统，实现施工过程的动态管控，及时发现并纠正质量偏差。在标准化管理方面，制定覆盖全

工序的操作手册，明确各工序的技术参数、操作方法与质量检查标准，如浆锚搭接的孔清理要求、钢筋插入深度、灌浆压力控制等，并推行“样板引路”制度，在正式施工前制作节点样板并组织培训与验收，确保施工质量一致。同时，建立标准化质量检查制度，明确检查频率、方法与合格标准，如构件吊装后检测轴线与标高偏差、灌浆过程中抽查压力与出浆情况，确保全过程受控。在信息化管控方面，构建基于移动终端与云平台的质量管理系统，实现施工数据实时采集、分析与反馈，施工人员通过移动设备上传构件安装、灌浆、钢筋连接等关键数据，智能传感器自动采集灌浆压力、时间、流量等信息并同步至云平台，系统实时比对数据与标准，超标时立即预警并推送整改指令，形成“数据采集—实时分析—预警整改”的闭环。此外，系统建立“一节点一档案”，将人员、设备、材料、检测数据与 BIM 模型关联，实现质量全程可追溯；结合视频监控对关键工序实时监督，杜绝违规操作，进一步强化过程管控力度。

（四）事后改进与智能监测

事后改进与智能监测是节点连接质量管控的重要延伸环节，通过缺陷修复、经验总结与长期性能监测，持续提升节点连接质量水平，保障结构长期安全。在事后改进方面，针对灌浆不饱满、螺栓松动、结合面裂缝等常见缺陷，制定分类修复方案，如小空洞采用钻孔注浆、大空洞需局部返工，裂缝则视宽度进行封闭或重浇，修复后组织多方验收。同时建立质量缺陷数据库，统计分析高频问题及成因，优化施工工艺与人员培训，并将成熟措施纳入标准，形成持续改进机制。在智能监测方面，通过在关键节点布设应变、位移、腐蚀及温湿度传感器，实时采集节点受力状态、变形与耐久性数据，结合云平台大数据分析建立性能退化模型，预测长期性能变化趋势，实现异常预警与动态维护，为装配式结构的长期安全运行提供技术支撑。

四、结束语

装配式混凝土结构作为建筑工业化的重要载体，其高质量发展离不开核心技术的持续攻关。本文聚焦于施工阶段这一关键环节，围绕节点连接性能优化与质量管控机制两大核心命题，开展了系统性的研究与实践。通过对主流节点连接技术的工艺剖析，揭示了影响其施工质量的深层原因；通过多维度因素分析，提出了针对性的性能优化策略；并在此基础上，创新性地构建了一套融合精益建造理念与 BIM 信息化技术的全过程、集成化质量管控机制。研究表明，该套策略与机制能够有效识别并控制施工风险，显著提升节点连接的施工质量稳定性和结构性能可靠性，为解决当前装配式建筑节点连接质量通病提供了系统性的解决方案和可复制的管理范式，具有重要的理论指导意义和工程应用价值。本文提出的优化策略与管控机制虽在理论分析和案例实践中得到了验证，但其普适性仍需在更多不同地域、不同结构

类型、不同施工条件的工程项目中进行大范围的检验与修正。装配式混凝土结构节点连接的性能优化与质量管控是一项长期而艰巨的系统工程，本文的研究仅为该领域的发展贡献了一份绵薄之力，期望未来能有更多的学者和工程技术人员投身其中，共同推动我国装配式建筑技术迈向新的高峰，为建设美丽中国、实现可持续发展做出更大贡献。

参考文献

[1] 朱祥. 装配式混凝土结构施工现场连接技术与质量控制研究 [D]. 陕西：西安建筑科技大学, 2020.

[2] 应家文. 全装配式混凝土框架梁柱新型连接节点抗连续倒塌性能研究 [D]. 江西：南昌大学, 2024.

[3] 钱磊. 机械式连接预制装配式混凝土框架节点抗震性能研究 [D]. 江苏：扬州大学, 2024.

[4] TEY MING WANG 郑茗旺. 装配式混凝土结构连接质量检测技术及装置研究 [D]. 浙江：浙江大学, 2021.

[5] 宋云. 装配式混凝土结构施工质量影响因素研究——以信达·泰禾 SH 院子为例 [D]. 江西：江西理工大学, 2019.

[6] 张猛. 装配式框架结构施工阶段的动态性能实验研究 [D]. 河北：河北大学, 2017.

[7] 朱建华. 装配式混凝土框架结构施工控制研究 [D]. 苏州科技大学, 苏州科技学院, 2020.

[8] 崔雷. 装配式混凝土结构施工管理技术研究 [D]. 上海：同济大学, 2019.

[9] 陈冬旭. 复合耗能装配式混凝土梁柱节点抗震性能研究 [D]. 江苏：扬州大学, 2023.

[10] 姜效亭. 装配式型钢混凝土柱连接处抗震性能研究与应用 [D]. 安徽建筑大学, 2016.

水闸施工工艺流程及质量控制分析

梁骏宇¹, 张良群²

1. 淮安新水建设有限公司, 江苏 淮安 223001

2. 江苏淮阴水利建设有限公司, 江苏 淮安 223001

DOI:10.61369/ERA.2025110002

摘 要 : 水闸工程作为水利枢纽的重要组成部分, 其施工工艺和质量控制直接关系到工程的安全性与耐久性。在施工过程中, 需综合考虑地基处理、混凝土浇筑、闸门安装等关键环节, 合理制定施工顺序与技术措施。施工质量控制贯穿于原材料选择、施工设备配置、工艺流程执行及成品检测全过程。通过建立严格的质量管理体系与标准化作业流程, 可有效预防质量通病, 提升工程整体质量水平。科学的施工工艺与精细化质量控制策略是保障水闸工程顺利实施的关键。

关 键 词 : 水闸工程; 施工工艺; 质量控制; 混凝土浇筑; 闸门安装

Analysis of Construction Process Flow and Quality Control for Sluice Gates

Liang Junyu¹, Zhang Liangqun²

1. Huai'an Xinshui Construction Co., Ltd., Huai'an, Jiangsu 223001

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

Abstract : As a crucial component of water conservancy projects, sluice gate engineering's construction process and quality control directly impact the safety and durability of the project. During construction, it is essential to comprehensively consider key aspects such as foundation treatment, concrete pouring, and gate installation, and to reasonably formulate construction sequences and technical measures. Quality control in construction permeates the entire process, from raw material selection and construction equipment configuration to the execution of process flows and finished product inspection. By establishing a stringent quality management system and standardized operational procedures, common quality issues can be effectively prevented, and the overall quality level of the project can be enhanced. Scientific construction techniques and refined quality control strategies are pivotal for ensuring the smooth implementation of sluice gate engineering.

Keywords : sluice gate engineering; construction process; quality control; concrete pouring; gate installation

引言

随着水利基础设施建设的不断推进, 水闸在防洪调度、水资源调配及生态环境保护中发挥着日益突出的作用。作为控制水流的关键设施, 其施工质量不仅影响使用安全, 还关乎区域水利系统的整体效能。当前在水闸施工实践中, 仍存在工艺不规范、质量监管薄弱等问题, 亟需系统化梳理施工流程并强化全过程质量控制。通过深入分析水闸施工工艺流程及质量管理要点, 可为类似工程提供可借鉴的技术支持与实践指导。

一、水闸工程结构特点与施工要求

水闸作为水利工程中的重要控制结构, 广泛应用于河流、渠道、水库等水体中, 承担着调节水位、控制流量、防洪排涝和保障灌溉等多重功能。其结构设计不仅要满足水力学功能需求, 还要适应复杂多变的地质、水文环境, 对工程稳定性、安全性提出了极高的要求。水闸通常由闸室、闸门、启闭设备、墩柱、工作桥及控制系统等组成, 各部分结构之间需高度协调, 以保证运行的可靠性与长期耐久性。其中, 闸室结构需承受巨大水压力, 混

凝土浇筑质量直接影响其抗渗能力与整体稳定性; 闸门作为活动结构, 其安装精度和运行顺畅度是确保启闭灵活性和水流调控精度的关键; 启闭机及传动装置的稳定运行则关系到整个水闸功能的实现。

水闸施工要求具备高度的系统性与严密性, 体现在工序安排科学、材料选用合理、环境适应良好及技术实施专业。施工前需进行详细的地质与水文勘察, 软弱地基应通过高压旋喷、灌浆等方式加固, 提升承载力, 防止不均沉降引发结构问题。混凝土施工阶段应控制配合比、振捣密实, 关键部位如闸室与底板需采取

分层浇筑、设置止水带等措施，确保结构抗渗防裂。闸门安装需毫米级精度，借助反复调试与试验，保障运行顺畅、密封良好。施工期间还应实时监测水位变化、天气状况与设备运行状态，确保质量与进度同步可控。整体而言，水闸施工是多专业融合、全过程动态管控的系统性工程管理活动^[1]。

为满足现代水利工程日益提高的质量和安全生产要求，水闸施工过程中应贯彻“预控为主、过程为重、细节为基”的质量管理理念。这要求各参建单位从设计图纸审查、原材料进场检验、关键工序控制到成品验收等环节，建立起全过程、全要素、全员参与的质量控制体系。例如，混凝土强度、闸门防腐性能、启闭设备的运行稳定性等指标需实施分阶段检测和数据跟踪分析，及时发现并反馈整改。同时，引入信息化手段如 BIM 建模、施工监测系统等，可实现工程数据可视化、质量问题可追溯，大幅提升施工管理的科学性与精准度。结构特点决定了水闸工程容不得半点疏忽，施工要求决定了每一步操作都必须规范严谨，唯有以系统性思维和精细化管理双重保障，方能确保水闸工程的安全运行和长效服务。

二、水闸施工工艺流程及关键技术环节

水闸施工工艺流程具有系统性和阶段性，需依据设计图纸与现场地质、水文条件，科学安排施工步骤，确保各工序协调衔接。通常流程包括场地清理、测量放线、围堰筑护、基坑开挖与支护、地基处理、闸室混凝土施工、闸门及启闭设备安装、附属结构施工与验收等环节。各道工序相互依赖，并需具备前瞻性布局。例如，围堰工程为整个施工创造稳定环境，基坑与排水系统的设置确保作业区干燥；而混凝土结构如闸室和墩柱的施工，需按结构受力要求采取分段浇筑、合理布置施工缝，以保障整体稳定^[2]。

关键技术环节是控制质量与工期的核心。首先，地基处理是首要技术难点，针对软弱地基常采用高压旋喷、强夯、复合地基等方法，以增强地基承载力和稳定性。地基不牢将引发沉降和结构变形等风险。其次，混凝土施工需严格控制配合比、振捣密实及养护质量，防止蜂窝麻面、裂缝等常见问题，特别是温差裂缝控制与缝处理是保障结构完整的关键。再者，闸门与启闭设备安装精度要求高，需通过激光测量、试运行等手段，确保启闭灵活、密封可靠，尤其在多闸门联动系统中，精确调试可避免结构受力不均。

现代施工越来越多采用信息化手段提升管理效率和施工质量。例如测量定位中应用全站仪和 GPS 系统，提升施工精度；混凝土浇筑中使用智能温控系统监测水化热，优化浇筑与养护安排；闸门调试则借助传感器与智能平台，实时监控启闭状态和运行参数，实现远程管理。这些先进技术显著提高了水闸施工的自动化与规范化水平^[3]。因此科学组织施工流程与强化关键节点控制相结合，构建起高效、规范、可靠的水闸施工体系，为工程质量与运行安全提供有力保障。

三、影响水闸施工质量的主要因素

水闸施工质量受到多种因素的综合影响，这些因素既包括自

然条件的限制，也包括人为管理与技术水平的制约。自然环境因素是影响水闸施工质量的基础性前提。地质条件不良、地下水位高、水流湍急等情况，会直接增加施工难度。例如，在软弱地基区域，如果未能采取有效的地基加固措施，可能会导致结构沉降不均或局部失稳；而在雨季或枯水期交替频繁的地区，施工区域极易遭受水浸或水位波动影响，影响混凝土浇筑质量及设备基础稳固性。此外，气温、湿度等气候条件对混凝土养护及闸门安装精度也有较大影响，若控制不当，容易引发裂缝、变形或锈蚀等问题。因此，在项目启动前，必须全面评估自然条件，制定应对预案，并根据气候变化动态调整施工计划^[4]。

技术工艺水平和设备性能直接决定施工质量的可控性。水闸施工涉及多个专业工种和复杂结构工艺，任何一道工序中的技术失误都可能对整体工程造成不可逆的影响。尤其是在混凝土施工、钢筋绑扎、模板支设等基础性工序中，必须严格按设计图纸和规范施工，一旦出现模板变形、钢筋错位或振捣不密实等现象，将直接影响结构强度和耐久性。同时，施工机械和检测设备的先进程度与维护状况也在很大程度上影响着操作精度和施工效率。例如，启闭设备安装环节对设备精度要求极高，若使用精度不足或校准不严的测量工具，很难保证闸门轨道和止水面的垂直度与平整度，从而影响启闭灵活性和密封效果。因此，提升施工技术和保障设备良好运行状态，是确保施工质量的关键环节^[5]。

施工管理水平和质量控制体系的完善程度，是决定水闸工程能否顺利、高质量完成的核心因素。现场管理混乱、技术交底不到位、工序安排不合理等现象，极易造成施工质量事故。例如，混凝土浇筑过程中若施工进度安排不科学、冷缝处理不及时，将出现结构断层，降低抗渗能力。同时，对施工原材料如水泥、砂石、钢筋等的质量把控不到位，也会埋下质量隐患。质量控制体系应覆盖从原材料检验、施工过程监督到成品验收的全过程，确保每一个环节都处于可监测、可追溯状态。此外，施工人员的培训和质量意识也极为重要，只有建立起全员参与、全程控制的质量管理机制，才能有效防止质量问题的发生，确保水闸工程长期稳定运行。

四、水闸施工全过程质量控制策略

水闸施工全过程的质量控制应贯穿于工程准备、施工实施和竣工验收的各个阶段，构建系统性、闭环式的质量管理机制。在工程准备阶段，首先需组织专业技术人员对施工图纸进行会审，确保设计意图清晰可行，并结合现场地质、水文条件制定合理的施工组织设计与专项施工方案。对施工材料应严格把关，所有进场的混凝土、水泥、钢筋、止水材料等均需按规定进行性能检测，确保符合相关技术规范^[6]。此外，施工队伍的技术交底和岗前培训也不可忽视，需使操作人员充分了解质量控制要点及操作流程，为后续施工质量打下坚实基础。

进入正式施工阶段，各道工序必须严格执行规范化作业流程，重点把控关键控制点。在基坑开挖与地基处理过程中，应加

强对边坡稳定性和地下水位的监测，采取有效支护和排水措施，防止塌方与渗漏。混凝土施工中需确保模板安装牢固、振捣密实、养护到位，特别是闸室、墩柱等承压结构的浇筑应采取分段施工工艺，避免结构冷缝和蜂窝麻面等缺陷的产生。钢筋加工及安装过程中应重点控制钢筋间距、锚固长度和保护层厚度，确保结构受力性能。闸门及启闭设备安装环节则需通过高精度测量及反复调试，确保启闭灵活、密封严密。整个施工过程中要建立质量巡查和专人旁站制度，对重点工序实施动态管控，发现问题立即整改，防止质量隐患积累。

在竣工验收及后期质量评估阶段，需组织多方参与的综合验收小组，对工程实体质量、设备运行状态及施工资料进行全面检查。通过试运行、水密性试验、结构强度检测等手段，评估工程整体性能是否达到设计标准。同时，应建立工程质量档案和问题整改台账，对施工过程中出现的问题进行记录、分析与总结，为今后类似工程提供经验依据。随着信息化技术的发展，建议在水闸工程中推广 BIM 模型管理、智能监测系统等技术手段，实现对施工过程的可视化管理和对关键参数的实时监控，从而不断提升质量控制的科学性与效率^[7]。全过程、全方位、全责任制的质量控制策略，是实现水闸工程安全、高效、耐久运行的根本保障。

五、提升水闸施工质量的优化建议与实践路径

为进一步提升水闸施工质量，需在技术手段、管理机制及人员能力三方面进行综合优化，构建多维协同的质量保障体系。在技术层面应注重新材料、新工艺的推广应用，针对传统施工中易出现的混凝土裂缝、闸门漏水等问题，通过使用高性能混凝土、自密实混凝土和新型止水材料提升工程耐久性。同时，应引入信息化施工管理手段，如 BIM 技术、三维激光扫描和自动化监测系统，实现结构定位精度控制与施工过程实时可视化管理。据统计，通过 BIM 技术辅助管理的水闸项目，其施工误差控制精度可提高 30% 以上，有效减少返工次数和质量缺陷，显著提高了施工

效率与质量稳定性。

完善质量控制管理体系是保障施工质量持续提升的核心。建议各施工单位建立“项目经理—专业工程师—工序班组”三级质量管理架构，强化岗位责任制和质量追溯机制，对关键工序实行专人旁站与全程记录管理。同时，施工前应组织质量目标责任书签订与技术交底，确保每一道工序的质量标准和控制要点落实到位。在材料进场、设备安装、结构验收等关键环节，需坚持“先检后用”“不合格不使用”的原则，杜绝质量问题源头隐患^[8]。此外，加强与设计、监理、业主三方的协同联动，建立质量问题联合评审和快速反馈机制，可使问题平均处理周期缩短 40%，大大提升整改效率与施工进度。

应高度重视施工队伍的专业素养与技能水平，通过常态化培训、技术比武及现场观摩等方式不断提升作业人员质量意识与技术能力。实践表明，在组织开展标准化操作培训后，一线作业人员操作合格率提升至 95% 以上，有效降低了因操作不当引起的质量问题。同时，应建立质量激励机制，对在施工中严格执行规范、发现质量隐患并及时上报的个人和团队给予奖励，形成全员关注质量、主动控制风险的良好氛围。通过“技术支撑 + 管理强化 + 人才保障”的多维路径，推动水闸施工质量持续优化，为水利工程的安全运行和社会效益的全面实现提供坚实基础。

六、结束语

水闸作为重要的水利控制工程，其施工质量直接关系到工程安全运行和区域水资源管理成效。通过系统梳理施工工艺流程、分析关键技术环节与影响因素，并提出全过程质量控制策略和优化建议，能够有效提升水闸工程建设的规范化和科学化水平。在日益严峻的水资源调控与防洪形势下，唯有坚持技术创新、强化管理、严控细节，方能实现水闸施工的高质量、高标准与高效能，确保工程长期稳定运行，真正发挥其在水利体系中的关键作用。

参考文献

[1] 单志勇，吴平连. 中小水闸施工工艺探讨及质量控制分析 [J]. 科技展望, 2016, 26(14): 86.
[2] 卢国辉. 水闸施工工艺探讨及质量控制分析 [J]. 建材与装饰, 2017, (52): 290-291.
[3] 余乔楠. 水闸施工工艺及质量控制分析 [J]. 江西建材, 2019, (06): 131-132.
[4] 叶建河. 水利工程水闸施工工艺流程与质控对策 [J]. 山西水利, 2022, (01): 58-60.
[5] 吴英成. 水利工程中水闸施工工艺要点及施工质量控制分析 [J]. 珠江水运, 2022, (09): 79-81.DOI: 10.14125/j.cnki.zjsy.2022.09.006.
[6] 刘浏昊知，刘晨阳. 水利工程中水闸施工工艺要点及施工质量控制分析 [J]. 工程建设与设计, 2023, (20): 156-158.DOI: 10.13616/j.cnki.gcjsysj.2023.10.251.
[7] 林观涛. 水利工程水闸施工工艺流程与质控对策分析 [J]. 工程技术研究, 2023, 8(20): 93-95.DOI: 10.19537/j.cnki.2096-2789.2023.20.031.
[8] 刘艳，张胜利. 水利工程中水闸施工工艺要点及施工质量控制分析 [C]// 中国水利学会城市水利专业委员会. 第七届城市水安全与水管理学术研讨会论文集. 山东菏泽黄河工程有限公司, 2024: 112-114.DOI: 10.26914/c.cnkihy.2024.026810.

智慧水务背景下供水管网漏损监测的物联网技术集成与漏点定位精度提升

任静

河北省邯郸市供水有限责任公司冀安新区分公司, 河北 邯郸 056000

DOI:10.61369/ERA.2025110008

摘 要 : 本文聚焦智慧水务背景下的供水管网漏损监测问题, 针对漏损制约供水系统高效运行的现状, 研究了物联网技术集成与漏点定位精度提升策略。本研究为智慧水务背景下供水管网漏损的精准监测与高效管理提供了有力技术参考, 助力供水系统智能化升级与高效运行。

关 键 词 : 智慧水务; 供水管网; 漏损监测; 物联网技术

Integration of Internet of Things (IoT) Technologies and Enhancement of Leak Point Location Accuracy for Water Supply Network Leakage Monitoring Under the Background of Smart Water Management

Ren Jing

Ji'an New District Branch, Handan Water Supply Co., Ltd., Handan, Hebei 056000

Abstract : This paper focuses on the issue of leakage monitoring in water supply networks under the context of smart water management. Addressing the current situation where leakage restricts the efficient operation of water supply systems, it investigates strategies for the integration of Internet of Things (IoT) technologies and the enhancement of leak point location accuracy. This study provides a robust technical reference for the precise monitoring and efficient management of water supply network leakage under the smart water management framework, facilitating the intelligent upgrade and efficient operation of water supply systems.

Keywords : smart water management; water supply network; leakage monitoring; Internet of Things (IoT) technologies

引言

传统漏损监测方式依赖人工巡检与经验判断, 存在响应滞后、定位精度低、覆盖范围有限等问题, 已无法满足现代化供水管理的需求。因此如何通过物联网技术的集成应用构建全域感知、智能分析的漏损监测体系, 如何融合多源数据提升漏点定位精度, 成为当前智慧水务领域亟待解决的关键课题。本文聚焦智慧水务背景下供水管网漏损监测的技术突破, 系统梳理漏损机理与物联网技术体系, 设计多层级物联网集成架构, 并提出基于多源数据融合的定位精度提升策略, 旨在为实现供水管网漏损的“早发现、早定位、早修复”提供理论支撑与技术参考, 助力供水系统向高效化、智能化转型。

一、相关理论与技术基础

(一) 供水管网漏损机理与特征分析

部分城市的管网缺乏统一规划与标准化建设, 存在管道布置不合理、阀门老化、接头漏水等问题, 这些因素都加剧了漏损现象的发生^[1]。供水管网漏损是制约供水系统高效运行的关键问题, 其机理涉及多方面因素的综合作用。管道自身材料老化是重要内因, 金属管道易因电化学腐蚀形成锈洞并扩大漏水; 塑料管道可能因紫外线、温度变化产生应力疲劳开裂, 接口处更易因收缩不

一致渗漏。外部环境影响显著, 地质活动使管道受不均匀外力, 应力超限会导致断裂或接口松动; 施工不当会让回填土硬物持续磨损管道, 形成漏点。漏损呈现明显动态特征, 时间上, 用水高峰期水压高则漏损量增加, 夜间水压稳定则漏损平缓; 空间上, 老城区管网漏点密集, 新建城区施工区域周边可能因外力扰动集中漏损。漏损形式包括明漏和隐蔽暗漏, 后者长期耗水且难发现。

(二) 物联网核心技术体系

物联网技术为供水管网的智能化监测提供了重要支撑, 其核

心技术体系涵盖感知层、网络层和应用层三个层面^[2]。感知层通过压力传感器（监测漏水水压异常）、流量传感器（捕捉流量波动）及智能水表（识别异常用水模式）实时采集管网状态数据；网络层借助 LoRa（低功耗远距离）、NB-IoT（抗干扰性强）等无线技术及光纤（高速大容量）将数据高效稳定传输至处理中心；应用层通过云计算存储数据，利用大数据分析挖掘漏损特征，再以可视化界面呈现管网状态与预警信息，为漏损管理提供决策支持。

（三）漏点定位核心算法理论

漏点定位算法是实现供水管网漏损精准定位的关键，目前主要有基于模型的算法和基于数据驱动的算法两类。基于模型的算法以管网水力模型为基础，依据流体力学原理建立水压、流量与管道参数的关系，通过对比实际与模拟的水力参数偏差反推漏点，定位精度高，但对管网模型准确性要求严、计算复杂，适用于结构清晰、参数已知的管网^[3]。基于数据驱动的算法依赖大量监测数据，经机器学习（如支持向量机、神经网络）、深度学习（如卷积神经网络、循环神经网络）训练模型实现定位，对管网结构依赖性低，但需大量标注数据，数据质量影响定位精度。此外，混合算法融合两者优点，如用水力模型缩小范围后用数据驱动算法精准定位，提升准确性与鲁棒性。

二、漏损监测的物联网技术集成架构设计

（一）总体架构设计

漏损监测的物联网技术集成总体架构以“全域感知、高效传输、智能处理、精准定位”为核心目标，采用分层递进设计，构建“感知层-网络层-平台层”三层协同架构，各层功能独立且通过标准化接口实现数据与指令双向交互^[4]。其设计遵循“数据驱动决策”原则，感知层捕捉管网漏损特征信号形成原始数据池；网络层经混合组网汇聚数据至平台层，同时下发控制指令；平台层融合处理多源数据、运算算法并可视化展示，输出漏损预警与漏点定位结果。该架构优势在于分布式部署可灵活扩展感知节点，适应不同城市管网场景；集中式管理平台统一调度数据与算法，避免多系统冗余冲突。技术适配性上需满足关键数据传输时延 ≤ 10 秒以快速响应漏损；网络层有断线重连与数据补发机制，感知节点平均无故障运行时间 ≥ 8000 小时；采用低功耗硬件与窄带通信，单节点年均能耗 ≤ 5 度电以控成本。三层架构融合实现漏损监测从“被动响应”向“主动预警”转型。

（二）多维度感知层设计

感知层设计质量直接决定原始数据的完整性与准确性，多维度感知层以“全参数覆盖、高密度部署、自适应感知”为设计原则。在监测参数与传感器选型上，建立对应的感知矩阵，压力特征选用扩散硅压力传感器，测量范围 0-1.6MPa，分辨率 0.1kPa，适应 -20℃-80℃环境；流量特征在 DMA 区域入口与主干管安装电磁流量计，管径适配 DN80 到 DN1200，流速测量 0.1-10m/s，通过 RS485 接口输出数据；声学特征采用压电式振动传感器，灵敏度 10mV/g，频率响应 20Hz-5kHz，可过滤环境

噪声；辅助感知部署土壤墒情传感器（0-100% 体积含水量）与管体应力传感器（0-200MPa）。传感器部署结合管网拓扑与漏损风险等级，高风险区域“网格状密集部署”，间距 50-80 米；中低风险区域“线性稀疏部署”，每隔 300-500 米设监测节点。感知节点采用 IP68 防护等级外壳，地埋式安装，内置锂电池与太阳能辅助供电，连续阴雨天气续航不低于 15 天，实现漏损信号“早发现、早捕捉、早传输”。

（三）混合组网的网络层设计

网络层作采用混合组网思路构建“近距离自组网+远距离广域网+骨干网传输”三级传输链路，平衡传输距离、数据量与能耗矛盾。近距离组网用 ZigBee 技术构建 WSN，感知节点通过星型拓扑与区域协调器通信，每个协调器接入 64 个终端节点，通信半径 50-100 米，传输速率 250kbps，适用于密集区域数据本地汇聚，采用 CSMA/CA 机制避免冲突，支持路由自动修复。远距离传输以 NB-IoT 与 LoRa 为核心，区域协调器经 NB-IoT 接入运营商基站，广域覆盖（半径 1-3 公里），窄带特性降干扰，适合小数据量周期性上报；偏远区域用 LoRa 构建私有网络，通信距离 3-5 公里，扩频技术抗干扰，满足低速率、低功耗需求。骨干传输结合光纤与 5G，区域监测中心经光纤专线连云端（速率 1Gbps）传输海量数据与视频流；应急场景启用 5G 切片，时延 ≤ 50 ms，保障实时数据回传。网络层还嵌入数据预处理模块，完成格式转换、异常值剔除与压缩（压缩率 $\geq 30\%$ ），降低云端压力，实现分层传输目标。

（四）一体化平台层设计

平台层整合数据存储、智能分析与应用服务功能，实现从原始数据到决策信息的转化，采用“云边协同”架构，边缘节点处理部分实时任务，云端部署核心计算与管理功能，形成分层协同的技术体系。数据接入层兼容多协议，接收感知层数据并对接管网 GIS 系统，建立“监测数据-管网实体”映射。数据存储层采用混合数据库，时序数据库存储实时监测数据，关系型数据库存储结构化数据，文件数据库存储非结构化数据^[5]。智能分析层集成三大引擎，漏损识别引擎对比数据与历史基线识别异常；定位引擎融合多种方法输出漏点坐标（平面精度 ≤ 5 米）；健康评估引擎计算管道剩余寿命并生成风险热力图。可视化层构建三维数字孪生场景，叠加展示各类信息，支持多维度查询与分析。应用服务层为运维人员提供工单管理与路径规划，为管理人员提供统计分析与决策建议，通过 API 接口与智慧水务平台对接，实现全流程智能化。

三、基于多源数据融合的漏点定位精度提升策略

（一）数据预处理与特征工程

多源监测数据在采集与传输中存在噪声干扰、数据缺失与格式异构等问题，需经预处理与特征工程转化为高质量特征^[6]。数据预处理针对不同数据特性采用差异化方法，时序数据用小波变换过滤噪声，保留有效频段；声学信号通过短时傅里叶变换转换为频谱图，过滤非漏点噪声。数据缺失时，短时缺失用滑动窗口

均值法填补，空间上用 K 近邻算法基于相邻传感器数据估算。数据标准化采用 Z-score 归一化，消除量纲差异^[7]。特征工程从时域、频域、空间域提取漏损特征，时域提取统计量捕捉数值波动规律，频域从声学信号频谱图提取特征，空间域结合管网 GIS 数据构建空间关系矩阵。再通过特征选择算法筛选出强相关特征子集，减少冗余信息，提升定位效率。

（二）传统定位算法的优化与改进

传统定位算法受管网复杂性与环境干扰影响，定位精度不足，结合多源数据优化可发挥其优势。水力模型法通过多源数据动态校正参数，用实时压力数据反演管道糙率并建立动态关系模型，结合流量数据修正节点用水量；引入漏点数量自适应识别机制，多目标优化求解多漏点位置与流量，降低模拟误差至 5% 以内。声学定位法校正环境干扰，建立声波速度校正模型，引入第三个传感器构成三角定位网络，用互相关函数改进时差计算，将定位误差缩小至 0.5 米以内。区域划分法融合压力与流量数据精细划分漏损区域，引入动态分区机制，根据漏损预警级别调整分区粒度，缩小定位范围至 50-100 米，为精确定位提供约束。

（三）基于机器学习的智能漏损诊断模型

机器学习算法能挖掘复杂数据关联，构建基于多源特征的智能漏损诊断模型，实现漏点位置非线性映射，突破传统算法精度瓶颈。模型设计遵循“数据驱动 - 模型预测 - 误差反馈”闭环优化机制，兼顾精度与效率^[8]。模型构建围绕数据集构建、算法选型与训练优化，整合历史漏损案例与模拟数据形成 10 万 + 样本数据集，按 7:1:2 划分训练、验证、测试集；分类任务选梯度提升树算法，管段识别准确率超 90%，回归预测用 3 层 BP 神经网络，坐标预测误差≤3 米。模型优化通过 SMOTE 算法和时间序列增强扩充样本，贝叶斯优化调优超参数，降低测试集定位误差 15%-20%。部署采用轻量化设计，压缩量化后模型≤10MB，满足边缘

节点实时推理。

（四）多源数据融合的精确定位模型

多源数据融合的精确定位模型构建“数据层 - 特征层 - 决策层”三级融合架构，整合物理模型与数据驱动模型优势实现优势互补，输出高精度漏点定位结果^[9]。数据层融合实现多传感器数据时空对齐与一致性校验，基于时间戳同步数据，用动态时间规整算法解决采样频率差异，通过卡尔曼滤波融合同一参数多传感器测量值，经一致性检验识别异常传感器并调整数据权重，降低压力数据均方根误差。特征层融合通过跨模态特征交互实现信息互补，用注意力机制融合时域与频域特征，拼接空间拓扑与传感器监测特征并经深度信念网络降维，引入对抗性学习生成跨模态合成特征缓解数据缺失问题^[10]。决策层融合基于多算法结果加权集成，根据历史定位精度动态调整各算法权重，用 D-S 证据理论处理冲突信息，结合管网拓扑约束修正结果，最终漏点定位平面精度稳定在 1-3 米，较单一算法提升 30%-50%。

四、结束语

本文围绕智慧水务背景下供水管网漏损监测的物联网技术集成与漏点定位精度提升展开研究，系统阐述了供水管网漏损机理、物联网核心技术体系及漏点定位算法理论，构建了“感知层 - 网络层 - 平台层”三层协同的物联网技术集成架构，并提出了基于多源数据融合的漏点定位精度提升策略。研究表明，通过多维度感知层的科学设计，可实现对管网漏损特征的全方位捕捉；混合组网的网络层设计能保障数据高效稳定传输；一体化平台层则实现了从数据采集到决策支持的全流程智能化。相信随着物联网、人工智能等技术的不断发展，供水管网漏损监测技术将日趋成熟，为智慧水务的深入推进及水资源的高效利用提供坚实保障。

参考文献

[1] 董瑜. 市政供水系统管网漏损监测与智能修复技术探讨 [J]. 新城建科技, 2025, 34(03): 19-21.
[2] 刘敬坡, 李阔. 基于物联网的城市供水管网漏损智能监测技术研究 [J]. 中国科技论文在线精品论文, 2024, 17(04): 415-419.
[3] 薛晓. 基于漏损特征空间的供水管网漏损识别策略优化与实践 [J]. 中国市政工程, 2024, (06): 39-41+157-158.
[4] 胡克勇, 孟欣, 孙中卫. 一种融合时空相关性特征的高效供水管网漏损识别方法 [J]. 水电能源科学, 2024, 42(11): 137-139+54.DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2024.20241270.
[5] 黎子麟, 荣清文, 武玉峰. 智慧水务在供水管网漏损控制方面的运用分析 [J]. 中国高科技, 2024, (16): 64-66.DOI: 10.13535/j.cnki.10-1507/n.2024.16.17.
[6] 潘倩. 基于融合物联网的供水管网漏损监测系统关键技术研究. 江西省, 江西省检验检测认证总院, 2024-07-31.
[7] 李睿. 智慧供水管网漏损控制项目实践 [J]. 城镇供水, 2023, (01): 54-59.DOI: 10.14143/j.cnki.czgs.2023.01.028.
[8] 向鹏. 城市供水管网系统智慧漏损控制技术 [J]. 高科技与产业化, 2022, 28(05): 26-29.
[9] 王欣, 徐雪婧. 智慧水务理念下管网漏损的研究进展 [J]. 清洗世界, 2022, 38(04): 45-48.
[10] 陈艳文. 智慧水务在大港油田水务供水管网漏损控制方面的运用分析 [J]. 供水技术, 2022, 16(01): 34-37.

基于数值模拟的水库溃坝洪水演进研究

王旭, 王蓓, 姜静静, 朱明, 张闯, 李康
淮安市水利勘测设计研究院有限公司, 江苏 淮安 223001
DOI:10.61369/ERA.2025110019

摘 要 : 水库溃坝常引发大规模洪水灾害, 对下游生命财产和生态环境构成严重威胁。通过数值模拟技术, 可有效再现溃坝洪水的传播路径与演进过程, 分析洪峰流量变化、洪水位演变及到达时间等关键参数。结果表明, 洪水具有传播迅速、洪峰突出的特点, 下游不同断面受影响程度存在差异, 淹没范围与地形条件密切相关。研究成果为洪水风险区划提供可靠依据, 对防灾减灾规划和应急管理具有重要应用价值。

关 键 词 : 水库溃坝; 洪水演进; 数值模拟; 风险区划; 防灾减灾

Research on Dam-Break Flood Routing Based on Numerical Simulation

Wang Xu, Wang Bei, Jiang Jingjing, Zhu Ming, Zhang Chuang, Li Kang
Huai'an Water Conservancy Survey and Design Institute Co., Ltd., Huai'an, Jiangsu 223001

Abstract : Dam-break incidents in reservoirs often trigger large-scale flood disasters, posing severe threats to downstream lives, properties, and the ecological environment. Through numerical simulation techniques, the propagation paths and evolution processes of dam-break floods can be effectively reconstructed, enabling the analysis of key parameters such as peak flood flow changes, flood level evolution, and arrival times. The results indicate that the flood propagates rapidly with prominent peak flows, and the extent of impact varies across different downstream cross-sections. The inundation range is closely related to topographical conditions. The research findings provide a reliable basis for flood risk zoning and hold significant practical value for disaster prevention and mitigation planning, as well as emergency management.

Keywords : reservoir dam-break; flood routing; numerical simulation; risk zoning; disaster prevention and mitigation

引言

溃坝洪水突发性强、破坏力大, 对下游居民生命财产安全及区域生态系统构成严重威胁, 亟需开展系统研究。随着数值模拟技术的发展, 基于浅水方程的 MIKE、HEC-RAS 等模型已广泛应用于洪水演进规律分析, 为风险预警和应急决策提供了技术支撑。通过数值模拟探讨水库溃坝洪水传播特征, 能够揭示洪峰流量变化、洪水位时空分布及淹没范围, 为风险区划、防灾减灾规划及应急管理提供科学依据。

一、数值模拟理论与方法

(一) 数值模拟理论基础

水库溃坝洪水演进过程通常采用浅水方程作为理论基础。浅水方程来源于质量守恒和动量守恒原理, 可在一定条件下简化三维流体运动规律, 广泛应用于非恒定流模拟。其主要形式包括连续方程和动量方程, 能够描述水位、流速、流量随时间和空间的变化情况。在溃坝洪水模拟中, 边界条件的设定是关键环节。上游边界条件常采用来水流量或水位过程, 下游边界条件通常根据控制断面水位或自由出流条件确定。溃口作为特殊边界, 需要设定溃口宽度、发展速率及下切深度等参数, 这些条件直接影响洪

水的演进结果。此外, 初始条件的合理设定对计算精度同样重要, 一般取水库蓄水高程作为初始水位, 库区水体静止状态作为初始流速^[1]。为了提高计算效率和稳定性, 模型往往在保证精度的前提下作出合理简化, 例如忽略空气阻力、植被阻力等次要因素。

(二) 模型选择与适用性

溃坝洪水演进的模拟方法主要包括一维和二维模型。一维模型以河道为中心线, 仅考虑纵向水流演进, 计算效率较高, 适合大范围流域的总体分析, 但对横向流动和局部淹没范围反映不足。二维模型基于平面网格, 能够更直观地模拟洪水在地形中的传播过程, 准确再现淹没范围和洪水动力特征, 但对计算资源要

求较高。实际研究中，常用的计算工具包括 MIKE 11/21、HEC-RAS 以及 Breach 模型等。MIKE 系列模型在水动力学和泥沙输移方面具有较强优势，适合复杂地形与大范围洪水演进的模拟；HEC-RAS 提供了一维与二维相结合的功能，便于实际工程应用；Breach 模型则侧重于溃口发展过程的刻画。不同模型各有特点，选择时需结合研究区水库规模、地形条件及计算需求综合考虑。本研究采用二维浅水方程模型进行模拟，能够更好地体现洪水的时空分布与淹没特征，保证结果的科学性和直观性。

（三）计算流程与模拟精度控制

溃坝洪水数值模拟通常包括数据收集、模型构建、计算实施和结果分析等环节。首先在模型构建中，需要进行合理的网格划分。网格的精粗程度直接影响计算结果的空间分辨率，过于粗糙会忽略局部特征，过于精细则会显著增加计算量，因此应根据研究区地形特征进行优化划分。时间步长的选择关系到计算的稳定性与精度，一般需满足 CFL 稳定条件，保证数值解收敛。其次，稳定性与收敛性是控制计算质量的核心。通过调整迭代步数、松弛因子以及边界条件，可避免数值振荡或不收敛现象。最后，模型验证是确保模拟可靠性的关键环节（如图1所示）。通常需要利用历史洪水过程、实测水文数据或已有研究成果进行比对，通过洪峰流量、洪水位及传播时间等指标校核模型的精度。在存在观测资料不足的情况下，也可采用不同模型结果对比的方法进行合理性验证^[2]。通过上述措施，保证效率与精度，提高模拟实用性，为洪水演进分析奠基。

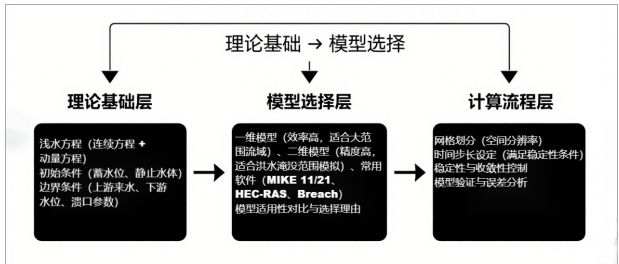


图1：数值模拟理论与方法框架图

二、研究区概况与数据获取

（一）研究区自然与工程条件

研究区所涉及的水库位于典型山地丘陵区，地形起伏显著，库区主要由上游河流汇流形成，具有一定调蓄和防洪功能。水库总库容较大，常年维持在正常蓄水位附近，是区域供水与防洪的重要枢纽工程。下游河道地貌以冲积平原为主，河槽相对狭窄，堤防设施存在薄弱环节，洪水一旦超出行洪能力极易发生溃决和外溢。下游居民点密集，部分区域分布有工矿企业和农田，社会经济承载量较高。一旦发生溃坝，将对居民生命财产、交通干道、电力设施及农业生产造成严重冲击。从工程安全角度看，该水库坝体主要由土石材料构筑，受极端降雨、渗流破坏或地震作用影响，存在溃口形成的潜在风险^[3]。常见溃坝情景包括洪水漫顶、坝体管涌或局部坍塌，不同情景下洪水演进模式和影响范围存在显著差异。

（二）基础数据收集

溃坝洪水数值模拟的可靠性高度依赖于数据的完整性和准确性。首先，水文气象数据是模拟的核心输入，包括多年实测降雨量、径流过程、设计暴雨参数及洪水频率分析成果。这些数据可为上游来水及边界条件提供基础支撑。其次，工程资料的收集涵盖水库坝体断面、坝高、坝基结构、溢洪道及泄洪设施参数等信息，同时需要掌握库区蓄水曲线和调度规程，以便设定溃坝情景。再次，地形数据的精度直接影响模拟结果，下游河道纵横断面、数字高程模型（DEM）以及土地利用现状均需精确获取。最后，社会经济数据的采集同样不可或缺，包括人口分布、基础设施布局、交通线路及重要公共设施位置。这些信息不仅关系到风险区划和损失评估，也为应急预案制定提供支撑。通过综合利用水文、工程和社会数据，可为溃坝洪水演进模拟构建一个较为完整的输入体系。

（三）边界条件与初始条件设定

在数值模拟中，合理的边界条件和初始条件设定是保证计算结果可靠性的关键环节。上游边界通常采用来水过程线，依据设计洪水或实测径流数据确定，同时结合水库调度方式，考虑可能的预泄与分洪措施。下游边界条件一般选取关键控制断面，如干流出口或主要汇合点，通过水位-流量关系或自由出流条件进行约束。对于溃口的设定，需要根据坝体结构及潜在破坏模式，设定不同宽度、发展速率和下切深度的情景，分别对应瞬时溃坝与渐进溃坝两类情况。在初始条件方面，通常取水库蓄水位作为初始水位，假定库区水体处于静止状态；河道内的基础流量和水位则根据近期实测资料设定。由于实际环境复杂，部分条件难以完全获取，因此需在合理假设前提下进行简化处理，如忽略小支流汇流或将复杂河网简化为主要河道。通过科学设定边界与初始条件，不仅能提高模型运行的稳定性，还能确保结果具有较强的解释性和应用价值^[4]。

三、溃坝洪水演进模拟与结果分析

（一）溃坝过程设定与方案设计

在模拟过程中，首先设定不同溃坝情景，以反映多种可能的灾害发展趋势。根据坝体结构特点与风险分析结果，设计了三种溃口宽度方案：小溃口（50 m）、中等溃口（100 m）和大溃口（200 m）。其中，小溃口代表局部冲刷破坏，中等溃口为坝体不稳定后快速扩展，而大溃口则模拟极端情况下的全坝冲毁。其次，对比瞬时溃坝与渐进溃坝两类模式。瞬时溃坝假设坝体在短时间内完全失稳，下泄流量急剧增大，洪水传播速度快，破坏力强；渐进溃坝则考虑坝体逐步下切，洪水释放较为缓和，但持续时间长，对下游地区造成更大范围的淹没。为增加研究的现实意义，还设定了工程调度措施假设，主要包括提前预泄 20% 库容、维持正常蓄水位和高水位运行三种情景，以对比不同调度方式下洪水演进过程的差异。

（二）洪水演进规律分析

模拟结果表明，溃口宽度与溃坝模式对洪水演进规律具有显著影响。以中等溃口方案为例，瞬时溃坝情景下洪峰流量可达 $2.1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{s}$ ，比渐进溃坝高出约 35%，洪峰到达下游 10 km 控制断面的时间仅为 0.9 h，而渐进溃坝则为 1.5 h。随着洪水传播，

下游各断面洪水位呈现明显的时空差异。距坝址 5 km 处，洪峰水位上升幅度为 7.2 m；距坝址 20 km 处则下降至 3.8 m，洪峰推迟约 1.6 h 才出现。传播速度在初始阶段维持在 5–6 m/s，逐渐衰减至 2–3 m/s。不同调度方式对洪水演进结果也表现出差异：提前预泄情景下洪峰流量比高水位情景减少近 28%，淹没范围缩小 15% 左右，表明合理调度对降低灾害风险具有积极作用^[5]。

（三）结果对比与验证

为确保模拟结果的可靠性，将模拟成果与历史洪水资料进行了对比。研究区在 1998 年曾发生特大洪水，洪峰流量约 $1.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{s}$ 。模拟结果显示，在中等溃口情景下的洪峰流量与历史数据较为接近，误差控制在 10% 以内，说明模型对洪水过程的再现能力较强。进一步对比 MIKE21 与 HEC-RAS 二维模块的计算结果发现，两者在洪峰流量和传播时间上差异较小，但 MIKE21 在淹没范围的细节表达上更为精确，适合用于风险区划。综合评价表明，所构建的模型在整体趋势、关键参数和洪水位变化方面均与观测结果和其他模型结果一致，具有较高合理性和应用价值。如表 1 所示。

表 1 溃坝洪水关键参数对比表

情景类型	溃口宽度 (m)	洪峰流量 (m^3/s)	洪峰到达时间 (h)	下游最大水位上升 (m)	淹没范围 (km^2)
小溃口－瞬时溃坝	50	1.2×10^4	1.2	5.6	42
中溃口－瞬时溃坝	100	2.1×10^4	0.9	7.2	68
大溃口－瞬时溃坝	200	3.4×10^4	0.6	9.5	105
中溃口－渐进溃坝	100	1.55×10^4	1.5	6.3	74
预泄情景	100	1.5×10^4	1.0	5.8	58

表 1 展示了不同溃口及调度情景下的关键结果。整体来看，溃口越宽，洪峰流量和水位上升幅度越大；瞬时溃坝造成的危害显著高于渐进溃坝。提前预泄措施可有效削减洪峰并缩小淹没范围，对提升下游防灾能力具有重要意义。

四、防灾减灾对策与应用启示

（一）风险区划与应急响应

基于模拟结果，可以对下游地区进行洪水风险区划。洪水淹没范围根据水位线分为高风险区、中风险区和低风险区，高风险区主要集中在坝址下游 0–10 km 内部，水位上升幅度大、洪峰到达快；中风险区位于 10–20 km，洪水虽有所衰减，但仍具较

强破坏性；低风险区分布在 20 km 以外，洪水主要表现为滞留淹没。人口与基础设施风险分布表明，沿河村镇、学校和交通要道处于直接威胁中，部分重要电力设施和输油管线也处于淹没区内，应纳入重点保护对象^[6]。在应急响应方面，应结合洪水传播时间设置分区预警阈值，明确不同区域的撤离顺序与时间窗口，并科学规划多条应急撤离路线，避免单一路径受阻而影响群众转移效率。

（二）调度与工程措施建议

模拟结果显示，合理的水库调度策略可显著减轻溃坝洪水危害。建议在汛期来临前，根据气象预报和流域水文情况实施预泄，将库容降低 15%–20%，为后续洪水留出调蓄空间。在洪水演进过程中，应加强水库泄洪与下游堤防联合调度，确保削峰错峰，提高整体防洪效能。在工程措施方面，需对下游重点河段堤防进行加固，提高防洪标准，同时在潜在溃口区域预设快速封堵设施和应急物资，以缩短抢险时间。信息化监测与预警体系建设亦是关键，应利用遥感、物联网与大数据技术，实时监测降雨、库水位及坝体应力，建立自动预警平台，实现洪水灾害的快速响应与精准调度^[7]。

（三）研究成果的推广应用

数值模拟成果不仅对单一水库防灾减灾具有应用价值，还能对整个流域的洪水风险管理提供科学支撑。通过模拟结果，可建立多水库联合调度预案，优化流域防洪格局。在应急演练方面，模拟成果可作为灾害场景输入，为政府和相关部门提供实战化演练依据，提升应急处置能力。同时，研究结果还可服务于防灾规划，辅助制定土地利用管控和城市防洪布局。在未来气候变化导致极端降雨频率增加的背景下，数值模拟方法可用于多情景分析，评估极端条件下溃坝风险和洪水演进规律，为适应性防灾策略制定提供参考^[8]。由此可见，研究成果在流域治理、防灾减灾和可持续发展中具有广泛推广意义。

五、结束语

数值模拟揭示了水库溃坝洪水传播的动态规律，结果表明溃口宽度、溃坝方式及调度措施对洪峰流量和淹没范围影响显著。通过风险区划可明确高风险区域与关键防护对象，为应急响应与撤离规划提供科学依据。调度策略与工程措施的优化能够有效降低灾害风险，信息化预警体系建设则提升了防控能力。未来结合实时监测、大数据与人工智能，将进一步增强模拟精度与应用价值，为流域防灾减灾提供更坚实支撑。

参考文献

[1] 杜昌宇. 抚州市马街水库溃坝洪水演进数值模拟及避险转移方案研究 [D]. 南昌大学, 2022.DOI:10.27232/d.cnki.gnchu.2022.001449.
[2] 俞增鑫, 漆文邦, 张强, 等. 某水库溃坝洪水演进数值模拟研究 [J]. 陕西水利, 2021, (08): 62–65+69.DOI:10.16747/j.cnki.cn61–1109/tv.2021.08.020.
[3] 周乃恒. 石佛寺水库溃坝洪水演进数值模拟研究 [D]. 沈阳农业大学, 2017.
[4] 魏一行. 城区水库溃坝洪水演进三维动态情景仿真 [D]. 天津大学, 2016.
[5] 王晓玲, 宋明瑞, 周正印, 等. 基于精细地形建模的溃坝洪水演进三维数值模拟 [J]. 水力发电学报, 2016, 35(04): 55–66.
[6] 黄怡青, 宋兵, 朱朝辉, 等. 基于 HEC-RAS 模型的水库溃坝洪水模拟及影响分析 [J]. 水科学与工程, 2025, (01): 20–24.DOI:10.19733/j.cnki.1672–9900.2025.01.06.
[7] 刘莹, 罗林峰, 黄晓洪. 大洋水库溃坝洪水数值模拟研究 [J]. 水利建设与管理, 2024, 44(10): 19–24.DOI:10.16616/j.cnki.11–4446/TV.2024.10.03.
[8] 吕多智, 王猛, 刘玮. 水库溃坝洪水数值模拟分析 [J]. 水利技术监督, 2024, (05): 49–52.

农田水利工程设计中的渠道设计与施工管理分析

孙鸿琴

农安县水利规划服务中心, 吉林 长春 130200

DOI:10.61369/ERA.2025110022

摘 要 : 在国民经济发展过程中农业经济占据较大的比例, 近些年我国不断提高乡村产业支持力度, 致力于提高农业生产现代化水平, 为农业经济的发展奠定基础。而在发展农业经济的过程中, 农田水利工程属于重要的基础设施, 为了满足农业生产过程中的灌溉需求, 需要做好工程设计工作, 尤其在渠道设计过程中需要遵循设计原则, 同时需要提高施工管理力度。本文主要分析了农田水利工程设计中渠道设计和施工管理工作, 为农业生产提供保障。

关 键 词 : 农田水利工程; 渠道设计; 施工管理

Analysis of Canal Design and Construction Management in Farmland Water Conservancy Project Design

Sun Hongqin

Nong'an County Water Conservancy Planning Service Center, Changchun, Jilin 130200

Abstract : In the process of national economic development, the agricultural economy occupies a significant proportion. In recent years, China has continuously increased its support for rural industries, striving to enhance the modernization level of agricultural production and lay a foundation for the development of the agricultural economy. During the development of the agricultural economy, farmland water conservancy projects serve as crucial infrastructure. To meet irrigation demands in agricultural production, it is essential to carry out effective engineering design, particularly adhering to design principles during canal design and enhancing construction management efforts. This paper primarily analyzes canal design and construction management in farmland water conservancy project design, providing a guarantee for agricultural production.

Keywords : farmland water conservancy project; canal design; construction management

引言

在农田水利工程施工中, 水利渠道设计和施工管理属于重要的工作内容。提高渠道设计和施工水平, 可以顺利落实农业灌溉工作。在渠道设计过程中需要结合农田灌溉需求, 同时需要综合地形条件和水文地质等因素。同时开展施工管理工作, 有利于准确地落实渠道设计工作, 保障整体工程质量。在实际建设阶段, 施工单位需要合理把控施工进度, 保障渠道施工质量, 构建稳固、安全的渠道结构。

一、农田水利工程渠道设计原则和注意事项

(一) 原则

1. 科学性原则

在渠道设计阶段需要遵循科学性原则, 做好渠道布置工作^[1]。设计人员在设计之前需要掌握施工现场设计情况和渠道功能需求等, 合理平衡灌溉区域的水资源, 提前勘察施工现场, 制定科学的设计方案, 避免在危险地段选址, 顺利开展渠道施工。

2. 因地制宜原则

遵循因地制宜原则, 有利于充分利用和分配水资源, 同时可以对现有的农田发挥出保护作用。结合勘察结果确定施工现场的地形、地势条件和水量以及农田分布等, 提高渠道设计的针对

性, 合理节省投资。例如在地势较高的部位设计渠道, 在地势较低的部位设计排水沟, 提高灌溉水的稳定性。同时需要综合周围居民分布情况设计渠道, 避免渠道建设过程中对周围居民日常生活造成干扰。

3. 干支结合原则

保证渠道设计质量, 需要遵循干支结合原则, 注重结合施工现场的地形和地质等因素, 合理控制灌溉面积, 合理规划用水量, 通过干支结合, 突出渠道设计的经济性优势, 合理节省工程投资。

(二) 注意事项

在渠道设计过程中注意以下两点: 首先需要做好渠道跌水设计工作, 这项设计工作关系到水利速率^[2]。在设计阶段, 设计人

员合理控制跌差范围,合理控制阻力,同时可以顺利开展灌溉工作。在跌水设计过程中,注意保护农田结构,平衡原有生态系统。设计人员需要提前做好考察工作,确定农田灌溉要求。其次需要合理选择施工材料,一些施工单位为了控制投资,利用低价劣质的材料,不利于充分发挥出施工技术的优势,同时会引发各种质量问题,减少工程使用寿命。因此在工程设计过程中,需要合理选择施工材料。在材料选择阶段要结合工程需求,因此设计人员需要结合渠道特点和具体设计要求,合理把控设计材料,保证所选的材料契合工程发展,避免因材料因素在后续施工和使用中引发渗漏问题,顺利推进工程施工。

二、农田水利工程设计中的渠道设计

(一) 渠道选址和布局

在渠道选址阶段需要综合各方面自然条件,其中在选择渠道线路的过程中要注意结合地形和地质以及水文条件等。地形条件关系到水流走向和后期施工难度,通常是在地势较高的区域布置渠道,这样可以自流输送灌溉水,合理控制呢更好。如果现场地形条件复杂,将会增加土方开挖和填方施工量,不仅会增加工程投资,还会增加施工安全隐患。因此在设计过程中,设计人员需要考虑地形条件,保证现场地势平坦,有利于开展施工。地质条件也关系到渠道选址工作,如果区域多含软土和膨胀土等,不利于构建稳定的渠道基础,还会提高渗漏等问题发生率。此外降雨量和地下水以及河流等也影响到渠道设计工作。如果当地比较干旱,需要增加流水量,以满足灌溉要求,而在湿润地区主要是发挥渠道排水功能,避免发生洪涝灾害。设计人员综合各方面自然条件,选择最优的渠道线路,有利于优化水利工程性能。

渠道布局关系到工程综合效益。在渠道布局阶段要遵循经济性原则,合理控制渠道长度,这样可以减少投资。在渠道布局阶段要做到便于管理,如果灌溉系统的规模较大,保证渠道布局的合理性,可以优化施工管理效果。在渠道布局阶段还要注重保护生态环境,避免破坏周围生态系统^[9]。设计人员需要结合灌溉区域实际情况对渠道数量和规模合理调整,高效地分配水资源。在设计过程中要注意结合分水岭和等高线等因素,例如在干渠上游布置泄水渠,用于应对突发性洪水,在灌溉区需要构建渠道,高效利用水资源。总之保证渠道布局的科学性,可以提高整体设计水平,同时可以推动工程可持续发展。

(二) 渠道横断面设计

1. 断面形式选择

选择渠道横断面形式的过程中,需要综合水流特点和地质条件等因素。例如在地势平坦和土质较硬等区域适合利用矩形断面,矩形断面的施工简单,但是在实际应用中很容易出现淤积等问题。U型断面的水力性能和自净能力等方面优越,因此在农田水利工程中使用率较高。利用U型断面可以控制水流的冲刷力,合理减少后期维护投资,而且设计圆弧状的底部,可以平稳地过渡水流。在渠道设计过程中,设计人员需要结合实际条件选择断面形状,尤其需要控制其深度和宽度,优化灌溉功能的同时合理减少投资。在选择结合可以综合流量和流速以及水力半径等进行计算。例如选用U型渠道,可以利用公式: $R=A/P$ 计算, R 代表水力半径, A 代表渠道过水断面面积, P 为湿周。通过对不同断面

流速分布和水头损失等进行比较分析,才可以保证所选的断面形式契合水利工程条件。

2. 渠道比降和边坡系数设计

在渠道设计过程中,渠道比降属于重要的参数,关系到水流速度和渠道稳定性。如果该值过大,将会提高水流速度,增加水头损失,同时会导致水流严重冲刷渠道。如果该值较小,将会降低水流速度,对灌溉效率造成影响^[4]。设计人员需要综合施工现场的地形条件和土壤类型等因素,保证比降值的合理性。例如在土质松散区域,可以降低比降值,控制水流的冲刷作用。在岩石地基中,可以提高比降值,可以使输水效率得以提高。保证比降设计的科学性,可以维持渠道运行的稳定性,延长工程寿命。边坡系数设计工作也非常重要,如果边坡陡峭,那么将会扩大渠道占地面积,增加工程投资。设计人员要综合地质特点,对边坡系数合理调整,保证渠道结构的稳固性和经济性。

3. 跌水设计

在农田水利工程中渠道跌水设计发挥重要的作用,通过逐级降低水位,可以降低地形落差引发的水利冲击力,同时可以减少填方量,因此控制投资。跌水设计阶段,设计人员要合理布置跌级和挖坑深度,平稳地过渡水流。在设计过程中,设计人员需要综合地形变化恶化水流特点,精准选择跌水位置和形式。例如在大坡度区域,可以利用多级跌水设计方式,这样可以减少单级跌水高度,避免水流严重冲刷渠道底部。此外在跌水设计过程中要保证挖坑的均匀性,否则不利于均匀地分布水流,引发淤积等问题。为了合理控制投资,减少填方量,可以选用挖方渠道和半挖半填形式,整体工期也相对短暂,可以降低对外部环境的影响。提高跌水设计的合理性,可以优化渠道性能,保障农田水利工程运行的稳定性。

(三) 渠道纵断面设计和水位高程确定

1. 确定渠道水位高程

确定渠道水位高程的时候需要综合灌溉要求和地形条件等。首先需要结合灌溉面积和需水量等,对渠道总流量进行计算。其次结合地形图和水源资料等,对渠道起点、终点的水位高程进行设计^[6]。在设计过程中要考虑到水头损失,顺利向灌溉区域引入水流。在计算节点可以利用能量方程等,对渠道水位变化进行分析。同时需要明确地面高程的变化,合理协调渠道水位和地面高程,避免水流淹没地面。

2. 损耗流量和净流量计算

在输水管道的使用中,由于渗漏、蒸发和植物吸收等原因,总会有一些损耗。为此,在设计中必须对流量进行精确的估算,才能保证灌区满足要求。输沙率可以通过现场观测、经验公式或模式仿真来确定。在设计过程中,需要对不同季节和不同天气的损耗差异进行分析,提高计算结果的精准性。在设计径流量的过程中,要综合考虑农田灌溉需要、作物生长周期和灌溉方式,选择适宜的径流量。为了高效利用净流量,顺利完成灌溉工作,需要对水源合理调配,科学地布局渠道。

3. U型槽纵坡和槽内过水流量计算

U型槽的纵坡降和过水流量设计工作发挥重要的作用。在设计纵坡降之后,需要综合考虑水流速度和渠道稳定性等因素,控制纵坡降在合适范围,可以保证水流稳定性,提高渠道结构稳定性^[6]。计算槽内过水量的回收,可以利用公式 $Q=Av$ 进行计算, Q

代表过水流量，A 代表过水断面面积，v 为流速。在设计过程中需要综合考虑灌溉面积和水源等，保证流量值的科学性，同时对槽宽和槽深等参数进行调整。

三、农田水利工程设计中的渠道施工管理要点

（一）施工前准备

1. 制定施工方案

在渠道施工之前制定施工方案，有利于顺利施工。在方案制定阶段需要综合考虑工程规模和施工难度等方面，选用合适的施工方法和顺序。首先要详细评估渠道长度和断面形式等，合理安排施工资源。其次如果某部分技术难度较高，例如在深挖方和高填方施工中，需要对地质数据和水文条件进行勘察，同时需要设计专项施工技术，合理降低施工风险。此外要注意合理协调施工顺序，紧密衔接不同的工序，例如在完成渠道放样工作之后，开展土方开挖施工，后续再安装衬板。通过制定科学的施工方案，可以使整体施工效率得以提高，避免因施工计划不合理引发返工问题。

2. 人员和材料组织

在施工之前要合理选择专业人员和施工材料，有利于保障施工质量。在人员组织阶段，需要根据施工要求配置专业人员。例如在土方开挖阶段需要安排专业的操作人员，针对衬砌施工，需要安排专业的模板工和混凝土工^[7]。施工单位还要组织岗前培训工作，使其掌握设计要求和特点等，保证施工操作的安全性。在选择材料的过程中，施工单位需要结合工程特点合理选择材料。例如在选择衬砌板的时候，需要保证所选的材料具备刚度和耐久性等特点，这样才可以适应自然环境。在材料入场之前需要全面检查材料的外观和物理性能等，保证所选材料符合工程要求。通过合理配置人员和材料，有利于顺利开展施工。

（二）施工过程关键环节管理

1. 土方开挖

农田水利工程渠道施工中，土方开挖质量关系到后续施工质量，在土方开挖阶段，施工单位需要结合设计方案控制断面尺寸和边坡坡度，稳固渠道结构，避免出现安全问题。首先需要结合施工现场地质条件选择合适的挖掘机等设备，在开挖之前需要在现场放线定位，合理调控开挖边界。其次在开挖阶段要注意保护边坡，避免因出现超挖和坍塌等问题。施工单位可以利用分层开挖方式，同时需要设置支护结构，进一步稳固边坡。完成开挖之后，需要平整和压实处理基底，保证渠道的承载力。通过控制

施工质量，规避施工中的质量问题，优化整体施工条件。

2. 渠道衬砌

渠道衬砌施工的目的是规避渠道变形和坍塌，施工质量关系到渠道施工质量和使用寿命。常用的施工材料包括混凝土和砌石以及预制板，施工单位要结合施工要求和施工条件合理选择施工材料。例如在干旱区域，适合利用混凝土衬砌。在山区具有丰富的石材，可以选用砌石衬砌。在实际施工中，施工单位需要精准加工和安装衬砌材料^[8]。例如在混凝土衬砌施工中，施工单位需要安装模板和绑扎钢筋，最后进行混凝土浇筑和养护。在模板安装过程中需要尺寸的精准度，并且提高表面的平整度，否则对混凝土成型质量将会造成影响。在浇筑混凝土的过程，需要保证振捣施工的密实度，避免出现蜂窝等问题。此外完成衬砌施工之后，需要立即开展养护工作，施工单位可以覆盖薄膜或者洒水，避免混凝土结构出现裂缝问题。提高施工方法的科学性，保证衬砌施工质量，延长工程使用寿命。

在衬砌施工中，需要加强管理施工材料，保证材料性能符合施工标准。因此需要完善施工标准，在最大程度上控制材料损耗，将工程效益发挥出来，避免因建材而影响到施工质量和进度。在施工现场坚决杜绝利用不合格的施工材料，避免留下安全隐患，并且要及时防护养护施工材料，避免因材料性能发生改变而影响到施工安全性，甚至会整体施工进度也会造成影响。

（三）防渗施工管理

渠道防渗施工管理关系到农田水利工程使用性能。在施工中要做好以下几点工作。一方面需要安排专业的工作人员采购材料，保证所选的材料具备良好的防渗性和经济性，并且要保证质量过关。另一方面在对渠道开挖或者填补阶段，施工单位需要提前安排专业人员检查现场。在修补施工中，需要保证混凝土配比的合理性，优化整体施工效果。同时需要做好排水施工，避免发生渗漏问题。

四、结束语

在农业发展过程中，农田水利工程发挥重要的作用。为了顺利开展农田水利工程施工，需要做好驱动设计和施工管理工作，保证渠道设计细节符合标准，有利于顺利推进施工质量，避免出现质量问题，顺利完成整体施工任务，优化农田水利工程灌溉效果，在最大程度上满足农业生产需求。

参考文献

- [1] 冉小丽. 浅谈农田水利工程中的渠道设计与施工管理 [J]. 新农业, 2022, (04): 91.
- [2] 赵金宏. 农田水利工程中的渠道设计与施工管理路径探索 [J]. 农业科技与信息, 2022, (03): 85-87.
- [3] 丁振刚. 农业水利工程设计中的渠道设计与施工管理 [J]. 南方农业, 2021, 15(12): 216-217.
- [4] 边疆. 农业水利工程设计中的渠道设计与施工管理 [J]. 科学技术创新, 2020, (05): 111-112.
- [5] 王堡俊. 试析农田水利工程设计中的渠道设计与施工管理要点 [J]. 科技风, 2019, (35): 117.
- [6] 周宏娇. 农田水利工程设计中的渠道设计与施工管理研究 [J]. 南方农机, 2019, 50(10): 35.
- [7] 王存红. 试析农田水利工程设计中的渠道设计与施工管理要点 [J]. 科技风, 2019, (09): 178.
- [8] 牛永芸. 试析农田水利工程设计中的渠道设计与施工管理要点 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2019, (09): 177.

人工智能在高速公路信息化安全预警中的应用

杨育忠

云南云岭高速公路工程咨询有限公司, 云南 昆明 650000

DOI:10.61369/ERA.2025110015

摘 要 : 人工智能帮助高速公路工程信息化安全预警系统, 可以提升预警的精确程度和时效性, 依靠智能算法深入分析工程数据, 能够迅速找出潜藏的安全隐患, 采用机器学习模型预估事故发生的概率, 预先发出警报, 还能做到即时监测并适时调整, 给高速公路工程建设给予全面的安全保障, 以后随着数字孪生, 生成式 AI 等技术和预警系统结合得越来越密切, 就可以塑造起工程全生命时段安全管理的模型, 逼真地模仿风险改变的过程。并且自动产生应对办法, 而且还要同成本, 进度管理以及智慧城市平台联系起来, 达成“安全 – 效益 – 地域协同”的多方面控制, 促使高速公路工程安全管理朝着智能化, 一体化的方向迈进。

关 键 词 : 人工智能; 高速公路工程; 信息化安全预警系统; 应用

Application of Artificial Intelligence in Information Security Warning of Expressway

Yang Yuzhong

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

Abstract : Artificial intelligence enhances the informatization and safety early-warning systems for highway engineering, improving both accuracy and timeliness. By leveraging intelligent algorithms to deeply analyze engineering data, it enables rapid identification of potential safety hazards. Machine learning models predict accident probabilities, issue timely alerts, and perform real-time monitoring with adaptive adjustments, providing comprehensive safety assurance for highway construction. As digital twin technology and generative AI become increasingly integrated with early-warning systems, they can establish full lifecycle safety management models that accurately simulate risk evolution processes. These systems automatically generate response strategies while coordinating with cost management, schedule control, and smart city platforms. This integrated approach achieves "safety-benefit-regional coordination" across multiple dimensions, driving the advancement of intelligent and unified safety management in highway engineering.

Keywords : artificial intelligence; expressway engineering; information security early warning system; application

引言

高速公路工程规模不断增大, 安全预警变得越发必要, 传统预警系统存在效率低, 准确度差等毛病, 人工智能有着很强的数据处理和分析能力, 给解决这些问题带来了新办法, 把它应用到信息化安全预警系统当中, 可以明显改善工程的安全性以及管理水平

一、人工智能在预警系统中的基础性应用研究

人工智能推动的高速公路工程安全预知系统, 其数据采集与整合阶段要形成起覆盖工程全场景的多源数据网络, 保障数据全面且即时, 好给后续预知分析赋予支撑, 在施工场地, 通过布置物联网传感器搜集重要数据, 高填方路基区域装设沉降监测传感

器, 及时获取路基垂直位移数据, 桥梁挂篮施工处设置应力传感器, 观测挂篮承重结构的应力变动, 隧道施工面装置瓦斯浓度传感器和粉尘监测仪, 立刻得到有害气体含量及空气质量数据。数据整合阶段, 借助人工智能数据处理技术, 把结构化数据和非结构化数据统一代入标准化格式, 并存入云端数据库, 比如把不同品牌传感器输出的应力数据统一代入“兆帕 (MPa)”单位, 把

监控影像中的人违规行为标注为“未戴安全帽”“违规跨越防护栏”等标准化标签，消除数据格式差异和信息壁垒，给后续安全预警形成统一、完备的数据根基^[1]。

二、机器学习模型的构建与应用

（一）模型选择与优化

机器学习模型的选择要符合高速公路工程安全预警的实际需求，先选适配复杂工程场景、容错率高、准确度强的模型，并不断优化模型预警性能，针对高速公路工程安全风险的非线性、多因素关联特性，常用的机器学习模型有随机森林、支持向量机、长短期记忆网络（LSTM）等。在路基沉降风险预警方面，用随机森林模型，这种模型能应对多种输入特征，对异常值不太敏感，可以防止某个因素被误判，针对隧道施工塌方风险预警，用 LSTM 模型，它擅长处理时序数据，分析不同时间段里围岩变形、支护应力等数据的变化走向，准确找出塌方之前的微小数据变动。同时根据实时的施工数据动态更新模型训练样本，比如每新增 100 组有效的施工数据就对模型进行一次微调，以此来降低模型因工程场景改变而出现的预警误差，保证模型始终具有较高的识别准确率^[2]。

（二）事故概率预测

事故概率预测依靠训练好的机器学习模型，配合实时获取的工程数据，量化各类安全风险转化为事故的概率，为预警分级给予量化数据支撑。应用时，把实时监测的风险特征数据输入对应的机器学习模型，模型按照以前训练形成的事故概率计算逻辑，算出事故发生概率数值，比如做桥梁支座偏移风险预测。把支座实时位移量，位移变化速率，支座材质老化程度等数据输入支持向量机模型，模型对比历史支座偏移引发事故的案例数据，算出当前状态下的“支座失效事故”发生概率，如果概率是 35%，就有中等事故危险。在路面施工沥青摊铺温度预警里，把沥青摊铺温度，环境温度，风速等数据输入梯度提升树模型，预测“沥青路面离析事故”发生概率，当概率大于 60% 时，显示高事故危险^[3]。

（三）预警等级划分

预警等级划分依照事故概率预测结果以及风险影响范围，联系高速公路工程安全管理规范。借助人工智能的分级算法来确定风险等级，先拟定多方面的预警等级划分标准，考虑“事故发生概率”，“风险影响范围”，“可能造成的损失程度”这三个主要指标，把预警等级划分成“蓝色预警（低风险）”“黄色预警（中风险）”“橙色预警（较高风险）”“红色预警（高风险）”四个级别，指定各个级别的量化阈值，像“事故发生概率 10%–30%，影响范围只是单个施工班组，也许会引发轻微财产损失”就对应蓝色预警，“事故发生概率 60% 以上，影响范围波及整个施工标段，也许会致使人员伤亡和重大财产损失”就对应红色预警。在进行等级划分的过程中，人工智能系统会将事故概率预测结果以及实时分析的风险影响范围的数据输入到分级模型中，自动匹配相应的预警等级，例如当系统预测隧道塌方事故概率为 75%，并且通过 BIM 模型分析得出该风险影响隧道掌子面以及后方 50 米施

工区，影响 20 名作业人员和 3 台大型设备时，自动判定为红色预警；当系统预测路基沉降超标事故概率为 25%，影响路基施工段 10 米范围内，没有人员设备暴露时，判定为蓝色预警^[4]。

三、实时监测与动态调整机制

（一）实时数据跟踪

实时数据跟踪依靠人工智能同物联网技术的深度结合，创建起全天候，无缝衔接的数据监测网络，保证高速公路工程安全预警体系一直可以察觉到工程的安全情况变动。在硬件安装方面，给重要监测设备添加 5G 通讯模块，做到监测数据几乎即时传送，像路基下沉传感器每 30 秒搜集一次数据并立刻传到云端系统，桥梁应力传感器每隔 10 秒更新一次数据，这样就能让系统随时得到工程的动态，在隧道，桥梁这些信号较弱的地方，设置更多的边缘运算节点，先把这些数据进行本地预先处理和暂时保存，防止因为网络中断而造成数据丢失，等到网络恢复正常之后再自动同步到云端。数据跟踪时，人工智能系统依靠实时数据流监测技术，对重要数据指标展开持续跟踪，设定数据更新超时警报，某个传感器若 5 分钟没上传新数据，系统就会自动发出“设备离线警报”，然后告诉技术人员去检查设备和网络故障^[5]。

（二）预警策略调整

预警策略调整依靠实时数据跟踪结果以及模型预测更新，借助人工智能的自适应学习能力，及时改善预警参数和应对举措，从而保证预警系统符合工程安全状况的动态改变，当系统察觉到工程数据特征出现明显变动时，便开始预警策略调整流程，譬如路基施工踏入雨季，监测到“路基含水量不断增多”，人工智能系统就会联系以往雨季施工危险数据，自动把“路基滑塌危险”这个特征阈值降低，把原来的“每天下沉量达 5 毫米就要发出警报”改为“每天下沉量达 3 毫米就要发出警报”，而且缩减数据监测间隔，由原先的每 30 秒一次变成每 15 秒一次，以此加强预警敏感度。如果系统察觉到某种风险的预警准确率下滑，比如说“设备故障风险”的误报率由 5% 升至 12%，就会自动回溯最近的数据，判定是不是因为施工工艺改变或者设备更新才致使风险特征发生改变，从而改良机器学习模型的参数，像改变支持向量机的核函数参数，重新训练模型来削减误报率^[6]。

（三）应急响应联动

应急响应联动依靠人工智能的智能调度技术，把预警信息迅速传达到相关责任主体，联动工程现场应急资源，做到安全风险的及时处理，当系统发出预警信息之后，人工智能平台就会按照预警级别和风险类别，自动产生应急响应指令，发到对应人员，比如红色预警信息会立刻发到项目总指挥，现场安全员，技术负责人的移动端 APP 上，带有风险位置定位、风险描述、建议处置办法。而且通过现场广播系统播放语音预警通告，保证人员马上知晓风险。资源联动上，系统会对接工程现场的应急资源管理模块，随时查看能调用的应急设备和人员，要是碰到“边坡滑塌预警”，就自动找出附近的挖机，挖机，应急抢险班组的联系方式，做成资源调度方案，发给现场调度员，加快应急资源调动时间^[7]。

四、应用效果与发展趋势

（一）安全保障效果评估

安全保障效果评价要从风险防控效率，事故发生频率，应急处理能力等多个层面来展开，要对人工智能安全预估系统在高速公路工程中实际应用的价值予以量化分析。在风险防控效率方面，通过比较应用系统前后风险识别所花费的时间，来评判预警时效性，比如某高速公路项目应用系统之后，路基沉降超标风险的识别时间由传统的手工巡视的4个小时缩减到15分钟，风险处置响应时间由2小时缩减到30分钟，极大地提升了风险干预速度^[8]。就事故发生频率而言，核算应用系统以后各种安全事故的发生次数和损失大小，像某项目应用系统之前每年会遭遇3起设备故障事故，应用系统以后每年的事故降到1起，事故造成的经济损失从每年50万元降到15万元，而且人员违规操作事情发生的比率下降了60%，从而削减了安全事故隐患。在应急处置能力上，考察系统联动应急资源的效果，像某隧道出现涌水警报之后，系统在5分钟之内就把应急人员叫来，并且把抽排水设备调过来，20分钟之内就把涌水势头压制住，跟传统的处置方法比起来，这种办法省下了40分钟，防止了事故进一步扩大。

（二）现存问题与改进方向

当前，人工智能在高速公路工程信息化安全预警系统中也还存在一些短板，要结合短板提出改进的方向来提升系统的适应性和稳定性。从技术层面看，有些复杂工程场景下数据采集精度不够高，隧道施工中粉尘浓度过高，AI视觉识别准确率跌到75%，不能准确辨认人员违规情况，多源数据融合时不同类型传感器的数据时间同步性也不好，路基沉降数据和地质雷达数据采集时间相差1分钟以上，造成风险联系剖析不准。从应用层面来看，系统对新的施工工艺和特别地质条件的适应性有所缺乏，面对模块化施工、智能建造等新型工法，风险库缺少相应风险种类和特征阈值，从而不能准确察觉风险。对这些问题，改进的方向应该是技术优化和应用推广，技术上开发更抗干扰的传感器比如防尘高清

摄像头，优化数据同步算法减少多源数据的时间差，应用上定期更新风险库加入新的工艺风险，加强管理人员系统操作培训建立预警处置考核制度，保证系统可以适应工程技术的发展和管理需求^[9]。

（三）未来应用前景展望

未来人工智能在高速公路工程信息化安全预警系统中的应用会向“更智能、更融合、更全面”方向发展，安全预警的深度与广度将得到进一步拓展，在智能化升级上，将应用生成式AI技术，以工程历史数据和实时数据为基础，自动生成安全风险处置方案，对于“路基边坡滑塌预警”，除了发出预警，还会生成“先撤离人员，再设置临时支护，最后加固边坡”的分步处置方案，并且模拟方案实施的效果；结合数字孪生技术，构建高速公路工程全生命周期数字模型，将预警系统与数字孪生模型联动起来，实时显示风险演变过程，比如模拟隧道塌方风险从萌芽到扩大的过程，帮助管理人员做出更精准的防控决策。在融合应用上，要让安全预警系统与工程成本管理、进度管理系统之间的数据互通，“安全-成本-进度”协同管控，当系统发出“设备故障预警”时，同时分析故障处置对施工进度的影响以及成本增加的幅度，给管理人员给予综合决策依据。并且要同智慧城市、智慧交通体系融合起来，把高速公路工程施工安全数据归入区域安全管理网络之中，做到跨部门、跨领域共同防控安全风险^[10]。

五、结束语

人工智能在高速公路工程信息化安全预警系统中的应用已取得一定的成果，对高速公路工程的安全预警起到了一定的作用。但仍然需要不断完善技术和方法，才能更好的适应复杂的工程环境。随着人工智能技术的发展，在未来人工智能将在高速公路工程信息化安全预警中发挥更大的作用，推动高速公路工程安全管理达到新的高度。

参考文献

- [1] 王博, 刘昌赫, 张驰, 等. 基于道路监控的高速公路作业区碰撞风险预警 [J]. 浙江大学学报 (工学版), 2024, 58(06): 1221-1232.
- [2] 李长寿, 张素君. 人工智能和大数据对高速公路养护运营的安全提升 [C]// 中国公路学会养护与管理分会, 重庆高速公路集团有限公司, 招商局重庆交通科研设计院有限公司. 中国公路学会养护与管理分会第十三届学术年会论文集. 山东欣鹏安全技术咨询有限公司, 2024: 482-486.
- [3] 谢克勇. 基于5G+ 人工智能的高速公路恶劣天气行车安全灾害预警示范应用技术. 江西省, 江西省气象服务中心, 2023-09-08.
- [4] 王乐宁. 基于人工智能的高速公路车辆安全驾驶预警系统识别方法与系统设计 [J]. 山西交通科技, 2020, (05): 104-107.
- [5] 徐琨. 智能安全监测系统在公路架桥机中的应用 [J]. 江西建材, 2017(11): 179-180.
- [6] 饶舰, 韩佳. 基于大数据的公路工程安全智能管控云平台构建 [J]. 土木建筑工程信息技术, 2022, 14(2): 120-126.
- [7] 成义龙, 曲超. 大数据与人工智能在公路施工管理中的协同应用 [J]. 世界家苑, 2024(7): 115-117.
- [8] 杨文广, 张茜. 浅析基于工程数字化的新一代管理信息化理论建构及实践展望 [J]. 土木建筑工程信息技术, 2021, 13(1): 113-121.
- [9] 黄颖, 高杰. “智慧工地”在公路工程项目中应用研究 [J]. 土木建筑工程信息技术. 2019, (4).
- [10] 朱子翔. 基于信息技术的数字安全管理系统在公路工程中的应用研究 [J]. 重庆建筑. 2022, 21(11).

遥感影像在土地利用动态监测中的测绘应用

朱江

宿迁市征地勘测中心, 江苏 宿迁 223800

DOI:10.61369/ERA.2025110016

摘 要 : 遥感影像凭借覆盖范围广、更新频率高和数据精度较好的特点, 在土地利用动态监测中展现出显著优势。通过多时相遥感数据的获取与解译, 可及时掌握土地利用类型的空间格局变化, 识别耕地、林地、建设用地等要素的动态转移, 为分析区域土地利用结构演变提供科学依据。同时, 结合地理信息系统技术, 能够实现多维度对比与趋势预测, 为土地资源的合理配置与可持续利用提供技术支撑, 具有重要的应用价值。

关 键 词 : 遥感影像; 土地利用; 动态监测; 测绘应用

Surveying and Mapping Applications of Remote Sensing Imagery in Dynamic Monitoring of Land Use

Zhu Jiang

Land Acquisition Survey Center of Suqian City, Suqian, Jiangsu 223800

Abstract : Remote sensing imagery, characterized by its extensive coverage, high update frequency, and good data accuracy, demonstrates significant advantages in dynamic monitoring of land use. Through the acquisition and interpretation of multi-temporal remote sensing data, it is possible to promptly grasp changes in the spatial patterns of land use types, identify dynamic transitions among elements such as cultivated land, forest land, and construction land, and provide a scientific basis for analyzing the evolution of regional land use structures. Additionally, by integrating Geographic Information System (GIS) technology, multi-dimensional comparisons and trend predictions can be achieved, offering technical support for the rational allocation and sustainable utilization of land resources. This approach holds important application value.

Keywords : remote sensing imagery; land use; dynamic monitoring; surveying and mapping applications

引言

随着社会经济的快速发展和城市化进程的加快, 土地利用格局不断发生深刻变化, 如何及时、准确地掌握其动态演变已成为资源管理和可持续发展的关键问题。传统调查方法在效率与精度方面存在局限, 而遥感影像凭借大范围、周期性和多维度的信息优势, 为土地利用动态监测提供了全新途径。通过测绘技术的支持, 遥感数据不仅能直观反映空间格局, 还能揭示潜在变化趋势, 为科学决策与资源优化配置提供重要参考^[1]。

一、遥感影像在土地利用动态监测中的技术优势

遥感影像在土地利用动态监测中的技术优势主要体现在其大范围覆盖和快速更新能力上。传统的地面调查在土地利用监测中常受到时间、空间以及人力资源的限制, 往往难以及时、全面地掌握土地利用格局的变化。而遥感技术通过搭载在卫星或航空平台上的传感器, 可以在较短时间内获取大面积区域的地表信息, 突破了时空局限性。这一特点使得研究者能够定期获取多时相数据, 动态反映不同季节和年度的土地利用变化情况, 为宏观调控与规划提供持续的数据支撑。同时, 遥感影像在空间分辨率和光谱分辨率上的不断提升, 使得耕地、林地、草地、水域及建设用

地等不同土地类型能够被更加清晰地区分, 从而提高了监测结果的精确性和可靠性。尤其在城市化快速发展的背景下, 遥感影像能够有效揭示城市扩展、耕地减少等动态演变特征, 为政府相关部门的管理与决策提供科学依据^[2]。

除了空间与时间上的优势, 遥感影像在信息提取与数据分析方面同样展现出不可替代的价值。遥感技术可以通过多光谱和高光谱成像获取地物的光谱特征, 不同土地利用类型在光谱曲线上表现出差异性, 这为分类与识别提供了坚实基础。借助先进的影像解译与图像处理算法, 可以自动化地识别和提取地表覆盖信息, 大大提高了数据处理效率。此外, 遥感影像与地理信息系统结合后, 能够进行空间叠加分析和动态演算, 形成多维度、多时

间序列的土地利用数据库。这不仅提升了监测的深度与广度，还能通过数据的对比与建模，揭示土地利用演变的规律和驱动因素^[3]。例如，通过对比不同年份的遥感数据，可以直观展示城市扩张带来的建设用地增长和生态环境的空间变化，从而为土地资源合理配置与生态环境保护提供科学依据。

更为重要的是，遥感影像在测绘应用中还具有成本可控、操作灵活和适应性强的优势。相比传统的实地测绘，遥感监测不仅减少了大量的人力与物力投入，而且能够在复杂或难以进入的地形环境中实现高效的信息获取，如山区、沙漠以及湿地等区域。同时，随着无人机遥感和高分辨率卫星影像的普及，数据获取的灵活性和精细度得到了进一步提升，使土地利用动态监测能够更具针对性和实用性。遥感测绘还具备较强的可扩展性，可以与人工智能、大数据等前沿技术深度融合，推动土地利用监测向智能化和自动化方向发展^[4]。在未来，遥感影像将不仅仅是静态地展示土地利用状况，更能通过实时数据更新与动态模拟预测，为国土空间规划、资源环境管理及区域可持续发展提供长远支持。综上所述，遥感影像凭借其覆盖广、精度高、效率高、独特优势，已经成为土地利用动态监测中不可或缺的重要技术手段。

二、土地利用变化信息的遥感测绘获取与分析

土地利用变化信息的遥感测绘获取与分析在动态监测中发挥着核心作用。首先，遥感技术能够通过多时相影像实现土地利用数据的连续获取，使研究者在不同时段掌握地表覆盖格局的演变特征。遥感影像在光谱、空间和时间分辨率方面的不断提升，使得土地利用类型的识别更加准确，特别是对耕地、林地、草地和建设用地的区分更加清晰。例如，耕地在红光和近红外波段上反射率特征明显，而林地因植被密集表现出稳定的光谱曲线，通过这种光谱特征差异，能够实现高精度的分类^[5]。在实际操作中，常采用监督分类、非监督分类以及面向对象的影像分类方法，通过训练样本与算法模型对影像进行自动识别，从而形成高精度的土地利用分布图。这些数据的积累不仅为静态的资源调查提供支撑，更为动态监测奠定了坚实基础。

其次，遥感测绘在数据分析层面展现出较高的集成性和灵活性。通过将遥感影像与地理信息系统平台相结合，可以实现空间叠加、变化检测和趋势分析等功能。常见的变化检测方法包括影像差分法、主成分分析法和分类后对比法，能够有效识别土地利用的增减与转移^[6]。以 2019 年与 2024 年 两期遥感数据对比为例，可量化五年间城市扩展导致的建设用地增加与耕地等类型的减少。同时，时间序列建模与回归分析可推断未来土地利用变化的方向与速度，为政策制定提供参考。遥感测绘既能揭示总体空间格局变化，也能精确到地块尺度，为区域规划和管理提供微观层面的依据，实现宏观与微观的联动。

最后，遥感测绘的优势还体现在其可量化、可比较的特征上，尤其是能够以数据表格的形式直观展示各类型土地在不同时期的规模与变化率。通过对 2019 与 2024 年影像的译解与统计，可清晰呈现建设用地增长、耕地与草地微幅回落、林地小幅波

动、水域基本稳定但有结构性调整等趋势。2019—2024 年主要土地利用类型的变化情况（单位：km²），如表 1 所示：

表 1 2019—2024 年主要土地利用类型的变化情况

土地利用类型	2019 年面积	2024 年面积	变化幅度	变化率（%）
耕地	4,820	4,550	-270	-5.6
林地	3,000	2,940	-60	-2.0
草地	1,750	1,685	-65	-3.7
水域	715	730	+15	+2.1
建设用地	1,650	2,030	+380	+23.0

从表中可以看出，2019—2024 年间建设用地增幅显著，而耕地、草地和林地呈不同程度回落，反映了快速城镇化背景下土地利用格局的结构性调整。该变化过程经由遥感影像的测绘获取与变化检测实现科学量化，为国土空间规划、用途管制与生态保护的差异化策略提供了可靠的数据支撑。

三、遥感影像与地理信息系统的融合应用

遥感影像与地理信息系统的融合应用已经成为土地利用动态监测的重要方向，其核心价值在于实现空间信息的集成与综合分析。遥感影像能够快速获取大范围地表覆盖信息，而地理信息系统则具备强大的空间存储、管理与分析功能，两者结合能够突破单一技术的局限性，实现从数据获取到信息管理的全流程支撑。在监测过程中，遥感影像提供了直观的地表影像数据，GIS 则通过空间叠加、分层管理与属性查询，将这些数据转化为可操作、可分析的成果。例如，在城市扩展研究中，遥感影像用于识别新增建设用地的边界，GIS 则能够进一步叠加人口、交通、经济等多维度数据，揭示土地利用变化的驱动机制。这种融合不仅提升了数据解译的精度，也为土地资源的精细化管理提供了技术保障^[7]。

在实际应用中，遥感影像与 GIS 的融合主要体现在动态变化检测与空间建模方面。遥感影像能够获取多时相数据，为土地利用变化提供时间序列支撑，而 GIS 能够将这些数据叠加分析，从而形成直观的变化图层。常见的变化检测方法如分类后对比法、叠加差分法和时序分析法，都可以通过遥感与 GIS 的结合实现高效应用。例如，利用遥感影像提取 2000 年与 2020 年的土地利用数据，再通过 GIS 平台进行叠加比较，能够精确定位耕地转为建设用地的区域，甚至可以进一步量化其变化面积。同时，GIS 还能够对遥感影像提取的结果进行空间统计与可视化分析，将复杂的数据转化为直观的图表和地图。这种方式不仅提高了监测的科学性和可操作性，也为决策者提供了可视化的直观依据，使其更容易理解土地利用变化的趋势和影响^[8]。

更进一步地，遥感影像与 GIS 的融合在趋势预测与模拟分析方面展现出巨大潜力。通过将遥感影像提取的土地利用数据输入 GIS 的空间分析模型，可以模拟未来的土地利用变化格局。例如，基于马尔科夫链模型或 CA（元胞自动机）模型，结合遥感与 GIS 的数据，可以预测未来十年某地区的城市扩展范围与生态环境可能受到的影响。这种预测不仅具有科学研究价值，更在城市规划、生态保护和资源管理中具有重要实践意义。同时，随着人工

智能与大数据技术的发展，遥感与 GIS 的融合正不断向智能化方向迈进，深度学习算法能够自动识别影像特征，GIS 则提供精确的空间定位和分析，使监测结果更加高效和精准。未来，遥感与 GIS 的深度融合将不仅局限于土地利用动态监测，还将在灾害监测、生态评估和环境治理等领域发挥更广泛的作用，成为推动可持续发展的重要技术支撑。

下面给出一张示意图，展示遥感影像与 GIS 融合在土地利用动态监测中的应用流程如图 1 所示：

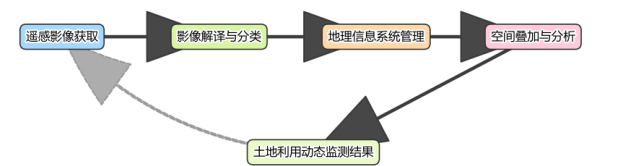


图1 遥感影像与 GIS 融合在土地利用动态监测中的应用流程

四、遥感测绘在土地利用可持续管理中的实践价值

遥感测绘在土地利用可持续管理中的实践价值体现在其能够为宏观战略与微观决策提供科学依据。随着城市化进程不断加快，土地资源紧张、生态环境承载力下降的问题愈加突出，如何在开发与保护之间寻求平衡，成为可持续发展的核心议题。遥感测绘凭借多时相影像的动态监测能力，可以全面掌握土地利用类型的空间分布及变化趋势。例如，通过长期序列遥感数据的解译，不仅能够揭示建设用地扩张对耕地和林地的挤占效应，还能识别水域面积变化对区域生态安全的影响。这种监测方式为政府和相关部门制定土地利用总体规划、耕地保护红线、生态修复方案提供了科学基础，从源头上减少因土地利用不当导致的资源浪费和生态破坏，从而推动土地资源的高效与合理利用。

在实践层面，遥感测绘与地理信息系统的融合使土地利用的可持续管理更具操作性与前瞻性。通过遥感影像提取的空间数据与 GIS 的分析功能，可以开展土地利用承载力评价、生态功能分区与环境风险预测等多维度研究。例如，在城市群发展过程中，

遥感测绘能够识别城市扩展边界，进而叠加交通、人口与产业布局数据，分析土地利用强度是否超过区域承载力，以防止无序扩张引发的环境退化。同时，遥感测绘还能应用于农业可持续发展中，通过对耕地的空间分布、种植结构及作物长势的动态监测，优化农业用地结构，提高土地利用效率。在林地和草地管理中，遥感测绘能够追踪植被覆盖率的变化，及时发现退化或过度开发区域，提出科学的生态修复对策。由此可见，遥感测绘在土地利用的资源配置与生态保护方面发挥着不可替代的作用，有助于实现经济发展与生态环境保护的双赢^[9]。

更为重要的是，遥感测绘为土地利用的可持续发展提供了监测—预警—决策的闭环机制。通过定期获取遥感数据并与历史数据进行对比，可以建立动态数据库和预警系统，快速识别土地利用中潜在的风险，如建设用地过快扩张、耕地面积持续减少或水域生态功能退化等。这一机制不仅能在问题初现端倪时及时提出干预措施，还能为制定长远的空间发展战略提供参考。同时，随着人工智能、大数据和云计算技术的应用，遥感测绘已逐渐实现自动化和智能化，使大规模土地利用监测和模拟预测成为可能。在未来，遥感测绘不仅仅是一种技术工具，更是土地利用可持续管理的重要支撑体系，它通过客观、实时、科学的数据分析，帮助决策者在发展与保护之间找到平衡点，促进社会经济、自然资源与生态环境的协调发展，为实现可持续发展目标提供坚实保障。

五、结束语

遥感影像在土地利用动态监测中的测绘应用，充分展现了其在信息获取、变化检测与趋势预测方面的独特优势。通过与地理信息系统的深度融合，遥感测绘不仅能够实现土地利用格局的动态量化，还能在宏观规划与微观管理中提供科学支撑^[10]。土地利用变化数据显示，城市扩展与生态保护之间的矛盾日益突出，合理利用与科学管控成为关键。遥感测绘在土地资源配置、生态修复、风险预警及可持续管理中发挥了重要作用，为实现经济发展与生态环境协调共进提供了强有力的技术保障与实践价值。

参考文献

- [1] 贺微，雷青静. 高分辨率遥感影像技术在土地工程监测中的应用研究 [J]. 石河子科技, 2025, (04): 75–76.
- [2] 李秋华. 遥感影像技术在土地调查和动态监测中的应用研究 [J]. 房地产世界, 2024, (22): 146–148.
- [3] 楚水滔，向玉，刘欣悦. 高分辨率遥感影像在土地工程监测中的应用 [J]. 长江信息通信, 2024, 37(11): 46–48.DOI: 10.20153/j.issn.2096-9759.2024.11.014.
- [4] 李朝旭. 无人机遥感影像在土地确权测绘中的应用 [J]. 北京测绘, 2023, 37(05): 751–755.DOI: 10.19580/j.cnki.1007-3000.2023.05.023.
- [5] 刘红英. 遥感影像技术在土地调查和动态监测中的应用 [J]. 农业工程技术, 2023, 43(05): 83–84.DOI: 10.16815/j.cnki.11-5436/s.2023.05.034.
- [6] 张启光. 遥感影像在土地调查和动态监测中的应用研究 [J]. 科技资讯, 2022, 20(16): 1–3.DOI: 10.16661/j.cnki.1672-3791.2112-5042-8755.
- [7] 任宁宁. 遥感影像在土地调查和动态监测中的应用研究 [J]. 中国地名, 2020, (01): 77.
- [8] 李建军. 遥感影像在土地变更调查与监测中的应用分析 [J]. 冶金管理, 2023, (07): 61–62.
- [9] 侯存伟. GPS 遥感测绘方法在土地测绘中的应用研究 [J]. 世界有色金属, 2021, (01): 24–25.
- [10] 叶威，刘丽丽，闪军. GPS 遥感测绘方法在土地测绘中的应用研究 [J]. 科技风, 2020, (29): 98–99+117.DOI: 10.19392/j.cnki.1671-7341.202029048.

人工智能辅助下机械制图个性化教学模式构建

马琨, 郭峰

西安文理学院机械与材料工程学院, 陕西 西安 710065

DOI:10.61369/ERA.2025110024

摘 要 : 机械制图作为工程教育核心课程, 其教学质量直接影响学生工程实践能力培养。本文聚焦人工智能技术赋能机械制图课程个性化教学模式构建。基于人工智能核心技术与个性化学习理论, 深入剖析了机械制图教学特点与学生个体化需求。阐述了该模式在提升教学效率与质量、精准适配学习差异、促进教育资源共享三方面的显著优势。重点提出以学生中心、智能辅助、持续优化为原则, 设计涵盖学习特征识别、资源智能推荐、学习路径规划、过程监控反馈四大功能模块的教学框架, 并明确教师转型、学生能力培养与技术环境支持等实施保障。旨在为革新机械制图教学形态、实现规模化因材施教积蓄力量。

关 键 词 : 人工智能; 机械制图; 个性化教学

Construction of an AI-Assisted Personalized Teaching Model for Mechanical Drawing

Ma Kun, Guo Feng

School of Mechanical and Materials Engineering, Xi'an University of Arts and Sciences, Xi'an, Shaanxi 710065

Abstract : Mechanical drawing, as a core course in engineering education, directly influences the cultivation of students' practical engineering abilities. This paper focuses on the construction of an AI-empowered personalized teaching model for the mechanical drawing course. Based on core AI technologies and personalized learning theories, it delves into the characteristics of mechanical drawing instruction and the individualized needs of students. The paper elucidates the significant advantages of this model in three aspects: enhancing teaching efficiency and quality, precisely adapting to learning differences, and promoting the sharing of educational resources. Emphasizing student-centeredness, intelligent assistance, and continuous optimization as guiding principles, it proposes a teaching framework encompassing four functional modules: learning characteristic identification, intelligent resource recommendation, learning path planning, and process monitoring and feedback. Additionally, it clarifies implementation safeguards, including teacher transformation, student ability development, and technological environmental support. The aim is to accumulate strength for innovating the teaching approach of mechanical drawing and achieving large-scale personalized instruction.

Keywords : artificial intelligence; mechanical drawing; personalized teaching

引言

因统一教学进度和资源有限, 难以有效解决学生空间认知能力、学习速度及理解程度的显著个体差别。人工智能技术飞速进步, 它在数据分析、模式识别与自适应学习范畴所体现的强劲能力, 为攻克难题创造了崭新契机。深度整合人工智能到机械制图教学中, 创建能精准掌握学情、实时调整教学策略、智能搭配教学资源的个性化授课模式, 是提高教学成效、培育高素质工程人才的必然走向。故而要全面探究人工智能助力下机械制图个性化教学模式的理论根基、关键优势和构建办法。

一、人工智能辅助机械制图教学的理论基础

(一) 人工智能技术概述

人工智能作为模拟延伸人类智能的科学技术集群, 其核心在

于赋予机器感知环境、理解知识、学习推理及自主决策的能力, 相关技术如机器学习、自然语言处理、计算机视觉等构成其重要支撑。相应技术在教育领域展现出广阔应用前景, 特别是在分析学习行为、识别认知规律、具备提供智能反馈等功能的独特长

处。教育领域引入的人工智能系统，能对海量教学数据进行处理，探寻隐匿的学习规律，为达成教育过程精准与智能干预提供稳固技术保障，由此为探寻机械制图教学新方式开创了崭新途径。

（二）机械制图教学的特点与需求

机械制图课程核心目标是培养学生扎实的工程图样识读、绘制能力及严谨的空间思维能力，其教学内容涵盖投影理论、制图标准、零件图与装配图表达等系统性知识技能。该课程实践性强，对学生的空间想象力和规范操作要求极高，不同学生因空间认知能力、前期知识储备及学习习惯的显著差异，学习进度、理解深度与实践操作必然会展现出多样需求^[1]。传统统一教学模式无法充分契合个体差异，有必要引入能精准辨别并回应个体学习状态的教学举措，达成学生个性化学习要求，提高整体教学成效。

（三）个性化教学模式的理论依据

个性化学习强调以学习者为中心，尊重个体差异，依据学习者的知识基础、认知风格、兴趣偏好及学习目标，动态调整学习内容、路径、方法与节奏，其核心原理在于因材施教与自适应学习。构建人工智能辅助下的教学模式，需要以建构主义学习理论、掌握学习理论等为思想指引，将智能技术作为支撑个性化学习实现的关键赋能工具^[2]。教学模式构建的理论框架要整合对学习特征的分析、个性化目标的设定、适应性内容的推送、智能路径的规划、即时反馈的调节以及效果的动态评估等关键部分，构建逻辑通顺、技术靠谱的循环系统，为人工智能与机械制图教学深度融合提供理论依据。

二、人工智能辅助下机械制图个性化教学模式的优势

（一）提高教学效率与质量

人工智能技术融入有力推动机械制图教学质效提升，智能系统可迅速处理与剖析学生于绘图练习、空间思维测验及知识理解期间所产生的海量行为数据，精确找出班级全体与单个学生的共同薄弱之处和典型错误类型，该种基于数据的洞察远超越传统经验判断的局限。教师据此可迅速调整教学重点，针对高频错误和知识盲区实施精准讲解与强化训练，极大缩短了问题发现与教学干预的周期。同时，人工智能辅助工具如智能绘图批改系统、三维模型动态生成与拆解工具、规范性自动校验程序等，能即时完成对学生作业中尺寸标注、线型应用、视图表达规范性等技术细节的自动化检查与反馈，将教师从繁重的重复性劳动中解放出来，使其能将更多精力投入到启发式教学、开展高阶思维启发与个性化教学此类更富创意的工作^[3]。高效精准的教学支撑，显著提高了单位时间教学产出量，还借助及时纠错与深入剖析，保障了学生技能掌握的标准度与规范度，最终达成教学成效和人才培养水平的全面提升。

（二）满足学生个性化学习需求

传统机械制图课存在难以攻克的难题，即无法有效适应学生个体在空间认知能力、学习速度和兴趣爱好上的显著不同。个性化教学模式借助人工智能，从根本上扭转了此种状况，系统依托

持续监测学生于平台之上的学习路径、互动举动、答题状况与练习成效，运用智能分析技术深度刻画每位学生的知识图谱掌握状态、空间想象力发展水平、学习风格倾向以及潜在的学习障碍点。基于精细化的学习者画像，系统能够动态生成并推送高度适配个体当前状态的专属学习资源包，其包括为空间思维薄弱者提供更多基础性三维模型观察与转换训练，为进度领先者设计更具挑战性的复杂装配图绘制任务，为偏好视觉学习的学生匹配丰富的动态演示资源，为逻辑型学生则侧重原理推导与步骤解析。更重要的是，系统能够为每位学生规划并动态调整最优学习路径，设定符合其能力水平的近期目标与长远规划，当面临难题时，自动给予层级式指引与具针对性的补救训练^[4]。若掌握情况良好便即刻推送高级内容，全程覆盖学习过程的精准适配的个性化帮扶，让每个学生都能在自身能力范围内实现有效成长，充分挖掘学习潜力，切实达成因材施教的教育目标。

（三）促进教育公平与资源共享

机械制图个性化教学模式借助人工智能，在推进教育公平与优质资源共享上体现出重大价值，智能系统所具备的大量教学资源库以及出色的适配能力，切实缩小了不同地域、不同层次学校师资力量与教学条件的客观差异。即使身处资源相对匮乏地区的学生，也能通过接入智能平台，获得与发达地区同等水准的优质制图课程资源、精准的学习诊断与个性化的辅导支持，显著缩小了因地域或学校条件差异导致的教育机会不平等。接着，智能平台强大的资源汇聚与分发能力，打破了优质教育资源流动的时空壁垒。顶尖教师开发的精品教学案例、前沿的工程图纸范例、复杂的动态三维模型资源等，均可在平台上实现标准化集成与智能标签化管理。系统依据学习者特征进行精准匹配，使稀缺的高价值资源得以突破校园围墙，高效覆盖至更广泛的学习群体，极大提升了资源的利用效率与辐射范围^[5]。再者，平台所积攒的大量匿名学习行为数据，为透彻把握机械制图学习的一般规律与个体差别奠定了珍贵研究基石，分析结果能反馈到教学资源的不断优化升级和教学策略的广泛改良，最终让全体学习者受益。此模式既助力个体学生的个性化发展，还在宏观维度促使优质教育资源普遍共享与整体教学水平均衡提升，为实现更高级别的教育公平筑牢了技术根基。

三、人工智能辅助下机械制图个性化教学模式构建

（一）明确教学模式构建原则

在人工智能辅助下开展机械制图个性化教学，需明确具备指导意义的核心准则，以学生为中心的原则规定，教学模式的规划与运作需始终聚焦于学习者的实际需求和成长潜力，涉及学生知识的掌握水平、能力发展的瓶颈问题、学习风格偏好及个体成长目标置于系统设计的首要位置，确保技术应用服务于人的全面发展而非本末倒置。智能辅助原则强调人工智能技术的角色定位是赋能与增效，其核心价值在于通过智能分析、精准推荐与动态调适等功能，为教师的教学决策与学生的学习过程提供强大的数据支撑与工具支持，但绝不替代教师的主导作用与学生的主体地

位，人机协同方能实现教育价值的最大化。持续优化原则则着眼于教学模式的动态演进特性，要求系统具备基于教学实践数据的自我反思与迭代升级能力，通过持续收集教与学过程中的多维度反馈信息，评估模式运转的有效性与适配性，推动教学资源、路径规划、交互策略等核心要素持续优化，保证教学模式可适应技术演进、教育理念更迭以及学生需求的变动，维持长期的活力与领先性。三项原则彼此依托、相辅相成，共同为教学模式搭建奠定价值根基与实践导向。

（二）教学模式框架设计

该个性化教学模式核心框架由四个彼此关联、协同工作的智能功能模块组成，学生学习特征智能识别模块作为全模式的启动点。关键任务是采集、分析学生在绘图平台上交互留下的日志、练习所得结果、测试呈现表现以及过程性的行为数据，借助智能算法对学生当下知识水平的掌握状况开展客观评定，还深入剖析学习风格类别、认知偏好特点和潜在学习阻碍，为后续个性化干预提供精准认知支撑。基于对学习特征的深度理解，个性化教学资源推荐模块开始发挥作用，该模块首先要求对海量的机械制图教学资源进行系统化分类与精细化标签化处理，明确标注资源的知识点归属、技能点要求、难度层级、呈现形式等关键属性，接着借助智能匹配系统，按照识别出的学生个人特性和即时学习诉求，从资源库中筛选并推送与他们当前学习态势和发展目标相适配的教学内容、学习素材及练习项目，做到资源供给精准且个性。智能学习路径规划模块则着眼于学习进程的宏观引导，系统依据学生特征识别结果与教学目标体系，为每位学生设定符合其能力水平的个性化短期目标与长期规划，并将目标科学分解为可执行的学习步骤序列，更重要的是该模块具备动态调整能力，能够根据学生实际学习进度与效果反馈，实时优化后续学习路径的难度梯度、内容侧重点及推进节奏，确保学习进程始终处于学生的最近发展区内。学习过程的监控与反馈模块在整个学习阶段持续发挥作用，持续性收集记录学生学习行为数据并开展分析阐释，若察觉学习偏差、效率欠佳或理解障碍等状况，系统会马上触发干预手段，给学生实时提供操作指引、纠错提议、概念补充讲解或适配练习。同时为教师端生成学情警示与教学指导报告，形成监测、分析、反馈、调整的闭环支撑，四个模块相互衔接、数据交互，合力搭建起一个以数据作驱动、以智能为依托、以个性化为特色的动态教学系统架构。

（三）完善教学模式实施

达成人工智能辅助的个性化教学模式由理论架构迈向有效应

用，完善配套实施保障措施是关键。核心要务是实现教师角色的深度变革与专业能力的同步增进，教师应从以往的知识传授者与课堂管理者的角色，转变为学生学习进程的指引者、定制化学习方案的规划者、人机协作的统筹者以及高阶思维能力的培育者，要求教师不仅掌握扎实的机械制图专业知识与教学技能，还须具备理解人工智能工具原理、解读学习分析数据、设计个性化学习任务以及开展基于数据的教学决策等新型能力，因此必须建立常态化的教师智能教育素养培训与研修机制。同时，学生自主学习能力的培育是模式顺利运转的根本，有了智能环境的支撑，学生获得了更多的学习自主权限和选择范围，不过也需其拥有更优的目标管理观念、时间安排能力、自我监督习惯以及主动获取资源和求助的意愿，教师与系统需协同设计引导策略，通过目标设定引导、元认知能力训练、学习反思日志、协作学习任务等方式，循序渐进地培育和提升学生的自主学习素养。最后，稳定可靠的教学环境与技术支撑是模式落地的物质保障，其包括建设高速稳定的校园网络环境，配备满足智能绘图软件运行要求的终端设备，部署功能完善、数据互通的教学管理平台与学习分析系统，构造专业技术运维班子来维持平台稳定且实现即时更新，且制定有关的数据安全及隐私保护规章。只有教师完成转型、学生能力达标、环境技术完善，三者协同作用，人工智能助力的个性化教学模式方可充分发挥其变革效能，促进机械制图教学质量大幅提升。

四、结束语

人工智能辅助下机械制图个性化教学模式的构建，标志着该领域教学改革的重要方向。借助确立以学生为中心、智能辅助和持续优化的原则，搭建包含学习特征辨认、资源精准投送、路径动态规划、过程闭环管控的智能教学框架体系。同时借助教师角色的重新塑造、学生自主能力的培育以及技术环境的保障，此模式切实满足了学生个性化学习诉求。未来应不断推进智能算法与教育场景的结合，优化以数据为导向的教学决策办法，增强教师的智能教育水平，助力该模式从理论搭建过渡到广泛施行，最终让机械制图教学水平和人才培养效果实现显著提升，为工程教育的创新发展增添长久活力。

参考文献

- [1] 崔强，徐生，张丽，等. 基于 OBE 理念的“机械制图”教学探索与研究[J]. 现代农机，2024，(05):109-111.
- [2] 黎帅，余阿东，赵琨. CAD 技术在制图课程融合教学中的应用[J]. 电子技术，2024，53(09):318-319.
- [3] 冯丹艳. 《机械制图与 CAD》课程思政教学设计与实践[J]. 产业与科技论坛，2024，23(18):191-193.
- [4] 李启智. 岗课赛证融通的机械制图课程教学改革研究[J]. 模具制造，2024，24(09):108-110.
- [5] 由国艳. 线上线下混合教学模式下高职机械制图的教学策略研究[J]. 教师，2023，(10):126-128.

无线远传技术在 DCS 报警优化中的应用

任保同

兖矿国宏化工有限责任公司, 山东 邹城 273500

DOI:10.61369/ERA.2025110027

摘 要 : 随着无线传感器网络在工业领域的广泛应用, DCS 报警系统在面对高维数据和噪声环境时, 常常存在误报警率高、响应时间长等问题。研究提出基于无线远传技术的多传感器协同优化算法 (MS-Opt), 通过结合决策树和支持向量机技术, 优化 DCS 报警系统的性能。实验结果表明, MS-Opt 误报警率降至 1.32%, 分类准确率达到 98.7%, 响应时间为 45.3 毫秒。MS-Opt 在高负荷情况下仍能保持较低的计算资源消耗, 在实时报警优化中的应用潜力优异, MS-Opt 算法可以为 DCS 报警优化提供有效的解决方案。

关 键 词 : 无线传感器网络; DCS 报警优化; 实时监控; 数据融合

Application of Wireless Remote Transmission Technology in DCS Alarm Optimization

Ren Baotong

Yankuang Guohong Chemical Co., Ltd., Zoucheng, Shandong 273500

Abstract : With the widespread application of wireless sensor networks in the industrial sector, DCS alarm systems often encounter issues such as high false alarm rates and long response times when dealing with high-dimensional data and noisy environments. This study proposes a multi-sensor collaborative optimization algorithm (MS-Opt) based on wireless remote transmission technology, which optimizes the performance of DCS alarm systems by integrating decision tree and support vector machine techniques. Experimental results indicate that MS-Opt reduces the false alarm rate to 1.32%, achieves a classification accuracy of 98.7%, and has a response time of 45.3 milliseconds. MS-Opt maintains low computational resource consumption under high loads and demonstrates excellent potential for application in real-time alarm optimization. The MS-Opt algorithm can provide an effective solution for DCS alarm optimization.

Keywords : wireless sensor networks; DCS alarm optimization; real-time monitoring; data fusion

引言

随着工业自动化水平的不断提高, 分布式控制系统 (Distributed control system, DCS) 在多个行业中得到广泛应用^[1]。DCS 报警系统作为监控工具负责实时检测设备异常并发出报警, 确保生产过程的安全。然而随着设备种类和监测点的增加, 传统的报警系统在面对高维数据和复杂环境时, 常常表现出较高的误报警率、较长的响应时间以及较低的分类准确性等问题^[2]。当前随着无线传感器网络 (Wireless sensor network, WSN) 的发展, 基于无线传感器的 DCS 报警优化成为研究的热点^[3]。无线远传技术能够提供实时监控和数据传输, 在保障数据更新及时性的同时, 面临着数据波动、噪声干扰等问题。因此如何在保证系统实时响应的同时, 有效降低误报警率, 成为了急需解决的问题^[4]。目前常见解决方法如如决策树、支持向量机等, 虽然这些算法在特定条件下表现出较好的效果, 但在面对高维数据和复杂非线性特征时, 往往难以有效应对。因此研究结合无线远传技术与算法优化, 构建 DCS 报警系统以构建多传感器协同优化, 发挥无线传感器网络的优势。

一、基于无线远传技术的 DCS 报警系统构建

(一) 基于决策树的报警分类算法

在无线远传技术的应用中, 决策树算法可以在 DCS 报警系统中被用来对多种报警事件进行分类, 从而实现报警信息的准确识别与处理。传统的决策树算法通过递归划分数据集来构建决策

树, 每个节点都代表一个特征的判定, 而叶子节点则代表类别标签。然而在无线远传技术的报警优化中, 数据集中的噪声、缺失值以及高维特征会导致分类结果的不准确, 因此在经典决策树中融合基于信息增益率的特征选择方法来选择最优特征^[5]。传统的 ID3 算法使用信息增益作为特征选择的依据, 但当数据维度较高时, 信息增益偏向选择取值范围较大的特征, 从而影响分类效

果。为此，C4.5算法引入信息增益率作为改进，公式如下。

$$GainRatio(D, A) = \frac{Gain(D, A)}{SplitInfo(D, A)} \quad (1)$$

其中， $Gain(D, A)$ 表示特征 A 在数据集 D 上的信息增益， $SplitInfo(D, A)$ 表示数据集 D 在特征 A 上分裂的程度。通过引入信息增益率，C4.5 能够更好地克服特征选择中的偏向问题，从而提高分类的准确性。为应对报警数据中的噪声与缺失值问题，优化决策树算法在构建过程中引入剪枝策略，决策树在构建过程中可能会出现过拟合现象，特别是在无线传感器网络中，由于传感器的波动性，数据往往存在一定的噪声。过拟合的决策树虽然在训练数据上表现良好，但在实际应用中则会导致较差的泛化能力。为避免过拟合，算法采用后剪枝 (Post-pruning) 策略，通过最小化树的复杂度来提高泛化能力。在决策树构建完成后，对其进行修剪，移除那些对分类性能贡献不大的分支。剪枝过程通过计算每个节点的误差率来判断是否需要剪除，如公式 (2)。

$$E(T) = E(T) - \Delta E \quad (2)$$

其中， $E(T)$ 是修剪后的树的误差率， $E(T)$ 是原树的误差率， ΔE 是剪枝后误差率的变化。通过控制误差变化，能够实现最优剪枝，从而有效减少过拟合现象。并且为优化 DCS 报警系统中的实时响应能力，结合数据流的处理机制使得报警分类更加适应无线传感器网络中的动态数据变化。采用在线学习策略，能够实时更新决策树的模型，使其能够在数据不断变化的环境中保持较高的分类准确率。

(二) 基于支持向量机 (SVM) 的误报警识别算法

在无线远传技术的 DCS 报警系统中，研究选择支持向量机提高误报警的识别情况和消除情况，提高系统准确性和减少误操作环境。虽然传统 SVM 在很多情况下表现出色，但面对高维、噪声较大的报警数据时，可能会出现分类性能下降的问题。为此在传统的 SVM 模型中为提高对非线性数据的分类能力，引入基于径向基函数的核函数，并通过自适应优化策略调整核函数参数。RBF 核函数形式如公式 (3)。

$$K(x, y) = \exp\left(-\frac{\|x - y\|^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3)$$

其中， $\|x - y\|$ 是样本向量 x 和 y 之间的欧式距离， σ 是核函数的参数， σ 是预设的常数值，通过交叉验证进行动态调整。通过自适应调整核函数参数，能够更好地拟合报警数据中的非线性特征，从而提高误报警的识别精度。为解决误报警识别过程中的不平衡问题，引入加权惩罚函数。由于在实际 DCS 报警系统中，正常报警和误报警的比例通常存在较大差异，传统 SVM 在面对这种类别不平衡的数据时，容易倾向于识别出多数类别的样本，从而忽视少数类别的误报警。为此在目标函数中引入类别权重调整项，使得误报警样本的分类权重得到有效增加。改进后的目标函数形式为公式 (4)。

$$\min_{w, b, \xi} \frac{1}{2} \|w\|^2 + C \sum_{i=1}^n w_i \xi_i \quad (4)$$

其中， w_i 为第 i 个样本的权重， C 为惩罚参数， ξ_i 为松弛变量。通过调整 w_i 的值，能够对误报警样本施加更大的权重，提升其在分类中的重要性，从而有效改善类别不平衡带来的影响。为提高分类精度并减少训练过程中的计算负担，采用序列最小优化 (Sequence minimum optimization, SMO) 算法进行优化。在 SVM 训练过程中，SMO 算法通过将大规模的二次优化问题分解为一系列小规模二次问题，减少计算复杂度。SMO 算法在每次迭代中，可以选择性地更新支持向量提高算法的效率和实时性。

(三) 数据融合与多传感器协同优化

在无线远传技术的 DCS 报警系统中，通过将来自多个传感器的数据进行融合，能够减少单一传感器可能带来的误差，提高报警系统的响应速度和准确性。但由于无线传感器网络中的数据具有较强的时变性和非线性特征，传统加权平均法的融合效果并不总是理想。因此，结合前文的支持向量机与决策树算法的特征，采用基于多传感器信号协同优化的数据融合方法，考虑每个传感器数据的重要性同时结合传感器之间的相关性，提升数据融合的效果。数据融合算法通过构建一个多维决策模型，将多个传感器的输出信号进行综合处理。设定每个传感器的输出为 x_1, x_2, \dots, x_n ，其中 n 是传感器的数量。假设各传感器输出的权重分别为 w_n ，通过加权融合得到一个融合结果 y 如公式 (5)。

$$y = \sum_{i=1}^n w_i \cdot x_i \quad (5)$$

为优化融合结果，改进算法根据每个传感器的精度和可靠性动态调整权重。传感器的权重通过其误差率与信噪比进行关联计算。假设传感器的误差率为 e_i ，信噪比为 SNR_i ，传感器的权重如公式 (6)。

$$w_i = \frac{SNR_i}{e_i + \sum_{i=1}^n SNR_i} \quad (6)$$

通过这种加权策略，能够根据传感器的实时性能动态调整各个传感器的权重，从而在数据融合时优先使用那些准确性较高的传感器数据。为增强数据融合算法的鲁棒性，构建基于决策树和 SVM 的多层次分类模型。在传感器数据融合后，通过决策树算法进行初步的分类判断，再使用支持向量机对初步分类结果进行精细化优化。该过程中 SVM 负责对各个传感器的误报警进行识别与抑制，避免由于单一算法的不足而导致的误识别。

二、实验分析与验证

(一) 实验环境与数据集构建

为验证本文构建的无线远传技术系统的误报警识别在无线远传场景下的协同效能，搭建并开展系统级现场实验。本研究在某电力公司控制室的无线远传技术环境下进行实验，所使用的设备包括浙大中控、无线传感器节点、数据采集器、计算服务器和监控终端。实验所用的数据集来自现场设备的实际运行数据。表 1 为数据集描述。

表1 数据集描述							
传感器 编号	传感器 类型	采集时间	温度 (°C)	湿度 (%)	压力 (Pa)	振动 (m/s²)	报警 状态
1	温度传 感器	2025/9/1 10:00	72.5	60.3	1020	0.15	无报警
2	湿度传 感器	2025/9/1 10:05	73	59.8	1018	0.18	报警
3	压力传 感器	2025/9/1 10:10	73.5	58.7	1015	0.2	无报警
4	振动传 感器	2025/9/1 10:15	74	57.2	1012	0.22	报警
5	温度传 感器	2025/9/1 10:20	71	55	1022	0.1	无报警
6	湿度传 感器	2025/9/1 10:25	70.5	56.5	1025	0.17	无报警
7	压力传 感器	2025/9/1 10:30	72	58	1019	0.19	报警
8	振动传 感器	2025/9/1 10:35	73.5	60	1013	0.21	无报警

在实验过程中，数据按5分钟为单位进行采集和记录，引入故障模拟机制，通过人为控制某些参数的波动，产生模拟故障数据，以测试系统对不同类型故障的识别和响应能力。

（二）算法对比与实验结果分析

实验对比本文改进多传感器数据融合算法（MS-Opt）与其他三种算法进行性能对比。算法性能通过四个指标进行评估：（1）误报警率 (False Alarm Rate, FAR)：表示误报警的比例。（2）响应时间 (Response Time, RT)：表示从报警发生到系统响应所需的时间。（3）分类准确率 (Classification Accuracy, CA)：表示算法正确分类的比例。（4）处理能力 (Processing Time, PT)：算法在单个数据集上运行所需的时间，衡量算法的实时性和计算效率。表2为不同算法在这些指标上的性能对比结果。可以看出 MS-Opt 在误报警率上低至1.32%，明显优于其他算法，MS-Opt 的响应时间为45.3毫秒，虽然略高于决策树算法，但在所有算法中仍然处于较低水平，且在实时性要求较高的场景中，能够满足系统需求。MS-Opt 的分类准确率达98.7%，加权平均法由于其简单性，准确率相对较低，仅为88.9%。MS-Opt 在处理时间上表现略低于加权平均法，但具有优秀的分类能力和低误报警率。其他算法在处理时间上表现相对较好，但无法达到 MS-Opt 在准确率和误报警率上的优势。MS-Opt 算法能够有效融合来自多传感器的数据，并通过协同优化策略动态调整每个传感器的权重减少误报警的发生，并提高系统的响应速度。相比于传统算法，MS-Opt 在多传感器信号融合时引入决策树与支持向量机的联合优化策略，使得算法在处理高维数据和复杂环境下的分类精度和实时性得到了显著提升。MS-Opt 在实际应用中能够有效优化报警系统，提升系统的可靠性和实时性。

参考文献

[1] 白丹丹, 刘宜成, 周树桥, 等. 去中心化分布式控制系统设计研究 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2024(3): 87-91.

[2] 林实宇, 万舒, 梁鑫, 等. OM690系统数字化报警卡转换工具研制 [J]. 电子技术应用, 2023, 49(S01): 169-172.

[3] 陶伟, 顾靖, 赵丽莉, 等. DCS 软件故障诊断的自动化测试技术的研究与应用 [J]. 自动化与仪器仪表, 2023(8): 224-227.

[4] 郑立松, 成贝贝, 桑大宁. 工业领域信号采集传输应用研究 [J]. 科学技术创新, 2024(15): 55-58.

[5] 王伟, 汪坤, 杨帆, 等. 基于 GBDT 和新型 P-GBDT 算法的催化裂化装置汽油收率寻优模型的构建与应用 [J]. 石油学报 (石油加工), 2020, 36(1): 179-187.

表2 性能对比分析				
算法	误报警率 (FAR, %)	响应时间 (RT, ms)	分类准确率 (CA, %)	处理时间 (PT, s)
MS-Opt	1.32	45.3	98.7	0.084
DT	6.75	59.8	90.5	0.022
SVM	4.12	52.4	94.8	0.076
WAM	10.28	60.6	88.9	0.018

为评估不同算法对 DCS 报警系统的性能影响，实验采用性能指标分别为误报警率波动 (False Alarm Rate Fluctuation, FARF)：表示误报警率的波动幅度，反映算法的稳定性。响应稳定性 (Response Stability, RS)：衡量系统响应的稳定性，基于多次实验计算响应时间的标准差。算法适应性 (Algorithm Adaptability, AA)：表示算法在面对不同工作条件下的适应能力，基于系统对突发事件的反应情况评估。计算资源消耗 (Computational Resource Consumption, CRC)：反映算法在运行时对计算资源的需求。表3为具体实验结果。

表3 DCS 报警系统性能影响分析				
算法	误报警率波动 (FARF, %)	响应稳定性 (RS, ms)	算法适应性 (AA, %)	计算资源消耗 (CRC, %)
MS-Opt	0.74	5.2	96.5	32.5
DT	2.31	9.5	85.2	28.1
SVM	1.88	7.3	89.6	45.2
WAM	3.92	12.4	78.3	20.3

可以看出 MS-Opt 具有最低的误报警率波动 (0.74%)，在长期运行中能够保持较为稳定的误报警率，避免频繁的误报警波动。MS-Opt 的响应时间稳定性为5.2毫秒，在面对复杂场景时响应稳定。MS-Opt 的适应性达到96.5%，其在多变的工作环境下，能够快速适应不同的报警情况，做出准确反应。在计算资源的消耗方面，MS-Opt 需要的计算资源略高。可以看出，MS-Opt 在多个指标中表现出色，在误报警率波动、响应稳定性和算法适应性方面显著优于其他对比算法，不仅能减少误报警，还能提高系统在不同工况下的适应性与稳定性，在高负荷和复杂环境下，仍能保持较低的计算资源消耗。

三、结论

随着无线传感器网络技术的发展，DCS 报警优化的需求愈发迫切。本研究提出基于无线远传技术的 DCS 报警优化方案，通过多传感器数据融合与算法优化，提高报警系统的实时性和准确性。实验结果表明，MS-Opt 在多个性能指标上表现出色。误报警率低至1.32%，分类准确率达到98.7%，在响应时间和处理能力方面也具有显著优势。尽管改进算法在性能上表现优异，但由于其计算资源消耗相对较高，仍需进一步优化，以实现更广泛的应用场景。

