



科技创新与工程

Technological Innovation and Engineering

Volume 3 Issue 3 March 2026 ISSN 3060-8996(Print) 3060-8988(Online)

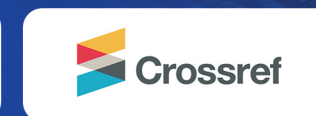


科技创新与工程

Technological Innovation and Engineering

Volume 3 · Issue 3 · March 2026 · ISSN 3060-8996(Print) 3060-8988(Online)

Nanyang Academy of Sciences Pte. Ltd.
Tel.:+65 62233839
E-mail:contact@nassg.org
Add.:12 Eu Tong Sen Street #07-169 Singapore 059819



中文刊名：科技创新与工程

ISSN: 3060-8996 (纸质) 3060-8988 (网络)

出版语言：华文

期刊网址：<http://journals.nassg.org/index.php/tie-cn>

出版社名称：新加坡南洋科学院

Serial Title: Technological Innovation and Engineering

ISSN: 3060-8996 (Print) 3060-8988 (Online)

Language: Chinese

URL: <http://journals.nassg.org/index.php/tie-cn>

Publisher: Nan Yang Academy of Sciences Pte. Ltd.

《科技创新与工程》征稿函

Database Inclusion



Google Scholar



Crossref



China National Knowledge Infrastructure

版权声明/Copyright

南洋科学院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南洋科学院所有。

All articles and any accompanying materials published by NASS 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). NASS Publishing reserves the final interpretation of the copyright of the article(s) in this journal.

Nanyang Academy of Sciences Pte. Ltd.
12 Eu Tong Sen Street #07-169 Singapore 059819

Email: info@nassg.org

Tel: +65-65881289

Website: <http://www.nassg.org>



期刊概况：

中文刊名：科技创新与工程

ISSN: 3060-8996 (Print) 3060-8988 (Online)

出版语言：华文刊

期刊网址：<http://journals.nassg.org/index.php/tie-cn>

出版社名称：新加坡南洋科学院

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
- 新加坡图书馆存档
- 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。

科技创新与工程

Technological Innovation and Engineering

Volume 3 Issue 3 March 2026
ISSN 3060-8996 (Print) 3060-8988 (Online)

主 编

康继军

Jijun Kang

编 委

刘 敏 Min Liu

龚勤林 Qinlin Gong

陈 升 Sheng Chen

包 艳 Yan Bao

夏旭东 Xudong Xia

1	融媒体视域下县级广播电视工程技术升级的路径与实践探索 / 韩雪莲	53	模块化给排水设备在轨道交通车站的安装实践研究 / 汪洋 曾国富
4	基于伯努利吸附的超薄硅片转运机械手结构研究 / 陈跃骅 方勇华 詹玉峰	56	绿色制造理念下机械加工工艺的节能降耗技术研究 / 卢树平
7	模块化室内智能空气净化器创新设计 / 曹婷婷 徐盈盈	59	智慧刑侦建设中大数据应用的现实困境与优化路径 / 张楠 康永强 郜涵博 张皓宇
10	利用业余天文观测验证与探究月球天平动现象 / 康洛嘉	62	BIM 驱动的装配式建筑全生命周期智能化建造体系构建 / 邵俊杰
13	国产 660MW 超超临界汽轮机插管密封性能提升的工艺优化 / 张国防 王国坤 程大央 刘林 李静伟	65	环保型汽车喷涂技术应用与工艺优化探讨 / 杨龙
16	信息技术系统集成的综合架构设计分析 / 杜欢 郑星伟 范洪浩	68	Ti-5523 紧固件精密成形与热处理工艺研究 / 李锡刚
19	飞机油门台操纵特性与飞行控制系统匹配分析 / 邹坤君	71	圆度误差测量的影响因素分析及精准补偿方案研究 / 董志忠
22	基于区块链的发电厂电气自动化监控技术 / 王健安 张百兆	74	基于大数据分析的消防监督执法规范化与效能提升路径研究 / 邱鹏
25	新电改下供电公司参与电力市场的交易机制与运营策略研究 / 李晓宇 张鑫 徐云芳 成丽红	77	基于无人机遥感与改进 VMamba-UNet 的作物病虫害检测方法 / 王喜军 许新华 李萍
28	新东方 1000FADR 不出射线故障维修一例 / 林炳炎	81	基于 XR 与实时渲染技术的总台演播室沉浸式舞美系统构建与实践 / 周通
31	基于创新驱动的航天企业技术研发管理模式研究 / 田恕 王馨梦 宋健	84	基于全生命周期的货运车辆检修周期优化与成本控制研究 / 左伟光
34	食品中塑化剂残留的气质联用检测方法建立与应用 / 洪琼雨 胡文彬 邵璐滢 朱锦雨	87	基于人工智能技术的物流设备管理探索与研究 / 荆辉 陆丹 叶竞秋
37	变频器在煤矿机电设备调速控制中的应用研究 / 李利娥 王世飞 杨松	90	基于记忆引导重启的蚁群算法求解 TSP 问题 / 高宏 李迎春
40	短波发射机节能改造技术优化与长期稳定运行管控方案 / 布哈力排·卓日	93	基于音速喷嘴装置的气体容积式流量计工况标况转换特性研究 / 叶舟
43	基于深度学习的火力发电炉膛监视自动化控制系统优化 / 王跃强	96	微波场强化冶金反应动力学及物料结构演变规律研究 / 魏光泽
46	整体装配式机电安装技术在地下轨道交通消防泵房中的应用 / 皇兴 谭幸芸	99	湘钢低磷钢种自动引流率提升实践 / 黄林华
49	工具理性与情感质疑：AI 伴侣（AIC）用户态度的二元分化分析 / 郭丽玲	102	由一个原理得出的理论 / 贺卫国

- | | | | |
|----|--|----|---|
| 1 | Path and Practice Exploration of County-level Radio and Television Engineering Technology Upgrade from the Perspective of Converged Media
/ Xuelian Han | 43 | Shortwave Transmitter
/ Buhalipai·Zhuori |
| 4 | Structure of a manipulator for ultra-thin silicon wafer transfer based on Bernoulli adsorption
/ Yuehua Chen Yonghua Fang Yufeng Zhan | 46 | Optimization of Automatic Control System for Furnace Monitoring in Thermal Power Plant Based on Deep Learning
/ Yueqiang Wang |
| 7 | Innovative Design of Modular Indoor Air Purifiers
/ Tingting Cao Yingying Xu | 49 | Application of Integrated Assembly Electromechanical Installation Technology in Underground Rail Transit Fire Pump Room
/ Xing Huang Xingyun Tan |
| 10 | Utilizing amateur astronomical observations to verify and investigate the phenomenon of lunar libration.
/ Luoja Kang | 53 | Instrumental Rationality and Emotional Skepticism: A Binary Analysis of User Attitudes Toward AI Partners (AIC)
/ Liling Guo |
| 13 | Process Optimization of Seal Performance Improvement for Domestic 660MW Ultra Supercritical Steam Turbine
/ Guofang Zhang Guokun Wang Dayang Cheng Lin Liu Jingwei Li | 56 | Research on Installation Practice of Modular Water Supply and Drainage Equipment in Rail Transit Station
/ Yang Wang Guofu Zeng |
| 16 | Analysis of the Integrated Architecture Design of Information System Integration
/ Huan Du Xingwei Zheng Honghao Fan | 59 | Research on Energy Saving and Consumption Reduction Technology of Mechanical Processing Process under the Concept of Green Manufacturing
/ Shuping Lu |
| 19 | Analysis of Match of Aircraft Throttle Control Characteristics and Flight Control System
/ Kunjun Zou | 62 | Realistic Challenges and Optimization Pathways of Big Data Application in Smart Criminal Investigation Construction
/ Nan Zhang Yongqiang Kang Hanbo Gao Haoyu Zhang |
| 22 | Electric Power Plant Electrical Automation Monitoring Technology Based on Blockchain
/ Jian'an Wang Baizhao Zhang | 65 | BIM-driven Intelligent Construction System for Prefabricated Buildings with Full Life Cycle Management
/ Junjie Shao |
| 25 | Research on Trading Mechanism and Operation Strategy of Power Supply Company in Electricity Market under New Power Reform
/ Xiaoyu Li Xin Zhang Yunfang Xu Lihong Cheng | 68 | Exploration into the Application and Process Optimization of Environmentally Friendly Automotive Spray Coating Technology
/ Long Yang |
| 28 | A Case of No-Ray Fault Repair for New Oriental 1000 FADR
/ Bingyan Lin | 71 | Research on Integrated Process of Precision Forming and Heat Treatment for Ti-5523
/ Xigang Li |
| 31 | Research on the Technology R&D Management Model of Aerospace Enterprises Based on Innovation-Driven Development
/ Shu Tian Xinmeng Wang Jian Song | 74 | Analysis of Influencing Factors of Roundness Error Measurement and Research on Precision Compensation Scheme
/ Zhizhong Dong |
| 34 | Establishment and Application of Gas Chromatography-Mass Spectrometry Detection Method for Residual Plasticizers in Food
/ Qiongyu Hong Wenbin Hu Luying Shao Jinyu Zhu | 77 | Research on Standardization and Efficiency Enhancement of Fire Supervision Enforcement Based on Big Data Analysis
/ Peng Qiu |
| 37 | Application Research of Frequency Converter in Speed Control of Coal Mine Electromechanical Equipment
/ Li'e Li Shifei Wang Song Yang | 81 | Crop Pests and Diseases Detection Based on UAV Remote Sensing and Improved VMamba-UNet
/ Xijun Wang Xinhua Xu Ping Li |
| 40 | Optimization of Energy-saving Retrofit Technology and Long-term Stable Operation Control Scheme for | | Construction and practice of immersive stage design system based on XR and real-time rendering technology |

	/ Tong Zhou		Nozzle Device
84	Research on Maintenance Cycle Optimization and Cost Control of Freight Vehicles Based on the Whole Life Cycle		/ Zhou Ye
	/ Weiguang Zuo	96	Study on Dynamics of Metallurgical Reaction and Material Structure Evolution under Microwave Field Enhancement
87	Research on Logistics Equipment Management Based on Artificial Intelligence		/ Guangze Wei
	/ Hui Jing Dan Lu Jingqiu Ye	99	Practice of Improving Automatic Flow Rate of Low-Phosphorus Steel at Xiang Steel Huang
90	A Memory-Guided Ant Colony Algorithm for TSP Problem		/ Linhua Huang
	/ Hong Gao Yingchun Li		
93	Study on the Standard Condition Conversion Characteristics of Gas Displacement Flowmeter Based on the Sound Velocity	102	A Theory Derived from a Principle
			/ Weiguo He

Path and Practice Exploration of County-level Radio and Television Engineering Technology Upgrade from the Perspective of Converged Media

Xuelian Han

Kashgar City Media Convergence Center (Kashgar City Radio and Television Station), Kashi, Xinjiang, 844599, China

Abstract

Against the backdrop of deepening media convergence, county-level radio and television engineering systems are transitioning from traditional single-channel broadcasting to multi-platform collaboration and networked operations. This study, grounded in media convergence requirements and county-level operational realities, systematically analyzes practical challenges in upgrading county-level broadcasting infrastructure. It explores feasible pathways and implementation strategies through technical system planning, production-broadcast integration, new technology adoption, and management/talent support. Research demonstrates that scientifically coordinated upgrades, integrated broadcasting-production transformation, enhanced intelligent technology applications, and synchronized management mechanism improvements can significantly enhance system efficiency and stability, thereby strengthening technical support capabilities for county-level media convergence. These practical insights provide valuable references for advancing engineering system upgrades and promoting high-quality development of county-level media convergence.

Keywords

converged media; county-level radio and television project; technological upgrading; path exploration

融媒体视域下县级广播电视工程技术升级的路径与实践探索

韩雪莲

喀什市融媒体中心（喀什市广播电视台），中国·新疆喀什 844599

摘要

面对融媒体深度融合持续推进的背景下，县级广播电视工程技术正由传统单一播出体系向多平台协同、网络化运行方向转型。本文立足融媒体发展要求，结合县级广播电视工程运行实际，系统分析县级广播电视工程技术升级的现实难点，从技术体系规划、制播系统融合、新技术应用及管理人才保障等方面，探讨工程技术升级的可行路径与实施策略。研究表明，通过科学统筹升级路径、推进播出与制作一体化改造、强化智能化技术应用并同步完善管理机制，能够显著提升工程系统运行效率与稳定性，增强县级融媒体技术支持能力。相关实践经验对推动县级广播电视工程技术升级、促进融媒体高质量发展具有一定参考价值。

关键词

融媒体；县级广播电视工程；技术升级；路径探索

1 引言

随着融媒体深度融合发展，在县级广电中扮演着重要角色的基层媒体舆论阵地面临着新的机遇和挑战，传统的广播电视工程技术和方法已无法适应当前多元化的传播形态和技术手段的要求，从多个方面都暴露出了不足之处，需要对相关技术进行更新和完善^[1]。分析融媒体背景下县级广播电视工程技术发展的必要性，对提高县级广播电视媒体的技术水平以促进县级融媒体建设及公共文化服务体系建设的发展有着积极的意义。

【作者简介】韩雪莲（1994-），女，中国陕西延安人，本科，从事广播电视工程技术研究。

2 融媒体视域下县级广播电视工程技术升级的重要意义

2.1 适应融媒体传播格局变化，提升广播电视工程技术支撑能力

融媒体时代的到来，使得媒体传播呈现多平台发展、多终端覆盖和多形态融合的特点，传统的以单一频道播出为主的广播电视工程技术体系已经无法满足现实的需求。县级广播电视工程技术升级，能够较好地适应传播渠道由“单向输出”向“立体传播”的转变趋势，将网络化、数字化、集约化的先进技术体系应用到内容多渠道发布中，为其发展保驾护航。从工程技术和系统上进行升级改造后，县级融媒体中心可以做到在电视端、网络端以及移动端同时播出节目，

并实时互动,提高广播电视台在媒体融合环境下的技术兼容性和市场占有率^[2]。

2.2 推动传统播出体系转型升级,增强内容融合与协同生产水平

广电工程技术升级是推动传统播出体系向融媒体生产体系转变的基础。一方面,对采集、制作、播控、传输等工程环节的技术整合有利于打破原有各业务系统的壁垒,形成节目生产流程的协同化与一体化;另一方面,工程技术升级为内容融合生产提供了技术前提,让广播电视节目从生产到播出能适应不同媒体终端的需求。县级融媒体中心建成后,在技术上将大大加快广电节目的生产流程,避免多次二次加工,提高新闻节目的生产和播出速度,更加符合融媒体时代的快节奏和多元化特征。

2.3 优化工程资源配置结构,提升技术系统运行效率与稳定性

以往传统的运行方式中,大多数县级广播电视工程系统的设备比较分散、利用效率不高,并且运营维护费用也比较高。如果开展工程技术优化工作,则可以将原来的技术资源进行全面整合并合理安排,在一定程度上实现从设备分散化到集中化的有效转化,以相同的技术基础和统一的标准作为支撑。可以对工程建设资源进行按需调用以及合理利用,在一定程度上能够避免重复建设以及资源的浪费,能够让更新的技术体系具备更好的稳定性、安全性及可操作性,从而有效减少故障问题的发生概率,保证广播电视工程系统的持续运转,进而为融媒体业务的顺利运行奠定坚实的基础^[3]。

2.4 夯实县级融媒体技术基础,服务公共文化传播体系建设

县级广播电视不仅是新闻宣传阵地,更是公共文化服务体系建设的重要载体之一。工程技术升级有利于为县级融媒体中心建设夯实技术基础,更好地实现其作为应急广播、政策宣传、文化传播及基层治理信息服务的稳定高效应用。以建设覆盖全面、运行稳定、可拓展的技术平台为基础,县级广电能更好地为基层百姓服务,增强公共信息传播的覆盖力与公信力。长线来看,工程升级是解决融媒体发展面临的现实需求,也是促进县融媒体中心承担起公共文化服务职能并获得可持续发展的基础保障。

3 融媒体视域下县级广播电视工程技术升级面临的难点

3.1 传统工程技术体系相对固化,难以满足融媒体业务需求

现有县级广电工程技术架构大多基于传统的单一线性播出方式构建,“采—编—播”的单向链式 workflow 贯穿整个系统设计,在技术层面缺乏足够的开放性和兼容性。面对融媒体业务中不同媒体形式如电视频道、互联网网站端、移动端 APP 及各类外部平台对节目的采集制作需求,现有工程

系统的开放共享程度不够,信息交互能力较弱,作业协同效率不高。例如,在喀什市融媒体中心,原有播控系统主要是为单频道播出服务,无法直接支持多端口同时分发,一些直播节目还要进行再次编码及人工操作,平均制作时间增加了20%—30%,影响了融媒体节目的有效播出。

3.2 技术设施更新投入不足,制约系统整体升级进程

硬件设施的建设成本相对较高,大部分县级融媒体中心在硬件设施更新上投入不足。事实上,摄像机、录像机、播出控制台、硬盘阵列等设备更换频率较低,甚至部分设备使用时间在8—10年以上,技术参数已严重滞后于国家标准。经分析发现,由于没有进行升级改造,原有系统在运行中故障频率是新型系统的2倍左右,维修费用约占全年机电运维费用的三分之一多。受制于经费分配压力,工程技术升级多采取分散实施方式,难以在短期内形成整体效能,客观上延缓了融媒体技术体系的系统重构^[4]。

3.3 多平台系统兼容性不足,影响工程技术协同运行

在融媒体传播格局下,广播电视工程应能与其他新媒体平台、网络平台以及数据库平台相互配合。但当前各系统之间的规范和技术要求不统一,在传输过程中会出现一定的矛盾冲突现象,在进行多平台直播的过程中,就遇到了个别制播系统无法适配新媒体推流平台的情况,如码率设置和延迟时间等问题。不同平台直播存在平均5—8秒钟的延迟差,在直播过程中容易造成内容的不同步;此外,这也给技术的运维工作带来更多的挑战,并增加系统的稳定性难度。

3.4 专业技术力量相对薄弱,制约工程升级持续推进

技术更新不仅是设备的投入,还需要有相关专业人员进行维护支持,而当前县级融媒体中心大多缺乏足够的技术人员,且技术人员来源较为单一,在技术方面也存在一定的局限性,很多技术人员都来自传统的广播电视台,对于网络化的制作播出、IP的传输以及系统融合等方面并不十分精通。比如从实际培训情况来看,有的技术岗位全年专业培训时间少于30学时,不能适应工程系统快速更新的要求,在进行工程升级的过程中过于依赖外部的技术支持,并不具备较强的内部消化能力以及再创新能力,这也是导致工程技术无法持续升级的关键性原因。

4 融媒体视域下县级广播电视工程技术升级的路径与实践探索策略

4.1 统筹规划工程技术升级路径,构建适应融媒体发展的技术体系

坚持顶层设计和逐步完善原则,在融媒体背景下的工程技术升级改造不能碎片化建设、重复建设。在技术升级过程中,先从当前的播出、制作、传输、运维系统入手,结合节目的产量、平台传播量以及今后的增长趋势,对现有情况进行测算分析,制定三年滚动升级计划表。确定以“网状化、高清化、集约化”为指导思想,对制播系统各环节做整体

规划设计。

具体做法是坚持“内部先动、外部后动”，即优先进行主干业务系统如主控播出系统、新闻制作系统的高清化、网络化进程；其次是演播室、外采及传输系统的升级改造；最后再进行信息库、媒体资产管理系统以及技术监控系统的建设。从目前来看，在核心系统改造之后，融媒体节目的整体制作播出时间比原来减少了四分之一左右的时间，并且技术设备得到了较好的使用，还给今后系统的扩容提供了可靠的平台^[5]。

4.2 推进播出与制作系统融合改造，提升多终端内容承载能力

将传统的播出系统和制作系统进行融合，建立统一的工程架构，在技术上实现统一信号格式、统一数据接口、统一管理平台，实现制作、播出和分发的一体化工程。这是县级融媒体中心建设的重点工作之一，也是难点所在。

在融合改造中引入支持多协议输出的制播一体化平台，把电视播出系统与融媒体制作系统做技术对接，做到节目内容“一次制作、多端发布”，即高清节目制作完成后，同时输出到电视端、网络端以及移动端，不重复编码。运行数据显示，融合改造后，多终端的内容发布提高了近四成，节目的播出失误率比改造前降低了近一半，有效地提升了工程系统对于融媒体内容的整体承载力。

4.3 强化新技术应用与平台整合，增强工程系统智能化水平

对于工程技术升级方面，应积极采用新技术手段来提高系统的智能化程度，一是通过IP化传输及制播架构取代传统的专线方式，提高系统延展性及灵活性；二是通过技术平台整合对工程运行情况进行可视化的监控。

在实际运用过程中，可采用网络化播出系统方案来达到核心环节冗余以及无缝切换的功能，接入硬件自检报警功能，对传输链路、服务器性能、网络连接等功能指标进行了检测分析。据相关统计显示，在系统上线之后，对于应急故障的解决效率也从之前的一个小时左右下降到了五分钟左右，全年直播中断事件下降近一半。此外，平台合并后，技术人员可以统一调配工程项目资源，在工程系统层面进一步提高系统的稳定性及自动化程度。

4.4 完善技术管理与人才保障机制，确保工程升级长效运行

规范化的管理手段以及稳定的人员是持续推动工程技

术升级的重要因素，在管理方面也要一并建立工程技术标准、运行流程、岗位职责，将技术升级的结果进行制度化、规范化。在工程升级期间制定一系列针对设备管理、系统维护、直播保障、应急处置的技术管理制度。并以技术档案及运行日志的形式进行记录，在后期运维中作为参考。

人才保障上采取“内部培养为主、外部引入为辅”的模式提高技术队伍的整体水平。根据工程升级改造进程，分期开展高清制播、网络传输、系统集成等方面的技术培训，技术人员每年平均接受培训时间达40小时以上，并派出部分技术骨干参加上级单位技术研讨和技术项目实施。提高其掌握新技能的能力。实践结果表明：在完成升级改造及培训之后，技术人员单人值班比例达到90%以上，确保了广电工程技术改造后的可持续性发展。

5 结语

在融媒体环境下，县级广播电视工程技术升级不再是一次性建设项目，而是持续性的工程，并对县级融媒体中心的运营能力和传播力有直接影响。从实践来看，技术升级不能仅仅依靠技术设备的升级改造来满足融媒体的需求，因此，只有从技术架构、运行机制和人才保障上共同发力，才能形成稳定持续的技术保障氛围。工程技术创新提高了制播效能和系统可靠性，同时支撑了多终端传播、应急保障和公共文化服务等功能。

未来，随着融媒体技术不断演进，县级广播电视工程仍需在标准化建设、智能化应用和技术管理精细化方面持续深化探索。通过不断优化工程技术体系、提升专业技术队伍能力，县级融媒体中心有望进一步增强内容生产与传播效能，更好地履行主流舆论传播和公共服务职能，为融媒体格局下基层媒体高质量发展提供有力支撑。

参考文献

- [1] 刘凯迪.无线数字覆盖技术在广播电视工程中的应用探究[J].中国宽带,2025,21(11):136-138.
- [2] 王东华.5G+4K超高清直播技术在广播电视工程中的应用[J].中国科技信息,2025,(12):151-153.
- [3] 刘博.网络技术在融媒体广播电视工程中的应用探讨[J].中国宽带,2025,21(01):70-72.
- [4] 出剑峰.人工智能技术在县级融媒体中心的应用[J].厦门科技,2024,30(05):43-44+47.
- [5] 徐永峰.融媒体时代下广播电视工程技术的应用策略[J].卫星电视与宽带多媒体,2024,21(11):16-18.

Structure of a manipulator for ultra-thin silicon wafer transfer based on Bernoulli adsorption

Yuehua Chen¹ Yonghua Fang² Yufeng Zhan³

Zhejiang Xusheng Electronics Co., Ltd., Quzhou, Zhejiang, 324300, China

Abstract

With the development of integrated circuit manufacturing toward higher integration density and higher yield, the safety and stability of ultra-thin silicon wafer handling during production have become increasingly critical. Conventional contact-based or vacuum suction handling methods are prone to inducing wafer warpage, micro-cracks, and surface contamination, making them difficult to meet the requirements of ultra-thin wafer processing. A non-contact handling approach based on the Bernoulli adsorption principle forms a stable negative pressure region on the wafer surface through high-speed airflow, enabling reliable adsorption while reducing mechanical contact stress. Focusing on the handling requirements of ultra-thin silicon wafers, this paper systematically analyzes the compatibility between the Bernoulli adsorption mechanism and the mechanical characteristics of wafers, and emphasizes the structural features and design considerations of the handling manipulator in terms of adsorption structure, overall layout, and key component design, providing technical references for the structural optimization of related equipment.

Keywords

Bernoulli adsorption; ultra-thin silicon wafer; handling manipulator; structural design; non-contact handling

基于伯努利吸附的超薄硅片转运机械手结构研究

陈跃骅¹ 方勇华² 詹玉峰³

浙江旭盛电子有限公司, 中国·浙江衢州 324300

摘要

随着集成电路制造向高集成度与高良率方向发展, 超薄硅片在生产过程中的转运安全性与稳定性问题日益凸显。传统接触式或真空吸附式转运方式在应用中易引发硅片翘曲、微裂纹及污染等风险, 难以满足超薄化工工艺需求。基于伯努利吸附原理的非接触式转运方式, 通过高速气流在硅片表面形成稳定负压区, 可在降低机械接触应力的同时实现可靠吸附。本文围绕超薄硅片转运需求, 系统分析伯努利吸附作用机理与硅片力学特性的匹配关系, 重点探讨转运机械手在吸附结构、整体布局及关键部件设计方面的结构特征与设计要点, 为相关装备结构优化提供技术参考。

关键词

伯努利吸附; 超薄硅片; 转运机械手; 结构设计; 非接触转运

1 引言

在半导体制造工艺持续演进的背景下, 硅片厚度不断减小, 超薄硅片在清洗、检测、分选及封装等环节中的转运难度显著增加。硅片厚度降低使其抗弯刚度和抗冲击能力明显下降, 转运过程中任何微小的结构不合理或受力不均, 均可能引发不可逆损伤, 直接影响产品良率与生产效率。现有转运装备多依赖机械接触或负压吸附方式, 其在高精度、低应力控制方面存在固有局限。伯努利吸附技术以气动力为核心, 具备非接触、受力均匀和响应速度快等特点, 在超薄硅片转运领域展现出较强的应用潜力。围绕该技术构建匹配的转运机械手结构体系, 成为提升超薄硅片制造可靠性的重要

研究方向。

2 伯努利吸附原理在超薄硅片转运中的适用性分析

伯努利吸附基于流体在高速运动条件下产生的压强变化规律, 当压缩空气经吸附头内部通道喷出并在硅片表面形成稳定气流层时, 气流速度的提升导致局部静压降低, 从而在硅片与吸附头之间形成持续负压区。该负压并非依赖密封空间建立, 而是由气流场自身维持, 使硅片在非接触状态下获得稳定悬浮与吸附效果。气流在吸附头表面的分布形态、喷口角度以及通道截面变化直接影响负压区的范围与均匀性, 进而决定吸附力的稳定程度。合理控制气流场结构, 有助于在硅片表面形成连续、平缓的压力梯度, 避免局部应力集中, 对超薄硅片转运具有良好的适配性。伯努利吸附通过气流间接作用于硅片表面, 可在较大面积内形成均匀压力分

【作者简介】陈跃骅(1971-), 男, 中国浙江开化人, 工程师, 从事硅材料加工研究。

布,降低点载荷和边缘应力,有利于满足超薄硅片在高速转运与多工位切换条件下对稳定性的严格要求^[1]。

3 超薄硅片转运机械手总体结构设计思路

3.1 机械手功能定位与结构组成框架

超薄硅片转运机械手的功能定位集中于高精度抓取、稳定搬运与柔性放置等核心任务,其结构设计需兼顾运动精度与动态稳定性。整体结构通常由基座、驱动单元、机械臂本体及末端吸附执行机构构成,各部分在空间布局上需形成清晰的力传递路径。机械臂长度、关节形式及运动自由度的设置直接影响转运轨迹的可控性与重复定位精度。通过合理规划功能模块,可在保证结构紧凑性的同时提升系统响应速度,使机械手在有限空间内完成多工位转运需求,满足超薄硅片生产线连续化运行要求。

3.2 吸附模块与执行机构的协同布局

吸附模块作为机械手末端核心部件,其空间位置与执行机构运动特性存在高度耦合关系。吸附头需布置在机械臂受力相对平衡的位置,以降低转运过程中惯性力对吸附稳定性的影响。气源通道、控制阀组与执行机构的集成方式,应兼顾气流响应速度与结构紧凑程度,避免因管路过长或布局不合理引起压力波动。通过在结构设计阶段实现吸附模块与驱动机构的协同匹配,可有效提升机械手整体运动平稳性,减少硅片在加减速过程中的姿态偏移风险。

4 基于伯努利吸附的机械手关键部件结构设计

4.1 吸附头气道结构与喷口参数设计

伯努利吸附头是实现超薄硅片非接触稳定吸附的核心部件,其气道结构直接决定气流速度分布与负压区形成效果。吸附头通常采用环形或多通道径向气道结构,压缩空气经中心进气口进入后,在内部腔体中完成压力均衡,再通过均布喷口高速喷出。喷口直径多控制在0.3~0.6 mm范围内,喷口间距一般设定为3~6 mm,以保证气流在硅片表面形成连续气膜。实验与仿真结果表明,当供气压力维持在20~35 kPa区间、喷口出口流速达到80~120 m/s时,可在吸附头与硅片之间形成约1.5~3.0 kPa的稳定负压区,对厚度低于100 μ m的硅片仍具备可靠吸附能力。气道截面过小会导致压力损失增加,而截面过大会削弱喷射速度,因此需通过流体仿真对气道渐缩角度进行优化,通常控制在8°~12°范围内,以兼顾能耗与吸附稳定性^[2]。

4.2 机械臂本体结构与轻量化设计要求

机械臂本体结构在保证足够刚度的前提下,需要严格控制自重,以降低转运过程中惯性载荷对吸附稳定性的影响。针对超薄硅片转运应用,机械臂多采用中空梁或箱形截面结构,通过拓扑优化减少非承载区域材料用量。有限元分析结果显示,在保持末端静态挠度小于0.05 mm条件下,采用铝合金或碳纤维复合材料可将机械臂质量降低25%~40%。机械臂关键受力截面的惯性矩需满足在最大加

速度2.5~3.5 m/s²工况下,应力水平低于材料屈服强度的30%,以避免长期运行引发疲劳问题。关节连接部位通常采用高精度轴承与预紧结构,连接间隙控制在0.01 mm以内,可有效抑制重复定位误差扩散,确保机械臂在高速转运状态下仍具备稳定的姿态保持能力。

4.3 末端执行器与超薄硅片接触安全结构

末端执行器在伯努利吸附结构中虽不直接接触硅片,但仍需具备完善的安全防护结构,以应对突发工况。吸附头周边常设置柔性限位环或缓冲框架,其高度略低于吸附头喷口平面0.2~0.4 mm,可在气压异常或系统断气时提供物理支撑,避免硅片自由坠落。缓冲材料多选用低硬度聚氨酯或硅橡胶,其压缩模量控制在1~3 MPa范围内,可有效吸收瞬时冲击能量。结构设计中还需考虑硅片边缘保护,末端执行器外形通常采用圆角过渡结构,最小圆角半径不低于2 mm,以减少边缘应力集中风险。通过上述结构配置,可将异常工况下硅片破损概率降低至0.1%以下,显著提升转运系统的安全冗余水平^[3]。

5 伯努利吸附转运机械手结构优化方向

5.1 吸附结构参数的优化路径

伯努利吸附结构参数优化的核心在于在吸附稳定性、能耗水平与结构尺寸之间建立合理平衡关系。吸附头直径、喷口数量及喷口几何参数共同决定有效吸附面积与负压分布形态。研究表明,当吸附头直径由120 mm增大至150 mm时,负压区覆盖率可由约55%提升至70%,对应吸附力提升约18%~25%。喷口直径在0.35~0.5 mm区间内变化时,气流速度与压力损失呈现较优匹配状态,单位吸附力能耗可降低约15%。喷口数量增加能够提升压力均匀性,但超过120个后吸附增益趋于平缓,同时气源负载明显上升。通过对供气压力进行精细调控,将稳定工作区间控制在25~32 kPa,可在保证吸附安全系数大于2.0的条件下,使系统总体能耗下降约20%。结合流体仿真与结构试验形成闭环优化路径,是提升伯努利吸附结构综合性能的有效技术路线^[4]。

5.2 机械手整体结构的模块化与集成化设计

模块化与集成化设计有助于提升伯努利吸附转运机械手在不同生产场景中的适应能力。机械手整体结构可划分为基座模块、驱动模块、机械臂模块与吸附执行模块,各模块在接口处采用标准化连接尺寸与定位基准。实验数据显示,在模块化设计条件下,单一模块更换或升级所需时间可缩短至30 min以内,相比整体更换方案维护效率提升约60%。通过将气源控制单元与吸附头模块进行集成,可缩短气路长度20%~35%,有效降低压力波动幅度,使吸附力稳定性提升约10%。结构集成化还可减少冗余支撑件数量,使机械手整体质量降低约15%,在保持一阶固有频率高于250 Hz的前提下,进一步改善动态响应性能。

5.3 面向超薄化发展的结构适配与扩展能力

随着硅片厚度向 $50\mu\text{m}$ 甚至更低水平发展, 转运机械手结构需具备更高的适配能力与扩展空间。结构设计需预留吸附头尺寸与喷口密度的调整余量, 以适应不同规格硅片对吸附面积和压力分布的要求。测试结果表明, 当硅片厚度由 $100\mu\text{m}$ 降低至 $60\mu\text{m}$ 时, 吸附压力波动容许范围需缩小至 $\pm 5\%$ 以内, 机械手结构刚度需提升约 20% 以抑制姿态偏移。通过采用可更换式吸附模块与可调节机械臂长度结构, 可在不改变主体框架的情况下实现多规格适配。结合高比刚度材料与局部增强设计, 机械手在未来超薄化工艺条件下仍可保持 99.9% 以上的转运成功率, 体现出良好的结构扩展能力^[5]。

6 结语

基于伯努利吸附原理的超薄硅片转运机械手在非接触、安全与高稳定性方面展现出显著技术优势。通过对吸附机理、关键结构及动态稳定性的系统研究, 可以看出结构参数与运动特性之间存在紧密耦合关系, 直接影响转运可靠性与设备运行效率。围绕吸附头气道设计、机械臂刚度控制及末端安全结构的协同优化, 有助于有效降低硅片翘曲与破损风险。相关研究成果为超薄硅片转运装备的结构设计与工程应

用提供了可行的技术依据, 对提升半导体制造过程的稳定性与良率具有积极意义。

参考文献

- [1] 田原,王浩铭,陶木鹤.降低硅抛光片表面硼含量的清洗方法[J].电子工艺技术,2025,46(05):49-51.
- [2] 王彦君,孙晨光,刘园,甄红昌,石明,刘琦,曲涛,罗翀,王力,吕莹,张俊生,刘振福,武卫,孙希凯,张晋英,魏艳军.天津中环领先材料技术有限公司,功率器件用区熔单晶硅抛光片的研发[Z].项目立项编号:15YDSSGX00700.鉴定单位:天津市高新技术成果转化中心.鉴定日期:2018-01-30.
- [3] 孙晨光,时金侠,董建斌,吉敏,谭启龙.天津中环领先材料技术有限公司,超薄区熔硅抛光片的无蜡抛光工艺[Z].鉴定单位:中华人民共和国国家知识产权局.鉴定日期:2011-09-14.
- [4] 李科技,由佰玲,武卫,孙晨光,李翔.单抛机双面硅抛光片有蜡贴片工艺研究[A].第二十五届中国(天津)2011·IT、网络、信息技术、电子、仪器仪表创新学术会议论文集[C].天津市电子学会、天津市仪器仪表学会:2011:152-155.
- [5] 刘振福,孙晨光,董建斌.天津中环领先材料技术有限公司,高平整度区熔硅抛光片的抛光工艺[Z].项目立项编号:08FDZDZX01800.鉴定单位:中华人民共和国国家知识产权局.鉴定日期:2011-07-13.

Innovative Design of Modular Indoor Air Purifiers

Tingting Cao Yingying Xu

Jincheng College, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu, 211156, China

Abstract

With the rapid development of urbanization, public health awareness has significantly increased, making indoor air quality a key concern in modern living environments. Traditional air purifiers often suffer from limited functionality, poor spatial adaptability, and suboptimal user experience, failing to meet the diverse needs of contemporary indoor environments. Addressing these challenges, this study proposes a more flexible indoor air purification solution through modular design principles and smart connectivity technologies. The research first conducts market analysis and user interviews to thoroughly evaluate the strengths and weaknesses of existing products while identifying potential user needs, ultimately proposing a “core purification unit + functional expansion modules” design framework. By integrating smart sensing and IoT technologies, the solution enables real-time air quality monitoring, automatic purification mode adjustment, and remote device status connectivity, forming an intelligent ecosystem. This approach demonstrates significant advantages in spatial adaptability, personalized configuration, and user experience. The study explores a paradigm shift in small household appliances, transitioning from standardized passive consumption to flexible personalized service configurations, providing valuable insights for sustainable design of future smart products.

Keywords

modular design, air purifier, smart connectivity, feature expansion, user experience

模块化室内智能空气净化器创新设计

曹婷婷 徐盈盈

南京航空航天大学金城学院, 中国·江苏南京 211156

摘要

在城市化加速发展的今天, 公众的健康意识普遍提升, 室内空气质量问题已经成为当下室内生活所关注的重点。传统的空气净化器功能相对单一, 且空间适应性较差、用户体验不佳, 无法满足现代室内生活的多方需求。基于此, 本研究应用模块化设计理念, 结合智能互联技术, 提出灵活性更强的室内空气净化解决方案。本研究首先通过市场现状调研与用户访谈, 深入剖析现有产品优缺点及潜在用户需求, 提出“核心净化单元+功能扩展模块”设计构架。其次, 融入智能传感与物联网技术, 实现空气质量实时监测、净化模式自动调节、设备状态远程互联的智能生态模式。本方案在空间适应性、功能个性化配置及用户体验方面具备显著优势。课题研究探索了小家电产品从标准化硬件的被动消费, 向个性化服务柔性配置的范式转变, 为未来智能产品的可持续设计提供了有益参考。

关键词

模块化设计; 空气净化器; 智能互联; 功能扩展; 用户体验

1 引言

在当代社会生活中, 人们大部分时间在室内度过, 室内空气中如装修材料释放的甲醛、二手烟、宠物皮屑, 以及室外雾霾颗粒物等, 均对人们的呼吸系统健康构成潜在威胁。根据世界卫生组织 (WHO) 报告, 长期暴露于劣质室内环境会构成哮喘、过敏、心血管疾病的风险指数上升。在此背景下, 室内空气净化器作为改善室内空气质量的重要工具, 其市场持续扩容, 但同时也暴露出诸多深层次问题。而模块化设计理念所强调的将复杂系统分解为独立的功能单元并通过标准化接口实现快速组合与重构的方法, 具有高灵

活性、易维护性等优势。同时, 物联网技术的成熟为解决空气净化器的“固态僵化”困境提供了全新的可能性。因此, 本研究聚焦于模块化设计理念与智能互联技术的高度融合, 构建一款真正以用户为中心、具备高扩展性的室内空气净化器。本研究突破传统产品的功能边界, 探索一种“核心+模块”的柔性架构, 让用户能够按需配置、按需升级, 实现从“购买一个机器”到“购买一套空气健康管理方案”的转变。同时, 通过智能化的感知、决策与交互, 提升用户使用过程中的体验感。

2 产品调研与用户研究

2.1 产品现状分析

作为公共健康问题重要影响因素, 室内空气污染伴随着城市化进程加速和工业化水平的提高而日趋严重。有机化

【作者简介】曹婷婷 (1990-), 女, 中国江苏南京人, 硕士, 讲师, 从事交通工具设计, 智能产品设计研究。

合物的装修污染,PM2.5等颗粒物的外界侵扰,尘螨等过敏源的室内滋生,都是造成室内空气污染的重要因素。公众对室内空气质量关注度与日俱增。因此,作为空气质量改善设备的空气净化器,其市场规模会持续扩大。

在智能技术普及之前,传统的空气净化器主要以物理过滤技术为主进行产品更新迭代来逐步提升净化效率、噪音控制及能效比。近些年,在“智能家居”浪潮的推动下,将人工智能、物联网等先进技术逐步融入到传统空气中,形成全新的智能空气净化器,也是目前行业发展的重要方向。智能化、网联化和用户体验是智能空气净化器的核心所在,它们的不断提升使得空气净化器从单纯的“空气清洁工具”逐渐演变为一个能够感知周边环境、主动做出响应、提供实时数据的空气管理小管家。目前国内以去甲醛等有害气体与消毒杀菌功能为侧重点,国外则更加侧重去除过敏源与细小颗粒物功能(如图2.1所示)。在技术层面,国内外品牌的空气净化器均以主动式与被动式净化技术相结合为主。目前市场上主流的净化技术涵盖了HEPA过滤、负离子、活性炭过滤、紫外线杀菌、臭氧以及光触媒等。

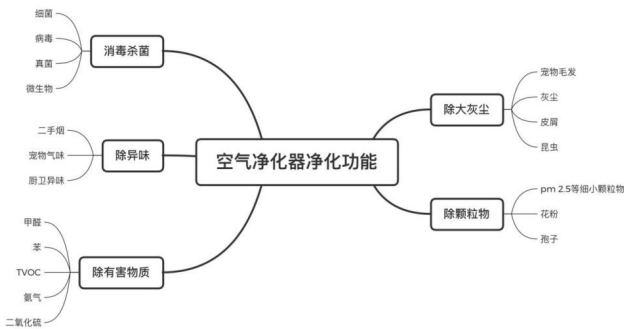


图 2.1 功能框架

据调研结果,现有模块化空气净化器的设计通常为塔式结构,方便用户更换净化器的各个功能模块,以此来改变空气净化器的效率或功能。模块化智能空气净化器多数采用黑白灰等中性色,作为产品的主要色彩。可增减或更换的模块部分,一般采用与主要区域相同的颜色,保持产品的整体一致性。但也有部分产品会将模块部分设计成各种不同的颜色,用于区分不同模块之间的功能,并增加产品的装饰性与趣味性。外壳材质一般会采用塑料、金属、木质、布艺等材料。功能模块的滤芯材质一般为高效过滤材料,比如HEPA滤网、活性炭等,用于解决不同的空气污染问题。

2.2 用户研究

空气净化器潜在用户群体包括办公室员工、敏感人群、吸烟者、养宠家庭以及新装修房屋的用户等。这些用户因心理需求和生理特征的不同,对空气净化器的功能和性能有着不同的期待和要求。因此,深入理解潜在用户的特性和需求,对于模块化室内智能空气净化器的设计起决定性作用。

2.2.1 用户心理特征分析

通过系统性调研发现用过户在选择室内空气净化器时

主倾向以下几点:第一,核心净化功能的考量,即是否达到预期净化效率和面积,是否具备空气质量检测及智能感知和自主响应等;第二,体验感受的考量,即是否具备远程控制与手机互联或者语音控制等,界面的美观性与操作的便捷性;第三,噪音与能耗的考量,空气净化器作为长时间运行产品,其使用舒适性和经济性是重要考虑因素;第四,外观设计与空间融合度,外观是影响消费者决策的重要因素之一,消费者会依据自身审美以及该产品与使用环境的适配性进行选购。

2.2.2 用户生理特征分析

空气净化器的核心价值在于改善空气质量,从而直接作用于用户的生理健康。因此,用户的生理特征是驱动其购买决策和使用体验的关键因素。本文对用户群体进行了分类分析。第一,敏感人群:对室内外过敏原反应强烈,重点关注产品的过敏源净化能力。对负离子、等离子等的技术感兴趣;第二,特殊人群:哮喘、慢性支气管炎等。对空气中的颗粒物和过敏源尤为敏感。追求极致的颗粒物净化能力,极其重视空气质量的监测和预警示,希望产品达到医疗级净化效果;第三,婴幼儿及孕妇:免疫系统尚未发育成熟或处于敏感阶段,对空气中的细小颗粒物、细菌病毒等抵抗力差。关注产品的安全性,尤其是无臭氧和二次污染物的产生,追求低噪音、高效且温和的净化方式;第四,老年人;免疫系统机能下降。对空气质量的变化的敏感度减弱。关注产品的可靠性、易用性、以及对空气中常见污染物的净化,同时也追求低噪音和低能耗;第六,健康群体:处于健康状态,但对室内空气质量影响身体健康问题有强烈意识。既关注基础的空气净化,也开始关注细菌、病毒等的污染,追求更全面的空气管理。

2.3.2 用户需求总结

模块化室内智能空气净化器是一种将传统一体式向“可拆卸、可替换、可扩展、可互联”方向发展的新型空气净化器形态。通过模块化结构的设计可以实现功能配置更灵活、维护更便捷、用户个性化定制以及智能互联。基于对目标用户的生理特征、心理特征及使用场景深入洞察,可归纳出以下关键用户需求。首先,功能灵活,用户可按需进行购买净化器主体以及不同模块;其次,维护便捷,模块化的设计方式让产品模块可独立更换,降低维修成本;然后,智能协同,可智能监测、自主响应、数据实时联动;再者,空间适配,产品外观需可融入不同的室内场景,包括不同的家装风格、办公场景等;最后,用户体验,尤其是用户与产品的人机交互上,做到好用、易用、耐用。

3 模块化智能空气净化器设计实践

3.1 设计定位

本文提出的模块化室内智能空气净化器的方案旨在创造一种新的用户关系:把用户从消费者向参与者转变,把服务从单一的购买产品向订阅健康空气管理推进。本次设计具

体提出以下几点设计理念：首先，空气的专属管家，即个性化、可成长、优质的性能以及良好的体验。其次，按需组合的配置，即灵活、高效、智能、可持续。最后，良好的空间适配性，即可较好的融入各种家装风格，办公环境等。

3.2 方案设计

基于设计定位，本文的灵感来源于仙人球（如图 3.1 所示），创造性突破了传统空气净化器的形式。整机主要分为主舱区与模块替换区两个部分，用户可以根据自身需求，自由组合替换副舱区的模块，具有强烈的装饰性与趣味性。净化器的主舱区具有控制净化器、显示空气质量值、空气质量指示灯、大颗粒初筛等功能。副舱区由各个可替换功能模块组成，造型多变，用户参与度高，体验感佳。功能模块除净化空气等主要功能外，还可搭配香薰功能模块和纯装饰模块。副舱区的可替换功能模块分为大中小三个型号，并且设计了三个不同口径的对接口进行连接。大号与中号功能主要为空气净化与消毒，小号则是附加香薰功能。同时，考虑到用户购买本产品因价格因素及个人需求而未购买全套以及在模块使用较少时产品的美观性，特增加不具有功能的装饰模块。



图 3.1 方案设计

3.3 交互界面设计

3.3.1 手机 APP 页面

交互 APP 的设计框架主要分为首页页、商城、我的三个主要区域。首先，用户可以在“首页”查看基础的数据信息，如天气状态、温度、室内空气质量值等，还可在首页添加新设备，可通过已连接的设备进行更加精细的操作与数据查看。其次，“商店”板块可以提供给用户多种功能模块方案，用户可在商店自行挑选与购买。最后，“我的”板块主要的功能为信息编辑、订单查询、用电量查看以及关于 APP 的一系列设置功能。

3.3.2 产品交互页面

产品的机身交互以极简风格为主，抛弃繁琐的触屏控

制，采用极简化的方式进行设计。保留了控制的基础功能，如开关功能、自动功能、最爱模式调节和睡眠模式调节。空气质量数值在控制按钮上方，方便用户直观查看，并按照喜好进行产品的模式调节。

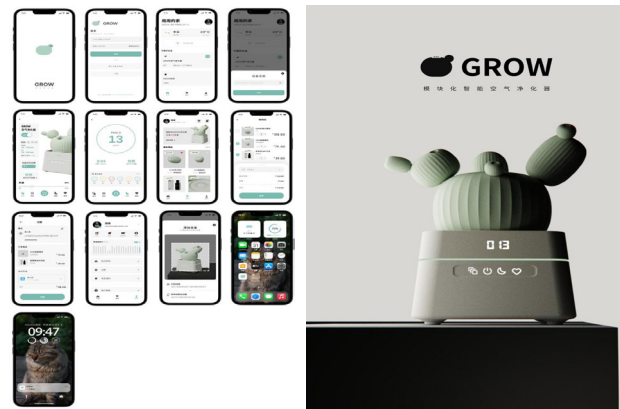


图 3.2 界面设计

4 结语

本模块化室内智能空气净化器设计突破了传统一体式净化器在功能相对固定、维护相当不便、升级几乎无望等方面的局限，成为室内空气健康管理管家，真正做到将室内智能空气净化器从一次性消耗品，转向可配置、可升级、可持续发展的室内健康基础设施。该设计采用“主机+独立净化模块”的模式，允许用户根据实际需求自由购买附加模块，真正实现“千人千面”的空气净化方案，从源头满足不同用户、不同场景下的精细化需求，大幅提升用户满意度。仙人球的原型使得空气净化器不仅仅是功能性电器，而是如同一盆绿植完美的融入现代各种室内环境中。直观的 App 界面、清晰的指示灯、简易的模块更换操作都带给用户优越的使用体验感。模块化室内智能空气净化器满足了消费者对产品个性化、智能化、可持续的追求，有望成为空气净化器市场的一个重要细分方向。

参考文献

- [1] Carliss Y. Baldwin, Kim B. Clark. Design Rules: The Power of Modularity[M]. Cambridge, MA: The MIT Press, 2000.
- [2] 陶建平, 杨瑞, 柳褚泉等. 我国空气净化器市场现状与发展概述[J]. 广东化工, 2020, 47(11): 92-94.
- [3] 于德添, 张钟艾, 王丽等. 智能负离子空气净化器设计[J]. 家用电器, 2022, (06): 121-125.
- [4] 关钥文, 朱晓冬, 孙易男. 基于城市记忆下空气净化器造型设计研究[J]. 美与时代(上), 2023, (03): 129-132.
- [5] 欧加勉, 徐燕君, 徐莉等. 空气净化器产品除菌效果的分析研究[J]. 家用电器, 2023, (01): 35-37.

Utilizing amateur astronomical observations to verify and investigate the phenomenon of lunar libration.

Luojia Kang

Beijing Normal University Affiliated High School, Beijing, 100091, China

Abstract

Lunar libration is a phenomenon of apparent oscillation caused by discrepancies between the Moon's orbital and rotational parameters as it revolves around Earth, enabling humans to observe approximately 59% of the lunar surface—exceeding the theoretically expected 50%. This study designed a systematic amateur astronomical observation program to quantitatively verify and investigate this phenomenon. Using a 150mm aperture reflecting telescope and planetary camera from the school astronomy club, continuous imaging and measurements were conducted from September 2024 to February 2025, during fixed time periods each month from the 18th to the 23rd of the lunar calendar, targeting three characteristic lunar limb features: the Copernicus crater, Tycho crater, and the edge of Mare Crisium. Through image stacking and coordinate analysis, apparent displacement sequences of these landmarks along the lunar longitudinal and latitudinal directions were extracted. The results show that the Moon exhibits significant periodic oscillations in both longitude and latitude, with periods and amplitudes largely consistent with theoretical predictions. This work not only successfully confirms the existence of libration but also deepens understanding of the complex dynamics of the Moon's orbit, highlighting the potential value of amateur astronomical observations in basic scientific education and research.

Keywords

Lunar libration; amateur astronomical observation; lunar surface measurement; orbital mechanics; astronomical investigation

利用业余天文观测验证与探究月球天平动现象

康洛嘉

北京师范大学附属中学, 中国·北京 100091

摘要

月球天平动是月球绕地球运行过程中表现出的复杂摆动现象, 它使我们能够观察到约59%的月面, 而非理论上的50%。本研究旨在通过设计系统的业余天文观测方案, 对月球天平动现象进行定量验证与探究。我们使用学校天文社的入门级专业设备(口径150mm反射式望远镜及行星相机), 在2023年9月至2024年2月期间, 选择每月农历十八至廿三固定时间段, 对月球边缘三个特征标志点(环形山“哥白尼”、“第谷”及危海边缘)进行持续拍摄与测量。通过图像处理软件叠加分析, 记录并计算这些特征点在月面经纬度方向上的视位移变化。观测数据清晰地揭示了月球在经度和纬度方向的周期性摆动, 与理论预测的周期和幅度基本吻合。本研究不仅直观验证了这一经典天文学现象, 更通过实践深化了对月球轨道力学复杂性的理解, 体现了业余天文观测在基础科学研究中的独特价值。

关键词

月球天平动; 业余天文观测; 月面测量; 轨道力学; 天文探究

1 引言

当我们抬头望月, 似乎总是看到相同的一面。这是由于月球的自转周期与绕地球公转周期同步, 这种现象称为“同步自转”。然而, 细心的古希腊天文学家便已察觉, 我们实际看到的月面并非一成不变, 边缘地带会有轻微的摇摆, 使我们得以窥见月背的一小部分。这种表观摆动被称为“月球天平动”。

从理论上讲, 天平动主要分为几何天平动与物理天平

动两大类。几何天平动, 即光学天平动^[1], 是观测者视角变化导致的视现象, 包括:

(1) 经度天平动: 月球绕地球的公转轨道偏心率约为0.0549, 其角速度服从开普勒第二定律(面积速度守恒), 在近地点附近最快, 远地点附近最慢。然而, 月球的自转却是均匀的(潮汐锁定后的同步自转)。这种公转角速度与自转角速度的周期性差异, 导致了在经度方向上观测者视线与月球中心-边缘连线的几何关系发生改变。

月球绕地球的轨道是椭圆, 公转角速度不均匀而自转角速度均匀, 导致在近地点前后我们能“瞥见”月面东西侧的额外部分。

(2) 纬度天平动: 月球自转轴并不垂直于其公转轨道

【作者简介】康洛嘉(2011-), 男, 中国北京西城人, 在读初三生, 从事天体物理研究。

面（白道面），存在一个约 6.7° 的固定倾角（相当于月球的“黄赤交角”）。同时，月球自转轴在空间中的指向基本保持稳定（指向北极星附近）。因此，在月球绕地球公转一周的过程中，从地球观测的视角高度会发生周期性变化。

基于月球自转轴相对于其公转轨道面有约 6.7° 的倾角，在公转周期内，我们交替看到月球北极和南极以外的区域。

周日天平动：本质上是一种地理视差效应，由地球自转引起，地球自转导致地表观测者在一夜间相对于地心发生位移（最大可达地球半径，约 6371 km ）。从地心看，月球中心是固定的；但从地表看，观测者在月出和月落时分别从东、西两个不同的侧面“窥视”月球，导致可见区域在经度方向上有约 1° 的附加摆动。这是唯一一种与月球自身运动无关、纯由观测者位置变化引起的天平动，在高精度观测中必须进行校正

观测者从地心移动到地表导致的视差效应。物理天平动则是由月球真实的物理摆动引起，幅度极小，需精密测量。

尽管天平动是天文教科书中的经典内容，但通过亲身观测来定量验证这一现象，对于中学生而言，仍是一次极具挑战性和价值的科学实践。它不仅连接了天体力学理论与直观的星空观测，更完整地涵盖了科学探究中提出问题、设计方案、收集数据、分析验证的全过程。本研究即试图架起这座桥梁。

2 观测方案与设备

2.1 观测目标与时间选择

为确保观测的有效性和一致性，我们小组制定了明确的计划：

· 特征点选择：选取月面上三个靠近边缘但易于辨识的标志性地貌作为测量“标尺”。

1. 哥白尼环形山（Crater Copernicus, 9.7°N , 20.1°W ）：位于中纬度偏西，对经度天平动敏感。

2. 第谷环形山（Crater Tycho, 43.3°S , 11.2°W ）：位于中高纬度偏南，对纬度天平动敏感。

3. 危海边缘（Mare Crisium border, 17°N , 59°E ）：位于东侧边缘的显著暗区，对经度天平动极为敏感。

· 观测周期：2023年9月至2024年2月，覆盖约6个月球公转周期。每月选择满月后3至5天（农历十八至廿三）的固定时间窗口（20:00-22:00）进行观测，此时目标特征点照明良好且均位于可见半球。

2.2 观测设备

· 主镜：星特朗 C6 施密特-卡塞格林式望远镜（口径 150mm ，焦距 1500mm ）。

· 赤道仪：信达 EQ3-Pro 级带 GOTO 自动跟踪，有效抵消地球自转，确保图像稳定。

· 成像设备：ZWO ASI120MC-S 行星相机。

· 辅助设备：2倍巴洛镜，笔记本电脑（用于相机控制及图像采集）。

2.3 数据采集与处理方法

1. 图像采集：每次观测时，将望远镜精确对准月球。对每个目标特征区域，录制一段约90秒的AVI视频文件（每秒30帧），以通过后续叠加消除大气湍流影响。

2. 图像预处理：使用 AutoStakkert 软件，从每段 AVI 视频中选取清晰度最高的 50% 帧进行对齐、叠加，得到一张高信噪比的静态图片。

3. 位置测量：使用天文图像处理软件 AstroImage。首先，将每个月球图像的边缘通过椭圆拟合进行标定，确定月球视圆面的几何中心。然后，手动标定特征点（如环形山中心）的像素坐标。软件根据已知的月面坐标系，将像素坐标转换为以月面中心为原点的相对经度和纬度（单位：度）。所有测量均以月面平均半径为基准进行归一化，以消除地月距离变化带来的视大小影响。

3 观测结果与分析

在为期六个月的观测中，我们共获得 18 组有效数据（每月 3 个特征点）。测量结果显示，三个特征点的视位置均呈现明显的周期性变化。

3.1 经度天平动验证

以最靠近东边缘的“危海”为关键指标。其测量经度值在约 $+55^\circ$ 至 $+62^\circ$ 之间摆动（理论最大经度天平动幅度约 $\pm 7.9^\circ$ ）。将危海每月测量经度值与时间作图（图 1，此处应为论文中的插图位置），可观察到明显的周期性起伏，周期接近一个朔望月（约 29.5 天）。波动规律与月球近地点和远地点的位置变化相关联：当月球接近近地点时，其公转角速度最快，导致我们能看见更多东边缘之后的月面，危海的视经度值增大；反之，在远地点时，视经度值减小。哥白尼环形山的经度值变化趋势与危海一致，但幅度较小，符合预期。

3.2 纬度天平动验证

以位于南半球的“第谷”环形山为关键指标。其测量纬度值在约 -40° 至 -46° 之间摆动（理论最大纬度天平动幅度约 $\pm 6.7^\circ$ ）。将第谷的每月测量纬度值与时间作图（图 2），同样显示出周期性，但周期约为半个月球交点月（约 13.6 天），这与月球在轨道平面上下来回运动的周期相符。当月球运行至其轨道面以北时，我们能多看到南极区域，第谷的视纬度值（负值）绝对值减小（即更靠近边缘）；反之，当其运行至轨道面以南时，视纬度绝对值增大。纬度变化与月相无直接关系，进一步印证了其源于轨道倾角。

3.3 数据分析与误差讨论

观测数据与理论预测的趋势高度一致，但测量摆动的幅度略小于理论最大值。这主要是因为理论最大值是在最极端几何条件下达到的，而我们的观测时间点未必完全捕捉到

峰值。此外,存在以下主要误差来源:

- 测量误差:图像边缘拟合和特征点中心判读存在约1-2个像素的不确定性,经换算约合 0.02° - -0.05° 。
- 大气扰动:尽管通过视频叠加进行了抑制,但严重的大气视宁度仍会影响图像清晰度和测量精度。
- 仪器与对齐误差:赤道仪跟踪的微小误差、望远镜光学畸变等。

这些误差在业余观测的可接受范围内,且不影响对天平动现象的整体验证和周期性规律的揭示。

4 理论延伸与探究意义

在验证基础几何天平动后,本小组研究进一步探讨其背后的动力学原理及延伸意义。

- 动力学根源:经度天平动的本质是角动量守恒在非圆形轨道上的体现。月球在近地点公转角速度大于自转角速度,故“跑过头”,露出东侧后面;在远地点则相反。纬度天平动则直观反映了轨道平面与赤道平面的夹角。

- 对月球探测的意义:天平动使得如危海、史密斯海等边缘区域能周期性地进入地面观测和通信范围,为这些区域的早期遥感测绘提供了可能。对未来月球基地选址(特别是极区或边缘地区),必须考虑天平动带来的日照和通信窗口的周期性变化。

- 与深空探索的联想:同步自转和天平动现象并非月球独有。在太阳系内,许多大型行星的卫星(如木星的伽利略卫星)都存在类似现象。理解月球天平动,是理解卫星系统轨道共振和潮汐演化的一把钥匙。

5 结论与展望

本研究以月球几何天平动现象为核心探究对象,通过为期6个月(2023年9月—2024年2月)的系统性观测与数据分析,验证了经度天平动、纬度天平动的周期性规律,完成了理论与实践的深度结合。研究选取哥白尼环形山、第谷环形山、危海边缘3个典型月面特征点,利用星特朗C6望远镜、ZWO行星相机等设备采集观测数据,经视频帧叠加、椭圆拟合标定、坐标转换等标准化处理,获得18组有效测量数据。结果表明,危海边缘的视经度在 $+55^{\circ}$ — $+62^{\circ}$ 间周期性波动(周期约29.5天),与月球公转轨道偏心率导致的经度天平动理论一致;第谷环形山的视纬度在

-40° — -46° 间周期性变化(周期约13.6天),印证了月球自转轴倾角引发的纬度天平动规律,且观测趋势与天体力学理论预测高度吻合。

研究过程中,通过优化观测时间窗口、采用视频帧叠加降噪、标准化坐标测量等方法,有效控制了大气扰动、仪器误差等影响因素,测量精度处于业余观测可接受范围。尽管实测摆动幅度略小于理论最大值(受观测时间点未完全覆盖极端几何条件影响),但未影响对天平动核心周期性特征的揭示。

本研究的科学价值体现在三方面:其一,通过中学生可操作的观测方案,实现了经典天文现象的定量验证,完整复刻了“提出问题—设计方案—数据采集—分析验证”的科学探究流程,为天文科普实践提供了可借鉴的范例;其二,直观呈现了角动量守恒、轨道倾角等天体力学原理的实际表现,深化了对月球同步自转与轨道运动关联性的理解;其三,延伸探讨了天平动对月球边缘区域观测、基地选址及深空卫星系统研究的参考意义,搭建了基础观测与前沿探索的桥梁。研究成果不仅验证了月球几何天平动的客观存在与周期性规律,更凸显了业余天文观测在科学探究中的实践价值。展望未来,我们小组研究可沿多个方向深化:延长观测基线:进行长达一整年甚至更长时间的观测,以捕捉更完整的周期和极小物理天平动的线索。提高测量精度:采用更先进的图像处理算法(如亚像素定位)自动识别特征点,减少人为误差。扩展探究内容:尝试测量“周日天平动”的微小效应,或研究天平动对月掩星事件预测的影响。结合中国探月工程:关注“嫦娥”系列探测器对月球重力场、内部结构的精密测量成果,这些数据正帮助科学家更深入地理解月球天平动(特别是物理天平动)^[3]与内部质量分布的关联。

从伽利略第一次将望远镜指向月球,到“嫦娥”奔月、“玉兔”巡勘,人类对月球的认知在观测与探索中不断深化。本次业余天文探究,正是这条壮阔探索长河中的一朵微小浪花,它印证了:科学发现始于对平凡天空的不平凡追问。

参考文献

- [1] 利用VLBI数据解算地球自转参数. 王兴文;彭粤.资源导刊,2024(18)
- [2] 如何精确测量地球与月球之间的距离. 周书华.物理,2025(08)
- [3] 天文观测和物理模型不同角度对行星冲日的分析——2023年1月浙江省物理选考卷第10题分析. 肖飞燕.物理教师,2023(05)

Process Optimization of Seal Performance Improvement for Domestic 660MW Ultra Supercritical Steam Turbine

Guofang Zhang Guokun Wang Dayang Cheng Lin Liu Jingwei Li

China Resources Power Jiaozuo Co., Ltd., Jiaozuo, Henan, 454450, China

Abstract

For domestically produced 660MW ultra-supercritical units operating under high-temperature, high-pressure, and peak-shaving start-stop conditions, if a minor leak occurs in the high-pressure steam inlet tube seal, the leaking steam may flow through the interlayer between the inner and outer cylinders, causing localized overheating of the cylinder body, expansion of temperature differences, and axial vibration fluctuations. The commonly used laminated metal seals in field maintenance are sensitive to assembly interference and concentricity. After thermal expansion and wear, the sealing interface is difficult to maintain long-term contact. This paper, based on the engineering background of tube leakage treatment for China's domestically produced 660MW units, proposes a comprehensive process optimization approach focusing on composite sealing, online compensation, operational tracking, and maintenance.

Keywords

Domestic 660MW ultra-supercritical steam turbine; tube insertion; sealing performance improvement; process optimization

国产 660MW 超超临界汽轮机插管密封性能提升的工艺优化

张国防 王国坤 程大央 刘林 李静伟

华润电力焦作有限公司, 中国·河南焦作 454450

摘要

国产660MW等级超超临界机组在高温高压与调峰启停条件下, 高压进汽插管密封若出现微漏, 泄漏汽可能沿内外缸夹层窜流, 造成缸体局部过热、温差扩大及轴系振动波动。现场检修中常见的叠片金属密封对装配过盈与同心度敏感, 热态差胀与磨损叠加后, 密封界面难以长期保持贴合。本文以中国国产660MW机组插管泄漏治理为工程背景, 围绕复合密封、在线补偿、运行跟踪与检修提出成套工艺优化思路。

关键词

国产660MW超超临界汽轮机; 插管; 密封性能提升; 工艺优化

1 引言

660MW 超超临界汽轮机作为中国火电主力容量段之一, 结构紧凑且热应力水平高, 密封薄弱点常集中在高压缸进汽与抽汽插管位置。插管密封一旦失效, 漏汽将改变汽缸温场与夹层压力分布, 进而带来温差异常、振动波动及效率下滑^[1]。对存量机组而言, 工程上更需要在既有结构基础上形成可实施、可检查、可维护的工艺路线, 使密封改造与运行管理能够相互闭环。

2 国产 660MW 超超临界汽轮机概述

660MW 超超临界汽轮机为高压缸双下进汽、一次中间再热、单轴、四缸、四排汽、双抽凝汽式结构。其中高压缸常见双下进汽、一次中间再热、四缸四排汽、双抽凝汽

式配置, 并采用全周进汽节流调节与双层缸结构, 高压内缸为圆筒形, 内外缸间设置隔热罩以抑制受热不均。高压进汽管路与汽缸连接多使用插管形式, 插管处处于高温区且压差大, 密封既要承受蒸汽冲刷, 又要跟随内外缸差胀与阀门端刚度变化引起的相对位移。因此, 插管密封的结构选型、配合面状态与装配质量, 往往直接映射到缸体温差、轴振与热耗的波动。

3 国产 660MW 超超临界汽轮机插管密封性能提升价值

插管密封的价值首先体现在热经济性上。插管微漏通常不呈现外部可见泄漏, 但泄漏汽会绕过通流级, 形成无功蒸汽, 热耗以小幅累积的方式长期抬升。在高温高压条件下, 原有叠片式金属密封容易因热态间隙扩大形成微通道, 且对热变形、振动与磨损缺乏自适应能力, 密封效果随运行时间衰减, 失效后还可能带来动静间隙变化等连锁风险。其次, 密封可靠性直接关联胀差与振动管理。夹层串汽会改

【作者简介】张国防(1974-), 男, 中国河南郟县人, 本科, 高级工程师, 从事火力发电厂热动力工程研究。

变缸体温场与支承受力,容易诱发轴振波动、端部汽封磨损加剧与二次漏汽,现场处理往往需要更长的揭缸窗口^[2]。再次,改造的可维护性决定停机成本。具备在线补偿能力的方案能够把部分处理工作前移到运行阶段,减少非计划停机与抢修的概率。以某660MW机组的改造数据为例,优化后在600VVO工况下热耗由7804.08降至7767.34kJ/kWh,高压缸温差由55℃降至28℃,轴振幅值由120μm降至58μm,反映出泄漏抑制、温场均衡与振动控制可以形成同向改善的链条。同时,高品位蒸汽的非计划泄漏减少后,缸体异常受热与热疲劳风险也随之降低。

4 国产660MW超超临界汽轮机插管密封性能提升的工艺优化

4.1 金属-石墨复合密封结构创新

针对国产660MW超超临界汽轮机高中压缸进汽插管处在热态差胀与装配离散叠加条件下的漏汽风险,现场可采用金属骨架承压、石墨涂层贴合的金属-石墨复合密封结构。第一,骨架层保留原金属密封环并沿用原基准尺寸,在工作面加工环形密封槽与注胶通道,槽型采用平底并配圆角过渡,槽深槽宽按目标石墨层厚度与接触带宽确定并预留固化收缩量,在槽口加工限位台阶与挡胶唇边以抑制高压侧挤出,刀具退刀处采用圆弧连切避免台阶划伤,机加工后复核同心度与端面平面度,槽底槽壁去毛刺后用无纺布与溶剂擦拭并吹干,回装前核对密封环与槽配合两侧总间隙全周一致性,工程上常以0.08mm至0.11mm作为复核参考。第二,密封环装入套管定位后实施注胶,选用与蒸汽温度等级匹配的高温石墨密封胶,按脱脂干燥、局部预热、分段充填、保压固化顺序执行,注胶前在通道末端设置排气点并确认无油无水,预热温度以不致胶体提前凝结为限并保持均匀,充填由低压侧向高压侧推进以降低夹气,分两至三次补胶并在每次保压后复查塌陷与气泡外溢,固化时间按材料说明并结合现场环境温度修正,必要时采用加热毯保温做试块对照,固化后对表面硬度与回弹进行抽检,未达到规定固化度不得带压冲转。第三,刚柔协同设计需明确差胀位移方向与约束边界,轴向补偿量以装配冷态间隙与热态伸长计算为依据设置,补偿量可控制在±1.5mm范围,槽口限位台阶与挡胶唇边应与高压侧迎风面匹配并留出受压变形余量,以降低石墨层被挤出的风险,金属层承压能力需结合环体壁厚、材料屈服强度与螺栓预紧力进行复核并满足25MPa以上工作压力,石墨层压缩变形率可按批次取样做压缩回弹试验确认,并与现场预紧目标对应,注胶口宜采用可拆堵头便于检修再用。第四,质量控制在回装前对石墨层厚度一致性、固化回弹与表面缺陷进行抽检,采用着色或压痕法检查接触带宽与连续性,接触带宽度宜保持在2mm至3mm,开展0.6MPa低压保压试验记录泄漏率并按现场限值判定,试运阶段结合缸温差、轴振与插管外壁温度点检,偏差时按规定复紧或修磨。

4.2 动态注胶补偿技术应用

国产660MW超超临界机组长周期运行中,插管密封副受热胀差、壳体椭圆化与振动耦合影响,配合间隙可能随负荷与温态变化产生漂移,动态注胶补偿应按标准化工序纳入汽机专业维护。第一,注胶通道与阀体布置以对称、避险与可操作为约束,在进汽管外壁按周向等分布置4个注胶口,孔径按现场注剂枪头与流量需求匹配选4mm级,孔位避开焊缝及高应力区并校核保温拆装后阀体检修空间,钻孔后对孔口倒角去毛刺并临时封堵防止异物落入,阀体宜带止回功能以防反窜汽,外设隔热罩与防误触结构,保证运行人员按票据流程完成接驳与隔离^[3]。第二,注胶作业遵循先通后补的分级控制,注胶前对通道吹扫并通过回胶口排气确认通畅,随后以小流量间歇注入促使胶料在环槽与通道内均匀铺展,待回胶口见胶后关闭排气端继续补入直至充实,必要时可按通道阻力从回胶端反向补注,该流程与注胶孔、回胶孔配合排气的做法一致。同一步骤中应结合缸温差与轴振谱的变化趋势细化补入量,注剂黏度按介质温度窗口控制并实施过滤、批次留样,避免低温凝结堵塞或高温稀释流失。第三,检修实施阶段对开孔定位、焊接密封与启闭可靠性实施强制校核,孔位以插管中心线与法兰基准复核后放样,现场加工将轴向与周向误差控制在0.1mm量级,注胶阀短接与管壁采用氩弧焊全焊透密封,焊后开展渗漏复核、阀芯启闭试验与阀座打压检查,注剂接头选用可快速接通并可切断通道的专用阀件与连接件,满足带压注剂连接要求。第四,运行维护阶段建立注胶台账并形成闭环复核,记录补胶时机、注剂用量、主汽参数、调门开度、缸温差曲线及轴振幅值与频谱变化,台账由运行与检修双签字并与当班操作票关联,阈值触发条件由本机组历史趋势与工况边界确定,补胶前核对工况稳定与隔离状态,补胶后保持观察并在同一负荷点复测,若阀体渗漏、阀芯卡涩或通道阻塞,则在小修窗口进行阀体更换与通道复通检查。

4.3 配合面表面强化与抗粘连处理

在660MW超超临界机组进汽插管密封改造中,配合面表面强化与抗粘连处理应与装配基准、紧固一致性同步受控,避免仅靠提高预紧力补偿泄漏,并把密封环更换批次纳入配套管理。第一,强化体系选择以热态温度区间、蒸汽冲刷与微动摩擦特征为依据,结合密封环材质确定可配对的表面体系。现场常用做法是在插管配合工作段采用司太立6号合金堆焊或Cr3C2-NiCr类喷涂层,优先选取与母材线膨胀系数接近的方案,并将目标硬度控制为梯度过渡,同时把厚度限定在后续可加工区间,例如堆焊层0.8至1.5mm,喷涂层0.3至0.8mm,并明确磨削余量与允许失圆值^[4]。第二,实施阶段重点管控热输入与残余应力,堆焊可采用TIG或等离子堆焊,按分道多层、对称走焊组织热场,预热150至200℃并控制层间温度200至250℃,每层焊后清渣并轻度打磨消除咬边与未熔合指示,焊后按材质要求执行保温缓冷或消应力回火并复测硬度梯度,喷涂宜选HVOF,喷

前按规定粒度喷砂粗化并固定喷距与入射角,基体预热 100 至 150 °C 并分次叠加厚度,单次增厚不宜过大,预留 0.2 至 0.4 mm 精加工余量,过程记录层间温度并对喷后冷却速率做约束以避免氧化夹层与微裂纹。第三,强化后应完成精加工与表面质量复核,将圆度、同轴度与粗糙度纳入同一验收链,车磨后圆度与同轴度分别控制在 0.02 mm 与 0.03 mm 以内,并以 Ra0.4 至 0.8 μm 为目标复测粗糙度与硬度,采用蓝油或着色检查接触带宽连续且无局部尖峰,必要时对边界区做缓坡过渡与 0.5 × 45° 倒角,喷涂层结合质量可通过敲击声判、渗透抽查及局部超声厚度核对进行确认。第四,面向现场回修应提前固化修补工艺卡与工装路线,可预制薄层强化套或备好补焊丝材与喷涂粉末,小修期完成局部补焊或补喷后使用便携车磨装置回修尺寸并恢复圆度,同步记录磨削量与剩余强化层厚度,机组投运磨合期跟踪温升、振动与泄漏量,磨合后复测尺寸并将实际磨损速率写入下周期检修点检表。

4.4 运行期热态跟踪与检修闭环管理

插管密封处在高温高压与频繁启停叠加的边界区,改造投运后应以热态数据牵引问题回溯到工艺与运行控制,形成闭环。第一,运行侧应建立面向插管内漏的特征监视组合,而不是只依赖轴振单一量。现场可将高压缸上下缸金属壁温差、相关抽汽段温度偏差、夹层或导汽管附近金属温度作为主判据,并与负荷、主再热温度、阀位和抽汽流量同步对比,形成趋势曲线与变化速率指标。已有机组在阀门全开工况下因进汽插管密封环泄漏出现抽汽温度较设计值偏高且壁温差扩大的案例,可据此把阈值设为预警与报警两级,并在同类工况下用实测数据校准判据,同时对异常时段做热力平衡复核以验证泄漏路径。第二,当监视量连续上扬且已排除通流擦碰、调节波动和测点漂移后,运行规程应给出处置窗口与边界条件。通常结合负荷曲线与启停计划,优先在负荷稳定段或计划性小修窗口安排补偿或注胶等处置,明确允许的温差变化范围、升降负荷速率、保温措施与保压时间,并设置注胶前后的参数复核清单,至少包含缸胀差、抽汽参数回归、夹层温度回落与振动复测,处置中若壁温差或振动超出

边界应立即退出并恢复稳态。第三,密封介质与备件必须纳入材料台账并与施工要点绑定。石墨类密封胶应记录批次、有效期、储存温湿度与现场施工温度,入库后按先入先出领用,施工前对胶料外观与流动性抽检并核对配比,注胶通道完成清洁度确认、试注与回流检查,密封面保持干燥无油,施工中按分段充填与保压固化控制用量与节拍,施工后对注胶阀门和单向件做启闭与泄漏复核,定期验证通道畅通性,防止堵塞或固化不足导致剥落回流。第四,检修结束后应在首启及负荷爬坡阶段开展对照评价并把偏差写回工艺文件。评价指标除热耗外需同步核对壁温差、抽汽温度偏差与轴振变化,按时间轴标注启停、阀位调整与补偿动作,结合拆检结果将偏差归因到加工尺寸、同心度装配、预紧离散或运行边界超限,并将插管检查与密封部件装配要求固化为质量验收控制点,形成下一次检修的工艺修订条目,同时把测量记录、螺栓对号、注胶用量等随工资料归档并纳入点检清单^[5]。

5 结语

综上所述,国产 660MW 超超临界汽轮机插管密封优化的关键在于把热态差胀、磨耗与振动引起的间隙漂移纳入闭环控制,既要在结构上获得可贴合的密封界面,也要在运维上保留可恢复的调整手段。以金属-石墨复合密封与运行中注胶补偿为主线,辅以配合面强化、运行期热态跟踪与检修,能够在不扩大揭缸工作量的前提下改善缸体温差与轴振趋势,并为同容量段机组的保效改造提供可执行路径。

参考文献

- [1] 薛青鸿.某660MW超超临界汽轮机轴承箱油挡漏油分析及处理[J].发电设备, 2024, 38(5):323-327.
- [2] 刘阳明.1 000 MW超超临界汽轮机叶片表面粗糙度对气动性能的影响研究[J].机械管理开发, 2025(8).
- [3] 曹丽华,李想,司和勇.超超临界汽轮机转子涡动对密封动力特性的影响[J].汽轮机技术, 2023, 65(1):32-34.
- [4] 孙嘉,夏芄,杨洪亮,等.某1000MW超超临界机组低压通流优化方法研究[J].汽轮机技术, 2024, 66(6):418-422.
- [5] 李大才,吕长虹,卜振海,等.偏置量影响的超超临界汽轮机转子密封动力特性[J].汽轮机技术, 2024, 66(4):271-274.

Analysis of the Integrated Architecture Design of Information System Integration

Huan Du Xingwei Zheng Honghao Fan

Quzhou Airport Construction and Development Group Co., Ltd., Quzhou, Zhejiang, 324000, China

Abstract

With the rapid advancement of information technology, the demand for system integration has surged significantly. Traditional standalone system architectures struggle to meet the needs of cross-platform business collaboration. As a key approach to system integration, comprehensive architecture planning coordinates business processes, application deployment, data transfer, and security management to establish a scalable and sustainable digital foundation. This paper analyzes the fundamental characteristics and design principles of system integration, clarifies the architecture layering approach driven by business needs, and provides theoretical foundations for resolving compatibility issues between different systems and ensuring data consistency. The research findings offer valuable guidance for improving enterprise informatization initiatives.

Keywords

system integration; comprehensive architecture design; modular principles; data governance

信息技术系统集成的综合架构设计分析

杜欢 郑星伟 范洪浩

衢州机场建设发展集团有限公司, 中国·浙江 衢州 324000

摘要

随着信息技术的快速进步, 各种系统整合的需求大幅增加, 以往独立存在的系统架构很难满足跨平台业务协作的需要。作为系统整合的关键方法, 综合架构规划通过协调业务流程、应用安排、数据传递和安全管理等方面, 打造出能够扩展并持续发展的数字化基础。本文旨在分析系统整合的基本特点和设计准则, 明确业务推动下的架构分层思路, 为解决不同系统的兼容问题、保证数据的统一性提供理论依据。研究结果对改进企业信息化建设的方式具有指导意义。

关键词

系统集成; 综合架构设计; 模块化原则; 数据治理

1 引言

信息技术系统整合涉及多个领域的技术融合和业务协作, 其主要难题在于协调标准化和灵活性。综合架构规划需要基于模块化和松散连接的原则, 实现系统分离。业务架构需要准确反映企业流程, 应用架构通过分层设计降低复杂程度, 数据架构规范模型和流动方向, 技术架构适应基础设施的弹性需求。安全和运维架构贯穿整个生命周期, 确保系统具有可监控和可恢复的特点。本文重点关注架构设计的方法体系, 分析关键要素的交互机制和实施思路。

2 信息技术系统集成概述

信息技术系统集成实质上是将分散的软硬件资源、数据资源及应用系统融合为一个功能协调、信息畅通的整体系

统。它超越了简单的物理连接, 核心在于实现异构系统间的无缝协同与数据高效流转, 从而支撑复杂的业务运作需求。因此这种集成实践致力于弥合业务目标与技术实现之间的鸿沟, 通过精心设计的架构确保不同技术栈和应用模块能够像一个有机体般运作。其价值不仅体现在解决信息孤岛问题, 更在于提升组织的整体运营效率与决策支持能力。高效的集成架构设计便成为整个过程的基石, 它如同系统生命体的神经系统, 科学规划信息流向、接口交互与资源调配。正是这种设计决定了系统未来的扩展性、稳定性及应对业务变化的敏捷度。完成一个成功的集成项目必然要求深入理解各组件特性与业务场景, 并综合运用适配的技术方案与标准规范进行创造性连接。整个过程融合了需求分析、方案制定、实施部署与持续优化等多个专业环节, 需要跨领域知识的深度协作才能构建出真正满足实际需要的一体化信息系统。技术选型与接口定义必须兼顾当下需求与未来发展, 确保系统具备必要的适应能力与演进空间^[1]。

【作者简介】杜欢(1989-), 男, 中国浙江衢州人, 本科, 高级工程师, 从事信息技术研究。

3 综合架构设计的理论基础

3.1 设计原则

整体架构规划的实际效果和模块化以及低关联度原则的执行情况有关,该原则规定要把复杂的系统拆分成功能独立的组件部分,各个部分之间通过规范化的接口来沟通,以此防止局部的变动导致整体重新构建的风险。可拓展性和可维护性作为支持系统发展的关键特性,需要在架构的初始阶段留出水平扩展和垂直升级的技术渠道,比如运用容器化部署来实现资源的灵活调配,同时建立版本管理和分阶段发布机制,减少更新过程对业务正常进行的影响。安全和稳定原则在架构设计的整个周期都要体现,不仅要在网络层面进行传输加密和入侵监测,还要在数据层面设计备份存储和故障切换方案,这种多方面的防护体系能够明显增强系统应对异常流量的能力,尤其是在高并发的情况下保证核心服务的稳定提供。

3.2 主流架构模式

面向服务的架构(SOA)通过抽象服务约定来实现跨平台的功能重复使用,它的主要价值在于搭建企业级的服务通道,消除不同系统之间的技术障碍,比如把传统单体系统中的用户验证模块发布成统一的身份服务,供多个业务系统调用。微服务架构在云原生的环境中表现出明显的优势,它把应用拆分成细粒度的服务单元进行独立部署运行,每个服务都有自己专属的数据存储和技术架构选择权利,这种模式特别适合需要快速更新的互联网应用,开发团队可以针对特定的服务进行技术升级,而不影响整个系统。事件驱动架构采用异步消息机制来解除各方主体之间的关联,事件通道作为核心实时传递状态变化的信息,当航班离港保障系统完成飞机推出指令时,会自动触发廊桥回收、行李装载状态同步以及地面服务人员调度流程,实现跨部门保障环节的自动协同^[2]。在实际应用中,这三种模式常常会相互融合,大型机场信息平台可能在基础服务层面采用SOA来整合空管信息与机场收费系统,在旅客服务层面使用微服务来支持安检流程优化或商业店铺促销活动的快速上线,而航空货运处理环节则依靠事件驱动来完成货单审核、仓库分配和海关申报的联动响应。

4 综合架构设计核心要素分析

4.1 业务架构设计

业务架构设计构成综合架构的底层逻辑起点,其核心任务在于精准捕获企业战略目标与操作流程的映射关系。在需求分析环节,要把指标分成功能和非功能两类,前者着眼于业务场景里的具体操作规则,后者则和系统反应时间、同时处理任务的能力等性能限制有关。流程整理通过跨部门一起参与的工作会议形式,找出重复多余的环节,像传统设施维修审批中纸质工单与电子系统中记录的重复核对,通过建立从头到尾的数字化流程,能够缩短处理时间。业务建模把

抽象的需求变成可以实施的方案,用BPMN标准描述航班保障过程中的状态变化规则,让机位分配、旅客登机、货运装载、航食配餐等操作形成可视化的协同流程。

4.2 应用架构设计

应用架构关注功能模块的组织形式和服务交互方式,按照分层设计的原则,把系统分成表现层、业务逻辑层和数据访问层三个主要层面。表现层负责在多种终端上进行交互适配,响应式框架可以自动调整界面布局,以适应移动设备或桌面环境。业务逻辑层运用领域驱动设计来划分核心能力区域,航班运行控制区域包含航班动态管理、机位分配策略和异常延误处置等专门服务,避免与监控、安防等系统的相互干扰。服务接口标准化是消除系统障碍的重要措施,RESTful API规定了清晰的资源操作含义和状态码规则,让机场运营管理系统(AODB)调用安检信息系统旅客数据时不需要了解底层的数据结构。在微服务架构下,每个领域服务可以独立部署运行,当需要临时调整航班延误后的旅客安置策略时,只需更新旅客服务调度模块,不用中断航班起降的核心处理流程,这种设计明显提高了系统局部更新的效率。

4.3 数据架构设计

数据架构规划致力于处理信息资产的标准化难题,重点在于构建统一的主数据模式以解决系统间的语义理解差异。航班主数据模式清晰界定航班号、航线、机型、计划时刻等关键数据项,让空中交通管理、机场地面运营和航空公司运行控制等系统在追踪同一航班时采用完全相同的标准。数据流动管控依靠管道式处理模式,航班起飞确认事件会触发数据管道执行旅客行程更新、常旅客积分累积和货运单状态同步等操作,Kafka消息队列能确保事务最终达到一致状态。存储策略要与数据类型特点相契合,关系型数据库用于处理对一致性要求较高的航班起降交易记录,而旅客Wi-Fi连接日志或安检通道图像流则使用时序数据库或对象存储来提高数据写入与处理能力。冷热数据分层存储方案可优化资源使用效率,近三个月的航班运营详细数据与旅客流量数据存放在高速SSD存储池,历史航班归档数据、建设期工程图纸则转移到成本较低的对象存储中。数据血缘追踪技术会记录字段层面的处理流程,当航班准点率统计报表出现异常时,能够反向追踪到原始的空管报点系统与地勤保障系统的输入时间戳^[3]。

4.4 技术架构设计

技术栈选择需要同时考虑开发效率和运行性能两个目标,云原生技术体系已成为现代架构的主要选择。容器化部署能保证环境的一致性,Kubernetes编排引擎可根据负载变化自动调整应用实例数量,在流量突然增加时,新添加的节点能在几分钟内完成服务注册。基础设施即代码的实践把服务器配置转化为可进行版本管理的描述文件,用Terraform脚本定义的网络拓扑结构能在不同云平台间无损耗地迁移。无服务器架构适用于事件触发的场景,图片上传操作会自动

启动图像处理函数生成缩略图，执行完毕后立即释放计算资源。边缘计算节点设置在制造业车间现场，实时处理设备传感器数据，只将关键告警信息上传到中心云平台，有效减轻

网络带宽压力。技术债务管理应纳入架构评估范围，遗留系统的 COBOL 模块可通过 API 网关封装成微服务逐步替换，避免因全面重构导致业务中断的风险。



图 1 企业综合架构设计核心要素一览表

4.5 安全架构设计

安全防护体系运用多层防御策略涵盖各个架构层面，在网络边缘设置新一代防火墙来识别诸如 SQL 注入这类应用层的攻击行为，内部微服务之间的通信强制采用双向 TLS 认证以避免中间人劫持情况的发生。数据安全方面实行分类分级管理，像客户身份证号等敏感字段在存储层面会进行 AES - 256 加密处理，这样即便数据库遭到非法访问，也不能直接获取到原始信息。访问控制依照最小权限准则，通过 RBAC 模型保证客服人员只能查看本区域的客户数据，而跨区域查询则需要区域经理的特殊许可。安全审计机制会记录所有特权操作，数据库管理员进行的表结构变更操作会生成不可更改的区块链存证。漏洞管理流程构建主动防御能力，依靠依赖项扫描工具持续检测第三方库的 CVE 漏洞列表，在公开利用代码出现之前完成补丁的安装。

4.6 运维架构设计

运维架构搭建起保障系统稳定运行的基础，全链路监控体系收集从基础设施到业务逻辑的关键指标。Prometheus 时序数据库不断存储容器 CPU 利用率和 JVM 堆内存数据，当线程阻塞率超过设定的临界值时，会自动发出警报通知值班工程师。日志分析平台进行多维度的关联分析，支付服务的异常日志与数据库连接池超时记录的时间关联性能够确定根本故障点。混沌工程主动检验系统的韧性，通过随机终

止订单处理服务的副本实例来测试集群的自我恢复能力，确保单点故障不会引发服务的连锁崩溃。备份策略采用 321 规则，核心交易数据同时存储在本地磁盘、跨可用区云存储和离线磁带库三种介质中，每日增量备份与每周全量备份相结合，降低恢复点目标。

5 结语

综合架构规划是信息技术系统整合的战略保障，其模块化的思维和分层协作的机制能够有效应对业务动态扩展的需求。在实践中，需要加强安全保护和数据管理的基本限制，同时提升运维监控能力以保证服务的连续性。未来的架构设计将与智能决策技术深度结合，通过自适应机制提高系统的容错能力，探索边缘计算和分布式存储对实时性场景的支持途径。不断完善跨平台整合的规范，建立技术平台和业务平台的联动模式，将成为数字化转型的核心工作重点。

参考文献

- [1] 周向华.信息技术系统集成的综合架构设计[J].科技资讯,2025, 23(12):40-42.
- [2] 武成柱.人工智能技术在信息系统集成中的融合应用与发展趋势[J].中国信息化,2025,(10):141-142.
- [3] 庞长才,张天一,柏亚萌.大型综合管理信息系统的智能技术集成与应用优化[J].数字技术与应用,2025,43(05):21-23.

Analysis of Match of Aircraft Throttle Control Characteristics and Flight Control System

Kunjun Zou

Beijing Qingyun Aviation Instrument Co., Ltd., Beijing, 100000, China

Abstract

As an essential component of the flight control system, the throttle control unit's operating characteristics directly impact flight performance and safety. This paper provides a detailed analysis of the basic structure, function, and operating characteristics of the throttle control unit, and explores factors influencing these characteristics, such as environmental conditions, mechanical structure, and control precision. Additionally, the paper discusses the matching requirements between the throttle control unit and the flight control system, including coordination, response matching, and the effects of flight state variations on the match. Using common matching analysis methods, such as theoretical models, simulation analysis, and experimental validation, the degree of match between the throttle control unit and the flight control system is assessed. Finally, strategies for optimizing the throttle control unit's operating characteristics and its match with the flight control system are proposed, with a particular focus on the potential and challenges of future technologies in the optimization process. This research provides theoretical foundations and practical guidance for the design and optimization of flight control systems.

Keywords

throttle control unit; operating characteristics; flight control system; matching analysis; optimization strategies

飞机油门台操纵特性与飞行控制系统匹配分析

邹坤君

北京青云航空仪表有限公司, 中国·北京 100000

摘要

飞机油门台作为飞行控制系统的重要组成部分,其操纵特性直接影响飞行性能和飞行安全。本文对飞机油门台的基本构造、功能以及操纵特性进行了详细分析,并探讨了影响操纵特性的因素,如环境条件、机械结构与控制精度等。同时,文章分析了油门台与飞行控制系统之间的匹配要求,包括协调性、响应匹配度以及飞行状态变化对匹配的影响。通过常用的匹配分析方法,如理论模型、仿真分析与实验验证,评估了油门台与飞行控制系统的匹配程度。最后,提出了优化油门台操纵特性与飞行控制系统匹配的策略,尤其关注未来技术在优化过程中的潜力与挑战。本文的研究为飞行控制系统设计与优化提供了理论依据与实践指导。

关键词

飞机油门台; 操纵特性; 飞行控制系统; 匹配分析; 优化策略

1 引言

随着航空技术的不断发展,飞行器的操控性和飞行安全性愈加依赖于飞行控制系统与各种操纵设备的协调性,其中飞机油门台作为关键的操控接口,其操纵特性直接影响飞行器的响应性能与控制精度。油门台的设计不仅要求其具备精准的操控响应,还需与飞行控制系统高度匹配,以确保在各种飞行状态下能够提供稳定且安全的飞行表现。然而,油门台与飞行控制系统之间的匹配问题常常面临复杂的技术挑战,包括不同飞行状态下的动态适应性、操控精度的保证

以及系统响应的及时性。因此,对飞机油门台操纵特性与飞行控制系统的匹配分析显得尤为重要,本文将对其进行深入探讨,旨在为油门台设计及飞行控制系统优化提供切实可行的策略和理论支持。

2 飞机油门台操纵特性分析

2.1 油门台的基本构造与功能

油门台是飞行器操控系统中用于调节发动机推力或功率的关键部件,通常由操纵杆、电子传感器、液压或机械驱动系统组成。油门台通过控制推进系统的燃料流量,实现对发动机输出的精确调节。其基本构造包括一个手动操控部件,用于飞行员输入操作信号,一个反馈系统,用于实时传输操控数据,并通过电子系统连接到飞行控制系统。油门台

【作者简介】邹坤君(1993-),男,中国山东烟台人,本科,工程师,从事油门台产品、高度表等产品市场开发研究。

的操作简便性和响应精度直接关系到飞行器的飞行性能和飞行员的操作体验。

2.2 油门台操纵特性的主要表现

油门台操纵特性主要表现为其响应灵敏度和稳定性。在正常飞行状态下，油门台应根据飞行员的输入做出迅速且准确的推力调节，确保飞行器在不同飞行阶段（如起飞、巡航、下降等）都能获得适当的动力支持。操纵特性还表现为操控力的舒适性，飞行员在操作时应感受到平顺的手感，避免出现过大或过小的阻力变化。此外，油门台的响应曲线应具备良好的非线性特性，特别是在高推力需求时，能够精确控制发动机输出，避免出现推力超调或迟滞现象^[1]。

3 飞机油门台与飞行控制系统的匹配要求

3.1 油门台与飞行控制系统的协调性分析

油门台与飞行控制系统的协调性是飞行安全和性能优化的关键。良好的协调性要求两者能够在飞行过程中无缝配合，确保飞行员的输入意图能够迅速准确地转化为发动机推力的变化，同时不对其他飞行控制系统（如自动驾驶系统、飞行仪表等）产生不良影响。飞行控制系统通常通过电子接口与油门台进行连接，飞行员的操作信号通过油门台输入，控制系统则根据实时飞行状态和飞行目标对油门台进行反馈调节。油门台的反馈系统应能够适应飞行控制系统的输入输出要求，确保操控系统能够根据飞行需求做出相应调整。飞行器的不同飞行状态（如起飞、巡航、着陆等）对油门台与控制系统的协调性提出了不同要求，在每种状态下都需要保持油门台与飞行控制系统之间的高效配合。

3.2 操纵特性与控制系统响应的匹配度

操纵特性与控制系统的匹配度决定了飞行员操控飞行器的流畅性与安全性。在理想状态下，油门台应与飞行控制系统高度匹配，保证飞行员操作时的手感舒适且精确。油门台的操纵特性应具备适当的线性响应，使飞行员的推力输入能够在短时间内转化为相应的发动机输出。控制系统的响应时间是一个重要的性能指标，过慢的响应时间会导致飞行器在紧急情况下无法迅速做出反应，从而影响飞行安全。匹配度还体现在飞行控制系统对油门台信号的处理能力上，系统应能够高效地解读来自油门台的信号，并作出适时调整。例如，飞行员在执行急剧加速或减速时，控制系统应能够迅速根据油门台输入的变化调整飞行器的推力输出，确保飞行性能的稳定。

4 油门台操纵特性与飞行控制系统匹配分析方法

4.1 常用匹配分析方法与理论模型

油门台操纵特性与飞行控制系统的匹配分析需要建立精确的数学模型，并结合控制理论框架，清晰描述油门台输入与飞行控制系统响应之间的动态关系。首先，采用状态空间模型来描述飞行器的动力学及控制通道。定义状态变量，

如速度 V （单位： m/s ）、加速度 a_x （单位： m/s^2 ）和推力系数 T （单位： $\%$ ），其中推力系数 T 的变化范围为 $[0,100]$ 。控制变量为油门位置 θ （单位： $^\circ$ ）及其一阶导数 $\dot{\theta}$ （单位： $^\circ/s$ ）。

4.1.1 建立油门台输入与飞行控制系统响应模型

在状态空间模型中，油门台输入 θ 与飞行控制系统响应输出之间的关系可以表示为控制矩阵 C 。假设飞行控制系统的响应矩阵 C 的典型元素为 $C_{11}=0.85$ 和 $C_{22}=0.92$ 。根据这一矩阵，可以通过矩阵传递函数 $G(s) = C \cdot H(s)$ 来建立控制律，其中 $H(s)$ 是油门台的动态特性传递函数，通常形式为 $H(s)=1/(0.1s+1)$ ，该传递函数表示油门台在输入信号变化下的动态响应特性。

4.1.2 频域分析与增益计算

为了分析系统的响应特性，可以采用频域分析方法。对于某一频率 $\omega=1 \text{ rad/s}$ 的响应增益，计算得到 $|G(j\omega)| \approx 0.78$ ，且相位延迟 $\phi \approx -15^\circ$ 。这些数值体现了油门台输入与飞行控制系统输出之间的匹配程度。如果增益较高且相位延迟较小，则表明油门台操纵特性与飞行控制系统之间的匹配较好。

4.1.3 稳定性分析与匹配评估

为了进一步评估油门台与飞行控制系统的匹配程度，采用李雅普诺夫稳定性理论，通过李雅普诺夫函数 $V(x) = x^T P x$ 来构造稳定性分析。要求 P 为对称正定矩阵，且满足 $AT P + P A < 0$ 。此条件确保系统稳定，并为匹配度提供量化依据。

4.1.4 匹配指标与评价体系

在匹配分析中，重要的匹配指标包括系统响应时间、增益、相位延迟和稳定性指标。例如，较高的增益（如 $|G(j\omega)| \geq 0.8$ ）和较小的相位延迟（如 $\phi \leq -10^\circ$ ）表示良好的匹配。对于系统的稳定性，若李雅普诺夫函数满足上述条件，则表示系统在操作范围内保持稳定。最终，评价油门台操纵特性与飞行控制系统的匹配程度时，可以结合这些指标并构建一个综合评价体系，匹配性较好的系统应具备较高的响应时间和较高的稳定性、增益与较小的相位延迟。

4.1.5 匹配度评价标准

为确保油门台与飞行控制系统的匹配性，设定量化标准：增益值在 0.75 以上、相位延迟在 -20° 以内、稳定性指标满足 $AT P + P A < 0$ 时，视为匹配性良好；若增益值低于 0.6、相位延迟大于 -30° ，则匹配性差。通过这些标准，能够为后续的仿真与实验验证提供清晰的指导方针。

通过这些分析方法及评估指标的结合，油门台操纵特性与飞行控制系统的匹配度得以有效量化，从而为后续设计优化提供科学依据^[2]。

4.2 仿真分析与数据验证

在仿真分析中，通常使用 MATLAB/Simulink 等工具建立油门台与飞行控制系统的联合模型。仿真模型中，油门

输入 $\theta(t)$ 作为控制变量输入飞行器整体模型，仿真过程中我们对油门响应与系统输出进行实时分析。设定仿真时间 $t \in [0,60]s$ ，模拟系统在不同时间段的表现。以 $t=5s$ 时施加油门 50% 阶跃输入为例，油门输入由 0% 变化至 50%，输出速度 $V(t)$ 在 $t=15s$ 时达到 280m/s，俯仰角 θ_p 在 $t=12s$ 稳定于 3° ，推力系数 T 在 $t=10s$ 内从 0% 增长至 45%。油门响应时间常数 τ 约为 0.3s。

计算过程与公式代入：

在仿真过程中，控制系统响应的计算涉及使用经典的 PID 控制算法，其中油门位置 $\theta(t)$ 的变化会影响系统输出，如速度 $V(t)$ 和推力 T 。PID 控制器的控制律公式为：

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int e(t) dt + K_d \cdot \frac{de(t)}{dt}$$

其中， $u(t)$ 为控制信号（油门位置调整值）， $e(t)$ 为误差（目标值与实际值之间的差异）， K_p 、 K_i 和 K_d 分别为比例、积分和微分增益。设定控制增益为 $K_p=1.25$ 、 $K_i=0.15$ 、 $K_d=0.05$ ，根据这些参数调整油门台响应，保证系统的稳定性与精确性。

一致性好的依据如下：仿真结果显示，油门台与飞行控制系统之间的响应一致性较好，这一点可通过以下误差指标进行量化：均方误差（MSE）：通过比较仿真输出和理论模型预测值，计算得到 $MSE=0.012$ ，表示仿真结果与理论预测结果的偏差较小，系统响应一致性良好。最大偏差（ Δ_{max} ）：最大偏差为 0.08，表示系统在整个仿真时间内的最大误差小于设定的容许误差范围。稳态误差：仿真数据表明，系统在稳定状态下的误差小于 0.02，进一步证明了油门台与飞行控制系统的匹配性能较高。增益与相位特性：通过生成频率响应曲线（Bode 图）来分析系统在 $\omega \in [0.1,10]rad/s$ 范围内的增益和相位特性。系统增益应保持在合理范围（例如， $|G(j\omega)| \geq 0.75$ ），而相位延迟应控制在 -10° 以内，以保证油门台与飞行控制系统的良好匹配。仿真数据不仅为匹配度的评价提供了参考，也为控制系统的设计与改进提供了数据支持^[3]。

4.3 实验验证的实施与数据分析

实验验证通常在工程机构或飞行试验单位开展，以真实飞机或代表性平台为载体开展油门台与飞行控制系统匹配实验。在中国飞行试验研究院等机构，以某型运输机或教练机为试验平台开展飞行控制与推进系统匹配测试。实验首先安装高精度传感器采集油门位移 θ (mV) 与发动机推力输出 T (kN)、飞行姿态角 α ($^\circ$)、速度 V (m/s)、俯仰角率 q ($^\circ/s$) 等数据。实验设置水平转场、爬升和大迎角操控等工况，固定油门台输入在 $\theta=30\%$ 、 45% 、 60% 等点进行稳态测试。在 $\theta=45\%$ 输入条件下测得 T 输出稳定在 $35 kN \pm 0.5 kN$ ， V 在稳定巡航时维持在 $230 m/s \pm 2 m/s$ ，俯仰角 α 在 $0^\circ \pm 0.3^\circ$ 范围内维持稳定。在爬升实验中，控制系统将油门指令调整到 $\theta=70\%$ ，对应推力 $T \approx 42 kN$ ，飞行器在 50 s 内完成由 $V=210 m/s$ 提升至 $V=240 m/s$ 的过程，

俯仰角变化在 5° 范围内。数据采集频率设置为 500 Hz，确保系统动态响应数据完整。实验结果对比理论匹配指标可计算匹配误差为 $E_\theta - T \approx 0.04$ 、 $E_V - q \approx 0.02$ ，表明实验和理论计算一致性较高。整个实验过程采用 GPS 和惯性导航系统（INS）辅助测量，保证实验数据的精确性和可信度，数据分析显示不同工况下匹配性能在可接受范围内。实验验证为油门台性能评估和飞行控制系统优化设计提供了真实数据支撑，详情见表 1。

表 1 某型运输机的油门台与飞行控制系统匹配实验数据分析表

实验项目	油门台输入 θ (%)	推力 T (kN)	速度 V (m/s)	俯仰角 α ($^\circ$)	俯仰角率 q ($^\circ/s$)
稳态测试 (低油门输入)	30%	12.5 ± 0.5	180 ± 3	0.0 ± 0.2	0.1 ± 0.01
稳态测试 (中油门输入)	45%	35 ± 0.5	230 ± 2	0.0 ± 0.3	0.1 ± 0.02
稳态测试 (高油门输入)	60%	40 ± 1.0	240 ± 5	0.1 ± 0.2	0.2 ± 0.03
爬升测试	70%	42 ± 0.8	240 ± 5	5.0 ± 0.5	0.3 ± 0.05
稳定巡航测试	45%	35 ± 0.5	230 ± 2	0.0 ± 0.3	0.1 ± 0.02

5 结语

通过对飞机油门台操纵特性与飞行控制系统匹配分析的研究，我们深入探讨了油门台的基本构造、操纵特性及其影响因素，并分析了飞行控制系统与油门台之间的协调性和响应匹配度。实验和仿真数据验证表明，油门台与控制系统的匹配对于提高飞行器的操控性能和飞行稳定性至关重要。这一结论来源于对油门台输入与飞行控制系统响应的分析，良好的匹配能够确保飞行器在不同飞行状态下的稳定性与精确控制。基于此，我们提出了油门台操纵特性优化方法和飞行控制系统匹配改进措施，并展望了未来技术对匹配优化的影响。随着技术的不断发展，油门台与飞行控制系统的匹配将得到进一步提升，为飞行器的安全性与操控性提供更强保障。这些研究成果不仅对飞行器设计与优化具有重要参考价值，也为未来的航空技术发展提供了理论支持。

参考文献

- [1] 姜本山.基于429总线的飞机油门操纵杆自动控制系统研制[D].导师：李霞.哈尔滨工程大学,2020.
- [2] 丁忠伟.某型直升机发动机油门操纵调整和故障排除[J].航空维修与工程,2019,(10):100-102.
- [3] 台春雷,李丹丹,韩梅.某型飞机发动机操纵力控制工艺研究[J].飞机设计,2017,37(02):64-67.
- [4] 王晓成,乔茂,张勇,毛晓珺,张铁军,贺轶斐.上海航空机械有限公司,陆军装备部驻上海地区航空军事代表室.一种直升机机械备份油门操纵技术[Z].项目立项编号:XCSSL761SHJ12001A.鉴定单位:陆航驻上海地区军事代表室.鉴定日期:2013-09-11.
- [5] 李应涛.舰载飞机的进场动力补偿和自动油门控制系统设计[D].导师：徐利梅.电子科技大学,2007.

Electric Power Plant Electrical Automation Monitoring Technology Based on Blockchain

Jian'an Wang Baizhao Zhang

Huadian Laizhou Power Generation Co., Ltd., Yantai, Shandong, 261400, China

Abstract

With the continuous expansion of power plant operations and increasing complexity of equipment systems, electrical automation monitoring systems face escalating security requirements. Traditional monitoring technologies exhibit limitations in data accuracy and system response latency. To address these challenges, this paper proposes a blockchain-based solution for electrical automation monitoring systems. Using a real-world power plant as case study, experimental results demonstrate that the blockchain-enhanced system significantly improves fault detection accuracy, enhances operational stability, and achieves faster control response times.

Keywords

blockchain; power plant; electrical automation monitoring technology

基于区块链的发电厂电气自动化监控技术

王健安 张百兆

华电莱州发电有限公司, 中国·山东 烟台 261400

摘要

随着发电厂发展规模日益扩大与各种设备系统结构愈发复杂, 电气自动化监控系统面临的安全要求逐步提升。在传统监控技术中, 数据准确性有待加强, 系统响应存在一定程度的延迟。为了改变现状, 文章以区块链技术为基础, 分析构建电气自动化监控系统的方案。文章以某发电厂为例, 通过开展实验, 说明应用区块链技术的电气自动化监控系统对故障检测准确度大幅度提升, 系统运行更加稳定, 对控制响应速度更快。

关键词

区块链; 发电厂; 电气自动化监控技术

1 引言

发电厂利用发电机和变压器等电气系统将一次能源转化为电能, 并输送到电网中, 其运行状态与电力系统的安全性和可靠性密切相关。随着电网规模日益扩大, 运行方式愈发复杂, 发电厂对电气自动化监控系统的性能提出更加严格的要求。传统发电厂中, 电气监控系统主要依靠 PLC、DCS、SCADA 系统, 通过对现场数据进行采集与集中化处理, 确保运行状态得到实时化监测。虽然大部分发电厂有自动化监控系统, 但在提升电气自动化水平的过程中, 监控数据的真实性与可靠性, 操作记录是否能够追溯, 不同系统之间的协同度是否可靠, 则起到尤为关键的作用。区块链技术具有去中心化特征, 将数据写入后, 便不会再轻易修改数据, 同时, 可随时对操作和数据来源进行回溯, 这些特征可以有效保证发电厂电气监控数据的安全性和可靠性。文章以某发

电厂为研究对象, 分析将区块链和电气自动化监控系统融合的方法, 构建专门的电气自动化监控系统, 通过实验验证其具体应用效果。

2 发电厂电气自动化监控系统设计

2.1 总体结构

在发电厂电气自动化监控系统中应用区块链技术, 构建专门的自动化监控系统。系统主要包括电源、数据采集、数据处理、区块链网络、控制执行。电源模块是整个系统的供电基础单元, 负责为各个模块提供稳定的电能支持。数据采集模块中, 通过合理布置电流、电压和温度等传感器, 持续采集设备运行数据, 并将数据传输至数据处理模块和区块链网络模块。数据处理模块主要对各种采集的数据进行预处理, 提取关键指标, 判断设备是否正常运行。区块链网络模块是系统的核心模块, 负责将采集和处理的数据进行格式校验、字段解析, 并做好数据加密处理和存储, 避免数据遭到篡改。控制执行模块根据区块链模块的分析结果执行相应动作, 保证设备运行安全、可靠^[1]。

【作者简介】王健安(1992-), 中国山东德州人, 工程师, 从事电气工程研究。

2.2 硬件结构

电气设备诊断模块主要用于诊断设备的故障和设备运行状态,主要包括电流检测部、磁场检测部、信号处理装置、中央处理装置、显示装置和操作装置。信号处理装置负责将传感器采集到的信号整理为中央处理装置可识别的数字化信号。构成这一装置的主要子部件如下:一是放大电路,负责放大微弱电信号的幅值,提高信号强度,对部分干扰形成抑制;二是 A/D 转换器,将连续变化的模拟信号转为离散数字信号;三是输出电路,保证信号的稳定性,将信号以可靠的方式传给中央处理装置;四是波形选择电路,结合需求筛选特定频段和特定类型波形,将无关波形和干扰过滤,保留有效信号。系统主要对有用信号的频段进行针对性放大处理,随后, A/D 转换器将模拟信号转化为数字信号,通过输出电路将信号传输给中央处理装置。中央处理装置的主要硬件有波形记忆单元、主存储单元、输入/输出接口。该装置的主要功能是对监测数据进行分析 and 计算,并将其写入存储单元。系统通过开关对检测方式进行切换,将开关切换至电流检测部位置时,系统会对设备的电流信号进行优先采集,根据电流的各项参数,对设备的运行状态进行判断^[2]。

将开关切换至磁场检测部位置时,系统利用感应器对磁通量信息进行测定,判断是否存在故障。显示装置和操作装置分工明确,前者用于输出可视化信息,后者用于接收人工指令,方便现场运维人员随时查看运行状态,对故障进行迅速定位,为维护等工作提供支撑。

2.3 区块链网络模块

区块链网络模块负责将所有监测数据和操作记录进行回溯,满足后续分析和责任划分等工作需求。这一模块专门对电气设备运行数据进行统一处理,对数据进行加密存储,构建完善的区块链共识机制,确保各节点之间的数据状态一致,满足后续自动化控制与运行分析的需求。

数据采集模块随时对电流、电压和温度等参数进行实时化采集,并将其传输至区块链网络模块。依托区块链智能合约,对原始数据进行分析,并将其划分为不同类型,结合电气设备的运行特征与预设要求,对数据状态进行标识,将其分别划分为正常、预警、异常等类型。这一过程充分考虑到设备历史运行信息与当前工作情况,保证判定依据多元化,提高诊断的准确性。对状态分析完毕后,系统结合区块链的标准交易格式,将原始监控数据和最终判定结论进行打包处理,将其正式纳入区块链网络中。基于链式数据结构,系统将新生成的数据块与前一区块进行关联。对数据块进行

存储时,按照时间的先后顺序,以串联的方式存储,避免设备监测记录出现断层和缺失,有效保证设备数据的完整性。每一个数据块均包含四样内容,分别为设备标识、记录时间、运行状态摘要、加密校验信息,确保数据的完整性和可追溯性,避免随意篡改记录。为避免数据被人篡改,在区块链网络中,采用加密校验机制对正式上链前的数据进行验证,确定其符合要求,方可将数据写入。在共识机制的作用下,每个节点会对新增加的数据进行确认,保证各节点存储的区块、数据和顺序相同,避免出现数据冲突。即使某个节点出现异常,也不会对整体监控数据的可信度造成影响^[3]。

2.4 控制执行模块

结合区块链网络模块的分析结果,控制执行模块可对发电厂的电气设备开展自动化控制。其中,故障报警模块承担着重要的职能,一旦设备出现问题,该模块会在第一时间发出警报。在系统中,对电流、电压、温度和磁场等关键指标设定安全阈值,对参数进行监测时,一旦发现其超过阈值,系统会自动进行报警,向断路器和开关发出切断电源的指令,及时将出现故障的设备断电与隔离,待到运维人员将故障排除后,设备会恢复正常运行。若在短时间内无法将故障排除,需启动备用设备^[4]。

3 实践应用验证

在本研究中,将某一发电厂为研究对象,使用本设计方案,对系统的功能进行验证。该发电厂中配备发电机、主变电气和相关电气设备,可充分满足本地区的用电需求。传统的监控系统存在以下缺点:一是数据容易被篡改,可信度较低;二是出现故障时,不能在第一时间响应和处理故障;三是数据存储的安全性较低。本研究在该发电厂中部署基于区块链技术的电气自动化监控系统,对关键设备进行不间断监测。

3.1 系统性能评估

为全面评估区块链发电厂电气自动化监控系统的效果,在本研究中,将该系统与传统监控系统进行对比测试,以验证新系统性能。对比时,不仅要关注其表面,还要设定相应的性能指标进行对比和评价:一是发生故障时,系统是否可以对其进行准确诊断,是否能够准确预报,是否可减少疏漏;二是系统长时间运行时,是否会出现死机、卡顿、掉线等情况;三是发生故障后,系统能否在第一时间做出响应;四是数据存储安全性是否有保障;五是能否追查到每一条数据的源头,是否可对数据进行全过程检查与核对。明确评价指标,可以保证方案评估得到量化。验证结果如表 1 所示。

表 1 系统性能对比

系统	故障检测准确率 (%)	系统稳定性 (%)	控制响应时间 (ms)	数据存储安全性 (%)	数据可追溯性
传统系统 A	91.2	92.5	950	88.0	否
传统系统 B	93.5	94.0	780	90.5	否
基于区块链系统	98.7	99.2	220	99.0	是

根据表1可知,以区块链为基础的监控系统各项指标均优于传统监控系统,其故障检测率达到98.7%,说明该系统可对设备的异常状况进行迅速准确识别,可进一步减少系统所面临的安全隐患,减少设备出现故障的风险;系统长期运行的稳定性为99.2%,很少出现死机、卡顿和掉线等问题,可充分满足发电厂对连续监控的要求;控制响应时间缩短为220 ms,远高于人工检测和传统模式,说明一旦发现故障,该系统可迅速进行报警、跳闸和切换等操作,避免故障范围扩大;在该系统中,采用哈希加密和多点分布式链式存储的方式保障监控数据的安全,操作人员可对每条数据进行追溯,大幅度提高数据安全等级。

综合分析表明,该系统不仅能够满足发电厂对监控的不间断和低延迟等需求,还可以保证数据安全可靠,避免数据遭到篡改,基于区块链技术的优势,确保每条记录可查可验,在推动发电厂迈向智能化建设的过程中提供强大的技术保障。

3.2 数据加密存储能力评估

采用模拟电能计量数据开展仿真实验,通过构建典型压力场景,对系统的高频采集和加密存储操作进行模拟,验证系统在复杂场景下的性能。对系统存储效率进行评估时,主要使用存储拥塞率,这一数值越小,越说明系统的存储数据通道顺畅。在本研究中,将三套不同系统进行对比,主要以数据量大小、超高数据压力等不同负载条件为主,分析其存储性能,结果如表2所示。

表2 系统数据存储能力对比

系统	数据采集频率 (次/分钟)	存储拥塞率 (%)	加密稳定性 (%)
传统系统 A	6	18.5	90.2
传统系统 B	12	12.3	92.8
基于区块链系统	20	5.1	98.7

实验结果显示,在高频次采集数据压力场景下,该区块链系统的存储拥塞率较低,约为5.1%,与传统系统相比,其数值明显更低,这意味着系统能够始终对海量化和实时化数据进行处理,同时不会降低数据存储效率。数据加密的稳定性为98.7%,可有效保证监控数据在传输和存储的过程中更加完整,避免其遭到破坏。综合这些实验结果可以看出,将区块链与加密存储机制相结合,可以有效提高监控数据的安全性和可靠性,确保数据在第一时间得到存储和追溯。

3.3 电气设备监测结果分析

采用基于区块链的监控系统对发电厂的重要电气设备进行不间断监测,如发电机和主变压器,对其运行数据进行实时化采集。在实验中,该系统可及时发现设备运行的异常现象,自动执行报警、断电、调节等操作。文章结合具体案例,对系统在实际应用中的效果和进行分析。

表3 发电厂设备监测案例

设备	监测参数	异常阈值	实测值	系统响应
1号变压器	温度(°C)	85	98	报警+自动切断电源
3号主发电机	电流(A)	550	580	报警+调整负载
2号变压器	绕组温升(°C)	90	87	正常运行

以1号变压器为例,当系统检测到其温度超过预先设定的数值,系统会立刻触发报警,同时及时切断电源,避免温度持续升高,保障设备安全,减少出现安全事故的可能性。接到报警和断电信息后,运维人员可通过远程监控平台对故障设备、参数等相关信息进行实时化监测与获取,确认故障的类型和位置,制定针对性检修计划,安排维修。结合现场检查结果可知,变压器绕组有杂物,其绝缘层已经老化,这与系统监测到的温度超标信息相符。

结合前面所有实验和数据对比分析结果可知,该区块链电气自动化监控系统具有以下几方面优势:一是持续监测发电机和主变压器等核心设备的运行参数,精准获取运行状态,为后续分析和处理工作提供参考依据;二是一旦检测到设备出现异常情况,系统能够第一时间进行报警、断电等动作,运维人员可通过远程监控的方式确定故障,并开展现场维修;区块链具有不可篡改等特点,可保证数据及时得到记录与追溯,操作人员可随时对数据进行查询,了解设备的运行情况,制定科学的运维计划。实验结果证明,该系统在实际应用中安全可靠,在推动电厂数字化建设方面起到有效的推动作用。

4 结语

文章以区块链为基础,探讨发电厂构建电气自动化监控系统的思路,结合具体案例,选择实际应用场景,对该套系统进行测试和验证。研究结果表明,该系统可以有效提高监控的实时性,避免监控时出现卡顿和延迟,还可以保证监控数据更加安全可靠,确保其全程得到追溯,进一步提高电器设备运行的安全性和可靠性。将区块链与电气自动化监控系统相结合,可充分结合发电厂的运行与管理需求,为其提供强大的技术支持。后续研究中,需充分引入人工智能和数字孪生等技术手段,进一步提高监控的精准度与管理水平,推动发电厂监控迈向智能化方向。

参考文献

- [1] 周刚,舒忠虎,黄振兴,等. 基于区块链的电力企业漏洞管理系统研究[J]. 湖南电力, 2025, 45 (06): 26-32.
- [2] 马廷霞. 区块链赋能农产品供应链金融的数字化转型[J]. 全国流通经济, 2025, (21): 129-132.
- [3] 胡晓禹,刘立静,杨淑珍. 基于区块链技术的粮储管理系统应用研究[J]. 粮食科技与经济, 2025, 50 (05): 80-84.
- [4] 杨梓萌,丁嘉熹,陈丽惠,等. 基于区块链技术的调度机房设备全天候监控[J]. 云南电力技术, 2025, 53 (05): 15-19.

Research on Trading Mechanism and Operation Strategy of Power Supply Company in Electricity Market under New Power Reform

Xiaoyu Li Xin Zhang Yunfang Xu Lihong Cheng

Inner Mongolia Electric Power (Group) Co., Ltd. Baotou Power Supply Branch, Baotou, Inner Mongolia, 014010, China

Abstract

The implementation of the new electricity reform policy has triggered intense competition among major power retailers, disrupting the traditional fixed transaction mechanisms in the electricity market and fundamentally altering the operational models of power supply companies. For power supply companies, stable electricity users remain the cornerstone of sustainable profitability. By respecting customers, delivering high-quality services, and resolving their issues, companies can prevent customer attrition, maintain their influence in the electricity market, and maximize their interests in the trading market. This paper examines the impact of the new electricity reform on the transaction mechanisms of power supply companies and proposes effective strategies to enhance their operational management.

Keywords

electricity market; trading mechanism; operational strategy; new electricity reform; power supply company

新电改下供电公司参与电力市场的交易机制与运营策略研究

李晓宇 张鑫 徐云芳 成丽红

内蒙古电力(集团)有限责任公司包头供电分公司, 中国·内蒙古 包头 014010

摘要

新电改政策落实后, 各大售电公司之间形成激烈的竞争局势, 电力市场的交易机制打破了传统固定模式, 供电公司的运行也与以前大不相同。对于供电公司而言, 稳定的电力用户才是维持正常盈利的根本, 而供电公司只有尊重用户并为其提供优质服务, 帮助用户解决问题, 才能避免用户流失, 从而保持自身在电力市场中的影响力, 确保供电公司在交易市场中的利益最大化。本文探讨新电改对供电公司交易机制的影响, 并提出有效提升供电公司运营管理的策略。

关键词

电力市场; 交易机制; 运营策略; 新电改; 供电公司

1 引言

电力行业是输电、供电、生产、消费环节为一体的关键产业, 社会经济发展离不开电力行业的支撑。新电改政策有效明确了电力市场交换结构, 改变了传统的市场结构, 其中售电相关的市场化改革是新一轮转型的重点要求。在新电改过程中, 供电企业需要摒弃传统的交易方式, 提出与新能源系统相适应的销售机制, 确保供电公司的优势最大化, 从而大力推进供电公司的运营效率。

2 新电改对供电公司交易机制的影响

2.1 售电侧竞争激烈

本轮新电改的一个明显亮点是售电侧放开。最新发布

的电改文件明确指出, 对于售电侧业务必须有序开放, 确保电力资源实现资本化运作, 稳步进入资本市场的大门^[1]。在现阶段多买多卖的局势中, 供电企业垄断销售运营方式必须进行调整, 电力资源的销售也有更多新的售电公司参与。在新电改政策下, 售电主体数量增多, 导致供电公司在市场中面临的压力也越来越大, 实际上, 这对于电力市场而言, 更有利于形成公平的交易机制。

2.2 供电公司盈利模式与投资理念改变

新电改明确指出要促进电力行业的市场化, 供电企业以往的固有模式需要进行改变。在过去电网企业是通过电力购销差价获取利润, 但新电改提出“单独核定输配电价”, 这是新电改9号文件的独特之处, 其中指出单独核定输配电价的电力用户, 需要进行公示, 并由整个社会进行监督。这种定价模式需要完成覆盖成本并实现合理收益的要求, 以电压等级为依据进行核定, 而电力用户则可以基于这种定价进

【作者简介】李晓宇(1975-), 男, 中国内蒙包头人, 本科, 工程师, 从事电力市场发展及电力工程建设研究。

行费用的支付。加之大客户直购电业务的大范围推广，导致供电企业失去了一些重要的客户，这也在一定程度上影响了营销收入。

2.3 电力交易模式的改变

过去供电企业属于垄断行业，处于统购统销的角色，所以在交易市场几乎没有竞争压力。随着增量配售电业务的陆续开展，过去的交易机制也发生了明显变化。交易机制的变化，将过去的供电方案等各项业务进行分割。原本归属于供电公司的业务，由于其他电力机构的设立，这些业务被分离出去。这种新模式的尝试导致电网企业涉及的营销业务被分割出来。

2.4 市场准入标准的规范

新电改9号文件指出，需要对符合标准的交易方提供自主选择权，目前这一建议正处在探索中。而这意味着供电企业需要将各方面的因素进行明确，包括电量、电价以及售电主体，基于输配电价进行过网费的支付，并直接与电网企业沟通合同事宜，从而使双方的交易能够面对面进行，无须引入其他环节。但对于短期及即时的销售过程，则需要引入专业的交易机构来促进双方实现合作，以确保各自在交易过程中均实现获利。与此同时，需要针对电力交易市场制定相应的规范，让各个机构按照标准参与市场交易。而在制定交易机制时，应考虑交易方的长期盈利，确保机制能够稳定实现最大利润。

3 新电改下供电公司参与电力市场的运营策略

3.1 建立多渠道销售体系

电网电力交易中心和电力消费者是现阶段供电公司的三个分销渠道。随着新电改政策逐步开展，大部分电力已经不是由电网直接发电，直接发电的形式几年后将逐渐消失。所以，供电公司的运营需要向能源贸易方向靠拢，将合作对象转向能源用户，并不断探索更好的交易机制^[2]。

发电公司重点要做的不是创建交易计划，而是开发新的交易机制，在交易过程中，发电公司也可以同配电企业合作，并灵活选择交易方式。而在选择合作对象时，应重点考虑有较高电力需求的用户。发电公司需要有自己的销售体系，并确保能够直接与用户进行链接。这样可以确保有更多的用户，从而有效促进风电场的工作效率，并确保在电力市场有更多话语权。供电公司需要结合用户的要求，与该地的能源企业形成良好合作关系，探索更适用于消费者的使用模式。通过改变销售观念，让电力用户更加信任供电公司，从而不断为用户提供完善的用电服务。

3.2 提供差异化电能产品服务

电力供应是发电企业最基本业务，这也是人们对发电企业的直观印象，但是随着电力改革的持续深入，大部分的电能产品已经发生了战略性变化，以应对电力市场的新规则。发电企业需要在深入落实能源政策的前提下，不断满足

大客户的各项需求，并不断提供有力支持。

一方面，发电企业需要持续优化产品质量，这样才能确保公司实现能源的稳定供应。与此同时，发电公司需要进一步提升生产力，以营地外部环境的多种变化，并对合作的各种电能产品进行严格把关。而且需要根据当前的政策，将电力消费者需求、市场价格、新能源生产成本进行有效组合，以实现电力的最佳生产效率。

另一方面，在电力服务方面也需要呈现差异化。电力产品有一定的特殊性，电力本身和消耗的能源并没有差异，电力产品应是发电厂提供的附加值。在电气化政策的不断推动下，电力市场的交易也有了新的变化，发电企业必须为用户提供新服务项目。比如，针对用户的切实需要，提供适用的服务项目，包括用电方面的咨询，或者节能方面的服务等。供电公司通过这些尝试，可以更早在交易市场中获得良好的经济效益。

3.3 建立个性化销售体系

作为供电公司，在开展销售方面的宣传时需要面向电网企业与电力用户，并与其建立合作，做好电力产品及电力服务。在销售体系中，大部分消费者受传统观念影响，对供电公司的广告宣传并没有明显的兴趣，供电公司通过传统的广告与电话营销方式，并不会对业务的销售效果产生积极影响。所以，供电公司需要改变传统的营销观念，建立个性化销售体系。

首先，需要基于电力消费者的需求，为其提供差异化的广告计划，并基于用户特征制定针对性的服务内容，从而提升用户的兴趣。例如，针对电力消耗量比较大的用户，则可以从节能管理为切入点，在输电线路的设计上进一步作出合理化的调整。同时，结合用户的具体需求，为其提供绿色电力交易、减排等相关服务，并为企业设计合理的电气元件。企业在关注发电业务的同时，也需要重视电能产品的服务，这样才能取得用户的满意与信任。

其次，供电公司需要与客户形成密切交流的关系，重视用户评价。由于电力客户更倾向于与更具实力的公司进行合作，因此，传统的门到门销售是行不通的，发电公司应将重点放在与当地政府的合作上。此外，发电公司需要与电网公司建立良好的合作，重视用户的需求，积极为用户提供优质的用电服务，这样才能充分保证公司的盈利效果。

3.4 实施灵活的售电价格策略

随着电改政策的持续推进，电能产品的商品属性也日益显化。但这并不意味着市场应推行低价销售策略，如果企业在营销过程中选择低价销售方式，那么势必会导致电力市场形成恶性竞争局面，从而影响企业的整体收益^[3]。所以，发电企业需要改变价格观念，通过灵活的售电价格策略，以便在交易市场中实现利益最大化。

一方面，企业需要采取多样化的定价方式。目前发电企业与用户所签订的购售合同，采用的是固定价格，以峰谷

模式对电力消费者进行划分,消费者采用的电压水平不同国家电网在结算时也会进行差异化处理。因此,在与用户达成合作时,对于售电价格可以进行适当调整,以获得用户的认可,确保供电公司在交易市场中实现良好的运营效率。

另一方面,针对特定的用户,可以对电价进行合理化下调,比如对于知名度较大或者用电量大的用户,与这类用户进行合作能够在一定程度上实现较好的宣传效果,方便有更多用户选择电力服务。在供电服务过程中,供电公司可以适当采用额外的服务项目来吸引消费者,从而帮助公司实现更好的经济效益,并保持用户数量的进一步增长。

3.5 建立专业营销团队

对于供电公司来说,优秀的营销团队是非常重要的,供电公司应该积极完善部门职能,并建立优秀的营销团队,从而帮助公司以更先进的思想参与电力交易,促使各项电力业务实现协调运行。虽然发电公司不是生产单位,但依然需要开展必要的营销工作,才能获得更多用户资源,以便在电力市场拥有更多竞争力,实现公司的良性发展。

首先,在组建营销团队方面,供电公司需要培养电力营销专家。就目前的实际情况来看,供电公司的营销团队普遍缺乏专业素养。对此,公司应该引入更多专业人员,加强对营销人员专业技能的培训,并引入外部的专业营销人员,对公司的营销团队进行专业技能的培训。确保营销团队掌握电力交易市场的规则,具备较强的职业素质,不断提升用户在用电方面的认可。同时,还需要积极与所在地区能源行业的营销员工进行经验交流,在互相的交流中了解更多电力交易市场的信息,以更好地促进公司各项业务的开始^[4]。

其次,需要进一步强化营销人员的服务理念。供电公司要根据市场的变化调整营销战略,而负责营销的人员,需要充分了解用户的消费轨迹,了解用户在用电方面的真实需求。与此同时供电公司还需要向其他的发电公司学习,在营销战略中将客户的需求放在第一位。

最后,供电公司需创建专业的营销系统。目前,供电公司的营销工作占比较小,没有专门负责营销的部门,所以有必要创建系统化的营销体系,以确保营销部门的工作有明确的目标。在开展营销活动时,要有明确的分工,确保每个员工具有基础利益。同时,供电公司还应该建立相应的考核与激励机制。对于供电公司来说,保持与电力交易市场的密切联系,才能够有效保证企业在市场竞争中的利益不受影响。如果对营销人员没有明确的激励规则,也会影响人员的工作

质量,所以,公司应当制定合适的奖惩规则,将营销人员的薪酬与实际业绩进行关联,而不是采取固定工资的方式^[5]。

3.6 树立良好企业形象,优化服务流程

公司的物质环境在很大程度上能够反映公司的文化背景、经济实力与经营环境,给电力消费者留下良好的印象非常重要。供电公司需要遵守内部设定的标准,积极展现企业文化,不断获得电力消费者认可与支持。供电公司可以通过其公众号展示公司的文化与经营管理情况,以便在消费者心中树立良好的形象。对于电力用户来说,简单的服务流程是最直观的销售指引牌,用户在了解供电公司的销售数据时,往往是通过服务流程来感受的。为了有效稳定客户数量,避免客户流失,供电公司可以对电力用户的行为轨迹进行模仿,从而实现缩短交易过程的目的,而对于一些无法避免的流程,可以进行适当优化,并且针对可能造成电力用户流失的环节,都需要及时进行优化^[6]。

4 结语

供电公司在参与电力市场交易的过程中,需要加强运营管理,确保实现良好的社会效益与经济效益。在新电改趋势下,企业想要做好电力市场的运营管理,就需要对当前运营工作中存在的问题进行明确,充分了解新政策对于供电公司的运营与交易的影响,这样才能更有针对性地提升供电公司运营效率,实现更好的经济效益。供电公司只有做好电力市场的运营管理工作,才能保障公司业务稳定运行,才能确保公司经营效益,进而全面提升供电公司的发展水平。

参考文献

- [1] 刘军,李凌阳,吴梦凯.分布式抽水蓄能电站与新能源发电联合参与现货市场的两阶段优化运行策略[J].浙江电力,2023,42(02):50-58.
- [2] 汤旻,刘翊枫,王静.电力市场售电公司最优购售电量决策模型及其应用[J].电力科学与技术学报,2022,37(04):3-12.
- [3] 白雪敏,张如意,徐璐.电改背景下售电商分时电价优化策略研究——考虑用户侧价格型需求响应的分析[J].价格理论与实践,2021,1(10):54-57.
- [4] 孙俊辉.新电改背景下电力行业上市公司财务质量评价——基于因子分析法和聚类分析法[J].中国市场,2024(4):124-130.
- [5] 吴琦.新电价改革形势下基于大数据的地区行业电量预测方法研究[D].天津职业技术师范大学,2024.
- [6] 张宁,孔思凡,邢飞.数字化背景下的中国电力企业项目绩效评价与优化[J].评价与管理,2024,22(1):29-38.

A Case of No-Ray Fault Repair for New Oriental 1000 FADR

Bingyan Lin

Anxi County Hospital, Anxi County, Fujian Province, 362400, China

Abstract

The New Oriental 1000FADR X-ray detection equipment is a core piece of equipment in the field of industrial non-destructive testing. Its operational reliability has a direct and crucial impact on the safety of production operations and the quality of detection results. This study focused on the typical failure of “no X-ray output” that occurred after the equipment had been operating under high load for a long time. It conducted a comprehensive research on the diagnosis and maintenance practices of the entire process for this fault. Through the construction of a systematic fault tree model, the top event of this fault was gradually decomposed into potential failure forms of subsystems such as the high-voltage system, X-ray tube components, control system, and cooling system. Finally, the cause of the fault was accurately identified. After the equipment was repaired, it was verified that the operational stability of the equipment had significantly improved. This study aims to provide a reference for the stable operation of similar high-energy X-ray detection equipment.

Keywords

X-ray detection equipment; no X-ray output fault; fault diagnosis

新东方 1000FADR 不出射线故障维修一例

林炳炎

安溪县医院, 中国·福建 安溪 362400

摘要

新东方1000FA型DR机通过数字成像技术实现头颅、胸部、腹部、骨骼等多部位进行诊断检查,其运行可靠性对诊断结果质量具有直接影响。此次针对该设备在使用中出现的“无射线输出”故障,开展了系统诊断及维修实践的全流程工作。通过构建系统化故障树模型,将该故障顶层事件逐级拆解为控制系统、高压系统、射线管组件、平板探测器等子系统的潜在失效形式,最终精准定位故障成因。设备维修完成后,经验证,设备运行恢复正常。

关键词

X射线检测设备; 不出射线故障; 故障诊断

1 设备故障现象具体描述及分析

1.1 设备故障现象及工作原理

2024年3月12日,一台累计运行时长约6500h的新东方1000FADR型X射线检测设备,在使用时突发故障,核心故障表现在设备全程无任何声光报警信号发出,布设于射线窗口正前方的经计量校准的射线剂量仪读数持续为零,经约1min持续观测,设备始终无射线输出,操作控制界面亦未弹出任何异常故障代码。该设备的工作运行原理是控制系统根据拍摄部位预设的管电压、管电流和曝光时间,输出相匹配的控制指令信号,高压发生器接收该控制信号后,产生相应的高压和电流加载至射线管产生X射线,生成的X射线穿透被检查患者检查部位后由平板探测器接收,设备

AEC功能根据探测器接收到的实时感光量,自动计算最佳管电压、管电流和曝光时间参数并迅速调整,既确保影像质量的同时降低辐射剂量,减少辐射对患者、公众人的影响。设备系统由门机联锁和紧急开关等安全联锁保护装置,系统运行过程中一旦出现任何异常,将立即触发保护性停机程序,终止设备运行。

1.2 基于故障树的根源分析框架

此次采用故障树分析方法搭建专项分析模型,将设备“无射线输出”界定为顶事件,并对其进行逐级向下的逻辑拆解与要素展开,具体分析框架见图1。该故障树模型直观且全面地厘清了所有可能诱发顶事件的底层失效原因,为后续开展分环节逐项的故障诊断工作,构建了系统性的核查依据与完整的检测清单。

【作者简介】林炳炎(1970-),男,中国福建安溪人,本科,工程师,从事医疗设备管理维护研究。

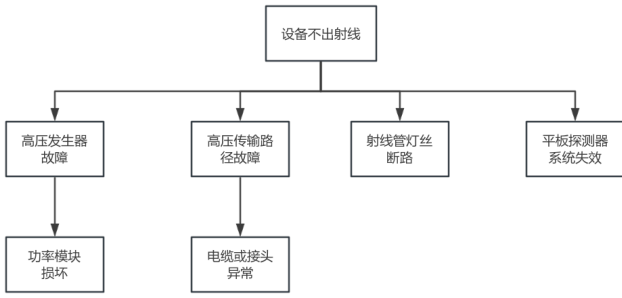


图1 新东方 1000FADR 不出射线故障树分析图

1.3 关键部件故障机理剖析

根据该型号设备的典型故障模式与本次无报警的故障表征，选取多个高概率底事件开展机理分析^[1]。在高压发生器整流/逆变模块失效方面，高压发生器为设备的核心动力单元，其内置的绝缘栅双极型晶体管模块与整流二极管，长期处于高电压、大电流的高频开关工况，易因热应力累积、电压尖峰冲击或材料老化引发击穿短路或开路故障。在射线管灯丝断裂方面，灯丝作为设备的易耗部件，灯丝断裂后，阴极将完全丧失热电子发射能力，即便高压回路输出正常，设备也无法产生 X 射线。在高压连接界面接触不良方面，高压电缆与射线管、高压发生器间的插接件，受长期热胀冷缩、设备振动等因素影响，会出现接触电阻异常增大的问题。在平板探测器方面，作为数字射线成像系统的核心成像单元，其内部硬件架构由闪烁体、光电二极管阵列及读出电路三大核心模块构成。该部件的典型故障类型主要包含：闪烁体经长期使用发生老化引发的射线转换效率衰减，光电二极管出现器件损坏或暗电流参数异常，读出电路板发生功能性故障，数据传输接口出现接触不良等。上述各类故障均可能造成平板探测器无法正常实现 X 射线信号的接收与光电转换，进而引发成像质量劣化问题，或直接触发系统的保护性停机机制。

2 系统化故障诊断流程与实施

遵循“由简至繁、由外及内”的故障诊断原则，按下述流程开展系统性检测排查工作^[2]。首先，在电源输入环节，对设备输入端子三相电压实施实测，数值均为 389V 且三相平衡度良好，据此排除电网供电异常的故障诱因。进行安全联锁回路检测，采用短接方式对门开关及紧急开关等所有联锁信号进行模拟触发，通过万用表检测 PLC 输入点工作状态及输出继电器动作情况。进行控制信号溯源检测，在下载“出束”操作指令时，利用示波器采集控制板卡向高压发生器传输的“高压使能”信号与“设定电压”模拟量信号（0-10V），初步判定控制系统的指令输出模块工作正常。进行静态绝缘性能测量，运用绝缘电阻测试仪对高压发生器输出端的对地绝缘电阻进行检测，实测数值 > 5000MΩ，设备绝缘性能达标。通过万用表二极管档位对三相整流桥模块进行性能检测，发现其一桥臂正反向电阻均为数欧姆，判定该

桥臂已发生击穿短路故障。进一步对 IGBT 模块的门极-发射极、集电极-发射极间电阻进行检测，未检测到明显短路现象，为保障维修可靠性，将其列为可疑故障器件。进行射线管基础性能检测，将高压电缆与射线管拆解分离，进行射线管基础性能检测，将高压电缆与射线管拆解分离，对射线管阴极灯丝两引脚间的直流冷态电阻进行检测，实测阻值为无穷大，初步判定灯丝发生断路故障。高压电缆接头经目视检测，发现存在轻微发黑与氧化腐蚀的表观缺陷。针对平板探测器的检测作业，需遵循分层排查的流程开展：首要对探测器的供电回路及通信链路的连接状态进行有效性核查，其次可调用设备内置的探测器自诊断程序，或执行图像均匀性检测试验，对其运行状态进行初步判定。若现场具备检测条件，可通过专业测试软件调取探测器的暗场噪声、坏点分布、增益一致性等核心技术参数，依据参数检测结果对探测器的内部故障进行精准定位。

最后，进行故障综合分析与精准定位，结合上述全流程诊断检测数据开展综合分析，最终完成故障精准定位。高压发生器内置整流桥模块发生击穿故障，造成高压生成电路前端环节失效，是导致设备高压无输出的直接原因。射线管阴极灯丝实测阻值为无穷大，证实灯丝已发生物理性断裂，完全丧失热电子发射能力。同时也从技术层面解释了故障发生前设备未出现明显放电打火征兆的原因。高压电缆接头经目视检测，发现存在轻微发黑与氧化腐蚀的表观缺陷。平板探测器经内置自诊断程序完成全面检测后，检测结果显示其成像均匀性指标达标，未检测到显著坏点及条带类缺陷，据此可排除探测器本体存在故障的可能性。经过逐级诊断过程与数据记录，综合判定此次设备无射线输出故障为复合型故障，由高压发生器核心部件损坏与射线管本体故障共同诱发。高压电缆接头的氧化腐蚀问题则界定为设备运行过程中的潜在风险点。

3 维修操作与技术要点

3.1 高压发生器维修

对核心功率元件进行更换，选用同型号三相整流桥模块完成更换，同时考虑到 IGBT 模块已长期服役且处于严苛工作工况，为消除潜在失效隐患，对同型号 IGBT 模块实施预防性更换^[3]。进行标准化安装工艺执行，彻底清除散热器表面的失效导热硅脂，均匀涂覆全新高热系数硅脂，模块固定螺丝的紧固操作采用扭矩扳手实施，遵循对角线紧固原则分两次拧至额定扭矩，确保模块与散热器间的散热接触压力均匀分布。

3.2 射线管更换与预处理

射线管作为设备的核心精密部件，兼具高价值特性，其更换作业需严格遵循操作规范并实施精细化管控。旧管拆卸工序方面，需要精准记录旧射线管在设备机壳内的安装角度及定位销的装配位置，做好清晰标记留存。对设备完成彻

底放电操作后，拆解高压电缆与灯丝电缆的连接节点。新管检测与预处理工序方面，新射线管拆箱后，首先开展外观质量检测，确认管体无碰撞损伤、陶瓷绝缘子无裂纹等外观缺陷。借助专用吊具将完成预处理的新管精准对准安装工位，确保定位销精准入位，保证安装基准无误。采用扭矩扳手实施安装螺栓的紧固操作，遵循对角线分步紧固原则，力矩值严格参照设备技术手册规定执行，确保密封面受力均匀。完成灯丝电缆与高压电缆的精准连接，确保接线牢固无松动。

3.3 高压电缆接头处理

进行清洁打磨处理，拆卸高压电缆铜质接头，采用 600 目及以上细砂纸对其接触表面进行轻柔打磨，彻底去除表面氧化腐蚀层，直至露出均匀金属本色；随后采用无水乙醇与无绒擦拭布对打磨后的接头表面进行彻底擦拭清洁，去除残留杂质与粉尘。进行导电膏涂覆操作，在接头接触端面均匀涂覆一层薄层高品质电力复合脂，其核心作用为降低接触电阻、抑制接触表面氧化腐蚀，并优化接头连接处的电场分布，保障高压传输稳定性。进行可靠连接紧固，将处理完毕的接头重新装配至射线管与高压发生器的对应接口，采用扭矩扳手按规定紧固力矩实施紧固作业，确保接头连接可靠、无松动隐患，满足高压运行要求。

4 维修效果全面验证与长期稳定性评估

4.1 性能指标恢复验证

设备完成维修作业后，优先启动其内置的球管更换后校准程序。该程序可自动完成管电压、管电流及曝光时间的软件校准操作，并同步生成标准化校准报告。工程技术人员可通过核查报告内各核心参数是否处于额定允许偏差范围，例如管电压误差 $\leq \pm 2\%$ 、管电流误差 $\leq \pm 5\%$ ，对设备维修效果进行初步判定。与此同时，可调用设备自带的剂量输出测试功能，在 80kV、100mA、200ms 等常用曝光工况下开展测试作业，观测设备控制界面的剂量显示数值是否保持稳定，并将该数值与维修前留存的额定基准值进行对比分析。若现场未配备专业剂量检测仪器，可采用铝阶梯模体等标准模体进行曝光成像，通过观测成像画面的密度均匀性，对射线输出的稳定性进行间接评估。

4.2 成像质量验证

本设备搭载成像质量自动分析软件，可对检测成像完成均匀性、分辨率、信噪比等核心指标的自动化量化评估，其具体操作流程如下。首先，进入设备质控功能菜单，选定成像质量验证功能模块。依据系统提示，将线型像质计、均匀性模体等标准测试模体精准放置于探测器探测面。选取 80kV、100mA、200ms 的推荐常用曝光参数完成射线曝光操作。系统将对成像开展自动化分析运算，同步输出通过/未通过的定性判定结果，及可识别最细线对、均匀性误差等定量指标数值。若分析结果出现异常，可结合成像伪影的形态与分布特征，进一步甄别故障成因是否指向探测器异常或射线输出系统故障。除此以外，也可依托日常检测获取的临

床成像开展主观评价，通过观测成像清晰度、对比度适配性、伪影存在情况等维度，综合验证设备整体成像性能是否恢复至额定工作状态。

4.3 预防性维护体系构建

基于本次设备故障诊断与维修的实践经验及总结的问题教训，为从根源上降低同类故障的发生概率，构建并严格落实设备预防性维护体系。通过制定分级维护计划、进行关键参数趋势监控与预测性维护、备件管理与人员培训、构建战略备件储备体系方面进行展开。

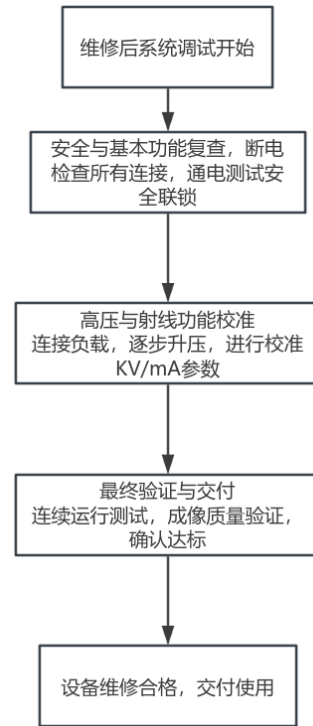


图 2 系统统调与校准流程图

5 结语

本次新东方 1000FADR 型高能 X 射线检测设备无射线输出故障的成功处置，是针对高端技术设备故障开展系统性工程化处理的典型实践案例。本文所梳理总结的故障诊断思路、标准化维修工艺及全流程运维策略，不仅适用于新东方 1000FA 型 DR 设备，其核心技术原理与实施方法亦可推广应用于其他型号的高能 X 射线检测设备，以及各类同类型高压精密电子设备的运维管理与故障维修实践，具备一定技术参考价值。

参考文献

- [1] 成磊,李巧,屈国民,等.数字成像射线检测技术(DR)在GIS设备故障检测中的应用[J].电工技术,2025,(08):210-212.
- [2] 陈庆军,李国光,冯林凯,等.基于X射线数字成像检测技术的组合电器故障定位策略[J].电工技术,2025,(16):220-222.
- [3] 申路,王彪.数字X射线摄影系统平板探测器工作原理分析及故障维修[J].中国医学装备,2022,19(12):208-210.

Research on the Technology R&D Management Model of Aerospace Enterprises Based on Innovation-Driven Development

Shu Tian Xinmeng Wang Jian Song

Tianjin Aerospace Long March Rocket Manufacturing Co., Ltd., Tianjin, 300462, China

Abstract

Against the backdrop of intensified global competition in the aerospace industry and the advancement of national space power strategies, innovation has become the core driving force for aerospace enterprises to break through technological bottlenecks and enhance their core competitiveness. Traditional R&D management models struggle to adapt to the rapid iteration of cutting-edge technologies and the accelerating demands of commercial aerospace, necessitating the establishment of an innovation-driven management system. Based on Porter's innovation-driven theory and considering the characteristics of aerospace enterprises—such as high R&D investment, long cycles, and multidisciplinary collaboration—this paper analyzes the current state and issues of R&D management models in aerospace enterprises and explores the root causes of these problems.

Keywords

Innovation-driven; Aerospace enterprises; Technology R&D; management model

基于创新驱动的航天企业技术研发管理模式研究

田恕 王馨梦 宋健

天津航天长征火箭制造有限公司, 中国·天津 300462

摘要

在全球航天产业竞争加剧与国家航天强国战略推进的背景下, 创新已成为航天企业突破技术瓶颈、提升核心竞争力的核心动力。传统研发管理模式难以适配前沿技术迭代与商业航天快速发展需求, 亟需构建创新驱动型管理体系。本文基于波特创新驱动理论, 结合航天企业技术研发高投入、长周期、多学科交叉的特点, 分析当前航天企业研发管理模式的现状与问题, 探究问题成因。

关键词

创新驱动; 航天企业; 技术研发; 管理模式

1 引言

航天产业作为衡量国家综合实力的战略性高技术领域, 直接关系国家安全与科技话语权。近年来, 全球航天市场格局深度调整, 商业航天崛起催生可重复使用火箭、低成本卫星等新技术需求, 国际竞争对手加速布局前沿领域, 给我国航天企业带来严峻挑战。我国相继出台多项政策, 明确提出优化航天研发资源配置、提升项目管理效率, 推动航天产业向高质量发展转型。航天企业长期依托国家重大型号任务发展, 形成了独具特色的研发管理体系, 但面对技术迭代提速、市场竞争加剧的新形势, 传统模式暴露出流程僵化、创新活力不足等问题。

2 创新驱动与航天企业技术研发理论基础

2.1 创新驱动理论概述

创新驱动理论由美国管理学家迈克尔·波特提出, 其在钻石模型中指出, 国家经济发展需经历要素驱动、投资驱动、创新驱动和财富驱动四个阶段。要素驱动依赖土地、劳动力等基础资源投入, 模式粗放且可持续性弱; 投资驱动以资本投入为核心, 通过规模化扩张和技术引进实现增长, 但易出现产能过剩与投资效益递减。创新驱动阶段以创新作为核心发展动力, 涵盖技术、体制、组织、人力资源等多维度创新, 强调通过原始创新、集成创新和引进消化吸收再创新, 突破核心技术瓶颈, 形成可持续竞争优势。与前两个阶段不同, 创新驱动并非摒弃要素与投资作用, 而是通过创新整合各类资源, 提升要素利用效能与投资回报率。当前我国经济正处于从投资驱动向创新驱动转型的关键期, 航天产业作为高技术密集型领域, 率先进入创新驱动发展阶段, 亟需以理论为支撑优化研发管理体系。

【作者简介】田恕(1987-), 女, 中国黑龙江哈尔滨人, 硕士, 工程师, 从事技术创新项目管理研究。

2.2 航天企业技术研发特点与挑战

航天企业技术研发具有鲜明的行业特殊性，首先呈现多学科交叉融合特征，涵盖航空宇航科学、材料科学、电子信息技术等多个领域，需突破复杂系统集成难题。其次研发周期长、投入规模大，一款新型运载火箭或卫星平台的研发往往耗时数年，研发投入占比超过市场规模的三成，且试错成本极高，任何环节失误都可能导致项目失败。同时，航天研发兼具国家战略属性与市场属性，既要保障重大型号任务的高可靠性要求，又要响应商业航天低成本、快迭代的需求。当前航天企业研发面临多重挑战，一方面重大型号任务保成功压力大，优势资源向成熟型号倾斜，前沿技术研发投入受限；另一方面前沿技术具有不确定性，颠覆性技术识别与管控机制不完善，跨专业协同难度大。

2.3 创新驱动对航天企业技术研发的必要性

创新驱动是航天企业应对国际竞争的必然选择，当前全球航天市场竞争日趋激烈，国际巨头加速布局可重复使用运载器、天地往返运输系统等前沿领域，我国航天企业若缺乏核心技术创新，将面临被技术封锁与市场挤压的风险。创新驱动是突破技术瓶颈的核心路径，航天领域关键核心技术无法依赖引进，必须通过自主创新实现突破，近年来我国百吨级液氧甲烷发动机的快速研制成功，正是创新驱动的典型成果^[1]。创新驱动能优化研发资源配置效率，航天项目因管理不善导致的成本超支可达一至二成，通过创新管理模式与数字化工具，可有效压缩成本、缩短周期。从国家战略层面，创新驱动是建设航天强国的内在要求，政策明确推动航天产业优化研发体系，提升原始创新能力，创新驱动型研发管理模式能推动政策落地，实现航天产业高质量发展。

3 航天企业技术研发管理模式现状分析

3.1 现有技术研发管理模式概述

我国航天企业长期形成以型号任务为核心的研发管理模式，普遍采用总师负责制，明确总设计师、总工艺师等核心岗位权责，构建层级分明的研发管理体系，保障重大型号任务的顺利推进。随着数字化转型推进，部分企业引入数字化协同平台与项目管理工具，搭建覆盖研发全生命周期的数据管理链路，如部分院所采用PDM系统优化图纸管理^[2]，将返工率从18%降至5%。在商业航天领域，企业探索敏捷研发模式，通过成熟技术与新技术融合、跨部门协同设计，实现研发周期大幅压缩。同时，部分企业依托产业链优势，构建产学研协同模式，与高校、科研院所共建创新平台，推动基础研究与工程应用衔接，形成“政府+龙头企业+配套企业”的融合发展格局，提升产业链整体创新能力。

3.2 管理模式存在的问题与不足

现有研发管理模式存在诸多短板，制约创新效能释放。原始创新内生动力不足，多数企业聚焦技术工程化实现，对基础研究与前沿技术跟踪敏感性不够，缺乏对颠覆性技术的

布局与管控，可持续发展能力受限。协同创新机制不健全，传统组织架构存在横向沟通壁垒，部门墙导致技术协调效率低下，部分项目因协调问题导致测试延期数月，跨专业、跨单位协同难度大。成果转化机制不畅，前沿技术突破后，受领域分工与队伍不延续等因素影响，工程化应用阶段资源落实困难，新技术推广受限，挫伤研发人员积极性。研发流程适配性不足，传统线性流程难以适配前沿技术快迭代需求，数字化工具应用不充分，部分企业国产化协同平台覆盖率不足四成，文档审批等环节冗余耗时。激励机制针对性不强，基层研发岗位待遇与晋升通道不及型号产品设计岗位，创新成果与个人收益关联度不高，难以激发核心人才创新活力。

3.3 问题成因分析

问题产生的核心成因在于体制机制与发展需求的不匹配。体制层面，航天企业长期承担国家重大型号任务，保成功的核心目标导致资源配置向成熟型号倾斜，前沿研发因周期长、风险高获得的资源支持有限，形成重工程化、轻基础研究的导向。组织架构层面，传统层级制架构强调纵向管理，横向协同缺乏制度保障，总师负责制虽能保障型号任务推进，但难以适配多学科交叉前沿技术研发的灵活需求，跨部门协调依赖个人能力而非机制保障。资源配置层面，研发经费与人才资源分配不均衡，基础研究与前沿技术研发投入占比偏低，数字化转型投入不足，系统集成与本土化适配存在瓶颈，制约工具效能发挥。文化与激励层面，创新容错机制不完善，研发人员面临失败追责压力，缺乏大胆探索的动力，同时激励体系侧重型号任务完成情况，对创新成果的中长期激励不足，难以留住核心研发人才。

4 创新驱动下的航天企业技术研发管理模式构建

4.1 构建原则与目标

创新驱动型研发管理模式构建需遵循三大原则，战略导向原则，紧扣国家航天强国战略与市场需求，平衡重大型号任务与前沿技术研发，确保研发方向与企业发展战略一致。敏捷迭代原则，适配前沿技术不确定性与商业航天快迭代需求，优化研发流程，强化数字仿真与快速验证能力，实现设计、试制、试验的高效循环。人才为本原则，突出人才在创新中的核心作用，完善人才培养、引进与激励机制，搭建多元化发展通道，激发团队与个人创新活力。构建目标包括短期与长期两个维度，短期目标为压缩研发周期、降低成本，将新型号研发周期缩短两成以上，成本超支率控制在8%以内；长期目标为完善创新体系，提升原始创新能力与成果转化效率，培育形成核心技术优势，打造开放融合的创新生态，实现从技术跟跑向并跑领跑转型^[3]。

4.2 创新驱动型技术研发流程设计

重构研发流程需打破传统线性模式，构建数字化、敏捷化的全周期流程体系。在前期规划阶段，建立前沿技术跟

踪与识别机制,整合内外部专家资源,定期研判技术发展趋势,提前布局颠覆性技术与拦截性技术研发。方案设计阶段,采用数字化协同设计模式,依托国产化协同平台实现跨专业、跨单位数据共享,开展组件联合仿真分析,通过数字世界多轮迭代优化方案,减少物理试制次数。试制与试验阶段,融合3D打印等先进制造技术,缩短复杂结构零件生产周期,搭建试验数据快速分析工具群,实现试验结束半小时内完成核心数据分析,提升试验效率与精度。迭代优化阶段,建立快速反馈机制,将试验数据实时反馈至设计环节,形成设计-试验-优化的闭环迭代,同时预留技术迭代接口,适配新技术融合需求。验收与转化阶段,同步推进技术验收与工程化应用衔接,明确成果转化责任主体,打通从技术突破到产品落地的通道。

5 创新驱动技术研发管理模式的实施策略

5.1 强化创新文化建设

以顶层引领塑造创新文化,成立科技创新委员会与专业技术专家委员会,定期召开技术创新专题会议,统筹推进创新体系建设,将创新理念融入企业发展战略。搭建创新交流平台,举办科技创新成果展、青年博士论坛、先进制造技术国际论坛等活动,营造崇尚创新、勇于探索的氛围。推行创新文化落地举措,开展创新案例宣讲与经验推广,宣传表彰重大创新成果与核心贡献人才,树立创新标杆。建立开放式创新文化,鼓励员工参与众筹众创活动,设立创新天使投资基金,支持员工开展自主创新项目,允许员工在绩效合格前提下申请更换团队或工作内容,激发内生创新动力^[3]。通过文化浸润与制度保障,形成人人重创新、敢创新、善创新的良好生态。

5.2 完善创新资源配置机制

优化资源投入结构,加大基础研究与前沿技术研发经费占比,确保研发经费年均增幅稳定在三成以上,设立专项基金支持颠覆性技术研发与创新成果转化。强化数字化资源配置,加快国产化协同平台推广应用,实现研发全流程数字化覆盖,打通设计、生产、试验等环节数据壁垒,提升数据驱动研发能力。构建柔性资源调配机制,根据研发任务需求动态调配人才、设备、资金等资源,优先保障前沿技术研发与创新试点项目需求。推进资源共享体系建设,搭建企业内

部资源共享平台,整合闲置设备与技术资源,同时推动产业链资源共享,通过数字化工具赋能核心供应商,提升产业链资源利用效率。建立资源投入评估机制,定期对创新资源投入效益进行考核,优化资源配置方案,确保资源向高效创新领域集中^[4]。

5.3 加强产学研合作与交流

构建长效产学研协同机制,与顶尖高校、科研院所共建创新平台,聚焦基础研究与核心技术攻关,明确合作双方权责与利益分配方式,解决成果共享难题。推行多元化合作模式,采用单透模式吸引外部创新主体参与军工创新,实现内部创新成果留存与外部成熟技术引进的双向互动,推动创新成果快速落地。搭建技术与成果转化平台,定期开展技术路演、成果展示与现场对接活动,加速产学研成果工程化应用,近三年某企业通过该模式实现科技成果转化合同金额达八千万元^[4]。深化国际合作与交流,在合规前提下对接全球创新资源,跟踪国际前沿技术动态,开展联合研发与技术引进,提升国际创新竞争力。

6 结论

创新驱动是航天企业突破发展瓶颈、提升核心竞争力的必由之路,构建适配创新需求的技术研发管理模式,对推动航天产业高质量发展具有重要意义。当前我国航天企业研发管理模式虽形成一定特色,但在原始创新动力、协同机制、成果转化等方面仍存在不足,根源在于体制机制与创新需求的不匹配。本文构建的创新驱动型研发管理模式,以战略导向、敏捷迭代、人才为本为原则,通过优化研发流程、完善激励机制、强化团队建设,能有效破解现有问题。配套实施创新文化建设、资源配置优化、产学研协同等策略,可保障模式落地见效,提升航天企业研发效率与创新能力。

参考文献

- [1] 姜黎辉.开放式创新驱动下的企业研发管理机制重构研究[J].科技和产业,2015(09):101-105.DOI:CNKI:SUN:CYYK.0.2015-09-020.
- [2] 施宇,王节祥,盛亚,等.专利平台驱动的企业创新模式:基于38家高新技术企业的组态分析[J].南开管理评论,2024,27(1):87-97.
- [3] 无[1].航天科工优化科技创新管理机制探索科技型企业内部创业有效路径[J].中国产经,2022(11):79-81.
- [4] 企业管理.技术战略驱动企业商业模式创新机制研究--以跨国医疗器械A公司为例[D].对外经济贸易大学,2022.

Establishment and Application of Gas Chromatography-Mass Spectrometry Detection Method for Residual Plasticizers in Food

Qiongyu Hong Wenbin Hu Luying Shao Jinyu Zhu

Zhejiang Fangyuan Testing Group Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang, 311400, China

Abstract

In recent years, due to the extensive use of packaging materials and production equipment, the issue of plasticizer (such as phthalate esters PAEs) residues in food has attracted much attention. Plasticizers can migrate into food, and long-term human intake may cause endocrine disruption, reproductive toxicity, and even carcinogenic risks, seriously threatening consumer health. Therefore, many countries around the world have introduced strict limit standards, such as the EU REACH regulation and China's GB 31604.30 - 2016. However, the food matrix is complex, the types of plasticizers are diverse, and trace amounts exist, which require high detection technology. Under this background, gas chromatography - mass spectrometry (GC-MS) technology, with its own advantages, has become the mainstream method for food plasticizer detection. This article first elaborates on the principle and advantages of GC-MS technology, then analyzes in detail how to establish and optimize GC-MS detection methods, subsequently proposes specific method validation and practical applications, and finally conducts a detailed discussion and outlook, with the aim of providing useful references and inspirations for related research.

Keywords

Food plasticizer residues; Gas chromatography-mass spectrometry detection; Method establishment; Practical application

食品中塑化剂残留的气质联用检测方法建立与应用

洪琼雨 胡文彬 邵璐滢 朱锦雨

浙江方圆检测集团股份有限公司, 中国·浙江 杭州 311400

摘要

近年来, 因包装材料和生产设备广泛使用, 食品中塑化剂(如邻苯二甲酸酯类PAEs)残留问题备受瞩目。塑化剂会迁移至食品中, 人长期摄入可能引发内分泌干扰、生殖毒性, 甚至有致癌风险, 严重威胁消费者健康。为此, 全球多国出台了严格限量标准, 像欧盟REACH法规、中国GB 31604.30 - 2016等。不过, 食品基质复杂、塑化剂种类多且痕量存在, 对检测技术要求颇高。在此背景下, 气相色谱-质谱联用技术(GC-MS)凭借自身优势, 成为食品塑化剂检测的主流方法。本文先是具体阐述了GC-MS技术原理与优势, 随后详细分析了如何建立与优化GC-MS检测方法, 紧接着提出了具体的方法验证及其实际应用, 最后进行了详细的讨论及前景展望, 以期对相关研究提出有益参考与借鉴。

关键词

食品塑化剂残留; 气质联用检测; 方法建立; 实际应用

1 引言

塑化剂是塑料制品中常用的添加剂, 它可能通过包装材料迁移或生产设备接触等途径进入食品, 给消费者健康带来潜在风险。特别是邻苯二甲酸酯类(PAEs), 因其具有内分泌干扰特性, 已被国际癌症研究机构列为2B类致癌物, 为此全球多国制定了严格限量标准, 如欧盟规定食品中DEHP迁移限量为1.5mg/kg, 中国也对多种PAEs设定了0.01-9.0mg/kg的限量。但食品基质复杂、塑化剂种类多且

含量低, 传统检测方法如液相色谱灵敏度不够, 气相色谱需结合质谱才能鉴定结构。GC-MS因高分离能力和特征离子监测技术, 成为塑化剂检测“金标准”。本研究据此建立了适用于复杂食品的GC-MS检测方法, 为食品安全监管提供技术保障。

2 GC-MS 技术原理与优势

2.1 技术原理

气相色谱-质谱联用技术(GC-MS)融合了气相色谱(GC)的分离能力与质谱(MS)的结构鉴定功能, 是复杂基质中痕量塑化剂高效分析的关键技术。GC利用化合物在固定相(如非极性色谱柱DB-5MS)和流动相(惰性气体

【作者简介】洪琼雨(1997-), 女, 中国浙江杭州人, 本科, 助理工程师, 从事食品质量研究。

载气)间相互作用差异进行分离。不同化合物因沸点、极性、等物理性质不同,在色谱柱中保留时间有别,像邻苯二甲酸二乙酯(DEP)和邻苯二甲酸二(2-乙基己基)酯(DEHP)可通过梯度升温程序基线分离。分离后的化合物进入MS系统,经电子轰击电离(EI)或化学电离(CI)成离子,再按质荷比(m/z)定性定量分析。EI源因能产生稳定特征碎片离子(如DEP的 m/z 149、DEHP的 m/z 149和167)常用于塑化剂检测。GC-MS优势明显,GC解决食品基质中塑化剂分离难题,MS以特征离子监测模式提供高特异性结构鉴定,可精准检测 ng/kg 级别痕量塑化剂,降低干扰与假阳性风险,为食品安全监管提供可靠手段。

2.2 技术优势

GC-MS技术在塑化剂检测方面优势突出。在灵敏度上,它能实现 $\mu g/kg$ 甚至 ng/kg 级别的痕量分析,远低于欧盟等国家对DEHP 1.5 mg/kg 的限量标准。通过优化离子源电子能量、发射电流及检测器电压等参数,信号响应还能进一步提升,满足超痕量检测需求。其高选择性借助特征离子监测(SIM)模式达成,仅监测目标化合物(如DEP的 m/z 149)的特征离子,可有效排除脂肪酸、糖类等基质干扰,信噪比全扫描模式提升超10倍,定量准确性大幅提高。该技术宽动态范围为0.01-10 mg/L ,能覆盖不同浓度样品,减少稀释或浓缩步骤,简化操作。而且,它通过质谱图库比对或同位素稀释法确认化合物结构,可避免假阳性,像DEHP与DBP的碎片离子差异能明确区分二者,为食品安全监管提供了可靠技术支撑。

3 GC-MS 检测方法建立与优化

3.1 样品前处理技术

在食品中塑化剂残留的GC-MS检测中,萃取方法需依据样品基质特性精准选择:液液萃取(LLE)以正己烷为萃取剂,通过振荡、离心分离水基样品(如饮料)中的有机相,操作简便但易受乳化现象干扰;固相萃取(SPE)采用C18或氨基柱吸附高脂/复杂基质(如乳制品)中的目标物(如DEHP、DBP),经甲醇洗脱可高效去除干扰,回收率稳定在85%-95%^[1];固相微萃取(SPME)则利用聚二甲基硅氧烷(PDMS)涂层纤维直接吸附挥发性塑化剂(如DEP),无需溶剂且操作快速,但灵敏度略低于SPE。净化环节中,凝胶渗透色谱(GPC)通过分子筛作用去除肉类、油脂样品中的脂类、蛋白质等大分子干扰物;硫酸镁/乙酸钠盐析法则通过快速沉淀蔬菜、水果中的水分及极性杂质,将净化时间压缩至10分钟内,显著提升前处理效率。

3.2 色谱条件优化

在食品中塑化剂残留的GC-MS检测中,色谱柱的选择需严格匹配化合物极性:非极性柱(如DB-5MS,规格为30 $m \times 0.25mm \times 0.25\mu m$)凭借其高柱效与对称峰形,成为分离多数邻苯二甲酸酯类(PAEs,如DEHP、DBP)的首选;而极性柱(如HP-INNOWax)则通过其特殊固定相,

实现对极性较强的替代型塑化剂(如乙酰柠檬酸三正丁酯ATBC)的有效分离。升温程序的设计需兼顾分离效率与分析速度:初始温度60 $^{\circ}C$ 保持1分钟以活化色谱柱,随后以20 $^{\circ}C/min$ 快速升至220 $^{\circ}C$,促使低沸点化合物(如DEP)迅速洗脱,再以5 $^{\circ}C/min$ 缓升至280 $^{\circ}C$ 并保持5分钟,确保高沸点化合物(如DEHP)完全分离,最终将总分析时间控制在15分钟内。载气与流速的优化中,高纯氦气(He)以1.0 mL/min 的流速运行,既能维持色谱柱的分离效率,又可避免峰展宽或保留时间延长,从而保障分析结果的准确性与重复性。

3.3 质谱参数优化

在食品中塑化剂残留的GC-MS检测中,电离方式的选择需紧密结合分析目标:电子轰击电离(EI)通过高能电子束轰击产生丰富的碎片离子(如DEHP的 m/z 149、167),为标准品比对和结构鉴定提供关键信息;而化学电离(CI)采用软电离技术,显著减少碎片生成,强化分子离子峰(M^+)强度(如DBP的 m/z 279),更适用于高精度定量分析^[2]。在监测模式上,全扫描(SCAN)与选择离子监测(SIM)各有特点。全扫描能全面采集质荷比信息,适用于未知塑化剂的筛查以及与质谱图库进行匹配,不过其灵敏度存在一定局限。而选择离子监测聚焦于目标化合物的特征离子,像DEHP的 m/z 149、167,能让信噪比提升3-5倍,检出限低至0.1 $\mu g/kg$,很好地满足了痕量分析的需求。除此之外,合理设置溶剂延迟,比如设定为2-3分钟,可有效阻止溶剂峰(如甲醇的 m/z 32)进入检测器,避免离子源被污染,进而延长仪器使用寿命,确保数据稳定可靠。

3.4 化学计量学方法应用

在食品塑化剂残留的多元数据分析中,多种分析方法协同作用,为检测工作提供了全面且可靠的解决方案。主成分分析(PCA)运用降维技术,精准提取关键变量,有效区分不同来源样品中DEHP、DBP的浓度差异。以白酒和饮料为例,PCA可构建可视化分类模型,为样品溯源提供科学依据^[3]。偏最小二乘回归(PLSR)则另寻途径,通过整合色谱峰面积与标准品浓度数据,构建高精度定量模型,其预测误差(RMSEP)严格控制在5%以内,在高脂乳制品等复杂基质的塑化剂测定中优势显著。支持向量机(SVM)结合选择离子监测(SIM)数据,利用核函数实现非线性分类与回归,既能快速鉴别塑化剂类型,如区分传统PAEs与替代型塑化剂,又能同步定量分析,单样品处理时间缩至秒级,大幅提升检测效率,满足大规模筛查与实时监控需求^[4]。这三种方法相辅相成,共同搭建起从定性分类到精准定量的完整体系,有力支持了食品塑化剂检测工作。

3 方法验证与实际应用

3.1 方法验证

为确保食品中塑化剂检测方法的可靠性,在方法验证环节进行了多项严谨测试。在线性范围与检出限方面,于

0.01-10mg/L 浓度范围内对 DEHP、DBP 等目标化合物测试,其峰面积与浓度呈极佳线性关系, R^2 均大于 0.999, 为准确定量分析奠定基础。同时,该方法灵敏度高,检出限 (LOD) 低至 0.5 - 2 μ g/kg, 定量限 (LOQ) 为 1.5-5 μ g/kg, 完全契合 GB 31604.30-2016 的严格要求,能精准检测食品中微量塑化剂残留。在准确度与精密度上,通过加标回收实验评估,白酒中添加 DEHP 回收率 85%-105%, RSD 小于 5%; 饮料中添加 DBP 回收率 90%-110%, RSD 小于 8%, 准确度高。对同一样品连续进样 6 次,峰面积和保留时间 RSD 分别小于 3% 和 0.1%, 重复性好,结果稳定可靠。

3.2 实际应用案例

3.2.1 白酒中塑化剂检测

针对白酒中塑化剂的检测,精心挑选市售的浓香型与酱香型白酒作为检测样本。前处理阶段,运用液液萃取 (LLE) 技术,能够高效地将白酒中的塑化剂提取出来。之后,借助凝胶渗透色谱 (GPC) 进行净化处理,有效去除脂类等可能干扰检测结果的物质,为精准检测提供保障。经过一系列严谨的检测流程后得出结果,其中 DEHP 浓度处于 0.8 - 3.2mg/kg 的范围, DBP 浓度在 0.1- 0.5mg/kg 之间,二者均低于国家规定的标准限量,这充分表明所检测的白酒在塑化剂残留方面完全符合安全要求。

3.2.2 饮料中塑化剂筛查

选取市售的矿泉水、果汁以及碳酸饮料作为检测样品,聚焦于挥发性塑化剂 (如 DEP) 的检测。采用固相微萃取 (SPME) 技术直接萃取,该方法操作简便且高效快捷。经检测,果汁中 DEP 的检出浓度处于 0.02-0.05mg/kg 的范围,未超出相关标准限量;而某款碳酸饮料中未检测到目标化合物,这说明该饮料在塑化剂管控方面成效显著。这些来自实际应用的检测案例有力地表明,所采用的检测方法在食品塑化剂检测领域具备可靠的有效性,且在实际运用中展现出良好的实用性,能为食品安全保障提供有力支持。

4 讨论与展望

4.1 方法优势与局限性

当前所运用的 GC-MS 结合优化前处理与化学计量学方法,在食品塑化剂检测领域优势突出。优化后的前处理步骤,能高效地清除复杂基质里的干扰物质,为后续检测营造良好条件;而化学计量学方法的应用,进一步增强了数据分析的精准度。二者相互配合、协同发力,可达成复杂基质中塑化剂的高灵敏度与高选择性检测,为食品安全监测筑牢了可靠的技术根基。不过,该方法并非十全十美,也存在一定局限。前处理环节较为繁杂,以凝胶渗透色谱 (GPC) 净化为例,需专业设备支持,这无疑增加了检测成本,也延长了检测时间;并且,对于极性较强的替代型塑化剂,像偏苯三酸三辛

酯 (TOTM),其分离效果尚有提升空间,可能会对检测结果的准确性产生一定影响。

4.2 未来研究方向

鉴于当前食品塑化剂检测方法存在前处理繁琐、对极性塑化剂分离效果欠佳等局限性,未来可从多维度展开研究。前处理技术简化是重要方向,开发微流控芯片、磁性固相萃取等新型前处理方法,它们操作简便、分析耗时短,可显著提升检测效率,降低检测成本。联用技术拓展也不容忽视,结合液相色谱-质谱联用 (LC-MS) 或高分辨质谱 (HRMS),能充分发挥不同技术优势,增强对极性塑化剂的检测能力。此外,在快速检测技术领域,研发便携式 GC-MS 或免疫传感器,可实现现场实时监测,助力及时掌握食品中塑化剂动态。

4.3 应用前景

该方法展现出极为广阔的应用前景。在食品安全监管领域,它可成为市场抽检与风险评估的强大技术后盾,凭借快速精准的检测能力,及时发现食品中潜藏的塑化剂问题,为消费者健康筑牢坚实防线。对于包装材料安全评价,通过迁移实验,能科学评估食品接触材料里塑化剂的安全性,有效避免有害物质迁移到食品中。而在国际贸易舞台上,该方法能严格契合欧盟、美国等对进口食品塑化剂的限量要求,帮助企业顺利跨越贸易壁垒,为出口贸易的繁荣发展注入强劲动力,推动行业迈向新高度。

5 结论

综上所述,本研究围绕食品中塑化剂残留的气质联用检测展开深度探索。通过系统整合前处理技术、优化色谱与质谱参数,并创新性地引入化学计量学方法,成功搭建起针对复杂食品基质的高灵敏度、高选择性 GC-MS 检测体系。经严格验证,该体系具备宽线性范围、低检出限,准确度与精密度表现优异,能精准锁定食品中的痕量塑化剂。在实际的白酒、饮料等食品样本检测中,其可靠性与稳定性良好。不过,当前仍面临前处理流程繁琐、对极性塑化剂分离效果欠佳等挑战。未来,可通过简化前处理、拓展多维联用技术、研发快速筛查手段等方向突破局限,为食品安全监管等领域提供坚实技术保障。

参考文献

- [1] 李德蕾,白茹燕,张永燕.液质联用与气质联用测定水果中烟碱类化合物效果对比[J].食品工业,2025,46(05):292-295.
- [2] 王佩佩,展晓慧.气质联用法在食品塑化剂污染检测中的应用[J].食品安全导刊,2025,(05):136-138.
- [3] 穆浩欣.白酒中香气成分的气质联用快速检测方法研究[J].中外食品工业,2024,(22):57-59.
- [4] 吕本松,赵君楠.气质联用仪内标法测定邻苯二甲酸二异壬酯含量的不确定度评定[J].盐科学与化工,2023,52(07):29-33.

Application Research of Frequency Converter in Speed Control of Coal Mine Electromechanical Equipment

Li'e Li Shifei Wang Song Yang

Shaanxi Zhongneng Coalfield Co., Ltd., Yulin, Shaanxi, 719000, China

Abstract

Coal mining environments are characterized by high-risk operations, intense load fluctuations, and enclosed spaces. As the core infrastructure for coal extraction, transportation, ventilation, and drainage systems, the stability, precision, and energy efficiency of electromechanical equipment directly determine production efficiency, operational safety, and cost-effectiveness. Traditional coal mine electromechanical systems predominantly employ power-frequency starting and fixed-speed operation modes, which suffer from excessive energy consumption, severe mechanical shocks, insufficient speed regulation accuracy, and high maintenance costs—issues that hinder their adaptation to the demands of intelligent and green coal mining. Frequency converters, as advanced speed regulation devices integrating power electronics and automatic control technologies, achieve stepless smooth motor speed control through precise frequency and voltage adjustment. These devices offer multiple advantages including energy conservation, soft-start protection, and precise speed regulation, gradually replacing traditional speed control methods and being widely adopted in various coal mine electromechanical systems.

Keywords

inverter; coal mine electromechanical equipment; speed control; energy saving and consumption reduction; safe operation

变频器在煤矿机电设备调速控制中的应用研究

李利娥 王世飞 杨松

陕西中能煤田有限公司, 中国·陕西 榆林 719000

摘要

摘煤矿生产环境具有高危险性、强负荷波动、空间密闭等显著特点, 机电设备作为煤炭开采、运输、通风、排水的核心载体, 其调速控制的稳定性、精准性与节能性直接决定煤矿生产效率、作业安全与运营成本。传统煤矿机电设备多采用工频启动与固定转速运行模式, 存在能耗偏高、机械冲击强烈、调速精度不足、维护成本高昂等突出问题, 难以适配煤矿智能化、绿色化生产的发展需求。变频器作为一种基于电力电子技术与自动控制技术的新型调速设备, 通过精准调节输出频率与电压, 实现电机转速的无级平滑调控, 兼具节能降耗、软启动保护、精准调速等多重优势, 已逐步取代传统调速方式, 广泛应用于煤矿各类机电设备的调速控制中。

关键词

变频器; 煤矿机电设备; 调速控制; 节能降耗; 安全运行

1 引言

随着电力电子技术、自动控制技术与煤矿智能化技术的快速发展, 变频器技术日趋成熟, 为煤矿机电设备调速控制升级提供了全新路径。变频器通过改变电机供电频率实现无级调控, 可精准匹配设备输出功率与负载需求, 兼具节能、减冲击、高精度等优势, 已广泛应用于煤矿各类核心机电设备, 取得良好效果。本文基于变频器工作原理与调速特性, 探讨其在煤矿机电设备中的具体应用, 分析现存问题并提出优化对策, 为煤矿企业推广应用变频器技术提供支撑。

【作者简介】李利娥(1985-), 中国陕西榆林人, 工程师, 从事煤矿机电研究。

2 变频器核心原理与调速特性

2.1 核心工作原理

变频器是一种将工频交流电转换为频率、电压可调节交流电的电力电子设备, 核心是通过电力电子器件通断控制, 实现电能频率与电压转换, 进而调节电机转速。其基本结构包括整流单元、滤波单元、逆变单元、控制单元四大组成部分, 各单元协同完成电能转换与转速调控。

整流单元为输入端, 由二极管整流桥或可控整流桥组成, 将工频交流电转换为直流电; 滤波单元位于两者之间, 由电容、电感组合构成, 滤除脉动直流电中的谐波, 提供稳定直流电源; 逆变单元为输出端, 由 IGBT 等功率半导体器件组成, 通过 PWM 控制技术, 将直流电逆变为频率、电压可调节的交流电, 控制电机转速; 控制单元作为“大脑”, 由微处理器、

检测电路等组成,接收外部信号并生成控制指令,同时具备故障检测与保护报警功能,保障设备安全运行^[1]。

2.2 核心调速特性

变频器相较于传统调速方式,具有五大突出特性,可充分满足煤矿机电设备恶劣工况需求:一是调速精度高,采用PWM与微处理器控制,频率调节范围0.5~50Hz,调速精度可达±0.5%以内,适配提升机、胶带输送机设备的精准调速需求;二是节能效果显著,电机功率与转速三次方成正比,变频器可根据负载实时调节转速,避免空载或低负载电能浪费,风机、水泵等设备节能率可达15%~40%;三是软启动软停止,启动电流控制在1.5倍额定电流以内,减小电机与电网冲击,避免机械部件磨损,适配重载设备;四是保护功能完善,内置过流、过压、过载等多种保护,实时监测运行参数,及时处理故障;五是适配性强,可灵活调节频率与电压,适配不同电机,且能与PLC、传感器联动,融入智能化控制系统。

3 煤矿机电设备调速控制现状与需求

3.1 调速控制现状

目前全球煤矿行业向智能化、绿色化转型,机电设备调速技术不断升级,但部分煤矿仍沿用传统调速方式,存在诸多问题:一方面是传统调速应用广泛,能耗损失严重,串电阻、变极调速无法无级调控,电阻损耗占电机总能耗10%~20%;另一方面是调速精度不足,分级调速无法匹配工况变化,易造成电能浪费或安全隐患;最后是机械冲击大,工频启动冲击电流大,设备部件磨损严重,故障率偏高

3.2 调速控制核心需求

结合煤矿生产工况与设备运行特点,调速控制核心需求体现在五方面:一方面是节能性,风机、水泵等设备能耗占煤矿总能耗60%以上,需通过精准调速减少浪费;其次是稳定性,设备需具备强抗干扰能力,在恶劣工况下长期稳定运行,保障生产连续;接着是精准性,不同设备对调速精度需求不同,需满足提升、运输、通风等不同场景需求;然后是安全性,需具备完善保护功能与软启停能力,保障设备与人员安全;最后是智能化,需与PLC、远程监控系统联动,实现自动化调速与故障诊断。变频器的特性与上述需求高度契合,推广应用具有重要现实意义。

4 变频器在煤矿机电设备调速控制中的具体应用

煤矿机电设备种类繁多,工况与调速需求差异较大。本文重点探讨变频器在胶带输送机、矿井水泵、矿井通风机、提升机四大核心设备中的应用,分析选型、控制方案与应用效果。

4.1 在胶带输送机中的应用

胶带输送机是煤料运输核心设备,具有负载波动大、启动转矩大、长期连续运行的特点,传统调速方式存在启动

冲击大、能耗高、调速精度低等问题。变频器应用可有效解决上述问题,实现平稳节能运行^[2]。

选型上,优先选用矢量控制变频器,启动转矩可达150%以上,满足重载启动需求,且调速精度高、动态响应快;结合井下环境,选用矿用防爆型变频器,保障安全稳定。控制方案采用“PLC+变频器+传感器”联动模式,通过煤量、速度、跑偏传感器采集参数,PLC分析处理后控制变频器调节转速,实现煤量与运输速度匹配,避免堆积或打滑,同时利用软启停功能减少机械冲击。

应用效果显著,能耗可降低15%~25%,设备故障率降低30%以上,维护成本大幅下降,且实现自动化调速与远程监控,提升智能化水平,生产效率显著提升。

4.2 在矿井水泵中的应用

矿井水泵是井下排水核心设备,长期连续运行且涌水量波动大,传统工频运行通过阀门调节排水量,能耗高、阀门磨损严重。变频器应用可实现排水量精准调节,降低能耗与维护成本。

选型上,根据水泵参数选用通用型电压型变频器,功率200kW以上选用高压变频器,结合井下环境选用防爆或防水防潮型。控制方案采用“PLC+变频器+液位传感器”联动模式,通过液位传感器采集水仓水位,PLC根据水位阈值控制变频器调节转速,实现排水量与涌水量匹配,避免空转或溢水,多台水泵可实现联动控制,进一步提升节能与稳定性。

应用后能耗降低20%~40%,设备使用寿命延长50%以上,维护成本降低40%左右,实现排水自动化,有效保障井下作业安全^[3]。

4.3 在矿井通风机中的应用

矿井通风机是井下通风核心设备,负责输送新鲜空气、排出有毒有害气体,长期连续运行且通风量需求波动大,传统方式通过挡风板调节,能耗高、精度低。变频器应用可实现通风量精准调控,提升安全性与节能性。

选型上,通风机功率较大,优先选用高压矢量控制变频器,调节精度高、负载适应能力强;井下有易燃易爆气体,选用矿用防爆型变频器。控制方案采用“PLC+变频器+传感器+瓦斯监控系统”联动模式,根据瓦斯浓度、作业人数等参数,实时调节通风机转速,确保通风量满足安全标准,双风机双电源联动可保障通风连续,避免中断引发安全事故。

应用后能耗降低25%~40%,设备故障率降低40%以上,瓦斯浓度超标次数大幅减少,通风系统智能化水平提升,有效保障井下作业人员安全。

4.4 在矿井提升机中的应用

矿井提升机是井下与地面运输核心设备,负载变化大、启停频繁、调速精度与安全要求极高,传统调速方式存在精度低、冲击大、安全性不足等问题。变频器应用可实现精准、

平稳、安全调速，提升系统可靠性。

选型上，选用高压矢量控制变频器，调速精度可达 $\pm 0.1\%$ 以内，启动转矩180%以上，动态响应快，且具备完善安全保护功能；结合井下环境选用矿用隔爆型高压变频器。控制方案采用“PLC+变频器+编码器+安全保护装置”联动模式，根据提升阶段与负载变化，精准调节转速，实现软启停与匀速运行，同时通过安全保护装置与故障诊断功能，保障运行安全，减少停机时间。

应用后启动冲击大幅减小，设备使用寿命延长60%以上，维护成本降低50%左右，能耗降低10%~20%，实现自动化与远程监控，提升效率与安全性，有效避免过卷、超速等安全事故^[4]。

5 变频器在煤矿机电设备应用中存在的问题

5.1 谐波干扰严重，影响电网与设备运行

变频器在运行过程中，由于逆变单元功率半导体器件的通断控制，会产生大量高次谐波，这些高次谐波会注入煤矿电网，对电网质量造成污染，同时影响其他机电设备的正常运行。具体而言，谐波会导致电网电压畸变、功率因数降低，增加电网损耗，缩短变压器、电缆等电力设备的使用寿命；谐波会影响电机的正常运行，导致电机发热加剧、振动增大、噪声升高，降低电机效率与使用寿命，甚至引发电机故障；谐波还会干扰煤矿井下的通信系统、监控系统等弱电设备，导致信号传输中断、数据失真，影响设备的正常运行与安全监控，严重时甚至会引发安全事故。此外，煤矿供电系统通常采用长距离电缆输送，谐波问题会进一步放大，严重威胁整个电力系统的稳定性。

5.2 环境适应性不足，设备故障率偏高

煤矿井下环境具有高温、高湿、高粉尘、强电磁干扰及潜在易燃易爆气体等特点，对变频器的环境适应性提出了严苛要求。目前，部分煤矿企业在选用变频器时，未充分考虑井下恶劣环境的影响，选用了普通工业变频器，而非矿用隔爆型、防水防潮型变频器，导致变频器在运行过程中，易受到粉尘、湿气的侵蚀，出现电路板短路、元件烧毁、散热不良等问题；同时，井下强电磁干扰（如高压设备、电机运行产生的电磁辐射）会影响变频器的控制信号，导致变频器出现控制失灵、调速精度下降等问题，甚至引发设备故障。此外，部分矿用变频器的散热设计不合理，井下通风条件有限，变频器运行过程中产生的热量无法及时散发，导致内部温度过高，触发过热保护，停机报警，影响生产连续性^[5]。

6 变频器在煤矿机电设备应用中的优化对策

提升环境适应性，降低设备故障率

合理选用变频器类型。煤矿企业在选用变频器时，需充分考虑井下高温、高湿、高粉尘、强电磁干扰及易燃易爆气体等恶劣环境的影响，严格选用符合煤矿安全标准的矿用隔爆型、防水防潮型变频器，确保变频器的防护等级满足井下运行需求（通常防护等级不低于IP54）。对于井下存在瓦斯等易燃易爆气体的区域，需选用防爆等级符合要求的矿用隔爆型变频器，避免引发安全事故；对于高温、高粉尘区域，需选用防水防潮、防尘性能优良的变频器，并加强密封处理，防止粉尘、湿气进入变频器内部。

优化变频器的安装与散热设计。变频器的安装位置应尽量避免高湿、高粉尘、高温及强电磁干扰区域，选择通风良好、干燥、清洁的位置安装；同时，根据变频器的功率与散热需求，优化散热设计，对于大功率变频器，可采用独立风道散热、水冷散热或热管散热技术，提升散热效率，确保变频器内部温度控制在允许范围内（通常不超过60℃）。此外，定期对变频器的散热器进行清洁，清除粉尘堆积，避免影响散热效果。

7 结论

变频器凭借高精度、节能、安全、稳定的核心优势，在煤矿机电设备调速控制中发挥着不可替代的作用，有效解决了传统调速方式能耗高、冲击大、精度低等弊端，推动煤矿机电系统向高效、节能、智能化升级。应用中虽存在环境适应性不足、谐波干扰等问题，但通过科学选型、规范调试、强化维护等优化对策，可显著提升应用效果。未来，随着变频器与煤矿智能化技术深度融合，其应用场景将进一步拓展，为煤炭行业高质量、安全高效发展提供有力技术支撑。

参考文献

- [1] 吴贵鹏. 高压变频器在煤矿机电设备中的选型与运用[J]. 煤炭与化工, 2021, 44(S1): 61-63
- [2] 苏健. 煤矿机电设备中高压变频器的选型及应用分析[J]. 科技创新导报, 2019, 16(36): 85-86
- [3] 李建军, 刘晓峰. 煤矿机电设备中变频器的选择[J]. 当代化工研究, 2019, (08): 177-178.
- [4] 马毓轩. 变频器在煤矿矿区机电设备中的应用策略分析研究[J]. 石化技术, 2019, 26(05): 260-261.
- [5] 翟伟涛. 谈谈煤矿机电设备中变频器的选择[J]. 科技风, 2018, (17): 136

Optimization of Energy-saving Retrofit Technology and Long-term Stable Operation Control Scheme for Shortwave Transmitter

Buhalipai·Zhuori

Xinjiang Radio and Television Bureau, Station 91615, Kezhou, Xinjiang, 845550, China

Abstract

Shortwave transmitters are critical to communication quality assurance. In China, 70% of existing equipment has been in operation for over a decade, facing challenges such as high energy consumption, component aging, and insufficient stability. Current retrofitting efforts often focus on single hardware replacements, making it difficult to sustain long-term energy efficiency. To address this issue, this paper presents a “hardware upgrade + software iteration + full lifecycle management” solution based on the retrofitting of a 150kW model. Through three major module optimizations—including gallium nitride (GaN) device replacement—combined with fuzzy PID algorithm control and a data-driven management platform, the solution effectively reduces energy consumption and enhances operational stability. Emphasizing hardware-software synergy and long-term management, the approach has proven highly feasible in practice. It provides actionable references for similar equipment retrofits and supports the industry’s green and low-carbon development.

Keywords

shortwave transmitter; energy-saving retrofit; technical optimization; stable operation; control scheme

短波发射机节能改造技术优化与长期稳定运行管控方案

布哈力排·卓日

新疆广播电视台 91615 台, 中国·新疆 克州 845550

摘要

短波发射机是通信质量的关键保障, 国内70%存量设备已运行超10年, 存在能耗高、部件易老化、稳定性不足等问题。现有改造多局限于单一硬件替换, 节能效果难以长效维持。针对这一痛点, 本文结合某台150kW机型改造实践, 构建“硬件升级+软件迭代+全生命周期管控”方案。通过氮化镓(GaN)器件替换等三大模块优化, 搭配模糊PID算法调控与数据化管控平台, 切实降低能耗、提升运行稳定性。方案突出软硬件协同与长效管控, 经实践验证可行性强, 为同类设备改造提供实操参考, 助力行业绿色低碳发展。

关键词

短波发射机; 节能改造; 技术优化; 稳定运行; 管控方案

1 引言

短波通信覆盖广、抗干扰强且无需地面基建支撑, 在应急保障、偏远地区通信中无可替代。短波发射机的运行效率与稳定性, 直接决定通信质量高低。国内存量发射机里, 70%已连续运行超10年, 这类设备沿用传统功率放大与电源架构, 能耗高、核心部件易老化、参数调控滞后。某省级广播电视台运维部2023年报告显示, 其3台150kW设备年运行超8000小时, 单台年耗电145万度, 远超行业先进水平。2022—2023年, 这些设备核心部件故障导致停机超340小时,

既加重运维负担, 又多次中断广播信号。“双碳”政策下企业节能压力陡增, 发射机节能改造迫在眉睫。现有方案多局限于单一硬件替换, 既无系统优化设计, 又忽视后期管控, 不少设备改造后节能效果仅维持3-6个月。因此, 本文将就短波发射机节能改造技术优化与长期稳定运行管控方案展开相关探讨。

2 短波发射机能耗与运行稳定性现状及问题分析

2.1 能耗现状及核心损耗点

短波发射机能耗损耗聚焦功率放大、电源供给、散热系统三大模块, 各模块损耗占比差异显著。某台150kW短波发射机技术部2023年运维台账实测数据显示, 功率放大模块损耗占整机62.3%, 电源供给占21.7%, 散热及其他部

【作者简介】布哈力排·卓日(1992-), 女, 柯尔克孜族, 中国新疆克孜勒苏柯尔克孜自治州人, 本科, 助理工程师, 从事中短波广播、调频广播研究。

件占 16.0%，这一占比直接锚定了节能改造的核心方向。功率放大模块是核心能耗载体。老旧设备多采用硅基功率器件，导通与开关损耗偏高，满负荷功率转换效率仅 72%—75%。150kW 机型满负荷运行时，该模块每小时耗电损耗约 41 度，日均近千度。更关键的是，部分设备功率放大电路冗余不足，输入信号波动会引发器件工作点偏移，进一步加剧能耗。电源供给模块损耗源于整流滤波与电压调节。老旧设备相控整流技术功率因数仅 0.75-0.82，既污染电网谐波，又降低电能利用率。电压调节缺乏精细化控制，轻负载时仍维持额定电压，造成明显浪费。散热系统能耗浪费同样突出。老旧设备强制风冷风扇恒速运行，不随负载、温度调整。低负载低温工况下，风扇每小时额外损耗 2.3-3.1 度电，年超 2 万度，长期高速运转还会加剧部件磨损。

2.2 长期运行稳定性问题梳理

某台短波发射机近 3 年完整运维台账显示，设备长期运行稳定性隐患聚焦三大维度。核心部件老化、参数调控滞后、运维体系不完善，三类问题相互交织，直接拉低设备运行可靠性。核心部件老化是故障停机的首要诱因。功率放大器、滤波器部件长期处于高电压、高温环境，老化进程加速。运行超 10 年的设备，功放年均故障 6.3 次、滤波器 5.7 次，每次检修至少耗时 4 小时，严重中断信号传输。更关键的是，部分改造仅替换核心损耗部件，未更新配套辅助件，部件适配性不足反而加剧老化。参数调控滞后直接制约稳定性提升。部分设备仍依赖人工调控，参数调整凭运维人员经验，无法实时响应负载与环境波动。即便配备自动调控系统，也存在算法粗放、响应慢的缺陷，调控滞后 2—3 秒，满足不了高精度运行需求，易引发信号失真、功率不稳等故障。运维体系不完善进一步放大风险。多数单位沿用“故障后检修”模式，无预防性运维机制，难以及时发现潜在问题。运维人员对新型部件、智能系统操作熟练度不足，故障排查耗时长。同时缺乏实时监测体系，运维决策无数据支撑，主观性极强。

3 短波发射机节能改造技术优化路径

3.1 功率放大模块节能优化

功率放大模块节能优化的核心，在于提升功率转换效率、降低器件损耗，同时兼顾运行稳定性^[1]。改造要跳出单一器件替换的局限，采用“器件升级+电路优化”组合方案，这一思路更贴合设备实际运行负载特性，实现精准优化。器件升级环节，选用氮化镓（GaN）功率器件替代传统硅基器件。这类器件导通电阻小、开关速度快、耐高温性强，能大幅削减导通与开关损耗。改造现场对比测试数据显示，GaN 器件功率转换效率达 88%—91%，较硅基器件提升 13—16 个百分点。150kW 发射机替换后，该模块每小时损耗从 41 度降至 26 度，日均节电 360 度，节能效果突出。其工作温度范围拓宽至 -40℃ -150℃，更适配高负荷工况，能缓解高

温引发的部件老化。电路优化聚焦拓扑结构与匹配网络。原有推挽放大拓扑存在功率波动大、负载适配差的缺陷，改用 Doherty 拓扑，主辅放大器随负载动态切换工作状态。同时优化匹配网络参数，信号反射损耗从 -12dB 降至 -18dB 以下，功率利用率显著提升。

3.2 电源供给模块节能升级

电源供给模块优化，核心是提升功率因数、实现电压动态调控，减少电网电能浪费和冗余供电损耗，兼顾供电稳定性与节能效益^[2]。针对性聚焦整流技术升级与智能调压系统搭建，构建适配短波发射机的高效供电体系。整流环节弃用传统相控整流，改用有源功率因数校正（APFC）技术。通过专属校正电路，输入功率因数可提升至 0.98 以上，谐波污染大幅降低，电网电能利用率显著提升。改造后实测显示，该模块损耗下降 32.6%，每小时节约约 2.8 度，年节电超 2.4 万度。同时，APFC 技术支持 180V—260V 宽电压输入，能有效规避电网电压波动带来的运行隐患。智能调压系统以 PLC 控制器为核心，实时采集负载、输入信号强度等参数，通过预设算法动态调整输出电压。负载与信号强弱变化时，电压同步适配调节，实现供电与需求精准匹配，杜绝冗余损耗。同时配套电压监测预警功能，电压异常时可及时提醒运维人员排查，筑牢供电安全防线。

3.3 散热系统节能改造

散热系统优化的核心，是让散热功率与设备发热需求精准匹配，既杜绝风扇冗余运转造成的电能浪费，又提升散热效率、延缓部件老化。采用“散热结构优化+智能调速控制”组合方案，贴合设备动态发热特性，构建高效且节能的散热体系。结构优化上，用热管与强制风冷结合的复合模式，替代传统单一强制风冷。热管传热效率高、散热速度快，能快速将核心部件热量传导至散热片，再由风扇排出。实测显示，复合散热模式使散热效率提升 45.3%，核心部件工作温度下降 18-25℃，有效缓解高温老化难题。同步优化散热风道，减少气流阻力，进一步降低散热能耗。智能调速控制系统是节能关键。温度传感器实时采集核心部件与环境温度，传输至控制器后，由控制器动态调节风扇转速：低于 45℃ 时以 30% 额定转速运行，45℃ -65℃ 时调至 60%，高于 65℃ 时满负荷运转。改造后，风扇平均转速下降 42%，每小时节约约 1.9 度、年节电超 1.6 万度，同时部件磨损减少，使用寿命提升至原来的 2.5 倍。

3.4 控制策略整体迭代

硬件改造完成后，需同步迭代发射机控制策略，搭建一体化智能控制系统^[3]。核心目标是实现运行参数精准调控与状态实时监测，兼顾节能效益与运行稳定性，适配实际运维场景。参数调控算法优化是核心突破点，摒弃传统粗放式算法，采用模糊 PID 算法。结合发射机改造实践，预设多组参数阈值，可实时响应负载、信号、温度等多维度变化，调控滞后时间压缩至 0.5 秒内，确保设备稳定处于最优工况。

引入机器学习算法,通过挖掘历史运行数据,自动优化调控参数,适配不同运行场景,进一步放大节能与稳定效益。同步搭建一体化监测平台,整合多类传感器,实时采集核心部件及运行参数,通过可视化模块直观呈现运行状态。参数超阈值时,平台自动触发声光预警,同步推送故障信息至运维人员终端,实现故障早发现、早处置。平台还支持数据存储分析,为运维决策与技术迭代提供可靠数据支撑。

4 短波发射机长期稳定运行管控方案

4.1 构建全生命周期运维体系

摒弃传统“故障后检修”模式,构建“预防—监测—处置—复盘”全生命周期运维体系,提前化解运行风险,筑牢设备长期稳定运行防线,贴合老旧发射机运维实际。建立预防性运维机制,结合发射机部件老化规律与运行时长,制定差异化计划,将核心部件划分为重点与常规两类。重点部件每3个月开展全面检测,涵盖性能测试、磨损检查及清洁保养;常规部件每6个月检测一次,聚焦潜在故障排查。结合季节特点调整重点,高温季加密散热系统检测,雷雨季强化防雷接地检查,提升运维精准度。优化故障处置流程,制定标准化手册,明确排查步骤、处置方法与责任分工。建立分级机制,一般故障现场人员1小时内处置,重大故障启动应急预案、协调技术骨干支援,确保24小时内办结。故障处置后同步开展复盘,深挖原因、优化运维措施,从源头规避同类故障重复发生。

4.2 强化运维团队建设

运维人员专业能力是保障设备管控成效的关键,需通过培训、考核、交流多举措强化团队建设,贴合发射机运维升级后的岗位需求。推行分层分类培训,适配不同岗位能力诉求。基层人员聚焦设备操作、故障排查等基础内容,夯实实操能力;技术骨干侧重新型节能部件、智能控制系统等进阶知识,提升技术优化与研发能力。采用“理论+实操”模式,邀请行业专家授课并组织实操演练,每年开展2—3次集中培训、每次不少于3天,同步搭建线上平台,方便人员随时补学。建立量化考核激励机制,将运维质量、故障处置效率等纳入考核,对优秀者予以表彰,不合格者针对性补训补考。同步设立技术创新奖励,鼓励提出优化建议,对成效显著者给予双重奖励,激发创新活力。此外,组织人员赴同类单位交流,借鉴先进运维经验,拓宽视野、提升整体管控水平。

4.3 搭建数据化管控平台

依托大数据与物联网技术,搭建短波发射机数据化管控平台,贴合短波发射机运维升级需求,实现设备运行数据全流程管控,为运维决策与技术优化筑牢数据根基。平台整合运行参数、能耗数据、故障及运维记录,搭建标准化数据库,实现数据集中存储与规范化管理。借助数据挖掘算法,剖析设备运行规律与能耗变化趋势,可提前预判部件老化及故障风险,助力预防性运维落地。以功率放大器为例,通过分析其运行参数波动,能提前1-2个月预判老化情况,及时更换部件,规避故障停机隐患。联动智能控制系统是提升智能化管控的关键,平台可远程调控运行参数,在设备异常时自动触发指令调整工况,化解运行风险。平台支持电脑、手机多终端访问,方便运维人员实时查看状态、远程排查故障,提升管控效率。尤为实用的是,其具备能耗统计分析功能,可生成多周期能耗报表,直观呈现节能成效,为后续优化指明方向。

5 结语

本文结合某广播电视台150kW短波发射机改造实践,围绕节能优化与稳定管控,提出“硬件升级+软件迭代+全生命周期管控”全方位方案。通过优化功率放大、电源供给、散热三大模块,搭配智能调控与数据化管控体系,切实达成能耗下降与运行稳定性提升的双重成效,经实践验证具备较强可行性与实操性。方案亮点在于打破单一硬件替换局限,注重软硬件协同优化,强化改造后长效管控,规避节能效果短期衰减问题。融入实测数据与实操案例后,方案贴合现场运行需求,但仍有提升空间——智能调控算法自适应能力不足,极端环境下节能成效需进一步验证,后续需持续完善。依托物联网与AI技术,未来可优化算法、引入深度学习,提升复杂场景适配能力。搭建多设备协同管控平台,探索新能源融合应用,推动行业绿色发展,同时推广改造经验,为同类设备提供参考,助力“双碳”目标落地。

参考文献

- [1] 钮安朋.浮动载波技术在100kW短波发射机节能方面的研究[J].电子世界,2017,(08):155.
- [2] 秦峰.浮动载波在DF100A型100kW短波发射机上的节能效果研究[J].信息通信,2015,(09):306-307.
- [3] 汪涛,赵鹏飞,刘平.浮动载波在DF100A型100kW短波发射机上的节能效果分析[J].广播电视信息,2012,(10):81-83.

Optimization of Automatic Control System for Furnace Monitoring in Thermal Power Plant Based on Deep Learning

Yueqiang Wang

China Resources Power Jiaozuo Co., Ltd., Jiaozuo, Henan, 454450, China

Abstract

Thermal power boiler furnaces operate in high-temperature, dust-laden, and radiation-intensive environments. On-site operators typically use flame television monitoring combined with fire detection signals to comprehensively assess ignition risks, combustion deviations, coking precursors, and fire suppression hazards on the Distributed Control System (DCS). This enables synchronized adjustments to coal feeding, secondary air supply, exhaust air, and oil gun deployment. Coal blending and deep peak shaving often cause abrupt flame morphological changes, while traditional threshold-based methods and human experience are prone to false alarms or missed detections under conditions of obstructions, reflections, or sudden light variations. This paper proposes actionable deep learning optimization strategies covering image acquisition, model training, alarm criteria, and control interfaces, with emphasis on long-term operational validation and redundant system configurations.

Keywords

deep learning model; thermal power generation; furnace monitoring; automated control system; optimization

基于深度学习的火力发电炉膛监视自动化控制系统优化

王跃强

华润电力焦作有限公司, 中国·河南焦作 454450

摘要

火电锅炉炉膛处于高温含尘与强辐射环境, 现场通常以炉膛火焰电视配合火检信号, 由运行人员在DCS上综合判读着火、燃烧偏斜、结焦苗头与灭火风险, 并联动给煤、二次风、燃尽风和油枪投退。煤质掺烧与深度调峰使火焰形态更易突变, 传统阈值与人工经验在遮挡、反光与光照突变下容易误报或漏报。本文从图像获取、模型训练、报警判据和控制接口等提出可实施的深度学习优化路径, 并强调模型在长期运行中的校核与冗余配置。

关键词

深度学习模型; 火力发电; 炉膛监视; 自动化控制系统; 优化

1 引言

炉膛监视系统是锅炉燃烧安全链条中的关键感知环节, 其输出影响点火投油、稳燃调整、吹灰节奏以及 MFT 相关保护的判定。中国机组多采用耐高温摄像探头配冷却吹扫的火焰电视方案, 并叠加紫外或红外火检、炉膛负压、氧量与烟温等过程量形成综合监视。随着多煤种掺烧与低负荷调峰常态化, 火焰亮度、形状与摆动呈现强非线性, 视频也易受粉尘遮挡、挂渣反光与镜头污染影响。运用深度学习模型强大的特征学习与模式识别能力, 实现对炉膛监视自动化控制系统的精准预测、实时诊断, 提升设备运行可靠性, 为火电厂的可持续运营提供支撑^[1]。

2 火力发电炉膛监视自动化控制系统概述

火力发电炉膛监视自动化控制系统在火电厂现场通常指以炉膛火焰电视为核心感知手段, 结合火检、炉膛压力、一次二次风量、氧量、烟温与给煤量等信号, 对燃烧过程进行连续观察、报警与联锁提示, 并把关键判据送入 DCS 或就地 PLC 参与控制的成套系统。该系统前端由观火孔、耐高温摄像探头、冷却水或压缩空气吹扫、镜头退出机构与防爆接线构成, 目的是在炉内高温与含尘冲刷条件下保持成像稳定并便于检修退出。中间层通常包含视频解码、画面增强、时间同步与录像回放, 运行侧以分屏轮巡辅助识别燃烧偏斜、脱火、油枪回火以及挂渣遮挡。控制侧并不替代锅炉主控, 而是通过报警分级、逻辑投退与风煤油控制形成配合, 例如在低负荷稳燃阶段把火焰稳定性、喷燃器着火与炉膛暗区扩大作为投油或配风微调的触发条件。如图 1 所示。现场运维还要处理镜头积灰、吹扫风不足、冷却回路泄漏与观火孔结渣等问题, 并设置备用通道与缺画面降级策略, 避免单

【作者简介】王跃强(1990-), 男, 中国山西晋城人, 本科, 工程师, 从事自动化控制研究。

点失效导致误报警或误连锁。在涉及保护的场合，系统输出一般只作为辅助判据，与MFT或炉膛安全监控链条保持可隔离的接口。



图1 火力发电炉膛监视自动化控制系统示意图

3 基于深度学习的火力发电炉膛监视自动化控制系统优化

为保证深度学习从“能识别”走向“能投运”，炉膛监视自动化控制系统的优化必须围绕数据、成像、部署、联动与运维五个环节逐项落地。

3.1 数据采集与标注规范化

为使炉膛监视深度学习模型在现场闭环控制中可复现与可追溯，数据采集与标注应先按热控工程口径固化为标准流程。采集端以DCS事件序列、MFT动作与运行日志对齐为主线，按炉膛燃烧扰动、启停、低负荷稳燃与掺烧等典型工况切片，同时导出炉膛工业电视视频、火检通道状态、燃料阀位、一次二次风量、氧量、炉膛压力及烟温等过程量，并统一到同一时钟源与采样周期，形成带时间戳的样本包；样本包应包含事件前后缓冲区并记录丢帧率与编码压缩参数，过程量需对缺失、跳变与量程超限做显式标记，时间对齐应以对时脉冲或网络授时偏差校验为准；对摄像头分辨率、帧率、镜头冷却风压与退镜次数同步建档，以便后续把画面衰减与设备状态作为输入或筛选条件，满足炉膛安全监控系统技术规程及热工检测仪表设计规程的接口一致性要求。标注端由运行值长与热控专业联合完成，标签体系除有火、无火外，应覆盖火焰偏斜、暗区扩大、油枪着火不稳、疑似脱火、强反光、蒸汽水雾遮挡、积灰失焦等可处置类别，并为每类写出可量化判据，如偏斜需指明偏向的角区或燃烧器层位，暗区用图像灰度占比或有效火焰面积阈值描述，疑似脱火需限定持续帧数并与火检波动同步核验。数据划分按机组、煤种、燃烧器型式与负荷分层，保证低负荷与掺烧样本占比，且把严重遮挡与失焦片段单独归类为不可用画面而非剔除，使模型具备降级触发能力。质量控制采用双人互审、冲突样本仲裁与一致性抽检，复核记录需保留到样本级版本号并固化标注指南的修订轨迹。上线前应建立误判代价矩阵，把各类误判可能触发的运行动作写入配置表，使模型

输出可直接映射到报警分级与处置卡^[2]。

3.2 成像稳态与预处理固化

为使炉膛视频可作为深度学习监视与联锁的稳定输入，成像稳态必须与预处理参数一并固化到运行规程中。一是热控人员统一观火孔安装标高、视场角与焦距组合，按燃烧器层位和炉膛四角布置覆盖矩阵，投运前用标定板或炉墙固定构件完成几何标定并固化像素到实际尺度的换算关系，同时在DCS中记录每路镜头对准基准与最小可见火焰边界，避免取景偏移造成燃烧分级误判。二是现场按月校核吹扫风压、风量与冷却回路压降，建立镜头温度、冷却水温差与污染速率趋势曲线，设置遮挡率和污点面积阈值告警，退出机构动作后由控制逻辑自动触发重新对焦与白平衡校准，并把对焦失败、白平衡漂移或帧丢失标记为数据不可用，训练与在线推理均按该标记剔除。三是预处理采用固定ROI裁剪、畸变校正与时间域稳像，稳像参考点选炉墙特征或喷燃器外轮廓，结合相位相关或光流估计求位移，并限制帧间位移与旋转上限，使振动抖动落入可训练范围且不引入拖影。四是针对粉尘灰雾与热漂移，在线使用轻量去雾、对比度拉伸与亮度归一，先建立每路相机灰度基线并做慢变补偿，但对增益和伽马设置硬上限，同时用直方图饱和度与高亮连通域持续时间判别抑制结渣反光和火星飞溅，再用形态学开闭运算滤除点状高亮并保留连续火焰纹理与边界^[3]。五是预处理参数按负荷、配风方式与煤种分组保存，旁路回放先做帧质量评分与报警回溯，再以版本号写入在线配置，并在工况切换时由逻辑锁定参数防止频繁自适应漂移。机组配置紫外或红外火检时，系统将其开关量与视频时间戳对齐用于异常溯源，同时把观火孔清渣、镜头擦拭与吹扫喷嘴检查纳入点检并在检修后按标准火焰工况复采样。

3.3 边缘部署与冗余降级设计

为使深度学习炉膛监视在火检联动中可用、可控且可维护，部署应以边缘实时推理与冗余降级链路为主线组织。一是现场端采用就地工控机或摄像机侧盒式算力，运行轻量检测或分类模型，先对画面做去抖与ROI裁剪，再判别火焰存在、暗区占比、遮挡与镜头污染，并把输出固化为健康标志与置信度，循环周期控制在100ms以内，推理超时即丢弃本帧以避免延迟累积。二是厂级服务器仅对边缘端标记的疑似片段做细分识别与时间趋势回归，服务器侧通过队列异步处理并限定回写频率，结果以提示量写入监视画面或历史库，不直接参与DCS连锁，从接口层把运行建议与保护动作隔开。三是模型压缩按通道剪枝、训练后量化与分辨率分档分步实施，每一步都用同机组回放样本复算误报与漏报，并对典型工况如低负荷、稳燃、启停与吹灰阶段做分组对比，同时验收推理时延、CPU占用、机箱温升与帧丢失率，发现误报上升或温升超限即回退到上一档配置。四是在线运行设置看门狗与健康度评分，连续出现帧率下降、推理超时或码流中断时，控制逻辑自动切换到传统火检信号与人工视

频,并在值班站给出降级原因、持续时间与恢复条件,运行人员按告警清单排查相机、网口、电源与模型进程。五是关键链路按双网口、双电源与旁路切换布置,相机到边缘端采用主备交换机或环网并设置链路心跳,边缘端到服务器的上送通道实施限流与断点续传,异常时仅上送状态量并本地缓存关键帧索引。另外,版本更新采用灰度投运与一键回退,更新过程保持DCS点表、量程与时标不变,运行日志固化结果、关键帧索引、版本号与校验值,网络与控制网经受控网关隔离并启用访问审计。

3.4 报警分级与控制联动闭环

为使炉膛视觉智能从能看见走向可处置,系统需把模型判据固化为DCS可执行的量与可追溯的闭环边界。信号映射层应把火焰偏斜角、暗区占比、火焰中心漂移与亮度波动等特征换算为0~100的燃烧稳定指数,并附带模型置信度与摄像机可用标志,DCS端按滑动窗口取中值并对变化率限速,降低闪烁与抖动干扰。报警分级宜采用视觉与火检并列融合:当稳定指数下滑但火检正常时定义为I级提示,系统仅给出受限调节范围,如一次风配比限幅、二次风挡板微调与分层燃尽风小步进,并要求运行人员确认后下发^[4]。当稳定指数跌破阈值且火检、炉膛负压及氧量同步异常时定义为II级预警,系统触发稳燃序列,投入对应层油枪、下调给煤速率、短时提高二次风并监测火检恢复,延时与幅度按机组试验整定。动作序列应配置时间窗、退出条件与互锁,典型做法是在30~90s内要求稳定指数回升且火检恢复,否则自动退出并转入人工处置,同时对风煤调整设置最小保持时间与反向死区,抑制摆动。验证闭环应结合历史灭火事件回放与现场低风险工况试验,逐条校验触发条件、延时、互锁与手动优先,并固化一键切除视觉联动回归原控制的路径。在涉及灭火保护场合,视觉输出仅以只读量进入安全链条或作为并列提示,不直接改变MFT动作条件对结焦挂渣趋势,系统输出附着区面积与遮挡率,形成吹灰优先级,经人工确认后调整吹灰器顺序和频次,并把指数回落量写入班报。现场运维应建立阈值、模型版本与摄像机清洁状态台账,联动动作每次触发自动记录特征量、操作量与结果,并与DCS事件顺序记录对齐,用于班组复盘与再整定。

3.5 模型巡检与再标定机制

系统投运后,现场班组要把模型巡检与再标定做成可执行的运维工序,而不是依赖一次性验收。热控人员应以月度或季度为周期建立性能巡检清单,按负荷分层抽取30%~100%负荷、不同煤种与不同配风方式下的关键帧与短

序列,并把模型告警时间戳与DCS事件、检修处置记录逐条对齐,形成漏报、误报、延迟报三类问题台账,同时统计问题在镜头通道、燃烧器层级与工况区间的分布,用于区分视觉遮挡、光学衰减与工况迁移引起的特征漂移。运行侧应同步跟踪置信度分布、输入亮度直方图、特征相似度等漂移指标,若同一通道连续两次巡检劣化,班组应先对观火孔吹扫风量、冷却水路、镜头窗口结渣与对焦状态执行点检消缺,消缺后再复测,避免以阈值补偿掩盖设备缺陷。机组发生燃烧器改造、观火孔位置调整、摄像机更换或煤质结构明显变化时,项目组应启动再标定流程,先在离线回放平台复现改造前后典型工况,复核标注口径与处置判据,并限定训练数据时间窗,剔除事故处置、异常吹灰与检修造成的非稳态画面,再采用小步长增量训练或迁移学习更新权重并做输出校准。新模型上线前应以旁路并行方式运行,保持同一预处理链与阈值配置,连续覆盖一个生产周期,比较告警一致性与处置闭环差异,确认差异处于设定范围后切换为主用,并保留旧模型的回退入口^[5]。系统应把阈值、版本号、预处理参数与镜头点检记录绑定存档,变更须经审批并自动生成回退包。平台应维护基准模型用于对照,当在线模型性能劣化时提示回退并锁定触发原因,同时定期备份配置与模型文件以便工控机更换后恢复一致状态。

4 结语

综上所述,炉膛监视系统的深度学习优化应以火电厂现有火焰电视与火检体系为基础,通过数据口径统一、前端成像稳态、边缘实时部署、分层联动逻辑与持续运维治理实现闭环。工程实施过程中,项目组需把降级与回退作为必备设计,并以回放校核和低风险试验验证每一条触发链路,确保系统在复杂工况下可控可用。系统投运后应保持日志可追溯与点检制度常态化。

参考文献

- [1] 赵焱.基于深度学习的火电厂锅炉燃烧优化与氮氧化物减排协同控制研究[J].行车指南,2023(5):0098-0099.
- [2] 胡显辉.基于深度学习的固废焚烧过程关键变量多步预测[D].大连海洋大学,2024.
- [3] 王化鲁,谢发焕,杜宇博.基于深度学习的链条炉火床燃烧工况分析[J].数码设计,2024(23):108-110.
- [4] 张元正.火力发电企业燃料智能化管理系统研究与应用[J].河南科技,2022,41(24):28-32.
- [5] 吴进勇.基于遗传算法的火电厂锅炉炉膛燃烧二次风挡板调节多目标优化策略[J].进展,2025(15):137-139.

Application of Integrated Assembly Electromechanical Installation Technology in Underground Rail Transit Fire Pump Room

Xing Huang Xingyun Tan

Sinohydro Bureau 7 Co., Ltd., Chengdu, Sichuan, 610213, China

Abstract

Underground subway station fire pump rooms are characterized by compact spaces, multiple system interfaces, and frequent maintenance requirements. Traditional “on-site cutting-welding + piece-by-piece installation” methods often accumulate deviations during cross-operations, resulting in high rework costs. The integrated prefabricated electromechanical installation adopts a factory-precast and integrated approach, organizing pump units, valve assemblies, support brackets, and electrical control components into transportable, installable, and interconnectable units. This enables rapid positioning and verifiable assembly of critical equipment within the pump room, while solidifying maintenance access routes, equipment entry/exit points, and operational interfaces as assembly boundary conditions to meet regulatory requirements for installation space and control cabinet layout. To ensure comprehensive quality and schedule benefits, the project implementation must incorporate fireproofing, waterproofing, and operational maintenance characteristics specific to subway projects, establishing practical modular divisions, standardized interfaces, and on-site acceptance protocols.

Keywords

Integrated Prefabricated Mechanical and Electrical Installation Technology; Underground Rail Transit; Fire Pump Room; Application

整体装配式机电安装技术在地下轨道交通消防泵房中的应用

皇兴 谭幸芸

中国水利水电第七工程局有限公司, 中国·四川成都 610213

摘要

地下轨道交通车站消防泵房空间紧凑、系统接口多、后期检修频繁,传统“现场切割焊接+逐件就位”的做法容易在交叉作业中累积偏差,且返工代价高。整体装配式机电安装以工厂预制、成套集成为主线,把泵组、阀组、支吊架与电控部件按可运输、可就位、可对接的单元组织,实现泵房内关键设备的快速定位与可复核装配,并把检修通道、设备进出与操作面作为装配边界条件一并固化,满足消防泵房对安装空间与控制柜布置的规范要求。工程实施中仍需结合轨道交通工程的防火、防水与运维特点,形成可落地的模块划分、接口标准与现场验收方法,才能稳定取得质量与工期的综合收益。

关键词

整体装配式机电安装技术; 地下轨道交通; 消防泵房; 应用

1 引言

预制装配式施工正处于高速发展阶段,机电泵房装配式技术由于其标准化、精细化、工序前置化等优势,正逐渐以各种形式应用于不同工程中^[1]。在中国地铁新线建设与既有有线改造中,消防泵房往往位于设备区深部,吊装转运受限,且泵、阀、电控与通风排水多专业同时进场,质量问题常集中在设备找正、法兰密封、支吊架受力与电缆端接等细部。装配式机电把现场高强度、易波动工序前移到工厂与场外预装,减少现场焊割与反复试装,同时通过分段验收把系统功

能一次交付。

2 整体装配式机电安装技术概述

从地下轨道交通施工现场的可操作性出发,整体装配式机电安装并不是把设备“做大做重”,而是把泵房内机电系统按运输条件与安装路径拆成若干成套单元,并在工厂或场外完成部件装配、定位基准与接口预留。其核心含义可以概括为三点:第一,模块以“功能闭合”为边界,例如把消防泵组底座、减振件、联轴器防护与基础二次灌浆控制面作为同一就位单元,使现场只需按基准线落位复核即可进入对接工序。第二,接口以“可复核”为原则,管段预制时同步固化法兰面距、阀门操作面、放空排水口朝向与支吊架点位,避免泵房内二次改孔改向。第三,交付以“成套验收”为目标,

【作者简介】皇兴(1989-),男,中国四川冕宁人,本科,工程师,从事市政及城市轨道交通工程施工管理研究。

除单机试运转外,还将控制柜位置、防护等级、设备进出与检修空间等作为装配质量的一部分进行检查,使技术路线与消防泵房设置及验收条款相衔接。

3 整体装配式机电安装技术在地下轨道交通消防泵房中的应用

3.1 消防主泵组整体装配就位

地下轨道交通消防泵房空间受限且成品保护要求高,主泵组宜以底座单元化思路实施整体装配就位,现场把调平、减振、限位与检修界面一次固化。第一,场外预装阶段由机电班组按出厂对中值复核电机与泵的同轴度,联轴器间隙与护罩同步安装,底座下预装成套可调垫铁或可调减振器并统一编号,紧固件规格成套化并复核预紧力,底座两侧刻设中心线与标高基准点并预留塞尺复核口,进场后用激光标高仪与钢尺复测基础平整度,宜控制在2m靠尺间隙不大于2mm,再逐点微调并做好复测记录。第二,底座与基础界面采用限厚控制条控制二次灌浆厚度,常用厚度30至50mm,底座先落在临时垫块上复核门洞转运、管线净空与检修侧净距,确认无干涉后再落到减振器上并校核四角压缩量宜基本一致,灌浆前设置侧向限位片与防漂移拉结,严禁用外接管道硬拉硬顶作为定位手段,灌浆终凝前不得二次扭动底座^[2]。第三,进出水短节与必要的压力表三通、试水接口宜随泵组预装至法兰前一跨,短节端面加装运输保护盖并标识流向、法兰等级与垫片材质,并按规范在出水侧预留DN65试水管位置及流量、压力测试接口,现场对接只在明确接口完成,螺栓按对角分三次均匀紧固并复核法兰间隙一致,必要时记录扭矩值以便交接,同时在短节与阀件之间预留可拆短节长度,保证后续更换止回阀或软接时不拆整段管网。第四,泵组周边同步固化检修与吊装条件,检修侧通道净宽宜不小于0.8m并避开电控柜开门半径,底座端部预留抽芯或拆联轴器空间,必要时设置可拆护栏段。吊点应直接连接主体结构或可靠承重构件,单点许用荷载宜按设备自重的1.5倍选型并标识起吊方向,同时在减振器处设置限位螺栓或侧向止挡,限位间隙宜控制在3至5mm以兼顾减振与抗位移。

3.2 稳压装置与附件成套安装

地下轨道交通消防泵房稳压系统宜按成套撬装思路组织安装,使现场工作从找点配管转为就位对接。第一,稳压泵、气压水罐与安全阀、止回阀、压力表、排水放空阀宜在厂内或场外预装为撬装单元,撬座下设置橡胶减振垫或弹簧隔振器并预留二次灌浆口,撬座自带吊点与受力支点,进场后安装人员复核预埋螺栓孔距和标高,按中心线定位后分级紧固并控制四角压缩量一致,同时在泵进出口加装金属软接或橡胶挠性接头并预留50至80mm补偿行程,必要时用塞尺检查撬座与基础贴合,避免罐体荷载传递到小口径支管。第二,撬装内进出水短管、旁通与试压接口应一次预制完成,

优先采用沟槽或法兰连接减少丝扣点位,法兰密封面在预装阶段做防碰保护并在现场对角分三次紧固,撬座两侧布置可拆短节和伸缩补偿段,保证更换稳压泵或止回阀时拆装长度不大于300mm且不牵连主管,阀门手轮朝向检修通道并预留不小于250mm的回转空间,试压口宜设置带盲板的快速接头并在撬座外侧标注介质流向。第三,压力表取压、罐体放空与排水宜用成套小管组预装,支管管径宜控制在DN15至DN25并设置防误碰托架,压力表前增设截止阀与缓冲弯并配置阻尼器减少指针抖动,取压点与控制柜端子按同一编号挂牌对应,现场只做方向核对和通断检查,同时把常开阀门采用铅封或锁扣固化并悬挂状态牌,减少检修时误关。第四,单元就位后按系统验收逻辑调试,安装人员先在不末端放水条件下核对启停压力设定,使准工作状态压力较启泵压力增加0.07至0.10MPa,并通过小流量泄放模拟管网渗漏观察压力波动,稳压泵启停频次宜控制在每小时不大于15次,气压罐有效储水容积不宜小于150L,同步完成主备泵自动切换与止回阀回闭检查,最后对法兰、卡箍和小管组逐点复检渗漏并记录参数^[3]。

3.3 吸水出水管段与阀组模块化拼装

为适应地下轨道交通消防泵房空间狭窄、吊装受限与工期压缩的条件,吸水出水管段与阀组宜采用整体装配式成套预制后现场快速对接的做法。第一,深化时以泵口中心线为基准把吸水管首段与出水管首段拆分为可吊装阀组模块,模块范围通常覆盖泵口至主管前1.5~3.0m,内含闸阀、止回阀、过滤器及按设计配置的泄压或水锤消除构件, DN150~DN300常见口径优先采用法兰连接并统一垫片材质与厚度,单个模块宜控制在0.3~0.8t便于小型电动葫芦就位,工厂预装完成短节长度校核、阀门启闭行程复核与接口编号,并在重心处设置吊点与防磕碰护角,两端设置标准法兰面对接并加临时盲板防尘,现场不再改口补短节以免占用净空。第二,阀组模块必须自带受力支点与限位,支架型式随土建条件选可调托架或滑槽连接,支点坐标与标高在预制图中固化到梁底或预埋槽位置,吊装就位先落在临时垫块上复核中心距、标高与检修侧净距,确认无干涉后再与支架锁固,支架与管段之间宜加耐磨垫片并设置侧向限位,避免启停冲击下产生爬移,使阀体与过滤器重量由支架承担而不是由泵口法兰悬吊,从源头控制端面偏斜与垫片受剪。第三,法兰密封面处理与螺栓紧固纳入装配工序卡控,进场后清洁密封面并复核垫片无折伤,螺栓强度等级与长度在模块清单中统一,安装时对螺纹润滑,按对角分3~4次均匀紧固并以塞尺抽查法兰间隙一致性,必要时按设计或厂家要求记录扭矩并二次回拧,阀门操作方向、阀位指示与常开锁定标识一次固化到位,避免通水后再调向而引入二次渗漏。第四,模块间在靠近检修侧预留可拆短节与试验接口,接口口径宜满足接软管放水与压力表接入,同时设置放空与排水点便于冲洗排气,试运转时按流程完成末端试水、泄压动作与泵启

停联动核验,拆装路径限定在模块边界内并预留扳手旋转空间,确保后续检修不牵连相邻管段^[4]。

3.4 电气控制柜与电缆成套敷设

为使地下轨道交通消防泵房电气装配在狭小空间实现位置可达、端接可追溯与切换可验证,控制柜与电缆敷设应按成套单元一次定型并与土建界面同步锁定。第一,消防泵控制柜、双电源切换箱与就地按钮箱采用成套底座预装,底座孔位与预埋件一一对应并编号,进场后复测基础标高与螺栓外露长度再就位,柜前操作净距控制在1.2至1.5m并校核开门回转半径,柜侧与墙面留检修缝且避开阀门操作区,底座四角用可调垫铁找平后分次紧固并做扭矩标记。第二,电缆桥架、支吊架与穿墙套管按防火分区预制为标准段,直线段宜2至3m成段配套连接板与跨接线,转弯、爬坡与进柜段采用成品转接件并在厂内倒角去毛刺,现场以插接和螺栓连接为主,振动区连接件加防松措施,穿越分区处预留封堵槽口并设置可拆挡板便于后续封堵。第三,动力与控制电缆在预制阶段确定走向与分层,动力宜下层、控制宜上层并保持间距,敷设前按回路清单核对规格与阻燃耐火等级,电缆固定点间距随水平段与竖向段分别控制并避免在转弯处悬空,弯曲半径按外径倍数复核,进柜处采用成套护口和密封接头,线芯压接端子统一型号,号码管、端子号与回路号一致并形成台账。同一桥架填充率宜控制在40%以内并预留扩容余量,电缆两端挂回路标识牌与竣工图一致,穿墙套管内加阻燃护口防止磨损。成束敷设时分层隔离板应连续设置,控制电缆屏蔽层在柜端单点接地并留检修余量,电缆进柜前清洁外护套并封堵孔洞防尘。第四,系统交付前按点对点法完成回路导通与相序核对,控制回路用500V兆欧表测绝缘电阻并记录 $\geq 1M\Omega$,桥架跨接与接地连续性复核,随后完成双电源自动与手动切换、泵组远程与就地启停、故障与欠压信号联动等试验,试验记录与端子号、回路号对应归档。

3.5 通风排水与附属设备一体化安装

在地下车站消防泵房内推进整体装配式机电安装时,通风、排水及附属设备应以成套预制与界面固化为主线组织。第一,送排风机、消声器、软接与检修段宜在场外组成为吊装单元,单元自带可调吊点与防振垫座,吊点优先落在结构预埋件或承重槽道上,现场用螺栓连接完成标高微调并控制机组水平偏差不大于2‰,减振器压缩量宜控制在

10至15mm,软接段有效长度宜取150至200mm并控制同轴,风管短节同步完成法兰找方、密封条粘贴与螺栓成套化配齐,接口处预留20至30mm拆装余量,现场仅对口紧固并复核漏风检查孔与测点位置,避免高温环境下反复补胶。第二,集水坑排水泵采用导轨式成套组件时,应把导轨、底座、自动耦合装置与提升链条在预制阶段试装到位并编号,进场后以坑口控制线复测导轨中心距与垂直度,底座通过预埋件或膨胀螺栓固定并校核耦合面贴合,液位开关固定支架随泵组预装,低液位点距坑底宜留150至200mm,出水立管与止回、闸阀宜布置在同侧检修面,阀前后预留不小于300mm可拆短节,并在高点设放气口、低点设排泥口。第三,泵房排水管、通气管与地漏支管宜按坡向分组预制,管组出厂前完成坡度与支吊架点位校核,支管坡度宜不小于0.5%,转弯处预留清掏口并做可拆封堵,穿墙穿板处采用可拆密封组件与止水套管配套,密封压紧件应可二次复紧并留有可视检查边,同时在地漏周边配置可拆格栅与沉砂篮,沉砂篮容积宜不小于3L且便于提取。第四,附属设备的控制与报警应随单元成套预接并在现场按端子编号逐点核对,交付前完成送排风启停、排水泵高低液位启停、故障报警及手动切换试验,通风量宜按6次/h控制并检查进排风口无遮挡,同时复核挡水坎高度、排水通道净宽与最大设备搬运路径。

4 结语

整体装配式机电安装在地下轨道交通消防泵房的落地,应以设备为单元组织工厂化预装,以接口为边界控制现场对接,以验收为闭环完成系统交付。实施中需要把泵组就位基准、阀组模块受力、控制柜操作净距、桥架端接可追溯以及通风排水可维护等内容写入装配深化与工序卡控,并与消防泵房的空间、控制与功能验收要求同步核对,才能在受限空间内稳定实现一次安装到位与可持续运维。

参考文献

- [1] 张东锋,周醒,栗仁君.BIM技术在消防泵房装配式安装工程中的应用分析[J].中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术,2021(1):2.
- [2] 沈洁,易乐平.整体装配式消防泵房在机电安装中的应用[J].上海建设科技,2023(1):46-48.
- [3] 穆育红,王斌.轨道交通装配式消防泵站设计与应用研究[J].给水排水,2021.DOI:10.13789.
- [4] 荀红英.BIM和装配式施工技术在设备机房的应用[J].广东土木与建筑,2020(7):116-118.

Instrumental Rationality and Emotional Skepticism: A Binary Analysis of User Attitudes Toward AI Partners (AIC)

Liling Guo

Hangzhou Zhen'ai Medical Aesthetic Clinic Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang, 325000, China

Abstract

As a paradigm of generative AI in emotional companionship, AI Companion (AIC) has become a vital digital solution for alleviating loneliness and providing emotional support. This study examines the dualistic dichotomy between instrumental rationality and emotional skepticism through a systematic review of core Chinese and English literature, elucidating the core manifestations, formation mechanisms, and practical impacts of AIC user attitudes. The analysis reveals that while the public recognizes AIC's instrumental value, they question its emotional authenticity and bidirectional relationship-building capabilities. AIC enhances tool usage willingness but constrains deep emotional connections, while simultaneously weakening the risk-sharing mechanisms of real-world social relationships. Finally, the paper proposes optimization pathways from three dimensions—technical transparency, cognitive guidance, and ethical norms—to guide the healthy development of AIC and the refinement of rational interpersonal relationships.

Keywords

AI Companion (AIC); Attitude Dichotomy; Instrumental Rationality; Emotional Skepticism; Interpersonal Relationships

工具理性与情感质疑：AI 伴侣（AIC）用户态度的二元分化分析

郭丽玲

杭州祯爱医疗美容门诊部有限公司，中国·浙江 杭州 325000

摘要

AI 伴侣（AI Companion, AIC）作为生成式 AI 落地情感陪伴的典型形态，已成为数字社会中缓解孤独、提供情绪支持的重要载体。本文将以工具理性与情感质疑的二元分化命题为核心，以梳理中英文核心文献为依据，阐述 AIC 用户态度二元分化的核心表征、形成机理与现实影响。分析发现公众认可 AIC 的工具价值，却质疑其情感真实与关系双向；AIC 即提升工具使用意愿，制约深度情感的建立，同时也带来社交现实关系的弱化分险。最后，本文将从技术透明、认知引导、伦理规范三个维度提出优化路径，为 AIC 健康发展与理性人际关系领域的完善提供参考。

关键词

AI 伴侣（AIC）；态度二元分化；工具理性；情感质疑；人际关系

1 引言

随着生成式 AI 技术的迭代，AIC 从概念走向普及，以全天候在线、稳定性输出、定制化共情等特性，融入了各个年龄群体之中。腾讯研究院调研显示，98% 的受访者愿意尝试 AIC 服务，79% 的用户认可其无顾虑情感宣泄的价值^[1]。与此同时，哈佛商学院 2025 年的研究证实，多数用户认为 AIC 无法实现人际关系的核心价值 - 相互关怀，将人机关系界定为“单向的、非真实的”；72% 的用户承认 AIC 能提供被理解，18% 用户认可其真实的双向交流^[10]。

【作者简介】郭丽玲（1993—），女，中国甘肃人，本科，高级形象设计师，从事应用心理学研究。

这种“认可工具价值、质疑情感真实”的现状，构成了公众对 AIC 态度的核心特征，即本文聚焦的“工具理性与情感质疑”二元分化命题。本文对文献中的核心问题、研究价值以及研究空白与未来方向进行系统性分析，试图理清态度分化的表征与逻辑，也期望能为 AIC 发展研究提供参考。

2 核心概念与理论基础

2.1 AI 伴侣（AIC）的界定

AI 伴侣是具备情感计算、拟人交互、长期记忆能力的对话式 AI，区别于工具型 AI 助手，其核心定位在于情感陪伴与情感支撑，通过拟人化回应、语境理解、个性化适配、模拟人类陪伴的交互体验，满足用户的倾诉、共情、陪伴等情感需求^[2]。目前 AIC 所提供的无批判的接纳、即时的反

馈和绝对的忠诚，是大众选择 AIC 的主要原因。

2.2 态度二元分化理论

态度二元分化指个体对同一对象同时存在两种相互矛盾的认知、情感与行为倾向，表现为“认可-质疑”的双重状态。在 AIC 场景中，表现为工具理性的认可性和情感真实的质疑性，由于两种态度的共存，形成了认知与情感的分离^[3]。相比人类群体来说，AIC 的确可以满足用户的技术操作需求，但由于没有实体的在场，让大众觉得它“不够真”，由此产生了抵触。

2.3 工具理性与价值理性理论

马克斯·韦伯的工具理性与价值理性理论为二元分化提供了理论框架：工具理性聚焦好用、快速、提供搜索帮扶，让公众认可其价值所在，价值理性聚焦意义、真实、伦理，对应公众对 AIC 感情的真实性质疑^[9]。二者的张力，是 AIC 态度二元分化的核心理论所在。工具理性的聚焦在于程序的设定和功能需要，这种算法模拟出的理解与共情，导致对价值理性的质疑，让用户群体明白算法共情不等于发自内心的关怀。

3 AIC 态度“工具理性与情感质疑”二元分化命题的阐述

3.1 工具理性：工具价值的普遍认可

对于工具理性的认可与接受，主要表现于以下三个方面：

情绪支持的高效性。AIC 在情绪支持方面表现出全面化的顺从，无批评、无延迟，为性格内向者、社交焦虑者以及无自信者提供安全的情绪空间。48% 的用户担心影响他人而压抑情绪^[7]，AIC 成为低成本的释放通道，在任何场合，被倾听显得尤为重要。

陪伴需求的无时空性。AIC 在陪伴方面突破了空间、时间，满足用户的各种需求，让找 AIC 沟通的用户无压力，永不缺席的特性填补了现实人际关系的空隙，让 AIC 近年来成为部分人群的刚需所在，例如孤独群体、独居群体、社交回避群体等。

交互体验的可得性。AIC 通过记忆用户的偏好、对话方式、喜欢话题，定制个性化的回应，避免人机沟通中存在的各种冲突、误解与消耗，形成了最为舒适化的交互体验。

简言之，AIC 使用者视其为高效、解压、舒适的沟通工具，工具价值得到普遍的认可，形成了对工具的积极态度。

3.2 情感质疑：情感真实性的本质质疑

情感质疑是指公众对于 AIC 存在的关键质疑所在，指向了情感与关系的本质属性，主要表现于以下三点：

情感的非真实性。并不像人类群体一样，情感的抒发来自于生命体验的真实共情，冰冷的算法让人容易意识到情感的模拟生成，其全天候、无打击的回应是程序化的输出，本质是一种幻觉的显现。特克尔认为，真当的亲密感恰恰需

要面对一个不完全可控的、独立的他者。

关系的单向性。我们总是说关系是双向奔赴、互相付出的，而 AIC 对使用者的响应、无条件的迎合，来自于算法的计算，并非真实的情感流露，这种人机关系更多的被界定为单向的，对使用者来说是一种依靠式的索取，而对 AIC 来说是一种单项式的输出。在我们人际关系中总是存在被误解、被排斥、被诟病的现象，而 AIC 的存在完全规避了这些风险，让我们跟 AIC 的关系处于温室的保护罩中。

伦理的边界感。AIC 通过将输入的内容整合化，提供给不同需求的群体，关于沟通的边界在那里，更多的是代码编程的设定，无法场景化的识别具体化，关于这一点也是伦理质疑之所在。如果我们往后余生在 AIC 陪伴下生活，而这种生活方式是永不拒绝、永远温柔的，那我们会不会再有勇气去爱一个有血有肉的、具体的人？

3.3 二元分化的核心特征

AIC 二元分化呈现“认知分离、情感质疑、场景差异”的特征：在认知中，公众还是明白工具虽好用，但情感并非真感情；情感上，接受工具理性，质疑情感真实的矛盾状态；在场景上，各种话题所依附的情景化不同，分场景边界化表达依然是工具所需要进一步学习的。

4 AIC 态度二元分化的形成机理

4.1 个体认知层面：人际关系的本质界定

用户对人际关系的本质认知是二元分化的底层逻辑：多数用户将 AIC 定义为“工具”而非“主体”，这种认知奠定了态度的基本框架^[12]。一方面，认可工具的功能好用；另一方面，质疑工具情感的主体，就是人们常说的“机器只是冰冷的机器”，在现实中更多的是体验上依赖 AIC，认知上排斥的分裂状态。

4.2 技术特性层面：情感模拟与真实情感的边界

目前的技术特性强化了情感质疑抗拒：技术更多的是通过算法模拟，具体化为语音训练、表情识别、话语匹配来模仿人类的共情，却由于缺乏自我意识、真实情感与情景化体验让人类抵制 AIC 成为更深入化的陪伴，不吵架、不质疑、不冷漠的交互方式，太过于完美，与人类的关系交际形成一定的冲突对比，让机器有了虚假化的存在^[4]。

4.3 社会文化层面：人际关系伦理的规范约束

社会文化与伦理规范为情感抗拒提供了外部约束：人类的关系主要以真实性、双向性、责任感为基础，AIC 单向的输出不符合人类的价值共识^[5]。在媒体叙事、舆论导向方面提出社交退化、情感异化等，加剧了对 AIC 的质疑抗拒。

5 二元分化态度的现实影响与效应

5.1 对使用行为的调节效应

二元分化态度塑造了 AIC 工具使用性模式：使用者更多将 AIC 作为情感宣泄、陪伴消遣的工具，而非深度的情感伴侣^[10]。功能接受提升了技术粘性，情感抗拒限制了使

用边界,避免过度依赖,形成了理性使用,过度投入感情的特征,这种效应即保障了AIC工具的价值落地,也降低了情感异化的风险。

5.2 对人际关系的制约

情感质疑抗拒成为深度人际情感连接壁垒:即使技术不断更新迭代,也难以突破人为认知,AIC的非真实性无法替代人类关系,只能算是补充,这一制约限定了AIC的定位,也划分了人际关系的边界^[11]。AIC对于我们来说,既不是猛兽,也不是万能药,而是一种取决于使用者定性的工具。人类在追寻陪伴者的过程中看重同频和共振,而人作为一个个独立的个体,受到各种因素(例如成长环境、家庭的经济支持等)的影响,在有限的时间内大多数人终其一生都未实现,而AI就成了人类的人际关系补充以及情感的替代。

5.3 对用户心理体验的双重作用

积极方面,工具理性为部分群体(高孤独感、社会焦虑者、经历依恋创伤与丧失者、Z时代数字原居民)提供了无压力陪伴、缓解了个体焦虑压力,稳定了社会关系^[14];消极方面,长期接触AIC的陪伴,会提高对人类群体关系的要求阈值,过于完美的“共情”与人类是冲突的,进而降低了这部分群体的社交能力、弱化了情感共情。麻省理工学院研究显示,长期使用现实社交共情能力下降27%,形成“数字温室效应”^[8]。剑桥大学神经科学研究进一步证实,过度依赖AIC会使用户前额叶皮层活跃度降低19%,加剧社交能力弱化^[13]。因此,在积极与消极之间,如何把握使用剂量、用户特征、互动深度、社会语境成了关键。

6 破解二元分化的路径思考

6.1 技术层面:平衡功能优化与情感透明

AIC产品目前集中于“情感模拟”,缺乏“真实情感支持”^[11],因此需做到:一明确告知用户AIC的运行逻辑,避免造成情感欺骗;二优化工具价值,聚焦正确理念的疏通引导、积极化的陪伴,不要过度拟人化;三建立边界提醒服务,防止过度依赖,保障用户的心理安全。AIC的作用,在于使用之“度”与社会之“境”。

6.2 用户层面:构建健康的人际关系认知

通过科普与引导,帮助用户理解工具的价值,AIC只是人际关系的补充,而非是人类的替代^[3]。清晰虚拟情感与真实情感的区别,鼓励使用者正确使用,将人际关系转移到线下,而非线上。当AIC被适度使用、作为真实关系的补充时,给用户群体提供了急需的情感支持;当过度依赖、取代真实连接时,对使用者来说容易练就毒药,因此“使用剂量”显得尤为重要。

6.3 社会层面:完善伦理规范与引导机制

在社会层面需建立伦理准则,明确模拟边界、数据隐私保护、用户权益保障;媒体舆论导向的引导,避免极端以及模糊化的报道;社会多包容部分群体,塑造正确的人际关

系形式,平衡工具理性与情感的抗拒^[6]。伴随着AIC的逐步完善,社会整体孤独感下降,心理健康服务可及性提升;社会信任危机,出生率可能进一步下降,代际断裂,将导致系统性的风险。在一个技术能够模拟情感、算法可以提供陪伴的时代,如何守护“社会”根基、定义“人”的价值、平衡二元亦或多元关系是我们需要注意的。

7 结语

本文围绕“工具理性与情感质疑的二元分析”为核心命题,系统阐述了该态度的表征、机理与影响。研究证实:公众对AIC的态度是工具理性与情感质疑的产物,功能接受基于效用认可,情感质疑源于真实性的体验,二者共同构成了矛盾而稳定的态度框架。这种AIC二元分化保障了工具的落地性,也制约了情感的深度投入,同时给用户带来了社交异化的潜在风险。

未来AIC的发展,应回归工具赋能情感,而非取代情感的本质,在技术优化、认知引导、伦理规划的协同下,实现工具价值与情感边界的平衡。对用户而言,清醒认知二元态度、理性使用AIC、坚守真实人际,是构建真实人际关系的核心;对学界而言,需进一步开展实证研究,量化二元分化的影响因素与效应,为人机关系理论完善提供更坚实的支撑^[2]。

在数字情感日益普及的时代,正视AIC态度的二元分化,不是否定技术的价值,而是让技术更好的服务于人类的真实情感,最终实现人机共存状态。我们需要对未来保持乐观,正如马斯克所说“究其生活质量而言,与其悲观的预测未来并最终证明是正确的,不如乐观的预测未来,即使最终证明是错误的”。

参考文献

- [1] 腾讯研究院.十问“AI陪伴”研究报告:现状、趋势与机会. 2024(10).
- [2] 黄浩宇,任梓源,方兴东.算法的逻辑与人类的温度—2025年情感智能研究综述[J/OL].青年记者. <https://doi.org/10.15997/j.cnki.qnjz.20260107.001>
- [3] 赵瑜,曹凌霄.人机亲密关系中的“媒介唤起”与用户试探行为研究[J].新闻与传播研究,2026(1):78-95.
- [4] 张丽萍,张立涛.对“生成式情绪”的共情实践:人对AI情感智能体的情绪感知与共情[J].国际新闻界,2025(7).
- [5] 刘梦雪,冯雨兔.AIGC时代青年与智能伴侣的虚拟交互及其风险审视[J].新疆社会科学,2024(6).
- [6] 工业和信息化部等部门.人工智能科技伦理管理服务办法(试行)[EB/OL].(2025-08-22). https://www.miit.gov.cn/jgsj/kjs/jscx/gjsfz/art/2025/art_092a447008f340d3abd55819b8c8e5cf.html.
- [7] Joi AI.Z世代AI伴侣情感关系调查报告[R].2025.
- [8] Fang C M, Liu A R, Danry V, et al. How AI and Human Behaviors Shape Psychosocial Effects of Chatbot Use: A Longitudinal Randomized Controlled Study[EB/OL].(2025-03-25). <https://doi.org/10.1101/2025.03.25.648888>

- org/10.48550/arXiv.2503.17473.
- [9] Weber M. *Economy and Society: An Outline of Interpretive Sociology*[M]. Berkeley: University of California Press, 1922.
- [10] De Freitas J, et al. Why Most Resist AI Companions[R]. Harvard Business School Working Paper, 2025(25-030).
- [11] Turkle S. Emotional AI and the rise of pseudo-intimacy: are we trading authenticity for algorithmic affection?[J]. *Frontiers in Psychology*, 2025,16: 1679324.
- [12] Mitchell L, Jeon J. Attachment to artificial companions: A systematic review[J]. *Computers in Human Behavior*, 2025,167: 107689.
- [13] Cambridge University. Neural correlates of AI companion dependency[J]. *Journal of Neuroscience*, 2025,45(12).
- [14] De Freitas J, et al. AI companions and loneliness: Six studies on perceived social connection[J]. *Journal of Consumer Research*, 2025,52(3): 45-68.

Research on Installation Practice of Modular Water Supply and Drainage Equipment in Rail Transit Station

Yang Wang Guofu Zeng

Sinohydro Bureau 7 Co., Ltd., Chengdu, Sichuan, 610213, China

Abstract

Rail transit stations have extensive water supply and drainage points, and pump rooms, sump pits, restrooms, and equipment areas are often affected by limited clearances, short construction windows, and overlapping operations. Traditional on-site assembly is prone to repeated damage and defects at interfaces. Modular water supply and drainage equipment integrates pump units, valves, filter bypasses, and support structures as a complete set during factory production and pre-inspection, reducing on-site work to positioning, connection, and functional verification. This paper, based on the scenario of China station drainage elevation and pressurized water supply, summarizes the structural boundaries, transportation and positioning conditions, and installation acceptance control points of modular equipment, and proposes installation key points that can be implemented in confined spaces to improve first-time pass rates and reduce operation and maintenance interventions.

Keywords

Rail transit station; Modular water supply and drainage equipment; Installation; Practice

模块化给排水设备在轨道交通车站的安装实践研究

汪洋 曾国富

中国水利水电第七工程局有限公司, 中国·四川成都 610213

摘要

轨道交通车站给排水点多面广, 泵房、集水坑、卫生间与设备区常受净空受限、工期窗口短和交叉作业影响, 传统现场组装容易出现接口反复破坏与成品。模块化给排水设备把泵组、阀件、过滤旁通与支撑构造在出厂阶段成套集成并预检, 使现场工作转化为定位、连接与功能核查。本文结合中国车站排水提升与增压供水场景, 归纳模块化设备的构成边界、运输就位条件与安装验收控制点, 提出可在受限空间实施的安装要点, 以提高一次成优率并降低运维干预。

关键词

轨道交通车站; 模块化给排水设备; 安装; 实践

1 引言

城市轨道交通车站机电安装呈现工序密集与工期压缩并存的特点。给排水系统虽“看似简单”, 却与装修收口、防水构造、消防水源与设备区运行条件紧密耦合, 任何接口偏差都可能引发渗漏、异味或排水不畅。近年来, 一体化预制泵站、成套提升装置与泵阀模块逐步应用, 但现场仍需通用验收规范框架内把安装精度和密封质量做实。本文结合实践视角, 梳理设备类型与安装流程, 形成可执行的控制要点。

2 模块化给排水设备

模块化给排水设备是指将给水加压、排水提升或局部水处理等功能所需的泵、管、阀与附件按照设计工况在工厂

完成集成, 并以可吊装、可运输的成套单元交付现场的设备形式。其关键不在“集中供货”, 而在于把吸水段、出水段、旁通、止回、防倒流、过滤、检修放空、排气泄水等接口在同一基准下预配, 配套支架、减振垫与防腐层一并固化, 现场只保留与管网、水箱、集水坑及地漏沟槽的少量连接界面^[1]。按应用场景可分为三类: 其一是泵阀一体式给水增压机组, 常用于车站生活给水或局部稳压, 强调成套泵组切换与防回流配置; 其二是污水、废水与渗漏水提升装置, 包括集水坑潜水泵导轨成套、提升箱体与管阀组件, 强调防堵与检修可达; 其三是城镇排水一体化预制泵站类成套设备, 用于车站出入口周边或附属用房排水中继, 强调筒体抗浮与防渗。依据《建筑给水排水及采暖工程施工质量验收规范》对设备资料齐全、运输保管防护、阀门强度与严密性试验等要求, 模块化设备应同步提供出厂检验记录与现场复核依据, 以保证安装后可交付运行。

【作者简介】汪洋(1987—), 男, 中国湖北鄂州人, 本科, 工程师, 从事市政及城市轨道交通工程施工管理研究。

3 模块化给排水设备在轨道交通车站的安装实践

3.1 界面复核与基础条件固化

为确保轨道交通车站模块化给排水设备进场后即可按位拼装,安装前必须把土建与机电界面用量化条目锁定。第一,安装工程师以厂家就位图与接口清单为基准,在结构基准线与0.000标高线上复测基础顶面标高、预埋螺栓间距及外露长度、套管与地漏中心线位置,测量采用激光水平仪配钢卷尺交叉核对,同一测点至少3次读数并附照片归档,标高偏差宜控制在 $\pm 3\text{mm}$ 、中心线偏差 $\leq 5\text{mm}$,螺栓外露满足螺母满扣后再外露2扣,超差项在找平层施工前完成纠偏并回填到检查表。第二,泵房、卫生间机柜间与集水坑周边应先完成防水层收口、墙根翻边及地面找坡,底座落点不得处在后续需要凿毛补漏区域,底座受力面要求连续密实且无积水,排水沟至集水坑的沟底坡度用水准尺复核,宜保持0.5%~1.0%单向坡,同时复核地坪完成面标高,避免二次找平抬高造成接管倒坡。第三,进出水方向、阀门操作面、过滤器抽芯方向与仪表检修面在放线阶段应标识到墙地面,标识包含离墙净距、阀柄旋转半径与搬运路线,阀门手轮侧净距宜 $\geq 150\text{mm}$,抽芯侧预留长度不小于滤芯抽出长度并加50mm余量,且与桥架、吊顶龙骨及装修收口密集带错开^[2]。第四,设备到场按批次核验合格证、说明书与随机备件,逐台检查防腐涂层无露底、法兰端面保护盖完好、软接头橡胶无裂纹起泡、紧固件镀层无白锈,铭牌流量扬程与电机功率应与设计一致,存在磕碰锈蚀或缺件时在吊装前完成除锈补漆与补齐,端口统一加封盖防尘,并进行法兰面清洁与螺栓试拧确认。

3.2 吊装就位与减振找正

为保证轨道交通车站泵房内模块化给排水设备单元一次就位到位,现场应把吊装、减振落位与整机找正作为同一受控工序连续组织。第一,吊装前工程师应复核单元重量、吊耳焊缝与重心标识,必要时对比出厂数据校核重心偏移,按起吊角度选择卸扣与吊带并加护角防磨,起吊工器具安全系数宜 ≥ 1.25 ;狭小泵房应提前清障并预布导向绳与滑移板,门洞、梁底和转角加设临时护板,起升速度宜 $\leq 0.2\text{m/s}$,提升中控制摆幅不超过200mm,转向与落点由专人统一口令指挥,禁止边吊边强撬。第二,设备落位先落在临时垫块上复核中心线、标高与检修侧净距,中心线采用墨线加钢尺双向复核,标用水准或激光复测并形成记录;确认无干涉后分次落到橡胶减振垫或可调垫铁上,减振垫厚度常用10~20mm,四角压缩量差宜 $\leq 2\text{mm}$,底座贴合用塞尺抽查并标记受力点,发现软脚及时调整垫铁,垫铁组控制2~3块并防滑移固定,避免单点硬顶引起底座翘曲。第三,泵体、集管与底座应整体找平找正,以联轴器同轴度为主控并校核管口同心度,径向偏差宜 $\leq 0.10\text{mm}$ 、端面偏差宜 $\leq 0.05\text{mm}$,同时检查泵轴手盘两圈无卡滞且阻力变化平缓;

外管连接应保持软接头自然长度并预留3~5mm自由量,严禁用强行拉管带正或用支架拉杆硬顶,必要时先调整支架标高与导向间隙再连接;找正合格后按对角顺序复拧地脚螺栓并加弹垫或双螺母防松,复拧后再复测同轴度一次。第四,二次灌浆应在找正合格并完成隐蔽验收后实施,灌浆前清理油污并凿毛,基层湿润但不得积水,灌浆厚度宜20~50mm,连续灌注至四周溢浆并捣实排气;养护期间不得振动与早期受力,强度达到要求后再连接刚性外管与固定支架,随后复核联轴器、软接头与管口同心度并进行试运转。

3.3 管网对接与密封控制

为把模块化给排水设备的预制优势真正落到轨道交通车站长期不渗漏,现场管网对接必须以密封面状态、连接几何与受力释放、洞口封堵工序为同一套可复核控制链条。第一,法兰对口前安装工程师应将密封面清理到无油污、无砂浆与无锈点,并用直尺抽检端面平整度,发现划痕应打磨修复后再装;垫片要逐项核对材质、厚度与介质温度相匹配,垫片内径不得侵入流道且不得遮挡螺栓孔,临时定位后先在四点测量法兰间隙,确保0.5毫米量级内均匀,再按对角线分3至4轮递增紧固,终拧按厂家或项目力矩表执行并记录最终力矩或圈数,紧固后复核螺栓外露丝扣一致与法兰无翘曲,试压前宜做一次二次回拧以消除垫片初期压缩^[3]。第二,沟槽与丝扣连接要把同轴度与端面垂直度作为验收点,切割端口必须倒角0.5至1.0毫米并彻底去毛刺,避免划伤橡胶圈或形成渗漏通道;沟槽卡箍安装时应确认密封圈型号与耐温等级正确,密封圈就位要居中不翻边,卡箍内缘必须完整嵌入沟槽,两侧螺母交替均匀紧固,螺母外露丝扣宜保持一致以便巡检;丝扣接口统一选用密封带或密封膏一种体系,按介质与温度确定缠绕圈数,外露扣数控制在2至3扣,严禁同一接口混用不同密封材料导致松动或剪切失效。第三,设备进出水口附近宜设置可拆卸短节、活接或伸缩节以释放装配误差与检修需求,短节长度一般不小于150毫米并预留扳手回转空间,过滤器、止回阀与软接头周边应留出下方接水与拆装通道;同时必须用独立支吊架承担外管重量,支吊架间距按管径与介质确定并在设备口两侧加设固定点,确保设备口不承受附加弯矩,软接头只承担微量位移补偿而不作为承重构件,连接完成后以水平尺复核设备口无拉扯、无偏载。第四,穿墙套管与楼板孔洞处应先完成套管防腐与防水封堵再做保温外护,套管内严禁设置丝扣或沟槽接口,封堵宜采用分层捣实的防水砂浆或柔性填料组合,填塞长度按管径的3至5倍且不小于100毫米,并在两侧留出可检查面;有防水等级要求的墙体应优先采用柔性防水套管并对翼环周边二次补浆,待封堵强度达到要求后再进行保温收口,保温端部必须做防潮封边与封口,外护层靠近洞口处宜设置可复开检修缝,避免装修封死后漏点难追溯与保温吸水霉变。

3.4 排水提升单元防堵与通气

为适应轨道交通车站杂排水夹泥沙、纤维与油污并存

的工况,排水提升单元安装需把防堵、排气与便检修落到结构尺寸与接口布置上。第一,集水坑导轨式潜水泵就位前,安装人员应以坑口控制线校核两根导杆垂直度与间距,底座膨胀螺栓紧固后再复测耦合座中心,保证泵体沿导轨下滑到位后靠自重完成自动耦合密封,现场需用塞尺检查密封圈压紧均匀并试提复落一次,起吊链条设置防脱扣并预留0.8~1.0m操作净空,检修提泵时控制提升速度并加软护角,避免泵体刮碰井壁导致耦合松动与回流冲刷。第二,出水管宜按一泵一阀组组织,泵出口先设闸阀后设止回阀并预留可抽换长度,止回阀可选球形或橡胶瓣结构以降低夹杂物卡阻概率,阀门中心线距检修侧墙面宜不小于300mm并保证阀盖可拆并在阀体标识流向,弯头与变径前后可加设DN50~DN80反冲洗或排泥接口并配封堵阀,接口中心距墙面不小于120mm以保证扳手回转,必要时在管段最低点设置放空口用于停机排水与冬季防冻。第三,管内积气应在系统高点设置排气阀并与车站排水通气立管连通,室内集水坑盖板应密封并另设通气管,通气管宜取DN50及以上并向外或向竖井引出,排气口加防虫网并设置回弯或水封控制异味与冷凝回流,穿越防火分区处按要求封堵且避免在设备间内直排。第四,箱体或筒体安装要同步落实抗浮与防渗,底板锚固按设计扭矩复核并做二次防松标识,回填采用中粗砂或级配碎石分层200~300mm夯实并控制含水量,禁止硬块直接挤压筒壁,封边完成后做满水或渗漏检查,观察不少于24h并记录水位变化^[4]。

3.5 试压冲洗与交接验收

模块化给排水设备在车站交付前,应以成套单元为边界组织试压、冲洗与交接资料,使接口质量与运行状态一次固化。第一,给水侧在外接管网连通、支吊架与限位完成后按站厅、站台或设备房分区建立试压回路,封堵不得用闸阀替代堵板,注水排气后选用1.5级压力表且量程为试验压力的1.5~2.0倍,按设计或规范取工作压力1.5倍且不小于0.6MPa,金属及复合管在试验压力下观测10min压降不大于0.02MPa,再降至工作压力逐点查漏,塑料管按稳压1h与二次稳压控制,并对软接、法兰对角线均匀紧固、阀杆填料、压力表接头与止回防倒流方向逐项复核,发现渗漏必须卸压

返工。第二,排水侧以集水坑泵组为核心做通水与抽排联动,先核对液位浮球启停点并切换手自一体模式,分段灌水观察检查口水封、立管通气与横支管坡向,水位应在5min内稳定回落且无倒灌音,核对启停水位、报警水位与止回阀关闭时间,必要时模拟停电停泵,记录回灌量与水位回升速度并校核坑内有效余量不小于0.2m。第三,系统冲洗在阀门全开、正式滤芯退出并加临时滤网条件下进行,冲洗由远端向排放口组织并每30min清理一次临时滤网,流速宜取1.0m/s左右直至出水澄清且无铁锈砂粒后恢复正式滤芯,并对泵体做30s点动、带水运行及主备切换,记录电流、振动、噪声与温升初值^[5]。第四,交接验收按单元编号闭合资料链,包含设备编号核对、就位复测、阀门启闭与止回试验、分区试压台账、冲洗记录、试运行参数与签字页,并附现场照片与标识清单,现场对敞口加盲盖封签并设置防护提示,交接时完成成品保护交底与责任界面划分。

4 结语

综上所述,模块化给排水设备在轨道交通车站的应用,使泵房与排水提升安装从“现场拼装”转向“成套就位”,但现场质量仍由界面复核、就位找正、连接密封、通气防堵与系统试验共同决定。安装人员应把出厂集成优势转化为可核查的工序控制点,落实测量记录、隐蔽验收与交接资料,并在后续专业进场前做好端口封堵与成品保护,使设备在开通前即可稳定进入可运维状态。

参考文献

- [1] 王辉,江琴,杨广伟,等.郑州地铁地下车站给排水管道冬季防冻保温方案[J].城市轨道交通研究,2025(8).
- [2] 陈冠宇.芜湖轨道交通给排水及消防系统设计要点[J].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术,2024(002):000.
- [3] 王刚,王莹莹.城市轨道交通车辆基地给排水及消防设计分析[J].工程技术研究,2023,8(2):170-172.
- [4] 磊石.轨道交通给排水及消防系统工程施工技术分析[J].Engineering Technology and Quality Management,2023,1(1):31.
- [5] 王刚,王莹莹.城市轨道交通工程地下车站给排水及消防系统设计分析[J].工程建设与设计,2023(3):65-67.

Research on Energy Saving and Consumption Reduction Technology of Mechanical Processing Process under the Concept of Green Manufacturing

Shuping Lu

Changzhi Technician College, Changzhi, Shanxi, 046000, China

Abstract

Against the backdrop of global sustainable development and the implementation of the “dual carbon” goals, green manufacturing has emerged as the core direction for transformation and upgrading in the mechanical processing industry, with energy conservation and emission reduction serving as key practices of this concept. As a pillar industry of the national economy, mechanical processing faces challenges such as high energy consumption, inefficient resource utilization, and prominent pollution issues. Traditional processing technologies have long failed to meet the demands of green development, exacerbating ecological pressures. This paper, grounded in the principles of green manufacturing and aligned with practical production conditions in mechanical processing, analyzes the significance of energy-saving and emission-reduction technologies. It focuses on exploring application methods for various energy-saving and emission-reduction technologies, providing corresponding optimization recommendations. The study aims to offer theoretical support and practical references for mechanical manufacturing enterprises to achieve energy efficiency and green transformation, thereby promoting the high-quality development of the mechanical processing industry toward low-carbon, efficient, and environmentally sustainable directions.

Keywords

Green manufacturing concept; Mechanical processing technology; Energy conservation and emission reduction; Technology application

绿色制造理念下机械加工工艺的节能降耗技术研究

卢树平

长治技师学院, 中国·山西长治 046000

摘要

在全球可持续发展推进和“双碳”目标落实的大背景下,绿色制造已经成为机械加工行业转型升级的核心方向,节能降耗更是践行绿色制造理念的关键。机械加工行业作为国民经济的支柱产业,生产时能耗高、资源利用不充分、污染问题突出,传统加工工艺早已跟不上绿色发展的需求,还加剧了生态环境压力。本文基于绿色制造理念,结合机械加工的实际生产情况,分析节能降耗技术的应用意义,重点探讨各类节能降耗技术的应用方法,给出相应的优化建议,为机械制造企业实现节能增效、绿色转型提供理论支撑与实践参考,推动机械加工行业向低碳化、高效化、绿色化方向高质量发展。

关键词

绿色制造理念; 机械加工工艺; 节能降耗; 技术应用

1 引言

随着中国工业现代化的不断推进,机械加工行业规模越来越大,在拉动经济增长、保障产业链稳定的同时,也面临着不小的能源和环境压力。传统机械加工大多只追求产量和效率,不太重视能源利用和环境保护,不仅造成大量能源浪费,还让生产成本不断增加,和绿色制造“节能、降耗、

减污、增效”的核心要求脱节。绿色制造的核心思想,就是在产品设计、生产加工到废弃回收的全过程中,将环境冲击与资源有效利用地结合起来,通过技术创新、工艺优化和管理方式的改进,达到同时提高经济效益、环境效益和社会效益的目的^[1]。将绿色制造理念贯穿于机械加工的整个流程之中,对其进行研究和应用,既可以帮助企业降低能耗和成本,又可以减少污染物排放,提高资源利用率,帮助企业突破环保瓶颈,提高市场竞争力。因此,对机械加工工艺中的节能降耗技术进行深入研究,是实现产业转型与可持续发展的必然选择。

【作者简介】卢树平(1984—),女,中国山西阳城人,本科,高级实习指导教师,从事机械制造专业课程的教学研究。

2 绿色制造理念下机械加工工艺节能降耗的核心意义

2.1 降低企业生产成本，提升市场竞争力

在机械加工企业的制造过程中，能耗与原料消耗占据相当大的比重，其中能源成本占企业生产总成本的15%-30%，如热处理、锻造等能耗较大的工序，能耗的比例更是高达40%以上。应用节能降耗技术，对机械加工工艺进行优化，可以有效地减少机床、加热炉等设备的能量消耗，减少原料的损耗，提升对资源的使用，从而直接减少企业在能源采购和原材料上的支出。此外，该技术还可以减少设备的损耗，延长设备的使用年限，降低设备的维修与更换费用，实现“节能-降本-增效”的良性循环，从而使企业在市场上的竞争能力得到进一步的提高。

2.2 践行绿色发展理念，缓解环境压力

目前，中国环保政策越来越严格，《工业领域碳达峰实施方案》明确要求，机械行业单位工业增加值能耗要比2020年下降13.5%，对高耗能、高污染企业实行差异化电价、环保税等管控措施。机械加工过程中高能耗、高污染的问题，已经成为制约行业发展的重要因素。应用节能降耗技术，可以大大降低加工中的能源消耗，降低碳排放和二氧化硫排放；通过工艺优化，采用环保加工方法，可以有效地减少切削液、切屑等废物的生成，降低废物处置费用，缓解对生态环境的危害^[2]。例如采用干式切削技术取代常规的湿式切削，可以将切削液的使用量降低80%，防止废弃的切削液对水土造成的污染，并可有效地降低切削液的购买及处理费用，达到绿色制造的目的，帮助企业满足环保政策要求。

2.3 推动行业转型升级，实现可持续发展

传统机械加工工艺存在能耗高、效率低、环境污染大等缺点，无法满足新时期的绿色发展要求，行业实现转型升级刻不容缓。绿色制造理念下的节能降耗技术，实质上就是对加工工艺进行的革新和优化，将先进的加工技术、节能装备和管理方式融入到生产过程中，促进加工工艺向高效率、节能和绿色化方向发展。节能降耗技术的普及应用，可倒逼企业加大技术研发投入，提升技术创新能力，突破传统加工工艺的局限，推动行业整体技术水平的提升；同时，通过实现能源高效利用、资源循环利用，打破“高耗能、高污染、低产出”的发展模式，推动机械加工行业向可持续发展方向迈进，为中国制造业高质量发展奠定坚实基础。

3 绿色制造理念下机械加工工艺的节能降耗技术应用策略

3.1 优化工艺参数，降低加工能耗

机械加工节能降耗最重要的是对工艺参数进行合理的调整，在不增加投资的情况下，对装备进行改造，取得显著的节能效益，适用于各种机械加工企业。优化时，要以绿色制造理念为核心，结合加工材料、加工精度及设备性能综合

考虑，构建以能量消耗、加工效率、加工质量为主要指标的多目标优化模型，利用科学的优化算法，确定最优的加工参数^[3]。

在切削过程中，切削速度、进给量和切削深度是决定切削能耗的主要因素，因此对其进行精准优化是非常必要的。例如在对一些易切削的材料如铝合金进行加工时，应增加切削速度，选择合适的进给量及切削深度，减小切削力及切削温度，达到降低能耗的目的；对于高强钢和其他难以加工的材料，应选择适中的切削速度，避免因高速切削而增加能量消耗，加速刀具磨损。在此同时，还要优化加工余量，利用柔性加工技术，根据工件的实际形状和尺寸动态调整加工余量，实现对切削过程中的能量和材料的有效利用。

热加工工序中，为了降低热能损耗，应对加热温度、保温时间和冷却速率进行优化。例如在锻造过程中，利用等温锻造工艺，准确地控制模具与加热温度，防止因高温而导致的热量损耗，同时减少锻件变形量，提高加工品质。热处理工序中，依据工件大小及材质特征，制定最短的保温时间，防止因保温时间太久浪费热能，同时采用快速冷却技术提升冷却效果，降低能源消耗。

3.2 创新加工工艺，推广绿色加工技术

要实现节能降耗，必须与绿色制造理念相融合，进行机械加工工艺的创新和发展。采用绿色加工技术替代传统高耗能、高污染的加工工艺，可以有效地降低能耗和污染物排放，并提高其生产效率与品质。

首先是推广干式切削与微量润滑切削技术。传统湿式切削需要使用大量切削液，不仅能耗高，切削液废液还会污染环境，处理废液的成本也不低。干式切削技术通过选用高性能刀具，不用切削液就能实现切削加工，能减少80%以上的切削液使用量，降低12%-18%的能耗，还能避免切削液污染，简化加工工序。微量润滑切削技术（MQL）用油气混合喷雾代替传统切削液，只需要少量润滑液就能达到润滑、冷却的效果，既能降低能耗，还能提高3%-5%的加工精度，适合对加工精度要求较高的零件加工。

其次采用高速切削和精密加工技术。在提高切削速率和进给速率的过程中，可以减少切削时间，降低机器的空载能量消耗。在降低切削力和切削变形的情况下，提高切削品质，通常可以实现10%-25%的节能。就拿模具加工来说，采用高速切削技术，可以将加工时间缩短30%-50%，能耗可以减少20%左右，并且可以省去后面的打磨工序，进一步降低能耗。精密加工工艺通过提高加工的精度，降低加工的余量与返工率，防止由于制造精度不够而造成的产品报废，降低能源与原料的消耗，还可以增加产品附加值，达到节能和增效的双重目的。

此外，对热加工工艺进行优化。在铸造加工中，推广消失模铸造技术，替代传统砂型铸造，可以节约20%-30%的能耗，同时可将铸件的报废比例降低至5%以内，降低原

料的损耗；在锻造过程中，通过采用粉末锻造和等温锻造等先进技术，可使材料的综合利用达到85%以上，缩短锻造时间，降低加热能耗。在热处理过程中，推广真空热处理和感应加热热处理工艺，真空热处理可以减小材料的氧化损耗，提高产品的品质，减少能源消耗；感应加热热处理采用电磁感应法对其进行快速加热，热效率能达到80%以上，与常规的电阻炉相比可节省30%-40%的能源。

3.3 升级加工设备，提升设备能效水平

加工设备是机械加工工艺实施的核心，设备能效直接影响节能降耗的效果。结合绿色制造理念，升级加工设备，推广节能型设备，改造老旧高耗能设备，能有效提升设备能效，减少能耗。

一方面要逐步淘汰落后的高耗能设备，代之以节能设备；一般机床、传统电阻炉、冲天炉等能耗高、效率低、环境污染严重的老设备要逐渐被淘汰，用高效率的数控机床，加工中心，感应加热炉，天然气加热炉等代替。节能型数控机床采用变频调速、伺服控制等先进的工艺，可在满足生产要求的前提下，实现对转速及负载的动态调整，能源利用率较常规机床提高50%，同时可显著提高加工的效率与精度。

另一方面，对于资金有限、没法一次性更换设备的企业，可以对现有设备进行节能改造，提升设备能效^[4]。比如在普通机床中加装变频调速装置，实现转速无级调节，减少空载能耗；对机床主轴、导轨等部位优化润滑，用长效润滑脂代替传统润滑油，减少润滑能耗和润滑油浪费；在加热炉中加装余热回收装置，回收烟气余热，用来预热助燃空气或生产生活热水，能源利用率能提升15%~25%。

另外，对设备的保养与管理也要加强。定期对加工设备进行维护保养，及时发现问题，防止由于设备故障造成的能源消耗增加和效率降低。例如对机器内的碎屑进行定时清理，对润滑系统，冷却系统进行检测，保证设备的正常运转；对设备的精确度进行周期性的校验，以防止由于设备的精确度不足而引起返工，造成能源浪费。同时，构建设备寿命周期管理体系，对设备的运行时长进行科学的规划，防止闲置、低效运转，提高设备的使用效率和能效水平。

3.4 完善管理模式，强化节能管控力度

机械加工要实现节能降耗，不光需要技术创新和设备升级，还得有完善的管理模式和强有力的节能管控，这样才能确保节能降耗技术和措施落到实处、见到效果。结合绿色制造理念，完善企业生产管理新模式，强化节能管控很有必要。

首先，必须要有健全的节能管理体系。企业可以设立专用的节能管理部门，配置一名专职的节能技术人员，制订

清晰的节能目标和管理制度，将节能目标分解到车间、班组和个人，将其与职工的绩效相结合，以此来激发职工的节能热情。此外，定期开展节能培训，提高员工的节能意识和技术水平，使他们能够规范地使用设备，培养节约能源的习惯，杜绝水电浪费、设备空转等情况。

其次，必须对企业的生产组织进行合理的管理。实行“以需定产”的生产调度方式，根据市场需要及生产任务，科学安排生产计划，防止机器空转，降低产量。例如，采用MES（制造执行系统）对生产节奏进行优化，提高加工中心使用效率。通过对各工序环节进行合理安排，缩短各道工序之间的等候期，提升生产效率，降低单位产品能耗；制定设备巡视制度，对跑冒滴漏、电机异常发热等隐蔽的能耗问题进行检测和整改。

最后要进行能耗审计与节能监测。通过定期聘请第三方组织进行能源审计，收集设备运行参数及各工序能耗数据，发现能耗高的部分及潜在的节能目标，提出有针对性的节能措施。同时构建能源管理平台，实现对配电、燃气、蒸汽等能源信息的实时采集，并对其进行大数据分析，辨识出能耗的异常，并利用数字孪生技术对各运行状态下的能源消耗进行模拟，优化生产参数。同时，要对生产过程中的能耗和污染物排放进行监测，及时调整节能措施，确保实现节能降耗目标。

4 结语

在绿色制造理念下，机械加工工艺的节能降耗是落实“双碳”目标和减轻环境压力的重大措施，是实现行业转型和可持续发展的必由之路。当前，中国的机械加工工艺在节能降耗上还存在许多问题，通过优化工艺参数，创新加工工艺，升级加工设备，完善管理模式，可以使机械加工工艺的节能降耗水平得到显著提高，达到能源的高效利用、资源的循环利用和污染物减排。随着科技的不断进步，节能降耗技术会朝着智能化、高效化、绿色化的方向发展，数字化孪生、工业互联网等技术与机械加工工艺的深度融合，会为节能降耗提供新的思路和支撑。

参考文献

- [1] 赵雪. 绿色制造理念下机械加工过程能耗分析与技术改进[J]. 长江科技评论, 2024, (12): 66-68.
- [2] 张延鹏, 文静. 绿色制造技术在机械制造中的运用探析[J]. 中国设备工程, 2023, (24): 220-222.
- [3] 王建军, 田东阁, 柴恒辉. 机械设计加工中的节能降耗措施[J]. 造纸装备及材料, 2023, 52(04): 115-117.
- [4] 王帅, 李长雨, 宋亚顶. 节能降耗在机械设计加工中的运用分析[J]. 中国设备工程, 2022, (14): 211-213.

Realistic Challenges and Optimization Pathways of Big Data Application in Smart Criminal Investigation Construction

Nan Zhang Yongqiang Kang Hanbo Gao Haoyu Zhang

Bei'an Public Security Bureau Heihe City Heilongjiang Province, Heihe, Heilongjiang, 164005, China

Abstract

Against the backdrop of deepening the construction of Digital China and Safe China, big data technology has become the core support for the construction of intelligent criminal investigation, effectively solving many problems in traditional criminal investigation and demonstrating enormous value in practical combat. However, due to multiple factors, its application still faces practical difficulties such as incomplete data governance, insufficient technological adaptability, shortage of talent supply, and incomplete institutional system, which restrict the release of technological empowerment efficiency. This article combines the current situation of the application of big data in smart criminal investigation, analyzes the specific manifestations and deep causes of difficulties, and proposes optimization paths from four dimensions: data governance, technology adaptation, talent construction, and institutional guarantee. It promotes the deep integration of big data and criminal investigation work, unleashes empowerment efficiency, assists in the high-quality development of smart criminal investigation, enhances the modernization level of criminal investigation, and provides support for building a higher level of safe China.

Keywords

Intelligent criminal investigation; Big data applications; Optimize the path; Inter-disciplinary talent; Police enterprise research and application

智慧刑侦建设中大数据应用的现实困境与优化路径

张楠 康永强 郜涵博 张皓宇

黑龙江省黑河市北安市公安局, 中国·黑龙江 黑河 164005

摘要

在数字中国与平安中国建设深度推进背景下, 大数据技术已成为智慧刑侦建设的核心支撑, 有效破解传统刑侦诸多难题, 在实践中彰显巨大价值。但受多重因素影响, 其应用仍面临数据治理不完善、技术适配性不足、人才供给短缺、制度体系不健全等现实困境, 制约技术赋能效能释放。本文结合智慧刑侦大数据应用实践现状, 剖析困境具体表现与深层成因, 从数据治理、技术适配、人才建设、制度保障四个维度提出优化路径, 推动大数据与刑侦工作深度融合, 释放赋能效能, 助力智慧刑侦高质量发展, 提升刑事侦查现代化水平, 为建设更高水平的平安中国提供支撑。

关键词

智慧刑侦; 大数据应用; 优化路径; 复合型人才; 警企研用

1 引言

在数字中国与平安中国建设深度推进背景下, 智慧刑侦已成为新时代刑事侦查转型升级的核心方向, 大数据技术作为其核心支撑, 凭借海量数据整合、多维度关联分析、智能化趋势预判的优势, 有效破解了传统刑侦“线索碎片化、侦查效率低、打击滞后性”等难题, 在命案攻坚、网络诈骗打击、在逃人员追捕等场景中作用突出。截至2024年底, 我国刑侦综合信息管理系统已初步实现全国覆盖, 东部发达地区部分系统日均处理线索超5万条, 响应时间低于3秒, 彰显了大数据赋能刑侦的巨大价值。但受技术适配不足、数

据治理薄弱、人才供给短缺、制度体系不完善等因素制约, 大数据应用仍面临诸多困境, 未能充分释放效能。本文结合实践现状, 深入剖析现存困境、探索优化路径, 为推动智慧刑侦高质量发展、提升刑事侦查现代化水平提供理论参考与实践支撑。

2 智慧刑侦建设中大数据应用的现实困境

智慧刑侦建设中, 大数据应用面临诸多现实困境, 制约其效能充分释放。数据治理体系不完善是首要瓶颈, 数据作为大数据应用的核心根基, 当前治理水平滞后, 主要体现在三方面: 一是数据孤岛突出, 跨域共享不畅, 刑侦工作需联动公安内部多警种及外部多单位, 但多数地区未建立统一共享机制, 数据分散管理、标准不一, 内外数据共享率普遍低于30%, 重大案件协调耗时超5天, 增加侦破难度; 二

【作者简介】张楠(1991—), 男, 中国黑龙江人, 本科, 助理工程师, 从事警务技术研究。

是数据质量参差不齐，部分数据录入不规范、更新不及时，中西部基层案件录入格式不一，老旧系统存在无效数据，非结构化数据未有效转化，影响分析精准度；三是数据安全风险凸显，刑侦大数据包含大量敏感信息，部分地区防护体系不完善，2023年公安系统17起数据泄露事件中12起发生在中西部基层，民警安全意识薄弱，还需平衡数据利用与相关法律规定的隐私保护要求。与此同时，技术适配性不足导致智能化应用处于浅层次，区域差异显著，东部已采用云原生、AI模型集群，如上海“刑综云脑”年调用量超1.2亿次，而中西部依赖传统系统，西部县域网络带宽不足100Mbps，且多数平台仅具备基础功能，难以适配新型犯罪侦查需求，先进技术应用有限。此外，复合型人才供给严重短缺，刑侦队伍中传统侦查人才居多，基层几乎无专职大数据分析人员，东部与全国信息化警力配置差距明显，现有民警专业能力不足，培训体系不完善、激励机制缺失，人才流失严重。最后，制度体系不健全导致保障支撑不足，我国未出台专门法律法规规范大数据应用，中西部财政投入不足，如甘肃2023年刑侦系统在线率仅67%，公安系统考核仍以传统指标为主，“警企研用”协同不畅，技术创新与实战脱节，难以形成赋能合力^[1]。

3 智慧刑侦建设中大数据应用的典型案例分析

结合我国智慧刑侦大数据应用实践，选取东部发达地区、中西部基层地区不同应用场景的典型案例，既有大数据赋能实战的成功经验，也有反映现实困境的实践案例，通过案例剖析，具象化呈现大数据应用的成效与问题，为困境破解与路径优化提供实践参考。

3.1 成功案例：东部发达地区实战实践

上海“刑综云脑”平台整合公安内外多领域数据，搭建统一共享机制，搭载云原生架构与AI模型，实现线索碰撞、趋势预判等功能，2024年依托该平台破获刑事案件1.2万余起，抓获在逃人员3200余名，未发生数据泄露事件，实现数据利用与隐私保护平衡。浙江制定《刑侦数据元规范（2023版）》，统一数据标准，搭建省级共享平台，数据共享率提升至75%以上，数据准确率达98.5%，专职大数据分析人员配备比例达8%，2024年刑侦破案效率提升40%，其规范被公安部采纳为行业参考^[2]。

3.2 困境案例：中西部基层应用难题

甘肃某西部县域仅配备传统刑侦系统，无专门大数据平台，网络带宽不足，数据共享率低于20%，32名刑侦民警无专职大数据人员，2024年信息化投入仅50万元，新型犯罪破案率仅38%，凸显数据、技术、人才、资金多重困境。河南某地级市虽有基础大数据平台，但120名刑侦民警中仅3名专职大数据人员且非科班出身，人才激励缺失、制度不健全，“警企研用”协同不畅，财政投入不均衡，依托大数据破案占比仅28%，体现人才与制度瓶颈^[2]。

3.3 案例启示

东部地区通过完善数据治理、优化技术、强化人才与制度保障，实现大数据与刑侦深度融合；中西部基层受经济、技术、人才等制约，面临多重困境。破解困境需统筹推进四大维度协同发力：数据治理是基础，技术适配是关键，人才建设是核心，制度保障是底线。同时需加大对中西部基层扶持力度，通过技术、人才、资金帮扶，缩小区域差距，推动智慧刑侦大数据应用均衡发展。

4 智慧刑侦建设中大数据应用的优化路径

4.1 完善数据治理体系，释放数据核心价值

破解数据治理瓶颈是大数据在智慧刑侦中高效应用的前提，需从数据共享、质量管控、安全防护三方面发力，构建完善的数据治理体系。其一，打破数据孤岛，构建统一共享机制。建立跨部门、跨区域、跨领域的数据共享平台，明确公安内部各警种及外部相关单位的数据共享范围、权限与流程，统一数据标准和接口规范，推动刑侦与户籍、交通、金融等数据高效整合、实时共享。借鉴浙江省公安厅制定《刑侦数据元规范（2023版）》并被公安部采纳为行业参考标准的经验，推动建立全国统一刑侦数据标准体系，提升数据互通兼容性。同时建立激励与约束机制，表彰积极配合单位，督促整改拒不配合单位，确保数据共享落地。其二，强化质量管控，提升数据精准度。建立数据录入、审核、更新、清理全流程管理制度，明确责任主体、规范录入标准，加强审核监管，杜绝数据重复、缺失、虚假等问题；定期开展数据清理，删除无效数据、更新老旧数据，提升数据完整性与准确性。加大数据结构化转化投入，利用人工智能、自然语言处理技术，将纸质笔录、现场影像等非结构化数据转化为可分析利用的结构化数据，同时建立数据质量评价体系，将其纳入基层单位与民警考核，倒逼数据质量提升。其三，健全安全防护，强化隐私保护。

4.2 提升技术适配性，推动智能化应用深度融合

推动大数据技术与刑侦工作深度融合、提升智能化应用水平，是智慧刑侦建设的核心任务，需从技术架构优化、智能化能力提升、实战化适配三方面发力。其一，优化技术架构，缩小区域差距。加大对中西部欠发达地区技术与资金扶持，推动基层刑侦系统升级，淘汰传统单体系统，推广云原生、微服务架构，统筹升级硬件设备，推动GPU服务器集群、边缘计算节点向基层延伸，提升基层算力与网络带宽，解决高清视频回传延迟问题，实现区域技术架构均衡发展。其二，强化技术创新，提升智能化分析能力。加大先进技术研发应用投入，推动大数据平台从基础功能向智能化分析、预测、预警升级；针对新型犯罪研发专项研判系统，实现犯罪相关信息的智能化拆解与追踪，提升侦查破案效率；借鉴DeepSeek大模型经验，推动国产AI大模型与刑侦融合，加强警企研合作，促进技术创新与实战衔接。其三，贴合实战

需求,提升系统实用性。坚持“实战导向、实用为王”,优化平台功能、简化操作流程,结合基层需求研发优化系统;借鉴芜湖“丁忠敏研判追逃工作室”经验,推动大数据与传统侦查模式融合,实现侦查模式从被动应对向“预警干预+精准打击”转变,通过技术与传统手段互补,提升案件侦破质效^[1]。

4.3 加强队伍建设,破解复合型人才短缺困境

复合型人才是推动大数据在智慧刑侦中高效应用的核心支撑,需从人才培养、人才引进、激励保障三个方面入手,打造一支高素质的复合型人才队伍。其一,要构建完善的人才培训体系,提升现有队伍专业能力,建立“分层分类、精准培训”的复合型人才培训体系,针对基层民警、中层骨干、专业技术人员等不同群体制定差异化培训内容与方案,培训内容既涵盖大数据、计算机、数据分析等专业知识,也结合刑侦实战案例开展实操培训,同时加强与高校、科研机构、科技企业的合作建立培训基地,邀请行业专家授课指导,并建立培训考核机制,将培训效果纳入民警晋升、评优考核,倒逼民警主动提升能力;其二,要加大人才引进力度,补充复合型人才缺口,制定优惠人才引进政策,重点引进精通相关专业知识和具备一定刑侦业务基础的复合型人才,加强与高校合作开展定向培养、联合开设相关专业,鼓励公安系统内部跨岗位交流学习,选拔优秀传统侦查民警转入大数据侦查岗位,参考东部省份经验,逐步提高信息化专业警力配备比例,缩小区域人才差距;其三,要完善激励保障机制,稳定人才队伍,建立健全复合型人才激励机制,将大数据应用成效、实战研判成果纳入考核评价体系,对优秀人才给予表彰奖励和晋升优先,完善待遇保障体系,提高薪资福利,建立健全人才晋升通道,为复合型人才提供广阔职业发展空间,激发其工作积极性与主动性。

4.4 健全制度体系,强化保障支撑力度

完善的制度体系与强有力的保障支撑,是智慧刑侦建设中大数据应用有序推进的重要保障,需从法律法规、投入保障、考核评价、协同机制四方面构建健全保障体系。一是完善法律法规体系,规范大数据应用。加快出台智慧刑侦大数据应用专项法律法规,明确数据收集、存储、使用等各环节权利义务,解决“无法可依”问题;加强与《刑法》《刑事诉讼法》衔接,明确大数据证据的法律效力与认定标准,

规范算法应用,防范算法偏见与黑箱风险,明确算法责任主体与问责机制。二是加大投入保障,优化资源配置。建立多元化投入机制,加大财政投入,重点向中西部欠发达地区和基层倾斜,保障平台建设、技术研发等工作;鼓励社会力量参与,形成“政府主导、社会参与”格局,通过对口支援缩小区域差距,引入全生命周期碳足迹评估,打造可持续智慧警务基础设施。三是优化考核评价,强化导向作用。重构公安考核体系,提高大数据应用指标权重,增设数据治理、应用成效、人才培养等专项指标,纳入年度考核与评优;建立成效评价机制,定期评估、总结经验、优化路径,倒逼基层重视并主动推进大数据应用。四是健全“警企研用”协同机制,凝聚合力。深化公安与科研机构、科技企业合作,构建生态闭环,实现实战需求、技术研发与成果转化无缝衔接;建立协同激励机制,鼓励各方参与、共享成果,释放协同创新效应,凝聚大数据赋能智慧刑侦的强大合力。

5 结语

大数据技术在智慧刑侦建设中的应用,是新时代刑事侦查工作转型升级的必然趋势,也是提升刑事侦查效率、破解侦查难题、维护社会安全稳定的重要支撑。当前,智慧刑侦建设中大数据应用仍面临数据治理不完善、技术适配性不足、人才供给短缺、制度体系不健全等现实困境,制约了大数据效能的充分释放。破解这些困境,需要立足刑侦实战需求,完善数据治理体系、提升技术适配性、加强人才队伍建设、健全制度保障体系,推动大数据技术与刑侦工作的深度融合,充分释放大数据的赋能效能。未来,随着技术的不断创新、制度的不断完善、人才队伍的不断壮大,大数据在智慧刑侦建设中的应用将更加规范、高效、智能,为推动刑事侦查工作现代化、建设更高水平的平安中国提供有力保障。

参考文献

- [1] 徐澍,张德智,肖井宇,等.数字化侦查背景下刑侦用犬的现实困境与实践进路[J].中国刑警学院学报,2025,(05):38-45. DOI:10.14060/j.issn.2095-7939.2025.05.005.
- [2] 戴金鸣.公安机关数据共享问题研究[D].山东财经大学,2025. DOI:10.27274/d.cnki.gsdjc.2025.000470.
- [3] 王超强.大数据时代刑侦基础工作的变革[J].辽宁警察学院学报,2024,26(03):13-19.

BIM-driven Intelligent Construction System for Prefabricated Buildings with Full Life Cycle Management

Junjie Shao

Anhui Yunling Jian'an Technology Co., Ltd., Xuancheng, Anhui, 245300, China

Abstract

After the large-scale promotion of prefabricated construction in China, projects generally face issues such as the disconnection between design and production, incomplete traceability of component information, unstable on-site installation rhythm, and gaps in operation and maintenance documentation. As a unified data carrier, BIM can integrate design parameters, component codes, factory production scheduling, transportation, hoisting, and acceptance records within the same model framework, and align with the management processes of all parties involved in the construction project. This paper, in line with China's policy orientation of promoting the coordinated development of intelligent construction and building industrialization, proposes a systematic construction approach focusing on key breakpoints throughout the entire lifecycle, and provides implementation strategies that can be implemented at the project level to support the transition of prefabricated construction from single-point applications to continuous collaboration.

Keywords

BIM; Driving force; Prefabricated construction; Full life cycle; Intelligent construction system; Construction

BIM 驱动的装配式建筑全生命周期智能化建造体系构建

邵俊杰

安徽云岭建安科技有限公司, 中国·安徽 宣城 245300

摘要

装配式建筑在中国进入规模化推广后,项目普遍面临设计与生产脱节、构件信息追溯不完整、现场安装节拍不稳和运维资料缺口等问题。BIM作为统一的数据载体,可以把设计参数、构件编码、工厂排产、运输吊装与验收记录在同一模型框架内贯通,并与工程建设各参与方的管理流程对齐。本文结合中国推动智能建造与建筑工业化协同发展的政策取向,围绕全生命周期的关键断点提出体系化构建思路,并给出可在项目层落地的实施策略,以支撑装配式建筑从单点应用走向连续协同。

关键词

BIM; 驱动; 装配式建筑; 全生命周期; 智能化建造体系; 构建

1 引言

装配式建筑是指建筑单元(PC构件)在工厂预制、运输到施工现场并进行现场拼装的建筑。它因具有很多现浇结构都不具备的优势而备受关注^[1]。从工程实践看,装配式项目的效率并不只取决于工厂产能,更取决于设计、制造、施工与运维之间信息是否一致、是否可追溯。中国已明确以数字化设计、专业化生产与新型组织方式推动建造方式转型,BIM被普遍视为实现协同的基础工具。

【作者简介】邵俊杰(1985—),男,中国安徽宣城人,本科,工程师,从事建筑工程类Bim技术与装配式建筑的结合与发展(实现智能化建筑体系的发展规划),关于智能型城镇化建设的发展规划研究。

2 装配式建筑全生命周期智能化建造体系概述

装配式建筑全生命周期智能化建造体系可理解为:以标准化构件与工业化生产为基础,把策划、设计、工厂生产、运输吊装、现场装配、交付运维与更新改造等环节视为一条连续业务链,并以统一的数据规则把人、料、机、法、环的关键状态串联起来。体系建设在中国多依托总承包统筹与构件厂协同,采用构件编码、二维码追溯、节点计划与旁站验收把生产、进场、吊装、灌浆、连接与成品保护等过程固化为可核查记录,同时把装配率评价、竣工资料与运维台账衔接,实现信息可交付、过程可追责与现场可验证的闭环。不少地区还要求关键数据上传监管平台并电子归档,为后续维修、加固和改造提供依据。

3 BIM 驱动的装配式建筑全生命周期智能化建造体系构建价值

在装配式建筑中引入BIM作为驱动核心,价值首先体

现在协同与一致性上。BIM模型以构件为最小管理单元,把建筑、结构、机电与装修的尺寸、预留预埋、连接节点统一到同一坐标体系,减少图纸口径不一导致的返工。其次,模型可生成构件清单与加工信息,支持构件厂排产、模台复用与运输分车计划,使生产节拍与现场吊装节拍对齐。再次,BIM用于装配仿真和施工组织推演,可在吊装顺序、堆场布置、临边防护与塔吊覆盖范围上提前校核,减少现场临时改线和二次倒运。最后,BIM与构件编码结合可形成质量追溯链,把出厂检验、进场复验、灌浆与连接验收记录挂接到构件对象,竣工后沉淀为运维资产台账,便于巡检与改造^[2]。与此同时,模型工程量可与招采清单、变更签证和现场实测对照,为结算与争议处理提供口径统一的依据,并满足全过程信息追溯与电子归档的管理要求。项目团队还可在模型上固化装配率、构件损耗率和缺陷闭合时长等指标口径,用于周度复盘与资源调整。

4 BIM驱动的装配式建筑全生命周期智能化建造体系构建

4.1 标准化模型交付与构件数据底座固化

为使装配式建筑全生命周期的智能化建造在各参建方之间可协同、可核验,项目应先把模型交付口径与构件数据底座固化到合同与流程中。第一,建设单位在招标文件中将交付分为方案、初设、施工图、加工深化、竣工五个节点,分别约定LOD目标、坐标基准与容差口径,统一命名、分层与交换格式,优先采用IFC等通用格式并保留原生模型,同时按GB/T 51301与GB/T 51212列出必须交付的视图、清单与检查项,要求每次变更均以构件编码追溯到会议纪要、RFI与变更单号。第二,设计单位以构件拆分为主线进行深化,先确定墙板、叠合板、楼梯等族库的几何容差、预留孔洞边距与连接做法,再把预留预埋、机电综合、运输限高和吊装回转半径纳入同一轮校核,节点处给出钢筋让位、套筒定位和灌浆区尺寸,模型内同步设置安装方向、吊点坐标、最小装配缝与临时支撑需求,并在关键楼层先做一段样板区模型联审后再铺开。第三,构件厂按GB/T 51269的分类编码并参照GB/T 7027原则,将配筋单、模台号、浇筑班组、养护曲线、强度报告与出厂合格证与构件一一绑定,出厂清单除数量外同步输出单件重量、重心偏移、吊点间距、翻转要求与建议吊装索具,关键数据与模型属性一致,现场可用二维码抽检到批次与检验记录,并对重量偏差超过设计值2%或外观缺陷的构件单独标识。第四,总包建立模型对象与现场资料的映射表,构件进场按楼层轴网扫码核对编码、尺寸、预埋件与吊点,安装前后分别留存定位复核记录、垫片与支撑实测、灌浆配合比与饱满度抽检结果及实体照片,隐蔽验收资料缺项则不允许转入下一道工序,并按周汇总编码到问题到整改到复验的闭环台账,保证资料、模型与实体一致^[3]。

4.2 设计生产施工一体化的节拍协同机制

要把BIM驱动的装配式建造从图纸协同落到现场连续作业,必须把设计、工厂与安装三端节拍用同一套数据口径锁定。第一,技术负责人以楼栋单元建立周节拍表,BIM模型中按楼层拆分构件包并绑定吊点、重量和安装顺序,结合塔吊或汽车吊能力与班组效率校核周安装量,如单塔吊可控在80—120件或450—650m²叠合板,计划同步生成到货窗口与缺件预警清单,并规定安装前两周冻结深化版本,设计变更在节拍例会上评审后回写模型影响范围,现场以模型清单复核放样、预埋件和节点做法,避免经验排期造成窝工。第二,生产端将BIM构件编码对接MES排产,按周节拍锁定模台与钢筋笼、预埋件工装,关键线路构件设置3—5天提前量并建立同模替代清单,遇到原材料波动或模台冲突时优先保障套筒区、核心筒及转换层构件,并把尺寸偏差、套筒同轴度等检验数据回写模型,超过阈值即触发返修或补产指令,实现质量与排产的闭环联动。第三,运输与堆场执行分区到货和限时周转,构件出厂前按构件包生成装车顺序与二维码,车辆路线提前核对限高限重与进场时段,运输到场后材料员按安装区段划定堆位并控制二次倒运半径在30m内,堆场周转宜不超过48h,进出场台账记录构件状态、复检结果与吊装顺序,确保卸车、复检、临边防护与吊前挂钩准备一次完成。第四,安装班组把工序拆成可签认节点并在移动端对照模型定位,套筒灌浆按批次留置试件并记录用浆量与温度,连接件紧固按扭矩值复核并抽检不少于2%,临时支撑与垂直度、标高复测形成当日闭合记录,质检员对节点签认后方可转序,使节拍协同建立在工序受控的连续流上。

4.3 构件全过程质量追溯与验收闭环

装配式建筑全生命周期智能化建造体系构建中为把生产、运输、安装三段质量信息打通,BIM端需以构件为最小管理单元建立可回溯的验收链条,并用时间戳约束资料生成。第一,工厂阶段以构件编码为主键生成二维码或RFID并回写到模型构件族,编码规则包含楼栋、楼层、类型与生产批次,首件检验上传尺寸偏差、钢筋保护层、预埋件定位三类实测值及照片,批量生产按同批不少于5%或每20件抽1件留痕,出厂合格证明与试验报告按编码自动归档,避免证书与实物脱钩。第二,运输与堆放阶段在模型中预置包装与吊装工况,发运前扫描生成装车清单并记录垫木位置、绑扎点与缓冲材料,途中可加贴一次性碰撞指示贴并在到场复扫时比对,若发现边角崩损、吊点裂纹或钢筋外露,技术员应在BIM问题单标注构件面、标高与坐标,形成返厂修补或现场修补工单并锁定责任人。第三,进场验收除外观与几何尺寸外,应复核连接条件,重点核查灌浆孔道通畅、套筒露口防护、预埋件外露长度与螺栓孔位,测量数据录入移动端并与模型阈值比对,超限即锁定该构件状态不得上楼,整改完成后需二次复验并保留前后对照记录^[4]。第四,安装

与连接验收以关键工序参数为主线，灌浆连接记录浆料批号、水灰比、流动度、环境温度与实灌量，并控制拌和至灌注完成的作业窗口，焊接连接记录焊材批次、焊缝外观与必要的无损抽检结果，螺栓连接按设计扭矩分两次紧固并记录复检人，监理或第三方按抽检规则签认，竣工时将构件履历、隐蔽验收、变更签证与最终状态汇入竣工模型并与构件清单对账。

4.4 现场装配空间管控与多专业协同落地

为使 BIM 在装配式建筑现场形成可执行的约束，应把场地、预留预埋、穿插与变更四类控制点统一写入模型与工序文件并闭环到现场。第一，总包在编制施工组织设计时应把吊装作业面参数化，依据塔吊幅度与构件最大吊重在模型中推演运输与起吊路径，明确临时道路宽度不小于 4m、转弯处加宽及硬化等级，给出构件堆场边界与吊装回转禁区，并将临设、附着点与市政管线作为碰撞对象校核，推演不满足时必须进场前调整布置与吊点方案，同时把临边防护、卸料平台位置与作业票流程在模型中定位到位。第二，机电以预留预埋为先导建立套管、洞口与支吊架埋件清单，模型内固化坐标、标高与净空控制值，土建移交前测量员按轴网复核并抽检洞口偏差控制在 $\pm 10\text{mm}$ 、套管中心偏差控制在 $\pm 5\text{mm}$ ，将复核记录与构件编号关联，未通过复核的楼层不得下发机电预制与到场计划，避免装配后凿改。第三，穿插施工按区域移交执行，项目部以楼层或功能区划分作业单元，上一专业完成自检、隐蔽验收与资料签认后由总包签发放行单，同一区域设置材料堆放线、通行线与成品保护责任人，机电安装与装饰进场前在模型中完成管综复核与支吊架定位交底，现场按清单逐点核对并留存影像证据。第四，变更与签证必须先完成模型影响范围分析，技术负责人在 24h 内标识受影响构件、连接节点与工序节拍，输出调整图与材料替换表并同步到分包与工厂，现场执行时采用版本号管理和停工点复核，关键节点如灌浆套筒、连接螺栓扭矩与防水封边需补齐复验记录，确保已吊装构件的二次调整有可追溯的工序卡与验收依据。

4.5 竣工模型运维移交与后评估机制

要让 BIM 装配式项目在交付后可运维，竣工模型应以运维验收、索引交付、变更回写与后评估四步固化为制度。第一，竣工验收前由建设单位牵头组织物业与维保单位联检模型，按机房、管井等空间核查检修通道、阀门井点位及构

件连接可达性，现场量测后在模型标注净距控制值，并将运维关注点写入必填字段，关键机电设备建议不少于 30 项属性，至少含型号、出厂编号、功率、设定参数与保修期，模型细度宜满足验收表达如 LOD350 级。第二，总包按系统加空间建立竣工模型索引，采用楼栋—楼层—房间—系统—设备目录，将构件履历、隐蔽验收、试压与调试数据挂接到唯一编码，移交时输出构件清单，并按 COBie 或等效字段生成设备、空间、系统、文档与作业清单，附带维保周期与阀门关断范围，手册写明故障定位路径与拆装顺序。第三，运维期建立变更回写规则，改造或更换时由责任单位在 7 日内提交变更包，包含更新模型、属性表、竣工图和现场照片，经运维主管审核入库，并保留版本号、原因与审核人，使模型持续可追溯。第四，项目后评估以问题清单驱动，建设单位将安装偏差、返工点与运维故障按构件族、接口节点和工序环节分类回溯，形成统计表记录频次与处置要点，再将高频问题固化为下一项目的构件标准、节点做法与抽检要点库，并同步更新企业构件库^[5]。

5 结语

BIM 驱动的装配式建筑全生命周期智能化建造体系，核心在于以构件为线索把数据、流程与责任同步固化，并通过节拍协同、质量追溯、空间管控与运维回写形成连续闭环。中国在智能建造与建筑工业化协同发展的政策框架下，已具备推进该体系的组织条件与应用场景，后续项目更需要把标准化交付、现场可执行工序与可验收资料作为同等重要的管理对象，确保体系在工程层面稳定运行。

参考文献

- [1] 林永民,王涵,赵德信,等.基于BIM的装配式建筑全生命周期信息管理管理平台研究[J].建筑经济, 2023, 44(1):77-83.
- [2] 荣博文,王颖.基于LSS-BIM5D的装配式建筑全生命周期分析与优化研究[J].建筑经济, 2023, 44(S02):348-353.
- [3] 邵培栋.基于 BIM 技术的装配式建筑全生命周期应用研究[J]. Engineering Management & Technology Discussion, 2025, 7(9).
- [4] 李豫姣,琚润东,黄秉章,等.基于BIM的装配式建筑全生命周期管理问题研究[J].中国科技期刊数据库 工业A, 2023(4):3.
- [5] 孙宇,黄小良.基于全生命周期的装配式部品部件智能建造与数据贯通创新研究[C]//第二届智能工程与经济建设学术研讨会论文集(三).2025.

Exploration into the Application and Process Optimization of Environmentally Friendly Automotive Spray Coating Technology

Long Yang

Sichuan Hope Automotive Technician College, Ziyang, Sichuan, 641300, China

Abstract

With the increasingly strict environmental regulations and the rise of green manufacturing concepts, environmentally friendly automotive spraying technology has been widely used as an important environmental protection measure in the automotive production process. This article delves into the current application status, technological development trends, and process optimization paths of environmentally friendly automotive spraying technology. Through the analysis of different types of spraying processes and technological innovations, combined with case studies, a series of process optimization strategies and implementation plans are proposed, aiming to improve spraying quality and production efficiency, and reduce negative impacts on the environment. We also focused on exploring environmentally friendly alternatives to spray materials to reduce harmful substance emissions while ensuring the stability and reliability of product performance.

Keywords

Environmentally friendly spraying technology; Water based paint; Powder coating

环保型汽车喷涂技术应用与工艺优化探讨

杨龙

四川希望汽车技师学院, 中国·四川 资阳 641300

摘要

随着环保法规的日益严格和绿色制造理念的兴起, 环保型汽车喷涂技术作为汽车生产过程中重要的环保措施, 得到了广泛应用。本文深入探讨了环保型汽车喷涂技术的应用现状、技术发展趋势及其工艺优化路径。通过对喷涂工艺的不同类型和技术创新的分析, 结合案例研究, 提出了一系列工艺优化的策略和实施方案, 旨在提升喷涂质量和生产效率, 减少对环境的负面影响。还着重探讨了喷涂材料的环保替代品, 以降低有害物质排放, 同时保证产品性能的稳定性和可靠性。

关键词

环保型喷涂技术; 水性漆; 粉末涂料

1 引言

环保型汽车喷涂技术是当前汽车制造行业响应环保要求、推动绿色生产的重要举措之一。随着全球环保法规的日益严格和消费者环保意识的提升, 汽车生产过程中使用低挥发性有机化合物 (VOC) 和低污染材料的需求愈加迫切。喷涂作为汽车制造中的关键环节, 传统的喷涂工艺采用大量的溶剂和化学添加剂, 这些物质不仅对环境造成污染, 也对工人的健康构成威胁。本论文旨在探讨环保型汽车喷涂技术的发展现状、应用前景以及面临的挑战。

2 环保型汽车喷涂技术概述

2.1 环保型汽车喷涂技术背景

随着全球环保意识的不断提升以及各国对环境保护法规的日益严格, 汽车行业面临着越来越高的环保要求。传统的汽车喷涂技术主要依赖于有机溶剂, 产生大量的挥发性有机物 (VOC), 这些物质不仅对环境造成了严重污染, 还对工人健康产生了潜在的威胁^[1]。为了应对这一问题, 环保型喷涂技术应运而生, 旨在减少对环境的污染, 同时保证喷涂质量和生产效率。

环保型汽车喷涂技术不仅满足了日益严格的环保法规, 还推动了汽车产业的绿色转型。随着全球范围内相关环保政策的出台, 例如欧洲的“REACH”法规和美国的“Clean Air Act”, 这些法规要求汽车制造商在生产过程中减少有害气体的排放。环保型喷涂技术的应用可以显著降低 VOC 的

【作者简介】杨龙 (1991—), 男, 中国四川资阳人, 本科, 讲师, 从事汽车维修研究。

排放,减少有毒物质的使用和挥发,并且通过采用创新工艺提升生产效率,成为汽车行业绿色发展的关键技术之一^[2-3]。

随着环保要求的提升,环保型喷涂技术不断得到改进和创新。水性漆、粉末涂料和无溶剂涂料等新型环保涂料技术逐渐替代了传统的溶剂型涂料,成为主流的喷涂技术。这些技术不仅符合环保要求,减少了污染,也提高了喷涂的质量和生产效率。环保型喷涂技术正向着更加高效、节能、低污染的方向发展,对汽车制造业的可持续发展起到了至关重要的推动作用。

2.2 环保型喷涂技术的分类与应用

环保型汽车喷涂技术可以根据不同的工作原理、材料特性及环保性能分为几类,每类技术在实际应用中有着不同的优势和局限性。以下是几种常见的环保型喷涂技术及其应用。水性漆喷涂技术广泛应用于汽车制造中,是目前最常见的环保喷涂技术之一。水性漆涂料使用水作为溶剂,代替了传统油漆中的有机溶剂,显著降低了VOC的排放,具有较强的环保性能。水性漆的涂层附着力和耐久性强,且喷涂效果优良,能够满足汽车外部和内饰喷涂的需求。尽管水性漆的干燥速度相对较慢,但随着喷涂技术的不断进步,这一技术的应用领域正在不断扩大,尤其在高端车身涂装中有着重要的应用前景。

粉末喷涂技术是一种无溶剂喷涂方法,不需要使用任何溶剂。它利用静电作用将粉末涂料吸附到汽车表面,经过高温固化后形成涂层。粉末喷涂具有不含溶剂、无VOC排放的优点,且涂层均匀、附着力强,耐腐蚀性能好,广泛应用于汽车零部件的喷涂。虽然粉末喷涂的效率较高,废料回收率也较高,但对于复杂形状的汽车零件,粉末涂料可能难以完全覆盖,特别是内凹部位,容易产生喷涂不均的问题。无溶剂喷涂技术通过去除传统涂料中的溶剂,使用固体涂料进行喷涂。该技术几乎不产生VOC排放,极大地减少了对环境的污染。无溶剂喷涂的涂层质量高,附着力强,并且涂装效率较高,适用于大批量生产的汽车外部涂装。然而,由于涂料的固体含量较高,喷涂的操作要求较高,需要精确控制涂料的粘度和喷涂参数,确保涂层的均匀性和稳定性。静电喷涂技术利用电场作用,使涂料颗粒带电,并通过电静电作用将涂料吸附到汽车表面。这种技术不仅提高了涂料的利用率,减少了浪费,还能显著降低喷涂过程中的VOC排放。静电喷涂广泛应用于汽车零部件的涂装,尤其适用于金属表面的喷涂,具有较高的效率和较好的环保性能。

3 环保型喷涂技术的关键工艺

3.1 喷涂前处理工艺

喷涂前处理是环保型汽车喷涂技术中的重要工艺环节,其目的是为喷涂提供一个干净、平整的表面,以确保涂料能够均匀、牢固地附着在基材上。表面污染物如油脂、灰尘、铁锈等会影响涂料的附着力和耐久性,因此,喷涂前的表面

处理尤为关键。常见的喷涂前处理工艺包括化学清洗、物理清洗、磷化以及表面修整等步骤。化学清洗通常使用去污剂或溶剂去除表面油污,而物理清洗则通过喷砂、高压水流等方法清除灰尘和杂质,确保喷涂表面光滑洁净。磷化工艺在金属表面形成一层磷酸盐膜,这不仅能提高涂层的附着力,还具有防腐蚀作用,广泛应用于钢铁等金属材料的处理中。表面修整则通过打磨和抛光,去除表面的不平整和瑕疵,为喷涂提供平整的基底。尽管喷涂前处理工艺对于提升涂层质量具有重要作用,但在一些特殊表面,如铝合金或镁合金等,仍然可能面临涂层附着力不足的问题。为此,喷涂工艺人员需要根据不同材料的特性选择合适的处理工艺,以达到最佳的喷涂效果。

3.2 喷涂工艺控制

喷涂工艺控制直接决定了环保型汽车喷涂的质量和效率,是确保喷涂技术顺利实施的核心环节。喷涂工艺控制的关键在于合理选择喷涂设备、精确调控喷涂参数,以及有效管理涂料的使用。首先,喷涂设备的选择至关重要。常见的环保型喷涂设备包括高效能喷枪、电静电喷涂设备和自动化喷涂机器人等。高效能喷枪能够提高喷涂的细化程度,减少涂料浪费;电静电喷涂通过电场作用提高涂料的附着率,减少过喷和涂料浪费;自动化喷涂机器人则通过精确的控制系统实现高效、高质量的喷涂,尤其适用于大规模生产中的涂装工作。其次,喷涂参数的控制对涂层质量有着直接影响,常见的参数包括喷涂压力、喷涂速度、喷涂角度和喷涂距离等。正确的喷涂压力能够确保涂料均匀喷洒,喷涂速度的调控可以提高生产效率,而喷涂角度和喷涂距离的合理设置则有助于提升涂层的均匀性和附着力。在喷涂过程中,涂料的质量控制同样至关重要。涂料的粘度、固体含量和配方需要严格控制。涂料粘度过高会导致喷涂困难,而粘度过低则会影响涂层的厚度和质量,涂料固体含量过高则可能导致涂层过厚,影响外观和涂层的均匀性。最后,喷涂后的固化和干燥工艺同样需要精细控制,固化温度和控制时间的控制直接影响涂层的硬度和附着力,因此,固化和干燥过程必须严格按照工艺要求进行操作。通过精确控制喷涂过程中的各项参数,能够显著提升环保型喷涂的质量,减少涂料浪费和环境污染,从而实现高效、环保的生产目标。

4 环保型喷涂工艺优化路径

4.1 喷涂技术的节能减排优化

随着全球环保法规的逐渐严格,节能减排已成为汽车制造业的重要目标之一。在环保型喷涂技术的应用中,如何降低能耗、减少污染物排放,不仅能符合环境要求,还能有效提升生产效率并降低生产成本。因此,喷涂技术的节能减排优化成为当前环保型喷涂技术研究的热点之一。

第一,节能减排优化的一个重要方向是优化喷涂设备的能效。现代喷涂设备通过采用高效能喷枪、自动化喷涂机

机器人和低能耗的电动系统，能够显著降低能源消耗。喷枪的优化设计能够使喷涂过程中的涂料分布更加均匀，减少涂料浪费和过喷，从而实现能源的高效利用。第二，喷涂过程中的热能利用是另一个节能的关键环节。喷涂过程中需要进行固化和干燥，而固化和干燥通常需要大量的热能消耗。为此，采用热回收系统能够将固化过程中产生的废热重新利用，从而降低能源的总体消耗。例如，在高温固化过程中，可以通过废气热交换技术回收余热，并将其用于预热涂料或加速干燥过程，减少对外部能源的依赖。

表 1 喷涂过程中的能效优化措施

优化措施	描述	影响
高效能喷枪	采用喷涂精细化设计，提高涂料分布均匀性	降低涂料浪费、减少过喷，提高生产效率
自动化喷涂机器人	使用机器人自动化喷涂，提高操作精度	降低人工误差、减少涂料浪费、提高喷涂一致性
热回收系统	回收废气中的热量用于预热涂料或加速干燥	降低整体能源消耗、减少依赖外部能源

4.2 工艺改进与废气治理

环保型喷涂技术不仅仅依赖于涂料和设备的优化，废气治理同样是减少喷涂过程中对环境负面影响的重要环节。喷涂过程中的废气主要来源于涂料中的溶剂蒸发和涂层干燥过程中的有害气体释放。这些废气含有大量的挥发性有机化合物（VOC）及其他有害物质，因此，如何有效治理喷涂过程中的废气，成为环保型喷涂技术研究中的关键问题。

废气治理的常用方法包括吸附法、催化法、吸收法和光催化法等。其中，吸附法是一种常见的废气处理技术，主

要通过活性炭等吸附材料吸附废气中的 VOC 成分，从而减少有害气体的排放。吸附法的优点在于处理效率高，设备投资相对较低，且可以回收处理后的废气。但其缺点是吸附材料的更换周期较短，且处理过程可能导致材料的二次污染。催化法则通过使用催化剂加速有害物质的氧化反应，将 VOC 转化为无害的二氧化碳和水。这种方法处理效果较好，尤其对于低浓度 VOC 的去除非常有效。近年来，随着催化技术的不断进步，催化法的效率和成本逐步得到了优化，成为废气治理中重要的技术之一。

除了吸附法和催化法，吸收法也是废气治理中的常见技术，尤其适用于处理一些特殊气体。吸收法通过将废气与吸收液接触，将其中的有害成分溶解在吸收液中，从而达到净化空气的目的。光催化法则是一种新型的废气处理技术，它通过光催化剂在紫外线照射下将有害气体转化为无害物质，适用于处理低浓度废气，且具有较好的环保效果。

在汽车喷涂工艺中，废气成分复杂，往往含有多种 VOCs 及少量颗粒物，单一的废气治理技术难以达到理想的净化效果。因此，在实际应用中，常采用多种技术组合的方式进行协同处理。如可先利用吸收法对废气中的部分易溶于吸收液的特定成分进行初步去除，降低废气浓度，再通过催化法或光催化法对剩余的低浓度有害气体进行深度净化，以弥补单一技术的局限性，提高整体治理效率。同时针对催化法初期投资较高和催化剂需定期维护的问题，汽车喷涂企业可通过优化催化剂选型、改进催化剂再生技术以及加强设备日常运维管理等工艺改进措施，延长催化剂使用寿命，降低长期运行成本。

表 2 废气治理技术的对比

废气治理技术	优点	缺点
吸附法	高效、低成本、可回收废气	吸附材料需要定期更换，可能导致二次污染
催化法	高效去除低浓度 VOC、无害化处理	初期投资较高，需要定期维护催化剂
吸收法	适用于处理一些特殊气体，简单可靠	处理效率较低，对某些特定气体处理效果有限
光催化法	低能耗、适合低浓度废气处理，环保效果显著	需要紫外线照射设备，处理效率受环境光照影响

5 结语

环保型汽车喷涂技术是推动汽车产业绿色转型的重要组成部分。随着环保法规的不断严格以及技术的持续进步，环保型喷涂技术在减少有害物质排放、提高生产效率、降低能源消耗方面具有重要意义。通过引入水性漆、粉末涂料、纳米涂层等新材料，以及智能喷涂和 3D 打印等先进技术，环保型喷涂技术的应用前景愈加广阔。但技术优化与产业化的推进仍面临诸多挑战，特别是在涂层质量控制和废气治理方面。如今随着政策支持的加强和技术的持续创新，环保型

喷涂技术必将在汽车制造业中发挥更大的作用，推动行业走向更加绿色、可持续的发展道路。

参考文献

- [1] 车磊. 汽车喷涂作业后喷枪清洗流程与方法研究[J]. 汽车测试报告, 2025, (18): 154-156.
- [2] 周亚文. 环保型水性漆在汽车喷涂中的应用及质量控制研究[J]. 汽车测试报告, 2025, (13): 73-75.
- [3] 游晨. 贵州省汽车喷涂与家具制造业挥发性有机物排放标准研究[D]. 贵州大学, 2024.

Research on Integrated Process of Precision Forming and Heat Treatment for Ti-5523

Xigang Li

Oriental Blue Sky Titanium Technology Co., Ltd., Yantai, Shandong, 264006, China

Abstract

To meet the urgent demand for lightweight and high-reliability fasteners in new-generation aerospace structures, an integrated process of precision cold heading and heat treatment for Ti-5523 titanium alloy fasteners was investigated. One-step precision forming of the internal hexagon head was achieved by systematically optimizing the die cavity radius, forming speed, and ram force stroke. The influence mechanisms of solution temperature, aging temperature, and holding time on the microstructure and mechanical properties were thoroughly investigated. An optimized heat treatment regime was established. Compared with conventional TB3 titanium alloy fasteners, the Ti-5523 products demonstrate significant advantages in specific strength, shear resistance, and process stability, meeting the application requirements for high-reliability and long-life aerospace structures.

Keywords

Ti-5523 titanium alloy; Cold heading; Solution and aging treatment; Mechanical properties

Ti-5523 紧固件精密成形与热处理工艺研究

李锡刚

东方蓝天钛金科技有限公司, 中国·山东·烟台 264006

摘要

针对新一代航天结构对轻量化、高可靠紧固件的迫切需求,本研究对Ti-5523钛合金紧固件开展精密冷镦成形与热处理一体化工艺研究。通过系统优化冷镦模具型腔半径、成形速度及冲力行程,成功实现了内六角头部一次精密成形。深入探讨了固溶温度、时效温度与保温时间对显微组织及力学性能的影响机理,确立了优化的热处理制度。相较于传统TB3钛合金紧固件,Ti-5523产品在比强度、抗剪切性能及工艺稳定性方面均表现出显著优势,满足高可靠、长寿命航天结构的应用要求。

关键词

Ti-5523钛合金; 冷镦成形; 固溶时效; 力学性能

1 引言

航天技术的飞速发展对航天器结构的轻量化、高可靠与长寿命提出了前所未有的挑战^[1]。紧固件作为航天器中不可或缺的基础连接元件,其性能直接决定了整体结构的承载效率、疲劳寿命及在轨服役安全。目前,我国航天领域广泛使用的TB3钛合金紧固件,虽具备良好的综合性能,但其抗拉强度(约1100 MPa)与剪切强度(约700 MPa)已逐渐接近材料极限,难以满足新一代航天器对更高承载能力与进一步减重的严苛需求。

Ti-5523作为一种新型近 β 型中高强度钛合金,凭借其优异的比强度、良好的断裂韧性及出色的耐腐蚀性能,被视为替代传统材料、制造新一代高性能航空航天紧固件的理想候选材料^[2]。其理论抗拉强度可达1400 MPa以上,比强度

显著优于TB3合金。

为此,本研究以航天卫星平台用M4-M8规格系列紧固件为对象,聚焦Ti-5523钛合金“精密冷镦成形—热处理强化”一体化制造工艺。旨在通过精准优化冷镦工艺参数以攻克成形难题,深入揭示热处理制度对组织性能的调控规律,最终建立一套稳定可靠、可工程化应用的完整工艺体系,为我国高性能航天紧固件的自主可控与升级换代提供关键技术支撑和理论依据。

2 研制目标与方法

2.1 研制目标

通过Ti-5523材料冷镦成型研究,确认该材料具备紧固件冷加工能力,达到批生产目的。

通过热处理研究,最终获取满足以下性能的高强、高韧钛合金紧固件:

- (1) 抗拉强度 $R_m=1300\sim 1450\text{MPa}$;
- (2) 剪切强度 $\tau_b=780\sim 870\text{MPa}$;

【作者简介】李锡刚(1974—),男,中国河南信阳人,本科,高级工程师,从事机械设计及制造研究。

- (3) 断后延长率 $A > 10\%$;
- (4) 断面收缩率 $Z > 25\%$ 。

2.2 研制材料

本项目采用的 Ti-5523 钛合金热轧线材，直径规格覆盖 $\Phi 5.5 \text{ mm}$ 至 $\Phi 9.0 \text{ mm}$ ，以满足 M4、M5、M6、M8 不同规格紧固件的制备需求。原材料供货状态为固溶处理态，此状态具有优良的塑性，利于后续冷成形加工。

2.3 工艺流程

紧固件制备主要工艺流程为：备料 → 无心磨 → 喷砂 → 涂覆润滑涂层 → 冷镦成形 → 机械加工 → 热处理 → 滚丝 → 荧光探伤 → 表面处理 → 最终检验 → 包装入库。

2.4 分析检测方法

力学性能测试：室温拉伸试验依据 ASTM E8/E8M-16a 标准执行^[3]；剪切试验参照中国航天行业标准 QJ 2585 进行^[4]。

显微组织表征：试样经标准金相制样后，使用 Kroll 试剂腐蚀，在光学显微镜下观察并分析初生 α 相、 β 转变组织及次生 α 相的形貌、尺寸及分布。

质量与尺寸控制：产品表面及近表面缺陷采用荧光渗透检测法进行 100% 排查；外形及螺纹尺寸依据 QJ 2581、QJ 2582 相关标准进行检验。

3 研制结果与分析

3.1 冷镦成形工艺优化

冷镦成形是决定紧固件头部几何精度与内部质量的核心工序。针对 Ti-5523 合金的成形特性，对关键工艺参数进行了系统优化。

3.1.1 模具型腔半径的确定

一冲模具的型腔半径 (R) 是引导金属流动、控制头部填充均匀性与避免应力集中的关键几何参数。优化结果如表 1 所示。研究表明，所需 R 值随产品规格增大而增加。对比同规格产品，内六角圆柱头螺钉所需的最佳 R 值均大于六角头螺栓。这主要因为内六角成形需要在头部中心区域形成凹槽，要求更多的金属材料向中心流动和重新分布，因此需要更大的型腔空间来容纳和引导这一材料转移过程。 R 值过小会导致材料在填充角部时流动受阻，易在应力集中区域引发径向裂纹； R 值过大则会使金属过度横向流动，在分模面处产生飞边。确定 R 的优化值 (M4-M8 内六角螺钉对应 $R=8.0, 9.0, 11.0, 14.5 \text{ mm}$)，允许 $\pm 0.2 \text{ mm}$ 的制造公差，这在保证成形质量的同时，也为模具的正常磨损提供了必要的容限，体现了工艺的稳健性。

表 1 最佳的一冲形腔半圆弧半径

型号 / 规格	一冲形腔半圆弧半径 (mm)			
	M4	M5	M6	M8
	内六角圆柱头螺钉	7.0 ± 0.2	8.5 ± 0.2	10.0 ± 0.2
外六角头螺栓	8.0 ± 0.2	9.0 ± 0.2	11.0 ± 0.2	14.5 ± 0.2

3.1.2 成型速度的影响

冲头成形速度 (v) 直接影响变形区的应变速率和由塑性功转化产生的绝热温升。对 M6 内六角螺钉的测试结果表明，当 v 控制在 20-40 件 /min (对应中低应变速率范围) 时，材料塑性变形充分且均匀，成形质量良好。当 v 提高至 50 件 /min 以上时，高应变速率导致变形区局部温度骤升，可能引发材料的动态软化或相结构变化，同时材料在高应变速率下韧性下降，裂纹敏感性显著增加，致使产品头部出现裂纹。因此，为兼顾生产效率和成品率，将最佳成形速度设定为 35-40 件 /min。

3.1.3 摆动冲力的精确控制

摆动冲力的大小通过调节偏心摆轮上定位螺栓的位置 (以行程百分比 S 表示) 来实现。 S 值直接决定了作用在坯料上的瞬时成形力。当 S 处于 40%-60% 区间时，成形力适中，能够使材料平稳、充分地填充型腔，获得高质量产品。 $S < 20\%$ 时，成形力不足，导致头部未充满； $S > 80\%$ 时，成形力过大，会造成材料过度变形，不仅产生飞边，还可能因晶界损伤而引发内部微裂纹。因此，将摆动冲力行程稳定控制在总行程的 40%-60%，是实现稳定、可控冷镦成形的关键。

3.2 热处理工艺对组织与性能的调控机理

热处理是激发 Ti-5523 合金强度潜力的关键。本项目研究揭示了各热处理参数的作用规律。

3.2.1 固溶温度的决定性作用

在固定时效制度 ($520^\circ\text{C} / 8\text{h}$) 下，固溶温度 (T_s) 从 780°C 升至 860°C ，材料的抗拉强度 (R_m) 从 1050 MPa 显著提升至 1420 MPa，而断面收缩率 (Z) 则从 55% 大幅下降至 23% (表 2)。这种变化源于固溶温度对微观组织的根本性重构。在较低温度 (780°C) 固溶时，组织中含有大量初生 α 相，其塑性好但强度有限。随着 T_s 升高，初生 α 相逐渐溶解于 β 基体中， β 晶粒长大，合金元素过饱和度增加。在后时效过程中，从过饱和 β 基体中弥散析出细小的次生 α 相，这是主要的强化相。 T_s 越高，析出的次生 α 相越细小、弥散，强化效果越强，但塑性随之下降。金相观察证实了这一点。综合考虑航天紧固件对高强度和一定韧性的要求，确定 $820-840^\circ\text{C}$ 为最佳固溶温度区间。

表 2 固溶温度对 Ti-5523 合金力学性能的影响
(时效: $520^\circ\text{C} / 8\text{h}$)

固溶温度 $T_s / ^\circ\text{C}$	各指标的试验结果			
	抗拉强度 R_m / MPa	剪切强度 τ_b / MPa	断后伸长率 $A / \%$	断面收缩率 $Z / \%$
780	1050	695	22.0	55
800	1280	760	21.0	39
820	1320	785	17.5	29
840	1380	835	14.0	26
860	1420	860	11.5	23

3.2.2 时效温度的工艺宽容度

在优化的固溶制度（840℃/30min）基础上，研究了时效温度（ T_a ）的影响。当时效温度在480℃至540℃范围内变化时，抗拉强度（ R_m ）在1345-1380 MPa之间窄幅波动，断面收缩率（ Z ）也保持在28%-34%的较高水平。这一现象表明，Ti-5523合金的时效强化效果在较宽的温度范围内具有良好的稳定性。这主要归因于Mo、V等强 β 稳定元素在钛中扩散缓慢的特性，使得次生 α 相的析出动力学对温度不那么敏感。这一特性为实际生产提供了宝贵的工艺调节窗口（480-540℃），允许根据具体性能需求或炉次差异进行微调。

3.2.3 固溶保温时间的优化

固溶保温时间（ t ）影响了合金元素的均匀化和 β 晶粒尺寸。 t 从15 min延长至45 min， R_m 从1290 MPa升至1415 MPa， Z 从37%降至23%。时间过短，元素固溶不充分，时效强化潜力未完全发挥；时间过长， β 晶粒明显粗化，

对塑性不利，且可能促进晶界 α 相连续分布，损害韧性。选择 30 ± 3 min的保温时间，能够在保证充分固溶的同时，有效控制晶粒长大。

综上，本研究推荐Ti-5523钛合金紧固件的优化热处理制度为：固溶处理：820-840℃ / (30 ± 3) min；时效处理：480-540℃ / 8 h。

3.3 工艺稳定性验证与综合性能优势

将优化后的全套工艺参数应用于三炉批连续生产，产品性能表现出优异的稳定性和一致性。与当前主流应用的TB3钛合金紧固件进行对比（表3），本研究的优势更为凸显。Ti-5523紧固件在抗拉强度、比强度及剪切强度上实现了显著提升，分别达到约18-32%和11-14%的增幅。这意味着在同等设计载荷下，采用Ti-5523紧固件可有效减轻连接部位重量，对于航天器减重意义重大。此外，近 β 钛合金固有的更优耐腐蚀性，也为其在长期恶劣空间环境下的可靠服役提供了额外保障^[5]。

表3 Ti-5523与TB3钛合金紧固件性能对比

性能指标	Ti-5523 (本研究)	TB3 (典型值)	性能提升
抗拉强度 R_m	1300 – 1450 MPa	~1100 MPa	~18-32%
剪切强度 τ_b	> 780 MPa (通常 > 800 MPa)	~700 MPa	> 11%
比强度 (R_m/ρ)	~290 – 323 kN · m/kg	~245 kN · m/kg	显著提高
断后伸长率 A	> 10%	$\geq 8\%$	相当或更优

4 结语

本研究通过系统的工艺探索与机理分析，成功开发出适用于航天卫星平台的Ti-5523高性能钛合金紧固件一体化制造工艺，主要结论如下：

攻克了Ti-5523合金的精密冷锻成形难题。通过匹配优化的模具型腔半径（M4-M8内六角螺钉对应 $R=8.0, 9.0, 11.0, 14.5$ mm）、控制成形速度为35-40件/min、设定冲力行程为总行程的40-60%，实现了内六角头部的高质量一次成形，有效杜绝了裂纹与飞边缺陷。

揭示了热处理参数对组织性能的调控规律，确立了优化制度。研究明确了固溶温度（820-840℃）主导强度-塑性平衡，时效温度（480-540℃）具备宽工艺窗口，固溶时间（ 30 ± 3 min）需平衡固溶与晶粒长大。最终确定的“820-840℃/30min固溶+480-540℃/8h时效”制度，使材料获得以弥散次生 α 相强化的理想组织。

所制备的紧固件综合性能卓越且稳定。产品抗拉强度达1300-1450 MPa，剪切强度> 780 MPa，塑性（ $A > 10\%$ ， $Z > 25\%$ ）良好，氢含量< 125 ppm。多炉批稳定性试验证

实了工艺的高度可靠性与重现性。

相较于现役TB3紧固件优势显著。Ti-5523紧固件在关键力学性能，尤其是比强度和抗剪切能力上实现大幅提升，为航天器结构减重与可靠性升级提供了先进的材料与工艺解决方案。

本项目研究作为Ti-5523钛合金在高端航天紧固件领域的规模化工程应用奠定了坚实的技术基础。

参考文献

- [1] 王宏伟, 刘涛, 赵志军. 航天紧固件技术发展及展望[J]. 航天标准化, 2019, 28(3): 1-5.
- [2] 张利军, 周义刚, 曾卫东, 等. 近 β 型钛合金热机械处理与组织性能调控研究进展[J]. 材料导报, 2021, 35(9): 9043-9054.
- [3] QJ 2585-2013. 钛合金螺栓、螺钉技术条件[S]. 北京: 中国航天标准化研究所, 2013.
- [4] ASTM E8/E8M-16a. Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials[S]. West Conshohocken: ASTM International, 2016.
- [5] BOYER R R, BRIGGS R D. The use of β titanium alloys in the aerospace industry[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2005, 14(6): 681-685.

Analysis of Influencing Factors of Roundness Error Measurement and Research on Precision Compensation Scheme

Zhizhong Dong

Kunming Metallurgical College, Kunming, Yunnan, 650000, China

Abstract

Roundness error, a fundamental geometric tolerance, critically impacts the assembly accuracy and service life of rotary components. This study systematically investigates three key influencing factors—instrument precision, environmental interference, and workpiece condition—with the core objective of enhancing roundness measurement accuracy. Through developing technologies including instrument error calibration compensation, adaptive environmental interference compensation, and workpiece installation error correction, we establish a comprehensive multi-source error compensation scheme. The proposed solution is validated through practical applications, providing technical support for precise roundness detection of precision components. This research holds significant practical implications for advancing quality control in high-end manufacturing.

Keywords

Roundness error measurement; Influencing factors; Error compensation; Precision measurement; Multi-source error

圆度误差测量的影响因素分析及精准补偿方案研究

董志忠

昆明冶金高等专科学校, 中国·云南昆明 650000

摘要

圆度误差是一种基本的形状误差, 对回转类零件的装配精度和使用寿命有显著的影响。以下以提升圆度测量精度为核心目标, 系统剖析测量仪器自身精度、测量环境干扰及工件状态三大类关键影响因素; 重点研发仪器误差校准补偿、环境干扰自适应补偿、工件安装与自身误差修正等技术, 构建多源误差综合补偿方案, 并结合实际场景验证方案有效性。研究为精密零件圆度精准检测提供技术支持, 对推动高端制造质量管控升级具有重要实践意义。

关键词

圆度误差测量; 影响因素; 误差补偿; 精准测量; 多源误差

1 引言

在航空航天、精密机床、高端液压等关键领域中, 轴类、套类等回转体零件被归为核心基础部件, 圆度精度直接决定装备的运动平稳性、密封可靠性与使用寿命。当前, 全球制造业向高精尖水平转型, 市场对精密零件圆度公差的要求已经达到微米甚至亚微米等级。但传统圆度测量过程中, 仪器自身漂移、温湿度波动、工件装夹变形、测量参数匹配不当等因素易叠加形成测量误差, 让检测结果偏离了真实数值, 阻碍了高端装备的研发及生产活动。在此背景下, 深入厘清各类影响因素的作用机理, 突破精准补偿技术壁垒, 拟定适应多样场景的补偿方案, 是破解精密圆度测量难题的关键。

【作者简介】董志忠(1968—), 男, 中国云南昆明人, 本科, 讲师, 从事机械工程研究。

本文对影响因素展开系统分析, 依照情况针对性设计补偿技术与综合方案, 再结合应用案例证实其可行性, 旨在为高端制造领域提供高精度的圆度测量应对方案, 推动我国高端装备制造产业打破技术壁垒。

2 圆度误差测量的影响因素分析

圆度误差测量结果受到多维度相关因素综合影响。测量仪器本身精度、主轴回转误差以及传感器灵敏度漂移为基础影响源, 直接左右着测量基准的可靠性。测量环境中的温湿度涨落、振动干扰及气压的波动, 极易引起仪器部件的形变、信号传输的失真。工件装夹引起的变形、表面的粗糙程度以及残余应力释放, 会造成被测轮廓与真实状态发生偏离^[1]。(如图一)。具体分析如下:

圆度误差测量影响因素分析

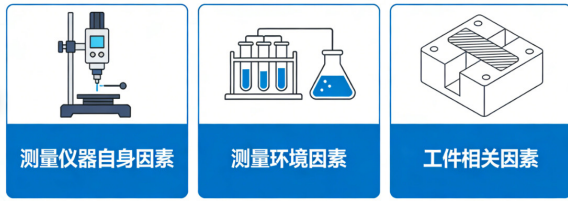


图 1 圆度误差测量的影响因素示意图

2.1 测量仪器自身因素

仪器自身性能是开展圆度测量的基础保障，其核心部件精度存在的缺陷会直接造成测量偏差。主轴作为驱动工件转动的核心零件，若产生径向跳动或者轴向窜动，能让工件回转中心偏离测量的基准中心，尤其在高精度轴类零件时，微米级跳动也会让测量结果失真。传感器身为信号采集的核心，其灵敏度漂移、线性度偏差现象会影响信号转换的精度，如电感式传感器长时间使用结束后，线圈老化会让输出信号跟实际位移之间的偏差增大，难以精准抓取工件表面的微小起伏。仪器导轨导向精度欠佳、传动机构间隙过大，会在测量过程中产生附加位移，如手动调节测量台时，导轨卡顿会导致采样点分布不均，影响圆度轮廓的完整采集。

2.2 测量环境因素

测量环境发生波动是圆度测量的关键干扰源，其影响多通过环境与仪器、工件相互作用产生。温度变化是最关键的影响因子，环境温度偏离了标准测量温度的时候，仪器和工件会由于热胀冷缩引起形变，又因为两者线膨胀系数不同会引发相对形变。湿度若出现变化，会影响仪器电子元件性能，高湿度环境下，传感器电路接口易出现氧化、短路，造成信号传输不顺畅，还会使工件表面产生凝露，改变工件表面轮廓，影响经抛光的精密零件。振动干扰源于车间设备的运转、人员的走动等现象，高频振动会造成仪器主轴、传感器出现共振，引发采集信号产生杂波现象，不能精准辨别工件真实轮廓和振动干扰信号；低频振动或许会造成工件装夹松动，引起附加的位移变动。

2.3 工件相关因素

工件自身状态及装夹方式直接决定圆度测量的基础条件，其固有的缺陷和装夹出现的变形会直接影响测量结果的真实性。在工件装夹过程产生的变形是常见误差的源头，采用三爪卡盘装夹薄壁套类零件时，夹紧力会使工件产生弹性变形，成为“三棱形”或“多棱形”，测量时得到的圆度误差实际包含了装夹变形量，松开夹紧力后工件恢复原状，造成测量结果与真实圆度的偏差量较大。工件表面质量差会影响到传感器信号的采集，若工件表面存在划痕、毛刺或粗糙度值过高，传感器探头测量时，会因表面坑洼起伏而产生信号波动，难以精准把握真实轮廓，好比铸造零件的毛坯表面砂眼数量多，会引起采样点数据离散性的提升^[2]。

3 圆度误差精准补偿方案研究

3.1 仪器误差补偿技术

仪器误差补偿核心是要达成“先校准后补偿”的闭环管控机制，针对主轴回转误差、传感器漂移等关键误差发生点设计专门对策。对于主轴回转误差，采用激光干涉仪进行高精度校准，采集主轴在不同转速水平时的径向跳动、轴向窜动数据，组建主轴误差数据库，采用软件算法实时修订测量基准偏差，例如在空气轴承主轴测量仪中，把校准误差曲线添加到测量系统，测量之际同步调用对应转速的误差数据，反向减去采集的轮廓信号。针对传感器灵敏度表现出的漂移现象，采用“实时校准+动态修正”模式，用标准量块对测量间隙的传感器做在线校准，记录各时间段内的漂移系数，构建漂移预测模型，自动校正测量信号的线性偏差。就导轨导向误差与传动间隙而言，结合软件修正与机械精度补偿，机械层面以刮研工艺提升导轨的贴合程度，软件层面采集导轨运动轨迹的数据，搭建位移补偿函数，去除运动出现的附加位移。

3.2 环境误差补偿技术

环境误差补偿以“实时监测+主动调控”为关键，搭建自适应环境管控体系，抵御温湿度、振动、气压等引发的干扰。就温度补偿而言，在测量区域安置多点温度传感器，及时采集环境、仪器自身及工件的温度，按照三者线膨胀系数的差别创建温度误差补偿模型。若环境温度偏离 20℃ 的标准数值，系统自动算出仪器部件与工件的热胀冷缩量，对测量数据进行反向校正；同时添置恒温空调与隔热罩，把控制测量区域温度的波动在 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 内，采用除湿机、气压稳定装置实现湿度与气压补偿，若湿度超过 60% 则自动除湿，阻止传感器电路氧化与工件表面出现凝露；对空气轴承式测量仪器，实时监测气压变化，依靠压力调节模块维持空气轴承支撑力的稳定，抵抗气压波动对主轴回转精度的影响。

3.3 工件安装与自身误差补偿技术

工件相关误差补偿聚焦装夹变形控制和自身缺陷修正，做到“装夹精准化+缺陷可视化修正”。装夹变形补偿采用“柔性装夹+夹紧力自适应调节”技术，针对薄壁套类别零件，采用软爪卡盘或者真空吸附装夹工件，杜绝刚性夹紧造成的弹性变形；凭借压力传感器实时监测夹紧力数值，按照工件的材质与壁厚创建夹紧力阈值数据库，自动调节夹紧力，如针对铝合金薄壁件，将夹紧力控制在 0.5-1.2MPa，切实减少装夹变形量。工件自身误差修正方面，测量前对工件实施清洁与等温处理，清除表面杂质防止误判，保证工件与环境温度一样以减少热变形；针对工件表面划痕、毛刺等缺陷，依靠图像识别技术锁定缺陷区域，数据处理阶段去除缺陷点数据，也可拟合相邻正常轮廓点，修正缺陷区域的测量偏差^[3]。

3.4 多源误差综合补偿方案

多源误差综合补偿关键是解决多误差源耦合干扰状况，采取“数据融合+动态协同”的实操方式。通过铺设多传

感器采集网络，同步抓取仪器主轴误差、环境温湿度、工件夹紧力、测量参数等实时数据，依托工业以太网达成数据间的互通共享。构建轻量化卡尔曼滤波融合模型，无需开展复杂理论运算，可快速判别各误差源的耦合关系及影响权重，精准估算综合误差数值。搭建动态补偿的决策模块，依照实时融合数据自动调用仪器、环境、工件等相关的单源补偿策略，共同调控补偿参数，杜绝不同方案出现冲突。同时积累不同测量工况的补偿数据，采用简单迭代的方式优化模型参数，适应航空航天、精密机床等多领域复杂的测量实际场景，维持长时间稳定的精准补偿效果。

该技术体系的核心原理是先通过模块化设计实现单源误差的精确剥离，再遵照多源数据耦合模型完成协同补偿，冲破传统单一补偿应对复合误差的局限困境。其明显优势体现为灵活性和精准度的双重提升，单源模块能依照误差类型迅速调换适配策略，多源融合层借由动态权重分配避免补偿

方面的冲突。与传统方案相比，无需重构测量系统即可实现误差补偿效率翻倍。适配场景覆盖高端制造的各类复杂工况，尤其适用于航空航天亚微米级精密轴类零件的多误差叠加测量、精密机床车间强振动环境下的主轴检测工作，以及液压薄壁套这类易变形工件的批量检测，还可延伸至半导体精密构件、汽车发动机核心部件等对测量精度要求极高的场景，为不同工况打造既涵盖标准化又有定制化的解决途径。

4 不同测量场景下的补偿方案应用案例

选取航空航天发动机主轴、精密机床主轴、高端液压薄壁套三类典型场景，应用前述多源误差综合补偿方案开展测试。航空航天场景中，发动机主轴精度要求达亚微米级，核心干扰为温度波动与主轴误差，采用环境—仪器协同补偿；精密机床车间振动显著，重点实施振动隔振+参数智能适配补偿；液压薄壁套易装夹变形，以柔性装夹+应力释放修正为主^[4]。应用效果如表 2 所示：

表 2 应用效果统计表

测量场景	工件类型	核心干扰源	采用补偿方案	补偿后精度提升率
航空航天制造	发动机主轴	温度波动、主轴回转误差	温度自适应补偿+主轴误差实时校准	82%
精密机床加工	机床主轴	车间振动、参数匹配不当	被动隔振+主动减振+智能参数适配	76%
高端液压制造	液压薄壁套	装夹变形、残余应力释放	柔性装夹+夹紧力自适应+时效处理	85%

5 结语

综上所述，本文细致梳理了圆度误差测量的三大类核心影响状况，明确了各因素的作用机理，构造了含有单源误差补偿与多源误差融合补偿的完整技术方案，通过应用案例验证了方案的精准性与可靠性。研究表明，多源误差综合补偿可有效消除复合干扰因素，显著改善测量的精准水平。未来可把智能传感和机器学习技术结合在一起，优化现有的误差预测模型，提高方案在极端工况下的契合能力，为高精度圆度测量需求提供更高效的技术后盾。

参考文献

- [1] 龚天辉,钟飞.滚珠直径非接触式测量及圆度边缘检测研究[J].湖北工业大学学报,2025,40(05):1-5.
- [2] 张俊萍,邵萌,洪丹丹,等.基于蒙特卡洛方法的三点圆度测量不确定度评定与降低[J].工具技术,2025,59(06):128-134.
- [3] 花晓彬,阮小霞,花世群.低成本大曲率半径平凸透镜圆度误差测量[J].激光与光电子学进展,2025,62(03):208-213.
- [4] 滕玉彬,孙涛.测头圆度对齿轮极坐标测量法精度影响的分析[J].机械传动,2021,45(07):172-176.

Research on Standardization and Efficiency Enhancement of Fire Supervision Enforcement Based on Big Data Analysis

Peng Qiu

Wuchuan County Brigade, Hohhot City Detachment, Inner Mongolia Fire and Rescue Corps, Hohhot, Inner Mongolia, 011700, China

Abstract

Addressing challenges in grassroots fire supervision enforcement such as inconsistent standards, fragmented information, and inadequate risk assessment capabilities, this study explores the application of big data technology in fire supervision enforcement. Drawing from practical fire prevention supervision experiences, the paper examines current enforcement operations, analyzes implementation pathways for data resource integration, risk model development, and intelligent supervision mechanisms, while discussing optimization of enforcement processes and performance evaluation improvements under data empowerment. The research demonstrates that big data analysis enhances risk identification accuracy, strengthens traceability management throughout enforcement procedures, promotes standardized enforcement criteria, and improves regulatory precision and scientific rigor. These findings provide practical references for advancing standardized fire supervision enforcement and enhancing grassroots governance capabilities, while offering significant implications for building a smart fire supervision system.

Keywords

Big data; Fire supervision; Law enforcement standardization; Efficiency improvement; Intelligent supervision

基于大数据分析的消防监督执法规范化与效能提升路径研究

邱鹏

内蒙古消防救援总队呼和浩特市支队武川县大队, 中国·内蒙古 呼和浩特 011700

摘要

针对基层消防监督执法在规范化水平与工作效能方面存在的标准不统一、信息分散、风险研判能力不足等问题, 本文围绕大数据技术在消防监督执法中的应用开展研究, 文章结合基层防火监督实践, 梳理当前执法运行现状, 分析数据资源整合、风险模型构建与智能监管机制建设的实现路径, 探讨数据赋能背景下执法流程优化与绩效评价改进方式。研究表明, 大数据分析能够提升风险识别精度, 强化执法全过程留痕管理, 促进执法尺度统一, 增强监管的精准性与科学性。相关成果对推进消防监督执法规范化建设、提升基层治理能力具有现实参考价值, 对构建智慧消防监管体系具有积极意义。

关键词

大数据; 消防监督; 执法规范化; 效能提升; 智慧监管

1 引言

在城市化进程加快和社会单位类型日益多样的背景下, 消防安全风险呈现复杂化趋势, 基层消防监督执法面临监管对象数量增加、隐患类型多变、执法标准把握不均等现实挑战, 传统经验型执法模式难以满足精细化治理需求, 信息资源分散与数据利用率不高制约了监管效能提升, 大数据技术的发展为风险识别、精准监管与执法留痕管理提供了技术支撑。围绕数据资源整合与分析应用展开研究, 对于提升消防监督执法规范化水平、增强基层防火监督工作的科学性具有现实价值。

【作者简介】邱鹏(1987—), 男, 蒙古族, 中国内蒙古呼伦贝尔人, 硕士, 从事消防监督研究。

2 执法现状分析

2.1 监管压力

基层消防监督执法面对的核心压力来自监管对象规模扩张与风险形态动态演化之间的不匹配, 城市建成区与乡镇产业点位持续增长, 人员密集场所与小微企业以及仓储物流等业态在空间上呈现分散化, 在时间上呈现季节性波动, 隐患诱因与管理责任链条也更为复杂, 有限警力需要在日常检查以及专项整治与投诉核查等任务之间频繁切换, 监管资源配置往往依赖经验判断, 导致对高风险目标的识别不够敏捷, 对低风险目标的检查投入又难以压缩, 结果表现为检查覆盖面与检查深度难以兼顾, 该压力直接影响执法效能提升路径的设计重点, 即如何依托数据支撑实现监管对象分级分类与差异化监管^[1]。

2.2 数据瓶颈

消防监督执法的关键瓶颈集中在数据可用性不足，主要表现为执法相关数据难以形成可计算的统一底座，基层掌握的单位档案以及监督检查记录与隐患整改信息在不同系统与不同表单之间分散存在，字段口径不一致导致同一对象在名称代码以及地址与业态等要素上出现差异，数据更新依赖人工录入使得时效性不足，跨部门数据协同层面，市场监管以及住建和应急管理数据难以实现稳定共享，人口流动与经营变更等关键信息无法及时反映到监管画像中，风险研判只能停留在静态台账层面，数据瓶颈削弱了大数据分析的基础条件，使规范化与效能提升难以进入模型驱动与精准投放阶段^[2]。

2.3 规范不足

执法规范化的突出问题集中在自由裁量与处置尺度难以稳定统一，其根源在于风险证据链构建不充分以及标准转化机制不完善，检查中对同类隐患的定性依据容易受到现场信息完整度与执法人员经验差异影响，整改期限设定与处罚幅度选择缺少与风险等级相匹配的量化支撑，导致同案不同处的感受在基层更易出现，执法全过程留痕主要依赖文字记录与零散影像材料，关联性不足使复核与评议难以还原关键事实要点，影响执法文书质量与后续执法衔接。规范不足不仅降低执法公信力，也制约了大数据应用落地，因为缺乏统一口径的数据难以支撑可解释的风险模型与流程标准化^[3]。

3 大数据应用

3.1 数据整合

消防监督执法规范化建设的技術基础在于形成结构清晰与口径统一的数据资源体系。数据整合的重点不在简单汇聚，而在于构建以监管对象为核心的全量数据主索引，基层单位档案来源于消防监督管理系统历史录入信息，隐患整改记录来自现场检查终端与执法办案系统，行政处罚数据来源

于法制审核模块，火灾事故数据来源于火灾调查系统，建筑基础信息可对接住建部门公开数据接口，市场主体登记信息来自市场监管部门共享平台，围绕统一社会信用代码与标准地址编码建立唯一识别键，利用数据清洗技术对名称差异与字段缺失进行比对修正，采用实体匹配算法消除重复记录，形成覆盖单位基本属性与监管频次和隐患类型与处罚记录的综合数据视图，在此基础上构建分层数据仓库，将原始层与主题层以及分析层分离管理，使风险评估与绩效分析调用统一标准数据源。整合后的数据体系改变了以纸质台账为核心的管理模式，为执法规范化提供可追溯的数据支撑，也为后续模型分析奠定基础。

3.2 风险研判

风险研判以整合后的单位级数据为样本基础，选取近三年监督检查记录与行政处罚信息以及火灾事故数据作为训练集，样本总量为1260家单位，其中发生过火灾事故或重大隐患反复整改的单位共计184家，未发生事故且隐患整改闭环良好的单位1076家，研究采用逻辑回归模型与决策树算法对隐患数量与隐患类别权重和处罚次数以及整改周期等变量进行建模，计算单位综合风险评分。部分样本结果如表1所示。

数据来源为近三年执法系统导出记录，经数据清洗与标准化处理后进入模型训练，模型计算结果显示人员密集场所的风险评分均值为0.72，与事故发生率8.1%呈明显正相关，决策树分析表明当平均隐患数大于6且整改周期超过20天时事故概率显著上升，小微企业样本的风险评分均值为0.41，事故发生率较低，但当处罚次数超过2次时风险评分跃升至0.63。模型在测试集中的准确率达到84%，表明风险研判具备较高区分度，该结果为差异化监管提供量化依据，使检查计划能够围绕高分单位展开，提高执法资源配置效率。

表1 单位风险评分统计表

单位类别	样本数量	平均隐患数	平均处罚次数	平均整改天数	风险评分均值	事故发生率
人员密集场所	320	6.8	1.9	18	0.72	8.10%
仓储物流场所	210	5.4	1.3	22	0.65	6.70%
小微企业	430	3.1	0.6	15	0.41	2.30%
机关事业单位	300	2.4	0.3	12	0.33	1.40%

3.3 智能监管

智能监管建立在风险评分动态更新机制之上，将单位日常检查数据与物联网监测数据接入分析平台，部分重点单位安装火灾自动报警系统联网模块，系统每日报送故障次数与误报次数以及巡检记录，数据由消防远程监控中心自动采集，研究选取150家已联网单位为样本，统计半年内报警系统运行数据与现场复查记录，运用时间序列分析方法识别异常波动，并与风险评分联动调整监管级别。

数据来源为远程监控平台自动采集记录，经异常检测

算法计算标准差与均值偏离度后划分区间，统计显示重度异常单位平均月故障次数达到7.9次，风险评分平均上调0.27，高于正常区间单位0.02的调整幅度，半年内重度异常单位接受现场复查的比例达到85%，隐患整改周期明显缩短，智能监管机制实现数据驱动的动态预警，使监管从定期检查转向实时感知，执法过程留痕与模型更新形成闭环结构，该模式强化了执法规范化基础，也提升了效能水平，为构建智慧消防监管体系提供实践样本。

4 效能提升路径

4.1 制度保障

消防监督执法效能提升的关键在于构建以数据治理为核心的制度体系,使大数据应用嵌入执法全过程运行结构,制度保障的重点应当围绕数据标准统一与权责边界清晰展开,基层监督执法活动涉及单位基础信息采集与隐患认定记录以及处罚决定制作等环节,若缺乏统一的数据口径与操作规范,模型分析与风险评分难以保持稳定,应当建立覆盖数据采集与校核以及更新与归档的闭环管理制度,明确执法人员在数据录入中的真实性责任与审核流程,形成以统一字段为载体的执法记录规则,数据共享层面需要建立部门协作协议,界定市场监管与住建等部门数据调用范围与更新频率,形成责任清单与权限控制机制,防止数据滥用与信息孤岛并存,围绕风险等级结果,应当制定差异化监管规则,将高风险单位纳入重点监管名录,将低风险单位纳入简化检查程序,使数据结果转化为执法行为依据。制度保障的目标不在技术层面扩展,而在于使数据成为规范执法尺度的共同语言,使执法裁量与风险等级之间形成稳定对应关系,从制度层面支撑规范化与效能提升。

4.2 技术支撑

技术支撑的核心在于构建稳定的数据处理与分析架构,使风险模型与执法系统形成持续迭代机制,当前执法系统多以信息录入与文书生成为主要功能,分析能力依赖人工统计,难以支撑高频次风险计算与动态分级管理需求,技术路径应围绕数据仓库建设与算法模块嵌入展开,将执法数据实时同步至分析平台,采用结构化查询语言进行数据抽取与转换,将原始记录转化为可计算指标,并在数据清洗环节完成异常值识别与缺失值校正,提升数据质量稳定性,风险模型可采用逻辑回归与随机森林算法对隐患数量与整改周期以及处罚频次等变量进行权重分配,在样本训练基础上形成评分公式,并结合交叉验证方法检验模型泛化能力,保证风险等级划分具有统计意义与业务解释基础。系统层面应嵌入自动更新机制,当单位新增检查记录或整改状态变化时,模型自动重新计算风险值并推送至监管人员终端,实现风险等级的实时调整与执法策略联动。技术支撑还包括可视化模块建设,将风险分布以地图热力形式呈现,并叠加行业类别与历史事故密度等图层,使监管决策建立在空间数据分析基础之上,该技术结构改变了依赖经验排序的检查计划编制方式,使执法资源配置围绕数据证据展开,形成数据采集与模型分析和监管执行之间的闭环结构,提升执法工作的精确度与响应速度,并为规范化考核提供可量化指标支撑。

4.3 队伍建设

队伍建设的重点在于培育具备数据思维的复合型执法

人员,使技术工具能够真正融入执法实践,大数据平台建成后,若执法人员仍以传统经验方式安排检查重点和判定风险水平,数据成果容易停留在报表展示层面,难以转化为执法规范化与效能提升的实际成效,队伍能力提升应围绕风险模型理解能力与数据质量意识开展系统培训,使执法人员能够读懂风险评分的指标构成与权重逻辑,理解不同隐患类型对风险等级的贡献差异,形成以证据链为导向的现场核查思路,培训体系可采取岗位需求导向的分层设计,基础层强化数据录入规则与字段口径统一要求,提升对单位名称地址业态等核心要素的规范采集能力,业务层强化风险画像解读与异常数据识别能力,使人员能够依据报表发现隐患反复与整改拖延等异常模式,提升检查的指向性与针对性,实战层可围绕典型案例开展复盘演练,将系统预警信息与现场发现进行对照,使执法人员掌握从数据线索到现场核查再到处置闭环的工作路径。绩效评价体系需要与数据应用深度挂钩,将风险分级监管落实情况与数据闭环质量纳入考核指标,考核内容强调整改闭环率与复查命中率以及高风险单位处置及时率等结果性指标,使数据结果成为执法工作的重要依据。队伍建设还需要形成专业化岗位分工,在基层大队设立数据管理专岗,负责数据校验与模型维护以及指标口径调整工作,与一线检查人员形成协作关系,一线人员负责现场事实采集与证据固化,数据专岗负责质量审核与分析反馈,法制岗位负责裁量基准与文书规范统一,三者形成职责闭环,该路径使技术应用不再停留在平台层面,而成为执法文化的一部分,推动消防监督执法由经验依赖型向数据驱动型转型,促进裁量尺度统一与监管精准度提升,形成规范化运行与效能提升的内在动力。

5 结语

大数据分析为消防监督执法规范化与效能提升提供了系统化支撑,围绕数据整合与风险建模以及智能监管机制构建,执法活动逐步实现由经验判断向数据决策转变,监管资源配置更加聚焦高风险领域,执法过程留痕更加完整,裁量尺度趋于统一,制度框架与技术平台及队伍能力形成协同结构,推动基层防火监督工作向精细化与科学化方向发展,相关路径的持续完善,有助于提升消防治理现代化水平,为智慧消防体系建设奠定坚实基础。

参考文献

- [1] 施奋飞. 消防监督执法规范化建设的意义及对策探讨[J]. 水上安全, 2023, (16): 112-114.
- [2] 胡翔. 消防监督执法规范化建设的认识与思考[J]. 消防界(电子版), 2022, 8(19): 111-113.
- [3] 张莹. 新形势下消防监督执法规范化建设研究[J]. 消防界(电子版), 2022, 8(13): 69-71.

Crop Pests and Diseases Detection Based on UAV Remote Sensing and Improved VMamba-UNet

Xijun Wang¹ Xinhua Xu² Ping Li²

1. iFlytek Co., Ltd. Zhengzhou, Henan, 451150, China

2. College of Engineering, Sias University, Zhengzhou, Zhengzhou, Henan, 451150, China

Abstract

In response to the challenges of weak small target features, complex backgrounds, low computational efficiency of traditional models, and insufficient global modeling ability in crop pest and disease detection in unmanned aerial vehicle remote sensing images, an improved multi-scale visual state space U-Net model (MVMamba UNet) is proposed. This method introduces a multi-scale state space module (MSSM) to model the long-range spatial dependencies of pests and diseases with linear computational complexity, and integrates a channel space attention mechanism (CSA) to adaptively focus on salient regions and suppress background interference. At the same time, it combines an optimized U-shaped encoding and decoding architecture to achieve efficient fusion of multi-scale features. The experiments on the self built unmanned aerial vehicle remote sensing pest and disease dataset show that the accuracy, recall, and F1 score of the proposed model reach 0.942, 0.937, and 0.939, respectively, and the comprehensive performance and training efficiency are better than the comparison model. The research provides an effective solution for precise and real-time intelligent detection of crop diseases and pests in complex field environments, which has practical application value for promoting the development of smart agriculture.

Keywords

Crop pest and disease detection; UAV remote sensing; VMamba-UNet; Improve VMamba UNet

基于无人机遥感与改进 VMamba-UNet 的作物病虫害检测方法

王喜军¹ 许新华² 李萍²

1. 科大讯飞股份有限公司, 中国·河南 郑州 451150

2. 郑州西亚斯学院工学部, 中国·河南 郑州 451150

摘要

针对无人机遥感图像中作物病虫害检测存在的小目标特征弱、背景复杂、传统模型计算效率低且全局建模能力不足的挑战,提出了一种改进的多尺度视觉状态空间U-Net模型(MVMamba-UNet)。该方法通过引入多尺度状态空间模块(MSSM)以线性计算复杂度建模病虫害的长程空间依赖,并集成通道-空间注意力机制(CSA)以自适应聚焦于显著区域、抑制背景干扰,同时结合优化的U型编解码架构实现多尺度特征的高效融合。在自建无人机遥感病虫害数据集上的实验表明,所提模型的精确率、召回率和F1分数分别达到0.942、0.937和0.939,综合性能与训练效率均优于对比模型。研究为田间复杂环境下的作物病虫害精准、实时智能检测提供了有效的解决方案,对推动智慧农业发展具有实际应用价值。

关键词

作物病虫害检测; 无人机遥感; VMamba-UNet; 改进VMamba-UNet

1 引言

粮食安全是国家发展的基石,而病虫害是导致作物减产的主要生物灾害。传统田间调查方法效率低、覆盖面窄,难以满足大范围农情监测需求^[1]。无人机(UAV)遥感凭借

其灵活、低成本、高分辨率的优势,已成为病虫害动态监测的重要工具^[2,3]。其获取的影像包含丰富的作物冠层信息,为病虫害的早期精准诊断提供了数据基础^[4]。对无人机遥感图像进行智能解译的核心在于病虫害区域的自动检测。显著性目标检测(SOD)技术能够快速定位图像中的突出区域,有助于从复杂农田背景中提取病虫害斑块^[5,6]。当前方法主要基于深度学习。基于CNN的方法(如YOLO、U-Net系列)局部特征提取能力强,但感受野有限,难以建模病虫害的离散分布与长程关联,易受复杂背景干扰^[7,8]。基于ViT的方法通过自注意力机制实现全局上下文建模,但其计算复

【基金项目】河南省科技攻关项目(252102110343);河南省校企协同创新项目(26AXQXT120)。

【作者简介】王喜军(1982—),男,中国河南平顶山人,工程师,硕士研究生,研究方向计算机应用技术。

杂度随图像尺寸呈二次增长,难以满足无人机平台对高分辨率影像的实时处理要求 [9]。新兴的状态空间模型 (SSM),特别是 Mamba 架构,为解决上述矛盾提供了新思路。它能在保持线性计算复杂度的同时有效捕获长程依赖,已在遥感目标检测等任务中展现出潜力^[10]。然而,将其直接应用于农业病虫害显著性检测仍面临独特挑战:病虫害目标(尤其是早期症状)常为特征微弱的“小目标”,易丢失细节或与背景混淆;田间光照变化、遮挡等动态环境干扰大;无人机载平台计算资源严格受限,要求模型必须在精度、速度和轻量化间取得最佳平衡^[11]。因此,本文提出一种基于改进 VMamba-UNet(MVMamba-UNet)的无人机遥感图像重大作物病虫害检测方法。旨在融合全局上下文建模与局部细节提取的优势,构建一个面向农田场景、轻量化、高性能的检测网络,以期作为作物病虫害的自动化、精准化监测提供有效的技术解决方案。

2 改进 VMamba-UNet(MVMamba-UNet)

本文提出了一种用于无人机遥感图像作物病虫害检测的多尺度视觉状态空间 U-Net 模型 (MVMamba-UNet)。其整体架构如图 1 所示,采用经典的编码器-解码器 U 型结构,并集成了通道-空间注意力 (CSA) 跳跃连接机制。编码器与解码器主要由多尺度状态空间模块 (MSSM)、改进的块合并 (IPM) 与改进的块扩展 (IPE) 操作构成。

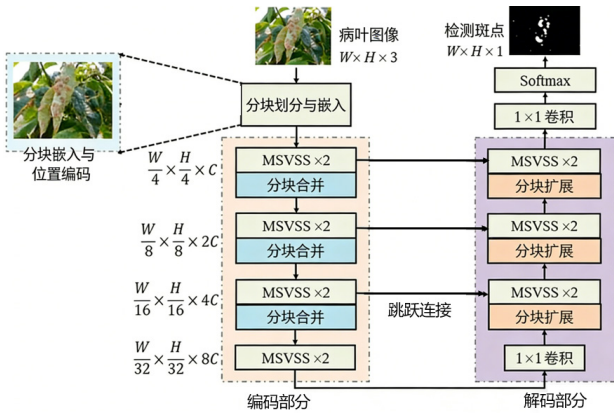


图 1 MVMamba-UNet 的架构图

整体架构:给定输入图像,首先将其划分为不重叠的 4×4 图像块,并通过线性投影嵌入到 C 维特征空间(默认 C=96),得到块嵌入特征。该特征经层归一化 (LayerNorm) 后输入编码器。编码器包含四个渐进阶段,依次使用 [2,2,2,2] 个 MSSM 模块,通道数按几何级数从 C 增至 8C (C→2C→4C→8C)。每两个阶段之间通过 IPM 操作进行 2 倍空间下采样并使通道数翻倍。解码器对称地包含 [2,2,2,1] 个 MSSM 模块,通道数从 8C 缩减至 C (8C→4C→2C→C)。除最后阶段外,每个上采样阶段起始于一个 IPE 操作。通过逐元素相加的方式融合编码器与解码器对应层的特征,以保持参数效率。最终,一个由 4 倍

块扩展层和 1×1 卷积投影层构成的重建模块将特征恢复至原始空间分辨率和通道维度。

借鉴 VMamba 思想,设计“行优先”与“列优先”的双向扫描策略,将 2D 图像特征图转换为两条互补的 1D 序列,确保每个像素都能充分融合全局行、列上下文信息,避免因序列化造成空间结构信息丢失。在每个 Mamba 块前加入扫描模块,对输入特征图进行两个方向的展开与处理,再将结果融合。为有效分离结构性目标信息与纹理噪声,研究引入频域特征自推理模块。拟通过在频域维度对特征进行分解与推理,为后续多尺度特征融合提供更加判别性和鲁棒性的语义表示。给定输入特征 $F \in R^{C \times H \times W}$,通过离散小波变化 (DCT) 可以获得不同频率分量特征 F_{LL} 、 F_{HL} 、 F_{LH} 和 F_{HH} 。

$$F_{LL}, F_{HL}, F_{LH}, F_{HH} = DWT(F) \quad (1)$$

研究通过将分解的频域特征输入卷积层进行进一步提取与编码,以捕获频域空间中的局部模式与结构细节。

$$F_1 = Conv_{3 \times 3}(F_{LL}), F_2 = Conv_{3 \times 3}(F_{LL}) \quad (2)$$

$$F_3 = Conv_{3 \times 3}(F_{LL}), F_4 = Conv_{3 \times 3}(F_{LL}) \quad (3)$$

为进一步降低模型参数量与计算开销,在频域特征提取中引入深度可分离卷积进行处理如下:

$$F'_1 = D_e(F_1), F'_2 = D_e(F_2) \quad (4)$$

$$F'_3 = D_e(F_3), F'_4 = D_e(F_4) \quad (5)$$

将各分支处理后的特征经过上采样和沿通道维度进行拼接,以融合不同频率、不同尺度的特征信息,形成包含丰富结构细节与全局语义的多尺度频域特征表示。

3 实验与结果分析

3.1 实验设置

为系统评估 VMamba-UNet 在无人机遥感作物病虫害检测任务中的性能,本研究基于自建数据集开展了对比与消融实验。实验数据通过搭载高清 RGB 相机的 DJI S1000+ 无人机采集,飞行高度 25 米,地面采样距离约 1.0 厘米/像素。原始图像经裁剪、标准化预处理后,通过添加噪声、旋转及裁剪等数据增强技术,构建了包含 1000 张 512×512 像素图像及其像素级标注的数据集。按 6:4 的比例随机划分为训练集 (600 张) 和测试集 (400 张)。

所有实验在配备 NVIDIA Tesla V100 GPU 的工作站上完成,使用 Keras (基于 TensorFlow 后端) 框架。为保证公平比较,所有对比模型均采用 Kaiming 方法初始化参数,使用随机梯度下降 (SGD) 优化器,设置初始学习率为 0.001,动量为 0.4,批量大小为 15,共训练 1000 轮。针对病虫害斑块像素占比较小的类别不平衡问题,训练中采用加权交叉熵损失函数。采用像素精度 (Precision)、召回率 (Recall) 和 F1 值作为主要评价指标,计算如下:

$$\begin{aligned}
 Precision &= \frac{TP}{TP + FP} \\
 Recall &= \frac{TP}{TP + FN} \\
 F1 &= \frac{Precision \cdot Recall}{Precision + Recall}
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

3.2 对比实验结果

将改进 VMamba-UNet 与 2 种模型进行对比: U-Net、VM-UNet。所有模型在相同条件下训练至收敛。检测结果如图 2 所示。

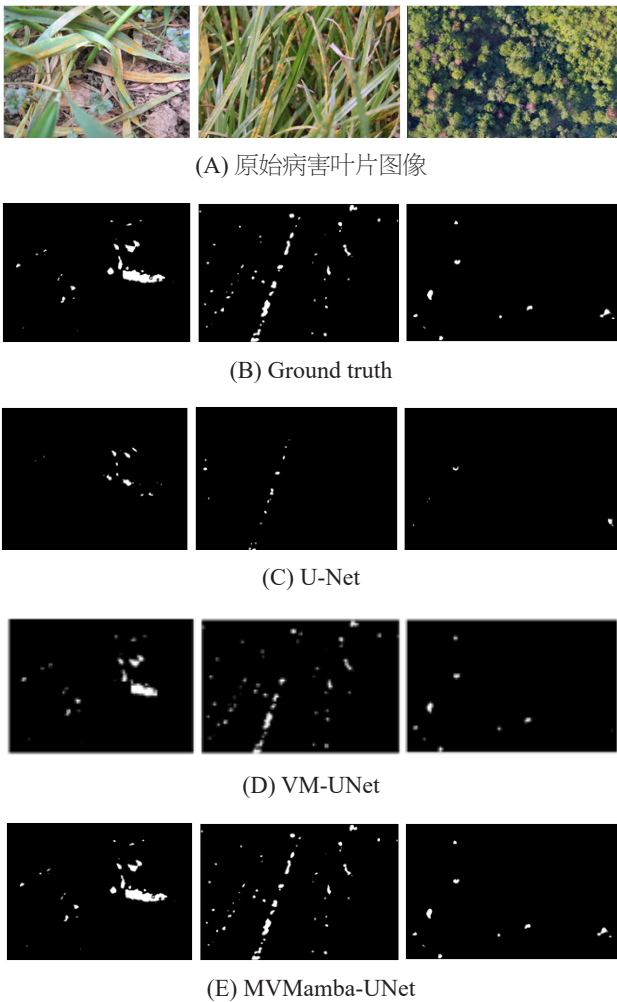


图 2 由三种模型得到的病害检测结果

表 1 不同模型在作物病害检测任务上的性能对比

模型	精确率 (Precision)	召回率 (Recall)	F1 分数 (F1-Score)	训练时间 (分钟)
U-Net	0.721	0.758	0.739	126
VM-UNet	0.913	0.938	0.925	79
MVMamba-UNet	0.942	0.937	0.939	87

图 3 为害虫图像数据库上的检测结果。

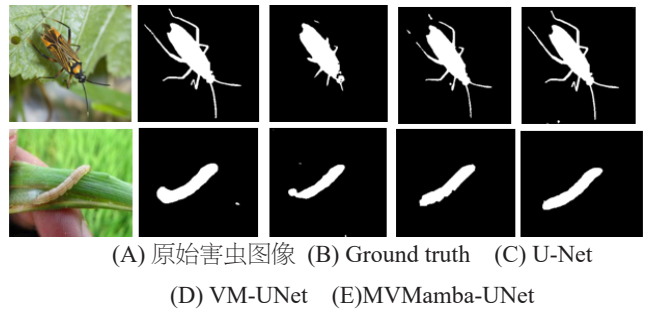


图 3 由三种模型得到的害虫检测结果

3.3 结果分析

实验结果表明, 本文提出的 MVMamba-UNet 在无人机遥感作物病虫害检测任务中取得了较好的性能。其在精确率 (0.942) 与 F1 分数 (0.939) 上均优于对比模型, 且在召回率 (0.937) 与训练效率 (87 分钟) 上达到优异平衡。可视化结果进一步证实, 该模型对复杂背景下的微小、离散病虫害目标具有更完整、精准的定位与分割能力, 显著减少了误检与漏检。

4 结语

针对无人机遥感图像中作物病虫害检测所面临的小目标特征微弱、背景复杂且计算资源受限的核心挑战, 提出了一种基于改进 VMamba-UNet (MVMamba-UNet) 的检测方法。该方法创新性地融合了多尺度视觉状态空间模块与通道-空间注意力机制, 在保持线性计算复杂度的同时, 实现了对病虫害区域长程语义依赖的高效建模与精准定位。在自建数据集上的实验表明, MVMamba-UNet 在精确率 (0.942)、召回率 (0.937) 和 F1 分数 (0.939) 上均达到最优, 且训练效率高, 显著优于传统 U-Net 与基准 VM-UNet 模型。该研究为复杂田间环境下的病虫害自动化、精准化监测提供了一套切实可行的轻量化解决方案, 对推动智慧农业与精准植保实践具有重要应用价值。未来工作将聚焦于模型的进一步轻量化设计以及在更多元病虫害类型与多模态数据上的泛化能力验证。

参考文献

- [1] 方晨晨,石繁槐.基于改进深度残差网络的番茄病害图像识别[J].计算机应用,2020,40(S1):203-208.
- [2] 曾伟辉,李淼,李增,等.基于高阶残差和参数共享反馈卷积神经网络的农作物病害识别[J].电子学报, 2019,47(09):1979-1986.
- [3] 王美华,吴振鑫,周祖光.基于注意力改进CBAM的农作物病虫害细粒度识别研究[J].农业机械学报,2021,52(04):239-247.
- [4] 张善文,邵或,齐国红,等.基于多尺度注意力卷积网络的作物害虫检测[J].江苏农业学报,2021,37(03):579-588.
- [5] He H M, Liu L N, Munir S, et al. Crop diversity and pest management in sustainable agriculture. Journal of Integrative Agriculture, 2018, 18(9): 1945-1952. DOI:10.1016/S2095-3119(19)62689-4.

- [6] Xavier T W F, Souto R N V, Statella T, et al. Identification of Ramularia leaf blight cotton disease infection levels by multispectral, multiscale UAV Imagery. *UAVs*, 2019, 3(2): 33-33. DOI:10.3390/UAVs3020033.
- [7] Zhang P, Huang Y, Pu R. Monitoring plant diseases and pests through remote sensing technology: A review. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2019, 165, 104943. DOI:10.1016/j.compag.2019.104943
- [8] Dehkordi R, Jarroudi M, Kouadio L, et al. Monitoring wheat leaf rust and stripe rust in winter wheat using high resolution UAV based red-green-blue imagery. *Remote Sensing*, 2020, 12(22): 3696. DOI:10.3390/rs12223696.
- [9] Narmilan A, Gonzalez F, Salgadoe A, et al. Detection of White Leaf Disease in Sugarcane Using Machine Learning Techniques over UAV Multispectral Images. *UAVs*, 2022, 6,230. DOI:10.3390/UAVs6090230
- [10] Gao D, Sun Q, Hu B, et al. A framework for agricultural pest and disease monitoring based on internet of things and unmanned aerial vehicles. *Sensors*, 2020, 20(5): 1487-1487. DOI:10.3390/s20051487.
- [11] Amarasingam N, Gonzalez F, Salgadoe A, et al. Detection of White Leaf Disease in Sugarcane Crops Using UAV-Derived RGB Imagery with Existing Deep Learning Models. *Remote Sens.*2022,14,6137.

Construction and practice of immersive stage design system based on XR and real-time rendering technology

Tong Zhou

Jiangsu Broadcasting Corporation, Nanjing, Jiangsu, 210008, China

Abstract

This paper aims to explore the construction and practice of immersive stage design system based on XR and real-time rendering technology. In terms of research methods, this paper first summarizes XR and real-time rendering technology, and then studies the practical path from four aspects: system architecture innovation, key technology breakthrough, multi-domain collaboration and continuous innovation optimization. The results show that the integration of XR and real-time rendering technology can innovate the architecture of immersive stage design system. Key technical breakthroughs can ensure the high-quality presentation of the system. Multi-domain collaboration helps the practical application of the system, and continuous innovation and optimization promote the development and upgrading of the system. The conclusion shows that the construction of the system can improve the quality of the studio program and the audience experience, and provide a new development direction and practical reference for the industry.

Keywords

Green energy; Equipment; Project management; Strategy

基于 XR 与实时渲染技术的总台演播室沉浸式舞美系统构建与实践

周通

江苏省广播电视总台, 中国·江苏南京 210008

摘要

本文旨在探讨基于XR与实时渲染技术的总台演播室沉浸式舞美系统的构建与实践。研究方法上,先对XR与实时渲染技术进行概述,进而从系统架构创新、关键技术突破、多领域协同以及持续创新优化四个方面展开实践路径研究。结果表明, XR与实时渲染技术融合可创新沉浸式舞美系统架构,关键技术突破能保障系统高质量呈现,多领域协同助力系统实践应用,持续创新优化推动系统发展升级。结论显示,构建该系统可提升总台演播室节目质量与观众体验,为行业提供新的发展方向与实践参考。

关键词

绿色能源; 设备; 工程管理; 策略

1 引言

在科技日新月异的时代, XR与实时渲染技术正在改变传统的演播室舞美。XR打破现实与虚拟的界限,而实时渲染可以让画面更加生动、逼真。总台的演播室是内容生产和播出的第一线,对于舞美的要求也更高。搭建一个基于XR以及实时渲染的沉浸式的舞美可以让节目更具观赏性,也可以给观众不一样的感受。

2 XR与实时渲染技术概述

XR是一种包括虚拟现实(VR)、增强现实(AR)、混合现实(MR)在内的综合性技术,利用计算机视觉、感

知等技术把虚拟世界和真实世界结合在一起,给用户提供一种沉浸式的交互方式。而其基础则是实时渲染技术的支持——这种技术可以在用户参与虚拟世界交互的过程中,以毫秒的速度产生并且刷新动态的3D图像,使得视觉平滑以及交互快速。比如,在2026年央视春晚节目《梦底》,使用了XR实时渲染技术进行虚拟舞台及“数字刘浩存”的时间和空间调度,做到4/8K清晰度下人物头发丝、衣服褶皱等细节表现的同时,也完成光效和环境光的效果一致,展示了实时渲染对于大量任务的强大并发算力^[1]。

实时渲染技术利用GPU并行计算能力和各种优化方法进行渲染,在渲染流程中(顶点着色、光栅化、片元着色等步骤)把3D模型转换为屏幕上的像素,在此过程中使用细节层次(LOD)、延迟渲染等方法减少工作量。它的发展可以回溯到上世纪80年代对光线追踪的研究,到2020年代

【作者简介】周通(1987—),男,中国甘肃酒泉人,本科,助理工程师,从事舞美工程与技术保障研究。

实时光线追踪的到来让画面更加逼真。目前，XR 实时渲染正受到硬件限制、渲染延迟等问题困扰，而利用云技术（比如 3DCAT 实时云渲染平台）把计算放到云端，配合 5G 低延迟能够实现轻量级终端和跨设备协作，可以低成本、高质量地为工业设计、医疗培训、文旅直播等行业用户提供 XR 服务，让 XR 走向产业化。

3 基于 XR 及实时渲染技术的总台演播室沉浸式舞美系统的搭建以及实现方式

3.1 XR 与实时渲染技术融合下的沉浸式舞美系统架构创新

在当下数字化时代背景下，舞台美术正在发生着一次由“物理搭建”到“数字构建”的巨大变化。而 XR 技术以及实时渲染技术的发展应用，让舞台美术不再受时间和空间限制，同时也重新定义了沉浸式舞美系统的基础架构，给电影电视、大型活动、虚拟演出等都带来了一场视觉上的革新。

传统的舞美系统一直受到实体置景的限制。巨大的空间需求、复杂场景的转换、高昂的成本以及高昂的存储费用经常是阻碍创意实现的因素。但是基于 XR 和实时渲染的新一代的沉浸式的舞美系统，它主要以超高分辨率、超高的刷新率的 LED 屏为媒介，在虚拟的空间中搭建了一个可以无限延展的 3D 显示的世界。这个革命性的变化首先就是把“后期”变成了“实时”。由多个服务器组成的多通道渲染集群以及高效率的视频拼接设备相互配合，可以将用户使用三维建模工具制作好的音视频、图片或者是复杂的 3D 模型，在极短的时间内完成渲染以及拼接，最终得到一个符合摄像机视角的画面，实现了“所见即所得”。

在硬件布置以及显示结构方面，新的体系放弃了传统平铺式背景的想法，而是使用 U 型、弧形甚至是穹顶式的屏幕来布置。这样做的好处就是可以大大的增加摄像机拍摄范围，避免了穿帮的问题，也给灯光师留下了很大的发挥空间，让虚拟灯光和实物人物的灯光可以很好的融合在一起。另外对于电影行业中常出现的摩尔纹的问题，新一代 LED 显示屏利用缩小像素之间距离及改进驱动电路的方法结合相机同步技术解决了这一难题，保证了画质清晰且有电影感。

系统的最重要之处就是它的虚拟植入以及三维渲染的能力。虚拟植入系统是一个重要的内容输出节点，可以实时地添加前景，比如飘动的文字图片，粒子效果，全息动画等等。而这些虚拟的东西并不是普通的背景贴图，它们是有实际的体积以及物理性质的三维物体，可以与其他真实的演员进行前后遮挡、光反射的效果，增加了整个画面的层次感以及真实感。同时，三维渲染系统加入了基于物理的渲染技术（PBR），配合高度准确的摄像机追踪信号，计算出光线对虚拟材质的反射以及折射过程，在虚拟场景中模拟出与演播室灯光一致的效果，做到真假难辨。

而且，虚实同步拍摄系统的使用，解决了动态拍摄时的稳定问题，在广播级虚实传感云台以及智能化虚实同步轨道的帮助下，可以准确记录下摄像机的推、拉、摇、移、俯、仰六个自由度的变化情况并将这些变化传达至渲染端，也就是说不管摄像机怎么动，其对应的虚拟背景的视角变化都会与实际镜头完全一致，杜绝了以往绿幕拍摄时经常出现的“漂浮感”和视角偏差等问题，给观众以身临其境的感受。

3.2 关键技术突破保障沉浸式舞美系统的高质量呈现

实时动作捕捉及空间定位是实现沉浸式舞美系统虚实交互重要前提条件。而在演播室内，演员身上或者某些重要道具上安放光学或惯性动作捕捉标记点，或者使用高性能的摄像机阵列对演员进行无标记点识别，都可以实时获取演员在舞台上准确的位置、姿态以及运动信息，然后把这些信息传给渲染引擎，引擎利用摄像机的角度和焦距等参数，推断出应该出现在这个角度下的虚拟场景画面，并且几乎实时地把它覆盖到摄像机拍到真实舞台画面上面。利用先进的摄像机反求技术以及强大的计算机图形学技术，使虚拟物体和真人演员、道具的位置关系、透视关系、光照关系等都做到非常精准，达到以假乱真的效果。

虚拟场景生成以及渲染引擎是实现这种逼真视觉体验的重要手段。高性能的工作站搭载专业的实时渲染引擎，在已有的数字场景模型以及客户需求的基础上，可以创造出逼真的虚拟世界，如古代诗词所描绘的山清水秀的楼宇亭台或者是具有极强科技感的赛博空间等，有多种不同的类型和主题。而渲染引擎也在不断提高自己的技术能力，使得渲染速度更快、画质更好，能够达到更高清晰度甚至是更为复杂的光照效果，比如可以模拟丁达尔效应、镜子般的反射、移动的阴影以及光线追踪等，让虚拟世界的画面更加的真实，给人们带来一种身临其境的感觉。

虚实画面的准确重叠以及同步是基于沉浸式舞美的关键技术问题，利用追踪系统得到演员的位置信息传送到渲染引擎里面，引擎利用摄像机的信息来渲染一个虚拟的场景画面，紧接着就要把这个虚拟场景的画面与摄像机拍摄下来的现实世界中的画面进行重叠及同步，在这个过程中就需要系统的计算速度非常快并且延迟很小，保证虚拟物体与现实世界中的一切都是一致的。另外，还需要用到一种先进的图像合成的方法，把虚拟的画面和现实的画面进行颜色上的调整以及融合，让它们的颜色一样并且平滑地结合，不能够有很明显的边界感，做到虚实的画面融为一体。

3.3 多领域协同助力沉浸式舞美系统的实践应用

在总台演播室打造沉浸式舞美工程里，技术先进性当然是基础，但是不同领域融合才是把这一体系变为强大艺术生产力。沉浸式舞美不再是简单的硬件堆积，而是包含艺术创作、技术实现、软硬件结合以及工作流程等方方面面内容综合体。只有消除各专业间障碍，进行全方位合作，才能让这个体系发挥其最大作用。

传统制作流程是技术落后创意或者创意受限于技术条件，在沉浸式舞美中，两者从一开始就紧密结合在一起。技术人员不是消极的执行者，而是一个积极的参与者。他们理解节目的主题思想以及情绪氛围，用XR技术和实现实时渲染把无形的想法变成有形的画面。比如用粒子效果表现一种古老的感觉，或者用动态灯光来营造一种未来的科技风。而另一方面，艺术家对于技术的应用也有着审美的把控，他们决定虚拟的东西的颜色、构图还有动作，保证技术为内容服务而不是为了炫技而忽视了艺术本身。这种紧密互动，实现了技术理性与艺术感性的高度统一^[2]。

硬件供应商与软件开发商的合作是整个系统的基石。沉浸式舞美对实时性有很高的要求，一旦出现延迟或者卡顿都会造成拍摄事故的发生。硬件供应商提供的高性能LED显示屏、低延时渲染服务器、高精度的动作捕捉设备给系统提供强大的计算能力和显示支持；而软件开发商负责优化渲染引擎、提高追踪算法精度、开发兼容不同合成软件的工具。双方紧密配合，在调试过程中不断磨合，根据总台演播厅的特点对接口进行量身定制，解决了摩尔纹消除、虚实光影结合问题。而这种全方位的合作，也为项目的顺利进行并最终上线打下良好的基础，并为之后的进一步优化以及新功能的增加提供了有利条件^[3]。

总台内部各部门紧密配合，形成一个整体，演播室管理部门是“守护者”，负责日常维护以及环境监控，保证物理空间和数字空间相统一；节目制作部门是“使用者”，在编导、导演和摄像师之间及时沟通，根据现场情况变动机位、调度等事宜，充分利用沉浸式空间带来的便利；后期制作部门是“升华者”，对已经拍好的虚实结合画面进行剪辑、调色等工作，进一步统一视觉效果。各个部门之间相互协作、环环相扣，避免了以往生产环节中出现的断层，大大提高工作效率^[4]。

3.4 持续创新与优化推动沉浸式舞美系统的发展升级

随着科技的进步，XR以及实时渲染也在不断发展和完善。为了使沉浸式舞美系统具有领先性和竞争力，就需要不断融入新技术新思想对其进行改善。首先，要了解硬件发展趋势并及时更新设备，如随着显示技术的进步而采用更高分辨率和更高刷新率的LED屏，提高画质和流畅度；使用更

加先进的动作捕捉装置以提高动作捕捉准确性和实时性；使用更强大的渲染计算机来增强系统处理能力以及渲染速度等。其次，要重视软件开发尤其是软件研发。不断的改进渲染引擎算法，提高渲染质量与速度，可以支持更多复杂光线和物理；制作更加强化的追踪系统以及合成软件，能够使虚实画面自动对齐并结合，方便使用并且节省费用；加入AI技术，可以让虚拟场景自动产生并且优化，随着节目的发展以及演员的动作变化及时改变虚拟的部分以达到更好的沉浸感和智能化^[5]。

同时积极参加行业内交流、学习、借鉴国内外先进经验、技术等；参与行业标准编写工作，促进沉浸式舞美技术标准、规范化；加强与高校、科研院所合作，进行产学研用相结合的研发，培养专业人才，为沉浸式舞美系统创新发展奠定坚实基础。不断改进和完善，提高沉浸式舞美系统质量和水平，给总台演播室观众带来更多、更优秀视觉感受，促进我国广播影视事业蓬勃发展。

4 结语

基于XR与实时渲染技术的总台演播室沉浸式舞美系统建设及应用，是技术与艺术完美结合过程。经过设计构思、技术创新、跨界融合、不断迭代优化，最终落地实施。这对总台节目的创作注入新鲜血液，提升节目品质和用户体验，对整个行业起到示范作用。以后随着技术不断发展进步，这个系统也会不断完善，给总台演播室带来无限可能性，促进行业进入新时代。

参考文献

- [1] 郑博. XR虚拟技术扩展舞美设计“新视界”[J]. 艺术教育, 2025, (17): 42-45.
- [2] 杨佳颖,李东娜. 从舞美设计、多维叙事及文旅融合新路径看沉浸式戏剧《戏韵关东》[J]. 戏剧文学, 2025, (08): 26-30.
- [3] 马渊清. 沉浸式视频技术在广播电视领域的应用研究[J]. 电视技术, 2025, 49 (07): 219-221.
- [4] 左宏达. 2025年中央广播电视总台春节联欢晚会沉浸式舞美包装视觉呈现解构[J]. 现代电视技术, 2025, (05): 41-44.
- [5] 刘俊杰,张啸. 民族服饰与沉浸式舞蹈剧场创意展演的互融机制探究[J]. 喜剧世界(下半月), 2025, (04): 136-138.

Research on Maintenance Cycle Optimization and Cost Control of Freight Vehicles Based on the Whole Life Cycle

Weiguang Zuo

Guoneng Railway Equipment Co., Ltd., Cangzhou Locomotive and Rolling Stock Maintenance Branch, Cangzhou, Hebei, 061113, China

Abstract

In railway transportation systems, the maintenance system for freight vehicles is critical to transport safety, operational efficiency, and equipment longevity. With the modernization of railways and the growing fleet of freight vehicles, the traditional periodic maintenance model—primarily based on time or mileage—has limitations in both cost-effectiveness and reliability. This study focuses on the C80 freight vehicle, applying the full life cycle theory to analyze three key aspects: operational condition monitoring, maintenance cycle optimization, and cost control. By establishing a life cycle cost model and a risk-based maintenance decision-making model, the study quantitatively evaluates the failure mechanisms of different components and their associated maintenance costs. The results demonstrate that adopting a cycle optimization strategy combining condition monitoring and predictive maintenance can reduce the vehicle's total life cycle cost by approximately 15% and decrease average downtime by 20%. This approach holds practical significance for operational guidance.

Keywords

C80 truck; Full life cycle; Maintenance cycle; Cost control; Condition monitoring

基于全生命周期的货运车辆检修周期优化与成本控制研究

左伟光

国能铁路装备有限责任公司沧州机车车辆维修分公司, 中国·河北·沧州 061113

摘要

在铁路运输体系里, 货运车辆检修制度关乎运输安全、效益与设备寿命。如今铁路现代化发展、货运车辆保有量增加, 传统以时间或里程为主的定期检修模式, 在经济性与可靠性上存在局限。本文以C80型货运车辆为对象, 基于全生命周期理论, 从运行状态监测、检修周期优化、成本控制三方面展开分析。通过建立生命周期成本模型与风险分级检修决策模型, 量化评估其不同部件失效机理与维护成本。结果表明, 采用状态监测与预测性检修结合的周期优化策略, 车辆全寿命周期成本降约15%, 平均停时减20%, 该方案有现实指导意义。

关键词

C80货车; 全生命周期; 检修周期; 成本控制; 状态监测

1 引言

随着我国铁路货运规模持续扩大, 重载运输车辆的检修模式正由经验型向数据驱动型转变。C80型货车作为重载煤炭运输的主力车型, 其维护策略直接关系到运输效率与经济效益。传统以固定周期为主的检修模式忽视车辆个体差异与运行环境复杂性, 易造成过度或滞后维护, 增加全寿命成本并降低可用率。引入全生命周期管理理念, 可在设计、制造、使用与报废全过程实现成本与性能的系统优化。本文以C80型货车为对象, 基于运行与故障数据构建生命周期成本

与状态检修模型, 在安全与可靠性约束下研究检修周期的动态优化, 为铁路货运装备的精益化运维提供科学依据。

2 C80 货运车辆的运行特性与检修现状

2.1 C80 型货车的结构与性能特点

C80型货车是我国自主研发的重载煤炭运输主力车型, 彰显国内铁路货车设计的高水准。它采用整体焊接铝合金车体与高强度钢构件结合的结构, 在保证承载力的同时减轻自重。该车设计轴重 27 吨, 最大载重 80 吨, 车体容积大、强度高, 适合长距离、高频次重载运输。其转向架用成熟三系悬挂结构, 缓冲抗冲击性能佳; 制动系统有自动间隙调节与冗余制动控制装置, 制动稳定性强。长期运行显示, 它在复杂线路和高负荷工况下平稳性好、能耗经济。不过, 高强度运载使关键部件疲劳寿命影响检修周期, 沿用传统周期制

【作者简介】左伟光(1983—), 男, 中国河北保定人, 本科, 人力资源管理师、助理工程师, 从事铁路机车车辆检修研究。

度,部分部件寿命利用率低,会造成资源浪费。

2.2 传统检修周期的设置逻辑与局限性

传统货车检修制度秉持“定期修、计划修”原则,以时间与里程为参数制定计划。C80型货车多采用8年厂修、4年段修的固定模式,搭配年度及月度检查。此模式在设备标准化初期有其科学性,但如今运行环境多样、车辆结构复杂,局限性渐显。它无法实时反映车辆状态差异,忽视运行线路、载重频次、气候条件等对设备疲劳寿命的影响,致使部分车辆提前检修、部分部件延迟维护,成本增加。统计分析表明,固定周期制度下,C80货车平均可用率约92%,比采用状态检修的国际先进水平低约5个百分点,维护费用还普遍高出约8%,亟待优化。

2.3 现行检修体系的运行问题分析

C80货车现行检修体系问题突出,以人工经验与制度约束为主,有标准滞后和结构性低效的弊端。其一,检修标准多参照早期车型经验,未针对重载运行特性做参数化修正,难以适应不同线路的疲劳分布规律;其二,成本核算仅关注单次维修投入,缺乏全生命周期经济性综合评估,维修投入与收益难量化平衡。此外,维修资源分配不均、流程衔接差,部分环节重复作业、浪费材料和工时,整体效率低下。部分车辆段数据未共享、调度不动态,检修任务与设备状态脱节,出现“轻故障过修、重故障漏检”。因此,建立基于全生命周期与状态监测的检修体系是C80货车运维优化的必然。

3 基于全生命周期的检修周期优化理论框架

3.1 全生命周期成本分析方法

全生命周期成本(Life Cycle Cost, LCC)分析是衡量装备经济性的重要工具,能够全面反映C80货车从制造、运行到退役各阶段的资金投入与资源消耗。针对C80型车辆的重载运行特点,其维护与检修环节在LCC中占比约45%,是影响经济性的关键环节。通过建立LCC数学模型,可对不同检修方案进行量化比较,从而确定最优周期与策略。模型通式为:

$$LCC=C_{\text{制造}}+C_{\text{运行}}+C_{\text{维护}}+C_{\text{报废}}-R_{\text{残值}}$$

其中维护成本 $C_{\text{维护}}$ 的最小化是核心目标。通过引入故障率与维护间隔的非线性函数关系,建立“成本-可靠性”平衡方程,可实现系统在经济性与安全性之间的最优折中。研究表明,在可靠度阈值设定为0.95条件下,采用LCC优化模型可使单位车辆维护成本降低12%,全寿命周期费用下降8%,具有显著的经济效益。

3.2 状态监测与预测性维护理念

状态监测(Condition Monitoring, CM)与预测性维护(Predictive Maintenance, PdM)是实现C80货车生命周期管理精细化与智能化的关键。通过对关键部件如轮对、轴承、制动片的温度、振动与磨耗参数进行实时采集,可动态

评估设备健康状态。基于大数据分析 with 机器学习的预测模型能够识别潜在故障趋势,判断部件失效概率,实现“从计划性维护向预测性维护”的转变。以轴箱为例,通过温升与振动信号融合分析,系统可提前识别出微裂纹或润滑失效等隐患。实践结果显示,采用状态监测技术后,C80轴箱平均寿命延长约20%,计划外停运率下降30%,综合维修成本减少15%,显著提升了运行可靠性与经济效益。

3.3 可靠性与经济性约束下的优化模型

检修周期优化必须在可靠性与经济性双重约束下进行,以确保既不产生安全隐患,又能降低维护费用。通过引入可靠性函数 $R(t)=e^{-\lambda t}$,可描述车辆关键部件随时间的失效规律。建立以总生命周期成本最小化为目标、以可靠度阈值 $R(T) \geq R_{\text{min}}$ 为约束条件的多目标优化模型:

$$\min LCC=f(C_{\text{维护}}, T), \text{ s.t. } R(T) \geq R_{\text{min}}$$

模型求解采用遗传算法与多目标线性规划方法,通过对维护间隔、故障率和经济损失等参数进行迭代优化,得出不同部件的最优检修周期。结果表明,当C80货车轮对检修周期调整为22~24个月、制动系统为5.5~6年时,可在保持安全裕度的同时,实现成本最小化与可靠度最优匹配,为铁路装备的动态运维提供了科学决策依据。

4 C80 货车典型部件的失效机理与维护优化

4.1 轮对系统的疲劳与磨耗规律

轮对系统是C80货车运行安全与动力传递的关键部件,其工作环境复杂,承受交变载荷与周期性冲击,应力集中明显。长期重载运行条件下,轮对的金属疲劳和轮缘磨耗是主要失效模式。通过对近五年运用数据的统计分析可知,轮缘磨耗速率呈非线性增长趋势,运行前期磨耗较缓,后期因表面硬化层破坏而磨耗加剧,平均每10万公里磨耗量约为1.2毫米。基于状态监测的轮缘磨耗预测模型,结合振动频谱与温升信号分析,可在早期识别异常磨耗。实践表明,采用该预测模型可提前0.5至1个检修周期发现潜在故障,减少突发脱轨风险。优化检修周期后,轮对更换率降低约12%,综合维护成本下降18%,设备可用性提升4%,有效延长了轮对的疲劳寿命并提高运行经济性。

4.2 制动系统的可靠性分析与检修间隔调整

C80货车制动系统在长期高负荷运行下,其可靠性变化直接关系到运输安全与车辆操控性能。通过对制动缸、制动梁、制动杆及闸瓦磨耗的长期监测,建立了基于Weibull分布的可靠性衰退模型。数据分析表明,当累计运行时间达到5.5年时,系统可靠度开始显著下降,磨耗速率加快,制动力波动幅度增大,若仍维持8年段修周期,将存在明显安全隐患。结合可靠性分析结果,将检修间隔优化至5.5~6年可在保证安全的同时减少过度维修,提升经济性。并通过在线检测与智能诊断系统对制动行程、气压变化及摩擦温度进行实时监控,实现动态修程管理。实测结果显示,优化后制

动系统故障率下降 32%，维修成本节约 30%，同时保障了列车在重载及长坡道运行条件下的制动稳定性。

4.3 车体结构与焊缝疲劳寿命预测

C80 货车采用高强度钢全焊接结构设计，轻量化与承载能力并重，但焊缝疲劳问题对寿命影响显著。焊缝处材料在交变应力与环境腐蚀的共同作用下易产生微裂纹，特别是在转向架支撑与横梁交汇部位应力集中最明显。利用有限元分析对车体结构进行建模，仿真结果显示，该部位峰值应力较均值高出 2.6 倍，是主要疲劳源区。结合金属疲劳理论与 Miner 累积损伤模型计算，车体焊缝的安全寿命约为 16 年。为延长使用周期，提出“半寿命检测 + 延寿修复”策略，即在第 8 年周期实施超声探伤与局部补焊修复，对焊缝损伤区实施残余应力消减处理。试验表明，该策略可使结构寿命延长约 25%，全车体寿命可达 20 年，生命周期总成本降低约 9%，同时确保焊缝疲劳裂纹不扩展至临界尺寸，进一步提升了 C80 货车在长期重载条件下的结构可靠性与安全储备。

5 基于数据驱动的成本控制与决策体系

5.1 全生命周期成本数据库的构建

构建 C80 货车全生命周期成本数据库，是实现设备管理科学化与决策精准化的核心环节。该数据库应覆盖车辆从设计、制造、运营到退役的完整阶段，全面记录包括设计参数、运用环境、检修工艺、部件更换与故障诊断等信息。通过多维数据的关联与融合，可实现对单车运行状态与成本变化的纵向追踪。为保证数据的可靠性，应建立标准化的数据采集与清洗流程，利用物联网传感技术实现实时监测，确保关键部件如轮对、轴承、制动系统等状态信息的及时更新。基于数据库的结构化与模块化设计，可为生命周期成本分析、故障模式识别与检修计划优化提供支撑。多源数据融合模型能动态反映成本构成的变化规律，使管理者能够在宏观层面掌握资源配置趋势，在微观层面制定最优检修与资金分配方案，从而提升全系统的经济性与可控性。

5.2 检修决策的智能化与动态化

智能化与动态化是 C80 货车检修管理的未来发展方向。基于机器学习和深度神经网络的预测算法，系统可对历史运行数据进行模式识别与趋势分析，预测关键部件的寿命衰退曲线，实现检修决策由“经验判断”向“数据驱动”的转变。通过建立健康状态评估模型，系统能够对车辆进行实时分级管理，自动识别潜在故障并生成检修建议，避免因过早或过迟维护带来的经济损失。在动态决策层面，算法会结合环境温度、载荷强度、运行速度等参数，对不同运行工况下的风险等级进行自动调整，实现真正意义上的“按需检修”。此外，

系统还能与调度与物流系统联动，优化车辆停时与检修计划，减少检修对运输效率的影响。实践表明，应用智能预测模型后，C80 货车检修间隔延长 10%~15%，平均维护成本显著下降。

5.3 成本控制与绩效评价机制

为实现全生命周期的成本最优化，必须将检修活动纳入绩效评价体系，实现“以效益论优、以成本定责”的动态管理。绩效考核应涵盖检修成本、车辆可用率、计划执行率、故障复发率等关键指标，并采用加权综合评价模型进行量化分析。通过建立成本—效益对照矩阵，可直观反映不同维修单位的经济绩效差异，为后续资源配置与激励政策提供依据。应构建以数据反馈为核心的闭环机制，将检修效果、成本控制与设备运行状态进行周期性评估，形成“评价—调整—优化”的持续改进路径。信息化管理系统应与财务、调度和安全监管系统互联，实现成本透明化与责任可追溯。研究表明，应用全生命周期绩效管理后，C80 货车的单位运维成本降低 13%，车辆利用率提升 17%，维修人均产出增加 12%，充分验证了智能化成本控制体系的经济与管理双重价值。

6 结语

C80 货运车辆作为我国铁路重载运输的核心装备，其检修周期与成本控制直接影响运输体系的安全性与经济性。本文基于全生命周期理论，构建了覆盖成本建模、可靠性分析与状态监测的综合优化体系。研究表明，实施状态驱动的预测性检修策略，能有效平衡安全与经济性，降低生命周期总成本，提升设备利用率。未来，应加快大数据与人工智能技术在车辆运维中的应用，完善铁路装备全生命周期管理平台，实现检修计划的数字化决策与动态优化。C80 货车的生命周期管理模式将为我国货运车辆检修体系转型升级提供重要借鉴，推动铁路装备维护从经验依赖走向智能化、科学化与可持续化。

参考文献

- [1] 陈琛,桑兴华.铁路货车项目全生命周期管理研究[J].企业改革与管理,2024,(13):21-22.
- [2] 王震尧.全生命周期燃料电池货车总成本计算与分析[J].商用车,2023,(06):76-81.
- [3] 柴瑞松,刘翀,吕一凝.新能源货车全生命周期总成本的优势分析[J].中国储运,2022,(12):112-113.
- [4] 刘焕然,张妍,孙铎,等.中国重型货车全生命周期碳排放及减排潜力研究[J].中国汽车,2022,(07):47-52.
- [5] 汤捷,谢航,吕强,等.基于生命周期的轻型商用货车轻量化碳排放研究[J].汽车工程学报,2024,14(03):502-510.

Research on Logistics Equipment Management Based on Artificial Intelligence

Hui Jing Dan Lu* Jingqiu Ye

Suzhou Company of Jiangsu Provincial Tobacco Corporation, Suzhou, Jiangsu, 215000, China

Abstract

Taking tobacco logistics equipment management as the research object, this paper systematically analyzes the practical pain points and common problems in current tobacco logistics equipment management. Combined with the critical window period of industry digital transformation and equipment renewal, it expounds the theoretical basis, practical foundation and opportunity of applying artificial intelligence (AI) technology. Focusing on the three core directions of preventive maintenance, accurate diagnosis and precise management, this paper deeply discusses the value and functions of AI in fault early warning, intelligent analysis, spare parts optimization, safety control and other scenarios. It also expands the application prospect of the integration of AI with intelligent logistics equipment, digital twin, AR/VR, digital human and other technologies. The purpose is to build a modern equipment management system driven by data, intelligently coordinated and covering the whole life cycle, so as to comprehensively improve equipment operation efficiency, reliability and comprehensive benefits, and provide technical approaches and practical references for the high-quality development, cost reduction and efficiency improvement, as well as green and low-carbon transformation of tobacco logistics.

Keywords

Artificial intelligence (AI); Tobacco logistics; Equipment management; Predictive maintenance; Intelligent operation and maintenance

基于人工智能技术的物流设备管理探索与研究

荆辉 陆丹* 叶竞秋

江苏省烟草公司苏州市公司, 中国·江苏 苏州 215000

摘要

本文以烟草物流设备管理为研究对象, 系统剖析当前烟草物流设备管理的现实痛点与共性问题, 结合行业数字化转型与设备更新换代的关键窗口期, 阐述人工智能(AI)技术应用的理论依据、实践基础与时代契机。文章围绕预防性维护、精确诊断、精准管理三大核心方向, 深入探讨AI在故障预警、智能分析、备件优化、安全管控等场景的价值功能, 并拓展研究AI与智能物流装备、数字孪生、AR/VR、数字人等技术融合的应用前景, 旨在构建数据驱动、智能协同、全生命周期覆盖的现代化设备管理体系, 全面提升设备运行效率、可靠性与综合效益, 为烟草物流高质量发展、降本增效与绿色低碳转型提供技术路径与实践参考。

关键词

人工智能(AI); 烟草物流; 设备管理; 预测性维护; 智慧运维

1 引言

人工智能作为新一代信息技术核心, 是推动产业升级、构建新质生产力的关键引擎。AI正推动管理模式从经验驱动转向数据驱动、从被动响应转向主动预判。烟草现代物流已成为贯通产业链、保障市场供应、支撑高质量发展的重要支撑。随着智能装备广泛应用, 物流设备日趋大型化、复杂

化, 传统人工巡检、事后维修已难以满足高效稳定运行要求。

国家烟草专卖局提出加快信息技术与烟草物流深度融合, 推进数字化、智能化、绿色化转型。将人工智能融入设备全生命周期管理, 是破解管理瓶颈、实现降本增效与可持续发展的必由之路。本文立足烟草商业物流实际, 研究AI在设备管理中的应用, 为智慧物流建设提供参考。

2 烟草物流设备管理现状与问题分析

2.1 设备管理的理论与政策基础

我国设备管理以设备综合管理为核心, 行业“一二三四五”框架中的“三个基本方针”强调依靠技术进步, 为人工智能、物联网、大数据等技术改造提升传统设备管理提供了理论支撑。

政策与实践层面, 烟草行业智慧物流建设要求推动新一代信息技术与物流业务深度融合, 为AI在设备状态监测、

【作者简介】荆辉(1978—), 男, 中国江苏镇江人, 本科, 经济师, 从事物流技术创新方面的研究。

【通讯作者】陆丹(1987—), 女, 中国江苏常熟人, 硕士, 江苏省烟草公司苏州市公司, 从事物流技术创新方面的研究。

故障诊断、智能运维、优化调度等场景应用指明了方向。

当前烟草商业物流正处于关键转型期：早期自动化设备进入老化与更新阶段，区域物流中心、柔性分拣、智慧园区等建设稳步推进，为系统性部署 AI 设备管理系统、实现技术与管理同步升级创造了有利条件。^[1]

2.2 当前烟草物流设备管理存在的突出问题

尽管行业物流自动化水平持续提升，但“汗水物流”向“智慧物流”转型过程中，设备智能化管理仍存在明显短板，集中表现为“三多三少”：事后维修多、事前预防少；经验判断多、数据支撑少；粗放管理多、精准管控少。具体问题如下：

2.2.1 运维模式滞后，预防性管理落地不足

多数物流中心仍以事后维修为主，设备故障停机后再组织抢修，导致生产中断、效率下降、应急成本升高。部分单位虽推行定期维保，但依赖固定周期与人工经验，易出现“过维修”与“欠维修”并存：维保不足引发故障，过度维保增加成本与停机时间。同时，设备前期管理重视不够，选型、安装、调试数据未有效沉淀，导致后期运维缺少基线参考，隐性故障长期积累，最终演变为重大停机事故。

2.2.2 故障诊断复杂，技术人员负担过重

现代烟草物流设备集机械、电气、液压、气动、传感与控制于一体，结构精密、联动性强、信号交互复杂。一旦出现异常，故障传导路径复杂、表象与根源错位，维修人员需逐点排查、反复验证，耗时费力。复杂故障往往依赖资深专家，新手成长周期长、技能断层风险突出。传统故障记录以纸质或简易台账为主，经验难以复用、知识难以传承，形成“隐性知识壁垒”。

2.2.3 备件耗材管理粗放，经济性与精准度偏低

备件与耗材是设备稳定运行的基础保障，但其管理普遍存在库存不合理、需求不精准、周转效率低等问题。依赖主观经验制定采购计划，易导致常用件缺货、关键件断供影响生产，或冷门件长期积压造成资金占用与浪费。缺少全生命周期数据与故障规律支撑，无法实现按需供应、动态补库，管理成本高、保障能力弱。

2.2.4 数据孤岛突出，智能决策缺少底座

各设备品牌、控制系统、业务系统相互独立，数据不互通、标准不统一，形成“数据烟囱”。设备运行参数、维保记录、故障历史、能耗数据分散存储，难以开展多维度关联分析，无法挖掘故障规律、优化运行策略、评估设备健康度，智能管控与科学决策缺少数据底座。

综上，物流设备管理已成为制约现代烟草物流提质增效的关键环节。人工智能技术以数据感知、深度学习、智能分析、自主决策为核心优势，能够系统性解决上述痛点，推动设备管理向预知、精准、高效、绿色转型，为延长设备寿命、提升综合效能、降低全生命周期成本释放巨大红利。

3 人工智能（AI）在烟草物流设备管理中的核心作用

人工智能是计算机科学与工程技术的交叉分支，通过机器学习、深度学习、知识图谱、计算机视觉、自然语言处

理等技术，使机器具备感知、理解、推理、决策与执行能力。在烟草物流设备管理中，AI 以物联网感知为基础、大数据分析为核心、智能算法为引擎，实现状态可测、故障可预、诊断精准、管理精益，核心作用集中体现在预防性维护、精确诊断、精准管理三大维度。

3.1 AI 驱动预防性维护，实现从“抢修”到“预修”

传统维护以时间或事件驱动，AI 维护以设备健康状态驱动，通过多源数据融合与智能算法模型，实现故障早发现、早预警、早处置。

3.1.1 多维度状态感知

通过在电机、轴承、输送带、堆垛机、分拣机等关键部位部署振动、温度、电流、电压、转速、噪声、位移等传感器，结合摄像头、热成像仪，实时采集设备运行数据，构建全域感知网络。

3.1.2 智能预测与预警

利用 LSTM、随机森林、CNN 等算法对时间序列数据建模，学习设备正常与异常特征，提前数小时至数天预测潜在故障，对温度漂移、振动超标、电流异常、异响等隐性问题实时告警，实现“治未病”。

3.1.3 主动维护与安全提升

系统根据预警等级自动生成维护工单，推荐维护内容、备件清单与作业步骤，推动从“定期维保”到“预测维保”。同时，AI 视觉实时识别人员违规操作、区域侵入、设备异常姿态等风险，联动声光告警与紧急停机，全面提升本质安全水平。

3.2 AI 支撑精确诊断，实现从“排查”到“秒判”

人工智能通过故障知识图谱与多模态数据分析，大幅提升故障定位速度与修复效率，降低对资深专家的依赖。

3.2.1 故障快速定位

设备异常时，AI 自动调取实时数据、历史记录、维保档案、图纸手册，进行关联比对与根因推理，快速锁定故障点，给出处置方案，将传统数小时排查缩短至分钟级。

3.2.2 辅助技能提升与知识传承

系统内置标准化作业流程与专家案例库，维修人员可通过语音、文字、图像查询故障解决方案，实现“新手变熟手、熟手变专家”。知识图谱将零散经验结构化，打破“人走技失”的瓶颈，实现设备管理知识可沉淀、可复用、可推广。

3.2.3 远程协同与专家指导

结合 AR/VR 技术，现场人员佩戴智能眼镜，第一视角实时回传画面，远端专家远程标注、语音指导，高效处理跨区域、高难度故障，提升应急处置能力。

3.3 AI 赋能精准管理，实现从“粗放”到“精益”

AI 通过对海量运行、维保、消耗数据的深度挖掘，优化备件、耗材、能耗与资源配置，实现降本、增效、绿色三重目标。

3.3.1 备件耗材智能管控

基于故障频率、使用寿命、消耗规律、采购周期、生产计划等数据，AI 构建需求预测模型，动态计算安全库存、最优采购量与补货时点，解决缺货与积压矛盾，提高资金周

转率,降低仓储与管理成本。

3.3.2 全生命周期成本优化

AI 综合评估设备采购、运维、能耗、残值等数据,给出最佳更新改造时机与技术方

3.3.3 绿色低碳与能耗优化

AI 分析设备负载、运行时序、环境温湿度与能耗关系,智能调节电机转速、照明、空调、通风等系统,在保障生产前提下降低能耗,减少碳排放,助力绿色物流建设。

4 人工智能 (AI) 在烟草物流设备管理中的应用前景

随着技术成熟与场景深化, AI 正从单一运维功能向全流程、全要素、全场景智慧管控延伸,与智能装备、数字孪生、数字人深度融合,打开更广阔的应用空间。

4.1 AI+ 智能物流装备: 全流程作业无人化、柔性化

人工智能与自动化装备深度融合, 重构入库、仓储、分拣、码垛、配送等环节作业模式, 提升效率、降低人力、保障质量。

4.1.1 智能入库与拆码垛

自动卸货机器人、拆码垛机器人搭载 AI 视觉与力控系统, 自适应车厢环境、烟箱姿态, 精准抓取、平稳搬运, 自动识别件烟信息并同步上传监管系统, 减少人工强度与差错。

4.1.2 智能仓储与盘点

堆垛机、四向穿梭车、无人叉车在 AI 调度下协同作业, 实现路径最优、冲突最少、效率最高。结合视觉与 RFID, 自动完成实时盘点、货位优化、库存监控, 做到账实相符、动态可视。

4.1.3 智能分拣与码垛

AI 视觉识别条烟品规、数量、包装状态, 自动纠错防错, 保障分拣精准度。机械臂按最优策略码垛, 提升稳定性与空间利用率, 降低人工成本与劳动强度。

4.1.4 智慧调度与园区管理

AI 中枢统一调度设备、人员、车辆、月台资源, 智能分配任务、优化排队序列、提升设备利用率与吞吐能力, 实现“一屏观全域、一网管全场”。^[2]

4.2 AI+ 数字孪生: 设备全生命周期可视化、可预演

数字孪生以三维建模实时映射物理设备, 结合 AI 实现可视、可测、可控、可预。

虚拟空间实时展示设备位置、状态、健康度、维保任务; 模拟故障演进与维保效果, 验证方案可行性;

对新设备安装、老设备改造进行仿真验证, 降低实施风险。

数字孪生让设备管理从“看不见、摸不清”变为“全景可视、精准操控、提前布局”。

4.3 AI+ 数字人 /AR-VR: 知识服务人性化、场景化

数字人以拟人化交互打通人与设备、系统、知识的连接,

重构培训、运维、服务模式。

4.3.1 沉浸式虚拟培训

AR/VR 结合 3D 建模, 开展虚拟拆装、故障排查、安全演练, 降低实操风险, 提升培训效率与覆盖面, 解决现场培训难、风险高、成本大的问题。

4.3.2 数字人“老师傅”智能助手

基于大模型与设备知识库, 数字人可语音交互、问答咨询、流程指导、案例推送, 实现自然交互、即问即答、全程陪伴, 把专家经验装进口袋、送到手边, 大幅降低学习与操作门槛。

4.3.3 智慧运维新体验

从“人找信息”变为“信息找人”, 故障告警、维护提醒、操作指引主动推送, 以友好、直观、生动的方式提供“看得见、管得住、可预知”的智慧解决方案, 推动管理模式革新。^[3]

5 实施保障与发展建议

为推动 AI 技术在烟草物流设备管理中落地见效, 需从四方面强化保障:

完善数据底座: 统一设备数据标准, 打通系统壁垒, 构建高质量数据集, 为 AI 模型提供可信支撑。

步有序落地: 先试点预警、诊断、备件优化等成熟场景, 再扩展数字孪生、数字人等创新应用, 以点带面、稳步推进。

强化人才支撑: 开展 AI、物联网、大数据技能培训, 培育既懂物流业务又懂数字技术的复合型人才。

健全管理机制: 建立智能运维制度、安全规范、考核体系, 保障系统稳定运行与数据安全。

6 结语

人工智能技术为烟草物流设备管理带来理念革新、模式重构、效能跃升, 从被动维修到主动预测、从经验判断到数据决策、从分散管控到协同智能, 全面提升设备可靠性、运行效率与经济效益, 同时助力绿色低碳与安全发展。面向未来, 随着大模型、数字孪生、物联网等技术持续突破, AI 将更深层次融入设备全生命周期管理, 推动烟草物流向数字化、智能化、精益化、绿色化迈进。

新时代新征程, 烟草物流从业者应把握新质生产力发展机遇, 以技术创新驱动管理升级, 以智慧赋能保障供应链稳定, 为行业高质量发展注入更强劲动力, 让人工智能真正成为现代烟草物流设备管理的核心引擎。

参考文献

- [1] 罗磊,赵宁. 人工智能在物流行业的应用综述与发展趋势[J]. 物流技术与应用,2025,30(04):156-158.
- [2] 李刚. 卷烟物流配送中心智能化设备管理体系构建[J]. 物流技术与应用,2025,30(10):145-147.
- [3] 王健. 烟草工业企业智能物流建设实践与展望[J]. 中国物流与采购,2025(18):68-69.

A Memory-Guided Ant Colony Algorithm for TSP Problem

Hong Gao Yingchun Li*

School of Computer Science and Technology, Liaoning University of Science and Technology, Anshan, Liaoning, 114051, China

Abstract

To address the problem of ant colony optimization (ACO) easily falling into local optima, this paper proposes a memory-guided adaptive restart ant colony algorithm to solve the traveling salesman problem (TSP). The algorithm stores excellent solutions and employs an intelligent restart strategy to escape local optima. Experimental results show that the proposed algorithm significantly improves solution quality and the hit rate of optimal solutions, accelerates the early convergence speed of the ACO algorithm, and has broad application potential.

Keywords

Memory-Guided Adaptive Restart; Ant Colony Optimization; Traveling Salesman Problem

基于记忆引导重启的蚁群算法求解 TSP 问题

高宏 李迎春*

辽宁科技大学计算机科学与技术学院, 中国·辽宁 鞍山 114051

摘要

针对蚁群算法 (ACO) 容易陷入局部最优的问题, 本文提出一种记忆引导的自适应重启蚁群算法求解旅行商问题 (TSP)。该算法通过存储优秀解并采用智能重启策略来跳出局部最优。实验结果表明, 所提算法显著提高了求解质量和最优解命中率, 加快了ACO算法的前期收敛速度, 具有广阔的应用潜力。

关键词

记忆引导自适应重启; 蚁群算法; 旅行商问题

1 引言

作为组合优化领域最经典的 NP-hard 问题之一, 旅行商问题 (TSP) 在印刷电路板布线设计和 DNA 测序等领域具有广泛的应用价值^[1]。随着现代工业体系规模的快速扩张和智能化管理需求的日益增长, 高效求解 TSP 已成为提升行业效率、降低运营成本的关键技术挑战。

蚁群算法 (ACO) 是一种模拟蚁群觅食行为的元启发式算法, 是求解 TSP 的常用方法^[2,3]。然而, 传统蚁群算法存在前期收敛速度慢、容易陷入局部最优等缺陷, 难以高效找到最优或接近最优的解^[4]。究其根源, 在于信息素分布与解的多样性之间的动态失衡: 算法初期信息素在各路径上初

始分布均匀, 蚂蚁的路径构建具有较强的随机性, 导致有效启发式信息积累缓慢, 这是造成前期收敛速度滞后的根本原因; 而随着迭代进行, 优质路径上的信息素浓度呈指数级增长, 正反馈机制虽能加速收敛, 却也极易导致种群迅速丧失多样性, 使算法陷入局部最优解无法自拔——这一现象在复杂对称 TSP 实例及大规模非对称 TSP 问题中尤为突出。尽管研究者提出了最大最小蚁群系统 (MMAS) 等多种策略来缓解早熟收敛问题^[5], 通过限定信息素轨迹范围和初始化全局最优解的信息素来试图延缓早熟, 但这些方法本质上仍属于被动防御机制, 无法在搜索彻底停滞时主动引导种群跳出局部陷阱, 因此在复杂搜索空间中的停滞问题仍然存在。

记忆引导的自适应重启算法是一种融合历史信息利用和动态重启机制的启发式优化方法。通过维护精英解的记忆库, 并根据搜索停滞指标智能触发重启, 旨在跳出局部最优, 引导搜索向更有前景的区域进行^[6]。与传统的随机重启或简单的变异操作不同, “记忆引导”强调对搜索历史的尊重与利用。具体而言, 记忆库不仅保存当前迭代中的最优解, 还系统性地记录历史迭代中出现的具有代表性或结构多样性的高质量解, 这一记忆库构成了算法对解空间认知的“集体

【基金项目】 2025年辽宁科技大学校级大学生创新创业训练计划项目。

【作者简介】 高宏 (2004—), 男, 中国四川人, 在读本科, 从事聚焦于启发式智能算法的改进与混合优化策略研究。

【通讯作者】 李迎春 (1973—), 女, 中国辽宁喀左人, 副教授, 从事自然语言处理研究。

记忆”。当检测到连续多代最优解无改进等搜索停滞指标时，自适应重启机制不再盲目地重置所有参数，而是依据记忆库中的精英解结构进行有导向的重启。这种重启可以表现为两种形式：其一，利用记忆库中解的共同边特征对信息素矩阵进行重新初始化，强化有前景的路径组合；其二，在种群重置时，部分蚂蚁直接继承记忆库中的优秀解片段作为模板进行局部扰动，从而在保留历史成果的基础上开辟新的搜索方向。这一概念与其他元启发式算法中用于平衡探索与开发的自适应机制有相似之处^[7]。

鉴于此，本文将记忆引导的自适应重启机制引入 ACO 框架，提出名为记忆引导自适应重启蚁群算法 (MGA-ACO) 的新算法。这种“记忆-检测-重启”的闭环设计，本质上是对算法探索与开发能力的一种动态调谐。在搜索前期，算法倾向于开发记忆库中的优质结构以加速收敛，有效提升前期搜索效率；在检测到停滞时，则利用记忆引导的多样性注入强制转移搜索重心，规避无效的随机徘徊，从而在保留历史成果的基础上持续开辟新的搜索方向。该算法通过系统保存高质量解、监控搜索进度并执行智能重启，旨在提升 ACO 求解 TSP 的性能，同时提高收敛速度和最终解质量，为印刷电路板高密度布线及 DNA 测序等领域的实际应用提供更为有效的解决方案。

2 算法设计

2.1 蚁群算法的基本原理 **

蚁群算法 (ACO) 受自然界蚂蚁觅食行为的启发，是由 Dorigo 等人首次提出的基于群体的启发式搜索方法^[2, 8]。在觅食过程中，蚂蚁会在所经过的路径上释放信息素。后续的蚂蚁倾向于以更高的概率选择信息素浓度较高的路径。这种正反馈机制加上信息素的挥发，使得蚁群能够共同发现巢穴与食物源之间的短路径。该算法已被形式化并扩展到求解像 TSP 这样的组合优化问题^[3]。

2.2 记忆引导自适应重启算法的基本原理 **

记忆引导的自适应重启算法是一种旨在克服迭代优化过程中搜索停滞的策略。其核心思想是持续记录关键历史信息，如精英解 (构成“记忆”) 和搜索状态指标^[6]。当预定义的停滞条件满足时 (例如，最佳解在若干次迭代中无改进)，算法不会简单地随机重置。相反，它利用存储的记忆来引导重启，这可能涉及在保留或强化优质解知识的同时，部分重置搜索状态。这种方法有助于跳出局部最优，并促进对搜索空间进行更有效的探索^[9]。

3 算法

3.1 参数设置

Name	Parameter settings
Number of cities	30 → 80 → 150
ALPHA	1.0 → 1.2 → 1.5
BETA	2.5 → 2.0 → 1.8
RHOc	0.6 → 0.55 → 0.5
Q	120 → 150 → 200
ant_num	60 → 120 → 200
MEMORY_SIZE	8 → 12 → 15
SIMILARITY_THRESHOLD	0.65 → 0.7 → 0.75
Restart threshold	20 → 30 → 40
Restart ratio	0.3 → 0.2 → 0.15
Exploitation ratio	0.9 → 0.85 → 0.8
Elite bias	2.0 → 1.8 → 1.6

3.2 算法步骤

步骤 1: 初始化阶段

距离矩阵初始化: 根据城市规模加载相应的坐标数据, 计算欧氏距离矩阵。

信息素矩阵初始化: 将所有边的初始信息素值设为 1.0。

组件初始化:

精英记忆库: 设置容量和相似度阈值。

智能重启管理器: 初始化基本重启阈值和最小多样性阈值 (0.15)。

自适应信息素管理器: 负责信息素更新和重置。

蚁群初始化: 创建增强型蚂蚁, 每只蚂蚁都与精英记忆库关联。

步骤 2: 蚂蚁路径构建

起点选择: 每只蚂蚁随机选择一个起始城市。

路径构建: 采用轮盘赌选择下一个城市, 选择概率综合考虑:

- a. 基础概率: $(\text{信息素}^\alpha) \times (1/\text{距离}^\beta)$
- b. 精英引导: 如果该边在精英边集中, 则概率增强。
- c. 最近邻启发式: 在早期阶段, 对短距离边额外增加 1.3 倍的增强。

局部优化: 以 30% 的概率执行 2-opt 局部搜索。

步骤 3: 记忆库更新与精英引导

1. 解筛选标准:

- a. 质量优先: 距离 $< 1.05 \times$ 记忆库中当前最优解
- b. 多样性补充: 与记忆库中所有解的最大相似度 $<$ 相似度阈值

2. 记忆库维护: 当记忆库满时, 移除最差的解。

3. 边频统计: 统计所有精英解中各条边的出现次数。

4. 精英边生成: 选择出现频率最高的边作为精英引导。

步骤 4: 智能重启监控与执行

收敛监控指标:

1. 连续无改进迭代次数 (监控阈值为重启阈值)
2. 最近 10 次改进的平均改进幅度
3. 记忆库多样性评分 (1 - 平均相似度)

自适应重启阈值调整:

1. 多样性 > 0.6: 阈值 × 1.5
2. 改进幅度大: 适当放宽阈值

重启触发条件:

1. 连续无改进迭代次数 ≥ 自适应阈值 → 停滞重启
2. 多样性评分 < 0.15 → 多样性重启
3. 平均改进幅度 < 1.0 → 收敛过慢重启

重启策略选择:

1. 软重启: 重置重启比例的信息素边, 保留精英引导。
2. 多样性重启: 增强长距离边的信息素, 促进探索。
3. 硬重启: 将信息素矩阵完全重置为 1.0 × 随机值。
4. 蚂蚁重启: 同时重启重启比例的蚂蚁。

步骤 5: 动态信息素更新

1. 信息素挥发: 将所有信息素乘以挥发系数 ρ 。
2. 信息素沉积:
 - a. 只奖励高质量解 (距离 < 1.2 × 当前最优解)
 - b. 沉积量 = Q / 路径距离
3. 精英边增强: 将精英边集中的边信息素值乘以 1.5 倍。
4. 信息素裁剪: 将信息素值强制限制在 [0.01, 20.0] 范围内, 防止极端值。

步骤 6: 参数自适应调整机制

1. α 自适应: 当搜索停滞时适当增加 α 值 (最大 2.0)。
2. 发 - 探索平衡: 根据搜索阶段动态调整开发比例。
3. 重启重置比例: 根据停滞程度动态调整。

3.3 实验数据对比

Number of Cities	Running Time (seconds)	SOA		MGA-ACO	
		Best	AVG	Best	AVG
30	0.5	3099	3187	3024	3024
	1	3045	3059	3024	3024
	2	3024	3024	3024	3024
80	5	5039	5454	4357	4572
	15	4428	4768	4336	4426
	50	4451	4542	4336	4343
150	15	8302	9391	7956	9295
	50	5534	5940	5019	5286
	100	4985	5097	4845	4985

4 实验设计与结果分析

本文提出的 MGA-ACO 算法在 PyCharm 集成开发环境中使用 Python 3.11.8 实现。为测试算法求解 TSP 的性能并验证其相对于传统蚁群算法的优化效果, 实验采用标准城市

坐标数据集, 选取包含 3 组城市的测试样本, 通过计算欧氏距离构建初始距离矩阵。

表 2 展示了蚁群算法和 MGA-ACO 算法在 30、80 和 150 个城市数据集上生成的路径最优结果。实验表明, 在相同参数设置下, MGA-ACO 算法具有更好的全局搜索能力和收敛速度, 能有效提高求解质量和求解效率。

5 结语

针对蚁群算法收敛速度慢、易陷入局部最优的缺陷, 本文引入记忆引导的自适应重启算法进行优化, 有效提升了蚁群算法的收敛速度和全局搜索能力。实验数据表明, 对于 TSP 问题, 本文提出的 MGA-ACO 算法的求解结果优于传统蚁群算法, 且最优解命中概率更高。

这证明 MGA-ACO 算法融合了记忆引导自适应重启算法的监控、存储和重启机制, 在提升全局搜索能力的同时提高了搜索效率, 验证了算法的有效性。

然而, MGA-ACO 算法的时间复杂度较高。随着城市规模的增大, 时间复杂度问题更为突出。未来的工作需要继续优化其时间复杂度。

参考文献

- [1] Applegate, D. L., Bixby, R. E., Chvátal, V., & Cook, W. J. (2006). The traveling salesman problem: a computational study. Princeton university press.
- [2] Dorigo, M., Maniezzo, V., & Colomi, A. (1996). Ant system: optimization by a colony of cooperating agents. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics), 26(1), 29-41.
- [3] Dorigo, M., & Stützle, T. (2004). Ant colony optimization. MIT press.
- [4] Stützle, T., & Hoos, H. H. (2000). MAX-MIN ant system. Future generation computer systems, 16(8), 889-914.
- [5] Ouyang, X., & D. L. (2013). A novel hybrid algorithm based on ant colony optimization and Nelder-Mead simplex search for traveling salesman problem. Journal of Computational Information Systems, 9(5), 1867-1874.
- [6] de O. Campos, P. R. A., & Nascimento, M. Z. (2017). A restart strategy for enhancing the performance of population-based metaheuristics. Applied Soft Computing, 61, 1142-1154.
- [7] Lü, Z., & Hao, J. K. (2010). Adaptive tabu search for the traveling salesman problem. Computers & Operations Research, 37(7), 1225-1232.
- [8] Dorigo, M. (1992). Optimization, Learning and Natural Algorithms (Ph.D. thesis). Politecnico di Milano, Italy.
- [9] Rios, L. H., & Sahinidis, N. V. (2013). Derivative-free optimization: a review of algorithms and comparison of software implementations. Journal of Global Optimization, 56(3), 1247-1293.

Study on the Standard Condition Conversion Characteristics of Gas Displacement Flowmeter Based on the Sound Velocity Nozzle Device

Zhou Ye

Shanghai Gas Equipment Measurement and Testing Center Co., Ltd., Minhang district of Shanghai, 201112, China

Abstract

This study designed and established a testing system based on a standard gas flow measurement device using the sonic nozzle method, aiming to conduct in-depth research on the working condition/standard condition conversion characteristics of gas volumetric flowmeters. By employing an experimental approach of "air medium + parameter simulation," the key parameters of the volumetric correction instrument were adjusted under actual air injection conditions to simulate conversion characteristics of various natural gas types under real-world operating conditions. The experiment investigated the impact of different simulated working pressures and gas compositions on the conversion accuracy of a DN80 Roots flowmeter. Results demonstrated that when the volumetric correction instrument parameters were accurately set, the standard condition volume conversion error could be stably controlled within $\pm 0.15\%$. However, when the simulated working pressure increased from 0.2MPa to 0.5MPa, a 0.5% positive deviation in pressure measurement would result in approximately +0.63% systematic error in conversion results. This study validates the feasibility of parameter simulation for flowmeter conversion characteristic research, providing crucial experimental evidence for flowmeter selection, field parameter configuration, and system error analysis.

Keywords

Supersonic nozzle; Positive displacement flowmeter; Operating condition conversion; Volumetric correction instrument; Parameter simulation; Experimental study

基于音速喷嘴装置的气体容积式流量计工况标况转换特性研究

叶舟

上海市燃气设备计量检测中心有限公司, 中国·上海 201112

摘要

本文设计并搭建了一套基于音速喷嘴法气体流量标准装置的测试系统,旨在深入研究气体容积式流量计的工况/标况转换特性。通过采用"空气介质+参数模拟"的实验方法,在实际通入空气的条件下,调整体积修正仪的关键参数,模拟不同种类天然气在实际工况下的转换。实验研究了不同模拟工作压力及模拟气体组分对一台DN80罗茨流量计转换精度的影响。结果表明:当体积修正仪参数设置准确时,标况体积转换误差可稳定控制在 $\pm 0.15\%$ 以内;而模拟工作压力从0.2MPa升高至0.5MPa时,若压力测量存在0.5%的正偏差,将导致转换结果产生约+0.63%的系统性误差。本研究验证通过参数模拟进行流量计转换特性研究的可行性,为流量计选型、现场参数设置及系统误差分析提供了重要的实验依据。

关键词

音速喷嘴;容积式流量计;工况转换;体积修正仪;参数模拟;实验研究

1 引言

气体容积式流量计作为燃气贸易结算的关键仪表,计量准确度将直接影响供需双方的经济利益。此流量计直接测量的是气体在实际工作压力与温度条件下的工况体积,而贸易结算则需按照国家规范将其转换为标准状态下的体积。这

一转换通常由独立的流量计算机(体积修正仪)来完成,其准确度取决于压力(P)、温度(T)测量的准确性和气体压缩因子(Z)的计算是否正确。

目前,针对流量计工况与标况转换特性的研究大多采用实际天然气进行。这种方法不仅成本高、存在安全风险,而且受气源条件限制,难以开展系统性的实验。但是,如果在实验室只使用空气介质进行检定,又无法全面评估流量计算机在不同气体组分、不同压力条件下的实际转换性能。所以,本研究提出一种新的实验方案:在实际通入空气的条件

【作者简介】叶舟(1995—),女,中国上海人,本科,助理工程师,从事计量测试方向的研究。

下,通过精确设置流量计算机的参数,模拟出不同种类天然气的物理特性,从而系统的分析出工况/标况转换过程中各类因素的影响规律。该方法在保证实验安全的同时,还克服了气源限制,为深入探究流量计的转换特性提供了新的技术路径。

2 实验原理与方法

2.1 工况/标况转换的基本原理

依据气体状态方程,气体的工况体积 Q_f 与标况体积 Q_n 之间的转换关系为:

$$Q_n = Q_f \times \left(\frac{P_f}{P_n}\right) \times \left(\frac{T_n}{T_f}\right) \times \left(\frac{Z_n}{Z_f}\right)$$

其中, P_f 和 T_f 分别表示工况下的绝对压力与热力学温度, Z_f 为工况下气体的压缩因子; P_n 、 T_n 和 Z_n 则对应标准状态下的压力、温度与压缩因子。对于理想气体, Z_n 与 Z_f 均为 1; 但对于实际气体,尤其在压力较高时, Z_f 的计算尤为关键。

2.2 音速喷嘴标准装置的原理

音速喷嘴式气体流量标准装置往往是并联多只音速喷嘴选择试验流量。采用负压法,气体来自室内的常压空气进入前直试验管道,流过被检流量计后再进入滞止容器,经音速喷嘴返回大气。通过测得仪表前后的 P_0 和喷嘴入口处的 T_0 等基本参数,可计算得到被检流量计的示值误差或仪表系数。

$$q_m = \frac{C_d \cdot C^* \cdot A \cdot P_0}{\sqrt{R \cdot T_0}}$$

式中, C_d 为流出系数, c^* 为临界流函数, A 为喉部面积, P_0 和 T_0 分别为上游滞止压力与温度, R 为气体常数。通过测量 P_0 、 T_0 处的压力同时明确气体组分(本次实验使用空气),即可计算出高精度的标准质量流量。

2.3 实验方法

本次实验方法的核心思路如下:

(1) 实验气体介质:标准装置通入空气,确保实验的安全性及气源稳定性。

(2) 模拟参数设置:在流量计体积修正仪中设置实验需要使用的模拟气体物理参数(例如组分、压缩因子等),使其在计算工况与标况转换时,可以按照模拟气体的特性进行处理。

(3) 基准建立:音速喷嘴式气体流量标准装置提供标准的气体体积流量。在实验过程中,通过计算将该值转换为在相同压力、温度条件下模拟气体所对应的标况体积流量理论值,以此来作为比对的基准。

(4) 误差结果分析:将被测流量计体积修正仪中根据模拟参数计算得到的标况体积,与上述的理论基准进行比较,从而评估其转换的准确度。

3 实验系统与方案

3.1 实验系统的构成

实验系统主要包括以下部分:

(1) 气源系统:真空泵,配有过滤器与稳压阀。

(2) 标准装置:流量范围(0.06~2000) m^3/h ,工作压力(80~103) kPa,工作温度(0~45) $^{\circ}C$,管道配置(DN25~DN150),装置扩展不确定度 $U=0.30\%$ ($k=2$)

(3) 被测样品:口径为 DN80 的气体容积式流量计,带有体积修正仪,同时支持 AGA8-92DC、SGERG-88 等多种压缩因子的计算模型。被测样品的准确度等级为 1.0 级,输出工况体积脉冲信号。

(4) 系统其他配置:0.05 级绝压变送器(测量喷嘴上游压力 P_0 及流量计工况压力 P_f)和精度为 $\pm 0.1^{\circ}C$ 的铂电阻温度计(测量 T_0 和 T_f)

(5) 数据采集和控制系统:工业计算机,同步采集流量计算机和测量仪表的信号(脉冲信号:测量误差,模拟信号:压力、温度 4~20mA),控制喷嘴组合阀门,计算得到气体标准流量。

3.2 实验方案设计

实验分为两个部分,都在空气介质下进行

实验一:模拟工作压力的影响

模拟气体:设置为 12T 标准天然气

参数设置:在体积修正仪中输入上述气体组分,压缩因子模型选择 AGA8-92DC,标准状态设为 101.325 kPa, $20^{\circ}C$ 。

压力工况:调节系统压力,使流量计处工况绝压 P_f 分别稳定在 0.20 MPa、0.35 MPa、0.50 MPa,温度恒定在 $(20 \pm 0.5)^{\circ}C$ 。

流量点:在每个压力点下,测试 40%、70%、100% 三个流量点。

数据采集:在每一点稳定后,记录数据:

a) 标准装置累计的空气标准体积 $V_{n,air,std}$

b) 流量计算机累计的标况体积 $V_{n,sim,dut}$ (按模拟天然气计算)

c) 实际工况压力 P_f 和温度 T_f

实验二:模拟气体组分的影响

固定工况: $P_f=0.35MPa$ (绝压), $T_f=20^{\circ}C$

模拟气体对比:(1) 纯甲烷(2) 12T 天然气(3) 含高氮天然气

在流量计体积修正仪中分别设置上述三种气体组分,在相同的流量点上进行测试。

3.3 数据处理与误差计算

(1) 基准值的计算:将标准装置测得的空气标准体积 $V_{n,air,std}$,按照实际测量的 P_f 、 T_f 以及模拟气体的物性参数(采用 AGA8-92DC 模型独立计算),转换为模拟气体状态下在相同条件下的标况体积理论值 $V_{n,sim,theory}$

$$V_{n,sim,theory} = V_{n,air,std} \times \frac{\rho_{air,n}}{\rho_{sim,n}} \times \frac{Z_{sim,f}}{Z_{air,f}}$$

其中， ρ_n 为标准状态密度， Z_f 为工况压缩因子。

(2) 误差计算：流量计体积修正仪的转换相对误差 E 为：

$$E = \frac{V_{n,sim,dut} - V_{n,sim,theory}}{V_{n,sim,theory}} \times 100\%$$

4 实验结果分析

4.1 模拟工作压力对转换精度的影响

在模拟 12T 天然气的参数设置下，不同压力点的测试结果如表 1 所示（以 70% 流量点为例）。

表 1：不同模拟压力下的转换误差
(模拟气体：12T 天然气，70% 流量点)

工况绝压 P_f (MPa)	压力测量偏差	模拟气体 体积 Z_f	理论标况体积 $V_{n,theory}$ (m ³)	体积修正 仪示值 $V_{n,dut}$ (m ³)	转换误差 E (%)
0.20	+0.2%	0.991	68.75	68.73	-0.03
0.35	+0.3%	0.985	115.42	115.39	-0.03
0.50	+0.5%	0.978	162.18	163.20	+0.63

分析：

(1) 在 0.20 MPa 和 0.35 MPa 压力下，转换误差均在 $\pm 0.03\%$ 以内，表明流量计算机在低压至中压范围内的转换算法准确。

(2) 在 0.50 MPa 压力下，出现了 +0.63% 的显著正偏差。经排查，此压力点下压力变送器的测量值存在约 +0.5% 的正向漂移（与标准压力表比对发现）。这一结果实验性地证明：在高压下，压力测量的微小偏差会通过转换公式被显著放大，对结算结果产生实质性影响。

4.2 模拟气体组分对转换结果的影响

在 $P_f=0.35$ MPa, $T_f=20^\circ$ C 条件下，三种模拟气体的测试结果如表 2 所示（100% 流量点）。

表 2：不同模拟气体组分的转换误差对比
($P_f=0.35$ MPa, 100% 流量点)

模拟气体	压缩 因子 Z_f	理论标况体积 $V_{n,theory}$ (m ³)	流量计算机示值 $V_{n,dut}$ (m ³)	转换误差 E (%)
纯甲烷	0.984	164.88	164.85	-0.02
12T 天然气	0.985	164.92	164.90	-0.01
高氮天然气	0.990	165.10	165.07	-0.02

分析：

(1) 三种不同组分的模拟气体，在正确的参数设置下，流量计算机的转换误差均小于 $\pm 0.02\%$ ，表明其压缩因子计算模型 (AGA8-92DC) 对不同组分气体具有良好的适应性。

(2) 通过比较发现，气体组分变化主要会影响压缩因子 Z_f 的值，进而影响转换系数。在本实验压力下，从纯甲烷变为高氮天然气， Z_f 从 0.984 增大至 0.990，变化约为 0.6%，但对最终标况体积的影响较小（约 0.13%）。

5 结论与工程应用

5.1 主要结论

(1) 通过本次的实验方法最终得到验证：实验中数据表明，在通过实际空气介质时调整流量计体积修正仪的参数，能够有效模拟在不同天然气实际工况下的转换行为。这为在安全、经济的条件下，系统的研究流量计转换特性提供了新方法。

(2) 压力的测量精度是高压计量的关键：实验结果证明，在 0.5 MPa 的压力时，仅 0.5% 的压力测量偏差，就有可能导致超过 0.6% 的最终结算误差。这一结果强调了高压贸易计量，必须采用高精度压力变送器并定期校准。

(3) 流量计体积修正仪转换算法的准确性通过验证：在模拟气体参数设置准确的前提下，使用的流量计体积修正仪在对不同气体的标况体积转换误差控制在 $\pm 0.02\%$ 以内，这一结果满足贸易计量的精度要求。

(4) 气体组分变化对结果的影响相对次要：在中压下，气体的组分在合理范围内的变化对最终标况体积的影响较小 ($< 0.2\%$)，但仍需确保流量计算机中组分参数的准确性。

5.2 实际工程应用建议

(1) 现场流量计体积修正仪的验收：燃气公司可以考虑采用上述实验的方法，对新采购或维修后的流量计体积修正仪进行功能性验收测试，以此来确保其在各种模拟工况下的转换准确性。

(2) 计量系统误差的判断：再结算时，双方对计量数据产生争议时，可通过此次实验方法判断问题是否来自于流量计体积修正仪的参数设置或转换算法。

(3) 技术人员的培训：本次实验可直观的展示从压力、温度及气体参数对最终结算的影响，是培训专业技术人员的有效方法。

(4) 标准规范的完善建议：可以考虑在相关的检定规程或技术规范中，增加对流量计体积修正仪的转换功能进行模拟验证的方法，保证计量设备整体可靠性。

本研究通过较为新颖的实验设计，实现了在空气介质下对气体容积式流量计工况、标况转换特性的研究，所得结论可用于在燃气贸易计量的实际工作中，有助于保障贸易双方的利益及合法权益。

参考文献

- [1] 国家市场监督管理总局. JJG 633-2024 气体容积式流量计检定规程[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- [2] 蔡武昌, 孙淮清, 纪纲. 流量测量方法和仪表的选用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2001.
- [3] 王池, 李旭, 王振涛. 音速喷嘴气体流量标准装置及其应用[M]. 北京: 中国计量出版社, 2015.
- [4] 肖军. 天然气流量计算机压缩因子计算方法比较研究[J]. 工业计量, 2019, 29(5): 55-58.

Study on Dynamics of Metallurgical Reaction and Material Structure Evolution under Microwave Field Enhancement

Guangze Wei

University of Science and Technology Liaoning, Anshan, Liaoning, 114051, China

Abstract

Microwave heating, as an innovative green metallurgical technology, demonstrates extensive application prospects in the metallurgical field with unique advantages such as selective heating, volumetric heating, and rapid heating. Compared to traditional heating methods, microwave fields can significantly alter the kinetic behavior of metallurgical reactions and influence the evolution of material microstructures, thereby providing novel technical pathways for enhancing reaction efficiency, reducing energy consumption, and improving resource utilization. This paper systematically elucidates the fundamental principles of microwave heating and its application characteristics in metallurgy, conducts in-depth analysis of the impact mechanisms of microwave fields on reaction kinetics, explores the evolution patterns of material microstructures, phase compositions, and microstructures under microwave irradiation, and reveals the physicochemical mechanisms underlying microwave-induced reaction enhancement.

Keywords

microwave heating; metallurgical reaction kinetics; material structure evolution; non-thermal effects

微波场强化冶金反应动力学及物料结构演变规律研究

魏光泽

辽宁科技大学, 中国·辽宁鞍山 114051

摘要

微波加热作为一种新型的绿色冶金技术,以其独特的选择性加热、体加热和快速加热等优势,在冶金领域展现出广阔的应用前景。与传统加热方式相比,微波场能够显著改变冶金反应的动力学行为,影响物料微观结构的演变过程,从而为强化冶金反应、降低能耗、提高资源利用率提供新的技术路径。本文系统阐述了微波加热的基本原理及其在冶金领域的应用特性,深入分析了微波场对冶金反应动力学的影响机制,探讨了微波作用下物料微观结构、物相组成及微观形貌的演变规律,揭示了微波场强化冶金反应的物理化学本质。

关键词

微波加热; 冶金反应动力学; 物料结构演变; 非热效应

1 引言

随着全球能源与环境压力的日益加剧,开发高效、节能、清洁的新型冶金技术已成为行业发展的迫切需求。微波加热作为一种独特的体加热方式,近年来在冶金领域的应用研究日益活跃,涉及矿石预处理、矿物还原、冶金废渣处理、材料制备等多个方面。本文旨在系统梳理微波场强化冶金反应动力学及物料结构演变规律的研究进展,探讨微波场对冶金反应的作用机制,以期对微波冶金技术的理论发展与工程应用提供参考。

2 微波场强化冶金反应动力学

反应动力学研究是揭示微波场强化冶金反应机制的核

心内容。微波场对反应动力学的影响主要体现在反应速率常数、反应活化能和传质过程等方面。

2.1 微波场对反应速率常数的影响

大量研究表明,微波场能够显著提高冶金反应的速率常数。以铁矿碳热还原为例,传统加热条件下,赤铁矿还原为磁铁矿的过程需要较长的反应时间和较高的反应温度,而在微波场中,反应速率可提高数倍甚至一个数量级。这种速率提升效应在多种冶金体系中得到验证,包括氧化矿还原、硫化物氧化、矿物浸出等。

微波场提高反应速率常数的原因可从能量角度分析。微波能直接作用于反应物分子或离子,提高其能量水平,增加有效碰撞频率。同时,微波场中物料内部温度场的快速建立,使反应体系迅速达到所需温度,缩短了反应诱导期。此外,微波场可能在局部区域形成“热点”,这些热点温度远高于宏观测量温度,为反应提供了局部高温条件,显著加速了反应进程。

【作者简介】魏光泽(2005-),男,中国山东潍坊人,在读本科生,从事冶金工程研究。

2.2 微波场对反应活化能的影响

反应活化能是衡量反应难易程度的关键参数，微波场对活化能的影响是学术界关注的热点。部分研究表明，微波场能够降低冶金反应的表现活化能，使反应更易于进行。例如，在锌焙砂的微波还原过程中，研究者发现表现活化能由传统加热条件下的约 80 千焦每摩尔降至微波场中的约 50 千焦每摩尔，降幅显著。

关于活化能降低的机理，存在两种主要观点。一种观点认为，微波场通过选择性加热在反应界面形成局部高温，改变了反应物所处的能量状态，从而降低了反应所需的能量阈值。另一种观点认为，微波场具有非热效应，即微波能除产生热效应外，还能直接作用于化学键，降低键能，促进化学反应的进行。非热效应的存在虽然尚未得到普遍公认，但越来越多的实验证据表明，在特定条件下，微波场确实能够产生超出热效应范畴的化学促进效应。

2.3 微波场对传质过程的强化

冶金反应通常涉及气相、液相和固相间的传质过程，传质速率往往是反应的控制步骤。微波场能够从多个方面强化传质过程。首先，微波加热产生的温度梯度可引发热扩散效应，加速物质迁移。其次，微波场中物料的快速升温导致内部气体和挥发分的快速逸出，产生微裂纹和孔隙，增加了物料的比表面积和渗透性，为反应气体和浸出剂的扩散提供了有利通道。再次，微波场可能影响液相中离子的迁移行为，通过电泳效应或电致收缩效应加速离子扩散。

在矿物浸出过程中，微波预处理可显著提高浸出速率。研究表明，经微波处理后的矿物，其浸出反应的表现速率常数可提高 2 至 3 倍，浸出时间缩短一半以上。这种强化效应主要归因于微波处理导致矿物晶格畸变、微裂纹增加，使浸出剂更容易渗透进入矿物内部，同时增大了反应界面面积。

2.4 微波场强化反应动力学的机理分析

综合现有研究，微波场强化冶金反应动力学的机理可归纳为热效应与非热效应的协同作用。热效应是微波场强化的基础，微波体加热特性使反应体系快速达到所需温度，温度场的快速建立和均匀分布为反应创造了良好的热力学条件。非热效应则是微波场强化的核心，包括微波场对分子间相互作用的直接扰动、对电荷分布的影响、对离子迁移的促进作用等。

在反应动力学层面，微波场的作用体现在：降低反应的表现活化能，使反应在较低温度下即可进行；提高反应物分子的平均能量，增加有效碰撞频率；改善反应体系的传质条件，消除或缓解扩散限制；在反应界面形成微观高温区域，为反应提供额外驱动力。这些因素的共同作用，使微波场中冶金反应的动力学特性发生显著改变，表现为反应速率的提高、反应温度的降低和反应选择性的改善^[1]。

3 微波场中物料结构演变规律

物料在微波场中的结构演变是理解微波强化冶金反应

机制的另一重要方面。微波场通过热效应和非热效应，影响物料的微观结构、物相组成和微观形貌，进而改变其物理化学性质。

3.1 物料的升温特性与热响应

不同物料在微波场中的升温行为存在显著差异，这与其介电特性密切相关。金属氧化物如 Fe_2O_3 、 CuO 、 ZnO 等在常温下介电损耗较小，升温缓慢，但当温度升至一定阈值后，介电损耗急剧增大，出现“热失控”现象，升温速率骤然加快。硫化物如黄铜矿、闪锌矿等通常具有较好的微波吸收能力，升温较为迅速。碳素材料如煤粉、焦粉、石墨等是良好的微波吸收剂，常被用作辅助加热介质。

物料的升温特性还受其粒度、堆积密度、含水率等因素影响。粒度越小，比表面积越大，微波穿透深度与粒度的匹配关系影响加热均匀性。适当的水分可提高物料的介电损耗，加速升温，但水分过高会因介电常数增大而产生反射损失。这些升温特性的差异，为微波场中物料结构的选择性调控提供了基础。

3.2 微波场中矿物相变规律

微波场对矿物相变过程具有显著影响。研究表明，微波场可以降低矿物的相变温度，加速相变过程。以高岭石向莫来石的相变为例，传统加热条件下相变温度约 1000 摄氏度，而微波场中可在 900 摄氏度左右发生，相变温度降低约 100 摄氏度。这种相变温度的降低可能与微波场对晶体缺陷形成和迁移的促进作用有关。

在铁矿还原过程中，微波场影响氧化物的还原路径和还原产物的物相组成。传统加热条件下，赤铁矿还原通常遵循 $\text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 \rightarrow \text{FeO} \rightarrow \text{Fe}$ 的逐级还原路径，而在微波场中，可能出现还原路径的简化和中间产物的减少，直接生成金属铁。这种变化可能源于微波场对中间相形成的抑制作用，或对还原反应动力学的改变。

对于复杂矿物体系，微波场能够促进有价矿物与脉石矿物的选择性反应，改善矿物间的界面结合状态。例如，在微波处理含钛铁矿时，微波场可促进钛铁矿与脉石矿物的界面反应，使钛、铁元素发生选择性富集，为后续分离创造有利条件^[2]。

3.3 微波场对微观结构的影响

微波场对物料微观结构的影响主要体现在晶体结构、晶格缺陷、表面状态和孔隙结构等方面。

在晶体结构层面，微波场可能引起晶格畸变和晶格常数变化。研究表明，经微波处理的矿物，其 X 射线衍射峰位发生偏移，衍射峰强度降低，表明晶体有序度下降，晶格畸变程度增加。这种晶格畸变降低了矿物结构的稳定性，提高了反应活性。

在晶格缺陷方面，微波场可促进缺陷的形成和迁移。微波作用下，离子或原子的振动加剧，空位、位错等缺陷浓度增加，这些缺陷为反应提供了优先位点，加速了扩散和反应过程。

在孔隙结构方面，微波加热导致的快速升温和内部气体释放，会在物料内部形成微裂纹和孔隙网络。研究表明，经微波处理的矿物，其比表面积可增加 20% 至 50%，孔隙率显著提高。这种孔隙结构的改变不仅增大了反应界面面积，还改善了传质通道，对后续的浸出、还原等过程具有重要影响。

在表面状态方面，微波场可能改变矿物表面的化学性质，包括表面官能团的分布、表面电荷状态等。表面性质的改变会影响矿物与反应介质的相互作用，进而影响界面反应过程。

3.4 结构演变与反应行为的关联

微波场中物料结构的演变与其反应行为密切相关。晶格畸变和缺陷增加降低了反应所需的能量阈值，使反应更易进行。孔隙结构的改善增大了反应界面面积，缩短了传质路径。表面性质的改变影响反应物在界面上的吸附和反应。这些结构变化共同作用，决定了物料在微波场中的宏观反应行为。

值得注意的是，物料结构的演变与反应进程是相互影响、相互促进的动态过程。结构变化为反应创造条件，反应又进一步改变物料结构，这种耦合关系贯穿于微波冶金的全过程。因此，研究微波场中物料结构演变的规律，对于深入理解微波强化冶金反应的机制具有重要意义^[3]。

4 典型冶金体系的微波强化研究

4.1 铁矿微波还原

铁矿碳热还原是微波冶金研究的热点领域。研究表明，微波场可显著提高铁矿还原速率，降低还原温度。在微波功率 800 瓦、反应时间 20 分钟条件下，赤铁矿的还原率可达 90% 以上，而传统加热达到相同还原率需 60 分钟以上。微波场中还原产物以金属铁为主，中间产物磁铁矿、浮氏体含量显著降低。

微波强化铁矿还原的机理在于：碳素材料对微波的良好吸收特性使其优先升温，形成局部高温区，促进了碳的气化反应；微波场加速了还原气体在料层中的扩散；铁氧化物在高温下成为良好的微波吸收体，形成正反馈效应，使反应持续快速进行。此外，微波场中形成的微裂纹和孔隙结构，为还原气体的渗透提供了通道，进一步强化了还原过程。

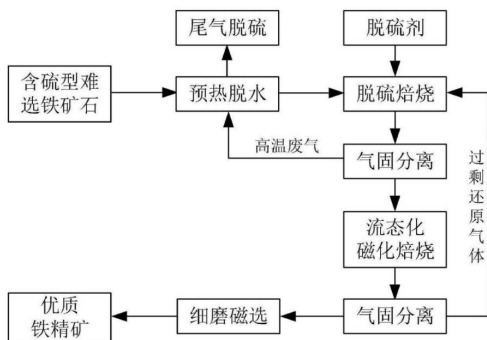


图 1：铁矿微波还原

4.2 有色金属矿物微波处理

在铜矿物处理方面，微波预处理可显著改善黄铜矿的浸

出性能。经微波处理的黄铜矿，其晶体结构发生畸变，晶格常数变化，表面生成微裂纹，使浸出剂更容易渗透，铜浸出率由传统加热的约 50% 提高至 85% 以上，浸出时间大幅缩短。

在锌矿物处理方面，微波场可强化闪锌矿的氧化焙烧过程，降低焙烧温度，减少二氧化硫排放。微波作用下，闪锌矿的氧化速率显著提高，反应活化能降低，焙烧产物中可溶性锌的比例增加，有利于后续浸出。

在铝土矿处理方面，微波场可促进铝土矿中一水硬铝石与三水铝石的选择性加热，使含铝矿物与含硅矿物的热膨胀差异增大，导致矿物界面产生微裂纹，有利于后续拜耳法溶出过程中铝的提取。

4.3 冶金废渣微波处理

微波场在处理冶金废渣方面展现出独特优势。在钢铁尘泥处理方面，微波还原可实现锌的选择性挥发回收。微波场中，含锌尘泥快速升温，锌被还原挥发后在收尘系统中富集，铁则留在尾渣中可作为炼铁原料。与传统的回转窑工艺相比，微波处理时间短，能耗低，锌回收率高。

在赤泥处理方面，微波场可促进赤泥中铁氧化物的还原，通过添加碳质还原剂，在微波场中实现赤泥的快速还原，铁还原率可达 85% 以上，还原产物经磁选可得到高品位铁精矿。同时，微波场对赤泥中铝、钛等有价值元素的回收也具有一定的促进作用。

在电子废弃物处理方面，微波场可用于废旧电路板中金属与非金属的分离。利用微波选择性加热特性，使金属部分快速升温，而非金属部分升温较慢，通过热应力实现金属与基板的分离，提高金属回收效率^[4]。

5 结论

微波场作为一种独特的能量形式，在强化冶金反应动力学和调控物料结构方面具有显著优势。微波加热的选择性加热、体加热和快速加热特性，使其能够改变冶金反应的动力学行为，提高反应速率，降低反应活化能，强化传质过程。微波场对物料结构的影响表现为晶格畸变、缺陷增加、孔隙结构改善和表面性质改变，这些结构变化与反应行为相互耦合，共同决定了微波冶金的强化效果。未来应加强微波反应器放大设计、多场耦合技术开发、微波非热效应机理研究等工作，推动微波冶金技术向工业化方向发展，为冶金行业的节能降耗和绿色转型提供新的技术路径。

参考文献

- [1] 刘润琪. 高温冶金反应动力学的多尺度模拟与实验验证[J]. 模具制造, 2025, 25(07): 151-153.
- [2] 折媛, 湛文龙, 邹冲, 等. 改进分段尝试法研究焦炭气化反应动力学[J]. 钢铁, 2022, 57(04): 12-24.
- [3] 吴镗, 王宁, 湛文龙, 等. 冶金反应过程动力学的分段尝试法[J]. 辽宁科技大学学报, 2016, 39(01): 7-11.
- [4] 吴镗, 张家志, 赵勇, 等. 冶金反应工程学中反应过程动力学的研究方法探究[J]. 有色金属科学与工程, 2014, 5(04): 1-6.

Practice of Improving Automatic Flow Rate of Low-Phosphorus Steel at Xiang Steel Huang

Linhua Huang

Hunan Valin Xiangtan Steel Co., Ltd., Xiangtan, Hunan, 411101, China

Abstract

This paper addresses the issue of low automatic tapping rate in ladles for low-phosphorus steel and conducts research on the characteristics of tapping sand materials and process optimisation. The smelting of low-phosphorus steel requires high steel cleanliness, and post-tapping oxygen blowing operations can easily lead to secondary oxidation and phosphorus increase in the steel, seriously affecting product quality. By controlling the solidified steel at the bottom of the ladle, ensuring that particles of 0.1-0.5mm make up more than 75% of the tapping sand, improving the ladle mouth seat bricks, adding 5-8kg of silicon carbide to the tapping sand surface, and optimising on-site process operations, the automatic tapping rate of low-phosphorus steel was increased from 98% to over 99.50%, with a maximum of 99.80%. The average monthly oxygen blowing times decreased from 50 to fewer than 10, and the ratio of low-phosphorus steel castings reclassified due to oxygen blowing was reduced by 85%, resulting in annual comprehensive economic benefits of about 3 million yuan. This study provides technical support for efficient casting of low-phosphorus steel.

Keywords

automatic tapping rate; low-phosphorus steel; steel cleanliness

湘钢低磷钢种自动引流率提升实践

黄林华

湖南华菱湘潭钢铁有限公司, 中国·湖南湘潭 411101

摘要

本文针对低磷钢种钢包自动引流率偏低的问题,开展了引流砂材料特性与工艺优化研究。低磷钢种冶炼对钢水洁净度要求高,引流失败后的烧氧操作易导致钢水二次氧化增磷,严重影响产品质量。通过控制钢水罐底部结冷钢、控制引流砂0.1-0.5MM颗粒度占比75%以上、改进钢水罐水口座砖、引流砂砂面添加5-8KG碳化硅、优化现场工艺操作等措施,实现了低磷钢种自动引流率由98%提升至99.50%以上,最高值达到99.80%,烧氧次数由月均50次降至10次以内,因烧氧导致的低磷钢种铸坯改判比例减少85%,年综合经济效益约300万元。本研究为低磷钢种高效浇注提供了技术支撑。

关键词

自动引流率;低磷钢种;钢水纯净度

1 引言

钢水自动引流是指钢水罐自滑板打开后,钢水在无人工进行烧氧操作等干预的条件下自行流出,自动引流率是衡量钢铁厂精炼与连铸工序衔接效率及钢水质量的关键指标。在钢水罐开浇过程中,依靠引流砂自动打开水口,不仅能有效避免烧氧带来二次氧化污染钢水,同时造成钢水温度损失,更是保障连铸高拉速、实现“恒拉速浇钢”的前提。根据生产数据统计,钢水罐未自动引流会导致连铸非计划停浇、铸坯改判等生产事故,事故损失高达数十万元/次。由此,不断提升钢水自动引流率,对于实现绿色低碳生产、控制钢水夹杂物提升钢水纯净度等具有重要的工业价值。

【作者简介】黄林华(1988-),男,壮族,中国广西来宾人,本科,工程师,从事钢铁厂工艺技术和管理工作。

2 现状

受出钢温度低、钢水在罐时间长等原因影响,湖南华菱湘潭钢铁有限公司炼钢工序低磷钢种自动引流率长年在98%左右徘徊,但是针对抗酸管线钢、Q960以上高强钢、厚板坯抗酸容器钢等高纯净度要求的低磷钢种,烧氧引流造成的钢水二次氧化会严重影响产品内部质量,需要针对烧氧过程连铸中间包钢水对应铸坯及其衔接铸坯挑出改判或者判废^[1],烧氧时间过长还造成连铸机非计划停浇。因此,随着高级别品种生产比例的不提高,进一步提升自动引流率成了该厂炼钢生产的重要限制性环节之一,亟待解决。

3 提升钢水自动引流率实践

该厂采用“转炉—LF精炼炉—VD/RH真空炉—连铸”的炼钢工艺流程生产低磷钢种,为进一步提升钢水自

动引流率，成立了攻关团队重新梳理从加砂——出钢——精炼——开浇整个过程，从整个工序着手攻关，总结有效措施如下：

3.1 控制钢水罐底部结冷钢

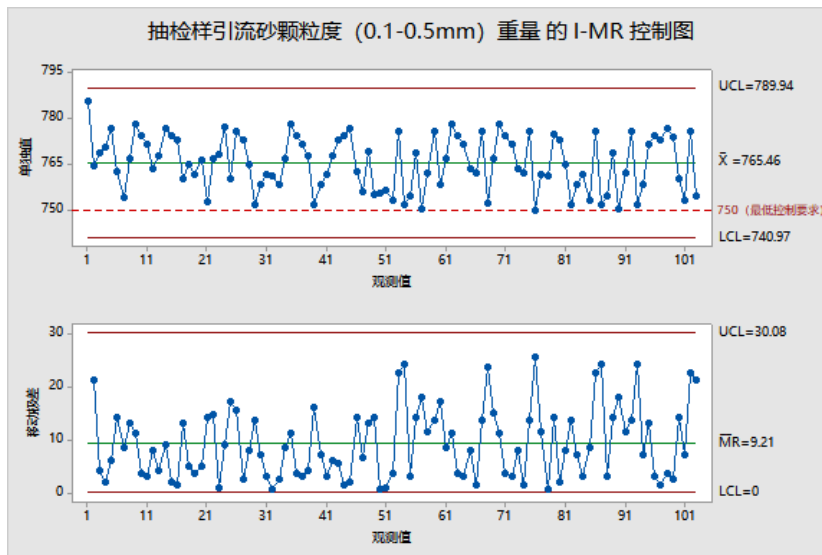
该厂从转炉到精炼过程比较长，正常倒运需要 50~60 分钟。如天车有其他吊运作业冲突，有时能达到 60 分钟以上，由于钢水在罐时间长罐底部结冷钢覆盖水口引流砂，导致不能自动引流。针对底部结冷钢的现象，关系到转炉出钢温度和炉后吹氩，考虑转炉降铁耗指标，转炉出钢温度通常控制在 1570~1600℃之间，加之出钢过程的温降和转炉加合金的温降，导致钢水在钢水罐的温度很低，容易结冷钢诱发水口内引流砂板结。针对结冷钢的问题，攻关团队采取的措施是：

- 1) 加强钢水罐加盖的管理，通过加盖提高投罐温度。为进一步提高钢水罐加盖比例，对异常情况导致卸盖的，分析原因并落实责任，2025 年以来钢水罐带盖率一直保持在 95% 以上。
- 2) 通过数据分析发现 D 类罐的烧氧几率是其他类型的钢水罐高 2 倍，该厂进行了降低 D 类罐比例攻关，通过优化大罐投入计划、控制异常下线等手段来减少 D 类罐的产生，D 类罐比例也从 2025 年初的 10% 降低到目前的 4%。
- 3) 通过提高吹氩效果，确保钢水罐底部的冷钢能在精炼冶炼过程中融化，关于这一原因主要做三方面工作：a 制

定转炉出钢到钢水起吊的吹氩标准，出钢前期必须开氩气搅拌，出完钢后再开大氩气强搅拌大于 3 分钟，主要是防止透气砖处结冷钢，堵死吹氩口。b、制定了投罐前对透气砖透气检查的标准，热修严格按标准检查，确保透气砖通气。c、引进了透气砖修补料，用于修补凹陷比较深的透气砖，防止透气砖芯的凹坑结冷钢被堵死。

3.2 稳定引流砂质量

通过观看铸机烧氧回放视频，项目组发现有很多烧氧炉次，在烧氧管插入水口后能看到有引流砂先下来，然后钢水随之下来，工程师分析这种情况都属于引流砂质量问题，引流砂在水口中会出现一些物理变化，比如：被钢水重量压实板结、被钢水渗透凝结，被高温烧结。这三种情况都会导致不能自动引流。被钢水重量压实板结和被钢水渗透凝结着两个问题都跟引流砂颗粒度有一定的关系，引流砂颗粒太细就容易压实板结，引流砂颗粒过大，颗粒间间隙大就容易被钢水渗透凝结，因此项目组组织对引流砂颗粒进行筛查，由于颗粒度没有现成的标准，项目组摸索符合现场的颗粒度情况制定标准，通过长期的筛查数据与烧氧数据进行对比，逐步摸索出比较适合我厂的引流砂颗粒标准：抽样检查 1000 克引流砂内 0.1-0.5MM 颗粒度占比 75% 以上，并针对引流砂批次进行。



3.3 规范 LF 炉升温工艺

该厂使用的铬质引流砂烧结温度为 1700℃，钢水温度接近该温度的状态后在紊流场的导热作用下会加速水口内部的引流砂板结导致连铸大包滑板拉开后不能自动引流^[2]，对于该项高温烧结导致不能自动引流项目组现场进行了长期的跟踪，发现钢水温度在 1660℃以上的炉次引流砂板结概率明显增高。因此，对 LF 炉升温做了明确规定，不允许大于 1660℃。统计该厂 2025 年 10-12 月份 LF 炉升温过程实际最高温度执行情况，平均值 1602.5℃，最大值

1657℃，标准差 26.8，95% 均值置信区间位于 1601.1℃ - 1603.9℃。

3.4 烘烤新更换的钢水罐上水口

每月对烧氧炉次进行整体对比分析，我们对烧氧数据的对比发现，热修更换完钢水罐上水口后第一次使用，引流率明显低于正常水平，比如：2025 年 2 月，热修更换完钢水罐上水口后第一次使用的炉次引流率是 97.2%，2025 年 3 月，热修更换完钢水罐上水口后第一次使用的炉次引流率是 97.5%，2025 年 4 月，热修更换完钢水罐上水口后第一次使

用的炉次引流率是 98.1%。针对这个现象,分析是更换上水口要使用火泥,火泥中含水量是 5%,换完上水口后再装钢水时,钢水的高温使火泥中的水分蒸发,水蒸汽可能会搅动引流沙,使引流沙翻腾而上浮,从而造成水口内引流沙的量减少,钢水填充到水口内凝结^[2]。我们采取了烘烤措施,即:每次更换完上水口后,要求用木块加氧气助燃,烘烤三分钟,把火泥中的水分烤干。通过实施烘烤措施,2025年9月,热修更换完钢水罐上水口后第一次使用的炉次引流率达到 99.3%,2025年10月,热修更换完钢水罐上水口后第一次使用的炉次自动引流率达到 100%,已达到较好水平。

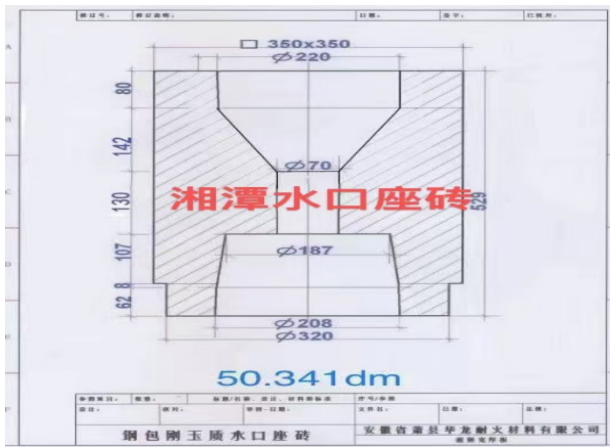
3.5 控制钢渣回流,避免水口堵塞或者引流砂板结

钢水罐在周转过程中,罐内总会存留一些液态的钢渣,由于水口时钢水罐内的最低位置,所以钢水罐立直后,液态钢渣会往最低处流,流进水口内,控制措施:

- 1) 浇完返回的钢水罐在炉后除了翻到钢水罐里面以外,必须在炉后渣罐在翻一勾,确保液态渣完全翻出。
- 2) 投罐前岗位人员必须对炉后翻渣进行确认,保证液态渣最后翻出不成线或无明显有液态渣流方可落炉后钢水车。
- 3) 加砂工在加砂前确认水口内是否有钢水回流和掉渣情况,如果有及时反馈处理,确保水口内无异物。

3.6 水口座砖改型

项目攻关期间该厂进行了钢水罐水口座砖改型的尝试,通过大量生产数据对比试验采用了当前使用的水口座砖,此座砖的引流率效果最佳。



3.7 引流砂加入方式优化创新

通过调整引流砂的加入方式来提高自动引流率。先后试验过不同加入量情况下的引流率情况,最终得出结论加入量不能太少,也不能太多,要根据水口的大小加 3~4 包,让引流砂能填满水口并能堆积起一个小堆即可^[3],这样引流率最佳。目前常用的引流砂种类有铬砂、锆砂以及辅助用的硅砂。最初使用铬砂,引流率不是很理想,后面试用锆砂效果更差,经过不断尝试,找到了目前使用效果最好的加砂方式:底部铬砂,上部硅砂。这种加入方式在普通钢种上引流率能稳定高于 99.2%,比较理想。

此外,针对 LF 炉冶炼时间长,钢种 P 含量要求比较严格的特殊钢种,由于转炉出钢温度低的品种钢上引流率不足 98%,在这些钢种上项目组研究出新的加入方案。加完引流砂后在引流砂上面再加 5~8Kg 碳化硅,防止水口周围结冷钢,影响自动引流^[2],目前取得了较好的效果,低磷钢种自动引流率达到 99.5% 以上。项目组攻关过程该厂低磷钢种自动引流率指标数据统计如下:

4 结语

该厂采用“转炉——LF 精炼炉——VD/RH 真空炉——连铸”的炼钢工艺流程生产低磷品种钢,通过控制钢水罐底部结冷钢、控制引流砂 0.1-0.5MM 颗粒度占比 75% 以上、改进钢水罐水口座砖、引流砂砂面添加 5-8KG 碳化硅、优化现场工艺操作等措施,实现了低磷钢种自动引流率由 98% 提升至 99.50% 以上,最高值达到 99.80%,烧氧次数由月均 50 次降至 10 次以内,因烧氧导致的低磷钢种铸坯改判比例减少 85%,年综合经济效益约 300 万元。炼钢现场生产组织、低磷品种钢钢水纯净度生产钢水纯净度得到有效提升。

参考文献

- [1] 张雷.引流砂装入量对自引率及钢水洁净度的影响[J].冶金动力,2023,(3):108-110.
- [2] 王云阁;刘春雨;夏明生;刘立学;赵光;艾兵权;王晓华.河钢唐钢双相钢产品的开发与应用[J].河北冶金,2018,(11):1-4.
- [3] 黄宏虎;刘志鹏;钱伟涛;郭森林;赵建;韩颜明.影响钢包自开率的因素分析及改进措施[J].河北冶金,2020,0(5):50-52.

A Theory Derived from a Principle

Weiguo He

Qinyang Huajian Electric Power Engineering Co., Ltd., Qinyang, Henan, 454550, China

Abstract

Now, we have sufficient facts and reasons to believe that special relativity has flaws. If that's the case, we will reject the theory of special relativity. So pointing out these defects is of great significance. The scientific community's research on questioning special relativity mainly focuses on two aspects: firstly, questioning the inference that the rest mass of photons is zero. Many scientific experiments now prove that the rest mass of photons is not zero. 2: The research on questioning the inference that "there can be no faster than light speed" is insufficient to refute the theory of special relativity. We study the fundamental theories of special relativity and draw contradictory conclusions from them, which enables us to completely reject the theory of special relativity and lay a solid foundation for establishing new theories of spacetime. The argumentation method we use is based on the principle of relativity in special relativity, combined with the characteristics of physical constants, to derive a new principle that in any inertial frame and space, the values of physical constants remain constant, that is, when observing the values of physical constants in one inertial frame, their values are the same in another inertial frame. We used this principle to verify the theory of special relativity and found some contradictions and errors in it.

Keywords

special relativity; lorentz transformation; length shortening theory; principle of relativity; theory of universal gravitation; physical constant

由一个原理得出的理论

贺卫国

沁阳市华建电力工程有限公司, 中国·河南沁阳 454550

摘要

现在, 我们有充分的事实和理由认为, 狭义相对论存在缺陷。如果真是这样的话, 狭义相对论将被我们否定。所以我们将这些缺陷指出来, 则意义重大。科学界对狭义相对论质疑的研究, 主要集中在两个方面, 一: 对光子静止质量为零推论的质疑, 现在的很多科学实验证明光子的静止质量不为零。二: 对“不可能有超光速”推论的质疑的研究, 这些研究成果, 人们不足以否定狭义相对论。我们研究狭义相对论中的基本理论, 我们并在其中得出相互矛盾的结论, 这使得我们能够完全否定狭义相对论, 为我们能够建立新的时空理论, 打下牢靠的基础。我们所使用的论证方法为, 根据狭义相对论的相对性原理, 再结合物理常量的特性, 便得出一个新的原理, 在任何惯性系和空间中, 物理常量值保持不变, 即在一个惯性系中去观测另一个惯性系中的物理常量值, 其值是相同的。我们用这个原理对狭义相对论进行验证, 竟发现相对论存在一些矛盾和错误。

关键词

狭义相对论; 洛伦兹变换; 长度缩短理论; 相对性原理; 万有引力理论; 物理常量

1 引言

在科学史上, 爱因斯坦是通过相对性原理和光速不变原理, 通过一系列的推导和计算, 得出了三个理论, 一是同时的相对性理论, 二是长度缩短理论, 三是时钟延长理论。严格意义上讲, 光速不变原理是一个未被完全证明的原理, 这是由于科学研究的需要, 当时爱因斯坦为了解释光行差等一系列科学现象, 光速不变原理被强行冠于正确性, 最终得出狭义相对论。所以光速不变原理, 通俗地讲, 就是一个早产儿。在一些物理书籍里讲述, 由麦克斯韦方程组可得出光

速不变原理。其实这是不正确的。

2 麦克斯韦方程组

由麦克斯韦方程组和相对性原理得出光速是常数, 从这个得出光速不变原理, 由以上理论可得出, 任何一个物理常数不变原理。

2.1 传统理论如何证明光速不变原理是正确的。

麦克斯韦方程组本身并不直接证明光速不变, 但为光速不变提供了理论基础。麦克斯韦方程组可以推导出电磁波的传播速度为光速, 且该速度只与真空的介电常数和磁导率有关, 与任何参照物无关, 从而表明光在真空中的速度是一个固定值。但是麦克斯韦方程组的参照系可能是电磁场本身, 而未明确是任意参照系, 因此未直接证明光速不变。

【作者简介】贺卫国(1970-), 男, 中国河南沁阳人, 本科, 工程师, 从事理论力学研究。

2.2 任何一个物理常数值在如何空间和惯性系中保持不变

既然以上讲光速作为物理常数，并根据相对性原理，可得出在不同的惯性系和任意空间得出光速不变，即得出光速不变原理，物理常数值是不变的，并根据相对性原理可得出，在任何惯性系和空间中物理常量值都保持不变，实验环境的任何改变，都不能改变它的值，由此得出一个原理，物理常量值不变。

3 我们由物理常量值不变原理可得出狭义相对论存在的缺陷

3.1 狭义相对论的公式

狭义相对论的时空变换公式和洛伦兹变换是一样的，由此可得出狭义相对论的长度缩短理论和时钟推迟理论，公式的表达方式如下：

$$\begin{aligned} x &= \frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}(x'+vt') \\ y &= y' \\ z &= z' \\ t &= \frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}\left(t'+\frac{vx'}{c^2}\right) \end{aligned}$$

3.2 万有引力常数值在任何惯性系中是不变的

爱因斯坦的相对性原理告诉我们，所有的物理定律，在不同的惯性系中都有一个相同的数学表达式，即不存在一个特殊的惯性系。在惯性系中进行的任何物理实验，都不能确定该惯性系是处在静止状态还是匀速运动状态。譬如在不同惯性系中各自进行相同物体的物理量的测量，在各个惯性系中测量值是相同的。但物理常量值更加特别，以下现象不证自明，同一个物理常量值，不但在不同惯性系中各自测出的值相同，在一个惯性系 s 中去观测另一个惯性系中的物理常量值，和惯性系 s 中观测到的这个物理常量的值是相同的。

3.3 引力公式代入相对论中产生的相对论的缺陷

在一个以速度 v 匀速运动的车厢中，两个用细线悬挂的铁球球心的连线与速度方向平行，即与这个惯性系的坐标轴的方向一致，在这个动系中，两个铁球的质量值都为 1kg ，其距离为一米，万有引力常数值为 $6.67 \times 10^{-11}\text{Nm}^2/\text{kg}^2$ ，引力为 $6.67 \times 10^{-11}\text{N}$ 。

在与地面静止的静系中，由上面得出的新原理可知，物理常量值在任何惯性系中是相同的，所以在静系中观测到动系中的万有引力常数值是相同的，为，在静系中观测到的两铁球的质量值设为 $n\text{kg}$ ，我们假设狭义相对论中的长度缩短理论是正确的，所以在静系中观测到的距离值为

$\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}\text{m}$ ，把这些代入万有引力公式，为了保持万有引力

常数值的不变，在静系中观测到的每个铁球的引力质量值变为 $\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}\text{kg}$ ，这是一个重要的发现，且在静系中观测到的万有引力值也不变。

近代物理认为，惯性质量等效于引力质量。通过上面可知，惯性质量并不等效于引力质量。处在以速度 v 运动的惯性系中的一个物体，在静系中观测到它的引力质量为

$$m = m' \sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}, \text{ 它的惯性质量为 } m = \frac{m_0}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$

上式中 m' 为在动系中观测到的这个物体的引力质量， m_0 这个物体在静系中处于静止时的引力质量。

在惯性系中决定能量大小的是引力质量，根据质能联系方程可得，质量正比于能量，所以在动系中存在一物体的能量为 E' ，在静系中观测到的这一能量为 $E = E' \sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}$ 。

还是动系中的两个铁球，它们球心的连线的方向设置成任意的一个方向，在动系中它们距离为一米，铁球质量为 $6.67 \times 10^{-11}\text{Nm}^2/\text{kg}^2$ 一千克，在静系中必然观测到万有引力常数值不变，为，在静系中观测的铁球的质量为 $\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}(\text{kg})$ ，把这些代入引力公式，经过分析可得，在静系中观测到两个铁球距离为 $\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}(\text{m})$ ，观测的引力仍为 $6.67 \times 10^{-11}\text{N}$ 。所以在动系中任何一个距离 L' ，在静系中观测这个距离为 $L = L' \sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}$ 。

狭义相对论的尺缩效应是仅在静系中的 x 方向观测到尺缩效应，而以上得出在静系中任何方向都能观测到尺缩效应，这就是狭义相对论存在的重大缺陷。

既然空间距离公式是统一的，时空时空，时间和空间是高度联系和绑定在一起，所以时间公式也有一个统一和简单明了的公式，它不以物体在动系中位置不同而改变。

在动系中存在一个铯原子钟，它的一秒是铯-133 两个超精细能级跃迁的 9192631770 个周期所持续的时间，在动系中，这一光子能量为 E' ，频率为 r' ，周期为 t' 。

$$\text{在静系中观测的能量为 } E = E' \sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}} = hr' \sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}} = hr$$

$$\text{由上式可得， } r = r' \sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}, \text{ 由这可得， } t = t' \sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}$$

在静系中观测的一秒为 $9192631770t' \sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}$ ，所以时间被延长了。在静系的一时刻必然对应着动系中某一时刻，这个动系中的一个时刻对应的静系中的某个时刻是唯一的。在动系中存在一时刻或时间，在静系中观测到的时刻或时间为， $T = T' \sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}$ 。

以上公式对照洛伦兹变换公式，时刻公式也不相同，

这也是狭义相对论存在的缺陷之一。

4 由新的时空公式得出一些理论

4.1 得出的一些物理量的变化

由于在静系中观测到的动系中万有引力值不变，引力是力的最基本的力，我们拓宽研究可得出，在一个惯性系观测另一个惯性系中任一力的值，其值不变，即在任何惯性系或空间，力值不变，这是一个重要的物理结论。

假设在以上动系中存在一个正电子和一个负电子，电荷为 $+q_1$ 和 $-q_1$ ，距离设计为一米，它的电场里为： $F = k \frac{q_1 q_1}{r_1^2}$ ，式中 k 为静电力常量， r_1 为距离。

在静系中观测到动系中的 k 值不变，观测到的距离为 $r = r_1 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ ，力值不变，代入电场力方程可得出，在静系中观测到的动系中的电荷值为： $\pm q = \pm q_1 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$

一动系以速度 v 运动，在动系中存在着一个平板电容器，当板面积 s' 的线度远大于间的距离 d' 时，可忽略边缘效应，板可视为无限大带电板，极板间的电场是均匀的。

设两极板表面所带电量分别为 $+q'$ 和 $-q'$ ，电荷分布在内表面，其面密度为 σ' 。

由高斯定理得板间电场强度为： $E' = \frac{\sigma'}{\epsilon_0}$ ，由这可得：

$$u'_{AB} = E'd' = \frac{d'q'}{\epsilon_0 s'}, \text{ 其电容为: } c' = \frac{q'}{u'_{AB}} = \frac{\epsilon_0 s'}{d'}$$

在静系中观测到， $d = \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \cdot d'$ $s = \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right) s'$

$$q = \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \cdot q' \quad \sigma = \frac{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \cdot q'}{\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right) s'} = \frac{\sigma'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

由以上这些式子可得出在静系中观测到的场强和电位差及电容的值。

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0} = \frac{E'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad u_{AB} = Ed = u'_{AB} \quad c = \frac{q}{u_{AB}} = \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \cdot c'$$

用同样的方法能求出静系中观测到的其它形式的电容器的场强和电位差及电容的值，求出的结果和以上得出的一样。

在动系中有一根无限长载流直导线，其电流强度为 I' ，距离导线 a' 的那一点的磁感应强度 $B' = \frac{\mu_0 I'}{2\pi \cdot a'}$ ，在静系中观测到的电流强度的值如下，

$$I = js = nq v_1 \cdot s = \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right) n' q' v'_1 \cdot s' = \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right) I'$$

$a = \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \cdot a'$ ，上式中 j 为电流密度， n 为导体单位体积内自由电子密度， v_1 为静系中以静系的尺子去测量动系

中电子运动的距离（这个距离不包括动系移动的距离）和静系中观测到的时间去计算出的导线中的电流速度。

在静系中观测到动系中那一点的磁感应强度为：

$$B = \frac{\mu_0 \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right) I'}{2\pi \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \cdot a'} = \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \cdot B'$$

任何形式的磁场都和上面一样，具有相同的性质。我们已经证明过，为了节略篇幅，在这里不再证明。

在动系中，回路的自感和自感电动势的关系为：

$E' = -L' \frac{dI'}{dt'}$ 由于自感电动势和电势差为一类的事物，所以在静系中可观测到： $E = E'$ ，根据静系中观测到的动

系中的电流强度的公式和静系中观测到的动系中的时间公

式可得， $\frac{dI}{dt} = \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{\frac{1}{2}} \frac{dI'}{dt'}$ ，将上式代入 E 的表达式得：

$$E = -L \frac{dI}{dt} = -\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{\frac{1}{2}} L' \frac{dI'}{dt'}$$
，综合上面的几个式子可得，

在静系中观测到的自感系数为： $L = \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-\frac{1}{2}} L'$

4.2 得出的震荡电路周期

在动系中一震荡电路的周期由下式决定， $T' = 2\pi \sqrt{L' C'}$ ，

在静系中观测到， $L = \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-\frac{1}{2}} L'$ $c = \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \cdot c'$ ，所以在

静系中观测到的周期为： $T = 2\pi \sqrt{LC} = \frac{T'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$ ，这和事实上

的实验结果一致。

以上的结果，是狭义相对论不能通过以上方法所证明和得出的，所以我们理论是正确的，这是狭义相对论存在的局限性和不足所引起的。

5 结论

利用新的方法研究狭义相对论论，我们得出其存在的矛盾，这为建立新的时空理论，打下了良好的基础，并对电动力学产生重大影响。

参考文献

- [1] 梁绍荣，池无量，杨敬明，1988. 波动光学与近代物理. 137, 北京师范大学出版社。
- [2] 爱因斯坦奇迹年-改变物理学面貌的五篇论文，约翰，2001，上海科技教育出版社，100-102。
- [3] 梁绍荣，池无量，杨敬明，1988，电磁学. 北京师范大学出版社，12，79-80,183,179-182