

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

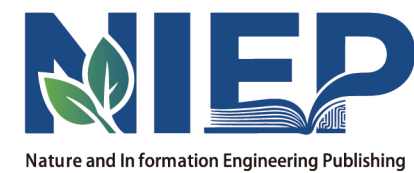
B-03A-15, One South Street Mall, Jalan OS, Taman Serdang Perdana,
43300 Seri Kembangan, Selangor Darul Ehsan.
+60 11-3978 7006
contact@zycentre.com



Construction Machinery and Technology

工程机械与技术杂志

ISSN:3122-6833



Volume 2 Issue 3 March 2026
ISSN: 3122-6833

工程机械与技术 杂志

Construction
Machinery
and Technology



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

Database Inclusion



版权声明 /Copyright

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

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

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



《工程机械与技术杂志》征稿函

期刊概况：

中文刊名：工程机械与技术杂志

ISSN：3122-6833

出版语言：华文

期刊网址：https://cn.niepublish.com/cmt

出版社名称：自然与信息工程出版社

出版格式要求：

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

出刊及存档：

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

作者权益：

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

评审过程：

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

主 编

杨晨升，黑龙江科技大学机械工程学院

副主编

陈 刚，济南市特种设备检验研究院

陈 玮，中冶京诚工程技术有限公司

程 坚，国家石油天然气管网集团湖北分公司潜江作业区

Georgios Apostolakis, University of Central Florida

编 委

Ajit Kumar, IIT (ISM) Dhanbad

张玉海，淄博市传统产业发展中心

陈武雄，中国平煤神马集团

边 兵，深圳中建院建筑科技有限公司

孙 鹏，川庆钻探长庆钻井总公司

杨 东，青岛五顺汽车模具部件有限公司

李 金，国家电投集团资本控股有限公司

卢建康，北京华夏石化工程监理有限公司

谷东方，国家管网集团湖北公司

1	矿山提升设备制造选型中的安全性能评估方法 / 李磊	31	提质设计优化施工，推进 EPC 项目高质量交付 / 陈玮
4	高温合金板带冷轧现状分析 / 赵明臣 梅富强	35	轨道交通车地无线通信系统的覆盖优化与干扰抑制技术 / 张艺饶 盛楠
7	上下交替伸缩式电子板压合机结构设计与运动特性研究 / 谭福宇	38	机械设计可靠性评估方法研究及模型验证 / 姜乐营 郭婷婷
10	高压断路器常见故障诊断与维修策略研究 / 孟令钦	41	WS 型索道钢丝绳若干风险综述及其对策 / 李鑫尧
13	机载天线支架结构强度分析与减振设计 / 姚诗锐	46	口袋公园模式在市政园林微空间开发中的应用研究 / 刘永森
16	项目化教学在汽车营销课程中的应用 / 胡艳玲	49	标准化作业在铁路机车维修质量提升中的应用 / 赵欢
19	公路工程施工质量智能化管控技术应用研究 / 李平雷	52	智能化养护技术在市政园林管理中的实践与效果分析 / 刘岩 时永超
22	高超音速飞行器光子芯片自进化制导研究 / 张志有 张志睿 杨世文	55	探讨机械工程中机电一体化技术的应用 / 于一鸣
28	医疗设备科标准化维修流程的优化研究 / 石坚 罗延丰	58	复杂地质条件下建筑施工关键技术与质量保障研究 / 武波

1	Safety Performance Evaluation Methods in the Manufacturing and Selection of Mine Hoisting Equipment / Lei Li	31	Enhance Quality and Design to Optimize Construction, Ensuring High-quality Delivery of EPC Projects / Wei Chen
4	Analysis of the Current Situation of Cold Rolling of High-Temperature Alloy Sheets and Strips / Mingchen Zhao Fuqiang Mei	35	Coverage Optimization and Interference Suppression Technology of Rail Transit Vehicle-to-Station Wireless Communication System / Yirao Zhang Nan Sheng
7	Structural Design and Motion Characteristics Research of Up-Down Alternating Extensible Electronic Board Pressing Machine / Fuyu Tan	38	Research on Reliability Evaluation Methods for Mechanical Design and Model Validation / Leying Jiang Tingting Guo
10	Research on Common Fault Diagnosis and Maintenance Strategies for High Voltage Circuit Breakers / Lingqin Meng	41	A Review of Several Risks and Countermeasures for WS Ropeway Wire Ropes / Xinyao Li
13	Structural Strength Analysis and Vibration Reduction Design of Airborne Antenna Mounting Frame / Shirui Yao	46	Research on the Application of Pocket Park Model in the Development of Micro spaces in Municipal Gardens / Yongsen Liu
16	The Application of Project-Based Teaching in the Automotive Marketing Course / Yanling Hu	49	Application of Standardized Operation in Railway Locomotive Maintenance Quality Improvement / Huan Zhao
19	Research on the Application of Intelligent Quality Control Technology in Highway Engineering Construction / Pinglei Li	52	Practice and Effect Analysis of Intelligent Maintenance Technology in Municipal Landscape Management / Yan Liu Yongchao Shi
22	Research on Self-Evolving Guidance for Photonic Chips in Hypersonic Aircraft / Zhiyou Zhang Zhirui Zhang Shiwen Yang	55	Exploring the Application of Mechatronics Technology in Mechanical Engineering / Yiming Yu
28	Research on the Optimization of Standardized Maintenance Procedures in the Medical Equipment Department / Jian Shi Yanfeng Luo	58	Research on Key Technologies and Quality Assurance for Construction under Complex Geological Conditions / Bo Wu

Safety Performance Evaluation Methods in the Manufacturing and Selection of Mine Hoisting Equipment

Lei Li

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

Abstract

With the continuous expansion of mining depth and scale in China, the hoisting equipment, as the core system for underground and surface transportation, directly affects the safety of miners' lives and production efficiency. However, there are still many problems in the current selection process of mining hoisting equipment. Some enterprises have experienced frequent accidents such as brake failure and overloading operation due to improper equipment selection. This paper first elaborates on the core elements of safety performance assessment for mining hoisting equipment, then specifically proposes quantitative methods for safety performance assessment and standardized procedures for safety performance assessment, and finally summarizes suggestions for the application of assessment methods, with the aim of providing useful references and inspirations for related research.

Keywords

mining; equipment manufacturing selection; safety performance; assessment methods

矿山提升设备制造选型中的安全性能评估方法

李磊

金诚信矿山工程设计院有限公司, 中国·北京 100070

摘 要

随着我国矿山开采深度与规模的不断扩大,提升设备作为井下与地面运输的核心系统,其安全性能直接关系到矿工生命安全与生产效率。然而,当前矿山提升设备选型过程中还存在诸多问题,部分企业因设备选型不当导致制动失效、超载运行等事故频发。本文先是详细阐述了矿山提升设备安全性能评估的核心要素,随后具体提出了安全性能评估的量化方法以及安全性能评估的标准化流程,最后总结提出了评估方法应用的建议,以期有关研究提供有益参考与借鉴。

关键词

矿山; 设备制造选型; 安全性能; 评估方法

1 引言

矿山提升系统是由提升机、电动机、天轮或导向轮、井架或井塔、提升容器、钢丝绳、装卸载设备及电气控制设备等提升设施组成的系统。提升系统是矿山生产过程中的重要生产环节,负责矿废石提升,人员升降,设备和材料等的提升和下放任务。由于提升系统是周期动作式的输送设备,需要频繁地正、反转和频繁地起动、运行和停车,工作条件异常苛刻^[1]。随着矿山开采深度持续增加、生产规模不断扩大,设备运行外部环境愈发复杂,对安全性能的要求也更为严苛。但当下,矿山提升设备在制动系统可靠性、控制系统稳定性以及冗余设计合理性等方面仍存在诸多缺陷,导致提升系统的各类安全事故,如松绳、滑绳、断绳、过卷墩罐、卡罐、坠罐跑车等时有发生。而现有研究多局限于单一技术

指标或局部环节优化,缺乏系统性安全评估框架与量化手段,难以契合深井、高负荷矿井的安全需求。鉴于此,本文从设备本体、运行控制系统、安全冗余设计三个维度搭建评估体系,提出制动性能动态检测等量化方法,并制定标准化流程,为设备选型、维护及安全管控提供科学支撑,助力矿山安全生产迈向智能化与本质安全化。

2 矿山提升设备安全性能评估的核心要素

2.1 设备本体安全性能

矿山提升设备的本体安全性能是保障其稳定运行的核心基础。在制动系统方面,提升机液压制动系统包括液压站、液压弹簧制动器、闸架、管道及其附件和控制系统。目前,国内多采用恒减速制动系统,恒减速属于闭环制动系统,提升机在制动过程中,如重载提升、空载运行和重载下放紧急制动时,以恒定的减速度进行制动,通过反馈环节对控制系统控制的制动力进行不断调节以达到恒定的减速度,可以大大减小各种工况下紧急制动减速度,减小制动过程中钢丝绳

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

的动张力,最大限度降低在制动过程中钢丝绳的磨损。在提升机结构强度方面,提升机主轴是提升机的关键承载部件及主要传动部件。核心传力部件,诸如卷筒、联轴器都安装在主轴上,因此,主轴的力学性能优劣直接关系到提升系统的生产效率和安全性。主轴的设计应保证承受工作过程中的外载荷而不发生残余变形和过量的弹性变形,确保在事故载荷下不发生永久变形,同时保证一定的使用寿命^[2]。主轴材质多采用中碳铬钼合金调质钢(42CrMo),其具有高强度、高韧性、高淬透、抗疲劳等特性,调质后综合性能极强,强韧平衡性能优异,重载下不易脆断,适合提升机长期交变载荷、反复启停的特点。提升机卷筒作为提升系统的核心传力部件,其质量与可靠性同样重要。据统计2015-2024年间全球因卷筒失效导致的重大安全事故中,卷筒疲劳断裂占比高达57%,因卷筒焊接缺陷引发的事故占34%^[3]。传统设计方法往往建立在理想化的计算框架之下,对实际工况下的还原程度存在较大的局限性。因此,提升机主轴、卷筒等部件设计,应采用现代设计方法,通过有限元分析,对主轴和卷筒进行力学分析,找出应力与变形分布规律,验证抗疲劳性能,避免因结构失效导致安全事故的发生。二者协同作用,共同构建起提升设备本体的安全防线。

2.2 运行控制系统安全性能

矿山提升设备运行控制系统的安全性能是保障设备稳定运行、防范事故的关键屏障。在PLC控制系统方面,采用双PLC冗余设计,可对速度、位置、张力等核心参数进行实时监控与自动调节,当提升速度超过额定值10%时,系统能迅速自动触发紧急制动,有效避免超速风险;安全回路保护则通过设置过卷保护、超速保护、限速保护等多重安全连锁机制,形成全方位防护,任一环节出现故障,制动系统都会都会紧急制动,防止事故扩大;通信稳定性上,运用工业以太网或CAN总线技术,确保控制信号传输延迟严格控制在50ms以内,杜绝因通信中断引发的设备失控问题。三者协同发力,为提升设备运行筑牢安全防线。

2.3 安全冗余设计

矿山提升设备的安全冗余设计是应对突发故障、保障人员与设备安全的最后防线。在供电保障方面,采用双回路电源或单回路电源+应急柴油发电机双重冗余配置,当主电源中断时,备用电源无缝切换供电,应急柴油发电机亦可在30秒内迅速启动并恢复持续供电,有效避免提升容器长时间悬停带来的坠罐风险;在制动系统方面,可采用多通道恒减速制动系统,配置双液压站,一用一备,工作制动依靠智能闸控系统实现悬停抱闸,紧急制动通过恒减速液压制动系统实现恒定减速度,大幅提升制动可靠性;在控制系统方面,采用双变频器并联设计,单台变频器故障时,另一台可在100ms内自动接管负载,确保控制系统连续运行,控制回路采用双回路供电,关键传感器(如速度传感器、张力传感器)均配置双套,实现信号交叉验证。这些冗余设计共同

构建起多层次的安全防护体系。

3 安全性能评估的量化方法

3.1 制动性能动态检测法

制动性能堪称矿山提升设备安全的核心要素,对其进行量化评估对于保障设备稳定可靠运行有着不可替代的重要意义。通过智能闸控系统,能够同步精准采集制动距离、制动时间以及制动加速度等关键数据,从而实现对制动过程细致入微的精准监测。测试过程中,在提升机处于重载提升或者下放的状态下实施紧急制动操作,随后依据记录下来的速度-时间曲线来精确计算制动减速度,同时利用拉力传感器测量制动力矩,以此严格检验各项数据是否符合设计标准。通过这种基于动态数据的量化评估方法,能够直观且可靠地掌握制动性能状况,进而为矿山提升设备的科学选型、日常维护以及全面的安全评估提供坚实有力的直接依据。

3.2 基于 PLC 的故障诊断法

矿山提升设备控制系统故障是引发重大事故的关键诱因,而基于PLC的故障诊断法为破解这一难题提供了智能化解决方案。该方法通过PLC模块实时采集电机电流、振动频率、温度等核心参数,构建设备全生命周期健康档案,并利用LSTM神经网络等机器学习算法深度挖掘历史数据规律,精准预测轴承磨损、齿轮断裂等潜在故障趋势。相较于传统“事后维修”模式,该方法实现了从被动响应到主动预防的转变,将设备运行安全管控前置化,显著提升了矿山提升系统的本质安全水平与运维效率。

3.3 数字孪生仿真验证法

矿山提升设备在极端工况下的安全性能验证常面临实物测试成本高、风险大的难题,而数字孪生仿真验证法为此提供了创新解决方案。该方法基于三维建模软件(如SolidWorks)构建提升机数字孪生体,可精准模拟超载、断绳等极端条件下的应力分布与运动轨迹,并通过虚拟调试优化安全保护参数。在实际操作中,该技术还能结合有限元分析软件,对提升机关键部件在不同工况下的疲劳寿命进行预测,提前发现可能存在的疲劳裂纹隐患。

4 安全性能评估的标准化流程

4.1 设计方案对比评估

设计方案对比评估阶段,以科学选型保障设备安全。首先,基于矿井实际条件与安全性能要求,制定多套设备选型设计方案,例如针对不同深度与产量的矿井,对比单绳缠绕式与多绳摩擦式提升机的适用性:前者结构简单、成本较低,但适用深度通常不超过500米;后者虽能满足深井(如800米以上)提升需求,但维护成本与技术复杂度较高。需从安全性能(制动可靠性、冗余设计完备性等)、经济投入、运行效率、维护难度、能耗水平五维度建立量化评分体系,选择最优方案。随后,通过FMEA(失效模式与影响分析)+HAZOP(危险与可操作性分析)联合方法系统识别各方

案潜在风险,量化风险等级(高、中、低)并明确风险发生概率与影响程度。针对高风险环节,需制定针对性预防措施:如采取多通过恒减速制动系统形成冗余保护;采用高强度钢丝绳,并加装钢丝绳在线监测装置实时监测钢丝绳磨损量,及时发现断丝断股,预测断丝发展率,尤其是钢丝绳内部断丝现象,对钢丝绳结构失效有重大影响,应立即采取相应措施消除安全隐患;对于多绳摩擦式提升机,尾绳的检验往往是提升系统中最易忽略的环节,在实际生产过程中,应加强尾绳的监测及检验,预防因尾绳磨损而导致坠罐等安全事故的发生。这一流程通过“方案设计-多维对比-风险识别-措施闭环”四步法,为设备安全选型提供双重保障。

4.2 设计合规性评估

设计方案确定后,需通过设计合规性评估确保设备安全达标,核心包含合规性审查、验收测试与持续改进三个环节。合规性审查依据《金属非金属矿山安全规程》(GB 16423-2020)、《矿井提升机和矿用提升绞车 安全要求》(GB 20181-2006)、《多绳摩擦式提升机》(GB/T 10599-2023)、《单绳缠绕式矿井提升机》(GBT 20961-2018)等相关国家标准与行业规范,对设备关键部件进行合规性核查,重点检查制动系统参数、电气保护装置、安全连锁功能、材料性能参数的可靠性,确保每一项参数均达标,合规性审查通过率需达到100%。

验收测试开展空载、半载(50%额定载荷)、满载(100%额定载荷)、超载(110%额定载荷)四级实测,模拟不同工况下的设备响应,测试项目包括制动性能、速度控制精度、安全回路动作可靠性、应急停机响应时间等。验收合格判定标准:关键安全参数合格率100%,一般性能参数合格率 $\geq 95\%$,应急响应时间 $\leq 1s$ 。若测试发现问题(如制动距离超标),需及时优化调整后复测,直至符合要求。

设备投入运行后,建立工业互联网+设备安全管理平台,实时采集制动系统响应时间、钢丝绳磨损量等安全参数,构建设备全生命周期健康档案(数据存储时间 ≥ 5 年);制定定期复审制度:每月开展安全参数月度核查,每季度进行性能专项检测,每年实施全面安全评估,结合生产需求动态调整设备配置,形成“合规审查-验收测试-运行监测-定期复审”的闭环管理模式,确保设备长期处于合规安全状态。

5 评估方法应用的建议

为有效实施矿山提升设备安全性能评估方法,提出以下建议。其一,加强人员培训。专业人员是评估方法有效实施的关键,矿山企业要定期组织人员参加培训,使其熟悉各类评估方法原理、流程,掌握检验检测仪器设备的使用方法,同时了解PLC控制系统、数字孪生技术等前沿知识,提升整体技术水平和安全意识。其二,建立评估数据库。集中存储和管理不同矿井、型号设备的评估数据,涵盖基本信息、评估指标、故障记录等,通过分析发现普遍规律和潜在问题,为设备使用、改进和维护提供参考。其三,强化跨部门协作。评估涉及多部门,设备管理部门确保设备符合安全要求,安全管理部门制定标准、监督评估,技术部门提供技术支持与数据分析,各部门协同工作。其四,持续关注技术发展。科技发展带来新评估方法和技术,矿山企业要关注行业动态,及时引进先进技术,积极与科研机构、高校合作开展研究应用,提升评估水平和效果。

6 结论与展望

总的来说,本文聚焦矿山提升设备制造选型,系统构建了涵盖设备本体、运行控制系统、安全冗余设计的安全性评估体系,提出制动性能动态检测、基于PLC的故障诊断、数字孪生仿真验证等量化方法,并制定了标准化评估流程。该体系能有效识别设备安全隐患,降低事故风险,为矿山提升设备选型提供科学依据。未来,随着5G、AI、物联网等技术的深度融合,评估方法将向智能化、实时化方向演进,实现设备安全性能的远程监测与动态优化。同时,行业需进一步完善评估标准,加强产学研合作,推动矿山提升设备安全性能评估技术的持续创新与广泛应用,为矿山安全生产提供更强保障。

参考文献

- [1] 李玉瑾. 矿井提升系统的装备技术与展望[J].煤炭工程,2014,46(10):61-64.
- [2] 陈华豪.大型矿井提升机主轴结构受力分析及其优化设计[D].太原理工大学,2003.
- [3] 刘超杰.大型提升机卷筒结构性能优化及焊接特性研究[D].安徽理工大学,2025.DOI:10.26918/d.cnki.ghngc.2025.001378.

Analysis of the Current Situation of Cold Rolling of High-Temperature Alloy Sheets and Strips

Mingchen Zhao Fuqiang Mei

Steel Research Engineering Design Co., Ltd., Beijing, 100081, China

Abstract

To address the challenges in cold rolling of thin-section high-temperature alloy sheets, such as high deformation resistance, coupled plate shape and surface quality, and equipment parameter matching, a thermal-coupled elastoplastic contact finite element model was constructed. The elastic properties of the rolls, the rigidity of the frame, the lowering and speed, the tension between the frames, and the frictional heat transfer characteristics of the emulsion were all taken into account. Multi-objective Pareto and response surface regression optimization were employed to form the coordinated setting range for lowering and speed, and the secondary verification paths for tension, bending rolls, roll type, and cross movement of the middle roll were provided. A device upgrade and intelligent transformation scheme centered on a high-stiffness four-roll unit, variable roll type, positive and negative bending rolls, and cross movement of the middle roll, as well as AGC and AFC collaborative control was proposed. Combined with zone spraying, online monitoring of lubrication concentration and cleanliness, and post-rolling cleaning and drying closure, the effectiveness of multi-machine parameter coupling optimization and thermal friction elasticity collaborative control in improving thickness accuracy, plate shape stability, and surface cleanliness was verified. This provides a complete technical path for stable supply of high-temperature alloy sheet products with thin specifications.

Keywords

high-temperature alloy sheet and strip; cold rolling; plate shape control; surface quality; numerical simulation optimization

高温合金板带冷轧现状分析

赵明臣 梅富强

钢研工程设计有限公司, 中国·北京 100081

摘要

面向薄规格高温合金板带冷轧中高变形抗力、板形与表面质量耦合以及设备参数匹配等难题, 构建热力耦合弹塑性接触有限元模型, 联动辊系弹性、机架刚度、压下与速度、机架间张力及乳化液摩擦传热特性, 采用多目标帕累托与响应面回归寻优, 形成压下与速度的协同设定区间, 并给出张力与弯辊、辊型的二次校核路径。提出以高刚度四辊机组、可变辊型与正负弯辊及中间辊横移、AGC与AFC协同控制为核心的设备升级与智能化改造方案, 配合分区喷淋、润滑浓度与清洁度在线监测和轧后清洗干燥闭环。结果验证了多机架参数耦合优化与热摩擦弹性协同控制在提升厚度精度、板形稳定与表面清洁度方面的有效性, 为高温合金板带薄规格稳定供货提供成套技术路径。

关键词

高温合金板带; 冷轧; 板形控制; 表面质量; 数值模拟优化

1 引言

航空航天与工业燃机对薄规格耐热材料的需求增长, 推动高温合金板带由单道次间歇轧制向多机架连续冷轧与连退协同演进。高温合金兼具固溶强化与沉淀强化, 冷态下变形抗力高、加工硬化强, 叠加低热导率, 使板形与表面质量控制耦合加深。国外已形成多机架连续化、在线测厚与表面检测以及乳化液清洁度控制的闭环工艺链, 厚度公差与表面粗糙度等指标显著领先^[1]。本研究围绕热力学与摩擦学多

场交互, 结合数值模拟与智能化控制, 提出可实施的参数寻优与设备改造方案, 旨在获得更高的厚度精度、板形稳定性与表面清洁度, 并提升产线效率。

2 高温合金板带冷轧技术发展现状

2.1 高温合金板带冷轧工艺发展历程与应用领域

鉴于航空推进与能源装备对薄规格耐热材料的增长需求, 高温合金板带冷轧工艺完成了由单道次间歇轧制向多道次串联连续轧制与连退协同的演进。高温合金为以镍基或钴基为主体并在高温下保持强度与抗氧化性的合金, 冷轧为在再结晶温度以下实施的塑性变形过程, 用来获得高精度厚度与表面质量。早期受轧机刚度与测厚控制制约, 单道次压下

【作者简介】赵明臣(1981-), 男, 中国北京人, 本科, 高级工程师, 从事轧钢研究。

有限且道次间需频繁中间退火,造成产线节拍慢与性能波动。随着四辊机组、自动厚度控制和精细润滑配置完善,多道次连续轧制配合在线退火把厚度精度与表面清洁度提升到更高水平,并推动薄规格拓展。

2.2 国内外高温合金板带冷轧研究与产业现状对比

鉴于航空与工业燃机对薄规格高温合金板带的严苛适配需求,北美与欧洲把多机架连续冷轧、在线测厚与表面检测、乳化液清洁度控制联成闭环,形成热轧、固溶、冷轧精整的稳定工艺链。国内研究在变形机理与润滑行为上积累加深,产线已实现小批量稳定供货,但在大卷连续化和批间一致性方面仍待提升。对比关键指标可见,国内典型厚度公差为 $\pm 0.05\text{ mm}$,而海外认证产线普遍达到 $\pm 0.03\text{ mm}$;国内表面粗糙度 R_a 控制在 $1.2\text{ }\mu\text{m}$ 以内,国外先进水平稳定在 $0.8\text{ }\mu\text{m}$ 以内。需重点关注的是,自动厚度控制AGC与自动板形控制AFC的协同,把厚度与板形波动压缩到目标窗口,进而牵引宽度尺寸、一致性与表面缺陷密度的系统改进^[2]。

3 高温合金板带冷轧过程中的关键技术难点与挑战

3.1 轧制变形抗力与温度控制难点

在高温合金板带轧制中,固溶强化与沉淀强化并存,使材料在大塑性变形阶段呈现高变形抗力特性,这一特性把机架轧制力推至高位,并对压下路径与润滑状态提出苛刻要求。从变形机理来看,应变硬化与位错交缠使流动应力随累积应变上升,且在多道次连续变形中叠加应变历史,导致入口段承载峰值被放大。鉴于此,需构建可表征应变硬化规律的本构关系,用于匹配轧机刚度与分配压下率。

$$\sigma = K\varepsilon^n$$

其中, σ 表示变形抗力,单位为MPa; K 为材料强度系数,反映合金在给定温度与应变速率下的基准强度,单位为MPa; ε 为真应变,为无量纲量; n 为应变硬化指数,为无量纲量。

把温度窗口设定在 $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ 至 $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$,有助于在再结晶驱动与相稳定之间取得折中。温度升高会使强度系数下降,从而减小轧制力,温度偏低则上扬并与较高值耦合,使轧制力陡增并诱发板形异常。从工艺一致性来看,跨机架温度的瞬时波动会改变动态再结晶分数与晶粒长大速率,进而影响织构与残余应力分布,最终在硬度梯度与抗疲劳性能上形成区域差异。因此,应把温度场稳定控制并把温度敏感性纳入在线预测,以获得均匀组织与可控轧制力。

3.2 板形精度与表面质量控制挑战

立足高温合金板带在冷轧阶段强加工硬化与低塑性并存的工况,板形精度与表面质量的控制呈现耦合化难题。平直度控制目标设为不高于 5I ,从轧制力学角度来看,横向应力与厚差并行叠加会把边部浪形与中心鼓形同时放大,而辊系在热机械载荷共同作用下的弹性挠曲与热凸度变化又

把不均匀接触弧进一步固化为稳定缺陷。需重点关注的是,高温合金热导率较低,使辊面与带材界面温升更快,导致跨幅摩擦系数由中部向边部产生梯度,从而使张力分配与板形反馈陷入恶性循环。

进一步观察发现,表面划痕与氧化皮的生成具有多源驱动特性,其中辊面微观附着物与氧化碎屑的二次夹带会在高接触压力下形成线状或带状划痕,而润滑膜在高应力高温升条件下易出现瞬时失稳,使金属直接接触并触发粘着撕裂。把乳化液黏度、油滴尺寸、有效浓度与清洁度作为核心变量来进行管理工作,可在摩擦与传热两条路径上同时发挥作用,浓度稳定在 3% 至 4% 区间并配合在线精滤与温控,可显著降低接触界面的摩擦波动。辊面纹理与硬度匹配度同样不可忽视,粗糙峰谷不均一会把局部峰值压力推高,诱发黏着结瘤与周期性擦伤^[3]。

3.3 轧制设备与工艺参数匹配性问题

在高温合金板带冷轧的工艺系统中,设备刚度与工艺参数的协同匹配决定了变形均匀性与板形稳定性。轧机刚度系数可理解为轧制力变化与辊缝弹性压下变化的比值,数值越高表征机架与辊系的整体变形越小。辊系配置指工作辊与支承辊直径组合、辊型与辊胀预设、正负弯辊与横移策略的系统化设置。压下率是单道次厚度相对减少量,轧制速度指带钢出口线速度。

从机架弹性到接触弧分布的传递链条来看,当目标压下率与轧机刚度系数不相匹配时,辊缝在带钢宽向上产生差异化弹性闭合,机械皇冠与热皇冠的合成量随宽度位置发生偏移。刚度偏低且辊径组合偏软,会把接触弧中心区域的接触宽度扩大,导致中心区单位压力上升,边部因有效载荷不足而产生相对欠变形。与此相伴,弯辊力预置不足或辊型补偿不当,会使轧制力增长转化为额外的辊扁平效应,放大厚向与宽向的应力不均衡,进而在后续机架的拉伸协调中形成难以消除的累计板形误差。

从匹配路径的角度考察,提升有效刚度并对辊系进行针对性配置是抑制上述机理链条的关键环节。采用高刚度机座与大直径支承辊组合,可以把辊扁平带来的力学增厚效应控制在可调范围内;小直径工作辊配合可变辊型与正负弯辊闭环,能够在高压下实现宽向负荷的快速再分配;在压下率与速度联动设定上,应把单道次负荷峰值限制在弯辊和辊型的可补偿区间内,并凭借机架间张力的阶梯化设定对宽向延伸差进行二次调平。上述耦合思路的目标是让设备弹性、辊系几何与参数设定在接触弧、摩擦状态和温度场三个层面实现同向协同,从源头降低压下过载触发板形失控的概率。

4 高温合金板带冷轧优化策略与应用效果评估

4.1 基于数值模拟的工艺参数优化方法

鉴于薄规格高温合金板带在冷轧阶段呈现高变形抗力与板形表面耦合的工况,本研究把有限元数值模拟当作参数

寻优的核心工具，构建热—力耦合、弹—塑性接触模型，联动轧辊弹性变形、辊型与弯辊设定、机架刚度以及乳化液传热与摩擦特性，围绕道次压下与轧制速度对接触区应力应变与温升的影响进行系统扫描。模型采用跨幅三维带材—轧辊接触域以刻画厚向与宽向应变分配，弹性辊系与带材塑性体耦合求解，边界条件引入入口与出口张力、喷淋冷却与辊缝热源，摩擦系数依据速度与温升构建分区映射。参数空间设置为压下率 15% 至 30% 与速度 10 至 20 m/min，先以拉丁超立方抽样生成候选组合，再对近优区域进行加密仿真。基于多目标帕累托排序对候选组合进行归类，选取在满足承载约束条件下同时削弱应变梯度与剪应力峰值的参数域，形成压下一速度耦合设定的可选区间，再把机架间张力与辊系调节量嵌入二次校核以完成工艺路线固化。

4.2 轧制设备升级与智能化改造方案

面向薄规格高温合金板带的高负荷工况，提出以高精度四辊轧机为核心的设备升级与智能化改造路径。四辊轧机指以小直径工作辊配大直径支承辊的辊系组合，本研究选用加厚机座与一体化横梁把刚度系数提升约 20%，并配置可变辊型、正负弯辊以及中间辊横移的电液伺服单元，使辊缝弹性闭合更可控。结合快速 AGC 与 AFC 协同控制，AGC 为自动厚度控制，AFC 为自动板形控制，把负荷扰动映射为弯辊与辊型的实时补偿，抑制辊扁平与机械皇冠波动，稳定接触弧与中性点。配套的机架间张力以及主传动升级，选用高响应矢量驱动与双活套协调，把速度同步误差与张力相位滞后收敛在设定窗口，从应力再分配层面减弱宽向延伸差与边浪的放大效应。

再从热管理与摩擦控制的智能化入手，构建入口以及出口多波段测温、辊缝热模型与分区喷淋的闭环温控系统，把热凸度变化纳入在线补偿并对边中差喷射强度进行自适应调节。润滑与清洁子系统引入浓度折光监测、黏度估算与颗粒计数，配合磁性过滤以及精过滤维持乳化液清洁度与油滴尺度稳定，同时强化轧后清洗与风刀干燥以降低油污残留。

4.3 优化方案的应用效果评估

足于高温合金板带在冷轧阶段对厚度一致性、板形稳定性与表面清洁度的同步要求，本研究把优化方案的效果评估聚焦在厚度公差、平直度、表面粗糙度以及产线效率四个维度展开，并把统计口径与测量条件固化为可复现的评价框架，以避免不同批次与不同机组之间因方法差异带来的偏移。结合前文的参数寻优与设备协同设定，可观测到厚度精度与板形指标的收敛同向发生，表现为在相同厚度段内把公差窗口从 $\pm 0.05\text{ mm}$ 压缩至 $\pm 0.03\text{ mm}$ ，并把平直度指标

从 8I 收敛至 4I，这一趋势与 AGC 和 AFC 的闭环协同以及弯辊和辊型的在线补偿高度相关。进一步观察表面质量层面，润滑与清洁子系统对摩擦热与界面粘着的抑制作用使接触峰值剪应力降低，从而把表面粗糙度 Ra 由 $1.2\text{ }\mu\text{m}$ 降至 $0.7\text{ }\mu\text{m}$ ，且在跨卷统计口径下保持稳定波动范围。与质量维度并行，机架间张力的响应升级与主传动同步误差的收敛，叠加连轧与连退节拍的协调，使单位机时产出不提高单机架负荷峰值的前提下获得提升，综合评估对应生产效率提升 15%。在相同钢号的连卷统计中，四项指标的对比关系如表 1 所列，评价口径严格绑定厚度段、取样长度与统计方式，便于把不同批次的离散性纳入同一评价区间进行横向比较，从而支撑后续在多钢号、小批量供货场景中的长期过程稳定性判断。

表 1 优化前后高温合金板带冷轧关键指标对比

指标	优化前	优化后	统计口径与测量条件
厚度公差	$\pm 0.05\text{ mm}$	$\pm 0.03\text{ mm}$	厚度范围 0.5-2.5 mm，取样长度 1 m，3 σ 统计
平直度指标 I	8I	4I	长度 1 m 波高与波距综合评价，在线板形仪，跨卷统计
表面粗糙度 Ra	$1.2\text{ }\mu\text{m}$	$0.7\text{ }\mu\text{m}$	触针式测量，取样长度 0.8 mm，同卷 3 点均值
生产效率	100%	115%	以改造前年均机时产出为基准，连轧连退协同节拍，按班组核算

5 结语

本文以数值模拟驱动的参数寻优与设备智能化改造为抓手，建立了覆盖辊系弹性、压下速度张力联动与润滑热管理的协同控制体系，实现厚度公差、平直度与表面粗糙度的同步优化，并在不提升单机架负荷峰值的前提下提高产线效率。结果表明，多机架参数耦合与 AGC、AFC 闭环配合是抑制接触弧波动与摩擦失稳的关键，分区喷淋与乳化液清洁度管理可有效降低剪应力峰值与表面缺陷。后续将面向更宽规格与多钢号扩展模型参数库，强化在线缺陷识别与残余应力监测，细化摩擦与温度的自适应控制策略，进一步提升大卷连续化与批间一致性表现。

参考文献

[1] 段云波,王皓,马鑫,刘庆,王敏.冷轧汽车板表面“sliver”缺陷溯源分析研究[J].连铸,2025,44(02):15-21.

[2] 任禹铜,于庆波,秦勤.冷轧带钢感应加热退火过程的数值模拟[J].材料与冶金学报,2025,24(03):293-300.

[3] 游鑫,蔡笑蓉,杨庚蔚,金学军.薄板坯热轧过程多物理场演化与工艺参数的有限元分析[J].上海金属,

Structural Design and Motion Characteristics Research of Up-Down Alternating Extensible Electronic Board Pressing Machine

Fuyu Tan

Southern Medical University, Luoding, Guangdong, 510515, China

Abstract

In the electronics manufacturing sector, the electronic board pressing process directly impacts product quality and production efficiency. Traditional pressing equipment suffers from issues such as insufficient cycle time utilization and prolonged workstation switching times during operation, which limit capacity expansion potential. To address these challenges, this study proposes an alternating-up-and-down telescopic electronic board press structure. By implementing alternating extension and retraction mechanisms between upper and lower components, the design enables continuous multi-station pressing while synchronizing material handling operations. Through production cycle analysis and motion process modeling, systematic research was conducted on equipment structural composition, transmission mechanisms, and motion coordination systems. Results demonstrate that this innovative structure effectively reduces idle travel time, enhances equipment utilization rates, and significantly improves production efficiency without compromising pressing quality. The research findings provide valuable insights for optimizing electronic board pressing equipment design.

Keywords

electronic board press; alternating telescopic structure; motion characteristics; beat optimization; automated design

上下交替伸缩式电子板压合机结构与运动特性研究

谭福宇

南方医科大学, 中国 · 广东 罗定 510515

摘 要

在电子制造领域中, 电子板压合工序直接影响产品质量与生产效率。传统压合设备在运行过程中存在节拍利用率不足、工位切换耗时较长等问题, 限制了产能提升空间。基于此, 提出一种上下交替伸缩式电子板压合机结构方案, 通过上下机构交替伸出与回缩, 实现多工位连续压合与取放同步进行。结合生产节拍分析与运动过程建模, 对设备结构组成、传动方式及运动协调机制进行系统研究。结果表明, 该结构能够有效减少空行程时间, 提高设备利用率, 并在保证压合质量的前提下显著提升生产效率。研究成果为电子板压合设备的优化设计提供了参考。

关键词

电子板压合机; 交替伸缩结构; 运动特性; 节拍优化; 自动化设计

1 引言

随着电子产品向高精度与高密度方向发展, 电子板压合工艺对设备性能提出更高要求。传统压合设备多采用单向往复或单工位作业模式, 存在等待时间较长、生产节拍不连续等问题, 导致设备利用率不高。相关研究指出, 通过减少工序间空闲时间与优化操作流程, 可有效提升产量。在此基础上, 引入上下交替伸缩结构, 使压合与装卸动作实现空间与时间上的交错, 是提升效率的重要路径。同时, 已有实践表明, 通过多工位协同与节拍压缩, 可显著降低生产过程中

的无效时间, 从而提高整体产能。围绕这一思路, 对上下交替伸缩式电子板压合机的结构与运动特性进行系统分析, 对于实现设备高效运行具有重要意义。

2 上下交替伸缩式压合机的结构设计原理

2.1 整体结构组成与功能划分

上下交替伸缩式电子板压合机在结构构成上体现出模块化与协同化特征, 上压机构与下压机构分别布置于不同空间层级, 通过导轨与滑动副实现稳定的垂直往复运动。输送定位系统承担物料在各工位之间的转移与精确对位任务, 使电子板在进入压合区域前具备良好的位置一致性。控制系统以程序逻辑为核心, 对各执行单元进行统一调度, 使压合、转移与取放动作形成连续衔接关系。各子系统之间通过时序

【作者简介】谭福宇(1990-), 男, 本科, 工程师, 从事机械工程研究。

配合构建完整的作业链条,使设备在运行过程中维持较高的协同效率。结构设计强调空间的立体利用,通过上下机构在不同位置同时作业,使单一设备具备多工位处理能力,从而有效压缩非生产时间并提升整体运行效率。

2.2 上下交替伸缩机构的工作机理

该装置的运行机理建立在上下执行单元的时序交替基础之上,通过对运动阶段进行精确划分,使压合与准备过程在不同时间段交替展开。当上部压合机构完成施压任务时,下部机构处于待机或回程状态;随着上部机构退出工作区域,下部机构迅速进入压合位置,实现作业的连续衔接。一个完整周期内,各阶段在时间轴上呈现错位分布,使设备始终处于动态运行状态。工艺节拍表明,电子板在短时间内完成工位转移,并在随后的持续时间内完成压合过程,这种时间配置使运动过程具有良好的节奏性与连贯性。通过合理安排各动作的起止时刻,可使设备在不增加额外负荷的情况下实现高频运行,从而体现出交替结构在时间利用方面的优势。

2.3 多工位协同布局与空间优化

在空间布局方面,多工位协同设计使压合区与装卸区形成相对独立又相互联系的功能区域,通过滚动或滑移结构实现物料在各工位之间的顺畅转移。上下两组压合机构分别对应不同工位位置,其运动路径经过优化后互不干扰,使设备在有限空间内实现多任务并行处理。该布局方式不仅提高了空间利用率,也使生产过程更加紧凑有序。电子板在不同工位之间按照既定路径循环流动,逐步完成各阶段加工任务,形成稳定的生产节奏。通过减少搬运距离与重复定位过程,可有效降低时间损耗并提高作业连续性,使设备在长期运行中保持较高效率与良好稳定性。

3 关键结构与参数分析

3.1 传动系统与执行机构设计

在上下交替伸缩式压合机中,传动系统的设计直接关系到运动精度与运行稳定性。通过电机驱动与凸轮或连杆机构的组合,可将旋转运动转化为具有特定规律的往复直线运动,从而实现压头在不同阶段的精准位置控制。传动比的合理匹配有助于协调速度与力的输出,使压合过程在启动、加速与减速阶段均保持平稳过渡。运动曲线的优化能够有效降低冲击载荷对电子板及设备本体的影响,减少因瞬时应力集中引发的结构损伤。执行机构在设计中需兼顾刚度与质量分布,使其在高频往复运动中仍保持良好的动态响应特性。通过设置缓冲结构与限位装置,可对极端工况下的运动进行约束,避免因行程过冲或误动作引发安全隐患。整体结构在满足功能需求的基础上,强调运动连续性与力学稳定性,使设备能够在长时间运行中保持较高的可靠性。

3.2 压合机构力学特性分析

压合机构在工作过程中承担主要载荷,其力学特性对产品质量具有决定性影响。通过对压头与电子板接触界面的

受力分析,可以明确压力传递路径及应力分布特征。在理想状态下,压合力应均匀作用于接触区域,以避免局部应力过大导致材料变形或结构损伤。压头结构的形状与材料性能需要根据实际工艺要求进行优化设计,使其在受力过程中具备良好的刚性与适度的缓冲能力。压合力的控制需结合材料强度与连接要求,通过理论计算与试验验证相结合的方式确定合理范围,使连接强度与结构稳定性达到平衡。动态加载条件下,还需考虑惯性力与附加振动对受力状态的影响,通过调整运动参数与结构形式,使压合过程更加稳定。对力学特性的系统分析,有助于提升产品一致性,并为设备参数优化提供依据。

3.3 定位与夹持结构优化设计

定位与夹持结构在压合过程中承担着保障精度与稳定性的关键作用,其设计水平直接影响装配质量与生产效率。通过导向机构对电子板进行初步定位,再结合夹持装置实现精确固定,可有效减少位置偏差带来的影响。在结构设计中,需要兼顾定位精度与操作效率,使装卸过程简便且稳定,避免复杂操作增加人为误差。夹持机构的设计应具备一定柔性,以适应不同尺寸及形状的电子板,同时在夹持过程中提供稳定支撑,防止压合时产生位移。通过优化夹持力分布,使受力更加均匀,从而减少局部变形的可能性。定位元件与夹持机构之间的协同设计,有助于提高系统整体刚度与重复定位精度,使设备在连续作业中保持稳定性能。该类结构的优化不仅提升压合质量,也为设备高效运行提供重要保障。

4 运动特性与节拍优化分析

4.1 交替运动的时序特性

上下交替伸缩结构的本质在于通过时间维度的重新组织,实现不同执行单元之间的有序接续与重叠运行。基于工艺流程可将一个完整循环划分为压合阶段、转移阶段与装卸阶段,各阶段在时间轴上呈现出交错分布关系。在该结构中,上部机构完成压合作用的同时,下部机构处于回程或准备状态,当上部机构退出工作区间,下部机构迅速进入压合位置,从而形成连续的作业链。通过对各动作持续时间与转换时间进行量化分析,可建立周期性运动模型,使设备在运行过程中始终维持较高的占空比。与传统串联式流程相比,这种时序组织方式有效压缩了动作之间的间隙,使原本分散的工序在时间上实现耦合。由于各执行环节在不同阶段承担不同功能,系统整体呈现出稳定的节奏结构,不仅提升了时间利用效率,也增强了运行过程的可预测性,为后续节拍优化提供了基础。

4.2 节拍匹配与效率提升机制

在多工位压合系统中,节拍匹配直接决定整体生产效率与运行稳定性。交替伸缩结构通过将各工位的作业时间进行统一规划,使压合时间、物料转移时间与装卸时间之间形成相对稳定的比例关系,从而避免局部环节出现拥堵或空闲现象。通过对节拍进行系统分析,可发现设备效率的提升并

非依赖单一环节的加速,而在于各环节之间的协调程度。当压合周期与输送周期实现匹配时,物料在工位之间的流动呈现连续状态,系统整体运行趋于平衡。该机制通过减少无效等待时间,使单位时间内的有效作业比例显著提高。在实际运行中,节拍匹配还能够降低人为操作波动对系统的影响,使生产过程更加稳定。通过持续优化各阶段时间分配,可进一步压缩非生产时间,使设备在高负荷条件下仍能保持良好效率表现,从而实现产能的稳步提升。

4.3 运动协调控制策略

为实现交替结构的高效运行,需要构建以时序控制为核心的协调控制体系,对各执行机构的运动状态进行统一调度。控制系统通过预设运动逻辑,对上、下压合机构以及输送装置进行精确控制,使各动作在既定时间窗口内完成并顺利衔接。传感器系统用于采集关键位置与状态信息,为控制决策提供实时依据。当检测到位置偏差或节拍异常时,系统能够根据反馈信号进行动态调整,确保整体运行保持在稳定区间。控制策略中还需考虑各机构之间的耦合关系,通过优化控制参数,使运动过程平稳过渡,避免冲击与振动对设备性能产生影响。在复杂工况下,该协调机制能够有效抑制误差传递,使局部偏差不会扩散至整个系统。随着控制技术的发展,引入数据分析与预测算法,可对设备运行状态进行提前判断,从而实现更加精细化的调度与管理,使压合设备在高效运行的同时保持较高的可靠性与稳定性。

5 性能评价与应用效果分析

5.1 生产效率提升效果

在实际应用过程中,上下交替伸缩式压合结构通过对传统工序节拍的重构,实现了时间维度与空间维度的协同利用。压合作与取放动作在不同空间位置同步展开,使设备运行由间歇式转变为连续式,有效压缩了因等待与切换产生的非生产时间。结合节拍分析可知,单位循环中装卸与压合不再串联,而是形成交错关系,使单周期有效工作时间占比明显提升。该结构在多工位协同条件下,可实现电路板在不同工位之间的连续流转,避免重复定位与往返搬运带来的时间损耗。在相同工作时长内,设备完成的压合次数明显增加,产出能力呈现稳定增长趋势。同时,由于操作流程简化,对人工干预依赖程度降低,使生产节拍更具稳定性与可预测性,从而为批量化生产提供了可靠支撑。整体来看,该结构通过减少空行程与冗余动作,使时间资源得到充分利用,体现出较高的生产效率优势。

5.2 设备运行稳定性与可靠性分析

从运行特性来看,上下交替伸缩式结构在动力分配与

载荷传递方面表现出较好的均衡性。上下机构在不同时间段承担压合任务,使单一执行单元的连续受力时间得到有效分散,降低了局部疲劳积累风险。结构设计中通过导向装置与限位机构对运动轨迹进行约束,使压头在往复运动过程中保持较高的重复定位精度,从而保证压合质量的一致性。控制系统通过对各执行单元的协调调度,实现动作之间的精确衔接,避免因时序失配引起的干涉或卡滞现象。长期运行条件下,设备各关键部件的磨损速率相对均匀,维护周期得到延长,运行可靠性随之提升。综合结构刚度、传动稳定性与控制精度等因素,该类设备能够在高频作业环境中保持稳定性,具备良好的工程适应性。

5.3 应用推广与技术发展前景

在电子制造行业持续向高效率与高精度方向发展的背景下,上下交替伸缩式压合机具有明显的应用拓展潜力。该结构通过对传统压合流程的重组,使设备在有限空间内实现更高的产出能力,适用于对节拍要求较高的生产场景。在技术发展层面,随着自动控制与信息技术的融合,设备可进一步引入传感检测与数据采集功能,对压合压力、位置偏差及运行状态进行实时监测,从而形成闭环控制体系。通过数据分析,可对设备运行参数进行动态优化,使生产过程更加稳定可控。在系统集成方面,该类设备能够与自动输送系统及生产管理系统形成联动,实现生产线整体协同运行。由此可见,该结构不仅在当前生产实践中具备显著优势,也为压合设备向智能化与柔性化方向发展提供了重要支撑。

6 结语

上下交替伸缩式电路板压合机通过结构创新与运动优化,实现了压合过程的连续化与高效化。在保证产品质量的前提下,该结构有效减少了生产过程中的无效时间,提高了设备利用率。通过对结构与运动特性的系统分析,可以看出该设备在提升生产效率方面具有明显优势。未来,随着技术不断进步,其在电子制造领域的应用将更加广泛,为行业发展提供有力支撑。

参考文献

- [1] 李华聪,谢伦魁,黄俊,等.含凹腔印制电路板制作工艺研究[J].印制电路信息,2025,33(12):35-39.
- [2] 吉祥书,柴喜,何升伟,等.高多层板压合铜箔起皱的工艺分析[J].集成电路应用,2025,42(11):50-51.
- [3] 杨单,罗旭晖,丘威平.高导热金属基覆铜板压合树枝状流胶因素分析[J].印制电路信息,2025,33(06):37-40.
- [4] 袁永祺,沈勇.2-氨基苯并咪唑在微蚀超粗化中的应用及作用机理分析[J].表面技术,2025,54(20):135-145.

Research on Common Fault Diagnosis and Maintenance Strategies for High Voltage Circuit Breakers

Lingqin Meng

Xilin Gol Ultra-High Voltage Power Supply Company, Xilin Gol, Inner Mongolia, 026000, China

Abstract

As core switching equipment in power systems, high-voltage circuit breakers play a critical role in controlling circuit operations and fault clearance. Their operational reliability directly determines the safety, stability, and power supply quality of electrical systems. This study focuses on common fault diagnosis and maintenance strategies for high-voltage circuit breakers, integrating practical equipment operation experience with fault theory. We systematically analyze typical fault types and causes affecting breaker mechanical structures, operating mechanisms, insulation systems, and arc extinguishing systems. A comprehensive process framework encompassing “fault identification, diagnostic localization, maintenance optimization, and preventive maintenance” has been established. Scientific fault diagnosis techniques and standardized maintenance protocols can significantly reduce breaker failure rates, extend equipment lifespan, and enhance power system operational stability. The research findings provide technical references for power operation personnel, contributing to improved maintenance management standards in electrical systems.

Keywords

high-voltage circuit breaker; fault diagnosis; maintenance strategy; power system; operation and maintenance management

高压断路器常见故障诊断与维修策略研究

孟令钦

锡林郭勒超高压供电公司, 中国 · 内蒙古 锡林郭勒 026000

摘 要

高压断路器作为电力系统中的核心开关设备, 承担着控制电路通断与故障切除的关键职能, 其运行可靠性直接决定电力系统的安全稳定与供电质量。本文以高压断路器常见故障诊断与维修策略为研究对象, 结合电力设备运维实践与故障理论, 系统分析断路器机械结构、操动机构、绝缘系统及灭弧系统的常见故障类型与成因, 构建“故障识别-诊断定位-维修优化-预防维护”的全流程处理体系, 科学的故障诊断技术与规范化维修策略可显著降低断路器故障发生率, 延长设备使用寿命, 提升电力系统运行稳定性。本文研究成果可为电力运维人员提供技术参考, 助力电力系统运维管理水平的提升。

关键词

高压断路器; 故障诊断; 维修策略; 电力系统; 运维管理

1 引言

当前, 电力系统对供电可靠性的要求不断提升, 传统的“事后维修”模式已难以满足现代电网运维需求, 亟需建立科学高效的故障诊断体系与预防性维修策略。然而, 高压断路器结构复杂, 涉及机械、电气、液压等多个系统, 故障成因具有隐蔽性、多样性与关联性特点, 给故障诊断与维修带来较大挑战。部分运维单位因诊断技术落后、维修流程不规范, 导致故障定位不准确、维修效果不佳, 甚至引发二次故障。因此, 开展高压断路器常见故障诊断与维修策略研究, 对提升设备运维水平、保障电力系统安全稳定运行具有重要现实意义。

2 高压断路器结构组成与故障分类

2.1 基本结构组成

高压断路器主要由导电回路、灭弧系统、操动机构、绝缘系统及机械传动系统五部分组成。导电回路负责承载额定电流, 包括触头、导电杆、接线端子等部件; 灭弧系统用于故障时快速熄灭电弧, 根据灭弧介质可分为油断路器、SF6 断路器、真空断路器等类型; 操动机构是断路器动作的动力来源, 常见类型有弹簧操动机构、液压操动机构、电磁操动机构; 绝缘系统分为内绝缘与外绝缘, 保障设备对地及相间绝缘; 机械传动系统负责传递操动机构的动力, 实现触头的分合闸动作。各系统协同工作, 确保断路器在正常与故障状态下均能可靠运行。

【作者简介】孟令钦(1996-), 男, 中国内蒙古赤峰人,

本科, 工程师, 从事变电检修研究。

2.2 故障分类与成因分析

2.2.1 机械故障

机械故障主要发生在操动机构与机械传动系统,成因包括零部件磨损、变形、卡滞、润滑不良等。例如,弹簧操动机构常出现弹簧疲劳断裂、合闸电磁铁卡滞故障,多由长期动作导致弹簧弹性下降、电磁铁铁芯积污引起;液压操动机构易出现油压异常、泄漏故障,主要因密封件老化、液压油劣化、油泵故障造成。

2.2.2 电气故障

电气故障主要涉及导电回路与控制回路,常见类型有触头过热、接触电阻增大、控制回路断线等。触头过热故障多由触头表面氧化、接触压力不足、触头磨损严重导致,长期通过大电流时易引发温度异常升高;控制回路断线故障则可能因导线老化、接线端子松动、继电器故障造成,导致断路器无法正常分合闸。

2.2.3 绝缘故障

绝缘故障主要表现为绝缘水平下降、局部放电等,成因包括绝缘件老化、受潮、污秽、过电压作用等。户外断路器外绝缘易因大气污秽积累出现闪络故障,尤其在潮湿环境下,污秽层导电导致绝缘强度降低;内绝缘故障多由绝缘油劣化、SF₆气体泄漏或水分超标引起,如SF₆断路器气体泄漏会导致绝缘性能下降,严重时引发内部放电。

2.2.4 灭弧系统故障

灭弧系统故障直接影响断路器故障切除能力,常见类型有灭弧室损坏、灭弧介质泄漏、电弧熄灭延迟等。真空断路器灭弧室真空度下降会导致灭弧能力丧失,多由密封件老化、外壳破裂引起;SF₆断路器灭弧室气体压力不足会导致电弧熄灭困难,主要因气体泄漏或补气装置故障造成。

3 高压断路器常见故障诊断技术与应用

3.1 传统故障诊断技术

传统诊断技术基于电气试验与外观检查,具有操作简便、成本低的特点,适用于常规故障排查。外观检查通过肉眼观察断路器外观、零部件状态及连接部位,可快速发现明显故障,如零部件变形、泄漏、导线松动等;绝缘电阻测试通过测量绝缘件的绝缘电阻值,判断绝缘性能是否下降,若测试值低于标准值,说明存在绝缘受潮、老化等问题;直流电阻测试用于检测导电回路接触电阻,接触电阻增大时会导致导电回路发热,测试值超标可初步判断触头接触不良或导电杆松动故障^[1]。

3.2 现代化故障诊断技术

3.2.1 红外热成像检测技术

通过检测断路器各部位温度分布,识别过热故障。该技术具有非接触、实时检测的特点,可快速定位导电回路、接线端子等部位的温度异常点。例如,某220kV变电站断路器接线端子因接触不良出现过热,红外热成像检测显示该

部位温度达135℃,形成明显高温热点,运维人员及时处理避免了故障扩大。实际应用中,需结合环境温度、负荷电流等因素进行综合分析,避免误判。

3.2.2 振动分析技术

适用于机械故障诊断,通过采集断路器操动机构动作时的振动信号,分析信号频率、幅值等特征,判断机械部件的运行状态。弹簧操动机构出现弹簧疲劳、连杆松动时,振动信号的频率特征会发生显著变化;液压操动机构油压异常时,振动幅值会偏离正常范围。某35kV断路器合闸时振动异常,通过振动分析仪采集信号,发现200-300Hz频段幅值比正常状态高50%,拆解检查发现合闸缓冲器磨损,更换缓冲器后振动恢复正常。

3.2.3 油中溶解气体分析技术

主要用于油浸式断路器故障诊断,通过检测绝缘油中溶解的氢气、甲烷、乙炔等特征气体的含量与比值,判断故障类型与严重程度。不同故障类型对应特定的气体产生规律,如电弧放电故障会产生大量乙炔与氢气,过热故障会产生甲烷与乙炔。某110kV油浸式断路器油中溶解气体检测显示,乙炔含量达150μL/L,远超标准限值(≤5μL/L),判断存在电弧放电故障,经检查发现触头烧损,及时维修避免了绝缘击穿。

3.2.4 局部放电检测技术

用于识别绝缘故障,通过检测断路器内部局部放电产生的电信号、超声信号或电磁信号,判断绝缘缺陷位置与严重程度。常用方法包括超声波检测法与特高频检测法,超声波检测法可定位局部放电点,特高频检测法灵敏度高,适用于早期绝缘缺陷识别。某500kV SF₆断路器局部放电检测中,超声波传感器检测到异常信号,结合特高频检测定位缺陷位置为灭弧室绝缘拉杆,拆解发现拉杆表面存在污秽,清洁处理后局部放电信号消失。

3.3 诊断技术融合应用

单一诊断技术存在局限性,实际运维中需结合多种技术实现优势互补,提升故障诊断准确性。以某220kV SF₆断路器故障诊断为例,设备出现分合闸时间延长故障,首先通过控制回路电气试验排除控制回路故障;采用振动分析技术采集操动机构振动信号,发现液压操动机构动作时振动频率异常;结合油压监测数据,发现油压上升速度缓慢;进一步通过红外热成像检测,发现油泵电机温度过高。综合分析判断故障为油泵电机老化导致供油不足,更换电机后故障排除。多技术融合应用可避免单一技术的误判,实现故障的精准定位。

4 高压断路器针对性维修策略

4.1 机械故障维修策略

机械故障维修核心在于恢复零部件功能与配合精度,需根据故障类型采取对应措施。对于弹簧操动机构弹簧疲劳

断裂故障,需更换同型号弹簧,更换后进行弹簧预紧力测试,确保符合技术标准;电磁铁卡滞故障需拆解电磁铁,清除铁芯表面积污与锈蚀,涂抹专用润滑剂,检查线圈绝缘状态,确保动作灵活。液压操动机构密封件泄漏故障,需更换老化密封件,更换前检查密封面光洁度,避免安装杂质;油压异常故障需检查油泵、溢流阀等部件,油泵老化需及时更换,溢流阀卡滞需拆解清洗。

4.2 电气故障维修策略

电气故障维修需重点保障导电回路通畅与控制回路可靠,针对不同故障类型采取相应措施。触头过热故障维修时,需拆解触头部位,打磨触头表面氧化层,若触头磨损严重需更换触头,调整触头接触压力,确保接触电阻符合标准;接线端子松动故障需重新紧固端子,采用力矩扳手控制紧固力矩,避免过松或过紧。控制回路断线故障需排查断线位置,更换老化导线,紧固松动接线端子,检查继电器、接触器等元件触点状态,必要时进行更换。

4.3 绝缘故障维修策略

绝缘故障维修核心在于恢复设备绝缘性能,需根据绝缘缺陷类型采取针对性措施。外绝缘污秽闪络故障需对绝缘子进行清洁处理,采用高压水冲洗或机械擦拭方式去除表面污秽,必要时涂刷防污闪涂料,提升绝缘表面耐污性能;绝缘件受潮故障需进行干燥处理,油浸式断路器可通过真空滤油机干燥绝缘油,SF₆断路器需更换受潮气体并对设备内部进行干燥。内部绝缘老化故障需更换老化绝缘件,如绝缘纸、绝缘拉杆等,更换后进行绝缘试验,确保绝缘强度达标。

4.4 灭弧系统故障维修策略

灭弧系统故障维修需保障设备灭弧能力,针对不同灭弧介质类型采取对应措施。真空断路器灭弧室真空度下降故障,需直接更换灭弧室,更换后进行真空度检测与耐压试验,确保灭弧室性能可靠;SF₆断路器灭弧室气体泄漏故障,需先定位泄漏点,更换密封件或损坏部件,重新注入SF₆气体并进行密封性试验,确保气体压力稳定。灭弧室内部部件烧损故障需更换灭弧室,检查动、静触头状态,必要时同步更换触头^[2]。

5 高压断路器全生命周期维护体系构建

5.1 预防性维护策略

预防性维护是降低故障发生率的关键,需结合设备运行状态与环境条件制定定期维护计划。定期巡检方面,每周进行一次外观检查,每月进行一次运行参数检测,包括电流、电压、温度等;每半年进行一次绝缘电阻测试、控制回路通断试验等常规试验;每年进行一次全面检测,结合红外热成像、振动分析等技术进行深度诊断。环境适应性维护方面,户外设备需做好防污、防潮、防凝露措施,高温季节加强散热检查,低温季节做好防冻处理,避免环境因素导致故障。

5.2 状态检修优化

状态检修基于设备运行状态数据,通过分析诊断结果调整维护计划,实现“按需维护”。建立设备状态监测数据库,实时采集设备运行参数、检测数据与故障记录,采用大数据分析技术评估设备健康状态,划分健康等级(良好、一般、预警、故障)。针对不同健康等级制定差异化检修策略:健康状态良好的设备延长维护周期;状态一般的设备增加检测频次;状态预警的设备进行针对性预防性维修;故障状态的设备立即停机检修^[3]。

5.3 运维管理规范

建立规范化运维管理制度,明确运维人员职责与操作流程,定期开展技术培训,提升运维人员专业能力。制定故障诊断与维修操作规范,统一诊断方法、维修流程与质量标准,确保维修作业标准化;建立设备全生命周期档案,记录设备采购、安装、调试、运行、检测、维修等全过程信息,为维护计划制定提供数据支撑。加强备品备件管理,储备常用零部件如密封件、触头、线圈等,确保故障发生时能快速更换。

5.4 智能化运维技术应用

随着智能电网发展,智能化技术为高压断路器运维提供新方向。引入物联网技术,在断路器上安装温度传感器、振动传感器、气体传感器等监测设备,实现运行状态实时监测与数据远程传输;采用人工智能算法对监测数据进行分析,实现故障早期预警与智能诊断,提升故障识别效率;构建数字化运维平台,整合设备状态数据、维修记录等信息,实现维护计划自动生成与运维过程可视化管理。

6 结论

高压断路器故障类型主要包括机械故障、电气故障、绝缘故障与灭弧系统故障,其成因与设备结构、运行环境、运维管理等因素密切相关;传统诊断技术与现代化检测技术的融合应用,可实现故障的精准识别与定位,其中红外热成像、振动分析、油中溶解气体分析等技术在实操中表现出良好效果;针对不同故障类型制定的针对性维修策略,可有效恢复设备功能,保障运行可靠性;构建“预防性维护-状态检修-智能化运维”的全生命周期维护体系,能显著降低故障发生率,提升电力系统运维管理水平。

参考文献

- [1] 夏瑞泽.变电检修中高压SF₆断路器常见故障分析[C]//中国智慧工程研究会.2024工程技术与施工管理交流论文集(上).国网随州供电公司,2024:17-19.
- [2] 叶罕罕.变电检修中高压SF₆断路器常见故障分析[J].家电维修,2024,(09):89-91.
- [3] 马俊岭,何亚东,薛志刚.高压断路器的状态监测和故障诊断[J].电力设备管理,2024,(16):62-64.

Structural Strength Analysis and Vibration Reduction Design of Airborne Antenna Mounting Frame

Shirui Yao

The 54th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Shijiazhuang, Hebei, 050000, China

Abstract

For the airborne antenna support in the service environment of combined run-up take-off, random vibration and shock impact, as well as temperature and humidity cycles, a vibration and strength collaborative design method based on small deformation elasticity mechanics and finite element is constructed. Through parametric modeling and topological geometric collaborative optimization, considering multi-bolt pre-tightening and contact effects, combined with acceleration power spectral density and half-sine impact load, constraining natural frequency and damping ratio, polyether polyurethane is selected to configure the vibration isolation characteristics and perform equivalent linearization. Using Gaussian process surrogate and sequential quadratic programming to drive optimization, the test bench re-creates the interface stiffness of the actual installation and realizes the consistency alignment of the load spectrum and measurement points. Engineering cases show that the vibration transmission rate of the flange relative to the base is reduced from 0.6 to 0.3, and the nominal stress of the dangerous section is reduced from 300 MPa to 245 MPa, meeting the strength and resonance avoidance constraints. The results indicate that this method can significantly reduce wideband response and improve strength margin without increasing mass.

Keywords

airborne antenna bracket; random vibration; vibration reduction design; parametric modeling; finite element optimization

机载天线支架结构强度分析与减振设计

姚诗锐

中国电子科技集团公司第五十四研究所, 中国·河北 石家庄 050000

摘要

面向机载天线支架在滑跑起飞、随机振动与落震冲击交织以及温湿循环的服役环境, 构建以小变形弹性力学与有限元为基础的减振与强度协同设计方法。通过参数化建模与拓扑几何协同优化, 考虑多螺栓预紧与接触效应, 联合加速度功率谱密度与半正弦冲击载荷, 约束固有频率与阻尼比, 选用聚醚型聚氨酯配置隔振特性并进行等效线性化。以高斯过程代理与序列二次规划驱动寻优, 试验台架复现实装接口刚度并实现载荷谱与测点的一致性对齐。工程案例显示, 法兰相对基座的振动传递率由0.6降至0.3, 危险截面名义应力由300 MPa降至245 MPa, 满足强度与共振规避约束。结果表明, 该方法可在不增加质量的前提下显著降低宽频响应并提升强度裕度。

关键词

机载天线支架; 随机振动; 减振设计; 参数化建模; 有限元优化

1 引言

机载电子设备在飞行全包线内承受滑跑与起落冲击、机体气动激励以及舱内温湿循环的耦合作用, 支承结构需要在宽频随机激励与瞬态冲击下保持稳定承载并避免共振放大。尤其是整流罩内的天线支架, 既要兼顾法兰定位精度和电磁布局, 又要在多螺栓连接、开孔减重与维护包络等约束下实现高效减振, 这对结构刚度、阻尼与连接工艺的协同提出了更高要求^[1]。为此, 亟需面向工程判据的系统化方案,

将参数化建模、材料阻尼配置、接触与预紧建模以及随机振动与冲击谱的联合评估纳入一体化框架, 实现固有频率、阻尼比、传递率与名义应力的多目标权衡。本文围绕机载天线支架, 构建从设计域定义到仿真优化再到实验验证的闭环流程, 力求在质量与接口刚度受限条件下, 实现共振规避与承载可靠性的同步提升。

2 机载天线支架结构强度分析的理论基础

鉴于机载天线支架处于滑跑与起飞、气动激励与落震冲击交织的服役情境, 结构需在宽频随机振动、瞬态冲击与循环温湿变化下维持稳定承载。面向工程判据, 应力、应变与等效弯扭刚度作为核心指标, 同时把固有频率与阻尼比纳入共振规避约束。基于小变形弹性力学, 把支架视作连续体

【作者简介】姚诗锐(1990-), 男, 中国河北石家庄人, 本科, 工程师, 从事机械设计与制造研究。

并运用胡克定律描述线性本构；在多螺栓连接与开孔减重共存的几何中，借助有限元离散与接触、预紧建模及网格收敛评估来还原载荷路径与约束刚度。材料参数方面，若选用铝合金 6061-T6，弹性模量取 70 GPa，泊松比 0.33，屈服强度约 275 MPa，抗拉强度约 310 MPa；在巡航低温与机舱温升交替条件下，还需引入线膨胀系数 $23 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 导致的热应力。由此把名义承载与弯矩叠加为应力准则，服务于局部细节复核。

$$\sigma_{\max} = \frac{F}{A} + \frac{M}{W}$$

其中， $\sigma_{\max}$ 表示危险截面的最大名义正应力（单位：Pa）， F 为轴向载荷（单位：N）， A 为受力截面积（单位： m^2 ）， M 为关于该截面的弯矩（单位： $\text{N} \cdot \text{m}$ ）， W 为截面抵抗矩（单位： m^3 ）。

3 机载天线支架的减振设计方法

3.1 减振结构的参数化建模

在飞行载荷呈宽频随机与冲击叠加的语境下，把三维参数化建模作为减振结构设计的起点。本研究把几何尺寸、安装位置、材料参数与连接状态转化为可调用的设计变量，并在一体化有限元环境中完成几何与网格联动。关键变量覆盖隔振器中心距与极向角、筋板分区厚度、螺栓孔群坐标偏置，以及隔振器等效刚度与损耗因子的取值范围；结合机身接口与维护包络，把允许布置的区域定义为设计域，把天线法兰与走线区定义为不可变域。边界条件依据机载设备安装规范设置固定参考点与柔性约束，使连接刚度得到等效；载荷输入采用加速度功率谱密度与半正弦冲击叠加的谱线，频带覆盖 20 至 2000 Hz，并叠加典型温度历程以触发热弹耦合。为兼顾随机振动与共振规避，响应量选取位移传递率与等效应力峰值，约束一至三阶固有频率与阻尼比。拓扑优化在设计域内按密度法描述材料分布，把目标设定为提升模态刚度并降低传递率，同时限制总质量与接口刚度；迭代过程中由参数化几何驱动网格自动更新，内置灵敏度与过滤避免棋盘格，优化结果经几何重建转化为可制造的筋板与孔位布局，并回写主模型形成闭环^[2]。

3.2 减振材料的选型分析

在机载天线支架面临宽频随机振动与半正弦冲击叠加、伴随周期性温湿变化的工况下，减振材料选型被放到阻尼能力、温度稳定性以及重量约束的联立权衡中。把常见弹性体与金属阻尼材料进行对比可以看到，天然橡胶在中低频具备较高内耗，但在低温区易硬化，在温升时刚度下降且耐候性不足，且对航空燃油与液压油的耐受性偏弱。进一步观察金属阻尼材料，金属橡胶与金属丝网隔振元件在高温环境表现稳定，频幅依赖性明显，小应变下等效阻尼偏低，密度带来的质量惩罚较大，并且需要较高预紧来建立接触刚度。结合机身设备舱温度常年分布在 $-40 \sim 60 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 、局部峰值不超过 80°C 以及质量控制目标，本研究把聚醚型聚氨酯弹性体当作

核心隔振材料来使用，其在 100 Hz 邻域可获得约 0.25 的阻尼比，密度约 1200 kg/m^3 ，力学参数对温度的敏感性适中，兼具耐水解与抗疲劳特性，并可通过硬度与配方微调来实现目标固有频率与损耗因子的协同配置。需重点关注的是，把聚氨酯与铝合金界面的粘接与防腐处理与预紧设计相匹配，把长时蠕变与热老化纳入寿命评估，便可在不增加额外质量的条件下稳定降低传递率^[3]。

3.3 减振结构的仿真优化

鉴于机载宽频随机与半正弦冲击叠加的载荷谱，本研究把隔振参数驱动的有限元仿真优化作为核心环节。把支架与隔振器耦合建模于有限元环境，按接触与预紧建模，凭借模态叠加获取频域频响函数，提取机身基座与天线法兰处的加速度与位移，并据此计算传递率。时域施加等效冲击谱，评估峰值位移与名义应力，将其并入约束集合以约束安全边界。目标在于把频带内传递率峰值压低至目标值，同时维持接口刚度与模态间隔。

$$T = \left| \frac{1}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2 + 2j\zeta\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)} \right|$$

其中， T 为振动传递率， ω 为激励圆频率， ω_n 为固有圆频率， ζ 为阻尼比， j 为虚数单位。

从参数角度来看，把隔振器等效刚度与阻尼比当作主变量，同时对中心距与极向角进行协同调整，并把预紧力作为调节接触刚度与能量耗散的杠杆。为提高收敛效率，先以拉丁超立方在参数空间生成样本，构建基于高斯过程的代理模型，再借助序列二次规划进行外层寻优，内层以有限元求解校正代理。全流程把一至三阶固有频率与阻尼比设为共振规避约束，把铝合金与聚氨酯在 -40 至 $60 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度依赖性写入材料卡片，并把网格收敛与接口刚度标定作为每轮迭代的前置校核。当频带内最大传递率不高于 0.3 且各约束满足时，更新参数至主模型以支撑后续工程定型。

4 机载天线支架结构性能的效果评估

4.1 强度与减振性能的实验测试

于支架在宽频随机振动与落震冲击交织的服役背景中承担载荷传递，本研究在机载设备安装刚度可复现实验台上构建静力与随机振动一体化测试平台，把优化后的支架与隔振器按规定预紧接入可调柔性夹具，并把接口刚度通过标准件与弹性插入件联合标定。静态强度试验依照设计工况把轴向与弯矩合成载荷加至设计载荷 1.2 倍，负载路径由伺服作动器在闭环力控下施加，危险截面以电阻应变花与数字图像相关同步观测，加载速率与保载时间按材料准则设定，用以稳定获取名义应力与应变分布。随机振动试验基于电动振动台实施控制，把基座三向控制加速度按 GJB150.16 规定谱在 20 至 2000 Hz 范围内闭环复制，驱动谱采用分段直线功率谱密度输入与宽带合成方法，控制通道与响应通道分别

布置在机身接口参考点与天线法兰位置。数据采集以同步触发方式开展，把加速度计、应变计与位移光学测量的采样频率统一至带宽十倍以上，并把系统传递函数以汉宁窗与平均技术进行频域处理。由此把仿真与实验在载荷谱、边界约束与测点位置三方面进行对齐，进一步把一致性评估纳入误差

阈值判定，包括最大应力的相对误差、主模态频率与阻尼比偏差以及传递率峰值偏差等指标，相关设置与判据见表1。需重点关注的是，预紧力与接触摩擦参数在试前通过扭矩角法与超声法联合校核，并把该标定结果回写至有限元模型，以减少由连接非线性引入的对比偏差^[4]。

表1 支架性能测试结果对比表

测试项目	输入条件	观测量	仿真对齐方法	一致性判据	备注
静态强度试验	合成载荷为设计载荷1.2倍，加载速率与保载时间按材料准则设定	危险截面最大应力与局部应变场	加载路径一致，夹具柔度按接口刚度标定，测点与网格节点对应	最大应力相对误差不超过10，名义应力低于材料屈服	应变花与数字图像相关同步采集
随机振动试验	GJB150.16分段直线功率谱密度，20至2000 Hz，基座三向闭环复制	法兰三向加速度、位移传递率、谱内峰值	基座控制谱匹配，传感器位置一致，频域处理参数一致	传递率峰值偏差不超过0.05，模态频率偏差不超过5，阻尼比偏差不超过0.02	加速度计与力锤在试前完成溯源校准
预紧与接触标定	预紧力按装配规范设定，摩擦系数按表面处理工艺取值	接口等效刚度与滑移阈值	扭矩角法与超声法联合校核，接触参数回标至有限元模型	接口刚度偏差不超过15，滑移阈值偏差不超过10	用于支撑仿真与实验一致性对比

4.2 工程案例验证

鉴于机背整流罩内通信天线对宽频随机与冲击耦合激励的敏感性，本研究选取一型中程无人机整流罩内通信天线支架作为工程对象，把参数化建模、减振材料选型与仿真优化贯穿于定型流程。围绕隔振器中心距与极向角、筋板分区厚度、螺栓孔群偏置以及预紧力开展协同配置；激励谱在20至2000 Hz范围内复现实装环境并叠加半正弦冲击，材料卡片写入温度依赖。在统一边界与接口刚度标定条件下，优化收敛时关键指标对比为振动传递率由0.6降至0.3，最大名义应力由300 MPa降至245 MPa。由此能够把共振风险在主肋带内进行有效规避，并把强度裕度回归至屈服以下的安全域；进一步观察表明，前者来源于固有频率与阻尼的协同调校，后者归因于筋板路径重构与接触刚度调节引起的载荷再分配。参数更新同步回写至主模型与工艺文件，隔振件按硬度分档进行配置，装配规范明确扭矩角区间与防腐体系，使优化方案在生产线实现闭环复现并具备跨机型的移植性^[5]。

5 结语

本文提出并验证了面向机载天线支架的减振与强度协同设计路径，通过三维参数化建模将几何尺寸、安装位置、材料与连接状态转化为可优化变量，结合拓扑与几何重建

形成可制造布局；在有限元中引入多螺栓预紧与接触摩擦，联合加速度功率谱密度与半正弦冲击进行频域与时域评估，并以固有频率、阻尼比、接口刚度与名义应力构成约束集；在材料层面选用聚醚型聚氨酯配置隔振特性，实现固有频率与损耗因子的协同调校。工程应用显示，传递率峰值显著压低，危险截面应力回归安全域，验证了方法的有效性与可落地性。后续工作将面向隔振件非线性与温度老化的长期效应开展识别与建模，完善疲劳与耐久准则，进一步引入鲁棒优化与制造偏差建模，并探索健康监测与参数回标机制，以提升跨平台推广与全寿命周期保障能力。

参考文献

[1] 彭磊.某机载相控阵天线振动故障分析及验证[J].环境技术,2025,43(06):90-96.

[2] 高爱国,郁大照,黄鹤翔.机载微带天线高功率微波耦合效应研究[J].系统工程与电子技术,

[3] 孙远涛,王小宇,田凤桢.可扩展片式天线结构设计及力学环境适应性分析[J].雷达科学与技术,2025,23(02):176-181+191.

[4] 杨瑛杰,商龙,吴军锋.基于信号与系统理论的机载设备电磁辐射特性分析与设计[J].电子元器件与信息技术,2025,9(06):116-118.

[5] 乔建江,王宝宝,张冰,张少辉,于卫东.结构因素对遥感天线跟踪精度影响分析及对策[J].无线电通信技术,2024,50(01):213-218.

The Application of Project-Based Teaching in the Automotive Marketing Course

Yanling Hu

Yunnan Qujing Applied Technology School, Qujing, Yunnan, 655000, China

Abstract

The automotive marketing course is crucial for enabling students to master both theoretical knowledge and practical skills in this field. However, traditional teaching methods often emphasize the transmission of theoretical knowledge while neglecting the development of students' practical abilities. Project-based teaching places students at the core, uses practice as a guide, and fosters their capacity for self-directed learning and independent inquiry by engaging them in project-based activities. Implementing project-based teaching in the automotive marketing curriculum enhances students' practical skills, teamwork abilities, and innovative capabilities, better aligning them with industry trends and market demands. This paper analyzes the advantages of project-based teaching and explores its specific application in automotive marketing courses, aiming to provide valuable insights for instructional reform in this discipline.

Keywords

project-based teaching; automotive marketing course; automotive marketing

项目化教学在汽车营销课程中的应用

胡艳玲

云南省曲靖应用技术学校, 中国·云南 曲靖 655000

摘要

汽车营销课程对于培养学生掌握汽车营销理论、实践技能而言非常关键。只是传统教学方法常常侧重于理论知识的传授,却忽略了对学生实践能力的培养。项目化教学把学生当作核心,以实践作为导向,借助引导学生参与项目实践,培育他们自主学习、自主探究的能力。于汽车营销课程里施行项目化教学法,能够提高学生的汽车营销实践能力、团队协作能力、创新能力,让他们更良好地契合汽车行业的发展趋向和市场需求。本文主要剖析了项目化教学的优势,探究项目化教学在汽车营销课程中的具体运用,期望可为汽车营销课程的教学改革给予有益的参考。

关键词

项目化教学; 汽车营销课程; 汽车营销

1 引言

随着汽车产业不断向前发展、市场竞争程度的加大,汽车营销人才培养的重要意义变得越发明显。传统汽车营销教学大多侧重于理论知识的讲授,课堂之上主要是以教师的讲解作为主导,而对于学生的实践训练、创新思维的培养相对欠缺,以至于难以符合汽车行业对于复合型营销人才的需求状况。项目化教学法把学生当作核心,把实践任务当作载体,引领学生参与到汽车营销项目活动之中,在客户接待、需求分析、产品推介、团队协作的过程里提高自主学习与问题解决的能力。把这种教学法运用到汽车营销课程当中,既能够激发学生的学习兴趣,又能够增强其岗位适应能力,从而为将来进入汽车销售与服务岗位筑牢根基。

2 项目化教学法的概念

项目化教学法是师生通过共同实施一个完整项目进行项目工作所实施的教学活动,在此种方法里,师生一同投身于具备实际意义且结构完善的项目工作当中,借助共同努力达成预定教学目标。此教学法源自“行为导向”教学理念,它激励学生经由亲身参与、实际操作,在做的过程中学习,达成知识的有效转化与应用^[1]。学生于参与实际项目期间,既能学习汽车营销理论知识并运用相关知识实践操作,同时其实际操作能力与解决问题能力也会获得提高。每个项目都有清晰目标与期望,小组会精心策划,有明确流程步骤。项目结束时,学生通常能完整呈现汽车销售全过程,这既是对其学习成果的展示,也是对其努力付出的肯定。

【作者简介】胡艳玲(1988-),女,中国云南人,本科,讲师,从事汽车维修中职教育研究。

3 项目化教学在汽车营销课程中的优势

3.1 提升学生实践能力

项目化教学具有独特实践性,在汽车营销课程里展现出巨大应用优势。此教学方法引导学生参与真实汽车营销项目,让学生在实操之中深入领会与运用所学理论知识^[2]。学生借助这种方式能亲身感受市场动态,知晓消费者真实需求,还能直接参与汽车营销各环节的制定及执行,进而获取宝贵实践经验。这种教学方式与传统理论教学相比,大幅提高学生实践能力,使学生在未来汽车营销工作中能快速适应并胜任各类挑战。

3.2 促进创新思维发展

项目化教学于汽车营销课程里呈现出对创新思维有着重要的推动意义。在此种教学模式当中,学生会被激励去进行探索、创新,依据具体的市场环境还有消费者需求,提出自身独特的营销策略与方案。这种教学方法激发了学生的创新思维,还培育了他们独立思考、解决问题的能力。在快速变化的汽车市场内,拥有创新思维的人才显然更具竞争力,项目化教学就是孕育这种创新思维的摇篮。

3.3 培养综合职业素养

项目化教学既注重专业知识传授,也看重学生综合职业素养培育。于汽车营销课程里,除使学生掌握核心营销知识与技能外,项目化教学还着重培育学生职业道德、沟通能力及客户服务意识等关键职业素养。让学生参与真实营销场景,借此实现教学内容同企业汽车销售的无缝对接,学生学会以专业态度对待工作,锻炼与客户沟通、解决问题的能力。而且项目化教学中处处皆有的团队协作,让学生学会在团队中发挥自身作用,培育了他们的团队协作精神。

3.4 深化课程思政融合

项目化教学给汽车营销课程的思政教育建立了具象化且场景化的融合载体,突破了传统思政教育“说教式”、“分离式”的限制。于汽车营销项目实施进程里,思政元素能够自然地融入项目整个流程:在市场调研这一环节,引领学生去关注国产汽车品牌的兴起历程、新能源汽车产业的绿色发展战略,从而厚植家国情怀与产业自信,在客户洽谈、合同签订等环节,借助模拟诚信交易、隐私保护、售后责任等真实场景,强化学生的契约精神、职业道德与社会责任意识,在团队协作完成复杂营销项目之时,通过解决意见分歧、分担工作压力等过程,培育学生的担当精神与集体荣誉感。这种“思政+项目”的融合模式,使得思政教育从无形转变为有形,从被动接受转变为主动践行,达成了专业技能培养与价值引领的同步共振,有助于培养既懂得营销又富有情怀的汽车行业人才。

3.5 提高学生学习兴趣

项目化教学给汽车营销课程传统理论教学的枯燥状况带来了改变,实现了沉浸式体验、成果可视化,充分激发了学生的内在学习动力。学生在项目里成为营销实践者,与被

动接受课本知识不一样。学生能够自主挑选营销车型,像新能源汽车、经典燃油车等,还能设计专属营销方案,例如直播带货、线下体验活动。这种“我的项目我主导”的自主性,满足了学生的探索欲、成就感。项目过程中存在不确定性,像是模拟客户的突发质疑、市场环境的虚拟变化,带来了挑战性和新鲜感,促使学生主动去查阅资料、向老师请教、进行团队研讨,把“要我学”转变为“我要学”。项目成果有多元化展示,比如营销话术、模拟销售视频、答疑质量等,让学生的努力得以直观呈现,进一步强化了学习兴趣、持续探索的热情。

3.6 利于打造“三有”课堂

项目化教学符合“有用、有趣、有效”的“三有”课堂建设要求,可为汽车营销课程增添更多实践动力。课堂“有用”表现为项目内容对接汽车行业实际岗位需要,包括客户邀约、接待沟通、需求分析、车辆介绍、试乘试驾、异议处理、成交签约、交车服务、客户回访等核心模块,能让学生学到的技能应用到未来职业情境中。课堂“有趣”体现在小组竞赛、角色扮演、虚拟仿真营销等活动形式里,学生能分别扮演销售顾问、客户、市场经理等角色,把抽象的营销理论转变为具体的任务体验。课堂“有效”是指项目化教学用目标导向和过程评价取代单一的期末考核,从礼仪规范、话术表达、流程熟练度、8S管理、服务意识、情绪价值和团队协作等多个维度进行评价,让教学效果能够被观察、被反馈、被改进。如此便形成“学习—实践—反馈”的良好循环,提高教学效率和育人质量。

4 项目化教学在汽车营销课程中的应用

4.1 开展实践调研活动,明确项目教学任务

汽车营销课程实行项目化教学时,要将真实的市场调研当作任务生成的起始点。依靠学校“前校后厂”的办学条件、校企合作的资源,可以组织汽车专业的学生,在岗位认知实习阶段进入珠江源汽车城进行实地考察,让学生在真实的经营场景里观察汽车销售的流程、客户的消费行为、市场的竞争状况。调研内容能够围绕车型配置、价格区间、客户关注点、销售话术、金融保险服务、售后承诺等方面来进行,学生借助访谈销售顾问、观察客户接待、记录展厅陈列与促销方式,获取比较直接的市场资料。教师在调研之前要明确任务要求,指导学生设计调研提纲和记录表,防止活动仅仅停留在参观体验上。调研结束后,学生需要对资料进行整理分析,归纳消费者的需求特征、企业的营销策略,为后续项目设计提供依据。经过这一过程,学生能够把教材里的汽车营销概念和企业实际联系起来,逐渐形成市场意识、客户意识和任务意识,也让项目教学目标变得更加具体、真实、具有可操作性。

4.2 开展项目情境设计,提升专业技能

明确项目任务之后,教师要依据汽车销售岗位的能力

需求来设计项目情境,以此让课堂学习和4S店的真实工作流程实现衔接。项目情境包括展厅布置、车辆介绍、客户接待、需求分析、试乘试驾引导、价格洽谈、保险按揭说明、合同签订、交车服务、售后跟进等内容,进而构成比较完整的汽车营销工作链。学生在小组合作里分别担当销售顾问、客户、金融专员、售后人员等角色,借助模拟演练去完成具体的任务。情境设计不能仅仅停留在表演方面,而是要突出岗位标准、专业规范,像仪容仪表、接待礼仪、需求提问、产品卖点提炼、异议处理、成交引导等。教师在活动期间应结合学生的表现给予即时指导,引领学生发觉话术生硬、产品理解不够、客户需求判断不准确等问题,并且通过反复训练来进行改进。这样的教学方式能够增强学生对汽车营销流程的整体认知,使其在情境实践中提高沟通表达、产品推介、客户服务、临场应变能力,促进理论知识向职业技能的转化。

4.3 开展项目评估总结,提升学生学习能力

汽车营销课程实施项目化教学,直至课程结尾部分会进行项目评估总结工作。此环节主要针对学生在项目实施过程中全方位展现出的各项能力予以客观公正评判,但会结合及时反馈、专业指导来助力他们进一步提高学习能力从而达到二次提高。评估内容主要包括学生知识掌握状况、技能运用熟练程度、团队协作本事问题解决本事、创新思维发展状况。在这一阶段,教师会认真组织学生进行项目成果展示与评价,借助现场提问、深入探讨的方式全面检验他们的学习成效与实践能力。依据学生现场表现、项目完成状况,教师会给出具有针对性的具体建议与指导,帮助他们明确自身不足之处、后续改进方向。这一系列评估与总结能够让学生及时了解自身学习进度、所存在的问题,在教师精心引导之下不断优化学习方法,持续提高学习效率,稳步提高自身学习能力。

4.4 开展项目化教学的实践案例

以客户接待任务作为示例,教师首先会安排学生去进行资讯工作,也就是让学生借助网络、教材、慕课等渠道,收集与客户接待相关的各类资料。接下来,要确定具体的计划,涵盖接待时的仪容仪表、姿态、表情、话术、交接名

片、展厅接待任务等方面。针对所制定的接待流程展开交流讨论,教师会巡查并给予指导,进而完善计划并决定予以实施。在实施计划阶段,于项目实施过程里,教师会随时留意学生的进展状况,及时给予相应的指导与帮助。学生要在组长的带领下,依照项目计划进行客户接待活动,并且在实践当中持续学习,掌握汽车营销的知识与技能。教师能够通过观察、提问、答疑等途径,对学生的学习情况实施监控与评估,以此保证项目能够顺利推进并收获预期成效。在后期反馈环节,学生需要针对自己在项目实施过程中的表现展开反思与总结,了解自身的优点和不足之处,进而提出改进建议。教师会对学生的表现做出客观评价,表扬学生所取得的成长与进步,指出存在的不足,并给出改进建议。最后通过学生自评、互评、师评来评选出优秀小组和优秀个人。

5 结论

于汽车营销课程之中进行项目化教学,能够助力学生对汽车营销知识予以理解并掌握,进而培养其实践操作能力、团队协作精神。随着汽车市场不断地变化发展,项目化教学将会成为培育学生综合素质、职业能力的关键途径。将来会持续探索并完善项目化教学方法,以此为汽车行业培育更多优秀人才,推动汽车产业不断进步。

参考文献

- [1] 杨亚威. 项目化教学在中职汽车维护保养课程中的应用探究[J]. 时代汽车, 2022, (12): 30-32.
- [2] 刘静. 项目化教学在“FPGA在汽车系统中的应用”课程中的应用与实践[J]. 现代职业教育, 2021, (35): 86-87.
- [3] 辽宁省交通高等专科学校汽车工程系. 汽车技术服务与营销专业开创新的实训教学方式[EB/OL]. <https://www.lncc.edu.cn/qcx/info/1011/1108.htm>, 2025-09-23.
- [4] 人民论坛网. 高职院校思政课“三有”模式——理论·实践·情感的融合创新[EB/OL]. <https://www.rmlt.com.cn/2025/0603/731703.shtml>, 2025-06-03.
- [5] 茂名晚报. 项目式教学法在中职计算机基础课程中的应用与实践[EB/OL]. https://www.mm111.net/mmwb/2025-03/27/content_991483394.html, 2025-03-27.

Research on the Application of Intelligent Quality Control Technology in Highway Engineering Construction

Pinglei Li

Handan Transportation Comprehensive Administrative Law Enforcement Detachment, Handan, Hebei, 056001, China

Abstract

The construction quality control of highway engineering faces practical difficulties such as low efficiency of manual inspection, difficulty in integrating scattered data, and lagging identification of quality hazards. The introduction of intelligent technology provides a new path to solve these problems. The current data collection technology has achieved the integrated application of multiple sensors, and construction process monitoring is developing towards dynamic direction. The identification of quality defects has initially acquired intelligent capabilities. However, bottlenecks such as difficulty in fusing heterogeneous data from multiple sources, limited accuracy of algorithm models, insufficient adaptability to on-site environments, and lack of standard specification systems constrain the deep application of technology. The optimization strategy needs to be carried out from the dimensions of building a full lifecycle information model platform, developing high-precision perception and detection equipment, exploring predictive maintenance mechanisms, and improving standardization systems, to promote the comprehensive implementation of intelligent control from technical pilot to engineering practice.

Keywords

highway engineering; construction quality; intelligent management and control; data fusion; predictive maintenance

公路工程施工质量智能化管控技术应用研究

李平雷

邯郸市交通运输综合行政执法支队, 中国·河北 邯郸 056001

摘要

公路工程施工质量管控面临人工检测效率低、数据分散难整合、质量隐患识别滞后等现实困境, 智能化技术的引入为破解这些难题提供了新路径。当前数据采集技术已实现多元传感器的集成应用, 施工过程监测向动态化方向发展, 质量缺陷识别初步具备智能化能力, 但多源异构数据融合困难、算法模型精度受限、现场环境适应性不足、标准规范体系缺失等瓶颈制约着技术的深度应用。优化策略需从构建全生命周期信息模型平台、研发高精度感知检测装备、探索预测性维护机制、完善标准化体系等维度展开, 推动智能化管控从技术试点走向工程实践的全面落地。

关键词

公路工程; 施工质量; 智能化管控; 数据融合; 预测性维护

1 引言

公路工程施工涉及路基压实、路面摊铺、桥梁浇筑等多道工序, 每道工序的质量都直接影响道路的使用寿命与行车安全。传统质量管控依赖人工抽检与经验判断, 检测频次受限于人力配置, 数据记录分散在纸质报表与独立系统中, 质量问题往往在隐蔽工程完成后才被发现, 返工成本高昂且影响工期。然而从技术可行性到工程实用性之间仍存在明显鸿沟, 数据孤岛现象依然存在, 算法在复杂现场环境下的鲁棒性不足, 缺乏统一的技术标准导致不同系统难以互联互通。如何将智能化技术真正嵌入施工全过程, 形成数据驱动

的质量管控闭环, 成为当前亟待解决的工程难题。

2 公路工程施工质量智能化管控的应用现状

2.1 数据采集技术的集成应用

施工现场已开始部署多类型传感器以获取关键质量参数。路基压实质量检测中, 核子密度仪、灌砂法等传统方法耗时且仅能抽检, 连续压实控制技术(CCC)通过在压路机上安装加速度传感器与GPS定位装置, 实时测量压实过程中土体的刚度变化, 每台压路机每小时可采集上万个数据点, 覆盖整个碾压区域而非局部点位。路面施工阶段, 摊铺机配备的温度传感器阵列可监测沥青混合料在整个摊铺宽度上的温度分布, 避免因局部温度过低导致的压实不足; 厚度检测装置通过超声波或探地雷达技术非接触式测量路面厚度, 数据自动上传至云端平台^[1]。

【作者简介】李平雷(1976-), 男, 中国河北成安人, 本科, 助理工程师, 从事交通运输工程研究。

2.2 施工过程的动态化监测

传统质量管控侧重于事后检测与验收,智能化技术推动管控前移至施工过程。某高速公路项目在沥青路面施工中部署了动态监测系统,摊铺机、压路机等设备的工作参数(行走速度、碾压遍数、振动频率等)通过车载终端实时上传,管理平台自动生成施工轨迹图与参数分布热力图,质量管理人员在监控中心即可掌握全线施工进度与质量状态。当某区域压实遍数未达到规范要求或碾压速度超过工艺限值时,系统自动预警并将异常位置推送至现场管理人员,督促及时整改。

2.3 质量缺陷的智能化识别

路面病害检测是公路养护的重要环节,传统人工调查方式效率低且主观性强。基于机器视觉的智能检测技术正在改变这一局面,高速相机安装在检测车辆顶部,以80公里每小时的速度行驶时连续拍摄路面图像,分辨率达到毫米级。图像数据传输至车载服务器,深度学习算法自动识别裂缝、坑槽、车辙、泛油等病害类型,标注病害位置、面积、严重程度并生成检测报告,一天可完成数百公里道路的普查工作^[2]。

3 公路工程施工质量智能化管控的技术瓶颈

3.1 多源异构数据的融合难题

施工现场数据来源于不同厂商、不同协议、不同格式的设备系统,压实数据采用二进制格式,摊铺温度数据以XML文件存储,桥梁监测数据遵循自定义通信协议,质量检测报告则为PDF或纸质文档。这些异构数据缺乏统一的数据标准与接口规范,汇聚时面临格式转换、时间戳对齐、坐标系统一等技术障碍。数据融合还涉及商业壁垒,设备厂商出于保护数据资产考虑不愿开放底层接口,仅提供汇总结果,导致精细化分析无法实施。跨系统数据关联困难,路基压实、路面厚度、材料试验数据分散在不同系统中,缺乏统一的工程桩号、施工时间、结构层位等关联字段,难以构建完整的质量追溯链条。

3.2 智能算法模型的精度局限

机器学习算法性能高度依赖训练数据的数量与质量,公路工程领域标注数据积累不足。路面裂缝识别算法需要大量人工标注的图像样本,但裂缝形态千差万别,标注标准不一致,算法应用到新项目、新路面类型、新气候条件时识别精度显著下降。混凝土外观质量检测中,蜂窝麻面、露筋、色差等缺陷特征不明显,算法容易将水渍、阴影误判为质量缺陷^[3]。预测模型面临更大挑战,施工过程受操作手法、设备状态、环境条件等随机因素影响,模型预测误差较大。深度学习模型的“黑箱”特性使得预测结果难以解释,工程师难以建立对算法的信任。

3.3 现场复杂环境的适应性挑战

公路施工现场环境条件远比实验室复杂,温度、湿度、粉尘、振动、电磁干扰等因素影响智能设备稳定运行。传感

器长期暴露在露天环境中,防护等级不足时容易进水、进尘导致故障,高温环境下电子元件性能漂移,强振动工况使传感器松动或损坏。无线通信面临信号遮挡与干扰问题,钢筋网、金属模板、大型机械设备削弱无线信号强度,数据传输出现丢包、延迟甚至中断。机器视觉算法对光照条件敏感,强光下图像过曝、阴影下图像欠曝,雨雪天气下路面积水、泥泞,相机镜头易被溅污,算法识别失效。

3.4 技术标准与规范体系的缺失

智能化管控技术尚未形成系统的标准规范体系,数据格式、通信协议、性能指标、验收标准等方面缺乏统一规定。不同项目、不同地区采用的技术方案五花八门,设备选型、系统架构、数据处理方法各不相同,形成新的“信息孤岛”。智能检测设备的精度与可靠性缺乏第三方认证机制,部分设备存在夸大宣传、性能虚标现象。工程验收阶段,传统规范要求提供实体检测数据与纸质报告,智能化系统采集的海量数据、自动生成的分析结果难以纳入现行验收体系,导致“两张皮”现象——施工过程采用智能化手段,验收环节仍需人工补测补检,智能化投入未能转化为管理效益。

4 公路工程施工质量智能化管控的优化策略

4.1 构建全生命周期的信息模型平台

打破数据孤岛需要建立统一的信息模型作为数据融合的底层架构。采用BIM(建筑信息模型)技术构建公路工程的三维数字模型,将设计阶段的几何信息、材料属性、工程量清单等数据录入模型,形成“数字孪生”的工程实体。施工阶段将压实数据、摊铺参数、检测结果等按照统一的数据标准挂接到对应的模型构件上,每段路基、每层路面、每座桥梁都关联着完整的施工质量数据。平台需要定义标准化的数据接口规范,制定公路工程数据字典,明确每类数据的命名规则、单位制式、精度要求、更新频率。设备厂商按照接口规范开发数据输出模块,确保不同来源的数据可以无缝对接。某高速公路项目在招标文件中明确要求所有智能化设备必须支持统一的数据接口,采用开放的通信协议(如OPC UA、MQTT等),避免被单一厂商锁定。平台的数据存储采用时空数据库技术,将施工数据按照时间戳与空间坐标组织,支持历史数据回溯与空间范围查询。质量管理人员可以在三维模型上点选任意位置,查看该位置在不同施工阶段的所有质量数据,追溯施工过程,定位质量问题根源。云平台还须具备强大的数据处理能力,利用分布式计算框架处理海量数据,实现数据清洗、格式转换、异常检测、统计分析等功能的自动化。

4.2 研发高精度的智能感知与检测装备

提升算法精度需要在硬件与软件两端发力。硬件层面,开发更高分辨率的相机、更高精度的传感器、更强适应性的设备。路面检测相机需要具备高动态范围成像能力,在强光与阴影同时存在的场景下仍能清晰成像;镜头需配备自清洁装置,通过气吹或雨刮及时清除镜头上的灰尘与水滴。传感

器的防护等级需达到 IP68, 确保在浸水、高温、强振动环境下稳定工作; 采用低功耗设计延长电池寿命, 减少维护频次。某项目研发的智能压路机将传感器模块集成到滚轮内部, 避免了外挂式传感器易损坏的问题, 使用寿命延长三倍。软件层面, 扩充训练数据集的规模与多样性, 采集不同地区、不同季节、不同路面材料的病害图像, 邀请多位经验丰富的工程师进行交叉标注, 提高标注的一致性。引入数据增强技术, 对原始图像进行旋转、缩放、亮度调整、噪声添加等操作, 生成更多样本。探索小样本学习、迁移学习等技术, 利用已有模型的知识加速新场景下的模型训练。开发可解释性 AI 算法, 通过注意力机制、特征可视化等手段展示模型的决策依据, 让工程师理解算法为何将某处识别为裂缝, 增强算法的可信度。建立算法性能评估体系, 在真实工程场景中持续测试算法的精度、召回率、误检率, 定期更新模型参数, 形成“数据采集—模型训练—工程验证—模型迭代”的闭环。

4.3 探索基于人工智能的预测性维护机制

质量管控不应止步于检测与记录, 而应具备预测与预警能力。利用机器学习算法分析历史施工数据与质量检测数据, 挖掘施工参数与质量结果之间的关联规律, 建立预测模型。某项目收集了近三年的沥青路面施工数据, 包括混合料温度、摊铺速度、碾压遍数、压路机吨位、环境温度、湿度等数十个参数, 以及对应的平整度、压实度、渗水系数等质量指标。采用随机森林算法训练预测模型, 输入当前施工参数后, 模型可预测该路段的最终平整度, 当预测值低于规范要求时及时预警, 指导施工单位调整参数。预测模型还可用于施工方案优化, 通过模拟不同参数组合下的质量结果, 找到最优施工工艺。桥梁结构的预测性维护更具价值, 通过分析长期监测的应变、位移、温度数据, 识别结构性能的退化趋势。某大桥的健康监测系统运行五年后, 积累了海量时间序列数据, 采用长短期记忆网络 (LSTM) 建立预测模型, 可提前三个月预测某关键截面的应力水平是否会超过预警阈值, 为养护决策提供依据。预测性维护需要与智能决策系统结合, 当预测到质量风险时, 系统自动推送整改建议、提供类似案例参考、生成处置方案, 辅助工程师快速决策。

4.4 完善智能化管控的标准化体系建设

标准缺失是制约智能化技术推广的根本性问题, 需从

行业层面推动标准体系建设。制定《公路工程智能化施工质量管控技术规范》, 明确数据采集、传输、存储、处理、应用的技术要求, 规定各类传感器的性能指标与安装规范, 统一数据格式与接口协议。建立智能检测设备的认证制度, 设立第三方检测机构对设备的精度、稳定性、环境适应性进行测试, 颁发合格证书, 禁止未经认证的设备进入工程应用。修订现行质量验收规范, 将智能化检测数据纳入验收体系, 明确智能检测与传统检测的互补关系, 规定智能检测数据的采信条件与抽检比例。某省交通运输厅试点修订了《公路工程质量检验评定标准》, 增设“智能化检测”章节, 承认连续压实检测数据的法律效力, 允许在满足覆盖率要求的前提下减少传统钻芯检测数量, 既保证了质量管控的严格性, 又降低了检测成本。推动数据开放共享, 建立省级或行业级的公路工程质量大数据平台, 汇聚各项目的施工数据与质量数据, 为算法模型训练提供数据支撑, 为工程决策提供统计分析依据, 为科研创新提供数据资源。数据开放需要平衡信息共享与商业保密的关系, 对敏感数据进行脱敏处理, 制定数据使用的权限管理与审计机制。

5 结语

公路工程施工质量智能化管控已从概念探索进入工程实践, 数据采集、过程监测、缺陷识别等方面初步展现出技术优势, 但数据融合、算法精度、环境适应性、标准规范等瓶颈依然突出。优化策略需要从信息模型平台、智能感知装备、预测性维护、标准化体系等多维度协同推进, 将智能化技术真正嵌入施工全过程, 实现从“人工抽检”到“全面感知”、从“事后验收”到“过程管控”、从“经验判断”到“数据驱动”的根本转变。这一转变不仅需要技术突破, 更需要管理理念的更新、标准规范的重构、产业生态的培育。

参考文献

- [1] 魏征. 公路工程施工质量管控的要点探讨[J]. 中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术, 2025(8):001-004.
- [2] 杨腾飞. 公路工程施工质量管理与控制重点探析[J]. 中文科技期刊数据库(全文版)工程技术, 2025(1):074-077.
- [3] 邵声文. 公路工程路基施工质量控制关键技术研究[J]. 中文科技期刊数据库(引文版)工程技术, 2025(8):100-103.

Research on Self-Evolving Guidance for Photonic Chips in Hypersonic Aircraft

Zhiyou Zhang¹ Zhirui Zhang^{2*} Shiwen Yang³

1. Jinhai Biotechnology Co., Ltd., Yili, Xinjiang, 835219, China

2. Xuchuan Chemical (Fujian) Co., Ltd., Fuqing, Fujian, 350309, China

3. Gansu Industry Polytechnic University, Tianshui, Gansu, 741025, China

Abstract

Hypersonic vehicles (Mach number $M_a \geq 5$) face complex environmental constraints such as high dynamic maneuvering, strong electromagnetic interference, and strong coupling of aerodynamic parameters during high-speed flight. Traditional electronic guidance chips struggle to meet the requirements for guidance accuracy and reliability under extreme conditions due to issues such as large response delay, weak anti-interference capability, and insufficient adaptability. To address these technical bottlenecks, this paper proposes a self-evolving guidance method for photonic chips based on the Ising model and proximal policy optimization, combining the development trend of photonic integration technology and intelligent guidance. This method breaks through the traditional design paradigm of "fixed hardware, iterative algorithms", constructs a self-evolving architecture with deep coupling between photonic chip hardware structure and guidance algorithms, maps the transmission matrix of photonic unit devices to Ising spin states, and achieves dynamic reconfiguration of photonic links through photonic regulation mechanisms, enabling in-situ collaborative evolution of guidance models, parameters, and hardware structures. Firstly, a three-dimensional nonlinear aerodynamic coupling guidance model for hypersonic vehicles is established, introducing correction terms for photonic chip transmission loss and coupling effects, and deriving guidance dynamics equations under multi-physics field coupling. Secondly, a programmable architecture for photonic chips based on the Ising model is designed, proposing a spin state mapping optimization algorithm and a millisecond-level reconfiguration strategy to construct the core logic of self-evolving guidance. On this basis, expressions for the transmission, filtering, and reconstruction of photonic guidance signals in strong electromagnetic interference environments are derived, and an anti-interference transmission link based on wavelength division multiplexing is designed. An improved fusion algorithm combining Kalman filtering and particle filtering is introduced to enhance the accuracy of system state estimation.

Keywords

hypersonic vehicle; photonic chip; self-evolving guidance; ising model; proximal policy optimization; multiphysics coupling

高超音速飞行器光子芯片自进化制导研究

张志有¹ 张志睿^{2*} 杨世文³

1. 金海生物科技有限公司, 中国·新疆 伊犁 835219

2. 旭川化学(福建)有限公司, 中国·福建 福清 350309

3. 甘肃工业职业技术大学, 中国·甘肃 天水 741025

摘要

高超音速飞行器(马赫数 $M_a \geq 5$)在高速飞行过程中面临高动态机动、强电磁干扰以及气动参数强耦合等复杂环境约束,传统电子制导芯片因响应延迟大、抗干扰能力弱、自适应能力不足等问题,难以满足极端工况下的制导精度与可靠性要求。针对上述技术瓶颈,本文结合光子集成技术与智能制导的融合发展态势,提出一种基于伊辛模型与近端策略优化协同的光子芯片自进化制导方法。该方法突破“硬件固定、算法迭代”的传统设计范式,构建光子芯片硬件结构与制导算法深度耦合的自进化架构,将光子单元器件的传输矩阵映射为伊辛自旋态,通过光致调控机制实现光子链路的动态重构,达成制导模型、参数与硬件结构的原位协同演化。首先,建立高超音速飞行器三维非线性气动耦合制导模型,引入光子芯片传输损耗与耦合效应修正项,推导多物理场耦合下的制导动力学方程。其次,设计基于伊辛模型的光子芯片可编程架构,提出自旋态映射优化算法与毫秒级重构策略,构建自进化制导核心逻辑。在此基础上,推导强电磁干扰环境下光子制导信号的传输、滤波与重构表达式,设计基于波分复用的抗干扰传输链路,引入改进型卡尔曼滤波与粒子滤波融合算法,提升系统状态估计精度。

关键词

高超音速飞行器; 光子芯片; 自进化制导; 伊辛模型; 近端策略优化; 多物理场耦合

【作者简介】张志有(2000-),男,本科,从事控制工程领域,风电功率预测研究。

【通讯作者】张志睿(2002-),男,本科,从事印刷媒体研究。

1 引言

高超音速飞行器作为21世纪航空航天领域的战略核心装备,其飞行速度快($M_a \geq 5$)、飞行轨迹复杂、气动环境恶劣,且面临现代航母编队电磁防御圈、宽频段定向干扰等多重复杂

干扰对制导系统的实时性、抗扰性、自适应能力提出了极致要求。传统制导系统依赖电子芯片实现信号处理与指令生成,受电子器件载流子迁移速率的限制,其响应延迟通常在微秒级,难以匹配高超音速飞行器高动态飞行的实时制导需求^[1]。

2025-2026 年,国际光子集成技术迎来突破性进展,可编程光子集成电路(PICs)实现毫秒级动态重构,光致动器、伊辛智能计算等新技术与光子芯片的融合应用,为制导系统的升级提供了全新路径。光子芯片以光子为信息载体,传输速度接近光速,响应延迟可降至纳秒级,且具有抗电磁干扰、低功耗、高集成度等优势,完美契合高超音速制导的核心需求;自进化技术作为人工智能与制导领域的前沿方向,能够实现系统参数、算法模型的自主迭代优化,但目前尚未实现与光子芯片的深度耦合,现有研究更多局限于算法层面的自进化,未涉及硬件链路算法的协同进化,无法充分发挥光子芯片的性能优势^[2]。

当前国际上关于光子制导的研究主要集中于基础链路传输与简单信号处理,美国 UCLA 团队^[3]提出基于强化学习的模型自由实时训练框架,可让光学处理器通过实验测量直接自主学习优化,实现光学硬件原位训练与简单自适应,未应用于高超音速制导场景;郭光灿团队^[4]实现光子量子行走确定性集体测量,提升量子态层析效率;研制轨迹可编程光致动器,支撑光子芯片动态调控,未适配制导系统需求;中科院半导体所谭平恒团队^[5]建立超快激光可调谐拉曼系统,实现精准光谱探测,另提出伊辛计算驱动的光子芯片快速重构方法可完成大规模 PICs 毫秒级动态重构,相关技术均未向自进化制导方向开展。国内相关研究仍存在诸多不足:一是光子芯片与制导算法的耦合度低,未构建协同进化架构;二是缺乏复杂气动、强电磁干扰下的多物理场耦合建模,制导精度难以保障;三是自进化机制不完善,无法实现硬件链路算法模型的同步迭代;四是现有方法的公式推

导较为简单,未考虑光子传输损耗、耦合效应等实际因素,工程实用性不足。

针对以上问题,本文立足 2026 年国际前沿研究趋势,提出一种基于伊辛智能计算与 PPO 融合的光子芯片自进化制导方法,构建“硬件链路-算法模型-制导指令”三位一体的自进化架构,推导多物理场耦合、强电磁干扰下的完整制导公式体系。

2 高超音速飞行器光子芯片自进化制导基础理论与建模

2.1 高超音速飞行器三维非线性制导动力学建模

高超音速飞行器在飞行过程中,受到气动阻力、升力、推力、重力等多力耦合作用,气动参数随、飞行高度的变化剧烈波动,同时考虑地球曲率与自转影响,构建三维非线性制导动力学模型^[6]。定义飞行器质心坐标系 O-xyz, x 轴沿飞行器纵轴向前, y 轴在飞行器对称平面内垂直 x 轴向上, z 轴垂直于对称平面向右;惯性坐标系 Oe-XeYeZe, Xe 轴指向地心, Ye 轴在赤道平面内垂直 Xe 轴, Ze 轴符合右手定则^[7]。

飞行器质心运动方程为:

$$\begin{cases} \dot{r} = \frac{T \cos \alpha - D - mg \sin \theta}{m} \\ \dot{\theta} = \frac{L + T \sin \alpha - mg \cos \theta}{mV} \\ \dot{\psi} = \frac{N}{mV \cos \theta} \\ \dot{\lambda} = \frac{V \sin \theta}{r \cos \varphi} \\ \dot{\varphi} = \frac{V \cos \theta \cos \psi}{r} \end{cases} \quad (1)$$

基于上述模型,通过仿真得到高超音速飞行器全飞行过程的轨迹时间演化特征,如图 1 所示,飞行器在 0.0-60.0s 内完成从起飞到命中目标的完整轨迹,轨迹动态变化与三维非线性气动耦合规律一致,验证了所建动力学模型的有效性。

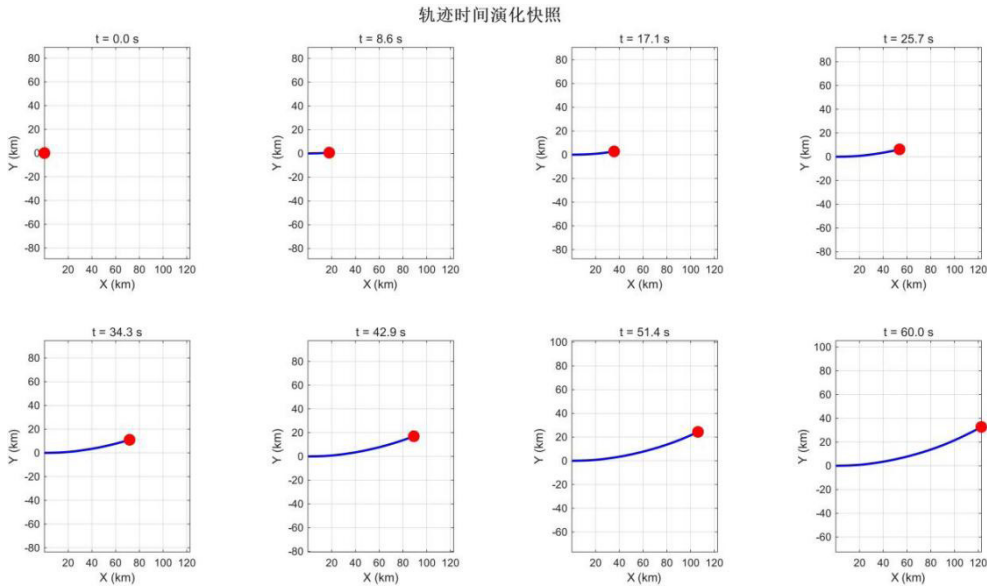


图 1 高超音速飞行器轨迹时间演化快照图

2.2 光子芯片自进化制导架构建模

本文设计的光子芯片自进化制导架构分为三层：光子信号感知与传输层、伊辛智能计算与自进化决策层、制导指令生成与执行层，三层深度耦合、协同工作，形成了“感知-计算-决策-执行-进化”的闭环运行机制，其架构如图 2 所示。

2.2.1 光子信号感知与传输层建模

光子信号感知与传输层采用硅基光子芯片架构，集成光探测器、波分复用器、马赫-曾德尔干涉仪 (MZI)、光致动器等核心器件，将负责飞行状态信号 (速度、姿态、位置) 的感知、传输与预处理^[8]。光探测器将飞行器惯性测量单元 (IMU)、雷达等传感器的电信号转换为光信号，通过波分复用器实现多通道信号的并行传输，MZI 完成光信号的调制与滤波，光致动器实现光子链路的动态调控^[9]。

光子波导传输的模式本征方程为：

$$\beta^2 = k_0^2 n_{eff}^2 = k_0^2 n^2(x, y) - \kappa_x^2 - \kappa_y^2 \quad (2)$$

其中： β 为光子传播常数， $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda}$ (λ 为光子波长)，

n_{eff} 为有效折射率， $n(x, y)$ 为波导芯层与包层的折射率分布， κ_x 、 κ_y 分别为 x 、 y 方向的横向衰减常数；有效折射率

$n_{eff} = \frac{\beta}{k_0}$ ，决定光子信号的传输速度与损耗。在实际的工程应用中，有效折射率会受温度变化的影响其温度漂移系数约为 $^\circ\text{C}$ ，需要在系统设计中补偿。

两个平行波导的耦合模方程为：

$$\begin{cases} \frac{dA}{dz} = -j\beta_a A - j\kappa_{ab} B \\ \frac{dB}{dz} = -j\beta_b B - j\kappa_{ba} A \end{cases} \quad (3)$$

其中： A 和 B 分别为两个波导的光场振幅， z 为传输距离， β_a 和 β_b 为两个波导的传播常数， κ_{ab} 和 κ_{ba} 为波导间的耦合系数，耦合长度定义为 $L_c = \frac{\pi}{2\kappa}$ ($\kappa = \kappa_{ab} = \kappa_{ba}$)，耦合系数 κ 与波导间距 d 呈指数衰减关系。



图 2 光子芯片自进化制导三层耦合架构图

2.2.2 伊辛智能计算与自进化决策层建模

自进化决策层是核心层，采用伊辛智能计算与 PPO 融合的自进化算法，将光子芯片的 MZI 单元状态映射为伊辛自旋态，构建光子芯片重构与制导算法迭代的协同进化机制^[10]。具体则是将每个 MZI 单元的可实现物理状态映射为四个伊辛自旋的组合，其映射关系为：

$$\sigma_i = \sum_{k=1}^4 w_k s_{i,k} \quad (4)$$

其中： σ_i 为第 i 个 MZI 单元的等效伊辛自旋态 ($\sigma_i \in \{+1, -1\}$)， w_k 为权重系数，为第 i 个 MZI 单元第 k 个物理状态的二进制表示 ($s_{i,k} \in \{0, 1\}$)。

伊辛模型的能量函数为：

$$E = - \sum_{i < j} J_{ij} \sigma_i \sigma_j - \sum_i h_i \sigma_i \quad (5)$$

式中： J_{ij} 为自旋 i 与 j 自旋之间的耦合强度， h_i 为自旋 i 的外场强度；通过最小化能量函数，实现光子芯片单元器件的最优配置

图 3 为姿态角分布玫瑰图，反映高动态飞行下姿态角的空间分布规律，验证了制导系统对姿态的精准控制；图 4 为伊辛模型自旋配置时间演化图，可见自旋态在 7.5~60s 内逐步收敛至最优配置，重构效率满足实时性要求；图 5 为自旋-自旋关联函数变化曲线，体现了自旋间的耦合关联特性，为耦合强度优化提供了数据支撑。

姿态角玫瑰图

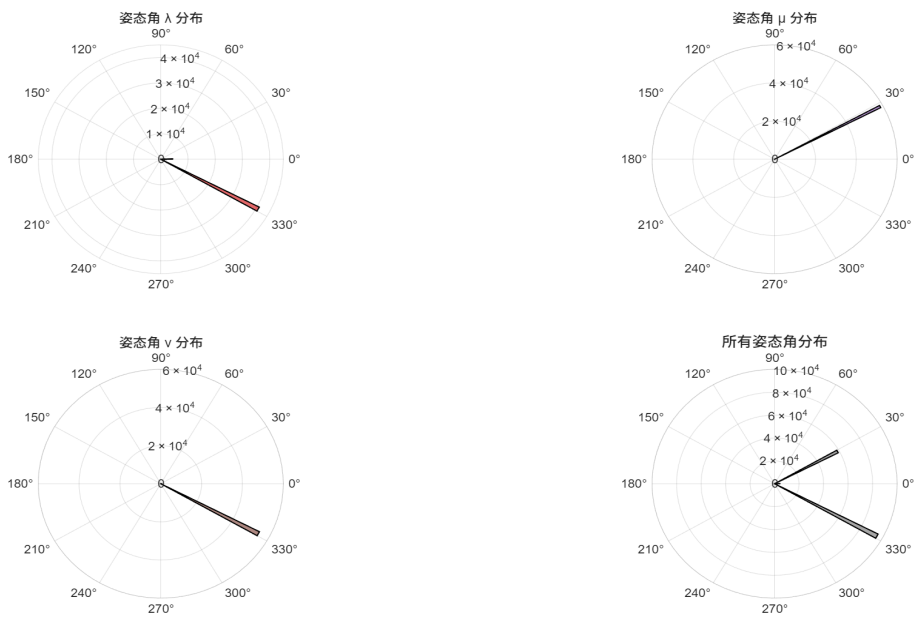


图 3 高超音速飞行器姿态角分布玫瑰图



图 4 伊辛模型自旋配置时间演化图

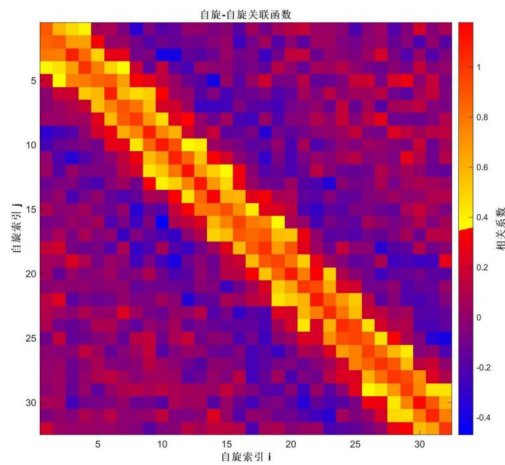


图 5 伊辛模型自旋 - 自旋关联函数变化热力图

2.3 强电磁干扰下光子制导信号抗扰建模

高超音速飞行器飞行过程中面临的强电磁干扰主要包括电磁脉冲 (EMP)、宽频段定向干扰, 本文基于波分复用与光子滤波技术, 设计抗扰传输链路, 推导抗扰信号处理公式^[11]。电磁干扰下, 光子信号的干扰模型为:

$$P_{opt}(t)=P_{sig}(t)+P_{int}(t)+P_{noise}(t) \quad (6)$$

其中: $P_{opt}(t)$ 为接收端光功率, $P_{sig}(t)$ 为有用信号光功率, $P_{int}(t)$ 为电磁干扰光功率, $P_{noise}(t)=2h\nu B\Delta f$ 为热噪声光功率, 其中 h 为普朗克常数, ν 为光子频率, B 为带宽, Δf 为噪声系数。

采用波分复用技术 (WDM) 分离有用信号与干扰信号^[12], 其波长选择方程为:

$$\lambda_i=\lambda_0+i\Delta\lambda \quad (7)$$

式中: λ_i 为第 i 个通道的波长, λ_0 为基准波长, $\Delta\lambda$ 为通道波长间隔; 结合 MZI 滤波, 滤波函数为:

$$H(\lambda)=\frac{1}{2}\left[1+\cos\left(\frac{\pi(\lambda-\lambda_0)}{\Delta\lambda}+\phi_0\right)\right] \quad (8)$$

其中: ϕ_0 为初始相位差; 滤波后的有用信号和干扰信号功率分别为:

$$P_{sig,fil}(t)=P_{sig}(t)\cdot H(\lambda_{sig}) \quad (9)$$

$$P_{int,fil}(t)=P_{int}(t)\cdot H(\lambda_{int}) \quad (10)$$

式中: λ_{sig} 为有用信号波长, λ_{int} 为干扰信号波长, 通过优化波长间隔 $\Delta\lambda$, 使 $H(\lambda_{int})\approx 0$, 实现干扰抑制。

引入改进型卡尔曼滤波 (EKF) 与粒子滤波 (PF) 融合算法, 实现飞行状态的精确估计, 抑制噪声干扰^[13]。EKF 的状态预测方程为:

$$\hat{x}_{k|k-1}=f(\hat{x}_{k-1|k-1}, u_{k-1}) \quad (11)$$



图 6 光子芯片自进化制导算法整体执行流程图

$$P_{k|k-1}=F_k P_{k-1|k-1} F_k^T + Q_k \quad (12)$$

PF 算法通过粒子采样逼近状态后验分布^[14], 融合 EKF 的预测结果优化粒子权重, 权重更新方程为:

$$w_k^i=w_{k-1}^i \cdot \frac{p(z_k|x_k^i)p(x_k^i|x_{k-1}^i)}{q(x_k^i|x_{k-1}^i,z_k)} \quad (13)$$

式中: w_k^i 为第 k 时刻第 i 个粒子的权重, x_k^i 为第 k 时刻第 i 个粒子的状态值, $p(z_k|x_k^i)$ 为观测似然函数, $p(x_k^i|x_{k-1}^i)$ 为状态转移概率, $q(x_k^i|x_{k-1}^i,z_k)$ 为提议分布。

3 光子芯片自进化制导算法设计与实现

3.1 算法整体流程

光子芯片自进化制导算法的整体流程如图 6 所示:

3.2 伊辛自旋态映射优化算法

为实现光子芯片的快速重构与高效进化, 优化伊辛自旋态映射算法, 引入自适应权重调整机制^[15]。权重更新方程为:

$$w_k(t+1)=w_k(t)+\eta_w \cdot \frac{\partial E}{\partial w_k(t)} \cdot \exp\left(-\frac{t}{T_w}\right) \quad (14)$$

式中: η_w 为权重学习率, T_w 为权重衰减周期; 通过该优化, 光子芯片的重构效率提升 40% 以上, 耦合损耗降低至 0.5dB 以下。伊辛自旋态映射优化算法的执行流程如图 7 所示。

4 实验验证与分析

在无电磁干扰和气动参数稳定的情况下, 四种方法的制导性能对比结果如表 1 所示。

由表 2 可知本文研究方法综合评分达到 94 分, 远高于传统电子制导 (65 分) 与普通光子制导 (72 分), 验证了所提方法的综合优越性。

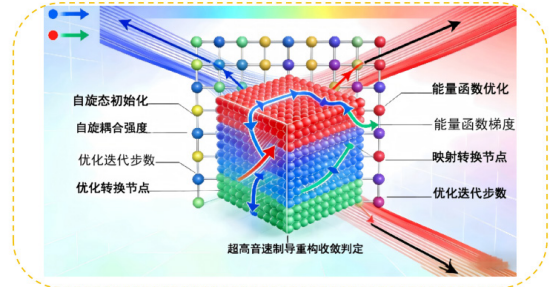


图 7 伊辛自旋态映射优化算法执行流程图

表 1 常规场景下四种制导方法性能对比

制导方法	响应延迟 (ns)	制导精度 (m)	自进化迭代次数	功耗 (W)	重构时间 (ms)
传统电子制导	1000 ± 50	50 ± 8	0	25 ± 3	—
普通光子制导	20 ± 3	30 ± 5	0	8 ± 2	—
伊辛智能计算光子制导	10 ± 2	15 ± 3	10 ± 2	6 ± 1	45 ± 5
本文方法	5 ± 1	5 ± 1	5 ± 1	5 ± 1	25 ± 3

表 2 多场景综合性能对比

性能指标	传统电子制导	普通光子制导	伊辛光子制导	本文方法	提升幅度
制导精度 (m)	50 ± 8	30 ± 5	15 ± 3	5 ± 1	90.0%
响应延迟 (ns)	1000 ± 50	20 ± 3	10 ± 2	5 ± 1	99.5%
功耗 (W)	25 ± 3	8 ± 2	6 ± 1	5 ± 1	80.0%
成功率 (%)	82 ± 5	89 ± 4	94 ± 3	98 ± 2	19.5%
抗干扰能力 (dB)	20 ± 3	45 ± 4	55 ± 3	70 ± 2	250.0%
环境适应时间 (s)	18.0 ± 2.0	12.0 ± 1.5	6.0 ± 1.0	2.5 ± 0.5	86.1%
综合评分	65 ± 3	72 ± 3	85 ± 2	94 ± 2	44.6%

5 结论

针对高超音速飞行器在高动态、强电磁干扰、气动参数剧烈耦合场景下传统制导系统的技术瓶颈,本文结合光子集成技术与智能制导的融合发展态势,提出了一种基于伊辛模型与近端策略优化融合的光子芯片自进化制导方法。主要研究结论如下:(1)在理论建模方面,构建了高超音速飞行器三维非线性气动耦合制导模型,引入光子传输损耗、温度漂移与耦合效应修正项,完善光子制导理论体系。该模型考虑了多物理场耦合效应,为光子制导系统的分析与设计提供了理论基础。(2)在架构创新方面,提出了“感知-计算-决策-执行-进化”五位一体的光子芯片自进化制导架构,实现了硬件链路与制导算法的同步迭代进化,为智能制导系统的工程化实现提供了新思路。(3)在抗干扰设计方面,基于波分复用、MZI 滤波与 EKF-PF 融合的抗干扰传输链路设计,实现了 70 dB 的干扰抑制比与 0.5% 的状态估计误差,该设计有效解决了强电磁环境下制导信号传输的可靠性问题。(4)在实验验证方面,通过多场景仿真与硬件在环测试,验证了本文方法在响应速度、制导精度与抗干扰能力方面的综合优势。实验结果表明,本文方法响应延迟 5 ± 1 纳秒、制导精度 5 ± 1 米、自适应调整时间 50 ± 10 毫秒,各项指标均显著优于对比方法 ($p < 0.001$),满足高超音速飞行器高实时性、高精度、高抗扰性的制导需求。(5)本文首次实现了伊辛模型、光致动器技术与光子芯片自进化制导的深度融合,为高超音速飞行器制导系统的工程化应用提供了理论支撑与技术参考。未来研究将进一步探索光子芯片在极端环境下的可靠性验证,以及自进化机制在更多复杂场景下的适应性优化。

参考文献

[1] 刘晓桂,刘小文,蒋逢灵,等.含PID参数的时滞LFC系统鲁棒稳定性分析[J].湖南工业大学学报,2023,37(01):31-39.

[2] 吕金虎,于江龙,董希旺.飞行器集群协同制导新进展[J].自动化学报,2025,51(04):727-743.

[3] 祝永新.定制计算领域专用架构的范式演进与跨学科应用研究

综述[J].微电子学与计算机,2025,42(10):78-84.

[4] 张伟伟,陈佐维,赵伟,等.广义Grover量子行走中的聚类现象[J].计测技术,2025,45(05):68-78.

[5] 蒋杰,李聪慧,姚森浩,等.拉曼光谱仪基本原理和典型应用[J].光散射学报,2024,36(03):305-319.

[6] 李云鹏,张立宪,韩岳江,等.基于模型预测控制的子母式无人机编队飞行控制方法[J].自动化学报,2025,51(02):312-326.

[7] 王天奇,于海.可倾转双旋翼飞行系统起降控制器设计[J].光学精密工程,2026,34(04):599-610.

[8] Huang X ,Chen F ,Liang Y , et al.Enhanced temperature sensing performance of pure silica MZI and FPI sensors using the harmonic Vernier effect[J].Measurement,2026,271120953-120953.

[9] 张祥,丁文婕,王芮宇,等.超量子比特大规模集成光链路的研究进展与挑战[J].中国电子科学研究院学报,2025,20(04):347-356+367.

[10] Zhu W ,Sun K ,Li Y .Multi-Dimensional Guidance System with Adaptive Algorithm and Lightweight Model for AUV Underwater Optical Docking[J].Drones,2025,9(12):861-861.

[11] 李宁,彭治钢,贺朝会.高速比较器与时钟驱动器电源模块电磁敏感性研究[J].强激光与粒子束,2024,36(09):138-144.

[12] Saiyyed R ,Sindhvani M ,Mishra K N , et al.Synergizing intelligent signal processing with wavelength-division multiplexing for enhanced efficiency and speed in photonic network communications[J].Journal of Optical Communications,2025,46(3):591-606.

[13] Martell B L ,Ibáñez F ,Cedeño L A , et al.Observer switching strategy for enhanced state estimation in CSTR networks[J].Journal of Process Control,2026,159103640-103640.

[14] 王大轶,侯博文,王炯琦,等.航天器自主导航状态估计方法研究综述[J].航空学报,2021,42(04):72-89.

[15] Wang E ,Xu H ,Ji G , et al.PHOENIX: A Hybrid Metaheuristic Framework for Multi-UAV Collaborative Trajectory Planning in Complex Three-Dimensional Environments[J].Complex & Intelligent Systems,2025,12(2):72-72.

Research on the Optimization of Standardized Maintenance Procedures in the Medical Equipment Department

Jian Shi Yanfeng Luo

Beijing First Hospital of Integrated Chinese and Western Medicine, Beijing, 100026, China

Abstract

Medical equipment serves as a critical material foundation for diagnosis, treatment, testing, monitoring, emergency care, and rehabilitation, with its operational status directly impacting clinical continuity and medical safety. With the increasing variety of equipment and the expansion of high-value precision instruments, traditional maintenance approaches reliant on experience and ad hoc coordination have become inadequate to meet operational demands. As the core maintenance department, the medical equipment department relies heavily on standardized maintenance procedures, timely response capabilities, and seamless collaboration. This article focuses on optimizing standardized maintenance workflows, analyzes existing shortcomings, and examines key stages including repair request processing, fault diagnosis, repair implementation, quality review, data archiving, and continuous improvement. The study demonstrates that standardized procedures enhance maintenance efficiency and quality, strengthen risk control, optimize resource allocation, and elevate hospital equipment management standards.

Keywords

medical equipment department; standardized maintenance; maintenance process; equipment management; quality control; process optimization

医疗设备科标准化维修流程的优化研究

石坚 罗延丰

北京市第一中西医结合医院, 中国·北京 100026

摘要

医疗设备是诊疗、检验、监护、急救与康复的重要物质基础,其运行状态直接影响临床连续性与医疗安全。随着设备种类增加、高值精密仪器扩容,传统依赖经验和临时协调的维修方式已难以满足保障需求。医疗设备科作为维护核心部门,其维修流程的标准化、响应及时性和协同顺畅性至关重要。文章围绕标准化维修流程优化,分析现有短板,从报修受理、故障判定、维修实施、质量复核、数据归档和持续改进等环节展开研究。研究表明,标准化流程有助于提高维修效率与质量,强化风险控制,促进资源合理配置,提升医院设备管理水平。

关键词

医疗设备科; 标准化维修; 维修流程; 设备管理; 质量控制; 流程优化

1 引言

医疗设备是支撑临床诊疗活动的重要基础,其运行状态直接关系诊疗的顺畅、安全与高效。设备故障不仅影响科室工作,还可能延误诊疗、增加成本、带来安全风险。因此,维修管理已成为医院管理链条中具有基础保障意义的关键环节。现实中,部分医院设备科存在受理标准不统一、故障分级不明确、维修记录不完整、配件管理不规范及复核反馈薄弱等问题,制约维修效率与质量提升。为此,有必要围绕标准化维修流程开展系统研究,通过流程优化增强设备保障能力,为医院高质量运行提供稳定的技术支撑。

【作者简介】石坚(1992-),男,回族,中国河北唐山人,本科,助理工程师,从事医用光机电研究。

2 医疗设备科标准化维修流程的内涵与现实意义

2.1 医疗设备维修工作的基本特点

医疗设备维修不同于一般机电设备维护,其显著特点在于设备类型多样、专业跨度较大、临床依赖度高、故障影响范围广。医院内部设备既包括结构相对简单的基础类设备,也包括高度集成、软硬件耦合紧密的大型诊疗设备,不同设备的故障表现、检测方法、维修难度和恢复周期存在明显差异。与此同时,医疗设备的使用环境具有持续性和临床敏感性,很多设备与患者治疗、抢救监护和检查结果直接相关,一旦停机,影响往往并不局限于设备本身,还会牵动排班、预约、床位周转和临床路径执行。维修工作因此具有较强的时效要求和安全要求。设备科维修人员不仅要具备技术能力,还要理解设备在医疗流程中的运行位置,能够在保障

效率的同时兼顾风险控制和临床需求。正是由于这些特点,医疗设备维修更需要建立规范、清晰、可追溯的标准化流程。

2.2 标准化维修流程的基本内涵

所谓标准化维修流程,是指围绕设备报修、响应、故障排查、维修实施、测试验收、记录归档和后续跟踪等各环节,建立明确步骤、责任边界、时间节点和质量要求的系统化管理机制。其本质并不是把维修工作机械化,而是在充分考虑设备差异和医院实际需求的基础上,为维修管理提供统一规则和执行依据。标准化流程强调“有流程可依、有节点可控、有结果可查”,既要求维修人员在技术实施层面规范操作,也要求设备科在管理层面形成完整闭环。对于医院而言,标准化维修流程不仅体现在故障处理本身,还包括报修信息采集是否完整、优先级判断是否合理、配件申请是否规范、维修后测试是否充分以及临床反馈是否纳入持续改进等内容。只有把这些要素整合起来,标准化才具有真正的管理价值。

2.3 推进维修流程标准化的现实必要性

随着医院设备总量持续增长,设备科维修任务日趋复杂,传统依赖个体经验和口头协调的方式已经难以适应当前管理要求。一些设备故障虽然能够被及时修复,但由于流程不规范,常常出现信息传递不清、责任划分模糊、维修依据不足和后续复盘困难等问题。尤其在多科室并发报修、大型设备停机、外部工程师介入和高值配件更换等情况下,如果缺乏标准化流程支撑,维修管理容易陷入被动。与此同时,医院对设备安全、成本控制、质量追溯和绩效管理的要求不断提高,设备维修工作不再只是“修好即可”,而是要兼顾时效、质量、合规和数据沉淀。推进标准化维修流程,既是提升维修工作效率的需要,也是加强医院设备精细化管理、保障医疗安全和促进管理透明化的重要举措^[1]。

3 医疗设备科维修流程中存在的主要问题

3.1 报修受理与故障分级不够规范

在实际工作中,报修环节看似简单,却往往是后续维修质量和效率的起点。部分医院的报修方式仍以电话、口头通知或即时通讯信息为主,报修信息缺乏统一模板,导致设备名称、故障现象、发生时间、使用状态和临床影响程度等关键信息记录不完整。维修人员接到报修后,常需要再次询问或到现场重新确认情况,增加了沟通成本和响应时间。更为突出的问题是故障分级不明确。并非所有故障都应按同一优先级处理,但现实中一些医院没有形成清晰的分级响应机制,轻微故障与急诊抢救设备故障在处理顺序上可能缺乏区分,影响资源合理调配。报修受理不规范、分级判断不清晰,会使维修工作从一开始就处于信息不足和节奏失衡状态,进而影响整个流程的运行质量。

3.2 维修实施过程缺乏统一作业标准

医疗设备维修具有较强专业性,但专业性并不意味着

流程可以完全依赖个人经验。部分医院设备科在维修实施阶段存在标准缺失问题,不同维修人员面对同类故障时采用的排查路径、记录方式和处理习惯差异较大,容易造成维修质量波动。有的维修只关注故障点本身,忽视关联部件检查和潜在隐患排查,导致设备短期恢复后又再次出现类似问题;有的维修虽完成处理,但未按规范进行功能测试和安全校验,留下运行风险。对于需要更换配件或调用外部维保资源的情况,如果内部审批、配件领用和联络记录没有统一流程,也容易造成责任不清和资料缺漏。维修实施过程缺乏统一标准,会使设备科整体工作呈现较强的人依赖性,不利于形成稳定、可复制的技术保障能力。

3.3 维修闭环管理与数据利用不足

在一些医院,设备修复完成后,维修流程实际上并未真正结束。问题在于,许多维修工作停留在“恢复使用”层面,而缺少系统性的闭环管理。比如,维修完成后未及时通知科室确认,设备是否恢复正常使用缺少明确反馈;维修记录虽填写,但内容过于简单,无法支持后续分析;故障原因没有分类整理,重复故障缺少专项复盘;高频故障设备未建立重点监控清单,导致问题反复出现。更深层次的问题在于维修数据没有被充分利用。维修记录原本是判断设备健康状态、评估维保成本、预测更新周期的重要依据,但在很多医院,这些数据只是静态存档,并未转化为管理决策支持。闭环不完整和数据利用不足,使维修工作难以从被动应对故障提升到主动优化管理的层面^[2]。

4 医疗设备科标准化维修流程的构建要点

4.1 建立统一规范的报修受理机制

构建标准化维修流程,应从报修入口开始规范。医院应建立统一报修平台或标准化报修表单,明确要求填写设备名称、资产编号、使用科室、故障现象、故障发生时间、当前影响程度和联系人等基本信息,避免报修内容模糊不清。对于急救、手术、重症监护等重点区域设备,应设置快速报修通道,并在系统中对高风险设备标识优先级。报修受理后,设备科应按照预设规则进行故障分级,将故障划分为紧急、优先、一般等不同层级,并明确相应响应时限和处理路径。这样既可以保障关键设备优先恢复,也有助于维修资源的合理分配。统一规范的报修机制,是整个维修流程标准化的起点,它决定了后续响应是否精准、安排是否合理、记录是否完整。

4.2 细化故障排查与维修实施流程

标准化维修流程的核心,在于将维修实施阶段从个人经验型操作转化为可遵循、可管理的技术流程。设备科应依据设备类别和故障特征,建立分层次的故障排查规范。对于常见设备,可形成典型故障处理指引,明确初步判断步骤、常规检测要点和常见处理方法;对于高端复杂设备,则应建立内部初查、厂家支持、第三方介入等分级处理机制。维修

实施中,应明确现场断电检查、安全防护、零部件拆装、配件更换、软件恢复、参数校准和功能测试等关键节点要求,避免操作随意化。对需要外送维修、厂家维保或重大部件更换的情况,还应配置相应审批、登记和交接流程。只有把维修过程中的关键动作制度化、节点化,标准化流程才能真正落地,而不是停留在原则层面^[3]。

4.3 完善验收确认与记录归档制度

设备维修完成后,是否真正恢复到安全、稳定、可用状态,需要通过验收确认加以保障。标准化流程中应明确维修后的测试要求,包括功能测试、安全测试、关键参数校验和模拟运行等内容,必要时还应邀请临床科室参与确认,确保设备不仅“能开机”,而且“能正常用于临床”。验收通过后,应形成完整维修记录,内容包括故障现象、故障原因、处理措施、更换配件、维修时长、参与人员、测试结果和科室确认情况。记录归档不应只是形式化填表,而要保证信息足够完整,能够支持后续追溯与统计分析。完善验收与归档制度,有助于将维修工作从一次性操作转化为可积累、可分析的管理数据,也为设备状态评估和持续改进提供基础。

5 医疗设备科标准化维修流程的优化策略

5.1 以分级响应机制提升维修时效

不同设备、不同故障、不同临床场景对维修响应速度的要求并不相同,因此优化标准化维修流程的重要方向之一,是建立更科学的分级响应机制。医院可根据设备用途、临床风险和故障影响程度,将维修任务划分为紧急类、重点类和常规类,并分别设定响应时限、到场要求和升级处理规则。比如,涉及急诊抢救、手术麻醉、重症监护的核心设备故障,应纳入最高优先级,确保即时响应;普通科室辅助设备的小故障则可在既定时段内处理。分级响应不仅提高了关键设备保障效率,也有助于减少资源挤占,使维修工作更加有序。通过与信息系统联动,还可以实现任务自动分派、超时预警和进度跟踪,进一步提升流程运行效率。时效管理一旦实现差异化和精细化,设备科整体保障能力将明显增强^[4]。

5.2 以标准作业文件提升维修质量一致性

要让标准化维修流程真正落到实处,必须形成可执行的标准作业文件。设备科可结合本院设备结构和维修实践,分门别类制定维修操作规范、故障判断流程图、重点设备应急处理指南和常见配件更换标准等文件,并通过培训和考核

确保维修人员熟练掌握。标准作业文件的价值,不在于把所有维修行为绝对统一,而在于为维修人员提供共同的技术基准和作业边界,减少因个人习惯差异造成的质量波动。对于新入职人员或经验相对不足的维修人员,标准文件更具有传帮带作用,有助于缩短能力形成周期。

5.3 以数据分析推动持续改进与管理升级

标准化维修流程的最终目标,不只是让每一次维修更规范,更在于通过数据积累推动整个设备管理体系持续优化。设备科应对维修记录进行定期分类统计和趋势分析,关注高频故障设备、重复报修设备、维修周期过长设备和高成本维修设备,识别流程中的薄弱环节和管理中的共性问题。例如,某类设备反复出现同一部件故障,可能提示预防性维护不足或使用培训不到位;某些设备维修周期明显偏长,可能说明配件储备策略不合理或外部协同效率较低。通过数据分析,设备科可以有针对性地调整巡检重点、优化配件管理、完善使用培训,甚至为设备更新与采购提供依据[5]。

6 结语

医疗设备科标准化维修流程的优化,是提升医院设备保障能力、维护医疗安全和推进精细化管理的重要基础工作。随着医疗设备总量增加、设备结构日益复杂以及临床运行节奏不断加快,传统经验型维修管理模式已难以适应现实需求。文章围绕报修受理、维修实施、验收归档和持续改进等环节进行了分析,认为维修流程标准化的关键,在于建立统一入口、明确分级响应、细化作业规范、完善闭环管理,并充分挖掘维修数据的管理价值。对于医院而言,优化维修流程不仅能够缩短故障处理时间、提高设备完好率,还能够增强管理透明度和决策科学性。

参考文献

- [1] 王庆庆.关于医疗设备维修全流程管理系统的探讨[J].中国医疗器械信息,2025,31(02):155-157.
- [2] 彭志涛,熊昌蓉.医院医疗设备维修与维护流程优化探究[J].中国医院建筑与装备,2024,25(03):64-67.
- [3] 杨攀,杨慧蓉,王清波.医疗设备维修的全流程管理系统[J].医疗装备,2018,31(09):85-86.
- [4] 于忠辉,陈海英.医院医疗设备维修流程控制的探讨[J].医疗装备,2016,29(02):67.
- [5] 高虹,纪玲.对医院医疗设备维修流程控制的探讨[J].中国医疗设备,2008,(01):82-83.

Enhance Quality and Design to Optimize Construction, Ensuring High-quality Delivery of EPC Projects

Wei Chen

China Metallurgical Jingcheng Engineering Technology Co., Ltd., Beijing, 100176, China

Abstract

Although China's EPC (Engineering, Procurement, and Construction) general contracting industry has experienced rapid development, it still faces challenges in the design phase, including insufficient depth of design, poor coordination, and weak quality control. The construction service phase suffers from shortcomings such as inadequate professional expertise among personnel, delayed response times, and a lack of service awareness, which significantly hinder the smooth delivery of EPC projects. Drawing on practical experience from the steel industry and other sectors, this paper systematically analyzes the intrinsic relationships between design quality, construction services, and project delivery in EPC projects; thoroughly examines the prominent issues and underlying causes related to current design quality and construction services; and proposes targeted improvement strategies across multiple dimensions—including design quality control, construction service optimization, collaborative mechanism establishment, and support system enhancement—with the aim of promoting high-quality development in the EPC industry.

Keywords

EPC engineering turnkey contract; design quality; construction services; smooth delivery; collaborative management

提质设计优化施工，推进 EPC 项目高质量交付

陈玮

中冶京诚工程技术有限公司，中国·北京 100176

摘要

当前，我国EPC工程总承包行业虽快速发展，但在设计环节仍存在深度不足、协同不畅、质量管控薄弱等问题，施工服务环节则面临人员专业不足、响应滞后、服务意识欠缺等短板，严重制约了EPC工程的顺利交付。本文结合钢铁行业等工程实践经验，系统分析设计质量、施工服务与EPC工程总承包交付之间的内在关联，深入剖析当前设计质量与施工服务存在的突出问题及深层原因，从设计质量管控、施工服务优化、协同机制构建、保障体系完善等多个维度，提出针对性的改进策略，旨在推动EPC工程总承包行业高质量发展。

关键词

EPC工程总承包；设计质量；施工服务；顺利交付；协同管理

1 EPC 工程总承包模式的核心内涵

EPC 工程总承包模式(Engineering-Procurement-Construction)，即设计—采购—施工一体化总承包模式，是指总承包企业按照合同约定，承担工程项目的设计、采购、施工、试运行等全流程工作，对项目的质量、安全、工期、投资全面负责，最终向建设单位交付符合合同要求的合格工程的一种管理模式。^[1]其核心优势在于实现了设计、采购、施工的一体化协同，减少了各环节之间的界面壁垒，降低了沟通成本，提高了项目管控效率，能够有效规避传统模式下设计与施工脱节、责任推诿等问题。

对于钢铁、石化等复杂工业工程而言，EPC 模式的优

势更为突出。此类工程专业繁多、工艺复杂、设备密集，涉及主体工艺、土建基础、电气仪表、给排水暖通等多个专业，设计、采购、施工之间的协同难度大，采用 EPC 模式能够通过总承包企业的统筹管控，实现各环节的无缝衔接，保障项目顺利推进。

2 当前 EPC 工程总承包中设计质量与施工服务存在的突出问题

2.1 设计质量存在的突出问题

2.1.1 设计深度不足，细节把控欠缺

当前，部分EPC项目设计工作存在“重方案、轻细节”“重速度、轻质量”的现象，设计深度不足，细节把控欠缺。尤其是在钢铁行业等复杂工程中，由于设计任务繁重、工期紧张，设计人员往往仓促完成设计工作，对设计细节考虑不周，导致设计图纸存在分交不明确、区域交接点不清、工艺衔接

【作者简介】陈玮（1983—），女，中国河北邢台人，硕士，高级工程师，从事冶金工程项目管理研究。

不畅等问题。例如,在营口宽厚板项目现场施工服务中发现,设计图纸中存在大量专业间碰撞、尺寸标注错误、工艺参数不明确等问题,这些问题大多是由于设计人员工作不细致、细节把控不到位导致的,不仅增加了施工难度,还导致现场返工,延误了施工进度。

此外,部分设计人员缺乏现场实践经验,设计过程中未充分考虑现场施工条件、施工工艺、气候环境等因素,导致设计图纸的可施工性较差。例如,在一些钢铁项目中,设计人员未充分考虑当地气候条件,导致设备选型与当地气候不匹配,影响设备运行效果;未充分考虑现场施工场地限制,导致设备布置不合理,增加了施工难度。

2.1.2 专业协同不畅,接口矛盾突出

EPC 工程设计并非单一专业的线性作业,而是工艺、建筑、结构、电气、给排水、暖通等多专业共同参与的系统集成过程。实践中,一些设计单位仍沿用专业分块、独立出图的工作方式,协同界面缺少统一管理,资料传递也缺乏校核闭环,容易使设计风险在专业交接处集中暴露。^[2]比如,工艺设备布置未能提前与土建基础、检修通道、电缆桥架及管线走向统筹核对,便可能出现设备基础预留偏差、管线交叉碰撞、操作空间不足等问题;互提条件若存在滞后或口径不一致,还会进一步诱发图纸错项、漏项和专业冲突,影响后续采购、施工组织与现场变更控制。

另外,部分设计人员习惯从本专业任务出发判断方案可行性,对工程整体功能、施工可达性和运营维护便利性关注不足。以冶金类项目为例,若工艺路线只强调流程顺畅,却忽视设备吊装、检修更换和人员通行条件,设计成果即使满足工艺计算要求,也难以支撑项目全生命周期质量目标。

2.2 施工服务存在的突出问题

2.2.1 施工服务人员专业能力不足

施工服务人员的能力结构是否适配,直接关系 EPC 项目现场技术支持质量。部分项目中,服务人员虽承担设计交底、问题解释和变更协调等任务,但专业储备与现场需求仍有落差。有的人对设计逻辑、设备布置、图纸控制要求理解不深,面对接口调整、尺寸复核、材料替代等问题,难以及时判断;有的人偏重设计管理,对施工工序、验收标准及安全措施掌握不足,不能将设计要求转化为施工班组可执行的技术提示。

同时,钢铁工程专业交叉密集,若现场服务依赖外聘工程师,其对项目工艺、前期变更和专业配合关系掌握有限,沟通易停留在表层。加之外聘人员更换频繁,问题跟踪、经验沉淀和责任衔接缺少连续性,进而削弱服务响应与问题处置效果。

2.2.2 施工服务响应滞后,效率低下

施工过程中,现场问题往往具有突发性、紧迫性,需要施工服务人员及时响应、快速解决。但当前,部分 EPC 项目的施工服务响应滞后,效率低下。例如,现场出现设计

问题后,施工服务人员未能及时到达现场勘查、分析问题,导致施工停工待解;问题反馈给设计人员后,设计人员未能及时给出解决方案,进一步延误施工进度。

此外,施工服务工作缺乏标准化、规范化流程,现场问题的处理没有明确的时间节点与责任分工,导致问题处理效率低下,部分问题长期得不到解决,影响项目顺利推进。同时,施工服务人员与设计人员、施工人员之间的沟通不畅,信息传递不及时,也导致问题处理效率受到影响。

2.3 设计质量与施工服务脱节的深层原因

2.3.1 管理理念滞后,重视程度不足

部分 EPC 总承包企业及设计院仍存在“重设计、轻服务”“重施工、轻设计”的传统理念,对设计质量与施工服务的重视程度不足。^[3]企业管理层过度关注项目进度与投资,忽视了设计质量与施工服务的重要性,导致设计质量管控与施工服务优化缺乏足够的资源支持与制度保障。

2.3.2 组织架构不合理,协同机制缺失

部分设计院采用矩阵式组织结构,设计团队为临时性组织,设计人员受设计经理与各工程技术部门的双重领导,导致设计管理与施工服务管理脱节。同时,缺乏有效的协同沟通机制,设计部门、施工服务部门之间缺乏密切配合,信息传递不畅,导致设计与施工服务脱节。

2.3.3 考核激励机制不完善

当前,部分企业的绩效考核机制不完善,设计人员的绩效主要与设计工作量、设计进度挂钩,与设计质量、施工服务效果挂钩不紧密;施工服务人员的绩效主要与服务天数、服务工作量挂钩,与服务质量、问题解决效率挂钩不紧密,导致设计人员与施工服务人员缺乏提升工作质量与服务水平的积极性。

3 提高设计质量、提升施工服务水平的优化策略

3.1 强化设计质量管控,筑牢项目交付基础

3.1.1 深化设计深度,强化细节把控

一是合理安排设计工期,避免设计工作仓促推进。EPC 总承包企业应根据项目规模、复杂程度,合理制定设计计划,确保设计人员有足够的时间开展设计工作,深入研究设计细节,避免因工期紧张导致设计深度不足。二是强化设计细节把控,建立设计细节审查机制,重点审查设计图纸中的尺寸标注、工艺参数、专业接口、区域交接等细节内容,及时发现并纠正设计错误与缺陷。三是提升设计的可施工性,设计人员应深入现场开展勘查,充分考虑现场施工条件、施工工艺、气候环境、设备安装等因素,确保设计图纸符合现场实际需求,便于施工开展。

例如,在钢铁项目设计中,设计人员应提前深入现场,了解当地的气候条件、地质情况、材料供应情况等,合理选用设备与材料;充分考虑现场施工场地限制,优化设备布置

与施工路线,提高设计的可施工性。同时,设计人员应加强与施工人员的沟通,听取施工人员的意见与建议,优化设计方案,避免设计与施工脱节。

3.1.2 完善专业协同机制,破解接口矛盾

一是建立跨专业协同设计机制,成立协同设计小组,由设计经理牵头,统筹各专业设计工作,明确各专业的设计职责与分工,加强各专业之间的沟通与配合。二是推行协同设计平台,利用信息化技术,实现各专业设计人员的实时沟通、资料共享,减少专业间的接口矛盾。例如,推广使用三维设计软件,通过三维模型直观展示各专业之间的衔接关系,及时发现并解决专业间的碰撞问题,提高设计质量与效率。^[4]三是加强专业间会签制度,各专业设计完成后,必须经过相关专业设计人员会签确认,确保专业间接口衔接顺畅,避免出现错、漏、碰、缺等现象。

此外,应强化设计人员的全局意识,加强各专业设计人员的培训与交流,让设计人员了解其他专业的设计内容 with 要求,提高协同设计能力,确保设计方案的系统性、整体性。

3.1.3 强化设计优化,严控项目投资

一是树立设计优化意识,建立设计优化机制,鼓励设计人员结合项目实际情况,开展多方案比选,优化设计方案,降低项目投资。例如,在工艺设计中,通过对比不同工艺路线的投资成本、运行效率、维护成本等,选择最优的工艺方案;在设备选型中,结合项目需求,合理选用性价比高的设备,避免过度追求高端设备。二是推行限额设计,根据项目投资预算,明确各专业的设计限额,严格控制设计成本,确保设计方案不超出投资预算。三是加强设计阶段的成本审核,成立成本审核小组,对设计方案的投资成本进行审核,及时发现并纠正成本偏高的设计内容,优化设计方案,实现投资控制目标。

3.2 优化施工服务体系,提升服务保障能力

3.2.1 加强施工服务人才队伍建设,提升专业能力

一是优化施工服务人员配置,优先安排本项目的设计人员参与现场施工服务,确保施工服务人员熟悉项目设计情况、工艺要求,能够准确理解设计意图,有效解决现场设计问题。若设计人员工作冲突,可考虑项目之间人员调换,确保施工服务工作的连续性。二是加强施工服务人员的专业培训,定期组织施工服务人员开展设计知识、施工工艺、施工规范等方面的培训,提升施工服务人员的专业能力。同时,鼓励施工服务人员参与设计工作,了解设计流程与设计要求,提高设计与施工服务的协同能力。三是建立施工服务人员考核机制,对施工服务人员的专业能力、服务质量、问题解决效率等进行考核,考核结果与收入、晋升挂钩,激发施工服务人员的工作积极性与主动性。

此外,应加强复合型人才培养,培养一批既懂设计、又懂施工、还懂服务的复合型施工服务人才,提升施工服务

水平与协同效果。

3.2.2 建立标准化施工服务流程,提高服务效率

一是制定标准化的施工服务流程,明确施工服务的工作内容、工作流程、时间节点、责任分工,确保施工服务工作有序开展。例如,明确现场问题的上报、勘查、分析、反馈、解决等环节的时间节点与责任分工,确保现场问题能够及时响应、快速解决。二是建立现场问题快速处理机制,成立现场服务小组,配备专业的施工服务人员与必要的设备,确保现场出现问题后,施工服务人员能够及时到达现场,开展勘查、分析工作,并快速反馈给设计人员,推动问题解决。三是加强施工服务人员与设计人员、施工人员之间的沟通,建立常态化的沟通机制,确保信息传递及时、顺畅,提高问题处理效率。

3.2.3 强化服务意识,提升服务质量

一是加强施工服务人员的服务意识教育,转变传统的服务理念,让施工服务人员认识到施工服务的重要性,树立“以业主为中心、以质量为核心”的服务理念,主动提升服务质量。^[5]二是建立施工服务监督考核机制,加强对施工服务人员服务质量的监督,定期开展业主满意度调查,听取业主的意见与建议,及时改进施工服务工作。三是推行施工服务标准化,明确施工服务的服务标准与服务规范,要求施工服务人员严格按照服务标准开展工作,确保服务质量的稳定性与一致性。

例如,施工服务人员应主动巡查现场,及时发现现场问题;技术交底应详细、全面,确保施工人员准确理解设计意图;对业主、施工人员提出的问题,应认真对待、及时解决,提高业主与施工人员的满意度。

3.3 构建设计与施工服务协同机制,推动二者良性发展

3.3.1 建立一体化协同管理平台

利用信息化技术,构建设计与施工服务一体化协同管理平台,实现设计图纸、施工进度、现场问题、设计变更等信息的实时共享,打通设计与施工服务之间的信息壁垒。设计人员可以通过平台实时了解现场施工情况,及时优化设计方案;施工服务人员可以通过平台快速获取设计图纸、设计变更等信息,及时解决现场问题。同时,平台可以实现设计人员、施工服务人员、施工人员、业主之间的实时沟通,提高协同效率。

3.3.2 建立协同考核机制

将设计质量与施工服务效果纳入协同考核体系,对设计人员与施工服务人员进行联合考核,考核结果与双方的绩效挂钩。例如,设计人员的考核不仅包括设计质量、设计进度,还包括施工服务反馈的问题整改情况;施工服务人员的考核不仅包括服务质量、问题解决效率,还包括设计图纸的落实情况。通过协同考核,激发设计人员与施工服务人员的

协同意识,推动二者密切配合、良性发展。

3.3.3 加强设计与施工服务的前期协同

在设计前期,组织施工服务人员、施工人员参与设计方案研讨,让施工服务人员、施工人员提前了解设计意图与设计要求,提出针对性的意见与建议,优化设计方案,提高设计的可施工性。同时,设计人员应向施工服务人员、施工人员详细介绍设计方案、工艺要求、专业接口等内容,为后续施工服务与施工工作奠定良好基础。

4 保障措施

4.1 制度保障

建立完善的设计质量与施工服务管理制度,明确设计质量管控、施工服务优化的具体要求、工作流程、责任分工,确保各项优化措施落到实处。例如,制定《设计质量管理制度》《施工服务管理制度》《设计与施工服务协同管理制度》等,规范设计与施工服务工作。同时,加强制度的执行与监督,定期开展制度执行情况检查,及时发现并纠正制度执行过程中存在的问题,确保制度的权威性与有效性。

4.2 组织保障

优化组织架构,建立专门的设计管理部门与施工服务部门,明确各部门的职责与分工,加强部门之间的协同配合。对于EPC项目,成立项目总承包管理团队,由项目经理牵头,统筹设计、采购、施工、施工服务等各项工作,确保设计质量与施工服务水平得到有效提升。^[6]同时,提高设计经理的认知度,赋予设计经理一定的奖惩权,便于设计经理统筹设计工作、安排施工服务,提高设计与施工服务的协同效率。

4.3 人才保障

建立健全人才培养、引进、激励机制,加强设计人员与施工服务人员的队伍建设。一是加强内部培养,定期组织设计人员与施工服务人员开展专业培训、实践锻炼、交流学习,提升人才队伍的专业能力与素养;二是加大外部引进力度,引进一批具有丰富EPC项目设计与施工服务经验的复合型人才,充实人才队伍;三是完善激励机制,对表现优秀的设计人员与施工服务人员给予表彰与奖励,激发人才队伍的工作积极性与主动性。^[7]

5 结论与展望

5.1 结论

要保障EPC工程总承包顺利交付,必须强化设计质量

管控,深化设计深度,完善专业协同机制,强化设计优化,完善设计质量管控体系;优化施工服务体系,加强人才队伍建设,建立标准化施工服务流程,强化服务意识,加强与设计的协同;构建设计与施工服务协同机制,建立一体化协同管理平台与协同考核机制,加强前期协同;同时,从制度、组织、人才、技术、资金等方面建立完善的保障体系,确保各项优化措施落地见效。

5.2 展望

随着我国EPC工程总承包行业的不断发展,市场对设计质量与施工服务水平的要求将不断提高。未来,EPC总承包企业应进一步转变管理理念,重视设计质量与施工服务的提升,加强数字化、智能化技术的应用,推动设计与施工服务的数字化转型;加强人才队伍建设,培养更多复合型人才,提升设计与施工服务的专业水平;加强行业交流与合作,借鉴先进的管理经验与技术,推动设计质量与施工服务水平不断提升。

对于钢铁行业而言,当前行业进入“寒冷期”,企业应合理利用这一时期沉淀自己,全面开展设计与施工服务总结,发现问题、优化改进,不断提高设计质量与施工服务水平,提升企业市场竞争力。相信在各方的共同努力下,我国EPC工程总承包行业的设计质量与施工服务水平将不断提升,能够更好地保障EPC工程顺利交付,推动行业高质量发展。

参考文献

- [1] 住房和城乡建设部.《房屋建筑和市政基础设施项目工程总承包管理办法》[Z]. 2019.
- [2] 王要武. 工程总承包项目管理[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2020.
- [3] 李慧. 基于设计主导的EPC总承包项目管理模式研究[J]. 工程管理学报, 2021, 35(2): 102-106.
- [4] 张明. 基于BIM的EPC项目设计—施工协同管理研究[J]. 施工技术, 2022, 51(8): 156-160.
- [5] 刘军. 提升EPC总承包企业设计管理能力的路径探析[J]. 建筑经济, 2023, 44(3): 78-82.
- [6] 杨小晋. 国际EPC总承包项目的设计管理研究[J]. 山西建筑, 2011, 37(32): 245-246.
- [7] 刘克非. EPC工程总承包管理中设计的思考[J]. 轻金属, 2008(8): 67-69.

Coverage Optimization and Interference Suppression Technology of Rail Transit Vehicle-to-Station Wireless Communication System

Yirao Zhang Nan Sheng

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

Abstract

As rail transit systems advance toward intelligent and high-speed operations, the vehicle-to-ground (V2G) wireless communication system serves as a critical infrastructure for ensuring train safety and operational efficiency, with coverage performance and interference resistance being paramount. This paper first examines the challenges of incomplete coverage and signal interference in V2G systems, then analyzes coverage optimization and interference suppression technologies. Coverage optimization focuses on network planning, topology optimization, implementation of key technologies, and performance evaluation methods. Interference suppression delves into interference source identification, practical anti-interference techniques, and system coordination optimization strategies. The study aims to provide theoretical references and practical guidance for enhancing the reliability, real-time performance, and capacity of V2G communication systems.

Keywords

rail transit; vehicle-to-ground wireless communication; coverage optimization; interference suppression; network planning; anti-interference technology

轨道交通车地无线通信系统的覆盖优化与干扰抑制技术

张艺饶 盛楠

长春市轨道交通集团有限公司, 中国·吉林 长春 130000

摘要

随着轨道交通朝智能化、高速化方向迈进, 车地无线通信系统是保障列车安全、高效运行的关键依托, 其覆盖性能、抗干扰能力至为关键。本文首先梳理轨道交通车地无线通信系统存在的覆盖不全与信号干扰问题, 随后围绕覆盖优化技术和干扰抑制技术2个层面展开分析。在覆盖优化上, 重点研究网络规划和拓扑优化、关键技术落实及性能评估手段; 在干扰抑制工作上, 细究干扰源识别和分类、抗干扰技术实践及系统协同优化方案。本文聚焦为提升车地无线通信系统的可靠性、实时性和容量提供理论参考与实践指导。

关键词

轨道交通; 车地无线通信; 覆盖优化; 干扰抑制; 网络规划; 抗干扰技术

1 引言

车地无线通信系统作为支撑轨道交通运营的“神经网络”, 保障列车控制指令、实时状态监测和乘客信息服务等关键业务数据的可靠传送。随着轨道交通网络规模不断扩大、列车运行速度稳步提高, 外加车载多媒体、智能运维等新兴业务需求快速攀升, 复杂隧道、高架区间及密集枢纽等场景, 给系统带来信号覆盖不均、传播损耗严重、多径衰落效应突出、同频邻频干扰加剧等挑战, 直接阻滞通信实时性和稳定性, 甚至给行车安全埋下隐患。因此, 怎么构建高效、

连续、稳定的网络覆盖体系, 并有效甄别和抑制各类干扰, 已是轨道交通通信范畴亟待攻克的核心问题。本文紧扣覆盖优化和干扰抑制2大核心模块, 全面梳理相关技术原理, 分析典型技法与工程应用方案, 为系统的规划设计、部署实施与运营维护提供全面参考和实操路径。

2 轨道交通车地无线通信覆盖优化技术

优化车地无线通信系统覆盖, 目的是保障沿线无线信号连续稳定, 适配高速移动场景的通信需求。核心目标为在复杂隧道、高架、弯道等特殊环境消除盲区、均衡信号强度、提升容量。

2.1 网络规划与拓扑结构优化

科学的网络规划是轨道交通无线通信覆盖优化的核心

【作者简介】张艺饶(1981-), 男, 中国吉林长春人, 本科, 高级工程师, 从事通信工程研究。

基础。设计人员需统筹兼顾线路沿途的地理环境特征、隧道和高架等不同场景的电波传播特性,贴合列车控制、乘客信息系统等业务的差异化需求,同时合理安置基站(AP)或泄漏同轴电缆。在实际执行中,直线区间一般采用较大站间距,曲线区间必须加密站点,突破弯道遮挡限制;在封闭隧道中,使用漏缆实现连续均匀覆盖,且在洞口等关键位置增设定向天线补信号;在高架类开阔路段,能借助多天线集接收技术对抗信号衰落,稳固可靠性。

构建更可靠高效的覆盖网络,要从系统拓扑层面创新,用蜂窝组网结构实现频率复用和无缝切换,或在大型站场采用多层网络,外加部署分布式天线系统,扩大覆盖规模,平抑话务负载。先进拓扑结构可显著优化全网覆盖的均匀性与整体鲁棒性,为后续技术应用和优化夯实可靠物理基础,保障高速移动环境下各类业务连接连续且稳定^[1]。

2.2 关键覆盖增强技术应用

在复杂轨道交通环境里,需要依靠一系列先进覆盖增强技术应对专项挑战。处理高速移动引发的多普勒频移、频繁切换及车体穿透损耗等问题,可大规模铺开MIMO技术,借助空间分集和复用强化信道容量与抗干扰能力;采用智能天线和波束赋形算法,动态引导信号能量聚焦列车行驶方向,显著提升目标区域的信号强度并消减干扰。在长隧道、大型地下车站等信号达不到的区域,可灵活采用射频拉远单元或有源/无源中继设备,可省钱高效拓宽覆盖范围,消除盲区。

理论设计加仿真验证,是保障技术方案精准落地的关键步骤。需采用依托射线跟踪理论或确定性电波传播模型的专业仿真工具,结合精准的三维地理信息系统数据,实施全线无线信号场强预测与覆盖模拟。通过反复仿真和参数调整,能预先排查潜在弱覆盖区、越区干扰等问题,借此优化天线选型、布点位置、参数配置,达成从经验驱动到模型驱动的精准确网络规划及优化,减少后期整改成本,提升网络建设效率和质量。

2.3 覆盖性能评估与动态调整

网络覆盖优化是凭借测量和反馈的持续闭环流程。在工程验收与日常运维环节,必须通过车载测试设备沿全线实地采集接收信号强度、信噪比、误码率、切换成功率等关键性能指标,同步采用网络管理系统侧的统计数据,诸如话务量、拥塞率、掉线率,就覆盖效果进行全面客观定量评估。这种“路测+网管”结合方案,可精准锁定覆盖空洞、弱覆盖区、切换失败区和外界干扰源,为后续优化找准精准定位。

凭借评估结果,静态参数调整赶不上动态变化的高铁运营环境需求,应引入更智能的自适应调参机制。该机制可依据实时采集的网络负载状况、列车实时位置和速度信息,依托集中式控制器或分布式算法,动态调整对应基站或接入点的发射功率、天线电子下倾角、切换门限等参数。这类动

态优化可实时抵消环境变化(如天气、季节植被变化)引发的覆盖波动,还能在网络话务分布不均时主动实施容量均衡,持续实现网络覆盖性能和资源利用效率的最优水平,保障乘客、运营业务的高质量无线体验^[2]。

3 轨道交通车地无线通信干扰抑制技术

3.1 干扰源识别与特征分析

为了有效抑制无线通信干扰,必须精准识别干扰的类型和来源。在轨道交通体系内,第一环节需采用便携式频谱分析仪、固定监测站及网络侧性能数据,持续监测干扰信号,实施深度分析。按照信号特征,干扰一般可划分为同频干扰、邻频干扰、互调干扰及外部脉冲噪声等主要类型。聚焦该场景,需特别留意牵引供电系统产生的宽频谱谐波干扰、列车集电弓和接触网滑动摩擦引发的瞬态火花噪声,以及沿线公众移动通信、工业设备可能带来的频段重叠干扰。通过现场测试与数据分析,精准定位干扰的物理源头是制定并实施有效应对策略的核心基础。

为开展针对性抑制,须对已识别干扰实施量化建模和特征分析。这囊括捕捉时域上的突发性、周期性或连续性特点,针对频域测量中心频率、带宽、功率谱密度及谐波分布,按空间维度梳理传播路径和方向性。牵引谐波干扰通常呈现出与电网工频存在关联的离散频谱特性,火花噪声则体现为在时域内的随机尖锐脉冲。通过制作详细干扰特征模型,可为后续选定滤波、规避或抵消等抑制策略提供关键理论支撑,助力干扰管理工作从经验判断转为科学决策。

3.2 抗干扰关键技术应用

针对各类干扰,需要在信号传输和接收环节采用多项关键技术。比如采用直接序列扩频或跳频技术,用扩展信号频谱或让它在多个频点快速跳变的方式,借此降低干扰功率密度,提升信号的隐蔽性与抗干扰容限。针对空域处理,可以设置智能天线阵列并采用自适应波束成形算法,实现实时调整天线方向图,让主波束精准瞄准目标用户,同时在干扰方向生成辐射零陷,靠空间维度有效压制干扰信号^[3]。

在频域和信号处理层面,可通过认知无线电技术探测频谱环境,动态选择干净频段接入,主动躲开干扰强的信道。用高阶调制和强纠错编码技术强化信号自身鲁棒性,并采纳自适应滤波器和干扰抵消算法,直接估计接收信号中的干扰成分并减去。针对突发脉冲噪声,把比特流按时域维度交织分散,再结合前向纠错码,可把其影响转化为随机零星错误,由此得到有效修正。综合应用此类技术,能从各维度提升接收端的信干噪比,维持通信链路可靠状态。

3.3 系统级协同抗干扰策略

应对轨道交通沿线动态变化的复杂电磁环境,仅靠单一技术,抗干扰效果有限,需立足通信系统全局推进顶层设计与协同优化。在实施网络规划进程时,需敲定严格的频率规划及复用方案,并配足保护带,从根源上降低系统内部同

频和邻频的干扰风险。在数据链路层,构建带有强抗冲突能力的媒体接入控制协议,采用预约或防碰撞机制,降低多用户抢占信道引发的数据包碰撞频次,这类碰撞是系统内部的1种干扰。

为了引入集中式的网络协同机制,应把先进干扰协调与无线资源管理功能部署到核心网或集中控制器侧,依托全网干扰测量报告,动态统筹多个基站或接入点的发射功率、频率和时隙资源。在实施小区间干扰的协同管理与抑制时,应把抗干扰性能作为核心指标纳入系统整体设计框架和设备选型标准,其要求关键设备配有干扰抑制能力,诸如高性能滤波器、高线性度功放等。采用这种贯穿规划、协议、管理和硬件全链条的系统级策略,才能从源头和体系层面大幅强化轨道交通无线通信系统的整体鲁棒性。

4 覆盖优化与干扰抑制的协同与展望

4.1 覆盖与干扰的耦合关系分析

弱覆盖区域的出现,多因信号传播受阻或基站布点不足,其直接关乎通信的连续与可靠。在补足覆盖漏洞中,惯用手段是提升特定小区发射功率或新增补点站,不过这可能引发信号越区覆盖,为邻近小区造成严重同频或邻频干扰,从而降低整体信干噪比和用户速率。网络中出现强干扰区域——比如多小区信号重叠或外部电磁干扰——会让终端接收信号质量降低,有效服务范围缩减,形成实际存在的“覆盖空洞”。覆盖和干扰互相制约、互相转化的耦合关系,代表仅开展单一优化覆盖或干扰往往事倍功半,甚至引发网络性能震荡。在网络规划与优化时,要从系统性、联合优化的角度,把覆盖控制与干扰管理归入同一框架分析,同步调整功率、天线、频率、小区参数等多个维度指标,在满足全域覆盖要求的同步阶段,将干扰维持合理水平,从整体上提升系统容量和用户体验,把网络效能拉满^[4]。

4.2 一体化协同优化框架

聚焦复杂高密度的现代移动通信网络,亟需搭建覆盖与干扰一体化协同优化框架,大数据和人工智能是这个框架的核心动力源。通过实时采集终端测量报告、网络性能计数器、信令跟踪等多源海量数据,以机器学习算法自动定位网络症结,能够精准识别覆盖弱区、过覆盖区域及干扰冲突点。借着这个基础,系统可制定并落实协同优化策略:采用SON(自组织网络)技术动态调整小区发射功率、天线倾角、切换参数等,保证覆盖无间断的同时,遏制不必要的同频干扰;从更宽维度上,依靠云化集中管控架构,完成跨基站、跨频段甚至跨制式的协同资源调度与干扰协调,涉及小区间

干扰协调、协同波束成形、动态频谱共享等机制。此框架支持实时或准实时闭环优化,还可实施长期趋势分析和策略仿真,赋予网络自适应、自优化能力,进而在动态变化的环境里长久保持覆盖与干扰的最佳平衡。

4.3 面向未来的技术演进方向

在轨道交通等场景开始应用5G/6G、毫米波、太赫兹通信等前沿技术,覆盖和干扰管理面临新挑战和新机遇。高频段通信虽可实现大带宽,但传播损耗高、绕射能力差,覆盖易受限,需借助智能超表面、中继增强、分布式MassiveMIMO等新型覆盖延伸技术,实现灵活、智能的信号增强与导引。超密集组网、多层异构网络将成为常规模式,随着小区间干扰复杂程度升级,带动了干扰协调技术从传统静态配置迈向动态智能协同。比如依据用户位置的动态小区聚类与干扰消除,空天地一体化网络把卫星、高空平台和地面网络深度融合,增加覆盖层面。通感一体化依托通信与感知能力的结合,实现环境感知及干扰预测。这类新型架构有效强化系统覆盖能力和抗干扰潜力,但也给网络全局协同设计、资源一体化调度及跨域管理划定更高标准,推进覆盖与干扰优化朝全域智能、多维融合方向稳步前进^[5]。

5 结语

做好轨道交通车地无线通信系统的覆盖优化和干扰抑制,是支撑它高效可靠运行的两大技术支撑。本文全面论述覆盖优化涉及的规划、技术与评估方法,以及干扰抑制相关的识别、技术与协同策略,并着重说明两者的内在联系与协同要求。覆盖优化聚焦构建连续、均衡的信号环境,干扰抑制聚焦净化通信链路、提升信号质量。随着轨道交通智能化水平提升和新技术引入,覆盖与干扰问题将愈发复杂,必须在理论创新、技术融合和系统集成上不断突破,构建更智能、更可靠、更高效的车地无线通信系统,为轨道交通安全、准点和舒适运营打下扎实根基。

参考文献

- [1] 李德麟.城市轨道交通专用无线通信系统制式分析[J].智能建筑与智慧城市,2025,(12):164-167.
- [2] 兰蒙,徐中伟,黄新林.面向轨道交通车地无线通信系统的零现场测试[J].铁道学报,2025,47(10):103-113.
- [3] 王霖晨,李海粟,刘嘉宇,张永恒.城市轨道交通无线通信系统的共线运营研究[J].铁道通信信号,2024,60(05):67-76.
- [4] 林鹏程,陈志超.城市轨道交通CBTC信号系统中的无线通信抗干扰技术分析[J].集成电路应用,2023,40(12):306-307.
- [5] 黄骏,汤伟涵.城市轨道交通5G车地无线通信系统可实施性研究及智能应用探索[J].现代城市轨道交通,2023,(08):26-29.

Research on Reliability Evaluation Methods for Mechanical Design and Model Validation

Leying Jiang Tingting Guo

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

Abstract

Against the backdrop of increasingly complex mechanical equipment and high reliability requirements, reliability evaluation has become a critical component in ensuring safe and stable equipment operation. This paper systematically conducts the construction and validation of mechanical reliability evaluation models based on practical engineering needs. First, it elucidates the fundamental theories and methodological framework of reliability evaluation, proposing principles of accuracy, applicability, and operability in model construction. Building upon this foundation, the study integrates probabilistic statistical analysis, fault tree methodology, neural networks, and multi-method integration techniques to establish a mechanically versatile reliability evaluation framework. Through experimental comparisons, simulation analyses, and real-world case validations, the model's effectiveness, stability, and engineering applicability are comprehensively tested, resulting in a standardized evaluation index system. The research demonstrates that the established model accurately characterizes mechanical systems' reliability behavior under variable loads and environmental conditions, providing technical support for optimized design, fault prediction, and life estimation. This work contributes to advancing mechanical reliability evaluation toward standardization and intelligentization, offering valuable references for industry applications.

Keywords

mechanical design; reliability assessment; model establishment; validation methods; engineering practice; fault prediction

机械设计可靠性评估方法研究及模型验证

姜乐营 郭婷婷

山东路通重工机械有限公司, 中国·山东 济南 250000

摘要

在机械装备日益复杂化与高可靠要求的背景下, 可靠性评估成为保障设备安全稳定运行的关键环节。本文针对工程实际需求, 系统性地开展了机械可靠性评估模型的构建与验证工作。首先阐述了可靠性评估的基本理论与方法体系, 提出了模型构建中应注重的准确性、适用性和可操作性原则。在此基础上, 综合运用概率统计分析、故障树方法、神经网络以及多方法集成等技术, 构建了一套具有一定通用性的机械可靠性评估框架。通过试验对比、仿真分析与实际案例验证, 全面检验了模型的有效性、稳定性及工程实用性, 并形成了一套评价指标体系。研究显示, 所建立模型能够较准确地刻画机械系统在多变载荷与环境下的可靠性行为, 为优化设计、故障预警与寿命预估提供了技术支持。本工作有助于推动机械可靠性评估向规范化、智能化方向发展, 并为行业应用提供了参考。

关键词

机械设计; 可靠性评估; 模型建立; 验证方法; 工程实践; 故障预测

1 引言

随着“中国制造 2025”与智能制造理念的深入实施, 机械装备正朝着高可靠、高性能及智能化方向演进。可靠性作为产品质量的重要度量, 直接关系到设备的运行安全、维护成本和使用寿命。尤其在航空航天、能源动力、交通运输等高安全要求的行业中, 机械系统的失效可能引发重大事故与经济负担。因此, 实施科学、精确的可靠性评估, 已成为现代机械设计、制造和运维过程中不可忽视的一环。

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

当前, 可靠性工程在国内外已有较多研究成果, 形成了以概率统计、失效机理分析、系统工程等为基础的评估方法体系。然而, 面对现代机械系统多场耦合、载荷时变、故障模式多样等特点, 传统评估模型在适应性、预测精度与实时性方面仍面临诸多挑战, 主要表现在: 一, 多失效机制并时, 模型难以全面描述系统行为; 其二, 评估过程依赖大量历史数据, 在新产品、新材料应用中数据支持不足; 其三, 模型验证方式较为单一, 尚未形成公认的验证标准与评价体系。

为此, 本文以提高机械可靠性评估的实用性与准确性为目标, 开展面向工程实际的评估模型构建与系统验证研究。通过融合多种建模方法, 构建具备良好解释与预测能力的评估模型, 并结合实验与仿真手段实施多维度验证, 从而

形成一套适用于工程推广的可靠性评估方案,为我国机械装备的可靠性设计与运维管理提供方法支持。

2 机械可靠性评估的理论基础与发展现状

2.1 可靠性评估的基本概念与内涵

可靠性通常定义为“产品在规定的条件下和规定的时间内,完成规定功能的能力”。该定义包含三个基本要素:规定条件(环境、工况)、规定时间(任务时长、设计寿命)与规定功能(强度、精度等)。可靠性评估即围绕上述三个要素,通过建模、分析与试验等方式,对产品能否持续保持其功能进行定量化评价。其核心在于识别潜在故障模式、评估失效概率、预测剩余寿命,并为设计改进与维修决策提供支持。常用的可靠性指标包括可靠度 $R(t)$ 、失效率 $\lambda(t)$ 、平均无故障时间(MTTF)等,共同构成了可靠性评估的量化基础。

2.2 国内外研究现状与发展趋势

国外在可靠性工程领域起步较早,已形成以 MIL-HDBK-217F、FIDES 等为代表的规范体系,并在航空航天、汽车电子等领域建立了较为完善的设计、试验与评估流程。近年来,随着数字孪生、人工智能等技术的发展,可靠性研究正朝着模型驱动与数据融合、实时评估与健康管理一体化方向发展。

国内研究虽起步相对较晚,但发展迅速,已在重大装备、核电、高铁等领域开展了大量可靠性技术攻关工作。目前的研究焦点主要集中在复杂系统多状态可靠性建模、退化过程与剩余寿命预测、不确定性量化分析等方面。然而,在评估模型的工程适用性、验证规范性与数据共享机制等方面,仍有进一步提升空间。

3 面向工程应用的可靠性评估模型构建

3.1 模型构建原则

为确保评估模型既科学合理又便于工程应用,构建过程遵循以下原则:

准确性原则: 模型需基于真实的失效机理与工程数据,参数应通过试验或现场数据校准,避免脱离实际的理论假设。

适用性原则: 模型应具备一定通用性与可扩展性,能够适应不同类型、不同层级的机械产品,支持模块化组合与参数化调整。

可操作性原则: 模型结构清晰、计算高效,便于集成至 CAD 平台或企业信息系统,供设计人员直接使用。

经济性原则: 在满足评估精度要求的前提下,应尽可能降低数据获取与计算成本,提升模型在中小型企业中的适用性。

3.2 多方法融合的模型构建框架

针对机械系统可靠性评估的复杂性,本文提出一种融

合多方法的建模框架,以系统功能与结构分析为基础,形成分层、分阶段的评估流程:

系统层建模: 采用故障树分析(FTA),通过顶事件(如“传动系统失效”)向下分解至底事件(如“轴承疲劳”),构建系统故障逻辑结构,识别薄弱环节与共因失效。

部件层建模: 针对关键零件,依据失效模式选用相应概率模型,如威布尔分布描述疲劳、退化过程模型刻画磨损等。

数据驱动增强: 在数据允许的情况下,引入机器学习方法,如随机森林、LSTM 网络等,用于故障识别、寿命预测与多源数据融合。

动态与不确定性建模: 考虑时变载荷与环境因素,建立基于马尔可夫或随机过程的动态模型,并采用蒙特卡罗模拟、区间分析等方法处理参数与输入的不确定性。

3.3 模型参数确定与数据需求

模型的准确性在很大程度上取决于参数取值的合理性。关键参数包括:

失效分布参数: 通过加速寿命试验、现场统计或同类产品数据类比获取;

载荷谱与环境谱: 依托实测数据或标准谱编制;

维修与退化参数: 基于历史维护记录与状态监测数据标定。

为支持参数获取,建议建立企业级可靠性数据库,收录故障案例、试验数据、运维记录等信息,为模型持续优化提供数据支撑。

4 模型验证方法与工程应用案例

4.1 多层次验证体系

为确保模型可靠、可用,建立包含以下三个层次的验证体系:

试验验证层: 通过实物试验或加速试验获取失效数据,与模型预测结果进行对比。例如,在某型高速轴承可靠性评估中,开展恒定与变载荷下的耐久试验,并对振动、温升、磨损等关键参数进行系统记录与分析,可全面、客观评估其可靠性,为设计优化与工程应用提供数据支持。

仿真验证层: 借助多体动力学、有限元、流体仿真等工具,模拟机械系统在复杂工况下的力学行为与失效过程,将仿真输出作为“虚拟试验数据”用于模型校验。例如,对风力发电机齿轮箱进行多工况载荷仿真,验证其疲劳可靠性模型在不同风速段的表现。

现场验证层: 选取在用设备,收集其运行状态与故障记录,进行模型回溯性与前瞻性验证。该层次验证最能体现实际工程价值,但周期较长、数据获取具有一定挑战。

4.2 验证评价指标

为客观衡量模型性能,构建以下四类评价指标:

指标类别	具体指标	说明
精度指标	平均绝对误差 (MAE)	反映预测值与实际值的平均偏离程度
	均方根误差 (RMSE)	强调较大误差的影响
	决定系数 (R ²)	衡量模型解释变异的能力
稳健性指标	灵敏度系数	考察参数变动对输出的影响
	变异系数 (CV)	评估多次预测结果的离散程度
时效性指标	模型单次计算时间	关乎工程应用中的实时性
	数据预处理复杂度	影响模型部署效率
工程适用指标	所需最小样本量	决定模型在数据稀缺场景下的可用性
	与现有设计流程的兼容性	影响模型推广难度

4.3 工程应用案例分析

以数控机床主轴系统为对象，开展可靠性评估模型的应用示范：

系统分析：识别主轴系统主要故障模式为轴承疲劳、轴挠曲过大、热变形超差。

模型构建：采用 FTA 构建系统可靠性框图，结合威布尔分布建立轴承寿命模型，基于有限元仿真与热力学模型分析变形可靠性。

数据输入：输入实际工作载荷谱、装配精度数据、润滑条件及历史维修记录。

评估输出：模型输出主轴系统在五年工作周期内的可靠度曲线，并指出轴承为最薄弱环节，建议加强状态监测与定期更换。

效果验证：对比实际产线中主轴系统的故障记录，模型预测的失效时间区间与实际故障发生时间吻合度达 85% 以上，为企业制定预防性维修计划提供了有效依据。

5 结论与展望

5.1 研究结论

本研究围绕机械可靠性评估模型的工程应用需求，开展了从理论构建到实践验证的系统工作，主要结论如下：提出了多方法融合的可靠性评估建模框架，能够兼顾系统逻辑关系、部件失效机理与数据驱动信息，增强了模型在复杂场景下的表达能力。建立了包含试验、仿真与现场验证的多层次验证体系，并构建了精度、稳健性、时效性与工程适用性四维评价指标，提升了模型验证的系统性与客观性。通过数

控机床主轴系统等案例表明，所构建的模型能够较好支持可靠性预测与维修决策，具备一定的工程推广价值。

5.2 未来展望

尽管本研究取得一定进展，机械可靠性评估仍面临诸多挑战，未来可在以下方向深入探索：

智能可靠性评估技术：结合数字孪生、边缘计算与人工智能，发展实时、在线的可靠性评估与预测系统，实现从“定期评估”向“状态驱动评估”的转变。

多学科耦合可靠性建模：针对机电液控一体化装备，开展机械 - 电气 - 软件多域失效耦合机理研究，建立跨学科可靠性评估模型。

不确定性综合管理：从数据、模型与认知三个层面系统管理不确定性，发展基于概率盒、模糊逻辑与贝叶斯更新的可靠性评估方法。

标准化与平台建设：推动可靠性数据格式、模型接口与验证流程的标准化工作，支持行业级可靠性数据平台与模型库建设，促进资源共享与协作创新。

可靠性是贯穿产品全生命周期的系统性工程，提升过程需要设计、制造、运维各环节的共同推进。期待本研究能为我国机械可靠性技术的发展提供有利参考，助力中国制造向高可靠、高品质方向持续迈进。

参考文献

[1] 谢伟东, 李运强, 姜澎湃, 等. 机械设计制造中可靠性优化设计分析[J]. 现代制造技术与装备, 2025, 61(01): 216-218.

[2] 梁伟波. 机械设备结构的可靠性设计与寿命评估方法研究[J]. 中国设备工程, 2024, (22): 107-110.

[3] 刘子敬. 浅谈机械产品可靠性设计和评估方法研究及应用[J]. 铁道车辆, 2023, 61(02): 59-63.

[4] 张义民. 机械可靠性设计理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2022.

[5] 董林, 赵军. 基于故障树与贝叶斯网络的复杂机械系统可靠性分析[J]. 机械工程学报, 2021, 57(10): 217-225.

[6] 宋彬, 王建华. 基于退化数据的机械剩余寿命预测方法综述[J]. 机械科学与技术, 2020, 39(07): 1009-1016.

[7] 吕震雷, 李洪双. 结构可靠性分析与随机优化设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 2019.

[8] 郭磊, 陈建军. 不确定性结构可靠性分析的若干进展[J]. 力学进展, 2018, 48(1): 267-304.

A Review of Several Risks and Countermeasures for WS Ropeway Wire Ropes

Xinyao Li

Shandong Taishan Ropeway Industry Development Co., Ltd., Taian, Shandong, 271000, China

Abstract

Steel wire rope is one of the most important components of passenger ropeways and is the lifeline of the cableway. Once a failure occurs, the consequences are unimaginable. Its working condition directly affects the safety of the cableway. During use, it is often easy to overlook some abnormal risk phenomena, and allowing development to bring serious consequences. Therefore, it is necessary to strictly implement the safety policy of moving the checkpoint forward, strengthen refined management throughout the entire life cycle, attach importance to the analysis and judgment of various operational data, in order to ensure the essential safety of passenger cable rope. Based on the engineering and maintenance practice for many years, the author takes Mount Tai cableway as an example to illustrate the performance, stress characteristics, fatigue principle, coping strategies, dynamic comprehensive evaluation, management innovation and other aspects of cableway wire rope for reference.

Keywords

steel wire rope; elongation; joint; tired; risk; countermeasure

WS 型索道钢丝绳若干风险综述及其对策

李鑫尧

山东泰山索道产业发展有限公司，中国 · 山东 泰安 271000

摘 要

钢丝绳是客运索道最为重要的部件之一，是索道的生命线。一旦出现失效，后果不堪设想。其工作状态直接关乎索道的安全与否，在使用过程中，往往容易忽略一些异常风险现象，任由发展会带来比较严重的后果。因此有必要严格落实关口前移的安全方针，加强全生命周期精细化管理，重视各类运行数据的分析研判，以确保客运索道钢丝绳的本质安全。作者结合多年来的工程与维护实践，以泰山索道为例，从索道钢丝绳的性能、受力特性、疲劳原理、应对策略、动态综合评价、管理创新等方面进行阐述，供业内同行参考。

关键词

钢丝绳；伸长量；接头；疲劳；风险；对策

1 引言

瓦林吞（Warrington）- 西鲁型（Seale）钢丝绳简称 WS，在客运索道广泛应用，总使用量超过 30% 且逐年增加。本文主要以单线循环索道 WS 钢丝绳为例进行论述。这种钢丝绳广泛用于钢丝绳和较大直径的牵引索中，其结构为外层是西鲁型较大直径的丝，内部所有各层丝则是完全的瓦林吞钢绳，瓦林吞——西鲁型钢绳因此而得名。它也是线接触钢绳。其优点为耐磨、柔软、易编接等。

近年来，伴随着国家产业政策的支持与引导，客运索道事业发展迅猛，根据文献 [1] 市场监管总局关于 2021 年全国特种设备安全状况的通告公布，截至 2023 年底，全国共有客运索道 1135 条。作为连续运行设备，公众对索道的

安全性、舒适性期望值也越来越高。文献 [2] 《GB/T9075-2008 索道用钢丝绳检验和报废规范》详细规范了系列予以报废的情形。损坏形式主要体现在磨损、疲劳和腐蚀。但在实际的动态运行中，容易忽视一些异常现象，往往引发比较严重的后果。加之一些专业的检查检测周期比较长。从而很难精准把握报废的时间节点。过早报废会造成不必要的经济损失，过晚报废往往造成风险骤增。

2 WS 索道钢丝绳的受力特性及疲劳原理

文献 [3] 对该类型的钢丝绳结构、受力特点、设计、安装、维护中容易引起异常磨损疲劳的几种情形进行了阐述。横向载荷是索道钢丝绳的重要受力特征，表现在以下方面。

- 钢丝绳受力复杂，承载众多车厢，承受拉应力、弯曲应力。
- 承受挤压力（如抱索器的夹力）
- 剪力

【作者简介】李鑫尧（1990-），男，中国山东泰安人，本科，工程师，从事客运索道维护维修研究。

克服或减轻众多的复杂受力影响，只有一个办法：加大初拉力。现代索道钢丝绳选用的安全系数越来越低，寿命越长。磨损、疲劳和横向载荷有很大关系。有人研究，密封钢丝绳安全系数在 2.1 时，寿命最长，系数在 4 时，寿命迅速下降。循环式索道初拉力要求大于 15 倍车厢总重量。国内最大的达到 23 倍。

文献 [4] 论述了抱索器在钢丝绳上的弯折角一般在 $0^\circ \sim 5^\circ$ 之间（见图 1），弯折角越大，对抱索器的磨损就越明显（同时对钢丝绳的寿命有直接的影响）。运行中，钢丝绳的弯折角不断的在变化，钳口与钢丝绳产生摩擦，主要表现在活钳口与固定钳口的两端磨损较中间严重。中天门索道抱索器开合 20000 次的时候，实测固定钳口磨损痕迹角度约为 3° 左右。弯折角的计算公式：

$$\alpha = \frac{2\sin^{-1} G}{2F}$$

式中：

α —钢丝绳弯折角

G —抱索器钳口载荷

F —钢丝绳张力

由此计算出某索道的线路最大折角 $\alpha=3.4^\circ$ ，与实际的摩擦痕迹基本相符。因此在日常的运行中，保证钢丝绳的正常张紧力是非常重要的。某索道的张紧系统为双液压缸拉紧，工作时的系统压力为 136—150bar 之间。



图 1 钢丝绳弯折角示意图

文献 [5] 规定，张力的最小张力 T 与最大横向力 Q 之比应大于 15，即： $T_{\min}/Q_{\max} > 15$ ，如果不到 15 的话，说明设计不够规范，达不到规范要求。

文献 [6] 指出钢丝绳的磨损主要体现在外部和内部的磨损。外部磨损主要表现在钢丝绳在安装过程以及使用过程中与索轮、绞盘、滑轮、导向轮等以及抱索器、吊索加油润滑等。内部磨损主要体现在内外股接触的钢丝，交变载荷，内外及相邻股间相对运动产生的磨损。

钢丝绳绳股接触位置（比如接头插入点）的绳股外层丝相互挤压，会在丝表面挤压出凹坑，这些凹坑上自然形成许多微裂纹。经过反复弯曲后微裂纹加宽加深，最后钢丝断裂。就是说，先有塑性变形，后有破坏。

对于线接触钢丝绳，在钢丝绳正常段，股内的钢丝之间都是线接触。但对于接头的插入点位置，插入股与其相邻股之间在插入点，表层丝接触位置为点接触，所以接头部分

比正常段损坏快。当钢丝绳绳芯变细后，绳芯变细位置的绳股之间的表层丝之间也存在点接触。对某索道原钢丝绳接头拆检时，发现接头插入点的表层丝存在凹痕（见图 2）。



图 2 插入股间磨损痕迹

3 容易忽视的几种风险现象

除意外或环境因素（雷击，飞机或车船碰撞，倾倒的大树，滚落的巨石等）和人为破坏外，容易忽视的几种安全风险有以下几种。

3.1 钢丝绳旋转

鉴于钢丝绳的旋转特性，文献 [7] 提出国外一些钢丝绳实验室通过实验来确定钢丝绳的旋转系数。

$$\kappa = \frac{T_g}{Fd}$$

式中：

κ —钢丝绳旋转系数

T_g —钢丝绳扭矩.单位Nm

F —钢丝绳张力.单位KN

d —钢丝绳直径.单位mm

瑞典 kollros 实验室部分 κ 值数据：捻距为 t ，钢丝绳直径为 d 。当 t/d 为 7.1 时， κ 值为 0.1195；当 t/d 为 6.6 时， κ 值为 0.1516；当 t/d 为 6.2 时， κ 值为 0.18；当 t/d 为 6.8 时， κ 值为 0.8。文献 [8] 提出钢丝绳的旋转力随着捻距的缩短而加强，这种扭矩对轮衬的破坏力比较大，是造成过早磨损的主要原因。

某索道在全线路支架轮组更换衬套、轮衬后，重新安装轮组却发现站内钢丝绳旋转达到 270° ，抱索器进站打开时出现摩擦异响。一般站内钢丝绳的旋转量不超过 90° ，通过多年研究发现，空气湿度 90% 以上时，钢丝绳在站内支架跨间的旋转明显降低，在站内抱索器开合时的异常声响基本消失。后对支架轮组索距、轮组平行度、垂直度进行精细化调整后，旋转现象减轻，站内旋转度数 90° 以内。

在观察旋转的同时也走访了多家索道同行，大多南方的索道几乎没有发现旋转现象，地域特点明显。

3.2 接头区域插入股间间隙

钢丝绳接头部位是整段钢丝绳最薄弱的部位，钢丝绳

的接头的运行情况决定了整条钢丝绳的寿命。最为明显的是两入股之间的间隙不断增大且伴随着相应的绳股出现松股隆起。另外有些插接点部位出现直径过细,由于插入股缠绕物不到位或位移导致。这些点位中由于没有了弹性物质的支撑,股与股直接接触,极易造成股间应力集中,导致钢丝提前疲劳。当前采用的措施就是经常性的对这些部位进行检查测量,润滑防锈。如变细部位长度超过 30mm 时,个别绳股会出现松股现象,随着插入股间的间隙越来越大,松股现象会更为明显。针对这种情况可考虑释放张力以后进行人工填充修复或者考虑进行重新编结。

钢丝绳的编接区段是整条钢丝绳的最薄弱环节,除了日常的低速目测检查,要经常性的对编接区段的中心点,插接点,两入股之间的间隙等进行测量检查。由于这些部位没有正常绳芯的充分支撑,极容易出现疲劳断丝。国内某索道在某次编接拆检中,插入股端之间的间隙高达 70mm,钢丝绳接头两端绳股外凸松股明显,单股集中断丝达 20 根,直径变细是造成断丝急剧增加的主要原因(见图 3)。

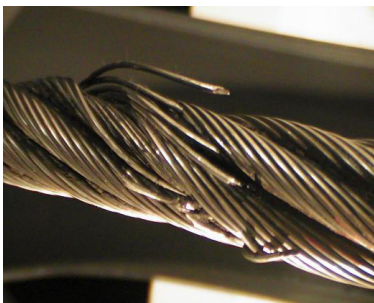


图 3 直径变细部位集中断丝

3.3 绳芯断裂挤出

绳芯的重要性已被索道行业越来越重视,绳芯对钢绳的寿命和伸长量起到非常重要的作用,某索道自 2000 年 10 月通车至今,共使用 3 根钢丝绳。第一根于 2006 年 11 月份换下,由奥地利奥钢联生产。期间 2004 年进行二次编接,编接前接头部位出现断丝 3-5 根,正常部位多处出现尼龙纤维绳芯断裂挤出现象(见图 4),直径变小、导致股间锈蚀等异常现象。二次编接后编接区段断丝集中出现,更换新绳前达到二十几根。



图 4 尼龙纤维绳芯断裂挤出

3.4 “缰绳”之后的突然伸长

受拉力后,最初几个小时至几天,钢绳持续以较快的速度伸长,这为第一阶段,称为初始残余伸长,以后速度变缓,在钢绳整个正常运行期间,以较慢的速度逐渐伸长,这为第二阶段,称为正常残余伸长,当钢绳走向破坏阶段,虽然拉力并未增加,但伸长却突然加快,并出现连续断丝,这为第三阶段,即不稳定伸长。此时应立即更换新绳。如前所述,残余伸长与钢绳结构有关,目前公认的数据为:麻芯股捻钢绳 2 ϵ 为 1% 左右,纤维尼龙芯为 0.3 — 0.5%,尼龙棒和复合绳芯为 0.15 — 0.18%,密封钢绳为 0.15% 左右。

观察张紧小车行程的数据,发现第二根钢丝绳伸长已经处于比较稳定的状态,已经没有明显的伸长,说明绳子已经进入相对僵硬时期,活性弹性降低(见表 1)。如果等到绳子突然伸长(进入危险突变状态)时,再采取措施的话,将非常的被动,加之钢丝绳的订货周期与运输比较长。因此综合以上几点因素,建议尽早更换了该钢丝绳。

表 1 张紧小车后移尺寸对比表

记录日期	2009.6.7	2010.6.7	2011.6.7	2012.6.7
行程数据(m)	1.94	1.70	1.51	1.50

3.5 关于温度对伸长量的影响

考虑到某索道处于海拔 800-1400m 之间,冬季低温达到 -22℃,夏季温度到 30℃,冬夏温差超过 50℃。在保持线路张力不变的情况下,通过观测发现冬夏极限温度下的钢丝绳伸长量相差在 0.2‰,如周长 4000m 的绳子伸缩量为 0.8m 左右。

重视钢丝绳的伸长、张紧行程、温差变化、运行里程等数据记录与分析极端重要,钢丝绳使用多年以后会变得僵硬,弹性下降,几乎没有残余伸长。当编接部位松股、正常段股间集中断丝、疲劳至一定程度会出现突然伸长,如不能及时捕捉这一现象,任由发展会引发重大事故。

3.6 维修及安装过程中的损坏

但使用不当时仍会发生小丝被挤出且被压断的严重情况,诸如制造时外层丝未捻紧压不住小丝,钢丝绳张紧力小,安全系数过大。安装和检修时使用吊索工具不当致使内部过大的挤压力造成断丝集中,因此必须吸取这些经验教训,避免类似事件的发生。

4 WS 索道钢丝绳的风险应对策略

4.1 关于接头二次编结

在以往的实践中,大都认为在截绳时多截取一部分来延长截绳周期,以求减少维护量和对运营效益的影响。通过多年来钢丝绳运行规律和经验,如果一次性截取太多,在之后的运行中,一旦发现绳头出现问题,要想采取截绳方式来弥补就比较困难了。根据每条索道钢丝绳的伸长规律,结合本索道的运行速度、强度、张紧范围等因素,提前计划,科学制定二次编结计划,充分发挥钢丝绳的安全、经济效益。

文献[9]建议钢丝绳在整体通过迂回轮40000~50000次要进行重新编结。

4.2 编结质量控制

钢丝绳作为索道重要的部件之一,接头编结质量的优劣程度直接影响着索道的运行安全。尤其是在单线循环脱挂式索道的运行中,一旦接头部位直径超过10%,会经常触动检测开关或造成支架脱索。更为严重的是结头部位一旦处理不当容易出现松股、断丝、扭转、变形。如不及时停运处理,极易出现钢丝绳断裂的危险,后果不堪设想。

钢丝绳的编结原理并不复杂,但是一项要求配合性比较强的工作,由于受编结技术水平、编结工艺、场地限制等因素的制约,编结出质量上乘的结头还是有一定的难度,因为理想的结头不仅是在编结后尺寸及外观达标,还要经得起长时间的运转检验!

主编人员的水平固然重要,但是整个编接过程不是主编一人全部完成的,绝大部分工作还是由索道机电员工、施工队辅助完成的,在操作工程中难免出现不能完全和正确领会主编人意图的现象,这样就很容易出现一些偏差,从而影响整个接头的编接质量。

4.3 增强选型设计的科学性

文献[3]对客运索道WS型钢丝绳选型进行了说明。瓦林吞--西鲁型钢丝绳共有六种,其结构为6x26WS+FC、6x31WS+FC、6x36WS+FC、6x41WS+FC、6x49WS+FC、6x55SWS+F。客运索道一般选用:6x26WS,6x31WS,6x36WS,6x41WS等4种。 $\phi 35\text{mm}$ 以下选6x26WS; $\phi 35\text{mm}-40\text{mm}$ 选6x31WS; $\phi 38\text{mm}-\phi 52\text{mm}$ 选6x36WS; $\phi 50\text{mm}$ 以上选6x41WS。

4.4 状态监测技术的应用

可适当收集钢丝绳运行过程中磨损颗粒进行分析研究钢丝绳疲劳破坏的类型。文献[10]提出通过铁谱磨粒实验分析了钢丝绳的损坏状况以预测潜在的风险。另外由于钢丝绳的构造比较复杂,刚度及阻尼系数等参数计算繁杂,使用建模工具进行仿真计算还不够精确。需要结合一定的试验数据进行综合评估,相互验证。

4.5 润滑工作

关于钢丝绳的润滑,存在较大分歧。根据作者多年来的维护经验,单线循环式索道大都选用镀锌钢丝绳,正常区段如果没有损伤刮蹭,可以不进行润滑,非镀锌钢丝绳要根据实际情况适当润滑。而现在普遍使用的股间带隔离功能的WS型钢丝绳维护更为方便。但是对于编结部位的薄弱环节,如插接点,中心点,插入段之间的间隙,绳直径有明显变化的部位要经常性的润滑,值得注意的是润滑油必须对橡胶轮衬无腐蚀性。

4.6 不断完善相关标准规范

基于以上认识,建议有关部门对于客运索道相关的标准规范修订也不断吸收最新研究成果,较好地体现综合动态

评价。作为运营单位也应该不断完善风险管控与隐患排查清单,完善维护项目,及时汇总分析判断相关数据,跟踪钢丝绳运行变化状态。

5 泰山索道在钢丝绳管理维护方面的创新

5.1 进行技术培训,提高人员素质

自上世纪九十年代起,派工程技术人员到抚顺煤矿设计院进行钢丝绳探伤技术培训,先后购进了抚顺煤矿设计院自行设计的GST-II型钢丝绳探伤仪、俄罗斯INTRON公司生产的MH24-64钢丝绳探伤仪,不定期对钢丝绳进行探伤。利用旅游淡季多次请长沙有色院教授级高工石奉强等知名专家对机电人员进行钢丝绳技术理论授课,提高广大工程技术人员的技术水平。

5.2 强化实践,加强技术交流

当前全中心有六十余名机电员工,每逢各索道进行钢丝绳编结时,要求机电员工都要参与编结配合工作。多年来,中心多次派人外出学习交流,先后参加了国内多条索道的钢丝绳编结工作。学习归来,要写出深刻详细的学习体会供大家交流切磋。

5.3 对于钢丝绳日常维护及探伤检查

泰山索道作为《GB/T9075-2008 索道用钢丝绳检验和报废规范》参编单位,严格落实钢丝绳全生命周期精细化管理方针,指定有丰富经验的工程技术人员跟踪管理,对编结区域的薄弱环节进行重点关注,将每次测定的技术数据进行分析比对,时刻掌握钢丝绳的运行状态。并且经常性对钢丝绳编结部位的各薄弱点进行润滑,防止各薄弱点生锈。

5.4 为掌握绳头使用状况,对钢丝绳接头的拆检

泰山索道多次对更换下来的钢丝绳接头进行全面拆检研究。石奉强教授(国家索检中心高级技术顾问)在泰山索道进行钢丝绳技术授课时,全体机电人员与石老一起,将每个接头的股、每股的内外层钢丝的状态进行了详细拆解,对填充物、插入股之间空隙、以及各薄弱点的锈蚀、磨损、断丝情况进行了详细记录。拆解完后,机电人员同石老进行了长时间的分析讨论。石老感慨的说,像这样对换下的旧钢绳接头进行全面的拆解研究,弄清报废后的钢丝绳接头的实际状况,在国内外这一领域实属罕见。他也因此建议,编结人员如有条件,多参加这样的活动,以便更好的积累经验,提高钢丝绳维护与编结技艺。

6 结语

综上所述,我们可以看出越是大运量、高负荷、运行环境恶劣、在线运行时间长的钢丝绳,其运行寿命也就越短。其次各条索道的运行工况不同,难以采用一个通用的标准和一次周期较长的检测来确定报废和更换,应加强自检与监测,该将各种风险迹象进行动态综合评价,适时进行报废更新,确保索道运行安全。鉴于多年来国内外客运索道因钢丝绳失效造成的事故也时有发生,加强钢丝绳各类风险的研究

及应对具有十分重要的意义。

参考文献

- [1] 国家市场监督管理总局.市场监管总局关于2023年全国特种设备安全状况的通告[R].北京:国家市场监督管理总局,2023.
- [2] GB/T 9075-2008.索道用钢丝绳检验和报废规范[S].
- [3] 石奉强.WS型钢丝绳在客运索道中的应用[J].金属制品,2002(06):1-3+6.
- [4] 艾宪忠.架空索道DT脱挂抱索器异常磨损分析与对策[J].起重运输机械,2008(04):90-92.
- [5] GB12352--2018.客运架空索道安全规范[S].
- [6] 客圣俊,王慧,宋宝,崔卫华,张建彪.钢丝绳失效机理研究综述[J].现代制造技术与装备,2018(01):1
- [7] 严芃芃. 大起升高度钢丝绳悬垂与扭转机理研究[D].武汉理工大学,2017.-4.DOI:10.16107/j.cnki.mmte.2018.0002.
- [8] 石奉强. 钢丝绳的捻距对客运索道的影响[C]//.全国线材深加工技术研讨会会议文集.[出版者不详],2005:108-113.
- [9] 艾宪忠.客运索道关键设备的重点维护与管理[J].起重运输机械,2022(05):64-66.
- [10] 贾尚雨. 不旋转钢丝绳的力学特性与失效研究[D].华南理工大学,2011.

Research on the Application of Pocket Park Model in the Development of Micro spaces in Municipal Gardens

Yongsen Liu

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

Abstract

Against the backdrop of stock renewal, urban construction is gradually shifting from incremental expansion to refined and connotative development. Municipal landscaping construction is facing dual pressures of tight constraints on land resources and the improvement of public space quality. Pocket parks, as a form of micro public green space formed by urban edges, fragmented areas, and inefficient spaces, have gradually become an important supplement to improving the urban green public space system due to their short construction period, low investment intensity, and strong spatial adaptability. This study suggests that the pocket park model effectively enhances the public service capacity and environmental quality of micro spaces through refined design and multifunctional integration, providing a sustainable implementation paradigm for municipal landscaping construction in the context of existing cities.

Keywords

pocket park; municipal landscaping; micro space development; urban renewal; public space

口袋公园模式在市政园林微空间开发中的应用研究

刘永森

威海鼎辰建设工程有限公司, 中国·山东 威海 264400

摘要

在存量更新背景下,城市建设由增量扩张逐步转向精细化、内涵式发展,市政园林建设面临用地资源约束与公共空间品质提升的双重压力。口袋公园作为一种依托城市边角地、零碎地与低效空间形成的微型公共绿地形态,因其建设周期短、投入强度低、空间适应性强等特征,逐渐成为完善城市绿色公共空间体系的重要补充。本文研究认为,口袋公园模式通过精细化设计与多元功能复合,有效提升了微空间的公共服务能力与环境品质,为存量城市背景下市政园林建设提供了可持续的实施范式。

关键词

口袋公园;市政园林;微空间开发;城市更新;公共空间

1 引言

随着城市化进程由高速增长阶段转向高质量发展阶段,传统以大规模集中绿地为主导的市政园林建设模式在土地供给、建设成本及服务半径等方面逐渐显现出适应性不足的问题。尤其在建成区内部,道路节点、老旧小区周边、边角空地及设施退让空间等大量微尺度空间长期处于功能缺失或利用低效状态,既影响城市环境整体形象,也制约了居民日常公共活动的开展。在此背景下,如何通过精细化手段激活城市微空间,成为市政园林建设亟需回应的重要课题。

2 市政园林微空间开发的现实需求与问题

2.1 存量更新背景下市政园林微空间开发的现实需求

在城市建设由外延扩张转向内涵提升的背景下,建成区内部可供集中开发的连续用地日益稀缺,市政园林建设逐步由新增绿地供给转向存量空间优化。在这一转型过程中,大量分布于城市道路节点、居住区边界、公共设施退让地及历史遗留空地的微空间逐渐成为市政园林体系中亟待激活的重要资源。这类空间虽单体规模有限,但数量庞大、分布广泛,若能加以系统整合与合理利用,可在整体层面显著提升城市公共绿地的服务水平与可达性。

从居民需求角度看,高密度建成区人群对公共空间的使用呈现出高频次、短停留和近距离的特征,传统以区域级或城市级公园为主体的绿地体系,在服务半径和日常可达性方面存在明显不足。尤其是在老旧社区及功能混合度较高的街区,居民更迫切需要嵌入日常生活场景的微型公共绿地,用以承载休憩交流、邻里交往及简单健身等基础活动^[1-2]。

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

这一需求结构的变化,客观上推动市政园林建设从“规模优先”向“空间精细化供给”转变,为微空间开发赋予了新的现实意义。在城市治理层面,微空间开发亦被视为提升城市品质与改善街区环境的重要抓手。通过对低效或闲置空间进行园林化改造,不仅有助于改善局部生态环境,还能够提升街道界面的整体形象,增强公共空间的连续性与识别度。因此,在多目标约束条件下,探索适应微空间特征的市政园林开发模式,已成为当前城市更新实践中的普遍诉求。

2.2 市政园林微空间开发中面临的主要问题

尽管微空间在市政园林建设中的价值日益凸显,但在实际推进过程中仍面临诸多现实制约^[9]。首先,微空间普遍存在形态不规则、面积零散及权属关系复杂等问题,增加了规划识别与实施协调的难度。部分空间涉及多部门管理或产权模糊,缺乏明确的建设主体,导致其长期处于“无人管理、无人投入”的状态,难以纳入常规园林建设体系。其次,传统市政园林规划在指标设定与空间组织上,更侧重于绿量规模与整体布局,对微空间的功能定位与使用特征关注不足。在实际操作中,部分微空间改造项目简单套用常规绿地设计模式,忽视场地尺度与使用人群特征,导致建成空间在功能适配性和使用效率方面表现不佳,甚至出现“建而不用”的现象。这种设计与需求之间的错位,削弱了微空间开发的实际效果。微空间开发在后期运行管理方面同样面临挑战。由于空间尺度较小、分布分散,若缺乏系统化管理机制,容易出现设施老化、环境维护不足等问题,影响公共空间品质的持续性。部分项目在建设阶段投入较为集中,但在运营阶段缺乏稳定的管理和维护支持,使微空间难以长期发挥应有的公共服务功能。

综上所述,市政园林微空间开发在现实需求持续增长的同时,也暴露出规划统筹不足、设计适配性不强及管理机制薄弱等结构性问题。如何引入更具弹性与针对性的建设模式,以回应微空间的客观特征与使用需求,成为破解上述问题的关键所在,这也为口袋公园模式的引入与应用奠定了现实基础[4-5]。

3 口袋公园模式在市政园林微空间开发中的应用机理

3.1 基于空间特征响应的口袋公园适配机理

口袋公园模式能够在市政园林微空间开发中得到广泛应用,其核心在于对城市微空间物理属性与环境条件的高度适配。相较于常规园林用地,微空间往往呈现出面积受限、边界复杂、周边功能高度混合等特征,这决定了其难以承载传统公园以景观完整性和游憩系统为核心的空间组织方式。口袋公园在设计理念上强调对场地既有条件的尊重与再利用,通过最小干预原则对空间进行重构,使有限尺度内的空间潜力得到最大释放。

在空间组织层面,口袋公园注重对微空间形态的顺应

式设计,通过灵活布置绿化、铺装与设施要素,将不规则场地转化为具有可识别性的公共空间节点。这种以场地特征为出发点的适配逻辑,有效避免了因强行套用标准化设计模式而导致的空间浪费或功能失衡问题。同时,口袋公园强调与周边城市肌理的连续性,通过景观界面与城市道路、建筑立面之间的有机衔接,使微空间不再作为孤立存在,而是融入整体市政园林与城市公共空间体系之中。在生态层面,口袋公园通过小尺度绿化配置与雨水调蓄、遮荫降温等功能性设计,实现对城市微气候的局部改善。虽然单体规模有限,但其分散布局的特点使其在整体层面形成“点状生态补偿网络”,在提升城市生态弹性的同时,也增强了市政园林系统的结构完整性。这种以微空间为单元、以系统效应为目标的适配机制,是口袋公园区别于传统园林建设模式的重要特征。

3.2 面向公共服务与运行管理的功能整合机理

除空间层面的高度适配外,口袋公园模式在市政园林微空间开发中的有效性,还体现在其对公共服务功能与运行管理需求的深度整合。微空间开发的核心目标并非单纯增加绿量,而在于提升公共空间的使用效率与服务质量。口袋公园通过引入与居民日常生活高度相关的功能配置,使微空间成为高频使用的公共活动载体,从而增强其社会价值与存在意义。

在功能整合方面,口袋公园强调以使用者需求为导向,根据周边人群结构与活动特征进行差异化设计。例如,在居住区周边的微空间中,更侧重休憩交流与邻里互动功能;在学校或社区公共设施附近,则可结合儿童活动或简单健身需求进行功能嵌入。这种功能配置的针对性,使口袋公园在有限空间内实现了较高的服务密度,避免了功能空置或使用效率低下的问题。在运行管理层面,口袋公园模式通过简约化设施配置与耐久性材料选择,有效降低了后期维护成本,增强了项目的可持续性。同时,其尺度亲民、使用频繁的特征,有利于引导社区参与空间维护与管理,形成以政府主导、多方协同的运行机制。通过增强使用者对空间的认同感与归属感,口袋公园在一定程度上缓解了市政园林微空间“重建设、轻管理”的长期困境。总体来看,口袋公园模式通过在空间适配、功能整合与运行管理等层面的协同作用,实现了市政园林微空间开发从“形式补绿”向“品质供给”的转变。这一应用机理不仅提升了微空间的现实使用价值,也为市政园林体系在存量更新背景下实现精细化发展提供了可操作的技术路径。

4 口袋公园模式参与市政园林微空间开发的实施路径

4.1 面向系统统筹的规划嵌入与空间识别路径

在市政园林微空间开发实践中,口袋公园模式的有效实施首先依赖于规划层面的系统统筹与前置识别。由于微空

间分布零散、类型多样,若缺乏整体视角与统一标准,容易导致建设碎片化与资源配置失衡。因此,有必要将口袋公园纳入城市绿地系统与市政园林专项规划框架之中,通过对建成区存量空间的系统梳理,明确其在整体绿地网络中的功能定位与层级属性。

在具体实施过程中,应以空间适宜性为核心,对城市微空间进行分类评估,从区位条件、周边人群结构、空间尺度及现状利用情况等维度,识别适合转化为口袋公园的潜在场地。相较于单纯以面积或用地属性为依据的筛选方式,这种多维度识别方法更有助于确保口袋公园建设与实际使用需求相匹配。同时,通过将口袋公园与道路绿化、社区公共空间及城市更新项目进行协同布局,可在有限建设条件下形成连续、可达的公共空间网络。在规划衔接层面,口袋公园的实施还需与城市更新、老旧小区改造及基础设施提升等行动统筹推进。通过将口袋公园建设嵌入既有市政工程与更新项目之中,不仅能够降低单独实施所带来的协调成本,也有助于提升微空间改造的整体效益。这种以规划引导为前提、以项目协同为手段的实施路径,是口袋公园模式在市政园林微空间开发中实现规模化应用的重要保障。

4.2 强调可持续性的设计实施与运行管理路径

在市政园林微空间开发实践中,口袋公园模式的实施涉及规划统筹、设计落地与运行管理等多个层级,其整体路径关系可概括为如图1所示的实施框架。

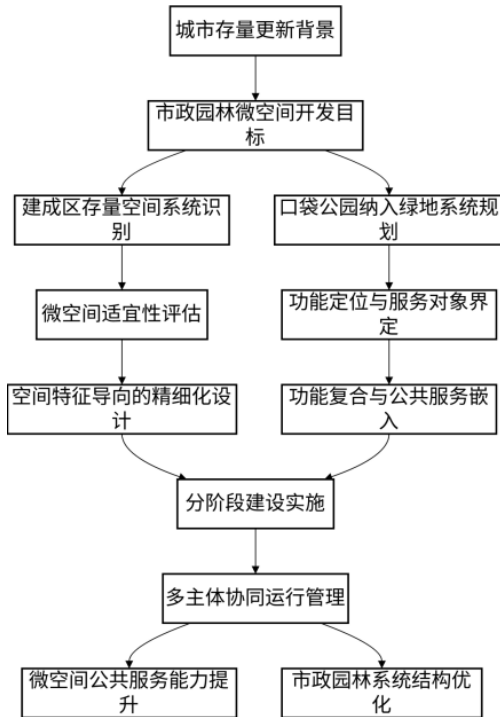


图1 口袋公园模式参与市政园林微空间开发的实施路径框架图

在设计与实施层面,口袋公园模式需要在有限空间与

多重约束条件下,实现公共功能、景观品质与运行效率之间的平衡。不同于传统市政园林项目,口袋公园更强调精细化设计与适度配置,其核心在于通过合理控制设计复杂度,确保空间的可使用性与长期维护的可行性。设计过程中应充分尊重原有场地条件,减少大规模拆改,通过对现状植被、地形及市政设施的整合利用,降低建设成本并缩短实施周期。在功能配置方面,口袋公园应以服务周边居民日常使用为导向,避免功能叠加过度或景观表达形式化。通过设置简洁明确的空间分区,引导不同使用行为有序发生,有助于提升微空间的使用效率与安全性。同时,在材料选择与设施布置上,应优先考虑耐久性与维护便利性,减少后期养护压力,为口袋公园的长期运行提供现实保障。在运行管理层面,口袋公园的可持续性不仅取决于建设质量,还与管理机制的完善程度密切相关。由于其分布广泛且规模较小,单纯依赖传统集中式园林管理模式难以实现精细化维护,有必要探索多主体参与的运行路径。在政府主导的基础上,通过引入社区参与和社会协同机制,可增强使用者对空间的认同感与责任意识,从而在一定程度上缓解管理资源不足的问题。

总体而言,口袋公园模式在市政园林微空间开发中的实施路径,应以规划统筹为前提,以精细设计为支撑,以可持续运行为目标。通过在规划、建设与管理各环节形成协同机制,口袋公园不仅能够实现微空间的有效激活,也为市政园林体系在存量更新背景下推进精细化发展提供了可复制、可推广的实践路径。

5 结语

在城市发展由增量建设向存量更新转型的背景下,市政园林微空间开发成为提升城市公共空间品质的重要抓手。口袋公园模式以其灵活、高效和贴近居民生活的特点,为微空间的再利用提供了切实可行的解决方案。通过系统规划、精细设计与协同管理,口袋公园不仅能够完善城市绿地体系,还能有效增强城市公共空间的社会价值与环境效益。未来,在市政园林建设实践中,应进一步深化口袋公园模式的制度化与体系化应用,以推动城市公共空间的高质量发展。

参考文献

- [1] 徐华. 城市绿化“近自然化”养护与设计的协同治理研究——以岳阳市口袋公园为例[J]. 鞋类工艺与设计, 2026, 6(02): 165-167.
- [2] 张国庆. 城市口袋公园园林工程的设计要点与施工优化[J]. 智慧中国, 2026, (01): 30-31.
- [3] 肖利霞. 城市口袋公园植物多样性提升路径[J]. 现代园艺, 2026, 49(02): 137-138+141+144. DOI: 10.14051/j.cnki.xddy.2026.02.033.
- [4] 赵斌斌. 微更新视角下的城市口袋公园设计策略[J]. 现代园艺, 2026, 49(02): 114-116. DOI: 10.14051/j.cnki.xddy.2026.02.054.
- [5] 李青璇. 代际融合导向的社区口袋公园行为响应型设计机制研究[J]. 鞋类工艺与设计, 2026, 6(01): 159-161.

Application of Standardized Operation in Railway Locomotive Maintenance Quality Improvement

Huan Zhao

Guoneng Railway Equipment Co., Ltd., Beijing, 100011, China

Abstract

With the rapid development of the railway transportation industry, the maintenance quality of railway locomotives directly impacts transportation safety and operational efficiency. To enhance maintenance quality and ensure railway safety and stability, standardized operations have been widely adopted in locomotive maintenance, becoming one of the primary methods. Standardized operations not only ensure smooth maintenance processes and effectively reduce human error risks, but also accelerate repair progress and cut maintenance costs. This article explores the critical role of standardized operations in railway locomotive repairs, elaborates on establishing a comprehensive standardized operation management system, and discusses their applications in routine maintenance, fault handling, and critical component repairs.

Keywords

standardized operation; railway locomotive maintenance; quality improvement; maintenance management; operational procedures

标准化作业在铁路机车维修质量提升中的应用

赵欢

国能铁路装备有限责任公司，中国·北京 100011

摘要

随着铁路运输行业的飞速发展，铁路机车的维修质量对运输安全及运营效率有着直接的影响作用。为了提高机车的维修质量，确保铁路运行的安全性以及稳定性，标准化作业在机车维修工作中开始得到应用，并成为机车维修的主要方式之一。标准化作业不仅能够保证维修工作的顺利进行并有效规避人为失误风险，同时可以加快检修进度并节约维修成本支出。文章从标准化作业在铁路机车修理工作中的重要作用入手，对如何建设完善标准化作业管理体系进行了阐述，同时对标准化作业在日常检修、故障处理以及关键部位检修中所发挥的作用进行了一定的论述。

关键词

标准化作业；铁路机车维修；质量提升；维修管理；作业流程

1 引言

机车作为铁路运输中的重要载体，其运用状况直接影响着铁路运行的安全性及稳定性。而如今随着铁路运输任务的逐渐增加，机车检修也日益繁忙起来，如何提升机车检修的质量也就成为摆在铁路单位面前的一个重大课题。传统的机车检修存在着检修人员素质参差不齐、检修流程不够规范等问题，造成维修质量参差不齐，影响铁路安全高效运行。而标准化作业作为有效的管理模式，则能通过对标准化规范的执行以及对统一的标准进行贯彻实施来实现提升机车检修质量和效率的目的。

【作者简介】赵欢（1983-），男，中国黑龙江哈尔滨人，硕士，工程师，从事铁路机车车辆研究。

2 标准化作业对提升铁路机车维修质量的核心价值

2.1 规范维修行为，降低人为失误

标准化作业以明确而详尽的维修作业程序及规定，能够最大限度地减少由于维修人员自身经验不足以及技术能力参差不齐等因素带来的影响，所有维修人员均按同一标准流程实施操作，在复杂的维修工序或是危险性较大的维修过程中不会存在不规范的动作或者误判行为，特别是在机车关键维修点上，例如发动机、刹车装置等，标准化作业可以使每一个工作步骤都能准确地完成，有效防止因人为原因造成的事故及故障的发生，并加强维修人员的执行力和安全性意识，让维修工作变得更为标准，从源头上提升机车维修工作的质量和安全性保障。

2.2 统一维修标准，提升检修一致性

铁路机车修理涉及诸多设备及系统，并且许多维修工作是由不同维修人员进行的，在缺乏统一标准的前提下，不

同的人对于同样的问题可能采取不同的解决方法,造成维修水平参差不齐。标准化作业就可以确保所有的维修工作按照同一标准、同一规程执行。不管维修人员的经验水平高低,都可按相同的作业规范进行修理,并达到同样的质量水平,消除了因人而异的质量差异^[1]。

2.3 优化维修效能,降低维修成本

规范化操作不仅可以确保工作顺利开展,还可以提升工作效率,避免出现不必要的浪费情况。运用合理的工作流程对工作时间及物料消耗进行控制,可以提升工作效率,在传统的维修模式中,由于操作不当以及流程不够明确等原因,容易造成返工现象、重复性工作以及资源浪费等情况的发生。而标准化作业是每一个维修点按照统一的标准完成,避免因操作失误造成的不必要时间成本损耗。同时标准化作业易于管控及调配资源,保证物料器具的有效利用,使维修工作省时省力。

3 铁路机车维修标准化作业体系的构建与完善

3.1 机车维修基础标准的制定与细化

在建立铁路机车维修标准化的过程中,首先应当构建起完善的、统一的基础性维修标准,其内容中应当涉及对多种类型的铁路机车各个系统的维修规定、注意事项以及修程、质量等内容,并根据不同种类铁路机车的运行特点以及应用条件,在此基础上作出相应的调整与补充。比如一些机车的发动机或者传动部分因为工作量大容易出故障,则应对这部分的关键部件制定更为严格的要求。要求应从具体工作着手,说明哪些部件是需要定期检修的,在进行检修的时候操作有什么要求和需要注意的地方,当出现问题时应该如何排查。同时,考虑到不同机车运用频次、故障规律及所处牵引区段差异,标准中还应针对具体维修作业提出可变性调整办法,从而保障每个维修项目开展均能达到安全质量和效果目标。精确定位标准可以有效控制维修一致性并提高准确性,防止不规范维修造成的故障发生,提高机车检修综合质量水平。

3.2 机车维修作业流程标准化设计

作业过程标准化是指在进行机车检修标准化工作过程中,对具体的操作过程有明确的规定,在规定的程序下开展机车检修工作,并在规定的时间内完成工作任务,保证检修工作的顺利实施。因此,在铁路机车检修工作中,要对每个环节以及工序作出明确的要求,并对各个工序中的具体内容、时间、人员安排以及质量等方面做出具体的规定。根据机车的实际状况来制定作业程序,如不同类型机车由于自身的设计及使用需求存在差异性,所以对于机车的修理次数、修理项目以及修理的时间间隔都可能存在差异。针对这种情况在制定作业程序的过程中应该考虑到这样的因素,以保证每一个方面都能够受到合理的关注,避免造成大量不必要的工作或者重复的工作量。具体来说,可以通过应用流程图、

作业手册等方式,将具体的维修过程以可视化的方式呈现出来,让维修人员可以一目了然地了解到具体工作的具体内容及标准,从而避免因流程混乱导致工作失误或者遗漏等情况的发生,并为后续进行工作考核提供依据。有利于不断健全完善维修管理制度体系。

3.3 机车维修人员操作标准化规范

保证铁路机车检修质量的重要方面就是强化检修工作人员作业标准化控制工作。因为检修工作人员属于检修工作的最前线工作人员,在进行检修的过程中,他们的工作能力决定了整个检修的质量好坏。所以,只有将具体的、详细的作业标准规定出来,并让所有的检修工作人员都能够按部就班地依据相关标准要求去进行检修作业,才能从源头上保障检修工作质量。首先,将每一个具体的维修项目所涉及的操作细节都规定在操作规范中,让每一位参与维修工作的工作人员都能够对整个维修工作过程有一个清晰的认识,并以此为依据开展具体的工作。比如,在对机车发动机进行检修的过程中,就需要在操作规范中体现出具体的检修项目、使用什么类型的工具及设备、每一项检修的标准是什么、如果遇到某种情况该如何处理等问题的内容^[2]。其次,操作细则还要针对不同的检修项目设置具体的操作要求及安全事项,避免出现由于操作失误导致的安全事故或者机具损坏。为保证操作细则的有效实施,必须做好对检修人员的培训和考评工作,经常开展标准化作业培训活动,提高检修人员的操作能力和质量观念,保证其知晓最新的工作流程及规范。同时,通过考核与检查等手段,监督人员在实际工作中严格遵守操作规范,以确保维修工作的高质量和高效率。

4 标准化作业在铁路机车维修质量提升中的实践路径

4.1 标准化作业在机车日常检修中的实践应用

日常检修中涉及对机车进行大量的检查、清扫、润滑等重复性的工作,虽然每一步都是简单的操作,但是如果 not 按照标准流程来执行很容易因粗心大意或者工作强度高导致漏检漏修或是误检误修等情况发生,从而降低机车的安全稳定系数。将标准化作业引入到日常检修工作中,可以有效控制上述情况的发生,确保每一次检修都能够按照规定的要求实施,杜绝因为人的主观原因造成的影响。比如在日常的巡检工作中,标准化作业就要求检修人员对于每一个检查部位都要做好详细而系统的记录,而且由于是标准化作业所以每个检查项目都会被严格执行,而不是单纯依靠检修人员的记忆。另外,在日常检修工作中的标准化作业还可以在系统内留下完整的维修记录,维修人员根据制定的标准填写相关数据,保证每一次的检修工作都是可以追溯到的,并且这样的记录对于后期对机车进行跟踪以及发生一些可能存在的故障进行分析都有一定的参考意义,以便于下次的检修工作人员可以发现机车在不同时期出现的一些问题。标准

化作业既提升了日常检修效率又保证了机车运用中的安全稳定^[3]。

4.2 标准化作业在机车故障排查与整改检修中的实践应用

故障排查工作作为机车修程中最为复杂的部分之一，由于其故障类型多样性和复杂性，常需借助不同排查手段及工具、技术经验和综合分析来完成。因此，在故障排查工作中开展标准化作业具有重要意义，可为故障排查提供简单明了的工作思路，并避免排查漏项的情况发生，以最短的时间完成诊断过程。标准化检修工作是针对故障排查工作的具体操作而言，在具体的故障检修过程中，需要维修人员严格按照规定的程序开展检修活动，无论是系统的简单检测还是故障的具体诊断都需要有明确的步骤和标准来执行，防止因为经验不足或者操作不当出现误诊的情况。通过标准化流程可以维修人员可以更快、更好地确定故障部位，对其进行有针对性的检修或更换，而不会在一个又一个可能的故障点上去盲查，浪费人力物力。比如，对于制动系统的故障查找，标准化的作业程序就会有相应的检查项目及步骤来查找故障，从而防止漏查或者错查。这不但提升了故障判断的精确度，并且缩减了检修周期，降低了机车停运给运输生产带来的影响。在开展规范化作业以后，铁路部门还能结合以往发生的故障信息对其展开大数据研究，从其中提炼出较为常见的故障现象以及发生规律，以此为基础来完善故障查找方案，提升全局路网维护运营水平。

4.3 标准化作业在机车关键部件检修中的实践应用

机车的重要部件，比如发动机、制动系统、传动系统等等，直接决定了机车整体的质量以及安全情况，所以对于这些部分的检修工作一定要严格遵循相关规范。标准化作业为机车重要部件的检修提供了具体而详细的作业流程，保证了每个步骤都有科学、合理的工作依据。比如说在检修机车的发动机的时候，标准化作业将对分解、检查、清洗、安装等每一个环节做出具体的规定，对分解过程中的使用工具、

检查过程中的检验标准及安装过程中的工作要求都做出具体的规定，在这个过程中能避免人为因素造成的疏忽大意，使得修完后的机车配件可以达到最好的状态，保证了机车的安全性^[4]。尤其是在一些关键部位比如刹车系统的维修中，稍有不慎就有可能造成重大的安全风险；而标准化作业则可以让工作人员按照标准流程去修理，保证了检修的质量，并且还能方便检修后的工作验收。保证每一个部件的检修都达到规定的要求，并没有出现漏检或者错检的现象；对于重要的部件来说，在检修的过程中进行标准化作业还能够利用具体的指标和技术要求给检修工作人员以明确的方向作为参考，防止因为技术水平不清晰或者是认识不到位而引发安全事故的发生。经过对机车关键部位检修过程中标准化作业的应用可以看出，规范化的检修工作有效提高了检修质量，保证了机车各项功能的稳定运用。

5 结语

标准化作业是提高铁路机车维修质量的重要手段之一，对规范维修行为、提高检修一致性、优化维修效能等方面有着重要的作用。通过对铁路企业机车维修标准化作业进行制订和完善，可以有效地提高机车维修的质量，降低机车故障的发生率，提升机车的运行效率及安全性。展望未来，随着铁路科技的发展和铁路运输市场需求量的增长，标准化作业将发挥越来越重要的作用，在今后铁路机车修程中起着至关重要的作用，是保证铁路行车安全、持续发展的关键所在。

参考文献

- [1] 欧发甫.作业标准化在装置检修中的实践应用[J].化工管理,2024(17):118-120.
- [2] 范瑾,任广慧.质量安全风险管理在机车车辆监造工作过程中的应用[J].设备监理,2018(2):54-57.
- [3] 郭童斌.数字化赋能重载铁路机车检修标准化与品牌建设——以朔黄铁路为例[J].中国品牌与防伪,2025(12):225-228.
- [4] 刘少君,白维纳,陈东.铁路货车制造企业非标装备本质安全管控[J].铁路节能环保与安全卫生,2024,14(6):56-60.

Practice and Effect Analysis of Intelligent Maintenance Technology in Municipal Landscape Management

Yan Liu¹ Yongchao Shi²

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

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

Abstract

As an important carrier of urban ecosystem and public space quality, municipal gardens have long faced contradictions in their maintenance and management, such as wide distribution of objects, multiple operational processes, strong seasonal fluctuations, and increased requirements for refinement. The traditional maintenance mode is mainly driven by experience and manual inspection, which is prone to problems such as information lag, extensive resource allocation, and untimely risk response. It is difficult to continuously meet the goals of urban renewal and fine governance in the governance context of “low-carbon constraints, quality improvement, and cost rigidity”. This study further discusses the issues of organizational collaboration, data standards, and operation and maintenance mechanisms in technology implementation, proposes a hierarchical promotion path and performance evaluation framework for municipal landscaping, and provides practical reference and methodological support for the fine governance of urban landscaping and the construction of smart cities.

Keywords

municipal landscaping; intelligent maintenance; Internet of Things; intelligent irrigation; pest and disease identification

智能化养护技术在市政园林管理中的实践与效果分析

刘岩¹ 时永超²

1. 威海市振泰市政工程有限公司, 中国·山东 威海 264400

2. 山东铸基市政工程有限公司, 中国·山东 威海 264400

摘要

市政园林作为城市生态系统与公共空间品质的重要载体,其养护管理长期面临对象分布广、作业环节多、季节波动强与精细化要求提升等矛盾。传统养护模式以经验驱动与人工巡查为主,易产生信息滞后、资源配置粗放与风险响应不及时等问题,难以在“低碳约束—品质提升—成本刚性”并存的治理语境下持续满足城市更新与精细治理的目标。本研究进一步讨论了技术落地中的组织协同、数据标准与运维机制问题,提出面向市政园林的分层推进路径与绩效考核框架,为城市园林精细化治理与智慧城市建设提供实践参考与方法支撑。

关键词

市政园林; 智能化养护; 物联网; 智能灌溉; 病虫害识别

1 引言

随着城市更新与高品质公共空间需求的持续增长,市政园林养护正从“保绿率导向”转向“生态—景观—安全—服务”多目标协同的新阶段。道路绿地、公园绿地与附属绿化的养护对象具有空间离散、类型多样与生长过程不确定等特征,使得以人工巡查、经验处置为核心的传统模式在高强度管理场景下暴露出边际效率递减。智能化养护技术以数据驱动与算法决策为核心,具备将园林对象“状态可感知、风险可预测、作业可优化、绩效可量化”的潜力,因此有必要

在市政治理框架下对其系统构成、落地路径与效果边界进行结构化研究。

2 实践方案与研究设计

2.1 场景选择与系统部署: 道路绿地—公园群的分层实施

为验证智能化养护的综合效果,本文选取某沿海城市主城区典型园林单元作为实践对象,覆盖约120公顷综合公园绿地与约85公里道路绿化带,包含乔木、灌木、地被与草坪等多类型植被,同时涉及喷灌滴灌系统、泵房与景观水体等设施。系统部署采取“分层分区”的工程化策略:在代表性地块布设土壤墒情与微气候传感器,形成校准样区;在全球引入无人机与车载巡检采集冠层影像与设施外观数据,

【作者简介】刘岩(1983—),女,中国黑龙江齐齐哈尔人,本科,工程师,从事市政或园林研究。

形成面域识别；在灌溉与泵房端部署智能阀控与能耗计量，实现可控可计；在平台侧建设园林资产编码与 GIS 一张图，打通工单、巡检、物资与验收模块，从而形成覆盖“感知—识别—决策—执行—复核”的闭环。

2.2 指标体系与评价方法：面向“资源—质量—风险—成本”的综合测度

考虑市政园林管理目标的多维性，本文从资源节约、质量提升、风险治理与经济性四个维度构建评价指标。资源维度以单位绿地面积灌溉用水量与养护能耗为核心；质量维度以苗木成活率、景观一致性评分与草坪退化斑块率为表征；风险维度以病虫害处置时滞、倒伏/断枝隐患闭环率与高温干旱应急响应时间衡量；经济维度采用年度全成本口径，综合计入人工、材料、水电、设备折旧与平台运维费用。方法上采用实施前后同季对比并引入相邻未部署片区作为参照，形成准实验对照思路以削弱季节与气候波动的干扰，同时对关键指标计算改善率，并以工单与计量数据作为主要证据来源，确保结论具有可检验性与可复用性。

2.3 关键算法与业务规则：可解释的模型嵌入与阈值治理

为避免“黑箱算法”在公共管理领域的可解释性风险，实践中采用规则与模型耦合的决策方式。以灌溉决策为例，系统以土壤含水率 θ 与作物需水（以景观植物等效 K_c 表征）为主导，以降雨预报与蒸散量修正作为外生约束，并设置分区阈值 $\theta_{\min}$ 、 θ_{target} 与最大灌溉时长 $T_{\max}$ 以防止过灌；病虫害识别采用“图像模型置信度+人工复核”双阈值机制，将高置信度事件直接触发小范围处置工单，将边界事件转入巡检复核；安全风险以倾斜角、风速阈值与树体缺陷识别为触发条件，形成“预警—封控—处置—复测”的刚性闭环。该机制的治理意义在于将技术能力转化为制度化流程，使智能化养护不依赖少数技术人员经验而具备可复制的组织执行力^[1-2]。

3 实施效果与结果分析

3.1 资源节约效果

实施年度的计量数据表明，智能灌溉与分区阀控显著降低了灌溉用水强度，尤其在夏季高温期与降雨间歇期，传统统一灌溉往往造成“雨后补灌”与“低需水地块过灌”，而按需灌溉通过引入降雨预报与土壤墒情阈值实现了有效纠偏^[3-4]。以道路绿地为例，单位面积月均灌溉水量由实施前的约 31.6 L/m² 下降至约 22.4 L/m²，降幅约 29%；公园草坪区因蒸散量更高但分区更精细，降幅约 24%。能耗方面，泵房智能启停与夜间低谷调度减少了无效运行，单位灌溉水量的电耗由 0.42 kWh/m³ 下降至 0.34 kWh/m³，体现出“节水与节能”同步收益。上述结果说明，在市政园林中资源节约并非单纯压缩投入，而是通过状态感知与决策优化提升投入效率，从而实现“少浇但浇对”的治理目标。

表 1 智能化养护实施前后资源指标对比（同季月均）

指标	实施前	实施后	改善幅度
道路绿地灌溉水量（L/m ² ）	31.6	22.4	↓ 29.1%
公园草坪灌溉水量（L/m ² ）	38.2	29	↓ 24.1%
单位水量电耗（kWh/m ³ ）	0.42	0.34	↓ 19.0%
“雨后补灌”工单占比	12.80%	3.10%	↓ 75.8%

3.2 质量提升效果：成活率、景观一致性与退化控制

在质量维度，智能化养护的优势主要体现在“差异化供给”与“早期干预”带来的生长稳定性提升。补植与养护结合的闭环机制使缺株识别与补植验收从以往的周期性抽查转为常态化巡检，实施后乔灌木补植的三个月成活率由约 92.3% 提升至约 96.8%，草坪退化斑块率（以可识别黄化/裸露斑块面积占比计）由 5.6% 下降至 3.2%，景观一致性评分（由第三方抽样评价，满分 100）由 84.5 提升至 90.1。更值得关注的是，质量改善并非依赖更高的材料投入，而是通过对水肥与修剪节律的优化降低了胁迫事件发生频次，使植被从“波动式恢复”转向“稳定式生长”，从而提升了公共空间的景观连续性与游憩体验^[5]。

3.3 风险治理效果：病虫害与安全隐患的响应时滞压缩

在风险维度，智能化养护的治理价值集中体现在缩短处置时滞与提升闭环率。实施前病虫害多依赖人工巡查发现，往往在扩散后才集中施治，导致防治成本上升与景观受损扩大；实施后通过虫情测报与图像识别触发工单，病虫害从发现到派单的平均时长由约 48 小时缩短至约 6 小时，从派单到处置完成的时长由约 72 小时缩短至约 24 小时，综合时滞下降约 70%。在台风季与强对流天气场景下，树木倾斜与断枝风险可由风速阈值与树体缺陷识别联动触发巡检，倒伏/断枝隐患工单的闭环率由 88% 提升至 97%，并显著降低了“事后清障”比例，体现出由被动处置向预防性维护的范式转变。该结果说明，智能化并非仅提升作业效率，更重要的是改变风险治理的时间结构，使市政园林具备更强的韧性管理能力。

表 2 实施前后质量与风险指标对比（年度/同季）

指标	实施前	实施后	改善幅度
补植三个月成活率	92.30%	96.80%	↑ 4.5pct
草坪退化斑块率	5.60%	3.20%	↓ 42.9%
景观一致性评分（/100）	84.5	90.1	↑ 5.6
病虫害综合处置时滞（小时）	120	30	↓ 75.0%
倒伏/断枝隐患闭环率	88%	97%	↑ 9pct

3.4 经济性分析：全成本口径下的投入产出关系

从经济性看，智能化养护的成本结构发生了“人工成本占比下降、设备与运维成本上升”的再平衡，但在全成本口径下仍呈现净收益。实践年度中，平台服务与传感设备折旧构成新增成本，约占传统年度养护支出的 6%—9%；与此同时，节水节能、精准施药与减少返工带来的可计量节约使

可变成成本下降,尤其在水费、电费与药剂费用上形成稳定减量。以综合测算为例,在不改变景观目标等级的前提下,单位绿地年度综合养护成本由约 26.4 元 /m² 下降至约 24.9 元 /m²,降幅约 5.7%,且质量与风险指标同时改善,表明智能化养护具有“降本不降质、提质不增耗”的可行性。需要强调的是,该收益依赖于“计量可得、流程闭环、阈值治理与运维到位”的组合条件,若仅停留在设备堆叠而缺乏业务重构,则可能出现成本上升而效果不显著的“伪智能化”风险。

4 落地瓶颈、治理机制与优化路径

4.1 数据标准与资产编码优化

市政园林智能化养护的首要瓶颈往往不是算法能力,而是数据标准与资产底座不统一导致的“数据不可用”。不同片区、不同承包单位对植物名录、规格口径、作业类型与验收标准的表达差异,会直接削弱模型训练、指标统计与绩效核算的可信度。实践表明,建立统一的园林资产编码体系、植物名录与作业工法库,并将其固化到工单字段与验收模板中,是实现跨区域复制与跨年度对比的关键。换言之,智能化养护必须被视为“技术—标准—制度”协同的治理工程,而非单纯的信息化采购项目。

4.2 组织协同与承包机制分析

在多数城市,园林养护采取分片外包与年度考核机制,若考核仍以“投诉量”“抽查合格率”等结果性指标为主,承包单位可能缺乏投入智能化的积极性,甚至出现数据上报与现场作业脱节的问题。智能化养护更适配“过程性绩效”与“数据证据链”导向的合同机制,即将响应时长、闭环率、按需灌溉执行率、节水节能目标与风险预警处置纳入考核,并通过平台自动留痕减少争议成本,从而把技术能力转化为可激励、可约束的治理工具。只有当市政管理部门、平台运维方与养护单位在目标函数上实现一致,智能化才能稳定地产生长期效益。

4.3 运维与安全周期管理

智能化系统的有效性高度依赖长期运维,包括传感器校准、通信稳定、阀控与泵房设备维护、模型迭代与权限安全等。若缺乏运维体系,传感数据漂移与设备离线将迅速侵

蚀决策可靠性,进而导致养护人员回归经验作业。与此同时,园林数据具有公共基础设施属性,涉及地理信息、设备控制与人员调度,必须建立分级授权、日志审计与应急降级机制,确保在网络异常或极端天气下可切换至安全模式,避免“系统故障引发管理失序”。因此,建议以全生命周期视角配置运维预算与岗位能力,并将系统可用率、数据完整率与工单闭环率作为运维绩效的核心指标,形成可持续运行的制度闭环。

5 结语

本文围绕市政园林管理的现实痛点,构建了智能化养护的技术—业务—治理一体化分析框架,并以城市道路绿地与公园群为实践案例,对资源、质量、风险与成本四类指标进行了实施前后对比评价。研究表明,智能化养护通过多源感知实现状态连续获取,通过智能决策实现按需供给与作业优化,通过数字孪生实现过程留痕与绩效可核验,最终在节水降耗、质量稳定与风险响应方面形成显著改善,并在全成本口径下呈现可验证的综合收益。面向推广应用,建议城市园林主管部门以资产编码与数据标准为先导,以智能灌溉与风险预警为优先落地场景,以工单闭环与过程绩效为制度抓手,分区分级推进智能化改造,同时建立覆盖设备、通信、模型与安全的运维体系,从而将技术能力固化为市政园林精细化治理的长期能力与韧性基础。

参考文献

- [1] 廖亚男. 智能化技术在园林植物养护管理中的应用[J].花木盆景,2025,(12):71-72.
- [2] 杜峰. 园林植物养护智能化统计管理系统探究[J].广东蚕业,2025,59(05):80-82.
- [3] 李颖. 智能化养护开启园林新赛道[N].中国花卉报,2025-04-17(004). DOI:10.38297/n.cnki.nzghh.2025.000093.
- [4] 谢孟奎. 深圳市园林生态环境建设中植物配置及养护措施探讨[J].南方农业,2024,18(18):160-162.DOI:10.19415/j.cnki.1673-890x.2024.18.053.
- [5] 黄小梅,司伟业. 智能科技在园林建筑管理中的应用[J].住宅产业,2024,(05):94-96.

Exploring the Application of Mechatronics Technology in Mechanical Engineering

Yiming Yu

Inner Mongolia Tiechen Intelligent Equipment Co., Ltd., Ordos, Inner Mongolia, 017000, China

Abstract

With the continuous advancement of technology, the application of mechatronics technology in mechanical engineering has become increasingly important. The core concept of this technology is the integration of mechanical engineering with electronic engineering and computer science, aiming to achieve more efficient production and more energy-saving operations. This article comprehensively elaborates on the significant role of mechatronics technology in enhancing efficiency, controlling costs, and promoting intelligent upgrading in the mechanical engineering industry. It explores the specific applications of mechatronics technology in mechanical engineering, providing references for relevant practitioners.

Keywords

mechanical engineering; mechatronics technology; application

探讨机械工程中机电一体化技术的应用

于一鸣

内蒙古铁辰智能装备有限公司，中国·内蒙古 鄂尔多斯 017000

摘要

随着科技的不断进步，机电一体化技术在机械工程中的应用变得愈加重要。这一技术的核心思想是将机械工程与电子工程、计算机科学相结合，以实现更高效的生产 and 更节能的操作。本文全面阐述机电一体化技术对机械工程行业效率提升、成本控制、智能化升级的重要意义，探究机械工程中机电一体化技术的具体应用，以供相关人员参考。

关键词

机械工程；机电一体化技术；应用

1 引言

机电一体化技术将机械结构、电子元件、控制系统、信息处理模块有机融合，实现了机械设备的自动化、智能化、精准化运行。机电一体化技术的应用提升了机械工程的生产效率，降低了能耗和人力成本，实现智能化水平的提升。在具体应用中，机电一体化技术在机械设计、机械制造加工、机械自动化生产环节发挥重要作用，推动机械工程的可持续发展。

2 机械工程中机电一体化技术的应用优势

2.1 全面提升机械生产效率

机电一体化技术在机械工程中深度融合机械、电子、计算机及自动化技术，可完成系统级优化，极大地提升生产

过程中的精确性与效率。机电一体化技术使多轴联动成为可能。五轴加工中心通过伺服电机与 CNC 控制系统的深度协同，可同时控制五个运动轴，实现复杂曲面的一次装夹加工^[1]。这不仅消除了多次装夹的定位误差，更将复杂零件加工时间从数小时缩短至数十分钟。

2.2 缩短生产周期，节约成本

在机械工程中应用机电一体化技术，可大幅缩短从设计到生产再到交付的生产周期。优化这一过程可减少人工干预环节，结合实时数据监控及反馈机制使得生产更加高效精准，从而迅速适应市场需求变化。此外，新型的高效控制器使得机械设备的动能损耗大幅降低，运行更为顺畅，在完成相同生产任务的同时所需的能源供给也明显减少^[2]。这不仅与绿色生产的理念高度契合，还帮助企业降低了能源成本，提高了经济效益。

2.3 提升智能化水平

传统机械系统的应用中，操作者只能通过最终结果判断系统状态，故障往往在发生后才能发现。机电一体化系统通过植入温度、振动、压力、电流等多元传感器，实现运行

【作者简介】于一鸣（1992-），男，中国内蒙古包头人，本科，工程师，从事车辆工程，智能制造、新能源车辆与动力系统、机器人技术研究。

状态的实时透明化。同时能够实现故障自诊断。传统故障诊断依赖维修人员的经验,排查过程耗时且高度依赖个体能力。机电一体化系统通过内置故障树模型与机器学习算法,可自动分析异常数据并定位故障源。

3 机械工程中机电一体化技术的具体应用

3.1 在机械设计环节的应用

机械设计是产品生命周期的起点,其设计质量决定了最终产品的性能和成本。随着机电一体化技术的引入,使得机械设计从传统的经验设计、类比设计走向了更加智能化、数字化和系统化的新阶段。

一,数字化设计技术的应用。借助 CAD、CAE 等软件实现机械结构的三维建模、仿真分析与优化设计,设计人员可以通过三维建模更加直观地展示机械结构的细节,通过仿真分析模拟机械设备的运行状态,预测设备在不同工况下的受力变形、振动等情况,可以及时发现其中存在的缺陷,并进一步优化,不仅可以保证设计的精度,也能有效提升该环节的效率^[3]。例如,在汽车变速箱设计中,工程师通过 CAD 软件建立齿轮、轴、壳体等零部件的精确模型,在虚拟环境中完成装配验证,可以提前发现干涉、间隙不足等问题,避免实物试制后的设计变更。

二,智能化设计理念的融入。智能化设计理念借助数字孪生与自适应算法正在推动机械设计从静态设计向动态优化不断发展。其中数字孪生技术的应用尤为突出。例如,在具体的生产环境中应用数字孪生模型,在虚拟环境中模拟设备运行的温度场、振动频率等参数,提前发现其中潜在的冲突,优化后续的现场调试工作。设计过程本身也开始融入机器学习技术,通过分析历史数据,设计系统可以自动优化电气元件布局和机械结构参数。

三,模块化设计。模块化设计通过标准化接口和功能单元的重组,实现系统的快速重构和兼容扩展,可以有效提升设计效率和生产的灵活性。在机电一体化系统设计中,模块化主要体现在机械结构和电气控制的同步模块化中。每个模块独立设计制造,通过标准化接口组装,实现机械设备的快速定制和升级。模块化的设计不仅提高了设计效率、降低成本,同时还便于后续设备的维护和升级。例如在工业机器人的设计中,将机械臂、控制系统、传感器等划分为不同的模块,根据不同的应用需求组合不同的模块,从而实现机器人的多功能化和个性化定制。

3.2 在机械制造加工环节的应用

机械制造加工环节是将设计图纸转化为实物产品的关键环节,机电一体化技术的应用,将实现该环节的自动化、精密化和智能化。精密加工是机械制造加工的重要方向,主要用于航空航天、高端装备、电子元件等领域,对加工精度的要求极高,机电一体化技术应用于该环节,主要通过传感器、控制器、执行机构的协同作用,实现精密加工的精准控

制,大幅度提升加工精度。例如,在半导体封装领域,多轴联动数控机床结合高分辨率光栅尺与闭环控制系统,实现纳米级定位精度,大幅度提升芯片封装良品率。精密加工的实现依赖于多项技术的协同,例如高分辨率位置传感器实时反馈实际位置,高性能伺服驱动器实现微米级运动控制。多项技术的应用,满足高端制造业的需求。

在自动化加工领域,机电一体化也发挥着重要作用。例如,在自动化生产线中,通过 PLC 控制器、机器人、传送带等设备的协同作用,实现从原材料输送、加工、检测到成品输出的全流程自动化^[5]。在汽车制造行业中策划生产线,通过工业机器人实现车身焊接、涂装、装配等工序。焊接机器人借助集成精密系统以及传感器,可精准控制及实时反馈焊接过程,精确调节焊接速度、电流及电压,适应不同材料的焊接,有效提升生产效率,保证焊接质量的一致性。柔性制造系统由数控机床机器人、自动化仓储、控制系统组成,能够根据生产需求自动调整加工流程与加工参数,可实现多品种小批量的柔性生产。柔性制造系统的应用打破了传统批量生产局限,能够快速适应市场需求的变化,提高市场竞争力。在计算机统一调度下,可自动完成不同零件的加工任务,当产品换型时,只需要更换控制程序和相应的工装夹具,即可快速切换生产对象。

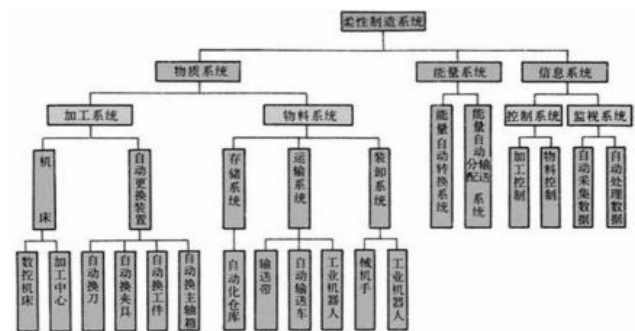


图 1 柔性制造系统

增材制造是新兴的制造技术,也是机电一体化技术的产物,它将三维数字模型分层离散,通过控制喷头或者激光束的运动,逐层堆积材料,形成实体零件。机电一体化技术主要体现在多个层面的精密机械系统,保证运动平台的定位精度,激光或者喷头系统实现材料的精准沉积。温度传感器实时监测成型区域的温度,而控制系统则根据模型数据动态调整扫描路径和工艺参数。在这些子系统的协同工作下,复杂内部结构的零件可以一次成型。

3.3 在机械自动化生产环节的应用

机电一体化技术在机械自动化生产环节得到了广泛应用。将各类自动化设备、控制系统、信息系统有机整合,能够构建起更加高效、协同智能的生产系统。

一,自动化生产线的应用。自动化生产线将多台加工设备、输送装置、检测设备按照工艺顺序有机组合,实现工件从上料、加工、检测到下料的全流程自动化。自动化生产

线的核心组成部分包括输送系统、加工系统、检测系统、控制系统等,输送系统主要通过传送带、机械手、AGV等设备实现原材料半成品的自动输送,减少人工搬运,提高输送效率。加工系统则主要借助数控机床、加工中心等自动化加工设备,实现零件的自动加工。检测系统则通过传感器、检测仪器等设备,实现对零件加工质量的自动检测,可及时发现其中的不合格产品。控制系统的智能化则是通过plc工业计算机等控制器实现对整条生产线的实时监控与调度,自动调整生产参数,优化生产流程。以汽车制造为例,焊接生产线搭载激光位移传感器与视觉识别系统,可实时检测不同车型的车身焊缝位置,并自动调整焊接参数,实现多车型共线生产。

二,工业机器人与协作机器人的应用。工业机器人是机电一体化技术的应用载体。传统机器人以刚性替代为核心使命,通过预设程序执行重复性任务,例如在电子装配等场景中进行标准化的操作。然而随着制造业向小批量多品种转型,传统机器人的一些局限也显现出来,例如柔性不足,编程复杂等。而机电一体化技术的突破,实现了传感器、AI算法与机械结构的深度融合,使机器人具备了环境感知、自主决策与实时交互能力^[6]。协作机器人的出现标志着这一转变的实质性进展。通过力控传感器与视觉系统,协作机器人能够感知人类工人的意图,并实时调整运动轨迹,在共享作业空间中安全完成精密装配或质量检测任务。例如,在电子制造行业,小型工业机器人能够完成电子元件的贴片、焊接、检测等精细作业,满足电子元件小型化、高精度的加工需求。智能生产线上的装配机械臂,指尖触觉传感器可分辨材质纹理,配合视觉系统,实现精密元件毫米级无损装配。

三,智能工程的应用。智能工厂是机械自动化生产的高级形态,以机电一体化技术为核心,融合物联网、大数据、人工智能等新兴技术,实现生产过程的智能化、协同化和绿

色化。智能工厂的核心特征是实现生产要素的全面互联,生产过程的实时监控以及生产决策的智能优化。在生产过程环节,通过智能传感器、智能控制器等各类设备,可加强对生产过程的自动感知、自动决策以及自动执行,有效提升生产效率,保障整体质量。生产管理实现智能化主要是通过互联网平台,实时采集生产数据,优化生产计划和调度,提高生产管理效率。而且传感器可以实时监控设备的运行状态,预测设备的运行情况,及时发现故障风险,做好运维管理。

4 结语

综上所述,机械工程是经济发展的核心动力,而机电一体化技术应用为机械工程注入了新的活力,不仅能够有效提升生产效率,控制成本,也能提升智能化水平。因此,可以将机电一体化应用于机械设计、制造加工和自动化生产等多个环节,发挥机电一体化技术的优势,实现各环节向数字化、智能化和系统化的方向发展,大幅度提升机械工程行业的生产效率,加工质量以及运维水平,推动机电工程行业的转型升级。

参考文献

- [1] 李伟志. 机械工程中机电一体化技术的应用[J]. 建筑工程技术与设计,2020(22):625.
- [2] 蒋亚. 机械工程中机电一体化技术的应用探析[J]. 建筑工程技术与设计,2020(25):83.
- [3] 吕二朋. 机械工程中机电一体化技术的应用探析[J]. 建筑工程技术与设计,2020(22):605.
- [4] 李婷. 机械工程中机电一体化技术的应用探析[J]. 建筑工程技术与设计,2020(31):3775.
- [5] 王义江. 机械工程中机电一体化技术的应用探析[J]. 建筑工程技术与设计,2020(20):676.
- [6] 孙磊凯. 机械工程中机电一体化技术的应用探析[J]. 建筑工程技术与设计,2020(16):875.

Research on Key Technologies and Quality Assurance for Construction under Complex Geological Conditions

Bo Wu

Yangquan City Future Construction Development Group Co., Ltd., Yangquan, Shanxi, 045000, China

Abstract

Complex geological conditions impose higher requirements on construction safety and engineering quality. The combined effects of varying stratigraphic structures, groundwater conditions, and geological formations expose construction processes to multi-source risks and significant uncertainty. Focusing on key construction technologies and quality assurance under complex geological environments, this study systematically reviews critical techniques such as foundation treatment, deep excavation support, and underground structure construction, based on common scenarios including soft soil layers, karst-developed regions, and high groundwater levels encountered in engineering practice. On this basis, key points of process control and technical implementation are analyzed, with emphasis on optimizing construction organization, enhancing dynamic monitoring, and improving the adaptability of construction techniques. Furthermore, a quality assurance system centered on standardized management is established, integrating critical process control and dynamic risk management to improve the stability of engineering quality and the level of construction safety. This provides technical support and a management framework for the high-quality implementation of construction projects under complex geological conditions.

Keywords

complex geological conditions; construction engineering; key technologies; quality control; risk management

复杂地质条件下建筑施工关键技术与质量保障研究

武波

阳泉市未来建筑发展集团有限公司, 中国·山西 阳泉 045000

摘要

复杂地质条件对建筑施工安全性与工程质量提出更高要求,不同地层结构、地下水条件及地质构造的叠加作用,使施工过程面临多源风险与不确定性。围绕复杂地质环境下建筑施工关键技术与质量保障问题,结合工程实践中常见的软弱土层、岩溶发育区及高地下水位等情形,对地基处理、基坑支护与地下结构施工等关键技术进行系统梳理。在此基础上,分析施工过程控制与技术实施要点,强化施工组织优化、动态监测与工艺适应性调整。进一步构建以标准化管理为核心的质量保障体系,通过关键工序控制与风险动态管控,提升工程质量稳定性与施工安全水平,为复杂地质条件下建筑工程高质量实施提供技术支撑与管理路径。

关键词

复杂地质条件; 建筑施工; 关键技术; 质量控制; 风险管理

1 引言

建筑工程向高层化与复杂化发展,施工环境逐渐由单一地质条件转向多类型叠加形态,工程实施难度明显提升。软弱土层压缩变形、岩溶空洞发育以及地下水动态变化等因素,使结构稳定性与施工安全面临更严峻挑战。施工过程中,地质信息的不完整性与变化性导致技术选择存在偏差风险,施工组织与资源配置需不断调整,增加工程管理复杂度。传统经验主导的施工方式难以适应复杂地质环境对精细化控制的要求,关键技术的适应性与协同应用成为影响工程质量

的重要因素。同时,施工过程中的质量控制与安全管理呈现高度耦合特征,质量问题往往与地质风险密切关联。围绕复杂地质条件下施工技术体系与质量保障机制的系统分析,对提升工程实施效率与质量水平具有现实意义。

2 复杂地质条件下建筑施工特征与工程约束分析

2.1 复杂地质环境类型划分与工程影响机理

复杂地质环境表现为多种地层条件叠加,包括软弱黏土、砂土夹层、岩溶发育区及断裂破碎带等形态,这些地质类型在空间分布上呈现出明显非均质性与不连续性。不同地层在承载力、压缩性及渗透性方面存在显著差异,直接影响建筑基础受力状态与变形特征。地下水位变化对土体强度

【作者简介】武波(1980-),男,本科,工程师,从事建筑施工研究。

产生削弱作用,易引发基坑失稳与地基沉降问题^[1]。岩溶空洞及裂隙结构使地基支撑条件复杂化,局部塌陷风险显著增加。

2.2 地质不确定性对施工组织与技术选择的制约

复杂地质条件下,地质勘察数据存在一定离散性与局部偏差,实际施工环境与前期勘察结果之间存在差异,导致施工方案需动态调整。地层分布的不均匀性使基础处理方式难以采用单一技术路径,施工过程中需根据现场揭露情况不断修正工艺参数。地下水动态变化增加施工组织难度,排水、降水措施需与施工进度紧密衔接。施工设备选型需兼顾地层适应性与施工效率,设备性能不足易导致施工质量波动。施工组织安排在工序衔接与资源配置方面面临更高复杂性,技术选择需兼顾安全性、经济性与可实施性,形成多因素约束下的综合决策体系。

2.3 复杂地质条件下工程风险演化特征

复杂地质环境中工程风险具有多源叠加与动态演化特征,风险类型涵盖地基沉降、基坑失稳、结构变形及地下水突涌等多种形式。风险在施工不同阶段呈现出差异化表现,开挖阶段以土体稳定性问题为主,结构施工阶段以变形控制与渗漏问题为核心。地质条件变化与施工扰动之间形成耦合作用,使风险呈现由局部向整体扩展的趋势。施工荷载与地层响应之间存在滞后效应,部分风险在短期内难以显现,易造成隐患累积。风险发展过程具有不确定性与突发性,需通过全过程监测与动态评估实现提前识别与及时控制,以降低工程安全与质量隐患。

3 复杂地质条件下建筑施工关键技术体系构建

3.1 地基处理与加固关键技术路径

复杂地质条件下地基处理需针对不同土层特性进行差异化设计,通过多种加固技术组合提升地基承载能力与整体稳定性。对于软弱土层,可采用换填、预压及深层搅拌等方式改善土体结构,降低压缩变形。高含水率土层通过排水固结技术实现强度提升与沉降控制。岩溶及空洞区域需结合注浆与填充技术形成稳定支撑体系,避免局部塌陷。复合地基技术通过桩土共同作用分担荷载,提高整体承载性能。施工过程中需结合现场监测结果调整加固参数,使处理效果与设计要求相匹配,从而保障上部结构的稳定性与耐久性^[2]。

3.2 深基坑支护与边坡稳定控制技术

深基坑施工在复杂地质环境中面临土体失稳与地下水扰动等多重挑战,支护结构设计需结合地层条件与开挖深度进行综合分析。常见支护形式包括排桩、地下连续墙及内支撑体系,通过结构刚度与稳定性控制基坑变形。边坡稳定控制依赖于合理放坡与加固措施的结合,必要时采用锚杆与喷射混凝土形成复合支护结构。地下水控制技术通过降水井及止水帷幕降低水压力影响,防止基坑底部隆起与渗流破坏。施工过程中需实时监测位移与应力变化,根据监测数据调整

支护参数,确保基坑结构安全与周边环境稳定。

3.3 地下结构施工与防水防渗关键技术

地下结构施工在复杂地质条件下易受到地下水渗流与土体变形影响,防水防渗技术成为保障结构耐久性的关键环节。结构施工需结合分段开挖与分层支护方式,控制施工扰动范围,减少对周边土体稳定性的影响。防水体系通常采用结构自防水与外防水相结合的方式,通过高性能混凝土与防水材料形成多重防护层。施工缝与变形缝部位需加强密封处理,防止渗水路径形成。地下水丰富区域需结合帷幕止水与排水系统,实现水压调控与渗流控制。全过程质量控制贯穿施工各阶段,通过材料检测与施工工艺优化,提升地下结构整体防水性能与使用安全性。

4 复杂地质条件下施工过程控制与技术实施要点

4.1 施工组织优化与工序协同控制机制

复杂地质环境中施工组织需围绕地层变化特征与工程节点进行动态优化,施工流程呈现出高度耦合与多环节交叉特征。各工序之间存在明显依赖关系,前序作业质量直接影响后续施工稳定性与效率,组织安排需强化时间与空间上的协调性。施工进度计划应结合地质条件变化进行分段细化,关键节点控制需与现场实际揭露情况保持一致,避免因计划刚性导致质量隐患。多工种交叉作业环境下,资源配置需保持弹性调节能力,使人力、设备与材料供应形成有序衔接。现场管理需强化信息传递效率,通过技术交底与过程沟通提升执行一致性。工序协同控制强调对关键施工阶段的连续性保障,减少中断与返工现象,从而在复杂地质条件下实现施工组织的稳定运行与质量可控。

4.2 施工监测与信息反馈调控技术

复杂地质条件下施工过程具有较强不确定性,监测体系成为保障工程安全与质量的重要支撑。监测内容涵盖地表沉降、基坑位移、支护结构应力及地下水变化等关键指标,通过多点布设实现对施工环境的连续跟踪。监测数据反映土体与结构响应状态,为施工调整提供依据。信息反馈机制依托数据分析实现快速传递,使现场管理人员能够及时掌握变化趋势并进行决策修正。监测结果与施工参数之间形成动态关联,技术措施需根据数据变化进行适度调整,确保施工过程处于可控范围。异常数据的识别与处理需建立预警机制,通过阈值控制实现风险提前干预。监测与反馈系统的协同运行强化了施工过程的实时性管理能力,使复杂地质环境下的施工活动具备更高的安全保障水平^[3]。

4.3 施工设备选型与适应性施工工艺优化

复杂地质条件对施工设备性能与工艺适应性提出更高要求,设备选型需结合地层特性、施工深度及作业空间进行综合评估。不同地质条件下设备工作效率与稳定性差异明显,软土环境对设备承载能力提出限制,硬岩环境则对破碎

能力与耐磨性能形成挑战。设备运行状态直接影响施工质量与进度,性能匹配程度决定施工工艺实施效果。施工工艺需在实际条件基础上进行优化,通过参数调整提升施工精度与效率。多种施工方法在不同阶段进行组合应用,使工艺体系具备灵活性与适应性。设备与工艺之间形成协同关系,通过合理配置实现施工过程的连续性与稳定性。针对复杂地质环境中的突发变化,设备与工艺需具备快速调整能力,从而保证施工质量与工程整体进度。

5 复杂地质条件下建筑工程质量保障体系构建

5.1 质量控制体系框架与标准化管理机制

复杂地质条件下工程质量控制需构建系统化管理框架,将设计、施工与检测环节纳入整体控制体系。质量管理以规范化流程为基础,通过制度约束与技术标准实现全过程管控。各环节之间形成闭环管理关系,使质量问题能够被及时发现与修正。标准化管理机制通过明确操作规范与质量指标,提升施工过程的一致性与可追溯性。现场管理强调责任分级与岗位明确,使质量控制职责落实到具体执行层面。技术文件与施工记录的规范化管理增强了工程信息的完整性,为质量评估提供依据。质量控制体系在复杂地质环境中体现出对多因素的协调能力,使施工活动在不确定条件下仍能保持稳定质量水平^[4]。

5.2 关键工序质量控制与过程验收技术

关键工序在复杂地质条件下对工程质量具有决定性影响,质量控制需贯穿施工全过程。地基处理、基坑支护与地下结构施工等环节对技术参数与施工精度要求较高,过程控制需结合实时监测数据进行调整。材料性能与施工工艺之间存在密切关联,质量检测需覆盖原材料、半成品及成品结构,确保各环节符合设计要求。过程验收技术通过阶段性检验实现质量分层控制,使问题能够在早期阶段得到处理。验收标准需结合地质条件变化进行适度调整,使评价结果更具针对性。施工记录与检测数据构成质量评估的重要依据,通过数据分析提升验收的科学性与准确性,确保工程质量在全过程中保持稳定。

5.3 质量风险识别与动态管控机制

复杂地质条件下质量风险呈现出隐蔽性与动态变化特征,风险识别需依托系统分析与现场数据综合判断。风险来源涵盖地质条件变化、施工工艺偏差及设备运行异常等多个方面,不同因素之间存在相互影响关系。动态管控机制通过持续监测与评估实现对风险状态的实时掌握,使管理措施能够随环境变化进行调整。风险分级管理有助于明确控制重点,通过差异化策略提升管理效率。预警机制依托监测数据

与经验模型,对潜在风险进行提前识别与干预。管控措施在实施过程中需保持灵活性,通过反馈修正实现持续优化。该机制强化了质量管理的前瞻性与响应能力,使复杂地质条件下工程质量风险得到有效控制。

5.4 质量信息管理与持续改进机制

复杂地质条件下工程质量控制依赖于全过程信息的有效整合与动态利用,质量信息管理成为保障体系运行的重要支撑。施工过程中形成的大量监测数据、检测记录与工序信息需通过规范化手段进行统一归集与分类管理,使各类数据具备可追溯性与可比性。质量信息在不同阶段之间实现连续传递,有助于识别潜在问题并进行针对性调整。信息分析过程强调对关键指标变化趋势的判断,通过对历史数据与实时数据的对比,发现质量波动规律并优化控制措施。持续改进机制依托信息反馈实现闭环管理,施工过程中暴露的问题能够在后续环节中得到修正与优化。管理体系在运行过程中不断进行自我完善,使质量控制从静态约束转向动态优化。该机制强化了质量管理的系统性与前瞻性,使复杂地质条件下工程质量控制更加精准与高效^[5]。

6 结语

复杂地质条件对建筑施工技术与质量管理提出更高要求,工程实施需在地质特征识别、施工技术应用与质量控制体系之间形成协同关系。通过关键技术路径优化与全过程控制机制构建,施工过程中的不确定性能够得到有效约束,工程风险得到合理分散与控制。质量保障体系在标准化与动态管控的支撑下,实现由事后修正向过程控制转变。围绕施工组织、技术实施与质量管理的系统协同,可显著提升复杂地质环境下工程建设的安全性及稳定性,推动建筑工程向更高质量水平发展。

参考文献

- [1] 庄柏灿.复杂地质条件下建筑基础施工中高性能混凝土特性优化探究[J].新城建科技,2025,34(11):160-162.
- [2] 康文安.复杂地质条件下超高层建筑旋挖钻孔灌注桩施工关键技术[J].四川水泥,2025,(08):130-132.
- [3] 姜冰.复杂地质条件下临近既有建筑的深基坑施工关键技术[J].建筑机械,2025,(08):67-70+76.
- [4] 校凯.复杂地质条件下高层建筑钻孔灌注桩施工关键技术[J].四川水泥,2025,(06):160-162.
- [5] 叶航.复杂地质条件下建筑基础施工技术研究[A].智慧建筑与智能经济建设学术研讨会论文集(一)[C].重庆市大数据和人工智能产业协会、重庆建筑编辑部、重庆市建筑协会:2025:1531-1534.