

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

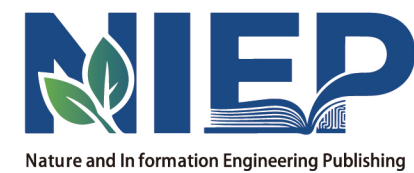
B-03A-15, One South Street Mall, Jalan OS, Taman Serdang Perdana,
43300 Seri Kembangan, Selangor Darul Ehsan.
+60 11-3978 7006
contact@zycentre.com



Construction Machinery and Technology

工程机械与技术杂志

eISSN:3122-6833



Volume 2 Issue 1 January 2026
eISSN: 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

ISSN: 3122-6833 (电子)

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

Serial Title: Construction Machinery and Technology

ISSN: 3122-6833 (Online)

Language: Chinese

URL: https://cn.niepublish.com/cmt

Publisher: Nature and Information Engineering Publishing Sdn Bhd

Database Inclusion



Google Scholar



Crossref



China National Knowledge
Infrastructure

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



Nature and Information Engineering Publishing

《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 (Online)

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

副编委

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	刍议煤矿机械工程智能化的发展与应用	/ 李军
	/ 任红飞	
4	煤矿智能化开采技术难点与科技创新研究	44 高速精密轴承结构优化设计与摩擦磨损性能研究
	/ 李佳航	/ 武广富
7	某天然气液化工厂的工艺设计	47 叉车检验中常见隐患及分析
	/ 高学明	/ 刘源
10	弱电系统设备运维的智能监测与故障预测技术研究	50 人工智能在化工设备维修故障诊断中的应用研究
	/ 李关平	/ 郭福康
14	楼宇弱电智能化系统在复杂机电环境中的协同设计研究	53 刮板输送机中部槽修复技术应用分析
	/ 严忠辉	/ 艾中利
17	仓储物流中轻型桁架机器人结构设计与分析	56 “技能—安全—核文化”三位一体的核电检修高技能人才培养模式探索
	/ 刘浩	/ 蒋小
20	低压电气设备维护中的安全风险分析与控制	59 建设用地土壤污染隐患排查技术路径与风险分级研究
	/ 刘超 刘程	/ 马晓梅
23	几何量通用卡尺校准失准现象的溯源分析与修理方法研究	62 汽轮机轴系对中与检修质量控制的工程实践分析
	/ 戴静芸	/ 单宝岩
26	面向安全生产的石油钻井平台压力仪表失准分析与可靠性保障研究	65 火电机组汽轮机振动问题的成因分析与工程对策
	/ 周智	/ 田春龙
29	水利工程施工围堰技术在水库除险加固工程中的应用	68 市政污水处理厂机电安装工程质量控制关键技术研究
	/ 毛广锋 惠金龙	/ 邵继宾
32	石油化工工艺管道安装质量的控制	71 机械电子技术赋能公路机电系统智能化升级路径研究
	/ 曾繁玲	/ 索伟
35	非标自动化设备中模块化设计方法的应用研究	74 港口四连杆抓斗门座机控制系统研究
	/ 乔毛小	/ 王合龙 魏可威
38	磷石膏建筑制品综合效益评估分析	78 基于机器人带电作业的驱鸟器安装工具研究
	/ 唐琼	/ 安韶辉 刘现飞 张凯 李涛 段立鹏
41	农业机械液压传动系统的故障诊断与可靠性分析	81 基于 PLC 的球磨机与破碎机智能运维控制系统研究与实现
		/ 赵彦波

- | | | | |
|----|---|----|--|
| 1 | A Preliminary Discussion on the Development and Application of Intelligent Technology in Coal Mine Machinery Engineering
/ Hongfei Ren | 44 | Optimization Design of High Speed Precision Bearing Structure and Study on Friction and Wear Performance
/ Guangfu Wu |
| 4 | Research on Technical Challenges and Scientific Innovation in Intelligent Coal Mining
/ Jiahang Li | 47 | Common Hidden Hazards and Analysis in Forklift Inspection
/ Yuan Liu |
| 7 | Process design of a natural gas liquefaction plant
/ Xueming Gao | 50 | Research on the application of artificial intelligence in chemical equipment maintenance fault diagnosis
/ Fukang Guo |
| 10 | Research on Intelligent Monitoring and Fault Prediction Technology for the Operation and Maintenance of Weak Current System Equipment
/ Guanping Li | 53 | Application analysis of repair technology for the middle groove of scraper conveyor
/ Zhongli Ai |
| 14 | Research on Collaborative Design of Building Weak Current Intelligent System in Complex Electromechanical Environment
/ Zhonghui Yan | 56 | Exploration of the Three in One Training Model for High Skilled Talents in Nuclear Power Maintenance and Inspection: Skills, Safety, and Nuclear Culture
/ Xiao Jiang |
| 17 | Structural Design and Analysis of Light Truss Robots in Warehousing Logistics
/ Hao Liu | 59 | Research on Technical Path and Risk Classification of Soil Pollution Hazard Investigation in Construction Land
/ Xiaomei Ma |
| 20 | Safety risk analysis and control in low voltage electrical equipment maintenance
/ Chao Liu Cheng Liu | 62 | Engineering Practice Analysis of Turbine Shaft Alignment and Maintenance Quality Control
/ Baoyan Shan |
| 23 | Research on the Trace Analysis and Repair Method of Geometric Universal Caliper Calibration
/ Jingyun Dai | 65 | Analysis of the Causes of Steam Turbine Vibration in Thermal Power Units and Engineering Countermeasures
/ Chunlong Tian |
| 26 | Research on the Analysis and Reliability Assurance of Pressure Instrument Misalignment of Petroleum Drilling Platform for Safety Production
/ Zhi Zhou | 68 | Research on Key Technologies for Quality Control of Mechanical and Electrical Installation Engineering in Municipal Wastewater Treatment Plants
/ Jibin Shao |
| 29 | Application of cofferdam technology in water conservancy project in reservoir reinforcement project
/ Guangfeng Mao Jinlong Hui | 71 | Research on the Path of Intelligent Upgrading of Highway Mechanical and Electrical Systems Empowered by Mechatronics Technology
/ Wei Suo |
| 32 | Quality Control of Petrochemical Process Pipeline Installation
/ Fanling Zeng | 74 | Research on the Control System of Four-bar Grab Door Seat Machine in Port
/ Helong Wang Kewei Wei |
| 35 | Research on the Application of Modular Design Methods in Non-Standard Automated Equipment
/ Maoxiao Qiao | 78 | Research on Installation Tools of Bird Repellent Based on Robot Live Working
/ Shaohui An Xianfei Liu Kai Zhang Tao Li Lipeng Duan |
| 38 | Comprehensive Benefit Evaluation and Analysis of Phosphogypsum Building Products
/ Qiong Tang | 81 | Research and Implementation of Intelligent Operation and Maintenance Control System for Ball Mill and Crusher Based on PLC
/ Yanbo Zhao |
| 41 | Fault Diagnosis and Reliability Analysis of Hydraulic Transmission System of Agricultural Machinery
/ Jun Li | | |

A Preliminary Discussion on the Development and Application of Intelligent Technology in Coal Mine Machinery Engineering

Hongfei Ren

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

Abstract

As an important pillar of China's energy structure, coal mines' safety production and mining efficiency are closely related to the lifeline of the national economy. The intelligentization of mechanical engineering, with its advantages of deep perception, autonomous decision-making, and precise execution, is profoundly reshaping the traditional coal mining model and becoming a key breakthrough in resolving safety dilemmas and improving economic efficiency. This article focuses on the essential transition of coal mine mechanization system from automation to intelligence. The system outlines the core supporting technology framework, covering key links such as sensor networking, information fusion, intelligent decision control, and equipment collaboration technology. By analyzing the practical application efficiency of intelligent technology in core areas such as intelligent mining, intelligent excavation, main and auxiliary transportation, ventilation and drainage, and safety assurance, combined with the current technological bottlenecks and system collaboration barriers, this paper explores the technological evolution path and implementation strategies for the future development of intelligent coal mines.

Keywords

Coal mine; Mechanical engineering; Intelligence

刍议煤矿机械工程智能化的发展与应用

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

煤矿作为我国能源结构的重要支柱，其安全生产与开采效率关乎国民经济命脉。机械工程智能化以其深度感知、自主决策、精准执行的优势，正深刻重塑传统煤炭开采模式，成为化解安全困境与提升经济效益的关键突破口。本文聚焦煤矿机械化系统由自动化向智能化的本质跃迁，系统梳理核心支撑技术框架，涵盖传感网联、信息融合、智能决策控制及装备协同技术等关键环节。通过剖析智能化技术在智能开采、智能掘进、主辅运输、通风排水、安全保障等核心环节的实际应用效能，结合当前存在的技术瓶颈与系统协同壁垒，探讨未来煤矿智能化发展的技术演进路径与实施策略。

关键词

煤矿；机械工程；智能化

1 引言

煤炭作为支撑我国能源消费体系的主体资源，其生产安全水平与开采效率始终是国家能源安全保障与企业运营效益的核心议题。传统煤矿开采作业面临地质条件多变、高危环境持续、人工作业强度大、效率潜力受限等固有挑战，安全事故与生产效率制约问题频现。近年来，以物联网、人工智能、大数据、机器人等为代表的颠覆性技术群在工程应用层面的高速渗透，为传统煤矿机械工程注入了智能化革新的强大动能。智能化并非自动化技术的简单延续，而是面向复杂矿井环境、具备深度环境感知、信息自处理、工况自适应

应决策与协同控制能力的智能化装备与管控体系的系统集成。它不仅深刻重塑了矿山装备的技术内涵与功能架构，更推动了煤矿生产组织模式与安全管理范式的重大变革。本文旨在立足于当前煤矿智能化实践基础，厘清智能化技术核心发展脉络与应用方向，剖析其在煤矿生产各环节的实际效能发挥状况，并针对暴露出的关键问题，前瞻未来突破路径与实施策略。

2 煤矿机械工程智能化发展概述与核心驱动力

煤矿机械工程智能化并非凭空构建的全新体系，而是伴随自动化技术持续深化与现代信息技术革命融合渗透而成的必然发展趋势。其核心脉络体现为由局部工序自动化向全系统智能协同的跃迁过程，早期以单机自动化作业为起点，例如基于固定程序指令操作的简易采煤机、输送机启停控制装置等。而智能化阶段的本质提升在于技术装备具备对

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

环境关键信息的有效感知力、对多维异构数据的融合解析力、依据工况自主生成优化策略的决策力以及多系统间响应协同的执行力。构成这一跃迁的根本驱动力源于多重现实需求叠加：首当其冲的是国家及社会对煤矿本质安全水平提升的空前迫切性。长期受困于高事故率与重特重大事故阴影的传统人工作业模式亟需被智能无人化操作模式彻底替代，以彻底阻断人员暴露于高风险环境的机会，从根本上杜绝人因失误风险。其次在于资源高效绿色开采的内在经济驱动。我国优质煤炭资源日渐稀缺，老矿深井占比攀升，亟需通过智能化技术突破装备极限适应性，精准控制资源回收率，降低无效能耗与无效维护投入。

3 煤矿机械工程智能化核心支撑技术体系

3.1 智能传感与泛在物联网络技术

作为感知中枢的智能传感与泛在物联网络技术，构成了煤矿机械工程智能化的底层基础。该技术领域已取得多项突破，开发出低功耗、高可靠性的瓦斯浓度、粉尘浓度、一氧化碳浓度等多参数环境传感器阵列。具备自校正功能的采煤机姿态倾角传感单元、大负载高精度液压支架压力状态传感单元、输送带健康状态监测传感单元、大型设备轴承温度振动状态监测传感单元等关键装备状态传感器。各类传感器依托有线高速工业总线网络（如矿用以太网、CAN总线）、无线抗扰低功耗传感网（如 ZigBee、LoRa）以及新型矿用 5G 专网混合组网模式，实现了对井下复杂动态环境的全域参数感知与海量装备运行数据的实时高速采集与传输网络覆盖。

3.2 多源异构信息融合与边缘智能处理技术

多源异构信息融合与边缘智能处理技术，致力于解决煤矿环境中感知数据类型繁复（包括结构化时序参数与非结构化图像、点云数据）、来源多样（涵盖环境参数、设备状态、影像数据、地质信息等）以及噪声干扰严重等问题。该技术采用自适应滤波方法对噪声数据进行深度处理，通过时序关联数据修正与补偿环境干扰项。在信息融合层面，广泛应用贝叶斯方法、D-S 证据理论及深度神经网络方法，实现了对瓦斯涌出异常、设备早期微弱故障征兆、顶板应力异常区域等复杂隐蔽状态的智能识别与准确评估。边缘计算节点的部署使得大量关键数据的特征提取与分析任务（如煤岩界面视觉识别的初期处理）能够在数据产生地就近完成，有效缓解了海量数据传输至远程云平台的压力，并显著提升了关键决策的响应时效性^[2]。

3.3 数据驱动的智能决策与精准控制技术

智能化的核心决策能力来源于数据驱动的智能决策与精准控制技术系统。该系统涵盖基于地质勘探数据、地质力学参数及历史作业大数据构建的三维矿井地质模型平台，以及在该平台上运行的采矿工程仿真优化环境。在采煤工作面内，依托深度强化学习算法与多智能体协同决策模型，实现

了对采煤机行进轨迹、截割滚筒转速功率模式、液压支架组递进推拉动作序列在复杂地质条件下的全局自优化控制策略生成。自适应截割模型依据滚动力矩与视觉传感器对煤岩硬度变化的在线辨识数据，动态调整滚筒截齿切入深度。通风设备则依据瓦斯浓度传感器网络分布数据，并结合风阻参数模型，实现风量供需匹配模型的智能寻优调整控制。

3.4 智能化装备集群协同控制技术

系统协同层面的保障能力源自智能化装备集群协同控制技术的持续演进。该技术包括精准可靠的井下多源融合定位服务（融合 UWB、惯导与视觉定位技术），为人员、穿梭车、采掘设备提供稳定厘米级定位服务能力。面向无轨胶轮车、胶带输送系统、无人辅助作业车等建立的智能调度中心平台与分布式局部路径规划协同控制系统，实现了物流作业任务流的精准协同。各类作业设备之间（如采煤机与液压支架群、掘锚一体机与转载机）构建的设备群状态感知共享机制与协同动作序列指令协议，通过底层即时通讯机制保障关键工序设备间高效可靠的动作同步运行能力^[2]。

4 煤矿机械工程智能化的核心应用场景剖析

4.1 智能开采系统

综采工作面的智能化水平是衡量整个煤矿现代化程度的核心标尺，当前智能化开采系统已形成成熟度较高的系统解决方案。系统核心构成为装备高精度工业传感单元的智能采煤机组、配电液控阀组与压力传感器具备自动递进移架功能的液压支架群、搭载煤流检测设备具备自适应调速能力的刮板输送机设备以及承担海量运行数据整合分析任务的控制中心平台单元。系统关键突破在于装备激光雷达、三维视觉系统与多种工况传感器的采煤机组已具备对煤岩界面的在线感知能力与空间轨迹自规划能力。机组结合高精度惯性导航系统生成的地理参照信息，可依据预置地质模型与开采工艺模型自动生成最优化的牵引路径序列，并依据滚筒力矩实时数据与环境瓦斯数据动态修正切割策略实现最优功率模式运转。液压支架控制器通过传感器实时监测支撑压力变化数据以及红外摄像头获取的邻架位置偏移数据，基于预设顶板管理规程策略自动执行跟机伸缩动作与支撑压力循环补偿操作，保障工作面持续稳定推进与顶板围岩安全。在极端工况（如瓦斯浓度短时异常波动或顶板局部压力突变事件）发生时，控制中心能够瞬时接管干预，远程强制停机并启动应急预案模块确保整体安全。整个流程构建的感知优化循环体系大幅解放了传统人工干预需求^[3]。

4.2 智能掘进技术

巷道智能掘进技术因环境多变复杂性当前正处于技术融合攻坚期，核心方向聚焦于掘锚协同作业与精准导航定位能力的突破。智能化掘锚一体机装备多元融合传感网络，通过机载三维激光扫描传感器实时捕捉巷道前方煤岩体空间结构，机械臂末端的红外视觉系统则提供对锚杆钻孔位置的

高精度定位信息数据。系统内部集成的高性能定位导航模组融合激光 SLAM 建图与捷联惯导技术,使得设备具备在低光照高粉尘环境下可靠空间定位能力,保障设备严格按预铺设设计路径线稳定行进作业。作业控制系统基于视觉点云构建的岩体强度分布热力图,实时为凿岩机提供最优凿孔深度与钻速参数组合,极大提升支护效能同时减低刀具损耗率;钻孔机器人则依据红外定位数据引导实现全自动锚杆精确安装功能;机载自感知胶带转载系统依据采落物料流量变化实时调整运行速度避免物料堵塞。整套系统运行数据由控制平台集中处理并依据地质雷达数据构建巷道前方岩体结构预测模型不断修正优化整体掘进节奏策略^[4]。

4.3 主辅运输智能化

运输系统作为煤矿关键动脉其智能化水平直接影响生产连续性。主运输胶带系统智能化重点体现为装备大量状态感知节点构成密集传感网络系统:分布在滚筒处的振动传感单元实时监测轴承温度状态;布设在沿线的视觉巡检机器人与红外热成像仪系统在线识别皮带撕裂纵向裂纹或跑偏异常事件;张力应变传感器与音频分析模块则负责对关键滚筒区域的摩擦状态进行预警性分析识别。中央控制系统依据各段载荷流量数据建立智能调速模型实时优化整线能耗状态。在辅助运输无人化层面发展尤为迅猛,搭载环境感知模块(含激光雷达摄像头等)并融合高精度定位技术的无轨胶轮车可实现基于全局地图任务分配模块调度指令规划最优运行路径执行物流转运任务;架空乘人装置则通过智能门禁调度系统实现按需精准运转,最大程度降低无效能耗;基于5G网络的矿用无人机系统实现井下固定区域高速视觉巡检任务构建重要场所监控网络^[5]。

4.4 智能通风排水安全保障体系

智能通风系统的核心在于风量调控环节。系统依托构建完善的瓦斯参数测点网络获取浓度分布数据;通过风速监测装置获取巷道风量数据;并整合通风系统物理拓扑结构模型建立全局风量供求匹配数据库。智能调控算法依据瓦斯实时涌出数据与作业区域分布模型预测需风量变化趋势自动调整局扇风机参数运行状态保障最优风量供给配给效能。智能排水系统则通过压力传感器群构建的工况感知网络实现水仓水位实时感知预警;配备智能启停策略的电控阀门组依据水位变化与水泵运行效率曲线完成泵组最优投切调度任务最大程度节省能耗开支。安全保障体系层面智能视频分析平台通过部署在关键区域的摄像设备结合 AI 算法实现人员异常行为识别系统对违章行为智能识别预警;具备高精度定位功能的矿用穿戴设备构建人员实时位置分布图实现对危

险区域人员进入自动告警功能^[6]。

4.5 成本管控与能效智能化管控

智能化技术为煤矿精细管理提供了强有力的工具链支持。设备健康管理预测系统通过对机组运行噪声频谱、温度振动参数数据进行建模分析预测潜在运行故障点及剩余寿命区间信息优化维保计划制定;基于大数据驱动的能耗管理系统通过建立全局设备功率数据库与生产数据关联性模型发掘节能潜力点实现生产全链条的能耗透明化管理控制优化用能效率;智能仓储平台通过自动识别物资单元构建库存信息可视化数据库并依据消耗模型预测生成最优化采购方案避免库存积压问题。这些工具体系共同构建了数据驱动决策模式,从运行维保、资源消耗、物资流转层面系统性优化成本结构提升整体投入产出效益比,助力企业实现深层次管理优化目标^[7]。

5 结语

煤矿机械工程智能化作为技术革新深刻融合产业需求的现实产物,已从概念蓝图快速演进为重塑行业核心能力的工程实践方向,展现出对提升煤矿本质安全水平、破解深部资源高效开采瓶颈、优化资源循环利用效率的强大赋能效应。当前在综采工作面的精准控制装备应用、运输系统自动化调度领域已实现规模化成熟应用并收获显著效能提升成果。而在地下复杂空间的导航定位精度与稳定可靠性、装备作业环境适应性、海量实时数据有效融合应用、跨层级系统架构优化协同等方面尚存系统性技术瓶颈亟待集中力量攻关解决。面向未来高质量发展战略需求与碳达峰碳中和背景挑战,煤矿智能化升级已成为不可逆的战略路径选择。

参考文献

- [1] 冀呈昕.智能化技术在农业机械工程技术中的现状和发展趋势[J].农业机械,2024,(12):83-85.-2
- [2] 马宝华,卜现美.智能化技术在农业机械工程自动化中的应用[J].热带农业工程,2024,48(04):5-8.
- [3] 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.
- [4] 易义宁,李泳霄,黄德位.基于矿山智能化技术的机械工程自动化运用及发展[J].中国战略新兴产业,2024,(06):152-155.
- [5] 沈蕾.机械工程智能化现状与发展方向[J].辽宁高职学报,2023,25(10):101-104.
- [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] 郝一宁.机械工程自动化中智能化技术的应用[J].造纸装备及材料,2023,52(03):120-122.

Research on Technical Challenges and Scientific Innovation in Intelligent Coal Mining

Jiahang Li

Shaanxi Huaneng Yulin Coal and Power Co., Ltd., Yulin, Shaanxi, 719000, China

Abstract

Intelligent mining of coal mines is the only way to achieve safe, efficient, and green development of the coal industry. This article deeply analyzes the main technical difficulties faced in the current intelligent mining process of coal mines, including insufficient accuracy and real-time environmental perception under complex geological conditions, the need to improve the intelligent collaborative control level of mining equipment groups, and the incomplete intelligent safety guarantee system. In response to these difficulties, this article systematically explores corresponding technological innovation paths and solutions, focusing on key areas such as high-precision geological exploration and perception technology based on multi-source information fusion, intelligent collaborative control and optimization technology for mining equipment groups, intelligent safety risk warning and prevention technology based on big data and artificial intelligence, human-machine collaborative optimization technology for intelligent mining systems, and intelligent standard system and platform construction, providing strong technical support for the transformation, upgrading, and high-quality development of the coal industry.

Keywords

coal mine intelligence; Mining technology; Technical difficulties; Technological innovation; Intelligent mining system

煤矿智能化开采技术难点与科技创新研究

李佳航

陕西华电榆横煤电有限责任公司，中国·陕西 榆林 719000

摘要

煤矿智能化开采是实现煤炭工业安全、高效、绿色发展的必由之路。本文深入分析了当前煤矿智能化开采进程中面临的主要技术难点，包括复杂地质条件下环境感知的精准性与实时性不足、开采装备群智能化协同控制水平有待提升、智能化安全保障体系尚不完善等核心问题。针对这些难点，本文系统性地探讨了相应的科技创新路径与解决方案，重点研究了基于多源信息融合的高精度地质探测与感知技术、开采装备群智能协同控制与优化技术、基于大数据与人工智能的安全风险智能预警与防控技术、智能化开采系统的人机协同优化技术以及智能化标准体系与平台建设等关键领域，为煤炭行业的转型升级与高质量发展提供强有力的技术支撑。

关键词

煤矿智能化；开采技术；技术难点；科技创新；智能开采系统

1 引言

煤炭作为我国主体能源，其安全高效开采对国家能源安全与经济发展至关重要。近年来，随着物联网、大数据、人工智能、机器人等新一代信息技术的迅猛发展，煤矿智能化建设已成为煤炭工业高质量发展的核心方向与战略选择。国家层面相继出台多项政策，大力推动煤矿智能化建设，旨在通过科技创新提升煤矿本质安全水平、改善作业环境、提高生产效率。然而，煤矿井下环境极端复杂，具有强干扰、高粉尘、空间受限、地质条件多变等特点，对智能化技术的

适应性、可靠性与稳定性提出了严峻挑战。

2 煤矿智能化开采技术现状与发展趋势

2.1 智能化开采技术发展现状

从当前的技术应用来划分，基于综采工作面的智能化开采系统已经从单机自动化逐步向系统智能化发展。其应用表现如下：一是先进矿井已经具备采煤机基于记忆截割或基于地质模型引导的自动截割功能；二是初具采煤机动作带动下的液压支架自动跟机移架及成组控制技术；三是工作面运输系统中的刮板输送机、转载机、破碎机实现了联合的集中控制监测；四是煤矿采用了巡检机器人代替工人去监测设备状态以及生产环境参数等；五是初具以工业以太网为依托的矿山物联网体系构建，实现了系统间的一定数据传输通道

【作者简介】李佳航（1994-），男，中国山东邹城人，本科，工程师，从事煤矿智能化、信息化、矿山供电研究。

的构建。

2.2 智能化开采技术发展趋势

一是感知维度的深化,由单一的传感器向多传感器协同、由点状监测向空间连续探测发展,结合地质透明化技术,建立高精度、实时三维地质模型以及工作面环境模型,进而为智能决策提供有力保障。二是个体装备智能化程度的提高,采煤机、液压支架、运输系统等主体装备具有更高的环境感知能力、自我检测能力和基于复杂算法的自我决策能力,从程序化控制向智能化控制发展。三是系统化协作能力提升,通过统一的智能化管控平台,将采、掘、机、运、通、安各个子系统进行高度集成并进行智能化协同,全矿井智能运行。

3 煤矿智能化开采面临的关键技术难点

3.1 复杂地质条件下环境精准感知与建模难题

煤矿井下地质环境存在煤层厚薄变化大、断层多、顶底板岩性变化频繁、瓦斯区域异常、水文地质条件复杂等问题,对智能化开采系统的环境感知带来了极大的挑战。其中难点在于现有井下传感器在粉尘浓度高、湿度大、电磁干扰等因素严重的大环境下其精度、稳定性、寿命易受到影响,难以保证井下采集数据的连续性、准确性。井下小断层、陷落柱等小特征的细部探测和超前识别技术还不成熟,缺少高效率、高精度的随掘随探或随采随探技术。瓦斯、粉尘、水灾等多源灾害信息的多元融合与关联建模能力较弱,难以达到对灾害隐患准确定位和尽早预警分析的目标。针对不完整和不准确的井下感知数据所建立三维地质模型的精度不高,难以支撑采煤机等高精自动化设备的自适应控制,如何突破极端环境下井下高可靠感知技术、井下超前精细地质探测技术、多灾害信息智能融合建模等技术问题,是智能化开采中目前存在的首要瓶颈问题。

3.2 开采装备群智能协同控制与自主决策瓶颈

从采煤机、液压支架、刮板输送机等多个装备相互配合协同作业方面看,装备群的协同智能化控制与自主决策方面困难重重。困难原因有:各个装备间协同的控制逻辑难度较大,需要按照煤层赋存条件以及自身装备运转状态的变化不断进行控制逻辑的调整与优化,基于预先的规则约束实现的控制策略缺乏灵活与变动性,难以应对各种复杂工况;采煤机-支架间的精确空间位置协同控制难度较大,针对井下采煤工作面受条件限制的受限空间定位技术(惯性导航、里程计、UWB等)均存在定位的累积误差或者定位信号干扰等问题,影响了支架移架的空间位姿精度以及移架时序协同性;刮板输送机具有较大的负载变化,输送机的运行状态变化直接制约采煤机的速度变化,而采煤机-液压支架-运输机的装备全局动态优化控制的算法并不成熟;针对大型装备群间的通信实时性与可靠性保障与控制策略依然存在问题,即控制策略的通信指令在执行过程中存在较大时间延迟以

及通信的控制指令出现丢包现象时,难以实现作业的正常控制甚至导致事故发生;针对采煤机、支架等大型装备在突然工况(如大块煤矸、顶板不正常来压)下自主的应急决策不够成熟,仍需要人员人工干预。

3.3 智能化安全保障体系构建与可靠性挑战

安全是煤矿生产的永恒主题,智能化开采也对安全保障提出更高的要求,但同时也存在新的问题,主要是:传统安全监控系统基本是独立的子系统,数据杂乱,形成很多的数据孤岛,无法提供基于多系统数据融合的风险联动动态监测预警。瓦斯、水、火、顶板、粉尘、冲击地压等灾害的实时监测数据量巨大,有效信息提取和灾害演化规律的智能判读不足,灾害的预警精确性和时效性不高等问题。设备故障诊断主要基于阈值的报警、人工的定期检修、巡检等,基于运行数据实现设备早期故障智能预测与健康评估管理尚不深入,无法提供预防性维护手段。在极端工况或部分系统失效情况下,能否保证智能化系统支持人员安全撤离、能否提供安全的闭锁或降级运行等功能,其可靠性验证和保障机制尚不完整^[1]。

4 推动煤矿智能化开采的科技创新策略

4.1 突破地质透明化与精准感知技术

探索感知,主要是为了解决复杂地质条件下感知难的问题。要着力攻克地质透明化与高可靠感知技术,加大随掘随探、随采随探等高精度、抗干扰、一孔多能的多技术耦合随进工作面内部构造精细化成像和超前识别技术的发展力度,开发适应井下环境的新型智能传感器,实现瓦斯浓度、粉尘浓度、温度、湿度、压力、微震、设备振动等参数的高维度、实时、高精度感知,重点开展多源异构感知数据智能融合技术研究,采用人工智能算法对地质、环境、装备等状态数据进行动态相关分析,形成动态更新的高精度三维地质-工程模型,为智能决策提供“数字孪生”基础。开发应用基于光纤传感、量子传感等先进技术环境感知研究,增强系统的感知精度和可靠性^[2]。

4.2 强化开采装备群智能协同与自主控制能力

智能协同提高装备群的生产效率、确保生产安全是核心,科技创新应针对如下问题开展探索:研究多源融合的井下精准定位导航技术,如基于UWB、里程计、惯性导航、激光SLAM的井下定位技术,确保采煤机、液压支架等移动装备厘米级精准定位,为装备群协同控制提供时空基础。研究基于人工智能的装备群协同控制算法,采用强化学习、模型预测控制等方法进行采煤机割煤速度、液压支架移架步序与步距、刮板输送机运行速度的全局动态优化、实时自适应调整,使其适用于煤层变化与负载波动等。研究装备群故障在线智能诊断与预测性维护方法,从设备运行状况数据出发进行故障分析,提前判断可能发生的故障,改善设备检修计划,确保设备可靠运行^[3]。加强装备自主决策能力,赋予

其一定边界条件约束下的应急处置权限,如遇顶板异常自动闭锁或降速等,减少对人的依赖性。研究低延时、高带宽、高可靠的井下装备群工业控制网络,确保控制指令实时可靠传输。通过装备智能、控制智能和网络智能,使装备群由机械化协同向智能化协同迈进。

4.3 构建基于大数据与人工智能的安全智能预警防控体系

一要通过科技创新构建智能化安全保障体系。实施数据共享工程。构建煤矿安全大数据平台,实现安全监控、人员定位、设备状态监测、视频图像、地质等全面集成统一的数据采集、接入、处理和应用,开发以大数据分析处理及人工智能算法为理论基础的多灾害耦合风险智能化安全预测、预报警模型,如利用机器学习算法分析瓦斯涌出趋势、微震信号辨识预警冲击地压、融合水害地质参数判别突水危险程度等,从而实现超前、预知预报警灾害隐患。发展人工智能视频识别技术。智能识别人员不安全行为、设备故障、巷道变形等风险;强化“空、灵、活”智能化视频平台的研发。实现对现场风险的及时分析研判。发展智能视频分析技术,自动识别人员违章、设备异常状态、巷道变形等安全隐患,提升监控效率。一旦遇到预警情况,煤矿应急联动或指挥系统自动执行防控措施,如区域限制供电、人员安全撤离引导、应急排水等,辅助管理人员决策,强化网络安全防护。通过科技创新手段,实现由被动保障安全到安全超前、主动预测防控的跨越式改变,全面提升煤矿安全生产“智能化”水平和本质安全保障能力。

4.4 优化智能化开采人机协同交互与决策机制

智慧开采不应是为了替代人,而是为了更好地发挥人的效用、保障人的生命安全的人机协同开采。通过智能技术创新,进一步重视以下几个方面:开发人工智能化的交互界面和决策信息,基于虚拟和现实技术,构建虚拟沉浸式地面实时监控操作界面,让人能够在地面看到真实井下情况,并顺利对井下情况轻松地进行操作或指挥;开发智能辅助决策系统,基于实时数据、事前规则库等为地面管理层决策提供更好的生产组织、计划优化、设备检修、安全风险管理等决策优化依据;开展智能化系统与人工经验的深度融合机制,将领域专家的知识经验转化为机器可理解的规则或模型,同时保留人工在复杂、突发情况下的最终决策权,形成优势互补;探索不同智能程度时人机功能的最佳分配方式和不同阶段的人的技能培训和角色变更策略,以期达到人机协同最优效应。

4.5 推进智能化标准体系与开放平台建设

基础设施标准化、平台化支撑煤矿智能化规模化、可

持续发展。科技创新同时发力:加快推进煤矿智能化标准体系建设,从标准、参数及接口协议上统一煤矿智能装备制造、应用及服务标准体系,包括统一通信协议、数据接口标准、设备互联互通标准、信息安全标准、智能化评级评价标准等,破解不同厂商设备及系统之间的对接标准,助力煤矿智能化产业良好发展。开发具备强大的智能化综合管控和丰富的扩展接口的综合管控平台,功能具备数据融合、集中监视、智能分析、联动控制、决策支持等作用,支持可扩充的模块插件或第三方应用,为矿山智能化各类应用软件提供基础运行环境和技术支持,鼓励产学研用联合攻关,建设煤矿智能化相关测试验证平台或开放实验室,以最快速度孵化新技术、培养新人才、构建新技术生态圈。鼓励支持我国自主研发煤矿智能化核心的软件和硬件,加快煤矿智能化核心软硬件的自主化研制及应用,进一步提高我国煤矿智能化核心产品产业链上的自主创新能力。以标准统领、平台驱动等手段,有效缓解智能化建设过程中技术、人员等方面的投入高、集成成本高等问题,加快推动智能化技术在煤炭行业的“开花”“结果”,并全面提升煤矿智能化技术的应用范围及水平,实现煤矿从“点线突破”到“面”的推进。

5 结语

煤矿智能化开采是煤炭工业实现安全、高效、绿色发展的关键技术创新,是煤炭开采技术未来发展方向。论文全面剖析现有煤矿智能化开采在复杂地质精细感知、开采装备群协同智能、安全保障体系构建等方面面临的核心技术问题,针对性提出基于地质透明与精准感知、基于装备群智能协同的开采技术控制、大数据与人工智能安全保障、人机协同的控制技术优化、基于标准体系与平台建设等五大科技创新策略;认为煤矿智能化开采能够克服现有挑战,必须通过持续全面地开展科技创新,突破感知与探测技术、技术装备群协同智能控制技术、安全保障体系构建等技术瓶颈,才能有效解决煤矿智能化开采在技术方面遇到的关键性难题,使之技术持续升级。未来煤矿智能化将随着新一代信息技术迭代和与煤炭开采的深度融合,技术进一步提升,实现煤矿少人/无人安全高效开采。

参考文献

- [1] 吴群英,胡俭,刘凯,等.浅埋多煤层群协调绿色开采关键技术研发与实践[J].煤炭科学技术,2024,52(9):19-30.
- [2] 魏文艳.我国煤矿智能化发展及技术创新[J].煤炭经济研究,2024,44(8):102-108.
- [3] 胡明军.贵州豫能新田煤矿:智能化开采驶入“快车道”[J].能源新观察,2023(1):35-37.

Process design of a natural gas liquefaction plant

Xueming Gao

National Pipeline Network Group Guangdong East Liquefied Natural Gas Co., Ltd., Jieyang, Guangdong, 515200, China

Abstract

Natural gas is one of the non-renewable mineral resources with abundant reserves worldwide, featuring advantages in reserves and low-pollution emission during utilization, and it is a widely applied energy type in China at the current stage. As a high-quality clean energy source, natural gas plays a crucial role in the development of the national economy. Based on its physical properties, natural gas can significantly improve transportation efficiency and reduce transportation costs after liquefaction treatment; thus, LNG liquefaction technology has become a core technical direction in the field of natural gas development and utilization. This paper conducts research focusing on the process flow of natural gas liquefaction plants, sorts out three mainstream types of natural gas liquefaction technologies at home and abroad, and conducts an in-depth analysis of the technical details and application key points of the mixed refrigerant liquefaction process, aiming to provide references for relevant engineering practices.

Keywords

Natural gas; LNG; Liquefaction technology; Mixed refrigerant; Technological process; Safety control

某天然气液化工厂的工艺设计

高学明

国家管网集团粤东液化天然气有限责任公司, 中国·广东 揭阳 515200

摘要

天然气是全球储量丰富的不可再生矿产资源之一,兼具储量优势与低污染排放的使用特性,是我国现阶段应用广泛的能源类型。作为优质清洁能源,天然气在国民经济发展中占据关键地位。基于其物理特性,天然气经液化处理后可大幅提升运输效率、降低运输成本,LNG液化技术也因此成为天然气开发利用领域的核心技术方向。本文围绕天然气液化工厂的工艺流程展开研究,梳理了当前国内外主流的三类天然气液化技术,并针对混合制冷剂液化流程的技术细节与应用要点进行深度剖析,旨在为相关工程实践提供参考。

关键词

天然气; LNG; 液化技术; 混合制冷剂; 工艺流程; 安全管控

1 引言

液化天然气(LNG)是将气田开采的天然气经净化处理后,通过超低温冷却工艺转化为常压液态的天然气产品,凭借清洁环保的特性,被视为现阶段最具发展潜力的化石能源之一。LNG的开发与利用不仅能缓解能源结构转型压力,还能推动天然气资源的跨区域调配,对能源安全保障具有重要意义。

2 液化天然气概况

在标准大气压下,天然气需被冷却至约 -163°C 才能实现液化。LNG的主要成分为甲烷,具备无色、无味、无毒且无腐蚀性的特性,其液态体积仅为同量气态天然气的

的1/625,质量约为同体积水的45%。不同液化工厂生产的LNG组分存在差异,依据《GB/T38753-2020 液化天然气》的分类标准,可根据甲烷含量和高位发热量将其划分为贫液类、常规类和富液类。

全球天然气资源分布的不均衡性、LNG技术的持续进步与成本下降,以及贸易模式的多元化发展,推动了LNG的全球化贸易进程,其在天然气国际贸易中的占比逐年提升。随着中国等新兴市场对LNG需求的增长,全球LNG产业呈现出持续扩张的态势。正如顾安忠主编的《液化天然气技术手册(第二版)》中所述,LNG产业的发展不仅依赖资源禀赋,更得益于液化、储运技术的突破,这为天然气的大规模跨区域输送奠定了技术基础。

3 天然气液化原理

天然气液化所需冷量的制取主要依托两类技术路径:气体膨胀制冷与相变制冷。气体膨胀制冷是利用高压气体通过节流阀或膨胀机进行绝热膨胀,借助压力降低实现温度下

【作者简介】高学明(1992-),男,中国河北南宫人,本科,工程师,从事油气储运、天然气液化工艺与优化设计研究。

降,从而获取冷量;相变制冷则是利用制冷剂在相变过程中的吸热效应产生冷量,常见形式包括蒸汽压缩式、蒸汽喷射式与吸收式制冷^[1]。工业实际应用中,天然气液化工艺通常会结合这两类制冷方式的特点,以实现冷量制取的效率最大化。

4 天然气液化技术

4.1 级联式液化流程

级联式液化流程也被称为阶式、复叠式或串联蒸发冷凝液化流程,因能耗低、技术成熟的特点,成为早期基地型 LNG 工厂的主流工艺。该流程采用三级压缩制冷系统,逐级为天然气液化提供冷量,各级分别使用丙烷(常压沸点 -42.3°C)、乙烯(常压沸点 -104°C)和甲烷(常压沸点 -162°C)作为制冷剂,且每个制冷循环配备三台换热器。

级联式液化流程由丙烷、乙烯、甲烷三个密闭的纯烃制冷剂循环构成,其中丙烷循环为天然气、乙烯和甲烷提供冷量,乙烯循环为天然气和甲烷降温,甲烷循环则直接为天然气液化提供深冷量。该工艺的优势在于能耗低、制冷剂为纯物质无需配比、技术成熟稳定;缺点是机组数量多、工艺流程复杂,附属设备与控制系统的维护难度较大。

4.2 膨胀机制冷液化流程

4.2.1 天然气膨胀机制冷液化流程

天然气膨胀液化流程又称开式膨胀机循环,其核心原理是利用原料气管道中的高压天然气,在膨胀机内进行等熵膨胀产生低温冷量,进而对另一股天然气实现液化,膨胀后的低压天然气则送入低压管网供应用户^[2]。

该流程的优点是工艺简单、调节灵活、运行可靠性高,且以天然气自身为制冷介质,省去了制冷剂的生产、运输成本;缺点是原料气需深度干燥处理,回流压力低导致换热面积需求大、设备投资高,同时液化率受低压用户规模限制,若采用循环压缩则会大幅增加能耗。

4.2.2 氮膨胀机制冷液化流程

氮膨胀液化流程又称闭式膨胀机循环,以氮气或氮-甲烷混合物为制冷介质,通过透平膨胀机的绝热膨胀实现冷量制取,适用于中小规模的调峰型 LNG 工厂^[3]。

4.3 混合制冷剂液化流程

混合制冷剂循环(MRC)是天然气液化领域的主流技术,其核心特点体现在以下方面:

- (1) 采用多组分混合制冷剂,仅需一台循环压缩机,相较于级联式流程大幅降低了设备投资;
- (2) 制冷循环的加热曲线可与天然气的冷却曲线高度匹配,有效减少制冷功率消耗;
- (3) 集成式 MRC 主换热器的应用,降低了设备成本与制造难度;
- (4) 节流阀降压可减少 LNG 蒸发损失,压缩机级间分离器则能降低压缩功耗^[4]。

顾安忠在《液化天然气技术手册(第二版)》中指出,

混合制冷剂的组分配比是 MRC 流程的关键,合理的配比可使制冷效率提升 15%-20%,同时减少设备的占地面积与运行能耗^[5]。

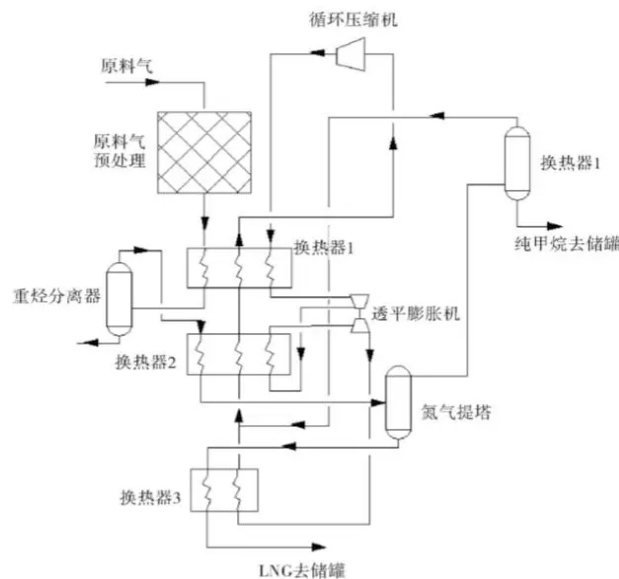


图1 氮膨胀机液化流程图

5 天然气液化厂工艺流程

5.1 液化天然气的主要生产流程

天然气从气田开采后,经集输系统送至液化工厂,依次完成脱水、脱重烃、脱 CO_2 和 H_2S 等净化处理,再进入液化装置转化为 LNG,最终储存于储罐并通过槽车输送至下游用户。LNG 工厂的核心单元包括原料气净化、天然气液化、LNG 储存与装卸,其中 MRC 液化流程因经济性与效率优势,成为当前工程应用的首选^[6]。

5.2 天然气的预处理

原料天然气中含有的水分、硫化物、二氧化碳、重烃和汞等杂质,在低温条件下易造成设备堵塞或腐蚀,因此液化前的净化处理至关重要。预处理的主要目标包括:满足 LNG 产品质量规范、防止低温设备堵塞、避免设备腐蚀与磨蚀^[7]。

预处理工艺路线为:原料气经调压计量与气水分离后,由压缩机增压,再通过 MDEA 溶液吸收塔脱除 CO_2 和 H_2S ;净化后的天然气进入分子筛干燥器,采用 4A 专用分子筛脱除水分,随后经干粉过滤器去除粉尘,再通过活性炭纯化器脱除芳香烃,并利用浸硫煤基活性炭吸附脱汞,最终进入 MRC 液化系统^[8]。

5.3 天然气液化工艺流程

5.3.1 天然气低温液化单元

该单元是 MRC 流程的核心,天然气经增压过滤后从冷箱顶部进入,初冷至 -98°C 后送入脱氮塔提纯,脱氮后的天然气在换热器中冷却至 -162°C 形成液态 LNG,经节流减压后送入储罐储存。混合冷剂则分气液两相进入冷箱,液相

节流后为冷箱提供初级冷量,气相深冷后为系统提供深级冷量,复温后的制冷剂返回压缩机循环使用^[11]。

5.3.2 混合冷剂压缩单元

常温状态的混合冷剂经往复式压缩机两级压缩,每级压缩后均通过冷却器与分离器处理,最终气液两相分别送至冷箱顶部,经两级节流后为系统供冷,完成制冷循环后返回冷剂配制罐^[9]。

5.3.3 冷剂储存和配制单元

MRC 流程采用氮气、甲烷、乙烯、丙烷、异戊烷作为混合冷剂,其中氮气来自公用工程系统,甲烷取自原料气,其余冷剂外购储存。首次开车时,按氮气 8%、甲烷 31%、乙烯 29%、丙烷 16%、异戊烷 16% 的比例配制冷剂;运行中需实时监控冷剂组分,及时补充泄漏的冷剂^[13]。

5.3.4 循环水单元

循环水系统分为内、外循环,内循环为 BOG 再液化装置提供冷却水,外循环通过闭式凉水塔为内循环水降温,补水均来自公用工程系统,保障整个液化装置的冷却需求^[10]。

6 液化天然气储存

6.1 液化天然气储存的主要方式

在 LNG 接收站、调峰型 LNG 工厂和基地型 LNG 生产厂与 LNG 运输过程中,LNG 储存是不可或缺的重要环节。LNG 的路上储存采用 LNG 储罐进行储存^[4]。陆上 LNG 储罐按照最高工作压力可划分为常压储罐和压力储罐,按照放置位置可分为地上 LNG 储罐、半地下 LNG 储罐、地下 LNG 储罐和地下洞穴 LNG 储罐。LNG 储罐形式的选择取决于投资费用、安全因素、工厂位置、地震、土壤沉降、外来侵略和设备、材料等诸多因素。

6.2 液化天然气安全储存的基本要求

首先,储罐及附属设备设施材料应具有良好的耐低温深冷性能,且能满足常温至-162℃的温度范围内的强度要求。材料应具有良好的低温韧性,热膨胀系数小,能保证罐体在任何情况下均不会出现渗漏和破损。LNG 接收站的特大型 LNG 储罐常用 9% 镍钢作为内罐材料。其次,LNG 低温特性对 LNG 储罐的绝热要求极高。储罐必须具有良好的保冷性能,保冷材料应使用热的不良导体。目前国内常见的特大型 LNG 储罐内罐与外罐之间的环形空间均采用珍珠岩填充,吊顶用玻璃棉毡覆盖保冷。

6.3 液化天然气储罐的压力控制

常见的控制储罐压力的方式有以下几种:

(1) 设置处理蒸发气的配套设施,由压缩机抽出输送至处理装置进行处理,以保证罐内压力在正常范围内。

(2) 设置火炬,在蒸发气处理装置满负荷后仍无法控制罐内压力或出现火灾等情况时,可将罐内蒸发气通过火炬燃烧排放。

(3) 根据储罐容积计算并设置相应能力的压力安全阀和真空安全阀,以防止储罐超压和负压。

(4) 设置补气管线,当罐内压力低于操作压力时,可通过高压天然气或氮气对储罐进行补气,以防止储罐出现负压。

6.4 液化天然气储罐的安全保护措施

(1) 在储罐四周设置消防栓、消防炮、雨淋阀等消防水灭火设备设施,且要保证消防设备的出水量足以吸收罐体的辐射热量,以保证罐体不受损坏。

(2) 在已发生泄露、火灾等紧急情况的位置设置火气探头,以检测 LNG 泄露和火灾等情况。同时,火气探头应自动连锁触发消防设施。

(3) 在储罐四周设置 LNG 收集沟、收集池,并在收集沟上方设置低温报警温度探头,在收集池设置泡沫发生器,以保证 LNG 发生泄漏可检测且不会蔓延,收集后可覆盖,防止爆炸混合气体扩散。

(4) 储罐外壳可设置防火层,以延缓关闭温蒂和罐内压力上升,在火灾发生时对罐体提供保护,但成本较高,保护程度有限。

7 结语

我国 LNG 产业目前面临工业化应用经验不足、大型液化技术与装备国产化程度低等问题,制约了产业的快速发展。未来需聚焦天然气液化技术的自主创新,突破全产业链关键技术瓶颈,研发具有自主知识产权的核心设备。目前我国在低温技术装备领域已取得一定进展,后续需进一步推动技术成果的工程化应用,构建完整的 LNG 技术体系,助力能源结构转型与天然气产业高质量发展。

参考文献

- [1] 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会《GB/T38753-2020液化天然气》[S].中国标准出版社,2020.4.28
- [2] 顾安忠,白改玲《液化天然气技术手册(第二版)》[M].机械工业出版社,2019
- [3] 敬加强,梁光川,蒋宏业《液化天然气技术问答》[M].化学工业出版社,2006
- [4] 张懿君,程玉排《LNG工厂的工艺设计探讨》[J].煤气与热力,2011,31(10):1-5
- [5] 郝文生,史少博,周丹,等,《LNG液化、气化工艺装置的选择》[J].中国化工装备,2017,19(2):30-33
- [6] 郭彦鑫《天然气液化技术与应用研究》[D].西安石油大学,2011
- [7] 李佩铭《丙烷预冷混合制冷剂循环液化天然气热力过程的数值模拟》[D].哈尔滨工业大学,2007
- [8] 宗辉《LNG工厂的工艺设计探讨》[J].现代商贸工业,2017,38(30):187-188
- [9] 王勇《丙烷制冷系统优化运行及节能改造研究》[D].大庆:大庆石油学院,2010
- [10] 韩昊亮,齐彦昌,彭云,等《LNG储罐用焊条不同烘干温度对焊后熔敷金属成分组织性能的影响》[J].焊接技术,2020,49(12):1-5

Research on Intelligent Monitoring and Fault Prediction Technology for the Operation and Maintenance of Weak Current System Equipment

Guanping Li

Kunming Tourism Cableway Development Co., Ltd., Kunming, Yunnan, 650228, China

Abstract

Against the backdrop of rapid development of smart cities and intelligent infrastructure, weak current systems have gradually become the core technical support for the operation of buildings, transportation, cultural and tourism facilities, and public safety systems. However, in practice, due to the diverse types of weak current equipment, scattered distribution areas, and complex operating states, coupled with the traditional operation and maintenance methods still mainly relying on manual inspection and passive maintenance, fault detection lags behind, downtime is long, maintenance costs are high, and system reliability is difficult to guarantee. The results of this study indicate that an intelligent monitoring system based on multi-source data fusion can significantly improve the timeliness of anomaly detection in weak current systems. The collaborative mechanism between deep learning prediction models and rule engines can achieve early fault prediction, providing reliable proactive maintenance support for cableway weak current systems, building weak current systems, and comprehensive traffic weak current systems. It has important theoretical value and practical significance for improving facility safety levels and reducing downtime losses.

Keywords

weak current system; Intelligent monitoring; Fault prediction; deep learning

弱电系统设备运维的智能监测与故障预测技术研究

李关平

昆明旅游索道开发有限责任公司，中国·云南 昆明 650228

摘要

在智慧城市和智能基础设施快速发展的背景下，弱电系统已逐渐成为建筑、交通、文旅设施及公共安全系统运行的核心技术支撑。但实践中由于弱电设备类型多样、分布区域分散、运行状态复杂，加之传统运维方式仍以人工巡检、被动维修为主，导致故障发现滞后、停机时间长、维护成本高、系统可靠性难以保障。本研究结果表明，基于多源数据融合的智能监测体系可显著提升弱电系统的异常检测及时性，而深度学习预测模型与规则引擎的协同机制能够实现故障的提前预判，为索道弱电系统、楼宇弱电系统及交通综合弱电系统提供可靠的主动式维护支撑，对提升设施安全水平、降低停机损失具有重要的理论价值和实践意义。

关键词

弱电系统；智能监测；故障预测；深度学习

1 引言

弱电系统是现代建筑、交通运输、文化旅游设施及公共基础设施中最基础、最关键的智能化支撑系统，其涵盖视频监控、通信网络系统、门禁报警系统、信息发布系统、广播系统、楼宇控制系统、综合布线系统等多个子系统。随着物联网、人工智能、边缘计算和大数据技术的快速发展，弱电系统正在从传统的独立子系统，逐渐演化为跨平台互连、数据实时融合、具备自感知与自诊断能力的智能体系。

基于上述背景，本文开展对弱电系统设备运维智能化的系统研究，从监测体系架构、数据采集与融合、异常检测机制、预测算法设计到索道场景应用展开深入探讨，旨在推动弱电系统从“经验运维”向“智能运维”升级。

2 多源感知驱动的弱电系统智能监测体系构建

弱电系统监测对象涵盖视频监控设备、网络通信设备、供配电设备、报警控制单元及环境感知模块等多类型装备，这些设备在实际运行中呈现出数据结构异构、运行场景复杂、故障模式多样等显著特征。因此，构建多源感知驱动的智能监测体系是实现弱电主动运维的基础。在总体架构上，系统需形成“感知—边缘—网络—平台”四层结构，通过分

【作者简介】李关平（1981—），男，中国云南师宗人，本科，高级工程师（副高），从事电气工程及其自动化等研究。

布式感知节点采集设备运行参数、环境信息与功能状态，并借助边缘智能完成数据过滤、异常识别与现场级初判，从而构成弱电智能监测的底座。

在感知层设计中，摄像机、交换机、UPS、电源模块、门禁控制器等核心设备需接入常态化运行数据，包括 CPU 占用率、温度、电压、电流、丢包率、帧率、图像清晰度、供电状态等基础参数。边缘计算节点的引入有效解决了弱电系统监测中的实时性瓶颈。边缘节点通常部署于弱电机柜、索道站房或塔架机房中，可对海量数据进行就地处理，通过特征提取、滑动分析、自编码器轻量化模型等方法识别异常，如端口流量突变、摄像头画面抖动、传感器漂移、电源电压波动等，从而实现“毫秒级”现场诊断。对于索道摄像机画面抖动、风速仪信号跳变、PLC 模块短时异常等事件，边缘智能可在第一时间检测到并触发现场告警，显著降低人工巡检成本与处置延迟^[1]。

在监测体系运行逻辑上，系统通过实时采集和动态阈值自适应评估机制，对弱电设备运行状态进行多因素综合判断；同时通过事件模型与规则引擎实现对包括网络链路中断、视频信号衰减、电池老化、电源过载等关键事件的结构化识别。多源感知、边缘计算、规则引擎和行为数据融合共同构成了弱电智能监测体系的整体能力，实现了从“看不见问题”到“实时可感知”的运维模式转型在具体实现层面，多源感知模块整合了多种类型的传感器数据，不仅覆盖了前文提及的基础运行参数，还扩展至环境温度、设备振动频率等辅助指标，形成全维度状态画像。边缘计算层通过部署轻量化 AI 算法，在本地完成数据清洗、异常检测与初步诊断，减少云端传输压力的同时确保关键事件响应延迟低于 50ms。规则引擎则基于领域知识库构建动态决策树，能够自动匹配 300 余种预设故障模式，并支持通过机器学习持续优化判断逻辑。最终，行为数据融合模块将分散的监测信号转换为结构化运维知识，通过时空关联分析揭示设备劣化趋势，为后续预测性维护提供数据支撑。

3 弱电系统智能运维平台构建与索道场景应用

3.1 智能运维平台体系架构与关键功能设计

为实现弱电系统全生命周期的主动运维与智能管理，需要构建集监测、分析、预测、调度与可视化为一体的智能运维平台。平台总体架构可划分为“数据采集层—边缘智能层—数据治理层—分析引擎层—应用服务层”五大模块，各模块之间形成闭环协同，支持弱电系统在复杂场景下的实时、精准与长期稳定运维。

在数据采集层，平台需实现与不同厂商、不同协议弱电设备的广泛兼容，利用标准化接口（如 ONVIF、Modbus-TCP、SNMP、OPC 等）采集运行参数，并同步引入索道场景的专用设备数据，如抱索器夹持力传感器数据、风速仪与风向标输出、索道运行速度曲线、塔架振动监测装置信息等，

构建面向弱电跨场景的全要素数据基础。为确保采集质量，平台需具备数据清洗、噪声处理与时间对齐机制，以保证后续分析模型输入的精度与稳定性。

边缘智能层承担实时识别与本地判断任务，主要包括帧丢失监测、人像/物体检测失败计数、摄像机抖动识别、电源波动快速判定、索道运行环境突变识别等关键功能。在索道较长线路或高海拔位置部署的设备中，边缘智能可避免由于网络延迟导致的数据滞后，确保极端天气下索道设备状态被快速捕捉。数据治理层实现对海量异构数据的标准化管理，通过标签体系、指标体系与时空索引构建弱电系统数据资产目录。在索道场景中，可增加线路区段标签、塔架编号、受力区段类别、海拔高度等数据维度，使得设备状态分析能够按空间建立关联，形成索道弱电设备的“地理关联链条”。治理层还需对长期运行数据进行结构化建模，为故障预测、寿命评估与智能决策提供可靠的数据基础。

分析引擎层是平台的核心，包括趋势分析引擎、风险识别引擎、故障预测引擎、健康评估引擎与知识图谱引擎等。通过机器学习、深度学习、规则引擎和知识推理协同工作，形成“强逻辑监督+自主学习模型”的混合决策体系。应用服务层面向运维人员提供智能告警、巡检计划推荐、故障趋势分析报告、风险地图、索道线路可视化等功能。在索道场景中，平台可展示“线路数字孪生图”，实时对应各塔架弱电设备健康度（HI）、风险等级（R）、预测故障时间窗（TTF）等关键指标，为索道运维人员提供科学决策依据。

总体而言，智能运维平台实现了弱电系统从“设备运行监控”向“系统级智能感知—提前预测—自适应运维”的全面升级，为索道等高风险场景提供了高可靠性支撑。

3.2 数字孪生驱动的弱电系统运维优化与索道智能场景集成

数字孪生技术通过构建物理设备与虚拟模型的动态映射，使弱电系统的状态、行为和故障模式得以在数字空间中实时可视化与智能推演，是推进弱电系统运维智能化的关键工具。在弱电系统中，数字孪生可实现对摄像机、交换机、UPS、报警主机、门禁控制器等设备的行为模拟与状态预测；在索道场景中，则可进一步将站房、塔架、线路区段与吊箱设备纳入整体模型，实现从“单设备孪生”向“场景孪生”的跨层级融合。

数字孪生模型的构建包括设备模型、环境模型与行为模型三部分。设备模型刻画弱电设备的结构参数、电气特性与老化规律；环境模型模拟温度、湿度、风速、风向、振动等外部扰动；行为模型描述设备在不同工况下的运行过程。以索道风速仪为例，数字孪生可模拟其在不同风频条件下的响应特性，并与实际数据进行实时对比，一旦出现偏差增大趋势，系统即可推断“可能存在风杯磨损或传感器漂移”等故障类型。^[2]

数字孪生的第二项核心能力是故障推演。通过融合弱

电设备的时序数据与索道运行环境参数，模型能够虚拟再现设备在未来周期内的运行轨迹。第三项核心能力是可视化决策支持。数字孪生可将索道线路、站房、塔架、弱电机柜等设备的健康状态以空间化方式呈现，形成“设备健康地图”。当某塔架区域的弱电设备健康度下降时，系统可自动定位至具体机柜、具体交换机端口或具体摄像机，并显示影响因素，如“视频抖动 12% 增幅”“端口抖动频率异常”“风速仪漂移可能在 3 日后超限”等，为决策部署提供依据。数字孪生的引入不仅提升了弱电设备运维的精细化水平，更使索道等复杂场景的安全管理具备预测性与可解释性。系统可在设备完全失效前数小时至数天给予提前告警，使运维工作由被动响应转向前置干预，大幅减少索道停机损失，提升游客安全保障能力。

4 弱电系统预测性维护策略与索道运维场景的实践路径

4.1 基于预测分析的弱电系统主动维护策略与优化机制

传统弱电系统维护大多依赖人工巡检、周期性维护与被动报修，缺乏对设备状态的连续监控和对故障趋势的提前识别，导致系统在突发故障前缺乏有效干预窗口。随着多源感知、时序预测与数字孪生技术的广泛应用，弱电系统正在从“经验式维护”迈向“预测性维护”。预测性维护策略以数据驱动为核心，通过对设备健康度变化、趋势特征与潜在异常的综合分析，在故障发生前进行干预，可显著降低停机率、减少维护成本、提升设备全生命周期可靠性。

在弱电系统中，预测性维护策略可从三类设备入手构建：其一是运行负载高度波动且故障模式易被忽视的设备，如交换机、光纤收发器、网络控制器等；其二是性能随时间退化明显的设备，如 UPS 电池、摄像机成像模组、传感器节点；其三是在复杂环境中长期暴露的设备，如索道沿线塔架摄像头、风速仪、温湿度传感器、抱索器监测装置等。通过建立针对不同设备类别的差异化维护策略，系统可根据设备健康度（HI）、剩余寿命（RUL）、风险等级（R）与趋势变化（ ΔT ）的综合结果动态调整维护计划。

预测性维护的核心机制包括三方面内容：第一，基于趋势分析的阈值前移策略，即在设备出现轻微异常趋势时，通过动态阈值提前触发预警。第二，基于模型预测的时间窗推断机制，通过 LSTM、Transformer 等模型预测未来 24-72 小时内的设备状态，以确定最佳维修窗口。在索道场景中，该机制可用于预测风速仪漂移是否会在未来强风天气前超限，从而提前更换设备。第三，基于风险等级的维护优先级排序，根据设备对整体系统功能的影响程度、故障后果、冗余程度等因素进行综合评分，使运维资源分配更加科学。

4.2 预测性维护在索道弱电系统中的应用机制与实践路径

索道系统作为公共交通与文旅设施中风险最高的运输

方式之一，其弱电系统运维具有高安全性要求、高环境复杂度与高连续性需求等突出特征。索道弱电系统承担着监控、指挥、通信、环境监测、安全防护等关键功能，其故障往往与风速变化、塔架振动、机械结构冲击和高湿度环境密切相关，因此预测性维护在索道场景中具备更高的应用价值。

索道弱电系统预测性维护的核心机制可从以下四个方面构建。索道沿线风速仪作为环境监测核心设备，其稳定性直接关系到索道是否具备运行条件。通过对历史风速数据的频谱分析与时序建模，可预测风速仪信号漂移的趋势。塔架作为索道结构的关键支撑，其振动对摄像机、温湿度传感器、抱索器监测设备等弱电装置影响显著。系统通过在塔架节点部署加速度传感器、图像抖动监测模块与边缘 AI 芯片，可识别“振动频段漂移—图像抖动增幅—连接件松动”这一典型趋势链条。数字孪生模型可进一步模拟塔架在不同负载条件下的振动行为，预测弱电设备在特定风段下的响应，提前判断是否存在安装件老化或支撑结构松动风险。

索道运行依赖 PLC 系统进行速度控制、抱索器监测、紧急制动与状态联动，因此 PLC I/O 点漂移或通信链路抖动将严重影响安全。通过对 PLC 输出波形、I/O 点响应时间、链路延迟数据进行趋势分析，系统可识别“延迟逐步上升—丢包增加—全链路抖动增强”的早期信号，并预测未来可能出现的通信中断时间窗。平台可据此在游客量低谷时安排检修，避免影响运营。通过构建索道弱电设备的设备健康指数（HI），平台能够对摄像机、光端机、供电模块、传感器节点等关键设备进行长期状态追踪，自动预测更换周期[3]。

5 弱电系统故障预测模型构建与算法协同机制

弱电系统在复杂场景下运行时，其故障往往呈现突发性强、隐蔽性高、模式多样的典型特征。传统模型多依赖单源数据或少量人工特征，难以有效捕捉弱电设备运行状态的动态演变过程。随着数据规模扩大与场景复杂度提升，构建具备泛化能力、解释能力与实时性要求的故障预测模型成为智能运维体系的核心步骤。本章从模型体系设计、特征工程构建、算法协同机制与业务场景适配四个方面展开论述，为弱电系统预测性维护提供系统化的理论支撑。

在总体架构上，弱电系统故障预测模型采用“特征层—模型层—推理层—反馈层”四级结构，并通过多模型协同与规则引擎强化，实现对不同类型弱电设备故障模式的细粒度预测。在特征层，系统需充分整合运行参数（如电压、电流、温度、帧率、CPU 占用率、丢包率）、环境参数（如湿度、风速、振动）与行为参数（如设备启动时间、异常日志、控制指令响应情况），构建以时序为核心的特征体系。在模型层，可针对不同场景采用差异化模型体系：对连续型时序数据采用 LSTM、GRU、TCN 等深度时序网络；对设备图像质量下降、摄像头抖动等视觉类异常采用 CNN 与 Transformer 结构；对设备日志与告警文本采用 BERT 等语言模型进行语义解析，通过多模态融合实现弱电系统的全域

状态学习。在推理层，模型输出设备健康度（HI）、剩余寿命（RUL）、风险等级（R）与未来故障概率（ $P[\text{fault}|t]$ ）等指标，为预测性维护决策提供依据。在反馈层，系统通过专家规则校准模型结果，并利用在线学习与增量训练机制持续提升预测精度，使模型能够随设备老化与环境变化自适应更新。

在算法层面，弱电系统需采用“深度学习模型 + 轻量化规则引擎 + 知识图谱”的协同机制，以兼顾预测精度、可解释性与实时性。深度学习模型负责学习复杂时序关系，识别隐含在大规模历史数据中的弱特征；规则引擎依据设备原理与专家知识构建结构化故障机制，如“端口抖动峰值 > 连续 30 分钟且链路延迟上升”可判定为“链路衰减趋势”；知识图谱则用于连接环境因素、设备状态与故障模式之间的关系，使预测结果具备可追溯性。三者的协同机制确保了系统既能捕捉海量数据中的模式，又能保持决策逻辑的专业性与透明度。

模型的场景适配能力是弱电系统故障预测能否落地的关键。实际场景中，设备分布分散、网络条件不稳定、环境极端变化频繁，导致训练数据与实际运行数据可能存在偏差。因此，模型需具备跨环境迁移能力，可通过迁移学习、模型蒸馏与领域自适应技术，提高模型在不同站房、不同塔架区段、不同时间段的泛化性能。在运维策略层面，基于预测结果可构建“分级干预机制”，即根据故障概率与风险等级对运维策略进行动态调整。当系统预测未来 48 小时内某摄像机成像模组可能失效时，可安排预防性检修；当预测某

UPS 电池健康度连续下降并可能在未来两周进入风险区间时，可纳入计划性更换；当识别到索道风速仪信号漂移持续加剧且可能在强风天气前超限时，可做提前替换或调整运行策略。通过预测结果驱动运维计划，使弱电系统实现从“事后响应”向“主动守护”的转型，大幅减少停机时间与安全风险。

6 结语

弱电系统作为现代基础设施的关键组成部分，其运维模式正从传统的人工巡检和被动响应，向智能监测、主动预警和预测性维护迅速演进。通过构建多源感知体系、完善边缘智能架构、采用深度学习与数据融合技术，可以显著提升弱电设备在复杂运行环境下的可靠性与安全性。本文在系统分析弱电设备运行特性的基础上，提出了面向弱电运维的智能监测框架与故障预测模型，并将其应用于索道运行场景，验证了智能运维技术在实际交通与文旅设施中的适用性与前景。

参考文献

- [1] 施庆. 智能建筑弱电系统的运维管理挑战与对策[J]. 消费电子, 2025(6):212-214. DOI:10.3969/j.issn.1674-7712.2025.06.070.
- [2] 李宏全. 智能楼宇弱电系统综合技术分析[J]. 中国金属通报, 2025(18):137-139. DOI:10.3969/j.issn.1672-1667.2025.18.046.
- [3] 苏立勇, 申樟虹, 游弋, 等. 城市轨道交通车站级弱电系统整合模式研究[J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27(10):205-209. DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.10.035.

Research on Collaborative Design of Building Weak Current Intelligent System in Complex Electromechanical Environment

Zhonghui Yan

Shangrao Big Data Industry Investment and Development Co., Ltd., Shangrao, Jiangxi, 334100, China

Abstract

Building weak current intelligent system is a key support for the digital and intelligent transformation of modern buildings, and its core value is reflected in multidimensional functional systems such as information perception, data integration, linkage control, and operation management. However, in practical engineering, weak current systems often need to be embedded in various types of electromechanical systems such as building HVAC, elevators, power supply and distribution, fire protection, and security. Their collaborative design not only involves multiple professional interface organizations, but also faces problems such as heterogeneous communication protocols, equipment logic conflicts, unstable network architecture, and cross construction interfaces. Starting from the system properties of complex electromechanical environments, this article aims to provide theoretical support and practical paths for the planning and design of weak current systems in complex building scenarios such as large public buildings, hospital complexes, and rail transit hubs.

Keywords

weak current system; Mechanical and electrical engineering; Intelligent building; System collaboration; BIM

楼宇弱电智能化系统在复杂机电环境中的协同设计研究

严忠辉

上饶市大数据产业投资发展有限公司，中国·江西 上饶 334100

摘要

楼宇弱电智能化系统是现代建筑数字化和智慧化转型的关键支撑，其核心价值体现在信息感知、数据集成、联动控制与运行管理等多维功能体系。然而，实际工程中弱电系统往往需要嵌入建筑暖通、电梯、供配电、消防、安防等多类型机电系统，其协同设计不仅涉及多专业接口组织，还面临通信协议异构、设备逻辑冲突、网络架构不稳定与施工界面交叉等问题。本文从复杂机电环境的系统属性出发，旨在为大型公共建筑、医院综合体、轨道交通枢纽等复杂建筑场景中的弱电系统规划与设计提供理论支持与实践路径。

关键词

弱电系统；机电工程；智能建筑；系统协同；BIM

1 引言

随着信息技术、传感网络和人工智能的快速演进，建筑已从传统的静态物理结构发展为具有数据驱动能力的智能系统实体。弱电智能化系统是这一演进的核心组成，其覆盖建筑自动化控制（BA）、消防报警（FAS）、安防监控（CCTV、ACS）、综合布线（SCS）、会议广播（PA）以及楼宇能源管理（BEMS）等子系统，对建筑安全性、舒适性、效率性和可持续运营具有直接影响。具体表现为配电箱和弱电井布局冲突、消防联动与空调控制逻辑分离、视频存储与网络管理割裂、施工阶段接口协调成本高昂等问题。因此研究弱电系统在复杂机电环境中的协同设计，不仅是设计理论问题，

更关乎工程实施风险控制与全生命周期价值实现。

2 复杂机电环境的系统特征与弱电需求分析

2.1 复杂建筑机电系统的多维耦合属性

现代建筑机电系统具有多维度的动态耦合特征。第一，功能耦合方面，空调新风系统、消防排烟、动力配电和能耗管理系统均需共享环境感知数据、设备状态与应急策略。例如消防模式触发后，电梯群控应进入“消防召回”状态，并自动切断非关键回路的供电，这一联动逻辑的执行依赖弱电系统的数据接口能力。第二，空间耦合方面，机电设备间的部署密集度高，尤其是医院住院综合楼、机场航站楼等场景中，竖井、管道井、弱电井需在狭小空间内实现多种材料与设备的垂直穿越，空间冲突与施工接口密度大。第三，时序耦合方面，跨专业工程施工通常呈现不同节奏，强弱电布线、暖通风道预埋、机房设备安装都需要先后次序的动态协调，

【作者简介】严忠辉（1986-），男，中国江西人，本科，目前职称：电气工程助理工程师，研究方向：弱电智能化。

一旦缺乏协同设计机制,会产生不可逆设备占位矛盾。

2.2 弱电系统的感知、通信与控制需求

弱电系统在复杂机电集成环境中的主要需求可归纳为三类。其一是传感需求,弱电电子系统通过多类型传感器模块获取建筑状态数据,如温湿传感器、烟感、门禁卡读者、视频摄像头、室内定位信标等。这些数据不仅服务单系统控制,还为跨系统联动提供基础输入^[2-3]。其二是通信需求,弱电系统需要在多协议并存环境中保证高速、稳定与低时延,如楼控系统的 BACnet/IP、消防系统的工业串行协议、安防系统的 ONVIF 与 RTSP、能耗管理中的 Modbus TCP/IP 等。其三是控制需求,弱电系统作为机电执行逻辑的中心控制层,需要实现联动场景定义,如火灾触发多系统应急、VIP 通行触发照明与门禁组合策略、能源负荷峰谷控制下的空调与照明梯度调节。

3 弱电系统协同设计的理论框架与设计方法

3.1 弱电系统协同设计的理论框架

弱电协同设计的理论基础在于系统架构分层。总体架构可分为设备层、网络层、平台层与应用层。设备层通过感知模块获取环境信息,网络层负责多协议数据融合与链路安全,平台层实现模型推理与策略调度,应用层进行人机交互与运营管理。该分层结构形成清晰职责边界,可避免不同机电系统之间的功能重叠,保证接口可预测性与联动指令可验证性。

在此架构下,复杂建筑机电系统不再以传统“子系统模块化交付”方式构建,而通过统一的中台结构实现数据接入与策略分发。弱电系统协同的第二核心是数据融合。弱电

系统数据本质上具有多源异构、时序敏感与设备依赖特征,其融合需构建语义解释与时序同步机制。工程实践中常见的做法包括通过边缘计算设备实现本地数据预处理;通过统一数据模型(UDM)进行跨系统语义映射;通过统一身份认证(IAM)与访问控制(RBAC)实现跨角色权限管理。此时弱电数据脱离单系统私有属性,成为面向全生命周期的数字资产,可用于预测性维护、运行调优与投运后决策支持。弱电协同设计不仅关注通信互联,更强调策略一致性。联动策略需要跨越事件触发规则、执行路径选择与冗余校验^[4]。

3.2 协同设计的工程模型与设计方法

在复杂机电环境中,弱电协同设计最显著的挑战来自空间资源争夺。传统二维图纸设计难以表达竖向管道、设备节点的空间重叠关系,因此 BIM-GIS 集成成为关键工具。BIM 模型用于构建机房、弱电井与机电管综的三维实体结构,GIS 提供建筑位置、环境负荷与外部基础设施等宏观信息,二者融合可形成可视化冲突决策模型。在设计阶段通过碰撞检测与路径优化实现弱电线缆路由、机房设备布局与机电接口点的预控,从根源上减少施工阶段变更成本。弱电系统协同不应停留在设计阶段,而应贯穿建设与运维。设计阶段通过 BIM 模型与系统架构明确接口逻辑;施工阶段需建立工序衔接模型,将弱电施工嵌入暖通、电梯与配电施工节点;运维阶段通过数字孪生技术实现系统状态监控、能耗分析与自动化调度。在医院、地铁站等高负载建筑项目中,生命周期协同方法可显著降低系统宕机、连锁故障与改造风险,有助于形成连续可控的智能建筑生态。为了明确弱电协同设计在不同阶段的关键任务,可建立“设计—施工—运维”的多维责任矩阵,如表 1 所示。

表 1 弱电协同设计在复杂机电环境中的阶段性要点对照

设计阶段关键事项	工程实施策略
BIM 管综一体化建模,预控弱电井与暖通、电梯井的空间关系	采用“强先弱后”“竖先横后”的施工节奏
异构协议融合与数据模型标准化(BACnet/IP、Modbus、ONVIF)	集成控制平台部署边缘网关,消除设备厂商差异
安全域划分和通信加密设计	弱电回路与动力线缆分区敷设,避开主风道与大功率设备
应急情景预案与启动次序配置	消防联动与空调、照明、电梯策略闭环测试
设备点位与维护通道预留	弱电桥架靠近维护界面,主干光纤避让高热区

表 1 从设计逻辑、施工组织与运维策略三个维度呈现弱电协同设计的基本面貌,体现出弱电系统不再是传统意义上的“独立子系统”,而是在复杂机电环境中作为贯穿式控制中枢,以信息流驱动物理系统协同运行。尤其在医院、机场、城市交通枢纽等高可靠性场景中,弱电系统的设计方法不再以“单点安全”或“接口互联”为目标,而是以“事件路径—策略决策—联动执行”的全链条结构构成建筑智能运行的骨架。

4 工程案例分析

4.1 基于三级协同架构的弱电设计落地路径

某大型三甲医院综合楼建筑面积超过 20 万平方米,功

能分区涵盖急诊中心、ICU 重症区、医技诊疗区与制剂中心,人员流线呈患者—医护—物流三重交错特征,运行状态对时间敏感性极高。医院弱电系统共配置 19 个子系统,包括楼宇自动化(BAS)、消防报警(FAS)、门禁控制(ACS)、视频监控(VMS)、护士呼叫、医用电梯群控、信息发布系统等。该项目弱电设计采用“楼宇感知层—集成控制层—业务应用层”三级协同架构,从源头构建各子系统逻辑边界、数据流通路径与联动策略承载方式^[2-3]。在感知层,空调末端、病区照明、医护走廊、急诊病房、负压手术室等部署大量感知节点,在实现设备状态采集的同时承担病区环境安全监测功能;在集成层,通过统一集控平台集中接入 BA、FAS、ACS 与 VMS 四大基础系统,并由边缘控制器架构支撑场景

级联动动作执行,使策略落地不依赖中心服务器,从而保障系统在极端事件中的失效隔离特性;在应用层面,以医院数字孪生平台为核心,将ICU床位状态、急诊转运路径、病房环境指标与医护 workflow 进行综合计算,实现跨系统信息驱动下的运行调度。

该案例的关键在于协同逻辑由传统“接口驱动”转向“事件驱动”,即弱电系统不再通过点状触发逻辑实现跨系统联动,而通过事件—策略—动作链条形成闭环。同时,竖向空间协调通过BIM模型实现,将弱电井、配电井与暖通风道形成三维同步布局,在竖井顶部严格设定安全黑区:弱电光纤主干与送风主管保持200 mm净距,弱电桥架横穿风道位置通过偏移布线规避碰撞,由设计阶段通过模型预控替代施工阶段被动修改。该方法不仅减少了后期变更成本,也避免了对医院高密度机电空间的破坏性施工干扰,体现了协同设计的工程适应性与专业深度。

4.2 从施工穿插到智能运维的全生命周期协同实践

该医院项目在施工阶段采用“强弱分区、竖横解耦、关键设备倒排”的施工协同策略,将弱电系统与强电、暖通、电梯等专业的安装过程进行时序化整合。在竖向施工中,以电梯井与主干配电井为优先,实现大型竖向设备优先安装,随后再进行弱电桥架与传输介质敷设,从而避免弱电材料在狭窄竖井空间遭受压覆与污染。在横向施工中,以技术夹层与走廊吊顶作为设备分布节点,机电管综实施“强电居中、暖通置后、弱电贴边”的排列逻辑,使弱电传输路径最大限度贴近维护面,提高后期可维护性。在此体系下,施工变更率较传统设计下降约30%,弱电设备损耗率降低约25%,体现弱电与机电专业的空间协同所得实践优势。

在运行阶段,该项目基于数字孪生技术构建医院虚拟运营模型,将弱电系统采集的数据转化为能源管理、病房舒适性调节与应急策略调度的核心变量。以ICU区为例,患者状态波动性大、设备运行密集,空调末端设有动态风量调节模式,依据传感器采集的温湿度与PM2.5实时值进行调节,在夜间负荷下降时经平台计算调整风机频率、照度等级与输氧系统压力,使空调系统能源负荷下降8%–12%;在医护走廊场景中,照明与人员定位结合,通过热感摄像与门禁标签判断人员区域密度,在夜间低流量状态下自动调整照度,结

合灯控与应急值守策略,将能耗峰值削减约15%。当遭遇紧急医疗转运或灾害演练时,数字孪生平台整合门禁、手术区通风、电梯群控、病房照明与广播,实现“路径型联动”:面向转运要求提前开放路径设备,避免等待式指令下发与分散策略执行,从而将响应时间缩短至原先的一半左右。

该案例显示,协同设计不是单纯的弱电施工可视化,而是在全生命周期内构建以数据、设备与策略为核心的建筑运行体系。在设计阶段通过数字化模型控制空间耦合,在施工阶段通过专业穿插模式实现接口衔接,在运维阶段通过数字孪生实现策略智能生成与动态调优。这一数字生成逻辑将弱电系统从被动接受“机电载体”提升为建筑运营的核心控制中枢,使医院这种高安全性、高连续性场景获得^[4-5]。

5 结语

弱电智能化系统在复杂机电环境中已从单一弱电技术体系进化为建筑数字治理的核心架构。本文从机电系统耦合特征出发,提出弱电协同设计的理论框架与方法论,强调架构分层、数据融合与策略统一的重要性。协同设计不仅在构建阶段减少冲突与变更,更在运行阶段形成价值闭环,实现建筑安全、节能与智能体验的综合优化。未来研究需关注AI调控算法、跨建筑数据共享与行业协同标准,推动弱电系统从工程技术走向智能决策平台。

参考文献

- [1] 王欢,李楠.建筑智能化弱电工程施工及质量控制[J].城市建设,2025,(16):49-51.
- [2] 詹永恩.5G通信技术在弱电智能化建筑系统中的应用分析[C]//广西网络安全和信息化联合会.2025年第五届工程领域数字化转型与新质生产力发展研究学术交流会论文集.浙江数创未来科技有限公司,2025:541-543.
- [3] 鲍平.智能化建筑弱电工程的施工要点与质量管理策略[J].房地产世界,2025,(06):161-163.
- [4] 余城樑.弱电智能化系统在建筑工程中的应用分析[C]//广西网络安全和信息化联合会.2025年第一届工程领域数字化转型与新质生产力发展研究学术交流会论文集.宁波万御安防科技有限公司,2025:50-51.
- [5] 朱钰.建筑电气智能化弱电工程应用技术研究[J].城市建设理论研究(电子版),2024,(19):80-82.

Structural Design and Analysis of Light Truss Robots in Warehousing Logistics

Hao Liu

People's Liberation Army Unit 32286, Gaotang, Shandong, 250000, China

Abstract

In response to the urgent demand for highly efficient and flexible automated equipment in modern warehousing logistics, this paper presents the structural design and analysis of light truss robots. The study first completes the overall structural design of the robot according to specified performance indicators, then systematically conducts static analysis of the truss robot structure using the finite element method to evaluate its stiffness and strength, and also performs dynamic analysis to determine its modal and harmonic response characteristics. The analysis results indicate that this design scheme meets both dynamic and static performance requirements. Subsequently, fatigue analysis is carried out on key components, providing a direction for improving structural reliability and extending service life. This study provides theoretical support and practical reference for the structural development of light truss robots.

Keywords

Light truss robot; Structural design; Static analysis; Dynamic characteristics; Fatigue analysis

仓储物流中轻型桁架机器人结构设计与分析

刘浩

中国人民解放军第 32286 部, 中国·山东 高唐 250000

摘要

针对现代仓储物流高效率, 高柔性自动化设备的迫切需求, 本文便展开轻型桁架机器人的结构设计与分析。研究先按指定性能指标完成机器人的整体结构设计, 再用有限元分析法, 系统地对桁架机器人结构做静力学分析, 以此考量其刚度与强度, 而且做动力学分析来得到它的模态与谐响应特性。分析结果表明此设计方案符合动静态性能要求, 之后又通过对关键部件执行疲劳分析, 给出了期望改善结构可靠性和延长使用寿命的方向。此项研究给轻型桁架机器人的结构开发赋予了理论支撑和实践参照。

关键词

轻型桁架机器人; 结构设计; 静力学分析; 动力学特性; 疲劳分析

1 引言

智能仓储物流行业正在飞速发展, 企业对于自动化搬运设备的效率, 灵活性以及经济性有着更高的要求。轻型桁架机器人是达成空间内高效精准搬运的重要设备, 其具有结构简单, 空间利用率高, 成本可控制的优点, 所以具备广泛的应用前景。但是, 轻型化设计虽然可以减轻设备重量并缩减制作成本, 但也存在一些问题, 比如刚度变小, 动态响应变得更为灵敏等情况, 这些都会影响到机器人的定位精度及其长时间运行时的稳定性。所以在设计之初就要系统地去分析它的结构设计并做力学性能分析, 这对于保证设备工作的可靠性, 提升其使用寿命十分关键。本文据此展开对轻型桁

架机器人结构的全面设计与分析工作。

2 轻型桁架机器人结构设计

2.1 设计目标与性能参数确定

轻型桁架机器人的设计目标要紧密联系仓储物流的实际作业需求, 关键在于要在有限的空间里达成高效的物料搬运。设计之初就要明确一些核心性能指标, 最大运行速度, 重复定位精度, 额定负载能力以及有效工作范围等。这些参数的确定给后续的设计指明了方向, 也是考量设计成果的重要依照。速度和精度指标直接影响着机器人的作业效率, 负载能力则决定了它应用场景的宽窄, 工作范围的划定需综合考虑库区布局和设备占地面积的限制。机器人是否可靠, 能耗水平如何, 守护是否方便, 这些都是很重要的设计考虑因素。这些性能参数常常相互制约, 所以要经由设计过程中的综合权衡并加以改善, 从而谋求达到较好的整体性能效果。材料的选择需按照负载要求和工作环境来决定, 既得保

【作者简介】刘浩(1994-), 男, 中国山东高唐人, 本科, 初级工程师, 从事机械工程专业研究。

障结构强度，也要控制好总体重量。

2.2 关键部件选型与结构布局

关键部件的选型对于保证机器人整体性能十分关键，要综合考量性能适配性，可靠性以及经济性等因素。结构框架一般会选用铝合金型材或者方钢来焊接，这样既能保证刚度，又能够达成轻量化的目的。驱动系统按照负载和速度的要求来挑选合适的伺服电机和减速器，至于传动方案，则可以在齿轮齿条和同步带当中做出选择。导轨和滑块的选取会直接左右到运动精度和使用寿命，所以应当依照负载和速度来确定恰当的规格型号。结构布局设计需改良质量分布情况，把主要载荷安排在支撑结构较强之处。各部件的结合方式应保证传力路径清晰可靠，也要方便安装与调试。布局方案还要顾及电缆守护，传感器安装以及后期维护的可达性。利用三维设计软件执行虚拟装配，可以预先找出并解决潜在的干涉问题。

3 结构静力学与刚度分析

3.1 静力学分析理论基础

静力学分析是考量结构承载能力的关键所在，其理论重点在于运用平衡方程和胡克定律。该分析依照连续性假设，把实际结构简化成理想的弹性体模型。平衡方程可使结构在外力作用下维持静力平衡，物理方程则阐述了应力与应变的本构关联，几何方程创建了位移场和应变场间的数学联系，这三者一同形成起弹性力学的基本方程体系。针对复杂的结构，用解析法求解常常很艰难，所以要采用有限元法之类的数值计算手段。有限元法经由离散化把连续体变成若干个单元的合成，在各个单元里用近似函数来表现位移场，最后把微分方程转为成线性代数方程组加以求解。选取恰当的单元种类，网格疏密以及边界条件，这对保障计算精度十分关键。

3.2 极限工况下的静力学仿真

静力学仿真要设置恰当的极限工况，用以考察结构在最不利载荷情况下的响应特点。常见的极限工况涵盖额定负载时的加速，减速情形，还有紧急制动之类的特别操作状态。仿真前处理步骤包含几何清理，材料性质指定，网格划分以及施加载荷约束等任务。网格质量会左右计算结果的正确与否，所以要在计算效率和精准度二者间寻求调和。施加载荷时得要考虑自身重量，工作负荷，惯性力以及冲击系数等诸多因素共同产生的影响。求解之后，可以得到结构的应力分布云图和位移变形云图，这两张图清楚地显示了高应力区域以及最大变形处。经由对仿真结果加以分析，能够判定结构是否符合强度标准，找出潜藏的不足之处。把不同工况的结果做对比分析，有益于全方位把握结构的力学特性。

3.3 结构刚度与变形量评估

刚度评定属于保障机器人定位精度的重要部分，要着重关注末端执行器处的变形量。评定指标包含静刚度和动刚

度，它们分别体现结构对抗静载荷和动载荷的能力。变形量的允许值按照机器人的精度要求来定，常常需控制到毫米级别甚至更小。就桁架结构而言，整体刚度很大程度上由导轨支撑间距，横梁截面特征以及连接部位的刚度所决定。过大的变形不但会影响定位精度，而且也许会造成振动现象发生。刚度评定要参考应力分析的结果，保证结构既达到刚度需求又不至于过度设计。经由调整截面参数，改良支撑位置或者增添局部加固结构，可以提升系统的刚度。刚度与重量之间的协调是设计阶段必要不断加以完善的主要问题。

4 结构动力学特性分析

4.1 模态分析与固有频率计算

模态分析属于探究结构动态特性的关键手段，目的在于得到结构的固有频率以及振型之类的模态参数。这些参数取决于结构的质量分布情况和刚度特性，体现出结构本身固有的振动特点。计算的时候一般会用块兰索斯法或者子空间迭代法这样的数值方法来解决特征值问题。在执行分析的时候要重视边界条件模拟的准确性，各种不同的约束形式会给计算结果带来很大改变。低阶模态常常关联到整体结构的刚体运动或者是主要梁的弯曲振动，高阶模态则更多地体现局部结构复杂的形变状况。经由模态分析能够找出结构中的不足之处，从而给动态设计赋予参考依照。分析结果需用振型图直观表现各阶模态的振动形态，方便工程人员领会结构的动态行为特性。模态分析的质量会左右后续谐响应分析等动力学计算的准确与否。

4.2 谐响应分析

谐响应分析用来计算结构受简谐激发时的稳态响应，是衡量结构共振风险的有效手段。该分析依靠模态叠加法或者直接频率响应法来执行，计算结构在不同频率激发下的振动幅度。激发力的幅值与相位需遵照实际工作状况加以合理设置，一般会考虑到电机运行，齿轮咬合之类的周期性激发源头。分析成果表现为频率-响应曲线，此曲线可清楚显示出结构的共振频率及其对应的放大系数。经由谐响应分析能够确认工作频率是否规避了结构的各级固有频率，防止共振情况出现。如果无法避开共振区，要考量共振时的应力水平是否处于允许范围之内。分析还要考虑阻尼对振动响应的的影响，合适的阻尼可有效地抑制共振峰值。

4.3 结构优化与轻量化设计

结构改良属于工程设计范畴，其目的在于在符合性能需求的情况下找到理想的材料分布方案。轻量化设计需经由参数改良，形貌改良以及拓扑改良这些多层次的方法来完成。参数改良可借助调节杆件厚度，截面大小等参数来提升结构性能，形貌改良侧重于针对现存结构探寻最合适的加强筋设置方案，而拓扑改良则是站在材料分布的层面考量，找寻最理想的传力途径。改良进程要创建起涵盖质量，应力，变形以及频率等诸多目标限制的数学模型，依靠更新计算渐

渐趋近于理想答案,从而做到减重和性能兼顾。改良后的结构还要再度执行静动力学检测,保证各项指标符合设计标准。

5 关键部件强度与疲劳分析

5.1 关键连接部位强度校核

关键结合部位的强度会直接左右整机的安全性和可靠性,所以要执行细致的局部应力分析。重点校核的部分包含横梁与端梁的结合节点,立柱与基础的结合法兰以及各个运动部件之间的螺栓结合。分析的时候要创建细化模型,精确模拟接触关系,焊缝形状和螺栓预紧力等细微特点。施加载荷时应考虑最不利的受力状况,比如偏心载荷造成的额外弯矩和扭矩。应力评定要用合适的强度理论,第四强度理论适合由塑性材料构成的结构。针对焊接部分,要格外留意应力集中的影响,焊缝质量须要达到有关标准的要求。螺栓连接要核查螺栓自身的拉伸强度,也要考量接合面的抗滑移能力。分析结果应给出确切的安全系数,以保证关键部位有足够的强度余量。对于不符合要求的部位,需给出具体的改进方案。

5.2 疲劳寿命分析理论

疲劳分析对于考量结构在交变载荷作用下的耐久性十分关键,其理论依照在于材料的 S-N 曲线以及累积损伤理论。S-N 曲线显示了材料在给定应力比情形下,应力幅值与破坏循环次数之间的关联。而在实际结构当中,由于存在应力集中现象,所以会利用疲劳强度降低系数予以考虑。至于累积损伤理论,最常被用到的是 Miner 的线性累积损伤准则,此理论觉得处于不同应力水平所产生的损伤能够实施线性叠加运算。疲劳分析要先确定结构的载荷谱,可以经由实测或者仿真方法得到。按照载荷谱做应力统计,就能知道应力幅值的分布状况,再结合材料的 S - N 曲线来做寿命预测,大致估算一下结构在指定使用期限内的损伤程度。焊接结构时,还要注意焊缝处的疲劳特点,一般会用热点应力法或者有效缺口应力法来执行更为精准的评价。疲劳分析存在不少

不确定性,所以得要采用合适的安全系数。

5.3 基于疲劳寿命的优化建议

按照疲劳分析的结果,可以针对薄弱部分给出改良建议,从而延长其使用寿命。改良的方向包含改善结构细节设计以减小应力集中系数,可以采用平滑过渡,加大圆角半径等办法。在材料选择上,可以考虑选用疲劳性能较好的高强度钢或者铝合金,并借助恰当的热处理工艺提升表面硬度。制造工艺的改良同样关键,要提升焊接质量,去除残余拉应力,运用喷丸强化之类的表面处理技术。针对螺栓连接处,可以经由改善预紧力控制或者增添防松装置来加强连接的可靠性。改良之后还要再次执行疲劳寿命评定,以验证改良举措是否有效。

6 结语

本文系统地完成了轻型桁架机器人的结构设计,并对其性能展开了分析。通过明确设计目的与参数,创建起完整的三维数字化模型。从静力学角度来讲,结构在极限工况下符合强度与刚度的要求,而动力学分析则证实它具备优良的动态特性,而且达成了轻量化设计。对关键部件执行疲劳分析,为长期稳定运行提供了保障。综合结果表明,此设计方案是合理可行的,达到了预期的目标,可以为同类设备的研发提供宝贵的参照。

参考文献

- [1] 陈海霞,吴馥云.基于改进A*算法的仓储物流机器人路径规划研究[J].无线互联科技,2025,22(18):39-42.
- [2] 耿宾.仓储移动机器人导航定位技术专利分析[J].军民两用技术与产品,2025,(09):48-54.
- [3] 周鹏,韩笑.仓储物流搬运机器人多场景任务优化调度研究[J].自动化与仪器仪表,2025,(05):161-166.
- [4] 操蓉蓉,刘大勇,赵冠永,等.仓储物流搬运机器人接触力阻抗自动控制方法研究[J].工业仪表与自动化装置,2024,(06):63-68.
- [5] 魏彦飞,李景景.室内仓储物流机器人路径规划研究[J].物流科技,2024,47(20):149-151.

Safety risk analysis and control in low voltage electrical equipment maintenance

Chao Liu Cheng Liu

Weinan operation area of Xi'an oil and gas transportation branch of Northwest Company of National Petroleum and natural gas pipeline network Group Co., Ltd., Weinan, Shaanxi, 710021, China

Abstract

low voltage electrical equipment is the key component of industrial production, building electromechanical and public facilities power supply and distribution system. Its operation safety is affected by multi-source coupling factors, showing the characteristics of recessive degradation and sudden failure. The research shows that contact arc erosion, thermal fatigue of conductive path and damp heat attenuation of insulating medium are the main risk chains in low-voltage system, and their evolution is a cumulative process from micro interface degradation to macro fault. Under the traditional experiential maintenance mode, the degradation behavior is difficult to identify early, leading to major accidents such as protection failure, local carbonization, insulation penetration and even busbar flashover. Based on the perspective of failure mechanism, this paper analyzes the system attributes, environmental sensitivity and organizational misunderstandings in the maintenance of low-voltage equipment, and puts forward the risk control strategy based on parameter trend monitoring, digital twin prediction and condition based maintenance. It is expected to provide theoretical support and engineering path for the safety management of low-voltage electrical equipment.

Keywords

low voltage electrical equipment; Maintenance; Safety risks; Contact degradation

低压电气设备维护中的安全风险分析与控制

刘超 刘程

国家石油天然气管网集团有限公司西北公司西安输油气分公司渭南作业区，中国·陕西 渭南 710021

摘 要

低压电气设备是工业生产、建筑机电和公共设施供配电系统的关键组成，其运行安全性受多源耦合因素影响，呈现隐性退化与突发失效并存的特征。研究表明，触点电弧灼蚀、导电路径热疲劳与绝缘介质湿热衰减是低压系统中最主要的风险链条，其演化表现为从微观界面劣化到宏观故障的累积式过程。在传统经验式维保模式下，退化行为难以早期识别，导致保护拒动、局部碳化、绝缘穿透甚至母排闪络等重大事故。本文基于失效机理视角，对低压设备维护中的系统属性、环境敏感性、组织性误区进行了剖析，并提出基于参数趋势监测、数字孪生预测与状态维修的风险控制策略。期望能为低压电气设备安全治理提供理论支撑与工程路径。

关键词

低压电气设备；维护；安全风险；触点退化

1 引言

低压电气设备广泛应用于工业生产、建筑机电系统以及公共基础设施，其运行状态直接关系到供配电系统的安全连续性。但是实践中传统维护模式长期依赖人工经验，对隐性危险识别能力不足，导致维护行为呈现“发现故障—排除故障—恢复运行”的被动式特征。在高负荷、非均匀负载与多扰动环境中，低压电气设备的绝缘衰退、电弧灼蚀、接触

疲劳与热积累逐步累积，不易在早期暴露，从而在运行过程中形成高概率的安全事故链条。

2 低压电气设备维护的体系特征与风险来源

2.1 低压电气设备的系统属性

低压电气设备具备典型的系统耦合特征，其运行不是单一元件的功能表现，而是由导体、开关电器、保护组件与环境介质共同构成的能量传递链^[1]。设备在负载转移、瞬时冲击、环境波动与电磁扰动等诸多因素的作用下，其电气性能呈现动态变化，而这种变化在不同元件之间相互作用，构成多级风险放大机制。以配电柜为例，母排与断路器之间的电流分布并非静态，随着相线不平衡、设备老化与导体截面变化，其载流路径逐步向局部集中，进而形成热应力集聚。

【作者简介】刘超（1988—），男，中国陕西西安人，本科，电工技师，从事天然气场站110kV变电所运行维护，防爆电气技术应用与维护研究。

当局部温升超过材料耐限后,母排表面氧化膜发生物理剥落,表面导电性提高,使温度进一步提升,从而导致绝缘材料提前进入熔融或碳化区间,形成不可逆的热劣化。当机构弹簧预紧力下降时,触头闭合力不足,使接触区实际导电面积减少,即使电流不超过额定值,也可能产生高密度局部电弧,从而形成电蚀微坑并加速热退化。同样,接触器在频繁启停中承受高重复冲击,过渡电阻呈波动状态,其可靠性不再由设备铭牌参数决定,而由其实际运行环境、介质污染与操作频率共同决定^[2]。因此,低压电气设备并非一个静态的功能载体,而是处于持续退化的动力演化体系,其维护策略必须围绕多物理场耦合机理与长期演化趋势展开,而不能停留于外观检查与单次测试。

2.2 维护行为的结构性缺陷

低压电气设备维护普遍存在结构性失效,这种失效不是单一操作错误,而是由知识结构、组织逻辑与维护工具的局限共同导致的系统性问题。从操作思维上看,维护人员习惯依赖静态、外显的事故征兆,而忽视隐性退化路径。然而在接触循环达到一定次数后,该膜层使电弧归一化路径偏移,会导致触点局部熔融,从而在短时间内形成灾难性失效。因此,基于“看得见的异常”进行的维护方式天然存在信息盲区,使退化演化在无干预条件下持续累积。

维护周期管理方式是另一项关键缺陷。传统维保采用时间驱动策略,将维护视为固定频次的强制性操作,却未考虑不同设备负载历史、使用频率与环境条件差异。结果导致高负载回路发生早期故障,而低负载回路持续被过度维护,造成资源浪费。状态不匹配的维护策略不仅降低安全性,也弱化运维人员对退化机理的敏感性,使设备行为被误解为偶发事件,而非系统性演化结果。

更深层的问题来自组织结构与信息链条断裂。许多工业企业维保执行由不同部门分段负责,检修记录分散在纸质档案、技师记忆或第三方维保报告中,缺乏统一数据平台。设备退化行为无法被横向比较,也无法形成纵向趋势分析,从而导致维护行为“原地踏步”。同一设备在多次维修后,实际退化曲线、微弧发生频次或端接温漂速率无法被再现与验证,使运维只能围绕“经验—故障—修复”的循环,在高风险环境中不断试错。甚至存在典型隐患,即外包维护团队目标偏向“短期恢复运行”,而非“长期降低失效风险”,其维护方案往往聚焦于症状,而对结构性退化因素视而不见,形成维护偏差^[3]。

3 低压电气设备典型失效机理与危险链条

3.1 触点与导电路径的失效机制

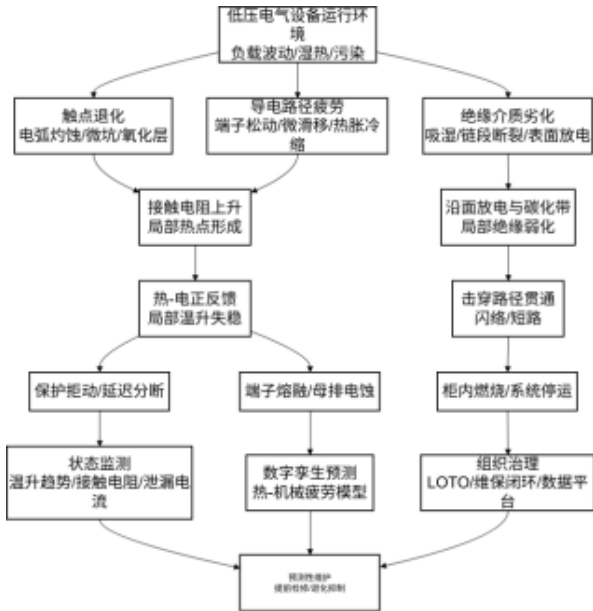
低压设备触点的失效是电弧能量冲击、机械疲劳与界面化学劣化的长期叠加结果,其演化过程呈现出从微观退化到宏观破坏的渐进路径。在断路器、接触器等控制设备的通断过程中,触头间的电弧可达到数千摄氏度高温,这种瞬态

高能量导致触点表层熔融、喷溅与蒸发,在随后的冷却阶段形成疏松的金属层或微坑结构,逐步降低接触界面实际有效面积。随着开合次数增加,表层氧化膜与电弧碳化物积聚会显著提升接触电阻。电阻的增加并非线性增长,而是呈“若干循环—突跳式上升”的阈值特征,在热-电耦合下产生局部高温,使触点表面在短时间内被焊合或烧蚀。当这一过程发生在过载或短路分断期间,保护动作时间被拉长或拒动,导致下游回路暴露于无保护状态,从而放大设备运行风险。与触头类似,导体端子与母排连接处的失效往往源于微动疲劳与预紧力退化。频繁的电流波动导致导体的周期性热胀冷缩,一旦螺栓或压接点未能保持稳定夹紧压力,接触面微距滑移将逐步减少实际载流截面,引发接触电阻指数增长。此类变化初期表现为轻微温升,外观与红外监测均难以捕捉,但随着局部热聚集强化,绝缘包覆进入热解阶段并产生导电碳化通道,最终从“热点”演化为火点。一旦热失稳触发生临界温度,导线端子处将产生连续氧化与碳化链式反应,进而演变为熔断、母排闪络甚至柜内燃烧事故。触点与导电路径的失效具有典型的延迟特征,退化过程多以亚表层积累方式存在,而最终破坏则表现为短周期内灾难性跳变。该危险链条通常从接触退化起始,经由局部电阻增长、温度非线性上升、绝缘局域击穿,最终演化为系统级故障,其风险具有极强隐蔽性与不可逆性^[4]。

3.2 绝缘介质的退化与穿透风险

绝缘材料失效是一种缓慢、累积且与环境高度敏感的退化过程,其本质是绝缘介质的分子链、微孔结构与表面物理形态在热、电、湿三类外部应力下发生协同变化,从而导致绝缘能力持续衰减^[5]。聚合物绝缘材料在长期热应力作用下发生链段断裂与交联结构失稳,其介电常数降低、击穿强度下降,而材料表面微裂缝与孔隙进一步扩大,使局部电场分布趋于集中。当环境湿度升高或存在温差凝露时,绝缘体微孔内形成水膜,该液膜显著降低绝缘表面电阻,使泄漏电流沿材料表层形成连续导电路径,降低 creepage distance 有效值,从而触发沿面放电行为。低压配电柜底部、潮湿管井或未安装加热除湿装置的电缆箱是典型高风险场景,绝缘劣化会先呈现为低密度表面放电,随后在微火花热侵蚀作用下形成粉末化碳化带。当碳化路径贯通并形成连续导电岛链时,材料击穿以突发形式发生,这种“累积—突穿”特征导致传统巡检难以提前捕捉危险信号。更为关键的是,绝缘介质失效往往与运行工况共同放大,特别是在负载波动、高频启停或局部发热条件下,绝缘体表面温度超过其玻璃化转变点后将进入加速退化区间,其内部分子结构退化与电弧侵蚀互为因果,加速形成贯穿性破坏。一旦穿透路径形成,局部放电将迅速演化为闪络甚至跨相短路,使系统进入爆炸式失效阶段,进而导致故障扩大为配电系统全面停运。因此,绝缘退化不是孤立的材料问题,而是介电性能衰减、湿热环境失控与运行应力叠加后的复杂物理过程,其危险链条

遵循“介质弱化—表面导电—局部放电—碳化贯通—瞬时击穿”的演化逻辑，是低压系统中最具破坏性的潜在失效模式之一。



本图1从低压电气设备的运行环境入手，将触点退化、导电路径疲劳与绝缘介质劣化视为三条平行但可交叉放大的危险起点

4 低压电气设备维护中的安全风险识别方法与技术策略路径

4.1 低压电气设备维护中的安全风险识别方法

低压设备维护必须从单点检查转向参数趋势分析。在常规维保中，使用红外测温或接触测温只能识别显著温升，但热退化过程往往在温差不足 10°C 时已经发生。因此，应采用连续监测与相关分析的方法，将温度、接触电阻与负载波动关联起来，构成动态退化曲线。数字孪生技术通过建立设备几何结构、材料属性、负载行为与环境因素的多尺度模型，将设备状态映射为虚拟空间中的“健康指数”。在低压系统中，数字孪生模型包含三个核心子集：电气行为模型、热传导模型与机械疲劳模型。通过实时监测数据输入，可对设备内部退化行为进行预测。维护模式应从传统预防式转向状态维修与预测性维护。在状态维修策略中，维护决策依据设备实时状态指标，如接触电阻、温升指数与绝缘泄放值。

当指标超出预设范围时执行维修，可减少冗余维护并精确匹配设备实际退化阶段。预测性维护进一步利用退化模型，通过历史数据训练获得设备老化曲线，可在设备仍处于功能完好阶段进行干预，从而避免高成本的紧急停产。维护不应只关注电气安全，还应考虑人因风险与组织风险。例如在断电检修时存在残余电荷积累、误触带电部件或二次合闸风险。应在维护流程中引入锁定挂牌（LOTO）制度，确保操作链可追溯，可验证并具备第三方确认。

4.2 案例分析与工程验证

在某大型制造企业的配电系统中，低压断路器触点退化导致保护拒动，其退化过程经过6个月演化。企业引入在线监测系统后，通过历史温升曲线发现触点温差随负载增加呈非线性增长，且温升峰值随环境湿度变化呈现滞后特征。数字孪生模型推断触点氧化层厚度趋于临界值，最终在预警后24小时进行更换，避免了生产线停产与设备烧毁。某商业综合体弱电配电柜长期位于潮湿机房内，绝缘因凝露形成沿面放电路径。维护人员采用传统巡检未发现异常，直到一次夜间突发短路引发系统宕机。事故后对绝缘材料表面微观结构分析表明，局部放电在表面形成贯穿路径，呈粉末状碳化痕迹。通过增加除湿系统与表面防护涂层，绝缘失效率降低70%以上，验证了结构性防护的重要性。

5 结语

低压电气设备维护不是单纯的修理活动，而是涵盖设备机理、运行数据与维护组织的复杂系统工程。触点退化、绝缘老化与导电路径疲劳是导致低压设备失效的核心因素，其退化模式呈隐性积累与阈值突变特征。传统基于经验与周期的维保方式难以应对多源耦合风险，应以状态监测、退化建模与预测维护为核心构建现代化维护体系。

参考文献

- [1] 姜伟强,曲家奎,林宇.低压电气设备运行故障与维护研究[J/OL].中国科技期刊数据库 工业A,2025(3)[2025-03-25].
- [2] 黄光攀,张林鎔,任峰,等.基于单应性评估的低压电气设备红外与可见光图像配准[J].红外与激光工程,2025,54(6):337-350.
- [3] 黄文盼.低压电气设备运行故障与维护研究[C].人工智能与工程发展学术研讨会论文集,2025:278-281.
- [4] 何曦.浅谈“城轨低压电气设备维护”课程项目式教学改革[J].科技风,2023,(25):127-129.
- [5] 杨振杰.低压电气设备绝缘性能提升技术[J].电气时代,2025,(10):99-101.

Research on the Trace Analysis and Repair Method of Geometric Universal Caliper Calibration

Jingyun Dai

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

Abstract

As a widely used caliper in industrial applications, the universal geometric caliper is commonly employed in precision manufacturing and quality inspection. However, prolonged use may lead to calibration inaccuracies, compromising measurement accuracy and stability. This paper analyzes the working principles and common calibration issues of universal geometric calipers, identifies root causes of calibration errors, and proposes effective methods for correction and precision restoration. The study identifies three primary factors contributing to calibration inaccuracies: wear of the measuring body, misalignment of the vernier, and contamination of the measuring surface. Environmental factors, improper handling, and design flaws also significantly impact calibration performance. By implementing corrective measures—including body and surface adjustments, vernier calibration, and regular maintenance—calibration inaccuracies can be effectively resolved.

Keywords

general caliper; calibration error; repair method

几何量通用卡尺校准失准现象的溯源分析与修理方法研究

戴静芸

汉正检测技术有限公司，中国·四川广汉 618300

摘要

作为工业中普遍使用的卡尺之一，通用几何量卡尺常用于精密生产、质量检测等行业，但在长久使用后可能会产生校准失准的问题，将影响测量结果的准确性和稳定性。在本文对几何量通用卡尺工作原理及其常见失准分析下，考虑校准失准原因，给出校准失准的修复及精度恢复的方法。文中认为造成校准失准的常见原因有尺身的磨损、游标位置的偏移和测量面的污染，而环境因素、使用操作不当、设计原因等也对校准失准有很大影响，在针对以上因素提出校准失准的修整尺身和测量面，校准和游标调整，定期清洁保养，可使校准失准得到良好的修复。

关键词

几何量通用卡尺；校准失准；修理方法

1 引言

常见的几何量通用卡尺多用于机械加工领域、质量检测领域、实验室研究领域等多个领域中，通过游标与尺身的相对移动来测量物体长度、内径、外径等几何量，因其测量精度高、构造简单、易于操作，因而被广泛应用于测量工作中。卡尺作为常见的通用量具，在实际工作使用中难免会受到各种原因影响，出现校准失准的情况。出现失准现象会使得卡尺的测量值产生误差，从而影响被测物的加工质量，造成严重的安全隐患。因此，对于校准失准的几何量通用卡尺如何实现失准检定以及如何修理等相关工作的研究，对于提高几何量通用卡尺的测量精度、维护生产安全具有十分重要的意义。

【作者简介】戴静芸（1989-）女，中国四川自贡人，本科，工程师，从事计量检测方面研究。

2 几何量通用卡尺的工作原理与常见失准现象

2.1 尺身磨损

卡尺的尺身是几何量通用卡尺的基本原件，直接接触待测量物体。长久使用后，卡尺尺身的表面会受其接触与摩擦等因素影响而产生磨损，卡尺的尺身往往都是采用金属材料制造，随着时间的推移，金属表面往往会因使用而产生磨损，继而导致卡尺上面的刻度线不清晰或出现变形的现象。尺身的磨损不仅会导致卡尺本身形状变化，还会使得其测量的结果出现一定的偏差，对于一些精度要求较高的测量过程，微小的磨损导致较大的测量误差。

2.2 游标错位

游标错位。游标卡尺的游标相对于尺身出现位置偏差而引起测量误差。游标和尺身是游标卡尺中的两部分重要构件，游标的滑动对准尺身的刻线便可进行测量，但是游标与尺身的结合关系会受多因素影响。长期使用磨损会改变游标

与尺身的接触面平整滑动情况,从而影响测量结果。另外,使用者的习惯问题也易造成游标错位,如游标没有归零与测量时受力不均造成游标相对于尺身出现错位。

2.3 测量面污染

卡尺测量是直接与被测对象接触的部位,测量面上的污染会对被测对象接触造成影响,从而使卡尺测量与被测对象接触不能满足完全接触情况,造成测量误差。测量面污染主要由灰尘、油污或其他小粒物质所造成的污染。污染物会使被测对象卡尺测量面与被测件接触面之间的完全接触产生影响,因此会影响测量的准确性。灰尘、油污会减少卡尺测量面对被测对象工件测量面的接触面积而引发卡尺测量误差,增加接触面污染物带来的误差,从而增加被测对象卡尺测量误差^[1]。

3 几何量通用卡尺校准失准溯源分析

3.1 机械磨损与老化

游标卡尺随着长时间的使用,由于不断接触被测零件,内部零件以及外部接触面都在逐步发生磨损。如游标、尺身、滑块等各个使用频繁的地方,极易发生物理上的磨损。随着使用时间的逐渐加长,这种磨损会逐渐增加,进而引起卡尺各部分尺寸发生微量变形,使其不能满足测量的精度要求。卡尺本身的测量精度不仅与其初始设计和加工水平有关,其本身的精度还会受到长时间使用造成的磨损的影响,比如尺身表层微小的划伤或微小的不平度都可能会导致游标无法对接,进而导致不能满足测量要求。卡尺缺少周期性的维护和检查时,这种磨损效用更加突出,精度将随着磨损越来越差,一直到无法满足要求。

3.2 环境因素的影响

卡尺的准确性在特殊的工作环境下也会受到很多外部因素的影响,特别是环境温度的变化,影响了卡尺的尺寸精度。卡尺材料的膨胀或者收缩使其尺身与游标间的尺寸关系发生变化,严重影响其测量结果的准确率。极端情况下,测量用的卡尺的材质在温度非常高或者是极低的情况下,会发生明显的变形,直接增加了卡尺的误差程度。同时环境的湿度过大,空气过于潮湿,也会影响卡尺的正常使用,导致其表面的金属成分发生化学腐蚀现象,进而改变了卡尺的几何外形,影响卡尺的准确测量。除此之外,在空气中也会存在很多尘土颗粒,化学物质和其他污染粉尘等,其会在卡尺上附着,进而影响其正常使用。

3.3 操作不当

不当操作是导致卡尺发生测量误差的最常见因素之一,测量误差主要是在进行精密测量时发生的,使用者在使用卡尺时还要从细微的角度进行控制和使用。例如没有清理卡尺的测量面就进行测量,卡尺测量面上粘附的污物或杂质导致测量出现误差。另外,测量的过程中没有将游标进行归零,导致游标与卡尺尺身之间存在位置差距而导致测量出现问题。

除此之外,在操作的过程中力道使用不当也会导致卡尺发生测量误差,卡尺受到外力过大或者力道过小,会导致其相应的部件形变或卡住,测量的精准度出现误差。

3.4 卡尺设计与制造缺陷

卡尺的设计和制造工艺对卡尺的精度和性能起着关键的影响作用。卡尺的设计缺陷可能导致使用过程中出现误差的积累,如游标和尺身间的滑动机构设计缺陷,游标滑动不平稳将会影响游标卡尺的使用精度;卡尺的制造过程如存在材料缺陷和工艺问题也会影响卡尺的整体性能,如卡尺尺身材料存在内部缺陷会导致使用过程中长期使用变形影响其精度。

4 几何量通用卡尺校准失准后的修复与精度恢复方法

4.1 尺身与测量面修整

卡尺尺身和测量面为几何量通用卡尺的核心,几何量通用卡尺的几何精度取决于尺身和测量面的精度。尺身或测量面的磨损、损伤等情况会造成通用卡尺失准,而引起测量值的较大偏差,此时必须修整卡尺使其恢复精度。一般尺身的磨损表现为卡尺尺身不光滑,且刻线无法清晰观察,游标无法与尺身对准导致测量失准的情况。故而在修整尺身的过程中,首要的目标即是尺身的平整度以及刻线的清晰度恢复到最佳状态。对于尺身的修整常用的方式是抛光与磨削处理。抛光是借助一定研磨率将尺身表面更加平滑的一种修复方式,将表面较小范围内的划痕以及尺身不平整等问题去除,恢复几何形状。在抛光的过程中应根据实际情况选择磨料,避免过大的力使得尺身失去更多的材料。对于部分损伤较严重的尺身,一般需要利用磨削的方式去除一定程度的尺身材料。在进行磨削的过程中,应选择合适的磨削工具,使得磨削后的尺身的平整度能够恢复。并且磨削后的尺身不应有形变或误差的出现。

除尺身的修整,测量面的修整也很重要。测量面是测量工具与被测对象直接接触的面,其表面的质量状况直接影响了接触是否充分或是否产生误差。首先就是必须清除测量面上的油污、尘土或其他污物,以确保测量面的精度,也可采用专用清洁剂和软刷等来擦洗。注意擦洗时不能使用硬物或金属工具,以防划伤测量面。当测量面有较大的损伤时,往往需要采用精密研磨方式对测量面的平面度和平滑度进行修整,即需利用超精密研磨工具精研以达到测量面与被测面的接触精度,使修整后的测量面符合制造公差的要求。

4.2 校准与调整游标

游标发生错位是造成几何量通用卡尺出现误差较为常见的一种现象,由于通用卡尺在使用时间过长,也有可能使得游标相对于通用卡尺尺身发生一定偏移,这样在读取通用卡尺游标数值时会存在较大的误差,不能保证测量工作的正确性,因此,做好游标校准与调整工作是恢复通用卡尺准确

度的一个重要工作内容。在进行校准工作前,首先需要将游标是否相对于尺身发生偏移进行了解确认,通常情况下,通用卡尺的校准,需要将卡尺与标准量具进行对比,以便于游标与尺身刻线进行相对对齐对比,标准量具尺寸与卡尺精度要比通用卡尺测量精度要高,将标准量具与通用卡尺进行对比后,可以通过校对标准量具能够将游标对于尺身的具体偏差进行确认,然后针对偏差制定出合理的调节方案与调节量。

在实际校准中,可通过标准量块、光学量仪、数显比较仪等方式测量游标的准确度,当游标与尺身无法对准时,可通过修正游标的位置使游标与尺身刻线复归。在卡尺的测量过程中,应注意防止所有使卡尺游标位置发生偏差的因素,如卡尺本身的变形、测量外力过大等;在对卡尺进行首次测量完成后应定期对卡尺的游标进行测量、修正,防止长时间使用中,卡尺发生游标位置误差累积的现象。游标错位一般发生在卡尺使用过长或者没经正常维护的时期,所以在及时校准的基础上对游标进行调整修正就能防止精度的变化,能使卡尺每次测量过程中游标与尺身准确对接,使得卡尺在整体测量性能方面有所提高^[2]。

4.3 定期清洁与保养

几何量通用卡尺的精度不仅与它的机械结构有关,还与使用环境、操作方法有关。卡尺在使用过程中会被灰尘、油渍、铁屑等物质沾污,当沾污了卡尺的测量面、游标或尺身时,会使表面接触不良、摩擦增大而影响测量精度。故对卡尺的定期清洁、维护保养是卡尺保证测量精度、延长使用寿命的关键。

使用前应经常对卡尺的清洁度进行擦拭,每次使用后应该擦拭卡尺的测量面、游标以及卡尺的尺身,将其表面附着的灰尘、油污或者杂物擦拭干净。如果使用尤其是进行高精度测量时应该避免油污或者污垢沾染卡尺的测量面以及游标部分。当卡尺的测量面出现污染物时,可以用专门的清洁剂并用软毛刷清洁卡尺的测量面和游标,使得清洁之后卡尺的测量面以及游标部分的表面上没有影响卡尺测量结果的污染物。为了防止使用过程中卡尺因与污染物发生摩擦而产生误差,所以卡尺的滑动部分也需要经常擦拭以除去卡尺滑动部分中落入的灰尘和杂质,这样可以让卡尺滑动过程更加顺畅。

卡尺除了需要定期对其进行清洁外,卡尺本身的保养也是必不可少的。由于卡尺在工作时,尺身与滑动部分、游标与尺身之间都有着直接的接触,在长久使用过程中会产生磨损,增加了卡尺在测量时所产生的误差,为了能够减少这

种磨损,在卡尺的滑动部分定期涂抹上适合润滑的润滑油,让卡尺在测量过程中产生的摩擦力减小,在操作中更加平稳。在保养时还应对卡尺的各个构成部分做一次整体的检查,保证没有松动现象、无变形、没有老化,一旦发生需及时调整、更换,以防影响到测量结果。

4.4 温度补偿与环境控制

第一,为了降低温度对卡尺测量精度造成的误差,关键措施就是保持卡尺的测量环境温度稳定,可以利用温控装置使测量环境处于相对稳定的温度环境中。例如在要求精密的工程测量或科学实验室环境中,可以采取恒温测量间或专门的测温仪器,以消除外界环境温度的变化对卡尺测量精度造成的误差。温度变化既改变了卡尺本身的物质状况,也对被测对象的尺寸产生影响,因而卡尺的测量环境温度要尽可能处于恒定的状态,否则其测量结果容易因为温度差异而引起误差。第二,为了消除温度对卡尺测量精度造成的误差,可以采取卡尺自身的温度补偿装置。温度补偿装置可以通过传感温度变化,而实时动态调整卡尺的测量数据,以消除温度变化引起的测量误差。例如,一些高端卡尺内部安装有温度传感器,能够实时跟踪和探测卡尺所处环境的温度,并对此误差自动进行修正,以便精确计量。另外,为了降低卡尺受环境温度的影响,必须保持测量环境的清洁、干燥、适当的湿度。因为空气尘埃和潮湿会容易导致卡尺的腐蚀或污染,因此,在精密测量中必须对测量环境加以控制和保持,进而保证卡尺自身的测量精度^[3]。

5 结语

精密测量仪器——几何量通用卡尺,校准失准会引发测量结果误差,危害产品品质与生产安全。对卡尺常见的失准进行溯源分析,提出修复精度恢复的方法,包括修整尺身及测量面、校准调整游标、定期维护与保养、温度补偿与环境控制等。维护保养和合理操作是保持卡尺长期高效稳定工作的重要手段。应用中的合理使用环境与流程,配合理论上有效的修复措施,可以最大限度地提高卡尺的检测精度,稳定产品品质。

参考文献

- [1] 水清波.通用卡尺内量爪检定装置的分析与设计[J].电子产品可靠性与环境试验,2022,40(1):42-46.
- [2] 李珊红,何小江,田伟丰,晁亚飞,张春霞,李艳利.高度卡尺示值误差校准的一种新方法[J].计量与测试技术,2019,46(10):65-68.
- [3] 于佃清.倒角卡尺校准方法的研究[J].新型工业化,2021,11(4):142-143.

Research on the Analysis and Reliability Assurance of Pressure Instrument Misalignment of Petroleum Drilling Platform for Safety Production

Zhi Zhou

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

Abstract

High-precision pressure instruments are critical safety indicators for oil drilling platforms. Inaccuracies in these instruments can lead to production inefficiencies or even major safety incidents. This paper examines the misalignment of pressure instruments used on oil drilling platforms, analyzing the factors affecting operational safety and the primary causes of such inaccuracies, including external environmental influences, inherent design flaws, improper installation and maintenance, and operator errors. The study proposes effective methods to ensure instrument reliability, such as enhancing reliability analysis during the design phase, improving environmental adaptability, optimizing installation and maintenance protocols, and upgrading operator expertise. These measures provide a reliable foundation for stable operations and enhanced production efficiency in the petroleum industry.

Keywords

oil drilling platform; pressure instrument; misalignment; reliability assurance

面向安全生产的石油钻井平台压力仪表失准分析与可靠性保障研究

周智

汉正检测技术有限公司，中国·四川广汉 618300

摘要

高精度的压力仪表是石油钻井平台进行安全生产的不可或缺的重要指标，压力仪表的失准会造成生产的低效率甚至重大的安全事故。本文主要围绕石油钻井平台上使用的压力仪表失准，论述压力仪表失准对安全生产的影响因素及造成压力仪表失准的主要原因，如外部环境因素的影响、仪表自身设计缺陷、安装与维护不当以及操作人员因素，最后提出一系列保障压力仪表的可靠性有效方法，如加强设计阶段的可靠性分析、提高仪表的环境适应性、优化安装与维护管理以及提升操作人员的专业水平，以此可以为石油行业的平稳运行和促进生产效益提供可靠的基础保证。

关键词

石油钻井平台；压力仪表；失准；可靠性保障

1 引言

近年来，在钻井技术发展的进程中，钻井平台在生产 and 使用的自动化程度逐步增强，压力仪表是钻井平台运行中不可缺少的仪表之一。而测量的压力仪表测量准确度不仅关系着钻井作业的生产安全与效率，同时如果仪表失准也会引起对压力监测的不准确，继而影响到生产，甚至出现事故。因此为了确保钻井平台生产作业的安全性，掌握压力仪表失准原因以及可靠度评估的措施有较重要的理论与实际意义。

2 石油钻井平台压力仪表失准与安全生产保障意义

2.1 提高安全生产水平

作为石油钻井平台十分重要的监测设备，压力仪表用于检测并监测钻井过程中各种压力数据。平台的压力仪表数据是否准确是平台安全生产水平的重要决定因素。而如果平台出现压力仪表失准现象，监测平台就有可能忽视压力情况的变化，致使系统得不到相应的调节，提高设备故障以及事故发生的概率。失准压力仪表的仪表测量数据并不准确，有可能出现判断压力不准确的现象，致使安全控制系统出现失当情况，存在相应的不安全因素。保证平台仪表的准确性和可靠性，能够使监控设备更加准确地运行，进而实现对设备的压力及时、准确控制。

【作者简介】周智（1995-），男，中国四川攀枝花人，本科，工程师，从事计量检测方面的研究。

2.2 降低运营成本

压力仪表失准会带来误报警、误判操作或未及时发现问题潜在故障,引起不必要的生产停工和设备维修,而误报警不但消耗大量的人力物力对仪表故障排查,而且会导致平台运营时效损失,增加生产成本;仪表失准会把设备无实际需求地停下来,是无谓的生产损失时间,浪费设备闲置和停机带来的经济损失;仪表的频繁维修和更换,又是增加了高额的维护成本以及更长的停机时间。因此提高压力仪表可靠性,有效降低由于仪表失准引起的误报警和不必要的生产停工,以及降低设备维修和更换频率,就会在长期运营中,大幅度地降低整体运营成本。

2.3 保障员工安全

钻井平台作为高危险性高复杂性的作业场所,运行装置包括大型设备和高压设备,压力异常情况有可能导致设备故障或者严重事故的发生。在压力仪表不准确的情况下,异常压力状况可能没有被及时发现或者控制,会造成设备故障的可能性增加、发生安全事故的可能性增大,如爆炸、泄漏。设备安全事故的发生,威胁设备正常运行、危及员工生命安全。为及时发现和处理相关设备的安全隐患,要控制好钻井设备的压力仪表的准确度,从而避免增加设备发生故障的风险^[1]。

3 石油钻井平台压力仪表失准的关键原因分析

3.1 外部环境因素的影响

石油钻井平台作业环境较为恶劣,其外部环境对压力仪表的准确度有着直接影响,高温、低温、潮湿及盐雾气候都会造成仪表失准。高温会使得压力仪表元件变形或材料老化,造成仪表的测量误差,在低温环境中会造成仪表内部元件冰冻或运动僵硬,造成压力仪表工作不准确。在盐雾等腐蚀气候下,则会对仪器的电路部分及外壳造成腐蚀,影响仪器中电子元件的稳定性与测量精度。

3.2 仪表自身设计缺陷

压力仪表本身的设计缺陷是影响压力仪表失准的一个重要原因。有些仪表本身的缺陷在设计时便已存在,如精度低、稳定性和防干扰性欠佳等,上述缺陷往往是在一段时间的运转后才逐渐显现出来的,因此在高负荷或者多变的情况下很容易失准。而有些仪表本身可能会缺乏一定的抗冲击性能,从而导致在井中高压作业时由于振击而失准。

3.3 安装与维护不当

仪表正确性是压力仪表本身设计、材质、加工环节,但除了安装和维护管理。仪表安装是否符合有关规定,是否有接触不良和传递信号不畅通的现象,导致仪表测量数据产生误差。例如没有将仪表正确地连接在检测点处或安装仪表没有考虑装置实际工作状态,造成压力信号接收不准确的问题,或在仪表运行过程中由于没有及时维护,仪表器件由于磨损、侵蚀、老化等出现故障等问题,缺少定期检定和校准,都会造成仪表的错误。

3.4 操作人员因素

操作人员的操作水平和操作习惯也会影响压力仪表的准确度。部分仪表出现故障的原因与操作人员的认知与操作不当相关,若操作人员对仪表相关原理不了解,操作规范不清楚,可能会导致仪表的安装、调校或操作出现问题,出现故障。操作人员在仪表校验时未遵循工作原理的相关步骤操作,未及时对测量结果进行校验与调整,都会降低其测量准确度^[2]。

4 提高石油钻井平台压力仪表可靠性的保障措施

4.1 加强设计阶段的可靠性分析

石油钻井平台压力仪表全寿命周期管理的第一步就为设计,该环节中的可靠性分析工作是仪表在全寿命周期后半部分能否正常工作的关键因素。因此,首先设计人员应彻底了解钻井平台的工作条件,了解工作场所中对压力仪表工作精度的影响因素,如钻井平台工作环境中有较为严重的高盐雾大气,对仪表外表面及内部金属组件都有腐蚀的影响,钻井工作时会压力测量系统产生的振动影响等,在设计环节中应考虑周全。

根据分析环境因素,设计单位应制定严格仪表选型要求,选用有行业内权威机构认证、有同类海洋钻井平台大量应用经验的仪表型号产品,在仪表选型时既要考虑仪表精确度和量程大小问题,也要着重考虑仪表的耐腐蚀性和耐振动性、仪表承受温度等问题,比如对表壳材料可采用耐海洋大气腐蚀性良好的 316L 不锈钢材料、对仪表核心传感元件应选用采用先进封装工艺、在 -40℃至 85℃范围内都可以良好工作的元件。

此外,为了验证仪表在工程实际工况下可靠性的稳定性,研发设计人员还需建立完善的仪表模拟测控系统,通过模拟钻井平台工程实际工况的测控系统,在模拟不同工况的油套压变化、温度的变化、振动幅值以及盐雾腐蚀等工况下对仪表进行稳态长期性能测试及工况极限值性能测试,实时记录仪表的测量结果、反应速度、工作状况,分析仪表在不同工况下性能的异常变化特征,并及时对测试发现问题进行设计优化,例如针对模拟高振动工况测试时出现的仪表测量结果明显偏差时,可通过优化设计仪表内部结构,增加减振缓冲结构,提高仪表抗振动性能,保证仪表在实际工程条件下长时间稳定工作。

4.2 提高仪表的环境适应性

仪表材料选取应按照海洋环境特性进行选择,对于仪表的外壳及外部连接件应选择抗海洋腐蚀能力强的材料,除了 316L 不锈钢等以外,还可以选择哈氏合金、钛合金等更高级耐腐蚀材料,对于这些材料具有较强的盐雾抗腐蚀能力和机械强度以及耐磨损的特点,能够承受钻井平台作业过程中外部应力。对于仪表内部电路元器件和传感器,应选择抗

湿能力强的元器件,比如使用密封性良好的接插件,对电路主板进行三防涂层处理(防腐蚀、防潮湿和防霉菌),将外界的湿气和腐蚀性气体隔绝在外,避免内部元器件受潮和腐蚀而引发的仪表故障发生。

从仪表结构设计方面考虑,要全面分析环境因素对仪表性能的影响,优化仪表的密封结构和散热结构。仪表的密封结构设计要采用多层密封的形式,选用耐油、耐老化密封圈,使用氟橡胶密封圈,确保仪表外壳的密封性,防止海水、盐雾、灰尘进入仪表内部。同时针对钻井平台作业过程中所产生的高强度振动,在设计仪表内部结构时增加减振机构,如在传感器和仪表外壳之间加装弹性减振垫,仪表电路主板安装位置采用弹性固定方式,在仪表外壳内部固定电路主板,通过减振机构把外界振动的振动能量吸收掉,减少振动对仪表内部元件的影响,防止因振动导致元件松动、元件损坏或测量数据失真。

4.3 优化安装与维护管理

仪表安装工作也要遵循设计和安装说明书的要求,确保其安装位置正确、安装方法正确,做到合理安装。首先,在安装位置方面,选择安装仪表,要尽量远离钻机设备振动源,防止安装的仪表在设备振动影响下误差增大或者损坏;尽量避免选择仪表安装在海水直接冲刷或者日晒的地方,保证安装的仪表免遭恶劣环境直接影响。对需要进行压力测点的管道,安装仪表的测点应当选择管道内部流速平稳、没有涡流和死角的地方,确保测点数据能够有效体现管道内部压力数据情况,例如在水平的管道中安装仪表时,仪表要安装在管壁一侧,防止管道中积水或者积气影响测点数据^[3]。

安装过程中按照操作规范进行仪表的连接与紧固,对于仪表和管道的连接,在进行连接时确保连接处的密封,选择合适材质和尺寸的密封垫片,防止由于密封垫片连接不好造成仪表周围介质泄漏,影响仪表的测量结果和设备的安全;对于仪表的电器连接,防止接线端子错误造成仪表的损坏,防止接线端子接线松动影响信号的正常输出。安装好之后要对仪表进行初期调整和检测,包含对仪表的零点校验、量程校验和信号的传输校验,确保仪表安装后能正常运行。

日常维护管理。建立完善的维护管理机制,编制具体的维护计划和维护规程,首先制定定期巡检制度,由专业的维护人员,按规定的周期对压力仪表进行巡检,巡检内容主要包括仪表的外貌检视、工作状态检视和测量数据比对。其中在外观检视中对仪表的外观有无损坏、腐蚀情况,玻璃面是否完整,连接部位是否存在松动、渗漏状况等进行检视,在工作状态检视中对仪表指针或显示屏的显示是否正常,有

无卡顿、跳变等异常状况等进行检视,在测量数据比对中,将仪表测量数据和标准压力计测量数据进行比对,确定仪表的测量精度是否正常。

4.4 提升操作人员的专业水平

首先,建立完善培训计划,针对操作人员岗位要求和操作人员目前的知识水平,分阶段、分层次地开展培训工作,培训内容包括压力仪表的工作原理、结构、技术参数、操作方法、日常操作和保养、常见故障处理等方面,让操作人员掌握仪表的详细相关知识,培训方式上采用理论培训和实操培训相结合的模式,在理论培训方面邀请业内专家或仪表厂家技术人员讲解仪表专业技术知识和行业标准规范;实践操作方面安排人员在模拟培训场地或钻井平台进行实际操作培训,由操作人员实际完成仪表的安装调试、操作、故障处理等相关操作,以便掌握更多的仪表知识,通过实践加深对仪表知识的理解。

在操作培训中重点培养操作人员的正确操作能力,详细介绍仪表的正确操作过程,对仪表的开机启动、参数设置、测量数据读取、关机等操作过程进行详细讲解,同时强调各操作环节应当注意的问题,如仪表在开机前要保证仪表电源连接良好、仪表外观完好无损,在进行参数设置时要根据实际的测量需求正确设置量程、单位等,避免操作人员因为操作不当造成仪表损坏或者测量数据错误;同时模拟不同的工况选择不同的情景进行实战操作,增强操作人员在复杂工况面前的操作应变能力和操作熟练度,确保操作人员在任何情况下都能够熟练正确地操作仪表,获取正确的测量数据^[4]。

5 结语

石油钻井平台压力仪表失准问题关系到平台的安全与生产。从仪表失准原因分析入手,采取相应的保障措施,可大大提升仪表的可靠度,降低仪表失准的发生。为了保证石油钻井平台的安全生产,各相关企业应该重视好压力仪表设计、选型、安装、维护、人员培训等方面工作,保证设备长期稳顺的工作状态。

参考文献

- [1] 陈荣毅.石油化工仪表自动化设备的故障分析方法[J].石油石化物资采购,2025(7):10-12.
- [2] 王志坤.基于物联网的石油管道压力仪表数据自动采集方法[J].石油和化工设备,2024,27(2):119-121138.
- [3] 林林.海洋石油平台压力仪表应用初探[J].能源与节能,2013(3):109-111.
- [4] 石振华,李子敏,马桂君.关于海洋石油平台压力仪表应用的探讨[J].化工管理,2019(3):43-44.

Application of cofferdam technology in water conservancy project in reservoir reinforcement project

Guangfeng Mao Jinlong Hui

Zhengzhou Hydraulic Machinery Co., Ltd., Zhengzhou, Henan, 450042, China

Abstract

Reservoir reinforcement projects are a cornerstone of water conservancy engineering, with cofferdam technology being a pivotal technique in this process. More than just a construction platform, cofferdams serve as a critical safety and stability safeguard for reservoirs. Based on practical experiences in reservoir reinforcement projects, this paper discusses the selection, design, and construction of cofferdam technologies. It highlights the characteristics and application conditions of earth-rock cofferdams, steel sheet pile cofferdams, and concrete cofferdams, while addressing key issues such as water-retaining height design, cofferdam stability, and seepage prevention. The paper concludes by proposing essential construction steps and technical safeguards, including preparatory work, foundation treatment, main structure construction, and seepage prevention measures. It further emphasizes the need for rigorous quality and safety control throughout the construction process, coupled with effective monitoring and early warning systems, to ensure the full effectiveness of cofferdam technology. These efforts lay a solid foundation for the smooth advancement and long-term safe operation of reservoir reinforcement projects.

Keywords

reservoir reinforcement; cofferdam technology; earth-rock cofferdam

水利工程施工围堰技术在水库除险加固工程中的应用

毛广锋 惠金龙

郑州水工机械有限公司, 中国·河南 郑州 450042

摘要

水库除险加固工程是水利工程建设重点, 围堰技术是库除险加固中的关键性技术之一, 围堰不仅是施工工作平台, 也是水库加固安全、稳定保障。本文基于水库除险加固工程建设实际, 进行了围堰技术的选择、设计与施工的讨论, 重点介绍了土石围堰、钢板桩围堰及混凝土围堰应用的特点与条件, 并论述了围堰设计挡水高度、围堰稳定与防渗等问题, 最后提出了围堰施工的关键步骤与技术保障, 如施工准备、基础处理、主体施工以及防渗施工。同时强调施工全程需严格把控质量与安全, 做好监测预警, 确保围堰技术充分发挥作用, 为水库除险加固工程顺利推进与长期安全运行筑牢根基。

关键词

水库除险加固; 围堰技术; 土石围堰

1 引言

受到自然或人为等多种因素的作用, 水库的运行会在一定范围内存在安全隐患。要实现水库的长期运行, 稳定的运行就需要水库的安全、长期稳定进行加固工作。围堰技术在水库加固工程中占有重要地位, 在水库加固工程中的作用是隔离水体, 便于加固工程的施工进行, 为加固施工提供较为稳定的施工环境。

2 水库除险加固工程中围堰技术的类型选择

2.1 土石围堰

土石围堰属于围堰建设过程中十分常见和普遍的结构型式, 该工程适用于建设地基比较平稳以及水流较为平缓的水库加固工程。土石围堰的特征是以建设相对简便、所需土石等建材资源通常较为充足, 且使用过程中造价成本较低为主要特点, 土石围堰施工方式中以土挖土填为主要操作方式, 以大型机械进行施工。在土石围堰中, 其稳定性主要取决于填土的密度厚度, 同时也需要对于土石材料选取方面给予充分的注重, 防止施工过程中产生冲刷渗漏的事故产生。

2.2 钢板桩围堰

钢板桩围堰一般应用于水流急、库区水位较高的水库工程中。钢板桩围堰一般由钢板桩、钢梁等组成, 在围堰施工中通过打桩设备将钢板桩插入水底中, 形成一个整体的隔

【作者简介】毛广锋(1975-), 男, 中国河南漯河人, 本科, 高级工程师, 从事水利水电工程研究。

水结构,由于钢板桩本身的防渗性能较高,因此也常用于水流变化较大、水位较高的地区,钢板桩的结构具有稳定性较强、围堰可抗复杂水文地质的抗水压的作用^[1]。

2.3 混凝土围堰

混凝土围堰在加固水库的主体结构时较为常见,施工过程中一般为钢筋混凝土结构,使得围堰的防水性及抗冲击能力都可以明显提升,在水流特别大或者水位较高的地方能够承受非常高的水压。耐久性、耐腐蚀性能非常好,在深水河底或者水流非常大的河道中也很适合。

3 水库除险加固工程中围堰的设计要点

3.1 挡水高度与断面尺寸设计

对于水库除险加固围堰设计来说,选择正确的挡水高度是保证施工安全及施工顺利进行的重要基础。施工期内水库可能出现的最高水位加上上游施工期间可能出现的最高上游来水形成的壅水高度是挡水高度的一个基础确定标准,并不能主观推断,还应结合水库设计期间的各项安全校核以及工程设计规范要求进行分析;对于水库除险加固的围堰,在进行挡水高度选择时,需在设计最高水位的基础上选择一定的安全超高值,其安全超高值需要根据围堰工程所在的地理位置的水文特征、防洪要求等确定,以保证在意外洪水或者水库水位发生变化出现意外等情况下,拦挡上游水流量对施工区域不会造成淹顶影响。

3.2 防渗设计

防渗设计是防洪除险除水工程中围堰建设的一个重要组成部分,设计的水准直接关系着围堰是否可以实现对水体的阻隔,实现施工区域内的干作业施工环境,以免因水流渗入影响施工效率和施工安全。围堰的防渗设计应该从围堰整体结构入手,对于不同部位进行针对性防渗处理。对于围堰主体部位,一般会设置专门的防渗处理结构,防渗材质的设计要根据工程项目具体情况和地质水文状况确定,如防水土工布具有较大的柔韧度和防渗作用,在很多地质结构中具有很好的适应性,而钢板的抗压强度较高,在一些需要高防渗系数或者地质情况比较复杂的围堰工程中应用较多。

3.3 稳定性设计

围堰的安全性是水库除险加固工程施工安全的关键,围堰出现安全问题导致围堰失稳,如滑坡、倾覆等,造成施工过程中工程中断,甚至人员伤亡及经济损失等,所以在围堰设计过程中稳定性至关重要。围堰稳定性设计过程中,要充分考虑到围堰受各因素的影响,首要考虑的因素为流态对围堰的冲刷,特别是在流速大的区域,高流速水流不断冲刷围堰迎流坡面与基础,围堰填料流失、基础掏空,降低围堰稳定,对此需要采取措施做好围堰的防冲,例如可以在迎流坡面设防护材料(块石、混凝土预制块等),提高坡面防冲能力,可设导流结构调整流向,减小水流对围堰的冲击力^[2]。

4 水库除险加固工程中围堰的施工关键流程

4.1 施工准备

针对水库除险加固工程围堰施工前期准备工作,施工方应组建勘察队伍,运用全站仪(拓普康 GPT-3003LW 全站仪)精准采集拟施工围堰及水库 500m 范围内的地形、地貌,并控制测量精度在 $\pm 5\text{mm}$ 以下,运用地质雷达(美国 SIR-4000 地质雷达)扫描施工段范围地下 20m 深度范围的地质构造情况,掌握地层厚度分布、岩面深度、是否发育溶洞、是否存在断裂等地质缺陷,运用水文监测设备(如 HOBO 水位记录仪)连续监测 3 天水库水位变化(6 天内),监测水位变化幅度、流速和流向,为设计单位科学制定施工方案提供详实数据,同时施工方案应根据勘察数据明确围堰形式、尺寸(如土石围堰的顶宽宜不小于 4m、边坡缓于 1:2.5;钢板桩围堰的桩长可根据具体情况而定,其入土深度应大于 6m)、施工工艺及质量要求,编制专项安全施工方案,针对施工人员进行 48 学时以上的安全培训,内容包括围堰施工安全工艺标准、高空作业安全保护、涉水施工安全应急等,并要求施工人员参加培训,经理论考试、实操考核合格后,持证上岗。施工设备准备,按照施工方案配备挖掘机(斗容量 $\geq 1.5\text{m}^3$)、装载机(额定载重量 $\geq 5\text{t}$)、振动压路机(激振力 $\geq 250\text{kN}$)等设备,进行土石围堰施工;钢板桩打桩机(锤重 $\geq 12\text{t}$)、履带式起重机(额定起重量 $\geq 25\text{t}$)等设备,进行钢板桩围堰施工,施工设备进场前均应进行检查及试运行,保证设备性能良好,并准备好足够的施工材料,例如土石围堰施工中粘性土(粘粒含量 $\geq 20\%$ 、塑性指数 ≥ 15)、块石(单块重量 $\geq 30\text{kg}$,饱和抗压强度 $\geq 30\text{MPa}$)。

4.2 基础处理

基础处理作为围堰施工的第一步,对围堰的稳定及安全极为重要,施工单位应提前对围堰的施工作业范围进行场地处理,采用挖掘机将场地内的杂草、树根及腐殖土等清理干净,一般不小于 0.5m,清理范围应大于围堰施工线 1.5m,保证无其他杂物影响施工。场地处理完毕之后,采用推土机进行初步的场地平整,平整后的场地高程偏差不得超过 $\pm 30\text{mm}$ 。若场地内有软土或是松散土层(承载力特征值小于 120kPa),需要对土层进行加固处理,当软土层厚度小于 3m 时,采用喷射混凝土加固工艺,利用混凝土喷射机(喷射工作风压以 0.4-0.6MPa 为宜)进行 C25 混凝土喷射作业,喷射厚度不小于 100mm,一次喷射完成,第一次喷射厚度 50-60mm,待混凝土初凝(一般间隔 4-6h)后进行第二次喷射,喷射混凝土时要控制好喷射速度(不大于 0.2m/s)及喷射角度(喷射角度应与受喷面形成角度不小于 70°),混凝土与土层紧密结合;当软土层厚度超过 3m 时,采用打桩加固工艺,管桩选用 $\Phi 500\text{mm}$ 的预应力混凝土管桩,桩长一般按照软土厚度来确定,桩端进入持力层(承载力特征值不小于 250kPa)深度不宜小于 1,沉桩后进行回填

处理。5m, 静压桩机(最大压桩力不小于600kN)沉桩施工, 沉桩时控制桩的垂直度(偏差 $\leq 0.5\%$)、桩顶标高(误差 $\leq \pm 50\text{mm}$), 桩的间距依据设计, 一般取1.2-1.5m, 成桩后须单桩竖向抗压承载力检测, 检测数量不低于总桩数的1%, 且不得少于3根, 检测结果满足设计要求(单桩竖向抗压承载力特征值 $\geq$ 设计值)^[3]。

4.3 主体施工

主体施工是围堰建设的关键工序, 施工质量直接影响着围堰的运行品质, 应根据不同选用的围堰类型采用对应的施工工艺进行施工。土石围堰施工采用分层填筑、分层压实施工方法, 按300-500mm厚度填土, 填土施工采用挖掘机辅助装载机摊铺填土, 摊铺填筑后采用振动压路机压实, 压实遍数依土料性质而定, 一般为6-8遍, 压实度要求达到95%以上(采用环刀法检测压实度, 每1000m²不少于3点检测)。施工过程中填土需控制土料的含水量, 使之符合最优含水量 $\pm 2\%$ 的范围(最优含水量通过击实试验得到), 如土料含水量过大, 需进行翻晒处理; 若土料含水量太小, 洒水进行湿润。钢板桩围堰施工, 施工前需对钢板桩进行抽检, 保证锁口完好, 无变形, 采用履带式起重机+钢板桩打桩机进行打桩施工, 打桩顺序应沿上游向下游, 以两边向中间施工, 打桩时需控制桩身的垂直度, 不大于0.5%, 桩顶标高误差控制在 $\pm 50\text{mm}$ 以内, 相邻钢板桩的锁口紧密连接, 缝隙不大于3mm。混凝土围堰施工中采用分仓浇筑的方法进行浇筑, 每个仓段按15m为宜。首先, 在浇筑前进行钢筋绑扎工作, 钢筋规格、型号应符合设计要求, 钢筋间距误差小于10mm, 保护层厚度误差控制在5mm以内。钢筋绑扎完之后再安装模板。模板采用钢制模板, 模板拼接缝间隙小于2mm, 模板平整度误差不超过3mm/m, 并保证模板加固牢固, 在浇筑过程中模板不会发生变形或者移位的情况。采用强度等级C25的商品混凝土浇筑, 坍落度控制在120-160mm内。混凝土的布料利用混凝土输送泵, 采取分层浇筑, 分层厚度不超过500mm, 使用插入式振捣棒振捣, 振捣间距不能超过400mm, 振捣时间控制在20-30秒, 至混凝土表面没有气泡, 出现水泥浆为止, 并保证混凝土振实, 不得出现漏振、过振的情况。

4.4 防渗施工

防渗施工是保证围堰不漏水, 从而顺利施工水库除险加固工程的重要方面, 应该在围堰结构施工完成之后进行。

对于防渗层施工应该按设计方案要求进行, 在施工过程中根据围堰类型选择防渗材料和施工方法, 土石围堰通常选用土工膜防渗, 土工膜采用高密度聚乙烯(HDPE)土工膜, 厚度 $\geq 1.5\text{mm}$, 幅宽结合施工需要确定, 一般为6~8m, 土工膜物理力学性能符合下列要求: 拉伸强度 $\geq 18\text{MPa}$, 断裂伸长率 $\geq 400\%$, 直角撕裂强度 $\geq 80\text{N/mm}$, 抗渗系数 $\leq 1 \times 10^{-11}\text{cm/s}$ 。在施工前需要对土工膜铺设基面做处理, 使基面平整, 不能有尖锐杂物(石块、草根等), 平整度差 $\leq 50\text{mm}/2\text{m}$, 铺设时按照“先下游后上游、先低后高”的施工顺序进行土工膜的铺设, 土工膜之间焊接时用热熔焊接, 焊温度控制为180~220℃, 焊速控制在1.5~2.5m/min, 焊缝宽度 $\geq 10\text{mm}$, 每条焊缝充气(充气压力0.2MPa, 保持30min, 压降不超过5%)和真空(真空度不小于0.02MPa, 保持30s, 无气泡产生)检测, 合格后进行下一步^[4]。针对钢板桩围堰而言, 由于防渗主要靠钢板桩锁口密封, 因此钢板桩锁口部位施工涂抹黄油(黄油纯度 $\geq 99\%$)或专用密封膏, 涂抹厚度 $\geq 2\text{mm}$, 确保钢板桩锁口涂抹到位, 密实封堵, 并在钢板桩围堰内侧铺设一层土工布(单位面积质量 $\geq 300\text{g}/\text{m}^2$, 渗透系数 $\leq 1 \times 10^{-7}\text{cm/s}$), 土工布与钢板桩采用尼龙绳绑扎固定, 绑扎间距 $\leq 500\text{mm}$, 形成双层防渗系统。

5 结语

围堰技术作为水库工程中除险加固不可缺少的一部分, 随着水库工程中加固规模的不断扩大, 围堰技术的出现将越来越重要。合理地选择围堰类型、精心地设计和施工, 才能保障水库加固工程的顺利运行, 从而保障水库的长期稳定工作, 这是水库围堰工程技术未来的发展趋势。随着新材料和新技术在围堰技术中的不断应用, 也将改变传统的围堰操作方法。

参考文献

- [1] 刘国鹏. 水闸加固施工技术在水利工程中的应用[J]. 科技资讯, 2024, 22(1): 110-113.
- [2] 于宁. 水利工程中病险水库加固工程技术研究[J]. 模型世界, 2024(11): 138-140.
- [3] 张生武. 水利工程隧洞衬砌及喷锚支护加固施工[J]. 科学技术创新, 2024(7): 161-164.
- [4] 王帅. 水利工程水闸除险加固设计研究[J]. 工程建设与设计, 2024(15): 125-127.

Quality Control of Petrochemical Process Pipeline Installation

Fanling Zeng

China National Petroleum Corporation No.6 Construction Co., Ltd., Guilin, Guangxi, 541004, China

Abstract

The quality control of pipeline installation in petrochemical processes has promoted the healthy development of the petrochemical industry. Nowadays, pipeline installation quality control has become an important guarantee for the safety of petrochemical production and plays a key role in ensuring the smooth progress of petrochemical production. The quality control of pipeline installation, as a key link in the petrochemical process, has achieved significant results by applying scientific quality control methods to pipeline installation. There are certain problems in the current quality control of pipeline installation. Before applying quality control methods, sufficient preliminary preparation and detailed planning must be carried out to clarify the key points of quality control. This can effectively improve the level of quality control and promote the construction of quality control for petrochemical process pipeline installation. This article is based on the current development status of the petrochemical industry, mainly analyzing the problems in pipeline installation quality control and proposing corresponding improvement strategies for reference.

Keywords

Petrochemical industry; Process pipeline; Installation quality; control method

石油化工工艺管道安装质量的控制

曾繁玲

中国石油天然气第六建设有限公司, 中国·广西 桂林 541004

摘要

石油化工工艺管道安装质量的控制推动了石油化工行业的健康发展,如今,管道安装质量控制早已成为石油化工生产安全的重要保障,对于保障石油化工生产顺利进行来说也具有关键作用。管道安装质量控制作为石油化工工艺流程中一个关键环节,将科学的质量控制方法应用到管道安装当中,已经取得了显著成效。当前管道安装质量控制中存在的问题,在将质量控制方法应用之前,必须进行充分的前期准备,进行详细的规划,将质量控制要点明确,这样能够有效提升质量控制水平,促进石油化工工艺管道安装质量控制建设。本文基于石油化工行业的发展现状,主要就管道安装质量控制存在的问题进行分析,并提出相应的改进策略,以供参考。

关键词

石油化工; 工艺管道; 安装质量; 控制方法

1 引言

随着石油化工行业的快速发展,管道安装质量的控制要求日益提高,实现高质量的管道安装成为行业关注的重点。由于石油化工工艺的特殊性,实现管道安装质量的精准控制进一步提升生产安全水平。对于石油化工企业来说,由于管道安装质量对生产安全和效率有直接影响,搭建完善的质量控制体系能提升生产效率和安全保障,同时也能提升企业的市场竞争力,这保障了石油化工行业的持续健康发展,使企业获得更强的市场支持。

2 石油化工工艺管道安装质量控制的意义及作用

2.1 提升管道安装安全水平

管道安装质量控制的实施需要系统性的规划,对管道材料和安装工艺要求高。对于石油化工工艺管道安装的施工团队来说,在安装过程需要严格遵循标准、规范和安全规程,同时会面临各种复杂环境因素^[1]。但在科学的质量控制体系支持下,将质量控制要点融入安装全过程,通过定期检查和评估进行质量监控,确保安装质量,进而有效提升管道安装的安全水平。

2.2 提升管道安装效率

在石油化工项目中,管道安装质量控制需要严格把关,因此质量控制体系的建立尤为重要。而在应用质量控制方法的过程中,只需要按照既定标准操作,其余的安装流程和質量检查由专业团队负责,这能够有效避免安装过程中的质量

【作者简介】曾繁玲(1998-),女,中国广西合浦人,本科,助理工程师,从事化学工程研究。

问题,进而有效提升管道安装效率。质量控制体系作为石油化工项目中的重要管理方式,质量控制中的关键点就是提高管道安装质量。在管道安装中,规范操作流程,就是将质量控制要求落实为具体操作规范,依靠科学方法,在安全、高效、经济的同时,强化管道安装质量控制。质量控制体系的完善既是提高管道安装质量的前提,同时也是企业实力的体现。质量控制体系良好,管道安装质量才能得到保障。

2.3 有助于实现安全生产

目前,安全生产已经成为石油化工行业的必然趋势,将科学的质量控制方法引入管道安装的全过程,能有效保障安装质量,通过严格的质量控制支持管道安装实现了安全运行,保障了石油化工生产过程中的安全。质量控制体系作为石油化工项目中的重要组成部分,既是安全理念与操作规范的升华,同时也是对安全生产要求的体现。在实际生产中,多注重质量控制的落实,通过科学的控制方法和严格的质量检查,从而实现安全生产以及企业可持续发展目标,确保生产安全。

2.4 能够实现成本优化

质量控制能通过精细化管理、标准化流程来优化管道安装的各个环节,做好质量控制的全程监控,从而确保管道安装质量更好地满足设计要求。在石油化工行业背景下,质量控制由传统的经验式管理为科学化、规范化、标准化,这能发挥质量控制的积极作用,进而有效推动石油化工管道安装质量控制的发展。在质量控制体系中明确要求质量控制方法的作用,转变过去粗放式管理方式,引导企业向精细化、标准化管理方向发展,实现安全、高效和经济等目标,这是增强企业竞争力和市场适应力的重要途径。

2.5 可实现持续改进

近年来,石油化工行业逐步实现了管道安装质量控制的规范化,管道安装质量控制的各个环节逐渐标准化,这样不仅保障了管道安装质量的稳定性,也使管道安装质量控制体现出专业能力。在管道安装的质量控制过程中,可以运用科学方法和先进技术,做好质量控制点的监控,进而发挥质量控制的价值,实现管道安装质量的持续提升^[2]。对管道安装质量控制而言,科学的质量控制方法是实现高质量安装的关键,对管道安装质量控制来说,应遵循科学合理的原则,注重质量控制的全面提高。质量控制方法的科学应用,让管道安装质量控制通过规范化、标准化形成质量保证体系、持续改进机制。让企业借助质量控制、标准化、持续改进等手段。最终实现质量提升、效率提高、成本降低效果,为石油化工行业的可持续发展奠定坚实基础。

3 石油化工工艺管道安装质量控制中存在的问题

3.1 质量控制意识不够

由于不同石油化工企业的规模和管理水平不同,质量

控制并不总是被重视的环节,不同企业的质量控制要求存在一定差异。目前,部分企业对质量控制不够重视,忽视了对管道安装质量的追求,错误地认为质量控制属于额外工作,会影响生产进度,在管道安装中不需要严格实施,这样的想法严重阻碍了质量控制方法的应用。另外,部分企业的管理人员对质量控制方法的认知不足,使质量控制实施过程中缺少有效指导。质量控制意识缺乏现代管理理念,会严重阻碍质量控制在石油化工管道安装中的应用。

3.2 缺少专业质量控制人员

质量控制是管道安装与安全管理的关键点,属于专业性很强的工作,其中包含管道材料检验、安装工艺控制等,以及质量检查等细节问题,质量控制涉及范围极为广泛。想要实现质量控制目标,一定要有专业的质量控制人员。目前,石油化工行业质量控制人员普遍短缺,再加上部分企业不够重视质量控制,导致质量控制水平难以提高,影响管道安装质量。质量控制在实施后,忽视了对质量控制人员的培训和管理,只关注安装进度和质量结果,这在实际操作中又增加了质量控制的难度。在实际管道安装过程中,存在质量控制人员配置不足的情况,对于大型管道安装项目,且缺乏专业质量控制人员,没有系统化的质量控制计划,质量控制和质量检查工作不到位,这对管道安装质量造成严重影响。

3.3 质量控制流程缺少规范和标准

质量控制的应用与管道安装工艺存在密切联系,在管道安装工艺不完善的情况下,许多问题会暴露出来,对管道安装质量控制的实施和质量保证影响。对于管道安装质量控制来说,需要有规范的流程,如果流程不完善,被质量问题困扰会出现质量失控的现象,管道泄漏、焊接缺陷等质量问题,会给管道安装带来严重安全隐患。

4 石油化工工艺管道安装质量控制的改进策略

4.1 加强质量控制意识的培养

质量控制需要得到企业高层的支持,企业应当以企业现状为基础制定质量控制策略,从企业实际的管理需求和质量控制需求出发,才能形成有效的质量控制体系。在实际管理中,企业要重视到质量控制对管道安装质量的保障作用,明确质量控制的管理目标,形成全员参与、全程监控的质量控制体系,在此基础上实现质量控制的有效实施,更有针对性地解决质量控制中的问题。质量控制意识的培养一定要根据企业当前的管理现状开展,满足实际需求^[3]。例如:某石油化工企业存在质量控制意识不足的问题,对自身质量控制流程不够充分,对质量控制标准的执行不够严格。因此,该企业在进行质量控制体系建设的过程当中,一定要制定科学的质量控制策略,客观分析人员、设备、材料等方面的质量控制需求,做好质量控制方案与质量控制标准的制定,明确质量控制的关键环节需求,结合实际情况制定质量控制计划,保障质量控制体系的建立与自身管理特点相符。在落实

质量控制体系建设的过程当中，一定要系统化去开展，也要结合行业标准，这样才能确保质量控制体系的有效性，充分满足企业质量控制需求。

4.2 提升质量控制人员的专业水平

质量控制体系的完善需要各部门之间的协作，即便在质量控制体系完善后，在实际操作中也应定期进行质量控制人员的培训和考核，做好质量控制方案和质量控制标准的更新，最大限度避免质量控制问题的出现。如果发现质量问题，就要及时处理。质量控制团队还应该加强质量控制方法和质量控制标准的学习，定期进行质量控制培训，及时发现质量控制中的问题，尽可能提前预防，也要做好质量控制培训工作，避免质量控制问题再次发生，及时解决质量控制问题，确保质量控制体系的有效性。例如：质量控制团队要定期进行质量控制培训，不仅提高质量控制人员的专业技能，还应该加强质量控制理念的培训，同时做好质量控制方案的制定，如果质量控制人员发生变动或质量控制标准有变化，则要及时更新质量控制方案，各部门质量控制人员应该定期进行质量控制交流，共同提高质量控制水平。质量控制团队的专业水平决定着质量控制体系的完善水平，保障质量控制体系有效运行是质量控制体系建设的关键。目前，石油化工业正处于质量控制体系完善阶段，企业需要不断完善质量控制体系，如果企业则要做好质量控制人员的培训，进而有效提升质量控制水平，提升管道安装质量。

4.3 在安装过程中进行质量控制

在质量控制体系的影响下，管道安装质量控制的实施更加系统化，有助于完善质量控制体系，有效利用质量控制方法。质量控制方法的应用进一步提升管道安装质量的价值，质量控制借助科学方法、标准化流程，能有效进行质量控制的全过程监控，保证质量控制具有现实意义，更好地开展管道安装质量控制。例如：管道安装的质量控制需要有完善的质量控制方案，通过质量控制计划和质量控制标准。对于大型管道安装项目来说，在质量控制过程中实现了质量控制和安装进度的平衡，同时确保质量控制要求得到满足。在质量控制体系支持下，将质量控制要点融入安装过程，通过定期检查进行质量监控，确保质量控制效果，最终实现管道安装质量的提升。

4.4 提高质量控制标准和规范

无论是在石油化工业管道安装还是其他管道安装领域，质量控制始终是核心所在，企业应该重视质量控制，为质量控制提供必要支持，并对质量控制进行引导。针对质量控制的改进是一个长期的过程，只有持续改进，才能实现质

量控制的持续提升。质量控制团队要持续改进，通过质量控制体系的完善去推动质量控制的水平提升，做好质量控制人员与质量控制标准的沟通，互相促进，通过质量控制实践对质量控制体系进行完善，保障质量控制体系的不断完善。例如：质量控制体系的完善一定要从设计、施工、验收等环节，加大质量控制投入，确保质量控制标准得到提升。在这个过程中，质量控制团队也要做好质量控制体系的优化，加快质量控制体系完善步伐，在质量控制体系的完善过程中，进一步提升质量控制的规范性。

4.5 建立质量控制监督机制

对于石油化工企业来说，应该建立完善的质量控制体系，在质量控制体系建立之后，再去实施质量控制的监督，保障质量控制的实施，更好地开展管道安装质量控制的监督工作，保障质量控制的规范性，这不仅需要企业重视，也需要质量控制团队的积极参与。质量控制团队要保障质量控制体系的完整性，加强质量控制团队之间的沟通和联系，进而加快质量控制体系完善步伐。例如：在质量控制体系建设下，企业通过质量控制检查、质量控制评估、质量控制改进等措施，形成了质量控制闭环管理，基于质量控制体系的完善，达到了质量控制的目的。不可否认的是，质量控制体系的完善也需要企业持续投入，推动了质量控制水平的提升，质量控制，进一步提升质量控制体系的完善程度。

5 结语

石油化工企业想要实现高质量的管道安装，就需要质量控制体系的支持。质量控制直接关系到管道安装的安全，随着石油化工行业的不断发展，企业一定要做好质量控制的全过程管理，逐渐提升质量控制的规范性，尽可能避免出现质量问题，减少质量控制风险，助力石油化工业管道安装质量的提升。企业应通过质量控制培训、质量控制体系建设等方式，为管道安装质量控制提供专业支持。实现质量控制，能有效保障管道安装质量，也最大限度地减少质量问题，保障石油化工业生产安全，进而提升石油化工业整体的质量控制水平。

参考文献

- [1] 于刚, 肖莉. 石油化工业管道安装质量控制技术分析[J]. 石化技术, 2022, 29(1): 85-86.
- [2] 杨芮, 黄晓虹. 石油化工业管道安装质量控制技术分析[J]. 石油石化物资采购, 2022(12): 16-18.
- [3] 董祥健. 石油化工业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.

Research on the Application of Modular Design Methods in Non-Standard Automated Equipment

Maoxiao Qiao

Shanxi Jinko Solar Manufacturing Co., Ltd., Taiyuan, Shanxi, 030000, China

Abstract

The modular design approach is crucial for improving the efficiency and quality of non-standard automated equipment design, and its applied research holds significant practical importance. This article comprehensively explores the fundamental theories, method formation, and implementation process of modular design, focusing on the design characteristics of non-standard automated equipment. It begins by explaining the concept of modular design, classification criteria, and key aspects of interface design. Then, it analyzes the demand characteristics, design challenges, and the necessity of modular application in non-standard equipment. Based on this, specific methods for functional module division, standardization strategies, and interface adaptability design are provided. Additionally, detailed pathways for module library creation, selection and synthesis, and system integration are discussed. By evaluating design efficiency and cost control outcomes, the direction for continuous improvement is determined, offering theoretical support and practical guidance for the modular design of non-standard automated equipment.

Keywords

Non-standard automated equipment; Modular design; Functional division; Interface design; standardization

非标自动化设备中模块化设计方法的应用研究

乔毛小

山西晶科能源智造有限公司, 中国·山西太原 030000

摘要

模块化设计方法对于改善非标自动化设备设计效率和质量十分关键, 其应用研究具备重要的现实意义。文章针对非标自动化设备的设计特征, 全面探究模块化设计的基本理论、方法形成以及开展过程。先说明模块化设计的概念、划分准则和接口设计重点, 然后剖析非标设备的需求特性、设计难点以及模块化应用的必要性。依托此, 给出功能模块划分、标准化策略以及接口适配性设计的具体办法, 并细致论述模块库创建、选型合成和系统融合的开展途径。经由考量设计效率、成本控制成果, 确定不断改良的方向, 给非标自动化设备的模块化设计提供理论支撑和实践指导。

关键词

非标自动化设备; 模块化设计; 功能划分; 接口设计; 标准化

1 引言

非标自动化设备具有定制化需求强烈、设计期限紧凑、技术融合度高这些特性, 所以其在制造业中有重要意义。但是传统设计方法往往依靠经验来推动, 存在很多问题, 比如重复性劳动繁重、协同效率低下、成本控制困难等。模块化设计把系统拆解成各自具有独立功能、接口标准统一的单元之后, 可以明显改善设计的灵活性并加强其被重复利用的频率, 从而满足非标设备快速回应各种情况的需求。本篇文章想要针对模块化设计方法在非标设备上的应用架构展开全面探究, 由理论根基入手逐步过渡到实行途径方面, 进而给改良设计流程、促使整个行业技术创新带来一些可资借鉴

之处。

2 模块化设计基础

2.1 模块化设计概念

模块化设计把复杂系统拆解成具有独立功能、接口标准的功能单元, 再把这些单元拼合起来制造产品。这种方法属于系统工程范畴, 重点就是借助功能单元的封装和标准化接口做到系统解耦, 以此改善设计的灵活性、可复用性以及可守护性。在非标自动化设备行业, 这个方法会把机械结构、激发控制、传感检测等子系统变成可互换的模块, 创建一个共享资源平台。凭借此平台, 设计人员可以利用少量模块快速设置来应对各种定制需求, 切实减小系统的复杂程度, 把非标设计由全面定制的方式转为成依靠标准化框架的高效开发模式, 达成知识沉淀和技术创新。

【作者简介】乔毛小(1989-), 男, 中国山西太原人, 在职本科, 从事机械设计自动化, 偏向于非标自动化研究。

2.2 模块划分原则

模块划分要按照功能内聚、接口解耦、粒度适中的关键原则。功能内聚使得各模块包含清晰完整的子功能，内部要素联系密切。接口解耦就是要使模块之间的衔接简易而标准，做到独立开发并可以替换。粒度适中就是协调好模块的大小，既不能因为过分细致而使接口变得繁杂，也不能过于粗放从而影响到重复利用的价值。这个划分的过程应当同功能流程分析联系起来，找出能量、物料以及信息传递的途径，把那些技术上相关度高而且改变时间相同的部分归入一类，还要兼顾工艺是否可行以及守护起来是否方便。这样就能让模块具备技术上的独立性并且守护起来也很轻松，进而为整个系统的整合及其后续的改良形成基础。

2.3 模块接口设计

模块接口设计对于模块化系统协同效能十分关键，它关乎机械、电气、控制等诸多方面的规范。机械接口要统一连接尺寸、公差配合以及定位方式；电气接口要明确电源、信号和接线标准；控制接口则要界定通信协议及数据格式。其设计目的在于达成兼容性、鲁棒性和可扩展性，使得模块之间在物理上精准契合、在功能上完美衔接。经由保留扩展余地或者设置配置选项，接口就能够顺应技术更新和需求变动。严谨的仿真和原型验证是保证接口可靠性的必要手段，这样做可以减小融合风险，支持模块化架构长期稳定运行。

3 非标设备设计特点

3.1 非标设备需求分析

非标设备的需求分析重点在于其高度定制化和动态变化的特点，要深入解读诸如特定工艺、产能以及空间限制之类的的关键需求。这个分析过程重视识别需求的变异性并区分其优先级，从而明确核心功能和可调节参数的界限。相比于标准设备，非标需求往往会在交流互动过程中被进一步细化，所以要求分析方法要有很强的适应能力，要在技术可行性和经济价值之间寻找恰当的调和点。经由结构化的访谈和场景模拟活动，把含糊不清的需求转变为确切的技术规范，给模块化的设计方案赋予明晰的输入信息，保证最终的设计既能准确契合用户所处的具体环境，又能达到一定的标准化水平并且具有成本优势。

3.2 设计流程与难点

非标设备的设计流程包含需求转化、方案设计、详细设计以及整合调试这几个部分，存在技术融合复杂、更改更新频繁、知识依赖性高的这些难点。很多领域里的技术要同时去开发，这样就很容易出现接口矛盾的情况，局部的调整常常会造成整个系统发生连锁性的反应。由于没有成熟可用的参考方案，所以设计的时候非常看重经验的判定，这就使得项目的历时和质量难以得到有效的控制。这些难点显示出传统串行设计模式有着自身的局限之处，迫切得要采用系统化的手段来改善流程的规范性、协作的效率以及知识留存的

能力，进而解决非标项目本身就具有的不确定性和多种类的问题。

3.3 模块化应用必要性

模块化设计对于非标设备来说十分必要，这是改善效率、质量和知识复用性的主要途径。功能模块如果做到标准化和可复用，就能极大地缩减重复设计的情况，压缩开发时间。明确的接口规范能减小多领域协作的困难，推动并行工程，把个人经验变成企业的技术财富，加强设计的一致性和可守护性。应对小批量、多种类的市场态势时，模块化框架可达成快速设置和灵活升级，有效地协调好定制化和标准化之间的矛盾，给非标设备达成高效、经济又可持续的开发给予方法上的支持。

4 模块化设计方法构建

4.1 功能模块划分方法

功能模块划分要采用自上而下的系统分析法，先从设备总功能入手，逐步分解成子功能单元，一直分解到可以独立执行的模块大小为止。划分按照功能流分析来做，找出能量、物料、信息之间的本质联系，把那些耦合性高的子功能归并成候选模块。利用公理化设计里的独立性公理，尽力让功能映射达到最小的耦合程度，使得模块具备较高的内聚性和较低的依赖性。划分的时候还要兼顾通用性和专用性，基本功能朝着标准化方向努力，工艺适应方面则保存一定的灵活性。这种科学的划分是创建模块化体系的根基所在，会直接影响到后面模块的研发、管理及组合应用的效能。

4.2 模块标准化策略

模块标准化策略期望经由统一参数、型谱以及元件选型来缩减种类，达成规模效益。该策略包含尺寸系列、性能等级、材料规格以及关键外购件的品牌型号，从而用少量模块变体去应对大量需求。在执行时要分层分类，基本模块必须严格执行刚性标准以确保互换性；专用模块则容许其参数在一定范围内调整以保留适应性。标准化并非静止不变的过程，应创建反馈机制不断改良标准体系，协调好设计限制与市场变动的关系，进而做到成本、效率和灵活性的兼顾并取得理想效果。

4.3 接口兼容性设计

接口兼容性设计着眼于达成模块之间物理层面、电气层面以及逻辑层面的无缝对接。机械接口要保证结构相适应并且动力传递稳定可靠；电气接口需统一信号标准并符合抗干扰需求；控制接口则要明确数据协议和交互规则。设计时应依照开放性、前瞻性准则，选用主流标准协议而且要保留技术更新余地。经由分层设计来划分基本接口和扩展接口，从而做到前后兼容。依靠模型仿真和原型检测的确认步骤十分必要，全面规避潜在矛盾之处，使得接口在复杂工作条件下具备稳定性与可靠性，进而为系统融合创建基础。

5 模块化实施流程

5.1 模块库建立与管理

模块库处于模块化执行的核心地位,创建它的时候要系统地把各个模块的技术参数、模型文件以及应用指南归档起来。它的结构按照功能域来划分,这样就能做到按照属性去查找,并且能够跟踪版本情况。这个管理机制包含模块入库前的审查、维持模块状态以及更新换代的步骤,从而保证信息既准确又统一。依靠像 PLM 这样的信息化平台,可以达成数据共享、设定权限并固定流程,创建起评定模块使用效果的体系,按照调用次数和项目反馈来改良库里的内容。优质而高效的模块库管理是做到知识积累、推动设计重复利用的关键所在,也会直接改善模块化体系的应用性能及其活力。

5.2 模块选型与组合

模块选型依照设备需求规格,从库中挑选功能、性能及接口相符的模块,并执行技术经济性对比。选型要兼顾成本、交付期和可靠性,从而确定最佳结合。针对特别需求,可以在标准接口之上开发专用模块。组合设计按照架构限制和接口准则,经由配置工具来执行逻辑安排与空间设计,形成起完整的方案,并出具装配图、接口清单之类的文件。这个过程把定制化设计转变成模块化设置,突出优化了方案质量的统一性及其生成的速度,减轻了对个人经验的依靠。

4.3 系统集成与调试

系统集成按功能依赖顺序进行模块物理组装与电气连接,严格执行接口规范。调试采用分层策略:先执行单体功能检测,接着做模块联合调试,最后开展整机性能验证。标准化的调试流程和检查列表体系会指引故障查找过程,着重考察接口适配情况以及控制逻辑的协同效果。经由系统性的整合与调试,保证模块拼接起来之后的综合性能符合标准,缩减现场变数并防止不必要的重新工作,促使项目得以如期完成。

6 应用效果与优化

6.1 设计效率评估

模块化设计利用预先定义好的模块,极大地缩减了方案设计和详细设计的时间。从库中直接调用资源可规避重复建模,而且接口标准化能削减修改的工作量。采用并行工程可以推动项目的进度。效率的改善一方面表现在人力投入的改良上,另一方面体现在交付速度的加快上。这使得初级工程师能够立即加入到复杂项目当中,从而提升整个团队的总体生产能力。模块化把设计重点从零部件制造转到系统设置

上来,这样就从根本上改变了非标设备的设计模式,做到了效率质的提升。

6.2 成本控制分析

模块化从多维度实现成本优化:模块复用会把研发成本进行分摊,依靠标准件的批量采购优势来削减采购成本,通过预装配缩减现场工时从而减轻生产成本,而且模块互换性能能够减小备件库存并简化维修难题进而减轻维持成本。从全生命时段来看,模块化有益于设备局部升级以延长其使用寿命,可以减小总体拥有成本。这种源于复用的经济性属于非标设备模块化设计的关键价值所在,极大地提升了市场竞争力。

6.3 持续改进方向

模块化体系需持续改进以保持活力。方向包括:加富模块库,优化覆盖范围和性能,更新接口标准并融入新技术,采用智能设置工具来改善选型合成的智能化水平,加深机械、电气、软件模块之间的深度融合,塑造更具灵活性的整合平台。其终极目的在于创建起可快速应对个性化制造需求,并支撑企业数字化转型的先进模块化设计生态体系,从而促使非标自动化行业不断发展。

7 结语

模块化设计方法给非标自动化设备领域带来了系统的解决途径,较好地协调了定制化需求同设计效率、成本控制之间的冲突。形成标准化的模块库和接口体系之后,开发时间大幅缩减,全生命时段成本得以减小,个人经验也变成了可持续发展的企业知识财富。制造业朝着柔性化、智能化方向发展,在此情形下,模块化设计深层次的价值就在于具备快速应对和不断更新的能力。未来的改进重点在于充实模块库、更新接口标准并采用智能化设置工具,以此加深跨技术领域的深入融合,促使非标自动化设计朝着更高层次的标准化、平台化模式发展,为行业转型升级增添持久动力。

参考文献

- [1] 党晓雪.非标自动化设备的模块化设计[J].中国机械,2024,(27):25-28.
- [2] 谢奉林.非标自动化设备的模块化设计分析[J].科学技术创新,2023,(06):211-214.
- [3] 徐江明.非标自动化设备模块标准化的探究分析[J].中国设备工程,2022,(11):231-233.
- [4] 徐康悛.非标自动化设备的模块化管理及其评价研究[D].扬州大学,2024.
- [5] 党晓雪.非标自动化设备的模块化设计[J].中国机械,2024,(27):25-28.

Comprehensive Benefit Evaluation and Analysis of Phosphogypsum Building Products

Qiong Tang

Qujing Normal University, Qujing, Yunnan, 655011, China

Abstract

Phosphogypsum, as a by-product of the phosphate fertilizer industry, has always been a pollution problem that troubles the industry. This article comprehensively analyzes the benefits of phosphogypsum building materials from various aspects in order to effectively utilize phosphogypsum. This article uses qualitative and quantitative analysis methods, combined with expert and questionnaire surveys, to study the maturity, economy, environmental friendliness, social evaluation and other performance aspects of phosphogypsum building materials. Through data analysis, the results are obtained.

Keywords

phosphogypsum; Building products; Comprehensive benefits; Resource utilization; Sustainable development

磷石膏建筑制品综合效益评估分析

唐琼

曲靖师范学院, 中国·云南 曲靖 655011

摘要

磷石膏作为磷肥工业副产物,一直是困扰行业的污染问题,本文为有效利用磷石膏,对磷石膏建材从各个方面综合分析了它的效益。本文采用定性与定量的分析方法,结合专家和问卷调查等方法,研究了磷石膏建材的成熟度、经济性、环保性、社会评价等方面性能,通过数据分析得到:磷石膏建材符合作为建筑产品使用的相关标准,能够达到节能减排与绿色工艺的要求,但在造价、普及率、评价等方面仍有待提升。针对上述问题,提出在生产技术、标准规范、政策支持等角度进行创新,推进磷石膏建材的快速发展,为绿色建筑开辟新渠道。

关键词

磷石膏; 建筑制品; 综合效益; 资源化利用; 可持续发展

1 引言

磷石膏作为磷肥行业或磷化工行业排出的固体废物,大量堆积占用资源,易造成环境影响,如何有效处理磷石膏,一直是科研人员和行业工作者研究的方向之一。随着国家倡导绿色发展、循环经济,对磷石膏资源的处理越发得到重视。对于磷石膏建筑建材的应用,可以有效解决磷石膏固废堆放问题,能够作为建筑材料应用,有利于双碳目标的实现。但对于使用磷石膏建筑建材仍限于技术、成本、政策等,对磷石膏多效益综合评价仍存在较大意义。对磷石膏建筑建材进

行多效益综合评价具有重要意义,经济效益方面,磷石膏成本低、市场需求量大,有利于建材行业的发展;环境效益方面,磷石膏建筑建材的大量应用,可以减少对磷石膏固废处理带来的危害,对环境有积极作用,有利于减少碳排放,减少高能耗建筑材料的使用;社会效益方面,磷石膏建筑建材的应用,可以提供就业岗位,促进建材行业的发展,符合我国的循环经济理念。本研究通过构建科学合理的评价指标体系有利于磷石膏建材生产的发展,为建筑行业绿色发展和废弃物治理提供政策支撑。

近几年对于磷石膏资源化利用的研究我国研究较多,主要研究的是预处理、建材制品、资源化利用。国内已有研究证明磷石膏资源化的技术取得突破性成果,在建材领域有着丰富的实践研究经验,学者对磷石膏净化、改良、强化等关键技术进行了研究开发,部分研究成果已应用到实际生产中^[1]。但是目前磷石膏建材仍存在着抗渗性能差,耐久性低,推广不广等突出问题;对于政府的政策扶持依赖性过高,缺乏良好的市场化运营环境,企业参与的积极性不高,在今后

【课题项目】云南省教育厅科学研究基金项目:编号:2024J0931,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。

【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。

研究过程中应注意材料性能、体系研究、推广应用等几方面的问题，进一步推动磷石膏资源化利用技术。

国外研究热点主要集中在磷石膏的处理、磷石膏高值化利用、磷石膏在建筑工程领域的应用，李纯等人认为国外发达国家磷石膏经济模式比较成熟，磷石膏在路用材料、土壤改良剂等领域的应用已经成功；高育欣等利用磷石膏添加剂，提高了砂浆的抗水性能，丰富了磷石膏的装饰用途。刘榴燕等人运用知识图谱对国内外研究趋势进行了分析后认为，欧美国家的研究考虑环境影响，亚洲国家考虑磷石膏建筑领域的应用研究。王磊等通过对比分析国内外的技术现状，总结了国外石膏板、新型墙材等发展技术成熟的技术。李明等认为西方国家的立法限制和经济激励政策手段相结合，对企业层面的行为资源化促进有积极影响。周武等通过总结国外经验，得出了我国在标准建设、关键技术研发、市场培育等方面应该从其经验借鉴，以加强磷石膏建材的技术能力。

国际上发达国家磷石膏应用领域已较为成熟，并制定了较成熟的磷石膏应用规范。国外发达国家在磷石膏的应用方面已经将磷石膏应用于道路填料、土壤改良等方面，并制定了相对成熟的制度政策以及监管制度。同时，磷石膏产业已经实现市场化程度高，产品标准相对成熟，技术相对成熟，同时产品的耐久性、环保性能等也相对成熟。国际上对于磷石膏的应用在建材开发新产品等方面研究较少，研究主要集中在环境影响以及政策监管等方面。

2 综合效益评价体系构建

进行了针对磷石膏建筑业的产品综合效益的问卷调查，

调查内容主要为使用磷石膏建筑产品情况及对经济和环境方面影响等情况，有效问卷61份，调查对象为来自建筑行业、环保行业专家、政策制定者、研究人员等相关人群针对建筑产品使用情况、产品成本对比、市场推广困难、环境影响等方面进行信息收集，通过以上数据来了解磷石膏建筑产品使用情况及未来发展趋势，为制定相关政策和行业的发展提供参考。通过调研了解都爱，目前磷石膏建筑制品的应用逐渐增多，但在标准化生产、环保达标、市场竞争等方面仍存在一些问題。社会对磷石膏制品的认知和接受度有待提高，同时，相关的政策支持和市场宣传力度不足^[2]。

为了对磷石膏建筑制品综合效益进行科学的计量，依据社会问卷调查的结果构建了以技术效益（J）、经济效益（E）、环境效益（En）、社会效益（S）等4个一级指标和十二个二级指标的综合评价指标体系。采用专家咨询法进行指标权重值的确定。通过专家问卷得出成对比较矩阵，一致性检验后得出权重如表1。

3 专家打分法分析

专家打分表设计：邀请5-10位专家（涵盖建材、环保、经济等领域），按1-5分对各项指标评分（1=差，5=优），并赋予权重。

综合得分计算：单项得分：各指标取专家打分的平均值。

加权总分：综合得分 = $\sum$ （单项得分 × 权重）。

加权分析表（见表1）：计算了每项指标的平均分、权重及加权得分，最后汇总了每位专家的加权总分。

表 1 指标权重及加权分析表

一级指标	权重	二级指标	权重	单项得分	加权平均分
技术效益 J	0.30	设备兼容性	0.090	3.375	0.30375
		工艺成熟度	0.105	4	0.42
		产品性能达标率	0.105	4	0.42
经济效益 E	0.40	生产成本	0.160	3.5	0.56
		市场售价竞争力	0.120	3.375	0.405
		投资回报周期	0.120	3.5	0.42
环境效益 En	0.20	磷石膏利用率	0.070	3.875	0.27125
		碳排放减少量	0.060	3.5	0.21
		生产能耗	0.070	3.5	0.245
社会效益 S	0.10	政策支持度	0.035	3.75	0.13125
		就业带动效应	0.045	3.375	0.151875
		公众接受度	0.020	2.875	0.0575

表 2 专家加权得分汇总表

	专家一	专家二	专家三	专家四	专家五	专家六	专家七	专家八
加权分	3.58	3.6	2.955	3.89	3.45	4.1	3	4.19

3.1 关键发现

总分排名：专家八（4.19分）表现最优，其次是专家六（4.1分）；专家三（2.955分）表现最差。

高分指标：工艺成熟度和产品性能达标率：均分4分（满分5），权重均为10.5%，对总分贡献显著（各0.42分）。

磷石膏利用率：均分3.875分，权重7%，贡献0.271分。

低分指标：公众接受度：均分 2.875 分（最低），权重仅 2%，影响较小（0.0575 分）。

就业带动效应：均分 3.375 分，但专家五评分仅 1 分，拉低整体表现。

争议指标：投资回报周期：专家七评分 1 分（极低），专家八评分 5 分（极高），差异显著。

碳排放减少量：专家二评分 1 分，专家五至八评分 4-5 分，显示专家意见分化。

3.2 权重影响

高权重指标（>10%）：生产成本（16%）、市场售价竞争力（12%）、投资回报周期（12%）、工艺成熟度（10.5%）、产品性能达标率（10.5%）。这些指标对总分影响最大，需优先优化。

低权重指标（<5%）：政策支持度（3.5%）、就业带动效应（4.5%）、公众接受度（2%）影响较小。

3.3 专家表现

专家八：总分最高（4.19 分），在投资回报周期、磷石膏利用率等指标上评分积极。

专家三：总分最低（2.955 分），对多项指标（如就业带动效应、公众接受度）评分保守。

专家七：总分较低（3 分），尤其在投资回报周期上评分极低（1 分），显著拉低其总分。

根据专家打分分析结果，有以下建议：改进高权重低分项：市场售价（均分 3.375 分，权重 12%），改进空间较大。关注分歧指标：如投资回报周期，需进一步分析差异原因。弱项改进：公众接受度（均分最低）可通过宣传或产品优化提升。专家协同：综合高分专家与低分专家的意见，平衡评估偏差。

项目总加权均值为 3.596 分，属于中等水平。长处：工艺成熟，产品性能稳定，成本控制较好，但需进一步提高产品性价比，增强市场竞争力，提高群众认知度。专家意见不一致提示应加强评价要求或沟通交流。

4 促进磷石膏建筑制品发展的对策建议

4.1 政策支持与产业发展

要达到发展磷石膏建筑制品的目标，需要政府实施鼓励政策，降低企业的生产和研发成本，如政府可以通过补贴、税收优惠等政策，加大对于磷石膏再利用系统建设，做到产业化。鼓励和提倡绿色化生产，加大监督与保护力度，提倡和发展节能、低碳型建筑材料，政府应建立绿色建筑认证标准和绿色建筑标准，以提高磷石膏建筑制品的质量和竞争力^[3]。

4.2 技术创新与研发投入

为确保磷石膏建筑制品的发展，企业要提升技术创新

开发。尤其是提升磷石膏材料性能水平，开发出新的磷石膏建筑材料，提升其抗压性、抗湿性、耐寒性、耐火性及性能，使其能够在建筑领域中推广应用。开发出智能化生产技术，提升生产力度，减少成本投入力度。要积极与科研院校、专家等进行沟通，使科研与生产相结合，使磷石膏建筑材料技术创新优化。

4.3 市场推广与应用扩展

为了推广磷石膏建筑制品，企业应该进行宣传和扩大市场的应用。利用论坛、展览和行业技术大会，提高磷石膏制品的知名度和美誉度。积极推广绿色建筑项目，推进磷石膏制品在高层建筑、工业厂房、房屋等领域的广泛应用。根据不同需求推出个性化产品，满足不同项目的环境保护要求。通过推广政策和行业标准的制定，提高磷石膏建筑制品的市场份额，促进磷石膏制品在世界各地的应用。

4.4 标准化建设与质量控制

为保证磷石膏建筑制品质量与行业竞争力，需要磷石膏行业加强标准化与质量控制，推动行业和国家建立健全与磷石膏建筑制品相关的标准，实现不同地区磷石膏建筑产品的质量一致性和跟踪性，企业需建立严格的质量体系，从原料采购、生产、运输、销售等环节进行把控，保证产品的质量稳定性。鼓励和支持企业使用先进的技术、生产设备自动化，提升生产效率和质量。加强标准化与质量控制，提升磷石膏建筑制品的竞争力，促进其得到更广泛的应用。

5 结语

本研究基于磷石膏建材综合利用效益的磷石膏建筑产品技术效益、经济效益、环境效益和社会效益进行研究。首先通过采集社会问卷调查数据（61 份有效数据）和专家问卷调查数据（8 份有效数据）构建磷石膏建筑制品综合效益评价体系，然后采用专家打分法让七位专家进行打分，最后通过定性与定量的分析结果提出发展磷石膏建筑制品的对策建议，主要是政策扶持、技术研究、市场营销和标准制定。总之，磷石膏建筑制品作为绿色建筑节能减排的可行建筑制品，在今后应注重技术研究和市场营销，为推动实现大规模资源化利用做出贡献。

参考文献

- [1] 宋博辉,黄政华,王家辉.新型无梁楼盖磷石膏复合空腔层模盒保温隔热性能试验研究[J].贵州大学学报(自然科学版),2021,38(03):110-116.
- [2] 李纯,薛鹏丽,张文静等.我国磷石膏处置现状及绿色发展对策[J].化工环保,2021,41(01):102-106.
- [3] 高育欣,麻鹏飞,康升荣等.改性磷石膏抹灰砂浆性能研究[J].金属矿山,2022(01):14-20.

Fault Diagnosis and Reliability Analysis of Hydraulic Transmission System of Agricultural Machinery

Jun Li

Inner Mongolia Hulunbuir Nongken Jite Nihe Farm Co., Ltd., Hulunbuir, Inner Mongolia, 021024, China

Abstract

As the core component of agricultural machinery power systems, hydraulic transmission systems play a pivotal role in operational efficiency and safety. With the advancement of agricultural machinery toward higher efficiency and intelligentization, hydraulic systems have become increasingly complex, resulting in a significant rise in failure frequency. This study analyzes key parameters including pressure, flow rate, temperature, and vibration based on hydraulic system mechanisms, proposing a fault diagnosis model that integrates data fusion and intelligent algorithms to enable real-time monitoring and early warning of system conditions. By incorporating reliability engineering principles, a life prediction and risk assessment model is developed to provide quantitative support for maintenance and decision-making. The research demonstrates that this approach enhances fault identification accuracy and prediction reliability, improving overall system reliability by approximately 25%, thereby offering technical support for stable operation and extended service life of agricultural machinery hydraulic systems.

Keywords

agricultural machinery; hydraulic transmission system; fault diagnosis; reliability analysis; intelligent monitoring

农业机械液压传动系统的故障诊断与可靠性分析

李军

内蒙古呼伦贝尔农垦集特泥河农牧场有限公司, 中国·内蒙古 呼伦贝尔 021024

摘要

液压传动系统是农业机械动力系统的核心,其性能关系到设备的作业效率与运行安全。随着农业机械向高效化、智能化发展,液压系统结构愈加复杂,故障频率显著上升。本文基于液压系统工作机理,分析压力、流量、温度与振动等多参数特征,提出基于数据融合与智能算法的故障诊断模型,实现了系统状态的实时监测与早期预警。结合可靠性工程理论,构建寿命预测与风险评估模型,为维护与决策提供量化依据。研究表明,该方法可提升故障识别精度与预测可靠性,系统综合可靠性提高约25%,为农业机械液压系统的稳定运行与寿命延长提供了技术支撑。

关键词

农业机械; 液压传动系统; 故障诊断; 可靠性分析; 智能监测

1 引言

液压传动系统以其传动平稳、功率密度高、控制灵活等特点,在拖拉机、联合收割机、播种机及田间运输设备等农业机械中得到广泛应用。然而,液压系统长期在高压、高温和复杂负载条件下工作,系统元件(如液压泵、阀、执行缸、油管等)易出现泄漏、卡滞、磨损、污染等问题,导致能量损失与作业中断。传统的人工检测与经验判断方式难以应对复杂工况下的动态变化,造成维护滞后、检修成本上升和设备寿命缩短。近年来,随着传感器技术、信号处理技术及人工智能算法的快速发展,液压系统的故障诊断逐渐向数字化与智能化方向转变。通过对液压系统的运行数据进行实

时采集与特征分析,可实现早期故障识别与可靠性预测,减少突发性停机风险。本文基于液压系统的结构与运行特性,分析其故障机理与特征信号,提出融合信号处理与智能算法的故障诊断策略,并从可靠性工程角度探讨系统寿命预测与风险评估方法,旨在为农业机械液压系统的优化设计与运维管理提供理论支撑与实践参考。

2 液压传动系统的结构与运行特性分析

2.1 系统组成与功能特征

农业机械液压传动系统是实现动力高效传递与精确控制的关键装置,其核心部件包括动力源、控制元件、执行元件及辅助装置。液压泵将机械能转换为液压能,控制阀负责调节流向、流量及压力,执行元件则完成推拉、旋转或举升等作业动作。辅助装置如油箱、冷却器、滤油器等用于维持系统稳定与清洁。液压油在密闭管路中循环流动,实现能量

【作者简介】李军(1978-),男,本科,工程师,从事农业机械设计制造及其自动化研究。

的传递与再分配,使机械具备较高的功率密度与灵活性。在复杂田间工况下,液压系统需同时具备快速响应与精确控制能力,以适应负载突变与多任务协同。由于系统存在非线性与多参数耦合特性,液压系统在高压高温状态下易出现压力冲击、能量损耗及振动干扰等问题,这对系统设计与运行维护提出了更高要求。

2.2 液压系统的动态响应特征

液压系统的动态响应性能决定了农业机械的工作平稳性与控制精度,其受液压泵排量、油液弹性、阀口阻尼及负载惯性等因素综合影响。在工作过程中,液压信号呈现明显的非线性动态特征,特别是在快速换向、重载启停与压力突变条件下,系统压力与流量会出现高频振荡。研究表明,液压油的黏度随温度升高而降低,当系统温度超过 60℃ 时,内部泄漏量显著上升,导致传动效率下降与压力调节迟滞。通过建立动态响应方程与流固耦合模型,可揭示液压系统在突加载荷作用下的瞬态变化规律。系统的非线性振荡特性不仅影响稳定性,也可作为故障早期识别的敏感信号,为故障诊断与控制优化提供依据。

2.3 影响系统性能的主要因素

液压系统的稳定性与可靠性受多种因素耦合影响,尤其是污染、磨损与振动问题的叠加效应。液压油污染是系统性能衰退的主要诱因,固体颗粒会堵塞节流口或磨损阀芯,造成执行元件动作迟缓或卡滞。密封件老化及油膜破裂将引起泄漏与能耗增加,严重时会导致系统压力无法维持稳定。长期振动会引发连接松动、管路共振及阀组疲劳失效,从而加速元件损坏。实验分析表明,液压油污染度与元件寿命呈负相关关系,污染等级每提高一个级别,元件寿命约缩短 15%—20%。因此,液压系统的可靠运行需综合考虑液压油质量、机械磨损与结构振动之间的耦合特性,通过精密过滤、温控与动态监测技术实现性能稳定与寿命延长。

3 液压传动系统的常见故障机理分析

3.1 压力异常与溢流故障机理

压力异常是农业机械液压系统运行中最典型的故障表现之一,其根源多来自系统内部泄漏、液压阀卡滞或回路堵塞等问题。当系统管路或密封件损坏时,液压油流动阻力增大,导致压力信号产生剧烈波动。若溢流阀阀芯卡滞或弹簧疲劳,则会造成压力调节失灵,使系统出现周期性的过压与欠压现象。通过高频压力传感器监测可发现,异常压力峰值通常呈现出间歇性、周期性分布特征,与阀控元件的动态响应密切相关。研究表明,在压力波动频率超过系统固有频率时,极易诱发液压冲击,导致执行元件运动不稳定及能量损失。通过对压力信号的实时分析与频谱特征识别,可实现溢流阀早期磨损与性能退化的有效诊断,为系统的安全运行提供预警依据。

3.2 流量不稳与管路泄漏故障机理

流量异常通常由液压泵内部磨损、密封件老化及气蚀

现象引起,是影响液压系统性能稳定的关键因素之一。当油液中掺入空气时,气泡在高压下被压缩并在低压区爆裂,形成强烈冲击与高频噪声,导致流量波动加剧。气蚀不仅破坏液压油的连续性,还会侵蚀泵体表面,产生二次污染。流量传感器监测数据显示,当流量曲线出现无规律的脉动且与负载变化无明显关联时,通常意味着管路存在隐性泄漏或局部堵塞。长时间运行下,接头松动、密封圈疲劳老化等因素将进一步加剧能量损耗与系统压力不稳。通过对流量信号的时间序列分析与趋势建模,可有效识别潜在泄漏点,实现早期诊断与预防性维修,提升液压系统运行可靠性。

3.3 温度升高与油液劣化效应

液压系统温度异常上升是反映系统能量损耗与油液状态劣化的重要指标。油液在高剪切速率下产生黏度下降与摩擦升温现象,当温度持续高于 60℃ 时,黏度下降导致泄漏量增加,系统压力维持困难。高温还会加速液压油的氧化分解,生成酸性产物与沉积物,堵塞阀口并降低系统响应灵敏度。通过温度传感器监测可发现,温度曲线的异常拐点常与冷却系统堵塞或油液污染相关。长期高温运行还会导致密封材料硬化与老化,进一步引发泄漏与能效下降。研究表明,温度突变信号的检测对识别冷却系统故障与摩擦磨损具有较高敏感性。建立温度与能量损耗的动态关联模型,可为液压系统的健康监测与油液更换策略提供科学依据。

4 液压系统故障诊断方法研究

4.1 基于信号分析的特征提取

信号分析是液压传动系统故障诊断的基础环节,其核心在于通过多源信号的采集与特征提取揭示系统运行状态的内在变化规律。液压系统的关键监测信号包括压力、流量、温度与振动等,这些参数与机械磨损、泄漏、气蚀等故障状态高度相关。通过小波包分解可有效识别非平稳信号的局部特征,谱分析可揭示频率分量与周期性规律,而希尔伯特-黄变换(HHT)则能准确反映瞬时能量分布与信号突变点。研究表明,压力信号的峰度与偏度变化能用于阀口卡滞的早期识别,振动信号的包络谱分析则可检测液压泵轴承的微弱损伤。通过多维特征提取与模式识别,可将复杂的动态信号转化为可量化的健康指标,为后续故障分类与趋势预测提供精确数据基础。

4.2 基于数据融合的多参数诊断模型

液压系统运行环境复杂,多因素耦合显著,单一信号难以全面反映故障特征。多源数据融合技术可整合不同传感器采集的异质信息,构建多维故障识别模型。通过卡尔曼滤波对噪声信号进行动态平滑处理,利用主成分分析(PCA)实现特征降维与相关性筛选,可显著提高模型的鲁棒性与泛化能力。进一步结合 BP 神经网络或支持向量机(SVM)等机器学习算法,可建立非线性映射模型,实现对压力异常、泄漏故障与磨损状态的多分类识别。以拖拉机液压提升系统为例,采用该方法对采样数据进行特征融合与分类分析,

故障识别准确率由原有的 83% 提升至 94%，预测误差降低约 30%。这表明多参数融合不仅提高了诊断精度，也增强了系统在复杂工况下的自适应能力，为智能化运维提供技术支撑。

4.3 基于智能算法的预测性诊断

随着人工智能技术的发展，液压系统故障诊断逐渐由传统的“事后识别”向“预测预警”转变。基于深度学习的模型（如卷积神经网络 CNN 与长短期记忆网络 LSTM）能够从历史运行数据中自动提取特征，实现时间序列下的故障趋势预测。通过训练模型识别系统信号的异常波动模式，可提前判断液压泵磨损、阀门卡滞或密封老化的可能性。强化学习算法在此基础上可实现系统的自适应控制，使液压系统在出现潜在异常前主动调整工作参数，降低风险与能耗。研究应用表明，基于 LSTM 的预测模型可提前 30 小时预警泵体泄漏趋势，准确率超过 92%。智能算法的引入使液压系统诊断从静态判断迈向动态决策，构建起“监测—预测—控制—优化”的闭环结构，实现了设备维护由被动修复向主动防护的转型。

5 液压系统的可靠性分析与寿命预测

5.1 基于统计模型的可靠性评价

液压传动系统的可靠性分析可通过统计模型进行定量评估，其中 Weibull 分布与对数正态分布是最常用的寿命分析方法。Weibull 分布能够灵活描述液压元件的失效规律，其形状参数反映失效率变化趋势，而尺度参数决定系统的寿命水平。通过寿命试验与运行数据统计，可拟合系统可靠度函数，从而计算设备在特定时间内无故障运行的概率。液压系统的失效率曲线通常呈“浴盆型”特征，包含早期失效期、稳定期与磨损期三个阶段。对失效率进行动态估计，可识别关键元件的退化拐点，为维护计划与备件更换提供科学依据。结合蒙特卡洛模拟方法，可进一步量化系统可靠性分布区间，提升可靠性评估的准确性与决策的稳健性。

5.2 基于退化信息的寿命预测方法

液压元件的退化特征具有连续性与可监测性，可通过压力损失、流量波动、温升与振动幅值等参数进行寿命预测。退化过程可采用随机过程模型（如 Gamma 过程或布朗运动模型）进行描述，而贝叶斯更新算法则能基于实时监测数据动态修正模型参数，实现剩余寿命（RUL）的自适应预测。通过融合传感器数据与历史故障样本，可构建健康指数

（HI），用于定量反映系统健康状态。研究显示，利用退化信息的寿命预测模型可在液压泵磨损前 20 小时发出预警信号，显著提升预防性维护的时效性。该方法不仅实现了从“被动检修”到“主动预警”的转变，还为复杂工况下的液压系统提供了可靠的寿命管理依据。

5.3 可靠性优化与维护策略

液压系统的可靠性优化是一项系统工程，需在设计、运行与维护多维度协同推进。设计阶段应通过元件冗余配置、管路布局优化与容错设计提高系统结构可靠度；运行阶段应结合状态监测实施状态维修（CBM）与预测性维护（PdM），在异常信号出现前进行针对性检修，降低突发停机风险。维护策略的优化可通过多目标优化算法综合平衡维修成本与可靠性提升效果。基于大数据与云平台的智能运维系统可实现故障数据的集中存储与分析，形成“监测—诊断—预测—优化”闭环。通过该系统，企业可实时掌握设备健康状况，动态调整维护计划，最终实现农业机械液压系统从经验维护向数据驱动的智能维护转型，为智能农机装备的安全、高效运行提供持续支撑。

6 结语

农业机械液压传动系统的可靠运行是保障农业生产效率与安全的关键。本文基于系统机理与信号特征，分析了液压系统的主要故障类型与成因，提出了融合多源信号与智能算法的故障诊断与可靠性分析方法。研究表明，基于 CFD 模拟、数据融合与深度学习的智能诊断模型可实现系统早期故障识别与寿命预测，有效提升系统的运行可靠性与维护效率。未来应进一步构建云端监测与远程诊断平台，实现液压系统状态的实时监控与自适应优化，为农业机械智能化与数字化管理提供技术支撑。

参考文献

- [1] 代瑞鹏,刘贺明,周加绪.机械液压传动系统故障及诊断处理技术分析[J].中国设备工程,2025,(10):159-161.
- [2] 杨磊.基于信号分析的机械液压传动系统故障诊断方法[J].工程机械文摘,2023,(02):10-13.
- [3] 杨森,安向东.基于VB的农业机械液压系统故障诊断专家系统开发[J].中原工学院学报,2015,26(03):24-28.
- [4] 闫兴瑞.PLC控制技术在农业机械电气控制系统中的应用效果和可靠性分析[J].南方农机,2024,55(04):49-51+59.
- [5] 姜天根.农业机械设计中的可靠性分析与故障诊断技术研究[J].南方农机,2024,55(08):87-89.

Optimization Design of High Speed Precision Bearing Structure and Study on Friction and Wear Performance

Guangfu Wu

Wafangdian Bearing Group Co., Ltd., Wafangdian, Liaoning, 116300, China

Abstract

As the core component of high-end equipment, the friction and wear performance of high-speed precision bearings directly determines the operating accuracy and service life of the equipment. In response to the technical challenges of high friction loss and prominent wear failure of bearings under high-speed operating conditions, this study integrates friction and wear mechanisms with optimization design methods, focusing on structural improvement and performance experimental research of rolling elements, retainers, and groove shapes. By systematically analyzing the coupling relationship between structural parameters and friction and wear, an optimal design model is established. Through numerical simulation and experimental verification, the effectiveness of the optimization scheme in reducing friction coefficient and minimizing wear is elucidated. The research results provide theoretical support and technical reference for improving the service performance of high-speed precision bearings under extreme working conditions, and have important engineering value for promoting the development of high-end equipment manufacturing industry.

Keywords

high-speed precision bearings; Structural optimization; friction and wear

高速精密轴承结构优化设计与摩擦磨损性能研究

武广富

瓦房店轴承集团有限责任公司, 中国·辽宁 瓦房店 116300

摘要

高速精密轴承作为高端装备的核心零部件,其摩擦磨损性能直接决定设备运行精度与使用寿命。针对高转速工况下轴承摩擦损失大、磨损失效突出的技术难题,本研究融合摩擦磨损机理与优化设计方法,聚焦滚动体、保持架及沟道槽形开展结构改善与性能实验研究。通过系统分析结构参数与摩擦磨损的耦合关系,建立最优设计模型,经数值模拟与实验验证,阐明优化方案在降低摩擦系数、减小磨损量方面的作用效果。研究成果为提升高速精密轴承在极端工况下的服役性能提供理论支撑与技术参考,对推动高端装备制造业发展具有重要工程价值。

关键词

高速精密轴承; 结构优化; 摩擦磨损

1 引言

随着现代制造技术的持续升级,航空航天、精密机床等高端装备对核心零部件的性能要求日益严苛,高速精密轴承的性能瓶颈逐渐凸显。在高转速运行条件下,轴承内部接触应力集中与摩擦生热现象尤为显著,极易诱发摩擦破坏,导致设备加工质量下降、运行效率降低,甚至引发停机故障。因此,通过结构优化提升轴承抗摩擦磨损能力,成为突破其使用瓶颈的关键课题。已有研究虽兼顾了轴承结构设计与磨损特性分析,但对结构参量与摩擦磨损之间的耦合机制仍缺乏深入探究。基于此,本研究以摩擦磨损机理为理论基础,

通过系统性分析轴承内部结构缺陷,制定针对性优化方案,采用数值模拟与实验相结合的手段验证效能提升效果,为解决高速精密轴承服役难题开辟可行路径^[1]。

2 高速精密轴承结构设计与摩擦磨损理论基础

2.1 高速精密轴承结构组成与工作特性

高速精密轴承的典型类型包括角接触球轴承、圆柱滚子轴承等,核心组成部件涵盖内圈、外圈、滚动体、保持架及密封件。其中,滚动体的数目与尺度直接影响接触负荷分配,沟道曲率半径决定接触区域尺寸,保持架的构型则与系统运动稳定性密切相关。在高转速工况下,轴承将承受离心力与回转扭矩的协同作用,导致内部接触应力分布不均,同时伴随滚动体与沟道之间的相对滑移,进而产生附加摩擦损失。

【作者简介】武广富(1983-),男,中国黑龙江尚志人,硕士,高级工程师,从事轴承制造、轴承设计、盾构机、机床轴承研究。

2.2 摩擦磨损相关理论

本研究以赫兹接触理论为核心,揭示了弹性体接触力学特性与载荷、材料特征的内在关联,为滚动轴承表面疲劳损伤评估提供理论依据。弹性流体动压润滑理论研究表明,高转速条件下,润滑油膜的厚度与强度是决定摩擦形式的关键因素:油膜完整时呈现流体润滑状态,油膜破裂则转为边界润滑,进而加剧磨损现象。轴承的主要磨损形式包括粘着磨损、磨粒磨损与疲劳磨损,其产生机理与接触状态、工况参数密切相关。研究过程中重点关注摩擦系数、磨损量、表面粗糙度等关键指标,这些参数的演变规律可直接反映轴承服役状态,为优化设计方案的有效性评定奠定基础。这些理论并非孤立存在,而是能够相互支撑,最终形成完整、完善的联动逻辑框架,接触力学特性决定润滑油膜形成条件,润滑状态又直接主导磨损形式的演变。关键指标的动态变化不仅能量化轴承服役损耗程度,还能反向推导结构参数与摩擦磨损的适配性,为后续针对性优化提供精准理论参考^[2]。

2.3 结构优化设计理论与方法

高速精密轴承结构优化以降低摩擦系数、减小磨损量为核心目标,同时需满足强度、刚度及空间限制等约束条件。常用优化算法包括响应面法、遗传算法与粒子群优化算法,其中响应面法可建立结构参数与性能指标的近似模型,简化优化计算过程;遗传算法与粒子群优化算法适用于复杂多维问题求解,能高效搜索最优参数组合。数值模拟技术为结构优化提供有力支撑,通过有限元分析可精准模拟轴承力学特性,多体动力学仿真能还原运动状态,润滑仿真可预测油膜性能。这些理论与方法的融合应用,实现了轴承结构优化从经验设计向科学设计的转变,为提升优化方案的可靠性提供保障。

3 高速精密轴承结构优化设计

3.1 现有轴承结构问题分析

针对现有高速精密轴承的受力特征与潜在摩擦磨损隐患,采用三维建模与数值模拟相结合的方法开展系统分析。结果表明,高速工况下该结构存在显著应力集中现象,滚动体与沟道接触区域的最大应力超过最优临界值,极易诱发表面材料疲劳。动力学模拟显示,传统保持架因结构刚度不足,在高速运行时会产生较大摆幅,导致滚动体运动路径偏移,进而增大滑动摩擦比例。摩擦特性分析发现,原始沟道曲率半径比设计不合理,造成接触面积过大,摩擦生热加剧;同时润滑通道布局不完善,导致润滑油供给不均,局部区域存在润滑失效隐患。基于模拟计算的隐患等级排序,确定滚动体几何参数、保持架结构刚度及沟道型面形状为核心优化靶点。

3.2 结构优化方案设计

以核心优化靶点为导向,构建多维度结构优化体系。滚动体优化采用“材质改善+结构调整”的思路,选用高

强度陶瓷基复合材料替代传统钢材,降低自身惯性力,同时将球形滚动体改为微鼓形结构,减小边缘接触应力。保持架优化聚焦构型与引导方式,通过拓扑优化剔除冗余材料,采用中空格栅结构提升刚度与轻量化水平,将外圈引导改为内圈引导,增强运动稳定性。沟道轮廓优化基于弹性流体动压润滑机理,将曲率半径比调整至最优范围,同时采用圆弧修形设计,消除表面应力集中。辅助结构方面,通过优化密封结构减少润滑泄漏,重新设计润滑通道使油液直达接触区域,形成稳定润滑油膜,各优化环节相互协同,确保综合性能提升^[3]。

3.3 优化设计仿真分析

基于优化方案建立精细化数值模拟模型,几何建模阶段采用参数化设计保证尺寸精度,网格划分时对接触区域进行加密处理,提升计算准确性;边界条件设定贴合真实高速运行环境,分别施加不同梯度的载荷与转速。力学性能仿真结果显示,优化后轴承接触应力峰值降低23%,应力分布更均匀,结构刚度提升18%,振动幅值减小35%,力学性能显著改善。摩擦特性仿真表明,微鼓形滚动体与优化沟道的合理匹配,静摩擦系数稳定在0.008-0.012区间,较原始结构下降约40%;同时摩擦生热速率降低,热量传导路径优化,使轴承最高温度下降15℃。通过多组方案仿真对比,最终筛选出兼顾力学性能与摩擦磨损性能的最优结构参数组合。仿真不仅量化了各结构参数对性能的影响权重,还为后续实验方案的细化提供了精准数据支撑,明确了关键测试指标的监测重点。

4 高速精密轴承摩擦磨损性能试验研究

4.1 实验方案设计

实验样本制备严格遵循设计参数,分别加工优化前后轴承试件各3组,经材料性能检测显示,优化后滚动体材料硬度提升20%,弹性模量提高15%。实验设备选用高速摩擦磨损试验机,配套精度为0.01 μm 的表面轮廓仪、扫描电子显微镜(SEM)及温度传感器,实现多参数同步监测。实验参数设定模拟真实工作工况,转速范围为5000-20000r/min,载荷分为100N、200N、300N三个梯度,采用聚 α -烯烃合成润滑油作为润滑介质,每组实验时长均为2小时。数据采集方案明确每10分钟记录一次摩擦系数与温度数据,实验结束后采用重量法与轮廓仪法双重测量磨损量,通过SEM观察磨损表面微观形貌,确保测试数据的全面性与可靠性。

4.2 摩擦磨损性能测试

高速工况下摩擦系数动态监测结果显示,优化前轴承摩擦系数随转速升高呈明显上升趋势,在20000r/min时达到0.021;而优化后轴承摩擦系数始终稳定在0.01以内,波动幅度减少60%。磨损量测试表明,优化后轴承的重量磨损量平均为0.003g,较原始结构的0.008g下降62.5%,轮

廓仪测量显示磨损深度从 $8\mu\text{m}$ 降至 $2.5\mu\text{m}$ 。SEM 微观分析显示,原始轴承表面出现明显粘着磨损痕迹与磨粒划痕,且存在较大面积材料剥落;而优化后轴承表面仅存在轻微磨痕,材料剥落现象显著减少。精度保持性测试中,优化后轴承在 20000r/min 转速下运行 2 小时后,旋转精度误差为 0.002mm ,较原始结构的 0.006mm 提升 66.7%,振动幅值始终控制在 0.01mm 以内,运行稳定性大幅提升。

4.3 影响因素分析

结构参数对摩擦磨损性能的影响规律显著:滚动体微鼓度在 $0.01\text{—}0.03\text{mm}$ 范围内时,磨损量随微鼓度增大呈先降后升趋势,最优微鼓度为 0.02mm ;保持架镂空率超过 40% 后,结构刚度下降导致磨损量增加,因此确定 35% 为最优镂空率。工况参数中,转速对磨损机制影响突出, 15000r/min 以下以磨粒磨损为主,超过该转速后疲劳磨损占比逐渐提升,优化结构通过降低接触应力有效延缓了疲劳磨损的发生。载荷增加使接触面积扩大,磨损量呈线性增长,但优化结构因应力分布均匀,磨损量增长率仅为原始结构的 50%。润滑条件与材料特性存在显著耦合效应,陶瓷滚动体与合成润滑油的匹配性更优,形成的润滑膜稳定性提升 40%,进一步降低了摩擦磨损程度。

5 优化结构的性能验证与改进建议

5.1 优化结构与原始结构性能对比

相同工况下的性能对比结果显示,优化后轴承摩擦系数平均下降 45%,磨损量降低 60% 以上,表面粗糙度 R_a 值从 $0.8\mu\text{m}$ 降至 $0.2\mu\text{m}$,摩擦磨损核心指标得到显著改善。力学性能方面,优化结构的接触刚度提升 18%,抗冲击载荷能力增强 25%,高速运转时的振动响应幅值减少 35%,结构稳定性明显优于原始轴承。动力学特性对比表明,优化后轴承的临界转速提高 20%,在 20000r/min 高速工况下仍能保持稳定运行,而原始轴承在 16000r/min 时已出现明显振动异常。基于磨损速率推算,优化后轴承的理论使用寿命可达 12000 小时,较原始结构的 5000 小时延长 140%,综合性能提升效果显著。

5.2 优化设计的有效性与可靠性分析

仿真结果与实验数据的对比分析显示,摩擦系数、接

触应力等关键性能指标的误差均控制在合理范围内,验证了数值模拟模型的准确性与优化方案的有效性。极端工况测试中,将转速提升、载荷增加,优化后轴承仍能稳定运行 1 小时,磨损量仅为原始结构在常规工况下的 60%,体现出优异的性能稳定性。工程可行性评估从加工难度与成本角度展开,优化方案采用的陶瓷材料与拓扑结构虽使加工成本增加 15%,但结合使用寿命延长带来的综合效益,成本回收期缩短至 8 个月,具备良好的工程应用与推广前景。

5.3 进一步改进方向

现有优化方案尚未充分考虑温度、应力、润滑多场耦合作用,后续可构建多场耦合数值模拟模型,深入研究各物理场相互作用机制,实现更精准的结构优化设计。材料、结构、工艺一体化优化是重要发展趋势,需从材料成分调整、结构参数优化与加工工艺改进三个维度建立协同优化体系,进一步提升轴承综合性能。智能化技术融合具备较大潜力,可在轴承内部集成微型传感器,开发磨损在线监测系统,实现磨损状态实时感知与预警;结合智能润滑系统,根据磨损状态动态调整润滑策略,优化服役效果。此外,数字孪生技术的应用可构建轴承虚拟孪生体,实现全生命周期性能模拟与优化,为设备运维提供数据支撑。

6 结语

综上所述,本研究围绕高速精密轴承结构优化与摩擦磨损性能展开系统研究,聚焦滚动体、保持架及沟道槽形等核心结构,深入分析结构参数与摩擦磨损的耦合机制,提出多维度优化设计方案。通过数值模拟与实验验证相结合的方法,证实优化后轴承在摩擦系数、磨损量及使用寿命等关键指标上均实现大幅提升,为突破高转速工况下轴承的服役瓶颈提供了可行技术路径。研究成果进一步完善了高速精密轴承的结构设计理论,具有重要的学术价值与工程应用意义。

参考文献

- [1] 常振,周振宇,李兴林,陆水根,李雄,李斌,朴钟宇.高速精密机床主轴轴承动态性能演化行为分析[J].兵工学报,1-19.
- [2] 杨婷婷,兰清群.轨道车辆精密轴承压装装置机械结构设计与分析[J].九江学院学报(自然科学版),2023,38(03):32-37.
- [3] 董胤喆,宁仲,李建星,孙小波,席博伦.精密轴承用PEEK保持架结构及注塑工艺优化[J].轴承,2024,(04):36-39+47.

Common Hidden Hazards and Analysis in Forklift Inspection

Yuan Liu

Henan Provincial Special Equipment Inspection and Technology Research Institute, Zhengzhou, Henan, 473000, China

Abstract

Forklifts are indispensable material handling equipment in logistics and industrial production. Their safe operation directly impacts production efficiency and the safety of personnel and property. Forklift inspection serves as a critical measure to detect equipment malfunctions and prevent accidents. This paper systematically analyzes common hazards in mechanical systems, electrical systems, safety protection devices, and operational management during forklift inspections, examines their root causes, and proposes targeted preventive measures through equipment management, personnel training, system development, inspection enhancement, and regulatory promotion. The findings aim to improve forklift inspection quality, reduce accident rates, and promote sustainable safety development in the industry.

Keywords

forklift inspection; common hazards; cause analysis; prevention and control measures

叉车检验中常见隐患及分析

刘源

河南省特种设备检验技术研究院，中国·河南 郑州 450000

摘要

叉车是物流运输、工业生产领域中不可缺少的物料搬运设备，叉车的安全运行直接影响到生产效率的提高与人员财产的安全。叉车检验是发现设备故障、预防安全事故的重要手段。本文对叉车检验中机械系统、电气系统、安全保护装置、操作与管理等各方面的常见隐患类型及表现进行梳理，分析隐患产生的原因，从设备管理、人员培训、体系建设、检验提升、监管宣传等方面提出针对性防控措施，为提高叉车检验质量、降低叉车安全事故的发生率提供参考，促进相关行业安全可持续发展。

关键词

叉车检验；常见隐患；成因分析；防控对策

1 引言

叉车因具有灵活高效物料搬运的特点，在工厂车间、仓库物流、港口码头中得到广泛应用，成为现代生产运营中的核心设备之一。叉车检验作为保证设备安全运行的关键手段，可以尽早察觉设备潜藏的故障与危险，给设备的保养、整改赋予科学的参照。但是目前叉车检验工作由于部分企业对检验工作重视不够等原因，造成各类隐患无法及时发现和消除。因此本文对叉车检验中常见的隐患进行全方位的分析，探究隐患产生的深层次原因，提出切实可行的防控措施，以完善叉车安全管理体系，提高叉车检验的有效性、针对性。

2 叉车检验中常见隐患类型及表现

2.1 机械系统隐患

机械系统是叉车运行的主要支撑，由行驶、转向、制动、

起升等重要部件组成，机械系统的工作状态直接关系到叉车运行是否稳定、安全。行驶系统隐患主要表现为轮胎花纹磨损超标、轮胎表面出现裂纹或鼓包、气压过高或者过低、轮毂变形、轴承松动等问题，长期在崎岖路面作业、超负荷承载、日常维护中并未及时检查轮胎状况，是造成此类隐患的主要原因。转向系统隐患包含转向时有卡顿现象、转向灵敏度不够、转向后难以自动回正、部分叉车存在转向拉杆球头松动、转向器齿轮磨损严重等问题，使驾驶员无法精准控制车辆行驶方向，增加碰撞事故的风险。

2.2 电气系统隐患

电气系统给叉车运行提供动力支持以及控制保障，电气系统故障易引发火灾、触电等安全事故，是叉车检验中不可忽略的重点环节。电源系统隐患主要是蓄电池壳体破裂、漏液，蓄电池极板硫化、电压输出不稳定，充电器充电效率下降、过热保护失效等，蓄电池长期未按规定的补充电解液、充电时间过长或者充电环境通风不好，都会加速电源系统老化损坏。控制系统隐患包含操作手柄触点烧蚀、信号传输延迟，控制器内部电子元件短路、程序错乱，仪表盘指示

【作者简介】刘源（1985—），男，中国河南南阳人，本科，工程师，从事特种设备检验研究。

灯不亮、数据显示异常等,此类隐患大多由电气元件质量较差、长时间使用造成的磨损、作业环境潮湿引发的短路造成。

2.3 安全保护装置隐患

安全保护装置是叉车安全事故发生前最后一道防线,如果失效,则会增加事故发生的概率和危害程度。安全带隐患主要是织带撕裂、卡扣无法锁紧、伸缩机构失灵,长期使用造成的磨损、操作人员使用不当造成的拉扯损坏、日常维护中并未及时检查更换,是安全带隐患的主要原因。限位器隐患有起升高度限位器未触发报警、前倾后仰限位器无法限制极限角度、机械卡滞、电气控制开关损坏、未定期校准调试等,会导致限位器失去保护作用,容易造成货叉过载起升、叉车倾翻等事故。报警器隐患包含倒车报警器音量过小或者完全失灵、过载报警器难以响应超载操作,喇叭损坏、线路接触不良、电源供应异常等,会造成周围人员无法及时察觉叉车的运行状态,增加碰撞风险。

2.4 操作与管理隐患

操作及管理环节的不规范为叉车安全事故的间接诱因,隐患存在于叉车使用过程的全部阶段。操作人员资质隐患表现为无证上岗、证件过期未复审,部分操作人员并未接受系统的专业培训,对叉车的结构原理、操作规范、应急处理流程不熟悉,容易因为操作失误而引发设备故障。日常维护管理隐患是企业并未制定出叉车的维护计划,维护记录不完整或者造假,对发现的小故障、小隐患未及时整改,长期积累造成隐患扩大。检验流程管理隐患指叉车未按周期规定进行定期检验,检验机构资质不足、检验人员责任心不强,造成漏检、误检等情况,部分企业为节约成本,委托无资质机构进行检验,造成检验结果不可靠。

3 叉车检验常见隐患的成因分析

3.1 设备自身因素

叉车制造质量、使用年限为隐患产生的基础因素。部分生产企业为了降低成本,使用劣质的原材料和零部件,生产过程中不严格按照质量检验标准进行检验,造成叉车先天存在结构缺陷,如车架强度不够、液压系统密封性能不好等,这类隐患在使用初期不会显现出来,但长期运行后会逐渐暴露出来。叉车使用年限直接影响设备状态,随着使用时间延长,机械部件会产生自然磨损、金属疲劳,电气元件会发生老化失效,如果不及时更换维修,隐患发生的概率就会大大增加。另外叉车作业环境对设备损耗影响较大,在高温、潮湿、多尘、腐蚀性较强的环境中作业,会加快机械部件的腐蚀、电气系统的短路,缩短设备使用寿命,增大隐患产生的可能性。

3.2 人为操作因素

操作人员行为规范、安全意识为叉车安全运行的重要因素。部分操作人员安全意识淡薄,存在超速行驶、违规载人载物、超载作业、野蛮装卸货物等违规操作行为,这些行

为会使叉车超出设计承载能力及运行极限,造成机械部件损坏、安全装置失效。操作人员未经过系统的专业培训,对叉车的操作流程、安全注意事项不熟悉,容易造成操作失误,如操作手柄操作不当造成起升或下降速度过快、转向过猛等,造成设备故障。另外部分操作人员疲劳驾驶、酒后作业、注意力不集中等问题都会降低对危险情况的预判和应对能力,从而增加事故发生的风险。

3.3 管理体系因素

企业安全管理体系不健全是隐患长期存在的主要因素。部分企业未建立完善的叉车安全管理制度,缺少操作规程、维护保养计划、检验检测标准和隐患排查治理制度,造成各项工作无章可循。安全管理责任落实不到位,企业未对各级管理人员、操作人员的安全职责作出明确的规定,遇到问题的时候相互推卸责任,无法及时有效地排除隐患。企业对叉车安全投入不足,不愿意花钱进行设备维护、人员培训、检验检测、安全设施更新等,造成设备老化问题无法解决,操作人员技能水平无法提高。另外部分企业存在重生产、轻安全的思想,对叉车安全隐患的危害性认识不足,忽视日常安全检查,对发现的隐患抱有侥幸心理,不及时整改,最终导致隐患扩大。

3.4 检验检测因素

检验检测工作质量好坏直接关系到隐患的发现和消除效果。部分检验机构资质不全,缺少必要的检验设备和技术人员,无法满足叉车检验工作的技术要求,造成检验工作流于形式,无法发现深层次的隐患。检验人员专业素质参差不齐,部分检验人员未经过系统的培训,理论知识不足、实践经验欠缺,对于叉车的结构原理、隐患识别方法不了解,容易出现漏检、误检的情况。叉车检验标准体系不健全,部分标准内容已经落后于叉车技术的发展,对于新型电动叉车、智能叉车的检验未明确的规定,使得检验工作缺少科学依据。检验流程不规范,部分检验机构并未严格按照检验标准进行工作,存在检验项目不全、检验方法不当、检验记录不完整等问题,影响检验结果的准确性、可靠性。

4 叉车检验隐患的防控对策

4.1 完善设备全生命周期管理

企业应加强叉车采购环节的质量控制,严格选择供应商,选择具有生产资质、信誉良好、产品质量合格的企业,采购前对叉车的技术参数、质量认证、安全性能等进行全方位的考察,签订质量保证协议。制定科学合理的设备使用制度,对叉车的额定载荷、行驶速度、作业环境等使用要求作出规定,严禁超负荷、超范围使用设备,防止由于违规使用造成设备损坏。健全设备维护保养制度,按照叉车使用说明书及运行状况,制订详细的日常维护、定期保养计划,确定维护保养项目、周期、责任人,定时对机械系统、电气系统、安全保护装置等进行检查、清洁、润滑、维修,及时更换老化、

损坏的部件。

4.2 强化操作人员队伍建设

企业要严格执行叉车操作人员持证上岗制度,严禁无证人员、证件过期人员操作叉车,招聘时对操作人员的资质进行严格审核,保证符合岗位要求。加强操作人员专业培训,制定系统培训计划,培训内容包括叉车结构原理、操作规范、安全知识、维护保养常识、应急处置流程等,采取理论教学与实操训练相结合的方式,提高操作人员的技能水平和安全意识。定期对操作人员进行安全教育、技能考核,考核结果同岗位绩效挂钩,对考核不合格者进行再培训,直到合格后方可上岗作业。建立操作人员岗位责任制,明确操作人员的安全责任,规范作业行为,对超速行驶、超载作业、违规载人等违规操作行为制定严厉的处罚措施,形成约束机制。

4.3 健全企业安全管理体系

企业应建立健全叉车安全管理制度,根据自身实际情况,制定出完善的操作规程、维护保养制度、检验检测制度、隐患排查治理制度、应急预案等,使各项工作有章可循。明确各级管理人员和操作人员的责任,将安全责任逐级分解落实到具体的岗位和个人,形成人人有责、层层负责的安全管理格局。加大安全投入,保证设备维护、人员培训、检验检测、安全设施更新、隐患整改等方面的资金需求,为叉车安全运行提供物质保障。加强作业环境管理,合理规划作业场地,保持地面平整、干燥、畅通,设置明显的安全标识和警示标志,划分行驶通道和作业区域,防止交叉作业发生冲突。

4.4 提升检验检测工作质量

相关监管部门要加大对检验机构的监管力度,严格检验机构资质审核和日常监管,规范检验机构执业行为,对资质不全、设备落后、服务质量差的检验机构进行清理整顿,淘汰不合格机构。检验机构要强化自身建设,加大检验设备投入,更新升级检验仪器和设备,提高检验技术水平,保证可以满足各种叉车的检验需求。加强检验人员的专业培训和职业道德教育,定期组织检验人员学习最新的检验标准、技术规范、叉车专业知识,开展技能比武、经验交流活动,提

高检验人员专业素质和责任心。完善叉车检验标准体系,相关部门应根据叉车技术发展的情况和实际检验的要求及时修订、补充检验标准,明确检验项目、检验方法、判定规则等,保证检验工作科学规范。

4.5 加强监管与宣传教育

有关监管部门应当加强对叉车使用企业的监管,定期开展叉车安全专项检查和日常监督检查,主要对企业的安全管理制度落实情况、设备维护保养情况、操作人员持证上岗情况、叉车定期检验情况进行检查,严厉打击无证操作、违规使用、未定期检验等违法违规行为。建立企业安全信用评价体系,将企业的安全管理状况、隐患整改情况、违法违规记录等作为信用评价指标,对信用等级低的企业加强监管,增加检查频次,依法采取限制措施。加强叉车安全知识的宣传教育,利用电视、报纸、网络、微信公众号等媒体平台,向企业和社会公众宣传叉车安全知识、相关法律法规、事故案例,提高全民安全意识。

5 结语

总之,叉车作为一种常见的运输设备,在许多行业中发挥着重要作用。特别是在实际操作过程中,叉车不可避免地会出现各种故障隐患,进而影响其正常运行。因此,加强对叉车门框常见故障的分析,根据实际情况探索有效的检测方法和手段,并根据实际应用情况对叉车进行定期检查和维修,可以提高叉车门框的性能指标,有效地解决这一问题,为叉车稳定的运输效率奠定基础。

参考文献

- [1] 易楠.叉车制动距离检验方法分析[J].装备维修技术,2024,(06):25-27+31.
- [2] 谭宁,丁延雪.叉车液压系统热平衡温度检验检测技术研究[J].机械管理开发,2024,39(03):65-67.
- [3] 陈贺.叉车制动不同步原因分析及检验检测研究[J].中国设备工程,2024,(01):183-185.
- [4] 谯舟,陆伟,柴乐乐.浅析叉车护顶架的定期检验以及设置[J].西部特种设备,2023,6(05):25-27+74.

Research on the application of artificial intelligence in chemical equipment maintenance fault diagnosis

Fukang Guo

China Pingmei Shenma Group Nylon Technology Co., Ltd., Shenma Operation and Maintenance Company, Pingdingshan, Henan, 467000, China

Abstract

This study focuses on the application of artificial intelligence in the field of chemical equipment maintenance fault diagnosis. The purpose of this study is to explore how to use artificial intelligence to improve the accuracy and efficiency of fault diagnosis of chemical equipment and ensure the safety and stability of chemical production. By analyzing the technical characteristics of artificial intelligence, combined with the common fault types of chemical equipment, the application points are discussed in depth. The study found that the use of multi-modal data fusion and feature extraction technology can fully perceive the state of the equipment; fault pattern recognition driven by deep learning can realize the leap from anomaly detection to fault location. Knowledge graph-enabled fault reasoning can construct an interpretable decision-making system. The real-time diagnosis of edge computing and federated learning collaboration meets the high reliability requirements of chemical production. Artificial intelligence provides a systematic solution for fault diagnosis of chemical equipment and promotes the transformation of the industry to intelligent and preventive maintenance.

Keywords

artificial intelligence; chemical industry; equipment maintenance; fault diagnosis

人工智能在化工设备维修故障诊断中的应用研究

郭福康

中国平煤神马集团尼龙科技有限公司神马运维公司, 中国·河南 平顶山 467000

摘要

本研究聚焦人工智能在化工设备维修故障诊断领域的应用。研究目的在于探索如何借助人工智能提升化工设备故障诊断的精准度与效率,保障化工生产安全稳定。通过分析人工智能相关技术特性,结合化工设备常见故障类型,深入探讨其应用要点。研究发现,利用多模态数据融合与特征提取技术可全面感知设备状态;深度学习驱动的故障模式识别能实现从异常检测到故障定位的跨越;知识图谱赋能的故障推理可构建可解释的决策体系;边缘计算与联邦学习协同的实时诊断则满足化工生产高可靠性需求。人工智能为化工设备故障诊断提供了系统性解决方案,推动行业向智能化、预防性维修方向转型。

关键词

人工智能;化工;设备维修;故障诊断

1 引言

化工行业身为国民经济的关键支柱产业,其设备可稳定运行对于生产安全以及效率而言非常关键,然而化工设备长时间处于高温、高压以及腐蚀等极为恶劣的环境之中,故障频繁发生并且成因复杂多样,传统的诊断方法依靠人工经验,存在效率较为低下、准确性欠佳等一系列问题,随着人工智能技术迅速发展,它在数据处理、模式识别以及智能决策等方面所有的优势,为化工设备故障诊断给予了全新的机遇。

2 人工智能概述

人工智能属于计算机科学里颇为关键的一个分支,主要希望能够对可模拟、延伸以及扩展人类智能的理论、方法、技术以及应用系统展开研究与开发工作,它的核心目的在于让机器拥有类似人类的智能行为,比如感知、学习、推理、决策、识别、理解语言甚至创造等,自从20世纪50年代该概念被提出以后,人工智能历经了好几次发展浪潮,近些年来在大数据、高性能计算以及深度学习算法的带动下取得了突破性的进步^[1]。当下的主流技术有机器学习、自然语言处理、计算机视觉、智能语音识别、强化学习等,已经在医疗、金融、交通、教育、制造、安防等诸多领域得到广泛应用,比如说,智能客服、自动驾驶、医学影像分析、个性化推荐系统等都是人工智能得以落地的典型场景,虽然人工智能呈

【作者简介】郭福康(1992-),男,中国河南漯河人,本科,助理工程师,从事化工设备检维修研究。

现出巨大的潜力,然而还是面临着可解释性不足、数据隐私、伦理安全以及就业结构冲击等诸多挑战。未来人工智能会朝着更加高效、安全、可信以及普惠的方向发展,与人类社会深度融合,成为推动科技进步以及经济社会变革的关键力量。

3 化工设备常见故障

化工设备在长时间的运行进程当中,会受到物料腐蚀、高温高压环境、机械磨损以及操作不当等诸多因素的影响,大多时候出现各种各样的故障,其中腐蚀属于化工设备最为常见的故障类型之一,像反应釜的内壁由于接触强酸强碱或者氧化性物质,很容易发生均匀腐蚀或者点蚀的情况,最终致使设备的壁厚变薄甚至出现穿孔现象,换热器管束因为氯离子、硫化物等介质而引发应力腐蚀开裂,会影响换热效率,还会引发泄漏问题。另外高温高压的环境会加快设备材料的疲劳速度,比如蒸汽锅炉会因为局部过热而产生鼓包变形,压力容器会因为频繁地升压降压而致使疲劳裂纹扩展,在机械磨损方面,泵类设备的叶轮、轴套会因为介质冲刷或者密封失效而出现磨损,离心机转鼓会因为不平衡振动而引发轴承损坏,这些情况都会对设备运行的稳定性产生影响。操作故障同样不能被忽视,例如阀门误操作会导致系统超压,温度控制不当会引发物料聚合结焦,未按照规定进行排污会导致管道堵塞等,这些都有可能引发设备停机甚至安全事故^[2]。

4 人工智能在化工设备维修故障诊断中的应用要点

4.1 多模态数据融合与特征提取

化工设备在运行期间所产生的数据有多源异构的特性,其中包含了像温度、压力、振动、声纹以及热成像等各类物理参数,同时以及工艺流程、操作记录等过程方面的信息,传统的诊断方法一般依靠单一传感器的数据,很难全面地捕捉到设备故障的特征,人工智能借助多模态数据融合技术,把不同类型传感器采集到的异构数据进行时空对齐以及关联分析,形成对设备状态的立体化感知^[3]。比如说,振动信号可反映机械部件的动态特性,声纹分析可以捕捉设备运行过程中的异常噪声,热成像技术则可定位局部过热的区域,人工智能算法依靠构建特征提取模型,从海量的原始数据里自动筛选出与故障相关的关键特征,像是振动频谱中的特征频率、声纹信号里的异常谐波成分、热成像图中的温度梯度变化等。这种多维度的特征提取方式打破了传统方法对人工经验的依赖,使得故障诊断从单一参数监测转变为综合状态评估。

多模态数据融合的关键要点就是解决不同数据源之间存在的语义鸿沟难题,人工智能借助深度学习里的注意力机制,可以自行学习不同模态数据在故障诊断方面的权重分配情况,比如说,在旋转机械的故障诊断过程中,振动信号对于轴承故障较为敏感,而声纹分析针对齿轮啮合异常更为有

效,人工智能模型可动态调节这两种数据的融合比例,以此提高诊断的准确性。另外人工智能还可运用迁移学习技术,把某一类设备的诊断经验转移到类似设备上,解决新设备数据不足所引发的模型训练险阻问题,借助搭建跨设备、跨工况的通用特征提取框架,人工智能让故障诊断模型拥有更强的适应性与泛化能力,为化工企业达成设备群的智能化管理给予技术支持^[4]。

4.2 深度学习驱动的故障模式识别

化工设备故障模式呈现出复杂且多样的特点,其中包含机械磨损、电气故障等传统故障类型,同时还存在因工艺波动而引发的软故障,传统的诊断方法一般是基于阈值比较或者简单规则匹配来进行的,然而这种方式很难应对非线性、非平稳的故障特征,深度学习借助构建多层非线性映射网络,可自动去学习设备状态与故障模式之间复杂的映射关系,达成从原始数据到故障类型的端到端识别。卷积神经网络也就是 CNN,它擅长处理时空数据,可以针对振动信号、热成像图像等二维数据开展特征提取工作,循环神经网络即 RNN 以及其变体长短期记忆网络 LSTM,它们适用于时间序列数据分析,可捕捉设备状态随着时间演变的动态规律^[5]。

在故障定位领域,人工智能借助构建设备三维数字孪生模型,把深度学习所识别出的故障特征与物理空间位置给予关联映射,比如说,当模型检测到某个区域出现振动异常情况时,可结合设备的结构参数以及传感器布局,迅速定位到具体的轴承或者齿轮部件,这种“数据-模型-物理”的闭环诊断机制,让故障定位精度从传统方法的米级提升到了厘米级,有效缩短了维修时间。人工智能还可依靠生成对抗网络模拟设备故障的演化过程,预测故障的发展趋势,为维修决策给予前瞻性支持,例如对于化工反应釜的腐蚀故障,人工智能模型依据当前的腐蚀速率预测剩余使用寿命,指导企业合理安排检修计划,避免出现非计划停机的损失。

4.3 知识图谱赋能的故障推理

化工设备故障诊断工作,除了要识别故障类型之外,还要对故障根源展开分析,评估其影响范围,制定出维修策略,传统的方法依靠专家经验,面对复杂故障场景时很难做到系统化处理,人工智能借助构建设备故障知识图谱,把设备结构、工艺参数以及历史故障案例等知识进行结构化呈现,形成可用于推理的决策支持系统。知识图谱按照实体-关系-实体的三元组形式来组织知识,像“轴承出现磨损会导致振动异常”“反应釜超压会使安全阀启跳”等,凭借语义关联达成故障链的自动追溯,当有新故障出现时,人工智能可依据知识图谱开展路径推理,从症状表现追溯到潜在根源,并且推荐出最优的维修方案。

知识图谱构建需借助多源数据融合以及自然语言处理技术,人工智能可从设备手册、维修记录、行业报告等文本数据里提取结构化知识,再结合传感器实时数据来动态更新图谱内容,比如对于某类化工泵频繁出现的泄漏故障,知识

图谱可关联“密封件老化”“安装偏差”“介质腐蚀”等多个可能引发故障的原因,并且依靠贝叶斯网络计算出各个原因的概率权重,以此辅助维修人员迅速锁定关键因素。知识图谱还可与强化学习相结合,构建故障处置的智能决策框架,当面临多设备联动故障时,人工智能可以依据图谱中的工艺流程关系,评估不同维修策略对生产系统产生的影响,选择最优处置路径,达成从单一设备维修到系统级优化的升级。

4.4 边缘计算与联邦学习协同的实时诊断

在化工生产这种有高风险性且连续性很强的工业场景中,故障诊断系统所有的实时性、可靠性以及安全性是十分关键关键的,传统那种基于云计算的集中式诊断架构,虽说有着较为强大的计算能力,然而却面临着网络延迟比较高、带宽压力比较大以及数据隐私出现泄露等瓶颈问题,很难契合化工过程对于毫秒级响应以及敏感信息保护的那种非常严苛的要求。边缘计算与联邦学习的协同融合可为构建新一代智能诊断体系给出创新的解决办法。

边缘计算把计算资源下沉到靠近数据源的设备端或者边缘节点,在本地开展数据采集、预处理以及初步推理,使得诊断响应时间大幅缩短,就像在化工园区的危险气体泄漏监测里,布置在现场的边缘设备可运行轻量化的计算机视觉模型,对高清监控视频实施实时分析,一旦辨认出管道破裂、烟雾扩散或者异常喷溅等泄漏征兆,系统可在数百毫秒内触发声光报警并且联动应急装置,整个过程不需要把原始视频上传到云端。这样规避了因网络拥堵产生的延迟风险,又有效防止了包含工艺布局、设备参数等核心商业信息的敏感数据泄露,达成了“就地感知、就地决策、就地响应”的闭环控制。

然而单个企业会受到设备种类有限、故障样本稀少、工况覆盖不全面等因素的限制,其在本地训练的诊断模型一般泛化能力欠佳,在这个时候,联邦学习技术呈现出独特的优势,这项技术构建了一种“数据不动、模型动”的分布式协同训练机制,各化工企业在本地运用自身的运行数据来训练专属模型,并且只把加密后的模型参数,比如梯度更新,上传到中央服务器,服务器聚合多方参数之后生成全局优化模型,接着下发给各参与方进行下一轮迭代。整个过程中原

始数据一直保留在企业内部,切实达成了“数据不出域”,比如说,多家石化企业可联合开展压缩机故障诊断模型的联邦训练,A企业在高温高压工况下的振动分析方面较为擅长,B企业积累了大量低温腐蚀环境下的声学数据,C企业拥有丰富的启停阶段故障样本,凭借联邦协作,各方贡献不同的知识,共同打造出一个覆盖多种设备类型、多种运行条件、多种故障模式的高鲁棒性通用模型。

边缘计算和联邦学习深度融合后,形成了一种新型架构,即“边缘智能+协同进化”,在这种架构里,边缘侧负责保障实时性以及安全性,联邦侧则希望能够提升模型的泛化能力和适应性,此模式成功解决了化工行业长期以来存在的数据孤岛和隐私壁垒问题,还推动了跨企业、跨区域的智能化诊断生态建设。未来随着5G、可信计算以及AI芯片技术成熟,该协同框架有望在更多高危工业场景中得以应用,为安全生产构建起坚实的技术防线。

5 结语

人工智能在化工设备维修故障诊断中的应用,实现了从数据感知、模式识别到决策推理的全链条智能化升级。多模态数据融合突破单一传感器局限,深度学习提升故障识别精度,知识图谱构建可解释的推理体系,边缘计算与联邦学习保障实时性与安全性。未来,随着人工智能与物联网、数字孪生等技术的深度融合,化工设备故障诊断将迈向自主化、预防性新阶段,为化工行业高质量发展提供坚实技术保障。

参考文献

- [1] 辛学辉,李兆凯,郑昊,等. 人工智能技术在机械设备远程监测与维修中的应用[J]. 中国机械, 2025, (25): 78-81+85.
- [2] 李建龙. 化工机械设备管理及维修保养技术标准[J]. 大众标准化, 2025, (16): 28-30.
- [3] 王日强. 基于维修保养周期的化工设备生命周期成本分析[J]. 化工管理, 2025, (22): 140-142.
- [4] 李维芳. 化工设备可靠性分析与维护管理策略研究[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2025, 45 (14): 78-80.
- [5] 尚亚平. 人工智能与化工设备与维修专业学科融合的教育模式探究[J]. 化工管理, 2020, (26): 19-20.

Application analysis of repair technology for the middle groove of scraper conveyor

Zhongli Ai

Liaoning Coal Machinery Equipment Manufacturing (Group) Co., Ltd., Tieling, Liaoning 112000, China

Abstract

As the core component of scraper conveyors, the central slot's wear and failure directly impact operational efficiency and equipment lifespan. This analysis systematically explores four mainstream repair reinforcement technologies based on structural analysis and failure mechanisms. Laser cladding technology, characterized by high precision, low deformation, and superior coating performance, is suitable for precision areas such as chain tracks. Automated wear-resistant overlay welding, with its high efficiency and cost-effectiveness, serves as the primary solution for large-area repairs. High-performance composite liner embedding technology provides a modular protection solution that eliminates thermal input and enables rapid replacement. Plasma cladding technology strikes a balance between efficiency and cost, making it ideal for thick-layer repairs. The selection of these technologies requires comprehensive decision-making based on wear patterns, cost considerations, and operational conditions, playing a significant role in advancing intelligent remanufacturing of mining equipment and implementing green circular economy development.

Keywords

scraper conveyor; central trough; wear failure; laser cladding

刮板输送机中部槽修复技术应用分析

艾中利

辽宁煤机装备制造（集团）有限责任公司，中国·辽宁 铁岭 112000

摘 要

中部槽作为刮板输送机的核心部件，其磨损失效直接影响设备运行效率与寿命。本分析在解析其结构与失效机理的基础上，系统探讨了四种主流修复强化技术。激光熔覆技术以高精度、低变形和优异涂层性能，适用于链道等精密部位。自动化耐磨堆焊凭借高效率与高性价比，是大面积修复的主力。高性能复合衬板镶嵌技术提供了一种无热输入、快速更换的模块化防护方案。等离子熔覆技术则在效率与成本间取得平衡，适合厚层修复。这些技术的选择需依据磨损形式、成本与工况进行综合决策，对推动矿山设备智能再制造、落实绿色循环经济发展具有重要意义。

关键词

刮板输送机；中部槽；磨损失效；激光熔覆

1 引言

随着《“十四五”原材料工业发展规划》与《关于加快废旧物资循环利用体系建设的指导意见》等国家政策的深入实施，推动重大技术装备的再制造与延寿，促进资源节约集约利用已成为制造业绿色发展的重要方向。刮板输送机作为煤矿开采的关键设备，其核心部件中部槽的磨损失效是导致设备停机与维护成本攀升的主要原因。传统更换新槽的方式成本高且周期长。因此，发展高效、可靠的中部槽修复与强化技术，不仅是保障煤炭连续生产的迫切需求，也是落实国家循环经济与可持续发展战略，推动矿山机械行业向绿

色、智能再制造转型的必然技术路径。

2 刮板输送机中部槽的结构与功能解析

刮板输送机的机体，主要由封闭的矩形断面槽体构成，而中部槽正是这延绵槽体的标准节段单元，是完成物料装载、运输与卸载功能的核心载体。其结构设计精密而坚固，通常由高强度低合金钢板焊接而成，主要包括两个相向对称布置的槽帮（或称铲煤板）、连接左右槽帮的封底式或开底式中板、以及安装于槽体两端的端头（分为凸端和凹端，用于节段间的连接）。槽帮上缘通常设计有可供刮板链条平稳运行的链道，其内侧与中板共同围成了煤炭的输送空间。在工作时，绕过机头、机尾链轮的封闭刮板链，在中部槽构成的轨道内循环运行，拖动刮板将槽底的煤炭源源不断地推向卸载端。中部槽并非孤立存在，它们通过端头处的精密连接

【作者简介】艾中利（1977-），男，中国辽宁灯塔人，本科，从事机械或矿山机械研究。

部件（如哑铃销、螺栓等）首尾相接，形成一条刚柔并济的连续运输线，能够在一定程度上适应工作面的推进和底板的起伏。其结构强度、几何精度尤其是链道与中板的耐磨性能，直接决定了输送机运行的平稳性、阻力大小以及最终的运输能力与使用寿命。因此，对中部槽的理解，必须将其置于动态的、受力的、摩擦的完整系统之中，其每一处结构特征都与其功能实现和失效模式紧密相连。

3 刮板输送机中部槽磨损失效的主要原因

3.1 输送物料的直接磨损与腐蚀作用

中部槽的磨损失效主要源于所输送物料的直接作用。煤炭及其中的硬质夹矸（如石英、长石等矿物），在输送过程中对槽体中板及槽帮内侧产生持续的滑动、滚动与冲击，形成典型的磨料磨损。物料硬度、粒度、形状及含水率直接影响磨损速率。当物料含水或矿井水侵入时，磨损机制常演变为更为剧烈的湿磨料磨损或冲蚀磨损（如图1）。矿井水通常呈弱酸性或含氯离子等腐蚀成分，与机械磨损协同作用，形成磨损-腐蚀交互效应。腐蚀会软化金属表面或产生疏松腐蚀产物，使其更易被磨料剥离；而磨损不断去除表层，暴露出新鲜金属，又加速了腐蚀进程，形成材料损失速度远超单纯磨损或腐蚀的恶性循环。槽体底部，尤其是中板区域，承受物料最大正压力与主要滑动摩擦，是该类磨损最为严重的部位。



图1 刮板输送机输磨磨损与腐蚀图

3.2 链条与槽体间的机械摩擦与冲击损伤

刮板链条与中部槽之间的机械相互作用是另一关键磨损原因。链条在运行中与槽帮上缘的链道持续滑动摩擦，这种金属对金属的接触磨损因煤粉、水汽等杂质侵入而加剧，形成三体磨料磨损，显著提高磨损速率。链道过度磨损会导致链条运行轨迹改变，增加阻力并可能引发跳链故障。更为严重的是，链条在启动、制动、负载变化及通过弯曲段时产生的抖动、拍击，以及刮板卡滞释放带来的瞬时冲击，会对槽体形成周期性冲击载荷。这种冲击不仅加速接触点的疲劳磨损，还可能引发微观裂纹萌生与扩展，特别是在焊缝、截面过渡等应力集中区域，易导致疲劳断裂。因此，链条系统带来的磨损是链道区域的接触疲劳磨损与槽体整体的冲击

磨损、微动磨损的综合体现，与物料磨损共同导致槽体几何尺寸破坏、强度削弱与功能失效。

3.3 焊接残余应力与结构应力集中的影响

中部槽的结构完整性及抗磨损能力，不仅受到外部物料与链条的直接作用，也与其内部固有的应力状态密切相关。焊接作为中部槽制造与维修的核心工艺，不可避免地会引入残余应力。在焊接快速加热和冷却过程中，焊缝及热影响区因不均匀的热膨胀与收缩，会产生高达材料屈服强度的拉应力。这种残余拉应力会显著降低材料的疲劳强度，在交变载荷下成为微观裂纹的起源点，加速裂纹的萌生与扩展，使得磨损过程从单纯的表面材料损失演变为更危险的磨损-疲劳复合失效。因此，焊接残余应力与结构应力集中的存在，实质上降低了材料的有效承载能力和耐磨性，是导致中部槽早期失效与局部异常磨损不可忽视的内在因素。

4 刮板输送机中部槽修复关键技术应用分析

4.1 激光熔覆技术

激光熔覆技术是一种利用高能量密度激光束作为热源，在工件表面快速熔化一层特殊合金粉末并与基体形成冶金结合的先进表面工程方法。其核心是激光与材料的相互作用，功率密度通常可达每平方厘米1万瓦以上，能在毫秒级时间内将基体表层与合金粉末共同熔化形成微小熔池，随后以每秒高达1百万摄氏度以上的冷却速度急速凝固。

这种超快的加热与冷却过程，使得熔覆层组织极为致密，晶粒尺寸可细化至微米乃至纳米级别，如马氏体、残余奥氏体与多种碳化物的复合组织，宏观硬度普遍可达HRC55-65，耐磨性可比基体材料提升5倍以上。其热输入集中，热影响区宽度通常可控制在1-2mm以内，工件的整体热变形量极小，变形量通常小于0.1%。该技术的关键优势在于其极低的稀释率，可控制在5%以内，这确保了高性能粉末（如含碳化钨60%的镍基复合粉末）的优异性能得以在覆层中充分保留，而不过多受基体成分冲淡。在中部槽修复中，激光熔覆以其高精度（轨迹重复精度可达 $\pm 0.1\text{mm}$ ）和低热影响的特点，成为修复精密链道、中板接合面等尺寸敏感和易变形部位的首选工艺。尽管其设备初期投资较高，单台大功率激光加工系统价格可达数百万元，且对工件装卡定位有一定精度要求，但其修复后的部件寿命延长效果显著，是追求高可靠性、长寿命修复方案的理想选择。

4.2 自动化耐磨堆焊技术

自动化耐磨堆焊技术是通过集成化机械系统与数字化控制，实现焊接过程全自动化的高效修复工艺。该技术利用电弧作为热源，熔化连续输送的耐磨合金焊丝或焊带，在磨损表面精确堆积形成强化层。其自动化核心体现在对焊接电流、电压、行走速度、摆动幅度与频率等关键参数的精准闭环控制，例如电流波动可控制在设定值的 $\pm 2\%$ 以内，确保了工艺的极端稳定性。

广泛应用的药芯焊丝,如高铬铸铁型,其堆焊层组织中以初生碳化铬为主,硬度可达 HRC58-65,抗磨料磨损性能优异。单道堆焊宽度通常为 20-50mm,单层堆焊厚度可达 3-8mm,通过多层多道搭接可快速覆盖大面积磨损区域。工艺优化的关键在于热输入与层间温度的控制。对于高碳高铬材料,通常需将层间温度严格控制在 150-250℃ 范围内,以抑制裂纹产生。采用多丝或宽带极(带宽可达 60-150mm)技术,能够将熔敷效率提升至每小时 20kg 以上,显著提高修复效率。其设备系统(包括电源、控制柜、行走机构)的一次性投资远低于激光设备,且日常耗材(焊丝、气体)成本相对低廉,使其在大型结构件、如中部槽的中板、槽帮等大平面磨损区域的批量化修复中占据了主导地位,综合性价比极高,是当前煤矿、矿山等工业现场应用最广泛的核心修复手段。

4.3 高性能复合衬板镶嵌技术

高性能复合衬板镶嵌技术是一种非焊接式的模块化防护技术。其工艺核心是,在经处理的磨损基体表面,通过钻孔、攻丝,使用高强度螺栓(如性能等级 8.8 级以上)将预先成型的耐磨衬板牢固地机械连接在基体上。衬板作为独立的易损件,承受全部磨损,从而保护中部槽本体。

该技术的关键在于衬板材料的选择与连接设计。常见的超高分子量聚乙烯衬板,其分子量通常超过 150 万,具有极低的摩擦系数,动态摩擦系数可低至 0.1-0.22,且具有自润滑性,能有效降低运行阻力达 30% 以上,其抗冲击强度可超过 150kJ/m²。安装时,为保证连接的长期可靠性,螺栓紧固扭矩需严格按设计执行,例如 M16 的高强螺栓,扭矩通常需达到 200-250 牛·米,并配合防松垫片或螺纹锁固剂使用。这种技术允许快速更换,单块衬板的更换时间可控制在 1-2h 内。其施工对现场环境要求极低,无需大型专用设备,无热输入,不产生焊接变形或残余应力。它特别适用于槽体侧帮、受料冲击点、卸载曲线段等冲击磨损严重的局部区域,或作为新设备的预防性保护措施。然而,在长期承受超过衬板材料剪切强度的强冲击载荷(如超过 30 兆帕的持续冲击压力)或工作温度长期超过 80℃ 的环境下,其可靠性会下降,需谨慎选用或进行特殊设计。

4.4 等离子熔覆技术

等离子熔覆技术是以高能等离子弧为热源的表面熔覆工艺。其等离子弧由电弧经特殊喷嘴压缩获得,电弧中心温度可达 15000-30000 摄氏度,能量密度比常规电弧焊高出一个数量级,可达每平方厘米 10 的四次方瓦量级。在工作过程中,转移弧在工件上形成稳定熔池,粉末输送系统(送粉率精度可达 $\pm 1.5\%$)将合金粉末精确送入弧柱或熔池,实

现粉末的高效熔化与冶金结合。该技术熔覆速率高,单道熔覆宽度在 5-15mm 范围内可调,单道熔覆厚度可达 2-5mm,粉末利用率通常高达 90% 以上。通过选用不同的合金粉末体系,可以获得性能各异的涂层。

例如,使用镍基碳化钨复合粉末,可获得硬度在 HRC55-60 之间、耐磨性优良的涂层;而铁基合金粉末则具有更好的经济性。与激光熔覆相比,等离子熔覆的设备投资成本通常仅为前者的三分之一到二分之一,但生产效率却可与之相当甚至在某些厚层修复场景中更高。其热输入和热影响区(宽度约 3-6 毫米)比激光熔覆大,但远小于传统电弧堆焊,对工件的装配间隙和表面状态(允许一定的锈蚀和氧化皮)的适应性更强。在中部槽修复领域,等离子熔覆技术特别适用于槽帮、底板等大面积均匀磨损或需快速增厚修复的区域。它能够在保证涂层与基体牢固结合和良好耐磨性能的前提下,以较高的性价比和现场工艺适应性,实现重型部件的快速修复与长效强化。

5 结语

面对中部槽的严峻磨损挑战,单一的修复技术难以应对所有复杂工况。激光熔覆、自动化堆焊、等离子熔覆与复合衬板镶嵌这四种关键技术各有其优势与适用场景。未来的技术发展将更加注重修复方案的定制化与复合化,即基于精准的磨损诊断,将多种技术优势结合,并融入智能化工艺控制与寿命预测。通过科学选择与优化应用这些技术,不仅能显著恢复甚至提升中部槽的性能,大幅延长设备服役周期,降低全生命周期成本,更能有效减少资源消耗与废件产生,有力支撑矿山装备的绿色、低碳、高效运行,为行业的高质量发展提供坚实的技术保障。

参考文献

- [1] 李俊.基于模拟分析的刮板输送机中部槽结构优化[J].机械管理开发, 2023, 38(5):120-122.
- [2] 赵毛毛.基于刮板链速度的带式输送机中部槽磨损性能的分析[J].煤炭与化工, 2023, 46(2):89-91.
- [3] 王浩.直线截割工况下刮板输送机中部槽疲劳失效特征分析研究[J].机械管理开发, 2025(8).
- [4] 张育萌.刮板输送机中部槽参数化力学分析及设计系统研究与开发[D].太原理工大学,2023.
- [5] 杨向峰.刮板输送机中部槽结构设计优化研究[J].机械管理开发, 2023.
- [6] 张育萌.刮板输送机中部槽参数化力学分析及设计系统研究与开发[D].太原理工大学,2023.
- [7] 夏蕊,李博,王学文,等.刮板输送机中部槽磨粒磨损试验装置研制与应用[J].实验室研究与探索, 2023, 42(2):192-195.

Exploration of the Three in One Training Model for High Skilled Talents in Nuclear Power Maintenance and Inspection: Skills, Safety, and Nuclear Culture

Xiao Jiang

China Nuclear Industry Second and Third Construction Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong, 518120, China

Abstract

Against the backdrop of the “dual carbon” goal and the continuous promotion of energy structure transformation, nuclear power, as an important clean base load energy, has put forward higher requirements for highly skilled maintenance personnel for its safe and stable operation. The nuclear power inspection and maintenance operations have significant characteristics such as technical complexity, highly concentrated risks, and strict procedural constraints. The talent training model based solely on operational skills is no longer suitable for the practical needs of nuclear safety management for “zero errors and zero tolerance”. In response to the problem of the disconnect between skill training, safety education, and nuclear culture cultivation in the existing training system, this study believes that embedding safety requirements into the skill training process and internalizing behavior through nuclear safety culture guidance can help improve the standardization of operation, consistency of safety behavior, and risk prevention and control capabilities of maintenance personnel. This model provides a systematic and scalable practical path for the cultivation of highly skilled personnel in nuclear power maintenance and repair, and has important theoretical value and practical significance for improving the safety level of nuclear power operation.

Keywords

nuclear power inspection and maintenance; High skilled talents; Trinity training model; Safety literacy

“技能—安全—核文化”三位一体的核电检维修高技能人才培养模式探索

蒋小

中国核工业二三建设有限公司，中国·广东 深圳 518120

摘 要

在“双碳”目标和能源结构转型持续推进的背景下，核电作为重要的清洁基荷能源，其安全稳定运行对高技能检维修人才提出了更高要求。核电检维修作业具有技术复杂、风险高度集中、程序约束严格等显著特征，单一以操作技能为核心的人才培养模式已难以适应核安全管理对“零失误、零容忍”的现实需求。针对现有培养体系中技能训练、安全教育与核文化培育相互割裂的问题，本文研究认为，将安全要求内嵌于技能训练过程，并通过核安全文化引导行为内化，有助于提升检维修人员作业规范性、安全行为一致性和风险防控能力。该模式为核电检维修高技能人才培养提供了系统化、可推广的实践路径，对提升核电运行安全水平具有重要的理论价值与现实意义。

关键词

核电检维修；高技能人才；三位一体培养模式；安全素养

1 引言

在“双碳”目标和能源结构深度调整背景下，核电作为稳定、清洁、可规模化发展的重要基荷能源，其安全高效运行对高素质技术技能人才提出了更高要求。核电检维修岗位作为保障核电机组长期安全稳定运行的关键环节，具有技术复杂度高、作业风险大、标准约束严、责任后果重等显著

特征。与传统工业设备检修不同，核电检维修不仅依赖扎实的专业技能，更高度依赖安全意识、程序执行力以及深植于从业人员内心的核安全文化。实践表明，单纯以技能训练或操作熟练度为核心的人才培养模式，已难以适应核电检维修对“零失误、零容忍”的现实要求。如何在人才培养全过程中实现技术技能、安全素养与核文化认同的协同塑造，成为核电企业与职业教育体系亟需回应的重要课题。^[1]

【作者简介】蒋小（1987—），女，中国湖南宁远人，本科，助理工程师，中级经济师，从事核电工程管理研究。

2 核电检修高技能人才培养的现实需求与问题分析

2.1 核电检修岗位能力结构的现实需求特征

核电检修岗位是保障核电机组安全、稳定、长周期运行的重要技术支撑，其岗位能力要求显著区别于常规工业设备检修岗位。从工作内容看，核电检修不仅涉及机械、电气、仪控等多专业交叉操作，还高度依赖标准化程序执行、风险预判能力与团队协同水平。随着核电机组向大型化、复杂化和长寿命运行方向发展，检修工作逐步由事后修复向预防性维护、状态检修和寿期管理转变，对人员综合素质提出了更高要求。

在能力结构层面，核电检修高技能人才不仅需要具备扎实的操作技能和设备认知能力，还必须能够在复杂工况和高风险环境下严格遵循作业程序，准确识别潜在风险并采取规范应对措施。这意味着，岗位能力已不再是单一技能熟练度的体现，而是技术能力、安全意识与规范执行能力的综合结果。从行业实践来看，当前核电企业普遍面临检修任务密集、作业窗口期短、人机协同复杂等现实情况，高技能

人才不仅要“做得对”，更要“在任何情况下都坚持正确做法”。这客观上要求人才培养模式能够在技术训练阶段同步塑造稳定的安全行为模式和高度一致的核安全价值认同，为后续岗位实践奠定可靠基础。

2.2 现有人才培养模式存在的主要问题

从现有培养实践看，核电检修高技能人才培养仍以技能训练为主线，安全教育和核文化培育在内容结构和实施方式上相对分离。技能培训侧重于操作流程和工艺标准，强调动作规范和结果达标，但对操作背后的系统风险机理和安全逻辑关注不足，容易导致学员形成“照章操作”的表层认知，而缺乏对异常工况的深入理解。安全教育多以制度宣贯、事故通报和集中培训形式开展，与具体技能训练场景结合不够紧密，安全要求在实际操作中容易被视为外在约束。为更加直观地反映当前培养模式与岗位需求之间的差距，可从能力要素角度进行对比分析，如表1所示。可以看出，现行模式在技能培养方面相对成熟，但在安全素养的情境化训练和核文化的系统内化方面仍存在明显不足，这也成为制约核电检修队伍整体安全水平提升的重要因素。^[2]

表1 核电检修高技能人才岗位需求与现行培养侧重点对比

能力维度	岗位实际需求特征	现行培养侧重点	存在的主要不足
技能能力	多专业协同、复杂工况操作	单项技能与流程训练	综合分析与应变能力不足
安全素养	风险预判、严格程序执行	制度宣贯与案例教育	与操作场景融合度不高
核文化认同	安全价值内化、责任意识稳定	理念性教育为主	行为层面转化不足

总体来看，现有培养模式在结构上呈现出“技能强、安全弱、文化虚”的特征，难以全面支撑核电检修对高可靠性、高一致性行为的要求。这一现实问题，正是构建“技能—安全—核文化”三位一体培养模式的直接动因和现实基础。

3 “技能—安全—核文化”三位一体培养模式结构构建

3.1 三位一体培养模式的内涵界定与逻辑关系

“技能—安全—核文化”三位一体培养模式，是在核电检修高风险、高规范、高责任属性基础上形成的一种系统化人才培养理念，其核心在于将技术技能训练、安全素养培育与核安全文化内化视为同一培养体系中的不同层级要素，而非相互割裂的独立模块。从能力生成逻辑看，技能是检修人员完成作业任务的基础条件，安全是技能应用的边界约束，而核文化则是引导个体行为选择和价值判断的深层驱动因素，三者共同决定了检修行为的可靠性与一致性。^[3]

在传统培养模式中，技能通常被视为“显性能力”，可以通过反复训练和考核快速形成；安全更多体现为“外在规范”，依赖制度约束和监督机制维持；核文化则被理解为“软性理念”，对实际行为的影响往往具有不确定性。而三位一体培养模式强调，应通过系统设计使三者在培养过程中

形成递进关系和协同机制，使安全要求内嵌于技能训练过程之中，并通过核文化的价值引导实现安全行为的长期稳定保持。在这一逻辑框架下，技能不再是孤立的操作能力，而是“受安全约束的技能”；安全不再是被动遵循的规则，而是“技能的一部分”；核文化也不再停留于口号层面，而是通过反复实践转化为自觉行为。

3.2 基于三位一体理念的培养结构与要素构成

在具体结构设计上，三位一体培养模式应围绕核电检修岗位能力要求，对技能、安全与核文化要素进行系统整合，构建层次清晰、相互支撑的培养体系。在技能层面，应以岗位能力标准为核心，突出对设备机理、系统逻辑和典型工况的理解，避免单纯以动作熟练度作为评价依据。通过仿真训练、情景化实操和现场实践相结合，使学员在掌握操作流程的同时，能够理解每一技术动作对系统安全的影响。在安全层面，应将风险识别、作业前分析、过程控制和事后复盘等安全管理要素嵌入技能训练全过程，使安全要求不再以独立课程形式存在，而是转化为操作技能的必要组成部分。通过反复训练，使学员形成在任何作业开始前主动进行风险评估、在作业过程中严格执行核对程序的行为习惯，从而实现安全意识向安全能力的转变。在核文化层面，应通过制度设计和教学组织，将“安全第一、责任至上、程序至上”的价值理念持续强化于培养全过程。核文化培育的重点不在于

概念灌输,而在于通过典型事件分析、经验传承和情境反思,引导学员理解违规操作和程序偏离的潜在后果,使其在心理层面形成对核安全红线的高度敬畏。这种内化过程,是保障技能和安全要求在实际工作中长期稳定执行的关键。^[4]

为更清晰地呈现三位一体培养模式的结构特征及其内在关系,可从培养目标、核心内容与作用机制三个维度进行概括,如表2所示。可以看出,该模式通过结构化设计,实

现了能力培养由“技能导向”向“安全与文化协同导向”的转变,为核电检修高技能人才培养提供了系统化路径。

总体而言,“技能—安全—核文化”三位一体培养模式通过对培养要素的系统整合,突破了传统单一技能导向的人才培养局限,使检修人员在能力、意识与价值层面形成高度一致的安全取向,为后续培养模式实施路径和实践效果分析奠定了坚实理论基础。

表2 “技能—安全—核文化”三位一体培养模式结构特征

培养维度	核心内容	主要作用机制
技能培养	操作规范、设备机理、系统逻辑	夯实岗位履职能力基础
安全培育	风险识别、程序执行、过程控制	约束技能应用边界
核文化塑造	安全价值、责任意识、行为自觉	稳定安全行为取向

4 “技能—安全—核文化”三位一体培养模式的实施路径与运行机制

4.1 面向岗位全周期的分阶段实施路径设计

在核电检修高技能人才培养实践中,三位一体模式的有效运行,依赖于与岗位成长规律相适应的分阶段实施路径设计。从人员能力发展周期看,检修人员通常经历由入岗适应、能力提升到骨干成熟的递进过程,不同阶段对技能、安全与核文化的侧重要求存在明显差异。因此,培养模式应围绕岗位全周期进行系统规划,避免“一次性培训”或“阶段割裂”的问题。

在入岗与基础阶段,培养重点应放在通用技能、安全底线意识和核电行业基本规范的建立上。通过标准化操作训练与安全基本原则的同步引导,使学员在初期即形成“技能必须服从安全”的认知框架。这一阶段的核文化培育,应侧重于帮助学员理解核电行业的特殊性和安全责任的严肃性,为后续能力提升奠定价值基础。在能力提升阶段,培养重点逐步转向复杂工况下的综合能力训练。通过情景模拟、跨专业协同演练和典型故障处置训练,将安全管理要素深度嵌入技能实践之中,引导学员在面对时间压力和任务复杂性时,仍能坚持程序执行和风险控制要求。此阶段核文化培育的核心,在于通过反思性学习强化安全责任意识,使学员逐步由“被要求守规”向“主动守规”转变。在成熟与骨干阶段,培养目标则侧重于能力传承与行为示范。通过参与关键检修任务、技术改进和经验总结工作,使人员在实践中深化对核安全文化的理解,并在团队中发挥示范引领作用。这一阶段的三位一体培养,更多体现为对稳定安全行为模式的持续巩固,是保障核电检修队伍长期安全可靠运行的重要支撑。

4.2 三位一体培养模式的运行机制与保障条件

为确保三位一体培养模式在实际运行中取得稳定成效,还需构建与之相匹配的运行机制和保障体系。在组织层面,应通过岗位能力标准与培训体系的衔接,将技能、安全与核文化要求统一纳入培养目标和考核体系,避免不同部门各自

为政。通过制度设计,使三位一体理念转化为可执行的培训流程和评价标准,从而形成长效运行机制。

在教学与训练层面,应强化情景化和过程性评价导向,改变以结果考核为主的传统评价方式。在技能考核中同步考察安全行为和程序执行情况,使安全表现成为技能合格的必要条件;在安全评价中引入行为观察和过程记录,提升评价的客观性与针对性;在核文化培育方面,则通过持续跟踪学员行为变化,评估价值内化程度。这种多维度评价机制,有助于推动三位一体培养要求在实践中真正落地。在资源与环境保障方面,应注重发挥师资队伍和实践平台的协同作用。具有丰富现场经验和良好安全记录的技术骨干,应在培养过程中承担示范和引导职责,通过言传身教强化核文化影响。^[5]

5 结语

核电检修高技能人才培养是一项系统性、长期性工程,其目标不仅在于满足岗位操作需求,更在于构建支撑核电安全运行的人才基础。“技能—安全—核文化”三位一体培养模式,通过打破传统分割式培养思路,实现了能力训练、行为约束与价值引导的深度融合,为核电检修人才高质量培养提供了可行路径。如今可以在持续总结实践经验的基础上,不断完善培养机制,使该模式在更大范围内推广应用,为中国核电事业安全、稳定、可持续发展提供坚实的人才保障。

参考文献

- [1] 罗慧. 核电大型阀门密封面自动研磨机器人设计与建模[J]. 中国科技信息, 2023, (09): 76-78.
- [2] 王彦翔. 核安全文化在核电检修领域的应用[J]. 劳动保护, 2022, (12): 46-47.
- [3] 徐康. 助力保障我国大陆所有商运核电站运维安全[J]. 中国核电, 2022, 15(02): 285-286.
- [4] 马驰. Z核电检修公司发展战略研究[D]. 大连理工大学, 2021. DOI: 10.26991/d.cnki.gdllu.2021.002201.
- [5] 朱志强, 王晓儒. 核电厂数字化检修管理平台设计与实践[J]. 设备管理与维修, 2020, (10): 23-25. DOI: 10.16621/j.cnki.issn1001-0599.2020.05D.11.

Research on Technical Path and Risk Classification of Soil Pollution Hazard Investigation in Construction Land

Xiaomei Ma

Xinjiang Environmental Protection Group Environmental Testing Technology Co., Ltd., Urumqi, Xinjiang, 830001, China

Abstract

Soil contamination on construction land is directly related to the safe utilization of land resources and the sustainable development of cities, and conducting systematic investigations of soil pollution hazards and risk classification studies is of significant practical importance. Focusing on potential soil environmental risks arising during the redevelopment and land-use conversion of construction land, a technical pathway system centered on hazard identification, investigation and verification, and risk determination is established, which helps enhance the foresight and scientific basis of pollution prevention and control. By integrating historical land-use information, current survey data, and environmental monitoring results, the types and spatial distribution characteristics of soil pollution hazards on construction land are systematically identified. On this basis, a risk classification evaluation framework is developed to achieve differentiated assessment of contamination risk levels across different land parcels.

Keywords

construction land; soil contamination; hazard investigation; risk classification; technical pathway

建设用地土壤污染隐患排查技术路径与风险分级研究

马晓梅

新疆环保集团环境检测科技有限公司, 中国·新疆乌鲁木齐 830001

摘要

建设用地土壤污染问题直接关系到土地安全利用与城市可持续发展,开展系统化的土壤污染隐患排查与风险分级研究具有重要现实意义。围绕建设用地再开发与用途转换过程中潜在的土壤环境风险,构建以隐患识别、调查验证和风险判定为核心的技术路径体系,有助于提升污染防控的前瞻性与科学性。通过整合历史用地信息、现状调查数据与环境检测结果,系统识别建设用地土壤污染隐患类型及其分布特征,在此基础上建立风险分级评价框架,实现对不同地块污染风险程度的差异化判定。

关键词

建设用地; 土壤污染; 隐患排查; 风险分级; 技术路径

1 引言

随着城镇化进程持续推进,建设用地更新利用频率不断提高,部分地块在长期工业生产或不合理使用过程中积累了不同程度的土壤污染风险。若缺乏系统排查与科学评估,污染隐患在土地再开发阶段易被忽视,进而对生态环境安全和人群健康产生潜在影响。在当前土地集约利用和环境约束趋紧的背景下,单纯依赖末端治理已难以满足管理需求,亟需从源头识别和过程控制角度加强建设用地土壤污染风险防范。通过构建规范化的隐患排查技术路径和清晰的风险分级体系,可实现对建设用地污染风险的分层识别与精准管控,为土地利用决策提供科学依据,也为土壤环境管理由被

动应对向主动防控转变奠定基础。

2 建设用地土壤污染隐患排查的总体技术框架

2.1 建设用地土壤污染隐患排查的目标定位

建设用地土壤污染隐患排查以保障土地开发利用过程中的环境安全为根本目标,核心在于在土地进入建设或再开发环节之前,对潜在土壤污染问题进行系统识别和风险预判。通过明确排查目标,将土壤环境安全纳入建设用地管理的前置条件,使土地利用决策建立在可靠的环境信息基础之上。该目标不仅关注已形成的污染事实,也重视可能存在的历史遗留风险与潜在隐患,通过提前识别不确定性因素,降低后续开发过程中环境风险暴露的可能性,为风险分级管理与分类管控提供清晰导向。

2.2 建设用地土壤污染隐患排查的对象与范围界定

建设用地土壤污染隐患排查对象主要涵盖拟开发、再

【作者简介】马晓梅(1981-),女,回族,中国新疆人,硕士,中级,从事生态环境保护研究。

开发及用途拟发生变化的各类建设用地,尤其关注具有复杂历史利用背景或曾从事高环境风险活动的地块。排查范围在空间上需覆盖地块本体及其可能受到影响的相邻区域,在介质层面需兼顾地表土壤、深层土壤以及与其存在联系的地下水环境。通过合理界定排查对象与范围,可以避免排查边界过窄导致隐患遗漏,确保风险识别结果能够真实反映建设用地整体环境状况。

2.3 建设用地土壤污染隐患排查的技术原则与基本要求

建设用地土壤污染隐患排查在技术实施过程中应注重科学性、系统性与规范性的协调统一,确保排查结果具备稳定的技术支撑能力。技术原则强调以证据链为核心,通过资料分析、现场调查和技术检测等手段形成相互印证的判断基础。基本要求侧重排查流程的规范化和结果表达的清晰化,使不同地块的排查成果在技术尺度和判定逻辑上具备可比性,为后续风险分级与管理应用提供可靠依据^[1]。

3 建设用地土壤污染隐患识别与信息收集路径

3.1 建设用地历史利用与污染源信息系统梳理

建设用地历史利用与污染源信息梳理是隐患识别的重要起点,通过系统收集地块历次用途变更、生产活动类型及管理方式信息,可追溯潜在污染形成的时间节点与空间特征。该路径依托历史档案、规划资料和相关调查成果,构建地块环境背景信息体系,使隐患识别建立在充分事实基础之上。通过对污染源类型与分布特征的系统梳理,有助于明确重点关注区域,为后续调查工作的针对性布置提供支撑。

3.2 建设用地现状调查与重点风险要素识别

建设用地现状调查以掌握地块当前环境状态为核心,通过现场踏勘和信息记录,全面识别可能反映污染风险的关键要素。调查内容涵盖地表特征、设施遗留情况以及周边环境条件,使风险识别更加贴近实际情况。重点风险要素识别关注可能引发土壤污染的异常现象及不规范利用痕迹,通过对现状信息的系统分析,提高对潜在隐患的识别敏感性,为后续风险判断提供现实依据。

3.3 建设用地土壤污染隐患信息整合与初步判定

在完成历史资料梳理与现状调查后,对各类信息进行系统整合是形成隐患判断的重要环节。通过对不同来源信息的综合分析,将零散数据转化为具有判定意义的风险线索,构建建设用地土壤污染隐患的整体认知框架。初步判定以风险存在可能性和不确定程度为主要依据,为是否进入深入调查阶段提供决策参考,实现隐患排查由信息收集向规范化判断的有效过渡。

4 建设用地土壤污染隐患调查与验证技术路径

4.1 建设用地土壤污染隐患现场踏勘与布点原则

建设用地土壤污染隐患调查的现场踏勘以识别污染风险空间分布格局为核心,通过系统掌握地块面积、地形条

件、地表硬化程度及历史设施遗留状况,为采样布点提供空间依据。踏勘过程中结合地块规模与历史活动强度确定布点数量,当地块面积在 5000m²—10000m² 范围内时,基础布点数量一般控制在 10 个—15 个,面积超过 20000m² 的地块布点数量相应增加至 20 个—30 个。在可能存在重点污染隐患的区域,将布点间距压缩至 15m—25m 范围,以增强对局部异常的识别能力。布点位置需重点覆盖原生产装置区、原辅料储存区、储罐区、物料装卸区、固体废物贮存区(含危险废物贮存库)、污水处理系统及排水汇集区域,并结合地表径流方向及地下水流向、地下构筑物分布情况进行合理调整。通过规范化踏勘与科学布点,可有效提升调查结果对实际污染风险的反映能力^[2]。

4.2 建设用地土壤与相关介质采样检测技术要求

建设用地土壤与相关介质采样检测以获取真实、可靠的环境数据为目标,重点控制采样深度、样品数量与检测精度。土壤采样通常分为表层与深层两个层级,表层采样深度控制在 0m—0.5m 范围,深层采样延伸至 2.0m—6.0m 区间,以反映污染在垂向上的迁移特征。在存在地下水暴露风险的地块,同步开展地下水采样,采样深度与地下水埋深相匹配,检测结果以 mg/L 作为计量单位。检测指标围绕重金属、有机污染物等高风险因子、有毒有害物质及潜在特征污染物设置,土壤检测结果以 mg/kg 表示。采样与检测过程需保持方法一致性,确保不同点位数据在统计分析中的可比性,为隐患验证提供稳定数据支撑。

4.3 建设用地土壤污染隐患调查结果的综合判读

建设用地土壤污染隐患调查结果的综合判读以定量数据分析为基础,通过对污染物浓度水平、空间分布及深度变化特征进行系统整合,形成对地块风险状态的整体判断。当同一污染物在相邻 3 个以上采样点位中均出现异常值,且最大值与最小值差异达到 2.0 倍以上时,可判定该区域存在明显污染隐患。在垂向分析中,若污染物在 2.0m 以下仍保持较高浓度水平,说明污染具有向深层迁移趋势,需提高风险关注等级。综合判读还需结合地块面积、污染介质类型及周边环境敏感目标分布情况,对隐患影响范围进行合理推断。通过系统判读调查结果,可为后续风险分级提供明确、量化的技术依据。

5 建设用地土壤污染风险分级指标体系构建

5.1 建设用地土壤污染风险分级的评价因子选择

建设用地土壤污染风险分级的评价因子选择以真实反映地块环境风险水平为基本目标,重点从污染程度、暴露条件与环境敏感性等维度构建指标体系。在污染程度方面,重点关注土壤中重金属、有机污染物、有毒有害物质及潜在特征污染物的浓度水平,采用 mg/kg 作为统一计量单位,对不同污染物进行横向比较。在暴露条件方面,结合污染分布深度、污染层厚度及地下水埋深等要素进行综合考虑,当污

染层厚度超过 1.0m 且地下水埋深小于 5.0m 时,风险关注等级相应提高。在环境敏感性方面,结合地块规划用途、周边居住人口密度以及生态敏感目标分布情况进行评价,当地块规划为居住或公共服务用地时,其风险权重明显高于工业用途。通过多维度评价因子的协同设置,可有效避免单一指标导致的风险误判,使分级结果更加符合建设用地实际利用需求^[3]。

5.2 建设用地土壤污染风险分级的判定方法

建设用地土壤污染风险分级的判定方法以综合评价为核心,通过对各类评价因子进行量化处理,形成具有可比性的风险判定结果。在具体实施过程中,将污染物浓度、污染范围及暴露条件等指标进行标准化处理,构建综合风险指数。污染物浓度采用实测值与对应评价基准值的比值进行计算,当比值大于 1.0 时,表明该因子对风险形成具有显著影响。空间因素通过污染面积占地块总面积比例进行表征,当比例超过 30% 时,风险贡献度明显上升。综合风险指数通过加权叠加方式形成,最终结果以无量纲数值表达。通过该判定方法,可实现不同地块风险水平的横向比较,为风险等级划分提供清晰、量化的技术支撑。

5.3 建设用地土壤污染风险等级划分标准

建设用地土壤污染风险等级划分标准以风险可控性和土地安全利用要求为依据,将综合风险水平划分为不同等级区间。当综合风险指数小于 0.5 时,可判定为低风险等级,该类地块土壤环境条件对建设活动影响较小;当综合风险指数处于 0.5—1.0 区间时,判定为中等风险等级,表明地块存在一定环境约束条件;当综合风险指数超过 1.0 时,判定为高风险等级,需在开发利用前采取针对性管控或修复措施。在风险等级划分过程中,同步考虑污染深度超过 3.0m 或地下水污染浓度超过相关评价价值的情形,对风险等级进行上调处理。通过明确风险等级划分标准,可为建设用地差异化管理和风险管控提供直接依据。

6 建设用地土壤污染风险分级结果的管理应用

6.1 建设用地土壤污染风险分级与用地准入衔接

建设用地土壤污染风险分级结果在管理实践中的核心作用体现在对用地准入条件的有效支撑,通过将风险分级结论嵌入土地供应和规划审批环节,可以实现环境安全要求与土地利用决策的深度融合。风险分级结果为不同类型建设用地设置差异化准入门槛,使土地开发活动在进入实施阶段前即明确环境约束边界,从源头降低污染风险外溢的可能性。通过将风险等级作为用地性质调整、出让方式选择及开发时序安排的重要参考依据,有助于推动土地资源配置更加审慎

有序,促进建设用地利用在安全性与可持续性层面的协调推进。

6.2 建设用地土壤污染风险分级与管控措施匹配

建设用地土壤污染风险分级为管控措施的精准匹配提供了明确依据,使环境管理由笼统要求转向分级施策。不同风险等级对应差异化的管理强度和技术要求,风险程度较低的地块以常规管理和过程监管为主,风险程度较高的地块则需在开发利用前落实针对性管控安排。通过将风险分级结果与管控措施直接衔接,可避免过度干预或管理不足的问题,提高管控资源配置效率。同时,风险分级结果为管控措施的持续评估提供参照基础,有助于形成以风险水平为导向的长效管理模式^[4]。

6.3 建设用地土壤污染风险分级的动态更新机制

建设用地土壤污染风险分级并非静态结论,其管理价值依赖于持续更新与动态调整机制的有效运行。随着土地利用方式变化、周边环境条件调整及管控措施实施,地块风险状态可能发生改变,需通过定期评估和信息补充对风险分级结果进行修正。动态更新机制强调信息积累与结果反馈的联动,通过持续跟踪地块环境状况,确保风险分级结论始终与实际情况保持一致。该机制有助于提升风险管理的前瞻性与灵活性,为建设用地长期安全利用提供稳定保障。

7 结语

建设用地土壤污染隐患排查与风险分级是保障土地安全利用和环境风险可控的重要基础性工作。通过构建系统化的隐患排查技术路径,并在此基础上形成科学合理的风险分级体系,有助于全面掌握建设用地土壤环境状况,提升污染防治工作的针对性与有效性。将风险分级结果与用地管理、准入控制及管控措施相衔接,可以推动土壤环境管理由事后处置向前端防控转变,促进土地资源利用与环境安全目标的协同实现。随着管理实践不断深化,完善风险分级应用机制,对于提升建设用地环境管理水平和保障城市可持续发展具有重要意义。

参考文献

- [1] 蒋婷梅.贺州市土壤污染重点监管单位管理现状与建议[J].低碳世界,2025,15(08):37-39.
- [2] 沈宗泽,郭观林,李慧颖,黄鑫,张萌,张雪峰,蒋晶,谢云峰.关于健全我国土壤污染隐患排查整改标准体系的若干思考[J].环境科学研究,2025,38(04):872-882.
- [3] 叶永梅,蔡河山.铝型材企业土壤污染隐患排查案例分析[J].中国资源综合利用,2024,42(09):150-154.
- [4] 陆露璐,刘芳,田弘.化工企业土壤和地下水污染隐患排查及自行监测研究与启示[J].皮革制作与环保科技,2023,4(06):176-179.

Engineering Practice Analysis of Turbine Shaft Alignment and Maintenance Quality Control

Baoyan Shan

Datang Qitaihe Power Generation Co., Ltd., Qitaihe, Heilongjiang, 154600, China

Abstract

Shaft alignment and maintenance quality control are key components for ensuring the safe and efficient operation of turbine units. The level of engineering practice in this area directly affects equipment reliability and economic benefits. Currently, within the industry, there are still many practical operational challenges, such as unreasonable benchmark selection, insufficient measurement accuracy, and non-standard maintenance procedures. These challenges restrict the improvement of unit operation quality. This paper takes engineering practice scenarios as the starting point, systematically reviews common issues in shaft alignment and maintenance quality control, and proposes targeted scientific management strategies to form a comprehensive, precise control plan. This provides technical support for on-site maintenance operations and helps enhance the operational stability and service life of turbine units.

Keywords

Turbine; Shaft alignment; Maintenance quality

汽轮机轴系对中与检修质量控制的工程实践分析

单宝岩

大唐七台河发电有限责任公司，中国·黑龙江 七台河 154600

摘要

轴系对中以检修质量控制属于保障汽轮机机组可安全且高效运行的关键部分，其工程实践水平会直接对设备可靠性以及经济效益产生影响，当前在行业内部该领域依然存在基准选择不合理、测量精度欠缺、检修工艺不规范等诸多实际操作方面的难题，这些难题对机组运行质量的提升形成了制约。本文以工程实践场景作为立足点，系统地梳理轴系对中以检修质量控制的常见问题，并针对性地提出科学的管控对策，来形成全流程精准管控方案，为现场检修作业给予技术支持，帮助提升汽轮机机组运行稳定性以及使用寿命。

关键词

汽轮机；轴系对中；检修质量

1 引言

汽轮机在火电、核电等能源领域里是核心动力设备，它运行的稳定性直接关系到能源供应的安全以及生产效益。轴系是汽轮机动力传输的关键载体，其中，对中精度与检修质量是决定机组运行效率、寿命以及故障风险的核心要素。在当前的工程实践当中，轴系对中基准失当、测量出现偏差以及检修工艺不规范等问题经常发生，容易引发振动、磨损等故障，造成停机损失。针对这类问题展开实践研究，构建科学的管控体系，有着迫切的行业实践需求。

2 汽轮机轴系对中与检修质量控制工程实践常见问题

2.1 轴系对中工程实践核心问题

轴系对对在汽轮机机组稳定运行保障方面处于核心地位。然而，在工程实践进程里，它容易受到基准选择、测量精度、工况适配以及调整方案等多种因素的作用，滋生出各种各样的质量隐患。基准选择不合理是最为主要的问题所在。在一些工程当中，存在将静止部件错误地用作对中基准的情况，没有充分考虑到汽轮机运行时热胀冷缩会对基准位置产生改变；基准面清理得不够彻底，残留有油污、铁屑等杂质，这直接造成了基准偏差，对后续的对中精度产生影响。

测量精度不足的问题也较为明显。一方面，部分项目依旧使用精度有限的传统百分表，与激光对中仪等高精度设备相比较，测量误差明显增大；另一方面，现场振动、温度波动等环境干扰没有得到有效的控制，再加上操作人员技能

【作者简介】单宝岩（1993-），男，中国吉林公主岭人，本科，工程师，从事火电厂汽轮发电机组研究。

欠缺所引发的读数偏差,降低了测量数据的可靠性。

热态与冷态对中不协调的问题容易被忽略。多数工程仅仅关注冷态对中数据的校准,没有充分考虑机组运行时各个部件热膨胀差异所引发的轴系偏移。而且,热态对中测试工况的设置缺乏科学性,无法精确模拟实际运行状态,致使冷态校准数据与热态运行需求不匹配。

对中调整方案不合理直接影响整改效果。部分作业存在调整顺序混乱、单次调整量把控不当等问题,并且没有结合轴系整体刚度特性来优化调整策略,导致调整后的轴系仍然存在隐性偏差,在运行过程中容易引发振动、磨损等故障。

2.2 检修质量控制工程实践核心问题

检修质量控制对于汽轮机机组安全稳定运行而言非常关键,是关键的保障所在。然而,在其工程实践过程当中,存在着多维度的管控漏洞,这直接对检修成效以及机组运行可靠性产生了影响。零部件装配精度管控方面的缺失是其中一个核心隐患,具体体现为:联轴器螺栓孔配合间隙超出标准范围,在传动过程中使得受力不均匀;轴承装配存在过紧或者过松的状况,破坏了润滑系统的稳定性,还加剧了部件的磨损;转子轴向窜动量的调整不合适,容易引发动静部件之间的摩擦,埋下故障隐患。

检修工艺规范性不足同样对质量提升起到了制约作用。在转子清理环节存在残留油污、杂质等情况,影响了装配精度以及密封性能;密封件安装流程不规范,压缩量控制不当,容易导致泄漏故障;焊接、紧固等关键工序没有严格依照工艺要求执行,出现螺栓力矩不均匀等问题,降低了连接的可靠性。

质量检测环节较为薄弱放大了质量风险。部分工程对于关键尺寸没有进行复核检测,无法及时发现装配偏差;超声、磁粉等无损检测的覆盖面不够,难以排查隐蔽部位的缺陷;检测数据记录不完整或者失真,导致质量问题追溯存在险阻。

人员与管理层面存在的短板是问题产生的深层原因。检修人员专业技能培训不足,对于新工艺、新设备的操作熟练程度不够;质量责任制没有得到有效落实,责任划分模糊导致问题出现后相互推诿;多个班组协作时流程衔接不顺畅,存在交接验收漏洞,形成了质量管控的盲区。

3 汽轮机轴系对中与检修质量控制工程实践解决对策

3.1 针对轴系对中常见问题的解决对策

科学地挑选以及处理对中基准,乃是保障对中精度的关键起始点。在工程实践里,应当摒弃传统的静止部件基准模式,优先选用转子中心孔、轴颈等动态基准。这类基准可同步跟随着转子的运行姿态,切实规避台板变形、基础沉降等因素所引发的基准偏移。在基准确立之前,需要进行精细化处理:运用120目砂纸对基准面进行环形打磨,去除氧化

皮、划痕以及油污;打磨之后,用无水乙醇擦拭干净,保证基准面平面度误差 $\leq 0.02\text{mm/m}$;结合机组设计参数以及历史运行数据,借助热力计算来确定基准补偿系数,着重考量高压缸、中压缸等关键部件的热膨胀量。比如,300MW机组一般需要预留0.15-0.25mm的热态补偿量,达成冷态基准与热态运行状态的精确适配,从根源上消除基准偏差隐患^[1]。

要提升测量精度,就得构建“设备-环境-人员”三位一体的管控体系。在设备选型方面,全面推行激光对中仪来替代传统百分表,它的测量精度可达到0.001mm,而且拥有数据自动记录与偏差分析功能,可有效地降低人为读数误差;建立设备全生命周期校准机制,每季度委托第三方计量机构开展精度校验,日常存放需要放置在恒温干燥环境中,避免振动与湿度变化对设备性能产生影响。在环境优化方面,测量作业要避免开邻近设备启停时段,对现场振动源采取铺设隔振垫的措施,同时将环境温度波动控制在 $\pm 1^\circ\text{C}$ 范围内,必要时搭建临时保温棚,防止温度梯度致使轴系形变。在人员能力提升方面,开展专项技能培训,内容包含激光对中仪操作规范、误差识别技巧、数据修正方法等;培训之后,需要依靠实操考核,考核合格才可以上岗;定期组织案例研讨,分析典型测量偏差案例,总结现场实操经验,提升人员应对复杂工况的测量能力。

构建热态与冷态协同对中体系,是解决工况适配问题的核心所在。借助有限元仿真软件搭建轴系热力模型,输入机组在不同负荷以及不同蒸汽参数状况下的运行数据,以此精确预判各个轴承座、转子的热膨胀量以及轴系的偏移趋势,形成热态对中预判报告。依据预判结果开展多工况热态对中测试,测试期间运用在线监测系统实时采集轴系对中数据、轴承温度、振动值等参数,着重记录满负荷稳定运行两小时后的对中数据,形成热态对中数据库。凭借对比热态与冷态对中数据,反向修正冷态对中参数。像某600MW机组热态运行时高压转子轴向膨胀量为2.8mm,依据此将冷态对中时的轴向偏差调整量设定为0.3mm,保证机组热态运行时轴系处于最优对中状态,彻底解决冷态校准与热态运行脱节的问题。

优化对中调整流程,要遵循“有序精准、分步实施”的原则,防止盲目调整造成二次偏差。首先,制定标准化调整流程,明确“先粗调后精调、先两端后中间”的操作顺序:粗调阶段,借助调整轴承座垫片厚度实现轴系大致对中,控制径向偏差 $\leq 0.1\text{mm}$ 、轴向偏差 $\leq 0.05\text{mm/m}$;精调阶段,采用百分表实时监测,结合激光对中仪数据进行微量调整,实施分步微量调整策略,每次调整量控制在0.02mm以内,调整后静置40分钟,等轴系完全稳定后再进行测量,避免调整后轴系回弹引发的偏差。同时,开展轴系整体刚度测试,采用脉冲激振法获取轴系刚度分布曲线,针对刚度较弱区域适当减小单次调整量,提高调整稳定性;对刚度较强区域可适度优化调整节奏,提升调整效率。调整完成后,需进行多

工况验证,依次开展空载、半负荷、满负荷试运行,实时监控轴系振动、轴承温度等参数,保证调整效果契合机组运行要求。

另外,要建立对中质量长效管控机制,把对中数据纳入机组检修档案,定期对比分析不同检修周期的对中数据,预判轴系偏移趋势。针对老旧机组,结合设备老化程度制定差异化对中策略,适当缩短对中检测周期。借助基准精准管控、测量精度提升、热冷态协同适配及调整流程规范的协同实施,可全面解决轴系对中工程实践中的各类问题,提升对中质量。实践说明,采用上述对策后,机组轴系振动值可控制在 2.5mm/s 以下,轴承温度稳定在 75°C 以内,有效降低故障停机率,延长机组使用寿命,为汽轮机机组安全高效运行提供核心技术保障。

3.2 针对检修质量控制常见问题的解决对策

强化装配精度管控,对于提升检修质量而言是极为关键的环节,需要从工艺、工具以及检验这三个方面构建起闭环管理。在工艺管控方面,应当制定出非常详细且有针对性的装配工艺卡,清晰地明确各个关键部件的装配技术参数,着重标注出联轴器螺栓孔配合间隙、轴承装配间隙以及转子轴向窜动量等核心指标所允许的偏差范围,附上装配步骤的示意图以及关键控制点的说明,以此为现场操作提供精确的依据。在工具选用方面,大力推广力矩扳手、百分表以及千分尺等精密装配工具。针对关键螺栓紧固作业,运用数显力矩扳手来保证紧固力矩均匀且一致,防止出现人工操作偏差;建立起工具全生命周期管理台账,定期开展精度校准工作,杜绝不合格工具投入使用。在检验制度方面,严格推行装配前零部件的复检制度,组织专业人员对零部件的尺寸精度、表面质量以及配合公差进行全面的复核,重点排查运输以及存放过程中可能出现的变形、损伤问题。对于不合格零部件坚决不给予装配,从源头上规避装配精度方面的隐患^[2]。

规范检修工艺标准,应以核心工序为基础,打造一种包含“操作规范、过程管控以及标准引领”的管理模式。首先,要对核心工序展开梳理,针对像转子清理、密封安装、焊接紧固这类关键环节,制定专门的操作规范:转子清理要运用高压清洗并结合人工精细打磨的办法,将表面的油污、积碳、杂质彻底清除,以此保证表面粗糙度契合装配要求;密封安装要严格把控密封件的压缩量,依据密封材质以及工况参数精确调整安装间隙,防止因压缩量不足而造成泄漏或者因过度压缩致使密封件损坏;焊接紧固工序要明确焊接材料选型、焊接电流、电压等参数,螺栓紧固采用“分次对称

紧固”工艺,保证连接可靠性。其次,要设置工艺控制点,对关键工序实施旁站监督,安排技术骨干全程跟踪操作流程,及时纠正不规范的操作行为,对工序质量进行实时确认。编制标准化作业指导书,整合各工序的操作规范、质量要求、安全注意事项等内容,发放给每一位检修人员,借助岗前培训、现场交底等方式保证全员掌握,达成检修工艺的标准化、规范化执行。

完善质量检测体系,是把控检修质量的关键防线。要构建“全流程覆盖+重点强化+数据追溯”的检测网络,建立“全流程检测+重点复核”机制,把检测环节贯穿检修全过程,从零部件入库检验开始,经过装配过程检测,直至检修完成后的整体测试,形成无死角检测链条。针对轴系对中精度、转子跳动量、轴承间隙等关键指标,实行“双人复核”制度,保证检测结果准确。扩大无损检测覆盖面,结合汽轮机结构特点,着重强化对转子叶片、联轴器焊缝、轴承座等隐蔽部位的检测,合理选用超声检测、磁粉检测、渗透检测等技术手段,精确排查内部缺陷、表面裂纹等问题。依据机组运行年限、工况条件,制定差异化无损检测方案,对高负荷、易损耗部件适当增加检测频次。规范检测数据记录与追溯流程,建立电子台账与纸质存档双重记录模式,详细记录检测时间、检测人员、检测设备、检测结果等信息,保证数据完整可追溯。搭建检测数据管理平台,对检测数据进行分类整理、分析,依靠数据趋势研判提前识别潜在质量风险,为后续检修优化提供数据支撑^[3]。

4 结语

围绕汽轮机轴系对中与检修质量控制的工程实践问题展开分析,构建了“问题梳理-靶向施策”的完整管控体系。通过科学选择基准、提升测量精度、规范检修工艺等对策协同发力,可有效解决实践中的核心痛点。该研究成果贴合现场实操需求,能为检修作业提供明确技术指引,显著降低机组故障风险,延长设备寿命,对提升能源领域汽轮机设备运行效益与安全保障水平具有重要实践意义。

参考文献

- [1] 岑国宝.浅析电厂汽轮机轴振大的原因及检修对策[J].家电维修,2024,(12):83-85.
- [2] 韩威.火电厂汽轮机辅机检修管理现状及对策探讨[J].中国设备工程,2022,(23):59-61.
- [3] 吕泰萍,马壮,滕九洋.火电厂汽轮机运行存在的问题与对策[J].现代工业经济和信息化,2021,11(11):235-237.

Analysis of the Causes of Steam Turbine Vibration in Thermal Power Units and Engineering Countermeasures

Chunlong Tian

Datang Qitaihe Power Generation Co., Ltd., Qitaihe, Heilongjiang, 154600, China

Abstract

As the core of production operation in the power system, steam turbines and their units directly affect the generating capacity and overall operation level of the units. However, during actual production, abnormal vibration of steam turbines is a common and significant issue that impacts operation. Once vibrations exceed permissible limits, it not only reduces the operational stability and generation efficiency of thermal power units but also can cause serious equipment damage, leading to load reduction or even shutdown of the units, thereby directly affecting the normal power supply of the system. At the same time, reduced power supply reliability also has a considerable impact on social production and residents' daily lives, resulting in increasing operating costs and a significant decline in economic efficiency. Therefore, analyzing the issue of abnormal steam turbine vibrations is of great importance. By thoroughly examining the vibration mechanisms, accurately identifying key causes, and implementing effective engineering control measures, it is possible to enhance the operational safety of steam turbines and ensure the long-term, stable operation of thermal power units.

Keywords

Thermal Power Unit; Causes of Steam Turbine Vibration; Engineering Countermeasures

火电机组汽轮机振动问题的成因分析与工程对策

田春龙

大唐七台河发电有限责任公司, 中国 · 黑龙江 七台河 154600

摘 要

汽轮机及其机组作为电力系统中生产运行的核心, 其运行情况将直接影响机组发电能力与整体运行水平, 但在实际生产期间, 汽轮机异常振动是比较常见且影响运行的重要问题, 一旦振动超出允许范围, 不仅会削弱火电机组的运行稳定性和发电效率, 且还会引起设备严重受损, 致使火电机组降负荷甚至停运, 从而直接影响发电系统的正常供电。同时, 供电可靠性下降也将对社会生产和居民生活产生较大影响, 导致运行成本不断上升和经济效益显著下降。因此, 通过对汽轮机异常振动问题展开分析有着重要作用, 通过详细分析振动产生机理, 准确识别关键诱因, 并采取有效工程控制措施, 有利于提升汽轮机运行的安全性, 确保火电机组长期、稳定的运行。

关键词

火电机组; 汽轮机振动问题成因; 工程对策

1 引言

火电机组作为电力系统中的重要设备, 其安全运行对电网可靠性有着直接关系, 汽轮机是火电机组核心设备之一, 有着转速高、结构复杂及运行工况多变等特征, 且对振动问题极其敏感。在实际运行期间, 汽轮机振动异常为火电机组非计划停运和设备故障重要原因之一, 不仅影响火电机组出力和运行寿命, 且还可对人身安全造成较大威胁, 因此, 仔细探讨火电机组汽轮机振动问题具有显示意义^[1]。近几年以来, 随着机组容量和参数的不断提高, 汽轮机转子长度增

加、轴系柔性增强, 振动肌力变得极其复杂, 传统处理方法已无法满足汽轮机安全运行要求, 而振动问题往往由机械、热力及流体等多方面因素形成, 且在不同运行阶段呈不同特征。基于实际运行数据, 本文就汽轮机振动成因进行深入探究, 并提出具有针对性的工程对策, 现内容综述如下:

2 火电机组汽轮机振动的概述

2.1 汽轮机振动概念

汽轮机振动具体指汽轮机在运行期间, 转子、轴系及支撑部件在内外力作用下产生的周期性或非周期性机械运动现象, 在实际运行过程中, 汽轮机为高速旋转设备, 其转子在蒸汽做功、轴承支撑及联轴器传递扭矩等条件下产生一定幅值的振动, 只要振动水平在设计允许范围内, 且具有稳

【作者简介】田春龙 (1994-), 男, 中国黑龙江绥化人, 本科, 工程师, 从事火电厂汽轮机方向研究。

定性,可被视为正常振动,不会对设备安全和运行造成不利影响。从工程角度来讲,汽轮机振动主要通过位移、速度或加速度等参数进行表征,其大小和变化趋势能充分反映轴系运行状态及设备健康状况^[2]。目前,振动产生原因较多,不仅与转子质量分布、轴系对中状态、轴承结构和润滑条件有关,且也可能受蒸汽参数波动、负荷变化及热态变形的影响。在不同运行工况下,振动特征存在较大差异,如启停过程中的过渡振动、稳态运行下的工频振动等,因此,汽轮机振动并非单一故障现象,而是一种重要的运行状态指标,通过对振动参数持续监测,可熟练掌握汽轮机运行状况,为设备运行调整、检修决策及故障预防提供重要依据。

2.2 汽轮机振动异常的危害

当汽轮机振动超过运行规定允许值时,可判定为振动异常,振动异常会对汽轮机及其相关设备造成较大影响:首先,长期超额振动会加剧转子、轴承及密封部件的机械磨损,减短重要零部件的使用寿命,提升设备故障发生率。其次,振动过大可导致轴承温度升高、油膜稳定性下降,进一步恶化轴系运行状态,形成恶性循环。从运行角度看,汽轮机振动异常往往限制机组负荷调节能力,迫使机组降负荷运行,直接影响发电效率和经济性。在严重情况下,振动可触发保护系统动作,引发机组非计划停机,不仅造成发电量损失,还会增加启动和检修成本。此外,频繁振动还会影响设备运行可靠性,增加运维管理难度。从安全层面分析,若振动问题未能及时发现和处理,可引发轴系失稳、部件松动甚至结构性损伤,对设备和人员安全构成较大威胁。因此,准确识别汽轮机振动异常及其危害,并早期采取有效控制措施,是确保火电机组安全、稳定运行的关键。

3 火电机组汽轮机振动问题的成因分析

3.1 油膜振荡引起的振动

油膜振荡是火电机组汽轮机中较为典型的一类振动问题,主要发生在滑动轴承支撑的转子系统中,当转子高速旋转时,轴承内形成承载油膜以支撑转子正常运行。在一定工况下,若润滑油黏度选择不当、供油压力不足、轴承间隙过大或转子负荷偏低,会导致油膜稳定性下降。此时,油膜产生自激振动,使转子绕平衡位置作周期性摆动,形成油膜振荡现象。此类振动常表现为振动频率低于转子转速,且随转速变化不明显,如果油膜振荡未能及时抑制,可进一步发展为油膜涡动甚至油膜失稳,对轴承和转子安全运行构成威胁。

3.2 摩擦引起的汽轮机异常振动

摩擦引起的汽轮机异常振动多发生于转子与静止部件之间间隙不足或发生接触的情况下,如轴封、隔板或汽封部位。当机组在启停过程、负荷波动或热态条件变化时,转子可能因轴系对中不良、基础沉降或热膨胀不均而发生偏移,导致局部摩擦现象。摩擦会使转子受力状态发生突变,引起

振动幅值和频谱特征异常,通常表现为振动不稳定、幅值波动明显,甚至伴随温度升高和异响,长期摩擦不仅会加剧设备磨损,还导致转子表面损伤,进一步恶化振动状态。因此,保证合理安装间隙、良好轴系对中及稳定热态条件,是减少摩擦振动的重要工程基础^[3]。

3.3 转子热变形引起的汽轮机异常振动

转子热变形是汽轮机运行中不可忽视的振动诱因之一,在机组启停、负荷调整或蒸汽参数波动过程中,转子各部位受热不均,容易产生温度梯度,导致转子发生不均匀膨胀。当热变形超过一定程度时,转子几何中心发生偏移,破坏原有的动平衡状态,从而引发振动异常。此类振动通常具有明显的工况相关性,在升温或降温阶段较为突出,如果热变形长期存在,还可诱发摩擦或加重轴承负荷。

3.4 气流激振引起的汽轮机异常振动

气流激振由蒸汽在汽轮机通流部件中流动不稳定而引起的一种振动形式,在部分负荷运行、汽流偏斜或通流部件结构不合理时,蒸汽流动可产生周期性脉动压力作用于转子和叶片,形成气流激振。该类振动往往与负荷变化密切相关,在特定工况下突然出现,且振动频率与汽流特性有关,气流激振不仅影响转子整体振动,还可对叶片造成附加动载荷,加大疲劳损伤风险。

4 火电机组汽轮机振动问题的工程对策

4.1 油膜振荡引起的振动工程对策

针对油膜振荡引起的汽轮机振动问题,应从润滑系统设计、运行控制及设备状态管理等方面采取综合工程对策:首先,应合理优化轴承结构形式,根据机组容量和转速特点,优先选用稳定性较好的可倾瓦轴承或改进型椭圆轴承,以提高油膜的阻尼能力和抗振性能。对于已投运机组,可通过技术改造方式改善轴承几何参数,增强系统稳定裕度。其次,应加强润滑油系统运行参数的精细化控制,严格控制供油压力、油温和油质,避免油温过高导致油膜承载能力下降。运行中应保持油温处于设计范围内,防止因黏度变化引发油膜不稳定,同时应强化润滑油净化管理,定期进行油质化验,防止杂质、水分和气体进入油膜,破坏其稳定状态。此外,应充分利用在线振动监测和轴心轨迹分析手段,对油膜振荡特征进行实时监控。当振动幅值或频谱特征出现异常趋势时,应及时调整运行工况,如适当改变转速或负荷,避开油膜不稳定区间,通过设备改造与运行优化相结合,可有效降低油膜振荡引起的汽轮机振动风险。

4.2 摩擦引起的汽轮机异常振动工程对策

针对摩擦引起的汽轮机异常振动,应重点从结构间隙管理、运行控制及检修质量保障等方面入手:首先,在设计 and 检修阶段,应严格控制转子与静止部件之间的径向和轴向间隙,特别是汽封、隔板和通流部件的装配精度,确保在各种工况下均具备足够的安全裕量,检修过程中应重点检查密

封部件磨损情况,防止因装配偏差造成运行中擦碰^[4]。其次,应加强机组启停及变工况过程的运行管理,运行人员应严格控制升速、升温和负荷变化速率,避免汽缸与转子热膨胀不同步而引发局部摩擦。在发现振动或轴位移异常时,应及时采取降负荷、稳参数等措施,防止轻微摩擦发展为严重机械损伤。此外,应强化状态监测与故障预警能力,通过轴振、瓦振、轴向位移及温度监测系统,综合判断是否存在摩擦征兆。一旦确认异常,应及时安排停机检查,消除隐患,通过规范运行操作与提高检修质量,可有效减少摩擦引起的汽轮机异常振动。

4.3 转子热变形引起的汽轮机异常振动工程对策

针对转子热变形引起的汽轮机异常振动,应重点采取热工管理与设备状态控制相结合的工程措施:首先,在运行管理方面,应严格执行机组启停曲线和操作规程,合理控制升温、升速速率,避免转子产生过大的热应力,特别在冷态启动和热态再启动过程中,应充分保证转子受热均匀,防止局部温差过大引发热变形。其次,应加强汽缸和转子热态监测,通过转子膨胀、汽缸膨胀及温度分布监测系统,实时掌握设备热态变化情况。当发现热膨胀异常或趋势不一致时,应及时调整运行参数,必要时降低负荷或中止升速过程,防止振动进一步扩大。在检修和维护方面,应重视转子本体状态管理,定期检查转子是否存在弯曲、应力集中或材料性能退化问题,对存在隐患的转子应进行热校直或修复处理。同时,应确保汽缸保温结构完整,减少外界环境对热分布的影响,通过规范运行与强化热态管理,可有效抑制转子热变形引起的异常振动。

4.4 气流激振引起的汽轮机异常振动工程对策

针对气流激振引起的汽轮机异常振动,应从运行工况优化和通流部件管理两个方面实施工程对策:首先,在运行控制方面,应合理安排机组负荷区间,尽量避免长时间运行于气流激振敏感工况,通过优化负荷分配和参数调整,使机组避开易发生激振的临界区域,从运行层面降低振动风险。其次,应加强通流部件的检查与维护,定期检查叶片、隔板和喷嘴等部件的磨损、变形及积垢情况,防止通流面积变化导致气流分布不均^[5]。检修中应保证叶片安装角度和间隙符

合设计要求,避免因局部气动不平衡引发激振现象。此外,可结合技术改造手段,提高机组抗气动激振能力,如通过优化叶片结构、改善通流通道形状或调整密封结构,降低气流脉动强度。同时,利用振动监测系统分析振动频率特征,识别气流激振特征信号,及时采取调整措施,通过运行优化与设备改进相结合,可有效控制气流激振引起的汽轮机异常振动。

5 结语

汽轮机振动问题贯穿火电机组运行的整个过程,是影响机组安全性、经济性的关键因素之一,通过对汽轮机振动问题深入分析得出,其产生并非单一原因所致,而是由转子系统、轴承支撑、热力状态及气动因素等多方原因共同作用的结果,因此,振动治理必须坚持系统性和针对性相结合的原则。工程实践表明,单纯依靠事后处理难以从根本上消除振动隐患,只有将工程对策前移到设计、安装、运行和检修各环节,才能有效降低振动发生概率。通过加强设备结构优化、严格运行参数控制、提升状态监测和故障预警能力,可早期发现和处置振动问题。同时,规范操作行为、提高检修质量,对保障汽轮机长期稳定运行具有重要意义。由此可见,汽轮机振动处置是一项长期且繁重的工程任务,随着国内工程监测技术和运行管理水平的不断提升,火电机组汽轮机振动问题能得以控制,同时也为火电机组的安全、稳定及长期运行提供重要保障。

参考文献

- [1] 张兴凯.600MW火电机组汽轮机回热加热器泄漏原因分析及解决措施[J].河南科技,2025,52(13):29-32.
- [2] 周士博,庞凯元,张宝琴.火电机组汽轮机冷端系统优化改造技术分析[J].仪器仪表用户,2024,31(05):77-79.
- [3] 臧利永,张涛.超超临界火电机组给水泵汽轮机20Cr13钢动叶片断裂原因[J].理化检验-物理分册,2024,60(05):74-78.
- [4] 文立斌,胡弘,李俊,等.汽轮机组功率振荡的关键影响因素仿真研究[J].武汉大学学报(工学版),2024,57(02):231-240.
- [5] 俞凯耀,金波,周锦.火电机组给水泵汽轮机振动跳闸的原因与防范措施[J].湖州师范学院学报,2024,46(02):33-38.

Research on Key Technologies for Quality Control of Mechanical and Electrical Installation Engineering in Municipal Wastewater Treatment Plants

Jibin Shao

Shouchuang Aihua (Tianjin) Municipal Environmental Engineering Co., Ltd., Tianjin, 300000, China

Abstract

Against the backdrop of the continuous development of urban sewage treatment facilities towards scale, intensification, and intelligence, the quality of mechanical and electrical installation engineering has become an important factor restricting the stable operation and treatment efficiency of sewage treatment plants. Compared to civil engineering, the mechanical and electrical system of municipal sewage treatment plants has the characteristics of multiple equipment types, strong cross disciplinary expertise, complex operating environment, and high coupling with process flow. Especially at the level of electrical and automation systems, higher requirements are put forward for installation accuracy, system coordination, and commissioning quality. Research has shown that by strengthening design disclosure and installation planning, optimizing the installation process of electrical and automatic control systems, improving the debugging and verification mechanism, and constructing a full process quality control system, the quality level of mechanical and electrical installation engineering in municipal sewage treatment plants can be significantly improved, providing strong guarantees for the safe, stable, and efficient operation of sewage treatment facilities.

Keywords

municipal sewage treatment plant; Mechanical and electrical installation engineering; Quality Control; Electrical self-control; system debugging

市政污水处理厂机电安装工程质量控制关键技术研究

邵继宾

首创爱华(天津)市政环境工程有限公司, 中国·天津 300000

摘要

在城市污水处理设施向规模化、集约化与智能化方向持续发展的背景下,机电安装工程质量已成为制约污水处理厂稳定运行与处理效能的重要因素。相较于土建工程,市政污水处理厂机电系统具有设备类型多、专业交叉强、运行环境复杂以及与工艺流程高度耦合等特点,尤其在电气与自动化系统层面,对安装精度、系统协调性及调试质量提出了更高要求。研究表明,通过强化设计交底与安装策划、优化电气与自控系统安装工艺、完善调试验证机制并构建全过程质量控制体系,可显著提升市政污水处理厂机电安装工程质量水平,为污水处理设施的安全、稳定与高效运行提供有力保障。

关键词

市政污水处理厂; 机电安装工程; 质量控制; 电气自控; 系统调试

1 引言

随着城市化进程不断加快,市政污水处理厂作为城市基础设施的重要组成部分,其运行稳定性与处理能力直接关系到城市生态环境安全和公共卫生保障。近年来,污水处理工艺不断升级,处理规模持续扩大,厂内机电系统在设备数量、控制层级和系统复杂性等方面均呈现显著提升趋势。机电安装工程已由传统的“设备就位与通电运行”阶段,逐步演变为涉及多专业深度协同、系统高度集成的复杂工程环

节。因此,从工程实施层面系统研究市政污水处理厂机电安装工程的质量控制关键技术,对于提升工程建设品质与运行可靠性具有重要现实意义。

2 市政污水处理厂机电安装工程的技术特征与质量控制需求

2.1 污水处理厂机电系统的工程技术特征

市政污水处理厂机电系统是在特定处理工艺与复杂运行环境条件下构建的综合性工程系统,其技术特征显著区别于一般工业建筑机电安装工程。污水处理厂内部通常按照处理流程布置多个功能单元,机电设备需在不同构筑物之间分散设置,并与提升、曝气、回流、污泥处理等工艺环节形成

【作者简介】邵继宾(1986-),男,中国山东菏泽人,本科,工程师,从事机电安装工程研究。

连续运行关系。这种布局方式决定了机电系统在空间分布、设备选型和控制逻辑上具有较强的系统耦合性,任何局部安装偏差都可能对整体运行稳定性产生放大效应。从运行环境看,污水处理厂长期处于高湿度、高腐蚀性气体及复杂电磁环境中,电气设备与自动化系统在使用寿命、安全可靠性和信号稳定性方面面临较大挑战。尤其是现场动力设备数量多、启停频繁,电机负载变化幅度大,对供配电系统的稳定性和保护协调性提出了更高要求^[1]。上述技术特征决定了污水处理厂机电安装工程不仅是设备安装过程,更是系统集成与运行可靠性构建的重要阶段。

2.2 机电安装工程质量控制的现实需求与目标

在市政污水处理厂建设实践中,机电安装工程质量直接关系到处理系统能否实现长期稳定运行,也是工程投运初期问题集中暴露的关键环节。部分项目在竣工投运后出现设备运行不稳定、自控系统频繁报警或联动失效等现象,其根源往往并非工艺设计问题,而是机电安装阶段质量控制不到位所致。这表明,传统以“安装完成”为导向的质量控制模式已难以适应污水处理厂机电系统复杂化和智能化的发展需求。从工程管理角度看,机电安装质量控制应由单一工序检验转向系统运行效果导向,将电气系统安全可靠运行和自动化系统稳定控制作为核心目标。在施工阶段,不仅需要关注设备就位、接线完成等表观质量,更应重视系统之间的匹配关系和运行条件适应性;在调试阶段,应通过系统化验证手段检验安装质量对实际运行效果的支撑能力。基于上述需求,构建覆盖安装实施、系统调试与运行验证全过程的质量控制体系,已成为市政污水处理厂机电安装工程的重要发展方向^[2]。

3 市政污水处理厂机电安装工程常见质量问题分析

3.1 电气系统安装过程中易发质量问题

在市政污水处理厂机电安装工程中,电气系统承担着设备供电与运行保障的基础功能,其安装质量直接影响整体系统的安全性与可靠性。从工程实践情况看,电气系统质量问题多集中于电缆敷设、设备安装及接地系统构建等关键环节。由于污水处理厂构筑物分布范围广、设备点位分散,电缆路径较长且敷设环境复杂,若在施工过程中缺乏系统规划,容易出现敷设走向随意、固定方式不规范或与工艺管线交叉冲突等问题,增加后期运行与维护难度。而部分项目在电气设备安装过程中,对现场环境适应性考虑不足,未能充分结合高湿、高腐蚀工况采取针对性措施,导致设备防护效果与实际运行条件不匹配。在长期运行中,易引发端子锈蚀、接触电阻增大等隐患^[3]。接地系统方面,若施工过程中对接地连续性和等电位连接重视不足,容易形成局部接地失效现象,一旦发生设备漏电或雷感应,将对电气系统运行安全造成不利影响。这些问题虽在单一节点上表现不明显,但在

系统运行过程中往往相互叠加,放大为整体性质量风险。

3.2 自动化系统安装与调试中的典型质量隐患

相较于电气系统,自动化系统安装质量问题具有更强的隐蔽性和系统性特征,是市政污水处理厂投运初期运行异常的重要诱因之一。在实际工程中,常见问题包括现场仪表安装位置不合理、信号线路敷设抗干扰措施不足以及控制逻辑与工艺运行条件匹配度不高等。这类问题在安装完成后往往难以及时发现,但在系统联调或负荷变化条件下容易集中暴露,影响自动控制系统的稳定性。现场仪表安装若未充分结合工艺运行条件,可能导致测量数据偏离实际运行状态,使自动控制系统失去有效依据。同时,在施工过程中若未严格区分信号电缆与动力电缆敷设路径,或屏蔽、接地处理不到位,易引发信号干扰和数据波动,降低系统控制精度。在调试阶段,若仅关注单机设备动作而忽视系统整体联动验证,容易造成控制逻辑与实际工艺流程脱节,影响污水处理系统的连续稳定运行。因此,自控系统安装与调试质量问题往往具有“前期不显、后期集中显现”的特点,需要在工程实施阶段给予高度重视。

4 市政污水处理厂机电安装工程质量控制关键技术

4.1 电气系统安装质量控制的技术要点

在市政污水处理厂机电安装工程中,电气系统质量控制的核心在于保障供配电系统运行的安全性、连续性与稳定性。由于污水处理厂设备负荷类型多样、运行工况变化频繁,电气系统安装必须在满足设计要求的基础上,充分适应现场实际运行条件。在施工前阶段,应结合工艺流程和设备布置情况,对电气系统进行系统性梳理,明确配电层级、负荷分配及保护协调关系,为后续安装提供清晰的技术依据。在安装实施过程中,电缆敷设质量是影响电气系统长期运行可靠性的关键因素。应严格按照分区、分层原则进行敷设,合理控制电缆弯曲半径和固定间距,避免因机械应力或环境影响造成绝缘性能下降。在接地与等电位连接施工中,应通过连续性检测和电阻测试手段,系统验证接地效果,防止因局部接地缺陷引发设备运行风险。通过对上述关键技术环节的有效控制,可显著提升污水处理厂电气系统安装质量水平。

4.2 自动化系统安装与调试的关键技术控制

自动化系统作为市政污水处理厂实现稳定运行与精细化控制的重要支撑,其安装与调试质量直接影响系统整体控制效果。在安装阶段,自控系统质量控制应以信号准确、结构清晰和系统兼容为基本原则。现场仪表安装应充分结合工艺条件和运行环境,合理确定安装位置和取样方式,确保采集数据能够真实反映污水处理过程状态。同时,应重视信号线路的抗干扰设计,通过合理分离动力电缆与信号电缆敷设路径,并采取屏蔽、接地等技术措施,提高信号传输的稳定性。在调试阶段,自动化系统质量控制应从单点测试逐步过

渡至系统联动验证。通过对仪表信号、控制回路和执行机构逐一核查，确保控制逻辑与工艺运行要求高度一致。在系统联调和试运行过程中，应结合实际运行工况对控制参数进行动态优化，使自动化系统在不同负荷条件下均能保持稳定运行状态。实践表明，只有将安装质量控制与调试验证紧密结

合，才能充分发挥自动化系统在污水处理厂运行管理中的技术优势。

为进一步明确市政污水处理厂机电安装工程中电气与自动化系统的质量控制重点，结合工程实践经验，对关键控制环节及其质量风险进行归纳，如表1所示。

表1 市政污水处理厂机电安装工程关键质量控制要点对照表

系统类别	关键控制环节	主要质量控制要点
电气系统	电缆敷设	动力与控制电缆分层敷设，弯曲半径与固定间距符合规范要求
电气系统	配电柜安装	柜体基础平整牢固，垂直度、水平度满足技术要求，二次接线标识清晰
电气系统	接地与等电位连接	接地系统连续可靠，接地电阻符合设计及规范要求
自动化系统	现场仪表安装	仪表安装位置合理，测量条件满足工艺要求
自动化系统	信号线路敷设	信号电缆与动力电缆有效隔离，屏蔽与接地措施到位
自动化系统	系统调试与联动	控制逻辑与工艺流程一致，参数设置符合运行工况

5 市政污水处理厂机电安装工程全过程质量控制体系构建

5.1 以系统运行为导向的质量控制总体思路

市政污水处理厂机电安装工程的质量成效，最终体现在系统投运后的稳定性与可控性上。因此，其质量控制不应仅停留在施工阶段的工序合格与验收通过，而应以系统运行效果为核心目标，构建贯穿设计理解、安装实施与运行验证的全过程质量控制思路。在工程前期，通过强化设计交底和技术交底，使施工人员充分理解污水处理工艺流程、电气系统结构以及自动化控制逻辑，避免因对工艺认知不足而导致安装偏差。尤其在电气与自控系统接口较为集中的关键部位，应提前开展技术协调，明确各专业之间的衔接关系。在施工实施阶段，应将质量控制重心前移，通过过程检查和关键节点控制，将问题消除在形成系统性隐患之前。相较于传统的结果性验收模式，这种过程导向的质量控制方式更有利于保障系统整体一致性。

5.2 全过程质量控制的实施机制与工程应用

在实际工程中，全过程质量控制体系的有效实施，有赖于技术措施与管理机制的协同推进。从技术层面看，应在机电安装过程中建立系统化的质量检查与记录机制，对电气接线、仪表安装、信号测试和系统联调等关键环节形成可追溯的技术资料，为后续运行维护提供依据。从管理层面看，应通过明确质量责任主体，强化施工单位、监理单位与建设单位之间的信息沟通，确保质量问题能够在第一时间得到反馈和处理。在试运行阶段，应结合污水处理厂实际负荷变化情况，对机电系统运行状态进行持续跟踪分析，重点关注电气系统运行稳定性和自动化控制系统响应特性。通过运行数据验证安装质量与控制效果的匹配程度，并在必要时对

参数设置和控制策略进行优化调整。实践表明，将质量控制延伸至试运行和初期运行阶段，有助于及时发现潜在问题，降低后期运行风险。通过构建系统化、动态化的全过程质量控制体系，可为市政污水处理厂机电安装工程质量提供持续保障。

6 结语

市政污水处理厂机电安装工程质量直接关系到污水处理系统的安全性、稳定性与运行效率。通过对电气与自动化系统安装特点、常见质量问题及关键技术控制要点的系统分析可以看出，机电安装质量控制应以系统协同和全过程管理为核心。实践表明，只有在工程实施中强化电气与自控系统安装的技术标准执行力度，完善调试验证机制，并构建系统化的质量控制体系，才能有效提升市政污水处理厂机电安装工程的整体质量水平，为污水处理设施长期稳定运行提供坚实保障。

参考文献

[1] 陈元栋. 机电安装工程中通风空调系统安装技术与质量管理措施研究[J].建筑机械,2025,(12):69-71+76.DOI:10.14189/j.cnki.cm1981.2025.12.003.

[2] 全辉跃. 智能建筑机电安装工程施工及质量控制探讨[J].城市建设理论研究(电子版),2025,(29):72-74.DOI:10.19569/j.cnki.cn119313/tu.202529024.

[3] 任建宇.机电安装工程中电气线路敷设的质量控制研究[C]//广西大学广西县域经济发展研究院.2025年第四届工程技术数智赋能县域经济城乡融合发展学术交流会议论文集.信息产业电子第十一设计研究院科技工程股份有限公司天津分公司,2025:42-44.DOI:10.26914/c.cnkihy.2025.047638.

Research on the Path of Intelligent Upgrading of Highway Mechanical and Electrical Systems Empowered by Mechatronics Technology

Wei Suo

Xinjiang Jiaoke Information Development Co., Ltd., Urumqi, Xinjiang, 830000, China

Abstract

Under the background of the convergence of the strategy of building a strong transportation nation and the digital China strategy, the intelligent upgrade of highway electromechanical systems has become a core issue in industry development. Mechatronics technology, through the deep integration of the closed loop of "perception-decision-execution," provides a key technical path to solve the dilemma of traditional system silos and improve the overall efficiency of the road network. This paper first elucidates the irreplaceable core value of this technology in achieving system integration, collaboration, and autonomous intelligence. It then analyzes the two major practical bottlenecks of insufficient integration and non-uniform standards in current electromechanical systems. Finally, it systematically proposes a specific intelligent upgrade path driven by mechatronics technology from four dimensions: reconstructing system architecture, deepening perception integration, forging decision-making centers, and weaving dense collaborative networks.

Keywords

mechatronics; highway electromechanical system; system integration

机械电子技术赋能公路机电系统智能化升级路径研究

索伟

新疆交科信息开发有限责任公司, 中国·新疆 乌鲁木齐 830000

摘要

在交通强国与数字中国战略交汇的时代背景下, 公路机电系统的智能化升级已成为行业发展的核心议题。机械电子技术通过“感知-决策-执行”的闭环深度融合, 为破解传统系统孤岛困境、提升路网整体效能提供了关键技术路径。本文将首先阐释该技术在实现系统一体化协同与自主智能方面不可替代的核心价值, 继而剖析当前机电系统存在的集成度不足与标准不统一两大现实瓶颈, 最后从重构系统架构、深化感知融合、锻造决策中枢、织密协同网络四个维度, 系统性地提出了以机械电子技术为驱动的具体智能化升级路径。

关键词

机械电子技术; 公路机电系统; 系统集成

1 引言

当前, 我国正深入实施交通强国战略, 并大力推进“新基建”与基础设施数字化升级, 为公路交通的智能化转型指明了方向。《“十四五”现代综合交通运输体系发展规划》等政策文件明确提出, 要推动先进信息技术与交通基础设施深度融合, 提升基础设施全要素、全周期数字化水平。在此背景下, 公路机电系统作为保障路网运行的神经中枢, 其智能化水平是政策落地关键。传统机电系统因固有技术架构与建设模式, 面临集成困难、数据割裂、响应迟滞等挑战, 难

以满足未来智慧路网要求。探索以机械电子技术为核心的智能化升级路径, 是响应国家战略部署的必然选择, 也是破解行业瓶颈、实现路网能效跃升的迫切需求。

2 机械电子技术赋能公路机电系统智能化升级的重要性

机械电子技术的深度融合, 为公路机电系统的演进注入了新的生命动能, 使其从传统的功能执行单元跃升为具备自主智能的有机体系。通过集成传感、控制与执行功能, 机械电子装置将离散的物理设备转化为具有环境感知、自主决策与精准执行能力的智慧单元。多模态传感器的融合应用, 使系统能够实时捕捉路面状态、交通流与气象变化, 形成对交通环境的全方位感知; 嵌入式智能与边缘计算技术的

【作者简介】索伟(1990-), 男, 回族, 中国新疆乌鲁木齐人, 本科, 中级职称, 从事机械电子/电力研究。

引入，赋予机电设备在复杂场景下的自主分析与即时响应能力，显著提升系统应对突发事件的敏捷性与准确性；而高精度伺服驱动、智能执行机构的应用，则实现了照明控制、信息发布、应急处置等环节的精细化、自适应调节。这种“感知-决策-执行”一体化的技术路径，不仅优化了单点设备性能，更推动了路网级协同控制与资源优化配置，从而在提升通行效率、保障行车安全、降低运营能耗等方面发挥关键作用，为构建安全、高效、绿色的智慧公路系统奠定坚实的技术基础。

3 当前公路机电系统存在的主要问题

3.1 系统集成度不足制约功能发挥

当前公路机电系统的各类设备与子系统往往呈现各自为政的状态，系统之间缺乏有效的深度整合。监控、收费、照明、通风、供配电等子系统多独立建设、独立运行，形成多个信息与控制孤岛。例如，隧道照明控制系统与交通流量监测系统之间缺乏联动，无法实现依据实时车流量对灯具功率与开启数量进行精准调节；收费站的车辆通行数据与主线交通监控系统之间未能打通，难以基于收费数据预测和疏导主线车流。这种割裂状态使得系统整体效能停留在简单叠加层面，而非实现“1+1>2”的协同效应。设备之间的信息壁垒导致管理效率低下，在面对突发事件时难以快速形成统一、高效的跨系统联动响应机制，资源无法得到最优配置，限制了机电系统作为公路“神经网络”本应发挥的全局性支撑与保障作用。

3.2 标准体系与数据融合障碍

公路机电系统在长期发展过程中，由于缺乏全国统一、前后贯通的强制性技术标准与数据规范，不同时期、不同供应商建设的子系统在接口协议、数据格式、通信规约等方面存在显著差异。这种异构性导致系统间的互联互通存在实质性障碍。实践中，常见的控制总线协议与网络通信协议并存，不同数据采集设备的采样频率、精度、编码方式各异，使得从底层传感器采集的原始数据到上层管理平台进行分析处理时，面临数据“听不懂、用不上”的困境。例如，环境监测设备采集的能见度数据格式可能与交通事件检测系统的输入要求不符，需要额外的、复杂的转换与适配，这不仅增加了系统集成的复杂性与成本，也引入了延时和误差风险。标准体系的碎片化与数据的异构性，严重阻碍了机电系统数据的汇聚融合与综合开发利用，使得系统难以形成统一的态势感知与决策支持能力。

4 机械电子技术赋能公路机电系统智能化升级的实践路径

4.1 重构机电融合架构

推动公路机电系统向“感知-决策-执行”一体化的融合架构演进，是迈向智能化的基石。这意味着要从传统的功能模块简单堆叠，转向构建以统一数据与智能模型驱动的体

系。在设备端，应大力推动集成化的“智能机电单元”的发展，通过将环境感知技术、本地计算能力与精准执行机制等核心功能进行深度融合，实现高效协同与智能控制，从而提升整体系统的响应速度与操作精度。

例如，新一代的照明灯杆可集成气象传感器、高清摄像机和通信模块，使其能够自主感知天气与交通状况，并执行最优的照明策略（如图1）。在路段或区域层面，需部署具备数据汇聚与处理能力的边缘计算节点，对来自多个终端的数据进行快速融合与实时分析，支撑本地化的闭环控制，如隧道的自适应通风与照明联动。在云端，构建覆盖全网的数字孪生平台，对物理系统进行高精度虚拟映射，通过仿真推演和模型优化，制定全局性的调度与运维策略，并下发至边缘与终端。这种端边云协同的架构，本质上是将机械的精确物理控制、电子的敏捷信息处理与智能的深度数据分析融为一体，能够有效打破信息孤岛，实现从“单体智能”到“系统智能”的跃迁，为更高层次的自主协同与全局优化奠定坚实、灵活且可扩展的架构基础。



图1 智能照明灯杆图

4.2 深化多模态感知融合

实现公路环境的精准感知，依赖机械电子技术对多源异构传感信息的深度融合与智能解析。单一的传感器难以应对全天候、全路况的复杂环境，必须发展多模态感知的“机电一体化”前端。这需要从硬件层面推动传感模块的微型化、低功耗与高可靠集成，例如，将毫米波雷达的测速测距能力、热成像摄像机的温度感知能力与高清可见光摄像机的纹理识别能力，封装于统一的防护壳体内，形成“一体化智能感知终端”，从而可靠捕捉车辆轨迹、车型分类、路面异常、能见度变化等多维信息（如图2）。

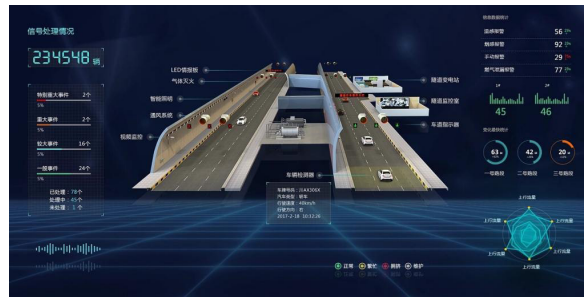


图2 公路隧道一体化智能感知终端图

在信息处理层面,需充分发挥嵌入式 AI 芯片的强大算力,在数据采集的最前端对不同物理特性的各类感知信号进行精准的时序同步与空间配准,继而完成高效的特征提取与多目标关联,实现真正意义上的“前融合”。通过这一流程,系统能够生成对交通参与者、路面实时状态以及周边环境事件的全方位、统一的结构化描述,为后续的智能分析与决策提供高质量的数据基础。这种深度融合不仅提升了感知的精度与鲁棒性,例如在夜间或雨雾条件下仍能有效工作,更重要的是,它为后续的决策与控制提供了语义更加清晰、维度更加丰富的“环境一张图”,使得系统能够“看得全、辨得清、认得准”,为智能决策提供高质量的输入。

4.3 构建分层决策体系

智能化升级的核心是从程序化的被动控制,转变为基于实时情境的自主决策与主动干预。这要求将智能“大脑”嵌入到机电系统的关键节点中。通过将经过优化的控制算法与决策模型,以嵌入式软件的形式植入边缘控制器、区域服务器乃至关键机电设备(如可变信息标志控制器、隧道通风主控器),使其具备在一定规则和权限下的自主分析与判断能力。

例如,隧道入口部署的环境感知终端一旦实时检测到能见度数值低于预设的安全阈值,与其高度协同的边缘控制器无需依赖远程云端的指令回传,即可根据本地预置的“事件-预案”联动知识库进行自主判断与决策,并迅速执行多项操作:自动调节照明系统以提高隧道内光照强度、实时驱动情报板发布醒目的警示信息,同时及时启动风机系统加强空气流通效率。这一基于“边缘智能”的分布式决策机制,显著压缩了从环境感知到智能判断再到设备执行的整个闭环过程的响应时间,将传统响应延迟从分钟级缩短至毫秒级或秒级水平,从而极大提升了在低能见度等突发状况下交通事件的处置效率与行车安全水平。同时,这些分布式的决策节点并非孤岛,它们接受云端数字孪生系统下发的优化策略与模型更新,并将本地执行效果数据反馈至云端,形成“在线学习、持续进化”的闭环,使系统的决策能力随着数据积累和算法迭代而不断增强,逐步从“执行预案”向“生成最优策略”演进。

4.4 构建协同控制网络

真正的系统级智能化,其实现离不开对监控、收费、通信、照明、供电等多个机电子系统之间数据与指令的无缝流转和高效协同的高度依赖。这些子系统必须能够实时交

互、共享信息,并基于统一逻辑进行联动响应,才能支撑起复杂场景下的智能决策与自动化运行。

首先,需推动制定基于开放标准的统一设备接口与数据通信协议,使遵循新标准生产的各类传感器、控制器和执行机构能够实现“即插即用”与互联互通。其次,构建面向公路业务的统一数据模型与语义标准,对“车辆拥堵”“交通事故”“设备故障”等业务概念进行明确定义,使得监控系统识别的事件能够被收费、通信等系统无歧义地理解与处理。在此基础上,建立基于事件驱动的协同控制平台,该平台作为“交通大脑”的协同中枢,接收来自全路网各类智能机电单元上报的事件与状态信息,通过预置的协同策略库或实时运算,生成跨子系统的联动控制指令。例如,当协同平台收到“主线严重拥堵”事件时,可自动触发指令,联动上游收费站实施入口管控、发布诱导信息,并调整沿线可变限速标志,形成一体化的诱导与管控方案。通过构建这一“标准-数据-平台”三位一体的协同网络,分散的机电设备得以整合为有机整体,实现从“单点响应”到“全局联动”的质变。

5 结语

机械电子技术与公路机电系统的深度融合,标志着公路基础设施从被动响应向主动服务的深刻变革。通过架构重构、感知融合、决策赋能与协同网络构建的系统性路径,将有效克服当前系统存在的集成与协同障碍。这一过程不仅是技术的革新,更是公路运营管理模式与服务体系的重塑,其目标在于构建一个更安全、高效、绿色、智能的道路交通环境。未来,随着技术迭代与生态完善,以机械电子技术为基石的智能化升级将持续释放潜能,为人民群众的美好出行和交通运输的高质量发展提供持久而可靠的动力。

参考文献

- [1] 孙俊峰.公路交通机电通信技术的应用与研究[J].新潮电子, 2024(2):106-108.
- [2] 郭世君.现代通信技术的特征及其在高速公路机电系统中的应用[J].新潮电子, 2025(15):181-183.
- [3] 罗祥红.高速公路机电工程中的通信系统应用[J].电子技术, 2024(2):170-171.
- [4] 贾涛英.基于人工智能的公路机电设施智能监测与维护系统分析[J].电子技术, 2025(6):162-163.
- [5] 王先辉.高速公路机电运维信息化管理措施[J].电子乐园, 2023(1):0127-0129.

Research on the Control System of Four-bar Grab Door Seat Machine in Port

Helong Wang Kewei Wei

Henan Weihua Heavy Machinery Co., Ltd., Xinxiang, Henan, 453400, China

Abstract

This paper provides an in-depth analysis of the electromechanical control system for four-bar gantry cranes, focusing on its main mechanism components, electrical control system configuration, equipment control modes, and communication network architecture. The main mechanism section elaborates on the functions of support mechanisms, opening/closing mechanisms, luffing mechanisms, slewing mechanisms, and trolley mechanisms, establishing the foundation for system optimization. Regarding the electrical control system configuration, it details the high-voltage power supply, low-voltage electrical room, operator cab, and gantry beam compartment, emphasizing the importance of coordinated operations across these components. The equipment control modes section thoroughly examines single-support control modes, single-opening/closing control modes, hook mode control methods, grab mode control methods, and trolley control modes, proposing corresponding optimization strategies. The communication network architecture section clarifies the communication relationships between the PLC master station, frequency converters, and sub-stations, supporting real-time monitoring and fault diagnosis. This study provides a scientific basis for optimizing control systems in port four-bar gantry cranes, offering significant implications for enhancing port operational efficiency.

Keywords

grab door station; control mode; PLC; frequency drive

港口四连杆抓斗门座机控制系统研究

王合龙 魏可威

河南卫华重型机械股份有限公司, 中国·河南 新乡 453400

摘要

本文围绕四连杆门座机电控系统展开深入探讨,重点分析了其主机机构组成部分、电控系统配置、设备控制模式以及通讯网络架构。在主机机构部分,详细阐述了支持机构、开闭机构、变幅机构、回转机构和大车机构的功能与作用,为控制系统的优化提供了基础。电控系统配置方面,介绍了高压供电电源部分、低压电气房部分、司机室部分和门架梁仓部分的具体构成,强调了各部分协同工作的重要性。设备控制模式部分,深入研究了单支持控制工况模式、单开闭控制工况模式、吊钩模式工况控制方式、抓斗模式工况控制方式以及大车控制工况模式,并提出了相应的优化策略。通讯网络架构部分,解析了PLC主站与各变频器、子站之间的通讯关系,为系统的实时监控和故障诊断提供了支持。本研究为港口四连杆抓斗门座机控制系统的优化提供了科学依据,对提升港口作业效率具有积极意义。

关键词

抓斗门座机; 控制模式; PLC; 变频驱动

1 引言

四连杆门座机作为现代港口作业的核心设备,其电控系统的性能直接关系到作业效率与安全。本文聚焦于四连杆门座机电控系统的控制原理及方案,系统阐述主机机构组成、电控系统配置、控制模式及通讯网络架构,旨在为设备优化与维护提供理论支持。

本次论述主要只针对四连杆门座机电控系统控制原理及方案的讨论。

【作者简介】王合龙(1989-),男,中国河南商丘人,本科,工程师,从事数控技术研究。

2 主机机构组成

四连杆门座机主机机构的组成部分:

支持机构(工作机构)
开闭机构(工作机构)
变幅机构(工作机构)
回转机构(工作机构)

3 大车机构(非工作机构)

支持机构:

支持机构属于起升的一部分,主要包括支持电机、支持减速机、支持卷筒、支持钢丝绳等组成。

支持钢丝绳对应到抓斗上的连接点是最边上的两根绳,

此钢丝绳决定抓斗在空中位置高度控制，即支持机构钢丝头的位置高度及时抓斗实际位置高度。我们常说的抓斗起升高度，这个起升高度数据来源就是指支持机构的数据。

开闭机构：

开闭结构也属于起升的一部分，主要包括开闭电机、通过中压卷盘电缆为四连杆抓斗门座机提供电源，由于整机设备功率较大，设备供电电压普遍代用 AC10KV 电压等级。AC10kv 相比 AC380V 供电可以用较小的电缆规格即可满足大功率供电。中压开关柜是用于安装在设备上用于控制机上 10/0.4KV 变压器电源通断，方便四连杆抓斗门座机维修时，可以切断整机电源，能更好的保证维修作业人员的人身安全。

开闭减速机、开闭卷筒、开闭钢丝绳等组成。

开闭钢丝绳对应到抓斗上的连接点是内侧的两根绳，此钢丝绳决定抓斗在空中的姿态，

抓斗是打开状态或闭合状态，取决开闭机构钢丝绳和支持钢丝绳的绳差值，若支持高度—开闭高度值=0 时，此时为抓斗闭合状态；若支持高度—开闭高度> 0 时，此时抓斗为未闭合状态，具体开度未多少，即在开度范围值越大，抓斗打开度越大；若支持高度—开闭高度<0 时，此时抓斗为过闭合状态，此时状态代表支持绳不受力，抓斗和抓斗内物料重力和全靠开闭钢丝绳提供，此时对抓斗属于异常状态，抓斗控制上要避免此种情况发生，因此此种情况，有开闭钢丝绳过载断绳的风险。

变幅机构：

变幅机构主要包括变幅电机、变幅减速机、变幅齿轮、变幅齿条等组成。

变幅机构是控制设备幅度大小的机构，在设备工作时根据吊装物距离设备的距离需要调整幅度大小，以便完成吊装作业的需要。

回转机构：

回转机构主要包含一套回转电机（两台）、一套回转减速机（两台）、回转齿轮、大齿圈、回转制动器等组成。

回转机构是控制设备大臂工作转向用的机构，主要用于根据工况需要改变变幅大臂朝向，以应对设备工作需要。

大车机构：

大车机构主要包含大车电机、大车减速机、大车制动器、大车卷盘等组成。

大车机构是控制设备位置移动的机构，属于非工作机构，即在设备正常作业时此机构是静止不动的，只有设备需要移动位置时，大车机构才会投入运行。

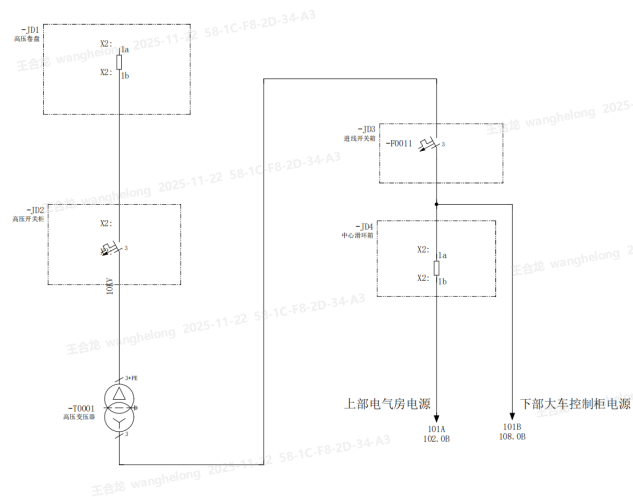
4 电控系统配置

四连杆门座机电控系统配置组成如下

4.1 高压供电电源部分

主要包含：中压供电电缆（卷盘电缆）、中压开关柜、

高中压变压器、以及中压电气房内所需辅助设施，例如：排风扇、室内照明、火灾报警消防系统等。



4.2 低压电气房部分

主要包含：低压电源柜、PLC 控制柜、CMS 柜（设备状态监控系统）、支持 / 大车变频驱动柜（由于支持机构和大车机构部同时动作，且大车属于非工作机构，所以此设备支持和大车机构都是为共用变频驱动，有些设备由于支持机构与大车机构功率差异交大，也可以大车机构和别的机构共用变频驱动）、开闭变频驱动柜、变幅变频驱动柜、回转变频驱动柜、照明变压器、空调系统、照明系统、消防系统等。

4.3 司机室部分

司机室联动台（设备主操作台）、司机是照明柜（设备照明系统控制柜）、司机内照明系统、语音通讯系统、空调系统等。

4.4 门架梁仓部分

大车行走辅助柜、低压电源隔离开关箱、仓内照明系统、仓内消防系统。

5 设备控制模式

单支持控制工况模式；

单开闭控制工况模式；

吊钩模式工况控制方式；

抓斗模式工况控制方式；

大车控制工况模式；

各机构及工况控制模式详解：

单支持机构控制工况模式，此模式工况下操作联动台支持（起升）主令，仅支持机构可以动作。此工况动作时，支持机构变频驱动方式需采用闭环速度控制模式控制，为了提高响应速度，斜坡时间可以调小。为了提高设备对应不同工况时的稳定性，斜坡时间可以选用通讯给定。

单开闭机构控制工况模式，此模式工况下操作联动台开闭主令，仅开闭机构可以动作。此工况动作时，开闭机构变频驱动方式需采用闭环速度控制模式控制，为了提高响应

速度,斜坡时间可以调小。为了提高设备对应不同工况时的稳定性,斜坡时间可以选用通讯给定。

吊钩模式控制方式,此模式机构驱动采用支持和开闭机构协同同步运行,为了保证协同作业时的支持和开闭同步一致,一般此模式下支持机构和开闭机构采用力矩主从控制方式,但是需注意此控制模式下会有以下几项问题,第一当主机驱动出现问题时,力矩从机又可能会有飞车的安全隐患,为避免此安全隐患设计系统时需要设计防飞车保护。第二当机构速度高,响应速度要求较高时,会出现力矩震荡现象,即设备外部现象为机构频繁快速启停吊钩4根钢丝绳出现受力不均,甚至会出现绳差现象。所为提高支持开闭机构吊钩模式控制性能,可将控制驱动方式改为支持机构闭环矢量速度控制,开闭机构闭环矢量速度控制,然后通过通讯将支持机构驱动器的力矩读取,将此力矩值与开闭机构驱动器力矩值进行比较,通过plc程序设置高速扫描周期,建立力矩环模型,让开闭机构的力矩值始终跟随支持机构的力矩值。当开闭机构力矩值与支持机构力矩值差值大于稳态范围值时,力矩环启动通过plc程序对开闭机构驱动器进行力矩调节。

抓斗模式工况控制方式,此模式机构驱动和吊钩模式工况有相同点,即都需要支持机构和开闭机构协同运行,但具体控制上面要求更高,主要体现是抓斗模式工况时,既要求支持机+构和开闭机构同步运行,又要求开闭机构能独立运行,而且支持机构和开闭机构同步运行和独立运行有能自动交替动作。

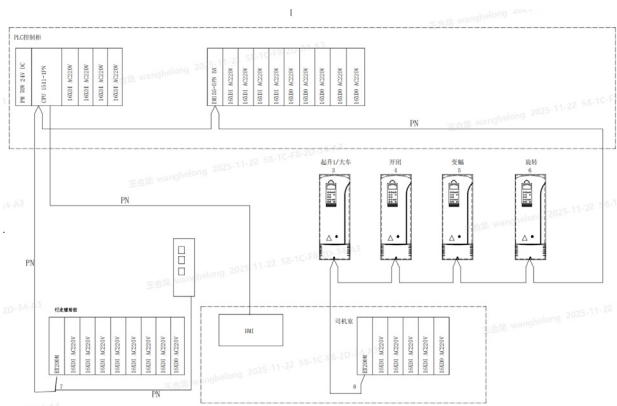
具体动作详解,我们这里通过抓斗工作的过程中,不同姿态时所需的控制要求进行论述,首先此模式工作从抓斗初始化开始,抓斗初始化即设置支持机构和开闭机构钢丝绳在抓斗完全打开时与抓斗完全闭合时的绳差值,并进行控制系统记录,之后作业过程,抓斗是打开姿态或闭合姿态,全通过实时数据与此记忆值进行比较来判断。下面从初始化完成后抓斗在空中抓斗闭合为起始抓斗姿态进行开始动作详解,第一步,抓斗开斗动作,此时由于抓斗在空中

此时开斗动作,需要支持机构保持不动,开闭机构主令往开斗方向动作,抓斗姿态会进行打开的动作,此时开闭机构驱动方式为,矢量闭环速度控制方式,当抓斗打开到最大开度后停止继续开斗动作,开斗指示灯点亮。(即支持机构与开闭机构允许开斗方向允许的最大位置差值对应的数据位置),第二步,抓斗闭斗动作,此时有抓斗在往闭斗方向运行,直至闭斗指示灯点亮,控制方式也为矢量闭环速度控制。第三步,当闭斗完成后,主令拉起升方向动作,控制方式从开闭机构运行切换至支持+开闭同步上升控制方式,此工况驱动控制方式为支持机构和起升机构走速度矢量闭环控制方式,控制过程运行过程,通过位置环参与调节相对位置,通过速度环调节同步速度响应,引入力矩环调节支持、开闭机构相对受力平衡,由于抓斗工况的特殊性,抓斗上升

过程中为保证抓斗上升运动过程中不出现开斗撒料的状况,所以需要保证一下控制状态,支持机构钢丝绳受力需要比开闭机构钢丝绳受力小约20%左右的动态平衡,支持机构和开闭机构需要做实时力矩值动态比较,然后用力矩值比较的结果配合力矩环模型进行调节,(即力矩差值越大调节数值越大,反之同理。但是需要注意由于高速扫描速度快,调节时出现调节震荡的情况,需根据情况适用力矩调节滤波。)抓斗主要运行工况即为上所述重复往返周期性运行作业。

6 控制系统通讯网络架构

四联杆抓斗门座机构控制系统通讯网络架构
根据整机PLC通讯网络架构进行解析:



PLC柜内为plc主站 ---- 支持/大车变频器

PLC主站 ----- 开闭变频器

PLC主站 ----- 变幅变频器

PLC主站 ----- 回转变频器

PLC主站 ----- 机下行走辅助柜plc子站

PLC主站 ----- 司机室联动台plc子站

PLC主站 ----- 司机联动台HMI子站

PLC主站 ----- 司机室超载限制器子站

PLC主站 ----- 港口中控站

PLC主站 ----- 电源柜多功能仪表站

PLC主站 ----- 高压柜多功能仪表站

7 结语

综上所述,本文围绕港口四连杆抓斗门座机控制系统展开深入研究,系统阐述了其主机构组成部分、电控系统配置、设备控制模式以及通讯网络架构。通过详细分析支持机构、开闭机构、变幅机构、回转机构和大车机构等关键组成部分,明确了各机构在港口作业中的功能与作用,为控制系统的优化提供了坚实的理论基础。在电控系统配置方面,深入探讨了高压供电电源部分、低压电气房部分、司机室部分以及门架梁仓部分的具体构成,强调了各部分协同工作对设备稳定运行的重要性。

针对设备控制模式,重点研究了单支持控制工况模式、单开闭控制工况模式、吊钩模式工况控制方式、抓斗模式

工况控制方式以及大车控制工况模式。通过对比不同模式的特点和控制要求,提出了相应的优化策略,特别是针对吊钩模式和抓斗模式工况中存在的同步运行与独立运行问题,创新性地引入了力矩环模型和高速扫描周期调节方法,有效解决了力矩震荡和绳差现象,显著提升了设备的稳定性和作业效率。此外,对四连杆抓斗门座机构控制系统的通讯网络架构进行了详细解析,明确了 PLC 主站与各变频器、子站之间的通讯关系,为系统的实时监控和故障诊断提供了有力支持。

本研究的成果不仅为港口四连杆抓斗门座机控制系统的优化提供了科学依据,也为同类设备的研发和改进提供了有益的参考。未来,随着港口作业需求的不断变化和技术的持续进步,四连杆抓斗门座机控制系统仍面临诸多挑战,如

智能化水平的提升、能耗的进一步降低以及作业安全性的增强等。因此,后续研究可围绕这些方向展开,通过引入先进的控制算法和传感器技术,不断优化系统性能,推动港口机械向更加高效、智能和环保的方向发展。

参考文献

- [1] 李华. 变频驱动技术在港口机械中的应用[J]. 机械工程学报, 2022, 58(3): 123-130.
- [2] 张明. PLC控制在门座式起重机中的应用研究[J]. 起重运输机械, 2021, 45(7): 45-49.
- [3] 陈强. 港口机械电控系统优化策略[J]. 中国港口, 2020, 35(2): 78-82.
- [4] 刘伟. 四连杆门座机控制系统通讯网络架构设计[J]. 电气传动, 2019, 49(11): 56-60.

Research on Installation Tools of Bird Repellent Based on Robot Live Working

Shaohui An Xianfei Liu Kai Zhang Tao Li Lipeng Duan

State Grid Tianjin Chengnan Company, Tianjin, 300000, China

Abstract

Bird nesting on 10kV transmission lines not only causes power line failures but also poses risks to the birds themselves. Therefore, bird repelling measures for 10kV overhead lines are particularly crucial. To address the needs of bolt-type bird repeller installation and the promotion of live-line operation robots for distribution networks, this study drew inspiration from rendezvous and docking processes and conical rod-type space rendezvous mechanisms. Through experimental testing and field investigations, a development plan was formulated, resulting in the creation of a robot-based live-line operation tool for installing bird repellents. From 2024 to 2025, the robot successfully completed 90 live-line operations equipped with these repellents. This research not only enables the installation of traditional bolt-type bird repellents on distribution network robots, saving labor while expanding their operational capabilities, but also improves working conditions for live-line operators, enhancing both efficiency and safety standards.

Keywords

robot; live-line work; bird deterrent; installation tool

基于机器人带电作业的驱鸟器安装工具研究

安韶辉 刘现飞 张凯 李涛 段立鹏

国网天津城南公司, 中国·天津 300000

摘要

鸟类在10kV线路筑巢容易引发线路故障,对鸟类本身也有伤害。10kV架空线路驱鸟工作尤为必要。为满足螺栓式驱鸟器安装与配网带电作业机器人推广需求,借鉴了交会对接过程和锥杆式空间交会对接机构,通过试验、调查分析等方法确定了研制方案,实现了基于机器人带电作业的驱鸟器安装工具研制,并在2024年至2025年期间实现了带电作业机器人加装驱鸟器作业90次的作业。该研究实现了配网带电作业机器人安装传统螺栓式驱鸟器,节省人力的同时实现带电作业机器人作业类型的拓展。改善带电作业人员工作条件,提升工作效率和安全水平。

关键词

机器人; 带电作业; 驱鸟器; 安装工具

1 引言

在10kV配电线路中,鸟害易导致配电线路发生故障,而驱鸟器的安装可以有效防止此类现象发生。驱鸟器的传统安装方式为人员登杆装设,采用的是带电作业的绝缘杆作业法。传统方法对作业人员体力消耗极大,风险点较多。

目前,配网带电作业机器人逐步试点应用,作业类型不断拓展,作业内容趋于多样化。相对传统作业项目而言,目前机器人作业项目较少,主要有接引线、断引线、安装接地环、安装故障指示器等,尚未研发出完善的应用配网带电作业机器人带电安装传统螺栓式驱鸟器的工具和方法。

使用现有配网带电作业机器人来安装传统螺栓式驱鸟器显得十分必要。研究机器人作业方式发现,关键是研究出

机器人安装驱鸟器的工具及使用方法,从而实现作业人员不用登杆,甚至不需要高处作业,只需利用控制终端控制作业流程,采取机器人带电作业的方式,便可轻松安装驱鸟器。

2 配网带电作业机器人和驱鸟器

为有效防范和减少线路因鸟类活动引起的故障,确保电网安全稳定运行,供电企业进行了大量的固定式驱鸟器安装,效果显著^[1]。在配电线路中,驱鸟器一般固定在横担上。驱鸟器与横担的固定方式主要有螺栓式、卡口式、磁吸式等。

在现有技术中,机器人主要能够安装磁吸式驱鸟器,而螺栓式驱鸟器以其成本低廉、固定可靠、效果明显等优势仍为配电线路主要使用的驱鸟器^[2]。此研究就是要实现机器人对传统螺栓式驱鸟器的安装,使机器人和驱鸟器更好的发挥各自的作用。

目前的配网带电作业机器人作业方式主要是依靠机械臂取相应工具完成相应任务。要实现机器人安装螺栓式驱鸟

【作者简介】安韶辉(1987-),男,中国河北唐山人,本科,高级工程师,从事主要从事配电带电作业研究。

器,关键是研究出基于机器人带电作业的驱鸟器安装工具及方法。

3 工具研制的总体方案

充分借鉴手动操作式交会对接控制方式,将机器人驱鸟器安装工具以及驱鸟器看作追踪飞行器与目标飞行器,操作人员在遥视系统的辅助下,借鉴锥杆式空间交会对接结构,使安装工具与驱鸟器准确结合,利用动力系统以及遥控系统,将螺栓与螺母拧紧固定,完成驱鸟器的安装。

经过研究,提出总体方案为研制远程操作式的机器人驱鸟器安装工具,将其中遥视系统功能设计为遥视控制部分,将动力系统的功能设计为旋转电机部分与扭矩控制部分,将遥控系统的功能设计为遥控部分,另外借鉴锥杆式空间交会对接结构设计工具的驱鸟器结合部分,同时安装工具还需要与配网带电作业机器人连接,即工具应有与机器人结合部分。所研制的安装工具通过机器人结合部分与配网带电作业机器人连接,在遥视控制部分的辅助下,通过操作工具遥控部分,利用驱鸟器结合部分、扭矩控制部分和旋转电机部分实现驱鸟器的安装。由此得到,总体方案由旋转电机部分、扭矩控制部分、驱鸟器结合部分、机器人结合部分、遥控部分、遥视部分组成^[3]。

4 工具各部分的研究

4.1 旋转电机部分

常见的旋转电机有直流电机和伺服电机。通过调查发现两种电机均满足扭矩输出要求,从轻便性角度设计试验。将直流电机和伺服电机分别通过快换盘安装至配网带电作业机器人机械臂,之后操作机器人机械臂按照程序设置最短路由作业初始位置上升至同一作业位置,测量采用两种电机时机器人机械臂移动时间。每组试验重复5次。

采用直流电机试验用时要明显低于采用伺服电机的时间,二者平均用时分别为7.3s和12.6s,这与伺服电机体积较大,机器人为绕开机械臂需设计更远路径有关。试验结果说明相较于伺服电机,采用直流电机轻便性更好,更有利于高效率作业,同时直流电机重量满足低于1kg的要求^[4]。

4.2 扭矩控制部分

常见的扭矩控制方式有力矩螺栓和力矩调节机构。进行驱鸟器螺栓拧紧试验,将驱鸟器其中一个螺栓拧松到接近极限,测试将螺栓完全拧紧所需要的时间。第一组采用加装力矩螺栓的驱鸟器,使用配套打断工具进行拧紧,第二组采用普通驱鸟器,使用带有力矩调节机构的电动扳手进行拧紧。每组试验重复5次。试验结果如表1所示。

采用力矩调节机构用时略低于采用力矩螺栓的时间^[5]。说明相较于力矩螺栓,采用力矩调节机构试验用时更短,采用力矩调节机构效率略高,这与该方案无需拧断过程有关。力矩调节机构效率略高于力矩螺栓方案,可适用于多种螺栓规格驱鸟器,集成于驱鸟器安装工具无需对每个驱鸟器进行改装,更适于工具重复作业,因此采用力矩调节机构作为扭

矩控制部分。

表1 力矩调节机构对比试验结果表

序号	采用力矩螺栓试验用时/s	采用力矩调节机构试验用时/s
1	3.4	2.8
2	3.5	2.7
3	3.3	2.8
4	3.4	2.8
5	3.3	2.6
平均	3.4	2.7

4.3 驱鸟器结合部分

机器人安装驱鸟器时,需要与驱鸟器的螺栓和螺母结合,结合部分一般选用套筒,套筒有长短的区别。短套筒为配网带电作业机器人带电接引线作业中用于拧紧线夹的常规套筒,筒深10mm;加长套筒筒深32mm。首先将驱鸟器安装至横担,之后将其中一个螺栓拧松到接近极限(螺纹一侧的头与横担连接槽螺纹口平齐)位置,螺母在不妨碍螺栓拧紧至横担且尽可能接近横担连接槽的位置,之后将带有套筒的配网带电作业机器人带电接引线工具安装至配网带电作业机器人机械臂,操作机器人将驱鸟器螺栓拧紧,测量从套筒第一次对准螺栓到将螺栓拧紧的时间。试验第一组采用加长套筒,试验第二组采用常规套筒,每组试验重复5次。试验结果如图1所示。

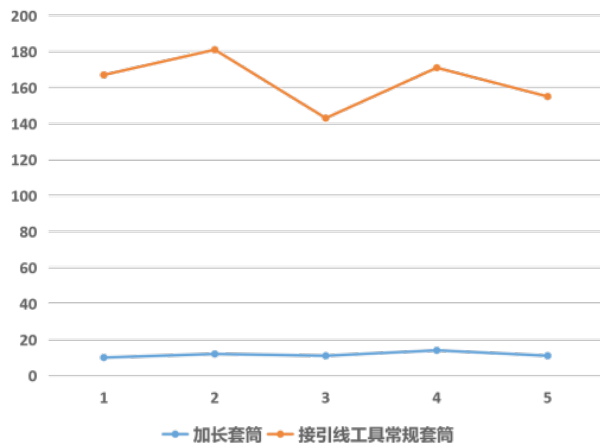


图1 驱鸟器结合部分对比试验结果折线图

采用加长套筒试验用时要明显低于采用常规套筒的时间,二者平均用时分别为11.6s和163.4s。采用加长套筒和接引线工具常规套筒试验用时的标准差分别为1.4s和13.2s,说明相较于常规套筒,采用加长套筒试验用时波动更小,更有利于重复作业^[6]。

采用加长套筒在第一次对准螺栓之后便可以一次将螺栓拧紧,不需要二次对准,而采用常规套筒时,需要多次对准,过程更为繁琐。

4.4 机器人结合部分

研究发现,与机器人结合的方法一般有两种可选,一种为自研快换盘式支架,另一种为机器人接引线工具^[7]。将自

研快换盘式支架和机器人接引线工具分别安装至配网带电作业机器人机械臂,之后操作机器人机械臂分别在高速和低速模式下完成前后、上下、左右移动操作以及前后左右倾斜和旋转操作,记录机器人是否会出现动作保护进而紧急停止。采用两种支架进行同一操作时,移动范围路径均保持一致。

采用自研快换盘支架动作保护概率明显低于采用机器人接引线工具的情况,二者动作保护概率分别为16.7%和41.7%。试验结果说明相较于机器人接引线工具,采用自研快换盘式支架动作保护概率更低,满足要求。

4.5 遥控部分

遥控方式有电源控制型和集成控制型两种可选方案^[7]。电源控制型通过独立遥控端远程控制工具电源通断实现工具电机旋转与停止的控制。集成控制型将遥控控制部分集成到目前机器人的控制平板中。

使用AI工具建模进行仿真试验,使用同一AI工具,给出统一需求与参数,输入人员数量以及具体情况,将人员电路制作水平与编程水平情况考虑在内。利用AI工具分析两种设计思路实现的预计所需阶段与时间。AI工具采用目前市面上主流的豆包AI。

采用电源控制型方案实施所需时间为7天,考虑到休息日以及其它工作占用时间情况,预计所需时间为28天,而采用集成控制型,预计所需时间将达到124天以上。因此最终采用所需时间更短且满足要求的电源控制型。

同时,电源控制型可使机器人驱鸟器安装工具兼容多种机器人。

4.6 遥视部分

研究发现,遥视部分可利用机器人本体的基底摄像头^[8],或者为工具单独加装摄像头。利用配网带电作业机器人断引线工具模拟驱鸟器安装工具,将断引线工具安装至配网带电作业机器人机械臂后,操作机器人将机械臂托举工具到达横担附近位置,分别对比机器人基底摄像头以及在机器人断引线工具上加装的摄像头的成像效果,以及能否实现驱鸟器和横担位置情况、工具动作情况、驱鸟器安装情况等的有效观察。测量的遮挡比例为按照体积换算得到。

直接采用机器人基底摄像头无需进行额外摄像头的安装,较简洁,但机器人基底摄像头距离作业位置远且机械臂存在遮挡,无法达到有效的观察效果。单独为工具加装的摄像头距离作业点更近,且可以实现有效的观察效果。

4.7 各部分的最佳组合

通过以上对各个部分的试验、调研、测量分析,研究出最佳组合,即采用直流电机、力矩调节机构、加长套筒、自研快换盘式支架、电源控制遥控,独立摄像头。

5 工具应用效果

在机器人带电作业模式下实现了传统螺栓驱鸟器带电安装,以创新技术加快配网带电作业转型升级,以新型作业模式优化了生产关系,加快了新质生产力培育。鸟害可能引

发火灾或设备损坏,驱鸟器降低此类风险,避免潜在赔偿及法律纠纷。避免了鸟类触电死亡,符合野生动物保护法规,促进了人与自然和谐发展。

6 结语

在10kV配电线路中,鸟害易导致配电线路发生故障,而驱鸟器的安装可以有效防止此类现象发生。驱鸟器的传统安装方式为人员登杆装设,采用的是带电作业的绝缘杆作业法。传统方法对作业人员体力消耗极大,风险点较多。

本文研究了基于机器人带电作业的驱鸟器安装工具,借鉴了交会对接过程和锥形杆式空间交会对接机构,实现了工具研发。通过试验、调查分析等方法,确定了以直流电机为旋转电机部分、以力矩调节机构为扭矩控制部分、以加长套筒为驱鸟器结合部分、以快换盘支架为机器人结合部分、以电源控制型为遥控方式、以独立摄像头作遥视部分的最佳组合。

该研究成果,节约了传统安装驱鸟器所需的人力成本,消除了隐患,减少了鸟类引发的配电架空线路故障,避免了鸟类触电死亡,促进了人与自然和谐发展,实现带电作业机器人作业类型的拓展。

参考文献

- [1] 李光茂,杨森,占鹏,等.配网带电作业机器人系统的设计[J].机床与液压,2022,50(09):66-70.
- [2] 刘兆领,张黎明,胡益菲,等.全自主配网带电作业机器人系统设计[J].科学技术创新,2021,(24):3-6.
- [3] 张静,黄国方,刘晓铭,等.配网带电作业机器人精准作业定位方法[J].电网技术,2022,46(02):812-819.
- [4] 鲁佳乐.天津:弘扬工匠精神提升发展质效[J].国家电网,2020,(05):22-23.
- [5] 何仰赞,温增银.电力系统分析[M].武汉:华中科技大学出版社,2002.
- [6] 李帅,张黎明,郭新,等.10kV配网带电作业机器人接引流线专用工具[J].设备管理与维修,2020,(04):106-107.
- [7] 李宇昊,王腾达,吴铭超.配网线路运维中顽固性鸟窝问题消缺方案[J].农村电气化,2024,(10):12-15.
- [8] 钱安.基于物联网的智能驱鸟器设计与应用研究[D].南昌大学,2024.
- [9] 艾健,严浪涛.基于超声波技术的浮标驱鸟器的设计[J].船电技术,2024,44(05):96-100+108.
- [10] 岳晓辉,陈福亮,陈有双,等.驱鸟器带电自动更换器的研制[J].农村电气化,2024,(06):57-60.
- [11] 马帅,冯欣,孔宁,等.空间交会对接机构综述及发展展望[J].火箭推进,2022,48(03):1-15.
- [12] 王亚男,俞敏.神舟飞天天宫探梦——中国载人航天交会对接相关术语解读[J].中国科技术语,2016,18(06):55-58.
- [13] 高宁,司玉琛,唐绍钧.一种新型驱鸟器安装工具设计应用[J].农村电工,2024,32(05):34-35.

Research and Implementation of Intelligent Operation and Maintenance Control System for Ball Mill and Crusher Based on PLC

Yanbo Zhao

Luoyang Kawen Automation Equipment Co., Ltd., Luoyang, Henan, 471000, China

Abstract

This study focuses on the high-load operating conditions of ball mills and crushers in industrial production and develops an intelligent operation and maintenance system based on PLC control technology. The system enables real-time perception of equipment status, identification of operating conditions, and coordinated regulation across units. By continuously collecting key parameters and performing logical assessments, the system can issue early warnings at the onset of abnormal trends and automatically execute safety interlocks when necessary, thereby reducing downtime caused by equipment failures. The research establishes a systematic framework covering control architecture design, signal interface configuration, and data-processing procedures, promoting a shift in equipment maintenance from experience-based management to a data-driven mode.

Keywords

PLC; ball mill; crusher; intelligent operation and maintenance; control system

基于 PLC 的球磨机与破碎机智能运维控制系统研究与实现

赵彦波

洛阳卡文自动化设备有限公司, 中国·河南 洛阳 471000

摘 要

本研究围绕球磨机与破碎机在工业生产中的高负荷运行场景, 依托PLC控制技术构建智能运维系统, 实现设备运行状态的实时感知、工况识别与联动调控。通过对关键参数进行连续采集与逻辑判断, 系统能够在异常趋势初现时完成预警提示, 并在必要情况下自动执行安全联锁操作, 从而减少设备故障造成的停机损失。研究在控制架构设计、信号接口配置与数据处理流程方面进行了系统化构建, 使运维由经验依赖向数据驱动转变。

关键词

PLC; 球磨机; 破碎机; 智能运维; 控制系统

1 引言

球磨机与破碎机是矿物加工系统的核心设备, 其运行状态直接关系到整条选矿生产线的能耗水平、产能规模与设备寿命。然而, 受长期高强度运转、物料冲击载荷变化以及工况波动影响, 两类设备在生产中普遍存在故障频发、参数波动明显、维护周期难以精准判断等问题。传统依赖人工巡检的方式无法实现及时响应, 容易形成滞后性维护, 导致停机风险增加。随着自动化水平的不断提高, 基于 PLC 的控制方式因其稳定性强、反应速度快、易于集成多源信号而被广泛应用于复杂工况场景。将 PLC 控制技术与智能运维理念结合, 可在保障安全的前提下实现设备工况的实时监测、

精准调整与趋势研判, 从而显著提升系统运行的可靠性。

2 基于 PLC 的球磨机与破碎机智能运维需求分析

2.1 矿山破碎—磨矿工艺运行特性与运维痛点剖析

破碎—磨矿系统在连续、高负荷、强扰动的环境下运行, 物料性质在不同环节呈现显著变化, 使球磨机和破碎机的负载呈现周期性波动。设备在大量物料冲击下出现转矩变化、电流脉动、振动幅值偏移等情况, 使运行稳定性高度依赖对实时参数的监测。人工巡检对瞬态变化难以及时识别, 尤其在给料量不稳定、物料湿度偏高、衬板磨损加重时, 设备常出现局部过载、堵料或磨矿效率下降等现象。破碎段与磨矿段在控制逻辑上缺乏动态协同时, 会导致物料供给不均衡, 使能耗显著增加, 磨矿粒度波动加剧, 产能水平受影响。现场环境粉尘多、湿度大、机械冲击强, 使设备部件的疲劳损

【作者简介】赵彦波(1988—), 男, 本科, 工程师, 从事电气电力拖动与自动化控制研究。

伤更难预测,进一步加大运维压力。构建实时监测、动态调节和趋势分析能力的智能化平台,成为提升系统稳定性和减少停机风险的重要手段。

2.2 球磨机与破碎机关键设备故障模式与风险特征

球磨机常见的风险包括主轴承温度异常上升、润滑油系统油压不足、筒体振动幅值变动、钢球冲击分布不均导致的噪声突变、给料失衡引起的胀肚现象等。破碎机则易出现物料堵塞、偏心轴发热、动颚或转子的冲击载荷升高、电机电流长期处于高位、破碎腔磨损改变粒度分布等问题。这些故障具有隐蔽发生、快速恶化的特点,早期表现为轻微参数偏移,例如温升速率加快、电流纹波变化、振动频谱结构出现新的特征峰等,人工巡查难以进行准确判断。在粉尘、湿度和机械冲击较强的运行环境中,轴承、联轴器和传动部件的失效概率进一步提升,使风险链条更加复杂。通过 PLC 对关键参数进行高频采集和逻辑过滤,可对故障模式进行量化识别,实现对不同风险类型的快速响应,为构建稳定可靠的运维体系提供基础条件^[1]。

3 基于 PLC 的主站架构的控制逻辑设计与系统建模

3.1 球磨机与破碎机运行参数的信号采集与接口设计

信号采集体系依托 PLC 主站及其扩展模块构建,通过模拟量、数字量和通信量模块形成完整的数据通道。球磨机的主轴承温度、润滑油压、筒体振动、电机电流、给料量等信号通过标准工业信号格式输入模拟量端口,破碎机的腔体料位、动颚振动、偏心轴温度、电机负载等信号以相同方式接入。为提升数据稳定性,采集回路采用屏蔽电缆、隔离放大器和独立接地结构,降低粉尘、湿度与电磁干扰的影响。对高速变化的振动与电流信号采用高速采集模块,以捕捉瞬态冲击事件。在接口设计中,通过 modbus、profibus 或 ethernet/ip 实现 PLC 与上位机的通信,使破碎段与磨矿段能够共享参数,实现设备间数据互联。采集体系为逻辑判断、参数分析和连锁控制提供基础支撑。

3.2 PLC 控制逻辑的顺序流程设计与工况建模

控制逻辑采用顺序功能图、梯形图和结构化文本组合构建,使破碎—磨矿系统能够依据工况自动执行启动、运行、负荷调节和停机保护。流程从破碎机的预启动检测开始,PLC 按照润滑压力、冷却水流量、电机状态与安全条件进行确认,条件满足后进入启动延时阶段。破碎机稳定运行后,PLC 发出球磨机启动指令,并在速度、电流和油压达到设定范围后切换至正常磨矿模式。在工况建模方面,以电机负载趋势、振动特征变化、物料料位波动和电流频谱构建运行模型,使系统能够识别物料是否供给不足、冲击是否异常或磨矿效率是否下降。逻辑模块依据模型输出自动调整给料速度、阀门开度和运行模式,实现破碎段与磨矿段的闭环联动,使系统能够在动态负荷下保持稳定运行。

3.3 安全连锁机制与保护策略的控制结构

安全连锁体系以 PLC 的实时运算能力为基础,通过多级触发结构确保破碎机与球磨机在异常条件下能够及时进入保护状态。主轴承温度、电机电流、振动幅值、润滑油压、料位等关键参数作为连锁判定依据,任何单项指标超过阈值时,PLC 立即执行减载、紧急停机或禁止启动指令,避免故障扩大。保护策略采用提前识别模式,通过温升变化速率、振动特征位移、电流波动幅度等趋势参数进行早期触发,使系统在异常发展前完成控制响应。控制结构包括硬件级急停回路、PLC 级逻辑连锁、上位机报警三级体系,使保护动作在不同层级具有可靠性和冗余能力。润滑、冷却和给料系统均纳入连锁链路,在任何关键参数异常时自动进入安全模式,通过断电保持与抗干扰机制确保在突发情况或外界干扰下仍能维持必要的保护功能。

4 智能运维平台的关键技术集成与系统实现路径

4.1 设备状态监测、阈值判定与工况识别策略

设备状态监测模块以连续采集的温度、压力、电流、振动、速度和料位等关键参数为基础,通过多源数据融合构建特征序列,并在 PLC 中完成实时计算。阈值判定策略采用静态阈值与动态阈值并行方式,通过设定基础报警线并结合参数的变化速率、波动幅度和频谱特征建立动态判断基准,使系统能够在工况早期偏离时作出响应。工况识别依托特征提取和逻辑判断机制,以物料量波动、电机负载曲线形态、振动频率结构和油压变化趋势构建判断模型,用于区分正常磨矿、轻载、重载、冲击波动、堵料等典型状态。识别模型通过 PLC 的高速运算单元实时执行逻辑,确保每秒内能够完成多轮计算。模块化识别方式支撑破碎段与磨矿段在不同负荷下实现联动调节,使系统在复杂工况中保持稳定运行能力。

4.2 智能运维数据处理模块的构成与控制界面设计

数据处理模块由采集层、分析层、呈现层构成。采集层将来自振动探头、油温传感器、电流互感器、料位计和压力传感器的信号持续输入 PLC 主站。分析层通过参数趋势建模、波动窗口计算、负荷曲线匹配和状态特征比对形成运行诊断结果,并以毫秒级周期刷新,满足高动态工况需求。数据处理结果经通信模块发送至上位机,实现界面可视化呈现。控制界面采用工况总览、关键参数曲线、报警清单、运行记录和执行指令五类功能窗口,界面布局以流程图形式呈现破碎机、球磨机、给料系统和润滑系统的实时状态,使操作人员能够在单页内掌握完整运行链路。界面中设置参数趋势折线、振动频谱图、负荷分析曲线等展示模块,通过颜色变化和动态标识帮助判断运行安全性,同时支持手动介入与自动调整的双重操作方式,使系统具备良好的人机交互能力。

4.3 远程监控、预警联动与自动化调度实现

远程监控依托工业以太网和安全通信协议实现生产现场与管理中心的实时互联,将关键运行参数、趋势结果、报警信息和控制指令在多终端间同步。预警联动机制以参数阈值、变化速率和频谱特征作为触发条件,通过 PLC 完成早期预警、中级报警和强制连锁的多级处理,使轻微异常由系统自动调节,重度异常触发停机保护。预警信息通过蜂鸣提示、界面弹窗和短信推送等方式传递,确保运维人员及时处理。自动化调度模块依据破碎段和磨矿段的实时负荷,采用动态给料策略、转速调节策略和阀门控制策略,使系统在不同产能需求下自行匹配运行模式。例如,在负荷超过安全区间时自动执行减载,在空载或轻载时逐步提高给料量,使产能保持在目标区间。自动调度模块还支持与能源管理系统联动,实现电能利用的优化配置,为整体生产链提升效率提供条件^[2]。

5 PLC 系统在球磨机与破碎机智能运维中的应用成效评估

5.1 运行稳定性、能耗水平与产能提升效果对比

应用系统后,球磨机主机电流波动幅度从原先的 15% 降低至 6%,振动峰值降低 0.8 毫米每秒,主轴承温度波动范围降低 3 度,稳定性明显增强。在能耗方面,球磨机单位磨矿能耗从每吨电耗 19 千瓦时下降至 16 千瓦时,破碎机单位能耗从每吨电耗 5.4 千瓦时下降至 4.3 千瓦时,整体能耗下降幅度达到 17%。产能提升效果明显,磨矿处理量从每小时 62 吨提高至 71 吨,破碎能力从每小时 85 吨提升至 94 吨,总体产能增长约 14%。运行后的变负载时长减少 26%,冲击工况出现频率下降 42%,系统在高负荷条件下的稳定性得到充分验证,通过参数改善形成更高效率和更低能耗的运行状态。

5.2 设备故障率、维护周期与停机时长的变化分析

系统投入使用后,球磨机年度故障次数从 16 次下降到 7 次,破碎机故障次数从 21 次降低到 9 次,总故障率下降约 58%。润滑系统报警事件减少 11 次,轴承温升异常减少 8 次,堵料事件从每月 3 次减少到每月 1 次。维护周期明显延长,球磨机大修周期从原先的 9 个月延长到 13 个月,破碎机关键部件更换周期从 6 个月延长到 10 个月。停机时长大幅下降,年度计划外停机时间从总计 129 小时减少到

54 小时,缩短比例达到 58%。设备可开机率从 82% 提高到 94%,整体可利用系数显著提升。维修工时减少约 170 小时,备件消耗量减少约 22%,系统在减少异常、压缩维护成本和延长设备寿命方面展现出明显成效,为生产连续性提供强力支撑^[3]。

5.3 系统综合性能、可靠性与扩展性的验证

系统运行半年后,各项综合指标保持稳定。逻辑指令响应时间稳定在 30 毫秒以内,通信延迟维持在 10 毫秒左右,数据完整率保持在 99% 以上。连锁动作可靠度经过 320 次异常测试均未出现误动作或漏动作,保护成功率达到 100%。系统在环境温度 40 度、湿度 85% 和粉尘浓度较高的条件下连续运行 90 天未发生通信中断或参数丢失,体现出较高抗干扰能力。扩展性方面,通过新增 4 路振动信号和 2 路温度信号后,PLC 资源占用率由 62% 提升至 71%,仍具备预留空间,说明系统可支持后续功能扩展。在多工序联动测试中,破碎段与磨矿段的负荷耦合度提升 22%,运行匹配度提高 18%,系统可在不同产能需求下保持高效协同,系统在稳定性、保护性、可管理性和扩展性方面达到预期目标^[4]。

6 结语

基于 PLC 的球磨机与破碎机智能运维控制系统的研究成果表明,将实时监测、工况识别、逻辑调控与安全连锁深度融合,可显著改善破碎—磨矿生产链的运行质量与管理水平。在连续高负荷的工业环境中,系统以稳定的数据采集能力、快速的逻辑执行能力和可靠的保护机制,实现了设备状态的精准感知与动态调节,为减少故障、降低能耗和提升产能提供了有效支撑。通过智能化运维方式,设备运行由经验式管理向数据驱动管理转变,生产系统的可控性、可预测性和安全性得到全面强化。

参考文献

- [1] 张明明.基于PLC技术的选矿厂溢流型球磨分级自动化协调控制系统[J].自动化应用,2025,66(03):56-58+62.
- [2] 吴鹏.球磨机模块化包绕直驱永磁电机容错性研究[D].导师:厉伟.沈阳工业大学,2023.
- [3] 刘德杰,周秀梅.球磨机全自动化运行设计研究[J].现代制造技术与装备,2023,59(02):205-209.
- [4] 冯聪聪,姜晓彤,黄海河,李强.球磨机控制系统的设计与研究[J].现代制造技术与装备,2022,58(08):18-25+30.