

自然与信息工程出版社
Nature and Information Engineering Publishing Sdn Bhd

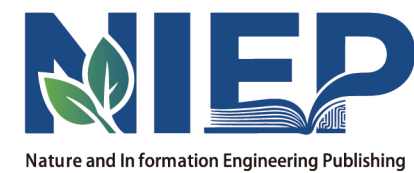
B-03A-15, One South Street Mall, Jalan OS, Taman Serdang Perdana,
43300 Seri Kembangan, Selangor Darul Ehsan.
+60 11-3978 7006
contact@zycentre.com



Construction Machinery and Technology

工程机械与技术杂志

ISSN:3122-6833



Volume 2 Issue 2 February 2026
ISSN: 3122-6833

工程机械与技术 杂志

Construction
Machinery
and Technology



中文刊名：工程机械与技术杂志	Serial Title: Construction Machinery and Technology
ISSN：3122-6833	ISSN: 3122-6833
出版语言：华文	Language: Chinese
期刊网址：https://cn.niepublish.com/cmt	URL: https://cn.niepublish.com/cmt
出版社名称：自然与信息工程出版社	Publisher: Nature and Information Engineering Publishing Sdn Bhd

Database Inclusion



版权声明 /Copyright

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

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

Nature and Information Engineering Publishing Sdn Bhd
电子邮箱 /E-mail: contact@zycentre.com
官方网址 /Official Website: <https://niepublish.com/index.php>
地址 /Address: B-03A-15, One South Street Mall, Jalan OS, Taman Serdang Perdana,
43300 Seri Kembangan, Selangor Darul Ehsan, Malaysia



《工程机械与技术杂志》征稿函

期刊概况：

中文刊名：工程机械与技术杂志

ISSN：3122-6833

出版语言：华文

期刊网址：https://cn.niepublish.com/cmt

出版社名称：自然与信息工程出版社

出版格式要求：

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

出刊及存档：

- 电子版出刊（公司期刊网页上）
- 纸质版出刊
- 出版社进行期刊存档
- 中国知网（CNKI）、谷歌学术（Google Scholar）等数据库收录
- 文章能够在数据库进行网上检索

作者权益：

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

评审过程：

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

主 编

杨晨升，黑龙江科技大学机械工程学院

副主编

陈 刚，济南市特种设备检验研究院

陈 玮，中冶京诚工程技术有限公司

程 坚，国家石油天然气管网集团湖北分公司潜江作业区

Georgios Apostolakis, University of Central Florida

编 委

Ajit Kumar, IIT (ISM) Dhanbad

张玉海，淄博市传统产业发展中心

陈武雄，中国平煤神马集团

边 兵，深圳中建院建筑科技有限公司

孙 鹏，川庆钻探长庆钻井总公司

杨 东，青岛五顺汽车模具部件有限公司

李 金，国家电投集团资本控股有限公司

卢建康，北京华夏石化工程监理有限公司

谷东方，国家管网集团湖北公司

1	煤矿智能化技术在机械工程自动化中的应用研究 / 任红飞	40	建筑工程技术管理中的控制要点与优化措施 / 付立行
4	铝加工热轧设备在线监测系统应用研究 / 马金伟	43	叉车制动器安装螺栓松动问题剖析与优化策略 / 刘浩
7	机械制造专业的发展现状与未来趋势探究 / 姜乐营 郭婷婷	47	城轨车站环境与设备监控系统的故障自愈技术及应用 实践 / 盛楠 张艺饶
10	轨道交通低压配电系统智能运维的故障诊断与预测 研究 / 杨燚	50	短流程萃取法制备钒电池电解液的工艺机理与效率提 升研究 / 师谦
13	综采工作面大坡度俯采综合控制技术研究与应用 / 卢参军	53	大型钢铁设备突发故障应急维修预案的制定与优化 方法 / 张微微
16	桥梁工程中 BIM 技术在施工管理中的应用研究 / 刘天雯	56	振动信号分析在电气自动化设备故障预警中的应用 研究 / 李少泉
19	飞行控制电子设备故障诊断与预测技术研究 / 乔兵克 贾彦荣 刘培懿	59	煤矿顶底板岩性结构特征及其对巷道围岩稳定性的影 响分析 / 孙岩
22	汽车发动机废气再循环阀性能测试研究 / 杨鑫 王斌	62	管道焊接工艺技术及质量控制措施探讨 / 孔祥超 文星星
25	城市滨水市政园林的生态防护与景观营造结合研究 / 时永超 刘岩	65	石油化工工程自动化焊接技术的应用现状和发展趋势 / 文星星 孔祥超
28	市政园林植物配置的乡土化与多样性设计研究 / 刘永森	68	基于加强化工工艺管道安装技术研究 / 韦宏 王贾
31	矿山充填系统输送设备磨损机理及耐磨改造研究 / 李磊	71	化工工程中工艺管道安装施工的问题与对策 / 王贾 韦宏
34	机械设备故障诊断与监测的常用方法分析 / 蔡小东		
37	基于 Grey-DEMATEL 方法的云南省磷建筑石膏市场 需求影响因素分析 / 唐琼		

1	Research on the Application of Intelligent Technology in Coal Mines in Mechanical Engineering Automation / Hongfei Ren	37	Analysis of Influencing Factors on the Market Demand for Phosphogypsum in Yunnan Province Based on the Grey-DEMATEL Method / Qiong Tang
4	Application Research of On-line Monitoring System for Hot Rolling Equipment in Aluminum Processing / Jinwei Ma	40	Control Points and Optimization Measures in Construction Engineering Technology Management / Lixing Fu
7	Exploring the Current Development and Future Trends of Mechanical Manufacturing Specialization / Leying Jiang Tingtin Guo	43	Analysis and Optimization Strategy of the Problem of the Looseness of the Installation Bolt of the Forklift Brake / Hao Liu
10	Research on Fault Diagnosis and Prediction of Intelligent Operation and Maintenance of Low Voltage Distribution System in Railway Transportation / Yi Yang	47	Fault Self-healing Technology and Application Practice of Environment and Equipment Monitoring System in Urban Rail Station / Nan Sheng Yirao Zhang
13	Research and Application of Comprehensive Control Technology for Steep Inclined Mining in Fully Mechanized Working Faces / Canjun Lu	50	Study on the Process Mechanism and Efficiency Improvement of Vanadium Battery Electrolyte by Short-Flow Extraction / Qian Shi
16	Research on the Application of BIM Technology in Construction Management of Bridge Engineering / Tianwen Liu	53	The Formulation and Optimization Method of Emergency Maintenance Plan for Sudden Failure of Large Steel Equipment / Weiwei Zhang
19	Research on Fault Diagnosis and Prediction Technology of Flight Control Electronic Equipment / Bingke Qiao Yanrong Jia Peiyi Liu	56	Research on the Application of Vibration Signal Analysis in Fault Early Warning of Electrical Automation Equipment / Shaoquan Li
22	Research on Performance Test of Exhaust Gas Recirculation Valve in Automobile Engine / Xin Yang Bin Wang	59	Analysis of the Structural Characteristics of Roof And Floor Rock in Coal Mine and Its Influence on the Stability of Roadway Surrounding Rock / Yan Sun
25	Research on the Combination of Ecological Protection and Landscape Construction in Urban Waterfront Municipal Gardens / Yongchao Shi Yan Liu	62	Discussion on Pipeline Welding Process Technology and Quality Control Measures / Xiangchao Kong Xingxing Wen
28	Research on the Localization and Diversity Design of Plant Configuration in Municipal Gardens / Yongsen Liu	65	Current Status and Development Trends of Automated Welding Technology in Petrochemical Engineering / Xixing Wen Xiangchao Kong
31	Research on the Wear Mechanism and Wear-resistant Transformation of Conveying Equipment in Mine Filling System / Lei Li	68	Research on Strengthening Chemical Process Pipeline Installation Technology / Hong Wei Jia Wang
34	Analysis of Common Methods of Mechanical Equipment Fault Diagnosis and Monitoring / Xiaodong Cai	71	Problems and Countermeasures of Process Pipeline Installation and Construction in Chemical Engineering / Jia Wang Hong Wei

Research on the Application of Intelligent Technology in Coal Mines in Mechanical Engineering Automation

Hongfei Ren

Xinjiang Tianshun Mining Co., Ltd., Jizhong Energy Fengfeng Group, Handan, Hebei, 056000, China

Abstract

The safety production and efficient mining of coal mines are the core issues of the national energy strategy, and the traditional operation mode is limited by bottlenecks such as complex geological environment, high personnel safety risks, and low production efficiency. Intelligent technologies such as artificial intelligence, the Internet of Things, big data, and robotics are deeply integrated into the field of mechanical engineering automation, providing a revolutionary path for the transformation and upgrading of the coal mining industry. This article deeply analyzes the core components of intelligent technology in coal mines, elaborates on the basic theory and key technical system of mechanical engineering automation technology in coal mine scenarios, and focuses on exploring the innovative applications and significant achievements of intelligent technology in core links such as mining machinery automation, coal flow transportation system intelligence, electromechanical equipment intelligent monitoring and diagnosis, mine safety assurance system automation, mining robots, and unmanned operation in fully mechanized mining faces.

Keywords

coal mining industry; mechanical engineering automation; intelligent technology

煤矿智能化技术在机械工程自动化中的应用研究

任红飞

冀中能源峰峰集团新疆天顺矿业有限公司, 中国·河北 邯郸 056000

摘要

煤矿安全生产与高效开采是国家能源战略的核心议题,传统作业模式受限于地质环境复杂、人员安全风险高、生产效率低等瓶颈。以人工智能、物联网、大数据、机器人技术等为代表的智能化技术正深度融入机械工程自动化领域,为煤矿产业转型升级提供了革命性路径。本文深入剖析了煤矿智能化技术的核心构成要素,阐述了机械工程自动化技术在煤矿场景下的基础理论与关键技术体系,重点探讨了智能化技术在综采工作面采掘机械自动化、煤流运输系统智能化、机电设备智能监控与诊断、矿井安全保障系统自动化、矿山机器人及无人化操作等核心环节的创新应用与显著成效。

关键词

煤矿产业; 机械工程自动化; 智能化技术

1 引言

煤炭作为我国主体能源的地位短期内难以撼动,其安全高效开采关乎国家能源安全与社会经济发展全局。然而,煤矿开采环境具有显著的高风险性、强隐蔽性与复杂性,瓦斯突出、煤尘爆炸、顶板垮落、冲击地压、水害等灾害时刻威胁着矿工生命安全。传统采煤方式高度依赖人工经验,机械化程度虽然已有显著提升,但在控制精度、灾害预判、系统联动性、信息透明度等方面仍存在诸多短板,导致安全事故频发、生产效率与资源回收率提升遭遇瓶颈。同时,劳动力成本持续攀升以及新生代矿工工作意愿下降也迫切要求煤矿减少井下危险区域作业人数。在此背景下,依托新一

代信息技术的煤矿智能化建设被提升至国家战略高度。机械工程自动化作为智能化矿山最直接、最核心的物理载体与技术实现基础,是智能化技术落地的关键环节。将人工智能、物联网、大数据、云计算、5G通信、机器人等先进技术与机械工程自动化系统深度融合,赋予矿山机械以智能感知、精准执行、自主决策与协同联动的能力,是实现少人化、无人化安全高效开采的根本途径。本文聚焦于煤矿智能化技术内涵及发展态势,系统论述其在机械工程自动化领域的关键技术突破与典型应用场景,分析当前面临的挑战,并对未来发展方向进行展望,以期为推进煤矿智能化建设提供有益参考。

2 智能化技术在煤矿中的发展态势

近年来,全球范围内矿山智能化浪潮风起云涌,中国煤矿智能化建设在政策强力驱动与企业内在需求推动下进

【作者简介】任红飞(1983-),男,中国邯郸磁县人,本科,工程师,从事煤矿安全管理研究。

入了快速发展期。国家层面密集出台了一系列支持政策,将其列为提升煤矿本质安全水平和推动煤炭工业高质量发展的关键举措。“机械化换人、自动化减人、智能化无人”已成为行业共识。发展态势呈现为:一是由单机、单点自动化向成套装备、全流程自动化协同发展,例如从液压支架的电液控制向整个综采工作面的智能联动控制演进;二是由单一设备自动化向“感知-分析-决策-控制-执行”闭环的智能化系统发展,设备具备了一定的自学习、自适应能力;三是由生产环节自动化向矿山全生命周期智能化管理拓展,包括地质保障、设计规划、生产运营、设备维护、安全保障、经营决策等环节;四是信息物理系统的深度融合,数字孪生技术为矿山构建了虚拟映射模型,实现虚实交互与协同优化^[1]。

3 机械工程自动化基础及其在煤矿中的关键需求

3.1 机械工程自动化核心技术原理

机械工程自动化是指在机械系统中引入控制装置或计算机系统,使其能够在无人直接干预或有限干预下,按照预设程序或根据感知到的信息自动完成规定动作或复杂操作过程的技术。其核心原理在于建立“检测-决策-执行”的高效闭环。传感与检测环节相当于系统的感官,负责获取设备状态、工作参数与环境信息;控制与决策环节相当于系统的大脑,基于预置逻辑或智能算法处理信息、制定控制策略并发出指令;执行环节相当于系统的手足,通过驱动装置将电控信号转化为机械运动或操作。实现煤矿机械自动化的关键技术包括:高精度伺服控制技术,实现设备的精确定位与平顺运行;可编程逻辑控制器与工业计算机控制技术,提供可靠高效的逻辑控制与计算平台;现场总线与工业以太网通信技术,保障控制指令与传感数据的可靠传输;机器视觉与模式识别技术,用于环境感知与目标识别;先进运动规划与轨迹跟踪技术,确保复杂任务的高效精确执行^[2]。

3.2 煤矿环境对机械自动化系统的特殊要求

煤矿井下环境对机械工程自动化系统提出了异常严苛的要求,构成了显著区别于一般工业自动化的特殊约束条件。首要要求是本质安全性与高可靠性,设备及其控制系统必须满足严格的防爆、防尘、防水、防潮等安全标准,且能在长时间、高负荷、多粉尘、强干扰的恶劣条件下稳定运行,任何控制失误或系统失效都可能引发灾难性后果。其次,系统需具备强抗干扰能力,能有效抵御井下大功率设备启停产生的强电磁干扰、空间受限造成的信号衰减以及矿压变化、爆破震动等机械冲击与振动干扰。第三,高度复杂性与适应性,煤矿开采面对的是隐蔽、动态变化的地质体,采掘设备需实时感知地质条件与煤层变化,并具备一定的自适应调整能力以应对非结构化环境。第四,远程操作与无人化作业能力,为最大限度保障人员安全,系统需具备稳定可靠的远程监控、操作与诊断功能,并逐步实现关键环节无人值守或区

域少人化目标^[3]。

4 煤矿智能化技术在机械工程自动化中的典型应用

4.1 综采工作面智能化采掘自动化

综采工作面作为煤矿的核心生产单元,是智能化技术应用最为集中、成效最为显著的领域。智能化技术在此的核心目标是实现工作面设备群的智能联动、自主运行与少人值守。核心技术应用包括:智能精准开采技术,基于高精度惯导系统、激光雷达与机器视觉系统对采煤机进行精确定位与三维导航,实时构建工作面地理信息系统模型;采用多种探测手段进行煤岩界面智能识别,指导采煤机滚筒高度自动调整与运行轨迹规划,最大程度减少割顶割底现象。液压支架智能自适应支护技术,利用位移、倾角、压力等多传感器监测支架姿态与顶板压力状态,通过先进电液控制系统实现支架群的成组移架、自动跟机移架、自动补压与压力平衡控制,确保支护的及时性与有效性。工作面设备智能协同控制技术,建立以采煤机为中心,刮板输送机、液压支架协同联动的集中控制系统;利用通信网络实现采煤机速度与刮板输送机负载的智能匹配、采煤机位置与支架动作的精确同步,并基于实时工况进行全局参数优化,保障系统高效稳定运行。此外,通过高速网络实现工作面的远程集中监控与可视化操作,在监控中心即可实现“一键启停”和关键设备的远程干预控制。这些技术的综合应用大幅减少了工作面作业人数,显著提升了开采安全性、效率以及资源的回收率^[4]。

4.2 煤流运输系统智能化

煤矿运输系统承担着将开采出来的煤炭从工作面运至地面的任务,其智能、连续、高效运行至关重要。智能化技术在煤流运输系统中的应用集中于保障运输的连续性、高效性、安全性及节能性。核心技术包括:带式输送机群智能协同控制技术,利用速度、流量、电流、张力、温度等多传感器网络实时监测各条胶带机运行状态与载荷情况;基于人工智能算法分析煤炭流量分布、预测堵塞风险,智能优化各条胶带机的启停时序、运行速度设定,实现煤流的无冲击启动、均衡负载分布与节能经济运行。带式输送机状态智能监控与预知维护技术,采用声发射、振动分析、红外热成像等手段对滚筒、托辊、减速器、电机等关键部件进行在线状态监测与故障诊断;基于历史运行数据建立寿命预测模型,实现故障的早期预警与视情维护,减少意外停机。智能煤仓管理技术,利用物位传感器实时监测各缓冲煤仓仓位,结合产量预测模型和运输计划,智能优化各仓位的进料、储料与卸料策略,有效平衡生产与运输节奏,防止煤仓空仓或满仓溢煤^[5]。

4.3 机电设备智能监控与诊断自动化

煤矿井下大量的大型固定机电设备是维持矿井正常运行的“心脏”,其安全稳定运行是保障矿井安全和生产连续的关键。智能化技术通过实现这些设备的在线状态监测、智

能诊断与预警性维护,极大地提升了设备管理水平。关键技术应用包括:机电设备状态感知网络构建,在主要通风机、压风机、提升机、排水泵、主变电站等关键设备上部署高可靠振动、温度、压力、流量、电流、电压、油液品质等多类型传感器,形成对其核心参数的全天候监测能力。基于人工智能的设备故障诊断与健康管理工作,构建设备运行状态特征数据库,应用机器学习模型进行特征提取和模式识别,实现早期故障征兆的有效捕捉与故障类型的智能诊断;融合设备历史运行数据和机理知识,建立预测性维护模型,准确评估设备剩余使用寿命并进行维护预警,实现“视情维护”模式替代传统的定期检修或事后维修。智能集中监控与运维平台构建,将分散的设备状态数据通过工业网络实时传输至地面集中监控中心,构建设备全生命周期管理平台;平台具备实时数据展示、历史数据回溯、报警管理、诊断报告生成、维护工单管理等功能,为运维人员提供决策支持。设备远程运维技术,利用增强现实技术为现场维护人员提供直观的设备拆装指导和故障排查辅助,并支持远程专家通过数据共享进行故障会诊与技术指导^[6]。

4.4 矿井安全保障系统自动化

保障矿工人身安全和预防重大灾害始终是煤矿生产的生命线。智能化技术为传统的安全监控系统注入了强大的自动化分析、预警与联动控制能力,极大提升了矿井的本质安全水平。核心应用领域包括:环境参数智能监测与预警联动系统,在原有瓦斯、一氧化碳、温度、风速、粉尘等环境参数传感器网络基础上,引入大数据分析和人工智能技术,对环境变化的异常模式进行智能识别;建立多维参数耦合预警模型,实现灾变的早期预警,并能在超限报警达到预设阈值时,自动触发相关区域设备的断电、闭锁及人员避险引导措施。智能视频监控系统与人员精准定位系统融合应用,在全矿井部署高清智能摄像机和精确的UWB/蓝牙人员定位系统;通过AI行为分析识别人员违章行为、设备异常运行状态;实时精确跟踪井下人员位置分布、运动轨迹;结合电子栅栏、精准广播系统实现人员滞留超时告警、闯入危险区域告警、重要场所权限管理等;在紧急情况下,能够根据人员分布图快速规划最优逃生路线并通过广播和定位卡引导疏散。智能通风系统自动化控制,建立通风网络解算与实时优化模型,利用分布式风速风压传感器实时监测通风状态;结合作业面位置、瓦斯涌出量等变化,智能调整主要通风机的运行频率及井下调节风门的开度,实时优化通风网络结构,确保各用风地点

风量充足稳定,并能快速应对灾变时期风流调控需求。水害与火灾智能监控系统,针对水文地质复杂矿井,应用微震监测、水位水压监测系统,进行水害风险预警;在重要地点设置温度、烟雾、束管色谱等传感器进行火灾早期探测^[7]。

5 结语

煤矿智能化技术的蓬勃发展为机械工程自动化在矿山领域的深度应用插上了智慧的翅膀。本文系统探讨了智能化技术在煤矿机械工程自动化领域的核心构成、应用价值与典型场景实践。研究表明,将人工智能、物联网、大数据分析等新一代信息技术与机械工程自动化的传感检测、伺服驱动、逻辑控制等基础技术深度融合,成功赋予矿山装备以强大的感知能力、分析能力、学习能力和适应能力。在综采工作面、煤流运输、大型固定机电设备管理、安全保障系统以及矿山机器人等多个核心领域,智能化赋能下的自动化技术取得了突破性进展,实现了从单点设备自动化向系统集成、智能协同、自主决策的高阶形态发展,显著降低了井下人工作业比例,有效提升了生产效率和资源回收率,从根本上保障了矿工的生命安全和健康。未来,应集中力量攻关关键技术瓶颈,加大智能感知终端与装备的研发投入,深入探索复杂地质条件下多源信息融合与智能决策新机制,推动数字孪生等技术在矿山全生命周期管理的应用深化,同时加强产学研协作,构建开放、标准的智能矿山生态系统,推动我国煤矿产业安全、绿色、高效的高质量发展目标早日实现。

参考文献

- [1] 孙庆宏,姚刚,郎曼廷.矿山智能化技术在机械工程自动化中的应用研究[J].世界有色金属,2024,(20):35-37.
- [2] 姜楠.矿山智能化技术在机械工程自动化中的应用研究[J].中国金属通报,2024,(08):98-100.
- [3] 齐斌.智能化技术在机械工程自动化中的应用研究[J].造纸装备及材料,2024,53(05):37-39.
- [4] 戴学伟.智能化技术在煤矿电气工程自动化中的应用研究[J].矿业装备,2024,(03):134-136.
- [5] 何成群.矿山智能化技术在机械工程自动化中的应用研究[J].中国设备工程,2023,(19):36-38.
- [6] 武子敬.煤矿智能化技术在机械工程自动化中的应用研究[J].中国设备工程,2023,(10):40-42.
- [7] 陈艳艳.智能化技术在机械工程自动化中的应用[J].数字技术与应用,2022,40(04):45-47.

Application Research of On-line Monitoring System for Hot Rolling Equipment in Aluminum Processing

Jinwei Ma

Henan Zhongfu High Precision Aluminum Materials Co., Ltd., Gongyi, Henan, 451200, China

Abstract

As the core equipment for producing high-end aluminum alloy materials, hot rolling mills' operational stability directly determines product quality, production efficiency, and maintenance costs. Traditional operation and maintenance models relying on manual inspections suffer from delayed responses, weak fault prediction capabilities, and high labor costs, making them incompatible with the intelligent production demands of modern aluminum processing enterprises. The online monitoring system, based on data acquisition, intelligent analysis, and visualization technologies, enables real-time monitoring of core parameters, abnormality alerts, and fault traceability for hot rolling equipment. This provides technical support for transitioning equipment maintenance from "reactive repair" to "proactive maintenance." Combining the operational characteristics of hot rolling equipment, this paper elaborates on the core architecture and key technologies of the online monitoring system. Through practical application cases, it validates system performance, analyzes existing issues, and proposes optimization directions, offering references for intelligent operation and maintenance upgrades in the aluminum processing industry.

Keywords

hot rolling equipment; online monitoring system; intelligent operation and maintenance; fault warning

铝加工热轧设备在线监测系统应用研究

马金伟

河南中孚高精铝材有限公司, 中国·河南 巩义 451200

摘要

热轧设备作为高端铝合金材料生产的核心装备,其运行稳定性直接决定产品质量、生产效率及运维成本。传统依赖人工巡检的运维模式存在响应滞后、故障预判能力弱、人力成本高的痛点,难以适配现代化铝加工企业的智能化生产需求。在线监测系统基于数据采集、智能分析与可视化技术,实现对热轧设备核心参数的实时监控、异常预警及故障溯源,为设备运维从“被动维修”向“主动维护”转型提供技术支撑。本文结合热轧设备的工作特性,阐述在线监测系统的核心架构与关键技术,通过实际应用案例验证系统效能,分析当前应用中的问题并提出优化方向,为铝加工行业热轧设备智能化运维升级提供参考。

关键词

热轧设备;在线监测系统;智能运维;故障预警

1 引言

随着航空航天、交通运输等高端制造领域对铝合金材料性能要求的不断提升,铝加工企业逐步向高精度、高效率、低能耗的智能化生产模式转型。热轧工序作为铝加工的核心环节,承担着将铸锭轧制成符合规格的中厚板、卷材等半成品的任务,其设备运行状态直接影响铝合金材料的晶粒组织、厚度精度、表面质量等关键指标。热轧设备结构复杂、运行负荷大,涵盖轧机本体、传动系统、液压系统等多个子系统,长期在高温、高压、高负荷工况下运行,易出现轴承

磨损、齿轮疲劳、液压泄漏等故障,不仅可能导致非计划停机,造成数十万至数百万元的经济损失,还可能影响产品质量稳定性,制约企业订单交付能力。

传统运维模式以定期人工巡检为主,需安排多班次人员对设备进行巡查记录,不仅耗费大量人力成本,且难以实现对核心运行参数的连续监测,故障预警滞后、预判精度低,往往在故障发生后才被动处置。近年来,随着人工智能、数字孪生、工业互联网等技术的快速发展,在线监测系统在热轧设备中逐步推广应用,通过对轴承、齿轮、联轴器和电机温度、振动和声音频谱等设备运行状态核心参数的实时采集与智能分析,实现故障早发现、早诊断、早处置,有效提升设备运维效率与生产稳定性。本文基于当前铝加工行业在线监测技术的应用现状,深入探讨系统的架构设计、应用实践

【作者简介】马金伟(1984-),男,中国河南新乡人,本科,工程师,从事机械/设备工程研究。

及优化策略,为行业技术升级提供理论与实践支撑。

2 热轧设备在线监测系统核心架构与关键技术

热轧设备在线监测系统以“数据采集-数据治理-智能分析-场景应用”为核心逻辑,构建“数据-模型-场景”三位一体的技术架构,实现对设备全生命周期运行状态的精准管控。系统整体分为感知层、传输层、数据层、分析层与应用层五个部分,各层级协同联动,确保监测数据的实时性、准确性与可用性。

2.1 系统核心架构

2.1.1 感知层

感知层作为数据采集的前端基础,负责对热轧设备运行过程中的核心参数进行全面捕捉,是系统实现精准监测的前提。针对热轧设备的工况特点,感知层需部署多种类型的传感器,覆盖轧机本体、传动系统、液压系统、冷却系统等关键部位。具体包括:在轧辊轴承、电机轴承处部署温度传感器,实时监测轴承温度变化,预判磨损与润滑故障;在轧机机架部署压力传感器,采集轧制力、液压系统压力参数,分析设备受力稳定性;通过位移传感器监测辊缝值、轧机牌坊变形量,保障轧制精度;借助振动传感器采集电机、轧辊的振动信号,识别设备不平衡、松动等异常;同时搭配厚度传感器、温度传感器,同步采集轧制件的厚度偏差、表面温度等参数,实现设备运行与产品质量的联动监测。传感器选型需满足高温、高压、强振动的工况要求,确保数据采集的稳定性与可靠性。

2.1.2 传输层

传输层承担感知层数据向数据层的传输任务,需解决多源数据的实时传输、抗干扰及安全加密问题。结合热轧车间的复杂环境,传输层采用“有线+无线”融合的传输方式:对于轧机主机等固定设备的关键参数,通过工业以太网(如Profinet、EtherNet/IP)进行有线传输,保障数据传输的稳定性与低延迟;对于移动部件或布线困难区域,采用5G、工业WiFi等无线传输技术,实现数据的灵活采集。同时,通过边缘计算节点对采集到的原始数据进行预处理,过滤噪声数据、补全缺失数据,减少数据传输量与后续处理压力;采用加密传输协议与访问控制机制,防止数据泄露与篡改,保障工业数据安全。

2.1.3 数据层

数据层是系统的数据存储与治理中心,负责整合多源监测数据,形成标准化、规范化的数据资源池。首先通过数据治理模块对传输过来的原始数据进行清洗、转换、整合,剔除异常数据、统一数据格式,建立涵盖设备运行数据、故障记录、维护日志、工艺参数等多维度的数据库;采用时序数据库(如InfluxDB、TimescaleDB)存储海量实时监测数据,保障数据的高效写入与查询;同时构建数据字典与元数据管理体系,明确数据来源、格式、含义及关联关系,为后续智

能分析提供高质量数据支撑。此外,数据层需实现与企业智慧制造系统、设备管理系统(CMMS)的对接,打破数据孤岛,实现生产全流程数据的协同共享。

2.1.4 分析层

分析层是系统的核心智能引擎,基于大数据分析 with 人工智能算法,挖掘数据背后的设备运行规律,实现异常预警与故障诊断。结合热轧设备的故障特性,分析层采用“传统算法+大模型”的融合分析模式:一方面,通过阈值分析、趋势分析、频谱分析等传统算法,对轴承温度、轧制力、振动信号等核心参数进行实时监测,当参数超出设定阈值或出现异常变化趋势时,触发初级预警;另一方面,基于行业大模型底座,输入设备历史运行数据、故障记录、维护日志等海量数据进行模型训练,构建适配铝加工行业特性的设备健康预测智能体,掌握参数变化与故障类型、发生时间的关联规律,实现故障的精准预判与根因分析,甚至提供针对性的维护方案。例如,通过深度学习算法对振动信号进行特征提取,可精准识别轴承早期磨损、轧辊不平衡等潜在故障,避免故障扩大化。

2.1.5 应用层

应用层面向设备运维、生产管理等不同岗位需求,提供可视化监控、异常预警、故障管理、维护计划优化等多元化应用服务。通过数字孪生技术构建热轧设备三维可视化模型,直观呈现设备结构、运行状态及核心参数变化,实现生产流程从“黑箱操作”向“透明管控”转变;当系统检测到异常时,通过声光报警、短信、协同办公软件推送等方式,及时向运维人员发送预警信息,明确异常位置、等级及处置建议;建立故障管理模块,记录故障发生时间、原因、处置过程及结果,形成故障知识库,为后续故障处置提供参考;结合监测数据与设备健康状态,优化维护计划,实现从“定期维护”向“按需维护”转型,降低运维成本^[1]。

2.2 关键支撑技术

数字孪生技术:通过构建与物理设备1:1对应的数字模型,整合实时监测数据与工艺数据,实现设备运行状态的虚拟仿真与可视化管控,支持故障模拟推演、维护方案预演等功能,为运维决策提供直观支撑。例如,图扑HT低代码数字孪生系统可实现铝材加工全流程的三维可视化监控,运维人员通过界面可直观查看立推炉温度分布、轧机运行状态等关键信息,快速定位异常设备^[2]。

人工智能与大数据分析技术:作为系统智能分析的核心,通过深度学习、机器学习算法对海量监测数据进行挖掘分析,突破传统人工经验判断的局限,提升故障预判精度与响应效率。南南铝加工通过阿南大模型训练,实现了对热轧机故障类型、发生时间的精准预判,显著提升了设备运维的主动性。

工业传感器技术:高性能传感器是保障监测数据准确性的基础,针对热轧设备的高温、高压工况,需采用耐高温、

抗振动、精度高的工业级传感器,确保在恶劣环境下持续稳定采集数据,为后续分析提供可靠依据。

3 热轧设备在线监测系统应用实践——以南铝加工为例

广西南铝加工有限公司拥有年产20万吨航空交通高端铝合金新材料项目,其热轧中厚板生产线是企业核心生产环节。其基于“数据-模型-场景”三位一体理念,部署热轧机健康智能监测系统,具体实施路径如下:一是数据整合与治理,打通企业智慧制造系统平台,整合生产全流程实时数据与第三方设备运维数据,建立标准化数据池,涵盖过去5年的设备运行历史数据、故障记录、维护日志等海量信息;二是模型构建与训练,将高质量数据输入模型进行训练,搭建适配铝加工行业特性的模型底座,孵化设备健康预测智能体,重点聚焦轧制力、厚度偏差、辊缝值、轴承温度等核心参数,挖掘参数变化与故障的关联规律;三是场景落地应用,通过智能体实时监测热轧机运行参数,实现异常预警、故障预判及维护方案推荐,同时对接数字孪生可视化平台,实现设备运行状态的全方位管控^[1]。

该在线监测系统上线后,应用成效显著:一是非计划停机时长环比降低20%,有效减少了停机带来的生产损失,保障了订单按期交付,订单按期交付率提升7%;二是运维效率大幅提升,维护工程师从接收故障到完成处置的平均时间从45分钟缩减至30分钟,故障处置精准度显著提高;三是运维成本有效下降,通过精准预判故障与优化维护计划,预计备件库存可下降15%左右,同时延长了设备使用寿命,降低了维护人力成本与备件消耗;四是产品质量稳定性提升,通过实时监测轧制力、辊缝值等参数,及时调整设备运行状态,减少了因设备故障导致的产品质量缺陷,提升了高端铝合金材料的生产一致性^[1]。

4 热轧设备在线监测系统应用中的问题与优化方向

4.1 现存问题

系统适配性不足:部分在线监测系统为通用型设备监测方案,未充分结合热轧设备的工况特性与故障规律,导致监测参数针对性不强、故障预判精度有限,难以满足高端铝加工的精细化运维需求。

数据融合与利用不充分:部分企业虽部署了监测系统,但存在数据孤岛问题,监测数据与生产工艺数据、设备管理数据未有效融合,且缺乏对海量数据的深度挖掘能力,数据价值未充分发挥。

运维人员技能不匹配:在线监测系统的高效运行需要运维人员具备数据解读、智能设备操作、故障分析等综合能力,而传统运维人员多擅长设备维修,缺乏智能化技术能力,制约了系统功能的充分落地。

成本投入与性价比平衡难题:高端在线监测系统的传感器、边缘计算节点、软件平台等硬件与软件投入较高,部分中小型铝加工企业难以承担,且存在投入与实际效益失衡的顾虑,影响技术推广速度。

4.2 优化方向

打造定制化方案:结合热轧设备的高温、高压、高负荷工况特点,针对性优化监测参数体系与算法模型,增加对铝合金材料性能关联参数的监测,提升系统适配性与预判精度,开发符合不同规模企业需求的轻量化、定制化系统版本^[4]。

深化数据融合与智能分析:打破数据孤岛,推动在线监测系统与企业ERP、MES、CMMS等系统的深度融合,实现生产、运维、管理数据的协同共享;引入更先进的人工智能算法,加强对多源数据的交叉分析,挖掘设备运行与产品质量、能耗的关联关系,为生产优化提供数据支撑。

加强运维人员技能培训:构建“技术培训+实践操作”的复合型人才培养体系,定期开展在线监测系统操作、数据解读、智能故障诊断等专项培训,邀请技术专家现场指导,提升运维人员的智能化技术能力;建立技能考核与激励机制,鼓励运维人员主动学习新技术、新方法,适应智能化运维需求。

优化成本与效益平衡:对于中小型企业,推广模块化、可扩展的在线监测系统,允许企业根据自身需求分阶段部署,降低初始投入成本;通过案例示范、政策扶持等方式,引导企业认识在线监测系统的长期效益,同时推动技术迭代与规模化应用,降低系统整体部署成本。

5 结语

热轧设备在线监测系统通过整合感知技术、人工智能、数字孪生等先进技术,有效解决了传统运维模式的痛点,实现了设备运行状态的实时监测、异常预警与精准运维,对提升铝加工企业的生产稳定性、产品质量与运维效率,降低运维成本具有重要意义。未来,随着工业4.0技术的持续迭代,热轧设备在线监测系统将向更智能、更集成、更绿色的方向发展。相信随着技术的不断成熟与推广,在线监测系统将成为热轧设备运维的标配,为行业高质量发展提供坚实技术支撑。

参考文献

- [1] 广西壮族自治区工业和信息化厅. “AI+制造”典型应用场景|南铝热轧机健康智能监测[EB/OL]. 2026-01-22.
- [2] 数字孪生小图. 低代码数字孪生铝材加工 SCADA 组态可视化监控[EB/OL]. 2025-09-10.
- [3] 王健,李刚. 工业设备在线监测技术及应用[M]. 北京:机械工业出版社,2024.
- [4] 张敏,刘军. 铝加工设备智能化运维研究进展[J]. 轻合金加工技术, 2025, 43(5): 1-6.

Exploring the Current Development and Future Trends of Mechanical Manufacturing Specialization

Leying Jiang Tingtin Guo

Shandong Lutong Heavy Industry Machinery Co., Ltd., Jinan, Shandong, 250000, China

Abstract

Mechanical manufacturing plays a pivotal supporting role in China's industrial system, where the enhancement of professional capabilities is closely linked to the overall competitiveness of the manufacturing sector. While China has made significant progress in numerical control technology, automated production lines, and high-precision machining, it still faces practical challenges including rapid technological updates, a shortage of high-level talent, and insufficient multidisciplinary collaboration. This paper, grounded in industry practices, explores integration pathways for key technologies such as artificial intelligence, the Internet of Things, digital twins, and green design, with a focus on intelligentization and green transformation. It analyzes major factors influencing professional development from three perspectives: innovative technologies, market demands, and policy environments. Finally, the paper proposes countermeasures and recommendations for strengthening core technology breakthroughs, deepening industry-education integration, and improving green manufacturing standards, aiming to provide references for the sustainable development and industrial upgrading of mechanical manufacturing specialization.

Keywords

mechanical manufacturing; professional development; intelligent manufacturing; green manufacturing; talent cultivation; development trends

机械制造专业的发展现状与未来趋势探究

姜乐营 郭婷婷

山东路通重工机械有限公司, 中国·山东 济南 250000

摘要

机械制造在我国工业体系中扮演着支撑性角色,其专业能力的提升与制造业整体竞争力密切相关。目前,我国在数控技术、自动化产线、高精度加工等方面已取得了明显进步,但同时也面临着技术更新节奏快、高层次人才不足、多学科协作不够深入等现实问题。本文结合行业实践,以智能化与绿色化为主线,探讨人工智能、物联网、数字孪生、绿色设计等关键技术的整合路径。并从创新技术、市场需求和政策环境三方面分析专业发展的主要因素,最后,就加强关键核心技术攻关、深化产教融合、完善绿色制造标准体系等方面提出对策建议,希望为机械制造专业的持续发展与产业升级提供参考。

关键词

机械制造; 专业发展; 智能制造; 绿色制造; 人才培养; 发展趋势

1 引言

机械制造作为国家工业化水平的重要标志,在全球制造业数字化、智能化转型浪潮中占据战略地位。从德国“工业4.0”到我国的“中国制造2025”,各国都将机械制造的升级视为抢占未来竞争制高点的关键。因此,分析该专业的发展现状与趋势,对优化学科局部、推动产业迭代具有重要意义。

然而,我们必须正视当前仍存在的突出问题:部分核心技术尚未完全自主、高端设备依赖进口、人才培养与行业实际需求存在偏差、绿色转型压力重重。为此,本文旨在通

过梳理发展逻辑、辨明主要方向,为政策制定、教学改革与产业实践提供参考。

2 机械制造专业发展现状分析

2.1 技术发展水平与主要特点

整体来看,我国机械制造技术已逐步从跟跑转向并跑,在若干重点方向实现了重要突破。

数控技术与高端装备:多轴联动数控机床、大型复合材料铺丝机等国产化高端装备已在航空航天、能源装备等批量应用。与此同时,依托物联网架构的机床远程监测与能效优化系统开始推广,提升了设备综合效率(OEE)。

增材制造技术:正从样件制作转向直接零部件制造,激光选区熔化(SLM)、电子束熔化(EBM)等工艺日益成熟,在航空发动机部件、医疗植入体等领域实现工业化应用。

【作者简介】姜乐营(1973-),男,中国山东泰安人,本科,中级,从事机械设计研究。

智能制造系统：以柔性制造系统（FMS）、计算机集成制造系统（CIMS）为代表的产线形态持续向智能方向升级。工业机器人应用密度逐年上升，协作与移动机器人在装配、检测、物料流转等环节广泛应用。

精密与超精密加工：纳米尺度加工技术在一些关键领域获得实质性进展，应用于光学元件、超精密模具等。测量技术也从传统接触方式向非接触、在线化发展，机器视觉的智能监测系统开始试用。

尽管如此，但短板依然突出：高端数控系统、精密伺服电机、减速装置等核心部件仍依赖进口；用于产品设计、仿真与工艺规划的CAD/CAE/CAM等工业软件自主化水平低，制约了产业向高端迈进。

2.2 人才培养体系与挑战

目前，我国已基本形成覆盖中职、高职、本科及研究生阶段的机械制造人才培养体系，但对照产业快速转型的要求仍不匹配。

课程体系与教学内容：多数院校仍以机械设计基础、制造工艺学、机床概论等传统课程为主干，尽管逐步加入了智能制造、机器人技术等新内容，但常呈现知识点零散、与实际工程场景衔接不紧的状况。工业大数据、数字孪生建模、可持续产品设计等前沿课程开设不足且与实际场景衔接弱。

实践教学条件：尽管国家和省级实验教学示范中心、虚拟仿真项目持续建设，但不少院校的实验设备更新滞后，先进制造装备缺乏，教学环境与企业真实产线差距较大。校企合作大多仍停留在认知实习层面，深度协作项目较少。

师资队伍构成：具备企业实战经验的教师比例偏低，“双师型”教师的培养机制不健全。在工业互联网、人工智能等交叉领域师资短缺。

人才供给结构性失衡：传统岗位竞争激烈，而智能装备研发、数字化运维等高技能岗位却人才难求，反应出毕业生工程实践能力弱、跨学科整合不足、系统创新思维欠缺等问题。

3 机械制造专业未来发展趋势

3.1 智能化：从自动化迈向自主化

智能化正成为机械制造演进的主线，其内涵将逐步从单机设备智能延伸到系统级智能，并最终向制造生态智能发展。

智能装备与加工单元：新一代数控机床将具备工艺参数自适应调节、加工过程自优化、故障提前预警与诊断等能力。机器人则向更强环境感知、自主路径规划与人机自然协作方向演进。

智能工厂与生产系统：基于数字孪生模型，实现物理工厂全要素、全过程与实时交互，支持生产状态的透明监控、故障预测与动态排产。5G与工业互联网的融合将构建高可靠、低延迟的厂内网络，为大规模定制化生产提供支撑。

智能设计与管理：人工智能技术将进一步渗透至产品概念生成、工艺设计、供应链优化等环节。生成式设计、拓扑优化等方法在轻量化、性能最优化方面发挥更大作用。基于分布式账本技术的质量追溯与供应链可信管理成为可能选项。

智能服务新模式：装备企业向“产品+服务”模式转型，提供远程操作、能效服务、产能共享等增值业务。预测性维护避免非计划停机，提升用户资产运营效率。

3.2 绿色化：全生命周期可持续制造

在环保政策的指引下，绿色制造正从理念层面全面转向实施层面，成为机械制造发展的硬约束与核心价值导向。

绿色设计：面向全生命周期的生态设计（DFE）理念日益普及，设计阶段即综合考虑材料环境属性、能耗水平、易于拆解回收等因素。通过结构轻量化、功能集成化设计降低资源消耗。

绿色工艺与装备：干式切削、微量润滑、冷喷涂等环境友好型工艺逐步替代传统高耗能工艺。激光、超声加工等非传统加工技术因其精度高、耗材少的特点，应用范围持续扩大。制造装备能效标准不断提升，余热回收、能源管理系统成为标配。

绿色工厂与供应链：工厂能源结构中光伏、风电等可再生能源占比逐步增加，屋顶光伏、分布式储能设施应用增多。循环经济模式推动废旧机电产品再制造产业走向规模化。绿色供应链管理要求供应商符合环保标准，实现碳足迹跟踪与减排。

新材料与结构创新：生物基材料、可降解复合材料逐步替代部分金属材料。多功能复合材料、超材料等新型材料为结构减重与性能提升提供新路径。

4 影响机械制造专业发展的关键因素

4.1 科技创新的驱动

新一代信息技术、先进材料、生物技术等多领域交叉融合，正重构机械制造的技术体系。

智能技术集群：人工智能、物联网、大数据、云计算等构成智能制造的关键技术基础。其中，边缘计算侧重于高实时性控制任务，云计算则支撑大规模数据分析与模型训练。

材料创新突破：高性能合金、陶瓷基复合材料、形状记忆合金等新材料持续推动极端制造能力提升。材料基因组等新范式有望大幅缩短新材料研发周期。

工艺原理革新：超快激光加工、电场辅助成形、生物制造等新原理工艺不断涌现，拓展制造可能性边界。

4.2 市场需求拉动

国内国际双循环新格局、产业升级与消费结构变化共同催生新需求。

产业升级需求：航空航天、新能源汽车、高端医疗装

备等战略性新兴产业对高精度、高可靠、高性能装备需求持续增长。传统产业智能化改造也带来大量设备更新与系统集成需求。

消费模式变化：个性化、定制化消费趋势推动制造系统向柔性化、可重构方向演进。产品生命周期缩短要求研发与制造周期高度压缩、紧密协同。

全球化竞争态势：发达国家推动制造业回流，新兴经济体凭借成本优势承接中低端环节转移。我国制造业必须向价值链高端攀升，从成本竞争向质量、品牌与服务的综合竞争。

4.3 政策与标准支撑

国家战略、产业政策与标准体系共同营造了机械制造专业发展的宏观环境。

国家战略引导：“制造强国”“数字中国”“双碳目标”等国家顶层设计明确了发展方向与重点。重大科技专项、产业基础再造工程等提供了资源支持。

标准体系建设：智能制造、绿色制造标准体系持续完善，为企业转型升级提供规范引导。提升国际标准制定参与度与话语权，有助于中国装备与服务更好走向世界。

产教融合政策：现代产业学院、卓越工程师培养计划等政策推动教育链、人才链与产业链、创新链衔接融合。

5 推进机械制造专业发展建议

5.1 构建协同创新网络，攻克关键核心技术

夯实基础研究，布局前沿方向：布局智能制造、极端制造、生物制造等前沿领域，鼓励学科交叉研究。持续加大对核心基础件、关键材料、先进工艺及产业技术基础（“工业四基”）的研发投入。

健全“产学研用”合作机制：支持行业骨干企业牵头组建创新联合体，承担国家重大科技任务。布局建设一批国家级制造业创新中心、产业技术研究院等公共平台，加速成果中试与产业化。

培育“专精特新”企业群体：营造有利于中小企业在细分领域深耕、掌握特色技术的生态环境，构建大中小企业融通发展、协同共生的产业生态。

5.2 深化教育教学改革，培育复合型工程人才

重构课程体系，更新教学内容：打破学科界限，建立“机械+信息+材料+管理”相互渗透的模块化课程体系。及时将新技术、新工艺、新标准纳入教学。加强工程伦理与可持续发展理念教育。

创新实践教学形式：建设一批虚实结合的实验实训平台，模拟真实工程环境。推广基于项目的学习、CDIO（构思-设计-实现-运行）等教学模式。深化校企联合培养，引进企业导师与真实课题。

强化师资队伍建设：完善教师赴企业实践制度，探索

设置“产业教授”岗位。积极引进具有国际视野与产业经验的优秀人才。建立健全教师工程能力持续提升机制。

构建终身学习体系：面向行业从业人员开展智能制造、绿色制造等专题培训和微认证项目。利用在线开放课程与虚拟仿真资源，提供灵活、便捷的学习支持。

5.3 推动绿色智能转型，增强产业核心竞争力

制定分类分级实施路线图：分行业、分区域制定智能制造与绿色制造发展路径，明确阶段性目标与重点任务。开展标杆企业评选与典型经验交流推广。

强化标准引领与认证推广：加快研制智能工厂、绿色工厂评价标准。推动产品碳足迹认证与绿色产品标识制度实施。鼓励企业参与国际标准制定。

优化政策支持与金融供给：落实研发费用加计扣除、首台（套）装备保险补偿等政策。创新绿色信贷、绿色债券等金融产品，引导社会资本投向绿色技术研发与改造。

营造开放协同的产业生态：主动融入全球智能制造与绿色制造创新网络。在引进吸收国际先进技术与管理经验的同时，推动中国技术、标准与服务国际化。

6 结语

机械制造专业正处在智能化和绿色化转型的关键阶段。面对核心能力不足、高端人才短缺等挑战，我们应把握科技与产业变革的窗口期，打破学科壁垒，深化产教融合，构建开放协同的创新生态。坚持创新驱动、强化人才支撑、践行绿色理念，是推动机械制造专业持续发展、支撑制造强国建设的必由之路。未来的画卷，期待业界、学界与政策制定者共同绘就。

参考文献

- [1] 周济. 智能制造——“中国制造2025”的主攻方向[J]. 中国机械工程, 2015, 26(17): 2273-2280.
- [2] 李培根, 周艳红. 数字孪生车间：一种未来车间运行新模式[J]. 计算机集成制造系统, 2017, 23(1): 1-9.
- [3] 谭建荣, 刘振宇. 智能制造与机器人应用：关键技术与发展趋势[J]. 中国工程科学, 2017, 19(3): 61-70.
- [4] 国家制造强国建设战略咨询委员会. 中国制造2025蓝皮书（2023）[M]. 北京：电子工业出版社, 2023.
- [5] 王柏村, 黄思, 丁汉. 面向2035的智能制造技术预见和路线图研究[J]. 中国工程科学, 2020, 22(3): 10-18.
- [6] 刘飞, 李聪波, 曹华军. 绿色制造理论体系与技术框架[J]. 机械工程学报, 2019, 55(17): 168-178.
- [7] 杨华勇, 傅建中, 贺永. 智能制造中的工业互联网与数字孪生[J]. 浙江大学学报(工学版), 2021, 55(6): 1009-1021.
- [8] 赵继, 张雷, 刘志峰. 机械工程学科前沿与未来发展[J]. 机械工程学报, 2021, 57(11): 1-31.
- [9] 李翠. 我国机械制造行业发展现状与未来发展趋势探讨[J]. 理论观察, 2020(9): 87-89.

Research on Fault Diagnosis and Prediction of Intelligent Operation and Maintenance of Low Voltage Distribution System in Railway Transportation

Yi Yang

Chongqing Rail Transit Operation Co., Ltd., Liangjiang New Area, Chongqing, 401120, China

Abstract

The low-voltage power distribution system of rail transit constitutes a critical foundation for the safe and stable operation of urban rail transit, and its operating condition is directly related to the reliability of power supply and the service performance of stations, sections, and auxiliary facilities. With the continuous expansion of rail transit networks and the increase in operational intensity, traditional operation and maintenance modes dominated by manual inspection and post-event handling have gradually revealed limitations in fault identification timeliness, risk anticipation capability, and refined management level. Focusing on the operating characteristics and maintenance demands of rail transit low-voltage power distribution systems, this study systematically reviews the technical basis of intelligent operation and maintenance, analyzes common fault types and their formation mechanisms, explores fault diagnosis methods based on operational data and multi-source information fusion, and further investigates the application pathways of fault prediction results in maintenance decision-making. The research aims to provide theoretical support and technical insights for improving the operational reliability and maintenance management level of rail transit low-voltage power distribution systems.

Keywords

rail transit; low-voltage power distribution system; intelligent operation and maintenance; fault diagnosis; fault prediction

轨道交通低压配电系统智能运维的故障诊断与预测研究

杨燚

重庆轨道交通运营有限公司, 中国·重庆 401120

摘要

轨道交通低压配电系统作为城市轨道交通安全稳定运行的重要基础,其运行状态直接关系到车站、区间及附属设施的供电可靠性与服务水平。随着轨道交通线路规模扩大和运行密度提升,传统以人工巡检和事后处理为主的运维模式在故障识别及时性、风险预判能力及管理精细化水平方面逐渐暴露出不足。本文围绕轨道交通低压配电系统的运行特征与运维需求,系统梳理智能运维的技术基础,分析低压配电系统常见故障类型及其形成机理,探讨基于运行数据与多源信息融合的故障诊断方法,并进一步研究故障预测结果在运维决策中的应用路径。研究旨在为提升轨道交通低压配电系统运行可靠性和运维管理水平提供理论支撑与技术思路。

关键词

轨道交通; 低压配电系统; 智能运维; 故障诊断; 故障预测

1 引言

城市轨道交通作为现代城市公共交通体系的重要组成部分,其供电系统的安全性和稳定性始终是保障运营秩序的关键因素。低压配电系统承担着车站照明、通风、自动化设备及各类辅助用电设施的供电任务,具有设备类型多、运行环境复杂、负荷变化频繁等特点。在高强度、长周期运行条件下,低压配电系统一旦发生故障,容易引发设备停运、服

务中断甚至安全风险,对轨道交通整体运行造成不利影响。

在信息技术与运维管理深度融合的背景下,轨道交通低压配电系统逐步向数字化、智能化方向发展,运行数据获取能力和状态感知水平不断提升。这为故障从被动处置向主动识别、提前预警转变创造了条件。围绕上述需求,对智能运维条件下的故障诊断与预测开展系统研究,具有突出的现实意义与应用价值。

2 轨道交通低压配电系统智能运维的技术基础

2.1 低压配电系统智能运维的技术内涵与目标

轨道交通低压配电系统智能运维是在信息化、数字化

【作者简介】杨燚(1983-),男,中国重庆市人,本科,高级工程师(项目管理),从事建设工程项目管理研究。

技术支撑下,对传统运维模式进行系统性升级的重要体现,其核心在于实现运行状态的持续感知、异常行为的快速识别以及运维决策的科学支撑。该模式依托在线监测、数据分析和状态评估手段,将低压配电设备的电压、电流、功率因数、温升等关键运行参数纳入统一管理,实现对系统运行过程的动态掌控。智能运维不再局限于设备故障后的处置,而是通过对历史数据与实时数据的关联分析,提前识别潜在风险,降低突发性故障发生概率。其技术目标体现在提升低压配电系统供电可靠性、缩短故障处置时间、降低运维成本以及增强运维管理的精细化水平等方面。通过技术手段推动运维方式由经验驱动向数据驱动转变,为轨道交通安全稳定运行提供更加稳固的基础保障^[1]。

2.2 轨道交通低压配电系统数据采集与信息感知体系

轨道交通低压配电系统的数据采集与信息感知体系是智能运维实现的前提条件,其建设重点在于构建覆盖全面、响应及时、数据可靠的运行信息获取网络。系统通过在配电柜、开关设备、电缆节点及关键负荷端配置传感装置,实现对电压等级 380 V、220 V 回路运行状态的连续监测,采样周期可控制在 1 s 至 5 s 范围内,满足运行分析需求。采集内容涵盖三相电流不平衡率、母线温度、开关触点温升、电能质量指标等关键参数,并通过现场总线或工业以太网传输至集中监控平台。信息感知体系在数据结构上强调多维度融合,通过时间戳校准和数据清洗手段,提高信息一致性与可用性,为后续故障诊断与预测分析提供稳定的数据基础,使低压配电系统运行状态由间断感知转向连续感知。

3 轨道交通低压配电系统常见故障类型与机理分析

3.1 低压配电设备电气故障的典型特征与成因

低压配电设备电气故障在轨道交通系统中具有较为明显的技术特征,其表现形式主要集中在过载、短路、接触不良及绝缘性能下降等方面。运行数据表明,当回路电流持续超过额定值的 1.2 倍并保持 300 s 以上时,导体温度会快速上升,温升幅度可达到 20℃至 30℃,显著加速绝缘材料老化进程。开关设备触点在频繁分合条件下,接触电阻由初始的 0.1 mΩ 上升至 0.5 mΩ 以上时,局部发热现象明显,极易引发电弧灼伤和接触失效。电缆绝缘老化常伴随泄漏电流增加,运行监测中当泄漏电流超过 30 mA 时,绝缘劣化风险显著上升。这类故障多由负荷增长、设备老化及运行工况变化叠加引起,其机理在于电气应力和热应力长期作用下对设备性能的持续侵蚀^[2]。

3.2 轨道交通运行环境引发的低压配电系统故障机理

轨道交通运行环境复杂多变,对低压配电系统的可靠性产生直接影响。地下车站普遍存在湿度较高的问题,环境相对湿度长期维持在 75% 以上时,金属部件表面易形成凝露,绝缘电阻由初始的 200 MΩ 下降至 50 MΩ 以下,绝缘

性能明显削弱。列车运行产生的周期性振动频率集中在 10 Hz 至 50 Hz 区间,对端子连接部位和电缆固定结构形成持续冲击,导致螺栓松动概率增加。监测数据显示,振动环境下接线端子松动率较静态环境提高约 18%。同时,轨道交通空间封闭性较强,散热条件受限,当配电柜内部温度超过 45℃时,电子元件失效率呈指数型上升。环境因素通过湿热、振动和散热受限等途径共同作用,构成低压配电系统故障产生的重要外部诱因。

3.3 运维管理因素对低压配电系统故障的影响分析

运维管理水平直接影响低压配电系统故障发生的频率与后果程度。从运维数据分析结果看,检修周期超过 12 个月的回路,其故障发生率明显高于 6 个月周期的设备,差值可达到 1.6 倍。人工巡检模式下,隐蔽性缺陷的漏检率约为 25%,尤其在接触电阻缓慢升高、温升变化不明显的早期阶段,难以及时发现问题。运维人员对设备状态依赖经验判断,容易受到主观因素影响,导致同类设备在不同站点的管理标准存在差异。当运维记录不完整或数据未实现集中管理时,历史故障信息难以形成有效积累,削弱了故障趋势分析能力。运维管理因素通过检修频次、技术手段和管理规范等环节影响低压配电系统运行可靠性,其作用机理体现在对故障隐患识别效率和处置时效的直接制约。

4 轨道交通低压配电系统的智能故障诊断方法

4.1 基于运行数据的低压配电系统故障识别思路

基于运行数据的故障识别以在线监测数据为核心,通过对低压配电系统电压、电流、功率因数、谐波含量及设备温升等参数的连续采集,构建反映设备运行特性的时序数据集。在实际运行中,系统对 380 V 与 220 V 回路的电流有效值进行高频采样,采样周期控制在 1 s 范围内,当电流波动幅度超过额定值的 15% 且持续时间超过 120 s 时,判定运行状态偏离正常区间。通过对历史运行数据进行统计分析,可提取电流均值、标准差及变化率等特征指标,并与当前数据进行对比,实现异常模式识别。结合阈值判别与趋势分析方法,当母线温度在 30 min 内上升超过 10℃、功率因数连续下降至 0.85 以下时,可识别为潜在故障信号。该识别思路依托数据驱动方式,使低压配电系统故障由人工经验判断转变为基于客观数据的定量识别^[3]。

4.2 低压配电系统多源信息融合的故障诊断模式

多源信息融合的故障诊断模式在单一运行数据基础上,引入环境参数、设备状态信息及运维记录,实现对故障特征的综合判定。诊断过程中,将电气参数数据与环境温湿度数据进行同步处理,当环境湿度长期维持在 80% 以上且绝缘电阻下降至 100 MΩ 以下时,系统可判定绝缘性能劣化风险显著增加。通过对开关分合次数、触点温升数据与历史检修记录进行关联分析,可发现触点接触电阻由 0.2 mΩ 升高至 0.6 mΩ 时,故障发生概率明显上升。信息融合过程中采

用数据对齐与相关性分析技术,消除不同来源数据在时间尺度和量纲上的差异,形成统一的诊断特征集。该模式通过多维信息交叉验证,提高了故障诊断准确性,降低了单一参数误判带来的风险。

4.3 智能运维条件下故障诊断结果的应用机制

在智能运维条件下,故障诊断结果通过数字化平台转化为具体运维决策依据,实现从识别到处置的闭环应用。系统根据诊断结果对设备状态进行分级,当综合健康指数低于70分时,自动触发重点监测机制;当指数低于50分时,生成检修指令并推送至运维终端。通过对诊断数据的统计分析,可量化不同故障类型的发生频率,例如接触不良类故障占比约32%,绝缘劣化类故障占比约27%,为运维资源配置提供数据支持。诊断结果还用于优化检修周期,将原有12个月的固定检修周期调整为基于状态的动态周期,使关键设备检修间隔缩短至6个月以内。该应用机制实现了诊断数据向运维行动的有效转化,提升了低压配电系统运维管理的针对性和效率^[4]。

5 轨道交通低压配电系统故障预测与运维决策支持

5.1 低压配电系统运行状态演化与故障预测逻辑

低压配电系统运行状态演化具有明显的连续性和阶段性特征,设备性能劣化通常经历由稳定运行向轻度异常、再向显性故障转变的过程。故障预测以长期运行数据为基础,通过对电流负载率、温升变化速率、绝缘电阻衰减趋势等关键指标的时间序列分析,刻画设备状态随时间的演化轨迹。在正常运行阶段,回路负载率多保持在60%至80%区间,设备温升变化幅度小于3℃/h,当负载率持续接近90%且温升速率上升至6℃/h以上时,状态演化进入风险累积阶段。结合运行数据的滑动窗口分析方法,对近30d至90d的参数变化趋势进行拟合,可预测未来一段周期内状态变化方向。当绝缘电阻在60d内由300MΩ下降至120MΩ时,系统可判定故障发生概率明显增大。该预测逻辑通过对状态演化规律的量化描述,实现对低压配电系统潜在故障的提前识别。

5.2 智能预测结果在轨道交通运维中的应用路径

智能预测结果通过运维管理平台嵌入日常管理流程,成为运维决策的重要依据。系统将预测得到的故障概率与设备重要程度相结合,对低压配电设备进行风险分级管理。当预测模型显示某回路在未来90d内故障概率超过0.6时,该设备被划入高风险等级,并自动列入优先检修清单。预测结果同时用于指导备品备件配置,通过对历史预测与实际故

障数据的对比分析,发现电缆接头和低压断路器在预测周期内的需求占比约为45%,从而优化库存结构。运维人员依据预测结果调整巡检频次,使高风险设备巡检周期由原有7d缩短至3d。该应用路径将预测信息转化为可执行的运维安排,提高了轨道交通低压配电系统运维工作的前瞻性和针对性。

5.3 故障预测驱动下的低压配电系统运维管理优化

在故障预测驱动下,低压配电系统运维管理模式由周期性维护向状态导向维护转变,管理策略更加贴合设备实际运行状况。通过对预测数据的统计分析,运维部门可识别故障高发时段和关键设备类型,例如夏季高负荷运行阶段故障发生率较全年平均水平高出约22%,为季节性运维策略调整提供依据。预测结果还用于优化人员配置,将运维力量向风险集中的站点和设备倾斜,提高资源利用效率。管理层通过对预测准确率的评估发现,基于状态演化分析的预测结果与实际故障吻合度达到75%以上,显著优于经验判断方式。该管理优化路径借助预测技术提升运维决策科学性,使低压配电系统在保障安全运行的同时,实现运维成本与管理效率的综合提升^[5]。

6 结语

轨道交通低压配电系统在城市轨道交通运行中承担着基础性和支撑性作用,其运行可靠性直接影响整体服务水平与运营安全。围绕智能运维背景下的故障诊断与预测问题,系统梳理了低压配电系统的技术基础、故障机理、诊断及预测应用路径,揭示了运行状态演化与故障风险之间的内在联系。研究表明,依托运行数据分析与信息融合技术,可有效提升故障识别的准确性和预测的前瞻性,为运维决策提供科学依据。通过推动运维管理由经验驱动向状态导向转变,有助于降低故障发生率,提升轨道交通低压配电系统运行的安全性与稳定性。

参考文献

- [1] 王玉苏,高云达.轨道交通车站照明系统中的低压配电方案优化[J].灯与照明,2025,49(04):88-90.
- [2] 李妍.智能化低压配电系统在城市轨道交通中的创新应用研究[A].第二届智能工程与经济建设学术研讨会论文集(三)[C].江西省工程师联合会:2025:228-230.
- [3] 陈雪.城市轨道交通中的低压配电与照明系统节能研究[J].灯与照明,2025,49(01):31-33+37.
- [4] 王蕾,雷崇,王德发,于琳,刘佳成.城轨低压配电系统可靠性评估研究[J].铁道标准设计,2025,69(12):215-223.
- [5] 周余贵,邓风琴.城市轨道交通工程中的低压配电及照明系统节能研究[J].光源与照明,2024,(02):26-28.

Research and Application of Comprehensive Control Technology for Steep Inclined Mining in Fully Mechanized Working Faces

Canjun Lu

Yongcheng Meidian Holding Group Co., Ltd., Cheji Coal Mine, Yongcheng, Henan, 476600, China

Abstract

In response to the safety problems caused by complex geological conditions such as large inclination angle changes (8° - 19°) and fault development in the MZ25 working face of Cheji Coal Mine, a comprehensive control technology system integrating “equipment anti-skid rolling gangue control personnel protection” is proposed through systematic analysis of key risks such as equipment sliding, rolling gangue, and personnel protection.

Keywords

steep slope mining; equipment anti slip; rolling gangue control; personnel protection; Integrated control technology; integrated design

综采工作面大坡度俯采综合控制技术研究与应用

卢参军

永城煤电控股集团有限公司永城市车集煤矿，中国·河南 永城 476600

摘 要

针对车集煤矿MZ25工作面倾角变化大(8° ~ 19°)、断层发育等复杂地质条件引发的大坡度俯采安全难题,通过系统分析设备下滑、滚矸及人员防护等关键风险,提出了一套集“设备防滑—滚矸控制—人员防护”于一体的综合控制技术体系。该体系创新性地将设备空间姿态协同调控、滚矸主动阻隔与人员通道保障进行集成化设计。主要措施包括:基于力学分析的端头支架链条连锁与面内支架防滑油缸布置;构建“煤袋墙+钻杆骨架+金属网”的组合式巷道挡矸结构;设置皮带架护网、人行扶手与标准化登高作业流程。现场应用表明,该技术体系有效降低了设备滑移率与人员安全事故发生率,提升了工作面生产效率与安全水平,为类似条件矿山安全高效开采提供了技术借鉴。

关键词

大坡度俯采;设备防滑;滚矸控制;人员防护;综合控制技术;集成化设计

1 引言

随着浅部煤炭资源日趋枯竭,中国煤矿开采不断向深部及地质条件复杂区域延伸,大坡度俯采工作面日益增多。此类工作面因煤层倾角大、构造发育,在生产中普遍面临液压支架与输送机下滑、上窜、滚矸窜矸伤人以及人员行走与作业困难等一系列严峻挑战,严重制约安全高效生产。目前,针对大倾角工作面的研究多集中于单一问题的解决。例如,冯耀东通过伪斜调整与采煤工艺优化控制设备下滑;王玉新等针对长延展大落差断层,采用挑顶卧底与回采层位调整技术保障过断层安全;诸多学者也对支架防倒防滑装置、输送机防滑技术等进行了探讨。然而,现有研究大多侧重于设备防滑或过断层等局部环节,对于在多断层、变坡度复杂地质

条件下,如何系统性地协同解决设备防滑、滚矸防控及人员安全防护这一综合问题的研究尚显不足,缺乏一套集成化的“人-机-环”协同控制技术体系。MZ25工作面地质条件复杂,平均倾角达 16° ,内部发育多条影响较大的断层,是典型的大坡度俯采难点工作面。为此,本文以MZ25工作面为工程背景,旨在通过工程地质分析→关键风险辨识→分项技术研发与集成→现场应用验证→综合效益评估的技术路线,构建并应用一套适用于该类工作面的综合控制技术体系,以期类似条件下的安全高效开采提供理论依据与实践参考。

2 工程概况

2.1 地质条件

MZ25工作面位于25采区南翼上部,东接南翼大巷保护煤柱(宽度50m),南邻2513、2511等多个采空区(采空时间均超过5年,稳定性较差),西依DF36正断

【作者简介】卢参军(1976-),男,中国安徽宿州人,本科,助理工程师,从事矿山开采研究。

层（走向近南北，倾角 75°，落差 8~12m），北靠 2105、2508 等采空区，工作面走向长度 1079~1103m，倾向长度 150~160m，煤层厚度 1.1~3.3m，平均厚度 2.6m，煤层倾角 8°~19°，平均倾角 16°，采用走向长壁后退式综合机械化采煤工艺，全部垮落法处理采空区顶板。

工作面顶底板岩性复杂，具体参数如下：基本顶为粉砂岩与砂质泥岩互层，厚度 8.05m，具滑面及少量铝质夹层，饱和抗压强度 28~32MPa；直接顶为砂质泥岩，厚度 3.63m，含铝质及菱铁质鲕粒，夹薄层砂岩，饱和抗压强度 15~18MPa，属中等稳定顶板；直接底为粉砂岩，厚度 6.53m，饱和抗压强度 22~25MPa，遇水易软化，软化系数 0.72；基本底为砂质泥岩，厚度 14m，饱和抗压强度 30~35MPa，稳定性良好。工作面掘进期间揭露 12 条断层，如表 2 琐事，其中 F₂₅₀₇₋₁（落差 12.9m）、DF₃₅（落差 5m）、F₂₅₁₁₋₁（落差 1.8m）等多条断层贯穿整个工作面，断层破碎带宽度 1.2~3.5m，带内岩性松散，导致局部区域煤层变薄、起伏，增加了开采难度。工作面瓦斯含量 0.3~0.5m³/t，煤尘无爆炸危险性（爆炸指数 12.3%），煤的自然倾向性为Ⅲ类不易自燃，水文地质条件简单，主要充水水源为顶板砂岩裂隙水，单位涌水量 0.02L/(s·m)，如表所示。

表 1 断层情况表

断层名称	倾向 (°)	倾角 (°)	落差 (m)	性质	走向延伸长度 (m)	对回采布局影响程度
MZ ₂₅₋₁	113	40	0.9	正断层	29	无影响
MZ ₂₅₋₂	113	43	1.0	正断层	46.5	无影响
F _{MZ25-3}	60	53	1.2	正断层	26	影响较小
F ₂₅₀₇₋₁	317	49	12.9	正断层	408.7	影响较大
F _{MZ25-4}	330	27	4	正断层	28	有一定影响
F ₂₅₋₂	99	68	1.1	正断层	122.6	影响较大
DF ₃₅	262.3	60	5	正断层	372	影响较大
F ₂₅₁₁₋₁	92	60	1.8	正断层	459	影响较大
F ₂₅₁₁₋₂	97	74	1.8	正断层	281	影响较大
F _{MZ25-6}	210	60	1.3	正断层	26	有一定影响
F ₂₅₀₅₋₄	306	52	1.2	正断层	177	有一定影响
F ₂₅₀₅₋₂₄	294	46	14.6	正断层	282	影响较大
F ₂₅₀₃₋₂	70	63	10.7	正断层	210	影响较大
F ₂₅₀₃₋₁	256	60	2.3	正断层	115	影响较大
F ₂₅₀₁₋₂	129	70	5	正断层	72	影响较小
F ₂₅₀₅₋₁	74	70	4	正断层	95	影响较大
F ₂₅₀₅₋₇	15	55	1	正断层	23	有一定影响
F ₂₅₀₈₋₈	35	55	2.2	正断层	36	有一定影响
F ₂₅₀₅₋₅	300	60	3.5	正断层	48	影响较大
F ₂₅₀₅₋₃	310	53	3	正断层	49	影响较大
F ₂₅₋₃	105	55	1	正断层	141	有一定影响

2.2 设备与技术条件

MZ25 工作面采用综合机械化采煤工艺，配备 MG500/1130-WD3 型采煤机、ZY6800/16/35D 型液压支架（102~126 架）、SGZ-800/2×700 型刮板输送机为核心设备；皮带顺

槽配置 SZZ-764/200 型转载机、PLM-1000 型破碎机及 DSJ-100/63/2×160 型带式输送机，形成完善的煤炭运输系统；工作面皮带顺槽为进风巷道，轨道顺槽为回风巷道，通过回风联巷与南翼回风大巷连通，形成独立的通风系统；通过轨道顺槽车场与 25 轨道底车场连通，构建辅助运输系统，为工作面生产提供基础保障。

3 大坡度俯采核心技术难题分析

结合 MZ25 工作面地质条件与俯采特点，经现场勘查与理论分析，确定工作面开采过程中面临三大核心技术难题：

一是设备下滑倾斜风险高。基于静力学分析，设备下滑分力 $F_x = G \cdot \sin \theta$ （ G 为设备总重， θ 为煤层倾角），以 ZY6800/16/35D 型液压支架为例（单架自重约 28t），当工作面倾角 19° 时，单架下滑分力达 90.5kN，远超支架与底板间的静摩擦力（约 65kN），存在天然下滑趋势。尤其在雨季或矿井湿气较重时，底板岩性软化，摩擦系数从 0.32 降至 0.25，静摩擦力进一步减小，下滑风险大幅提升。端头支架若发生下滑（累计下滑量超过 100mm 即影响支护效果），易导致工作面端头支护失效，引发顶板垮塌；刮板输送机下滑会造成与转载机搭接量偏差超过 200mm，影响煤炭运输连续性；面内设备倾斜角度超过 3° 时，还可能引发咬架、挤架等问题，损坏千斤顶、立柱等关键部件^[1]。

二是滚石窜矸隐患突出。大坡度俯采条件下，采空区矸石易沿坡面滚落，尤其在断层影响段，顶板稳定性差，矸石片帮、滚落现象更为严重。滚落的矸石不仅会损坏设备，还会对作业人员造成致命威胁；同时，皮带顺槽大坡度段易出现窜矸现象，影响皮带输送机正常运行。

三是人员作业安全保障难。工作面坡面倾角较大，作业人员在行走、设备检修及物料运输过程中，易因脚底打滑发生倾倒或滑落事故；在登高作业、锚杆拆卸等环节，安全风险进一步提升，传统防护措施难以满足安全作业要求^[2]。

4 设备防滑控制技术体系构建

4.1 设备下滑力学机理与防控思路

设备下滑的根本原因在于其重力沿斜面方向的分力（下滑力 F_s ）超过了设备与底板之间的摩擦阻力（ F_r ）。对于质量为 m 的设备，其下滑力可表示为： $F_s = m \cdot g \cdot \sin \theta$ ，其中 θ 为工作面倾角。防滑的本质是提供额外的抗滑力（ F_a ）或增大有效摩擦，确保 $F_s \leq F_r + F_a$ 。本技术体系通过刚性连接（链条）、液压锁定（防倒千斤顶、防滑油缸）及工艺调控，主动提供 F_a 并优化设备姿态，从而抑制下滑。

4.2 关键部位防滑技术措施

（1）端头支架刚性连锁防滑

机头、机尾端头支架掩护梁处采用 $\phi 22 \times 92$ mm 高强度链条与相邻工作面支架进行硬性连接（图 1）。当坡度超过 25° 时，增设防倒千斤顶，形成“链条-千斤顶”双重保险。

移架时严格执行带压擦顶,初撑力不低于 24 MPa。

(2) 转载机及皮带尾综合锚固

转载机机尾通过链条与下端头 #1、#2 支架牢固连接。采用 UW01B 型机尾快速推移装置实现同步推移。皮带自移机尾每次前后,在其后方两侧施工至少 4 根地锚或打设单体液压支柱,并用链条将其与锚杆底座或支柱固定为一体,防止整体下滑(图 2)。

(3) 面内设备协同姿态控制

支架-输送机联动防滑:每隔 10 架安装一组防滑油缸,通过 $\phi 26 \times 92$ mm 链条(链环间用 $\phi 15.5$ mm 钢丝绳串接以防崩断)与刮板输送机相连。通过调整油缸伸缩,动态补偿输送机的上窜下滑。

工艺协同控制:严格控制采高(≤ 3.3 m),推溜时使用抬底千斤顶压住推拉框架;优化割煤顺序,保持机头机尾推进比例,维持输送机平直。

(4) 电缆单轨吊防下滑

在斜巷段增设一套冗余电缆拖移装置,形成“一运一备”互锁系统。在最后一个电缆小跑车后设置机械阻车器,人工拉移时配合手拉葫芦与 40T 链条进行防滑保障^[9]。

5 防滚矸及人员安全防护技术体系

5.1 巷道空间滚矸主动阻隔技术

针对上下隅角及两巷超前段,构建多层次被动防护网。

上隅角组合挡矸墙:当俯采角超过 15° 时,沿走向每隔 10m 构建一道防滚矸体系。第一道为双排煤袋墙(高度不低于 1m);第二道为“钻杆骨架+半圆木+大眼网”的刚性结构,钻杆插入煤岩帮 0.4-1m,内侧栽设半圆木,整体用铁丝牢固捆扎。

下隅角与巷帮防护:调整端头支架使其尽可能贴近巷帮(间距不超过 0.5m)。当间距超出规定范围时,及时打设单体液压支柱(柱压不低于 11.5 MPa)以阻挡矸石,必要时在支架与巷帮间拉设直径不小于 15.5 mm 的钢丝绳并挂网。

5.2 采运系统窜矸控制技术

皮带运输系统防护:在皮带顺槽坡度大于 16° 的区段,行人侧全程安装高度不低于 300mm 的角铁骨架金属护网。转载机机头溜煤嘴前方加装挡矸皮或链条。(图 3)

工作面内封闭防护:在液压支架顶梁下方与电缆槽之间,使用防倒绳编织防窜矸网,封闭煤壁侧空间,以防止片帮煤矸滚入机道。

5.3 人员通行与作业安全保障技术

通道安全化:在两巷大坡度段(坡度大于 15°)统一

安设稳固的人行梯与扶手(或麻绳)。扶手设置坡度与巷道一致,以便人员抓握。

作业规范化:规定登高作业(高度不低于 1.6m)必须佩戴安全带并有专人监护;严禁蹬踏在锚杆、阀组等不稳定物体上。大坡度段物料搬运优先采用机械化运输方式,必须人工搬运时,一律采取拖运方式。

管理流程化:拉移端头支架、割机头/机尾等高风险作业时,必须在作业点下方 10m 外设警戒,并有班组长统一指挥。

6 应用效果分析

自综合控制技术实施以来,MZ25 工作面设备滑移事故率下降约 70%,滚矸伤人事件显著减少,人员行走与作业安全性大幅提升。工作面推进效率提高约 15%,设备维修成本降低,实现了安全与效益的双重提升。该技术体系具有较强的适用性与推广价值,尤其适用于类似大坡度、多断层的复杂开采条件。

7 结语

形成了一套系统化、集成化的综合控制技术体系。针对 MZ25 工作面大坡度、多断层的复杂条件,研究并成功应用了涵盖“设备防滑-滚矸控制-人员防护”三大模块的协同控制技术体系,突破了单一措施治理的局限性,实现了“人-机-环”系统的整体安全管控。

实现了硬件措施与管控流程的深度融合。基于力学原理设计的链条连锁、防滑油缸等硬件措施,与伪斜调整、工艺优化、标准化作业流程等软性管理措施有效结合,形成了长效防控机制,从根本上降低了各类安全风险。

技术适用性与展望:本体系主要适用于倾角 $8^\circ \sim 25^\circ$ 、存在构造影响的俯采综采工作面。对于更大倾角($> 30^\circ$)或极松软底板等极端条件,其有效性需进一步验证。未来研究可着眼于:①引入倾角、支架姿态实时监测与智能预警系统;②开发自适应调斜控制系统;③研究遥控操作技术,实现人员在安全区域的远程干预,进一步减少高风险区域的暴露。

参考文献

- [1] 杨慧涛,邵高峰.大坡度综采工作面安装技术应用研究[J].内蒙古煤炭经济,2025,(12): 109-111. DOI:10.13487/j.cnki.imce.026790.
- [2] 焦东瑞.基于全方位视频监控技术在大坡度综采工作面安装期间的应用研究[J].山西煤炭,2024,44(01): 89-95.
- [3] 仝泽文.大倾角大坡度仰采综采工作面瓦斯治理技术应用[J].煤炭科技,2023,44(05): 127-130. DOI:10.19896/j.cnki.mtkj.2023.05.023.

Research on the Application of BIM Technology in Construction Management of Bridge Engineering

Tianwen Liu

Guangzhou Urban Construction Vocational College, Guangzhou, Guangdong, 510925, China

Abstract

With the continuous expansion of transportation infrastructure construction scale, bridge engineering has shown a significant improvement trend in structural complexity, construction organization difficulty, and safety risk control. The traditional construction management model, which mainly relies on two-dimensional drawings and experience management, has gradually exposed problems such as information fragmentation, response lag, and decision-making dependence on manual experience in terms of multi-disciplinary collaboration, construction process visualization, and dynamic control. Building Information Modeling (BIM) technology provides a new technological path for bridge construction management by constructing integrated 3D digital models. This article focuses on the key aspects of bridge construction management, systematically analyzing the role and mechanism of BIM technology in construction scheme optimization, schedule and resource coordination control, quality and safety management, and information integration application. Combining with engineering practice, it explores its application effectiveness and implementation points, in order to provide reference for the digital transformation of bridge construction management mode.

Keywords

bridge engineering; BIM technology; construction management; promotion of information technology; coordinated control

桥梁工程中 BIM 技术在施工管理中的应用研究

刘天雯

广州城建职业学院, 中国·广东广州 510925

摘要

随着交通基础设施建设规模的持续扩大,桥梁工程在结构复杂性、施工组织难度及安全风险控制等方面呈现出显著提升趋势。传统以二维图纸和经验管理为主的施工管理模式,在多专业协同、施工过程可视化以及动态控制方面逐渐暴露出信息割裂、响应滞后和决策依赖人工经验等问题。建筑信息模型(Building Information Modeling, BIM)技术通过构建集成化三维数字模型,为桥梁工程施工管理提供了新的技术路径。本文围绕桥梁工程施工管理的关键环节,系统分析BIM技术在施工方案优化、进度与资源协同控制、质量与安全管理以及信息化集成应用中的作用机制,并结合工程实践探讨其应用成效与实施要点,以期桥梁工程施工管理模式的数字化转型提供参考。

关键词

桥梁工程; BIM技术; 施工管理; 信息化; 协同控制

1 引言

在我国交通基础设施由规模扩张向质量提升转型的背景下,桥梁工程逐渐呈现出跨径增大、结构体系多样化及施工环境复杂化等特征。斜拉桥、悬索桥以及复杂互通立交桥的广泛应用,使施工阶段涉及的工序衔接、结构受力转换和施工风险控制显著增加。施工管理作为保障桥梁工程质量、安全与工期目标实现的关键环节,其管理精度和信息响应能力直接影响工程整体绩效。当前,BIM技术在建筑工程领域的应用已较为成熟,而在桥梁工程中的系统化应用仍处于

不断探索和深化阶段。如何将BIM技术与桥梁工程施工管理需求深度融合,充分发挥其在施工组织、质量安全控制和资源配置优化方面的优势,是当前工程实践中亟需研究的问题。

2 桥梁工程 BIM 模型的构建特征与信息组织逻辑

桥梁工程BIM模型的构建和一般建筑工程不一样,它的技术难点不光是构件尺度大、结构形式复杂[1]。更在于结构体系在施工阶段有动态变化的特性,桥梁的上部结构、下部结构以及临时支撑体系在不同施工阶段承担的受力功能有明显差别,这就意味着BIM模型构建时要充分考虑施工过程导向,而不只是服务于竣工状态的几何表达[2]。在

【作者简介】刘天雯(1987—),女,中国广东人,研究生,讲师,研究方向:土木工程+人工智能。

模型构建方面,一般要依照构件级、子系统级和结构体系级来分层组织,把主梁、桥墩、承台、桩基以及挂篮、支架等临时结构放进统一的信息体系里,形成覆盖“永久结构—施工临时结构—施工工序”的完整模型框架,在信息组织逻辑上,桥梁工程 BIM 模型要包含几何尺寸和空间位置等基础信息,还要集成材料性能参数、施工工艺属性以及关键施工控制指标。依靠参数化建模方式,让构件之间形成明确的逻辑关联关系,当局部构件参数有调整时,能自动联动更新相关信息,这种以参数驱动为核心的信息组织模式,给施工阶段设计变更管理、方案调整及施工状态分析提供了可靠的数据基础,有效减少了信息割裂对施工管理决策的影响。

3 BIM 技术在桥梁工程施工管理中的应用路径

为了可系统且清晰地阐述 BIM 技术在桥梁工程施工管理当中的作用原理,构建了基于 BIM 的施工管理协同流程框架 [3]。具体如图 1 所示,此流程以施工设计以及施工方案作为起始点,借助 BIM 三维模型达成结构参数、施工工序以及管理信息的统一整合,并且在这个基础之上纳入进度、资源、质量还有安全等多个维度的管理要素。经由施工过程的动态模拟以及数据分析,达成施工方案的持续改进以及管理决策支持,现场施工数据借助信息化方式实时反馈到 BIM 模型,形成“模型—施工—反馈—优化”的闭环管理机制,为桥梁工程施工阶段的精细化管理以及动态控制给予技术支持。

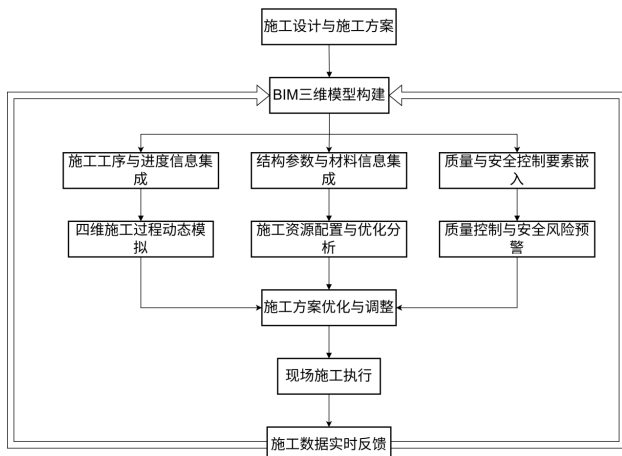


图 1 基于 BIM 的桥梁工程施工管理协同流程示意图

3.1 基于 BIM 的施工方案的优化与技术路径分析

在桥梁施工进度当中,对施工方案给予优化属于保证工程质量、工期以及成本控制的关键要点,传统的施工方案优化一般依靠经验以及定性分析。但 BIM 技术为方案优化给予了数据支撑以及可视化工具,借助构建施工 BIM 模型,管理者可针对不同施工方法开展虚拟仿真以及方案比选,从结构安全、施工便捷性、环境影响以及资源配置等多个维度展开分析。

BIM 技术可依靠模拟不同施工方案的实施过程,帮助管理人员深入知晓各方案的施工难点与技术要求。比如在支

架方案优化中,运用 BIM 技术进行三维建模与动态模拟,以此评估支架布置的合理性,识别潜在的空间冲突以及结构稳定性问题,避免了传统方案评估时难以直观呈现的缺陷。

BIM 模型还可以有效协调各施工阶段的关系,减少因设计变更或者信息传递不及时所引发的返工情况,像在桥梁上部结构施工时,模型可对吊装顺序、施工设备使用以及作业面协调等方面给予优化,让施工过程更为顺畅,减少时间与资源的浪费。

3.2 基于 BIM 的施工进度与资源协同管理

于桥梁工程施工管理而言,进度控制以及资源管理属于对工程成本与质量产生影响的的关键要素,以往传统的进度管理主要依靠时间表以及人工协调来开展。然而其欠缺对整体全局的视角以及实时更新的能力,而 BIM 技术借助整合项目各个环节的相关信息,可达成施工进度动态更新,并且与资源管理系统实现实时对接,以此保证施工资源达到最优配置状态。

把施工进度计划和 BIM 模型相结合,能直观呈现施工各阶段的关键节点。管理人员能实时查看每个阶段的施工进度以及可能出现的瓶颈状况,BIM 模型里的进度条以及虚拟施工演示,让施工人员可以提前识别潜在的进度滞后问题,依据实际情形调整工作计划,BIM 技术让工地现场的资源,像工人、设备和材料等,能与进度计划紧密关联,避免了资源配置的盲目性。借助 BIM 模型的三维可视化,施工人员能清楚知晓每一环节所需的资源类型、数量以及使用时间,防止了材料浪费和设备闲置,提升了资源的利用效率。BIM 技术可以把施工现场的实时数据采集与进度管理系统进行无缝对接,构建出一个闭环管理系统,在施工期间,借助传感器等设备采集的数据会实时反馈到 BIM 模型中,更新工程的实际进度与资源使用情况。这种依靠数据驱动的管理方式,使施工进度不只是依赖传统的人工记录,而是借助实时数据的采集和反馈,及时呈现现场实际状况,方便进行动态调整。

3.3 基于 BIM 的施工质量与安全控制

在桥梁工程领域,施工质量以及安全管理属于不容忽视的关键问题,传统的质量跟安全管理大多时候依靠人工巡查、表格记录以及事后检测来开展工作。在大规模施工情形下,此种方式效率不高,还容易出现漏检状况以及错误,BIM 技术借助数字化模型达成对施工质量与安全管理整个过程的监控,给工程质量和安全供给了全新的管理办法。

在质量控制领域,BIM 技术借助在模型里标注质量检查点、关键构件以及关键工序的方式,帮助质量管理人员精准识别出那些需要重点把控的部分。BIM 模型可呈现出各个施工阶段的质量标准,而且还可经由与质量检测设备的数据对接,达成施工过程中的实时检测,借助同自动化检测系统相结合,BIM 技术可即刻反馈结构的质量数据,并且依据设定的标准展开自动分析与报告,降低了人工干预所产生

的误差,提升了检测的及时性与准确性。在安全管理范畴,BIM技术依靠把安全风险点信息嵌入模型,得以在施工前对潜在的安全隐患展开识别与预警,对于桥梁工程里的高空作业、深基坑作业等危险工序,BIM模型可预先模拟作业流程,评估可能出现的风险,依据模拟结果提前拟定安全防护措施,借助BIM技术,施工现场的安全风险可获得更为全面、系统的管理,施工人员在踏入施工现场之前可充分知晓潜在风险,提高安全意识,减少安全事故的出现。

4 工程实践分析与应用成效评价

4.1 BIM 技术应用的实践案例分析

在实际的桥梁工程项目里,BIM技术的运用已然收获了一定成果,就拿某城市的跨河大桥来说,此项目在设计时期便引入了BIM技术,借助精准的三维建模以及虚拟施工模拟,达成了施工方案的优化以及进度管理的可视化呈现,在项目开展进程中,BIM模型作为统一的信息平台,顺利地把施工进度、资源配置、质量管理以及安全保障等各个环节给予了整合。其一借助BIM技术的引入,项目团队可在模型中提前识别潜在的设计冲突,比如在桥梁的结构设计与施工组织进程中,借助与临时第一支撑和运输路线的三维模型对接,察觉到原计划里的运输路线与现有交通设施之间存在空间冲突,及时做出了调整,其二BIM技术于施工阶段帮助项目管理团队达成了精细化的进度管控。每个施工工序的实际进度都经由BIM模型进行了实时更新,项目管理人员可及时知晓各工序的进展状况,避免了传统方式中因信息滞后所引发的进度延误。

在质量以及安全控制领域,BIM技术呈现出了较大优势,此项目运用了BIM与物联网即IoT的组合方式,对施工现场的环境变化如温度、湿度、风速等展开实时监控,并且与BIM模型形成联动,帮助安全管理人员针对可能出现的风险发出预警,于高空作业以及深基坑施工进度当中,借助BIM模型开展虚拟仿真以及风险评估,预先制订了详尽的安全防护方案,使得施工过程中事故的发生率得以降低。

4.2 BIM 技术对施工效率和资源配置优化的影响

BIM技术针对施工效率以及资源配置所产生的优化成效在诸多层面都获得了验证,起初施工进度的可视化管理极大程度上提升了管理人员的决策效率,借助于在BIM模型里针对每个施工阶段的工序给予详尽标注,并且借助四维BIM开展动态进度模拟,管理团队可预先识别出施工进度里有可能存在的瓶颈,及时实施调整。BIM技术明显提高了施工资源的利用效率,以往的资源调配大多时候是依据经

验进行估算以及手工管理,然而BIM模型可依照施工进度的改变实时对资源需求作出调整,凭借和资源管理系统相结合,BIM技术促使施工现场的物资、设备以及人员得以高效调度。

4.3 BIM 技术对施工质量与安全管理提升的成效

在施工质量管理范畴,BIM技术的运用切实提升了管理的精确程度以及时效性能,借助BIM模型所有的三维可视化特性,质量管理人员可以更为直观的方式去知晓施工进度里的每一处细节,及时察觉潜在的质量问题,就好比在桥梁焊接工艺环节,BIM模型可清晰标注出各个焊接点的质量检查具体要求,并且与现场的质量检测设备达成联动,达成实时监控以及数据反馈的效果。一旦发现某个焊接点的质量不符合定标准,模型会自动做出标记并生成报警信息,管理人员可在第一时间针对问题展开处理,规避了传统检测方法中容易出现漏检以及延误状况,在安全管理领域,BIM技术与物联网技术相互结合,为施工现场的安全监控给予了强有力的支撑,依靠在BIM模型当中嵌入传感器数据,项目管理团队可实时监测施工现场的环境变化情况,并且借助模型对潜在风险展开预先判断。比如在深基坑施工过程中,BIM技术可结合地下水位、土壤承载力等相关信息,对基坑稳定性进行分析,在施工前期制定好应对方案,BIM模型还可对施工人员的安全防护措施实施实时检测,保证高危作业人员佩戴好安全防护设备,防止安全事故的发生。

5 结语

BIM技术为桥梁工程施工管理提供了一种集成化、可视化和信息驱动的新型管理模式。通过在施工方案优化、进度与资源协同、质量与安全控制等方面的应用,BIM技术有效弥补了传统施工管理模式在信息整合和动态控制方面的不足。实践表明,BIM技术的合理应用有助于提升桥梁工程施工管理的精细化水平和整体绩效。实践中应进一步加强BIM技术与施工管理流程的深度融合,推动其在桥梁工程中的系统化、常态化应用。

参考文献

- [1] 崔以浩,尚明政. BIM技术在框架剪力墙结构建筑施工中的应用分析[J]. 中国建筑装饰装修,2025(13):69-71. DOI:10.3969/j.issn.1672-2167.2025.13.006.
- [2] 薛孟祥. BIM技术在建筑施工进度控制中的应用[J]. 建筑·建材·装饰,2025(5):193-195. DOI:10.3969/j.issn.1674-3024.2025.05.065.
- [3] 申传瑞,吴超,张宝森. BIM技术在建筑工程施工管理中的应用[J]. 建筑与装饰,2025(9):148-150.

Research on Fault Diagnosis and Prediction Technology of Flight Control Electronic Equipment

Bingke Qiao Yanrong Jia Peiyi Liu

Shijiazhuang Haishan Aviation Electronic Technology Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei, 050208, China

Abstract

As the information processing and instruction execution core of the aircraft control system, the operational reliability of flight control electronic devices directly determines the level of flight safety and the ability to complete system tasks. With the development of aircraft towards high integration, high autonomy, and complex mission environments, flight control electronic equipment exhibits diverse failure mechanisms, hidden evolution processes, and amplified failure consequences under long-term service and complex operating conditions. The traditional fault handling mode based on post detection is no longer able to meet engineering needs. The results of this study indicate that the prediction method that integrates multi-source monitoring information and intelligent algorithms can effectively improve the foresight and diagnostic accuracy of fault identification, providing technical support for the safe operation and maintenance decision-making of flight control systems.

Keywords

flight control system; electronic devices; fault diagnosis; status monitoring; fault prediction

飞行控制电子设备故障诊断与预测技术研究

乔兵克 贾彦荣 刘培懿

石家庄海山航空电子科技有限公司, 中国·河北 石家庄 050208

摘要

飞行控制电子设备作为飞行器控制系统的信息处理与指令执行核心, 其运行可靠性直接决定飞行安全水平与系统任务完成能力。随着飞行器向高集成度、高自主性和复杂任务环境方向发展, 飞行控制电子设备在长期服役与复杂工况下呈现出故障机理多样化、演化过程隐蔽化和失效后果放大化等特征, 传统以事后检测为主的故障处理模式已难以满足工程需求。本研究结果表明, 融合多源监测信息与智能算法的预测方法可有效提升故障识别的前瞻性与诊断准确性, 为飞行控制系统的安全运行与维护决策提供技术支撑。

关键词

飞行控制系统; 电子设备; 故障诊断; 状态监测; 故障预测

1 引言

飞行控制系统是飞行器实现姿态稳定、轨迹跟踪与任务执行的关键技术体系, 其中飞行控制电子设备承担着信号采集、数据处理、控制律计算与执行指令输出等核心功能, 其运行状态直接关系飞行器的安全性与可靠性。近年来, 随着无人机、先进有人机以及高机动飞行平台的快速发展, 飞行控制系统的结构复杂度和功能集成度持续提升, 电子设备内部集成了大量高密度电路、嵌入式处理单元与复杂接口模块, 使其对环境应力、老化效应与瞬态扰动更加敏感。因此, 如何在故障发生前对设备状态进行有效评估, 实现对失效风险的提前预警, 已成为飞行控制系统安全保障领域的重要研究方向。

【作者简介】乔兵克(1987-), 男, 中国河北巨鹿人, 本科, 工程师, 从事飞机飞行控制系统调试和维修研究。

2 飞行控制电子设备故障诊断方法研究

2.1 基于运行信号特征的故障诊断方法

飞行控制电子设备在正常运行状态下, 其电气参数、计算时序及信号输出均呈现出较为稳定的统计特性, 当设备内部元器件性能退化或局部功能异常时, 相关运行信号往往会首先发生细微变化。因此, 基于运行信号特征的故障诊断方法成为飞行控制电子设备状态评估中应用较为成熟的一类技术路径。该方法以设备在役运行过程中采集的电压、电流、温度及时序响应等信号为分析对象, 通过对其时域、频域及统计特征的变化规律进行分析, 实现对异常状态的识别与判定 [1]。

在工程实践中, 飞行控制电子设备通常工作于强电磁干扰和高动态载荷环境中, 其信号特征不仅受设备自身状态影响, 还与外部工况密切相关。因此, 故障诊断过程中需重点关注信号特征随工况变化的相对偏移趋势, 而非单一时刻

的绝对数值。当电子元器件发生老化、电源模块稳定性下降或信号通道接触不良时,设备运行信号往往表现为幅值波动增大、噪声成分增强或特征频率异常等现象。这类变化虽然在早期不一定引起系统功能失效,但其长期累积将显著增加故障风险。为提高诊断结果的可靠性,实际应用中通常对多类信号特征进行联合分析,通过构建多维特征空间,增强对复杂故障模式的辨识能力。同时,引入统计判别与异常检测方法,可在一定程度上抑制随机噪声和短时扰动对诊断结果的干扰。然而,该类方法在面对多故障耦合或隐性退化场景时,仍然存在诊断边界模糊的问题,其结果更多反映的是“是否异常”,而对故障类型与发展阶段的判定能力有限。

2.2 基于模型与数据融合的故障诊断方法

针对单纯信号特征分析在复杂系统中的局限性,近年来逐渐发展出基于模型与数据融合的故障诊断方法。该方法通过引入飞行控制电子设备的功能模型或行为模型,将设备的理论运行状态与实际观测数据进行对比分析,以残差信息或偏差特征作为故障判据,从而提升诊断的针对性与解释能力[2]。

在模型驱动诊断过程中,设备模型用于描述正常工况下各功能模块之间的输入输出关系,当设备内部出现异常时,模型预测结果与实际测量值之间将产生偏差。通过对该偏差随时间演化特征的分析,可有效区分暂态扰动与持续性故障。对于飞行控制电子设备而言,模型可重点围绕信号处理延迟、计算负载变化及电源响应特性等关键行为进行构建,从而降低整体建模复杂度。在融合诊断框架下,模型输出结果可作为数据驱动算法的先验约束或特征输入,而数据分析结果则可用于修正模型参数或优化诊断阈值,从而构建具有自适应能力的故障诊断体系。工程应用表明,该类融合方法在复杂工况与长期运行条件下,能够显著提升飞行控制电子设备故障诊断的稳定性与准确性,为后续故障预测与维护决策奠定可靠基础。

3 飞行控制电子设备故障预测技术研究

3.1 状态监测与健康指标构建

飞行控制电子设备的故障预测技术基于设备的状态监测,目的是通过持续跟踪设备的工作状态,提取与故障演化相关的关键特征,构建设备的健康监测模型,并将这些特征转化为健康指标。健康指标是反映设备工作状态的重要量,它能够揭示设备从正常状态到失效状态的演变趋势,为故障预测提供量化依据[3]。

在飞行控制电子设备中,多个关键参数(如温度、电流、电压、计算延迟等)直接影响设备的健康状态。例如,过高的工作温度可能导致半导体元器件的退化,电流波动过大则可能指示着电源模块的不稳定。通过传感器对这些关键参数的实时监测,可以获得设备的动态状态信息。通过对这些信号的分析,能够有效识别设备是否存在潜在的风险。在设备

运行的不同阶段,其健康状态会表现为不同的动态变化,通常早期阶段的退化过程比较缓慢,信号特征较为微弱,但随着故障的逐步加剧,故障的痕迹变得更加明显。因此,健康监测的精度和预测的准确性在于及时发现这些微弱变化,并能够提前预警。

为了有效评估飞行控制电子设备的健康状态,常见的做法是通过多维度监测数据的融合与综合分析,构建一个能够实时反映设备状态的健康指数。例如,通过对设备温度、功率消耗及工作频率等参数的加权平均或综合计算,得到一个综合健康指标,该指标可以反映设备整体的健康水平。随着设备运行时间的推移,健康指标将显示出逐步退化的趋势,一旦该健康指数超过设定阈值,就可以预警设备即将发生故障。

3.2 基于智能算法的故障预测方法

随着飞行控制电子设备技术的不断进步,越来越多的智能算法被应用于设备故障预测领域。与传统的基于规则或模型的预测方法不同,基于智能算法的故障预测方法具有强大的自学习能力,可以处理复杂的非线性关系,尤其适合于飞行控制电子设备中多元数据和复杂故障模式的识别。

常见的智能算法包括机器学习方法、深度学习方法、支持向量机(SVM)、决策树(DT)、随机森林(RF)等。这些方法能够从大量的历史运行数据中学习潜在的故障特征,自动识别不同工况下设备的健康状态。在这些方法中,深度学习尤为重要,因为它可以从原始信号中自动提取特征,避免了人工特征提取的复杂性。具体来说,深度神经网络(DNN)和卷积神经网络(CNN)在设备故障预测中具有广泛应用。这些模型通过多层非线性变换,能够识别设备运行中微小的、难以察觉的故障前兆。通过对飞行控制电子设备的历史数据进行训练,深度学习模型能够有效捕捉到设备故障前的退化模式,为预测模型提供精确的判断依据。相比传统的诊断方法,智能算法通过自适应的学习过程,能够在数据模式发生变化时及时调整,从而提供更加精确和稳定的预测结果。基于智能算法的故障预测不仅可以应用于设备的单一故障类型预测,还能通过多任务学习对多种故障模式进行联合预测。例如,在飞行控制系统中,电源模块的故障、计算单元的故障以及信号通道的故障往往同时发生。通过智能算法,系统能够根据不同故障模式之间的关联性,进行更为准确的预测。

4 工程应用与技术实现分析

4.1 飞行控制电子设备故障预测在实际工程中的应用

随着飞行控制系统复杂度的不断增加,特别是高性能飞行器的研发与应用,飞行控制电子设备故障预测技术的工程应用显得尤为重要。在实际工程中,飞行控制电子设备故障预测系统通常作为飞行器整体健康管理体系的一部分,与飞行器的其他系统进行深度集成。

在飞行器中,飞行控制系统的健康状态监测和故障预测通常依赖于两大类数据:一类是飞行过程中实时采集的状态监测数据,包括设备运行参数、传感器数据、电源信息等;另一类则是历史数据,包括设备的过往故障记录、维修日志、工况变化记录等。通过实时数据与历史数据的融合,故障预测系统可以对飞行控制电子设备的未来状态进行科学估算,预测设备可能的故障及其发生时间,从而为系统维护提供精准的决策依据。以无人机为例,飞行控制电子设备在无人机飞行中的应用要求极高的可靠性和实时性。通过将健康监测与故障预测技术集成到无人机的控制系统中,可以在飞行过程中持续监测各关键部件的健康状态。当预测到某个组件的性能出现退化并接近故障阈值时,系统会自动发出预警信号,并根据预测结果调整飞行计划,减少飞行器损失。同时,故障预测系统还可与无人机的自动返航系统协同工作,一旦出现设备失效迹象,飞行器可自动选择最安全的路径进行返航或着陆,从而提高飞行安全性。

对于有人驾驶飞行器,飞行控制电子设备故障预测技术同样具有至关重要的作用。通过实时监测飞行控制系统的状态,飞行器能够实现对各关键系统组件的健康评估,并通过故障预测分析,及时调整飞行任务和航路,避免因设备故障造成飞行事故。例如,飞行控制系统中的电源模块可能在长时间高负荷运行后逐渐退化,智能故障预测系统可以通过电压波动、温度变化等信号进行早期预警,并指导维修团队提前进行检修或更换。

4.2 持续优化与未来发展方向

尽管飞行控制电子设备故障预测技术在多个领域取得了显著进展,但在实际应用中仍面临许多挑战,尤其是在预测精度、实时性以及系统集成等方面。目前,飞行控制电子设备故障预测的精度仍受限于数据质量和算法性能。在实际应用中,设备的故障模式和退化过程复杂多变,单一的预测模型难以覆盖所有的故障类型。为此,未来的研究应集中在如何通过多源数据的融合,提升故障预测的精准度。除了传统的电压、电流、温度等数据,未来可以考虑集成更多种类的传感器数据,如振动信号、噪声信号等,以及飞行器操作环境数据,如气象、飞行姿态等。基于数据融合的技术可以将来自不同传感器、设备及飞行环境的数据进行联合分析,形成更为全面的设备健康状态评估。通过多模态数据的互补性,可以有效减少单一数据源可能带来的误差,提升故

障预测的准确性和可靠性。

飞行器的实时性要求对故障预测系统提出了极高的要求。尤其在高速飞行器或无人机的控制系统中,预测模型需要能够实时运行,并根据飞行器的实时状态变化调整预测结果。为此,未来的故障预测系统需要结合边缘计算与云计算技术,在飞行器上实现对数据的快速处理与实时预测,同时结合云端数据中心进行更为复杂的分析与建模。智能化故障预测技术的进一步发展,将依赖于更加先进的人工智能算法。通过增强学习、生成对抗网络(GAN)等前沿技术,故障预测系统将能够在复杂、多变的飞行环境中更加智能化地进行学习与优化。例如,增强学习能够使系统通过与环境的互动自动调整预测策略,从而实现更高效、更精确的故障预警。

故障预测系统不仅仅是单独的预测工具,它需要与飞行控制系统、维护系统及其他子系统进行深度集成。在未来的飞行器设计中,飞行控制电子设备故障预测系统将被嵌入到飞机的整体健康管理系统中,确保数据流、决策流与反馈流的顺畅传递。这种集成不仅能够提高飞行器的故障诊断与维护效率,还能通过系统的协同工作最大化飞行安全和运营效率。

5 结语

飞行控制电子设备故障预测技术作为飞行器整体健康管理的重要组成部分,已在多个领域取得显著进展。通过融合多源数据与智能算法,飞行控制系统能够实现对设备健康状态的实时监测与故障预测,大幅提升飞行安全性和设备维护的效率。尽管目前仍存在一定的挑战,但随着技术的不断进步,尤其是在多源数据融合、实时计算能力与智能算法应用等方面,未来故障预测技术有望得到更广泛的应用,推动飞行器安全保障水平的进一步提升。

参考文献

- [1] 张晨,崔利军,李飞晟,等.机载任务设备控制模块自适应BIT检测电路设计[J].计算机测量与控制,2021,29(7):7-10.D
- [2] 曹悦,王红敏,张健雨.航空电子系统中的人工智能应用研究[J/OL].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术,2024(12)[2024-12-01].
- [3] 徐楠.探讨空客A320系列飞机航空电子设备故障及维修措施[J/OL].中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术,2025(2)[2025-03-07].

Research on Performance Test of Exhaust Gas Recirculation Valve in Automobile Engine

Xin Yang Bin Wang

Wenzhou Yiqi Electromechanical Technology Co., Ltd., Wenzhou, Zhejiang, 325000, China

Abstract

To address the challenges of exhaust gas purification and operational condition matching in internal combustion engines, this study tackles issues such as performance testing inaccuracies and incomplete evaluation criteria for EGR valves. The paper first elucidates the working principles of EGR systems and valve functionalities, establishing a comprehensive performance evaluation framework that incorporates both dynamic and static metrics. Subsequently, it systematically examines practical strategies across five key dimensions: sealing integrity, dynamic response, anti-caking capability, full-range durability, and intelligent testing. Through concrete engineering case studies, the research analyzes operational implementation points and optimization pathways for each testing method. This study provides precise theoretical support and actionable technical solutions for EGR valve performance optimization, batch testing, and engineering applications, ultimately enhancing emission control efficiency and operational stability in internal combustion engines.

Keywords

exhaust gas recirculation valve; performance testing; parameter system; engineering practice; multidimensional detection

汽车发动机废气再循环阀性能测试研究

杨鑫 王斌

温州日益机电科技有限公司, 中国·浙江温州 325000

摘要

为满足内燃机尾气净化和工作状况匹配的需要, 针对EGR阀性能测试精准度偏差、测试项目不全面等问题, 本文先说明EGR系统的工作原理和阀的功能, 建立包含动态和静态指标的关键性能评价参数体系, 接着依次探讨密封性、动态反应、抗积碳、全工作状况耐久性及智能测试五个方面的实践策略, 结合具体工程实例分析各测试方法的实际操作要点和优化途径。该研究为EGR阀性能优化、批量检测以及工程应用提供了精确的理论支持和可行的技术方案, 有助于提高内燃机排放控制水平和运行稳定性。

关键词

废气再循环阀; 性能测试; 参数体系; 工程实践; 多维度检测

1 引言

随着内燃机排放法规越来越严格, EGR 阀的性能稳定对于尾气净化和动力平衡非常关键。现有的测试方法存在一定限制, 基于此, 本文构建理论体系并提出多方面的工程测试策略, 为 EGR 阀总成性能测试提供技术支持。

2 废气再循环阀性能测试的理论基础

2.1 废气再循环 (EGR) 系统工作原理与阀体功能

EGR 系统作为内燃机尾气净化以及热效率调整的关键部位, 其运行原理和流体混合动力学、燃烧学理论相契合。

【作者简介】杨鑫 (1986-), 男, 中国河北唐山人, 本科, 高级工程师, 从事汽车发动机零部件设计开发、废气循环阀、增压器等进、排气零部件设计开发研究。

该系统把排气歧管里经过降温处理的一部分废气引回到进气歧管, 借助进气气流的剪切作用和湍流扩散效果, 让废气和新鲜混合气能够均匀混合。从燃烧学的角度来讲, 废气会降低氧含量并且吸收燃烧产生的热量, 根据氮氧化物生成动力学理论, 将燃烧室的峰值温度控制在 1500K 以内, 从而抑制 NOx 的热生成; 同时, 依据爆震热力学原理, 对混合气的自燃特性进行优化, 在不同工况下平衡排放和动力方面的需求。

2.2 EGR 阀性能核心评价参数体系

EGR 阀性能评价参数体系以流体力学和自动控制理论为基础, 构成了多维度的架构。静态指标依靠流体密封理论和精密机械控制原理: 开度精度以伺服控制精度理论为依据, 保证阀芯的位移和 ECU 指令呈线性对应关系, $\pm 3\%$ 的偏差限值来自空燃比控制的稳态误差允许范围; 密封性能依照泊肃叶定律和伯努利方程, 对全关时的泄漏量进行控

制,防止混合气浓度出现异常而影响燃烧的稳定性。背压性能 ($\geq 3\text{bar}$),满足高低压阀在不同工况下的动力需求。动态指标结合了瞬态流体力学和时域响应分析, $\leq 100\text{ms}$ 的响应滞后时间能够适应发动机的瞬态工况,流量调节线性度 (偏差 $< 8\%$) 则可以保证控制算法的适配性,与流体流量和开度的耦合关系理论相符合详见表 1。

表 1 废气再循环阀性能测试的理论浏览表

参数类型	具体指标	核心要求
静态指标	开度精度	偏差 $\leq \pm 3\%$
	密封性能	全关泄漏量达标
	背压性能	$\geq 3\text{bar}$
动态指标	响应滞后时间	$\leq 100\text{ms}$
	流量调节线性度	偏差 $< 8\%$

3 面向工程应用的性能测试实践策略

依据前面所说的理论支持,按照工程实际需要,下面从多个方面构建测试实施体系,把重点放在关键测试情况和具体实施办法上,给 EGR 阀性能验证提供能够实际运用的工程计划。综合性能是基本的保障条件,需要运用高精度的量化方式来打破单一的检测限制,首先性测试建立精确的检测步骤及测试项目。

3.1 综合性能测试包含 PWM 开环驱动和闭环驱动两个模块进行运行状态测试及动态响应优化, PWM 波形激励与阶跃响应综合测试

运行状态检测 EGR 阀关闭到打开、打开到关闭,运行顺畅度,通过采集连续步进之间信号变化量监控过程测试其运行平稳性、是否存在卡滞和各个机械止点位置信号、位移等,监控其基本的运行性能。EGR 阀的动态反应特征会直接作用于发动机在瞬间工作状态时的适应能力,其反应速度、超出预期的变化量、稳定状态下的偏差需要和 ECU 的控制方法精确契合。以 PWM 波形作为主要驱动方式、通过调整脉冲频率和占空比模仿 ECU 实际发出的控制信号,有针对性地测试阀门在不同激励信号作用下的运动反应情况,以及通过施加突然变化的控制信号迅速捕捉阀门从起始位置移动到目标开启程度的运动过程并量化反应延迟时长、上升时长等重要指标的阶跃响应测试。综合测试同时搭建闭环测试模块,实时收集 PWM 控制信号和阀门位移的数据,通过对数据进行同步分析来排除信号异常、机械部件卡顿等干扰因素,同时结合流体力学的仿真结果,对激励信号的参数和阀体的机械构造进行优化,实现动态反应性能的逐步提升,以保证在急加速、急减速等瞬间工作状态时,废气再循环的量能够迅速按照指令进行调整。

在某个乘用车发动机研发项目里针对与 1.5T 涡轮增压发动机配套的 EGR 阀开展动态反应优化测试,目标为将阶跃响应的延迟时间控制在 80 毫秒以内且超调量不超过 5%,测试系统使用 NI CompactRIO 控制器生成频率范围在 100-

500 赫兹、占空比调节范围为 0-100% 的 PWM 激励信号,并通过采样频率为 10 千赫的激光位移传感器收集阀门位移数据。^[2]首先采用频率为 500 赫兹、占空比从 20% 跃变到 80% 的激励信号来测试初始的反应性能,发现延迟时间为 110 毫秒,超调量达到了 8%,而且存在阀门运动卡顿的现象。通过对数据曲线进行分析,判断卡顿是由于阀门导向机构的摩擦阻力过大或 PWM 信号频率较低导致控制精度不够。优化方案是将 PWM 信号频率提高到 1000 赫兹,提升导向套表面粗糙度或改进导向套材质 (比如石墨轴套)、优化配合间隙,然后再次进行综合测试。

密封性测试达到标准是 EGR 阀稳定运行的基础,然而传统的静态检测方式很难满足像国六这样严格的排放标准下对于实际泄漏的检测要求。^[1]所以,使用测试系统模型,结合工程实际测量的情况对检测方法、参数进行优化,实现对泄漏量的测量准确,为密封性能的评价提供可信的数据。

3.2 密封性和背压力测试,搭建定制的测试系统模型

密封程度是 EGR 阀保证工作状态稳定的关键因素,阀门关闭位置漏气量超过标准会造成额外的废气进入进气系统,打破混合气体浓度的平衡,加重燃烧的不稳定并引发排放超标。过去的水压检测泄漏、气压差检测泄漏的办法,因检测装置和检测参数差异导致检测数据的失准。检测时要先搭建被测控体部位封闭的检测空间,并施加规定的测试压力,同时基于产品特性辅助反向通电锁紧阀门,模拟检测车载工况下产品的实际泄漏量。背压测试是模拟负载工况、检测产品推力的有效途径,检测时在阀门端施加一定压力的压缩气体,检测系统施加 100% 占空比驱动阀门,压力传感器检测压力变化情况,系统采集位置信号变化,通过曲线判定实际背压值。

一家商用车发动机工厂针对国六排放标准的 EGR 阀进行密封检测,选择型号为 EGR-630、采用双密封面结构且设定泄漏临界值 $\leq 30\text{L/min}$ 的电控提升阀作为检测对象,检测前先对腔体部位进行封堵、将其固定,进气端在保持 0.1 MPa 稳定气压下。充气时间为 4 秒,保压 5 秒,检测 4 秒后读取泄漏仪的数据。检测时发现阀门泄漏为 43L/min,增加反向通电后,实际泄漏为 27L/min。反向通电更符合产品使用工况,避免盲目调整导致制造过剩。切换检测工位,运用背压检测系统完成背压检测。背压检测能够实时监控产品推力制造过程一致性。

3.3 抗积碳测试,加速老化台架与碳沉积量化分析

汽车发动机排出的气体里,没烧完的燃料、润滑油里的脏东西等,会在 EGR 阀的阀杆、密封的地方和气体流过的通道留下碳堆积物。时间长了,这些堆积物会让阀杆卡住、打开的精准度降低、密封效果变差,大大影响阀门的使用时间。抗积碳测试的关键,是用加速老化的设备模拟实际使用时的环境,让碳堆积形成的时间变短,同时建立科学的计算碳堆积多少的分析办法,准确评估阀门抗积碳的能力。加速

老化的设备要模拟发动机不同工作状态下排气的温度、流动速度、成分和压力等数据,通过延长高负荷工作的时间、增加排气中碳颗粒的浓度等方法,加快碳堆积的产生。

一家发动机零件公司选用型号为 EGR-850 的电控阀对重型柴油机的 EGR 阀进行抗积碳性能测试,搭建专门模拟柴油机在额定负荷、怠速、加速等典型工作状态,且排气温度控制在 200-550℃、排气流动速度在 5-20m/s 之间,并通过添加柴油添加剂将排气中碳颗粒浓度提高到实际工作状态下 3 倍、老化时间设定为 1000 小时的加速老化设备。在老化测试前,先测试阀门打开的精准度、密封性能和动态反应指标,把这些作为基础数据。^[1]老化测试结束后,拆开阀门发现阀芯表面和阀座边缘有均匀的碳堆积层,用电子天平称得碳堆积的重量为 1.2 克,通过三维激光扫描发现碳堆积使阀门有效流通面积减少了 8%。

3.4 全工况耐久, 高低温交变振动复合测试方案

EGR 阀的工作环境比较复杂,要经受温度高低交替变化、震动冲击、有腐蚀性气体的侵蚀,全工况持久测试的目的是模仿实际工作过程中的各种极端状况,检验阀体长时间运行的可靠程度和稳定情况。测试运用温度高低交替变化和震动一起加载的方式,避开单一环境测试的不足,让测试更接近实际工作状况。温度高低交替变化测试借助环境试验箱实现从 -40℃到 150℃的温度循环,通过控制升温、降温速度和恒温时间模拟冬季低温启动、夏季高温运行、工作状况转换时的温度改变;震动测试通过电磁振动台施加频率范围 5-2000Hz、加速度 0.5-40g 的正弦和随机震动负荷,模拟发动机运行和车辆行驶过程中的震动冲击。

3.5 智能测试, 多传感器数据融合的实时诊断系统

以往 EGR 阀检测大多用单个传感器收集数据,存在检测准确度不高、抗干扰能力欠佳、故障识别迟缓等状况,很难满足智能化生产和维护的需要。运用多传感器数据整合的

实时诊断系统,借助集成位移、压力、温度、振动等不同种类的传感器,同时收集阀体运行时的多方面数据,再结合数据预先处理、特征提炼与整合算法,能够对性能参数进行精确监测,并实现故障的早期诊断。

某汽车零部件企业自主研发的新型智能废气再循环阀搭建的测试系统,运用多传感器数据整合系统来完成批量生产中的实时诊断。该系统集成了激光位移传感器、压力传感器、温度传感器和振动传感器,分别收集门位移、腔体压力、阀体表面温度和振动信号,传感器的采样频率都设定为 10 千赫兹,通过工业以太网来实现数据的同步传输。在数据预先处理阶段,运用小波分析算法来去除噪声干扰;在特征提炼阶段,提取位移偏差、压力波动范围、温度变化程度和振动频率等关键特征量;运用加权平均整合算法对多源特征数据进行整合,从而构建性能评估模型。

4 结语

本文所构建的经具体实例验证具有实际操作可行性和可靠性的 EGR 阀性能检测理论框架及五项工程检测策略,在有效填补现有检测方法不足的同时为阀体性能优化和质量把控提供全面技术支持,后续工作中可结合智能化技术进一步提升检测准确度,以助力内燃机行业落实更严格的排放和能效标准。

参考文献

- [1] 陆玲亚,王吉华,薛芹余,等.热端废气再循环阀的设计及试验研究[C]//内燃机科技(企业篇)——中国内燃机学会第六届青年学术年会论文集.中国内燃机学会,2015.
- [2] 邓彪.废气再循环单向阀对燃气发动机性能的影响[J].柴油机设计与制造,2023,29(3):25-30.
- [3] 李鲲.发动机废气再循环阀流场特性与多场协同机理研究[D].湖南大学[2026-01-22].

Research on the Combination of Ecological Protection and Landscape Construction in Urban Waterfront Municipal Gardens

Yongchao Shi¹ Yan Liu²

1. Unit: Shandong Zhuji Municipal Engineering Co., Ltd., Weihai, Shandong, 264400, China

2. Weihai Zhentai Municipal Engineering Co., Ltd., Weihai, Shandong, 264400, China

Abstract

Against the backdrop of accelerating urbanization and ongoing climate change risks, urban waterfront spaces, as an important component of urban ecosystems, undertake multiple functions such as flood control and storage, ecological restoration, landscape creation, and public activity carrying. Traditional waterfront municipal garden construction often focuses on landscape image shaping or single project protection, neglecting the stability of ecosystem structure and the overall coordination of landscape space, resulting in the weakening of ecological service functions and the coexistence of landscape homogenization problems. Research has shown that only under the premise of stable ecological protection structures, can the synergistic improvement of ecological security, landscape quality, and social functions of waterfront spaces be achieved through layered spatial organization and low impact development (LID) embedding, providing theoretical basis and technical support for the high-quality construction of urban waterfront municipal gardens.

Keywords

waterfront municipal gardens; ecological protection; landscape construction; sponge city; ecological restoration; resilient city

城市滨水市政园林的生态防护与景观营造结合研究

时永超¹ 刘岩²

1. 单位山东铸基市政工程有限公司, 中国·山东 威海 264400

2. 威海市振泰市政工程有限公司, 中国·山东 威海 264400

摘要

在城市化进程不断加快与气候变化风险持续叠加的背景下, 城市滨水空间作为城市生态系统的重要组成部分, 承担着防洪调蓄、生态修复、景观营造与公共活动承载等多重功能。传统滨水市政园林建设往往偏重景观形象塑造或单一工程防护, 忽视生态系统结构稳定性与景观空间整体协调性, 导致生态服务功能弱化与景观同质化问题并存。研究表明, 只有在生态防护结构稳定的前提下, 通过分层空间组织与低影响开发技术 (Low Impact Development, LID) 嵌入, 才能实现滨水空间生态安全、景观品质与社会功能的协同提升, 为城市滨水市政园林高质量建设提供理论依据与技术支持。

关键词

滨水市政园林; 生态防护; 景观营造; 海绵城市; 生态修复; 韧性城市

1 引言

在城市化快速推进与生态环境压力持续加剧的背景下, 城市滨水空间逐渐成为生态安全与公共生活交汇的重要区域。滨水市政园林不仅承担防洪排涝、水质净化与岸线稳定等生态防护功能, 同时也是提升城市形象与改善人居环境的重要载体。然而, 传统建设模式中生态防护与景观营造往往相互割裂, 导致空间功能单一与生态效益不足。如何在保障水环境安全的前提下, 实现景观品质与生态系统稳定性的协同提升, 成为当前滨水园林建设亟需解决的关键问题。

【作者简介】时永超 (1983-), 女, 中国山东威海, 本科, 工程师, 从事市政或园林研究。

2 城市滨水市政园林生态防护与景观营造的理论基础

2.1 滨水生态安全格局与系统耦合机理

城市滨水区域通常位于河流、湖泊或人工水系沿岸, 是城市生态系统与人工建成环境交界的过渡地带, 其生态安全格局直接影响城市整体生态稳定性。根据景观生态学的“斑块—廊道—基质”结构理论, 滨水带不仅是生态廊道的重要组成部分, 同时也是水陆交互作用最为频繁的生态敏感区。在自然条件下, 滨水生态系统具有较强的自我调节能力, 通过植被群落演替与水体动力循环实现能量与物质交换。然而, 在高强度城市建设背景下, 硬质护岸与高密度开发削弱了自然缓冲功能, 导致水体自净能力下降、生物多样性退化

以及洪涝风险加剧。生态防护体系的构建本质上是通过恢复或重建生态基底结构，增强滨水带对水动力冲刷、污染扩散及极端气候冲击的抵御能力。在此过程中，生态护岸、湿地缓冲带与雨洪调蓄设施形成多层次防护结构，其稳定性可通过植被覆盖率、土壤渗透系数与水体交换率等指标进行综合评估。只有当生态防护结构形成完整的空间连续性，景观营造才具有可持续发展的基础。

2.2 景观营造的生态表达与空间重构逻辑

景观营造并非单纯的视觉形象塑造，而是以生态功能为支撑的空间组织过程。滨水景观空间的构建应遵循“生态优先、功能复合、文化表达”的基本原则，通过对水岸线形态、植被层次与活动空间的合理布局，实现生态系统稳定性与公共空间品质的双重提升。在设计实践中，水岸缓坡化处理、自然式种植群落构建以及分区式功能组织成为提升空间生态价值的重要手段。在空间结构层面，滨水园林通常呈现由水体向城市腹地逐渐过渡的梯度结构，可划分为水域核心区、生态缓冲带与活动开放区三个层级。通过控制不同区域的硬质铺装比例与植被密度，可形成具有渗透性与连续性的生态景观系统。该空间组织模式既满足城市防洪与水质保护需求，又为市民提供多样化的休闲与文化体验空间，实现生态防护与景观营造的结构性融合。

3 城市滨水市政园林生态防护体系构建路径

3.1 多层级生态护岸结构优化

传统直立式混凝土护岸在提高河道行洪能力与结构稳定性方面具有一定工程优势，但其高硬化率与低渗透性特征削弱了水陆生态界面的物质交换功能，破坏了滨水带的自然缓冲体系，导致水体自净能力下降与岸线景观单一化问题突

出。在韧性城市建设与生态修复导向下，多层级生态护岸结构逐渐成为滨水市政园林生态防护体系的核心技术路径。其基本逻辑在于通过工程结构稳定层、生态功能填充层与植物固坡覆盖层的复合构建，实现结构安全、生态恢复与景观表达的协同整合。

在结构层级上，基底稳固层通常采用级配碎石或透水混凝土构建承载骨架，承担主要抗滑与抗冲刷功能；生态填充层则引入种植土与透水介质，通过调节孔隙率与渗透系数增强水体与土体之间的交换效率；植被覆盖层通过构建乔、灌、草复合群落，实现根系加固与表层稳定的双重效果。在水动力冲刷作用下，边坡稳定性可通过抗剪强度模型进行分析，当植被根系加固效应提高等效黏聚力参数时，边坡安全系数显著提升。研究表明，在岸坡坡度控制在 1:2.5 以内、植被覆盖率达到 70% 以上条件下，冲刷破坏概率明显下降，同时岸线曲折度增加有助于降低流速集中效应。多层级护岸结构还强调生态缓冲带的连续性构建。通过设置水生植物带、挺水植物带与陆生灌草带形成梯度过渡结构，可提高生态系统的多样性指数，并增强污染物吸附能力。该结构不仅提升边坡稳定性，还通过群落演替形成动态稳定系统，从而实现长期生态防护目标。为明确不同护岸结构形式在稳定性与生态功能方面的差异，可结合工程实践进行综合对比分析，如表 1 所示。

由表中数据可见，缓坡式与湿地型生态护岸在生态功能与景观协调性方面具有显著优势，尤其适用于以公共活动与景观体验为主的城市滨水园林区域。在设计实施过程中，应结合河道水文特征与用地功能分区进行差异化配置，形成结构安全与生态景观并重的多层级防护体系。

表 1 不同护岸结构形式性能对比分析

护岸类型	结构稳定性	渗透性能	生物多样性支持度	景观协调性	适用场景
直立式混凝土护岸	高	低	低	较差	高强度行洪区
生态袋护岸	较高	较高	中等	良好	中等流速河段
缓坡式生态护岸	高	高	高	优良	城市景观型滨水区
复合湿地型护岸	中等	高	高	优良	生态修复区

3.2 雨洪调蓄与海绵设施嵌入

在气候变化背景下，极端降雨事件频发使城市滨水空间面临更为复杂的水文风险。传统排水模式以快速汇流与集中排放为主要目标，易导致下游水位骤升与内涝问题。基于海绵城市理念，滨水市政园林逐渐成为雨洪调蓄与径流削减的重要空间载体，其核心在于通过“渗、滞、蓄、净、用、排”多环节协同，实现源头减排与过程调控 [1]。

在空间构成层面，下凹式绿地通过降低地表标高形成自然汇水单元，有效延缓径流峰值出现时间；雨水花园利用多层滤料与植物群落对径流进行物理过滤与生物吸附；人工湿地则通过微生物分解与植物吸收降低水体氮磷含量。生态调蓄设施通常依据年径流总量控制率进行设计，当控制率维

持在 70%—85% 区间时，可有效应对重现期为 1—3 年的降雨事件，并削减径流峰值 30% 以上。为验证调蓄系统的综合效能，可通过暴雨情景模拟与水动力模型分析不同设施组合方式对径流削减率的影响 [2-3]。实践表明，当下凹绿地面积占绿地总面积的 20% 以上，且透水铺装比例控制在 40% 以内时，径流削减效果显著提高。同时，在滨水空间布局中，应将调蓄设施与景观节点、休闲广场及步行系统有机结合，使工程设施转化为可参与、可观赏的景观单元。例如，将雨水花园设计为花境景观带，将人工湿地与生态科普展示结合，可增强公共教育功能。

在综合技术路径上，滨水市政园林雨洪调蓄体系应与生态护岸形成联动机制。当暴雨来临时，上游下凹绿地与湿

地系统优先滞蓄径流,减缓流量冲击;当水位上升时,缓坡护岸与植被缓冲带发挥削能与稳坡作用,从而形成完整的生态防护闭环。通过这种结构协同方式,滨水园林既承担城市雨洪调节功能,又维持景观品质与生态连续性,实现防洪安全、环境改善与空间美学的综合统一。

4 景观营造与生态防护的协同机制构建

4.1 生态功能导向的滨水空间形态优化机制

在城市滨水市政园林建设中,生态防护体系的构建为景观营造提供了结构基础,但若缺乏空间形态层面的系统整合,生态设施往往难以充分发挥环境与社会双重价值。因此,在生态护岸与雨洪调蓄系统形成基本安全格局之后,应进一步从空间结构优化与形态重构层面推动生态防护与景观营造的协同融合。

滨水空间的形态优化首先体现在岸线结构的生态化调整。传统直线型岸线虽有利于施工与管理,但削弱了生态边界效应与水体滞留能力[4-5]。通过引入自然弯曲岸线与多级缓坡过渡结构,可延长水陆接触界面,提高生态栖息空间的多样性。研究表明,当岸线曲折度指数提高至1.2以上时,水体流速分布趋于均衡,局部冲刷强度明显下降,同时滨水植物群落的物种丰富度呈现上升趋势。该形态优化策略不仅提升了生态系统稳定性,也为景观空间创造出更具层次感与变化性的视觉效果。

其次,滨水空间应形成由水域核心向城市腹地逐级递进的生态梯度结构。水域核心区以水生与挺水植物群落为主体,强化水体净化与岸线稳定功能;生态缓冲区通过乔灌草复合种植构建生态屏障,承担污染削减与径流调节任务;活动开放区则在保持一定绿量与透水率前提下,设置步道、平台与休闲设施,实现公共服务功能。通过对不同功能区的铺装比例、植被覆盖率与地形起伏进行定量控制,可建立兼具防护能力与空间品质的滨水景观体系。

在植物配置层面,应优先选择耐水淹、抗冲刷、根系发达的乡土树种与湿地植物,以增强生态稳定性。同时通过季相变化设计与景观色彩组织,使生态防护结构具有持续性的景观表达能力。乔木层形成遮荫与视觉骨架,灌木层增强空间围合感,地被与水生植物承担固坡与净化功能。多层次群落结构既提升生态系统抗扰动力,也增强景观空间的纵深感与识别性,实现生态结构与视觉结构的统一。

4.2 公共活动系统与生态缓冲结构的复合整合路径

滨水市政园林不仅承担生态防护与水环境调节功能,还应满足城市居民多样化的休闲与文化需求。因此,在生态安全格局形成的基础上,应构建兼顾公共活动与生态保护的复合体系,实现社会功能与生态功能的平衡协调。

首先,应建立分级管控的空间组织结构。核心生态保

护区保持低干预状态,限制高强度活动;过渡控制区设置生态步道与观景节点,通过架空栈道或透水铺装降低对地表的扰动;开放活动区承担集散与休闲功能,但其硬质铺装比例应控制在合理范围内,以维持整体渗透性。通过人流强度与生态敏感度叠加分析,可优化空间布局,避免高频活动对生态缓冲带造成破坏。

其次,在公共活动设施设计中,应将生态构造元素转化为景观体验资源。例如,将雨水花园设计为可参与式科普空间,通过展示水循环过程增强公众环保意识;将人工湿地与滨水步道结合,形成可近距离观察生态系统运行的体验场景;利用地形高差与植被屏障构建视线引导系统,使生态防护结构成为景观空间的有机组成部分,而非孤立的工程设施。

在材料与结构选择方面,应优先采用透水混凝土、生态砖与木质结构等低影响材料,以减少对地表径流与热环境的负面影响。通过降低地表不透水率与增强绿地连续性,可提升区域微气候调节能力。监测数据显示,当滨水绿地连续度提高15%以上时,夏季地表温度平均降低约2—3℃,生态舒适度显著改善。这种微气候优化效应进一步增强了公共空间的吸引力。景观营造与生态防护的协同机制应建立在空间结构优化、功能分区管控与动态管理基础之上。通过形态重构、群落配置与公共活动系统整合,滨水市政园林能够在保障生态安全的同时提升景观品质与社会价值,实现从“工程防护”向“生态—景观复合系统”的转型升级。

5 结语

城市滨水市政园林的生态防护与景观营造并非两个独立系统,而是相互依存、相互促进的复合体系。通过重构生态基底结构、优化护岸与雨洪设施、整合空间形态与公共功能,可实现生态安全与景观品质的协同提升。未来滨水园林建设应在韧性城市理念引导下,强化生态系统稳定性与多功能复合利用能力,推动城市滨水空间向生态化、景观化与可持续化方向发展。

参考文献

- [1] 林长辉. 风险评估下的园林空间施工图安全防护设计策略[J]. 福建建材, 2026, (01): 111-114.
- [2] 康斌. 园林树木冻害防护技术措施[J]. 新疆林业, 2025, (03): 34-35.
- [3] 吴昊, 张培, 唐金晶, 等. 园林绿化废弃物在城市绿地裸露坡面生态防护中的应用——以西山国家森林公园裸露坡面生态防护示范项目为例[J]. 中国水土保持, 2024, (08): 64-68.
- [4] 邱鹏. 新型环保防护液在园林树木防护中的应用[J]. 现代农业研究, 2023, 29(04): 90-93.
- [5] 冯记锋. 浅析园林树木在园林建设中的作用[J]. 农家参谋, 2020, (18): 92+94.

Research on the Localization and Diversity Design of Plant Configuration in Municipal Gardens

Yongsen Liu

Weihai Dingchen Construction Engineering Co., Ltd., Weihai, Shandong, 264400, China

Abstract

Against the backdrop of the continuous deepening of urban ecological civilization construction and the continuous promotion of refined governance of national land space, the configuration of municipal garden plants has gradually shifted from simple landscape beautification to a development stage of ecological restoration, environmental regulation, and cultural expression with multiple functions coordinated. Localization and diversity design have become important paths to enhance the ecological stability and landscape quality of urban green space systems. This study suggests that by strengthening the priority strategy for local plants, optimizing the community structure hierarchy, constructing a multi-scale habitat network, and introducing a diversity index evaluation system, the ecological resilience and long-term operational stability of municipal landscaping and green space systems can be effectively improved, which has important practical significance for promoting high-quality green development in cities.

Keywords

municipal landscaping; native plants; plant diversity; ecological landscape; optimization of community structure

市政园林植物配置的乡土化与多样性设计研究

刘永森

威海鼎辰建设工程有限公司, 中国·山东 威海 264400

摘要

在城市生态文明建设持续深化与国土空间精细化治理不断推进的背景下, 市政园林植物配置由单纯景观美化逐步转向生态修复、环境调节与文化表达多重功能协同的发展阶段。乡土化与多样性设计成为提升城市绿地系统生态稳定性与景观品质的重要路径。本研究认为, 通过强化乡土植物优先策略、优化群落结构层次、构建多尺度生境网络及引入多样性指数评价体系, 可有效提升市政园林绿地系统的生态韧性 with 长期运行稳定性, 对推动城市高质量绿色发展具有重要实践意义。

关键词

市政园林; 乡土植物; 植物多样性; 生态景观; 群落结构优化

1 引言

随着城市化进程的持续推进, 市政园林绿地系统在调节城市热环境、改善空气质量、缓解雨洪压力及提升居民生活品质方面发挥着基础性支撑作用。在“双碳”目标与生物多样性保护政策背景下, 植物配置理念由“景观导向”逐步向“生态导向”转型。乡土化与多样性设计不仅有助于降低养护成本、增强植物群落抗逆能力, 还能强化地域景观识别度与文化连续性。因此, 系统构建市政园林植物配置的乡土化与多样性设计理论体系, 具有明确的理论价值与现实意义。

2 多样性设计的结构构建与功能提升机制

2.1 植物多样性的生态学内涵与功能基础

植物多样性是衡量城市绿地生态系统稳定性与环境调

节能力的重要指标, 其理论内涵涵盖物种多样性、结构多样性与功能多样性三个层面。物种多样性体现为不同植物种类的数量与比例分布, 是群落复杂度的基础; 结构多样性强调垂直与水平空间层级的组织方式; 功能多样性则关注不同植物在碳汇、水文调节、固土保水及生境营造等方面的生态贡献差异。在市政园林系统中, 多样性并非单纯增加物种数量, 而是在生态功能互补与资源利用效率最大化前提下进行的系统优化过程。

从生态系统稳定理论出发, 多样性水平的提高能够增强系统内部的功能冗余度与替代能力。当某一物种因气候异常或病虫害影响而功能下降时, 其他具有相似生态功能的物种可通过“功能补偿机制”维持系统运行平衡。尤其在城市环境受人为干扰频繁的背景下, 高多样性群落更具抗冲击能力与恢复能力。在实际配置中, 应合理控制乔木、亚乔木、灌木及地被植物之间的比例关系, 形成常绿与落叶树种动态互补结构, 使群落在不同季节均保持生态功能的连续性[1]。

【作者简介】刘永森(1977-), 男, 中国山东威海人, 工程师, 从事市政或园林研究。

多样化群落结构在微气候调节方面具有显著优势。乔木层通过冠幅遮荫降低地表温度，灌木层与地被层通过蒸腾作用提升空气湿度，并在空间层面形成多尺度生态单元，提高单位面积绿地的综合生态效益。在城市热岛效应较为突出的区域，复层结构可使地表温度下降 2℃—4℃，显著改善局部环境舒适度。因此，多样性设计不仅具有审美价值，更是城市生态安全与可持续发展的技术基础。

2.2 多层级群落结构优化与空间复合设计

多样性设计的实现路径在于群落结构层级化构建与空间组织的系统整合。单一乔木行道树或草坪化绿地虽然在视觉秩序上较为统一，但在生态效能层面存在明显局限。缺乏垂直结构梯度的绿地系统难以形成稳定的生境环境，也无法充分发挥碳汇与水文调节功能。通过构建乔木层、灌木层与地被层复合叠加的空间结构，可提升资源利用效率与群落稳定度，使植物系统在垂直方向形成连续生态梯度 [2-3]。

乔木层作为生态骨架，承担遮荫降温与碳吸存功能；灌木层强化空间围合与生态过渡，同时为鸟类与小型动物提供栖息环境；地被植物通过覆盖地表减少水分蒸发与土壤侵

蚀，维持土壤理化性质稳定。复层群落结构在光照分配与养分循环方面更为合理，可显著提升单位绿地面积的生态承载能力。在功能分区层面，可结合不同场地条件构建林地型、草甸型与湿地型等生态单元，实现城市绿地由单一观赏空间向复合生态空间的转型。为进一步明确多样性结构在市政园林中的功能分工，可构建如下多层群落结构与生态功能对应关系表。

在宏观层面，多样性设计还需融入城市生态网络体系构建，通过公园绿地、道路绿廊及滨水绿带之间的连通性布局，形成连续绿色廊道，促进物种迁移与基因交流。通过多尺度空间整合，将局部植物群落多样性转化为整体生态系统稳定性的提升，实现结构优化与功能强化的协同推进。

综上所述，多样性设计在市政园林植物配置中既是一种空间组织策略，也是一种生态系统重构路径。通过科学的层级结构构建与功能分区协同配置，可显著提升城市绿地系统的综合生态效益与环境承载能力，为城市可持续发展提供坚实的生态支撑。

表 1 复层植物群落结构及其生态功能对应关系

层级类型	主要植物形态	结构特征	生态功能重点	空间作用
乔木层	高大乔木	冠幅大、根系深	碳汇吸收、遮荫降温、降低热岛效应	构建生态骨架
亚乔木层	中小型乔木	冠层过渡	光能调节、增强群落稳定性	空间层次过渡
灌木层	常绿或落叶灌木	中低层覆盖	提供栖息环境、阻隔噪声	增强围合与生态缓冲
地被层	草本及匍匐植物	贴地生长	保水固土、抑制杂草	稳定地表环境

3 市政园林植物配置中的现实问题与结构性偏差分析

3.1 外来物种依赖与生态适配性失衡

在快速城市化与景观工程化背景下，部分市政园林项目在植物选择阶段过度强调即时观赏效果与成景速度，倾向于引入生长整齐、规格统一且市场供应稳定的外来观赏树种。这类配置模式在短期内能够形成视觉秩序与形式感，但从长期运行视角分析，其生态适配性与系统稳定性往往存在明显不足。外来植物在气候适应性、水分利用效率及土壤适配方面通常缺乏长期演替基础，若遇到极端高温、寒潮或持续干旱等气候波动，易出现大面积生理失调与死亡现象，从而增加补植与维护成本。而外来物种在缺乏自然天敌或共生系统支撑的条件下，可能打破原有生物链结构，造成生态平衡扰动。部分地区曾出现外来植物单一化种植后病虫害集中爆发的现象，其根源在于群落结构过度简化与生态冗余度不足。当某一主栽树种受害时，缺乏功能替代物种进行生态补偿，系统恢复能力较弱 [4-5]。由此可见，过度依赖外来植物不仅削弱绿地系统的抗风险能力，也在一定程度上背离了城市生态安全建设的基本目标。

3.2 群落结构单一与空间层次缺失

在实际市政道路与广场绿化中，常见配置模式以单排行道乔木配合大面积草坪为主，灌木与地被植物比例偏低，复层结构构建不足。这种平面化绿化方式虽然便于管理与视线组织，但在生态功能层面表现出明显局限。单层乔木结构无法充分利用垂直空间资源，光照分布不均导致下层空间利用率低，生态效益发挥受限。群落结构单一还容易造成城市景观的同质化趋势。不同区域之间采用相似的植物组合与种植模式，使城市空间缺乏差异化表达与地域识别度。在文化表达层面，这种模板化设计削弱了植物景观与地方生态背景之间的联系，使园林空间成为“可复制景观”，而非具有独特环境语境的生态场所。长期来看，结构单一的绿地系统在面对气候变化与环境压力时，其生态调节能力与恢复能力均呈现下降趋势，难以支撑城市可持续发展需求。

3.3 设计—养护脱节与运行机制缺陷

市政园林植物配置过程中，设计阶段与后期养护管理之间缺乏系统衔接，是影响生态效益持续发挥的重要因素。部分项目在前期设计中追求景观形式创新，却未充分考虑植物生长周期、养护频率及运营成本，导致后期管理压力增大。高修剪频率树种与高耗水植物比例过高，会增加人力与资源

投入,降低绿地系统的经济效率。植物配置决策缺乏数据支撑与动态监测机制,也使问题难以及时发现与调整。缺少针对物种成活率、群落结构演变及病虫害发生率的长期跟踪分析,使植物群落演替方向难以科学把控。在此背景下,植物配置往往停留在静态设计层面,而未形成动态优化机制。

4 乡土化与多样性协同的设计路径与技术体系构建

4.1 基于生态适宜性评价的乡土植物优选机制

在市政园林植物配置实践中,实现乡土化与多样性协同发展的首要前提,是建立科学的植物优选与适宜性评价体系。传统经验式选种方式难以全面反映物种在复杂城市环境中的生态响应特征,亟需引入多指标综合评价模型,对植物生态适配度进行量化分析。评价指标体系可围绕气候适应性、土壤耐受性、水分需求强度、抗污染能力及病虫害抗性等方面构建,通过分级赋权方法形成综合适宜性指数。

在技术实施层面,应结合区域气候分区与土壤类型数据库,建立本地乡土植物资源清单,并根据不同功能空间属性进行分区配置。例如,在滨水绿地系统中优先选择耐湿型乡土乔灌木;在道路绿化带中选用耐修剪、抗污染能力强的树种;在生态保育区域则优先恢复原生群落结构。通过生态适宜性评价与分区配置策略的结合,可以在保障植物成活率与群落稳定性的基础上,拓展物种组合的多样性空间,实现乡土化原则与多样化结构的技术融合。

4.2 复层群落构建与功能分区协同设计

乡土化与多样性设计的协同路径,核心在于构建复层群落结构与功能分区的有机衔接。在空间结构层面,应以乔木层为骨架,结合亚乔木与灌木层形成过渡空间,再以地被植物覆盖基底层,构建稳定的垂直生态结构。不同层级植物在光照需求、根系深度与生长节律方面存在差异,通过合理配置可实现资源利用效率最大化。在功能分区设计中,应结合场地环境或使用需求,形成生态保育区、景观展示区与休闲活动区等多类型空间单元。在生态保育区内,可提高乡土物种比例,强调群落自然演替过程;在景观展示区,则在乡土植物基础上适度引入色叶或花灌木,增强季相变化效果;在休闲活动区,应兼顾遮荫与安全性要求,构建开敞而具有层次感的植物空间。通过功能分区差异化配置,实现植物多样性结构在不同空间尺度上的合理展开,使绿地系统既具生

态稳定性,又具景观表现力。

4.3 动态监测与数字化管理支撑体系

在现代城市治理框架下,植物配置不应停留于静态设计阶段,而应通过动态监测与数字化管理手段实现全过程优化。通过建立植物生长数据库,对成活率、长势指标与病虫害发生频率进行持续跟踪,可及时调整种植密度与结构比例,防止群落退化。在技术路径上,可结合地理信息系统与遥感监测技术,对城市绿地覆盖率与群落结构变化进行空间分析,实现多尺度数据整合。通过构建数字化管理平台,将植物配置方案、养护记录与环境监测数据进行关联分析,有助于提升决策科学性与管理效率。同时,基于数据反馈优化植物多样性结构,可形成“设计—实施—监测—调整”的闭环管理机制,使乡土化与多样性设计理念在长期运行中持续深化。乡土化与多样性协同设计并非单一技术措施,而是涵盖物种筛选、结构构建与运行管理在内的系统工程。通过科学评价体系支撑、复层群落结构优化与数字化管理融合,可以构建稳定、高效且具有地域特征的市政园林植物配置模式,为城市生态系统安全与景观品质提升提供持续动力。

5 结语

市政园林植物配置的乡土化与多样性设计,是城市生态文明建设的重要技术路径。通过强化乡土植物优先原则、构建多层次群落结构、建立多样性评价体系及推动生态修复协同机制,可有效提升城市绿地系统的生态韧性与景观品质。未来,应进一步结合数字化监测与智能养护技术,实现植物配置全过程动态管理,从而推动市政园林建设向科学化、精细化与可持续方向发展。

参考文献

- [1] 程义策. 数字化技术在绿色市政园林设计中的应用研究[J]. 新城建科技, 2025, 34(02): 16-18.
- [2] 陈浩. 市政景观园林设计中的空间艺术应用[J]. 中国林业产业, 2024, (11): 118-119.
- [3] 徐开诚. 探讨城市规划中的市政园林设计[J]. 新城建科技, 2024, 33(05): 34-36.
- [4] 郑源泓, 黄海珠. 基于生态规划理念的市政园林景观设计[J]. 城市建筑空间, 2022, 29(S2): 47-50.
- [5] 姬向华, 董云欣, 吴育强. 城市规划设计与市政工程建设[M]. 辽宁科学技术出版社: 2022 10: 126.

Research on the Wear Mechanism and Wear-resistant Transformation of Conveying Equipment in Mine Filling System

Lei Li

Jinchengxin Mine Engineering Design Institute Co., Ltd., Beijing, 100070, China

Abstract

With the expansion of mineral resource extraction to deeper layers and more complex geological conditions, the filling technology, due to its advantages in controlling surface subsidence and improving resource recovery rate, has become a key process in the industry. However, the conveying equipment (such as pumps, pipelines, and mixing devices) in the filling system are in prolonged contact with high-concentration and high-hardness slurries. Under the combined effects of multiple factors such as abrasion wear, erosion wear, corrosion wear, and cavitation wear, the service life of the equipment is significantly shortened, leading to frequent shutdowns for maintenance, a sharp increase in production costs, and even triggering safety accidents. Therefore, revealing the wear mechanism of conveying equipment under multiple conditions and developing adaptable wear-resistant modification technologies are of great significance for improving the stability of the filling system and promoting green and efficient mining in mines. This paper first analyzes the wear mechanism of conveying equipment in the mining filling system from multiple perspectives, then elaborates on the wear-resistant materials and surface treatment technologies of the conveying equipment, and finally proposes the structural optimization and wear-resistant design of the conveying equipment, with the aim of providing useful references and inspirations for related research.

Keywords

mining filling system; conveying equipment; equipment wear mechanism; wear-resistant modification

矿山充填系统输送设备磨损机理及耐磨改造研究

李磊

金诚信矿山工程设计院有限公司, 中国·北京 100070

摘要

随着矿产资源开采向深部、复杂地质条件延伸, 矿山充填技术因控制地表沉降、提高资源回收率等优势成为行业关键工艺。然而, 充填系统中输送设备(如泵、管道、搅拌装置)长期接触高浓度、高硬度矿浆, 在磨蚀磨损、冲蚀磨损、腐蚀磨损及气蚀磨损等多因素耦合作用下, 设备寿命显著缩短, 导致频繁停机维修、生产成本激增, 甚至引发安全事故。因此, 揭示多工况下输送设备磨损机理, 开发适配性强的耐磨改造技术, 对提升充填系统稳定性、推动矿山绿色高效开采具有重要意义。本文先是从多角度具体分析了矿山充填系统输送设备磨损机理, 随后具体阐述了输送设备耐磨材料与表面处理技术, 最后具体提出了输送设备结构优化与耐磨改造设计, 以期对相关研究提供有益参考与借鉴。

关键词

矿山充填系统; 输送设备; 设备磨损机理; 耐磨改造

1 引言

金属矿高浓度充填能有效消除尾矿库和采空区危害^[1], 矿山充填技术是深部开采与绿色矿山建设的核心工艺, 其效率直接取决于充填系统的可靠性, 充填系统设备及管道磨损问题成为制约充填效率的关键因素之一。当前充填系统多采用活塞泵作为核心输送设备, 该设备凭借容积式工作原理, 能有效适配高浓度、高粘度充填料浆的输送需求, 通过活塞往复运动形成负压吸入料浆并加压排出, 具有压力稳定、输

送距离远、对料浆颗粒粒径适应性强等优势, 广泛应用于矿山高倍线充填场景。但活塞泵在长期运行中, 缸套、活塞环等关键部件易受矿浆中硬质颗粒的切削与研磨, 密封件在高压工况下易老化失效, 且维修拆装复杂, 停机时间较长。

除活塞泵外, 离心泵作为传统通用型输送设备, 在中低浓度(固相含量 40%~60%)、短距离充填系统中仍有较多应用。其通过叶轮高速旋转产生离心力驱动料浆流动, 具有结构简单、运行平稳、维护便捷等特点, 但在高浓度、高硬度料浆工况下, 磨损问题更为突出。然而, 充填系统中输送设备(包括活塞泵、离心泵、管道、搅拌装置等)长期接触高浓度、高硬度矿浆, 传统耐磨方案(如单一材料升级或局部涂层修复)存在成本高、适配性差等问题, 难以满足复

【作者简介】李磊(1987-), 男, 中国山东威海人, 本科, 工程师, 从事矿山机械研究。

杂工况需求。因此,本文从磨损机理出发,结合材料改性、表面处理与结构优化,提出系统性耐磨改造方案,旨在为矿山充填系统提供经济、可持续的技术支撑。

2 矿山充填系统输送设备磨损机理分析

2.1 输送设备类型与工况特点

矿山充填系统的核心输送设备涵盖充填泵(活塞泵、离心泵等)、输送管道、搅拌装置及阀门等,其工况特点直接影响磨损机制与严重程度。活塞泵作为主流输送设备,缸套内壁与活塞环的滑动接触面易受矿浆颗粒嵌入与切削,尤其是固相浓度超70%时,活塞环磨损速率显著加快,使用寿命仅为中低浓度工况的1/3~1/2;吸入阀与排出阀的阀座密封面在高压料浆冲击下,易因颗粒挤压产生划痕,导致泄漏率上升,当密封面磨损量超0.5mm时,需强制更换密封组件。

离心泵作为动力源,需承受高浓度(60%~75%固相)、高粘度料浆的循环冲击,叶轮与泵壳内壁易因颗粒切削与涡流冲蚀磨损,如离心泵叶轮出口处因流速梯度大,磨损速率可达入口处的3~5倍;输送管道长期输送高速(2~5 m/s)料浆,内壁受硬质颗粒连续刮擦,弯头、三通等局部区域因流态突变磨损加剧,统计显示弯头处磨损量是直管段的8~10倍;搅拌装置的桨叶旋转时与高硬度颗粒碰撞,叶尖线速度超5 m/s时磨损速率显著提升,且易因局部应力集中出现疲劳裂纹;阀门则通过调节流量控制料浆流动,阀芯与阀座密封面在高压(1~16 MPa)下受颗粒冲击,易引发密封失效与泄漏。

2.2 磨损类型与影响因素

矿山充填输送设备及管道的磨损形式复杂多样,主要有四类:

磨蚀磨损。磨蚀磨损是硬质颗粒在充填料浆携带下划擦设备表面,造成划痕与切削,主要通过表面摩擦造成的材料损失,磨损量与颗粒硬度、浓度及流速正相关,如石英颗粒对碳钢磨损速率是石灰石颗粒的3倍。

冲蚀磨损。冲蚀磨损是靶材表面在颗粒反复撞击下材料的渐进损耗、断裂和位移过程^[2],是高速料浆中颗粒以一定角度冲击设备表面,引发微观塑性变形与材料剥落,一般情况下,冲蚀角15°~30°时磨损率最高,常见于管道弯头外侧、泵体出口及垂直管道料浆-空气交界面;在充填管道系统中还存在一种特殊的冲蚀磨损——空化冲蚀,即在垂直管道的不满管段,充填料浆在自由下落过程中,不连续段形成真空负压,真空压力小于饱和蒸汽压时,形成气泡,待气泡运动至料浆-空气交界面处发生溃灭,料浆内部气泡溃灭造成微射流作用^[3],产生局部高压,造成冲蚀磨损。

腐蚀磨损。腐蚀磨损是料浆化学成分与设备材料发生电化学反应,形成腐蚀产物后被流体冲刷剥离。充填料浆对管道也存在腐蚀作用^[4],且在腐蚀-冲蚀、腐蚀-磨蚀协同作用下,总磨损量比任何基本磨损形式都要严重^[5]。

气蚀磨损。气蚀磨损主要发生在离心泵中,比如渣浆

泵吸入口局部压力低于饱和蒸汽压力时,形成真空负压,导致液体汽化形成气泡,气泡运动至高压区时发生溃灭,溃灭后产生微射流冲击叶片表面,引发点蚀与蜂窝状损伤。

此外,除上述四种主要磨损外,设备及管道磨损的主要形式往往是多因素协同磨损类型,如腐蚀-冲蚀磨损、腐蚀-磨蚀磨损等。

设备及管道磨损影响因素可归纳为三类:

料浆及颗粒性质。料浆pH值影响腐蚀速率,固相含量超65%时磨蚀磨损主导作用增强,硬质颗粒形状尖锐比球形磨蚀率高2~3倍。

材料性质。高硬度材料抗磨蚀磨损强但易脆裂,耐腐蚀材料可减缓腐蚀磨损但成本高,自润滑材料可降低磨损但耐温性差。

系统工况。流速超临界值后磨损速率指数增长,压力波动大易产生疲劳裂纹,频繁停机导致料浆沉淀结块,重启时加剧磨损。

3 输送设备耐磨材料与表面处理技术

3.1 耐磨材料选择原则

在矿山充填系统里,输送设备面临高浓度、高粘度料浆持续磨蚀冲蚀磨损及腐蚀磨损,耐磨材料的选择与应用至关重要。贝氏体钢管的耐磨性能是钢橡复合管道的4倍,陶瓷管道的2倍,传统X80管线钢的10倍^[6]。新型超耐磨复合管道(HDPE/Si-TPE)的耐磨性为超高分子量聚乙烯(UHMWPE)管道的2~3倍,为钢管的5倍以上^[7]。

耐磨材料选择时需综合考量多方面原则:工况适配性上,依料浆浓度及使用场景选用Q355低合金耐磨钢、Q235碳素钢或高分子复合材料;综合力学性能方面,材料要具备高硬度等特性,高冲击区选强韧性合金钢,高磨损区及充填钻孔选用马氏体、贝氏体钢或双金属复合材料;耐蚀性与耐磨蚀性上,岩盐类矿山充填系统需兼具高耐蚀性与耐磨蚀性,如不锈钢、镍基合金或陶瓷复合材料;经济性与可加工性上,满足性能前提下选成本低、易加工制造的材料。材料类型多样,高硬度材料中,高铬铸铁耐磨但抗冲击差、加工适配性差;陶瓷复合材料耐磨耐蚀但抗冲击弱、加工适配性弱。耐腐蚀材料里,不锈钢耐蚀但成本高、耐磨性差;镍基合金耐蚀与高温稳定性好但成本极高。自润滑材料中,高分子复合材料如聚氨酯自润滑与耐磨性良好,适合异形路线且初始成本低,但耐磨性相对差、易老化。

3.2 表面处理技术对比

在矿山充填系统设备修复中,多种表面处理技术各有优势。热喷涂技术在材料表面冲蚀防护方面应用广泛,其涂层主要以金属陶瓷和陶瓷材料为主,材料主要包含Ni、Fe、Cr、Co、Ti等及其合金,制备技术涉及等离子喷涂、电弧喷涂及火焰喷涂等^[8],借助高温热源将喷涂材料加热至熔融或半熔融状态后喷射到基体表面形成涂层,对基体材料、喷涂尺寸形状无限制,能赋予机械表面新性能,可用于

修复磨损的设备及管道。堆焊技术通过电弧或气体火焰熔化焊丝堆积在基体表面,焊层与基体结合强度高、耐磨性好,能现场修复。激光熔覆技术利用高能激光束熔化熔覆材料快速凝固形成致密熔覆层,熔覆层性能优异,热影响区小、修复精度高,可修复高精度泵体等。表面渗层技术通过化学或物理方法使元素渗入基体表面形成渗层,渗层与基体结合牢固,厚度可控、成本低,可用于处理输送管道等设备,像氮化、渗碳处理能分别提高钢铁材料表面硬度、韧性与耐磨性。

3.3 材料-工艺匹配性分析

在不同工况下,要依据输送设备的磨损机制、腐蚀环境、温度压力等条件,挑选适配的耐磨材料与表面处理技术,达成材料-工艺的优化组合。立式砂仓放砂过程中,可通过技术措施适当提高放砂浓度并保持稳定。对于高流速管道,因料浆磨蚀冲蚀磨损严重,应选用高硬度、耐磨性佳的材料。强腐蚀环境中,输送设备易腐蚀磨损,要选耐蚀性好的材料,如不锈钢或镍基合金,再运用表面渗层技术,如氮化或渗碳处理提高表面耐蚀性,如岩盐矿山充填系统用不锈钢管道并氮化处理提高表面硬度与耐蚀性,降低腐蚀对磨损的加速作用。高冲击区域,输送设备承受强烈冲击载荷,应选强韧性好的材料,如合金钢或复合材料,再采用堆焊或激光熔覆技术形成高韧性修复层。

4 输送设备结构优化与耐磨改造设计

4.1 结构优化策略

输送设备结构优化策略包含多方面。流线型设计可减少涡流与冲击,以泵体流道优化为例,传统流道局部突兀转折易形成涡流,消耗能量、降低效率还加剧磨损,采用流线型设计让流道壁面光滑过渡,引导料浆平稳流动,如优化离心泵叶轮流道,能降低能量损失与磨损,提高泵性能和寿命。模块化设计将设备划为多个独立模块,故障或磨损时可快速更换受损模块,缩短停机时间、提高效率,还便于设备升级改造,降低升级成本。

4.2 耐磨改造方案设计

耐磨改造方案设计包含关键部件改造与整体系统协同优化。针对矿山充填系统设计中物料的合理配比、管道参数等难以确定的问题,对输送设备关键部件改造是提升整体耐磨性的关键,像泵壳内衬陶瓷,泵壳作为泵的重要部件,输送高硬度、高磨损性料浆时内壁易受冲蚀磨损,衬上氧化铝陶瓷、碳化硅陶瓷等,凭借其高硬度、耐磨和耐腐蚀性,可有效保护泵壳内壁、延长使用寿命。同时,输送设备与泵、管道、阀门等构成整体系统,耐磨改造需整体协同优化,实现泵-管-阀一体化耐磨设计,要根据物料性质和工艺要求合理选型,使部件性能匹配,还要考虑连接与密封,如输送高粘度料浆,选有良好自吸和耐磨性的泵、内壁光滑阻力小的管道及密封好的阀门,确保系统稳定运行与耐磨。

4.3 数值模拟与验证

数值模拟与验证在输送设备设计与改造中至关重要。

充填系统设计可借助计算流体动力学(CFD)模拟数值方法求解流体流动方程,能直观呈现料浆在输送设备内的流动速度、压力分布、湍流强度,以及其对设备壁面的冲刷与磨损状况。比如对泵体模拟,可针对不同流量和料浆性质,找出易产生涡流与磨损的部位,为结构优化和耐磨改造提供依据,还能对比不同设计方案,提升设计效率与准确性。有限元分析(FEA)则将连续结构离散为有限单元,求解节点位移和应力,分析整体应力与疲劳寿命。在设备设计改造时,它能确定不同工况下设备应力分布,找出应力集中处,评估结构强度与安全性。对关键部件分析,可模拟其承受载荷时的应力应变,判断是否会塑性变形或断裂,还能预测长期使用的疲劳损伤,为部件设计选材提供参考,保障设备在规定寿命内安全可靠运行。

5 结论与展望

综上所述,本文聚焦矿山充填系统输送设备磨损机理及耐磨改造展开研究。分析输送设备类型与工况后,明确了磨蚀磨损、冲蚀磨损等类型及料浆性质、设备材料等影响因素,并构建多因素耦合磨损模型。在耐磨材料与表面处理技术领域,阐述了材料选择原则,对比多种技术并分析材料-工艺匹配性。结构优化与耐磨改造设计方面,提出流线型、抗磨损等策略,设计关键部件改造与整体系统协同优化方案,数值模拟验证了其有效性。展望未来,需深入研究复杂工况下多因素耦合磨损动态演变以完善模型;开发新型耐磨材料提升性能、降低成本;借助智能化技术实时监测与预测磨损状态;加强工业试验积累数据,持续优化耐磨改造方案,推动矿山充填系统高效、可靠、绿色发展。

参考文献

- [1] 王小林,张润,邱征,等. 金属矿山高浓度充填管道磨损规律与防控技术[J]. 金属矿山, 2024, (06): 181-190. DOI:10.19614/j.cnki.jsks.202406025.
- [2] Javaheer V, Porter D, Kuokkala V T. Slurry erosion of steel-Review of tests, mechanisms and materials[J]. Wear, 2018, 408: 248-273.
- [3] 黄玉诚,段晓博,王瑜敏,等. 煤矸石胶结充填管路输送不满管流及其防治方法研究[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48 (09): 117-122. DOI:10.13199/j.cnki.cst.2020.09.014.
- [4] 王石,宋学朋,石海天. 基于云模型和改进CRITIC的深井垂直充填管道磨损风险评估[J]. 重庆大学学报, 2020, 43 (04): 73-84.
- [5] Calderon-Hernandez J W, Sinatora A, de Melo H G, et al. Hydraulic convey of iron ore slurry: Pipeline wear and ore particle degradation in function of pumping time[J]. Wear, 2020, 450: 203272.
- [6] 白秉哲,高古辉,刘文利. 浆体输送用贝氏体管道的磨损机制及耐磨性能研究[J]. 矿山机械, 2012, 40 (12): 101-103. DOI:10.16816/j.cnki.ksjx.2012.12.029.
- [7] 陆国强,冯金茂,张伟娇. 新型超耐磨HDPE/Si-TPE复合管道的制备及应用[J]. 新型建筑材料, 2015, 42 (05): 25-28.
- [8] 李力,魏天酬,刘明维,等. 冲蚀磨损机理及抗冲蚀涂层研究进展[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2019, 38 (08): 70-74+91.

Analysis of Common Methods of Mechanical Equipment Fault Diagnosis and Monitoring

Xiaodong Cai

Han Zheng Testing Technology Co., Ltd., Deyang, Sichuan, 618300, China

Abstract

As the backbone of industrial production, mechanical equipment's stable operation directly impacts production efficiency and operational safety. Fault diagnosis and monitoring technologies serve as critical safeguards for maintaining equipment stability throughout its lifecycle. This paper systematically examines common equipment failure types, their underlying mechanisms, and diagnostic monitoring workflows, with particular emphasis on five prevalent diagnostic approaches: signal processing, vibration analysis, oil analysis, temperature monitoring, and intelligent algorithms. Through in-depth comparative analysis of technical principles, tool characteristics, advantages/disadvantages, and application scenarios across different equipment types and operating conditions, the study establishes practical selection criteria. The research provides clear guidance for engineers to implement equipment condition monitoring, fault localization, and maintenance decision-making, facilitating the transition from reactive to predictive maintenance practices. This advancement significantly enhances industrial production stability and operational efficiency.

Keywords

mechanical equipment; fault diagnosis; condition monitoring; common methods

机械设备故障诊断与监测的常用方法分析

蔡小东

汉正检测技术有限公司，中国 · 四川 德阳 618300

摘要

机械设备是工业生产的核心支撑，其稳定运行直接关系到生产效率与运营安全，故障诊断与监测技术是保障设备全生命周期稳定的关键手段。本文梳理了机械设备的常见故障类型、产生机理及诊断监测流程，并重点剖析了基于信号处理、振动分析、油液分析、温度监测及智能算法的五类常用诊断方法。文章深入对比了各类方法的技术原理、工具特性、优劣势及适配场景，结合不同设备类型与运行工况，提炼出务实的方法选用原则。本文为工程技术人员开展设备状态监测、故障定位与运维决策提供了清晰指引，有助于推动设备运维从事后维修向预知性维护转型，提升工业生产的稳定性与高效性。

关键词

机械设备；故障诊断；状态监测；常用方法

1 引言

工业现代化进程中，机械设备的应用场景不断拓展，运行工况也愈发复杂，轻微故障若未及时监测识别，极易逐步恶化引发设备停机，增加运维成本甚至影响生产安全。故障诊断与监测技术的合理应用，能够提前捕捉设备运行异常信号，精准定位故障隐患并给出适配解决方案，目前各类诊断监测方法已广泛应用于各行业设备运维中，深入分析这些常用方法的应用逻辑与适配要点，对推动设备运维水平提升具有重要的现实意义。

【作者简介】蔡小东（1980-），男，中国四川人，本科，工程师，从事检测工程研究。

2 机械设备故障诊断与监测的核心基础

2.1 机械设备故障的常见类型及产生机理

机械设备在当下自动化、高频次的运行场景中，故障类型不再局限于传统的自然损耗，更多与工况适配不当、维护细节缺失相关，故障产生机理也呈现出关联性而非单一性。磨损类故障多因润滑维护不及时或润滑介质适配性不足导致，零部件相对运动时摩擦不断加剧，长期积累便会造成表面损耗；松动类故障多源于横向循环载荷的长期作用，螺纹连接接触面会产生微动滑移，随载荷循环次数增加逐步出现松动迹象；电气控制类故障则多与传感器老化或程序适配偏差有关，这些故障均能通过日常细致观察和基础检查提前发现，并非突发不可控。

2.2 故障诊断与监测的基本流程及核心要素

故障诊断与监测的基本流程贴合当下自动化设备运维

的实际场景，摒弃传统单一检测的繁琐模式，先对设备运行状态进行基础感知采集，再结合日常运维记录排查异常细节，最后结合基础检测结果梳理故障关联点。核心要素聚焦于状态感知的全面性、运维记录的完整性和异常排查的针对性，不同于传统流程只注重检测结果，当下流程更侧重各环节的衔接适配，避免因某一环节疏漏导致故障误判，日常运维中只需把控好这三个核心要素，就能让诊断监测流程更贴合实际需求，避免无用功。

3 机械设备故障诊断与监测的常用方法分类及分析

3.1 基于信号处理的故障诊断方法

基于信号处理的故障诊断方法已摆脱传统单一检测的局限，适配当下自动化设备多工况运行的现实需求，核心依托低成本 6 自由度惯性传感器采集设备振动信号，传感器采用磁吸式安装，可直接固定在设备关键旋转部位，无需额外打孔或固定件，摒弃传统短时傅里叶变换易出现频谱模糊的问题，采用复 Morlet 小波进行连续小波变换，能更精准捕捉信号中的时间与频率特征，避免故障特征混淆。传感器同步采集设备线性加速度与角加速度数据，传输至客户端后无需复杂处理，运维人员通过简单操作就能识别信号中的异常波动，排查设备潜在故障，这种技术优化既降低了操作门槛，又解决了传统方法误判率高的实际问题，适配日常运维的实际需求。

3.2 基于振动分析的故障诊断方法

IEPE 型三轴加速度传感器是当下工业现场振动诊断中最常用的设备，它内部集成了信号调理电路和恒流源设计，采用差分输出方式进一步提升抗电磁干扰能力，适配采煤机等恶劣工况下的振动数据采集，其频带覆盖 1Hz-10kHz、动态范围达 $\pm 50g$ 的特点，能精准捕捉设备运行时的微弱振动信号，避免因环境干扰导致的数据偏差。振动信号分析不再依赖传统人工频谱解读，而是结合简易数据处理技术，通过时域波形去趋势、频域 FFT 变换，将传感器采集的一维振动信号转换为可直观观察的频谱图，通过对比设备健康状态与异常状态下的频率特性，就能精准识别齿轮齿面磨损、轴承损坏等常见故障，这种方式无需复杂的专业操作，运维人员经过简单培训就能上手。实操中还会优化传感器的安装位置，通常将其固定在采煤机电机、摇臂等关键测点，搭配 32 通道振动分析控制器实现同步采样，采用触发式采集模式减少无效数据，既能保证采集数据的完整性，又能避免因测点不当导致的故障误判，解决了传统振动诊断中数据采集不准、故障识别滞后的实际问题，贴合当下工业设备运维的务实需求，也让振动分析方法在普通工业场景中得到更广泛的应用^[1]。

3.3 基于油液分析的故障诊断方法

便携式油液颗粒计数器是当下工业现场油液诊断的主

流设备，它采用光阻法技术搭配高精度激光传感器，无需复杂样品预处理，仅需 20ml 油样就能现场完成检测，其 316L 不锈钢管路设计能适配油田、高温车间等恶劣工况，可同步检测油液污染度、含水量、温度三项核心指标，捕捉最小 4 微米的颗粒杂质，解决了传统实验室检测耗时久、无法即时反馈的痛点。

傅里叶变换红外光谱仪可辅助完成油液劣化分析，通过检测油液中羧基等氧化产物的特征吸收峰，判断油液氧化程度和添加剂损耗情况，无需复杂的化学试剂，运维人员简单操作就能读取数据，适配空压机、发电机组等常见工业设备的油液监测，与便携式油液颗粒计数器配合使用，能实现油液状态的全面监测。

现场油样采集需遵循规范流程，通常从设备放油口抽取，避免混入外界粉尘和水分，采集后立即放入专用密封容器，搭配颗粒计数器和红外光谱仪的检测数据，可精准判断设备内部磨损类型，比如油样中出现暗红色铁基颗粒多为缸套磨损，金黄色铜基颗粒则提示轴承损坏，不用依赖专业化验人员，普通运维团队就能完成日常监测。

3.4 基于温度监测的故障诊断方法

红外测温仪凭借国产化核心芯片的突破已成为当下机械设备温度监测的主流工具，其无需停机拆解就能捕捉设备自然散发的红外辐射，精准识别轴承缺油干磨、电气接头松动等隐蔽性隐患带来的微小升温，这种非接触式监测方式适配大多数工业场景，尤其适合户外输电线路、矿山机械等不便人工巡检的设备。当下很多工厂已摒弃传统的人工触感测温方式，改用集成了简单 AI 算法的红外测温仪，它能自动捕捉温度异常并区分正常摩擦发热与危险过热，不用运维人员逐一排查，大大降低了人工成本和误判概率，具体不同场景下的适配型号及应用细节可参考表 1。

表 1 温度监测技术的典型应用场景与监测工具及要点对照

应用场景	适配监测工具	核心监测要点
汽车焊装车间机械臂	定制红外热像仪	监测机械臂末端温差波动，排查元器件过热
户外变电站输电线路	手持红外测温仪	检测线路连接点升温，排查接触不良隐患
小型车间电机	NTC 贴片温度传感器	实时监测电机绕组温度，捕捉微小温变

温度传感器作为红外测温仪的辅助工具，其选型直接影响监测精度，不同类型的传感器适配不同温度范围和设备场景，比如高温窑炉等极端环境适合用耐热性强的热电偶，而医药车间、小型电机等中低温场景则更适合精度高的 Pt100 铂电阻。很多运维人员在实际操作中会忽略传感器的安装位置，将其靠近设备发热源导致数据失真，这种问题在中小型工厂中尤为常见，其实只要按照设备说明书固定传感器位置，同时定期校准，就能有效提升温度监测的准确性，避免因数据偏差导致故障漏判或误判^[2]。

3.5 基于智能算法的故障诊断方法

智能诊断算法已逐步替代传统人工判断模式,在中小型工厂电机、机床等常用设备上落地,它依托无线温振传感器采集的振动、温度三维数据,通过时域波形降噪、特征频率提取等基础技术分析,无需运维人员丰富经验就能精准识别故障类型。很多工厂引入的轻量化智能算法无需搭建复杂云端系统,可直接在边缘端完成数据预处理与故障识别,适配老旧设备改造需求。无线温振传感器体积小,采用低功耗蓝牙传输,可直接粘贴在设备表面,高频采集运行参数并传输给算法,解决了人工巡检难以捕捉细微异常的问题,实际应用中定期检查传感器续航和信号稳定性,即可保障算法分析准确。

运维日志解析工具作为智能诊断算法的配套工具,采用结构化解析与异常特征标注技术,可将工厂分散的故障运维日志分类处理,梳理不同故障的参数变化规律,为算法迭代优化提供精准数据支撑。当下很多中小企业的算法失效问题,多因缺乏日志数据持续补充,导致算法无法适配设备迭代后的运行状态。智能诊断算法实际应用中简化运算逻辑,采用阈值触发与特征匹配结合的方式,针对轴承磨损、线路松动等常见故障捕捉参数异常,无需过度追求高精度而增加改造和运维成本。

4 常用故障诊断与监测方法的应用对比与适配场景

4.1 各类方法的优势与局限性对比

各类诊断监测方法的优势与局限性均与实操场景、设备类型深度绑定,基于信号处理的方法依托复 Morlet 小波变换技术,能精准捕捉设备早期微弱故障信号,适配低速、重载类旋转设备,但其对传感器安装位置要求较高,偏离关键部位就会导致信号衰减,且易受环境电磁干扰,日常运维中需频繁调整传感器位置、清理周边干扰源。基于振动分析的方法采用压电式传感器,安装便捷、成本适中,能精准定位异常振动的频率来源,适配机床、风机等常见设备,但其在设备运行噪音较大的场景中,振动信号易被干扰,无法精准区分正常振动与故障振动,需避开噪音干扰时段进行检测。

基于油液分析的方法通过光谱与铁谱联合检测,可实现非破坏性诊断,无需拆卸设备,适配大型压缩机、重型机床等难以频繁拆卸的设备,但其检测周期较长,无法实现实

时监测,且取样操作需严格遵循标准,操作不当易导致检测结果失真,不适用于需要快速预警的设备场景。基于温度监测的方法操作最简单、成本最低,可实现非接触测温,适配高温、高压等特殊工况,但其只能实现故障预警,无法精准定位故障部位,需结合其他方法进一步诊断。基于智能算法的方法效率高、可实现自动化诊断,适配多设备集中运维场景,但其对数据量要求较高,前期数据积累耗时,且易受数据噪声干扰,不适用于小型企业的简易运维场景^[3]。

4.2 不同机械设备的方法适配选择

机械设备的方法适配选择需结合自身运行特性与日常运维条件,机床、风机等旋转类设备以振动异常为主要故障表现,适配基于振动分析的方法,采用压电式传感器吸附在轴承座处,通过时域与频域联合分析捕捉异常振动频率,无需复杂操作就能精准定位齿轮、轴承等部件的故障隐患,适配中小型企业的运维能力。大型压缩机、重型机床等难以频繁拆卸的设备,优先选用基于油液分析的方法,遵循 GB/T 30582-2014 标准取样,通过火焰原子吸收光谱仪检测金属元素含量,实现非破坏性诊断,避免拆卸设备造成的生产停滞。电机、配电箱等电气类设备侧重温度与信号监测,采用红外测温仪与 6 自由度惯性传感器联合使用,既能监测电机绕组、接线端子的温度异常,又能通过复 Morlet 小波变换捕捉电气信号波动,适配电气设备的故障特点,普通运维人员经过简单培训就能完成适配操作。结语

机械设备故障诊断与监测方法的合理选用,是实现设备精准运维、降低故障损耗的核心路径,不同方法基于自身特性适配不同设备类型与运行工况,不存在绝对最优的单一方法,合理搭配使用才能充分发挥技术价值。本文对各类常用方法的分析的核心在于为实操应用提供指引,后续可结合更多行业实操案例,进一步优化方法适配策略,让诊断监测技术更好地适配各类机械设备的运行需求,为工业生产的稳定高效提供更坚实的保障。

参考文献

- [1] 张伟华,韩庆飞.浅谈机械设备故障诊断与监测的常用方法及其发展趋势[J].中国设备工程, 2021(9):2.
- [2] 刘姣艳.机械设备故障诊断与监测的常用方法及其发展趋势[J].消费电子, 2024(8):33-35.
- [3] 王楠.浅谈机械设备故障诊断与监测的常用方法及其发展趋势[J].中国设备工程, 2024(1):159-161.

Analysis of Influencing Factors on the Market Demand for Phosphogypsum in Yunnan Province Based on the Grey-DEMATEL Method

Qiong Tang

Qujing Normal University, Qujing, Yunnan, 655011, China

Abstract

As a region rich in phosphorus resources in China, Yunnan Province is affected by multiple factors in the supply and demand relationship of phosphogypsum. Studying the factors influencing its market demand is of great significance for promoting the resource utilization of phosphogypsum and promoting the development of green building materials. At present, there is relatively little research on the phosphogypsum market, and most of it is focused on the technical level, lacking a systematic analysis of market supply and demand. This article is based on the background of the phosphorus chemical industry in Yunnan Province. It uses literature analysis, questionnaire survey, and expert interview methods to analyze the key influencing factors of the demand side of the phosphorus building gypsum market from the perspective of demand. Based on the Grey DEMATEL method, it clarifies the current situation and development trend of the demand side of the phosphorus building gypsum market in Yunnan Province, proposes policy recommendations to promote the balance of supply and demand in the phosphorus building gypsum market, promote the resource utilization of phosphorus gypsum, reduce environmental pollution, promote resource conservation and environmental protection, promote the green development of the phosphorus building gypsum industry, and promote the development of circular economy.

Keywords

phosphogypsum; Influencing factors; Resource utilization; Supply side; Demand side; Grey DEMATEL method

基于 Grey-DEMATEL 方法的云南省磷建筑石膏市场需求影响因素分析

唐琼

曲靖师范学院, 中国·云南 曲靖 655011

摘要

云南省作为中国磷资源富集地区, 磷建筑石膏的供需关系受多重因素影响, 研究其市场需求影响因素对推动磷石膏资源化利用、促进绿色建材发展具有重要意义。目前针对磷建筑石膏市场的研究相对较少, 且多集中于技术层面, 缺乏对市场供需的系统分析。本文基于云南省磷化工产业背景, 运用文献分析法、问卷调查法以及专家访谈法从需求端的维度, 并基于 Grey-DEMATEL 法分析磷建筑石膏市场需求端的关键影响因素, 明确云南省磷建筑石膏市场需求端现状及发展趋势, 提出促进云南省磷建筑石膏市场供需平衡的政策建议, 推动磷石膏资源化利用, 减少带来环境污染, 促进资源的节约和环境的保护, 促进磷建筑石膏行业绿色发展, 推动循环经济发展。

关键词

磷石膏; 影响因素; 资源化利用; 供应端; 需求端; Grey-DEMATEL 法

1 引言

云南省作为中国磷矿资源富集区, 磷石膏的堆存与综

合利用问题日益突出。磷建筑石膏作为磷石膏资源化利用的重要方向, 其市场供需关系直接影响磷化工产业的可持续发展和区域环境治理成效。近年来, 在国家“双碳”目标和绿色建材政策的推动下, 磷石膏在建筑领域的应用逐步扩大, 但云南省磷建筑石膏市场仍面临供给过剩、技术不成熟、市场竞争力过于低、运输成本高、区域竞争激烈等挑战。本文将通过文献分析法、市场调研法以及专家访谈法对磷建筑石膏市场的需求端的影响因素进行分析、筛选、总结, 最后得出云南省磷建筑石膏市场需求端的主要端影响因素, 并根据分析出来的影响因素的影响程度对云南省磷建筑石膏市场

【基金项目】云南省教育厅科学研究项目名称“云南固废磷石膏在建材行业综合利用产业发展模式研究”(项目编号2024J0931)。

【作者简介】唐琼(1983-), 女, 中国广西桂林人, 硕士, 副教授, 从事新型建筑材料、工程项目管理、高等教育研究。

的发展提出对策建议。

2 Grey-DEMATEL 方法

Grey-DEMATEL 方法是一种结合灰色系统理论和 DEMATEL 方法的混合分析工具,主要用于处理不确定性环境下的复杂系统因素关系分析。它通过量化因素间的直接影响与间接影响,识别关键因素及其因果关系,适用于数据有限或信息不完全的场景。本文将使用此种方法对云南省磷石膏市场需求端的影响因素进行分析。

3 云南省磷建筑石膏制品的需求方影响因素识别

为确保选取的影响因素具有科学性、客观性、准确性,并使选取的影响因素能够精确的反映出磷建筑石膏市场目前存在的问题,本文将在遵循系统性原则、科学合理性原则、行业特征原则、代表性原则的基础上对磷建筑石膏市场需求方面进行影响因素的筛选^[1]。通过文献法来初步识别出磷建筑石膏市场需求端的影响因素。得到磷建筑石膏市场需求端影响因素有:大多数消费者离购买市场较远、房地产市场波动、运输成本导致的产品价格较高、基础设施建设投资、地区经济的增长、居民的消费观念发生变化、传统石膏及其他建筑材料的替代、目前磷石膏产品较少,影响了消费者购买时的局限性、替代产品价格与性能比较、绿色建筑政策的推动、建筑行业的标准与规范。

通过市场调研、专家访谈方法初步识别出 8 个影响磷建筑石膏市场需求端的影响因素,分别为:

(1) 房地产市场波动

房地产市场是磷建筑石膏需求的重要拉动力量。近年来,云南省房地产市场呈现出波动发展的态势。在房地产市场繁荣时期,新建住宅、商业地产等项目大量开工建设,磷建筑石膏的需求旺盛。例如,昆明、曲靖等城市的房地产市场发展较快,带动了当地磷建筑石膏市场的需求增长。但在房地产市场调控政策的影响下,市场需求出现波动。当房地产市场低迷时,新建项目减少,磷建筑石膏的需求量也随之下降,企业面临产品滞销的困境。

(2) 基础设施建设投资

基础设施建设投资的增加对磷建筑石膏市场需求起到积极的推动作用。云南省加大了对交通、水利、能源等基础设施建设的投入,如高速公路、铁路、桥梁、水库等项目的建设。这些项目在建设过程中需要大量的建筑材料,磷建筑石膏作为一种重要的建筑材料,其市场需求也相应增加。在一些大型基础设施建设项目中,磷建筑石膏被广泛应用于道路基层、桥梁附属设施等部位,为磷建筑石膏市场提供了新的发展机遇。

(3) 地区经济增长

地区经济增长与磷建筑石膏市场需求密切相关。随着云南省经济的快速发展,居民收入水平提高,消费能力增强,对住房和建筑装饰的需求也不断增加。经济增长带动了建筑

行业的繁荣,从而促进了磷建筑石膏的市场需求。在经济发达地区,如昆明、玉溪等地,建筑市场活跃,对磷建筑石膏的需求量较大。而在经济相对落后的地区,由于建筑活动相对较少,磷建筑石膏的市场需求也相对较低。

(4) 居民消费观念变化

居民消费观念的变化对磷建筑石膏市场需求产生了重要影响。随着人们环保意识和健康意识的提高,对绿色环保建筑材料的需求日益增加。磷建筑石膏作为一种绿色环保建筑材料,具有环保、节能、健康等优点,符合现代居民的消费需求。此外,消费者建筑装饰品质和个性化的要求也在不断提高,促使企业不断研发和生产高品质、多样化的磷建筑石膏产品,以满足市场需求。

(5) 传统石膏及其他建筑材料的替代

传统天然石膏和其他新型建筑材料对磷建筑石膏市场形成了一定的竞争压力。天然石膏在某些性能方面具有优势,如纯度较高、性能稳定等,部分高端建筑项目仍倾向于使用天然石膏。一些新型建筑材料,如加气混凝土砌块、轻质隔墙板等,也在建筑市场中占据一定份额。这些材料在价格、性能、施工工艺等方面与磷建筑石膏存在竞争关系。加气混凝土砌块具有重量轻、保温隔热性能好等特点,在一些对重量和保温要求较高的建筑项目中得到广泛应用,对磷建筑石膏的市场份额产生了一定的挤压。

(6) 替代产品价格与性能比较

在替代产品竞争中,价格和性能是影响消费者选择的关键因素。磷建筑石膏在价格方面具有一定优势,尤其是在原材料成本较低的情况下,其产品价格相对较低,能够满足一些对价格敏感的客户需求。但在性能方面,与部分替代产品相比仍存在一定差距。天然石膏在强度和稳定性方面表现较好,新型建筑材料在保温隔热、防火等性能方面可能更具优势。因此,磷建筑石膏生产企业需要不断改进生产技术,提高产品性能,以增强产品的市场竞争力。

(7) 绿色建筑政策推动

国家和云南省积极推动绿色建筑发展,出台了一系列相关政策和标准。绿色建筑对建筑材料的环保性能、节能效果等提出了严格要求,磷建筑石膏作为一种绿色环保建筑材料,符合绿色建筑的发展要求。在绿色建筑项目中,鼓励使用磷建筑石膏产品,这为磷建筑石膏市场提供了广阔的发展空间。一些政府投资项目和大型房地产开发项目在建设过程中,为了满足绿色建筑标准,优先选择磷建筑石膏产品,推动了磷建筑石膏市场需求的增长。

(8) 建筑行业标准与规范

建筑行业的标准和规范对磷建筑石膏的应用和市场需求产生重要影响。相关标准规定了磷建筑石膏产品的质量要求、性能指标、施工工艺等,确保了产品的质量和安全性^[2]。符合标准规范的磷建筑石膏产品更容易被市场接受和应用。随着建筑行业标准的不断完善和提高,磷建筑石膏产品的质量和性能要求也越来越严格,这促使企业加强技术研发和质量管理工作,提高产品质量,以满足市场需求。一些不符合标准

规范的磷建筑石膏产品将逐渐被市场淘汰，从而优化了市场结构，促进了市场的健康发展^[3]。

4 基于 Grey-DEMATEL 法对需求端关键影响因素分析

基于 Grey-DEMATEL 方法的分析原理，制作出云南省磷建筑石膏市场影响因素之间的影响程度打分问卷分别发给 5 位在磷建筑石膏领域较为权威的专家进行填写，5 位专家分别为专家 Q、专家 W、专家 E、专家 R、专家 T，专家类别对应为：某磷建筑石膏企业负责、某高校教授、某新型材料公司负责人、某建材公司负责人、某科研单位研究员。

根据专家的评分，计算需求端各影响因素间影响度、被影响度、中心度和原因度，具体见表 1。

表 1 磷建筑石膏市场供给端各影响因素间影响度、被影响度、中心度和原因度

影响因素	行和 Di	列和 Ri	中心度 Di+Ri	原因度 Di-Ri
C1 房地产市场波动	1.8	2.2	4.0	-0.4
C2 基础设施建设投资	2.0	1.9	3.9	0.1
C3 地区经济增长	2.3	2.1	4.4	0.2
C4 居民消费观念变化	2.5	1.8	4.3	0.7
C5 传统石膏及其他建筑材料的替代	2.2	2.3	4.5	-0.1
C6 替代产品价格与性能比较	2.1	2.0	4.1	0.1
C7 环绿色建筑政策推动	2.4	1.7	4.1	0.7
C8 建筑行业标准与规范	1.7	2.5	4.2	-0.8

(1) 影响度分析

影响度从高到低的排序为：

$C4 > C7 > C3 > C5 > C6 > C2 > C1 < C8$ ，居民消费观念变化（C4）是最为显著的动力因素，是推动云南省磷建筑石膏市场需求端最根本的动力因素，建筑行业标准与规范（C8）为最不明显的动力因素。

(2) 被影响度分析

被影响度从高到低的排序为： $C8 > C5 > C1 > C3 > C6 > C2 > C4 > C7$ ，被影响度相对较高的三个因素分别为建筑行业标准与规范（C8）、传统石膏及其他建筑材料的替代（C5）、房地产市场波动（C1），所以在云南省磷建筑石膏市场需求端效果最明显的动力因素为 C8、C5、C1。

(3) 中心度分析

按照其中心度由大到小的排序为：

$C5 > C3 > C4 > C8 > C6=C7 > C1 > C2$ ，中心度越大说明该影响因素对磷建筑石膏市场需求端其他影响因素的影响效果也越强，根据排序可以得出传统石膏及其他建筑材料的替代、地区经济增长、居民消费观念变化是对云南省磷建筑石膏市场影响较大的，而基础设施建设投资是最不重要的因素。

(4) 原因度分析

当 $Di-Ri > 0$ 时， $C4=C7 > C3 > C2=C6$ ，经济的增长，基础设施的完善，使得消费者更注重绿色环保，应在环保的基础上继续发展。

当 $Di-Ri < 0$ 时， $C5 > C1 > C8$ ，受传统石膏影响，需通过建筑行业的规范不断修改，将磷石膏更多的投入建筑当中。

5 发展策略研究

为推动磷建筑石膏市场健康发展，需从政策、市场与技术多维度协同发力。政策层面，政府应完善质量标准与奖补机制，明确产品的标准规范、设立专项补贴并减免企业税收，同时加强市场监管，建立严格的准入退出机制^[4]；市场层面，通过宣传推广、示范工程建设增强市场认知，给予市场主体更多自主选择权，引导企业提升竞争力；技术层面，多方合作加大研发投入，鼓励企业创新与引进先进技术，攻克生产工艺瓶颈，新老产品结合，让磷石膏制品可以更好的融入居民的日常生活，提升产品性能与生产效率，尽可能控制价格；产业层面，加强上下游协同合作，促进行业协会交流，共同制定行业规范，优化生产链，构建从原料供应到工程应用的完整产业链，从而实现磷建筑石膏市场的绿色高质量发展。

6 结语

本文对云南省磷建筑石膏市场需求端的现状分析，运用文献分析法、市场调研法、专家访谈法以及 Grey-DEMATEL 法分别对磷建筑石膏市场需求端的影响因素分别进行了分析，得出了以下结论：

(1) 本研究综合运用文献分析法、市场调研法与专家访谈法，系统收集云南省磷建筑石膏市场供给端和需求端的影响因素。在此基础上，采用 Grey-DEMATEL 法对初步筛选出的影响因素进行深入分析，最终识别出云南省磷建筑石膏市场需求端关键影响因素 8 个。

(2) 云南省磷建筑石膏市场需求端因素的影响程度大小排序为：传统石膏及其他建筑材料的替代>地区经济增长>居民消费观念变化>建筑行业标准与规范>替代产品价格与性能比较>房地产市场波动>基础设施建设投资。

参考文献

- [1] 谈云志,赵小谊.推动湖北“磷石膏”规模化消纳的思考[J].党政干部论坛,2023(05):22-23.
- [2] 许秀川,吴朋雁.磷化工产业绿色发展背景下地方政府和企业的演化博弈——贵州省“以渣定产”政策经验[J].西南大学学报(自然科学版),2023,45(03):152-163.
- [3] 吴浩,韩超南,汤昱.中国磷石膏资源化利用研究进展[J].现代化,2023,43(03):18-21
- [4] 杨宇雄,曹凯中,杨佳陵,等.磷石膏应用现状分析及资源化利用探究[J].房地产世界,2023(02):93-95.

Control Points and Optimization Measures in Construction Engineering Technology Management

Lixing Fu

Xining Huangshui Development and Construction Co., Ltd., Xining, Qinghai, 810000, China

Abstract

Scientific and effective technical management is the core guarantee for improving the quality of construction projects. Currently, the concept of refined management has become a trend in the industry and plays a key role in the overall efficiency of projects. As an important support for the entire process of engineering construction, technical management has achieved significant results by integrating advanced management methods into construction practice. However, in the process of implementing technical management, there are many urgent problems that need to be solved. Before implementing management measures, it is necessary to deeply analyze the current situation, carry out systematic planning, and organically combine theory with practice. This can not only improve management efficiency but also promote engineering quality construction. This article is based on the practice of construction engineering, mainly analyzing the key links in technical management in depth, and proposing targeted optimization plans for industry reference.

Keywords

construction engineering; technical management; Quality Control; optimization strategy

建筑工程技术管理中的控制要点与优化措施

付立行

西宁湟水开发建设有限公司, 中国·青海 西宁 810000

摘要

科学有效的技术管理是推动建筑工程质量提升的核心保障,当前,精细化管理理念已成为行业发展趋势,对于项目整体效益也发挥着关键性作用。技术管理作为工程建设全过程的重要支撑,将先进管理方法融入施工实践当中,已经取得显著成效。然而在技术管理实施过程中,存在诸多亟待解决的问题,在将管理措施落地之前,需深入分析现状,进行系统规划,将理论与实践有机结合,这样既能提高管理效能,又能促进工程品质建设。本文立足于建筑工程实践,主要就技术管理中的关键环节进行深入剖析,并提出针对性优化方案,以供业界参考。

关键词

建筑工程; 技术管理; 质量控制; 优化策略

1 引言

随着建筑行业持续发展,工程项目的质量要求需不断提升,实现安全高效建设目标。由于技术管理是工程质量的重要保障依据,实现精细化管理将进一步提升项目综合效益。对于建筑企业而言,由于市场竞争日益激烈,构建完善的技术管理体系能提升项目执行能力,同时优化资源配置,企业能更好地应对复杂施工环境,这不仅符合行业规范要求,使项目管理获得科学理论支持。现阶段,行业主管部门对工程质量管理提出更高标准。管理意识薄弱,致使管理机制不健全、责任不明确、流程不规范、标准不统一等问题频发,引发质量隐患、工期延误、成本超支等风险,影响工程

整体效益。部分企业对技术管理的认知存在偏差,缺乏系统性思维,存在形式化或碎片化现象。而科学的技术管理能有效规避这些风险。因此,探索科学合理、切实可行的管理优化措施,基于工程实践需求,对提升项目管理水平和保障工程质量具有重要现实价值。

2 建筑工程技术管理的重要价值

2.1 保障工程质量水平

工程质量的稳定提升需要系统化管理支撑,对施工工艺和质量标准要求严格。对于复杂工程项目的实施,在技术管理过程中需要统筹规划、协调各方、把控细节,同时会面临多重挑战。但在科学管理支持下,将有效整合各类资源,通过标准化流程进行质量控制,实现全过程监管,进而确保工程质量符合规范要求。从实施效果看,精细化的技术管理能够显著降低质量风险,进一步优化施工工艺,推动工程质

【作者简介】付立行(1989-),男,中国吉林白山人,本科,从事建筑工程技术方向研究。

量持续提升,这对于打造精品工程具有决定性意义。

2.2 提高项目管理效率

在施工过程中,技术管理需要协调多方关系,因此管理效率至关重要。而在数字化技术的支持下,只需要建立统一平台,其余信息传递和流程管控由系统自动完成,这大大减少了人工干预与沟通成本,进而显著提升工作效率。BIM技术作为现代工程管理的重要工具,技术管理的核心功能就是信息集成与共享。在实际应用中,技术管理能够将设计、施工、监理等环节紧密衔接,信息流成为项目推进的主线,依靠数据驱动,在进度控制、质量监督、安全管理的同时,强化的整体协同能力。技术管理既是项目顺利实施的保障机制,同时也是提高管理效能的关键路径。实践证明,良好的技术管理体系,项目执行效率明显提升。

2.3 助力成本有效控制

目前,成本控制已经纳入工程管理的核心环节,将技术管理引入项目的实施过程,能有效避免资源浪费,通过科学规划支持成本目标实现精细化管理,保障工程建设过程中资金使用合理规范。技术管理作为连接设计与施工的纽带,既是设计方案落地的执行保障,同时也是成本控制的重要抓手^[1]。在项目实施阶段,注重技术方案优化,通过价值工程和方案比选,实现功能需求与成本支出的平衡,提升投资效益。

3 建筑工程技术管理面临的挑战

3.1 管理意识有待加强

由于传统施工思维的影响,部分企业并未充分认识到技术管理的战略价值,不同规模企业的重视程度差异明显。目前,部分施工单位对技术管理理解片面,忽视技术管理对项目全局的指导作用,甚至将技术管理简单等同于资料整理工作,影响管理工作的实际效果,在施工过程中不需要投入过多精力,这种错误认知阻碍了技术管理的有效应用。另外,部分企业的技术管理体系缺少专业人才支撑,使技术管理在应用过程中缺乏科学指导。管理意识的不足,会导致技术管理在项目实施中的作用大打折扣。

3.2 技术应用不够深入

技术管理是理论知识与工程实践的有机结合,属于系统工程,其中BIM技术、物联网等,以及大数据分析、人工智能等前沿技术,应用尚不充分。技术管理想要发挥实效,必须依托先进技术手段。目前,技术应用水平普遍不高,技术集成度不够完善,导致管理效能受限,影响项目整体表现。企业在技术应用后,往往只关注基础功能和表面数据,这在复杂工程环境中又增加了管理难度。在实际管理过程中,技术应用存在碎片化现象,对于技术价值挖掘不够深入,且缺乏系统评估,没有建立完善的应用标准,技术投入与产出不成正比,这对技术管理的深入推进造成阻碍。

3.3 协调机制尚不完善

技术管理与项目各环节存在紧密联系,在实施过程中,

许多问题相互交织,对工程进度和质量管控产生不利影响。对于技术管理中的难点问题,需要多方协同解决,如果沟通机制不畅,被问题拖延会导致工期延长的风险,材料浪费、工序混乱等问题,会给项目管理带来额外压力^[2]。技术管理在工程实践中的应用与推广,通过理论研究和实践探索,实现了管理水平的显著提升。从行业发展看,技术管理的深入应用能够增强企业竞争力,同时提高项目成功率。

4 建筑工程技术管理中的优化措施

4.1 强化管理意识建设

在数字化时代,技术管理通过信息化手段,实现了管理效能的显著提升。而在智能化技术的加持下,不仅提高了管理精度,而且质量控制和进度管理由数据驱动,这极大降低了人为因素与经验主义,优化了管理流程,达到提质增效的综合目标。技术管理需要全员参与的管理文化,技术管理体系建设应以企业战略为导向,从高层管理到基层执行全面贯彻,才能形成管理合力。在企业管理中,决策层要认识到技术管理的长期价值,明确技术管理的战略定位,形成共识、统一思想,在战略规划层面实现管理目标,更有针对性地指导管理实践。技术管理体系建设应当根据企业的实际需求,匹配相应的资源配置。例如:技术管理问题往往源于企业对自身管理能力认识不足,对技术管理的系统性理解不够深入。因此,企业在制定管理策略时,应当客观评估、全面分析等实际情况,做好需求调研与资源匹配的统筹工作,明确管理目标与实施路径,结合项目特点,保障管理措施的适用性与有效性^[3]。在管理体系建设过程中,既要关注制度完善,也要注重执行落地,这样技术管理才能真正发挥作用,充分满足项目实际需求。

4.2 提升技术应用能力

技术管理能力的提升需要系统规划,各环节之间紧密配合,即便技术先进,在应用过程中仍需持续优化。设计方和施工方需要建立协同机制,做好信息共享及流程衔接的统筹工作,最大限度避免出现管理脱节的不良后果。如果发现问题隐患,就要及时干预。技术管理还需加强过程监控和效果评估,定期开展技术应用评估,及时发现问题症结,尽可能消除潜在风险,也要注重经验总结,避免重复犯错,持续改进管理方法,优化管理流程,提升管理效能。例如:施工企业要推进技术管理创新,不仅要更新管理理念,还要优化管理工具,同时完善管理机制,如果遇到技术难题或管理瓶颈,则应组织专家会诊,各相关部门应当协同配合进行问题解决。技术能力决定项目的管理水平,保障技术管理有效实施是项目成功的关键。目前,技术管理处于发展阶段,体系建设需要系统规划,企业则要加大资源投入,进而完善管理体系,提升管理专业化水平。

4.3 完善多方协调机制

在项目实施中,建立高效的沟通协调机制,有助于构建完善的管理体系,利用信息化平台实现信息共享。技术管

理的协调机制,进一步明确了各方的职责边界,企业可以借助移动终端、云平台等技术手段,能实现管理信息的实时传递,保证管理流程的顺畅运行具有可追溯性,更好地支持决策制定。例如:项目的协同管理需要制度保障,通过标准流程和明确规则。对于复杂的工程问题,在解决方案制定过程中融入的技术支持实现了问题精准定位和高效解决,同时提升了管理效率。对技术管理而言,信息共享是协同管理的基础保障。对管理流程而言,企业应建立标准化的协调机制,注重流程优化。技术管理的协同机制建设需要系统规划,让各方通过信息平台形成利益共同体、责任共同体。让项目参与方借助移动应用、数据分析、智能预警等工具。实现信息互通、资源共享、风险共担效果,为项目顺利实施奠定坚实基础。在技术支撑下,将管理要求具体化,通过流程再造进行管理创新,优化资源配置,最终实现管理效能最大化。

4.4 提高人员专业素养

无论管理理念多么先进还是技术手段多么高端,人才始终是核心要素所在,企业应该重视人才培养,为技术管理提供智力支持,并对管理团队进行系统培训,提升专业能力,加强人才队伍建设。针对技术管理中的专业能力短板是亟待解决的问题,技术管理只有依靠专业人才,才能发挥实际作用。企业要注重能力培养,通过专业培训去提升员工的综合素质,做好专业技能与管理知识的融合教育,互相促进能力提升,通过考核机制对技术管理水平进行评估,保障管理工作的专业性和持续性。同时,技术管理一定要注重实践能力,从理论学习、案例分析、实操训练等维度,加大培养力度,确保管理能力得到全面提升。在项目实施中,团队也要持续学习,加快知识更新速度,在管理实践中,进一步提升专业素养和综合能力。伴随着行业技术的快速发展,技术管理人员的专业能力也能够同步提升,管理效能得到保障,项目质量得到提升,从而实现企业可持续发展。

4.5 健全管理评估体系

对于技术管理而言,应该建立科学的评估机制,在实施管理措施之后,再去评估管理效果的具体表现,保障管理措施的有效性,开展有针对性的管理改进,保障管理工作的持续优化,这既是管理闭环的必要环节,也是提升管理水平的重要途径。企业要保障技术管理的科学性,加强过程监控和效果评估,进而提升管理工作的针对性。例如:在项目实践中,通过建立评估体系,通过数据分析方法,质量指标等参数,项目管理效果显著提升,基于科学评估,达到了预期管理目标。同时,管理评估体系也要与时俱进,推动了管理

创新,提升了管理效能,在评估过程中,企业的管理水平得到提升。不仅完善了管理闭环的实施路径,企业的管理能力体现出持续改进能力。在技术管理的评估体系构建当中,可以引入第三方评估和内部自评相结合,做好评估标准的科学制定,进而明确管理改进方向,实现管理水平的螺旋式上升。评估体系结合定量分析与定性评价。评估过程,企业立足于项目实际,同时管理目标以满足业主需求为导向。评估方法与评估标准。评估工作,数据采集与分析并重,通过专业评估或专家评审方式。评估结果并落实改进。如此一来,管理评估体系得以完善,从而保障技术管理工作的科学性和有效性。

4.6 创新管理模式探索

技术管理需要与时俱进的创新思维,管理模式创新需从企业发展战略为出发点进行系统规划。管理创新并非简单改变,而是系统性、整体性、协同性的变革。整合管理资源,组织专业团队,深度挖掘管理潜力,实现管理效能突破。深化管理创新与技术应用融合。建立创新机制,不再局限于传统模式,而是探索数字化、智能化、绿色化等创新路径。企业应对管理实践进行系统总结,为创新提供理论支撑,创新成果可转化为管理标准与操作规范。将管理经验系统化,形成知识库。制定创新计划,明确具体实施步骤,构建创新生态系统。设置基于价值创造的创新评价体系,确保创新成果有效落地。

5 结语

工程项目想要实现高质量发展,就必须重视技术管理的作用。管理水平直接决定项目成败,随着行业标准不断提高,企业一定要做好技术管理的系统规划,逐渐完善管理体系建设,尽可能减少管理漏洞出现的可能性,降低项目风险,助力工程建设质量提升。企业应通过制度建设、技术创新等手段,为技术管理提供全方位支持。实现管理现代化,能提升项目品质,也能增强企业的核心竞争力,保障工程顺利实施,提升项目管理的整体水平。

参考文献

- [1] 王峰.高层房屋建筑工程技术管理中的控制要点与优化措施[J].陕西建筑, 2024(1):88-91.
- [2] 项永明.建筑工程技术管理中的控制要点与优化措施分析[J].中国住宅设施, 2025(6):109-111.
- [3] 牛祥社.建筑工程施工技术管理出现的问题及优化措施[J].安家, 2024(3):0151-0153.

Analysis and Optimization Strategy of the Problem of the Looseness of the Installation Bolt of the Forklift Brake

Hao Liu

Baoji Heli Forklift Co., Ltd., Baoji, Shaanxi, 721001, China

Abstract

As a critical component of the drive axle, the installation bolts of forklift brake systems directly impact braking safety and operational stability, with potential to cause malfunctions and accidents. This study examines bolt loosening through four dimensions: design, manufacturing, assembly, and maintenance, considering operational characteristics such as load fluctuations and braking impacts. The analysis identifies three primary causes: inadequate anti-loosening effectiveness, insufficient installation plane precision, and environmental vibration coupled with delayed maintenance. Countermeasures proposed include optimizing anti-loosening processes, improving installation accuracy, strengthening assembly control, and refining maintenance protocols. Practical validation demonstrates that these improvements significantly enhance bolt connection reliability and reduce failure rates, providing technical support for the safe and stable operation of drive axle braking systems.

Keywords

fork crane brake; installation bolt; bolt loosening; problem analysis; optimization strategy

叉车制动器安装螺栓松动问题剖析与优化策略

刘浩

宝鸡合力叉车有限公司，中国·陕西 宝鸡 721001

摘要

叉车制动器安装螺栓作为驱动桥核心连接部件，其松动直接威胁制动安全与运行稳定，易引发故障及事故。本文结合叉车作业载荷波动、制动冲击等工况特点，从设计、制造、装配及运维四维度分析该螺栓松动问题，明确防松效果欠佳、安装平面精度不足、环境振动及维护不及时为主要成因。据此提出优化防松工艺、提升安装精度、强化装配管控及完善运维规范等对策。实践验证显示，改进措施可有效提高螺栓连接可靠性、降低松动故障率，为驱动桥制动系统安全稳定运行提供技术支撑。

关键词

叉车制动器；安装螺栓；螺栓松动；问题剖析；优化策略

1 引言

在现代物流与工业生产中，叉车是关键物料搬运设备，广泛应用于工厂、仓库、港口等场景，其高效稳定运行直接关系到生产顺畅与作业效率。鼓式制动器作为叉车制动系统核心部件，其安装螺栓承担连接紧固重任，直接影响制动效能。螺栓一旦松动，会导致叉车制动跑偏、异响、制动力下降，严重时引发制动失效，造成侧翻、碰撞等安全事故，危及人员安全、损毁货物设备，给企业带来重大经济损失。因此，深入研究该螺栓松动问题，对提升叉车运行安全性、降低事故风险，具有重要现实意义。

2 故障现象

据市场反馈，某型小吨位叉车在使用一段时间后，偶发制动时制动跑偏、异响、制动力下降等现象。经售后人员对故障车辆驱动桥拆解后发现，用于固定制动器的安装螺栓存在松动现象，导致车辆在刹车过程中，制动器产生位移，从而导致制动蹄片与制动鼓接触异常后产生制动跑偏、异响、制动力下降等故障。经对故障车辆的制动器安装螺栓重新紧固后，故障消除。

3 原因分析

该型叉车制动系统采用鼓式制动器，由左右对称的2个高强度铰制孔螺栓和6个高强度标准螺栓将制动器总成安装于驱动桥桥壳上（结构原理见图1）。

【作者简介】刘浩（1987-），男，中国陕西咸阳人，本科，工程师，从事机械设计制造及其自动化研究。

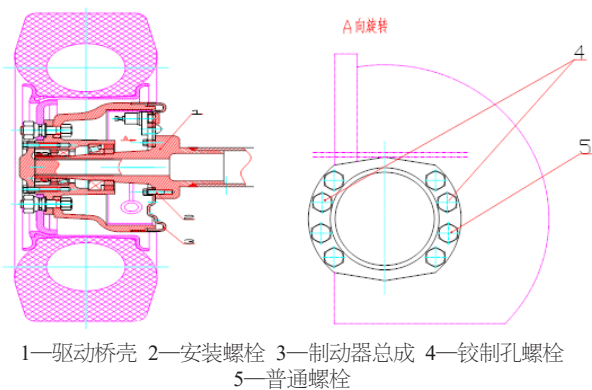


图 1 鼓式制动器安装结构

造成制动器安装螺栓松动有多方面的原因。尤其是叉车在运行过程中,要经受复杂工况考验,满载高频前后行驶、制动以及路面颠簸,使得制动器的安装螺栓持续承受交变载荷下的剪切和高频振动。

3.1 螺栓涂胶工艺不合理

通过对螺栓安装过程进行检查,发现螺栓采用弹簧垫片加螺纹紧固胶的方式防松,在螺栓紧固过程中,工人采用风动扳手先拧紧序 4 的两个铰制孔螺栓,随后呈对角线沿顺时针方向依次对序 5 的 6 个普通螺栓进行拧紧,对拧紧力矩采用首、中、末“三检”的频次进行抽检,从抽检记录来看力矩符合要求。在对松动螺栓拆解后发现螺栓上的紧固胶呈

局部布置,未在螺纹接触部位全部涂抹,这将导致防松效果大幅下降。

3.2 制动器安装平面精度不足

制动器安装平面的精度对螺栓连接有着重要影响,平面度误差过大,会使螺栓在拧紧时,各部位受力不均,产生附加弯矩。检测数据显示,部分制动器的安装平面度误差达到了 0.2mm,远超设计允许范围(通常应控制在 0.15mm 以内)。螺栓在拧紧过程中,会承受额外的弯曲应力,导致螺栓局部应力集中。在某叉车生产企业的实际案例中,由于安装平面加工精度不足,部分叉车在使用一段时间后,固定螺栓出现了断裂现象,经分析,主要原因就是安装平面不平,使螺栓承受了过大的附加弯矩。图 2 和图 3 分别展示了平面度检测过程和检测数据情况。



图 2 制动器安装面平面度检测

序号	平面度	序号	平面度	序号	平面度	序号	平面度	序号	平面度	序号	平面度	序号	平面度	序号	平面度
1	0.10	13	0.10	25	0.10	37	0.15	49	0.10	61	0.15	73	0.15	85	0.10
2	0.10	14	0.10	26	0.15	38	0.10	50	0.15	62	0.10	74	0.15	86	0.15
3	0.10	15	0.15	27	0.15	39	0.15	51	0.15	63	0.10	75	0.15	87	0.10
4	0.15	16	0.15	28	0.10	40	0.15	52	0.15	64	0.20	76	0.15	88	0.15
5	0.10	17	0.10	29	0.15	41	0.15	53	0.18	65	0.10	77	0.10	89	0.15
6	0.10	18	0.15	30	0.10	42	0.15	54	0.15	66	0.10	78	0.15	90	0.15
7	0.15	19	0.15	31	0.10	43	0.15	55	0.10	67	0.15	79	0.10	91	0.10
8	0.15	20	0.10	32	0.15	44	0.10	56	0.15	68	0.15	80	0.10	92	0.15
9	0.10	21	0.15	33	0.15	45	0.15	57	0.10	69	0.10	81	0.10	93	0.15
10	0.15	22	0.15	34	0.10	46	0.15	58	0.15	70	0.15	82	0.15	94	0.15
11	0.10	23	0.18	35	0.15	47	0.12	59	0.15	71	0.15	83	0.10	95	0.15
12	0.15	24	0.15	36	0.10	48	0.10	60	0.15	72	0.10	84	0.15	96	0.18

图 3 平面度检测数据

3.3 维护保养不及时

部分叉车的维护保养制度执行不到位,未定期检查螺栓紧固情况。根据统计数据,当检查周期超过一个月时,螺栓松动故障率会增加 50% 以上。某物流企业的叉车,由于维护人员未能按照规定的两周检查周期对螺栓进行检查,在一次作业中,因螺栓松动导致制动失效,险些引发安全事故。未及时更换制动蹄也会影响螺栓的紧固状态。例如,制动蹄磨损到一定程度后,会使制动时的作用力发生变化,对固定螺栓产生额外的冲击力,加速螺栓松动。当制动蹄磨损量超过 10mm 时,固定螺栓的松动风险会显著增加。通过对多起叉车制动故障案例的分析发现,因维护保养不及时导致螺栓松动的比例高达 30%-40%,可见维护保养工作对防止螺栓松动的重要性。

4 改进措施

针对以上分析原因,实施针对性改进。

4.1 对螺纹紧固胶涂抹工艺优化

螺纹紧固胶利用其固化后形成的高强度胶层,填充螺纹间隙,增加螺纹之间的摩擦力,有效防止螺栓松动,适用于对防松要求较高、拆卸频率较低的场合。为消除由于螺纹紧固胶涂抹不规范造成的质量波动,按照操作规范对操作工人进行了培训和指导:在涂胶前检查紧固件表面的清洁度,涂胶时须沿螺栓轴向进行均匀、充分涂抹,特别是在螺纹旋合段的内部和底部,厚度保证在 0.1-0.15mm 之间。以此提高螺栓连接的防松性能,确保在复杂工况下螺栓连接的可靠性。

4.2 提高制动器安装平面精度

制动器安装面的精度实为制动器底板总成的平面度。制动器底板总成为压型底板和加强板采用电阻焊铆接而成，总成的表面处理采用高温喷粉工艺。（结构见图4）

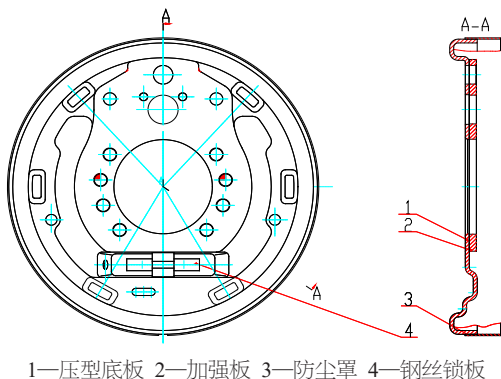


图4 制动器底板总成结构

为探寻提高制动器底板总成平面度的具体方向，分别对压型底板平面度、加强板平面度、加强板铆接后总成的平面度和高温喷粉后总成的平面度分别进行跟踪检测，发现铆

接后和喷粉后均存在平面度超差的情况。为此从以上两道工序分别着手开展提升。

4.2.1 底板铆接工序平面精度提升

铆接工序的平面度超差主要来源于热变形，通过对铆头球面大小进行优化，在保证铆接强度的前提下，减小了电阻焊电流，从而降低了底板总成的热变形；同时通过对铆接位置和先后顺序不同对底板产生的热变形影响，进行了大量试验（见图5、图6试验过程记录），根据实验结果对铆接位置和顺序进行了优化，最大限度的降低电铆对底板热变形影响。

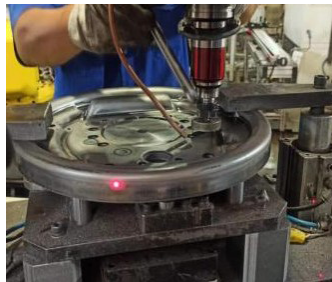


图5 加强板铆接过程

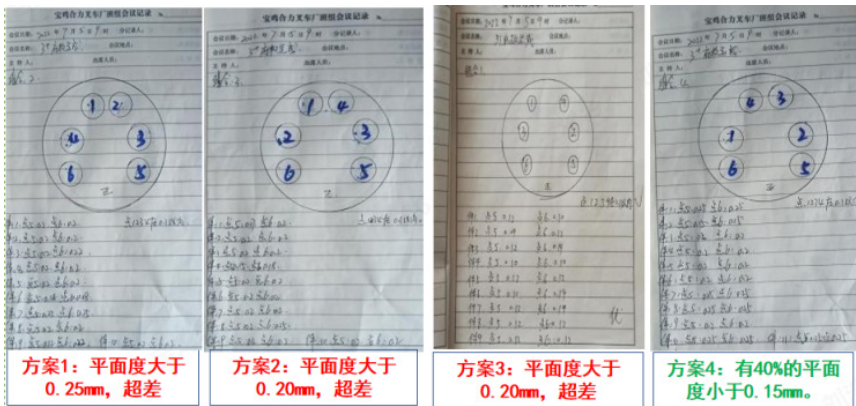


图6 铆接顺序试验记录

4.2.2 底板总成喷粉工序平面精度提升

通过对喷粉前、后底板总成平面度的对比数据发现，喷粉过程中，底板总成在180℃-200℃的粉末固化温箱内持续烘烤30分钟，高温下产生了应力释放，也会导致变形。



图7 底板总成高温喷粉过程

为消除由于铆接和喷粉两道工序产生的热变形和应力释放，引入新的工艺路线：在喷粉后增加整形工序。增加了底板总成压装整形模具，采用油压机进行压装整形，通过反复试验确定了最优压力参数。通过试验验证，整形后平面度合格率100%。

4.3 建立定期维护保养制度

制定详细的叉车维护保养计划和标准，在检查过程中，使用扭矩扳手对固定螺栓的紧固力矩进行检测，确保力矩在规定范围内。如发现螺栓松动，应及时按照规定的拧紧力矩进行紧固。同时，定期更换磨损部件，如制动蹄磨损量超过5mm时，应及时更换新的制动蹄。添加润滑剂，对制动系统的活动部件，如制动分泵活塞、支承销等，每两周添加一次润滑剂，确保部件运动灵活，减少磨损。建立维护保养档案，记录每次维护保养的时间、内容、更换的部件以及发现的问题等信息。通过对维护保养档案的跟踪和分析，及时发

现和解决螺栓松动等潜在问题，如通过分析螺栓松动的频率和位置，找出导致螺栓松动的根本原因，采取针对性的改进措施。

5 效果验证

改进对策实施后，对叉车的制动性能和运行稳定性进

行了实际测试和用户反馈收集。在运行稳定性上，用户反馈叉车在行驶和作业过程中，制动时的抖动异响和跑偏现象明显减少，操作更加平稳，提高了作业效率和安全性。综合实际测试和用户反馈结果，改进对策有效提升了叉车的安全性和稳定性，验证了改进措施的可行性和实用性，为叉车的安全稳定运行提供了有力保障。

底板总成安装面平面度喷粉前后对比							
序号		点1	点2	点3	点4	点5	点6
件1	喷粉前	0	0.08	0.06	0.03	0.11	0.08
	喷粉后	0.04	0.16	0.13	0.06	0.18	0.07
件2	喷粉前	0	0.06	0.12	0.06	0.08	0.06
	喷粉后	0.06	0.13	0.05	0.10	0.13	0.12
件3	喷粉前	0	0.08	0.08	0.06	0.12	0.08
	喷粉后	0.06	0.14	0.12	0.12	0.06	0.08
件4	喷粉前	0	0.08	0.06	0.04	0.10	0.08
	喷粉后	0.08	0.12	0.12	0.18	0.12	0.13
件5	喷粉前	0	0.06	0.08	0.06	0.06	0.06
	喷粉后	0.05	0.12	0.13	0.14	0.14	0.12

图 8 喷粉前、后平面度检测记录

6 结语

本文围绕叉车鼓式制动器安装螺栓松动这一影响制动安全的关键问题，从设计、制造、装配及使用维护多维度剖析成因，针对性提出螺纹紧固胶涂抹工艺优化、安装平面精度提升及定期维护保养制度建立等改进措施。实践验证表明，各项优化策略有效解决了螺栓松动难题，显著降低故障发生率，提升了叉车制动系统运行可靠性。螺栓连接的稳定性是叉车安全作业的重要保障，本文研究成果为同类工程机械连接件的防松设计与维护提供了实践参考。未来可进一步结合智能化监测技术，实现螺栓松动的实时预警，持续完善叉车制动系统的安全保障体系，为物流与工业生产的高效开展筑牢技术根基。

参考文献

[1] 莫易敏,梁绍哲,晏熙,等.汽车高强度螺栓的防松性能影响因素研究[J].机械设计与制造, 2015(9):89-92

[2] 陈海平,曾攀,方刚,等.螺纹副承载分布规律[J].机械工程学报, 2010, 46(9):171-178

[3] 王晓婷,刘文光.螺栓组布局对连接结构承载能力和剪切刚度的影响[J].润滑与密封, 2021, 46(12):99-104

[4] 中国机械工业联合会.工业车辆安全要求: GB/T 10827.1-2014 [S].北京:中国标准出版社, 2014

[5] 李建明,张宏,王强.制动器安装面加工与整形工艺优化[J].制造技术与机床, 2020 (7): 156-159

[6] 机械工业部.叉车维护保养规程: JB/T 3300-2010[S].北京:机械工业出版社, 2010

[7] 巩浩,刘检华,冯慧华.螺纹连接松动机理和防松方法研究综述[J].机械工程学报, 2021, 57(4):1-23.

[8] 谢雁成.浅析装配螺栓松动原因及防松措施[J].装备制造技术, 2015(4):173-175.

[9] 刘传波,孙静明,莫易敏.螺纹紧固件防松性能影响因素研究[J].现代制造工程, 2018 (4):138-143.

Fault Self-healing Technology and Application Practice of Environment and Equipment Monitoring System in Urban Rail Station

Nan Sheng Yirao Zhang

Changchun Rail Transit Group Co., Ltd., Changchun, Jilin, 130000, China

Abstract

The continuous expansion of urban rail transit networks and escalating operational demands have made station environment and equipment monitoring systems (BAS systems) indispensable for ensuring stable and reliable operations. Traditional fault handling methods, which rely on manual inspections and responses, suffer from inefficiency and delayed responses. In contrast, fault self-healing technology integrates intelligent sensing, diagnosis, and execution mechanisms to automatically detect, locate, and restore system anomalies, significantly enhancing system resilience and operational intelligence. This paper comprehensively explains the fundamental principles and core framework of urban rail BAS fault self-healing technology, supplemented by practical application cases. It analyzes the implementation pathways and benefits of key technologies, providing valuable insights for the safe, efficient, and intelligent development of urban rail operations.

Keywords

urban rail transit; building automation system (BAS); fault self-healing; intelligent operation and maintenance; application practice

城轨车站环境与设备监控系统的故障自愈技术及应用实践

盛楠 张艺饶

长春市轨道交通集团有限公司, 中国·吉林 长春 130000

摘要

城市轨道交通网络规模接连扩张和运营要求的持续提高,使车站环境与设备监控系统(BAS系统)稳定可靠运行的地位无可替代。传统故障处理模式依赖于人工巡检与响应,有效率低、响应慢等问题,然而故障自愈技术聚合智能感知、诊断和执行机制,可实现系统异常的自动检测、定位与恢复,大幅提高系统韧性和运维智能化水准。本文全面讲解城轨BAS系统故障自愈技术的基本原理、核心框架,加上实际应用案例,分析关键技术的落实路径和应用效益,为城轨运营的安全、高效与智慧化发展提供借鉴。

关键词

城市轨道交通; 车站设备监控系统(BAS); 故障自愈; 智能运维; 应用实践

1 引言

城轨车站环境与设备监控系统(BAS)是保障车站公共安全、优化乘客体验、实现能源精细化管理的关键系统,监控涉及通风空调、给排水、照明、电梯扶梯等多台设备。该系统一旦故障,轻度情况干扰服务品质,情况严重会威胁运营安全。常规故障管理多采用“事后维修”或定期检修,跟不上现代城轨高密度、高强度运营对设备可靠性的严苛标准。面对这样的形势,结合物联网、大数据、人工智能等先进技术的故障自愈理念就此形成。故障自愈技术要实现的目标是让BAS系统具备自适应、自诊断、自恢复能力,把故

障影响降到最低,降低运维开支,是城轨智慧运维建设的关键发展路径。本文聚焦技术内涵、体系构建与实践应用3个层面推进,细致探究城轨BAS系统故障自愈技术。

2 故障自愈技术的内涵与体系架构

2.1 技术核心内涵

核心为3个关键环节的闭环自动化。第一项为“自感知”。系统依托遍布车站和区间的密集传感网络,实时抓取通风、照明、电扶梯、给排水等关键设备的状态参数,同步采集温湿度、客流密度等环境数据,生成设备运行的全景动态画像,精准察觉异常波动与潜在风险。第二项为“自诊断”。系统并非仅凭预设规则开展初步判断,还借助机器学习模型关联分析历史故障案例与实时数据,判定复杂模式下的故障类型、锁定具体设备并估算影响范围,大幅压缩诊断时长。第

【作者简介】盛楠(1986-),女,中国吉林长春人,本科,高级工程师,从事电子信息工程研究。

三项为“自恢复”。通过诊断结论触发预案执行动作,对故障风机执行远程重启、切换备用回路或调整站内通风模式。在无工干预时迅速让系统回归正常运作或保持最低服务标准,构建从感知到恢复的完整闭环,显著增强系统韧性与可靠性^[1]。

2.2 系统层级架构

城轨BAS故障自愈体系采用多层级协同架构。基础层级为“设备感知与执行层”,依靠安装在各类机电设备上的智能传感器、PLC控制器与执行器,达成设备数据的高频采集与动作指令的精准下发,从而搭建系统的“神经末梢”。中间层定为“边缘计算与区域自治层”,把边缘服务器部署到车站或区域控制中心,通过本地数据实时清洗、聚合与分析。启用提前设定的快速诊断算法与恢复策略,能够实现自主控制。顶端为“云端分析与管理层”,能够收拢全线数据并实施深度挖掘。通过大数据平台不断训练与优化故障预测模型,为各边缘节点同步更新及下发自愈策略,实现跨线、跨区域的智能协同及系统能力的不断优化,从而构建集中管理加分布式执行结合的高效体系。

2.3 与传统监控的区别

传统BAS系统核心定位为“监视者”,是通过SCADA界面集中呈现设备状态。在参数超出限定值时触发声光报警,由运维人员人工识别信息、现场排查并手动实施恢复操作,整体反应滞后且对人员经验门槛高。故障自愈系统实现从“感知报警”到“决策执行”的本质跨越,本质为拥有自主决策能力的“智能运维体”。系统能第一时间察觉异常,可自动分析故障根源、评估影响,落实预置或动态生成的恢复指令,诸如自动启动冗余设备、调整系统运行参数或隔离故障区段。这种变化可以把运维人员从频频的紧急处置里解脱出来,让它更聚焦系统策略优化、故障原因分析及预防性维护,推动运维模式从“被动响应”切换到“主动防御”和“预测性维护”,全面强化城轨系统自动化水平和提升运营安全。

3 故障自愈的关键技术实现

3.1 多源数据融合与智能感知技术

根据BAS系统内部设备的实时运行状态数据、车站环境动态参数(如温湿度、CO₂浓度、光照度等)以及视频监控画面信息,搭建多维度立体化综合监测体系。采用时序数据分析技术,对海量数据连续追踪及模式挖掘,采用先进的异常检测算法,对系统运行状态做实时智能扫描。这类算法可精准分辨正常波动和真实异常,从纷繁环境噪声里精准锁定潜在风险模式,大幅提升感知的精准度和灵敏性。该技术可对设备早期故障开展预警,还能快速应对环境异常,为后续诊断和处置抢出宝贵时间,全面增强BAS系统的主动感知与预警能力^[2]。

3.2 基于知识图谱与机器学习的故障诊断技术

构建覆盖BAS设备结构、功能属性、故障模式与因果

关联的知识图谱,为智能诊断提供足量语义化上下文与关系支撑。依托已积累的历史故障案例库,通过机器学习算法(如决策树、随机森林及深度学习模型)实施训练,构建能自动识别故障类型、分析根本原因的智能诊断模型。系统识别到异常后,诊断模块可快速完成知识图谱的语义检索和模式匹配,比对以往案例,推算出最可能的故障起因和影响范围。该技术可实现故障快速分类和定位,还可给出解读性分析,辅助运维人员理解故障机理,给精准高效地恢复决策筑牢可靠基础,明显提升运维智能化水平。

3.3 自适应策略生成与安全执行技术

按照故障诊断输出结果,系统能自动生成针对性恢复策略,或智能启用预置应急预案库,生成策略严守安全第一原则。在开展应急响应时,必须优先保障消防联动设备、大客流区域通风和环境控制等关键系统稳定,现场设备接收由可编程逻辑控制器或智能物联网网关精准下达的恢复指令。执行期间依靠传感器网络持续监测设备反馈和环境变化,实时考核执行成果,构建起“感知—诊断—执行—验证”的完整控制闭环,赋予系统动态调整 and 自适应优化能力。这项技术既能保障单次恢复动作的有效性,又能保障其安全性,也依托持续学习和反馈提升系统整体鲁棒性和长期运行稳定性。

4 在城轨车站BAS系统中的实践应用

4.1 通风空调系统自适应调节与故障处置

当系统探测到某台空调机组风机电流出现异常暴涨时,自带的自诊断模块会马上启动多维度分析程序。该模块不光实时比对电流数值与预设的安全运行阈值,还会整合风机转速反馈、轴承振动传感数据以及近期运行历史曲线做综合判断,对电流突变的波形特征与持续时间展开分析。系统可初步锁定故障根源为电气过载或机械卡阻两种主要诱因,同时排除瞬时电压波动造成的误报警,完成这项诊断仅需数秒,为后续自动化应对出具准确的故障定性依据。

按诊断结论,系统的自恢复模块优先落实预设的初级处置策略。它能够马上向异常风机的驱动控制器下达指令,试运行软启动复位程序1次。通过平滑调整电压和频率,消除电气冲击引发的暂时性过载隐患。在电流数据复位后监测周期内未恢复正常,系统判定此故障为持续性机械问题,立刻启动备用预案。自恢复模块自动把该故障机组隔离出制冷回路,顺利启动备用空调机组接管其负荷,系统动态调整对应水阀开度,满足新投用机组的换热需求,并配合新风机组调节送风占比和风量,把该服务区域温湿度波动快速控制在预设可接受范围,最大程度维持环境舒适度连贯^[3]。

4.2 水泵与水箱系统的异常自恢复

在日常监控车站给排水系统时,中央管理系统检测到某组生活水泵出现不符合常规逻辑的频繁启停现象时,或水箱、水池的水位信号长时间停滞、出现跳跃式突变等异常,系统自带的专家诊断算法马上启动。该算法不单独着眼于单个信号,而是把水泵运行状态、启停频率、电流曲线、水位

变化速率以及历史数据趋势做交叉比对和关联分析。借助这类综合分析,系统能精准区分真实用水波动引发的正常调节,或是设备本身故障引发的异常动作,由此初步精准确定故障源自水位传感器信号失真、传感器探头附着物干扰,或是水泵控制柜内继电器粘连、控制回路接触不良相关问题。

凭借上述诊断结论,系统的自愈控制模块将落实提前设定的多层次应对策略。面对疑似传感器故障,系统将自动排除该故障传感器的读数,切换到由相邻区域液位传感器数据、水泵累计运行时长及用水量估算值共同组成的冗余逻辑计算模式,借此间接核算实际水位。若判定问题出自水泵控制单元,系统马上把该主泵的控制权限调整为“维护锁定”状态,同步平稳启动同规格备用水泵接入管网,维持供水压力和流量平稳。在全程切换期间,系统调整关联阀门,维持供水线路平稳过渡,实时监测排水管路压力变动,防止供水波动诱发排水系统气塞或回流。

为全面阻断风险,系统启用备用设备的同步阶段。针对已识别的故障设备,从逻辑和电气两个层面强制锁定。这不只是要在控制软件界面标明“不可用”,也是采用远程指令或硬接线途径,切断其控制回路使能信号,从根本上杜绝故障传感器持续上传错误数据干扰系统,或是故障水泵因控制回路紊乱引发未被授权的误启停。所有诊断步骤、完成的切换操作、设备锁定状态及切换后的系统运行参数,都会生成详细的事件日志与故障报告,自动推送至运维人员的监控终端,在保障供水安全和排水顺畅的同时,为后续人工维修的高效、精准开展提供清晰技术指引和决策依据^[4]。

4.3 照明回路故障的智能隔离与补偿

当智能照明监控系统监测到某公共区域照明回路突发短路故障导致断路器自动脱扣跳闸时,系统即刻启动故障响应序列。它第一步将回路通信模块传回的失电信号和拓扑网络做比对,数秒内精准锁定故障涉及的物理回路编号及对应具体区域,譬如某站厅层东侧广告灯箱集群回路,系统同步获取该回路跳闸前刹那的电流、电压波形数据进行瞬态分析,结合历史运行数据,初步界定故障类别,为后续自动处理决策提供凭据。

系统的自愈控制程序依照预设策略开展操作。第一步是启动,当系统确认无人工干预指令时,可以对该断路器开展1次远程合闸操作。执行该操作,是为了降低瞬时性冲击

(如浪涌电压)引发误跳闸的可能性。合闸后电流监测模块瞬间检测到远超安全阈值的短路电流,系统迅速识别这属于永久性故障,马上再次分断断路器,系统把该故障回路在电气逻辑图上标注为“故障隔离”状态,切断对应上级关联的智能控制开关,让故障支路彻底与网络断开关联,阻止故障扩大或引发安全隐患。

在完成故障回路隔离后,系统并非消极等候维修,转而主动激活照明补偿方案。系统按照该故障回路前承担的照明负荷和所在位置的空间光学模型,自动核算相邻且运行正常的照明回路可调节裕度,始终不超过回路设计负荷。系统采用调光控制系统,按适度幅度平稳提升相邻回路灯具亮度。通过略微调高故障区域周边的一般照明和重点照明,能够补上局部熄灯引发的照度损失和均匀度下降。这套动态补偿机制,可覆盖维护人员到现场修复的前置时段,全力保障车站整体照明环境舒适安全,切实降低对乘客视觉体验和空间导向感的不良影响,说明系统保障基础运行的同时,落实服务品质的精细维护。

5 结语

城轨车站环境及设备监控系统故障自愈技术,展现了轨道交通运维管理朝智能化、主动化发展的必然走向。它创建汇集智能感知、精准诊断与自主恢复的技术体系,可切实强化BAS系统的可靠性和韧性,降低运营中断频次和减少运维开支。目前在统一标准、复杂故障处理等方面仍存挑战,但技术逐步成熟和实践案例增加,故障自愈技术必将在更广泛的城轨场景中深入落地,也是保障城轨安全、高效、智慧运营的核心技术支撑项之一。在未来,依托数字孪生、预测性维护等前沿技术,故障自愈能力会往更前瞻、更协同的方向不断演进。

参考文献

- [1] 李珂.适应储能调频的控制系统故障诊断及自愈控制[J].山东电力高等专科学校学报,2024,27(06):41-47.
- [2] 张力,徐进霞.基于人工智能的电力系统故障诊断与自愈控制[J].电工技术,2024,(S2):218-220.
- [3] 黄蓓,张宗华,温晓莹,谭社平.基于人工智能的供配电系统故障诊断与恢复策略[J].广西水利水电,2024,(03):128-131.
- [4] 张蝶.高速铁路牵引供电系统故障仿真与自愈重构技术的研究与实现[D].北京交通大学,2023.

Study on the Process Mechanism and Efficiency Improvement of Vanadium Battery Electrolyte by Short-Flow Extraction

Qian Shi

Shaanxi Jutai New Material Technology Co., Ltd., Weinan, Shaanxi, 714300, China

Abstract

The short-process extraction method for vanadium battery electrolyte preparation represents an efficient and environmentally friendly alternative to the traditional complex vanadium pentoxide production process. This study investigates the technological mechanisms, advantages, and application potential of the short-process extraction method in vanadium electrolyte production. By optimizing extraction agents, regulating the back-extraction process, and adjusting operating conditions, the concentration and purity of vanadium extraction were significantly enhanced. Key technical challenges such as impurity removal, activated carbon adsorption efficiency, and wastewater treatment were also addressed, further improving the electrochemical performance of the electrolyte. Compared to conventional electrolytes, the extraction-based method demonstrates superior electrochemical stability and lower production costs. Additionally, this research analyzes the industrialization prospects of the extraction method for vanadium battery electrolyte preparation, providing a novel technical solution for the efficient production of new energy battery materials.

Keywords

short process extraction; vanadium battery electrolyte; extraction efficiency; electrochemical performance; wastewater treatment

短流程萃取法制备钒电池电解液的工艺机理与效率提升研究

师谦

陕西聚泰新材料科技有限公司，中国·陕西 渭南 714300

摘要

短流程萃取法制备钒电池电解液是一种高效、环保的技术，旨在替代传统复杂的五氧化二钒生产工艺。本研究探讨了短流程萃取法的工艺机理、技术优势及其在钒电解液制备中的应用潜力。通过选择优化萃取剂、调控反萃过程和操作条件，提高了钒提取的浓度和纯度。同时，研究了杂质去除、活性炭吸附效率和废水处理等关键技术问题，进一步优化了电解液的电化学性能。与传统电解液相比，萃取法制备的电解液具有更高的电化学稳定性和更低的生产成本。此外，本研究还分析了萃取法在钒电池电解液制备中的产业化前景，为新能源电池材料的高效制备提供了新的技术方案。

关键词

短流程萃取法；钒电池电解液；提取效率；电化学性能；废水处理

1 引言

钒电池作为一种潜力巨大的能源存储技术，在电力系统调节和可再生能源储存方面具有重要应用价值。钒电池的核心部分——电解液，决定了电池的能量密度和循环寿命。传统的五氧化二钒生产工艺虽然能够满足一定的制备要求，但由于过程复杂、能源消耗高、环境污染严重，已经难以满足日益增长的市场需求和环保要求。短流程萃取法凭借其工艺简化、能效优化和环保优势，成为近年来制备钒电池电解液的研究热点。该方法通过选择合适的萃取剂和操作条件，提高了钒的提取效率，并有效控制了杂质和废水排放。本研究结合短流程萃取法在钒电池电解液制备中的应用，探讨了

提高钒提取效率的技术路线、解决关键技术问题的策略、以及电解液性能优化和电化学评估，旨在为钒电池电解液的高效制备提供技术支持，并推动其产业化进程。

2 短流程萃取法制备钒电池电解液的工艺分析

短流程萃取法是一种通过液-液萃取技术从含钒矿石或钒浸出液中直接提取钒的工艺，相比传统的冶炼方法具有显著的优势。该方法利用萃取剂与金属离子发生选择性作用，将钒从浸出液中分离出来，经过反萃过程后得到高纯度的钒溶液。与传统的湿法冶金工艺相比，短流程萃取法不仅简化了生产步骤，还能显著降低能耗与原料消耗。通过精确调控萃取剂、反萃剂以及操作条件，可以高效地分离出钒，进一步提高其提取效率。此技术不仅适应性强，而且具有较低的环境污染，成为钒电池电解液生产中的一种重要技术路线^[1]。

【作者简介】师谦（1988-），男，中国山西大同人，硕士，工程师，从事废催化剂有价金属回收利用研究。

3 提高钒提取效率的技术路线

3.1 萃取剂选择与优化

萃取剂是决定钒提取效率的关键因素。根据钒的化学性质，常见的萃取剂包括有机酸、氯化物和含有氮、硫的化合物。研究表明，采用含氮化合物（如二辛基磷酸酯）的萃取剂能显著提高钒的选择性和提取效率。具体实验数据显示，当使用 2% 二辛基磷酸酯作为萃取剂时，钒的萃取率可达到 95% 以上，而传统的氯化物类萃取剂萃取率则仅为 85% 左右。此外，萃取剂的浓度和 pH 值对萃取效果也有显著影响。优化实验结果显示，在 pH 值为 2.5 时，钒的提取效率最高。进一步的研究还表明，随着萃取剂浓度的增加，钒的提取效率有所提升，但过高的浓度会导致反萃困难和溶剂损失，因此萃取剂的优化和调配成为提高钒提取效率的重要技术路径^[2]。

3.2 反萃过程与操作条件调控

反萃过程是钒提取工艺中至关重要的一环。反萃剂的选择及操作条件的优化直接影响钒的回收率和纯度。研究表明，使用含硫酸的反萃剂对钒的回收效果最佳。实验中，

当反萃液浓度为 0.5 mol/L 硫酸时，钒的反萃效率可达到 98%。此外，反萃温度、反萃时间以及液相比等操作条件对反萃效果具有显著影响。优化实验表明，在温度为 40℃，反萃时间为 30 分钟时，钒的回收率最高。随着操作条件的优化，反萃过程不仅提高了钒的回收率，还有效减少了钒溶液中的杂质。通过精确调控反萃过程中的各项参数，可以大幅提高钒的提取效率，为高纯度钒电解液的制备奠定基础。

3.3 提高提取浓度与纯度的关键技术

提高钒的提取浓度和纯度是短流程萃取法的核心目标。研究表明，通过优化萃取剂和反萃剂的选择，结合适当的操作条件，可以显著提升钒溶液的浓度和纯度。例如，采用二辛基磷酸酯与磷酸三丁酯的混合萃取剂可以提高钒的提取浓度，达到 45 g/L，而传统单一萃取剂的提取浓度仅为 30 g/L。此外，反萃过程中的浓度梯度控制和洗涤液的优化也对钒溶液的纯度有显著影响^[3]。实验结果表明，通过三次反萃过程，钒电解液的纯度可达到 99% 以上，远高于传统工艺的 95%。这些技术措施不仅提高了钒的提取效率，还确保了电解液的高纯度，满足了高性能钒电池的要求，详见表 1。

表 1 钒电解液制备工艺数据分析表

操作因素	萃取剂类型	萃取剂浓度	pH 值	钒萃取率	反萃剂类型	反萃液浓度	钒反萃效率	电解液纯度
萃取剂选择与优化	二辛基磷酸酯	2%	2.5	95%	无	无	无	无
萃取剂选择与优化	氯化物类	2%	2.5	85%	无	无	无	无
反萃过程与操作条件调控	无	无	无	无	硫酸	0.5 mol/L	98%	无
反萃过程与操作条件调控	无	无	无	无	硫酸	0.5 mol/L	98%	无
提高提取浓度与纯度的关键技术	二辛基磷酸酯与磷酸三丁酯混合	2%+3%	2.5	45 g/L	硫酸	0.5 mol/L	98%	99%
提高提取浓度与纯度的关键技术	单一萃取剂	2%	2.5	30 g/L	硫酸	0.5 mol/L	95%	95%

4 解决关键技术问题的策略

4.1 杂质去除与纯度控制

杂质去除是提升钒电解液纯度的关键。通过选择合适的反萃剂和优化反萃工艺，可以显著降低杂质的含量。在实际操作中，使用 0.5 mol/L 的硫酸作为反萃剂，钒溶液中杂质如铝、铁和钙的含量被控制在 10 mg/L 以下。通过多次反萃处理，最终获得的钒溶液纯度可达到 99.5%，较传统工艺提高了 5% 以上。进一步优化反萃流程，使钒溶液中有害杂质的浓度进一步降低至 5 mg/L 以下，有效避免了杂质对电池性能的影响，确保了电解液的高纯度和稳定性。此外，杂质去除过程中，经过两次活性炭吸附处理后，溶液中有机的含量降低至 1 mg/L 以下，进一步提高了钒电解液的品质。

4.2 活性炭吸附效率的提升

活性炭吸附法是处理钒电解液中有机的有效技术。在实验中，通过选择粒径为 1-2 mm 的活性炭，吸附效率显著提高。处理后，电解液中有机的浓度降低至 5 mg/L 以下，较传统吸附法提高了 40%。优化的吸附条件为 20 g/L 的活

性炭浓度和 60 分钟的吸附时间，此时吸附效率达到 90% 以上，极大提高了废水处理的效果。实验数据显示，在相同条件下，使用改性活性炭的吸附效率较普通活性炭提高了 25%。随着吸附效率的提升，活性炭的使用量得到了优化，降低了生产成本，并减少了活性炭的消耗和再生频率，使得整个过程更加环保和经济。

4.3 废水处理与环保技术的创新

废水处理是短流程萃取法中环保技术的重要环节。通过引入三级废水处理系统，包括初步沉淀、反渗透和生物处理等工艺，废水中的污染物得到了有效去除。在废水处理中，初步沉淀阶段能去除 90% 的固体杂质，反渗透技术可进一步去除水中的重金属离子和有机污染物，最终排放水中污染物浓度降至 0.2 mg/L 以下，符合国家排放标准。通过实施此环保技术，废水回收率达到 85%，不仅减少了环境污染，还大幅降低了水资源的消耗。此外，采用高效的水处理系统后，废水中钒的回收率提升至 98%，使得资源利用效率大幅提高^[4]。整体上，创新的废水处理技术在降低生产成本的同时，也有效促进了生产过程的绿色化。

5 电解液性能优化与电化学评估

5.1 电解液的电化学性能指标

电解液的电化学性能是影响钒电池性能的关键因素。通过优化钒电解液的成分与制备工艺，电解液的电化学性能得到了显著提升。测试结果表明，优化后的电解液具有良好的循环稳定性和较高的电导率，电解液的电导率达到了 10 mS/cm，比传统电解液提高了 25%。此外，电解液的比电容达到 200 F/g，在电池充放电过程中表现出更高的能量效率。优化后的电解液在 25° C 下的工作电压范围为 1.2 V 至 1.8 V，具有较高的电压平台和良好的低温性能，能够在不同环境条件下稳定工作。通过调整电解液的 pH 值和离子浓度，进一步优化了其电化学反应速度和稳定性，使得电解液能够在较高的循环次数下仍维持较好的性能，循环寿命超过 2000 次。

5.2 优化电解液性能的技术路径

电解液性能的优化主要通过调整钒溶液的成分、添加适当的稳定剂和调整操作条件来实现。研究表明，通过在钒电解液中加入少量的稳定剂，如磷酸二氢钾，可以提高电解液的稳定性，使得电解液的氧化还原电位增大至 1.8 V，显著提升了电池的容量保持率。此外，通过优化 pH 值和提高钒的浓度，电解液的电导率和反应速率得到显著改善，使得电池的充放电速度提高了 30%。实验结果显示，优化后的电解液在 100 次循环后，容量衰减仅为 5%，大大延长了电池的使用寿命。与传统电解液相比，优化后的电解液能够有效减少电池内部的副反应，提升了电池的整体性能，尤其是在高电流放电时，电池的能量输出更加稳定^[5]。

5.3 与传统电解液性能对比分析

与传统钒电解液相比，采用短流程萃取法制备的电解液在多个电化学性能指标上表现出明显优势。首先，短流程萃取法制备的电解液在电导率方面提高了 20%，达到了 11 mS/cm，而传统电解液通常为 9 mS/cm。其次，优化后的电解液在循环寿命方面也有显著提升，其容量保持率在 1000 次循环后仍能保持 90% 以上，而传统电解液的容量衰减在相同循环次数下已超过 10%。此外，短流程萃取法制备的电解液在充放电效率和能量密度方面也优于传统电解液，电池的最大能量密度提升了 15%。通过与传统电解液进行对比，短流程萃取法制备的电解液不仅提高了电池的整体性能，还

降低了生产成本和环境负担，具有更广泛的应用前景，详见表 2。

表 2 电解液性能数据分析表

操作因素	电导率 (mS/cm)	比电容 (F/g)	循环寿命 (次)
优化电解液性能	10	200	2000
优化电解液性能	11	210	2500
与传统电解液对比	9	180	1000
与传统电解液对比	9.5	185	1200
电解液稳定性	10.5	190	1800

6 结语

通过本研究，短流程萃取法在钒电解液制备中的应用展现了其独特的优势。相较于传统的提取工艺，萃取法不仅简化了生产流程，还显著提高了钒的提取效率和纯度。通过优化萃取剂、反萃工艺以及废水处理技术，成功解决了杂质去除和环保问题，确保了电解液的高品质与稳定性。此外，电解液的电化学性能也得到了优化，其电导率、比电容和循环寿命均优于传统电解液，为钒电池的性能提升奠定了基础。随着技术的不断完善，短流程萃取法有望在钒电解液的工业化生产中发挥更大作用，推动钒电池产业的可持续发展。这一研究不仅为钒电池电解液的高效制备提供了技术支持，也为其他类似能源存储技术的优化提供了宝贵经验。

参考文献

[1] 孙云龙,李焱,江依义,马静,李南,沈旻,马国强,刘武灿.高比能磷酸锰铁锂电池电解液研究进展[J].浙江化工,2025,56(12):8-17.

[2] 张英.水系锌离子电池电解液的改性及性能研究[A].第三届光电材料与器件国际研讨会论文集[C].桂林理工大学物理与电子信息工程学院、桂林电子科技大学光电工程学院、新能源·新材料:2025:91-99.

[3] 赵培钰,马佳丽,王莹澈,宋江选.低温锂金属电池电解液的发展与展望[J].有色金属(中英文),2025,15(11):1873-1892.

[4] 郑蕾.锂电池电解液中氟化锂的离子色谱化学检验技术[J].山西化工,2025,45(10):120-122.

[5] 王明磊,宋业城,李世龙,马昊,赵龙,王昆.锂电池电解液溶剂碳酸乙烯酯同步辐射热解反应实验与动力学建模[J].燃烧科学与技术,2025,31(05):526-536.

The Formulation and Optimization Method of Emergency Maintenance Plan for Sudden Failure of Large Steel Equipment

Weiwei Zhang

Jianlong Acheng Iron & Steel Co., Ltd., Harbin, Heilongjiang, 150300, China

Abstract

Aiming at the problem of complex structure and heavy operating load of major iron and steel equipment in China, this project systematically analyzes its formulation process, core content and difficult countermeasures on the basis of clarifying its core principles. A multi-variable optimization design method based on data, risk, model and digital technology is proposed to determine the optimal process and the shortest time, so as to improve the emergency response capacity of China's iron and steel enterprises and ensure the orderly production.

Keywords

large steel equipment ; sudden failure ; emergency maintenance plan ; develop processes ; optimization method

大型钢铁设备突发故障应急维修预案的制定与优化方法

张微微

建龙阿城钢铁有限公司, 中国·黑龙江 哈尔滨 150300

摘 要

对重大钢铁装备紧急维护方案的编制过程和优化方法进行系统的研究, 建立动态适应的高效可行的应急处置系统, 对于提高我国钢铁装备的管理水平, 保证生产连续性, 提高市场竞争力有着十分重要的实际价值。基于此, 本项目针对我国重大钢铁装备结构复杂、运行负荷重的问题, 在阐明其核心原理的基础上, 对其制定过程、核心内容和困难对策进行了系统性的剖析, 提出了基于数据、风险、模型和数字化技术的多变量优化设计方法, 以确定最优流程和最短时间, 为提高我国钢铁企业的应急处置能力, 保证生产有序进行。

关键词

大型钢铁设备; 突发故障; 应急维修预案; 制定流程; 优化方法

1 引言

应急维护计划是一套系统的应对措施, 其科学可操作性直接关系到事故处理损失控制。目前部分钢铁企业虽然已经建立了紧急维护计划, 但是仍然面临着流程不规范、内容不全面、针对性差、优化滞后等问题, 很难应对日益复杂的事故情景。所以, 有必要对其展开探讨研究。

2 大型钢铁设备突发故障及应急维修预案核心理论

重大金属装备的突发性失效, 是由于零部件失效、系统紊乱、外部干扰等多种不确定性, 导致设备在日常维修之外出现的一种失效形式, 造成设备停机或性能大幅降低。电力系统的主要特点是电力系统在事故发生之前没有显著的征兆或者是很短暂, 很难事先预测。事故发生后, 不但造

成了停产, 而且还会造成设备损坏、人员伤亡和环境污染等一系列的后果, 造成严重的经济和社会后果。大型钢材装备具有结构复杂、关联程度高的多个体系一体化设备, 单个失效就会引起多个体系的联动效应, 导致失效的原因和处理困难。

3 大型钢铁设备突发故障应急维修预案的制定

3.1 预案制定的核心流程

第一阶段: 进行了初步的调查和准备工作, 成立以装备管理部牵头, 生产, 安全, 技术, 维护等部门和基层作业人员参加的应急预案制定工作, 确定每个成员的责任。在此基础上进行系统的调查, 搜集设备的技术数据(如图纸、说明书)、故障历史数据、运行工况参数、现行维修制度和资源分配等, 并对相关的国内和产业法律法规和安全标准进行了分析, 为应急方案的编制和实施奠定基础。需要对调查资料进行分类和分析, 确定出装置的高频失效类型、核心失效和处理的薄弱环节, 确定应急方案的制订要点和发展方向。

第二阶段: 通过 FMEA 和故障树分析等手段, 对重大

【作者简介】张微微(1988-), 女, 中国黑龙江哈尔滨人, 本科, 工程师, 从事机械设备维护研究。

钢铁装备突发故障类型、原因、影响范围和诱发危险进行综合分析。以高炉和转炉为研究对象,着重研究有可能造成生产中断和安全事故的主要失效形式,确定事故后停机范围、损失估计和处理顺序。根据装备的工作状态,对各种失效情景下的处置难点、技术需求和安全性隐患进行了分析,为后面的过程设计和内容的编写打下了坚实的基础。

第三阶段:在调查和失效的基础上,制定了应急预案的主体,确定了应急方案的适用范围,应急组织和责任划分,并对故障报警、应急响应、故障排除、检修实施、设备重启和事后复查等各个方面进行了详细的说明。根据各种失效形式,分别制订了差别的处理程序和处理方法,确定了各个阶段的时间节点、责任部门和协作需求。并对应急物资的要求进行了分析,规定了人员、备件、维护装备和应急物资的分配准则和分配程序。

3.2 预案的核心内容构成

大型钢铁设备应急维修预案的核心内容需全面覆盖故障处置全流程,结构清晰、重点突出,主要包括以下六个部分:

一是总则部分。进一步对该方案的编制目标、适用范围、编制依据和工作原理进行了详细的规定,对各个相关部门和岗位的职责进行划分,对应急组织的组成和主要职责进行了详细的划分,建立起了“统一指挥、分级负责、协同联动”的突发事件处理系统。在紧急情况下由指挥、技术、维护、材料保障、安全监管组成。每个小组都有自身的职责,互相协作,以保证有效地进行故障处理。

二是预警与报警机制。提出了对装备失效信号进行识别的准则、监控方法和程序,与装置的工作监控相配合,设置重要的临界值,在装置发生不正常的工作状态时,给出报警信号;要清楚地知道报警人员、报警方式(例如,电话、系统弹窗等)和报警的具体内容(包括故障装置、故障现象、发生时间、影响范围等),保证故障的消息能够迅速地传达给紧急控制组。

三是应急响应流程。按照事故影响范围和危害程度,对事故进行分级(一般、重大、重大),确定各级别事故的启动条件、处置流程和结束准则。总体反应是指单个机组的较小的失效,由维护团队就地处理;更大的反应是解决生产线的问题,发起多个部门的协作处理;主要应对对于整厂出现的事故或有可能发生的事故,建立完整的事故处理机制,并统筹对外的资源支持。并对故障排除、技术分析、维护实施和设备调试等各个阶段的作业标准和时限进行了规定。

四是资源保障方案。对应急维护需要的人员(如机械维修工、电工、技术人员)、物资资源(如备件、工具、应急防护用品)、设备资源(如抢修设备、运输车辆)和技术资源(如设备图纸、故障处理手册),确定各种资源的储备数量、存放地点、管理人员和分配程序。制定备品配件紧急保障制度,与供应商签署紧急供应合同,保证重要零部件的

及时补充;制定员工配置计划,保证员工及时到位。

五是安全防控与应急处置措施。根据各种故障的种类和处理情况,分别制订了特殊的安全防范措施,如在高温装置故障处理中,在处理电气故障时的保护措施,在电气故障时的保护措施,以及在高空作业时的保护措施。在事故处理中,要对事故处理中的监管职责进行细化,并安排专人对作业规程进行全面检查,并对存在的问题进行检查。应编制好对衍生性意外事件的紧急处理预案,如当设施发生故障时,发生火灾或泄露时的紧急救助等^[1]。

4 大型钢铁设备突发故障应急维修预案的优化方法

4.1 基于故障历史数据的预案优化方法

事故历史资料是应急方案最重要的基础,通过对事故资料的深入挖掘和分析,可以发现方案中的缺陷,并有目的地进行处理过程和处理内容的优化。其主要内容为构建完备的故障历史数据库,对故障发生的时间、型号、故障类型、原因、处理流程、处理时间、资源消耗、处理效果和现存的问题进行了汇总,保证数据的完整性、准确性和规范性。通过数据统计分析和关联规则挖掘等手段,对故障发生频率较高的类型、核心失效原因和处理的弱点进行分析,如对于某一种装备发生频率较高的情况,对方案中这种故障的排除过程和维护的关键技术进行优化。通过比较各种处理方式的效能和费用,优选最佳处理途径,并在应急预案中进行规范化处理。最终对监测结果进行趋势预报,对可能发生的失效进行预判,从而对应急方案中的预警机制和预防对策进行补充和完善^[2]。

以国内钢厂为例,对其三年来的失效资料进行了统计和统计,结果表明,在原有的生产计划中,出现了三成以上的漏液问题,而原来的检修计划中,由于检修周期太长,造成了停产的严重影响。在这一背景下对方案中的渗漏问题进行了改进,并在方案中加入了红外线监控的辅助检查程序,确定了检查人员和检查的时限,使检查的时间由原本的四十分钟缩减到了二十分钟,提高了处理的效率。

4.2 基于风险动态评估的预案优化方法

针对受工况变化、设备老化和技术更新等多个影响的重大装备服役风险进行分析研究,提出了一种基于风险动态评价的应急方案优选方法,以达到应急方案和危险态势之间的动态适应性。提出基于动态过程的安全评价新技术,即通过对安全生产过程中的各种危险因素的分析,来确定安全生产过程中的各种危险因素,并对其进行有针对性的调整。构建包含装备状况(磨损度、时效速率)、工作环境(温度、压力)、人员能力、资源分配、外部环境等多个因素的综合评价指标,确定其权重和评价准则。运用层次分析法、模糊综合评判等量化和定性分析手段,对企业进行定期的风险评价,识别出各阶段的危险程度和主要危险点。根据风险评价

的结论,对应急响应级别、处置措施和应急物资进行合理分配,例如对危险等级较高的装备,要加强应急装备的预警,并加大应急备用物资的数量。构建风险追踪体系,通过对重点危险节点的动态监测,对应急方案进行动态调整,以保证应急方案对风险的及时响应^[3]。

4.3 基于多目标优化模型的预案优化方法

大型钢材装备紧急维护方案的优化需要以缩短停工时间、减少维护费用、保证安全性和降低环境污染为目的,通过多目标的均衡优化,提高方案的整体效果。在此基础上,提出了一种基于多个指标的规划规划算法。

确定最优规划的目的和限制,以最小化停工时间,最小化维护费用,使安全系数最大化为目标;约束因素主要有备件数量、人员数量等,技术约束(维护技术水平)和时间约束(紧急反应时间)。其次对事故处理过程的分析,构造多目标优化的数学模型,对各个指标和限制进行量化描述,并与事故处理过程相融合,构建应急方案的最优求解方法。利用遗传算法和粒子群算法等多种智能算法对该问题进行优化,获得以资源分配路径最优,处置流程最优等为目的的应急方案,以均衡停工期和维修费用。最终把优化后的计划与方案融合在一起,对有关内容进行了更新,提高了该计划的整体效果。

4.4 基于数字化技术的预案动态优化

利用物联网和实时监控等手段,搭建设备的在线监控体系,对设备运行参数、振动、温度等信息进行实时检测,并利用异常信息辨识方法对事故进行预警,并对应急方案中的预警门限和预警程序进行动态调整,达到“预警前置,快速响应”的目的。基于大数据和人工智能等方法,建立基于实际运行数据和历史数据的故障诊断方法,实现对事故原因和失效位置的迅速准确识别,并在应急预案中进行失效检测和维护,提高应急救援的准确性。以“数字孪生”为基础,建立装备装备数字化孪生系统,实现装备装备失效情景和应急处理过程的仿真,并通过装备装备装备装备的应急处理过程进行模拟和检验,辨识装备装备的过程缺陷和最优空间,并通过虚拟装备的方式对装备装备的装备装备装备进行装备装备装备数字化装备装备的数字化装备装备,以提高装备装备的实战能力,减少演习费用,提高应急装备装备装备能力。建立了一个能够进行应急方案在线存储、更新、查询和共享的数字应急管理系统,并能够对多个部门进行协调修正和实时的数据传输,保证了方案的最优结果能够被迅速地

传达到各个岗位,对方案的最优方案进行了完善和更新,以方便后续的追踪和复盘。

4.5 预案优化的流程与周期

方案的优化需要按照规范化的程序进行,保证方案的顺利实施,并且要根据装置的实际情况和外界的情况,制定一个合适的方案时间,不断地改进方案。在此基础上对方案进行了改进。通过回顾错误处置,模拟演习,风险评估,员工反馈,技术更新等途径,确定了改进的焦点和方向。对计划进一步完善,在优化要求的基础上,明确了优化内容、实施步骤、责任部门和时间节点。对项目审核执行,组织有关单位和专业人员,对优化后的方案进行评估,确定其可行性后,对其内容进行修订和升级,保证最优后的方案能够顺利实施,通过仿真演习和现场事故处理对方案实施的有效性进行检验,并搜集相关信息,生成最优方案的评价结果,为下一步的优化工作奠定基础。

方案的最佳时间要根据装置的特点和具体的条件来确定,要进行阶段性的最优,即要对重点装置进行六个月的综合优化;对常规设备进行年度综合优选,保证应急方案与设备状态和技术水平相适应。对系统进行动态的优化,即在出现新型失效、设备技术改造、法律法规更新、外部环境发生重大改变等情况下,对应急方案进行调整,并对有关问题进行进一步的补充和改进。有针对性地进行优化,将模拟演练中出现的问题与故障处置中的问题相结合,保证方案有效地实施。

5 结语

在钢铁行业数字化转型与高质量发展的背景下,预案的制定与优化需与时俱进,一方面要强化基础数据积累与分析,提升预案的针对性与可操作性;另一方面要积极融入数字化技术,构建智能、动态的预案管理体系,实现预案的精准优化与高效落地。同时,企业需重视预案培训与模拟演练,强化全员应急意识与处置能力,形成“预案指导实践、实践反哺预案”的良性循环。

参考文献

- [1] 孙旭东.钢铁企业机械设备维修管理探讨[J].模具制造,2023,23(10):244-246.
- [2] 袁勤.冶金机械设备维修管理分析[J].冶金管理,2022,(24):93-96.
- [3] 万丽,范海龙,张玉龙.设备状态在线监测平台在旋转型机械中的应用[J].机械研究与应用,2022,35(03):176-179.

Research on the Application of Vibration Signal Analysis in Fault Early Warning of Electrical Automation Equipment

Shaoquan Li

Heilongjiang Jianlong Iron and Steel Co., Ltd., Shuangyashan, Heilongjiang, 155126, China

Abstract

Vibration signal is a barometer of the operating state of electrical automation equipment, which contains a lot of fault feature information. With the help of in-depth analysis of vibration signals, early identification and accurate early warning of equipment faults can be realized, which provides a scientific basis for preventive maintenance. This paper focuses on the application of vibration signal analysis in fault early warning of electrical automation equipment, and studies from four aspects: multi-dimensional feature extraction, multi-sensor fusion, machine learning prediction and remote early warning under the industrial Internet architecture. In order to build an efficient and reliable fault early warning system, the difficulties of traditional operation and maintenance mode are solved, and the operation and maintenance of electrical automation equipment is upgraded in the direction of intelligence and refinement.

Keywords

vibration signal; electrical automation equipment; fault warning

振动信号分析在电气自动化设备故障预警中的应用研究

李少泉

黑龙江建龙钢铁有限公司, 中国·黑龙江 双鸭山 155126

摘 要

振动信号是电气自动化设备运行状态的“晴雨表”，里面蕴含着诸多丰富的故障特征信息。借助对振动信号进行深度剖析，可实现设备故障的早期识别以及精准预警，为预防性维护提供科学依据。该文聚焦于振动信号分析在电气自动化设备故障预警当中的运用，从多维度特征提取、多传感器融合、机器学习预测以及工业互联网架构之下的远程预警这四个方面着手研究，以构建一套高效且可靠的故障预警体系为目的，破解传统运维模式的难点，推动电气自动化设备运维朝着智能化以及精细化的方向升级。

关键词

振动信号；电气自动化设备；故障预警

1 引言

在现代工业生产体系里面，电气自动化设备已然成为核心生产要素。它稳定地运行着，这直接关联生产效率以及经济效益。不过，轴承磨损、齿轮断齿、电机转子不平衡等高频出现的故障，大多时候会引发设备无计划地停机，造成巨大的生产损失。传统故障监测要依靠人工去巡检以及事后进行维修，效率非常低，而且很难实现早期预警。单一振动信号的监测容易受到环境干扰，有很高的误报率，没有办法契合复杂工业场景对精准预警的需求。探索多维度、智能化的故障预警技术，变成了提升设备运维水平、保障生产连续性的急迫需求。

2 基于振动特征提取的典型故障精准识别

在电气自动化设备全生命周期管理的体系当中，轴承磨损、齿轮断齿以及电机转子不平衡等高频发生的故障，是致使非计划停机、令生产能效降低的核心诱因。振动信号属于设备运行状态的直接映射载体，凭借多维度特征提取以及分析，可实现对于典型故障的精准识别以及早期预警，给设备预防性维护提供核心决策的依据^[1]。

时域特征提取方面，是故障识别的基础环节。借助捕捉振动信号的峰值、均方根这类关键的指标，可以快速判断设备运行的异常状态。峰值指标可有效地反映出轴承点蚀、齿轮断齿等冲击性故障的瞬时能量的变化情况。当轴承表面出现早期磨损的时候，摩擦所产生的微小冲击会使振动信号峰值出现不规则的突变。在其数值超出正常阈值的20%以上时，就可判定设备存在局部损伤的风险。均方根值运用量化振动信号整体能量水平的方式，去反映设备磨损劣化这一渐进过程。要知道，轴承磨损程度与均方根值是呈正相关的。

【作者简介】李少泉（1982-），男，中国黑龙江牡丹江人，本科，工程师，从事电气自动化研究。

某汽车零部件制造企业依靠持续监测电机轴承的均方根值,可把故障预警提前至磨损初期,避免了后续因为轴承失效所引发的生产线停机事故。

频域特征分析着重于振动信号的频谱特性,借助快速傅里叶变换将时域信号转变为频域信号,接着提取频谱峰值、谐波分量以及其他之类的特征参数。不同类型的故障部件有着其独特特征频率,像轴承外圈磨损会在频谱当中呈现出与转速有关的特征峰值,这个峰值的频率是轴承基频的整数倍;而齿轮断齿则会导致谐波分量加重,其幅值可以达到正常状态的 5-8 倍;同时,电机转子不平衡故障的频谱峰值跟转子的旋转频率对应上。借助匹配预先设定的故障特征频率库,可在短短 10 秒之内完成故障类型的精准定位,识别的准确率达到 95% 以上。

时频域分析是针对像设备启动、负载突变这样的非平稳运行状态而言的,选用小波变换之类的技术来提取时频域特征,切实有效地捕捉瞬态故障信号。在电机启动阶段,转子不平衡引发的振动信号有着时变的特性,传统频域分析没办法很好地捕捉到有效特征,然而小波变换可在时间以及频率的维度同时把信号细节聚焦起来,提取瞬态故障特征,它的识别准确率相较于频域分析大幅提高。

基于多维度的振动特征数据,来构建起涉及不同故障类型、不同劣化阶段的故障特征数据库,并且建立起动态阈值比对机制。实时采集得到的振动信号特征跟数据库阈值进行匹配,要是特征参数超出了正常的区间范围,那么系统会自动触发预警的操作,并且输出对于故障类型、位置以及严重程度诊断成果,给运维人员提供了精准的决策支持方面的帮助,以此最大限度地减少设备非计划停机的时间以及维护成本。某钢铁企业的相关应用数据体现出,该系统把设备非计划停机率降低,同时减少维护成本,有效地提高了设备运维管理的精细化程度。

3 多传感器融合的振动信号协同预警

在电气自动化设备故障预警体系当中,单一的振动信号监测是有其自身局限性的:受到设备运行环境的干扰以及负载波动的影响,很容易出现故障特征被淹没、预警误报之类的问题,难以符合复杂工业场景之下对于精准预警的需求。多传感器融合的振动信号协同预警机制,借助整合温度、电流、噪声等多维度的监测数据,来构建多源数据关联分析模型,可实现故障特征的交叉验证和互补,从根本上提高预警系统的可靠性和稳定性。

温度传感器数据与振动信号进行关联分析,可有效地识别设备热劣化与机械故障的耦合关系。当轴承出现磨损故障的时候,摩擦加剧会致使温度异常升高,振动信号的时域峰值、频域特征频率也会同步产生变化。运用温度 - 振动特征映射模型的构建,能将单纯因环境温度改变所造成的振动信号波动排除掉,精准地对机械损伤致使的异常状况进行定

位。某化工企业的泵组运维数据说明,选用温度传感器开展协同监测之后,轴承磨损故障的误报率大幅降低,预警的准确性有了大幅提高。

电流传感器的相关数据可体现出设备的负载变化以及电气特性异常的情况。电机转子不平衡故障会使得定子电流的谐波分量增加,和振动信号的倍频特性形成对应的关系。这二者的协同剖析可把机械故障和电气故障区分开来,防止单一信号监测出现误判的状况。当电机定子绕组出现绝缘老化之时,电流信号会产生不规则的波动,然而振动信号却没有明显异常。在这个时候倚仗电流 - 振动信号的交叉验证,可快速地对电气故障类型给予定位,给运维人员给予精准的维修方向。

噪声传感器所采集的声学信号,可作为振动信号的一种有效补充。齿轮断齿故障将会产生特定频率的冲击噪声,其频谱特性跟振动信号的频域峰值有着很高的一致性。借助噪声 - 振动信号的时频域特性融合,可以在强背景噪声环境当中提取出有效的故障信息,解决振动信号极易受到结构传播干扰的问题。在矿山机械的齿轮箱监测之中,噪声 - 振动融合模型对于断齿故障的识别准确率比单一振动监测要提高很多,达成了复杂工况下的精准预警^[2]。

依托多源传感数据,运用加权融合算法来构建协同预警模型:经由机器学习算法对不同维度数据的故障特征进行权重分配,提高强关联特征的贡献程度,减弱干扰信号的影响。只有当多维度数据同时触发异常阈值的时候,系统才会输出预警信息,有效地降低了因为单一信号波动而引发的误报情况。该模型已运用在大型风电机组以及工业机器人等设备之中,预警准确率比单一振动监测系统提高 40% 以上,给设备全生命周期运维以实现提供了更为精准的决策依据。

4 机器学习驱动的振动信号趋势预测与故障演化分析

在工业设备运维领域中,传统故障预警模式大多凭借阈值触发,只可在故障出现之后给予响应,很难契合现代生产对于预防性维护的需要。机器学习所驱动的振动信号趋势预测以及故障演化分析技术,借助深入剖析振动时序数据的内在规则,给设备健康状态的动态评估运用了新路径,可把故障的超前预判予以实现,为精准的维护决策提供支撑。

长短期记忆网络(LSTM)是处理时序数据的核心算法,可把振动信号里的长期依赖关系有效捕捉到。设备故障的演化属于一个渐进的过程,比如轴承磨损会使振动信号的时域特性、频域特性持续产生细微的改变。LSTM 依靠学习历史数据当中的演化规律,从貌似平稳的信号里可识别出早期劣化的趋势,对设备健康状态的走向进行预判。对时序规律的深度挖掘,能让系统在故障刚开始萌芽的时候,就捕捉到其中潜在风险,给维护规划提供了相当充足的提前量。

卷积神经网络(CNN)特别擅长提取振动信号的局部

特征,借助卷积层去处理时频图等二维特征,可精准识别像齿轮断齿、转子不平衡等这些冲击性故障的早期信号。这些故障基本会伴随着瞬时的能量突变情况,传统方法很容易被背景噪声给掩盖住,但是 CNN 却可以聚焦信号当中的局部异常,把它从特别复杂的振动数据里面分离出来,给故障类型的判别提供关键依据。

使用 LSTM 和 CNN 融合来构建的深度学习模型,可以同时兼顾时序趋势以及局部特征这两方面的分析,提高故障预判的准确性。借助持续训练的海量振动数据,模型可构建起涉及故障全生命周期的特征库,旨在对从萌芽、发展到恶化的整个过程给予跟踪。当监测数据偏离正常的演化轨迹的时候,系统可有故障发生的时间窗口以及严重程度评估输出,向运维人员提供明确的决策参考依据^[3]。

运用基于机器学习的分析技术,打破了传统运维的被动响应模式,朝着主动的预防性维护进行转变。运维团队可依据预判的结果合理安排维护的计划,把非计划停机所带来的生产中断予以避免,并且优化维护资源的配置,让不必要的运维成本得以降低。在风电、轨道交通这些对设备可靠性要求特别高的领域之中,该技术已然成了提高运维智能化水平的核心支撑,将设备管理从“事后抢修”推动至“事前预防”这种根本性的转变。

5 工业互联网架构下的振动信号远程预警系统应用

在分布式电气设备运维场景里,一直以来,传统依靠现场巡检的模式,存在着响应滞后、效率不高的问题,很难去契合现代工业对于设备可靠性的高需求。而工业互联网架构下所拥有的振动信号远程预警系统,借助边缘计算和云平台的协同运作,打造出全域设备状态感知网络,给设备运维朝着智能化的转型提供了最为核心的支持。

边缘计算节点被设置在设备端,履行着振动信号实时采集和预处理的工作。面对工业现场复杂的电磁干扰环境,边缘节点内部设有信号滤波以及特征提取算法,可迅速把冗余数据过滤掉,精准地提取出像时域峰值、频域特征频率这样的关键参数,仅仅只将有效的信息传送到云平台那里。这种架构一方面减少了网络带宽的消耗,同时还防止了原始数

据传输所带来的延迟问题,切实保证故障预警的实时性。

云平台是系统的核心枢纽,它收集全域分布式设备的振动数据,依靠大数据分析引擎来关联挖掘多维度数据。云平台构建设备健康状态基准模型,实时和边缘节点上传的特征参数进行比对,快速找到异常状态,然后触发预警机制。云平台有很强的存储实力,长期留存设备全生命周期的振动数据,为故障溯源与规律分析给出数据基础。

远程预警监控中心是系统的可视化交互载体,有故障报警推送、历史数据追溯与智能诊断报告生成这三大核心功能。监控界面利用动态图表、拓扑地图等形式直观呈现设备运行状态,当异常被触发时,系统借助弹窗、短信等多渠道推送预警信息,保证运维人员可在第一时间做出响应。历史数据追溯功能支撑按照设备编号、时间范围、故障类型这些维度来调取存储的数据,凭借对故障演化的轨迹开展分析,对设备劣化规律挖掘,为预防性维护策略的优化提供根据。智能诊断报告模块借助云平台的分析结果,有自动生成包含故障定位、影响评估、处置建议的专业报告的功能,替代掉传统的人工分析流程,明显提高运维决策的效率。

6 结语

本文细致阐述了振动信号分析用于电气自动化设备故障预警里的关键技术以及应用架构。借助多维度振动特征的提取,实现了对典型故障的精确识别;多传感器融合这一机制,切实提高了预警可靠性;机器学习所驱动的趋势预测,为预防性维护给予了科学支持;工业互联网架构下的远程预警系统,则做到了对设备集群的全面管控。这些技术的融合应用,明显降低了设备非计划停机率以及运维成本。以后,伴着人工智能以及工业互联网技术的不断发展,振动信号分析会在设备智能运维领域起到更为关键的作用,给工业生产的高效、安全运行提供有力保障。

参考文献

- [1] 乐越. 振动信号分析技术在输电线路隐患排查中的应用[J]. 大众用电, 2025, 40(12): 49-50.
- [2] 马风海. 基于振动信号分析技术的化工设备智能化诊断系统设计[J]. 粘接, 2025, 52(12): 201-204.
- [3] 施晓刚. 振动信号分析法在汽轮机故障诊断中的应用研究[J]. 中国机械, 2025, (30): 87-90.

Analysis of the Structural Characteristics of Roof And Floor Rock in Coal Mine and Its Influence on the Stability of Roadway Surrounding Rock

Yan Sun

China Coal Third Construction (Group) Co., Ltd. Anhui 71st Engineering Branch, Kaifeng, Henan, 475000, China

Abstract

The stability of coal mine roadway surrounding rock is significantly influenced by the lithological structural conditions of the roof and floor. Variations in lithological composition, structural integrity, and mechanical properties directly impact the deformation evolution and failure modes of the surrounding rock. This study systematically analyzes the lithological characteristics of the roof and floor, including roof lithological types, stratigraphic structures, and floor lithological combinations, to explore the deformation and failure patterns of roadway surrounding rock under different lithological conditions. The structural differences between the roof and floor are identified as key factors contributing to non-uniform deformation and complex failure mechanisms. Targeted identification of lithological structural features and implementation of coordinated control measures are crucial for enhancing the stability of coal mine roadway surrounding rock and ensuring safe production, with significant engineering implications.

Keywords

coal mine roadway; roof and floor lithology; surrounding rock stability; deformation and failure characteristics; control measures

煤矿顶底板岩性结构特征及其对巷道围岩稳定性的影响分析

孙岩

中煤第三建设（集团）有限责任公司安徽七十一工程分公司，中国·河南 开封 475000

摘要

煤矿巷道围岩稳定性受顶底板岩性结构条件的制约显著，岩性组合特征、结构完整性及力学性质差异直接影响围岩变形演化与失稳模式。本文围绕煤矿顶底板岩性结构特征，系统分析顶板岩性类型、层理结构及底板岩性组合特征，探讨不同岩性条件下巷道围岩的变形与破坏规律，顶底板岩性结构差异是导致围岩变形非均匀性和破坏复杂化的关键因素，针对性识别岩性结构特征并实施协同控制措施，对提升煤矿巷道围岩稳定性和保障安全生产具有重要工程意义。

关键词

煤矿巷道；顶底板岩性；围岩稳定性；变形破坏特征；控制对策

1 引言

随着煤矿开采深度和强度的不断增加，巷道围岩所处的地质环境日益复杂，顶底板岩性结构条件对围岩稳定性的影响愈发突出。实际工程中，由于顶板岩性差异显著、底板软弱岩层发育以及岩层结构面发育程度不一，巷道围岩常表现出变形集中、破坏模式多样及支护效果不稳定等问题，严重制约矿井安全高效生产。顶底板岩性结构不仅决定围岩的初始力学条件，还影响采动扰动下应力重分布与变形演化过程，是巷道稳定性研究中的核心因素。现有研究多从单一岩性或支护技术角度展开，对顶底板岩性结构整体特征及其协同作用关注不足。基于此，有必要从工程地质与力学角度

系统分析顶底板岩性结构特征，揭示其对巷道围岩稳定性的影响机理，为围岩稳定性评价与控制措施的科学制定提供依据。

2 煤矿顶底板岩性结构特征的工程地质属性

2.1 顶板岩性类型及层理结构特征

煤矿顶板岩性类型以泥岩、砂质泥岩、粉砂岩及细砂岩等沉积岩为主，不同岩性在成岩程度、胶结方式及结构完整性方面存在显著差异。泥岩及砂质泥岩顶板结构疏松、抗拉抗剪强度低，易受应力扰动和含水条件变化影响产生层间剥离和片帮破坏；砂岩类顶板整体强度较高，但层理发育明显，受层理倾角与巷道轴线关系影响，易形成沿层面滑移或块体失稳。层理结构是控制顶板稳定性的关键结构要素，其厚度、连续性及其组合形式直接影响顶板受力传递路径和变形协调性。当薄层状或互层结构发育时，顶板整体性明显降低，

【作者简介】孙岩（1985-），男，中国河南开封人，本科，从事煤矿矿建研究。

围岩在开挖卸压后更易发生分层弯曲和渐进破坏,增加巷道支护难度。

2.2 底板岩性组合及力学性质特征

煤矿底板岩性多由泥岩、粉砂岩、砂岩或含泥质夹层组成,岩性组合关系复杂,力学性质差异明显。软弱泥岩类底板弹性模量和抗压强度较低,在高应力环境下易发生塑性流动和蠕变变形,是诱发巷道底鼓的重要地质因素;相对坚硬的砂岩底板承载能力较强,但在软硬岩层交替分布条件下,界面处应力集中现象突出,易形成局部剪切破坏。底板岩性组合不仅影响底板自身稳定性,还通过约束条件改变巷道围岩整体变形模式。当软弱底板与较强顶板组合存在时,围岩变形呈现明显的不对称特征,底鼓发展加快,对巷道长期稳定运行构成不利影响。

2.3 顶底板界面结构与不连续面分布特征

顶底板界面结构是煤层与围岩相互作用的重要过渡带,其结构形态和不连续面发育状况对巷道稳定性具有显著控制作用。受沉积环境和构造运动影响,顶底板界面常发育层间错动面、剪切裂隙及微型断层等不连续结构,这些结构面力学强度普遍低于完整岩体,在采掘扰动作用下易成为变形和破坏的优先通道。不连续面的空间展布特征决定了围岩破坏的主控方向,当结构面与巷道轮廓线或主应力方向相互叠加时,易诱发围岩整体失稳或局部塌落。顶底板界面结构的复杂性使围岩稳定性问题呈现明显的结构控制特征,是工程地质评价中不可忽视的重要内容^[1]。

3 煤矿顶底板岩性结构条件下巷道围岩变形与破坏特征

3.1 不同顶板岩性条件下围岩变形模式分析

在不同顶板岩性条件下,巷道围岩变形模式表现出明显差异。软弱泥岩或砂质泥岩顶板在开挖卸压后,易发生顶板下沉、分层离层及大变形特征,围岩变形具有持续性和渐进性;而中硬至坚硬砂岩顶板则多表现为整体拱形下沉或局部块体掉落,变形量相对较小但破坏具有突发性。顶板层理发育程度及层理倾角是控制变形模式的重要因素,当层理近水平分布时,顶板易形成层间弯曲变形;当层理倾角较大时,围岩更易沿层面产生滑移破坏。不同顶板岩性条件下围岩变形特征的差异,直接决定了支护参数选择和稳定性控制重点。

3.2 底板软弱岩层对围岩稳定性的影响表现

底板软弱岩层对巷道围岩稳定性的影响主要体现在底鼓变形和围岩整体失稳风险的增加。软弱底板在高地应力和采动影响下易发生剪切屈服和塑性流动,导致巷道底板隆起,进而改变围岩应力分布状态,使顶板和帮部受力条件进一步恶化。随着底鼓的发展,巷道断面形态发生变化,支护体系受力不均,局部构件失效概率显著提高。此外,软弱底板常伴随含水性增强,在水岩耦合作用下力学强度进一步降

低,加剧围岩变形程度。底板软弱岩层的存在使巷道稳定性控制由单一顶板问题转变为顶、底、帮协同控制的系统性问题。

3.3 顶底板结构组合引起的围岩破坏类型

顶底板结构组合特征决定了巷道围岩破坏的整体形式和演化路径。当软弱顶板与软弱底板同时存在时,围岩易出现大变形破坏,表现为顶板下沉、底鼓隆起及两帮内移的协同发展;当硬顶板与软弱底板组合时,破坏多集中于底板区域,并通过应力传递诱发顶板局部失稳;而在硬顶硬底条件下,围岩整体稳定性较好,但在结构面发育区仍可能发生块体脱落破坏。不同结构组合条件下,围岩破坏具有明显的阶段性和差异性,其本质是岩性结构与应力环境共同作用的结果,对巷道支护与稳定性控制提出了针对性要求。

4 煤矿顶底板岩性结构对巷道围岩稳定性的影响评价

4.1 岩性结构参数在围岩稳定性评价中的作用

岩性结构参数是巷道围岩稳定性评价中最具基础性和约束性的判据,其变化直接决定围岩变形程度与失稳方式。工程应用中常采用岩体完整性系数、单轴抗压强度、弹性模量、泊松比及层理厚度等参数对顶底板稳定性进行量化表征。统计分析表明,当顶板岩体完整性系数由0.75降至0.50时,顶板最大下沉量由40 mm增加至110 mm,增幅接近175%;当顶板单轴抗压强度由32 MPa降低至18 MPa时,顶板离层范围由0.8 m扩展至2.1 m。底板岩性参数对围岩稳定性的影响同样显著,当底板弹性模量小于2.5 GPa、抗剪强度低于1.2 MPa时,巷道底鼓发生概率可超过70%,底鼓量普遍大于150 mm^[2]。通过对岩性结构参数进行系统量化,可有效识别围岩薄弱区段,为稳定性评价和支护强度分级提供精确依据。

4.2 顶底板岩性差异对巷道稳定等级划分的影响

顶底板岩性差异是巷道稳定等级划分的重要控制条件,其对围岩整体受力协调性具有决定性影响。现场监测数据显示,在顶板为泥岩、底板为泥质粉砂岩的条件下,巷道围岩稳定等级多被划分为V级,顶板累计下沉量一般达到180~260 mm,底鼓量可达200~300 mm,支护失效率超过35%。当顶板为中硬砂岩、底板为软弱泥岩时,围岩稳定等级通常为Ⅲ~Ⅳ级,顶板下沉量控制在90~150 mm范围内,但底鼓仍持续发展,年均增长量约为45~60 mm。在顶底板均为中硬至坚硬岩层条件下,围岩稳定等级可稳定在Ⅱ级,巷道变形量普遍小于60 mm,支护体系长期受力状态稳定。由此可见,顶底板岩性差异越大,巷道稳定等级越低,稳定性评价中必须充分考虑其耦合影响。

4.3 典型岩性结构条件下围岩失稳风险特征

在不同岩性结构条件下,巷道围岩失稳风险呈现出明显差异化特征。薄层泥岩或砂质泥岩顶板条件下,围岩失

稳以分层离层和渐进下沉为主要形式,离层厚度通常为0.5~1.5 m,失稳过程持续时间长,具有明显的累积效应。厚层砂岩顶板条件下,围岩整体性较好,但当节理裂隙发育时,易发生突发性块体破坏,单次掉块体积多集中在0.6~1.8 m³,安全风险集中且破坏突然。软弱底板条件下,围岩失稳风险主要体现为持续性底鼓,其发展速率在高应力区可达到3~6 mm/d,易引发巷道断面持续缩小和支护构件失效^[3]。不同岩性结构条件下失稳风险在表现形式、演化速度和危害程度方面均存在显著差异,体现出明显的结构控制特征。

5 基于顶底板岩性结构特征的巷道围岩稳定性控制对策

5.1 针对顶板岩性特征的围岩支护优化思路

顶板控制需要以岩性类型、层理发育程度、结构面组合关系为约束条件,将“稳定结构、限制离层、控制变形”作为主线,形成与顶板特征相匹配的支护体系。软弱泥岩类顶板易产生分层弯曲和离层扩展,支护重点应放在提高顶板整体约束能力与层间联结能力上,通过构建连续受力骨架,将松动圈内的分层岩体整合为可承载结构,使变形由无序发展转为受控释放。互层顶板常出现刚柔差异导致的层间错动,支护设计需兼顾柔性吸能与刚性约束,避免局部刚度突变引起剪切破坏扩展。砂岩类顶板整体性较好但节理裂隙控制明显,支护重点应转向块体稳定与结构面抗滑,通过增强关键结构面的约束条件,使潜在块体形成可靠的空间锁固关系。顶板支护实施中应强调受力连续性和施工质量一致性,保证锚固、连接、面层封闭的协同作用,减少因局部失效引发的连锁破坏,使顶板稳定性控制具备可持续性。

5.2 基于底板岩性条件的底鼓防治技术路径

底鼓防治需要围绕底板岩性的软弱程度、含泥夹层分布、遇水软化敏感性与变形时效性,建立“强度提升—应力调整—变形约束”的组合路径,实现对底板隆起的长期抑制。软弱泥岩或含泥质夹层底板在高应力与扰动条件下易发生塑性流动和剪切屈服,治理思路应突出底板承载能力恢复与变形通道切断,通过底板加固提升整体性,限制裂隙扩展与强度衰减,同时配合底板约束结构,降低隆起对巷道断面的侵占。遇水软化显著的底板应将水害与力学耦合作为控制对象,强化封闭隔水、疏排水与底板加固的联动,避免含

水引发的强度衰减导致变形加速。底板稳定性较好的区域也需要关注应力转移效应,顶板与两帮支护增强后可能诱发底板承载增大,底鼓表现会更加突出,防治路径应同步优化断面形态、底板应力释放条件与支护匹配关系,保持围岩变形的整体协调。底鼓治理的关键在于将短期抑制转化为长期稳定,通过结构性约束与环境控制共同作用,降低底板变形的累积风险^[4]。

5.3 顶底板协同控制条件下围岩稳定性提升措施

围岩稳定性提升不能割裂顶板、底板与两帮的相互作用关系,应以巷道围岩整体承载结构的形成与维持为目标,构建协同控制体系,使各部位支护强度、变形允许度与受力路径保持匹配。施工组织上需要保证关键部位同步实施与参数一致性,避免时序滞后导致围岩先行破坏。运行管理上应依托变形与载荷信息开展动态优化,针对变形集中段及时进行补强或结构调整,使支护体系随围岩状态变化保持适应性,最终实现复杂岩性结构条件下巷道围岩的稳定可控与长期可靠。

6 结语

煤矿巷道围岩稳定性问题具有显著的工程复杂性和结构控制特征,其中顶底板岩性结构条件是影响围岩变形与破坏演化的核心因素。通过系统分析顶底板岩性类型、结构特征及其对围岩稳定性的作用机理,可以更加准确地认识不同岩性组合条件下巷道失稳的内在规律。研究表明,围岩稳定性并非单一因素作用结果,而是岩性结构、应力环境与支护条件共同耦合的体现。以顶底板岩性结构为基础实施针对性、协同性控制措施,有助于提高围岩稳定性评价的科学性和支护设计的适应性,为煤矿巷道安全、高效、长期稳定运行提供可靠支撑。

参考文献

- [1] 韩霞.三维地震勘探对煤层顶底板岩性精细解释技术研究与应用[J].煤,2024,33(02):59-61+69.
- [2] 李大旺.顶底板岩层透气性对煤层瓦斯抽采的影响研究[J].矿业安全与环保,2021,48(05):28-32.
- [3] 贾峰晋.沁水煤田里煤矿勘探及瓦斯赋存规律研究[J].石化技术,2019,26(02):144.
- [4] 窦仲四,沈书豪,翟晓荣.恒源煤矿6煤底板岩性-结构类型划分[J].煤炭技术,2016,35(10):116-118.

Discussion on Pipeline Welding Process Technology and Quality Control Measures

Xiangchao Kong Xingxing Wen

- China Petroleum 6th Construction Co., Ltd., Handan, Hebei, 056001, China
- China Petroleum 6th Construction Co., Ltd., Pingliang, Gansu, 743418, China

Abstract

Pipeline welding constitutes a critical component in the construction of long-distance pipelines, urban pipeline networks, and industrial facilities, with its quality directly impacting energy transmission safety, facility operational reliability, and environmental protection. This paper provides a systematic discussion on two key themes: pipeline welding process technology and quality control. It elaborates on essential process control parameters during welding, required skill levels for operators, applications of weld quality inspection and non-destructive testing techniques, mechanisms behind common welding defects and preventive strategies, as well as the establishment of a comprehensive quality management framework throughout the entire process. By integrating theoretical analysis with practical considerations, this study aims to provide a systematic reference for enhancing both the inherent safety standards and long-term performance of pipeline welding projects.

Keywords

pipeline welding; welding process; quality control; non destructive testing; defect prevention

管道焊接工艺技术及质量控制措施探讨

孔祥超 文星星

- 中国石油天然气第六建设有限公司, 中国·河北 邯郸 056001
- 中国石油天然气第六建设有限公司, 中国·甘肃 平凉 743418

摘要

管道焊接是长输管道、城市管网及工业装置建设中的核心环节,其质量直接关系到能源输送安全、设施运行可靠性与环境保护。本文围绕管道焊接工艺技术与质量控制两大主题展开系统论述。详细阐述了焊接过程中的工艺控制要点、操作人员的技能素质要求、焊缝质量检验与无损检测技术的应用范围、典型焊接缺陷的生成机理与预防策略,以及贯穿始终的系统性质量管理框架构建。本文旨在通过理论梳理与实践指向相结合的方式,为提升管道焊接工程的本质安全水平与长期服役性能提供系统的参考依据。

关键词

管道焊接; 焊接工艺; 质量控制; 无损检测; 缺陷预防

1 引言

现代工业体系中,管道承担着输送油气资源、化工原料、城市用水等重要介质的职能,被称为工业的血管。焊接作为管道连接最主要且不可替代的永久性方法,其接头质量是整条管线结构完整性与密封性的决定性因素。焊接接头存在的任何微小瑕疵,在介质压力、温度交变、土壤应力及腐蚀环境长期作用下,都可能演变为导致泄漏甚至灾难性事故的初始裂纹源。因此,深入探究管道焊接所涉及的复杂工艺技术,并建立一套严密、科学、可追溯的质量控制体系,具有极其重大的工程意义与经济价值。本文的论述目的即在于对管道

焊接从技术原理到质量保障的全流程进行整合性探讨,梳理技术关键点与管理核心要素,为相关工程实践与标准制定提供理论支撑。

2 管道焊接技术的理论内涵

2.1 焊接工艺的技术原理基础

焊接工艺的本质是通过物理或化学方式,在待连接工件接头处建立原子或分子间的结合,从而形成不可拆卸的永久性连接。对于管道焊接而言,这一过程通常涉及局部热源的施加,使母材金属与填充金属熔化形成共同的熔池,随后熔池冷却凝固结晶,形成将两段管道熔合为一体的焊缝金属。依据热源性质与保护方式的不同,形成了多种焊接方法。其技术原理的共通性在于实现金属的冶金结合,同时必须克服因快速加热与冷却带来的焊接应力、变形、组织性能不均

【作者简介】孔祥超(1998-),男,中国河北邯郸人,助理工程师,从事焊接技术研究。

匀等一系列冶金学与力学问题。

2.2 质量控制的定义与要素

在管道焊接工程语境下,质量控制是指为确保焊接接头满足设计标准、技术规范及安全服役要求,所采取的一系列有计划、系统化的技术活动与管理措施。它并非单一环节的检验,而是贯穿于焊接作业全生命周期的连续性过程。质量控制的核心要素涵盖人的因素、机的状态、料的品质、法的合规以及环的适宜性五大方面。具体而言,包括焊接操作人员与检验人员的资格认证与技能水平;焊接设备、预热及热处理装置的性能稳定性与计量准确性;管道母材、焊丝、焊条、保护气体等材料的化学成分与力学性能符合性;经过评定合格的焊接工艺规程的严格执行;以及施焊环境如温度、湿度、风速等条件对焊接过程影响的控制。这些要素相互关联,共同构成了质量控制的基本框架。

3 焊接工艺体系的结构分析

3.1 主要焊接方法的分类与特性

管道焊接领域应用广泛的方法主要包括焊条电弧焊、钨极惰性气体保护焊、熔化极气体保护焊以及药芯焊丝电弧焊。焊条电弧焊设备简单灵活,适用于全位置焊接及野外作业,但对操作者技能依赖度高。钨极惰性气体保护焊电弧稳定,焊缝纯净度高,常用于打底焊道及薄壁管、特殊材料管的焊接。熔化极气体保护焊效率高,易于自动化,在中厚壁管道填充盖面中应用普遍。药芯焊丝电弧焊综合了熔敷效率高与工艺适应性好的优点,在长输管道建设中占据主导地位。此外,自保护药芯焊丝焊因其无需外部保护气体,在户外有风环境下展现出独特优势。

3.2 工艺参数设定的科学依据

焊接工艺参数的设定是工艺规程的核心,直接决定了焊接热输入、熔深、焊缝成形及最终接头性能。关键参数包括焊接电流、电弧电压、焊接速度、送丝速度、保护气体流量与成分、焊丝伸出长度、坡口形式尺寸以及层道间温度控制区间。这些参数并非孤立存在,而是相互影响、相互制约。例如,增大电流可增加熔深与熔敷率,但可能导致焊道过宽、咬边或热影响区晶粒粗大。科学的参数设定建立在焊接冶金理论、大量工艺试验及焊接工艺评定的基础上,旨在获得最佳的焊缝金属化学成分、金相组织、力学性能指标,并确保焊接过程稳定,缺陷发生率最低。

3.3 母材与焊接材料的选择要求

管道焊接接头的性能是母材、焊缝金属及热影响区三部分共同作用的结果。因此,材料的选择与匹配至关重要。母材通常根据输送介质、设计压力、环境温度及腐蚀条件选用碳钢、低合金高强度钢、不锈钢、耐热钢或双金属复合管。焊接材料的选择必须遵循等强匹配或高强匹配原则,同时兼顾韧性与耐蚀性要求。焊丝或焊条的化学成分需能与母材形成良好的冶金相容性,控制有害元素如硫、磷的含量,并通

过添加合金元素调整焊缝金属性能。保护气体的选择影响电弧特性、熔滴过渡形式与焊缝表面质量。例如,富氩混合气能改善电弧稳定性,减少飞溅,而纯二氧化碳成本较低但飞溅较大。焊剂或药芯的成分则承担着脱氧、脱硫、造渣保护、合金化及稳弧等多重功能。材料的正确选择与严格验收是保证焊接质量的前提^[1]。

4 技术实施与质量控制融合

4.1 焊接过程的工艺控制要点

将书面的工艺规程转化为实体高质量焊缝,依赖于焊接过程中每一环节的精准控制。焊前准备是控制的第一步,坡口角度、钝边尺寸、组对间隙的精度直接影响焊接可达性与熔透均匀性;组对时的错边量必须严格限制在标准允许范围内;坡口表面及两侧至少20毫米范围内的油污、铁锈、水分等必须彻底清除,以防止氢、氧、氮等气体侵入焊缝。预热是控制焊接冷却速度、防止氢致冷裂纹的核心工艺措施,预热温度需根据钢材的碳当量、壁厚拘束度及环境温度通过计算或查表确定,并采用接触式或红外测温仪进行实时监控与记录。施焊过程中,焊工或设备操作员需保持工艺参数的稳定,通过观察熔池的宽度、亮度、流动性及电弧的声音,可直观判断焊接过程是否正常。对于多层多道焊缝,每一焊道完成后都必须使用专用工具仔细清除焊渣与飞溅,并使用测温仪检查层间温度,确保其始终处于工艺规定的上下限之间,避免因层间温度过高导致焊缝区晶粒粗化韧性下降,或因温度过低而增加淬硬倾向。后热及焊后热处理是重要的补充控制手段,后热可使氢加速逸出,焊后热处理则用于消除残余应力、改善接头韧性或恢复耐蚀性^[2]。

4.2 操作人员的技术能力规范

焊接质量的高度人性化特征决定了操作人员是质量控制链条中最活跃、最具决定性的因素。建立一套严谨、规范的焊工技能管理体系至关重要。一名合格的管道焊工,不仅需要掌握手眼协调的稳定操作技能,还需具备基本的金属学、焊接原理、识图及安全知识。其技能获取必须通过系统化的培训,包括理论学习与大量的实际操作训练。更为关键的是,焊工必须通过针对具体工程项目的焊接工艺评定试验,即使用项目将采用的管材、焊材、焊接位置及工艺,在监督下焊接试件,该试件经无损检测和破坏性检验合格后,焊工方能取得针对该项目的上岗资格。这种资格通常是针对特定材质、壁厚范围和焊接位置的,并且设定了有效期,到期需重新考核。除了技能,焊工的职业道德与质量意识培养同样不可忽视,应使其深刻理解手中焊枪所承载的安全责任,养成严格遵守工艺纪律、一丝不苟对待每一道焊缝的职业习惯^[3]。

4.3 检验与检测技术应用范围

质量检验体系是验证焊接成果是否符合设计预期的“裁判所”,它由破坏性检验和无损检测两大支柱构成。破坏性

检验通常在焊接工艺开发评定阶段或对批量产品进行质量仲裁时采用, 通过从焊接试板上截取样块, 进行拉伸、弯曲、冲击、硬度、金相宏观与微观分析等试验, 以获得接头全面的力学性能数据和内部组织信息, 其结果具有结论性。而在工程现场, 无损检测由于其不破坏被检对象的特性, 成为对每一个焊缝接头进行百分之百或抽样检验的主要手段。射线检测利用 X 或 γ 射线穿透焊缝, 在胶片或数字探测器上形成影像, 对气孔、夹渣、缩孔等体积型缺陷显示直观, 且能永久保存记录, 但其对裂纹等面状缺陷的检出灵敏度受方向影响较大, 且有辐射安全限制。超声波检测利用高频声波在材料中传播遇到缺陷时产生反射的原理, 对裂纹、未熔合等面积型缺陷非常敏感, 且能估算缺陷深度, 适用于厚壁管检测, 但对操作者经验依赖度高, 且结果不直观。磁粉检测适用于铁磁性材料, 能灵敏地检测表面及近表面的缺陷, 渗透检测则适用于所有非多孔性材料表面的开口缺陷检测。

4.4 焊接缺陷的预防机制

卓越的质量控制理念强调“预防优于纠正”。建立系统的焊接缺陷预防机制, 需要深入理解每一种常见缺陷的生成机理。裂纹是最危险的缺陷, 冷裂纹与焊接接头的淬硬组织、扩散氢含量及拘束应力三要素直接相关, 其预防策略是一整套组合拳: 选用低氢或超低氢焊接材料并严格烘干; 根据碳当量与壁厚实施足够的预热与后热; 优化接头设计以降低拘束度; 控制焊接热输入以获得有利的组织。热裂纹则与焊缝凝固末期的低熔点共晶物有关, 预防需从控制焊缝化学成分、调整凝固模式入手。气孔主要由熔池中溶解的气体在凝固前来不及逸出造成, 预防关键在于杜绝气体来源: 确保焊区及焊材干燥清洁; 检查保护气路密封性; 在野外有风处设置防风棚。夹渣与未熔合多因焊接参数不当、操作手法不良或层间清理不净导致, 预防需优化电流电压匹配、保证合适的焊枪角度与摆动方式、以及彻底的清渣。通过系统的焊接工艺评定, 可以在实验室条件下探索并确定能够规避主要缺陷的“工艺窗口”。在工程实践中, 推行基于统计过程控制的质量数据管理, 持续收集焊接参数、检验结果及缺陷类型数据, 运用统计分析工具识别异常趋势, 追溯至人、机、料、法、环等根本原因, 从而及时采取纠正与预防措施, 将质量控制从被动响应推向主动预测与干预。

4.5 质量管理的系统构建

将前述所有分散的技术控制点、检验活动与管理要求整合为一个协调、高效、自洽运行的有机整体, 必须依赖一个成文的、系统化的焊接质量管理体系。该体系的构建应以

国际国内通用的质量管理标准为骨架, 融合管道焊接领域的特殊专业技术规范与具体项目合同要求。体系文件通常呈金字塔结构: 顶端是阐述管理意图的质量方针与目标; 下层是描述跨职能活动流程的管理性程序文件; 再下层是针对具体作业的技术性规程、作业指导书与工艺卡片; 底层则是用于记录各类活动的表格、报告等。体系运行的核心活动构成一个“计划-执行-检查-处理”的闭环。这包括: 项目初始阶段的设计焊接性审查与制造焊接工艺设计; 采购过程中对焊接材料供应商的严格评价与入场后的抽样复验; 制造与施工阶段对“人、机、料、法、环”所有要素的持续符合性验证, 以及焊接过程的实时监控与参数记录; 通过专职检验员巡检、质量工程师抽检、第三方监理或业主代表监督等多层次、多角度的独立验证活动; 对发现的任何不合格品进行标识、隔离、记录、原因分析、处置方案评审及实施纠正; 定期进行内部质量审核与管理评审, 以评估体系运行的有效性, 识别改进机会, 推动质量管理水平的螺旋式上升。

5 结语

管道焊接, 是一门融合了材料科学、热力学、流体力学、电学及自动控制等多学科知识的精深技艺, 更是一项涉及设计、工艺、操作、检验与管理等多环节协同的复杂系统工程。其最终质量的铸就, 是理论基础、技术细节、人员素养与系统管理共同交织作用的成果。本文通过层层递进的论述, 试图阐明这样一个核心观点: 保障管道焊接的高质量, 既需要深入掌握焊接冶金与工艺的内在科学规律, 对每一个技术参数的精雕细琢, 对每一位操作人员的匠心培养, 也需要构建一个贯穿全局、闭环反馈、持续改进的系统化管理框架。当前, 焊接技术正朝着自动化、数字化、智能化的方向迅猛发展, 智能焊接机器人、在线视觉传感、焊接大数据分析 with 云计算等新技术, 为实现焊接过程的精确感知、智能决策与自适应控制开辟了崭新前景。然而, 无论技术工具如何演进, 对焊接本质规律的敬畏之心、对工艺纪律的恪守之责、对人员价值的重视之道以及系统化质量管理的思维之纲, 始终是不可或缺的基石。

参考文献

- [1] 张新龙, 云保洋, 步爱军. 化工设备安装中焊接技术的质量控制措施分析[J]. 你好成都(中英文), 2023(27):0229-0231.
- [2] 毛晨, 李占宇. 石油化工管道的焊接工艺与质量控制[J]. 中国图片(中英文), 2024(22):219-220.
- [3] 叶勇. 油气长输管道焊接工艺质量控制[J]. 全面腐蚀控制, 2023, 37(6):28-30.

Current Status and Development Trends of Automated Welding Technology in Petrochemical Engineering

Xixing Wen Xiangchao Kong

1. China Petroleum 6th Construction Co., Ltd., Pingliang, Gansu, 743418, China
2. China Petroleum 6th Construction Co., Ltd., Handan, Hebei, 056001, China

Abstract

This paper systematically examines the current application status and future development trends of automated welding technology in petrochemical engineering construction. It first defines the core concepts of automated welding within this field and analyzes its fundamental value in enhancing project quality, ensuring construction safety, and improving operational efficiency. Subsequently, it details the technical characteristics of mainstream automated welding processes and their specific applications in critical stages such as pipeline prefabrication, modular construction, and storage tank installation. The study focuses on identifying technical bottlenecks and management challenges hindering widespread adoption of this technology. Finally, it outlines a forward-looking roadmap for the evolution of automated welding toward intelligent, flexible, and standardized operations through process innovation, equipment upgrades, and system integration, providing theoretical insights for the transformation and upgrading of welding technologies in the petrochemical industry.

Keywords

automated welding; petrochemical engineering; intelligentization; process control; technology integration

石油化工工程自动化焊接技术的应用现状和发展趋势

文星星 孔祥超

1. 中国石油天然气第六建设有限公司, 中国·甘肃 平凉 743418
2. 中国石油天然气第六建设有限公司, 中国·河北 邯郸 056001

摘要

本文系统性地探讨了自动化焊接技术在石油化工工程建设领域的应用现状及其演进方向。文章首先界定了石油化工工程范畴内自动化焊接技术的核心内涵,分析了其在提升工程质量、保障施工安全、提高作业效率方面的根本价值。进而,详细阐述了当前主流自动化焊接工艺的技术特点及其在管线预制、模块建造、储罐安装等关键环节的具体应用场景。文章重点剖析了制约该技术深度普及的技术瓶颈与管理挑战。最终,从工艺革新、装备升级、系统集成等维度,前瞻性地论述了自动化焊接技术向智能化、柔性化、标准化演进的核心路径,为石油化工行业焊接技术的转型升级提供理论参考。

关键词

自动化焊接; 石油化工工程; 智能化; 工艺控制; 技术集成

1 引言

石油化工工程作为国家能源与基础原材料供应的重要支柱,其设施建设具有规模宏大、结构复杂、介质高危、服役环境苛刻的显著特点。焊接作为连接金属构件、形成密闭承压系统的核心工艺环节,其质量直接关乎装置的整体完整性、安全可靠性与长期运行寿命。传统手工焊接方式高度依赖焊工的个人技能与作业状态,在一致性、稳定性、可追溯性方面存在固有局限,难以完全满足现代石化工程对高质量、高效率、高安全标准的严苛要求。因此,推动焊接作业

从依赖人工经验向依靠自动化、智能化技术转变,已成为行业发展的必然选择。

2 自动化焊接技术的概念阐释与核心价值

2.1 石油化工工程范畴内自动化焊接的技术定义

自动化焊接技术特指在石油化工装置建造过程中,通过机械装置、传感系统与程序逻辑控制器协同工作,部分或全部替代焊工手持焊枪进行直接操作,实现焊接参数预设、焊缝轨迹跟踪、熔池状态监控与工艺过程闭环调节的先进制造技术。其核心在于将焊接工艺知识数字化、代码化,并由执行机构精准复现,从而剥离了焊缝质量与操作者瞬时状态的强关联。

【作者简介】文星星(1995-),男,中国甘肃平凉人,本科,助理工程师,从事焊接技术研究。

2.2 自动化焊接技术对于石化工程建设的根本性意义

该技术的根本性意义在于为石化工程建设质量提供了基于确定性的保障机制。首先，它通过恒定的运动精度与参数稳定性，极大提升了焊缝成形的一致性，有效降低了气孔、夹渣、未熔合等传统手工焊易发缺陷的出现概率。其次，自动化设备可适应恶劣施工环境，如在高温、高寒、有限空间或存在有害气体的场合进行连续作业，显著降低了焊工的劳动强度与职业健康风险。再者，焊接过程数据可被完整记录与追溯，为实现焊接质量的全生命周期数字化管理奠定了基础，有助于故障归因与寿命预测。从工程经济性角度，自动化焊接通过连续作业大幅提高了熔敷效率，缩短了施工周期，其长期综合成本优势日益凸显。

3 自动化焊接的主要工艺形式与技术特征

3.1 基于轨道引导的自动焊接工艺形式

轨道式自动焊接系统是当前石化现场应用最为成熟的形式之一。该系统将焊枪搭载于沿预设刚性轨道行走的小车上，轨道通过磁性或机械方式固定于工件表面。其技术特征表现为运动轨迹高度精确、重复定位性能优异，特别适用于长直焊缝、环焊缝等规则路径的焊接。该系统通常集成多丝或热丝技术，通过提高熔敷速率来适应厚壁结构的施工需求，同时配备电弧传感或视觉传感以实现焊缝的自动对中与宽度跟踪。

3.2 依赖于机械臂执行的智能化焊接工艺形式

以工业机器人为载体的智能化焊接系统代表了更高的自动化层级。六轴或更多自由度的机械臂提供了极其灵活的空间运动能力，能够完成复杂三维空间曲线焊缝的焊接，如管管相贯接头、泵阀异形件、结构框架节点等。该形式的特征在于其强大的离线编程与仿真能力，施工前可在虚拟环境中规划最优焊枪姿态与路径，避免干涉碰撞。先进的机器人系统融合激光扫描传感，能够对组对后的工件进行实际轮廓扫描，并与理论模型比对后自动生成修正后的焊接程序，从而补偿工件加工与装配误差，实现真正的自适应焊接。

3.3 适用于特殊场景的自动化焊接工艺形式

除上述主流形式外，针对石化工程特定场景衍生出若干专用自动化工艺。例如，窄间隙自动焊专为厚壁压力容器的环缝和纵缝设计，采用特制焊枪在极窄的坡口内进行多层多道摆动焊接，在保证焊透性的同时最大限度地减少填充金属用量与焊接变形。全位置管道自动焊机则用于现场固定口的焊接，其机头通常设计为分离式钳状结构，能够包裹管壁进行爬行焊接，内置的多个微型执行器独立控制各区域参数，以应对焊接位置连续变化带来的熔池控制难题，确保在全周范围内获得均匀一致的焊缝质量^[1]。

4 石油化工工程自动化焊接的应用实态与未来走向

4.1 管道预制环节自动化焊接的规模化应用实态

在环境可控、工位固定的管道预制厂内，自动化焊接技术已实现了高度规模化和流水线化的工业级应用，这是其应用最成熟、效益最显著的领域。对于长输管道项目，广泛采用“内焊机根焊+外焊机自动填盖”的流水作业模式。内焊机在管道内部展开多个焊炬，一次性完成整周根焊，效率极高且背面成形光滑。随后，管道移至外焊工位，多台外焊机（通常为双焊炬或四焊炬）沿轨道环绕管道，同步进行热焊、填充焊和盖面焊，将原本需要多日的焊口作业压缩至数小时内完成。在工艺管道的预制中，基于焊接机器人、管端坡口机、管件变位机（翻转机）集成的柔性制造单元已成为现代化预制厂的标准配置。通过变位机的精确旋转与翻转，将管道上的法兰角焊缝、对接环缝等始终调整到机器人最擅长的平焊或船形焊位置，这不仅获得了最高的焊接质量，也极大地简化了机器人编程，只需针对少数几种标准位置编程即可覆盖绝大多数焊缝。预制环节自动化的核心追求在于将焊接工序彻底分解、标准化，并融入节拍化的生产流水线，从而实现质量、效率与成本的最优平衡^[2]。

4.2 模块化建造中自动化焊接的深度集成实态

模块化建造是近年来石化工程领域的革命性趋势，即将整套装置在条件优越的陆地车间分解为多个巨型功能模块进行预制，然后整体运输至现场拼装。在这一模式下，自动化焊接技术从“辅助工具”升级为“核心生产中枢”。大型结构模块（如钢结构框架）、管廊模块（集成了数百米管道、阀门、仪表）的制造，涉及海量重复的标准化焊接节点，如H型钢梁柱连接、管道支吊架焊接等。机器人焊接工作站被深度嵌入到从钢材数控切割、坡口机器人加工、到组对校正、再到最终焊接的全数字化流水线中。基于统一的三维产品信息模型，焊接机器人可以直接读取每一条待焊焊缝的精确坐标、尺寸、坡口形式及材质信息，并自动从中央工艺数据库中调用经过严格评定的最优焊接参数包^[3]。这种深度的信息集成与流程贯通，其价值不仅在于提升了单个焊点的质量，更在于通过确保模块内数以万计焊点质量的绝对均匀一致，从根本上保障了各个重量达数千吨的巨型模块在经历长途海运、吊装后，在现场能够实现毫米级的精准对位与快速连接，这是模块化战略得以成功实施的不可或缺的技术支柱。

4.3 现场安装环节自动化焊接的技术优势与适应性

施工现场环境复杂多变，存在组对误差大、风雨气候干扰、空间受限、工况不可控等诸多不利因素，这对自动化焊接技术的环境适应性与智能性提出了终极考验。尽管挑战巨大，自动化焊接在现场安装的关键环节已展现出不可替代

的优势。在大型储罐、塔器、反应器的现场立式组装中，自动化焊接是主流选择。例如，储罐壁板的竖向焊缝普遍采用气电立焊自动化完成，其效率可达手工焊的三至五倍，且焊缝一次合格率极高。大型塔器逐段吊装后的环向对接焊缝，则广泛应用自动埋弧横焊设备。对于遍布全厂的工艺管道固定口安装，全位置自动焊机的推广正在加速。这些适应现场的设备，其技术先进性集中体现在智能传感与自适应控制上。它们集成了更精密的视觉传感或基于电弧物理信号（如电弧电压、声发射）的监控系统，能够实时“感知”坡口宽度的变化、组对间隙的起伏以及环境风力的影响，并通过内置的智能算法，自动、平滑地调整焊枪的横向摆动幅度、焊接行进速度乃至送丝速度与热输入，从而在非理想的、动态变化的工况条件下，依然能够输出成形美观、内部质量合格的焊缝。

4.4 当前自动化焊接技术推广普及面临的核心制约

尽管技术优势显著且应用案例不断增多，但自动化焊接在石化工程领域的全面普及仍面临一系列深层次的制约因素。首当其冲的是高昂的初始投资与总拥有成本。一套功能完备的高性能焊接机器人系统、专用的自动化焊接专机及其必需的激光跟踪、传感系统、工装夹具，购置费用动辄数百万，且后期的维护、升级、工艺调试同样需要持续投入，这对许多项目驱动型、利润空间有限的中小型工程承包商构成了较高的资金门槛。其次是技术准备与工艺开发的复杂性。不同于手工焊的“即插即用”，针对每一项新工程的特定材料（如高强度、耐热钢、双相不锈钢）、新的接头形式，都必须进行系统的焊接工艺评定试验，以建立可靠的焊接参数数据库，这个过程耗时耗力，对工艺工程师的理论功底和实验能力要求极高。第三是系统柔性的不足。当前多数自动化系统，尤其是轨道专机，是为特定类型的焊缝“量身定做”的。而石化工程现场存在大量非标准、小批量、多样化的焊接任务，为每一种此类焊缝定制自动化方案在经济上不可行，系统快速重构与重编程的能力尚待突破。最后，也是最为隐性的制约，来自于管理与思维的惯性。传统的项目管理流程、以“人工工时”为基础的施工组织与计价模式、基于事后抽检的质量验收体系，与自动化焊接所代表的“前期高投入、过程高可控、数据可追溯”的新模式存在内在冲突。推动自动化焊接，不仅是一场技术变革，更是一场涉及标准更新、流程再造、技能重构的深层组织变革。

4.5 自动化焊接技术向智能化深度演进的必然趋势

展望未来，石油化工工程对焊接质量、效率与可靠性的需求永无止境，这必将驱动自动化焊接技术向着更高程度的智能化、网络化与本质柔性化方向深度演进。其核心趋势

是从当前以“程序执行”为主的自动化，向以“感知-决策-执行”闭环为特征的智能化跃迁。未来的焊接单元将是一个高度集成的智能体：通过深度融合高分辨率机器视觉、3D激光雷达、光谱分析与多物理场传感，它能够在作业起始瞬间自主识别工件身份、扫描焊缝三维形貌、评估装配质量；在焊接过程中，不仅能监控熔池的几何形状与振荡频率，还能通过光谱信息初步分析熔池的冶金状态；基于这些海量实时数据与内置的工艺知识图谱、机器学习模型，系统能够进行自主决策，动态调整参数以应对各种扰动，并实时预测焊缝成形与内部质量，实现真正的在线质量判定。数字孪生技术将成为标准配置，在虚拟空间中构建与物理焊接过程完全同步的镜像，通过多物理场耦合仿真，提前预测并优化焊接应力、变形和微观组织演化。从系统形态上，模块化、可重构的柔性制造单元将逐步取代固定式专机，通过标准化接口快速更换不同的末端执行器（焊枪、激光头、打磨头等），并借助云端共享的工艺算法，迅速适应新的焊接任务。最终，焊接将不再是孤立的“工位”，而成为工厂物联网与工业互联网中的一个智能节点，与材料管理、生产调度、质量系统、设备健康管理平台等无缝连接，实现从单一工序优化到全产业链协同优化的跨越，为石化工程建设带来革命性的进步。

5 结语

自动化焊接技术在石油化工工程领域的渗透与应用，已跨越了早期的概念验证与试点示范阶段，正稳步迈入规模化、深度化集成应用的新时期。它不再仅仅被视为提升某项具体工艺效率的替代工具，其更深层次的意义在于，它作为一项使能技术，正在深刻改变石化工程建设的底层逻辑——从依赖个人技艺的“手工业”模式，转向依托工艺科学、数据驱动与智能装备的“现代工业”模式。这项变革在提升工程本体质量与安全的同时，也为行业应对熟练焊工短缺、实现绿色低碳建造、拥抱数字化转型提供了关键抓手。当然，前方的道路并非坦途，高昂的成本、复杂的技术集成、对管理体系的冲击都是必须正视的挑战。这要求行业内的设计方、业主、承包商、设备供应商乃至标准制定机构形成共识，协同发力，在技术研发上持续创新，在标准规范上与时俱进，在人才培养上未雨绸缪，在商业模式上勇于探索。

参考文献

- [1] 李辉.石油化工工程自动化焊接技术的应用现状和发展趋势[J].中国石油和化工标准与质量, 2024(21):193-195.
- [2] 邹剑波.汽车产业中焊接自动化技术的现状及发展趋势[J].大众汽车, 2023(9):0087-0089.
- [3] 孙克.离散制造装备传感器应用技术现状与发展趋势[J].仪表技术与传感器, 2023(5):1-4.

Research on Strengthening Chemical Process Pipeline Installation Technology

Hong Wei Jia Wang

1. China Petroleum 6th Construction Co., Ltd., Dingxi, Gansu, 541000, China
2. China Petroleum 6th Construction Co., Ltd., Hanzhong, Shaanxi, 541000, China

Abstract

As the core conduits for material transportation, the installation quality of chemical process pipelines directly impacts the safety, stability, and long-term operation of production systems. This paper conducts a systematic study on the technical requirements for chemical process pipeline installation, providing an in-depth analysis of key elements and potential risks in current implementation practices. The research focuses on the core installation procedures, precise control of technical parameters, and concrete approaches to enhancing installation quality. Through integrated analysis of design, material selection, welding processes, and inspection protocols, this study aims to establish a rigorous, scientific framework for installation technology execution, offering theoretical guidance and technical support for improving the overall reliability of chemical facilities. The findings demonstrate that only by adhering to high standards and stringent requirements at every stage of implementation can fundamental safety in chemical production be fundamentally ensured.

Keywords

chemical pipeline installation technology; welding quality; stress analysis; non-destructive testing

基于加强化工工艺管道安装技术研究

韦宏 王贾

1. 中国石油天然气第六建设有限公司, 中国·甘肃 定西 730500
2. 中国石油天然气第六建设有限公司, 中国·陕西 汉中 723303

摘要

化工工艺管道作为物料输送的核心通道,其安装质量直接关系到生产系统的安全稳定与长期运行。本文针对化工工艺管道安装的技术要求展开系统性研究,深入剖析了当前技术实施过程中的关键要素与潜在风险。研究内容聚焦于安装工艺的核心流程、技术要点的精准把控以及强化安装质量的具体路径。通过对设计、材料、焊接、检验等环节的整合分析,本文旨在构建一套更为严谨、科学的安装技术执行框架,为提升化工装置的整体可靠性提供理论参考与技术支持。研究表明,唯有在技术执行的每一个细节上贯彻高标准、严要求,方能从根本上保障化工生产本质安全。

关键词

化工管道; 安装技术; 焊接质量; 应力分析; 无损检测

1 引言

在现代大型化工生产装置中,错综复杂的工艺管道构成了系统的血脉网络。这些管道输送的介质往往具有高温、高压、易燃、易爆、腐蚀或剧毒的特性。因此,管道安装绝非简单的机械连接,而是一项融合了材料科学、结构力学、焊接工艺与质量控制的精密系统工程。安装过程中的任何细微偏差或质量缺陷,都可能成为潜在的安全隐患,引发介质泄漏、火灾甚至爆炸等严重后果,造成巨大的生命财产损失与环境污染。面对日益严苛的安全生产法规和环保要求,传

统依赖经验的安装模式已难以满足现代化工装置长周期、高负荷、安全稳定运行的需求。在此背景下,对化工工艺管道安装技术进行系统性加强与深入研究,探寻其内在规律与技术边界,具有极其重要的现实意义与工程价值。本文的论述即由此展开,力图从技术原理与实践规范的双重维度,探讨强化安装质量的可行路径。

2 化工工艺管道安装的核心概念解析

2.1 化工工艺管道安装的内涵界定与功能定位

化工工艺管道安装是指在化工生产装置的建设或改造过程中,依据设计文件与规范标准,将管道元件通过特定工艺连接成系统,并完成支承、保温、防腐等附属作业,最终形成符合预定工艺要求的完整输送通道的全部活动。这一过

【作者简介】韦宏(1998-),男,中国甘肃定西人,本科,助理工程师,从事工艺与结构技术研究。

程的最终目标是实现管道系统在设计寿命期内安全、可靠、经济地履行其输送功能。其内涵超越了单纯的施工范畴,涵盖了从图纸转化、材料验收、现场预制、组合安装直至最终测试投用的全链条技术与管理活动。功能定位上,它是将静态设计转化为动态可运行实体的关键桥梁,其质量直接决定了工艺设计的意图能否准确实现,是装置投产前最为重要的质量形成环节。管道安装的技术水平是衡量一个工程建设单位或工程总承包单位技术能力与管理水平的重要标尺。

2.2 管道系统完整性在安全生产中的基石作用

管道系统完整性是指管道在物理上和功能上均保持完好无缺的状态,能够承受预期的操作条件与环境载荷,并在整个生命周期内持续满足安全运行的要求。对于化工工艺管道而言,完整性是其发挥安全功能的根本前提。这种完整性由多个维度共同构筑,包括结构完整性、密封完整性、材料完整性以及功能完整性。安装技术正是构筑和维护这一完整性的首要关口。优质的安装确保了管道应力分布合理,避免了过大的局部应力集中。它保障了连接接头的密闭性,杜绝了介质泄漏的通道。它维护了材料的固有性能,防止了安装过程中的损伤或劣化。它实现了管道布置的精确就位,保证了阀门、仪表等附件的正常操作与检修空间。因此,管道安装质量是系统完整性建设的源头,其重要性怎么强调都不为过,是化工安全生产不可动摇的基石。

3 安装技术实施的关键要素剖析

3.1 设计意图的精准解读与现场转化机制

设计文件是安装作业必须遵循的根本法理与技术蓝图。然而,将二维的图纸精确转化为三维的实体,并非简单的按图索骥,而是一个需要深度解读与创造性转化的技术过程。安装团队必须具备精准解读设计意图的能力,这包括理解工艺流程图、管道仪表图中每一根管线、每一个符号所代表的意义,掌握管道布置图、轴测图所确定的空间坐标与走向,明晰材料表中规定的材质、规格与标准。更为关键的是,现场转化机制。由于设备定位误差、结构碰撞、施工空间限制等现场不可预见因素,完全照搬图纸往往不可行。这就需要建立规范的现场设计变更与技术核定流程。安装技术负责人需与设计方密切沟通,在遵循原设计安全与工艺原则的前提下,通过绘制施工详图、制作加工草图等方式,进行合理的现场调整与优化。这一转化机制的有效性,直接决定了最终安装成果是否既符合设计本质要求,又具备现场可施工性与未来可维护性。

3.2 管道组成件材料的质量控制与验收流程

管道组成件,包括管子、管件、法兰、阀门、紧固件、支承件等,其材料质量是安装质量的第一道物质基础。化工介质特性的复杂性对材料提出了耐腐蚀、耐高温、耐高压等特殊要求。因此,建立严格且科学的材料质量控制与验收流程至关重要。此流程始于采购环节的技术规格确认,必须确

保采购文件与设计要求完全一致。材料到货后,验收是核心环节。验收内容不仅包括核对数量、规格型号、材质标识,更需审查质量证明文件,如合格证、材质化验单、无损检测报告等的完整性与符合性。对于关键材质,需要进行光谱复验以杜绝材质错用。所有材料的标识应清晰、可追溯,并按照规定条件进行仓储管理,防止锈蚀、变形或混料。任何不符合要求的材料必须坚决隔离并退场,严禁流入施工环节。这一流程的严格执行,是从源头上杜绝因材料问题导致的安装失效。

3.3 焊接工艺程序的评定与焊工技能管理

焊接是管道安装中最为核心也最易产生隐患的连接工艺。焊接接头的质量决定了管道系统的密封性与强度。确保焊接质量依赖于两大支柱:经评定合格的焊接工艺与具备相应技能的焊工。焊接工艺评定是通过试验验证拟定的焊接工艺参数能否产生符合标准要求的接头性能的过程。评定合格的工艺形成焊接工艺规程,成为现场焊接必须遵守的作业指导书。任何材质、壁厚、焊接方法的改变,都可能需要重新评定。另一方面,焊工技能管理同样关键。焊工必须通过相应资格考核,取得与其所从事焊接工作相匹配的项目资格,并在有效期内。现场需建立焊工档案,实施焊工标识制度,确保每道焊口可追溯至施焊焊工。此外,还需关注焊工的状态管理,包括岗前练习、持续培训以及生理心理状态对焊接操作稳定性的影响^[1]。

4 强化安装质量的核心路径探索

4.1 管道应力分析与柔性设计的优化策略

管道系统在安装状态、操作状态及温度变化下会产生复杂的应力与变形。过大的应力会导致管道或连接处失效,对设备管口产生有害推力或力矩,影响设备安全。因此,在安装前期,必须进行详细的管道应力分析。这项工作基于管道布置,通过专用软件模拟计算管道在各种工况下的应力水平、位移量以及对设备的接口载荷。强化安装质量的路径之一,便是高度重视并优化这一分析设计环节。分析的目的在于验证应力是否在许用范围内,更是主动优化管道柔性。通过合理设置自然补偿弯管、在关键位置增设导向架或限位架、有控制地使用膨胀节等手段,引导应力以安全的方式释放与分布^[2]。优化策略强调从系统角度出发,兼顾热应力、机械应力与重力作用,寻求管道支撑体系与管道本身柔性的最佳平衡点,从而从设计源头上为安装出一个低应力、高可靠性的管道系统奠定基础。

4.2 预制化施工与模块化安装的深度应用

传统现场散装安装模式效率低、质量受环境因素影响大、现场交叉作业安全隐患多。强化安装质量的重要路径在于大力推进预制化施工与模块化安装的深度应用。预制化是指在条件可控的车间或现场预制场内,提前将管道切割、坡口加工、组对、焊接、部分检验等工作完成,形成一个个管

道组合件。模块化则是将关联紧密的管道、设备、仪表、钢结构等集成为一个整体的运输吊装模块。深度应用这两项技术能带来多重优势。其一，车间化作业环境稳定，有利于保证焊接与加工精度，质量更均一可控。其二，大量高空作业、动火作业转移到地面，显著提升施工安全性。其三，缩短现场工期，减少各专业交叉干扰。其四，便于实现标准化、批量化作业，提高工效。实施的关键在于精细的施工规划、准确的三维建模以解决接口问题、以及严格的模块运输与吊装方案。这是现代大型化工项目提升安装技术水平与工程管理层面的必然方向^[1]。

4.3 安装过程中的几何尺寸精准控制体系

管道安装的最终物理形态必须符合设计空间位置要求，这依赖于贯穿始终的几何尺寸精准控制体系。该体系涵盖从基础复核到最终检查的全过程。首先，需以土建结构、设备最终坐标为基准，建立全场统一、精度可靠的测量控制网。管道安装的基准线、标高线均据此引出。在安装过程中，控制重点在于管段组对时的直线度、同心度，法兰连接的平行度与同心度，以及阀门、仪表管嘴等关键元件的方位与标高。特别是对于大型、高温或敏感设备相连的管道，其最后连接口的组对偏差控制极为严格，常需使用千分表等精密工具测量。此外，弹簧支吊架的安装荷载调整、膨胀节安装时的冷紧或预偏置，都是几何控制的重要环节。建立并执行一套从测量工具校准、控制点标识、到工序交接检验的完整程序，是确保管道系统精准就位、避免安装强制应力、保证后期顺畅投用的技术保障。

4.4 多层次无损检测与压力试验的完整性验证

当所有管道安装的实体工作完成后，系统是否真的如我们所愿那样坚固与严密？这需要依靠一系列严酷的“考试”来验证，无损检测与压力试验就是其中最重要的两位“考官”。无损检测是在不损害被检对象的前提下，探测其表面或内部缺陷的科学技术。为了最大限度地提高检出率，需要采用多层次、多技术互补的 NDT 策略。检测的实施必须严格按照经审批的检测比例和合格标准执行，对发现的任何超标缺陷，都必须进行严格的评估，根据规范确定是进行修复还是让步接受，且所有修复部位必须进行重新检测。NDT 合格后，压力试验是最终的、也是最直观的强度与严密性大考。水压试验因其安全性高、检漏直观而被广泛采用。试验压力通常为设计压力的 1.5 倍，需缓慢分级升压，并有足够的稳压时间以便全面检查。对于工艺上忌水或由于设计原因无法进行水压试验的系统，可选择气压试验，但其危险性高，

必须编制极其详尽的安全方案，划定隔离区，采用发泡剂等更灵敏的检漏手段，且试验压力通常较低。

4.5 安装作业人员专业技术素养的系统性提升

一切技术、程序与标准最终都需要由人来执行。因此，强化安装质量的根本路径之一，在于系统性提升作业人员的专业技术素养。这不仅仅是针对焊工、管工等直接操作人员，也包括技术员、质检员、班组长等基层技术管理人员。素养提升是一个系统性的工程。首先是持续的专业知识培训，内容应涵盖最新标准规范解读、典型事故案例剖析、新材料新工艺介绍、专用工具使用等方法。其次是实操技能的强化训练与考核，特别是针对特殊材质焊接、精密安装、复杂测量等关键技能。再者是质量意识与安全文化的培育，使“第一次就把事情做对”、“零缺陷”的理念深入人心。最后，建立有效的激励机制与严谨的责任追溯制度，将个人技能水平、工作质量与职业发展、薪酬待遇挂钩，激发从业人员主动提升技能、严守工艺纪律的内生动力。一支训练有素、作风严谨、责任心强的安装团队，是任何先进技术与管理制度得以有效落地的最终承载者。

5 结语

化工工艺管道安装技术是一个多层次、多环节交织的复杂技术体系。本文从概念内涵出发，剖析了技术实施的关键要素，并重点探索了强化安装质量的若干核心路径。研究表明，加强此项技术研究，必须坚持系统思维，将设计优化、材料控制、工艺创新、过程检验与人员素质视为一个有机整体。任何环节的薄弱都可能成为系统安全的短板。未来的技术研究应当更加注重数字化、智能化技术的融合应用，如利用三维数字化设计指导精准安装，借助物联网技术实现焊接参数的实时监控与追溯。然而，无论技术如何进步，严谨求实的工程态度、精益求精的工匠精神以及对安全红线永葆敬畏的文化，始终是化工工艺管道安装质量最坚固的基石。唯有技术与管理的双轮驱动，方能为化工装置的安全、稳定、长周期运行构建起一道真正牢不可破的防线。

参考文献

- [1] 杨海亮.石油化工艺管道安装施工风险点与技术对策研究[J].石油石化物资采购, 2025(6):184-186.
- [2] 李国锋,齐福祥.石油化工艺管道安装质量通病与防治措施探究[J].中国品牌与防伪, 2025(4):165-167.
- [3] 董祥健.石油化工工程中工艺管道安装施工存在的问题与对策[J].葡萄酒, 2024(11):0034-0036.

Problems and Countermeasures of Process Pipeline Installation and Construction in Chemical Engineering

Jia Wang Hong Wei

1. China Petroleum 6th Construction Co., Ltd., Hanzhong, Shaanxi, 541000, China
2. China Petroleum 6th Construction Co., Ltd., Dingxi, Gansu, 541000, China

Abstract

In chemical engineering, process pipeline systems function akin to the vascular network of the human body, where installation quality directly determines the safety, stability, and long-term operational reliability of entire production facilities. This paper systematically examines key challenges encountered throughout the entire process of process pipeline installation and proposes comprehensive solutions. It first elucidates the fundamental principles of pipeline installation and its critical importance in chemical engineering. Subsequently, it analyzes typical deficiencies and challenges across various stages—from material management and welding quality control to on-site installation. By integrating these systematic solutions, the study aims to provide theoretical insights and practical guidance for enhancing overall quality and safety standards in chemical engineering pipeline installation practices in China.

Keywords

chemical engineering; process pipeline; installation and construction; quality control; welding technology; non-destructive testing

化工工程中工艺管道安装施工的问题与对策

王贾 韦宏

1. 中国石油天然气第六建设有限公司, 中国·陕西 汉中 723303
2. 中国石油天然气第六建设有限公司, 中国·甘肃 定西 730500

摘要

化工工程中, 工艺管道系统犹如人体的血管网络, 其安装施工质量直接关系到整个生产装置的安全、稳定与长周期运行。本文旨在系统探讨工艺管道安装施工过程中存在的关键性问题, 并针对性提出综合性的解决对策。文章首先阐释了工艺管道安装施工的核心内涵及其在化工工程中的极端重要性。随后, 深入剖析了从材料管理、焊接质量控制到现场安装等多个环节暴露出的典型弊端与挑战。通过对这些系统性对策的集成与实施, 旨在为提升我国化工工程工艺管道安装施工的整体质量与安全水平提供理论参考与实践指引。

关键词

化工工程; 工艺管道; 安装施工; 质量控制; 焊接技术; 无损检测

1 引言

化工产业作为国民经济的重要支柱, 其生产装置日益朝着规模化、复杂化与高参数化方向发展。工艺管道作为连接各类反应器、塔器、换热器等静设备及动设备的脉络, 承担着输送高温、高压、易燃、易爆、有毒及腐蚀性介质的关键任务。其安装施工并非简单的管道连接作业, 而是一项融合了材料科学、焊接技术、力学计算、质量控制与项目管理的综合性系统工程。施工过程中的任何细微疏漏, 都可能成为潜在的安全隐患, 引发介质泄漏、火灾爆炸甚至灾难性事故, 造成巨大的人员伤亡、财产损失与环境污染。因此, 深入识别工艺管道安装施工各阶段存在的深层次问题, 并研究

制定科学、严谨、可执行的对策, 对于保障化工装置的本质安全、实现稳定高效生产具有至关重要的现实意义。本文即立足于此, 展开系统性的论述与分析。

2 工艺管道安装施工的核心要义

2.1 工艺管道系统的功能架构解析

工艺管道系统在化工装置中构成了复杂的立体网络, 其功能远不止于介质输送。它需精确实现工艺流程所要求的流量分配、压力平衡、温度控制及相态转变。从架构上解析, 一个完整的工艺管道系统包含管道元件、管件、阀门、支架、隔热层及防腐层等多个组成部分。这些组成部分需根据介质特性、操作条件及环境因素进行精准选型与设计。管道本身需承受内压、外载、热应力及振动载荷; 阀门作为控制枢纽, 其密封性能与调节精度至关重要; 支架体系则需有效约束管道位移, 合理分配应力。因此, 安装施工的本质,

【作者简介】王贾(1997-), 男, 中国陕西汉中, 本科, 助理工程师, 从事工艺与结构技术研究。

是将设计图纸上的静态参数与力学模型,通过一系列工艺手段,转化为现场空间中具有特定功能、满足安全运行要求的实体结构,这一转化过程的精确性与可靠性是安装施工的核心追求。

2.2 安装施工质量对工程安全的基础影响

安装施工质量是决定工艺管道系统能否实现其设计功能、保障长期安全运行的基石。质量缺陷具有隐蔽性、累积性与突发性的特点。一道存在未熔合或裂纹的焊缝,在静水压试验时可能不会暴露,但在交变热应力或腐蚀环境的长期作用下,可能逐渐扩展导致失效。一个不符合标准的法兰连接紧固作业,可能引发垫片密封失效和介质慢性泄漏。管道支架安装位置偏差或选型不当,可能使管道系统产生非设计预期的附加应力,加速疲劳损伤。

3 工艺管道安装施工的关键挑战

3.1 材料设备选型与检验环节的典型弊端

材料与设备的源头质量控制是安装施工的第一道关口,然而在此环节常出现系统性弊端。首要问题是材料管理混乱,存在以次充好、规格代用、标识不清或丢失的现象。例如,不锈钢材料与碳钢材料混放导致误用,管道或阀门材质与设计规定不符。其次,入场检验流于形式,缺乏系统性的验收程序。对管道、管件、阀门及焊材的材质证明文件审查不严,对实物进行的光谱分析、尺寸测量、无损抽检等未能全面覆盖或深度不足,使得有缺陷的材料流入施工现场。

3.2 焊接作业过程的质量控制缺失

焊接是工艺管道安装中技术含量最高、质量影响最大的工序,其质量控制缺失问题尤为突出。焊工资质管理存在漏洞,持证焊工能力与工程实际要求不匹配,或存在人证不一、超项目范围施焊的情况。焊接工艺评定未能有效指导生产,工艺规程编制脱离现场实际条件,或未能被焊工严格执行,存在随意改变焊接参数、预热及层间温度控制不当等问题。焊接过程监控薄弱,焊工自检、班组互检未能有效落实,质量检查人员对坡口处理、组对间隙、清洁度等关键点检查不到位。焊后热处理工艺执行不规范,升温速率、保温温度与时间、降温速率控制不精确,影响了焊缝残余应力的消除效果与力学性能。

3.3 施工安装阶段的精细化管理不足

现场安装施工是多工种、多工序交叉作业的复杂过程,精细化管理不足导致诸多问题。管道预制精度差,在加工厂进行的管道切割、坡口加工、弯管制作等尺寸控制不严,导致现场组对困难,强行组对产生过大安装应力。管道安装空间协调冲突,由于设计深度不足或各专业施工图会审不彻底,工艺管道与电气桥架、仪表管线、结构梁柱等在空间上发生碰撞,现场被迫进行大量修改,影响安装质量与进度。支架安装不规范,支架类型选择错误、安装位置偏移、焊接不牢或滑动支架卡死,未能起到有效支撑与导向作用。法兰

连接质量控制松懈,螺栓紧固未采用对称交叉拧紧法,紧固力矩不均匀,导致法兰面偏斜、垫片压紧力不足。清洁与保护意识淡薄,管道内部在安装过程中落入杂物,安装后的管道开口未及时封闭,管道外防腐层在施工中被破坏^[1]。

4 面向卓越绩效的工艺管道安装施工质量提升综合对策体系

4.1 构建基于唯一标识与区块链理念的全生命周期材料可追溯管理体系

革新材料管理,必须从传统的仓储保管升级为以数据驱动、全过程可追溯的智能资产管理。核心是实施材料的唯一性标识编码,该编码应在材料生产时即由供应商赋予,并贯穿于工厂监造、入场复验、仓储管理、车间预制、现场安装直至最终管线号的整个链条。标识载体应兼具耐久性与可机读性。在此基础上,构建材料大数据平台,集成供应商信息、材质证书、复验报告、存放位置、领用记录、最终使用位置等全维度信息。探索应用区块链技术存证关键质量文件,确保数据不可篡改、易于共享与审计。入场检验须采用基于风险分析的抽样统计方法,对高风险材料如合金钢、高压临氢管道元件实施全检,并综合运用光谱仪、测厚仪、硬度计、内窥镜等多种工具进行多维验证^[2]。

4.2 推行焊接工艺标准化、人员能力认证与过程数字化监控的深度融合

将焊接质量的控制从对结果的检验前移至对过程和能力的全面管理。首先,推动焊接工艺的极致标准化。不仅要要求焊接工艺评定覆盖全面,更要编制极度细化、图文并茂的焊接作业指导书,将坡口型式、清洁工具、焊接参数范围、层道排列、温度测量点位置等全部可视化、量化,使任何合格焊工都能按同一标准执行。其次,建立动态的焊工能力认证与绩效档案。焊工入场考试必须模拟工程实际最苛刻的工况,考试试件需进行无损检测和力学性能试验双重考核。为每位焊工建立包含资质、考试记录、历年拍片合格率、违规记录等在内的电子档案,并与其焊工代号绑定,实现基于数据的焊工能力评估与分级使用。最后,强制推行焊接过程参数的数字化采集与监控。在重要管道焊接中,为焊机加装数据记录模块,实时采集并上传电流、电压、送丝速度、焊接速度、热输入等参数,并与工艺规程窗口进行自动比对、报警。管理者可通过云端平台远程监督现场焊接过程合规性,使焊接从“黑箱操作”变为“透明工艺”,为质量分析、工艺优化和人员培训提供宝贵的大数据资源^[3]。

4.3 实施以数字化孪生与模块化建造为核心的安装精细化流程再造

利用现代信息技术对传统安装流程进行根本性重构。首要任务是创建施工阶段的管道数字化孪生模型。在详细设计模型基础上,集成采购材料数据、预制加工数据、焊接记录数据、检验数据等,形成与物理安装同步生长的“数字线

程”。该模型可用于：进行虚拟安装模拟，优化安装顺序和空间路径；指导现场采用增强现实技术进行管道对位和支架放样，提高精度；实时监控安装进度与质量状态。大力推进深度模块化建造，将管道系统分解为可在预制厂内完成焊接、检验、保温、涂装乃至部分仪表安装的“功能模块”，然后将这些高质量、高完整度的模块运至现场进行“乐高式”组装。这不仅极大提升了质量一致性和清洁度，也减少了高空作业和恶劣环境下的工作量。制定并强制执行管道支架的专项施工方案与检查表，对每个支架的类型、位置、焊接质量、标高进行百分百检查并记录。法兰连接作业推行“标准化作业包”管理，为每个法兰连接点配备规定型号和数量的螺栓、垫片，以及标定好的液压扭矩扳手或螺栓拉伸器，由经过专门培训的班组按既定程序施工，并采用超声波螺栓应力测量等技术进行抽检复核，确保紧固均匀性。

4.4 深化先进无损检测技术的集成化应用与基于风险的检测策略优化

将无损检测从一种事后验证工具，提升为贯穿制造、安装、在役检查全过程的质量决策支持系统。必须推动检测技术的升级换代，在常规射线和超声波检测基础上，大力推广相控阵超声波检测、衍射时差法超声波检测、数字射线成像、导波检测等先进技术。这些技术具有更高的缺陷检出率、更精确的定量能力和数字化的数据结果，便于存储、分析和对比。基于管道系统的风险等级，制定差异化的、科学的检测策略。运用风险分析矩阵，综合考虑介质危害性、失效后果、管道应力水平和以往失效经验，动态确定不同区域焊缝的检测比例、方法和时机。所有检测数据连同管道孪生模型、材料数据、焊接数据一并归档，形成该管道焊缝的“终身健康数字档案”，为预测性维护和寿命周期管理提供核心依据。

4.5 完善系统性的压力试验程序与投运前完整性保障综合验证

压力试验不应被视为孤立的、最后的“一锤子买卖”，而应作为整个施工质量链条的最终集成验证环节，并融入更广泛的投运前完整性保障程序。试验前，必须成立跨专业的试验委员会，编制堪比军事行动方案的详细试验计划，该计划需经过严格的 HAZOP 或 JSA 安全分析。计划中应清晰界定试验系统边界，绘制试验系统图，明确每一个隔离点的位

置与责任人，制定升压曲线、稳压时间、检查路线、应急响应预案。试验介质的选择需审慎评估，优先考虑水压试验，若必须采用气压试验，则必须进行爆炸当量计算，划定严格的安全警戒区，采用远程监控与自动控制系统。试验过程中，除了监控压力，还应部署应变片、振动传感器等监测管道系统的整体结构响应。稳压期间的检查必须系统化、表格化，检查人员需配备强光手电、检漏液、听音棒等工具，对每一处潜在泄漏点进行地毯式排查。试验成功后，需编制完整的压力试验报告，记录所有关键数据、检查结果和参与人员。

5 结语

工艺管道安装施工，这门深植于化工工程腹地的专业技艺，其现代化演进之路，正是我国从化工大国迈向化工强国进程中，必须攻克的质量堡垒与安全关隘。本文所揭示的问题，折射出的是在快速工业化背景下，规模扩张与精细管理、成本控制与本质安全、传统经验与现代科技之间尚存的张力。而所提出的对策体系，则试图描绘一条通过系统性思维、数字化工具和标准化实践来化解这些张力的路径。它强调从材料的“基因管理”到焊接的“过程透明化”，从安装的“数字孪生驱动”到检测的“风险智慧决策”，最终汇集投运前的“完整性综合验证”，构建一个层层递进、环环相扣的质量防御纵深。这不仅仅是一系列技术与管理方法的堆砌，更是一种工程文化的倡导：即倡导一种对质量细节近乎偏执的敬畏，对科学规程坚定不移的恪守，以及对数据价值深刻认知的理性精神。唯有将这种文化内化于组织、固化于流程、外化于行动，工艺管道安装施工才能真正摆脱“低端作业”的窠臼，晋升为确保化工装置安、稳、长、满、优运行的卓越工程实践，为我国化工产业的高质量与可持续发展，铸就最为坚韧可靠的物理基石。这条路任重道远，但方向已然清晰，征程始于足下。

参考文献

- [1] 董泽义,张艳军.石油化工工程中工艺管道安装施工存在的问题与对策[J].中国化工贸易, 2025(13):77-79.
- [2] 佟赫,贯士国.石油化工工程中工艺管道安装施工存在的问题与对策[J].葡萄酒, 2024(14):0166-0168.
- [3] 董祥健.石油化工工程中工艺管道安装施工存在的问题与对策[J].葡萄酒, 2024(11):0034-0036.