

科技创新与工程

Technological Innovation and Engineering

Volume 2 Issue 5 May 2025 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



技术创新与工程

Technological Innovation and Engineering

Volume 2 · Issue 5 · May 2025 · ISSN 3060-8996(Print) 3060-8988(Online)



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

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

Database Inclusion



Google Scholar



Crossref



China National Knowledge Infrastructure
www.cnki.net

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

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>



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 2 Issue 5 May 2025
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 基于 NB-IoT 的供水管网监测系统应用研究
/ 杨霞松
- 4 AI 智能监控赋能钢铁企业安全管理的实践路径与成效研究
/ 宋望
- 7 铠装钢丝多道次拉拔工艺的强度——韧性协同调控机制
/ 陶曼桦
- 10 食品中农药残留检验的前处理方法优化研究
/ 禄彦科
- 13 高速数据链中自适应编码调制技术的工程化应用
/ 胡亮
- 16 新能源背景下电力营销模式转型路径探索
/ 曹秋林
- 19 “装表接电”一站式服务模式的客户满意度提升策略研究
/ 齐兵
- 22 油气田远程智能注脂与液控技术的创新与应用
/ 牛洪媛 王浩川 杨杰 杜志宏
- 25 基于改进 Interbrand 模型的短视频账号估值——以抖音账号“鹿小草”为例
/ 利文萱 徐瑞
- 28 煤矿综采工作面智能化开采过程中的煤质控制技术
/ 李军
- 31 铝合金壁板的高效机床加工技术研究
/ 刘丽英
- 34 基于多 Smart Actor 系统的分布式能源与配电网互动运行控制方法
/ 邓正东 雷宣念
- 37 基于互联网 + 公路交通智联管理的突发事件应急处置对策思考
/ 宁建红 汪焕锋 张龙华
- 40 数字音频在广播电视工程中的同步传输与控制技术研究
/ 刘英魁
- 43 现代室内装饰设计中对传统工艺美术元素空间应用的探究
/ 郝涛
- 46 “全灾种”背景下危化品处置能力短板与练兵对策
/ 纪云飞
- 49 电力负荷预测在电网运行管理中的应用与改进
/ 马战飞
- 52 智能电网背景下电力工程项目全生命周期管理优化探讨
/ 潘志超
- 55 新能源电力工程项目风险管理体系建设与应用分析
/ 吴伟权
- 58 高压电气设备状态监测与故障诊断技术的应用研究
/ 陈虞云
- 61 分布式能源接入的配电台区过载主动防御与重配可视化策略研究
/ 田晓鹏 戈狄 张洪涛 刘乐康 刘博
- 64 打造世界级“VR 中心”战略的新质生产力发展途径
/ 王雅莉
- 68 火电厂燃料皮带接头硫化工艺优化及强度可靠性提升研究
/ 周维国
- 71 火电厂汽轮机高压缸叶片磨损故障诊断与检修修复工艺优化研究
/ 高峰
- 74 火电厂余热利用系统与循环水系统耦合运行的能效提升研究
/ 于志璞
- 77 火电厂输煤皮带跑偏原因分析及自适应纠偏装置设计与应用
/ 徐东升
- 80 太空领域军民融合研究热点演变
/ 杨彤 董鸿波 陆云峰
- 84 汽车 eHMI 交互设计：发展现状、挑战与未来趋势
/ 陈哲
- 87 基于昆仑大模型的液化石油气终端行业智能应用研究
/ 周锦贵 李喆 李凌翔 刘熙成
- 91 消防钢瓶防爆裂综合预警系统的构建研究
/ 俞太亮 王军港 王守运 刘益晗
- 96 湖南教育强省战略下科研成果转化区域发展动力的路径与机制研究
/ 陈刚 李毅梅 何小宁
- 99 光纤环圈导热固化胶的制备及其对环圈温度特性的影响
/ 熊旭 丁燕鸿 熊水城
- 102 总磷的测定及监测对比分析
/ 曹海迪
- 108 基于主 - 客观一体化的海上风电塔筒状态评估方法
/ 徐狄 陈大江 张军波 张燕超 李佳禧

- 1 Application research of water supply network monitoring system based on NB-IoT / Xiasong Yang
- 4 Research on the Practice Path and Effectiveness of AI Intelligent Monitoring in Safety Management of Iron and Steel Enterprises / Wang Song
- 7 Mechanism of Strength-Toughness Synergistic Regulation in Multi-Stage Drawing Process of Armored Steel Wire / Manhua Tao
- 10 Study on optimization of pretreatment methods for pesticide residue testing in food / Yanke Lu
- 13 Engineering Application of Adaptive Coding and Modulation Technology in high-speed Data links / Liang Hu
- 16 Exploration of the Transformation Path of Electric Power Marketing Mode under the Background of New Energy / Qiulin Cao
- 19 Research on customer satisfaction improvement strategy of “meter installation and power connection” one-stop service mode / Bing Qi
- 22 Innovation and application of remote intelligent grease injection and liquid control technology in oil and gas fields / Hongyuan Niu Haochuan Wang Jie Yang Zhihong Du
- 25 Short video account valuation based on improved Interbrand model—Taking Douyin account “Lu Xiaoca” as an example / Wenxuan Li Rui Xu
- 28 Coal quality control technology in intelligent mining of fully mechanized coal mine working face / Jun Li
- 31 Research on efficient machining technology for aluminum alloy panels / Liying Liu
- 34 Interactive operation control method of distributed energy and distribution network based on multi-Smart Actor system / Zhengdong Deng Xuannian Lei
- 37 Thinking on emergency response strategies for emergencies based on Internet + intelligent management of highway traffic / Jianhong Ning Huanfeng Wang Longhua Zhang
- 40 Research on synchronous transmission and control technology of digital audio in radio and television engineering / Yingkui Liu
- 43 The exploration of the spatial application of traditional arts and crafts elements in modern interior decoration design / Tiao Hao
- 46 “All kinds of disasters” background, the short board of hazardous chemical disposal ability and training countermeasures / Yunfei Ji
- 49 Application and improvement of power load forecasting in power grid operation management / Zhanfei Ma
- 52 Discussion on optimization of whole life cycle management of power engineering projects under smart grid background / Zhichao Pan
- 55 Construction and application analysis of risk management system for new energy power engineering projects / Weiquan Wu
- 58 Research on application of condition monitoring and fault diagnosis technology for high voltage electrical equipment / Yuyun Chen
- 61 Research on overload active defense and reconfiguration visualization strategy of distribution station area for distributed energy access / Xiaopeng Tian Di Ge Hongtao Zhang Lekang Liu Bo Liu
- 64 A new quality productivity development path for the strategy of building a world-class “VR center” / Yali Wang
- 68 Research on Optimization of Vulcanization Process and Enhancement of Strength and Reliability of Fuel Belt Joints in Thermal Power Plants by / Weiguo Zhou
- 71 Research on Fault Diagnosis and Maintenance Process Optimization of High-Pressure Cylinder Blade Wear in Thermal Power Plant Steam Turbines by / Feng Gao
- 74 Study on Energy Efficiency Improvement through Coupled Operation of Waste Heat Utilization System and Circulating Water System in Thermal Power Plants by / Yu Zhipu
- 77 Analysis of Causes and Design of Adaptive Alignment

- Correction Device for Coal Conveying Belts in Thermal Power Plants by / Dongsheng Xu 96
- 80 Evolution of hot research topics in civil-military integration in space / Tong Yang Hongbo Dong Yunfeng Lu 99
- 84 Automotive eHMI Interaction Design: Current Status, Challenges and Future Trends / Zhe Chen 102
- 87 Research on Intelligent Applications for Liquefied Petroleum Gas Terminals Based on the Kunlun Large Model / Jingui Zhou Zhe Li Lingxiang Li Xicheng Liu 108
- 91 Research on the Construction of a Comprehensive Early Warning System for Fire Steel Cylinder Explosion Prevention / Tailiang YU Jungang Wang Shouyun Wang Yihan Liu 108
- Research on the path and mechanism of transforming scientific research achievements into regional development impetus under the strategy of building Hunan into a strong education province / Gang Chen Yimei Li Xiaoning He
- Preparation of a Thermally Conductive Adhesive for Fiber Optic Coils and Its Impact on the Coil's Temperature Characteristics / Xu Xiong Yanhong Ding Shuicheng Xiong
- Comparative analysis of total phosphorus determination and monitoring / Haidi Cao
- Offshore wind turbine tower condition assessment method based on subjective-objective integration / Qiu Di Djiang Chen Junbo Zhang Yanchao Zhang Jiaxi Li

Application research of water supply network monitoring system based on NB-IoT

Xiasong Yang

Weifang Institute of Technology, Weifang, Shandong, 261000, China

Abstract

With the acceleration of urbanization, water supply system management and maintenance face increasing challenges. Traditional pipeline monitoring methods suffer from issues such as poor real-time performance, low accuracy, and high maintenance costs, making it imperative to develop new monitoring solutions. This paper proposes an intelligent monitoring system for water supply pipelines based on Narrowband Internet of Things (NB-IoT) technology. By integrating NB-IoT with smart sensors, the system can obtain real-time pipeline status data and achieve effective monitoring and management through data analysis and processing. The paper details the system's design framework, key technologies, and practical applications, analyzes its advantages in enhancing operational efficiency and reducing management costs, and explores future development directions.

Keywords

NB-IoT; water supply network; intelligent monitoring; Internet of Things; data analysis

基于 NB-IoT 的供水管网监测系统应用研究

杨霞松

潍坊理工学院, 中国 · 山东 潍坊 261000

摘要

随着城市化进程的加速, 供水系统的管理与维护面临着越来越多的挑战。传统的供水管网监测方式存在实时性差、精确度低、维护成本高等问题, 亟须一种新的监测手段。本文基于窄带物联网 (NB-IoT) 技术, 提出了一种适用于供水管网的智能监测系统。通过结合NB-IoT技术与智能传感器, 能够实时获取管网状态数据, 并通过数据分析与处理实现对供水管网的有效监控与管理。文章介绍了系统的设计方案、关键技术以及实际应用, 分析了其在提高供水管网运营效率、降低管理成本等方面的优势, 并探讨了未来的发展方向。

关键词

NB-IoT; 供水管网; 智能监测; 物联网; 数据分析

1 引言

随着城市发展进程的不断推进, 供水管网作为城市基础设施的重要组成部分, 其运行状态的安全性和稳定性日益成为人们关注的焦点。传统的供水管网监测系统往往依赖人工巡检或者较为简单的自动化系统, 存在着实时性差、精度不高、人工成本高等问题。因此, 如何实现供水管网的精细化管理, 提高水资源的利用效率, 降低水损耗, 成为亟待解决的问题。

窄带物联网 (NB-IoT) 作为一种新型的低功耗广域网 (LPWAN) 技术, 具有广泛的应用前景。其覆盖范围广、

能耗低、数据传输稳定等特点使其在智慧城市建设中展现出强大的应用潜力。基于 NB-IoT 技术的供水管网监测系统能够实时采集管网内的水流量、水压、水温等参数, 并通过数据传输平台进行实时监控和数据分析。通过对供水管网的实时监控与分析, 可以实现对管网运行状态的早期预警, 进而减少故障的发生, 优化水资源的调度与分配。

本文将从供水管网监测的需求出发, 分析 NB-IoT 技术在供水管网中的应用, 探讨系统设计方案, 并对该技术的应用前景进行深入分析。

2 供水管网监测的需求分析

2.1 供水管网监测现状

传统的供水管网监测技术多依赖于人工巡检或简单的自动化监测设备。然而, 这些传统方式存在许多局限性。例如, 人工巡检不仅需要大量的人力资源, 而且在复杂的管网环境中难以覆盖所有区域; 而现有的自动化监测设备普遍存

【基金项目】潍坊市科技发展计划《基于 NB-IoT 的供水监测系统应用研究》(项目编号: 2023GX078)。

【作者简介】杨霞松 (1989-), 女, 中国山东聊城人, 硕士, 副教授, 从事智能技术与自动化装置研究。

在数据更新不及时、设备维护困难等问题^[1]。因此，迫切需要一种新的监测手段，能够有效克服这些不足。

2.2 NB-IoT 技术的优势

NB-IoT 技术作为一种专为物联网应用设计的无线通信技术，具有覆盖范围广、低功耗、低成本等显著优势。特别是在地下管网等恶劣环境下，NB-IoT 技术能够提供稳定可靠的信号传输。其低功耗特性使得传感器设备能够长期稳定工作，大大降低了维护成本和电池更换频率。相比传统的监测方式，基于 NB-IoT 技术的监测系统具有更高的实时性、精确度和可靠性。

2.3 供水管网监测的目标

供水管网监测的目标不仅是实时采集水流量、压力、温度等数据，还应能够通过数据分析发现管网中潜在的隐患问题，如漏水、管道老化等。进一步的目标是通过数据驱动的决策支持系统，优化供水管网的调度，减少资源浪费，提高供水效率。

3 基于 NB-IoT 的供水管网监测系统设计

3.1 系统架构

基于 NB-IoT 的供水管网监测系统通常包括传感器节点、数据传输网络、数据处理平台和用户终端四大部分。传感器节点负责采集管网内的水流、压力、温度等关键参数；数据传输网络利用 NB-IoT 技术将传感器数据传送到后台数据处理平台；数据处理平台对采集的数据进行存储、分析和展示，提供实时监控和报警功能；用户终端则为管网运营人员提供管理和决策支持界面。

3.2 传感器节点的设计

传感器节点是监测系统中的核心组件，其主要作用是采集管网内部的各项数据。常用的传感器包括流量传感器、压力传感器、温度传感器等。这些传感器的选择需考虑到管网的环境特性以及监测数据的准确性^[2]。同时，为了确保长期稳定运行，传感器节点应具备低功耗特性，并能够在极端环境下正常工作。

3.3 数据处理与分析

数据采集后需要通过数据处理平台进行分析。首先，采集的数据会经过预处理，如去噪、归一化等，确保数据的准确性和可靠性。然后，系统通过大数据分析技术，结合管网的历史运行数据，进行趋势预测和异常检测。例如，系统可以根据实时压力和流量变化，预测管网可能出现的泄漏点，及时发出报警并进行维修调度。

4 基于 NB-IoT 的供水管网监测系统应用实践

4.1 系统在实际中的部署

在实际应用中，NB-IoT 技术已经被广泛应用于供水管网的监测和管理。具体实施过程中，多个传感器节点被部署在供水管网的关键位置，包括水源地、泵站、管道交汇处等，通过传感器实时监测管网内部的水流量、压力、温度等参数。

这些传感器通过 NB-IoT 无线通信网络与后台数据中心连接，将采集到的数据实时传输至云平台进行存储和处理。供水公司通过该系统可实时监控管网的运行状态，及时发现水压异常、流量失常或管道破裂等问题，迅速做出反应。

例如，在某城市的供水管网中，NB-IoT 传感器被应用于全城范围的供水管道监测。系统每分钟都会采集一次水流量数据，实时反馈给运维人员，以便及时调整供水策略，避免可能出现的水压波动或者漏水问题。由于 NB-IoT 技术具有广泛的覆盖能力，即使在地下深处或偏远区域的管道，也能够稳定传输信号，保证数据的实时性和完整性。此外，通过建立管网监控系统，供水企业能够及时掌握管网的运行状况，避免了传统人工巡检所带来的效率低下和盲点问题，极大提升了供水管理的精度和响应速度。

4.2 系统性能分析

从系统性能的角度来看，基于 NB-IoT 的供水管网监测系统在多个方面表现出了其技术优势。首先，NB-IoT 具有较强的抗干扰能力和较低的信号衰减，在城市环境中的应用，尤其是地下管网监测时，能够确保数据的稳定传输。该技术采用了低功耗广域网（LPWAN）架构，能够在较低的频段进行通信，减少了对高带宽的需求，因此能够在极端环境下长期稳定运行^[3]。其次，NB-IoT 传感器的低功耗特性使得设备能够在无需频繁更换电池的情况下，稳定运行数年，极大减少了设备的维护成本。

其次，系统在数据传输方面也表现出了极高的稳定性。NB-IoT 能够有效传输大规模的数据，即便在高频次传输的情况下，依然能够保证连接的稳定性和数据传输的准确性。这对于供水管网监控系统而言尤为重要，因为系统需要持续不断地获取实时数据并及时反馈。例如，通过监测水流量和水压的变化趋势，系统可以在水压异常时迅速报警，提醒工作人员进行检查。而且，系统能够做到低延迟的响应，确保在突发事件发生时能够第一时间处理。此外，数据处理平台也能够对采集的数据进行智能分析，发现潜在的风险点，提前做出预警。

4.3 经济效益分析

采用 NB-IoT 技术的供水管网监测系统不仅在技术层面上表现突出，更在经济效益方面带来了显著的提升。首先，通过实时监控，供水公司能够及时发现管网泄漏等故障问题，避免了传统方式中因漏水导致的水资源浪费。根据相关研究，城市供水管网每年因管道泄漏造成的水资源浪费占总水量的 10% 以上，而通过 NB-IoT 监测系统的早期预警，能够有效减少这些损失。通过及时发现泄漏点并进行修复，水损率显著降低，从而带来可观的经济效益^[4]。

其次，NB-IoT 技术的应用能够大幅降低传统人工巡检的成本。以往，供水公司需要派遣大量工作人员进行巡检，尤其是偏远地区，巡检频繁且时间成本较高。借助 NB-IoT 技术，系统能够自动采集并上传数据，供水公司只需对异常

数据进行远程分析和处理，这不仅降低了人力成本，还提高了管理效率。通过减少人工巡检的工作量，供水公司能够将资源集中到更为重要的工作上，如管网的优化调度和维修工作。

最后，NB-IoT 监测系统的智能化和自动化管理带来了整体运营成本的降低。通过数据分析，系统可以优化供水管网的运行策略，减少不必要的水资源浪费，实现资源的合理调配。例如，当系统发现某一区域的水压过高时，自动调整供水量，从而避免管道爆裂或设备损坏的情况发生。通过对供水调度的精细化管理，供水公司能够进一步提高资源的利用率，降低整体运营成本，提升经济效益。

5 存在的挑战与发展方向

5.1 技术挑战

尽管 NB-IoT 技术为供水管网的监测与管理带来了许多优势，但在实际应用过程中，仍然面临一些技术性挑战。首先，传感器节点在恶劣环境中的稳定性仍需进一步优化。供水管网的环境复杂，传感器需适应极端天气、地下水浸泡以及管道腐蚀等环境条件。虽然 NB-IoT 技术本身具有较强的抗干扰能力，但在一些特殊环境下，仍可能受到外界因素的影响，导致数据丢失或传输中断。因此，未来需要在传感器的防护技术和稳定性方面进行更多的研究与改进。

其次，数据的实时性和准确性在大规模应用中仍存在一定的挑战。尤其是在传输网络较为复杂的地区，数据传输的稳定性会受到网络质量、信号覆盖等多种因素的影响。在大规模部署传感器节点时，如何确保传感器节点与数据传输网络的高效配合，以及如何解决可能出现的通信延迟、丢包等问题，是当前技术面临的难点之一。未来的研究可以重点关注如何提升数据传输的稳定性和可靠性，确保供水管网监测的实时性和准确性。

5.2 未来发展方向

随着 NB-IoT 技术的不断发展，供水管网监测系统未来将朝着更加智能化和自动化的方向发展。首先，人工智能与大数据分析技术的结合，将使得供水管网监测系统能够更加精准地预测管网的运行状态。通过对历史数据的深入分析，系统将能够实时预测管道的维护需求，提前发出预警，避免设备的故障或管道的损坏。此外，机器学习技术可以帮助系统自动识别潜在的风险点，并提供优化的决策方案。

另外，随着 5G 技术的逐步普及，NB-IoT 技术的结合

将进一步提升供水管网监测系统的性能。5G 网络提供了更大的带宽和更低的延迟，将使得数据传输更加迅速，尤其是在数据量庞大的情况下，5G 技术能够提供更稳定的通信支持。这为更大范围、更高精度的供水管网监测提供了可能^[5]。

最后，未来的供水管网监测系统将更加注重系统间的联动和协同。通过物联网技术，多个城市的供水系统能够互联互通，实现跨区域的管网调度与资源共享。随着全球智慧城市建设的推进，基于 NB-IoT 的供水管网监测系统将成为城市基础设施数字化转型的重要组成部分。

6 结语

基于 NB-IoT 的供水管网监测系统通过结合现代通信技术与智能化管理手段，为供水管网的实时监控与管理提供了创新的解决方案。该系统通过部署智能传感器节点，对水流量、压力、温度等关键参数进行实时采集和监测，并借助 NB-IoT 网络将数据传输至云平台，实现数据的实时分析和处理。系统能够对管网中的潜在故障进行早期预警，并通过远程监控和智能分析，帮助供水公司实现对供水管网的精确调度，提升了管网的运行效率。

此外，基于 NB-IoT 技术的供水管网监测系统具有低功耗、广覆盖和高可靠性的特点，使得传感器能够长期稳定工作，减少了设备维护的成本，降低了人力巡检的需求，进而减轻了运营成本的负担。在减少水资源浪费方面，系统能够实时监测管网中的水流和压力变化，及时发现并修复泄漏点，避免了因漏水造成的大水损失。这些优势不仅提高了供水管网的运营效率，也为环境保护和水资源节约做出了积极贡献。尽管当前系统已经展示了显著的效果，但在广泛应用的过程中，仍然存在一些技术挑战。

参考文献

- [1] 迎九.NB-IoT 有望用于水表和气表行业[J].电子产品世界, 2017,24(11):23-25.
- [2] 韩旭,沈永滨.基于NB-IOT的城市供水管网监测系统设计[J].科技创新与应用,2019,(22):5-7.
- [3] 洪俊贤,龚珑聰,许俊鸽.基于NB-IoT的DMA用于供水管网漏损控制的研究进展[J].市政技术,2020,38(04):197-199+203.
- [4] 吴津津,毛家润,袁宏永,等.基于NB-IoT的消火栓状态实时监测方法研究[J].消防科学与技术,2020,39(11):1561-1564.
- [5] 陈海峰.NB-IoT技术在智能消防栓系统中的应用研究[J].长江信息通信,2021,34(09):108-110.

Research on the Practice Path and Effectiveness of AI Intelligent Monitoring in Safety Management of Iron and Steel Enterprises

Wang Song

Hualing ArcelorMittal Automotive Sheet Co., Ltd., Loudi, Hunan, 417009, China

Abstract

As a pillar industry of the national economy, the steel sector is characterized by high-temperature operations, high-pressure environments, elevated workstations, and significant exposure to dust and hazardous gases, posing substantial safety management challenges. To address risks such as unauthorized personnel access, Hualing ArcelorMittal Automotive Steel Co., Ltd. (VAMA) has developed an AI-powered production safety monitoring platform. By integrating visual analytics and edge computing technologies, this system enables 24/7 real-time surveillance and intelligent alerts in high-risk zones. Field tests have demonstrated over 95% object recognition accuracy, effectively reducing mechanical injury risks and earning the “Model Application Scenario” award at Hunan Province’s “Intelligent Empowerment for Ten Thousand Enterprises” competition. This paper examines the architectural design, technical implementation, and operational outcomes of VAMA’s AI-driven monitoring system, providing insights for digital transformation in steel enterprise safety management.

Keywords

AI-powered monitoring; steel industry; safety management; edge computing; intelligent alert systems

AI 智能监控赋能钢铁企业安全管理的实践路径与成效研究

宋望

华菱安赛乐米塔尔汽车板有限公司，中国 · 湖南 娄底 417009

摘要

钢铁行业作为国民经济支柱产业，其生产过程具有高温、高压、高空作业及粉尘、有害气体多等特点，安全管理难度极大。华菱安赛乐米塔尔汽车板有限公司（VAMA）为解决人员非法入侵等安全风险，构建了生产安全监控AI预警平台。该平台通过整合视觉分析、边缘计算等技术，实现对高风险区域的24小时实时监控与智能预警。经实践，系统对象识别准确率达95%以上，有效降低了机械伤害等事故风险，荣获湖南省“智赋万企”大赛“示范性应用场景”奖。本文以VAMA项目为例，阐述AI智能监控系统的架构设计、技术路线及实施成效，为钢铁企业安全管理数字化转型提供参考。

关键词

AI智能监控；钢铁企业；安全管理；边缘计算；智能预警

1 引言

钢铁生产环节复杂，危险点位多，传统安全监管依赖人工巡检，存在响应滞后、覆盖不足等问题。随着新一代信息技术与制造业的深度融合，“科技兴安”成为钢铁行业安全管理升级的核心路径。国务院安全生产委员会印发的《安全生产治本攻坚三年行动方案（2024—2026年）》明确提出，推动安全生产监管模式向事前预防数字化转型^[1]。在此背景下，人工智能技术在安全监控领域的应用成为必然趋势。

【作者简介】宋望（1987—），男，中国湖北黄冈市人，本科，工程师，从事健康安全管理研究。

华菱安赛乐米塔尔汽车板有限公司（VAMA）作为高端汽车用钢生产企业，2022年因人员非法入侵发生工伤事故后，率先探索AI技术与安全管理的融合路径，构建“生产安全监控AI预警平台”。本文基于该项目的实践经验，从方案设计、技术创新、应用成效等方面展开研究，分析AI智能监控在钢铁企业安全管理中的实用价值与推广前景。

2 企业概况

VAMA 坐落于娄底经济开发区，由湖南钢铁集团与安赛乐米塔尔各持股 50% 合资组建，注册资本 40.1472 亿元，是国家发改委和商务部批准的重点投资项目。公司专注于汽车用钢研发与生产，一期工程 2014 年投产，设计产能 150 万吨；二期项目 2023 年投产，新增 45 万吨产能，整体年

产能达 200 万吨，供应从低碳钢到超高强度钢的全系列汽车用钢。经过多年实践，VAMA 已取得“零”行政处罚、“零”火灾事故、“零”职业病发生的优异成绩，连续实现 2013 天无损工事故，累计百万工时损工事故率仅为 0.23，达到国际先进水平，并先后获得湖南省及全国安全文化建设示范企业、全国青年安全生产示范岗等荣誉称号。

3 项目方案设计

3.1 建设目标

针对酸轧线、镀锌线、连退线三条生产线的高风险区域，通过升级原有 IP 监控架构，新增智能分析设备，构建“事前预防、事中预警、事后溯源”的安全管理模式。一期项目投资 66 万元，重点实现人员非法入侵、工服穿戴、烟雾火灾等异常的智能告警，解决员工及外来人员误入危险区域、机械伤害等问题。

3.2 总体架构

系统采用“云一边一端”三层架构，融合感知、通信、计算与应用能力，具体分为以下层级：

感知层：部署高清摄像头覆盖所有危险区域，配备声光报警器，实时采集现场视频数据并触发联动预警。

通信层：基于 MQTT、HTTP 等协议，通过工业以太网实现摄像头、边缘计算设备与云端平台的数据传输，保障低延迟与高可靠性。

工具层：采用容器化技术支撑边缘计算节点，通过鸿鹄智能计算盒实现本地化视频分析，降低云端算力压力。

业务支撑层：部署边缘计算操作系统，提供视频预览、IPC 接入、算法任务调度等功能，支持单节点调试与小规模部署。

行业应用层：构建视频智能分析综合应用平台，集成设备管理、任务作业、日志管理等模块，与现有宇视监控平台对接，实现弹窗预警、报警存储与溯源查询。



图 1 视频智能分析用平台总体设计架构

3.3 技术路线

纯视觉 AI 方案：通过鸿鹄 AI 智能计算盒部署入侵检测算法，拉取监控视频流实时分析，识别人员闯入后联动摄像机声光报警，同步推送预警信息至管理平台^[2]。

纯视觉 AI + 报警器方案：在视觉识别基础上，增设独立声光报警器（音量 ≥80 分贝），针对不同操作室划分监控区域，实现分区域精准告警，避免干扰^[3]。

多协议集成方案：采用 OAuth2.0、SAML 等协议，实现系统与企业安全信息系统的无缝对接，支持统一认证、权限管理与数据共享。

3.4 核心功能

越线检测：后端设定警戒线，人员靠近或翻越时，操作室立即收到告警信息与图片，设备触发声光警戒阻止危险行为^[2]。

区域入侵检测：针对设备运行等禁止区域，结合时间与空间信息判定人员入侵，过滤动物、异物等误报，减少意外事故^[2]。



图 2 区域入侵检测

安全装备检测：通过 AI 视觉分析识别人员是否佩戴安全帽、穿着工服，未达标时触发语音广播提醒，并存储告警截图与录像^[4]。



图 3 安全装备检测

烟火识别：实时监测烟雾与火焰，联动消防装置启动喷淋，杜绝火灾隐患^[4]。



图4 烟火检测

报警管理：支持 72 个摄像点位声光报警，按区域划分操作室权限，管理员可一键启停算法，操作人员仅能单次关停报警，确保预警有效性^[3]。

4 项目实施成效

4.1 技术创新性

边缘计算能力：构建边缘节点体系，支持多场景算法部署与实时分析，降低数据传输带宽需求，提升预警响应速度^[5]。

智能算法仓库：建立包含越线检测、安全帽识别等算法的动态库，可根据现场需求调优模型，后期可扩展新算法，识别准确率达 95% 以上^[4]。

分区域管控模式：通过权限划分实现操作室与监控点位的精准绑定，如酸轧入口操作室仅管理对应 4 个摄像头，提升监管效率^[6]。

4.2 应用效果

安全监管升级：系统上线后实现高风险区域 24 小时不间断监控，累计告警 30 万条（含检修期素材收集），有效避免上百起潜在安全风险，人员误入危险区域事件发生率下降 80% 以上^[6]。

管理效率提升：替代传统人工巡检模式，减少安全岗位人力投入 30%，同时通过自动化告警与溯源功能，事故调查时间缩短至 1 小时内^[4]。

行业示范认可：项目获湖南省第五届“智赋万企”人工智能产业创新与应用大赛“示范性应用场景”奖，成为钢铁行业“科技兴安”的标杆案例^[7]。

4.3 效益分析

安全效益：显著降低机械伤害、火灾等事故发生率，保障员工人身安全与企业财产安全^[6]。

生产效益：避免因安全事故导致的生产中断，提升设备利用率，间接增加年产能^[7]。

管理效益：推动安全管理从“被动应对”向“主动预防”转型，监管规范化水平提升，通过数字化手段满足合规要求^[1]。

市场竞争力：以智能化安全管理体系增强客户信任，助力汽车板订增长^[7]。

5 可推广性分析

5.1 示范意义

项目验证了 AI 技术在钢铁高风险场景的实用性，其“边缘计算 + 云端协同”架构可复制到其他工业领域，为安全生产数字化转型提供技术范式^[5]。

5.2 推广可行性

技术成熟度：AI 视觉识别、边缘计算等技术已通过实

践检验，算法准确率与系统稳定性满足工业场景需求^[4]。

应用场景广泛：除钢铁外，可拓展至煤矿、化工、建筑、电力等高危行业，用于危险区域管控、安全装备监测等场景^[2]。

经济适用性：一期项目投资仅 66 万元，中小企业可分期投入，运营成本低，回报周期短（预计 1—2 年）^[6]。

政策支持：符合国家“智赋万企”“安全生产治本攻坚”等政策导向，易获地方政府资金与资源支持^[1]。

5.3 推广范围

建议优先在钢铁行业同类企业推广，再逐步拓展至冶金、机械制造等领域，最终形成跨行业的安全生产 AI 监控标准方案^[7]。

6 结语

VAMA 生产安全监控 AI 预警项目的实践表明，AI 智能监控可有效破解钢铁企业安全管理难题，通过“感知 - 分析 - 预警 - 处置”全流程数字化，实现安全监管的精准化与高效化^[4]。项目不仅带来显著的安全与经济效益，更验证了人工智能技术在工业安全领域的应用价值^[6]。

下一步，VAMA 将从三方面推进项目升级：一是深化算法研发，提高复杂环境下识别准确率，降低误报率至 3% 以下^[2]；二是拓展功能模块，新增设备状态监测、能耗分析等场景，构建一体化工业安全平台^[5]；三是启动二期项目，全面拓展全公司，优化算法功能进一步助力企业安全管理水平提升^[7]。

参考文献

- [1] 国务院安全生产委员会. 安全生产治本攻坚三年行动方案（2024—2026 年）[Z]. 2024.
- [2] 李佳, 杨明. 计算机视觉技术在工业危险区域入侵检测中的应用 [J]. 仪器仪表学报, 2022, 43 (3): 123-131.
- [3] 国家标准化管理委员会. GB/T 30574-2014 工业场所作业安全视频监控系统技术要求 [S]. 2014.
- [4] 王健, 李刚. 人工智能在工业安全监控中的应用研究进展 [J]. 中国安全科学学报, 2023, 33 (5): 1-9.
- [5] 张思远, 刘军. 边缘计算与云计算协同在智能制造中的实践 [J]. 计算机集成制造系统, 2022, 28 (8): 2345-2356.
- [6] 陈志强, 赵敏. 钢铁企业安全生产数字化转型路径研究——基于“科技兴安”战略视角 [J]. 冶金经济与管理, 2023 (2): 34-38.
- [7] 中国钢铁工业协会. 钢铁行业安全生产智能化发展报告（2023）[R]. 2023.

Mechanism of Strength-Toughness Synergistic Regulation in Multi-Stage Drawing Process of Armored Steel Wire

Manhua Tao

Jiangsu Huaneng Cable Co., Ltd., Gaoyou, Jiangsu, 225600, China

Abstract

This study investigates the balance between strength and toughness during multi-stage drawing processes of armored steel wire, analyzing microstructural evolution, mechanical property changes, and residual stress distribution patterns. Results demonstrate that rational allocation of deformation increments and optimization of process parameters can enhance strength while effectively delaying toughness degradation, achieving synergistic performance enhancement. Through systematic experimental and theoretical analyses, this research reveals the microscopic mechanisms underlying coordinated strength-toughness evolution during multi-stage drawing processes, establishing a mapping relationship between process parameters and material properties.

Keywords

armored steel wire; multi-pass drawing; strength; toughness; synergistic regulation

铠装钢丝多道次拉拔工艺的强度——韧性协同调控机制

陶曼桦

江苏华能电缆股份有限公司, 中国 · 江苏 高邮 225600

摘要

本文针对铠装钢丝多道次拉拔过程中的强度与韧性平衡问题, 研究了显微组织演化、力学性能变化及残余应力分布规律。结果表明, 合理分配道次变形量并优化工艺参数, 可在提升强度的同时有效延缓韧性衰退, 实现性能的协同优化。本研究旨在通过系统实验与理论分析, 揭示铠装钢丝在多道次拉拔过程中强度与韧性协同演化的微观机制, 形成工艺参数与性能之间的映射关系。

关键词

铠装钢丝; 多道次拉拔; 强度; 韧性; 协同调控

1 引言

铠装钢丝作为电缆、防护缆、石油钻探绳索及海洋工程索具的重要承载构件, 其服役环境通常具有高载荷、强冲击以及海水或油气介质腐蚀等特点。因此, 该类钢丝不仅需具备高强度以抵御拉伸断裂, 还需保持足够韧性以抵抗冲击与疲劳断裂。

然而, 在传统制造过程中, 提升钢丝的抗拉强度往往伴随塑性和韧性的显著下降, 导致服役安全性降低。这种“强度—韧性”矛盾是铠装钢丝制造中的核心技术瓶颈。

多道次拉拔工艺因其较低单道次变形量和更均匀的应变分布, 可以在累积形变的同时实现组织细化和织构优化, 有望在较宽性能范围内实现强度与韧性的协同提升。因此, 深入研究其作用机制对于提升铠装钢丝整体性能、降低服役风险意义重大。

【作者简介】陶曼桦 (1997-), 女, 中国江苏高邮人, 硕士, 工程师, 从事承荷探测传感电缆研发及产业化研究。

国内对铠装钢丝多道次拉拔的研究多侧重于工艺参数对抗拉强度的影响, 较少涉及微观组织演化与韧性关联规律的定量分析, 也缺乏针对铠装钢丝实际服役条件的综合优化研究。

总体而言, 现有成果虽揭示了部分工艺与性能关系, 但仍缺乏能解释“高强度—高韧性”同步获得的完整协同调控机制模型。

2 多道次拉拔工艺原理与材料基础

2.1 铠装钢丝的化学成分与初始组织特征

本研究所选用的铠装钢丝原料主要为高碳钢, 碳含量通常处于 0.70% ~ 0.85% 范围, 能够保证较高的基体强度与硬度, 同时含有少量硅 (Si 0.15%~0.35%) 与锰 (Mn 0.40%~0.80%), 用于提高淬透性、增强固溶强化作用并改善钢丝的抗磨损性能。在某些特殊工况, 如海洋辐射环境或强腐蚀介质条件下, 还会在合金成分中添加适量的铬和镍元素, 以提升耐腐蚀性和韧性保持能力。钢丝在热处理状态下, 其初始显微组织通常由细珠光体和板条索氏体

组成。珠光体层片细致且分布均匀，片层间距一般在 $80\text{~nm} < \text{del} < 120\text{~nm}$ 区间，这种细化形态有助于在保持一定塑性的同时提供较高的屈服强度。碳化物形态主要为沿珠光体层片分布的片状碳化物以及弥散分布于铁素体基体内的细粒状碳化物。在此状态下，钢丝的屈服强度多在 $800\text{~MPa} < \text{del} < 1000\text{~MPa}$ ，延伸率为 $8\% \sim 12\%$ ，具备一定韧性与冷加工潜力，但其强度尚不能满足最终服役条件，因此需要通过后续多道次拉拔加工进一步提升。

2.2 多道次拉拔变形机理

多道次拉拔是一种通过连续多次塑性变形逐步将钢丝直径缩小至目标尺寸的加工方法。与单道次大变形不同，多道次工艺在每次加工时的压缩率较低，这样不仅降低了加工力和设备负荷，还能有效减少因应变集中造成的裂纹萌生风险。

在拉拔过程中，钢丝承受着复杂的应力应变状态，轴向上存在持续的拉应力来牵引材料通过模具，同时径向和切向则受制于模具壁的压力和摩擦应力。这种三向应力共同作用下，材料表层应变最为显著，而中心区域应变相对较小，随着拉拔道次数的增加，累积形变不断向内部渗透。

加工硬化是这一过程中最显著的特征之一，塑性变形引起的大量位错生成和堆积造成晶格畸变，从而显著提高屈服强度和抗拉强度。然而过度加工硬话会削弱塑性，因此道次安排需兼顾强度提升与韧性保持。

此外，随着应变增加，原有等轴晶粒被逐渐拉长并转变为纤维状组织，多道次加工中不断形成新的亚晶结构和高角度晶界，这不仅细化了晶粒、改善界面阻碍位错运动的能力，也促使材料组织向特定取向优化，从而进一步影响力学性能表现。

2.3 影响强度与韧性的关键因素

在多道次拉拔过程中，决定最终强度和韧性匹配的主要因素包括：

应变累积与加工硬化速率：均匀且适度的应变累积能在逐步提升强度的同时延缓塑性的下降；若加工硬化速度过快，则容易导致早期脆化失效。晶界结构与尺寸：细小且分布合理的晶粒能有效阻碍位错滑移，提高材料的整体强度；但若晶粒过细或晶界数量过多，在受力时应力集中将导致裂纹在晶界处优先扩展，从而降低韧性。析出相形态与分布：细小、均匀分布的碳化物颗粒有助于位错钉扎，既能维持高强度又减少过度硬化；反之，过大的碳化物或链状/网状连续分布会削弱基体韧性，使裂纹更易连通扩展。残余应力分布：拉拔后的钢丝常在径向与轴向上存在不同的残余应力分布，不均匀的高残余拉应力成为裂纹萌生的源头，降低了疲劳寿命与断裂韧性。

拉拔温升与回复现象：在快速冷作变形过程中，由于摩擦和塑性耗能会产生局部温升，这可能引发部分回复或低温再结晶现象，对位错密度和组织稳定性产生影响，从而改变强度-韧性平衡。

这些因素相互作用，共同决定了多道次拉拔后铠装钢丝的综合力学性能，也为后续的强度-韧性协同调控研究提供了重要的工艺与材料基础。

3 多道次拉拔过程中的强度-韧性演化规律

3.1 强度与韧性变化的总体趋势

在多道次拉拔过程中，铠装钢丝的力学性能呈现出显著的阶段性变化特征：

变形阶段（前若干道次）：应变累积迅速、加工硬化效应强烈，屈服强度与抗拉强度显著上升，提升幅度可达 $15\% \sim 25\%$ ；韧性下降幅度较小，主要由塑性略微衰减引起。中期变形阶段：随着位错密度进一步上升和纤维组织的显著形成，强度继续增长但增幅趋缓，延伸率与冲击韧性呈较明显下降趋势。此阶段，强韧平衡开始出现偏移，高强伴随脆化倾向在局部萌生。末期变形阶段（临近终规格）：材料强化趋于饱和甚至出现加工软化迹象，韧性降至较低水平，延伸率可能不足 $3\% \sim 5\%$ 。此时残余应力集中明显，微裂纹萌生风险显著提高。

3.2 显微组织的演化特征

多道次拉拔的显微组织变化具有强烈的变形主导特征：

等轴晶粒拉长纤维化：在早期阶段，等轴晶粒沿拉拔方向被显著拉长并形成纤维组织，其晶界与拉拔方向夹角减小。**亚晶形成与演化：**高塑性应变推动位错组织化发展，亚晶界密度增加，高角度晶界比例在中后期显著上升，从而实现有效的晶粒细化。**织构强化：**拉拔促使 $\{110\}\langle 111 \rangle$ 和 $\{111\}\langle 112 \rangle$ 等 BCC 强纤维织构生成，这种优选取向进一步增强了轴向强度，但会降低横向韧性。**碳化物形态变化：**原始片状珠光体中碳化物逐渐断裂、溶解并细化为球状或短棒状颗粒，在铁素体基体中呈弥散分布，起到位错钉扎作用。

3.3 残余应力与内部缺陷的形成

多道次拉拔不仅引入塑性变形，还在材料内生成复杂的残余应力场：**径向分布特征：**通常表层呈现残余压应力，中心则为残余拉应力，这与表层应变和冷却条件有关。**裂纹萌生位置：**残余拉应力集中区易成为裂纹萌生的源头，尤其是在拉拔末期或服役疲劳中作用时更为明显。

位错胞与应力集中：高密度位错在局部形成胞状亚结构，并与碳化物或夹杂物界面形成应力集中区，导致微裂纹优先萌生。

3.4 强度-韧性协同关系的阶段性解析

通过拉拔道次与性能指标的对比可发现：在低到中等应变阶段，强度与韧性尚能保持较好的同步提升或稳定关系，此时可以通过适度增加变形量和控制模具角度来获得最佳综合性能。

在高应变阶段，强度提升趋于饱和而韧性急剧衰减，此阶段若不采取中途热处理（如中温回火或低温退火）或工序优化，将难以兼顾两者。最佳强韧匹配区通常位于强度达到目标值的 $80\% \sim 90\%$ 、韧性尚保持在 50% 以上的范围，这也是实际工艺优化的重要区域。

4 强度—韧性协同调控机制分析

4.1 协同调控的核心思路

在多道次拉拔工艺中，强度与韧性之间存在天然的制约关系：塑性变形累积可显著提升强度，但会不可避免地削弱韧性。因此，协同调控的核心在于在强化过程中延缓韧性衰减，即通过组织、相、应力的综合优化，实现强度与韧性的相对兼顾。该机制可浓缩为三大路径：

控制变形节奏：通过合理道次分配与变形量控制，避免应变过快集中导致韧性早期丧失。

组织细化与分级结构构建：利用亚晶细化、高角度晶界增加以及梯度组织分布，获得高强与一定塑性的平衡。析出相与残余应力优化：细小弥散碳化物强化的同时，通过工艺手段调控残余应力分布，减少裂纹萌生源。

4.2 加工硬化与回复的协同作用

加工硬化（位错密度提升）是强度增长的主因，但过度硬化会导致塑性急剧下降。通过在中后期道次中控制拉拔速度与模具角度，可降低瞬时应变速率与摩擦发热，避免局部温升触发不受控的回复或再结晶。

适度回复的作用：弱回复可缓解应力集中、稳定亚结构，同时部分消除位错胞，提高断裂韧性。过度回复的风险：若温升过高导致显著软化，将降低强化效果，破坏强度-韧性平衡。

建议采用间歇式微回火或低温退火工艺，使位错与组织状态在强化和韧性保持之间动态平衡。

4.3 晶粒细化与织构控制

细晶强化效应满足 Hall-Petch 关系，可在高强材料中保持一定的韧性，但需要防止极细晶粒带来的脆化倾向。

早期道次：应注重均匀拉长原始晶粒，为后续细化奠定基础，避免产生加工带状组织。

中期道次：在稳定应变速率下促进亚晶界形成并转化为高角度晶界，实现平均晶粒尺寸 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 的细化水平。

织构调控：强 $\{110\} \langle 111 \rangle$ 织构虽能提升轴向强度，但会牺牲横向塑性；通过在中后期引入交叉拉拔或旋转模拉拔，可抑制织构单一化，改善各向韧性。

4.4 析出强化的优化路径

碳化物的形态和分布是强化与韧性匹配的关键：

弥散强化作用：在多道次变形过程中，碳化物断裂和细化可在铁素体基体内均匀分布，钉扎位错并抑制晶粒长大。避免连续弱化区：应防止碳化物在晶界连续分布形成脆性薄膜，这会成为裂纹快速扩展路径。可通过控制冷却速率、变形温升和适度中间退火来实现。析出-位错交互调节：利用位错作为析出核心，使碳化物定向沉积于位错周围，形成强化网络而不形成脆化链。

5 结语

本研究围绕铠装钢丝多道次拉拔过程的强度-韧性协同调控展开，结合显微组织演变、力学性能变化及残余应力分布特征，得出以下主要结论：

强度与韧性变化规律明确多道次拉拔过程中，屈服强度和抗拉强度呈阶段性上升，早中期增幅显著，末期趋于饱和甚至略有下降；韧性在中后期衰减明显，延伸率下降至 $3\% \sim 5\%$ 区间。显微组织演化与性能提升密切相关等轴晶粒沿拉拔方向纤维化，亚晶界数量和高角度晶界比例逐步增加，细晶效应与织构强化共同作用提升了强度；碳化物断裂、溶解与弥散化显著增强位错钉扎作用。残余应力与微缺陷影响韧性保持拉拔引入的径向残余应力呈“外压内拉”分布，中心拉应力集中易诱发裂纹萌生，微观缺陷与应力集中相互作用加速韧性损失。协同调控的有效路径已构建通过控制变形节奏、优化晶粒细化与织构分布、合理设计析出相形态及调整残余应力梯度，可在高强度前提下延缓韧性衰退，获得较优的强韧匹配区。

5.1 工业应用意义

该强-韧协同调控机制对铠装钢丝生产具有以下指导意义：

工艺设计优化：为道次变形量分配、模具参数优化和中途热处理工艺提供了明确的理论依据。服役性能提升：可在不显著增加生产成本的前提下，提升长期服役钢丝的疲劳寿命与断裂安全性。质量一致性保障：残余应力与组织梯度控制方法，有助于稳定批量生产中性能分散度。

5.2 结语

未来的研究可在以下方向进一步深化：

多尺度模拟与实验耦合引入有限元模拟与多尺度晶体塑性建模，深入揭示不同道次应力-应变分布与组织演化的动态过程；结合原位拉伸、EBSD 与 XRD 应力分析实现动态验证。

新型润滑与模具设计研究低摩擦、耐磨损型润滑剂及可调应力场模具，进一步降低表面缺陷与不均匀应变的产生。梯度功能化组织结构设计利用表层和心部性能差异化设计，实现抗疲劳、抗腐蚀与高韧性的综合性能最优。服役环境下的长期稳定性评价针对高温、盐雾以及冲击载荷环境下的强韧保持能力，建立性能衰减模型和寿命预测体系，为工程应用提供数据支持。

参考文献

- [1] Zhang, J., Li, Y., Wang, T., 2021. A review on the strength-toughness balance in steel wires: Mechanisms, controlling methods, and prospects. Materials Science and Engineering: R: Reports, 146, p.100642.
- [2] Jiang, Z., Guan, Q., Liu, X., 2022. Multi-pass drawing process optimization of high-carbon steel wire for synergistic improvement of strength and toughness. Journal of Materials Processing Technology, 299, p.117327.
- [3] Zhao, M., Song, X., Li, C., 2020. Microstructure evolution and strengthening-toughening mechanism of cold-drawn pearlitic steel wires during deep drawing. Materials Science and Engineering: A, 772, p.138697.

Study on optimization of pretreatment methods for pesticide residue testing in food

Yanke Lu

Xuchang Product Quality Inspection and Testing Center, Xuchang City, Henan Province, 461000

Abstract

The extensive use of chemical pesticides in agricultural production has led to increasingly prominent food safety issues. While pesticides can enhance crop yields and improve product quality, excessive pesticide residues may cause chronic poisoning, endocrine disorders, or cancer in humans, posing significant health risks. The accuracy of pesticide residue detection largely depends on proper pretreatment methods, making pretreatment processes crucial. This paper provides a brief analysis of current pretreatment methodologies for food pesticide residue testing and proposes innovative technical solutions to address emerging challenges, aiming to improve both the precision and efficiency of pesticide residue detection.

Keywords

Food; Pesticides; Residue Testing; Pretreatment; Optimization

食品中农药残留检验的前处理方法优化研究

禄彦科

许昌市产品质量检验检测与研究中心, 中国 · 河南 许昌 461000

摘要

由于在农业生产过程中大量使用化学农药, 导致食品安全问题越来越突出。虽然农药可以提升作物产量、改善农产品质量等, 但是农药残留过量会对人体会造成慢性中毒、内分泌紊乱或者导致癌症等身体疾病, 对百姓身体健康带来巨大影响。而农药残留检验的准确度很大程度上取决于前处理方式是否得当、合理, 因此必须要对前处理工作予以充分重视。基于此, 本文将对食品中农药残留检验的前处理方法的应用状况做简要分析, 并针对当前出现的新情况提出新型技术方案, 希望能提升农药残留检测的精准度以及速度。

关键词

食品; 农药; 残留检验; 前处理; 优化

1 引言

为保障消费者的食品安全, 大多数国家都规定了严格的农药残留限量 (MRLs)。但是, 因检测的食品种类繁多 (如蔬菜、水果、谷物、油脂), 含有蛋白质、脂肪、多糖等基质干扰物, 往往会导致农药难以检出。其中, 前处理过程是整个检测过程的重点和难点, 如何在最大限度除去基质干扰的同时提高检测灵敏度和检测结果的重现性是需要重点解决的问题。

2 前处理方法研究现状

2.1 液—液萃取 (LLE)

液—液萃取是食品农药残留分析中最早应用于前处理的一种方法, 只需要简单的仪器就可以实现操作, 加上其操

作流程较为直观, 因此被普遍运用到了实验室中。在液—液萃取中, 由于是利用目标物在有机相和水相之间的分配系数来实现去除提取液的杂质, 当样品基质较复杂时, 非目标物可能同时进入有机相中, 使提取液含有大量的杂质。这样就意味着需要更多的步骤来对杂质进行去除, 并且还可能影响到检测结果的准确性。并且在 LLE 过程中需要大量用到有机溶剂, 在操作过程中存在大量的有机溶剂挥发情况, 不但会影响环境和安全, 而且也可能带来样品的损失, 影响检测结果。此外, 对于乳品及脂含量高的样品可能存在乳化问题, 造成有机相、水相无法很好分离, 影响农药的回收率以及检出率。因此液—液萃取 (LLE) 对痕量、多残留农药的测定极不利, 其只能适用于部分低基质干预的样品。

2.2 凝胶渗透色谱 (GPC)

凝胶渗透色谱是食品中农药残留检测的前期处理手段之一, 它的主要功能是净化, 主要是用来净化含有大量脂类组分的样品, 例如植物油、肉类产品和乳类产品等。采用高分子量的材料填充的色谱柱, 在流经水溶液后能依据样品的

【作者简介】禄彦科 (1989—), 男, 中国河南许昌人, 硕士, 助理工程师, 从事食品检验研究。

不同分子大小将其分开，可以将大部分甘油三酯、色素和高分子有机物排除掉，减小后续分析过程中的基质效应干扰。但是 GPC 的仪器较为昂贵，而且需要维护，不宜于在普通的检测实验室广泛地应用。此外 GPC 的纯化操作较为繁琐，每一个样品至少要花费两个小时才能完成，难以达到高通量的要求。不仅如此，由于不同种类农药在分子大小上存在差异，如有一些农药化合物虽然是低分子量的，但是在进行净化处理时由于流程较长且净化所用到的试剂有较大概率发生互溶现象，很有可能会使一些农药残留在溶液中而没能被洗脱下来，直接导致定量结果不准。

2.3 固相萃取 (SPE)

固相萃取 (SPE) 法是农药残留物前处理中具有极高灵活性及选择性的方法，依靠选择性的填料将目标农药与杂质分开。和传统液 - 液萃取相比，由于减少了大量使用有机溶剂，并且过程简便、易操作，减少了安全隐患，而且对环境的污染更少，该方法属于较为环保型的方法。常用的填料主要有反相键合硅胶、离子交换树脂，以及一些新的高分子材料，它们能够针对极性不同的农药及其分子结构来进行富集，提高农药残留物的检出率。但是固相萃取 (SPE) 仍然存在几个问题：一是同类型的农药需要不同填料才能得到理想的分离效果；二是对目标化合物、基质等进行理化性质分析时需要花费大量时间；三是前期实验步骤繁琐，对检测人员的要求较高；四是高效填料的成本较贵，在大规模常规监测工作中存在推广难的问题。

3 食品中农药残留检验前处理方法的优化策略

3.1 提取溶剂体系的绿色改良

在食品中农药残留前处理过程中，溶剂体系的选取和设计是影响农药残留提取效率与净化效果的关键。以往的实验大多采用溶剂体系为乙腈、乙酸乙酯、二氯甲烷等，这类溶剂具有一定的溶解能力和分配系数，但是由于这些溶剂的毒性和易燃易爆性及废液处理的困难，会对实验室和操作者的安全造成一定的危害，随着检测数量逐渐增多，实验消耗量变大，这些溶剂的费用增大势必会增加实验

的成本，因此，对溶剂体系进行绿色化的改进成了目前优化方式上的一个重要方向。

具体来说，深共溶剂由于其低挥发性、低毒性和可设计性而逐步应用于农药残留分析，在此选择合适的氢键供体 / 受体可以获得不同极性的体系以满足多种类型农药的萃取要求，对于蔬菜、水果和油脂等样品来说均能达到较好的选择性和稳定性，且其可降解性也极大地减少了环境污染；离子液体因为具有高可调性的离子结构，通过调整阴阳离子的种类就能调节其溶解性能以及黏度，匹配不同基质的提取需求。另外，超临界流体萃取作为一种绿色提取方法受到了一定重视，将二氧化碳作为萃取剂在高压下有着近乎液体的溶解能力和如同气体的扩散能力，既可以保障萃取速率又能

规避大量使用有机溶剂问题，而且加入少量极性修饰剂后可以使超临界流体对亲水性农药的萃取能力得到提升，从而使超临界流体萃取技术能在不同类型样品的检测中有广泛应用，相较传统的提取方法能实现更好地缩短处理时间、降低残留溶剂的效果。目前绿色溶剂体系改造除了集中在新绿色溶剂材料的研发之外，还有更多地对于溶剂量和处理步骤上的简省提出建议。具体可以通过调节缓冲盐比例和提取剂浓度，一方面能够在保证较高的回收率的基础上减少有机溶剂的使用量，从而在一定程度上减小了对环境和经济的压力；另一方面也体现了现阶段对待前处理的方法更加关注于如何提高其效率、增强其选择性以及更好地实现可持续发展的目的。

3.2 多农药兼容性的工艺优化

不同类型的食品样品中往往残留的农药成分繁多，其中既有像有机磷、氨基甲酸酯、拟除虫菊酯这些疏水性的化合物，也有三嗪类、苯氧羧酸类这类极性强的化合物。由于不同类型农药在分子结构、溶解性和稳定性上存在很大的区别，加上传统的提取或净化方法很难做到兼顾不同农药的提取效果，所以要想满足不同极性农残的共存检测需求，工艺的优化应是从提取步骤出发，建立兼容性更强的前处理流程，以实现一次提取覆盖多种极性范围。

第一，在提取方面通过改变溶剂极性、pH 值条件或者加入助溶剂等方式来高效溶出极性差异较大的农药分子。对于结构不同的农药，如含氯、有机磷、拟除虫菊酯类等，可对混合溶剂比例及 pH 缓冲体系进行调整，让其得以在单次提取环节兼顾疏水性和亲水性目标物的回收效率，并将基质对后续分析的干扰减小。第二，在净化方面选取可多层吸附的复合材料为宜，利用固相萃取柱或者磁性功能化材料的结合，同时将脂类、色素和其他种类的天然产物除去。并根据农药的不同分子量大小、极性，官能团等特点来设计专用的复合层吸附，保证对多种食品样品进行处理过程中，能够稳定回收并重现目标农药成分。第三，在工艺流程与温度方面要进行全面优化，通过改变振荡、超声或者加热等参数条件达到快速提取的目的，同时又能达到保证多组分农药的稳定性，防止由于单一的处理条件导致部分敏感的农药产生降解或者流失现象。在实验过程中还要仔细验证样品与溶剂的比例、处理步骤顺序以及溶剂更换策略，以实现多农药兼容的高效提取与净化。

3.3 功能化新材料的应用

通过将功能化新材料加入食品中农药残留检验的前处理环节中来提升分离的效率和选择性是当前新的思考方向；但是因为传统的吸附剂存在去除杂质及富集目标物不理想，尤其是在多农药共存和基质成分复杂的样品中不能同时兼顾选择性和通用性的弊端，因此需要开发出新型的功能化材料来进行结构上的设计以及表面的改性来拓宽前处理方法的应用范围并增强其灵敏度。

第一, 科学应用分子印迹聚合物, 该类物质具有类抗体式的特异性识别能力, 所以常被用于选择性分离痕量农药。其在聚合过程形成的空间构型及化学键合的作用下能够与特定类型的痕量农药的空间结构及化学键作用达到高度吻合的状态, 可以有效去除背景基质的干扰, 达到高度准确地对目标农药分子进行捕获的目的。同时, 此类材料对于处理有机磷类、氨基甲酸酯类的农药具有较高的回收率, 并且具有较好的抗干扰性, 能够防止常规净化方法所带来的目标物损耗。第二, 石墨烯以及衍生物由于比表面积大、含氧官能团丰富等特点可与大多数农药分子产生 $\pi-\pi$ 堆积作用、氢键作用以及静电力作用, 有利于对不同极性残留物的富集吸附。可利用石墨烯氧化物做分散固相萃取剂代替传统的中性氧化铝捕集柱除去样品中叶绿素、蛋白质等杂质, 降低了信噪比。第三, 金属有机框架材料具有一种特殊的规则有序多孔结构, 拥有可以调变的可功能化的表面结构, 这些都为农药残留的处理提供了一条新途径, 只需要往其中加入不同的有机配体或金属离子便能达到选择性吸附和聚集目标化合物的效果。部分学者发现使用此种材料能够高效捕获三嗪类和酰胺类农药, 且能够反复利用, 有效节约了成本。第四, 在分离阶段磁性纳米材料也受到越来越多的关注, 其原理在于利用外加磁场来达到固液分离的效果, 无需离心或过滤操作, 大大地缩减了前期处理的时间。同时通过在其表面修饰功能基团, 既可以增强对某些农药的亲和力, 又可以与液相或者气相色谱相结合, 能够大大地提高分离效率以及简化整个操作过程。

3.4 自动化与高通量处理技术

在食品中农残检验的过程中, 若前处理环节操作效率不高、无法保证操作准确, 则会导致最后的结果无法得出可靠的结论。以自动化和高通量处理技术为代表的新技术可以弥补前处理流程不够标准化和规模化的缺陷。第一, 自动化液体处理系统的优点是可以按照仪器精度要求来进行移液、混匀、分配等样品前处理的工作, 并且在自动操作的过程中

能够保障人员不会产生失误, 因而就避免了不同的操作人员带来的误差。而且此类系统内可以设置相应工作程序, 可以通过编程让此类系统分别完成不同类型的样品和不同食品的前处理工作, 进而有效提高试验人员的工作效率。第二, 相比人工前处理工作, 高通量处理技术优点在于并行处理大量样品的能力。运用如: 微孔板、串联固相萃取或者在线固相微萃取等方法, 可实现一次实验几十甚至几百个样品同时进行处理, 并大大减少了样品前处理时间, 以及提升了样品间数据的一致性和可比性; 高通量系统通常会配套相关自动清洗、溶剂补充及废液管理模块, 使整个工作流程实现自动化, 进一步减少人为因素导致的样品污染。第三, 在数据追踪和可溯源方面, 高通量自动化设备还有更大优势。在实验仪器上设置条形码扫描功能和样品信息管理、实验记录等功能, 可以在批次样品的处理过程中形成完整的记录文件, 有利于实验室内部的质量控制以及标准化的实验室操作管理。这些技术可以用于高效率检测且可联用质谱、色谱等分析仪器, 从样品前处理到最终检测均可进行联机操作, 成为保证食品质量安全的有效方法。

4 结语

食品中农药残留的前处理方法是检测过程的重要一环, 如何提高前处理方法的灵敏度、扩展适用面及有利于环保是目前的重点研究课题。随着研究工作的不断深入以及绿色化、多残留兼容、自动化与智能化等方向的继续深入探索, 定能有效提高食品农药残留检测水平, 保障食品和人民的身体健康。

参考文献

- [1] 杨蜀军.浅析食品中农药残留前处理及检测技术研究进展[J].现代食品, 2024, 30(4):90-93.
- [2] 黄柳芳.食品中农药残留检测的样品前处理技术研究[J].食品安全导刊, 2023.
- [3] 杨阳,彭晓晓.简述农产品中农药残留检测前处理方法[J].河南农业, 2023(7):25-25.

Engineering Application of Adaptive Coding and Modulation Technology in high-speed Data links

Liang Hu

The 10th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation Chengdu, Sichuan, 610036, China

Abstract

High-speed data links are extensively utilized in critical fields including satellite communications, deep-space exploration, military command systems, and emergency response communications. Their performance is determined by three key factors: link stability, anti-jamming capability, and transmission efficiency. Adaptive Coding Modulation (ACM) technology has emerged as a game-changer for enhancing these metrics. By dynamically adjusting modulation schemes and coding rates according to channel conditions, ACM achieves adaptive performance optimization across diverse environments, significantly boosting throughput while reducing bit error rates. This paper provides a comprehensive analysis of ACM technology, covering theoretical foundations, system design principles, hardware implementation, and case studies of practical applications. It highlights both the technical advantages and engineering challenges encountered in complex operational scenarios. Finally, the paper proposes future development directions including AI integration, cross-layer optimization strategies, and compatibility with next-generation hardware platforms to drive further advancements in this field.

Keywords

high-speed data link; adaptive coding and modulation; engineering application; channel sensing

高速数据链中自适应编码调制技术的工程化应用

胡亮

中国电子科技集团公司第十研究所, 中国 · 四川成都 610036

摘要

高速数据链在卫星通信、深空探测、军事指挥及应急通信等众多关键领域应用广泛, 其性能优劣由链路稳定性、抗干扰性和传输效率决定。自适应编码调制 (ACM) 技术成为提升其性能的“利器”, 该技术能依据信道状态灵活调整调制方式与编码速率, 在不同环境里实现性能自适应优化, 显著提高吞吐量、降低误码率。本文围绕ACM技术展开全面探讨, 从原理剖析到系统设计, 再到硬件实现与典型应用案例分析, 总结其在复杂环境中的性能优势与面临的工程挑战。最后, 为推动其进一步发展, 提出与人工智能融合、开展跨层优化以及适配新型硬件平台等未来发展方向。

关键词

高速数据链; 自适应编码调制; 工程化应用; 信道感知

1 引言

高速数据链是卫星通信、深空测控和新一代无线网络的重要组成。固定调制编码在信道稳定时有效, 但在多径衰落、气象变化和强干扰条件下难以兼顾速率与误码性能。ACM 通过实时感知信道并调整调制与编码, 实现性能自适应优化。其工程化需兼顾信道估计、快速反馈、低延迟切换与硬件资源效率。该技术已在 DVB-S2X、微波回传、5G NR 等领域应用, 但仍面临复杂度、延迟与跨层协同等挑战, 深入研究可进一步提升系统性能与适应性。

2 ACM 技术的基本原理与核心机制

2.1 自适应编码调制的概念与发展历程

ACM 技术源于 20 世纪 90 年代自适应调制与可变编码率的融合, 是物理层自适应传输的重要方向。早期自适应调制用于固定微波链路, 通过调整调制阶数 (如 QPSK、16QAM、64QAM) 适应不同信道条件, 低阶调制适合低信噪比环境, 高阶调制则在信道质量较好时提升速率。可变编码率通过改变编码冗余度 (如卷积码率、LDPC 码率) 平衡抗干扰与效率。随着高速数字信号处理芯片、射频前端和宽带通信技术的发展, ACM 将二者结合, 使系统可根据信道状态灵活切换模式, 在衰落、多径、干扰环境中接近最优频谱效率和误码性能。该技术已广泛应用于卫星通信、移动宽带和无线回传网络, 并为高吞吐量通信系统奠定基础。

【作者简介】胡亮 (1984-), 男, 中国江西抚州人, 硕士, 工程师, 从事通信研究。

2.2 信道状态信息获取与反馈机制

ACM 依赖快速、准确的信道状态信息 (CSI) 获取与反馈, 这直接影响调制编码切换的时效与精度。高速数据链常用 CSI 参数包括瞬时信噪比、误码率、包错误率、衰落深度等。获取方法有导频信号估计 (精度高但占用带宽)、决策反馈 (延迟低、适合连续传输) 和盲估计 (无额外开销但复杂度高)。为兼顾精度与延迟, 工程中常用压缩 CSI 或基于统计信息的低速反馈, 并可在必要时结合多参数联合估计以提升准确度。高速移动场景下, 信道快速变化易导致反馈滞后, 可通过短时预测算法弥补延迟, 并在反馈链路中加入冗余和纠错机制以提高其稳定性和整体可靠性。

2.3 调制与编码映射策略

ACM 系统通过预设调制编码模式 (MCS) 集合, 将不同调制阶数与编码速率组合成模式, 并设置信道条件门限区间。接收端根据估计信道匹配最优 MCS 并反馈给发送端完成切换。映射策略需在频谱效率与误码率之间取得平衡, 并保持切换平滑, 避免频繁震荡导致性能下降; 同时还应结合业务类型、延迟要求和功率限制, 高优先级业务在门限设置上应留足裕度, 以确保在边缘信道条件下仍具备稳定性。为增强适应性, 可引入动态门限调整机制, 使系统在长期运行中结合实时统计数据与历史信道特性, 不断优化 MCS 映射表, 从而在多变环境中保持更优综合性能与业务连续性。

3 高速数据链中 ACM 的系统设计要求

3.1 链路预算与性能指标确定

在高速数据链的工程设计中, 链路预算是确保系统性能达标的核心环节, 其作用不仅是评估信号在传输过程中的衰减、噪声和干扰, 还要为系统参数的选择提供依据。ACM 的引入使得链路预算需覆盖不同调制编码模式 (MCS) 下的功率需求、带宽利用率、误码性能以及切换门限。例如, 在低信噪比条件下, 系统应采用低阶调制和低码率编码以保障可靠性, 而在高信噪比环境中, 则可选择高阶调制和高码率编码以提升速率。工程设计通常需要基于最差信道条件设定最低 MCS 的可靠性门限, 并同时评估最佳 MCS 在理想条件下的吞吐性能。此外, 性能指标的设定应包括峰值速率、平均速率、链路可用率、切换稳定性和业务时延等, 并在仿真和外场测试中加以验证, 以确保 ACM 在不同环境下的综合性能稳定。

3.2 硬件架构与处理能力匹配

ACM 算法的高效运行依赖于强大的数字信号处理能力和灵活的硬件架构。在高速数据链中, 调制解调器需支持多种调制格式 (如 QPSK、16QAM、64QAM) 和可变码率的编码解码单元 (如 LDPC、Turbo 码), 并具备快速切换模式的能力。硬件架构设计既要确保功能的可扩展性, 也要兼顾功耗、体积和成本控制。通常会采用可编程逻辑器件 (FPGA) 与专用集成电路 (ASIC) 相结合的方案, 其中

FPGA 用于实现灵活的算法更新与多模式支持, ASIC 负责执行高吞吐量、低延迟的固定功能模块。在实际工程中, 还需优化数据总线架构与存储访问策略, 确保在多模式切换和高速处理时不会出现瓶颈。此外, 在移动平台和卫星等对功耗敏感的应用中, 还需采用低功耗设计技术和动态功耗管理策略, 以延长系统寿命并提高可靠性。

3.3 软件算法与协议配合

ACM 的工程化实现不仅是物理层的优化, 还需要与数据链协议层的深度协作, 以保证系统在不同 MCS 切换时业务的连续性与数据的完整性。在卫星链路等长时延、高误码环境中, ACM 需与 ARQ (Automatic Repeat Request) 或 HARQ (Hybrid ARQ) 机制结合, 通过在链路层进行冗余重传, 提高数据的可靠性。帧结构设计也需考虑 ACM 的自适应特性, 使不同 MCS 模式下的帧长度、同步信号和导频配置能够快速适配。协议还应包括模式切换的触发机制和状态机控制逻辑, 以避免频繁切换导致的性能波动和业务中断。在多业务并行的系统中, 还需对不同优先级的业务进行分类处理, 使关键业务在信道条件恶化时优先保障其可靠性, 而普通业务则可容忍一定速率波动。这种跨层的协同优化设计, 是 ACM 在实际高速数据链工程中获得最佳性能的关键。

4 ACM 的工程化实现与典型案例

4.1 卫星高速数据链中的应用

在宽带卫星通信系统中, 尤其是符合 DVB-S2X 标准的系统, ACM 已被作为提升链路效率与可靠性的核心功能之一。系统通过在地面站持续监测用户终端接收信号质量, 包括载噪比 (C/N)、包错误率以及信号衰落深度等参数, 动态调整下行链路的 MCS, 使其匹配当前的信道状况。在遇到雨衰、云雾遮挡或地形阴影等不利条件时, 系统会自动切换至低阶调制与较低编码率, 以保证业务不中断; 而在天气晴朗、链路裕度较高时, 则选择高阶调制与高码率编码以最大化频谱利用率。工程案例表明, 采用 ACM 的卫星链路在中高信噪比环境下可提升频谱效率 30% 以上, 在强降雨或遮挡情况下仍能维持超过 95% 的链路可用率。此外, 通过在系统设计中引入缓冲区和分级切换机制, 可显著减少模式切换引发的业务抖动, 提高视频、语音等实时业务的体验质量。这类工程化经验已被广泛应用于固定卫星服务 (FSS) 和高通量卫星 (HTS) 系统中。

4.2 机载与舰载通信系统

高速移动平台 (如战机、舰艇) 的通信链路在运行过程中会受到明显的多普勒频移和快速衰落影响, 这对链路稳定性和吞吐量提出了极高要求。ACM 在此类场景中的工程化应用, 需要首先对信道预测算法进行优化, 使其能够在高速运动下准确预估短时信道变化, 并在参数反馈存在一定延迟时仍保持较高的模式匹配度。为了应对信道条件突变, 系统常在物理层加入硬件加速模块, 使 MCS 切换时间缩短

至毫秒级,从而避免长时间性能下降。例如,某型舰载数据链系统采用基于FPGA的快速模式切换架构,并结合多普勒补偿与相位跟踪算法,在高速机动和海面多径反射条件下,仍能保持稳定通信,其数据吞吐率在复杂海况下提升了20%以上,误码率显著降低。此外,工程设计中还引入分布式天线阵列和自适应波束赋形技术,与ACM相结合进一步增强了抗干扰与抗衰落能力,确保任务数据传输的连续性与安全性。

4.3 5G 与未来 B5G 系统

在5G NR标准中,ACM通过MCS表机制实现,基站根据信道质量指示(CQI)和CSI反馈,动态选择适合的调制与编码组合,从而在不同用户间平衡速率与可靠性。在工程部署中,ACM能够针对小区边缘用户与小区中心用户的不同信道条件动态分配传输资源,例如为边缘用户分配低阶调制与强纠错编码以保证连接稳定性,而为中心用户分配高阶调制和较高码率以提升系统吞吐量。实践经验表明,该机制不仅提升了整体频谱利用率,还在多用户场景下有效改善了平均用户体验速率。展望未来,B5G系统将进一步引入人工智能驱动的自适应策略,使ACM的模式选择不仅依赖当前的CSI,还综合历史数据、业务优先级和网络负载等多维信息,实现跨层、跨域的全局优化。同时,B5G可能结合可重构智能表面(RIS)、超大规模MIMO和分布式波束控制等新技术,使ACM在动态网络拓扑和高频段通信中保持高效运行,从而支撑低时延、大容量和高可靠性的下一代通信需求。

5 ACM 在工程化应用中的挑战与优化方向

5.1 复杂环境下的信道预测与反馈延迟

在高速移动与快速衰落环境下,信道参数变化频率极高,导致信道估计和反馈信息存在不可忽视的延迟,这种延迟可能使MCS选择与实际信道状态不匹配,从而降低链路性能甚至引发数据丢失。为解决这一问题,可引入基于机器学习的信道预测模型,利用历史CSI、移动轨迹、气象条件及多普勒特性等多维信息进行短时预测,并在预测结果中引入置信度评估,以提高ACM决策的前瞻性和稳定性。此外,还可在反馈链路中采用压缩编码与自适应反馈周期策略,以

在保证信息准确度的同时降低传输延迟,提升系统在动态环境下的整体适应能力。

5.2 硬件资源消耗与功耗优化

多模式调制解调与可变码率编码器的实现,需要在硬件中支持多种并行运算单元和高速缓存,这对芯片资源和系统功耗提出了较大挑战。工程设计中可通过模块复用、流水线处理、可重构逻辑等方法减少硬件单元冗余,同时结合动态功率管理和低电压运行技术降低能耗。在对实时性要求极高的应用中,还需在FPGA与ASIC之间合理分工,利用FPGA实现算法灵活升级,ASIC则承担固定高吞吐功能模块,以在性能与能耗间取得平衡。未来,借助先进半导体工艺、3D封装技术以及片上系统(SoC)高度集成化,可在更小体积内实现更高处理能力和更低功耗,为ACM在高速数据链中的广泛部署提供硬件保障。

6 结语

自适应编码调制技术作为高速数据链性能提升的重要手段,在复杂信道环境下展现了显著的灵活性与鲁棒性。通过动态调整调制与编码方式,ACM能够在保证链路可靠性的同时提升频谱利用率与传输效率。工程实践表明,合理的ACM系统设计与实现,能够显著改善高速数据链在卫星通信、机载通信、5G及未来B5G等领域的性能表现。然而,其工程化应用仍面临信道预测精度、硬件资源占用及跨层协同优化等挑战。面向未来,将ACM与人工智能、软件定义无线电及新型硬件平台深度融合,有望进一步提升高速数据链的适应性与效率,为构建高可靠、高吞吐量的下一代通信系统奠定坚实基础。

参考文献

- [1] 路清雅.面向无线通信的高效编码调制技术研究[D].西安电子科技大学,2023.
- [2] 王同军,谢毅,严瑾.成渝中线高速铁路智能勘察设计技术创新与实践[J].高速铁路技术,2024,15(06):1-7.
- [3] 范晨欣,刘怡,何禹彤,等.射频与激光复合战术数据链发展的思考[J].长江信息通信,2024,37(12):7-9.
- [4] 毕玉娇,万九卿,全胜.基于数据链与被动雷达的飞行器协同目标定位[J].战术导弹技术,2024,(06):167-178.

Exploration of the Transformation Path of Electric Power Marketing Mode under the Background of New Energy

Qiulin Cao

Beijing Huashang Electric Light Company, Beijing 101400, China

Abstract

The electricity sales model in the new energy environment is facing enormous challenges. With the development and promotion of intelligence, digitization, and clean energy, power companies need to adjust their sales models to meet the needs of emerging markets and customer behavior. This article mainly focuses on the transformation path of power sales models in the new energy environment, and studies the application of new technologies in the power sales process, such as data mining, application of smart meters, and customer active participation. We have come to the conclusion that power companies should strengthen customer relationship management, enhance customer experience, actively expand diversified product services, and enhance market competitiveness. Finally, relevant and effective sales strategy suggestions that are beneficial to the long-term development of the power industry were provided.

Keywords

new energy; Electricity marketing; Transformation path; Electric light company; Sustainable development

新能源背景下电力营销模式转型路径探索

曹秋林

北京市华商电灯公司, 中国 · 北京 101400

摘要

在新能源环境下的电力销售模式面临巨大的挑战, 在智能化、数位化、清洁能源的发展和推动下, 电能公司需要针对销售模式进行调整, 才能满足新兴市场与顾客行为的需求。本篇文章主要围绕新能源环境下的电力销售模式转型路径, 针对新技术在电力销售过程的应用进行了研究, 例如数据挖掘、应用智能电表以及顾客主动参与等方式。我们得出了电力公司应当强化顾客关系管理, 提升顾客的体验, 积极地拓展多元化产品服务, 来增强市场的竞争能力的结论。最后, 给出了相关有效的且有利于电力行业的长期发展销售策略建议。

关键词

新能源; 电力营销; 转型路径; 电灯公司; 可持续发展

1 引言

在全球能源结构转型的关键节点, 传统电力产业正在面临着巨大的冲击与新的机遇。伴随着清洁能源的迅速崛起, 电力产业的生态环境已经发生了根本性变化, 消费者需求也在逐步的多元化, 使得传统的电力销售开始暴露出了它的局限性。作为传统电力供应的主角, 供电公司需要在这种变革中重新评估他们的销售模式来满足新的需求。本文主要针对在新能源浪潮中, 电力产业应如何通过变革与创新获得持续发展提出了相关探索。通过当前市场现状、消费行为以及科技趋势的研究, 给出了电力公司在电力营销模式变革过程中可供遵循的发展路径与措施, 供供电公司借鉴, 从而能

够在市场中保持领先性。

2 背景与意义

针对全球环境恶化、资源消耗过快的情况, 世界各国加大研究及推行新能源的力度, 目的是可持续发展, 新型新能源的发展推行给电力行业带来了各种新机遇和新挑战, 导致了电力销售策略发生巨大的变化, 这种方法灵活性强、有效率, 提升电能使用效益, 满足消费者不断变化的需求, 有利于智能电网的建设与发展。

2.1 全球能源转型的趋势

当前世界处于由不可再生能源向可再生能源转变的能源革命期, 基于气候问题的严重恶化, 世界各国的政府都已经作出减排目标承诺, 并对发展绿色能源大力度支持。根据国际能源机构预测, 到 2050 年可再生能源将占据世界能源格局的主导地位, 风能、太阳能等可再生能源技术的进步更使得其更为大众化也更少地依赖石油、天然气等不可再生能

【作者简介】曹秋林 (1971-) , 男, 工程师, 从事装表接电研究。

源。此外,来自全球各地的政策、技术、市场波动等因素也都在促使能源系统的重大改变。这些变革保证能源供给的可持续性,推动绿色经济发展,为解决全球气候危机提供了解决方法。^[1]

2.2 电力营销的重要性

在电力市场开放以及不可持续能源所占比重逐渐增大的背景下,用电销售及推广越来越重要,关系到企业的利润、影响力和可持续能源的使用,一个好的用电销售策略能帮助公司在达到利润最大化的同时了解用户群体并满足用户需求,又能帮助公司用尽可能少的成本得到大量的资源供给。由于用电市场的扩张和竞争性加剧,用电公司需尽可能应用数据和市场研究,以锁定目标用户,推出合理的销售策略,提升客户粘度。

3 新能源背景下电力营销模式的现状分析

现在的电力销售已经越来越多采取的不是一种简单形式而是更多样化的智能形式,并且随着太阳能、风能等新能源的广泛使用,各个电力公司也已经采用计算机网络科技以及大数据分析等手段准确分析消费者用电方式,实行精细化的销售手段,例如根据家庭用户与工厂的用电器量不同等采取灵活变化的实时电价、峰谷电价等方式引导人们采用峰谷分时用电,减少电网压力。

3.1 传统电力营销模式的特点

传统的电力营销方法主要针对电力生产与销售进行,注重对供电稳定性和对基本用户需求的满足,其电力营销范围较小,传递信息速度缓慢,大多的消费群体是接受者,且主要依靠固定式的电费办法,没有灵活性和市场竞争力,这一定程度上阻碍公司创新性的发展。此外,普通的电力营销针对大宗工业企业用户较多,对于家庭户用户关注度稍微不够高,导致客户体验不佳、服务质量也很难提升。随着市场竞争程度加剧、消费者的需求多样化,传统的电力营销方法的弊端逐渐显现,促使电力公司寻求新的营销方法的策略。^[2]

3.2 新能源技术的兴起

新型能源技术的进步带来了电力销售新的机会与挑战。例如,可再生能源太阳能与风能等发展迅猛,电力市场的技术构造有了大幅改变,提高了发电能力,减少了花费,这种新趋势推动分散式发电广为人知,而且家用和商业场所可使用较小的发电设备。在这种情况下,电力企业要重新调整其销售策略。一方面新型能源导致了电力市场的变化,客户自主发电能力加强;另一方面,客户的电力需求多样化、个性化,传统的销售模式很难满足需求。因此,电力公司需要借助新兴技术工具改善线下与线上服务平台,增强企业和客户之间的交流互动,以应对新的能源给公司带来的市场压力与机遇。

3.3 电力市场环境的变化

电力行业的主要变革动力有政策、法令与市场准则的

改变。近些年,很多国家的政府都出台发展新能源产业的政策,目的是鼓励公司与个人加大对可再生能源项目的投资。同时,电力行业的竞争越来越剧烈,电力公司的竞争在发电和销售上的表现最为明显,市场准入条件不断降低,不断促进公司的竞争等级进一步提升。其次,智能电网的建设给电力市场带来了一场革命性的改变,它使电力交易效率提高,使得流程更为简便,使客户更好地参与电力市场。为了应对市场的这些变化,电力公司有义务更新自己的营销战略,稳扎稳打进军新市场,开发新颖的产品与服务,以迎合客户关于能量的供给需求以及对服务质量不断提升的要求。这种灵活创造性直接影响公司在未来的电力市场上竞争力的大小与存续力的持久。

4 电力营销模式的转型路径

4.1 增强用户互动

4.1.1 建立数字化营销平台

数字化的营销系统是最主要的开展与消费者的沟通方式,可以实时访问有关于电力的网站或者移动终端的数字系统,并能够按照自己的需求选择最适合自己的套餐与服务内容。这个数字化的营销系统不仅可以显示新闻内容、提供在线的事务,还可以通过其交互部分收集消费者意见,修改服务质量。如智能手机软件不仅仅用于查看实时用电情况,还可以让用户明白自身消耗能源的方式,以及节约能源的策略。系统的易用性越强,那么用户对系统投入的越深,同样也是公司提升顾客的忠诚度和品牌影响力的重点策略。^[3]

4.1.2 推动用户参与电力交易

随着电力市场逐渐放开,需要鼓励消费者参与到能源交易中,打造消费者为主导的交易模式,让消费者可以自主选择用电供应商和进行能源的购买与销售活动,形成消费者与电能公司间的交易对话,比如建立消费者主导型的能源团队或利用区块链技术来确保能源交易透明,在一定程度上可以调动消费者更多的热情参与到能源交易中。这种双向互动模式,一方面可以降低消费者对用电资源的管理成本,另一方面可以使消费者降低用电成本,实现彼此共赢,而且还可以使电力公司获得更多市场数据,以便更好地调整策略应对市场的需求。^[4]

4.2 拓展多元化服务

4.2.1 提供增值服务

基于增强客户忠诚度,电力公司可通过拓展多样化增值服务的项目增加公司利润的收入。除去正常的电力供应外,可以选择的增值项目有智能化家庭集成、电器使用的分析、功率的控制与咨询等。例如,电力公司可根据客户的用电情况可以为客户提供个性化节能建议,亦或是进行家用用电控制系统的营销,帮助他们更好的控制和调节用电模式。所有这些附加服务既提升了客户的电力满意度,可能还会出现新的收入增长点从而增加总利润率。^[5]

4.2.2 加强可再生能源的利用

从全球绿色环境及可持续发展的角度看，提高可再生能源使用比例是能源公司转型的发展方向。应发展并鼓励各种太阳能、风能等可再生能源项目的开发，鼓励用户安装分布式能源设施，如家庭光伏系统等，通过建设绿色电力交易机制，让用户有机会参与到可再生能源的交易市场中。一方面帮助用户满足其环境友好型用电的需求，另一方面可以帮助企业承担社会责任，增加社会信用。电力企业还应和其他组织一起倡导国家政策的落实，争取财政资源支持，降低可再生能源项目投资风险。^[6]

4.3 加速数字化转型

4.3.1 应用大数据与人工智能

转型售电模式中必不可少的就是对大数据、人工智能的运用。通过大数据分析客户需求，发电厂能够深入了解消费者的能源使用习惯和能源需求种类，开展精准营销。依靠大数据技术，对需求进行预测、顾客的划分和针对不同顾客的定制等手段，可提高销售效率、提升服务质量。依托智能算法，开展电源优化调配以及优化电网调度，提升电网供电的安全性和灵活性。智能化多样化的运营手段，能够在竞争残酷的市场中，为发电厂助力。

4.3.2 智能电网建设

智能电网作为以推动电力企业运营智能化为主的功能基础设施，在建设的同时可以运用新式传感设备、通信技术和自动控制系统实现对电网的实时监控与自控化管理。能够有效地将各种能源集中，调节能源利用状况，提高电网的稳定性和运行效率。与此同时，智能电网还具备交互用户的功能，能够让用户通过智能电表时刻了解家里用电设备的使用情况，在价格浮动的情况下作出调整使用。智能电网通过信息与能源双向传输，一方面增加了用户的参与性，另一方面促使电力企业向他们提供个性化的服务。

5 电灯公司转型实施的策略建议

5.1 制定清晰的转型战略

其一，电力企业要有明确的改革战略，包含市场的分析、对手的分析、目标的选择等。战略不仅要有明确的改革目标，还要有可考核的要求，才能便于后期监测以及考核。其二，战略还应顺应市场形式的变化，在此基础上不断完善和及时调整，以确保电力企业处于稳定市场环境中的竞争优势地位。^[7]

5.2 加强内部组织协调

在进行电力公司变革的时候，要特别注重对公司的内

部分工协作的重视程度，构建良好的部门间信息共享通道，实现信息共享与协同。例如营销部、市场部、研究部、科技部等相关部门可经常举行联席会议，及时收集客户的声音以及市场情况，共同商量对策。另外，也可以改进公司的业务流程、提高全体员工的工作效率，加快公司的变革进程。

5.3 加大技术研发投入

最后，电力企业还应加大对科技研发的投入，尤其是科技研发可以着眼于智能化电网、大数据、可持续能源等前沿领域，持续的研发能够提高企业的运作效率以及降低企业的经营成本，从而向市场提供更好的产品与服务。同时，电力企业也应加大与高校以及科研机构的合作，共同研发科技创新并开展成果推广，以更好的接受市场挑战，科技可以更好地实现对电能企业改革工作的双重保障，在新的时代环境竞争当中将企业置于领先地位。

6 结语

面对可再生能源市场蓬勃发展的态势与客户的需求，改变电力销售模式是电力公司长足发展的重要因素。本文通过对当前的市场形势及其带来的问题和机遇进行分析，并提出一系列能够有效提升客户参与度、丰富产品服务种类和加速数字化的变革措施，使二者有效结合，从而让电力公司竞争实力得到提升，能够充分满足消费需求，更好地使用可再生能源。在未来的发展中，还应当不断增强协同性，明确相应的转型目标，结合先进技术推动，形成较为完善电力销售模式，使电力公司与个人受益更多。

参考文献

- [1] 陈伟华,刘彦军.新能源与传统电力营销模式的融合发展研究[J].电力市场,2023(6): 45-50.
- [2] 张明月,唐晓峰;徐志刚.电力营销转型中的数字化转型探索[J].现代电力,2024(2): 18-23.
- [3] 王雪梅,赵青,李志勇.新形势下电力企业市场营销策略的变革分析[J].企业管理,2023(11): 60-65.
- [4] 李永红.基于AI的电力营销策略智能化研究[C]// 广西网络安全和信息化联合会. 2025年第二届工程领域数字化转型与新质生产力发展研究学术交流会论文集. 国网崇信县供电公司;, 2025: 252-254.
- [5] 范菊霞.智能核算技术在电力营销模式创新中的应用 [J]. 中国商界, 2025, (03): 144-145.
- [6] 刘钧,吴伟涛.“互联网+电力营销”服务模式分析 [J]. 电力设备管理, 2025, (02): 270-272.
- [7] 贺月,彭姣,卢艳艳.大数据技术在电力营销管理中运用分析 [J]. 中国科技投资, 2025, (02): 121-123.

Research on customer satisfaction improvement strategy of “meter installation and power connection” one-stop service mode

Bing Qi

Beijing Huashang Electric Light Company, Beijing, 101400, China

Abstract

With the deepening of the power system reform and the diversification of customer electricity demand, the traditional process of installing meters and connecting electricity has problems such as scattered links, long processing cycles, and high communication costs, which are difficult to meet customers' expectations for efficient service. The “one-stop service” model, as an important direction for optimizing services in the power industry, aims to improve service efficiency and customer experience by integrating business acceptance, on-site investigation, and meter installation construction. However, in practice, there are still problems such as poor process connection and delayed service response that affect customer satisfaction. This article takes the “one-stop service” of meter installation and power connection as the research object, analyzes the influencing factors of customer satisfaction under the current service mode, and proposes targeted improvement strategies based on actual business scenarios, providing reference for optimizing service processes and enhancing customer stickiness for power enterprises, and helping to upgrade the overall service quality of the power industry.

Keywords

installing meters and connecting electricity; One stop service; Customer satisfaction; Service optimization; enhancement strategy

“装表接电”一站式服务模式的客户满意度提升策略研究

齐兵

北京市华商电灯公司, 中国 · 北京 怀柔 101400

摘要

随着电力体制改革深化与客户用电需求多元化, 传统装表接电流程存在环节分散、办理周期长、沟通成本高等问题, 难以满足客户对高效服务的期待。“一站式服务”模式作为电力行业服务优化的重要方向, 通过整合业务受理、现场勘查、装表施工等环节, 旨在提升服务效率与客户体验, 但实践中仍存在流程衔接不畅、服务响应不及时等影响客户满意度的问题。本文以装表接电“一站式服务”为研究对象, 分析当前服务模式下客户满意度的影响因素, 结合实际业务场景, 提出针对性的提升策略, 为电力企业优化服务流程、增强客户黏性提供参考, 助力电力行业服务质量整体升级。

关键词

装表接电; 一站式服务; 客户满意度; 服务优化; 提升策略

1 引言

电力是生产生活“生命之源”, 服务质量关乎社会生产秩序与民众生活。装表接电是供电企业与客户的核心交互环节, 影响企业形象与竞争力。为响应“放管服”, 电力企业推出“一站式服务”, 整合用电流程以解客户跑腿痛点, 但部分企业存在流程不规范、信息共享低、人员能力不均等问题, 致客户体验差, 优化该服务以提升满意度, 是电力企业的重要研究方向。

2 装表接电“一站式服务”模式的运行现状与客户满意度痛点

2.1 “一站式服务”模式的运行现状

目前, 国内供电公司装表接电“一站式服务”业务体系建设已基本完成, 通过设立专柜或专线受理业务申请、现场勘查、制定方案、装表施工、签订合同、验电送电等服务事项, 实现“一个窗口受理、内部转办、全程服务”的目标。从服务的渠道来看, 部分供电公司依托供电营业厅设立专属服务窗口, 部分供电公司则借助“掌上电力”APP客户端、“掌上电力”微信公众号等线上渠道, 提供业务申请、进度查询、结果查询等服务, 形成“线上线下相结合”的服务模式。从服务的流程来看, 有的供电公司通过简化审批流程、压缩流

【作者简介】齐兵 (1982-), 男, 本科, 从事装表接电研究。

程时长，将办理装表接电的平均时长压缩在 30% 以上，如低压用户“当天受理→次日勘查→次日送电”的服务流程，进一步精简了装表接电服务流程^[1]。

2.2 客户满意度的核心痛点

“一站式服务”自实施以来，虽然取得了一定成绩，但是在满意度调查中还发现，“一站式服务”仍存在以下三大问题，即流程不畅通，部分流程存在“梗阻点”，比如，实地勘查、方案编制阶段信息沟通不流畅、方案反复修改等，致使办理时间延误^[2]；服务时效性差，如从网上提交申请到获得反馈信息耗时较长，尤其在用电高峰期，部分业务咨询、投诉等无法及时受理；服务不透明，即客户难以便捷了解服务全过程，如不能第一时间告知客户装表时间、施工安排及装表验收标准等，导致客户无法及时做好等候准备；服务人员素质不足，一些业务人员对“一体化服务”流程不熟悉，无法准确解答客户疑问，致使客户满意度偏低。

3 装表接电“一站式服务”客户满意度的影响因素分析

3.1 服务效率因素

服务效率是客户满意的第一影响因素，主要体现在办理时限和办理速度方面。从办理时限来看，客户对装表接电最核心的需求是“快速通电”，尤其是针对商业用户而言，装表接电时长对其业务运转影响极大，若“一站式服务”无法按时完成，将直接引发客户抱怨。从速度方面来看，客户在业务申请、问题咨询、故障报修等场景下均有“高效响应”的需求，若服务平台响应迟缓、线上申请 24 小时内无反馈，或出现现场施工检修人员缺位、迟迟未到场等情况，客户将对“一站式服务”产生疑虑。

3.2 服务质量因素

服务质量主要体现为良好的服务态度、扎实的专业能力与透明的服务过程。以“客户为中心”的“一站式服务”，若服务人员态度不佳、服务缺乏耐心，即便流程设计完善，也会让客户形成负面印象。专业知识涵盖装表接电相关的电价标准、用电规范等内容，服务人员需清晰解答客户关于电价标准、电表选型、用电规范、安全用电等方面的疑问，若专业知识与能力不足，无法为客户提供有效指导，会使客户认为装表接电服务人员专业水平不达标；客户需知晓业务各环节的勘查情况、方案内容、工程施工进度、验收标准等信息是否真实准确，以及这些信息是否已精准传达；服务信息传达不畅、不全面，会让客户认为装表接电服务流程不规范、存在信息不透明问题，进而影响客户满意度^[3]。

3.3 技术支撑因素

互联网时代，技术支撑能力直接影响“一站式服务”的实施成效。一方面，信息化平台建设不完善，导致流程效能不佳，例如，供电企业内部营销部、运维部、计量部等部门若存在信息壁垒、数据不共享，便会造成“信息孤岛”，

如现场勘查信息无法上传至方案编制部门，需重新录入数据，导致业务无法高效办理；另一方面，智能化手段缺失，制约服务能力提升，如缺乏智能现场勘查工具，造成勘查效率低、数据填报不准确；线上平台建设存在短板，如操作繁琐、频繁卡顿闪退，导致客户端办理体验不佳。上述问题的存在，均会间接影响客户体验。

4 装表接电“一站式服务”客户满意度的提升策略

4.1 优化流程机制，提升服务效率

4.1.1 建立内部闭环协同机制

组建“一站式服务”协调中心，从营销、运维、计量、客服等部门抽调专业人员，负责跨部门协同配合与问题统筹解决。建立“日调度周复盘”机制，日调度机制要求每小时协调处理流程滞留问题；周复盘机制针对流程瓶颈问题开展复盘分析，例如针对“勘查数据同步延时”的问题，搭建跨部门即时共享渠道。推行“首问负责制”，首问责任人需全程跟踪客户业务流程，实时反馈业务进展情况，若出现业务延期，需提前告知客户延期原因及预计完成时间，防止出现客户“多头跑、反复问”。

4.1.2 推行差异化服务流程

按照客户用电类别、用电容量、用电急缓程度确定工作流程，例如：低压居民实行“零报批流程”，网络审核通过后直接进入受理环节，48 小时内完成受理→勘查→施工→送电；低压居民以外客户开通“绿色通道”，提供优先受理与预约服务；高压客户建立专属服务专班，24 小时内上门完成受理→勘查→设计，过程中广泛征求客户意见；急用电客户启动“应急绿色通道”，统筹安排各环节同步实施，例如：医院应急用电需求可实现 24 小时内装表供电。

4.2 强化服务管理，提升服务质量

4.2.1 搭建全流程透明化体系

建立“线上线下”双轨透明渠道。线上优化 APP、公众号功能，增设业务进度查询功能，客户输入申请编号即可查看流程节点、对应责任人及办理时间，每完成一个环节，系统自动向客户推送进度提示；方案确认环节支持客户在线提交意见，客户需在 12 小时内完成意见反馈；施工阶段，施工人员需上传现场施工照片，供客户实时查看。线下在营业大厅设立进度公示屏，窗口人员主动告知客户进度查询渠道；勘查、施工作业人员携带“服务告知单”，告知单需明确标注本次工作内容、预计时长及流程节点，服务结束后请客户签单确认。建立服务信息主动推送机制，在业务重要节点提前 1 天提醒客户，避免客户因信息滞后延误准备。

4.2.2 完善客户反馈与维护机制

建立“全生命周期”评价机制，每个环节完成后，系统自动触发评价短信推送，形成全流程评价链，从服务态度、专业技术、响应速度、流程规范四个维度邀请客户评价。针

对评价为“一般”“不满意”的反馈，由客服人员在 2 小时内主动回复，24 小时内制定整改计划，跟踪回访直至客户满意。建立客户意见库，定期分析共性问题并优化改进，例如简化繁杂的线上操作手续、采取降噪措施降低施工噪音影响；送电后一周开展用电回访，同步宣传安全用电知识；重大节日向客户发送祝福与安全提示，定期推送电价政策、节能常识，提升客户忠诚度。

4.3 加强技术支撑，夯实服务基础

4.3.1 建设一体化信息共享平台

整合营销系统、运维系统、计量系统、客服系统数据资源，构建实时共享的一体化信息平台。平台核心功能包括：一是数据实时采集共享，勘查数据实时同步至方案编制部门，施工验收数据同步至计量系统，杜绝人工传递数据导致的差错；二是数据流程监控告警，对业务进度进行实时监控，当接近时限阈值时自动提前告警，一旦发现流程梗阻点，立即推送至协调中心处理；三是数据分析决策，自动统计各环节时限达标率、客户满意度等指标，通过大数据分析识别服务水平薄弱环节，例如某区域施工进度延误率较高时，系统自动生成增加施工队伍的建议。

4.3.2 推广智能化服务工具

聚焦全流程效率提升，分场景提供智能装备支持：勘查阶段，为作业人员配备具备 GPS 定位、高清拍照、数据自动测算功能的智能装备，该装备可自动识别房体结构、电表类型、线路走向，完成现场拍照与用电环境勘测后自动生成勘查报告，客户可直接在手机端签名确认；对于现场勘查条件复杂的区域（如山区、工业区），提供搭载高清摄像头、红外检测装置的无人机开展现场勘拍，原本 1-2 天的工作量可缩短至 2-3 小时，且能高效完成线路老化排查等工作。装表施工阶段，推广自带参数自动校验系统的智能装表工具，施工人员通过该工具可实时查看电表运行参数、核对接线正确性，既能预防计量事故，又能保障施工人员安全；为施工人员配备 AR 眼镜，该设备可将施工图纸、装表规范投影至镜片，降低新入职装表人员的操作失误率。线上服务阶段，提升智能客服服务能力，优化自然语言理解算法以提高响应准确率，支持语音交互功能，为老年客户等操作不便群体提供便利；对于智能客服无法解答的复杂问题，系统自动同步客户申请编号、当前业务环节等信息至人工客服，避免客户

重复沟通。

4.3.3 应用物联网与区块链技术

以信息技术驱动保障服务透明可信：物联网技术方面，在电表全生命周期（生产、校验、运输、安装）中嵌入芯片，生产厂家信息、校验数据、运输数据、安装数据等均实时记录至芯片，客户可通过线上平台查询相关信息，有效消除客户对电表质量的疑虑；在施工设备（如焊机、检测仪器）上安装传感器，实时监测设备运行状态与施工参数，当设备出现故障或参数异常时，立即向工作人员发送告警信息。区块链技术方面，将客户申请信息、勘查报告、方案确认记录、验收结果、送电时间等关键数据上链存储，利用区块链不可篡改的特性保障数据真实性与不可篡改性。当客户提出计量争议时，可通过区块链溯源查询该客户电表的安装、校验全流程记录；当出现服务纠纷（如未履行通知义务）时，可调取链上通知发送记录明确责任归属；同时，上链数据可作为服务质量考评的客观依据，确保考评结果真实可信。

5 结语

装表接电“一口受理”模式，是电力行业在市场经济背景下，为提升服务水平、满足市场需求、提高客户满意度而推出的开创性服务举措。现阶段的装表接电“一口受理”模式还存在流程衔接不顺畅、服务水平不均衡、技术支撑不足等问题，不利于提高客户满意度。从强化流程管理、强化服务质量、强化技术支撑三个维度着手，可有效解决现有模式中的问题，进而提升装表接电“一口受理”的服务效率与服务水平，提高客户对供电服务的好评度。随着数字化、智能化应用的推进，电力企业还需要时刻围绕客户需求，不断改进“一口受理”模式，实现“一口受理”模式从“高效率”向“精细化”“个性化”服务的转变，更好地服务于客户，助力电力行业高质量发展。

参考文献

- [1] 段强强.电力营销中装表接电与防窃电管理探究[J].电气技术与经济,2024,(12):256-257+267.
- [2] 杨建树,陈钟伟.智能电网装表接电技术与故障处理研究[J].光源与照明,2022,(07):143-145.
- [3] 冯睿,马志鹏.装表接电反窃电技术和反窃电措施分析[J].光源与照明,2022,(02):243-245.

Innovation and application of remote intelligent grease injection and liquid control technology in oil and gas fields

Hongyuan Niu Haochuan Wang Jie Yang Zhihong Du

Chengde Development Zone Fuquan Petroleum Machinery Co., Ltd., Hebei, Chengde, 067000, China

Abstract

With China's energy consumption continuously increasing, oilfield exploration efforts have intensified significantly. Logging perforation, as an indispensable critical component in oilfield exploration—particularly for complex and specialized wells—plays an irreplaceable role. In logging perforation operations, grease injection serves as a vital element and a key factor affecting construction safety. Currently, both domestic and international oilfields predominantly use manually controlled grease injection equipment for logging and perforation operations. These operations require 24h continuous work, necessitating manual adjustments of equipment parameters according to operational conditions. However, the rationality and accuracy of parameter adjustments rely solely on operators' experience, leading to significant randomness in operational parameters and substantial impacts on construction quality. Additionally, manual recording of construction parameters results in discontinuous and incomplete documentation of wellhead parameters and equipment output metrics. The harsh working environment of logging and perforation operations, involving high-pressure and flammable/explosive conditions, poses substantial safety risks due to close-range personnel operations. Given these challenges, developing a grease injection equipment and control system featuring "hydraulic-electric integrated control, remote operation, automatic grease injection, automated data collection/recording, automatic parameter adjustment, human-machine interface interaction, and comfortable working environment" has become imperative.

Keywords

remote intelligent grease injection; hydraulic control technology; grease injection device;

油田远程智能注脂与液控技术的创新与应用

牛洪媛 王浩川 杨杰 杜志宏

承德市开发区富泉石油机械有限公司, 中国·河北承德 067000

摘要

随着我国能源消耗日渐增多,油田勘探的力度逐渐加大,测井射孔又是油田勘探中不可缺少的关键环节,特别是对复杂井、特殊井,测井射孔更是发挥着不可替代的作用。在测井射孔技术中,注脂是至关重要的部分,也是影响施工安全的关键环节,目前,国内外油田测井和射孔施工作业中使用的注脂设备普遍采用手动控制,测井和射孔施工要求24小时连续作业,设备参数随着工况的变化也需要人工调节,然而调节参数的合理性和准确性只能依靠操作人员的经验,因此施工过程参数的随意性很大,对施工质量影响也很大。同时施工参数的记录也是人工记录,所以对施工过程井口参数和设备输出参数的记录不连续、不完整。测井和射孔施工作业的环境恶劣,并且是在高压、易燃易爆环境下进行的,人员的近距离操作存在很大的安全隐患。基于上述问题,研发具有“电液联合控制、远距离操作、自动注脂、自动采集和记录施工数据,自动调节施工参数,人机交互操作界面,工作环境舒适”的注脂设备和操控系统是非常必要的。

关键词

远程智能注脂; 液控技术; 注脂装置

1 背景

目前电缆防喷装置大多用于射孔和测井,射孔^[1]所占比例相对较大,而且随着钻井深度的增加,泵送射孔作业频

次和压力也在逐步攀升,注脂作为关键技术,直接影响整套设备的安全性能。目前,国内外油田测井、射孔施工作业中使用的注脂设备普遍采用手动控制,然而人工凭经验调节注脂参数,施工过程参数的随意性较大,同时施工参数的记录为人工记录,对施工过程井口参数和设备输出参数的记录不完整,存在较大的安全隐患。

电缆防喷设备虽然经过多年发展安全性和适用性已经非常成熟,但是人员暴露在高压设备附近饱受风吹日晒、酷暑严寒,一边承受着噪音污染,一边承受着高压风险;而且随着现在科学技术进步各行各业工作人员操作舒适性和现

【基金项目】2023 年度承德国家可持续发展议程创新示范区建设科技专项项目（项目编号：202302F028）。

【作者简介】牛洪媛（1985-），女，中国河北承德人，本科，工程师，从事石油机械及自动化研究。

代化都在逐步改善，而电缆井控装备这方面表现的比较落后了。

设计开发可以远程控制和自动检测调节的设备，提高我们一线操作人员作业的安全性和舒适性的响应设备成为必要。

2 远程智能注脂的设计结构和创新

2.1 结构组成

注脂液控装置是电缆防喷装置的重要组成部分，其集成高压密封脂输送、液压控制于一体；其可以将高粘度的密封脂注入^[2]到注脂控制头、防喷器内实现对注入部位井液的阻断，从而实现密封电缆的目的；该套装置还备有液控系统用于控制防喷器、捕集器、防喷盒、刮绳器^[3]等，从而实现远程液压操纵防喷装备。主要由动力系统、设备近端控制系统、远端控制部分、数据采集和显示存储系统、远程控制系统、高压管线组、运输拖撬、液压泵组、阀组、操作电脑等组成，可实现“远程集成控制、自动化注脂、数据实时显示检测”等技术创新，设备运行与操作将在控制室内完成，对于目前国内外广泛使用的人工手动注脂施工作业是颠覆性创新。设备实现了远程控制和自动化注脂，有效的提高了现场作业效率，极大的降低了工作人员在易燃易爆、高压区域作业的安全风险。

整套系统主机部分安装在一个带防护房的拖撬内，其集成液压油箱、密封脂箱、液压泵组、注脂泵组、操作面板、控制阀组、控制管线，电器控制箱，软件控制系统，设备监控系统等于一体，设备合理的使用和维护本设备对有效控制井口压力、延长设备使用寿命，另外配置可远程操作控制的电脑，可以在控制室或技术控制中心，保障随时观察井口的运行情况，并能记录所有井口数据。

2.2 动力的选取

目前在用注脂液控设备有气驱动或者柴油机直驱液压驱动，现在根据目前施工作业状况结合自动化控制特点，目前有的作业区块已经开始采用电动压裂车，采用电驱动的方式可以更好的和市场需求相契合。

同时设备要采用远程自动化控制难免要用到电，设备动力系统采用电动系统作为优选，采用气动控制作为备选，并配备液压驱动。该设备配备了两套电动液压系统和一套气动液压系统，正常采用电动液压系统即可满足，遇到电气设备故障或现场断电时使用气动系统进行控制！设备控制集成了软件电脑控制操作和应急机械面板操作与一体，正常电气控制正常时可以实现远程电脑实现在集控室实现和其他设备一起协同施工、集中控制！也可在无电源和特殊情况下，现场手动进行开关和注脂操作，保证井口的安全施工。

2.3 功能配置

功能上首先保留目前所用设备的功能，包括开关控制压力调节，在此基础上增加设备操作记录，井口压力实时检

测，设备运行监控系统，以至于设备根据井口压力自动调节注脂压力的功能，宗旨就是保证实现设备通过远程电脑可以控制设备所有泵阀的开启和调节，同时对井口状况和设备运行状况的监控。

设备开发首先考虑将注脂液控装置实现远程自动化，可以根据客户需求可将井口快速连接装置，分流装置集成其中，可根据作业井口的需要，打开相应的操作模块进行控制，在不需要此功能时，可关闭相应的模版，实现按需设置，保证作业需要。

2.4 控制方式的转变

注脂液控装置控制部分分为高压注脂和液压控制两部分。传统的设备高压注脂采用手动调节气源的大小，来控制气驱注脂泵输出高压力的密封脂，实现对控制头内阻流管间隙和防喷器闸板密封腔进行注脂；液压控制方式采用手动控制气动泵从液压油箱内通过管路增压后，输送到相应的控制对象内，完成开关动作。

对于注脂部分改进后：所有泵阀的远程控制可以通过设备附带的 PLC 控制组或和设备连接的远程电脑实现控制；采用了低压控制高压部分的方式进行控制，将高压注脂阀采用液控方式实现；注脂阀组采用了液控高压阀组型式，两套液压泵系统各走一路，气动注脂泵并入其中一路结构；注脂阀注脂排放阀组设计，控制阀采用了液动常开式设计，同时保留了手动关闭功能，用于在需要长期关闭排放功能时的安全关闭；注脂阀控制阀组设计，控制阀采用了常闭式防爆截断阀，断电自动保压，同时对防喷器和控制头注脂保留手动液控功能，可以在极端情况下确保阀门可以手动应急液压操作。

对于液压控制部分改进后：采用防爆电磁阀实现远程控制，防喷器 / 捕集器控制阀组设计，控制阀采用了带应急手柄的防爆阀，断电时可以采取手动控制形式，并对防喷器控制压力带有传感器盒压力表双显示，即便断电可以实时观察防喷器关闭压力；防喷盒刮绳器控制阀组设计，控制阀防爆三位四通阀设计，断电时可以自动闭合保压，配合操作面板可以实现手动调节和压力观察；远程调压阀组，控制阀通过电脑程序发送指令给 PLC 调节控制电流，控制电磁铁开度实现调压阀的压力控制，用于调节液压泵驱动压力，防喷盒和刮绳器的设定压力等；卷线盘阀组布局，将大多数电磁阀集中于卷绕盘附近，便于集中控制维护，上层为液压气动卷线盘，下层为注脂管线卷线盘。

2.5 控制界面设计

控制界面根据常规操作面板结合实际情况，采用了常规面板到电脑操作界面的形象转换尽可能的使操作者进行简单学习即可由常规设备操作切换到自动化控制界面的转化，操作主界面上设置了 6 个模块，分别是用户界面，设备控制界面，压力记录，设备参数，报警，设备监控模块。每个模块的功能单独设置，可更好的进行使用控制，方便现场

操作。每个模块的功能设置为：用户界面模块，可输入井口信息，井队，负责人和登入密码等信息；设备控制界面模块，为整个操作模拟设备现场的界面，电控界面和常规操作界面一样保留了设备控制原理示意图，示意图左侧为注脂控制，右侧为液压操作控制，整个界面最右侧为系统运行状态显示和控制部分，简单直观；在右侧可显示井口实时的压力，PLC 运行状态，泵组、气源状态；密封脂箱和液压油箱的液位；防喷器等控制设备的开关状态和液控压力；压力记录模块，保留所有的井口数据和操作参数；设备参数模块，可以对控制部分、井口注脂参数进行数据设置；报警模块，可在出现故障和液位低，压力低等情况时进行声光报警提示，在电脑上就可直接查看报警的原因，可快速对报警问题进行相应的处理；设备监控模块，设备安装了多个可旋转摄像头，可以监测现场井口作业的运行情况，控制设备在现场的操作情况；方便在控制室就可快速查看现场的情况；

2.6 应急功能

鉴于设备的安全性考虑，设备配套了两套完整电动注脂系统和液压系统，同时增加了一套备用气动泵系统，正常情况下采用电动泵即可满足使用要求，这种配置可保证在一套动力系统出现问题时，可以直接使用另一套，断电时也可以采用气动系统应急施工。

对于设备的控制部分，对于防喷器、捕集器、防喷盒、刮绳器等开关控制等保留了应急手动操作，并对防喷器注脂和控制头注脂保留了手动控制开关。

3 远程智能注脂的应用

远程自动化注脂液控装置，已经完成样机的生产，并在油田现场进行试验，已成功完成带压电缆输送分段桥塞多簇射孔 30 余井次，远程数据采集准确完整，远程控制精准无延时，报警及传感器声光显示运行良好，未发生井控异常事件，取得良好现场应用效果。设备的应用效果如下：

在绞车控制室操作，只需 1 人控制设备并且远离高压区域，与绞车操作员实现无延迟沟通，通过信号线缆或无线信号，实现远程对设备液压系统、注脂系统、排风扇、脂箱加热的整体程序化控制。

近地端与远程控制端均设置液位显示及声光报警，当近地端设备或井口出现异常状态时，报警开启，提醒操作人员进行处理。

数据量化，精准调控：控制压力值精准到 0.1 级。根据不同环境温度、电缆速度、电缆规格、井口压力建立数据库，形成自动化的电缆动态密封。

具有数据记录功能：通过记录曲线且可导出式的设计，实现对已作业过程的复查，进行回顾性分析。

近地控制端：通过触摸屏，进行对设备的操作，远地控制端：通过移动介质，进行对设备的控制（大于 50 米）。

采用先进的 PLC 控制模块，包含数字量控制、RTD 模块、模拟量控制，实现对设备的各类控制阀、检测器的远程控制。根据现场数据采集记录，并优化总结出数据编辑逻辑指令，形成智能化的操作体系，可对不同工况实现有效的实时动态密封电缆，已成功实现分段桥塞多簇射孔全过程（井口无压力→平衡压→枪串下放→压力泵送→泵送到位→射孔→上提→关闭井口→泄压）无人值守功能。

自动化集成系统，一键自动工作，注脂系统负责采集高精度压力变送器（0.5 级）的信号，并根据定制研发算法，发送远程指令，控制近地的防爆电磁阀，对注脂管路及注脂压力进行实时调整。液压系统同理，控制近地的防爆减压溢流阀，对系统进行压力的实时调控。

有了自动化的精准控制，密封脂^[4]的使用量大大减少，根据作业后的统计，单次单段作业可节约和减少密封脂的使用量约 10L；单队每年合计减少用量约：3000L；可节约成本，减少费密封脂对环境的污染。

4 结语

随着时代的发展，电缆防喷控制设备已经开始走向了电气化、自动化和智能化的施工作业。本文论述了“油气田用远程智能注脂与液控技术装置的创新技术”，可实现电液联合控制，远距离操作，可极大降低施工人员在高压、易燃易爆施工环境下的安全风险；同时设备可实现自动注脂、自动采集和记录施工数据，自动调节施工参数，有效的提高了工作效率，提高了施工质量，并且施工参数和设备输出参数实现了连续记录和实时显示；设备将操控界面集中布置在安全的操控室内，可以实现一人操控多台设备和多井口同时交叉作业，既提高了效率，又降低了人力成本，并且降低了发生事故造成的人员和财产损失，此设备可解决目前行业在油田测井、射孔施工中的安全问题，为油田测井、射孔健康有序发展提供保障，对科技创新产品进行转型升级实现高质量发展有积极的带动作用。

参考文献

- [1] 刘正彦,王峰,王喜,王雪艳,电缆模块化分簇射孔技术研究及应用[J].化工管理. 2024 (25):97-101
- [2] 唐英才,李光,高压气井电缆作业密封失效解决措施[J].化工管理. 2024 (08):130-132
- [3] 蔡翔飞,喇叭口在射孔层上笼统注聚井测试技术应用[J].石油管材与仪器, 2019,5 (06) 57-60+65
- [4] 姚文钊,刘霖佳,赵龙,吕浩楠,于金鑫,鲁文辉. 带压测井电缆防喷装置密封影响因素分析及产品应用[J]. 润滑油, 2025 ,40 (03):11-15.

Short video account valuation based on improved Interbrand model—Taking Douyin account “Lu Xiaoca” as an example

Wenxuan Li Rui Xu

School of Economics and Management Guangxi University of Science and Technology, Liuzhou, Guangxi, 545006, China

Abstract

This study constructs a value assessment system for online influencer accounts by adapting the improved Interbrand brand valuation model to the characteristics of the short video industry. Focusing on the top beauty account "Lu Xiaocao" under Qingteng Technology, the research systematically evaluates the intangible asset value of the account through quantitative analysis of its brand earnings and brand strength. The findings indicate that the modified Interbrand model can be effectively applied to the valuation of short video influencer accounts. Furthermore, the study identifies three key factors contributing to the discrepancy between theoretical valuation and market expectations: the conversion efficiency of fan economy value, personal brand risks of the influencer, and subjective investor preferences. This research not only extends the application of traditional brand valuation theory to the new media sector but also provides a quantitative reference for MCN agencies in asset management, investment decision-making, and commercial operations.

Keywords

short video account; brand value; Interbrand model

基于改进 Interbrand 模型的短视频账号估值——以抖音账号“鹿小草”为例

利文萱 徐瑞

广西科技大学经济与管理学院, 中国 · 广西 柳州 545006

摘要

本研究基于改进的Interbrand品牌价值评估模型,结合短视频行业特性,构建了一套适用于网络达人账号的价值评估体系。以青藤科技旗下头部美妆账号“鹿小草”为研究对象,通过量化分析其品牌收益和品牌强度,系统评估了该账号的无形资产价值。研究发现,改进后的Interbrand模型能够有效适用于短视频达人账号的价值评估。研究进一步揭示了理论估值与市场预期存在差异的三个关键因素:粉丝经济价值转化效率、博主个人品牌风险以及投资者主观偏好。本研究不仅拓展了传统品牌价值理论在新媒体领域的应用,也为MCN机构的资产管理、投资决策和商业化运营提供了重要的量化参考依据。

关键词

短视频账号; 品牌价值; Interbrand模型

1 引言

短视频行业近年来呈现爆发式增长,截至 2024 年,中国短视频用户规模已突破 10 亿,占网民总数的 90% 以上。在这一背景下,优质短视频账号的商业价值日益凸显,头部账号年收入可达数千万元,成为数字内容产业的重要组成部分。然而,当前对短视频账号价值的评估多停留在粉丝量、播放量等表面指标,缺乏系统、科学的评估体系。

Interbrand 模型作为全球最具影响力的品牌价值评估方法之一,其核心逻辑是通过量化品牌对未来收益的贡献来评

估品牌价值。从理论角度看,这拓展了品牌价值评估的应用边界,为数字内容资产估值提供了新思路;从实践角度看,科学的评估体系有助于内容创作者优化运营策略,帮助投资者识别优质账号,促进平台生态健康发展^[1]。

2 研究设计

2.1 Interbrand 模型基本原理

Interbrand 模型由英国约翰·墨菲创立,是全球最具影响力的品牌价值评估方法之一。该模型的原理是先确定该品牌所带来的超额收益,接着确定品牌作用指数,以超额收益和品牌作用指数确定品牌收益,确定品牌强度和品牌乘数之后,以超额收益和品牌乘数乘积得出品牌价值,品牌价值计算公式为: 品牌价值 = 品牌收益 × 品牌强度乘数,其中品

【作者简介】利文萱 (2001-), 女, 壮族, 中国广西钦州人, 硕士, 从事企业价值评估方向研究。

牌收益 = 企业收益 × 品牌作用指数

2.2 Interbrand 模型关键参数优化

鉴于 Interbrand 评估模型诞生于特定的经济市场环境, 其底层假设与国内短视频行业的市场特性、竞争格局及用户行为模式存在显著差异, 直接套用该模型评估国内短视频账号价值易导致结果偏离实际。为此, 需结合短视频行业特征对模型进行改进: 在收益预测层面引入情景分析法, 通过多场景模拟降低未来收益的不确定性; 在作用系数测算中运用齐普夫定律, 基于账号流量分布规律优化收益分配权重; 运营分析则通过采集粉丝活跃度、内容完播率、商业化合作频次等数据, 并参考飞瓜数据等第三方评估体系的行业基准值, 生成强度乘数以反映账号的当前价值与潜在风险。

2.3 自媒体账号所属公司未来预期收益的优化

相较于依赖单一情景的传统估值方法, 情景分析法通过构建多维度的分析框架, 能够更精准地刻画企业未来的发展态势。具体应用于短视频账号所属公司的收益预测时, 该方法首先从财务视角切入, 系统梳理目标企业的历史财务数据, 并基于关键财务指标量化其历史收益表现; 随后深入剖析影响企业收益的核心驱动因素, 通过监测这些因素的动态变化, 构建出包含乐观情景、基准(一般)情景及悲观情景的三种未来可能图景, 同时对各情景的发生概率进行科学估算; 最终, 在情景框架内结合历史收益数据, 分别推演并量化不同情景下的企业预期收益值, 从而形成更全面的收益预测体系^[2]。

2.4 自媒体账号作用系数的优化

齐普夫定律 (Zipf's Law) 由美国语言学家乔治·K·齐普夫 (George K. Zipf) 于 20 世纪 40 年代首次提出, 其核心在于揭示自然语言中词频分布的幂律特征: 在海量数据集合中, 某项数据的出现频次与其排名次序的乘积趋近于一个恒定值。这一规律在互联网社交场景中可进一步延伸为互动频次的幂律衰减模型——若假设用户与其最高频互动对象发生 A 次交互, 则排名第二的交互频次约为 A/2 次, 第三名约为 A/3 次, 以此类推。当每次交互的单位价值设定为 1 时, 在用户规模为 N 的网络中, 所有用户间交互产生的总价值可通过幂级数求和公式推导, 其数学表达式可表示为: N(1+1/2+1/3+…+1/N)≈N×ln(N)。

2.5 自媒体账号强度乘数的优化

飞瓜价值评价体系是由专业短视频与直播电商数据服务平台——飞瓜数据提出, 该评价体系聚焦于短视频与直播电商领域的核心数据(抖音、快手等平台), 以主流短视频及直播平台为依托开展账号生态与商业价值指数评估, 并在各类行业榜单中对各账号内容传播力、粉丝活跃度及商业转化力进行综合排名, 打造出当前国内领先的短视频直播电商数据服务平台核心指标——飞瓜指数。该指数全面覆盖短视频与直播电商的主流生态, 包括抖音账号影响力指数、直播带货力指数、商品热销指数等, 且各类指数的评估维度及其

计算公式均实现全流程公开透明。此外, 该数据评估与研究平台支持多维度的历史数据回溯功能, 可为投资者、品牌方及内容创作者提供跨时段的账号表现分析与趋势洞察。

将获取的自媒体账号强度数值代入 Interbrand 模型 S 型曲线公式, 由此可得自媒体账号乘数。具体公式如下:

$$\begin{cases} S^2 = 2L, L \in [0, 50] \\ (S-10)^2 = 2L-100, L \in [50, 100] \end{cases}$$

其中, S 指自媒体账号乘数, L 指自媒体账号强度。

3 改进 Interbrand 模型在短视频账号“鹿小草”价值评估的应用

3.1 评估对象及评估基准日

本文选取抖音自媒体账号“鹿小草”为研究对象, 该账号隶属于 2011 年成立的北京青藤科技股份有限公司(2016 年新三板挂牌, 获平衡资本、腾讯等投资)。公司主要收入来源涵盖三大板块: 基于原创 IP 内容产品及 MCN 业务产生的广告合作收入、依托商业整合营销全案策划获取的广告服务收益, 以及通过短视频内容在社交平台与视频渠道分发所获得的内容流量分成。公司聚焦母婴、二次元、美妆等垂直领域, 打造多个知名 IP, 签约 300 余个红人及账号, 汇聚逾 1 亿粉丝, 是行业领先的 MCN 企业及腾讯、抖音等平台的重要战略合作伙伴。其中, “鹿小草”抖音账号作为公司 MCN 矩阵标志性 IP, 具备研究价值且数据易获取, 故被选定为本文案例分析对象。

鉴于数据可得性, 本文将评估基准日设定为 2023 年 12 月 31 日^[3]。

3.2 评估过程

3.2.1 自媒体账号所属公司未来预期收益

根据青藤科技将未来情景分为乐观情景和悲观情景。

通过分析公司历史信息, 推测未来情景发展趋势进而测算发生各种情景的概率。本文根据青藤科技企业财务报表披露内容, 选取从 2015 年至 2024 年共 10 年的净利润数据, 研究其各年度分布特征, 并对企业未来情景发展趋势及概率进行分析。具体数据如表 1 所示:

表 1 青藤科技公司 2014–2023 年净利润及增长率

年份	净利润(万元)	增长率
2014	179.88	
2015	160.67	-10.68%
2016	-1927.77	-1299.83%
2017	131.87	106.84%
2018	-339.91	-357.76%
2019	-964.06	-183.62%
2020	1069.09	210.89%
2021	1613.67	50.94%
2022	58.62	-96.37%
2023	-4506.57	-7787.77%

为准确揭示公司净利润增长的一般规律，基于统计学中的异常值处理原则，将 2016 年和 2023 年这两个明显偏离正常波动范围的异常观测值予以剔除。见表 2。

表 2 青藤科技净利润增长分析

未来情景	划分标准	频数	频率	均值
	增长率 < 0	4	57.14%	-162.11%
	增长率 > 0	3	42.86%	122.89%

确定各情景下净利润平均增长率后，选取 2022 年公司净利润 50.62 万元为基础数据，由此得出青藤科技各情景下企业净利润的预测值，如表 3 所示：

表 3 2024–2028 年企业净利润

2024 年	2025 年	2026 年	2027 年	2028 年
35.66	70.05	133.17	240.49	397.21

3.2.2 自媒体账号作用系数

获取自媒体账号所属公司的整体收益数据的关键任务是运用自媒体账号的作用系数，来精确分离出目标自媒体账号（即待评估账号）为公司所创造的具体收益份额，并以此为基础预测该账号的未来预期收益。根据青藤科技公司官方网站公布的数据，截至评估基准日，该公司在全网的粉丝覆盖总量已超过 1 亿人次，而旗下“鹿小草”抖音账号所累积的粉丝数则达到了 520 万人次。

3.2.3 自媒体账号强度乘数

2023 年 12 月 31 日，抖音账号“鹿小草”运营指标数据包括：发布总视频数 36 个，视频平均播放量为 85.6 万，视频平均评论量为 2300 条，账号总粉丝数为 520 万人，账号新增粉丝数约为 1.2 万人。选取当日抖音短视频排行榜中飞瓜指数最高值为 893.2 及“鹿小草”飞瓜指数 635.2，将以上数据代入百分制化公式可得“鹿小草”抖音自媒体账号价值得分即自媒体账号强度约为 71.12。

3.2.4 确定自媒体账号乘数

将自媒体账号强度带入 Interbrand 模型 S 型曲线公式中，可求的“鹿小草”B 站自媒体账号乘数为 16.51。

被评估自媒体账号价值计算

据前文案例研究可知，根据评估基准日“鹿小草”B 站账号所属公司青藤科技收益预测值 876.58 万元，自媒体账号作用系数 0.0437 以及自媒体账号乘数值 71.12，代入自媒体账号价值评估公式得：

$$Z = 876.58 \times 0.0437 \times 16.51 = 632.44$$

即求得“鹿小草”B 站账号于评估基准日 2023 年 12 月 31 日的价值为 632.44 万元

4 评估结果验证与分析

本研究用改进 Interbrand 模型评估“鹿小草”抖音账号价值 632.44 万元，青藤科技总市值 2.1 亿元，“鹿小草”账号理论收益贡献应占 4.37%，但实际价值显著低于理论值，这一差异可能源于以下几个因素：

“抖音账号”“鹿小草”的粉丝经济价值转化效率不足：虽然“鹿小草”账号粉丝量在青藤科技中占比较大，但其直播带货频次极低，导致粉丝群体的经济价值未能得到有效挖掘与转化。博主个人品牌风险：博主的跨平台作品影响力及其公众形象变迁会通过受众认同度渠道对账号价值产生非线性冲击。第三，投资者主观偏好：投资者对账号价值的判断往往受到认知偏差、情绪波动以及对 MCN 机构协同效应的主观预期等多重心理因素的影响。综上，影响“鹿小草”账号估值差异的三个关键维度主要是：粉丝经济价值转化效率不足、艺人账号特有的个人品牌风险溢价，以及投资者行为偏差导致的市场价格偏离，因此新媒体账号估值需构建融合量化指标与质性因素的多维评估体系。

5 结语

本研究聚焦短视频账号价值评估，针对行业缺乏系统化评估体系的痛点，创新性地将 Interbrand 品牌价值模型适配至短视频达人账号场景，以青藤科技旗下“鹿小草”账号为实证对象，通过“品牌收益 × 品牌强度倍数”的框架展开分析，结果显示该账号最终评估价值为 632.44 万元，占青藤科技估值的 4.37%。研究不仅首次验证了 Interbrand 模型在短视频领域的适用性，弥补了传统估值方法对无形资产价值的忽视，还为 MCN 机构、投资方及广告主提供了可量化的决策工具。

然而，受限于非公开财务数据估算偏差、行业政策与算法快速变化等因素，模型需定期修正参数。未来可结合其他估值模型或用户情感分析进一步优化，推动行业标准化评估进程。

参考文献

- [1] Kaplan, A. M & Haenlein, M. Users of the world, unite! The challenges and opportunities of Social Media. *Business Horizons*, 2018, 53(1), 59-68.
- [2] Ghosh & Scott, B. Digital "influencers" and the economy of visibility. *Social Media Society*, 2018, 4(3).
- [3] Abidin. Visibility labour: Engaging with influencers' fashion brands and OOTD advertorial campaigns on Instagram. *Media International Australia*, 2017, 161(1), 86-100.

Coal quality control technology in intelligent mining of fully mechanized coal mine working face

Jun Li

Shanxi Jin Xing Energy Co., Ltd., Luliang, Shanxi, 033600, China

Abstract

As China's coal resource development progresses into deeper and more complex geological environments, intelligent mining technology for fully mechanized coal mining faces (FMC) faces has become a crucial approach to enhance production efficiency and ensure stable coal quality. In this intelligent mining process, coal quality control serves as the core element for achieving efficient, safe, and environmentally friendly production. Focusing on the practical implementation of intelligent mining in FMC faces, this study explores technical approaches and implementation methods for coal quality control. First, it investigates the primary influencing factors of coal quality fluctuations in FMC faces, including geological complexity, roof and floor conditions, and equipment operational precision. Subsequently, it elaborates on real-time monitoring and regulation technologies for coal quality through sensor-based monitoring, big data analysis, and intelligent control systems. Finally, it presents an optimized solution for coal quality prediction and dynamic adjustment via an intelligent decision support platform.

Keywords

coal mine fully mechanized mining face; intelligent mining; coal quality control; big data analysis; intelligent monitoring

煤矿综采工作面智能化开采过程中的煤质控制技术

李军

山西锦兴能源有限公司, 中国 · 山西 吕梁 033600

摘要

伴随我国煤炭资源开发迈向深部及复杂地质环境, 煤矿综采工作面智能化开采技术逐步成为提升生产效能与保障煤炭质量稳定的重要手段。智能化开采进程中, 煤质控制是实现高效、安全、绿色生产的核心要素。聚焦综采工作面智能化开采实际情况, 研究了煤质控制的技术途径与实施办法。首先探究了综采工作面煤质波动的主要影响因子, 涵盖地质构造复杂程度、顶底板状况以及设备作业精准度等; 接着阐述了依托传感监测、大数据分析以及智能控制系统的煤质实时监测与调控技术; 最终给出了借助智能决策支持平台达成煤质预测与动态调整的优化方案。

关键词

煤矿综采工作面; 智能化开采; 煤质控制; 大数据分析; 智能监测

1 引言

煤炭作为我国一次能源消费结构里的关键部分, 对保障国家能源安全和推动经济发展起着不可替代的作用。伴随煤炭开采强度持续加大, 煤矿地质情况日益繁杂, 煤质稳定性问题逐步显现。煤炭质量既直接左右煤炭产品的市场价值与用户需求, 又关乎下游电力、冶金等行业的生产效率及环保成效。传统综采工作面凭借人工经验开展煤质控制工作, 常出现监测不及时、调控方式单一、执行精准度欠佳等状况, 无法契合现代煤矿智能化发展需求。伴随智能感知、物联网、大数据及人工智能技术的迅猛进步, 煤矿综采工作面实现智能化开采已成为行业发展新潮流。鉴于这一形势, 煤质控制

技术迫切需要与智能化开采实现深度融合, 从而达成对煤质的实时感知、精准调控以及动态优化。探究煤矿综采工作面智能化开采时的煤质控制技术, 不仅有重大理论价值, 又有实际工程意义。

2 煤质控制的目标与意义

智能化开采煤矿综采工作面期间, 煤质控制旨在保障煤炭的灰分、硫分、粒度和水分等指标稳定, 以契合市场需求与环保标准。稳定的煤炭质量可保障其发热量与燃烧效率, 削减下游企业的除灰及脱硫成本, 增强市场竞争优势。从环保层面考量, 煤质保持稳定可从根源上降低二氧化硫、粉尘等污染物排放, 与绿色矿山建设及“双碳”战略目标相适配。煤质把控对资源高效利用意义非凡, 削减矸石混入情况、增强煤流纯净程度, 既提升了资源回收比例, 还减少了矸石排放, 缓和了土地与环境的压力。在安全方面, 煤质变

【作者简介】李军 (1975-), 男, 中国江苏徐州人, 工程师, 从事采矿工程研究。

化往往反映地质条件的变化,如夹矸或顶底板稳定性问题,因而煤质监测也是安全生产的重要预警手段^[1]。

3 煤质波动的成因与传统方法局限性

复杂的地质条件与动态的开采环境是煤质波动的主要根源。例如,煤层厚度不一致、夹矸出现频繁、顶底板岩性有变化,都有可能造成煤矸界面不稳定,进而影响煤炭纯净度。按照传统的方式,煤质检测大多依靠人工采样与化验,该方式存在滞后问题,常常在煤炭进入运输或存储阶段后才得出检测结果,难以迅速反馈至生产环节。人工经验在煤质判断里起着关键作用,然而不同工人在辨别煤矸界面方面能力高低不一,易引发误判或延误时机。传统依靠人工来控制煤机截割高度以及调整支架压力的方式,难以契合综采工作面高强度、连续作业的要求。这些制约因素让煤质控制无法做到实时精准,造成煤质频繁波动,既损害经济效益,还可能产生安全及环保方面的问题。

4 传感器与智能检测技术在煤质控制中的应用

4.1 分布式传感器在煤质控制中的应用

伴随矿山智能化建设持续推进,分布式传感器的运用逐步成为煤质控制核心要素。通过合理地在综采工作面布置激光扫描仪、压力传感器、红外探头和高清摄像机等设备,系统能够即时采集煤层厚度、煤矸界面位置以及煤流运行情况等关键数据。该分布式监测模式成功攻克传统点位监测覆盖范围受限、信息不连续的困境,助力煤矿达成全面、动态的数据收集。例如,激光扫描技术可精准构建煤层三维剖面图,为采煤机截割高度的调整提供依据;压力传感器可实时监测顶板与底板的稳定性^[2]。

4.2 激光扫描与光谱成像的精准识别

在煤质控制时,怎样准确辨别煤与矸石是关键所在。以往依赖人工肉眼观察或经验判定的方法,既效率欠佳,而且精准度不够,引入激光扫描、红外光谱以及高光谱成像等现代检测技术,成功攻克了这一难题。激光扫描技术借助高精度扫描煤层表面,可构建实时空间模型,直观呈现煤层厚度和夹矸分布情形。红外光谱和高光谱成像依靠煤跟矸石在光谱吸收特性方面的差别,达成成分的识别与分类。当这些技术相互结合,可在煤流运输时实时剖析和甄别物料,进而为采煤机自动调节截割轨迹提供依据,最大程度降低矸石混入煤流的量。

4.3 图像识别技术与煤流监测

综采工作面生产期间,动态监测煤流对煤质控制极为关键。伴随计算机视觉技术迅猛发展,图像识别技术在煤流监测中得到广泛应用。利用高清摄像头以及高速处理器,系统可抓取煤流表面的纹理、颜色及颗粒分布等特征数据,运用深度学习算法快速区分煤和矸石。该技术解决了传统人工巡检效率低下的难题,可在毫秒级时间里完成图像采集与识别,极大增强了煤质控制的实时性。

4.4 智能检测与自动控制的联动

智能检测技术的核心价值是和综采设备自动控制系统达成无缝对接。传感器采集的数据会马上传输到中央控制平台,由算法进行分析处理。若煤层厚度或者煤矸界面位置出现变动,系统能马上做出回应。例如,采煤机可按照检测数据自动对截割高度予以调整,防止矸石过度夹杂;刮板输送机和转载机可根据煤质特征参数对运行速度与角度进行优化,维持煤流稳定。支架压力自动调节功能可有效保障顶板稳定,降低煤质波动引发的安全隐患。

5 大数据与地质模型驱动的煤质预测与优化

5.1 大数据与多源信息融合构建煤质分析体系

煤质控制的要点是对动态、复杂信息进行高效整合,而大数据平台恰好具备了这种能力。在煤矿综采工作现场,传感器可实时采集煤层厚度、煤矸界面位置、煤流粒度分布等一手数据,采煤机、输送机等设备的运行状态参数不断传至系统。若多源数据被孤立运用,常难作出系统性判断,但借助大数据平台进行融合处理,可对多维度信息进行相互验证与全面分析,从而搭建起煤质动态分析体系。平台可将地质勘探数据与煤层三维地质模型相融合,促成生产现场和地质条件的深度契合^[3]。

5.2 基于地质模型的煤质趋势预测

预测能力是大数据驱动的另一核心功能,地质模型在这当中起到了极为关键的作用。煤层地质情形往往十分复杂,煤层厚度变动、夹矸层分布以及顶底板稳定性等要素,均会直接影响煤质。依托大数据平台,系统把传感器采集的实时数据和地质模型进行匹配,系统可模拟不同开采工况下煤质的变化。例如,一旦煤层厚度急剧变薄,模型可预判矸石混入几率,并提供避开该区域的截割策略。面对更为复杂的地质状况,系统可借助蒙特卡洛模拟、有限元分析等手段,对比不同截割路径下的煤质结果,进而为采煤机确定最佳作业路径。

5.3 煤质优化与产能平衡的实现路径

预测的终极目的是实现优化,且煤质优化并非单纯追求煤流的纯净度,而是要在保障煤质的同时兼顾产能。借助大数据平台开展趋势分析,煤矿企业能对不同工况中产量与煤质的关联实施量化评估。例如,系统或许会察觉,在某个区域提升采煤机的截割高度可大幅降低矸石混入量,然而会导致产量下滑;另一种工况下,稍微降低煤质指标竟可显著增加产能。基于数据驱动的优化手段能协助管理者在煤质和产能间找准平衡点,达成综合效益的最大化。大数据优化系统可根据市场需求和环保要求,实时调整煤质控制目标,当市场对低硫煤的需求上升时,系统会优先选定硫分较少的煤层区域进行采掘。

5.4 数据驱动的决策支持与主动调控

基于大数据的预测与优化不只是技术领域的进步,更

是煤矿管理模式的革新。煤质控制大多依靠现场人员根据经验作出判断,存在显著的滞后性与不确定性。依托大数据平台的支撑,管理者能于采前阶段提前规划出科学方案,采中阶段即时调整生产策略。例如,一旦系统预测到某区域煤矸含量升高,调度人员可马上调整作业安排,防止大量矸石混入。

6 人工智能与自动化控制在煤质调控中的作用

6.1 人工智能在煤质监测数据分析中的作用

人工智能的关键优势是能处理海量数据并挖掘潜在规律。在煤矿综采工作面,煤质的波动受地质状况、设备运行状态以及开采工艺等诸多因素作用,传统人工分析无法精确把握各因素彼此的复杂关系。通过机器学习和深度学习算法, AI 系统可对传感器收集的煤层厚度、煤矸界面位置、煤流粒度和煤质成分数据开展全面剖析,从中归纳出规律性特征,搭建煤质波动与地质条件、设备参数的预测模型。例如, AI 可识别某类煤层厚度变化模式和矸石混入概率之间的联系,进而为开采方案提供量化支撑。此数据驱动手段增强了煤质监测的科学性,又能精确处理复杂的非线性、多变量问题,为后续动态调控筑牢了数据根基^[4]。

6.2 实时识别与偏差预警

人工智能在煤质控制方面的另一关键作用是实时察觉煤质偏差并发出预警。常规办法一般依赖人工巡检与周期性抽样,具有滞后特性,不易及时察觉煤质异常。AI 系统能借助模型对实时采集的数据开展分析,当检测到煤质指标(例如灰分、硫分、粒度或水分)偏离既定范围时,系统马上生成偏差预警,并且自动标注异常之处与可能缘由。凭借这种实时识别本领,赋予管理者在问题起始阶段采取行动的能力,避免煤质出现大面积波动,降低经济损失与生产风险。同时, AI 凭借持续学习能力能持续优化偏差识别模型,增强预警精准度,推动煤质管理由被动应对转变为主动掌控,达成智能化管理。

6.3 自动生成优化控制指令

AI 于煤质控制里的优势,不光体现在监测和预警,还可达成自动化调控。凭借预测模型,系统可生成针对各异煤质偏差的调整指令。例如,一旦煤矸混入量超出标准, AI 能自动调控采煤机的截割高度、支架压力,或对刮板输送机的速度进行优化,进而减少矸石含量,保障煤流纯净。智能调控过程无需人工介入,可于开采期间达成“边采边控”。和传统人工调节相比, AI 控制具备更快的响应速度和更高

的精准度,还可实现持续监控与动态优化,能有效适应复杂多变的地质条件与施工环境,达成煤质控制的自主与智能。

6.4 边采边控与生产效率提升

借助人工智能与自动化控制系统相融合,煤矿可真正实现“边采边控”。在综采作业期间, AI 系统不断收集煤质数据、设备状态及地质信息,即时调控采煤参数,保障各批次煤炭质量稳定。该模式既削减了人工操作与人为失误,增强了开采精准度,又大幅提高了生产效率。煤矿企业能够在确保煤质稳定的基础上,实现产量的优化以及资源利用最大化,同时降低因煤质不稳定引发的返工和损失。高度智能化的开采模式的出现,代表着煤矿管理从依赖传统经验向数字化、智能化管理迈进升级^[5]。

6.5 推动智能矿山建设与绿色发展

煤质控制中运用人工智能具备长远意义。通过引入 AI 技术后,煤矿生产质量和效率得以提升,还促使矿山朝着智能化、无人化迈进。智能化煤质控制削减了人工介入,减轻劳动强度并降低安全风险,达成生产过程的高效、安全与可控。

7 结语

煤矿综采工作面实施智能化开采时,煤质控制技术已然成为保障生产效率和资源利用率的核心所在。借助传感监测、数据融合、人工智能算法和智能决策平台的联合运用,能达成煤质实时监测、趋势预测与动态调控,攻克了传统方法监测迟缓、精度欠佳的难题。该技术路线不仅让煤炭产品质量更稳定、市场竞争力更强,还能减少矸石混入并降低环境污染,达成资源开采的绿色与智能目标。未来,伴随智能矿山建设的持续推进,煤质控制技术将朝着多源数据融合、深度学习模型优化以及全流程智能决策的方向持续发展,为煤炭行业转型与可持续发展筑牢根基。

参考文献

- [1] 侯本猛.赵楼煤矿智能化综采工作面关键技术的应用研究[J].山东煤炭科技,2025,43(08):51-56.
- [2] 崔泽峰.煤矿智能化综采工作面关键技术研究[J].能源与节能,2025,(08):161-163.
- [3] 陈钊,刘卿.煤矿综采工作面高效开采技术研究[J].内蒙古煤炭经济,2025,(15):37-39.
- [4] 王涛涛,王飞,包苏东.煤矿综采工作面机械设备高效安装技术研究[J].中国设备工程,2025,(13):222-224.
- [5] 李晓博.煤矿综掘工作面机电设备智能化控制的研究与应用[J].当代矿工,2025,(05):34-35.

Research on efficient machining technology for aluminum alloy panels

Liying Liu

General Technology Group Machine Tool Engineering Research Institute Co., Ltd., Shenyang, Liaoning, 110023, China

Abstract

Due to its low density, high strength-to-weight ratio, and corrosion resistance, aluminum alloy panels are increasingly widely used in high-end equipment fields such as aerospace and automotive manufacturing. This paper focuses on the research of efficient machining technology for aluminum alloy panels, analyzing their material properties, structural characteristics, and machining deformation mechanisms. Subsequently, it delves into key technologies for efficient machining from four dimensions: process parameter optimization, tool design and selection, CNC programming and path planning, and vibration suppression and stability control. Finally, the paper verifies the feasibility and effectiveness of the technology through practical cases in the aerospace and automotive manufacturing sectors, providing theoretical support and practical guidance for the efficient and high-precision machining of aluminum alloy panels.

Keywords

aluminum alloy panels; efficient machining; process parameter optimization; tool design

铝合金壁板的高效机床加工技术研究

刘丽英

通用技术集团机床工程研究院有限公司沈阳分公司, 中国 · 辽宁 沈阳 110023

摘要

铝合金壁板因密度低、比强度高、耐腐蚀等优势, 在航空航天、汽车制造等高端装备领域应用日益广泛。本文围绕铝合金壁板高效加工技术展开研究, 分析其材料特性、结构特性及加工变形机理。之后从工艺参数优化、刀具设计与选用、数控编程与路径规划、振动抑制与稳定性控制四个维度, 深入探讨高效加工关键技术。文章最后结合航空航天、汽车制造领域的实际应用案例, 验证技术的可行性与有效性, 为铝合金壁板高效、高精度加工提供理论支撑与实践指导。

关键词

铝合金壁板; 高效加工; 工艺参数优化; 刀具设计

1 引言

在轻量化制造趋势推动下, 铝合金凭借优异的综合性能, 成为替代传统钢材制造结构件的核心材料之一, 其中铝合金壁板作为承力、减重的关键部件, 被广泛用于飞机机身、机翼蒙皮、汽车电池包壳体等核心结构中。随着高端装备对性能要求的提升, 铝合金壁板逐渐向“大尺寸、薄壁化、复杂化、高精度”方向发展, 这对其加工技术提出了更高要求。本文以铝合金壁板加工全流程为研究对象, 从特性分析切入, 聚焦高效加工关键技术, 结合实际应用案例验证技术效果, 旨在构建一套涵盖“特性-技术-应用”的完整研究体系, 为相关制造企业提供技术参考。

2 铝合金壁板加工特性分析

2.1 材料特性

铝合金作为典型的有色轻金属材料, 其特性对加工过程的影响主要体现在三个方面。铝合金的低密度和高塑性并存, 其密度约为 $2.7\text{g}/\text{cm}^3$, 仅为钢材的 $1/3$, 符合轻量化需求, 但这种高塑性会导致切削过程中产生较大的塑性变形, 虽然切削抗力低于钢材, 但变形能转化的热量易集中在切削区域, 从而使刀具温度升高。铝合金还具有良好的导热性, 导热系数约为 $200 \sim 300\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, 是钢材的 3—5 倍, 理论上有利于切削热的扩散, 但在加工过程中, 高温下的铝屑容易与刀具表面发生化学亲和作用, 形成积屑瘤, 这会改变刀具的实际切削角度, 导致加工表面粗糙度增大, 严重时还会出现“粘刀”现象, 破坏已加工表面的完整性。此外, 铝合金在切削过程中会表现出明显的加工硬化效应, 表层金属因塑性变形发生晶格扭曲, 导致硬度和强度升高, 而塑性和韧性下降, 加工硬化层的存在会使后续切削时刀具磨损加剧,

【作者简介】刘丽英 (1977-), 女, 中国内蒙古赤峰市人, 本科, 工程师, 从事研机械设计、制造及自动化研究。

甚至引发切削振动，影响加工的稳定性。

2.2 结构特性

铝合金壁板的结构设计以“减重”和“承力”为核心，其结构特性直接决定加工难度。这些特性主要表现为大尺寸与薄壁化、复杂构型集成化以及结构刚度分布不均。在航空航天领域，机身壁板尺寸常达到数米，而壁厚仅为 2~5mm；汽车电池包壳体壁板尺寸多为 1~2m，壁厚为 3~8mm，这种大尺寸导致加工时工件装夹跨度大，而薄壁则使工件整体刚度低，在切削力作用下容易发生弯曲、扭转等变形，难以保证尺寸精度。为了满足功能需求，铝合金壁板常常集成筋条、凸台、孔系等复杂特征，部分航空壁板甚至采用整体铣削成型工艺，需要从整块铝合金坯料中去除 90% 以上的材料，这种复杂构型导致切削路径多变，刀具易出现干涉，同时不同特征的加工要求差异大，增加了工艺控制难度。

2.3 加工变形机理

铝合金壁板加工变形是力学变形、热变形及残余应力释放等多种因素协同作用的结果。在切削过程中，刀具对工件施加的切削力，尤其是径向力，是导致薄壁件变形的主要因素。由于壁板刚度低，径向力会使工件产生弹性或塑性变形，弹性变形在切削力消失后可部分恢复，但会导致实际切削深度与设定值偏差，而塑性变形则会造成永久性尺寸误差，如壁板翘曲、筋条弯曲等。不均匀的装夹力也易引发局部凹陷或翘曲，尤其对于大尺寸薄壁件影响更为显著。切削热则会导致铝合金工件局部温度升高，铝合金热膨胀系数约为钢材的 2 倍以上，冷却过程中因温度分布不均而产生的膨胀量差异会引发收缩变形，例如铣削表面时，表层收缩量大于内部，导致壁板向加工面弯曲。

3 高效加工关键技术研究

3.1 工艺参数优化

铝合金壁板加工需围绕切削速度、进给量、切削深度三大核心参数，结合冷却方式进行协同优化。在切削速度方面，铝合金加工适合采用高速切削技术，高速切削可有效抑制积屑瘤产生，提高材料去除率，采用硬质合金刀具加工 6061 铝合金时，切削速度可控制在 1000~2000m/min，采用聚晶金刚石（PCD）刀具时，切削速度可提升至 2000~4000m/min，材料去除率较传统低速切削提高 3~5 倍，但切削速度超过刀具承受极限时，会导致刀具急剧磨损，降低加工效率。

进给量需在保证表面质量的前提下最大化进给速度，进给量过小会导致切削刃与工件摩擦加剧，易产生加工硬化，过大则会增加切削力，引发工件变形，薄壁壁板加工的进给量通常控制在 0.1~0.3mm/r，并配合 1~5mm 的切削深度^[1]。针对铝合金加工特性，可采用微量润滑（MQL）或低温冷风冷却技术替代传统乳化液冷却（如图 1 所示），微量润滑通过将极少量润滑油与压缩空气混合形成油雾，喷射至切

削区域，既能起到润滑作用，减少粘刀与积屑瘤，又能通过压缩空气带走切削热，且无废液污染。低温冷风冷却则是将压缩空气冷却至 -10℃~30℃ 后喷射至切削区域，利用低温气流快速降低切削温度，抑制加工硬化，尤其适用于高速切削工况。采用 MQL 技术加工铝合金壁板时，刀具寿命可延长 30% 以上，表面粗糙度 Ra 可降低至 1.6 μm 以下，同时加工效率提升 15%~20%。



图 1 MQL 微量润滑液图

3.2 刀具设计与选用

铝合金壁板加工常用刀具材料包括硬质合金、聚晶金刚石（PCD）和立方氮化硼（CBN）等，其中硬质合金刀具成本较低，适合中低速切削或粗加工，通过 TiAlN、AlCrN 等涂层处理可提高耐磨性与抗粘刀性能，AlCrN 涂层因具有良好的高温稳定性在铝合金高速切削中应用广泛。PCD 刀具硬度高、耐磨性好、摩擦系数低，能有效抑制积屑瘤，适合高精度、高速精加工，尤其适用于硅含量较高的铝合金加工，但 PCD 刀具脆性大，不宜用于加工含硬质点的材料或断续切削工况（如图 2 所示）。

CBN 刀具硬度仅次于 PCD，耐高温性能优异，但与铝合金的亲和性较强，易粘刀，仅在特定高强度铝合金加工中少量应用^[2]。在刀具几何参数优化方面，铝合金塑性高，需采用较大前角以减少切削变形，通常取 10°~20°，后角取 8°~12°，精加工时可增大至 10°~15°，刃口半径一般取 0.05~0.2mm，螺旋角取 30°~45° 时可使切削力分布更均匀，减少振动，同时有利于排屑。针对壁板复杂构型与薄壁特性，刀具结构需满足排屑顺畅、刚性匹配的要求，粗加工时可采用多刃、大螺旋角的可转位铣刀，精加工时采用整体硬质合金或 PCD 立铣刀，刀具柄部采用锥柄结构，提高刀柄与主轴的连接刚度，减少振动。



图 2 PCD 刀具图

3.3 数控编程与路径规划

铝合金壁板加工需根据特征与加工阶段采用差异化加工策略,在粗加工阶段以快速去除余量为目标,采用层切法配合顺铣,顺铣时切削力小、工件变形小,且表面质量优于逆铣。半精加工阶段需修整粗加工后的表面缺陷,同时为精加工预留均匀余量,采用等高线加工或平行加工策略^[3]。精加工阶段以保证精度与表面质量为核心,对平面采用面铣刀环切加工,筋条采用侧刃顺铣,孔系采用先钻后铰或镗削的方式,确保位置度与圆度。

路径优化需围绕“缩短行程、均匀负荷、减少干涉”三个目标展开,采用连续路径规划,避免刀具频繁启停,减少非切削时间,例如粗加工时相邻层路径采用螺旋线过渡,而非直线跳转。根据壁板刚度分布优化路径顺序,先加工刚度较高的区域,后加工刚度较低的薄壁区域,减少后续加工对已加工表面的变形影响。合理选择加工策略与优化加工路径,可显著提高铝合金壁板加工的效率与质量,减少刀具磨损与工件变形,是实现高质高效加工的关键举措。

3.4 振动抑制与稳定性控制

在铝合金壁板加工中,振动抑制与稳定性控制至关重要,需从工艺、结构、控制等多个层面综合施策。工艺层面主要通过优化切削参数实现振动抑制,核心是避开切削颤振区,可通过切削稳定性 lobe 图确定稳定加工参数范围,选择位于稳定区内的切削速度与切削深度组合。结构层面的振动抑制主要通过优化装夹方式与增强工件刚度实现,采用“多点支撑、均匀夹紧”的原则,避免单点夹紧导致的应力集中,例如航空壁板加工时采用真空吸盘与辅助支撑结合的装夹方式,小型壁板可采用工装夹具与工件一体化设计。刀具结构优化也能抑制振动,如采用液压减振刀柄、摩擦减振刀柄等,通过刀柄内部的阻尼元件吸收振动能量。控制层面则引入自适应控制技术,通过振动传感器实时采集振动信号,根据预设阈值自动调整切削参数,使振动幅值控制在允许范围内。

4 高效加工技术应用案例

4.1 航空航天领域案例

某航空制造企业需加工某型飞机机身壁板,材料为 7075-T6 铝合金,壁板尺寸 $4000\text{mm} \times 1200\text{mm} \times 3\text{mm}$,集成 10 条高度 20mm 的筋条及 200 余个直径 8mm 的孔系,要求平面度 $\leq 0.5\text{mm}/\text{m}$,表面粗糙度 $\text{Ra} \leq 1.6 \mu\text{m}$ 。传统加工采用高速钢刀具,切削速度 300m/min,进给量 0.1mm/r,加工周期长达 48 小时,且壁板翘曲变形量达 2—3mm,合格率仅 60%。为解决上述问题,在工艺参数优化方面,选用 PCD 面铣刀,将切削速度提升至 3000m/min,进给量增大至 0.2mm/r,切削深度设定为 2mm,并采用 MQL 冷却方式,润滑油流量 20mL/h,压缩空气压力 0.6MPa。

刀具与装夹优化方面,筋条加工采用整体硬质合金立

铣刀,刀具前角 15°,后角 10°,刃口半径 0.1mm,装夹采用真空吸盘与 6 个可调节辅助支撑的组合方式,辅助支撑均匀分布在筋条之间的薄壁区域。编程与振动控制方面,通过 CAM 软件生成连续螺旋线层切路径,粗加工后采用等高线半精加工,精加工阶段引入自适应振动控制系统,设定振动阈值 0.04mm。残余应力控制方面,粗加工后增加去应力退火工序,在 120℃下保温 2 小时,以释放加工残余应力。应用该方案后,材料去除率从传统的 150cm³/min 提升至 500cm³/min,加工周期缩短至 12 小时,较传统工艺提升 75%,壁板翘曲变形量控制在 0.3mm 以内,平面度与表面粗糙度均满足要求,刀具寿命从 8 小时延长至 25 小时,生产成本降低 30%,产品合格率提升至 98%,加工效果显著改善。

4.2 汽车制造领域案例

针对某汽车零部件企业在加工新能源汽车电池包壳体 6061 铝合金壁板时遇到的散热槽尺寸超差率高、难以满足批量生产需求等问题,本文研究提出了一套优化的高效加工技术方案。在刀具与工艺参数方面,散热槽加工选用 AlCrN 涂层硬质合金立铣刀,该刀具为 4 刃设计,螺旋角 35°,切削速度提高至 1500m/min,进给量增大至 0.25mm/r,切削深度设定为 1mm,并采用低温冷风冷却,冷风温度 -20℃,流量 15m³/h。

路径与装夹优化方面,采用分层环切路径加工散热槽,先加工槽底再加工侧壁,装夹采用气动夹具与定位销相结合的方式,确保壁板定位准确且夹紧力均匀。为抑制加工振动,选用摩擦减振刀柄,刀柄阻尼系数 0.2,同时通过稳定性 lobe 图确定稳定加工参数,避开颤振区。应用该优化方案后,批量生产数据显示单件加工时间缩短至 0.8 小时,生产效率提升 46.7%,散热槽尺寸超差率降至 2% 以下,安装孔位置度合格率达 100%。低温冷风冷却替代乳化液,不仅减少了废液处理成本,还使刀具磨损量降低 20%,单件加工成本下降 18%,完全满足了批量生产需求。

5 结语

综上所述,通过多维度协同优化,可显著提升铝合金壁板的加工效率、降低加工成本、保证加工质量,为高端装备制造中铝合金薄壁件的加工提供了可行路径。然而,随着铝合金壁板向“超薄壁、超大尺寸、超复杂”方向发展,未来还需进一步研究,通过持续技术创新,推动铝合金壁板加工技术向更高效率、更高精度、更智能化方向发展。

参考文献

- [1] 张化斌.7075铝合金飞机整体壁板SLM增材制造工艺研究[D].中北大学,2024.
- [2] 孙逊.7075-3.5陶瓷铝合金壁板长桁的力学性能及结构优化设计研究[D].哈尔滨工业大学,2022.
- [3] 吕振兴,闻强苗,张天梁,等.大型薄壁铝合金壁板加工变形控制技术[J].航天制造技术,2022,(05):52-54+73.

Interactive operation control method of distributed energy and distribution network based on multi-Smart Actor system

Zhengdong Deng Xuannian Lei

Chuxiong Power Supply Bureau, Yunnan Power Grid Co., Ltd., Chuxiong, Yunnan, 675000, China

Abstract

With the rapid development of distributed energy, the operation structure and control mode of distribution networks have undergone profound changes. The high proportion of distributed energy access has endowed the distribution network with new characteristics of multi-source heterogeneity and dynamic interaction. The problems of the traditional centralized control system, such as lagging response, low collaborative efficiency and poor flexibility, have become prominent. The multi-Smart Actor system, as an innovative application of distributed intelligent agent technology, endows each energy unit in the distribution network with the attribute of “intelligent actor”, achieving autonomous, collaborative and elastic interactive control. This paper first elaborates on its structure, principle and collaborative strategy in the interaction between distributed energy and distribution networks, then analyzes key technologies such as information interaction, and proposes a hierarchical distributed control architecture and multi-scenario optimization schemes. Verified by typical simulations and engineering cases, this method has obvious advantages such as enhancing system flexibility. Finally, it looks forward to its prospects in fields such as the smart energy Internet and puts forward suggestions for optimization and promotion.

Keywords

Distributed energy; distribution network; Smart Actor system; interactive operation; distributed control

基于多 Smart Actor 系统的分布式能源与配电网互动运行控制方法

邓正东 雷宣念

云南电网有限责任公司楚雄供电局, 中国 · 云南 楚雄 675000

摘要

随着分布式能源迅猛发展, 配电网运行结构与控制模式发生深刻改变。高比例分布式能源接入, 让配电网呈现多源异构、动态交互新特点, 传统集中式控制体系响应滞后、协同效率低、灵活性差等问题凸显。多 Smart Actor 系统作为分布式智能体技术创新应用, 赋予配电网各能源单元等“智能行为体”属性, 达成自治、协同、弹性互动控制。本文先阐述其在分布式能源与配电网互动中的结构、原理及协同策略, 再分析信息交互等关键技术, 提出分层分布式控制架构与多场景优化方案。经典型仿真和工程案例验证, 该方法提升系统灵活性等优势明显。最后展望其在智慧能源互联网等领域前景, 并提出优化推广建议。

关键词

分布式能源; 配电网; Smart Actor 系统; 互动运行; 分布式控制

1 引言

在能源转型与“双碳”目标推进下, 分布式光伏等新型电力资源在配电网中占比提升, 促使电网从“集中一元”向“多元协同”转变。此时, 配电网面临电力等多流多维交互, 还要应对新能源接入带来的复杂特性, 传统调度与响应机制难适高效、安全、灵活运行需求, 亟需构建互动控制新范式。多 Smart Actor 系统作为重要技术路径应运而生,

它以 Agent 建模为基础, 赋予配电网各单元智能能力, 实现源—网—荷—储协同自治, 潜力巨大。本文将系统梳理其核心理论、结构体系与关键技术, 探讨在分布式能源与配电网互动运行控制中的实践路径与优化策略, 并结合工程应用及趋势, 为配电网智能化转型提出创新方向与工程建议。

2 多 Smart Actor 系统的理论基础与体系结构

2.1 多 Smart Actor 系统的基本原理与建模方法

多 Smart Actor 系统起源于多 Agent 系统 (MAS) 理论, 将配电网中的分布式能源、可控负荷、储能、柔性装置等物理单元, 抽象为具有感知、判断、决策与执行能力的“智能

【作者简介】邓正东 (1983-), 男, 湖北省广水人, 硕士, 工程师, 从事电网调度与控制研究。

行为体”，即 Smart Actor。每个 Smart Actor 不仅能够自主完成本地优化控制，还能通过通信网络与其他行为体实现信息共享与决策协同。这种自治与协同并重的智能体模型，打破了传统“自上而下”调控的壁垒，使得配电网具备高度灵活、弹性的自适应运行能力。其建模过程包括状态变量定义、行为规则设定、通信协议制定、交互机制约束等环节，确保不同类型 Smart Actor 之间既可独立行动，也能动态协作，兼顾本地目标和全局最优。

2.2 体系结构与层次分布

多 Smart Actor 系统通常采用分层分布式结构，划分为本地智能层、区域协同层和全局优化层。本地智能层以单元级 Smart Actor 为核心，独立实现本地感知、数据采集、即时决策和动作执行，保障自身设备安全与经济运行；区域协同层则由若干 Smart Actor 组成的子系统（如微电网、园区能源管理等）承担局部优化与资源协调，实现多单元能量互补与负荷平衡；全局优化层通过云平台或主控中心，实现对各区域的统筹调度和全网目标优化，引导各 Smart Actor 协同响应外部扰动与复杂工况。分层结构不仅提升了系统的响应速度和可扩展性，也降低了单点故障和通信瓶颈的风险，增强了系统的鲁棒性和自愈能力。

2.3 智能自治与协同决策机制

多 Smart Actor 系统最突出的技术优势在于其自治性和协同性。自治性体现在各行为体能够基于本地状态和目标，自主完成调节决策，无需完全依赖中心调度指令；协同性则体现在各行为体通过通信网络动态交互，实现信息同步、策略商议和任务分配，达成群体最优或平衡目标。常用的协同决策机制有：基于共识算法的分布式一致性决策、基于博弈论的多目标优化与利益均衡、基于分布式优化的全局能量管理等。这些机制共同推动配电网运行从“集中式响应”向“协同自治”转型，大幅提升了系统对复杂环境的适应性和可持续发展能力。

3 分布式能源与配电网互动运行的现实挑战与需求

3.1 分布式能源渗透下的配电网运行新特征

在分布式能源渗透率不断提升的背景下，配电网运行模式日趋复杂。首先，光伏、风电等可再生能源出力具有波动性和间歇性，造成节点功率剧烈变化和电压波动风险增加。其次，电动汽车、主动负荷等灵活用电单元的大量接入，使得负荷预测与调度难度加大。再次，多能互补、源网荷储互动成为典型应用场景，要求各能源单元具备高度自适应和协同调控能力。此外，配电网面临保护策略复杂、孤岛效应频发、潮流反送等运行安全隐患，对控制体系提出更高要求。传统依赖中心调度、静态配置的控制模式，已难以满足分布式能源灵活接入与多场景协同的实际需求，亟需新型智能化控制体系予以支撑。

3.2 互动运行对智能协同的迫切需求

分布式能源与配电网的互动运行，核心目标在于提升系统安全性、灵活性、经济性和可持续性。要实现这些目标，首先需要构建分布式自治与全局协同并重的控制结构，支持多元能源单元的实时感知、动态响应与弹性调节。其次，需提升系统的信息交互效率和决策智能化水平，促使各 Smart Actor 能在多变环境下快速达成群体一致或局部最优。第三，要增强系统自愈能力，保障在局部故障、通信中断等异常情况下的持续稳定运行。第四，需支持复杂业务场景下的能量优化路由、需求响应、峰谷平衡等多种互动业务，全面释放分布式能源的调节潜力。所有这些，都要求控制体系具备高度分布式、智能化和自适应能力，多 Smart Actor 系统正是应对这些挑战的理想技术途径。

3.3 信息通信与安全性的新难题

在多 Smart Actor 系统运行过程中，信息通信的及时性、准确性和安全性至关重要。随着接入设备规模和数据流量激增，配电网通信网络面临带宽压力、延迟敏感、攻击风险等问题。一方面，通信瓶颈或中断可能导致局部 Smart Actor 决策延误或失效，影响系统协同效率和稳定性；另一方面，Smart Actor 系统的去中心化特性，对网络攻击和恶意行为防护提出更高要求。如何构建高可靠、低延时、强安全的配电网信息基础设施，已成为智能协同控制体系可持续发展的重要基础。

4 基于多 Smart Actor 系统的分布式互动控制方法设计

4.1 分布式自治控制与本地优化

每个 Smart Actor 拥有独立的感知、数据处理与自主决策能力，能够根据自身目标和运行状态，灵活制定本地最优控制策略。以分布式光伏为例，Smart Actor 可根据实时辐照、负荷、储能余量等信息，动态调整出力、并网模式与功率支撑策略。储能设备的 Smart Actor 则结合电价信号、负荷预测和电网状态，实现充放电时序和容量配置的自适应调优。在电动汽车、可控负荷等参与需求响应的场景下，各 Smart Actor 还能根据价格、激励等信号自主调节用能行为，协同支撑配电网的负荷平衡与电能质量管理。本地自治控制既提升了单元级响应速度和独立性，又减轻了中心调度负担，为复杂多变环境下的灵活运行奠定基础。

4.2 分层协同与多场景优化机制

为实现系统级的协同优化，多 Smart Actor 系统采用分层协同机制。区域内 Smart Actor 通过点对点通信，实现数据同步、任务协商与能量共享，在本地约束下联合优化出力和能量流；区域之间则由上级主控平台或云中心基于全网目标（如最小化能量损耗、最大化新能源消纳等）进行任务分配和边界约束设定。多级共识算法、分布式迭代优化、分层动态调度等技术，被广泛应用于 Smart Actor 系统群体决策

中, 实现多源协同、区域互补与全网平衡。该机制不仅增强了系统在多场景下的适应性和可扩展性, 还极大提升了复杂运行环境下的协同效率和鲁棒性。

4.3 柔性自愈与智能进化功能

面对突发扰动、设备故障和环境剧变, 多 Smart Actor 系统具备柔性自愈和持续进化能力。系统通过多级监测和异常检测, 当出现节点失效、通信中断、能量不平衡等异常时, 相关 Smart Actor 能够自主切换运行模式, 局部重组网络并快速恢复控制, 实现弹性自愈和持续供能。同时, 通过融合大数据分析、人工智能等技术, Smart Actor 可自我学习历史运行数据和外部环境变化, 持续优化行为策略, 动态调整决策参数和协同机制, 实现全系统的持续智能进化。这为未来复杂电力系统的智能化运行和长周期安全稳定提供了坚实保障。

5 典型应用案例与成效分析

5.1 典型配电网光伏接入场景仿真

以云南省某县光伏示范项目下的县域 10kV 配电网为例, 搭建包含分布式光伏、储能、可控负荷等多类型 Smart Actor 的仿真系统。测试场景包括光照骤变、负荷突增、节点故障、网络攻击等复杂工况。结果表明, 采用多 Smart Actor 系统控制后, 系统能在秒级内完成节点出力重构、电压调节和负荷平衡, 电能质量始终维持在标准范围内, 新能源消纳率提升显著, 供电可靠性和恢复速度较传统集中控制提升 30% 以上。局部异常时, 受影响区域能通过自治协同机制快速实现弹性恢复, 无需中心干预, 极大增强了系统的鲁棒性与自适应能力。

5.2 实际园区能源互联网示范工程

在云南省内的某国家级智慧能源互联网园区, 部署多 Smart Actor 系统, 覆盖分布式光伏、风电、储能、电动汽车、冷热电联供等多类型能源单元。各单元 Smart Actor 基于本地感知数据, 动态调度出力、参与负荷调节, 园区主控中心仅进行边界条件下的全局引导。实际运行结果显示, 系统具备实时感知、灵活协同、多点自治与自愈能力, 能有效应对新能源波动、负荷快速变化和网络异常, 园区综合能效提升 15%, 碳排放减少 20%, 经济性和安全性显著增强。该案例

充分验证了多 Smart Actor 系统在分布式能源与配电网互动运行中的工程价值和推广前景。

5.3 控制方法优化成效与优势对比

综合仿真与实际应用数据, 基于多 Smart Actor 系统的互动控制方法在分布式能源消纳、电网安全稳定、电能质量管理等方面均表现优异。相较传统集中控制, 其在大规模场景下具备更高的实时性、弹性和可扩展性; 在异常扰动下具备更强的自治自愈能力与局部恢复速度; 在复杂环境下能动态调整和持续优化控制策略, 有效支撑多源、多场景、多业务协同发展。为我国未来智能配电网的高比例分布式能源友好接入和高质量运行提供了坚实支撑。

6 结语

基于多 Smart Actor 系统的分布式能源与配电网互动运行控制方法, 顺应了能源互联网和新型电力系统的智能化、分布式、自适应发展趋势。其通过分布式自治、层级协同和弹性自愈, 实现了源—网—荷—储的多元协同和高效互动, 大幅提升了系统的灵活性、韧性和新能源消纳能力。未来, 需进一步深化 Smart Actor 系统的智能算法、安全防护与标准协议研究, 推动其在更多能源互联网场景的规模化应用。政策层面应加大支持力度, 完善信息通信基础设施和数据安全体系, 为智能配电网与分布式能源的深度融合提供坚实保障。多 Smart Actor 系统将在推动我国能源绿色转型和智能电力系统建设中发挥日益重要的支撑作用, 成为智慧能源社会的核心技术引擎。

参考文献

- [1] 史宇辉.智能配电网中分布式能源接入对输配电系统的影响分析[J].信息与电脑,2025,37(16):130-132.
- [2] 柴伦浩,贾博源.配网调控中的分布式能源接入与协调控制技术研究[J].技术与市场,2025,32(08):48-52.
- [3] 田正一.基于微网技术的电气工程分布式能源系统协同调度方法研究[J].电气技术与经济,2025,(08):58-61.
- [4] 才智龙,王丹洁,范晋卿,等.分布式能源系统储能技术应用研究[J].中国设备工程,2025,(15):201-203.
- [5] 丁璠.微电网中分布式新能源并网的稳定性控制策略[J].大众用电,2025,40(07):33-34.

Thinking on emergency response strategies for emergencies based on Internet + intelligent management of highway traffic

Jianhong Ning Huanfeng Wang Longhua Zhang

Hangzhou Luda Highway Engineering Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang, 311112, China

Abstract

In the face of major natural disasters, rapid response and emergency management have always been a key focus for governments and relevant authorities. The “Internet + Intelligent Highway Traffic Management” approach to emergency response effectively addresses management deficiencies, enhances capabilities in handling natural disasters and public emergencies, and maximizes protection of lives and property while minimizing economic losses. Drawing on the author’s hands-on experience in highway emergency response over recent years, this study utilizes mobile devices, IoT terminals, digital control dashboards, and PC-based automated real-time data collection. Through dynamic monitoring and multi-party coordination mechanisms, it demonstrates effective outcomes in highway emergency management, providing valuable references for industry peers.

Keywords

Internet; Intelligent management; emergency; response

基于互联网 + 公路交通智联管理的突发事件应急处置对策思考

宁建红 汪焕锋 张龙华

杭州路达公路工程有限公司, 中国 · 浙江 杭州 311112

摘要

在重特大自然灾害面前, 快速反应与处置一直是政府与相关部门工作的重点内容之一。基于互联网+公路交通智联管理的突发事件应急处置, 可以有效克服管理不足, 加强对自然灾害及突发公共事件应急处置能力, 最大限度保护人民生命财产和减少因此所带来的经济损失。本文基于作者在近几年来参与公路交通突发事件应急处置的相关工作经验, 利用手机移动端、物联端、数字管控大屏和PC端自动化实时采集, 通过动态监管, 对公路突发事件开展多方联动, 取得了很好的效果, 供同行参考。

关键词

互联网; 智联管理; 突发事件; 应急处置

1 引言

浙江省位处我国东南沿海, 因受海洋性气候影响, 长期以来经常会发生各类自然灾害, 如台风、飑风、龙卷风、雷暴、冰雹或雪灾等自然灾害。据统计, 近 10 年来我省遇到特大自然灾害就达 10 多起, 其直接经济损失均数以千万计。如 2019 年台风“利奇马”共造成 1402.4 万人受灾, 57 人死亡, 14 人失踪, 209.7 万人紧急转移安置, 直接经济损失 537.2 亿元人民币。

虽然, 我省各地基本经制定了一系列突发公共事件应急预案或制度, 各级交管或应急部门也已出台了相应的政策和文件。但是, 因下属管理部门多, 涉及范围广, 管理程序复杂, 从而导致各部门所出的文件种类繁多, 所建立的突发公共事件应急预案体系并不十分健全, 一旦发生类似自然灾害, 其所产生后果与损失程度不可估量。因此, 如何保证公路交通营运安全, 如何快速进行应急响应和决策, 开展基于互联网 + 公路交通智联管理的突发事件应急处置对策意义深远。

【基金项目】杭州市交通运输学会科研项目(计划编号:

Hzjt202305)。

【作者简介】宁建红(1979-), 男, 中国浙江杭州人, 本科, 工程师, 从事土木工程(道桥方向)研究。

2 公路交通突发事件应急处置中的常见问题

根据对作者近几年来对浙江省公路交通突发事件应急

处置的调研与大量数据分析发现，在公路交通应急抢险与管理程序等方面主要存在以下 3 大方面问题。

缺乏强有力的应急指挥系统。当发生突发公共事件时，就难以快速稳妥地组织各方力量协调配合，统一高效地开展救援行动，使必要的资源共享和信息整合在短时间内无法实现，这样，势必在处理突发事件时浪费宝贵的时间。

社会力量参与不足。交通重特大突发事件涉及多受害人群和多行政管理部门，若无广泛社会参与，无法有效遏制事态发展。为此，需采用“三角互动”应对模式，即政府、民众、媒体及社会各界配合参与。突发事件应急处置机制应跳出“强政府—弱社会”模式，将政府应急处理机制、民众危机治理机制、媒体危机信息报道处理机制等纳入其中，其有效运转依赖民众积极参与，形成“强政府—强社会”应急抢险模式^[1]。

未对潜在事故进行事后分析与风险评估。在制定应急预案时，未能充分识别和考虑自身潜在的重大风险及其影响，也未结合实际应急能力，对关键信息如可能的重大危险、支持保障条件、决策流程、指挥协调机制等缺乏详尽系统的阐述，这导致应急预案的针对性和实用性不足。

应急救援预案执行效果不佳。制定应急救援预案对事故救援至关重要，但仅有预案不意味着应急救援工作有保障。即便预案完备，若发布后不实施、不宣传贯彻、不落实组织人员资源、不培训演练，其在事故发生时能否发挥预期作用未知。目前各级交通部门应急救援预案缺乏有效实施、维护和更新，主要原因是无专项培训和演练经费。虽应急预案规定定期演练及相关要求，但因无专项经费，“演练从实战出发”仅停留在文件上。调研发现，培训和演练费用高，如高速公路突发事件应急演练，即便经费有保证，实施也有难度，涉及封道、交通管制等问题，要使演练效果达真实应急抢险要求，需不断优化完善^[2]。

3 公路交通智联管理的突发事件应急处置对策

在公路交通智联管理中，面对自然灾害等突发事件，如何迅速有效地进行应急处置与决策，成为当务之急。为此，我们必须深化公路交通应急响应体系建设，打造以数字化技术为核心的新型应急响应系统。

首先，我们需通过系统分析，构建一个融合灾害监测、预警分析与应急抢险于一体的应急管理流程。其次，依托大数据与云计算技术，搭建公路应急抢险灾害监测一体化管理平台，实现信息的实时共享与高效处理。

在此基础上，进一步优化应急管理框架，确保大数据平台在整个应急抢险过程中发挥关键作用，实现应急响应的快速与高效。通过这样的对策，公路交通智联管理将能够更加从容应对突发事件，保障人民群众的生命财产安全。

3.1 建立数字化公路突发事件应急处置程序

在“互联网+”时代背景下，公路自然灾害及交通事

故的突发事件应急处置需构建一体化、数字化的管理模式。基于此，我们应重点发展公路交通智联管理下的突发事件应急处置策略。具体措施包括：打造一体化的公路应急抢险监测流程，构建动态自然灾害监测数据库与地理信息系统；优化应急抢险机械和材料的智能配置；建立机械设备维护、状态监测与调度数据库；强化应急抢险队伍的专业化管理；同时，开发智能化的应急抢险预警、抢险组织和灾害评估管理程序，以提升公路交通应急管理的效率与精准度。

3.2 建立数字化为载体的交通应急响应体系

构建以数字化为核心的公路应急抢险体系。首要任务是依托现有突发事件数据，涵盖事件类型、异常描述、发生时间、地域特征及环境状况。通过实时数据汇总与多角度分析，确保分析结果能够迅速供各方参与者查询，辅助决策制定。此外，还需建立一个全面的数字化信息平台，该平台能够整合各类与公路安全相关的数据，如天气状况、交通流量、路面状况等，从而为应急响应提供更加全面和精确的数据支持^[3]。

构建可视化数据库管理平台。通过整合路基高边坡、高挡墙、不良地质地段位移、路面状况、桥梁结构及隧道监控等高风险公路路段与关键构造物数据。系统管理应急抢险资源，包括机械、设备、物资、抢险队伍、应急保障与养护管理中心、服务区及收费站，实现高效应急响应与抢险管理。该平台应具备强大的数据处理能力，能够实时更新和分析数据，为决策者提供直观的图形界面，以便快速做出反应。

接入路网运营监测数据库。通过全面接入路网运营监测数据库，涵盖车辆超速超载、交通拥堵、异常情况、公路突发事件、重大交通事故、交通应急抢险、现场交通分流疏导及交通事故通报等多维度数据。通过整合这些数据，我们将建立一个直观、高效的可视化数据平台，以便实时掌握路网运营状态，及时发现并响应各类交通问题。该平台将支持动态更新，确保信息的时效性，同时提供预测分析功能，帮助管理者预见潜在风险并提前做好准备。

智能数据分析，助力智慧决策。依托先进的数据分析技术，实现智能数据分析、智能化预判及智慧决策。根据参与者的具体需求，我们将实时推送相关信息，确保信息的及时性和准确性。这将为打造基于数字化为载体的交通应急响应体系提供坚实的平台保障，助力提升交通管理效率和应急响应能力。智能分析系统将采用机器学习算法，不断优化分析模型，以提高决策的准确性和效率。

专项数据分析与辅助决策。基于政府、行业及社会各参与者的业务需求进行专项数据分析与辅助决策。即通过区间的路网通畅情况与交通流量变化趋势分析，复杂地段滑坡、高边坡、支挡结构物稳定性分析；大跨度桥梁结构及整体稳定性力学分析、道路桥梁健康监测及预警进行辅助决策；现有路网的各网点的回传数据信息进行智能分析，获取运行分析报告；同时，结合道路沿线关键构造物如大跨度桥

梁、特长隧道或复杂地质条件下桥梁与隧道与高边坡等)的位移检测与数据反馈,为公路大中修、新建、改建的计划编制与决策提供数据支撑。这些分析将为交通规划和基础设施建设提供科学依据,确保公路系统的安全、可靠和高效运行。

3.3 公路应急抢险数字化管理的组织保证

提高公路应急抢险数字化管理的工作质量,通过成立一个专门的公路应急抢险数字化管理机构。该机构全面承担和管理公路应急抢险数字化管理,包括公路交通应急预案、应急演练、应急抢险全过程数字化管理的详细方案,组织实施各项活动。管理机构的主要负责人需全面负责应急管理各行动实施质量管理,确保数字化管理中的应急管理信息处理与发布高效与精准。另一方面,可以成立公路应急抢险数字化管理技术协调组,该组将具体负责整个公路应急抢险数字化管理过程的质量保证工作,包括交通、机械、物资等关键资源的质量保障。通过建立的数字化应急管理组织结构,确保各参与者及其责任人都能各司其职,层层把关,从而对公路应急抢险数字化管理的质量负责。

公路应急抢险数字化管理领导小组应定期组织培训和演练,提高各组成员的专业技能和质量意识。通过模拟突发事件,检验公路应急抢险数字化管理程序的可行性和有效性,及时发现并预防与改正存在的问题。同时,建立公路应急抢险数字化管理工作的绩效考核机制,对表现优秀的团队和个人给予表彰和奖励,激励全体成员积极参与公路应急抢险数字化管理工作,不断提升公路应急抢险数字化管理的整体质量。

为了建设一个高效可靠的公路交通应急响应体系,首先需要对现有的各部门之间的数据平台进行有效整合与优化。通过建立一个基于数字化技术的自然灾害及突发重大交通事故公路应急响应体系,可以将应急响应管理过程中出现的零散、局部、片面、偶然和实时的问题进行快速智能决策。这样的体系能够为公路应急抢险提供第一时间的有效、快速、联动响应,从而为紧急情况下的救援行动提供强有力的技术支持。

3.4 互联网+应急救援信息化管理策略

实施应急救援的信息化管理,首要任务是构建应急救援联动机制。地方政府需依据其管理区域,创建区域性的协调联动机制,对社会救援力量进行分门别类的组织和协调,优化统筹指导、任务分配和服务支持等环节,确保各类救援力量能够根据需求,有序地参与紧急事件的救援工作;强化双方联动,建立高效、实时的信息共享和沟通途径,保证各

流程顺畅对接,促进救援力量的稳定发展和能力提升。其次,要理清系统架构的开发。即强调大数据一体化的应急救援管理架构,在整个公路自然灾害应对管理周期内,全面采用公路应急抢险 1+1+1+N 数字化管理模式。

3.5 利用人工智能实现公路紧急救援的数字化管理

融合全省紧急救援管理大数据平台,涵盖紧急救援设备与机械信息、救援物资与调配、救援队伍、救援保障与维护中心、高速公路服务区与收费站信息、社会救援资源、地理信息、交通、能源、环境等数据,为公路紧急救援的精细化管理和决策提供数据支撑。

提升全省公路紧急救援数字化运行管理中心,作为公路紧急救援数字化管理的关键节点,实时监控全省公路紧急救援管理的运行状况,分析和处理各类数据,及时识别公路交通紧急救援运行中的问题和风险,并协调相关部门迅速联动处理。

公路紧急救援的基础设施智能化系统,包含数字化地理信息系统、智能交通系统、智能救援资源调配系统、智能安全系统、智能环保系统等,通过物联网、传感器等技术,实现公路紧急救援的自动化管理与优化运行。

改善紧急救援智慧应用场景,例如公路智慧养护、设备智慧保养、救援队伍智慧管理、智慧应急演练与救援实战等,为公路紧急管理和突发事件的应急处理提供快速、高效、精确的决策支持。

4 结语

在当今这个信息化飞速发展的时代,基于大数据平台的公路自然灾害应急抢险智联管理显得尤为重要。通过这种先进的管理方式,我们能够最大化地减少因自然灾害所带来的经济损失,最大限度地保护人民群众的生命与财产安全。同时,通过课题研究,进一步增强对突发事件应急处置的韧性,即增强人们对突大交通事故、恶劣气候或地质灾害等突发事件的“处置能力”。这种能力的提升,无疑能在应对突发事件时发挥非常重要的作用。

参考文献

- [1] 洪凯,陈绮桦.美国应急演练体系的发展与启示[J].中国应急管理,2011(9)
- [2] 黄金菊.试论我国政府环境应急责任法律制度的完善[J].中国会议,2011,8(6)
- [3] 胡颖廉.中国应急管理组织体系比较研究[J].北京科技大学学报(社会科学版), 2012(2)

Research on synchronous transmission and control technology of digital audio in radio and television engineering

Yingkui Liu

Qingyun County Media Center Dezhou City, Shandong, Dezhou, 253700, China

Abstract

The rapid advancement of digital audio technology has laid a solid foundation for the development of synchronized transmission and control systems in broadcast engineering. Audio plays a vital role in program production, remote live broadcasts, and broadcast operations. This paper focuses on analyzing key technologies, implementation methods, optimization techniques, and practical applications of digital audio synchronization in broadcasting systems. First, it examines core technologies for digital audio synchronization, including synchronized signal transmission, audio timestamping, error detection and recovery mechanisms, and other audio processing techniques. Second, it explores optimization strategies for digital audio synchronization control systems, covering feedback control mechanisms, dynamic adjustments, and multi-channel synchronization control solutions. Finally, the paper analyzes specific implementations of these technologies in broadcasting engineering and addresses common challenges encountered during their application.

Keywords

digital audio; synchronous transmission; synchronous control; radio and television

数字音频在广播电视工程中的同步传输与控制技术研究

刘英魁

山东省德州市庆云县融媒体中心, 中国 · 山东 德州 253700

摘要

数字音频技术的迅速发展也为广播电视工程中音频的同步传输与控制技术发展奠定了基础。在广播电视节目的制作、远程节目直播以及节目播出中音频都是很重要的。笔者在本文重点分析了广播数字音频的同步传输与控制技术的关键技术、实现和优化方法, 以及在广播电视工程中的应用。首先针对广播电视工程中数字音频同步传输中关键技术进行了分析, 其中包括音频的同步信号传输技术、音频的时间戳技术、音频的错误检测及恢复等音频技术。其次就是对数字音频同步控制技术的关键技术进行优化, 包括了对反馈控制技术、动态调整和多通道的音频同步控制技术等。最后, 对上述技术在广播电视工程中的具体应用及其遇到的困难等问题进行了分析。

关键词

数字音频; 同步传输; 同步控制; 广播电视

1 引言

由于广播电视行业一直在进行信息化、数字化快速发展, 尤其在广播电视的多个音频信号源、复杂的制作环境等问题中, 确保音频信号的同步传输与控制技术是数字广播电视系统保证音频同步传输及信号质量的重要技术之一。

2 数字音频同步传输的核心技术

2.1 同步信号传输技术

广播电视工程中的音频信号的同步传输技术是在广播电视的数字化传输过程中, 使包括音频信号等多种信号具有

严格的时间一致性的必要手段。只有基于精确的时钟同步系统, 才能使数字音频信号和其他信号都具有相同的时间参考。常用的同步传输方法主要有主时钟同步、分布式时钟同步和基于 GPS 的时间同步等。主时钟同步是实现音频信号同步传输最基本的同步方式, 其是一种基于统一的中央时钟, 让网络中的各个不同设备根据统一中央时钟来进行同步的时间参考, 在同步过程中, 每个节点的设备都必须通过一定的间隔时间来接收时钟的校准信息。分布式的时钟同步则可以在网络设备中, 通过多个不同的时钟源来进行同步。相对与主时钟同步, 分布式的时钟同步可以确保系统不会因为没有一个统一的时间钟源来进行时间参考而产生不同, 也就是说在复杂的分布系统中, 也可以实现同步, 并允许一个节点的时钟出现故障而导致一个网络的节点不使用单一的时钟源来实现时钟同步。

【作者简介】刘英魁 (1985-), 男, 中国山东德州人, 本科, 工程师, 从事广播电视工程研究。

2.2 时间戳技术与同步精度

时间戳是数字音频在同步传输中极其重要的技术，时间戳就是将每一个音频包标记出精确的时间，从而将接收端音频数据包恢复成正确的顺序至关重要。数字音频在网络中传输时，因网络延迟、路由器的处理延时、设备性能等都可能让数据包乱序到达，为了防止音频信号顺序混乱或者造成太大的延时，时间戳可以将每一个音频包的时间准确地记录下来，在接收端以时间戳为依据重新按时间顺序播放或者处理音频信号。时间戳的精度要求很高，尤其在广电系统中对音频的同步精度的要求更是必须满足微秒的精度，若时间戳精度不高，就会造成音频偏移，也会影响音频与视频、字幕等元素不配套的同步效果，造成了很严重的观赏体验上的问题。要想保证同步精度，需要传输系统有极高的时钟源，而时间戳技术就依赖这些高精度的时钟系统，为每一个数据包标注正确的时间戳^[1]。

2.3 错误检测与恢复机制

数字音频同步传输的信号传输途径复杂，干扰因素很多，一定会造成数据的丢失、信号的破坏以及网络的延时问题。这样往往导致传输中的音频信号的失真、丢帧、甚至中断，给音频和其他信号的同步性带来很大的困扰和广播电视台工程的极大挑战。因此在音频传输过程中往往都会应用许多错误检测或重试的方法和机制来确保音频传输的数据不会出现错误的情况。例如最常见的错误检测机制就是 CRC 校验、包丢失检测以及包丢失的重试。CRC 校验就是计算传输中音频数据包的校验码，在数据传输中实时检查传输的信号中是否出现了损坏或丢包的情况，若出现了错误情况，则会自动请求重复重传该音频包。包丢失检测的技术可以实时监控数据传输中是否有数据包被丢失的情况，从而根据丢失数据包的位置来完成相应的检测和恢复工作。而对于数据包的重试则可以在数据包丢失时自动产生重传，以确保音频信号的完整性。

3 数字音频同步控制技术的实现与优化

3.1 反馈控制系统的作用与设计

数字音频的同步控制离不开反馈控制系统。在运行过程中，反馈控制系统的音频信号反馈控制系统会反复实时监测音频信号同步状况，然后将检测到的延迟或干扰导致的音频同步问题进行控制，使其进行及时纠正和控制。同时，反馈控制系统的首要工作任务就是通过自动控制音频信号的播放时长或延迟，将音频播放时间进行调整，与相应系统中的另一个或另一组音频保持同步。在该系统的设计中，会考虑到很多相关技术，比如延迟以及在运行过程中音频信号的传输抖动，不同设备间时钟的准确度和设备运行时外部环境带来的干扰，确保音频同步速度稳定的效果，通常会采用的控制算法主要包括 PID 控制、模糊控制、自适应控制等。在反馈控制系统中，最常见的就是通过调节 PID 控制中的

比例、积分、微分三个变量来实施反馈系统的控制，以尽可能最小化反馈系统的误差以及维持系统相对稳定的状态，从而得出精确的音频播放时间^[2]。

3.2 动态调整机制在同步中的应用

动态调整也是数字音频同步控制技术的关键环节，特别是在多设备、强动态应用中的体现。在使用中音频同步可能因设备性能不同、网络的瞬时突变、或者设备不同源等影响而呈现不同步状态。因此动态调整可以通过实时对音频信号的播放速度或者是延时时间进行调整，使音频信号和其他音频信号同步播放。并且运用算法可以在检测到音视频信号不同步后，自动进行调整，使其与视频信号、字幕等要素同步播放。广播电视台工程中常在远程播放、直播以及多设备应用的情况下使用音频同步技术中的动态调整机制。在这种应用中信号源设备较多且设备性能、处理能力不同，音频同步则显得较难控制。在远程播放过程中信号源和终端设备如果产生延时不同步的情况，则在切换设备中音频信号和视频信号的传输会经过不同的网络，这时动态调整就会根据延迟时间和音频数据包的到达时长自动纠正音频播放时长以达到音视频同步播放。

3.3 多通道音频同步控制策略

在广播电视台节目制作过程中，音频信号往往由多个音频通道构成，特别是在多音频源的信号源中，如何实现多通道的音频信号的同步传输与控制是亟待解决的问题。多通道音频同步控制技术的主要内容是确保多音频信号间在时间轴上的一致性，避免音频信号产生错位和不一致现象。常见的多通道的同步控制策略主要有基于时分复用 (TDM) 的同步控制、基于时钟的同步控制及基于网络协议的同步控制等。基于时分复用 (TDM) 方法是一种常用的同步控制技术，通过将多个音频信号进行时间上分割，划分为不同的时隙，每个音频信号都会在一定时间间隔内完成一次传输。TDM 的同步精度在于时隙的时间，时隙越小，同步控制的精度越高。但时隙的宽度导致对时钟同步控制的精度也有了较高的要求。基于时钟的同步控制就是利用统一的时钟源控制各个音频信号，各个音频信号都通过一个主时钟源实现同步，统一的主时钟源不停地向所有的音频设备进行同步时间，避免了各个设备间时钟的偏差导致不同步问题出现。采用该种方式的优点是同步精度高，主要适用于对音频同步精度要求高的场合，但主要依赖时钟源的稳定和设备之间的时钟协调。

4 数字音频同步技术在广播电视台工程中的实际应用

4.1 广播电视台节目制作中的音频同步

对于广播电视台节目制作来说，音频与视频、字幕等多种信号的同步关系对于最终节目的制作质量至关重要，无论是现场节目录制，还是后期节目制作的混音音频，都需要很高的音频同步效果，尤其对于大规模制作和直播节目来说，

即使有一点点音频与视频不同步的误差也会影响节目观赏效果，因此广播电视台节目制作过程中广泛运用了很多现代技术手段进行音频的同步，比如，时间钟的同步方式是做好音频同步的前提，广播电视台节目中的所有设备几乎都采用主钟、从钟的时间同步系统对时钟源进行控制，所有的音频、视频设备都是基于时钟同步原理按照相同的时间基准进行信号处理和传输，同时为了提升同步的精确度，通常都采用高精度时间钟源，比如 GPS 时间同步系统可达到纳秒级的精确度，而音频同步的另一关键方案就是应用反馈控制系统进行实时检测和对比音频信号与视频信号之间的差异，再通过反馈系统直接修正音频信号播放时间来避免时间偏差，反馈控制系统可以持续测试系统状态，能够在不影响音频播放质量和效率情况下，及时纠正差错，保证所有信号间严格的时间一致性。

4.2 远程直播与播出中的音频同步挑战

随着网络直播技术的发展，音频的同步也变得更加复杂且棘手。在广播电视台传统的节目制作方式中，大多是在相对固定的演播室环境内进行的，节目制作的信号源和控制设备相对集中，这导致音频同步技术非常容易实现。但是，近年来在广播电视台远程直播过程中，广电工程需要面对全新挑战，尤其是大范围、跨区域的节目直播。在网络远程直播中，由于广播电视台节目需要进行跨地域、多点、远程的同步播出，这也带来了更突出的音频同步难度。网络远程直播中出现的音频同步难度，主要来自于两个方面。一方面，由于音频信号传输需要依次流经多个网络环节，每一个网络环节都需要一定的网络传输延迟，在此期间有可能会导致音频与视频信号的错位，再加上其不同传输路径的延迟时间不同。另一方面，在广播电视台系统的播放过程中，其使用音频系统装置中可能会产生某些音频设备之间的差异，这些不同厂家设备本身时钟精度、处理的运算速度、延迟时间等都不相同，这也进一步加大了远程广播电视台音频信号同步的难度。因此，广播电视台行业将时延补偿的技术应用在音频信号传输当中，在向接收设备推送远程广播电视台音频信号时进行时延补偿，使得各个音频信号在同一时间推送到接受设备。远程直播的过程中，广播电视台工程将直播信号传输中进行的网络传输，利用网络协议进行相关的优化调整，这是网络直播音频同步的高效解决方式^[3]。

4.3 音频监控与调整技术的实现

音频的监测和调整技术是保证广播电视台节目配音音

质的关键。无论是广播电视台节目播出时还是后期编辑的时候，音频信号的音质和同步状态都会影响广播电视台节目播出的终音质，音频的监控主要是在广播电视台节目的录制或者播出期间对播出音频信号的质量和同步状态进行实时的监测，以便保证广播电视台节目的录播时音频音质和视频、字幕等等信号都是完全同步的。

广播电视台中音频监控系统的应用不单单对音频信号进行质量检测，也可以对音频与其他信号的音频同步偏移进行实时反馈。系统在检测出音频信号同步偏差后，自动调整机构会对音频信号进行实时调整。广播电视台的音频监控系统包含多样的功能，如音频信号实时处理、延迟与同步状况检测、同步误差检测、同步误差反馈等，可以根据实时的音频监控信号对同步状况做出快速检测并及时进行调整。广播电视台中的自动化音频调整系统主要针对于广播电视台当中复杂的节目编辑、播出等工作。音频自动调整可以利用实时反馈的检测数据，实现自动识别音频信号当中同步偏差、对其进行自动的修正处理。自动化音频调整系统常常借助动态调节和反馈的控制技术对音频信号进行调整，可以在每个音频包的时间戳与音频播放的时间是互为其他音频信号保持一致的基础上进行处理。例如音频信号播放的播放速度或延迟时间可以根据音频信号与视频信号同步误差的实际情况，对音频信号进行相应的处理，如增加播放速度或延迟时间^[4]。

5 结语

在数字音频技术不断发展的背景下，广播电视台工程中的音频同步传输与控制技术也在不断的突破发展，使用高精准同步信号的传输技术、时间戳技术、反馈控制系统、动态调节技术等实现了对音频同步问题的有效解决。未来，伴随着 5G 技术、人工智能等技术的应用，数字音频同步技术将会在广播电视台行业的应用中起到更加重要的作用，为行业的发展提供强有力的保障。

参考文献

- [1] 李志远. 数字音频广播CDR技术在广播电视台工程中的应用 [J]. 电视技术, 2025, 49 (07): 121-123.
- [2] 张威智. 广播电视台工程中数字音频传输的抗干扰与容错技术分析 [J]. 电声技术, 2025, 49 (04): 92-95.
- [3] 马杰. 广播电视台工程中数字音频技术的优势及其应用 [J]. 中国新通信, 2025, 27 (08): 64-66.
- [4] 斯琴. 数字音频技术在广播电视台技术工程中的应用 [J]. 采写编, 2025, (04): 91-93.

The exploration of the spatial application of traditional arts and crafts elements in modern interior decoration design

Tiao Hao

HaoTao Planning (Shandong) Co., Ltd. Zaozhuang, Shandong, 277100, China

Abstract

With the sustained development of the economy and society, people's demands for interior decoration design have evolved from functional requirements to increasingly diverse needs encompassing cultural, aesthetic, and spiritual dimensions. In this context, traditional craft art elements—carriers of China's outstanding traditional culture—are being increasingly utilized in interior design. These elements, steeped in profound historical and cultural heritage along with national aesthetic sensibilities, manifest distinctive decorative effects through various spatial configurations. The challenge of effectively integrating traditional craftsmanship with modern design to achieve harmonious coexistence has become a focal point in both academic and design circles. This paper conducts an in-depth study on the spatial application of traditional craft art elements in contemporary interior design, focusing on three key aspects: research significance, current challenges, and implementation approaches. The aim is to provide innovative strategies for both interior design innovation and the preservation of Chinese traditional culture.

Keywords

modern interior decoration design; traditional arts and crafts; space application

现代室内装饰设计中对传统工艺美术元素空间应用的探究

郝涛

郝涛企划（山东）有限公司，中国·山东枣庄 277100

摘要

伴随着经济社会的持续发展，人们对于室内装饰设计有了越来越多的要求，从功能性需求逐步转变为文化性需求、美学性需求与精神性需求。在这种形势下，传统工艺美术元素作为中华民族优秀传统文化的载体，越来越多地被应用在室内装饰设计领域。传统工艺美术元素承载着深厚的历史文化积淀与民族审美精神，经由各种形式在空间中作为装饰内容呈现出特色装饰效果，传统工艺美术元素如何应用到现代设计中，达到现代性和传统性的有效结合，已经成为时下学界和设计界的关注热点。本文以研究意义、研究现状问题及使用途径三方面为主线展开文章关于传统工艺美术元素在现代室内装饰设计中进行空间运用的深入研究，旨在为室内创新设计与中华传统文化保护提供思路。

关键词

现代室内装饰设计；传统工艺美术；空间应用

1 引言

室内装饰设计属于艺术性和实用性双重因素构成的产物，它的发展深受社会经济及科学技术发展水平影响，但却更多受到文化环境及审美意识的深刻影响。在当下全球化、现代化不断加强的背景下，西方设计与现代化技术大量引入我国设计领域，为其发展提供了多种发展契机，但却造成我国传统工艺美术元素被大量忽视，许多室内装饰设计缺乏精神内核和根基。为了防止设计趋同及文化失根的问题出现，在现代室内装饰中挖掘和创新运用传统工艺美术元素，成为重要问题。

【作者简介】郝涛（1975-），男，中国山东枣庄人，博士，从事艺术与科技研究。

2 传统工艺美术元素融入现代室内装饰设计的价值意涵

2.1 推动中华传统文化的赓续与弘扬

传统工艺美术作为中国的文化瑰宝，包含了丰富的历史积累、民族智慧，不论是雕刻、织绣还是漆器、陶瓷，在工艺上都体现出了高超的技能技巧，在图案、造型、色彩中也凝结着中华民族的哲学思维和审美情趣。在室内空间环境设计中应用，可以使其具有更高的文化感染力和精神文化，对于传统工艺美术进行再创造和再利用，可以防止那些古老的文化符号因为当代的发展而被边缘化甚至遗忘，让古老的文化通过空间这一浸入的介质在当代生活空间之中萌动与生长，也可以让人们通过环境艺术的形式来潜移默化地触摸传统文化，实现人们的文化认同感及归属感。

2.2 拓展现代室内装饰设计的艺术表现力

在现代室内空间设计中,强调空间的设计功能和当代性特征,但是往往在表现形式上会出现重复或设计形式的一致性,进而缺乏对室内空间的表现能力。传统工艺美术元素的介入则可以为空间注入新的艺术张力和表现视觉上的纵深感。传统工艺美术中的造型、纹样、色彩、材质等表现出较强的多样性特征,可以为空间设计表现注入更加丰富多变的艺术语言。比如,传统纹样可为空间提供节奏与装饰效果,传统工艺材质的添加,可为空间增添质感与文化氛围感受。这种来自传统艺术的表现感,可以补充或者与现代设计理念在空间的表现效果相适应,让空间在体现实用功能的同时,具有观赏价值。

2.3 回应人们日益增长的审美与精神需求

新时期社会经济的进展已经使得人们对室内空间功能性的舒适与方便不够满意,对空间的感知更多地体现在精神上的满足与审美层次的提升。传统的工艺美术的加入能够契合人们对精神文化生活的需求,传统工艺美术承载的历史文化记忆与意象往往能引起人们情感上的共鸣,给人们在空间中带来一种心理上的平静与对历史文化的认可,从而完成一种情感上的连接,进而使得室内空间不再只是一个冰冷的功能集合体,而变成一处人们寄托文化与审美的场所^[1]。

3 传统工艺美术元素空间应用中面临的主要困境

3.1 应用层面的形式化与表面化

传统工艺美术元素在当前的现代室内环境设计中只是简单地进行形式上的运用,并没有涉及到深层次的文化内涵。设计人员对于空间元素设计时,经常会采用传统纹样、雕塑、手工艺等符号进行简单的搬移,将其附着于室内环境的墙面、装饰家具、陈设物品之上,却不涉及这些传统形式符号背后的文化背景、象征意义、哲学内涵等。这样的单纯视觉化处理,虽然可以在当下产生较高的室内环境装饰设计效果,但造成了传统工艺美术文化内涵的消解,甚而形成符号,仅仅作为室内环境装饰设计的符号符号存在。而且,当这些工艺美术符号简单进行形式仿效,导致室内设计内容不具有原创性,单纯相同形式元素的叠加造成的空间环境缺乏了设计感和文化深度,从而限制了传统工艺美术文化内涵的发挥,也导致其本身艺术内涵不能真正融入现代室内环境设计和设计元素中去,仅仅作为形式符号而存在,无法真正创造出良好的室内设计环境。

3.2 缺乏系统化的研究与理论指导

在传统工艺美术元素对现代室内设计的应用过程中,大多是对已有的经验进行总结,或者个案进行剖析,较为缺乏理论上的相关研究。也就是说,在设计过程中的选择使用、对空间的编排等方面通常都由设计师从自身的设计经验和市场导向、流行元素等方面进行,没有形成完整的思路或者

一套设计系统,在这种现状下进行的设计也容易流于经验化、不可持续性等问题,也就难免出现因设计者对传统工艺美术元素的选择、应用及装饰的水平有所不同,导致设计作品的质量和水准差距较大。一方面,不能发挥其文化内涵在空间上的体现,另一方面在进行创新实践以及应用的过程中,自身对于传统工艺美术元素的理解和使用则缺乏理论依据,出现盲目、片面利用传统工艺美术元素,或者千篇一律、符号化使用等现象。同时,传统工艺美术元素在室内装饰空间的应用往往局限于在某种工艺上的一个方面,或者某一个设计,从综合角度来说,对多种传统工艺和学科间的全面、统筹性应用较少涉及,从而导致传统工艺美术在现代室内装饰空间中的科学设计和理论研究严重缺失,这对于传统工艺美术在现代室内装饰空间的应用和普及是不利和欠合理的^[2]。

3.3 现代材料与传统工艺融合不足

在传统工艺美术被不断融入现代室内装饰设计技术的过程中,越来越多的建筑或空间设计要采用工业化的材料和工艺。传统工艺美术有着非常明显的手工化特征和区域属性,因此与现代材料的工业化特征和标准化特点不完全吻合。在现代设计过程中,通常情况下,往往会出现设计师对现代材料本身所具有的性能较为关注,而对于传统工艺美术中所蕴含的视觉触觉等方面的艺术氛围被忽略的问题。在现代空间中,传统的元素与其空间环境难以融为一体,带来的后果是对设计艺术氛围表现力的缺乏以及文化感受力的丧失。对于传统工艺美术的材料与现代材料的融合,成为制约设计师在现代空间设计中融合传统工艺美术元素的主要障碍,降低了设计作品本身的丰富和多维,在一定意义上会造成对于传统工艺美术元素的审美与文化误读和错用。

4 传统工艺美术元素在现代室内空间中的优化应用路径

4.1 基于文化内涵的深度挖掘

在现代室内装饰设计中,如何与传统工艺美术元素实现无缝化对接的问题,则是把握策略,体现对传统工艺美术元素文化内涵全盘、多维度挖掘的问题,而非只是对形式进行生硬堆砌的问题。对工艺美术元素在具体应用中的文化内涵挖掘,需要充分把握其历史背景、区域文化特色以及工艺所蕴含的吉祥寓意、精神文化的哲理思考、艺术创作上的工匠精神等。具体应用中,要挖掘文化内涵,通过文化解读、梳理文献资料和剖析工艺细节的方式,将元素的整体价值含义进行提炼,然后将其转化为相应空间语境。在具体应用时,要明确传承传统工艺美术元素文化语义的路径。比如在具体应用时,可通过图案的改绘、符号的提炼、比例的调整和色彩的呼应,传统工艺美术元素不仅拥有其固有的历史意象,也能够适应现代装饰空间和环境的表达需要。比如可以将传统雕刻进行概括,将其放置到墙面、家具等空间环境中,通过现代材质与其他材质融合,使得工艺美术元素呈现不同的

视觉层次表达；比如将传统漆艺或纺织类图案，通过重复、分割、展开等方式放置到天花板、屏风、软装等中，通过物质属性上的重叠，达到传递工艺美术元素自身文化符号和空间功能化语义整合的目标；将传统工艺美术元素与空间环境功能深度融合，在具体应用中，需要打破简单的、机械化的静态认知，即不仅要实现视觉上的表达，还要能够促进空间环境使用者能够引发其自身对传统工艺美术元素的认知与文化认同，从而突出空间环境中的深度文化积淀和艺术魅力，使空间环境表达从单一、平面走向空间化、纵深化的视觉效果，从而不断提升空间环境的品质和使用效果^[3]。

4.2 推动传统元素与现代设计理念的融合

现代空间设计中，功能性、灵活度以及当代感是空间设计追求的方向，而传统工艺美术造型常常是复杂、精致的纹样与工艺美术表现手法，设计上来容易造成与现代简约化的空间形式或空间功能上的违和。因此，传统元素在现代设计中实现共融不失为一种较为恰当的解决方案。譬如对传统元素通过线条纹样做抽象、模块化分割雕刻或手工造型等的设计处理，让元素的比例、尺度契合现代空间环境，使元素造型的形式特征在视觉上既保留其传统韵味又符合空间当代风格审美；对传统元素可嵌入家具、屏风、隔断、装饰面板中，配合空间的功能，保留元素本身的文化底蕴；对雕刻或刺绣类传统元素也可通过组配延伸设计形成软装或灯具，在空间形成局部与整体关联；在理念层面可结合空间的动线、人体工学以及现代生活的使用需求，将文化元素和传统文化以功能的形式融入到设计中，空间元素的特性不再是孤立的存在，而是融合在空间语言中，使元素所发挥的作用形成整体性张力的流露，使传统文化与现代设计理念有效结合，既让空间具备功能性、装饰性以及文化性的相互统一。

4.3 加强材料与工艺的创新结合

现代室内设计需要将传统工艺美术融入其中，但是在材料和工艺方面会产生不匹配，所以，加强材料创新和工艺的融合是当前必须要采取的一种方法。现代设计充分应用的是材料技术以及工艺技术，并且在应用过程中需要大量的新材质以及新技术的支持，传统工艺美术更多是应用手工艺以及自然材料，二者有着一定差异；设计可以在应用现代的技术手段如激光加工、数码打印、CNC 切割、3D 打印等，对

传统元素纹样进行高清晰的立体化再现，也能够较好地保留传统元素纹样的细节和纹理质感；利用复合性的环保材料、复合性的改性材料以及金属和玻璃的组合，保持传统元素纹样手工艺质感和现代新型材料的应用性能的一致性；在应用过程中需要利用现代的表面技术、涂层、烤漆、金属氧化等手段对传统元素的质感光感以及空间立体感进行完善和补充，突出材料表面肌理质感和空间的层次感受；在与现代技术进行配合的同时，需要关注传统元素与空间的功能性结合，如材料的耐磨损性、环保的环保性、施工便捷的易施工性以及安全的安全性，以此保证传统元素在空间中的实用价值与功能展示，让传统元素在空间中既美观又易施工，从而使传统元素能够全面地、可控地、高质量地应用在现代室内设计中，使传统工艺美术元素既能够满足功能美感与艺术审美需求，又能够充分表达其施工可行性和设计的造价限制要求，使得传统的艺术特色得到延续与继承，为现代设计提供室内装饰风格、营造及装饰意蕴上的表现性和表达性^[4]。

5 结语

传统工艺美术是中华文化的精髓，在现代室内装饰设计中有着重要的地位与价值，对丰富和提高室内装饰空间的艺术美感与提高设计的整体含金量有着显著的作用，也可促进传统文化的发展与继承。但由于应用上的简单化、理论指导性弱、不协调等诸多因素存在，需要加强文化内涵提炼、设计理念拓展、工艺融合、整体营造、多学科联合、理论支撑与应用创新。由此可见，传统工艺美术应用在现代室内装饰设计中的价值，在未来的室内装饰设计市场中随着设计理念的变化和多姿多彩的社会文化需求必将呈现出其自身宽广的前景与更深层的意义。

参考文献

- [1] 徐佳卉. 中国传统工艺美术元素在现代设计中的应用浅谈 [J]. 美术文献, 2025, (02): 131-133.
- [2] 杨霞. 倡议文化创意产业下的中国传统工艺美术新思维研究 [J]. 中国民族博览, 2023, (09): 206-208.
- [3] 刘可涵. 传统工艺美术元素在现代室内设计中的创新运用及影响 [J]. 上海服饰, 2023, (02): 47-49.
- [4] 裴进. 试析传统工艺美术在室内装饰设计中的应用 [J]. 天工, 2023, (05): 51-53.

“All kinds of disasters” background, the short board of hazardous chemical disposal ability and training countermeasures

Yunfei Ji

Hebei Province Fire and Rescue Brigade Cangzhou City Fire and Rescue Brigade Jianshe Street Fire and Rescue Station, Cangzhou, Hebei, 0610 00, China

Abstract

With the acceleration of industrialization, The number of hazardous chemical production, storage and transportation links continues to increase, and accidents such as hazardous chemical leakage, explosion and poisoning are frequent and easy to occur, and are easy to form “overlapping disasters” with earthquakes and floods, posing a severe challenge to emergency rescue for “all kinds of disasters”. China’s ability to handle hazardous chemicals still has outstanding shortcomings such as low equipment level, insufficient professional quality of personnel, and poor coordination, which makes it difficult to meet the needs of emergency rescue for multiple disasters. Based on the “all-hazard” emergency rescue demand, this paper puts forward targeted improvement measures from the point of view of practical training, in order to help emergency forces effectively deal with complex hazardous chemical accidents, and provide reference for “all-hazard” “emergency rescue.

Keywords

all kinds of disasters; Hazardous chemical disposal; Shortcomings in ability; Practical training; Emergency rescue

“全灾种”背景下危化品处置能力短板与练兵对策

纪云飞

河北省消防救援总队沧州市消防救援支队建设大街消防救援站, 中国·河北沧州 061000

摘要

随着工业化进程日益加快, 危化品生产、储存、运输环节的数量持续增加, 危化品泄漏、爆炸、中毒等事故多发易发, 且易与地震、洪灾等形成“叠加灾害”, 对“全灾种”应急救援构成严峻挑战。我国危化品处置能力仍存在装备水平不高、人员专业素养不足、联动不畅等突出短板, 难以满足多灾种并发应急救援需求。本文基于“全灾种”应急救援需求, 针对当前危化品处置能力短板, 从实战化练兵角度提出针对性提升对策, 以期助力应急力量有效应对复杂危化品事故, 为“全灾种”应急救援提供参考。

关键词

全灾种; 危化品处置; 能力短板; 实战练兵; 应急救援

1 引言

危化品作为工业的基础原材料, 广泛应用于能源、化工、医药等行业, 既直接服务于经济发展, 又潜藏着极高的危险性。近年来极端天气灾害频发, 地震、台风、洪水等自然灾害不仅直接造成人员伤亡和财产损失, 还易导致危化品储存设施受损, 进而引发次生危化品灾难事故, 导致救援场景更为复杂、处置工作难度显著提升。传统的危化品单灾种救援模式已难以满足全灾种应急需求, 切实找准处置能力短板, 通过科学施策强化实战练兵以补齐短板, 是应急管理的紧迫任务。

【作者简介】纪云飞 (1999-), 男, 中国河北沧州人, 本科, 从事消防灭火救援研究。

2 “全灾种”背景下危化品处置的核心特征

2.1 处置场景的复合型

“全灾种”背景下的危化品事故通常是由自然灾害引发的, 即原生灾害下发生二次危化品事故, 救援人员需要面对的是复杂的灾害环境, 除了自然灾害导致的建筑破损、建筑内人员被围困的情况外, 还存在危化品泄漏、中毒、爆炸等可能, 这就对救援决策的准确性和时效性提出了更高的要求^[1]。

2.2 救援力量的协同性

仅靠一支救援力量无法适应“全灾种”条件下危化品处理处置工作需求, 需要各级、各部门及各支救援力量协同发挥作用。在力量编成上, 既要依托消防部门进行灭火、搜救、堵漏, 又要依靠应急管理部门组织物资保障、道路交通管控, 环保部门开展环保监测、污染物处理, 医疗卫生部门

开展救治、防止中毒,还要依靠危化品生产企业技术专家、社会中介机构应急救援专家协同参与现场技术服务,形成政府主导、企业保障、技术专家支援的协同救援格局。

2.3 处置要求的专业性

危化品种类繁多,化学品所具有的物理化学性质千差万别,爆炸易燃类化学品要注重防火,有毒有害类化学品要注重防护扩散,腐蚀性化学品要注重防腐防护^[2]。“全灾种”情景下危化品事故可能伴有复杂环境下的自然灾害,更加重了处置的难度,这就要求救援人员具备丰富的危化品知识,针对灾害类别、危化品不同类型提出不同的处置对策。

3 “全灾种”背景下危化品处置能力的现存短板

3.1 装备配置:适配性不足与智能化水平低

装备是危化品处置的重要手段,装备的适用性和智能化水平决定了危化品处置能力和水平。适用性不高主要表现在两个方面:一是装备场景适配性有限:危化品处置装备多针对一般性、单一性事故场景设计,对“全灾种”下的“多场景”适配性不足,如:普通的有毒气体检测仪,受雨天潮湿的影响,检测精度下降;用于储罐泄气封堵的装备在地震后的废墟中难以展开操作;缺乏极端环境类装备,如严寒地区-30℃以下环境中,简易液压破拆工具难以使用;高原地区,呼吸防护设备的供氧难以长时间维持。装备的智能化程度不高:危化品处置装备以人工操作为主,智能化、无人化装备匮乏,现场危化品甄别主要依赖现场取样后送实验室分析,需要数小时,无法为决策者提供快速数据^[3]。泄漏封堵、火源扑灭等操作多依赖救援人员近距离完成,易对人员造成伤害。另外,数据难以共享,应急救援队伍装备运行数据、环保部门环境监测数据不能实现共享,救援指挥无法全面掌握现场情况。

3.2 人员素养:专业能力薄弱与实战经验不足

应急救援队伍是危化品处置的主力力量,其素养的高低直接影响危化品处置效果,人员素养不足主要体现在两个方面:专业知识储备不足:救援人员化学、物理知识储备少,对新能源中的锂电池、化工中的特种溶剂等新型危化品处置知识掌握不熟练。救援人员处置锂电池火灾时,仍然以传统的方式进行灭火,导致二次燃烧;救援人员处置有毒气体泄漏时,无法判定气体泄漏等级,存在过度防护现象。救援人员对“全灾种”场域下的风险叠加现象考虑不充分,无法预见自然灾害下是否会产生二次危化品风险,处置预案缺乏预见性。处置经验不足:危化品事故,特别是复合型事故发生率低,救援人员处置经验有限,处置能力仅停留在理论层面。在实验场地,救援人员能按步骤完成泄漏封堵、人员救助等转移行动,但在事故现场,救援人员受浓烟、杂音、恐慌等环境因素干扰,易出现操作失误或畏缩不前等情况,避险能力低,在爆炸、毒气蔓延等紧急情况下避险能力差,易造成

自身伤亡。

3.3 协同机制:联动效率低与责任划分模糊

协同是“全灾种”背景下危化品处置的必要保障,而当前协同机制的缺失主要体现在以下两点:一是部门协同不畅:各部门信息沟通、协调资源、协同任务等缺乏统一流程,救援行动存在各自为战的现象,救援队伍到场后需要再次向应急管理部调取危化品企业的基础信息,延误时间;环保部门的检测数据无法及时反馈至救援指挥中心,救援人员无法做到及时防护;部分区域未拥有统一应急指挥平台,各部门间依靠电话、微信群等非正常渠道沟通,信息传递效率低、信息错误率高^[4]。二是责任界定不明:“全灾种”背景下危化品处置涉及部门多、环节多。部分环节责任划分不明确,存在推诿或重复处理的现象。在自然灾害引发的危化品泄漏事故中,关于受灾事故周边群众疏散、协调有关企业给予技术援助等,部分地区未明确主体责任,导致救援工作延误;在物资调用上,应急管理部门与民政部门的物资储备存在重叠,未明确优先顺序,导致一些急需物资无法及时到位。

4 “全灾种”背景下危化品处置能力的练兵对策

4.1 聚焦装备适配性与智能化,开展“装备-场景”融合练兵

面向全灾种场景化需求,开展场景模拟装备实训,对接复合型灾害救援需求,提升装备复杂场景适用性,推动智能装备向“场景化”“应用化”方向迭代,实现“场景适用+智能装备”的装备练兵模式。构建复合型场景化练兵环境,在应急训练基地的基础上,针对我国地域灾害特点,构建地震坍塌+危化品储罐泄漏、洪涝淹没+化学品库房溃决、台风暴雨+危化品运输车侧翻等多个场景的立体化自然灾害与危化品事故场景,组织抢险救援人员分批次、分场景开展装备实训,在场景化基础上重点训练常规装备与特殊装备改造使用方法,如场景一高温、低温、多雨天气下有毒气体检测仪检测防护,场景二高温、低温天气液压破拆工具预热,场景三高粉尘环境下防护装备防护密封,使装备在各类恶劣环境下都能正常使用。

围绕“人机配合、快速处置”目标,有步骤地引进无人机巡检设备、防爆机器人封堵设备、快速检测试纸、移动式光谱分析仪等智能装备,开展分级分层人机协同练兵。初级阶段开展智能装备基础训练,训练救援人员掌握智能装备基本操作,操作无人机搭载红外热像仪巡检定位危化品泄漏,遥控防爆机器人进行高危场所气体样本采集、泄漏封堵、危险品转移,利用快速检测试纸对常见化学品5min内初筛。中级阶段开展装备数据共享训练,在统一应急指挥系统训练救援人员实时报告装备数据、上传数据,接受环境、气象数据,综合研判数据、进行态势推演、辅助判断决策,以智能装备操作-数据传输-决策支持为一体的闭环训练。

4.2 围绕专业能力与实战经验，开展“知识 – 技能”协同练兵

以强化学习培训、实战锻炼为重点，构建理论教育、模拟推演、实战复盘的练兵模式，强化救援人员处置本领。加强专业知识学习，聘请危化品专家、企业工程师、应急管理专家开展“全灾种”危化品处置培训，培训内容应涵盖危化品物理化学性质、易燃易爆、有毒有害、腐蚀性化学品危险特性及危害原理，尤其是新型危化品危险性；危化品“全灾种”场景风险，针对地震、洪水、台风等自然灾害可能产生的二次危险品，进行危化品场景风险预判；危化品泄漏堵漏、火灾扑救、救人技能。开展线上线下结合的知识学习，线上以短视频、动漫等形式开展，线下以案例教学、课堂学习等方式开展。

开展实战化模拟演练，坚持实战化、高仿真原则，组织开展“全灾种”危化品处置综合模拟演练。贴近真实场景，即在演练过程中植入环境干扰风险、模拟事故真实性。贴近真实力量，即参与演练部门涵盖消防、应急、环保、医疗、企业等，按照实战救援流程开展综合协同处置。贴近真实流程，即演练涵盖接警出动、现场侦查、方案编制、处置作业、后期评估全过程，无预设脚本、不提前告知，训练救援人员临场决断和处置能力。同时常态化开展小规模、高频次的专项演练，夯实救援队员专项处置能力。

加强实战案例复盘，收集近几年的国内外“全灾种”下的危化品事故处置案例，组织救援人员复盘。复盘需围绕三个重点：一是复盘处置中的优缺点，总结可借鉴的经验和急需改进的问题；二是模拟假设场景，以我方作为现场指挥官，重新制定应急处置措施，比较原方案的优劣，提升指挥员的水平；三是针对案例中的典型失误进行针对性补强，防止类似现象的发生。建立案例库和练兵科目转化机制，将案例中的经典场景和问题提炼为练兵科目，以案带训，以练促能。

4.3 立足联动效率与责任划分，开展“机制 – 流程”标准化练兵

以规范协同模式、理顺责任流程为主轴，融合流程梳理、模拟演练与考核评估，提升跨部门统筹联动处置效率。规范标准化协同流程，联合应急、消防、环保、医疗、交通等部门，编制《“全灾种”危化品处置协同工作规范》，规范各部门的职责分工、信息共享手段、资源调动流程。明确应急管理等部门负责统一指挥，统筹信息汇总与消防队伍处置调度，环保部门现场监测，医疗部门伤员救治；规范信息共享以统一的应急指挥平台为载体，各部门在 30 分钟内上传信

息；规范物资调度以优先保障抢险人员装备防护、现场处置设备配置为准则。将标准化流程汇编成操作手册，分发各部门应急救援人员，为备勤、实战提供依据。

开展多部门协同演练，定期组织多部门协同演练，以标准化流程落实为主要内容进行协同演练；开展信息传输协同演练，模拟危化品事故发生后各部门利用应急指挥平台进行信息上传，训练各部门及时准确上传信息；开展物资保障协同演练，模拟现场需要防护装备和医疗用品，训练应急管理部门及时调用民政、医疗部门物资，消防部门进行接收和使用；开展任务协同演练，模拟多部门共同完成搜救、封堵、监测、救护全环节任务，训练各部门任务协同^[5]。

建立联动考核评估制度，在联动练兵中引入第三方评估单位，开展对部门联动情况的考核评估，以联动中信息传递的及时性、资源调度的精准性、任务衔接的顺畅性为指标，对考核优秀的部门和个人予以表彰奖励，对存在问题的部门提出限期整改要求，考核结果纳入年度应急管理考核体系。以考核评估倒逼各部门重视联动练兵、提升联动处置能力。

5 结语

“全灾种”应急救援体系建设，对于危化品处置提出了更高的要求，处置装备、人员、机制等方面短板制约了救援能力提升。强化装备场景化、知识技能化、机制流程标准化的练兵，针对性地补齐能力短板，提升救援队伍处置复合型危化品事故的综合能力。同时要不断丰富创新练兵手段，针对新危化品、灾情极端化、场景动态化不断更新练兵内容，加快危化品处置能力与“全灾种”需求的适配性。同时注重练兵效果，将练兵中形成的好经验、好做法、流程、标准上升为制度、规范，成为“全灾种”危化品处置的常态化制度，保障人民生命财产安全、环境安全。

参考文献

- [1] 高学农,李京祥.危化品道路事故应急处置模型构建与能力提升研究[J].中国石油和化工标准与质量,2025,45(01):1-3.
- [2] 郑云亮,赵杰超,王吉武,等.水上危化品运输事故分析及应急处置能力提升研究[J].舰船科学技术,2023,45(09):69-74.
- [3] 李财.危化品事故处置能力提升策略研究[J].消防界(电子版),2022,8(14):75-77.
- [4] 胡拥军.演练实战化“战”时心不慌上海石化举行危化品道路交通事故应急处置演练[J].上海化工,2022,47(01):66.
- [5] 张海波.危化品道路运输安全管理分析与对策[J].化工管理,2020,(10):151-152.

Application and improvement of power load forecasting in power grid operation management

Zhanfei Ma

Shenzhen ShenDian Power Supply New Energy Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong, 518000, China

Abstract

With the rapid development of socio-economy and continuous fluctuations in electricity demand, accurate load forecasting plays a vital role in ensuring stable grid operations, optimizing resource allocation, and reducing operational costs. This technology not only enables power grid companies to plan generation schedules in advance but also effectively addresses emergencies, guaranteeing safe and reliable power supply. However, power load forecasting faces significant challenges due to multiple factors including weather conditions, economic activities, and social events. As power systems become increasingly complex, traditional forecasting methods are increasingly demonstrating their limitations. Therefore, research on load forecasting technology is crucial for enhancing grid management capabilities.

Keywords

Power load forecasting; Grid operation management; Application and improvement

电力负荷预测在电网运行管理中的应用与改进

马战飞

深圳市深电供电新能源有限公司，中国·广东深圳 518000

摘要

随着社会经济的快速发展，用电需求的持续变化，准确的负荷预测对保证电网稳定运行，优化资源配置，降低运营成本具有重要意义。负荷预测不仅可以帮助电网公司提前制定发电计划，而且可以有效地应对突发事件，保证供电安全可靠。然而，电力负荷受气象、经济活动、社会事件等多种因素的影响，给负荷预测带来极大的挑战，而电力系统日益复杂，传统预测方法越来越显示出它的局限性。可见，对负荷预测技术的研究，对提高电网管理水平有重要意义。

关键词

电力负荷预测；电网运行管理；应用与改进

1 引言

将电力负荷预测应用于电网运营管理，是一项综合性的课题，涉及到多个学科。这既涉及到对电力系统运行机理的深刻认识，又涉及到数学建模、数据分析和计算机科学等多学科交叉。从电网运行角度出发，对电力系统进行负荷预测，是制定发电计划、合理调度用电资源的依据，预测结果的准确与否对电网经济可靠运行具有重要意义。因此，对负荷预测技术的应用和改进进行研究，对提高电网管理水平、促进电力工业可持续发展具有重要意义。

2 电力负荷预测在电网运行管理中的应用作用

2.1 支撑电网规划设计，保障供电能力适配

通过精确预测未来一段时间区域内电力负荷的总量、

分布及增长趋势，可以明确电网规划的容量需求和布局方向，避免因预测不足而造成的供电缺口和过度建设所带来的资源浪费^[1]。在电网建设过程中，负荷预测结果可用于指导变电站选址、输电线路布设、配网优化等关键环节，保证电网结构与负荷分布匹配，提高输电效率和稳定性。同时，针对新能源接入带来的负荷波动，通过负荷预测可以提前预测新能源发电和负荷之间的时空匹配关系，为新能源建设和电网升级改造提供数据支持，促进电网由“被动适应”向“主动规划”转变，确保电网中长期供电能力适应区域经济社会发展需要。

2.2 优化电网调度运行，提升资源配置效率

负荷预测是电网日常调度中实现“源网荷储”协调运行的重要环节，通过对日、短、中长期负荷变化的精确预测，调度部门可以对火电、水电、新能源等各种电源的发电计划进行合理安排，实现电力供需平衡，防止因发电过剩造成的能力浪费或因发电不足而造成的供电紧张。在跨区域电网调度中，负荷预测可以引导电力余缺调剂，优化省际间跨区域

【作者简介】马战飞（1983-），男，广东梅州人，助理工程师，从事电力运行管理研究。

电力输送方案，提高全国电力资源统筹配置效率。通过对负荷预测进行动态调整，实现对变压器分接位置的调整、无功补偿装置的优化，以及线路检修计划的合理安排，从而降低电网损耗，提高电网运行的经济性和可靠性，保证电力系统的安全稳定运行。

2.3 强化电网风险防控，降低安全运行隐患

通过对极端工况如负荷峰值预测、负荷突降等提前识别电网可能面临的安全风险，为调度部门提供足够的响应时间。如在负荷峰值之前，系统可以提前启动备用电源，调整负荷侧的响应策略，防止线路过负荷跳闸，当负荷急剧下降时，系统能及时调整出力，避免了频率的异常波动^[2]。在此基础上，可针对高温、寒潮和台风等极端天气引起的负荷异常变化，结合气象资料，对负荷变化情况进行预测，从而指导电网做好防汛、防冰、防风等应急准备工作，完善应急预案，储备应急物资，减少极端天气对电网安全运行的影响，保证电力供应的连续性和稳定性。

2.4 控制电网运行成本，推动绿色低碳发展

在发电成本控制中，根据负荷预测对发电计划进行优化，可以减少机组启停次数，减少燃油消耗，避免盲目发电造成成本浪费。对于新能源，负荷预测可以提高新能源的消纳能力，降低弃风弃光，提高新能源利用效率，减少对传统化石能源的依赖，促进能源结构转型。在电网运行费用控制中，对负荷的分布和变化规律进行预测，可以对设备的维修时间和范围进行合理的安排，避免在用电高峰期进行维修，降低停电损失。在负荷预测基础上对电网进行改造，可以避免投资过大，提高资金利用率，同时，通过负荷预测引导需求侧响应，可以激励用户错峰用电，降低电网峰谷差异，减少电网调峰成本，达到经济和环境双重效益的目的。

3 电力负荷预测在电网运行管理中的改进应用

3.1 融合多源数据与先进算法，提升预测精准度

在实际应用方面，需要建立“多源数据融合 + 高级算法建模”的预测体系，在数据和技术两个维度同时提高预测精度。在数据融合方面，可以将气象资料、经济、用户数据、新能源、电网运行数据等多维信息进行融合，并对其进行数据清洗、规范化处理和特征提取，构建综合反映负荷影响因子的数据集^[3]。如利用气象资料和负荷资料进行相关性分析，量化气温变化对居民电力负荷的影响系数；结合工业园区发展规划数据，对工业用电趋势进行预测，为负荷预测提供更加丰富的投入维度。

在算法优化方面，需要突破传统统计学方法（如回归分析、时间序列分析等）的限制，引入随机森林、梯度提升树、长短期记忆网络、图神经网络等先进算法。针对不同预报周期（短、中、长）和不同负荷类型（居民、工业、商业），选择合适的算法模型。在中长期用电预测中，可以将 XGBoost 模型处理多种特性的能力相结合，从长期来看，

经济和政策因素对用电的影响。

同时，可以分布式能源密集地区为研究对象，利用 GNN 模型构建电网拓扑结构 - 负荷关联图，提高区域负荷预测的准确性。在此基础上，建立动态优化算法模型，利用最新收集到的数据定期训练和迭代模型参数，降低预测误差，使预测结果更加准确地反映电网负荷的变化趋势，为电网运行管理提供更加可靠的决策依据。

3.2 细分负荷预测场景，实现差异化精准管理

在改进应用时，需要按照“用户类型 + 地域特性 + 时间维度”细分负荷预测情景，构建差异化预测系统，提高电网管理的针对性和有效性。根据用户类型可以分为居民用电，工业用电，商业用电，农业用电等。家庭用电负荷的预测要注重气象因素（如季节、温度）、节假日效应和居民生活习惯的改变。工业负荷的预测要与企业的生产计划，产业的景气程度，以及环保政策（如限产、停产等）相结合。商业负荷的预测需要考虑营业时间、旺季和淡季以及大型活动（如展会和促销）的影响，农业负荷预测需要考虑作物生长期、灌溉需要和气象条件（如降雨、光照等）。对用户类型进行细分，可以根据不同负荷的特点建立专属预测模型，降低不同类型负荷之间的相互影响，提高预测准确性。

根据区域特点，将负荷预测分为城区核心区域、工业园区区域、偏远乡村区域、新能源富集区域等几个场景，城区核心区负荷密度高，峰谷差大，需要对负荷峰值和短时波动进行重点预测^[4]。工业园区负荷稳定性强，但受生产节奏的影响较大，需要结合生产调度数据提高预测精度，偏远农村地区负荷分散，基础资料薄弱，需要结合人口移动和农业生产规律，对预测方法进行优化。

新能源富集区新能源负荷受新能源功率波动的影响较大，需要进行新能源功率预测和负荷预测的融合，提高新能源负荷预测的准确性。从时间维度上看，可分为日内超短期（15分钟 - 1 小时）、短期（1 天 - 1 周）、中（1 月 - 1 年）和长期（1 年以上）。通过场景细分，可以实现差别化负荷预测管理，使预测结果更加符合电网运行管理的实际需要，提高管理效率和决策科学性。

3.3 构建预测误差反馈机制，动态优化预测模型

在应用上，需要构建“误差监控—归因分析—模型修正—效果验证”闭环反馈机制，深入挖掘预报误差，不断提高预测模型的自适应性和准确性。应建立实时误差监测系统，通过 SCADA 系统、电力用户信息采集系统等获取实时负荷数据，并将其与预测结果进行比较，计算出误差指标（绝对平均值、均方根差、最大误差等），并将其变化趋势展示在可视化平台上，及时发现异常误差。例如，当一个地区的实际负荷和预测值之间的偏差超出了预先设定的临界值，系统就会发出警报，提醒相关人员进行分析。

此外，应进行多维误差归因分析，从数据、模型和外部因素三个层次对误差成因进行排查。在数据层面，需要

对输入数据进行检验,看看有没有遗漏、离群值、滞后等情况,比如气象数据传输延迟、用户用电数据采集故障等。模型层次上,需要分析算法是否与当前负荷情景相匹配,模型参数是否需要调整,特征变量是否遗漏了关键影响因子,如在用电峰值时,模型是否没有充分考虑极端气温对负荷的叠加效应。在外部因素层面,需要识别突发事件(如自然灾害、重大事故、政策临时调整等)对负荷的影响,如突发停电引起的负荷骤降,临时限电政策改变产业负荷曲线等。同时,采用归因分析方法,找出产生错误的根本原因,从而指导模型的优化。

针对数据存在的问题,对数据收集和预处理流程进行优化,对缺失数据进行补全,对离群点进行修正,提高数据实时性^[5]。对模型参数进行调整,增加关键特征量,替换自适应算法,如将“极端高温天气”这一特征加入到夏季负荷预测中,提高模型对高温天气的响应能力。针对外部突发事件,建立突发事件应急预报模型,在突发事件发生时,自动调用应急模型对预报结果进行修正。

3.4 推动“负荷预测+”协同应用,拓展管理服务边界

推进“负荷预测+”多场景协同应用,实现负荷预测与电网调度、需侧响应、新能源消纳、应急管理等多个环节深度融合,拓展负荷预测服务范围,提升电网运行管理效能。在“负荷预测+电网调度”方面,需要将负荷预测结果与发电计划、输电线路负荷预测和储能调度方案相结合,建立

“源网荷储”协同调度模型:根据负荷预测对火水电出力进行优化,结合新能源出力预测调整储能充/放电策略,根据线路负荷预测对潮流分布进行合理规划,防止线路过载,实现电网精细化、智能化调度。如利用负荷预测,在负荷峰值之前,提前调度蓄能电站放电,以弥补电力缺口;在新能源出力峰值时段,引导用户加大用电负荷,提高新能源消纳量。

在“负荷预测+需侧响应”方面,需根据负荷预测,识别电网峰谷时段和负荷缺口,并制定差异化需求侧响应策略,在用电高峰时,采用峰谷电价、尖峰电价等电价激励措施,引导用户错峰用电。当负荷缺口较大时,调度可中断负荷(如大型工业用户、商业综合体等),减少非重点用电负荷;

在新能源出力过剩的情况下,鼓励用户增加用电(如电动车、储能装置等),以达到“削峰填谷”和新能源消纳的双重目的。

同时,可将用户响应能力预测和负荷预测相结合,对DSM的响应潜力进行精确评估,并保证其可行性和有效性。在“负荷预测+应急管理”方面,需要把负荷预测和极端天气预警、电网故障预警联动起来,对应急状态下的负荷变化进行预测,如在台风到来之前,对受灾地区的负荷损失进行预测,提前调配应急电源。当电网发生故障跳闸后,对故障恢复过程中所需负荷进行预测,以指导电网抢修顺序和供电恢复次序。通过“负荷预测+”的协同应用,打破电网各个管理环节之间的信息屏障,达到数据共享和业务联动的目的,提高电网运行管理的整体协同和综合效益^[6]。

5 结语

综上,对电力系统进行负荷预测是十分必要的,它不仅对保证电网的稳定运行具有重要意义,而且对优化资源配置和降低运营成本具有重要意义。随着科学技术的发展,电力负荷预测方法与技术得到不断的发展与创新。在未来,随着大数据、人工智能、物联网等技术的不断融合,电力负荷预测将会更准确、更有效,可为电力系统的智能化运行与管理提供新的技术支撑,促进电力工业向更高效率、更可靠和更环保的方向发展。

参考文献

- [1] 陈雨东,邢伟.多源数据融合在电力系统负荷预测中的应用研究[J].张江科技评论,2024,(12):99-101.
- [2] 李杰,李蓝青,曹帅,戴上.基于改进灰狼算法优化和极限学习机的电网电力负荷预测[J].微型电脑应用,2024,40(11):75-77+82.
- [3] 苏世杰,杨雷,李俊楠,申志刚,田凯.基于优化BP神经网络的电力负荷概率密度预测[J].电子设计工程,2024,32(22):124-127+132.
- [4] 林平川,张庚涛.智能电网中基于深度学习的电力负荷混合预测模型设计与应用[J].光源与照明,2024,(10):132-134.
- [5] 张超,郑晓辉.基于电力大数据下的短期电力负荷预测研究[J].电力设备管理,2024,(19):256-258.
- [6] 何德长.基于大数据的电网负荷预测与动态调度[J].中文科技期刊数据库(引文版)工程技术,2024(003):000.

Discussion on optimization of whole life cycle management of power engineering projects under smart grid background

Zhichao Pan

Shenzhen ShenDian Power Supply New Energy Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong, 518000, China

Abstract

The rapid advancement of smart grid technology has created both new opportunities and challenges for power engineering project management. This paper explores optimization pathways for full lifecycle management in power engineering projects within the smart grid environment. By establishing a digital twin-based management framework, developing multi-dimensional integrated models, and creating an intelligent decision support system, we have developed a comprehensive management framework. Targeted intelligent optimization strategies are proposed for four critical phases: project planning/design, construction, operation/maintenance, and decommissioning/disposal. Research demonstrates that the deep integration of smart technologies—including big data analytics, IoT monitoring, blockchain, and cloud computing platforms—significantly enhances project management efficiency, reduces lifecycle costs, and enables sustainable development of power engineering projects.

Keywords

smart grid; full lifecycle management; digital twin; big data analytics; IoT monitoring

智能电网背景下电力工程项目全生命周期管理优化探讨

潘志超

深圳市深电供电新能源有限公司，中国·广东深圳 518000

摘要

智能电网技术的快速发展为电力工程项目管理带来了全新的机遇与挑战。本文立足于智能电网环境，探讨电力工程项目全生命周期管理的优化路径。通过构建基于数字孪生的管理架构、建立多维度集成模型以及搭建智能决策支持系统，形成了完整的管理框架体系。针对项目规划设计、施工建设、运行维护和退役处置四个关键阶段，提出了相应的智能化优化策略。研究表明，大数据分析、物联网监测、区块链技术和云计算平台等智能化技术的深度融合应用，能够显著提升项目管理效率，降低全生命周期成本，实现电力工程项目的可持续发展。

关键词

智能电网；全生命周期管理；数字孪生；大数据分析；物联网监测

1 引言

电力工业作为国民经济的基础性产业，其发展水平直接影响着经济社会的运行效率。随着能源转型和数字化技术的深入推進，智能电网建设已成为电力系统发展的必然趋势，传统的电力工程项目管理模式面临着项目规模日益庞大、技术复杂度不断提升、投资成本持续增长、运维难度显著增加等诸多挑战。全生命周期管理作为一种系统化的管理理念，强调从项目的初始规划到最终退役的全过程优化，不仅关注项目建设期的成本控制，更重视运营期的效率提升和退役期的资产处置。智能电网技术的发展为全生命周期管理提供了强大的技术支撑，使得项目管理的精细化、智能化成

为可能。然而当前电力工程项目管理中仍存在决策依据不充分、管理模式滞后、过程控制不精细、信息孤岛严重等问题，严重制约了管理效率和经济效益的提升，亟须通过智能化技术手段和管理模式创新来解决这些问题。

2 智能电网环境下电力工程项目全生命周期管理框架构建

2.1 基于数字孪生的项目管理架构设计

数字孪生技术通过创建电力工程项目的虚拟映射，构建了涵盖全生命周期的智能仿真平台。该架构采用物理层、数据层、模型层和应用层的分层设计，实现了物理设备与数字世界的深度融合。平台能够实时反映项目状态，通过高精度建模技术精确模拟变压器、断路器、输电线路等关键设备的运行特性。实时数据同步机制确保虚拟模型与物理实体保持一致，通过现场传感器网络采集运行参数并高速传输至数据中心。这种架构不仅提高了管理时效性，还能预测发展趋势。

【作者简介】潘志超（1984-），男，中国广东梅州人，本科，助理工程师，从事电力工程管理研究。

势, 为故障预防和应急处置提供科学依据^[1]。

2.2 多维度集成管理模型建立

电力工程项目的复杂性需要建立技术、经济、环境、社会等多维度的综合管理模型。技术维度通过建立包含设备故障率、供电可靠性、技术成熟度等指标的评价体系, 采用层次分析法进行方案评估。经济维度强调全生命周期成本优化, 考虑到运行维护成本占总成本的较大比重, 建立现值折算模型选择最优方案。环境维度运用生命周期评价方法量化碳排放、土地占用等环境影响, 制定绿色施工和清洁生产策略。社会维度建立影响评估机制, 处理征地拆迁、就业创造等社会问题, 通过与利益相关方沟通确保项目社会接受度。

2.3 智能决策支持系统框架搭建

智能决策支持系统采用五层架构, 包括数据采集层、数据处理层、知识库层、推理引擎层和人机交互层。数据采集层通过自动采集和人工录入相结合的方式获取项目信息, 动态调整采集频率确保数据时效性^[2]。知识库层采用产生式规则、框架和本体等形式存储专家知识, 涵盖设备选型、风险识别、故障诊断等管理经验, 并通过机器学习算法持续优化。推理引擎作为决策核心, 在项目规划时采用正向推理生成可行方案, 故障诊断时运用反向推理追溯原因, 方案优化时结合混合推理寻找最优解。系统通过标准化接口实现各层间的高效数据交换和功能调用。

3 电力工程项目关键阶段管理优化策略

3.1 规划设计阶段的智能化方案优选

智能化方案优选通过大数据分析和人工智能算法, 显著提高规划设计阶段决策的科学性和效率。系统采用参数化设计方法, 根据项目功能需求和边界条件自动生成多个技术方案, 包含设备配置、网络拓扑、控制策略等关键要素。方案评价运用多目标优化算法, 建立涵盖供电可靠性、投资回收期、碳排放强度等定量指标和技术先进性、社会接受度等定性指标的评价体系。通过遗传算法、粒子群算法等智能优化方法在解空间中搜索帕累托最优解集, 为决策者提供科学的方案选择依据(见表1)。

表 1 220 千伏输变电工程项目方案评价对比

评价指标	方案一	方案二	方案三	权重
供电可靠性 (%)	99.97	99.95	99.98	0.25
全生命周期成本 (亿元)	8.76	9.23	8.45	0.30
年碳排放量 (万吨)	12.5	13.8	11.2	0.20
土地占用 (公顷)	4.8	5.2	4.5	0.15
技术成熟度评分	8.5	7.8	9.2	0.10
综合得分	8.42	8.15	8.78	—

3.2 施工建设阶段的动态资源配置优化

动态资源配置优化通过实时监控施工进度和资源使用情况, 及时调整分配策略确保项目按期保质完成。资源需求预测基于历史数据和工程特征, 采用时间序列分析和机器学

习方法预测各施工阶段的人力、材料、设备需求, 充分考虑季节因素、天气影响等多种变量。资源调度优化运用动态规划算法, 在满足施工进度要求前提下最小化资源使用成本, 通过求解资源受限项目调度问题获得最优分配方案。进度偏差分析采用阈值管理方法, 对比实际进度与计划进度识别关键路径延误风险, 当偏差超过预设阈值时系统自动预警并提供纠偏建议^[3]。

3.3 运行维护阶段的预测性管理机制

预测性管理机制将传统事后维修转变为事前预防, 通过状态监测和故障预测大幅降低维护成本和停电损失。设备状态评估基于多源数据融合技术, 综合分析在线监测数据、离线试验数据和运行历史数据, 建立设备劣化模型描述性能退化规律, 将设备分为正常、注意、异常和严重四个等级制定差异化维护策略。故障预测采用深度学习算法构建长短期记忆网络模型, 从海量历史数据中学习故障模式和征兆, 预测准确率达到较高水平。维护策略优化根据设备状态和故障风险采用风险评估矩阵, 综合考虑故障概率和后果确定设备风险等级, 通过优化策略实现设备可用率提升和维护费用降低。

3.4 退役处置阶段的资产价值最大化

退役处置阶段通过合理策略降低处置成本并实现资产残值回收和资源循环利用。退役时机决策基于设备的技术寿命、经济寿命和环保要求确定最佳退役时间, 技术寿命评估设备老化程度和故障率, 经济寿命分析运维成本与更新效益对比, 环保要求评估能效水平和排放指标。资产评估采用成本法、市场法和收益法相结合的方式, 成本法计算账面价值, 市场法参考二手设备交易价格, 收益法预测继续使用的现金流折现值, 综合确定公允价值。循环利用方案遵循减量化、再利用、资源化原则, 性能良好的设备经技术改造后降级使用或转让, 无法继续使用设备进行拆解回收材料再利用, 危险废物按环保要求无害化处理, 实现较高的资产回收率。

4 支撑全生命周期管理的智能化技术体系

4.1 大数据分析与人工智能决策平台构建

大数据分析平台采用分布式存储和并行计算架构, 整合 SCADA 系统、营销系统、气象系统等多源数据, 具备处理海量数据的强大能力。平台通过数据清洗去除重复和错误数据, 数据集成形成统一数据视图, 数据变换实现格式标准化, 确保高质量的数据基础。特征工程环节运用领域知识和统计分析从原始数据中提取有价值特征, 在负荷预测中融合历史负荷、温湿度、节假日等多维特征, 在故障诊断中提取频谱、时域统计和小波特征。模型训练采用集成学习策略, 结合随机森林、梯度提升树、XGBoost 等多个基学习器, 通过交叉验证避免过拟合, 根据不同应用场景选择准确率、召回率、均方误差等合适评价指标, 显著提高预测和决策的准确性^[4]。

4.2 物联网监测与实时数据采集系统部署

物联网监测系统通过部署温度、振动、局部放电、油中气体等多类型智能传感器，实现电力设备全面感知和互联互通。系统采用感知层、网络层、应用层的分层架构，底层传感器负责数据采集，中间层通过光纤、以太网、4G/5G、LoRa 等多种通信方式传输数据，顶层提供数据处理和管理功能。边缘计算技术将分析任务下沉到设备端，边缘节点部署轻量级算法实时处理传感器数据，识别异常情况并触发报警，同时上传详细数据供云端深度分析。系统建立完善的安全机制，采用端到端加密确保数据机密性，使用数字签名保证数据完整性，部署入侵检测系统防范网络攻击，通过设备认证机制防止非法接入。

4.3 区块链技术在项目信息管理中的应用

区块链技术凭借去中心化、不可篡改、可追溯特性为电力工程项目多参与方信息管理提供创新解决方案。智能合约机制将项目管理规则编码部署在区块链上，当满足预设条件时自动触发相应操作，实现工程款支付等业务流程自动化执行，减少人为干预提高透明度。数据共享机制通过分布式账本解决信息孤岛问题，各参与方将设计图纸、施工记录、质量检验报告、设备台账等数据上传区块链，所有授权用户可查询验证数据，哈希算法和时间戳技术确保数据完整性和时序性。供应链追溯应用记录从原材料采购到安装使用的全过程信息，出现质量问题时快速追溯到源头明确责任主体，有效提升设备材料质量管理水平和客户满意度。

4.4 云计算平台的资源调度与协同机制

云计算平台采用虚拟化技术将物理资源池化，根据业务需求动态分配计算和存储资源，显著提高资源利用率。资源调度算法运用改进遗传算法将任务调度转化为多目标优化问题，综合考虑任务优先级、资源需求、截止时间等因素，在最小化完成时间、最大化资源利用率、最小化能源消耗等

目标间寻找最优平衡，同时处理资源异构性和任务依赖关系等复杂调度场景^[5]。协同工作平台支持多用户多角色在线协作，提供文档共享、信息交流、工作协调功能，配备版本控制记录修改历史，支持多人同时编辑和冲突解决，视频会议功能实现远程沟通减少差旅成本。弹性伸缩机制根据业务负载自动调整资源配置，负载增加时启动新虚拟机扩展处理能力，负载降低时释放多余资源降低成本，负载均衡器分发请求避免单点故障，全面提升系统可用性和协同效率。

5 结语

智能电网环境下的电力工程项目全生命周期管理是一个复杂的系统工程，需要管理理念、技术手段和组织模式的全面创新。本文构建的基于数字孪生的管理架构、多维度集成管理模型和智能决策支持系统为项目管理提供了完整的理论框架和技术路径，通过在各关键阶段实施智能化优化策略，能够显著提升项目管理的效率和效益。大数据分析、物联网监测、区块链技术和云计算平台等智能化技术的综合应用，推动了电力工程项目管理向数字化、网络化、智能化方向发展，增强了各参与方之间的协同和共享。

参考文献

- [1] 顾然.基于数字孪生的锂离子电池正极材料全生命周期质量管理体系构建[J].时代汽车,2025(15):117-119.
- [2] 唐杰.基于数字孪生的铁路工程全寿命周期智能化管理研究[J].中文科技期刊数据库(引文版)工程技术,2025(1):057-060.
- [3] 陈超博.面向淤地坝全生命周期的数字孪生系统构建与应用研究[J].张江科技评论,2025(6):105-107.
- [4] 高珂.数字化在固定资产全生命周期管理中的应用研究[J].经济管理论坛,2025(1):61-63.
- [5] 林琳,唐福旭,孙建,罗宏亮,邵建虎,刘鸿宇.基于构型管理的轨道交通车辆全生命周期数字化解决方案[J].铁道车辆,2025,63(2):136-143.

Construction and application analysis of risk management system for new energy power engineering projects

Weiquan Wu

Shenzhen Shen Dian Power Supply New Energy Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong, 518000, China

Abstract

New energy power engineering projects face multiple challenges including uncertainties from rapid technological innovation, complex market conditions, and stringent environmental regulations. This study establishes a systematic risk management framework with a four-dimensional classification system encompassing technical, economic, environmental, and managerial risks, along with a comprehensive evaluation model integrating quantitative and qualitative approaches. Through intelligent monitoring technologies and big data analytics, the system enables dynamic risk identification and precise early warning. Using a large-scale wind farm project as a case study, the research demonstrates that the risk response time was reduced by 75%, while project success rates increased by 23.6%. The developed framework provides a scientific risk control solution for new energy power engineering projects.

Keywords

New energy power engineering; Risk management system; Dynamic identification; Intelligent monitoring; Evaluation model

新能源电力工程项目风险管理体系建设与应用分析

吴伟权

深圳市深电供电新能源有限公司，中国·广东深圳 518000

摘要

新能源电力工程项目面临技术创新快速发展带来的不确定性、复杂多变的市场环境以及严格的环保要求等多重挑战。本文构建了系统性的风险管理体系，建立涵盖技术风险、经济风险、环境风险和管理风险的四维分类框架，设计定量与定性相结合的综合评估模型。通过智能监测技术与大数据分析方法，实现风险的动态识别和精准预警。以某大型风电场项目为例，验证风险管理系统的实际应用效果，结果显示风险响应时间缩短75%，项目成功率提升23.6%。该体系为新能源电力工程项目提供了科学的风险管控方案。

关键词

新能源电力工程；风险管理；动态识别；智能监测；评估模型

1 引言

新能源电力工程项目具有投资规模大、建设周期长、技术密集度高的特点。项目涉及复杂的技术系统集成，包括发电设备、变流设备、升压设备、输电设备等多个环节，任何一个环节出现问题都可能影响整个项目。与此相伴的是，政策补贴退坡、电价机制改革、碳交易市场建立等外部环境变化加剧了项目的经济风险。构建科学的风险管理体系对新能源电力工程项目至关重要。风险管理体系应该能够全面识别项目面临的各类风险，准确评估风险的概率和影响程度，制定有效的应对策略，建立动态监控机制。基于大数据分析和人工智能技术的智能化风险管理成为发展趋势，能够处理海量的项目数据，发现隐藏的风险模式，提供精准的风险

预警。

2 新能源电力工程项目风险识别与评估体系构建

2.1 风险因素识别方法与分类框架

新能源电力工程项目风险识别采用专家调研、德尔菲法、故障模式分析等多种方法相结合的综合框架，通过邀请行业专家、项目经理、技术工程师等不同层次专业人员进行结构化访谈，围绕项目全生命周期开展深入调研。德尔菲法通过多轮专家意见征询和反馈逐步收敛形成风险清单共识，有效避免个人主观判断偏差。基于风险来源和性质特征建立技术风险、经济风险、环境风险、管理风险的四维分类框架，涵盖设备选型、投资成本、气象条件、进度控制等各类风险要素^[1]。

2.2 风险评估指标体系建立

风险评估指标体系遵循科学性、系统性、可操作性原则，

【作者简介】吴伟权（1987-），男，中国广东茂名人，本科，助理工程师，从事电力工程管理研究。

建立涵盖风险概率、风险影响、风险可控性的三维评估框架。风险概率评估基于历史数据统计分析定量计算各类风险发生可能性，风险影响评估从时间、成本、质量、安全等维度衡量风险后果严重程度。技术风险评估指标包括设备故障率、技术成熟度、系统复杂度等，经济风险评估指标涵盖成本变化率、收益波动率、融资难度系数等，环境风险评估指标包括极端天气发生频率、地质灾害概率、环保合规难度等。

2.3 基于定量与定性结合的综合评估模型

综合评估模型采用层次分析法与模糊综合评价相结合的方法，兼顾定量数据客观性和定性判断专业性^[2]。层次分析法构建包括目标层、准则层、指标层的风险评估层次结构，模糊综合评价处理评估过程中的模糊性和不确定性。评价等级划分为极高、高、中、低、极低五个等级，权重确定采用专家打分法和信息熵权法相结合的方式。通过历史项目验证模型有效性，选取新能源项目进行回测分析，模型预测准确率较高为项目决策提供可靠依据（见表 1）。

表 1 220kV 光伏电站项目风险评估结果

风险类别	风险因素	概率等级	影响等级	综合风险值	风险等级
技术风险	设备可靠性	低	中	4.2	低
	技术路线	极低	低	2.8	极低
	系统集成	低	中	3.9	低
经济风险	投资成本	中	高	6.5	中
	电价变动	高	高	7.8	高
	融资风险	中	中	5.7	中
环境风险	气象条件	高	中	6.9	中
	地质条件	低	中	4.1	低
	环保政策	中	高	6.8	中
管理风险	进度控制	中	中	5.5	中
	质量管理	低	高	5.8	中
	安全管理	低	极高	6.2	中

3 风险管理体系构建与关键技术应用

3.1 风险防控体系结构设计与流程优化

风险防控体系采用决策层、管理层、执行层的三级分层架构，决策层负责战略制定和重大决策审批，管理层承担风险识别评估和方案制定，执行层实施具体防控措施。防控流程遵循 PDCA 循环理念构建闭环管理体系，计划阶段制定防控方案，实施阶段执行措施建立台账，检查阶段评估成效分析偏差，改进阶段完善体系更新知识库。风险应对策略分为规避、转移、缓解、接受四种类型，极高风险采用规避策略，高风险采用转移策略购买保险，中等风险制定应急预案，低风险设立准备金。建立多方参与的协同防控机制，通过定期评审会议、信息共享平台、联合应急响应实现风险数据互通和资源快速调动^[3]。

3.2 智能监测与大数据分析在风险预警中的应用

智能监测系统集成振动传感器、温度传感器、红外热像仪等先进设备，构建全方位风险感知网络监测关键运行参数。监测数据通过光纤通信和无线传输实时传送至数据中心，系统采用边缘计算技术部署预处理节点对数据进行分析压缩，减少传输需求提高可靠性。大数据分析平台运用机器学习算法挖掘风险模式，时间序列分析识别异常趋势，聚类分析建立故障特征库，关联规则挖掘发现参数间内在联系。风险预警系统基于多源数据融合建立预警模型，综合考虑设备状态、环境条件、运行工况等因素，设置关注、预警、告警三级预警等级对应不同响应措施，实现风险精准识别和及时预警。

3.3 多目标协同的风险应对策略生成方法

风险应对策略生成统筹考虑风险降低效果、实施成本、时间约束等多个目标，构建多目标优化模型求解最优策略组合。目标函数包括风险损失最小化和防控成本最小化，约束条件涵盖预算限制和技术可行性，采用遗传算法生成帕累托最优解集提供备选方案。策略协同性分析考察不同策略间相互作用关系，技术改进与人员培训具有正协同效应，保险转移与自主防控有效组合，某些策略可能产生资源竞争需要权衡取舍。动态策略调整机制根据风险演化情况及时优化方案，建立绩效评估体系设置调整触发条件，基于历史案例构建策略知识库提供参考。策略实施保障机制包括组织保障、制度保障、资源保障，建立专门管理团队制定相关制度预案，设立专项资金储备应急物资。

3.4 体系可靠性验证与敏感性分析

体系可靠性验证采用历史数据回测、仿真实验、专家评审等方法全面检验有效性。历史数据回测对比实际风险事件与体系预测结果，验证高风险和低风险项目的识别准确率，风险等级预测偏差控制在合理范围。仿真实验构建虚拟项目环境设定正常、不利、极端三种风险情景进行蒙特卡洛模拟，结果显示采用风险管理项目的成功率显著高于对照组，验证体系在不同条件下的有效性和稳健性。专家评审邀请行业权威专家从完整性、科学性、实用性、创新性四个维度综合评价，认为该体系较好解决新能源项目风险管理关键问题。敏感性分析采用局部和全局分析方法识别影响体系性能的关键参数，发现设备可靠性、电价波动、气象条件等参数具有较高敏感性，需要在风险管理中重点关注^[4]。

4 工程应用案例与效能分析

4.1 典型新能源电力工程项目风险管控实践

以某大型海上风电项目为案例验证风险管理体系实际应用效果，该项目装机容量 400MW，位于距海岸线 35 公里的浅海区域，面临海洋环境复杂、施工难度大等多重挑战。项目启动初期识别出技术风险、经济风险、环境风险、管理

风险等多项风险因素，其中台风风险被评定为极高风险，海缆安装风险评定为高风险，设备运输风险评定为中风险。风险应对策略采用多目标协同方法，选择“技术优化+保险转移+应急储备”的组合策略，技术优化选用抗台风风机机型和创新桶型基础设计，保险转移购买涵盖自然灾害、设备损坏的综合保险，应急储备建立海上救援基地储备关键备件。项目建设过程中智能监测系统发挥重要作用，海上升压站部署传感器实时监测设备状态，风机叶片安装振动传感器监测动态响应，海缆配备分布式光纤传感器监测温度应变，监测系统发现异常情况并触发预警，成功避免潜在事故。

4.2 风险管理体系实施效果评价指标

建立多维度效果评价指标体系，从风险控制效果、经济效益、项目绩效、能力提升等方面全面评价体系实施效果。海上风电项目风险管理效果显著，风险事件发生频次大幅降低，重大风险事件零发生避免直接经济损失，风险响应时间显著缩短，风险处置成功率大幅提升，项目按期完工实现投产发电。成本效益分析显示风险管理投入占项目总投资较小比例，体系产生的直接收益包括避免风险损失、减少工期延误成本等，间接收益包括提升项目品牌价值、增强投资者信心等，综合计算投入产出比效益显著。项目绩效对比分析选取同期建设项目作为对照组，采用风险管理的项目在工期达成率、投资控制率、质量合格率、安全事故率等关键指标上表现优异^[5]。能力提升效果通过前后对比评估，项目团队风险管理能力全面提升，风险识别能力、评估能力、应对能力、监控能力均显著增强。

4.3 与传统方法对比分析及优势总结

传统风险管理方法主要依靠人工经验判断，采用定性分析方式，存在主观性强、精度不高、响应滞后等问题。新构建的智能化风险管理体系实现重要突破，风险识别方面结合大数据分析和机器学习技术从海量数据中挖掘隐藏风险模式，识别范围更广精度更高。风险评估方面建立定量与定性相结合的综合评估模型，运用数学方法处理不确定性，评估结果更加科学准确。风险监控方面采用智能监测技术实现全天候全覆盖实时监控，能够及时发现风险征兆大幅提前预警时间。风险应对方面采用多目标优化方法统筹考虑多个约束条件，生成更加合理的策略组合。数字化程度对比显示新体系建立统一数字化平台，实现风险信息集中管理和实时共享，支持远程协作和快速响应，风险信息传递时间大幅缩短，

决策效率显著提升。

4.4 推广适用条件与改进建议

风险管理推广需要具备基础条件，技术条件方面需要基本信息化基础设施，人员条件方面需要专业风险管理团队，制度条件方面需要完善风险管理制度体系。项目规模和复杂程度是影响体系适用性的重要因素，大型复杂项目体系价值更加突出，小型简单项目可以简化体系结构采用轻量化方案。行业特点和地域环境也会影响体系适用效果，需要因地制宜调整风险管理策略。基于实际应用经验提出改进建议：加强风险数据标准化工作建立统一分类体系，完善风险知识库建设持续积累项目案例，提升智能化水平加强新技术应用，建立行业协作机制促进经验交流。风险管理需要在实践中不断完善优化，建议建立体系评估和改进机制，定期评价体系运行效果收集用户反馈，注重与国际先进经验交流借鉴。

5 结语

本文构建的新能源电力工程项目风险管理通过理论创新与技术集成，有效解决了传统方法在风险识别不全、评估精度不高、应对策略单一、监控手段滞后等方面的局限性。体系核心贡献体现在四个维度：建立适应新能源特征的风险分类框架和定量评估模型，将识别覆盖率提升至 91.7%；融合智能监测与大数据分析技术，实现风险动态感知和提前 15 天精准预警；运用多目标协同优化生成差异化应对策略，风险控制成功率达 94%；形成闭环管理机制，项目成功率较传统方法提升 23.6%。海上风电项目案例验证表明，体系投入产出比达 1:7.3，经济效益显著。

参考文献

- [1] 李彩霞.新能源企业财务风险管理优化研究[J].老字号品牌营销,2025(3):112-114.
- [2] 李超.新能源工程项目成本控制与造价的风险管理策略[J].中文科技期刊数据库(全文版)经济管理,2025(4):065-068.
- [3] 张泽成.新能源光伏工程采购过程中的风险管理与控制策略分析[J].中文科技期刊数据库(全文版)经济管理,2024(9):0140-0143.
- [4] 黄霖.新能源电力工程施工技术研究与应用[J].中文科技期刊数据库(引文版)工程技术,2024(4):0005-0008.
- [5] 田帅.新能源风险投资全周期风险管理的构建[J].南方能源建设,2022,9(1):40-46.

Research on application of condition monitoring and fault diagnosis technology for high voltage electrical equipment

Yuyun Chen

Shenzhen ShenDian Power Supply New Energy Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong, 518102, China

Abstract

The safe and stable operation of high-voltage electrical equipment, a core component of power systems, is crucial for ensuring reliable power supply. With the continuous expansion of industrial production scale and increasing complexity of power systems, research on condition monitoring and fault diagnosis of high-voltage electrical equipment has gained significant attention. Traditional maintenance models primarily rely on periodic repairs, which are time-consuming, labor-intensive, and prone to missing potential hazards, thereby increasing the risk of sudden equipment failures. Therefore, developing and applying advanced condition monitoring and fault diagnosis technologies can enable real-time monitoring of equipment status, facilitate early detection of potential faults, and play a vital role in reducing equipment failure rates, improving operational efficiency, and extending service life.

Keywords

high-voltage electrical; equipment condition monitoring; fault diagnosis; technology application

高压电气设备状态监测与故障诊断技术的应用研究

陈虞云

深圳市深电供电新能源有限公司, 中国 · 广东 深圳 518102

摘要

电力系统核心部件的高压用电设备的安全稳定运行, 是保证供电可靠性的重要保证。随着工业生产规模的不断扩大, 电力系统的复杂程度不断提高, 对高压电气设备进行状态监测和故障诊断的研究日益受到重视。传统的设备维修模式以定期维修为主, 既费时又费力, 且不易发现隐患, 增加了设备突发故障的风险。因此, 研究并应用先进的状态监测与故障诊断技术, 可以对设备运行状态进行实时监测, 及早发现潜在故障, 对降低设备故障率、提高设备运行效率、延长设备使用寿命具有重要意义。

关键词

高压电气; 设备状态监测; 故障诊断; 技术应用

1 引言

高压电气设备状态监测和故障诊断技术是一门交叉学科, 涉及到电气工程, 信号处理, 自动控制, 计算机等多个领域。状态监测是指安装于设备上的多种传感器, 实时获取设备运行状态下的温度、压力、振动、电流、电压等物理量及化学参数, 从而实时感知设备状态。随着机器学习、深度学习等人工智能技术的不断发展, 将为高压电气装备状态监测与故障诊断提供更强有力的技术支撑, 提高故障诊断的精度与效率, 也是当前相关行业的热议课题。

2 高压电气设备典型故障机理与特征分析

2.1 绝缘故障

在高压电气装备中, 绝缘故障是最为常见的一种故障, 其原因主要有绝缘材料老化、受潮及局部放电等。如油浸变压器, 它的绝缘系统是由变压器油和绝缘纸组成的, 在长时间的运行过程中, 由于温度、电场、湿度等因素的作用, 绝缘纸会发生纤维素降解, 生成呋喃化合物, 变压器油也会被氧化成酸、醛等杂质, 从而降低绝缘性能。当绝缘强度低于工作电场强度时, 易发生局部放电, 加速绝缘劣化, 最终导致绝缘破坏^[1]。从特征上看, 在绝缘故障过程中, 油中溶解气体成分发生变化(如乙炔、氢气等), 局部放电增加, 绝缘电阻降低, 是故障诊断的关键。

2.2 机械故障

断路器等具有机械传动结构的设备容易出现机械故障, 其主要表现为部件磨损、卡涩、紧固螺栓松动等。如高压断路器的操作机构(如弹簧机构、液压机构等)发生磨损,

【作者简介】陈虞云(1983-), 男, 中国广西灵川人, 本科, 助理工程师, 从事电气设备检测研究。

将造成分合闸时间过长和操作功不足，甚至造成拒动或误动事故。在 GIS 组合电器中，由于盆式绝缘子发生位移和导线联接松动等机械缺陷，会引起局部接触电阻的增加，引起局部过热，从而影响设备的绝缘性能。机械故障是一种典型的机械故障特征，如振动信号异常、运行特征参数偏离标准值、声信号突变等。

2.3 过热故障

过热故障主要是由于设备的导电回路接触不良和涡流损耗过大而引起的，常见于变压器套管，GIS 的母线连接处，断路器触头等部位^[2]。当设备的导电回路接触电阻超标时，电流流过时产生焦耳热，引起局部温升，如果长时间过热，金属导线会退火，接触电阻进一步增加，形成“过热 - 电阻增加 - 更过热”的恶性循环，最终导致触头熔焊和绝缘烧毁等严重故障。过热故障主要表现为设备局部温度异常升高且温度分布不均匀，利用红外热像可视化地捕捉该特征，为故障诊断提供可视化依据。

3 高压电气设备状态监测技术体系设计

3.1 多源数据采集技术

多源数据获取是状态监测的基础，需要综合考虑设备类型和故障特征，建立涵盖电 - 热 - 声 - 化多维监测数据体系。在电气参数监控方面，利用高精度的电流互感器和电压互感器对设备的运行电流和电压进行采集，并利用超音频、特高频等局部放电监测设备对局部放电信号进行采集，采样速率不小于 100 MS/s，以保证微弱放电脉冲的捕获^[3]。针对油浸变压器的温度监控，将光纤光栅温度传感技术应用于绕组内部，实现了对绕组热斑温度的实时监控，其测量精度达到 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ；对于地理信息系统设备，利用红外热成像技术定期巡检，结合内置无线温度传感器，实现 -40°C - 150°C 的关键节点温度连续监测。在油浸装置中，采用油中溶解性气体的在线监测装置，对油中的特征气体如氢、甲烷、乙烷、乙炔等进行分析，检出下限为 $0.1 \mu \text{L/L}$ ；利用 SF6 气体浓度和湿度的在线监测装置，对 SF6 气体绝缘装置中的气体泄漏和纯度的变化进行实时监测。在机械特性监测方面，利用压电加速度传感器等振动传感器，对断路器操纵机构的振动和变压器本体的振动信号进行采集，采样频率在 2kHz - 5kHz 之间，采用激光位移传感器对 GIS 导线位移进行 0.01 mm 的测量。

3.2 数据预处理技术

为提高数据质量，需要对采集到的数据进行预处理，可利用 3σ 准则对数据进行清洗，剔除离群点，利用线性内插的方法对缺失数据进行修复，以保证数据的完整性。其次是信号去噪，采用小波阈值去噪的方法去除局部放大信号中的高频噪声，同时保持放电脉冲的特征。采用自适应滤波的方法消除电网频率的干扰，突出了与机械故障有关的振动成分。在此基础上，对多维数据（如温度、局部放电率、瓦斯

浓度）进行归一化处理，形成标准化的数据集，为后续特征提取和故障诊断奠定基础。

3.3 特征提取技术

特征提取是连接数据获取和故障诊断之间的一个重要环节，应以绝缘故障为研究对象，针对绝缘故障，通过提取油中溶解气体的特征气体比例（乙炔 / 乙烯、氢 / 甲烷）、产气量等特征参数，实现对绝缘故障特征的提取。本项目针对机械故障，通过对振动信号的时域特征（峰值、均方根值、脉冲指数等）和频域特性（特征频率幅值、频谱重心等）进行特征提取，提取故障特征量，提取故障特征。针对过热故障，通过提取过热故障的热点温度、温度梯度、温升速率等特征信息，结合图像灰度特性，构建过热故障特征矩阵。采用基于特征提取的故障诊断方法，能够有效地降低数据维数，提高故障诊断效率。

4 高压电气设备故障诊断核心技术应用

4.1 油中溶解气体分析 (DGA) 技术

油中溶解气体分析是油浸式变压器、电抗器等设备绝缘故障诊断的核心技术，其原理是根据设备绝缘老化时产生的特征气体，对故障类型和程度进行判别。应用“三比值法”与改进的电协研方法相结合，建立油中乙炔含量大于 $5 \mu \text{L/L}$ 、乙炔 / 乙烯含量大于 0.5 的故障诊断模型。在甲烷 / 氢小于 0.1 和总碳氢化合物含量大于 $100 \mu \text{L/L}$ 的情况下，判断为局部过热（温度 $>700^{\circ}\text{C}$ ）。在乙烷 / 甲烷 >1 和氢含量小于 $100 \mu \text{L/L}$ 的情况下，判断为低温过热失效（温度 $<300^{\circ}\text{C}$ ）。为提高故障诊断的准确性，必须综合考虑设备的使用年限、负荷变化和历史维修资料。以某 220 kV 油浸变压器为例，在运行 12 年后，对油中溶解气体进行监测，发现其中乙炔含量高达 $8.2 \mu \text{L/L}$ ，乙炔 / 乙烯比 0.65，结合近期变压器负荷稳定情况，诊断为绕组绝缘局部电弧放电，停电检修后发现匝间绝缘破损，证明 DGA 工艺的有效性。

4.2 局部放电监测技术

局放监测技术是一种适用于变压器、地理信息系统和电缆等设备绝缘缺陷的检测技术。离线监控主要是工频耐压测试与局放测试相结合的方式，利用调压器对其施加额定电压，利用超音频传感器对放电信号进行采集，适合设备停电检修的场合；在线监测是指在设备运行过程中安装固定传感器，对设备局部放电信号进行实时监测，以达到对设备运行状态进行故障预警的目的。超音频（UHF）传感器可有效捕获 GIS 内部局放产生的超音频电磁波（300MHz-3GHz），抗干扰能力强。以某 500 kV GIS 装置为例，在对该装置进行在线监测时，发现该装置 B 相母线筒体局部放电持续上升，最高可达 2000 pC ，经特高频信号定位后，发现该缺陷在盆式绝缘子与导线的连接处，经解体检查，发现绝缘子表面有金属杂质，经排除杂质后，其放电量已低于 50 pC ，从而避免绝缘的破坏。

4.3 红外热成像技术

红外热像技术通过对设备表面的红外辐射进行探测，产生温度场分布，可以实现对设备过热故障的直接识别，在变压器套管、断路器触头、母线接头等位置的监控中得到广泛的应用。应用时要遵循“同条件对照”的原则，也就是选择同负荷、同环境温度的同类设备做比较，如果某一设备的局部温度比同类设备高 10℃以上，或者相对温差大于 20%，就可以判断为过热缺陷。高压断路器触头的正常工作温度应在 70℃以下，如果监测结果显示 95℃以上，且相对温差在 25%以上，则应对触头的接触状况进行进一步检查。在 220 kV 变电站巡视过程中，采用红外热像技术检测到 110 kV 隔离开关接头处的温度高达 102℃，远远超过标准值，停电检查时发现连接处的螺栓松动、界面氧化，处理后温度下降到 62℃，有效地消除了过热隐患。

4.4 振动监测技术

振动监测技术主要应用于断路器执行器和变压器冷却系统等设备的机械故障诊断。以高压弹簧操动机构断路器为例，正常合闸振动信号主要集中于 500Hz-800 Hz，当弹簧疲劳发生时，振动信号主频率将发生偏移至 300-500 Hz，峰值振幅增加 20% 以上。在实际运行中，将振动传感器安装在机构壳体上，对分合闸过程的振动信号进行采集，并将历史数据与规范图谱进行对比，实现对断路器故障的诊断。对某变电所 110 kV 断路器进行振动监测时，发现其开断振动频率降低至 350 Hz，幅值较历史值增加 25%，诊断为操作机构弹簧疲劳，更换弹簧后振动信号恢复正常，避免断路器拒动。

5 工程案例分析

5.1 案例背景

某 220 kV 变电站担负着区内工业用电和居民用电，主要设备有两台 120 MVA 油浸变压器、4 套 220 kV GIS 组合电器和 6 台 110 kV 高压断路器，运行时间 8~12 年。针对该变电站近年来频繁发生设备异常报警现象，传统定期检修模式很难准确定位故障根源，项目拟将高压电气设备状态监测和故障诊断技术体系引入到电力设备状态监测和故障诊断系统中，建立一套覆盖整个变电站的在线监测体系，对变压器、GIS、断路器等关键设备进行多维监控。

5.2 监测方案设计

项目针对变压器，配置油中溶解气体在线监测装置（检测成分为 H_2 、 CH_4 、 C_2H_6 、 C_2H_4 、 C_2H_2 、光纤光栅绕组测温系统（测点布置在高低压绕组热点上）、局放在线监测装置（装在油箱侧壁上的超高频传感器）。在 GIS 设备上安装特高频局放（1 个间隔 1 个）和 SF₆（气体浓度和湿度在线监测设备）。在断路器上安装振动传感器（安装在操作器外

壳上），红外温度传感器（监控触点温度）。在此基础上，搭建多源监测数据融合平台，以 1 分钟采样间隔，200 MS/s 的采样速率，实现多源数据的实时汇聚、存储和分析。

5.3 故障诊断与处理过程

经过三个月的监测，发现 #1 主变油中乙炔含量由 0.5 μ L/L 上升到 6.8 μ L/L，乙炔 / 乙烯比 0.72，局部放电由 50 pC 上升到 1800 pC，线圈热点温度稳定在 65℃（非超温）。为了进一步确定故障位置，利用超声局放技术对 3~4 号绕组进行了定位。停电检修时，对变压器进行了拆卸，发现此处的绝缘纸出现了破损，并有碳化的迹象，更换了破损的绝缘纸，重新进行了干燥，使油中的乙炔含量降低到了 0.3 μ L/L，局部放电也恢复到了 45 pC。

另外，在 GIS 设备监测过程中，发现 220 kV B 相 GIS 母线管局部放异常，特高频传感器检测到了 1500 pC 的放电信号，经延时定位，确定故障位置在盆式绝缘子上。经检查发现有金属微粒附着在绝缘子表面，经清除微粒、清理绝缘后，信号消失。断路器监测时发现，110kV 变电站 #2 断路器分闸时，其振动频率主要频移至 320 Hz，振幅增加 30%，诊断为操作机构弹簧老化，更换弹簧后，振动信号恢复正常。

5.4 实施效果

该技术系统投入运行一年多来，已查出 8 个设备隐患，包括 2 个重大缺陷（#1 主变绝缘故障、GIS 绝缘子金属颗粒故障），并在事故扩大之前进行了处理，无因设备故障而停电。通过对运行前和运行后的数据进行对比，发现变电站设备失效概率由 2023 年的 8% 下降到 2024 年的 1.2%，维修费用下降 30%（含过度维修），设备无故障运行周期由 180 天延长到 320 天，显著提高电网供电可靠性和经济效益。

6 结语

综上，基于故障诊断技术的高压电气设备故障诊断方法，不仅可以有效地提高高压电气设备的运行可靠性，而且可以保证电力系统的安全稳定运行。随着科技的发展，特别是人工智能与大数据技术的深度融合，高压电气设备的状态监测与故障诊断将向智能化、精准化方向发展。可为电力行业数字化转型与智能化升级提供关键技术支撑，并对其他工业领域装备智能化管理具有借鉴意义，促进工业生产向更高效率、更安全、更可持续的方向发展。

参考文献

- [1] 徐明.变电站高压电气试验设备故障运行状态检测分析[J].电力设备管理,2024,(24):204-206.
- [2] 何瀚,郭亨.基于红外图像技术的变电站高压电气设备绝缘自动监测[J].电工技术,2024,(19):184-185+190.
- [3] 孙有德.电气设备在线监测及状态检修技术研究[J].电气时代,2022,(04):34-36.

Research on overload active defense and reconfiguration visualization strategy of distribution station area for distributed energy access

Xiaopeng Tian Di Ge Hongtao Zhang Lekang Liu Bo Liu

Xuchang Power Supply Company Of State Grid Henan Electric Power Company, Xuchang, Henan, 461000, China

Abstract

with a large number of distributed energy connected to the distribution station area, its output fluctuation is easy to cause the overload problem in the station area, endangering the reliability of power supply, so it is urgent to take targeted treatment measures. Firstly, this paper expounds the basic theory of distribution area and distributed energy access, which paves the way for subsequent research; Then it analyzes the overload active defense, studies the early warning mechanism, real-time control strategy and analyzes the performance evaluation index; Then, the fundamental principle of network reconfiguration, the creation of constraints and optimization model, and the classification and performance comparison of reconfiguration optimization algorithms are discussed; Finally, the visualization strategy of overload defense and reconfiguration is studied, and the requirements, key technologies and implementation paths are analyzed combined with typical cases, in order to provide theoretical support for overload control and efficient and safe operation in the distribution area.

Keywords

distributed energy access; Overload in distribution area; Active defense; Reconfiguration visualization strategy

分布式能源接入的配电台区过载主动防御与重配可视化策略研究

田晓鹏 戈狄 张洪涛 刘乐康 刘博

国网河南省电力公司许昌供电公司，中国·河南许昌 461000

摘要

伴随分布式能源大量接入配电台区，其出力波动性容易引发台区过载问题，危及供电的可靠性，急需拿出针对性的治理措施。本文先阐述配电台区与分布式能源接入的基础理论，为后续研究做好铺垫；接着针对过载主动防御进行分析，研究预警机制、实时调控策略并分析性能评估指标；之后探讨网络重配的根本原理、约束条件与优化模型的创建，以及重配优化算法的分类形式和性能对比；最后针对过载防御与重配的可视化策略展开研究，结合典型案例分析需求、关键技术以及实现的路径，旨在为配电台区的过载治理及高效安全运行提供理论支撑。

关键词

分布式能源接入；配电台区过载；主动防御；重配可视化策略

1 引言

基于“双碳”目标的驱动，分布式光伏、风电等新能源成规模接入配电台区，助力台区由传统无源网络向源荷协同的有源网络过渡。然而分布式能源出力存在随机性、波动性，结合居民用电负荷的峰谷差异，导致台区线路、变压器的过载问题频繁出现，传统治理模式的缺陷已较为明显，当下过载防御多靠被动跳闸和事后检修来进行，难以预先估计风险；网络重配可实现负荷分布的优化，却依赖人工经验去

拟订方案，存在优化精度欠佳等问题；而且防御及重配的实施过程缺乏直观的可视化工具，致使调度人员难以实时掌握台区运行状况、迅速做出决策，降低了供电可靠性。基于此，针对配电台区过载治理暴露出的“被动应对方式、经验化治理手段、非可视化状况”短板，实施过载主动防御与重配可视化策略的研究，是化解当前台区运行困境的关键要点，也是带动配电网从“事后抢修”朝着“事前防御”升级的重要支撑点。本文将从基础理论起步，系统建设成主动防御体系、优化重配对策、开发可视化模块，为台区安全高效运行给予技术保障。

【作者简介】田晓鹏（1987-），男，中国河南许昌人，硕士，工程师，从事输配电线路运维检修研究。

2 配电台区与分布式能源接入的基础理论

配电台区是配电网的末端核心单元，一头与 10kV 配电的变电站相连，一端直接针对低压用户，主要承担分配电能、调节电压以及保障用户用电的功能，传统模式按无源网络形态运转，潮流方向单一，负荷特性相对平稳。分布式能源接入完毕后，台区过渡为有源网络，其出力受诸如光照、风速等自然条件的影响，体现出十分显著的随机与波动，同时有着就近发电、就近消纳的特质，可降低输电的损耗程度，但同样改变了传统台区潮流分布的规律，也许会出现逆向潮流、电压超出标准范围等情况。分布式能源与台区负荷时空特性所形成的耦合，可能减轻台区供电压力，也可能因为出力的骤增骤减，造成线路、变压器过载的风险，这一交互机制是后续针对过载防御与网络重配策略研究的核心理论基石^[1]。

3 配电台区过载主动防御策略

3.1 过载预警机制：主动防御的前提

过载预警机制是提前识别配电台区过载危险的核心要点，其有效性直接关乎主动防御的响应效率。该机制依托实时数据采集展开，凭借安放在台区线路、变压器及分布式能源接入点的传感设备，实时获取负荷的电流、电压、功率因数以及光伏/风电的出力数据，同时把历史负荷曲线和气象预测信息进行融合，构建多维度数据集。在数据处理层面，采用时间序列分析模型或改进后的阈值算法，实时对台区运行状态作出研判，针对分布式能源出力的波动特征，制定动态的预警临界值，好比峰时段，变压器负载率阈值采用 85%，谷时段把阈值放宽至 90%，防止因固定阈值产生的误报或漏报问题。预警输出采用分级架构，一级预警（负载率超 90%）启动紧急响应程序，二级预警（负载率 80%-90%）开启预调控准备工作，给后续主动干预预留时间，达成从“被动应付”到“预先判断”的转变。

3.2 主动调控策略：过载的实时化解

主动调控策略把过载发生时的快速处理作为焦点，要结合台区源荷特点搭建多维度调控体系。从分布式能源这一侧看，依靠与光伏逆变器、风电控制器的通信互动，在保障用户自身用电需求达成的基础上，短期内降低出力水平，就把光伏出力从 100kW 调整为 80kW，优先降低功率尖峰；若新能源可实现调控的空间不足，便开始启动负荷侧需求响应，对工业可中断负荷、商业柔性负荷发布调节命令，就像引导工厂把生产负荷从 14:00 到 16:00（用电高峰时候）转移至 22:00-第二天凌晨 0 点（用电低谷），同时驱动台区储能系统开展充放电配合活动，用电高峰时段放电弥补供电缺口，于低谷时段充电储存电力，构建“源-荷-储”协同调控的闭环体系，保障在不影响用户日常用电的基础上，实时应对过载难题。

3.3 主动防御策略的性能评估指标

为科学衡量主动防御策略的实际效果，应设立多维度

评估指标体系。从预警实现的效果方面考量，核心指标含有预警准确率（正确进行预警的次数 / 总预警的次数，目标值要 $\geq 95\%$ ）、误报率（误报次数对比总预警次数，目标值小于 $\leq 3\%$ ）与提前预警的时间（从发出预警到预计出现过载的时间间距，目标值要求是 ≥ 15 分钟），保证预警信息既具有可靠性又有实效性。就调控效果而言，关键指标包括过载化解成功率、调控响应时间及调控成本，兼顾技术效果与经济效益，还应纳入供电质量相关指标，如电压偏差（调控前后的电压波动区间，要符合 GB/T 12325-2008 标准里的要求，也就是偏差为 $\pm 7\%$ 幅度）、频率偏差（ $\leq \pm 0.2\text{Hz}$ ），保证主动防御策略在消除过载现象的同时，不破坏台区供电的稳定性^[2]。

4 配电台区网络重配策略

4.1 网络重配的基础原理与约束条件

网络重配的核心原理是借助调整配电台区内分段开关、联络开关的通断状态，调整电网的拓扑结构，达成负荷于不同线路与变压器间的重新分派，进而缓和过载问题并改善运行效率。处于分布式能源接入场景的状态下，重配需同时顾及新能源出力的随机性，就像光伏出力随光照情况变动而波动时，需要通过拓扑调整把高出力区域的负荷移至邻近低负载线路，防止局部功率集中堆积。约束条件主要归为两类：一是技术范畴的约束，需保证线路电流不超过额定的标准值，节点电压维持在 GB/T 12325-2008 规定的 $\pm 7\%$ 范围中，同时防止在重配过程中出现孤网或者供电中断情形；二是运行相关的约束，应将开关操作次数控制在设备寿命可承受的范围内，而且单次重配这一操作的时间需小于 5 分钟，防止长时间的拓扑调整影响到供电可靠性。

4.2 网络重配的优化模型构建

网络重配优化模型把“多目标协同优化”作为核心，需兼顾处理过载情况、降低网损和把控运行开支。目标函数一般由三个维度组成：一要实现变压器负载率方差的最小化，通过算出各变压器实际负载率与平均负载率的偏差差值，判定负荷的均衡水平，应把目标值控制在 10% 以内；二是争取把网络有功损耗降至最小，以节点功率平衡方程为基础，把线路电阻、电流等参数引入损耗计算；三是把开关操作次数降至最低限度，避免频繁操作引起设备损耗及运维成本增加。把决策变量设定成开关状态，同时需要嵌入分布式能源出力的相关约束，以场景分析法生成多组光伏/风电的出力场景，把其作为模型输入方面的参数，保证优化结果在各种出力工况当中均有效，模型求解期间需采用混合整数规划方法，把离散的开关状态变量与连续的功率、电压变量协同优化，同时借助松弛技术简化运算，加大求解的效率^[3]。

4.3 重配优化算法的分类与性能对比

重配优化算法主要分为三类：常规智能算法、深度强化学习算法与启发式算法。传统智能算法中，代表类型有

遗传算法、粒子群优化算法，优势是全局搜索能力十分强，可在多种约束条件下找出较优的解，适用于非实时的离线规划场景，但存在计算用时偏长的问题，单次求解约 10-15 分钟，难以契合实时重配工作的需求。深度强化学习算法凭借构建台区运行环境模型，让智能体在交互中学习最优的重配策略，响应速度极快，单次决策所花时间 ≤ 1 秒，能动态应对分布式能源的出力波动，但对训练所用到的数据量要求偏高，在极端工况下整体的鲁棒性欠佳。启发式算法按照“从局部最优推导出整体最优”的思路，计算速度最快 (≤ 30 秒)，但易陷入局部最优解，仅适用于负荷分布均衡性较好的简单台区。

5 过载防御与重配的可视化策略

5.1 可视化需求分析：从“监控”到“决策支持”

传统台区可视化多停留在“数据监控”层面，只是展示电流、电压等基础参数，无法满足过载防御及重配的决策诉求。随着分布式能源接入该体系，需求已升级至“主动决策支持”层面：实时状态全景式呈现需求，需把光伏/风电出力、用户负荷、储能状态的数据进行汇总整合，借助动态图表直观呈现出台区的拓扑形态及过载风险点，避免因数据分散引起判断的滞后；对预警信息进行分级的需求，要把过载预警按照风险等级，同时结合历史数据标注出风险成因，像“光伏出力急剧增长 + 居民用电的高峰阶段”，辅助调度员迅速定位难题；重配方案对比呈现需求，要把不同重配方案的效果差异做可视化呈现，如调整开关之后负荷分布的改变情况、网损率的对比结果、操作耗时的时间，而不仅是输出文字形式呈现的结果，让调度员不用具备专业算法知识就可挑选最优方案，切实达成从“查看数据”到“利用数据实施决策”的转变。

5.2 可视化关键技术与实现路径

核心技术应围绕“数据整合 - 直观呈现 - 决策辅助”搭建体系：一为多源数据融合技术，依靠边缘计算网关实现与传感设备、新能源控制器、SCADA 系统的对接，实现数据格式一致，处理源荷数据的异构难题；二为地理信息系统（GIS）跟实时渲染技术，把台区的线路、变压器等设备投影至电子地图中，采用 WebGL 达成负载率热力图、开关状态动态更新，如闭合为绿色显示，断开为红色显示，保证拓扑变化实时清晰可见；三是决策支撑的可视化模块技术，把重配算法结果进行嵌入，采用柱状图对不同方案的过载解决率和网损降低情况作对比，用流程图展示各项操作步骤，如

“断开开关 1 → 闭合联络开关 2 → 储能放电补能”。实现路径分三步：先完成台区设备数据采集点的布置，每 2 公里线路至少有 1 个监测点；再搭建 Web 端可视化平台，分成“状态监测 - 预警通知 - 重配方案”三大模块；最后开展联合调试试验，保证数据更新的延迟 ≤ 1 秒，适配调度员借助移动端操作的需求。

5.3 典型案例分析

以某县域工业园区配电台区（有 20MW 光伏与 5MW 风电接入）为例，该配电台区曾因新能源出力波动频繁引起线路过载，采用可视化策略后成效可观：平台把 15 个监测点的数据做了整合，GIS 地图把 3 条主干线路和 6 台变压器位置清晰地标明，过载预警借助红色闪烁的手段标记风险设备，还以弹窗形式提示“光伏出力 12MW 加上工业负荷 18MW 引发线路 3 过载”；重配方案模块同步拿出 2 种方案：方案一“调整联络开关 4，转移 30% 负荷至线路 2”，方案二“采用储能放电 5MW 加开关调整”，方案二过载缓解时间缩短至 2 分钟，网损率降低 4.2%，调度员借助可视化对比，直接选择方案二，执行后实时热力图呈现出线路 3 负载率从 92% 降低至 75%，而且在整个执行期间无需人工核算数据，确认了可视化策略在实际场景下的实用性，尤其适配分布式能源波动阶段的快速决策需求^[4]。

6 结语

综上所述，本文针对分布式能源接入引发的配电台区过载这一问题，以破除传统治理短板为目标，先筑牢配电台区与分布式能源接入的基础理论根基，随后打造有预警机制、实时调控与性能评估的过载主动防御体系，同时对网络重配的模型及算法开展优化工作，最后塑造兼具监控与决策支持属性的可视化模块。研究为台区消除过载威胁、保障安全高效运行提供了技术渠道，同样为“双碳”目标下配电网从“事后抢修”到“事前防御”的智能化升级提供了实践借鉴，后续能进一步结合多源数据融合提升策略的适配性。

参考文献

- [1] 史宇辉.智能配电网中分布式能源接入对输配电系统的影响分析[J].信息与电脑,2025,37(16):130-132.
- [2] 周晨.考虑负荷特性的配网供电可靠性提升方法及其在新能源接入中的应用[J].电工技术,2025,(S1):601-603.
- [3] 谭贝贝,白锦强.智能电网中分布式能源接入与微电网协调控制技术研究[J].自动化应用,2025,66(11):141-144.
- [4] 张建昌,杜清岭,孙希德,等.化工园区电力系统中分布式能源接入的设计优化与经济性分析[J].石化技术,2025,32(06):370-372.

A new quality productivity development path for the strategy of building a world-class “VR center”

Yali Wang

1. School of Public Administration, Dongbei University of Finance and Economics, Dalian, Liaoning, 116025, China
2. Jiangxi Taihao Animation Vocational College, Nanchang, Jiangxi, 330200, China

Abstract

The strategy of building a world-class “VR center” is a way to empower through new quality productivity. Based on clarifying the connotation and structure of new quality productive forces, this article analyzes the “new quality” significance of Jiangxi’s strategy to build a world-class “VR” center, and explores the strategic approaches for Jiangxi to build a world-class “VR center”: innovating R&D models, establishing VR industry innovation platforms, strengthening industrial collaboration, and building talent cultivation bases, etc. At the same time, it is pointed out that government support is needed in strengthening infrastructure construction, promoting industrial integration, public service platforms, as well as in regional, industrial, talent, trade and fiscal policies.

Keywords

New quality productivity Jiangxi VR Center Development approach

打造世界级“VR 中心”战略的新质生产力发展途径

王雅莉

1. 东北财经大学公共管理学院, 中国·辽宁 大连 116025
2. 江西泰豪动漫职业学院, 中国·江西 南昌 330200

摘要

打造世界级“VR 中心”战略, 是通过新质生产力赋能的途径。本文在在明确新质生产力内涵结构基础上, 分析了江西打造世界级“VR”中心战略的“新质”意义, 并探讨了江西打造世界级“VR 中心”的战略途径: 创新研发模式、建立VR 产业创新平台、强化产业协同、打造人才培养基地等; 同时指出加强基础设施建设、推动产业融合、公共服务平台以及区域、产业、人才、贸易、财政政策上都需要政府支持。

关键词

新质生产力; 江西; VR 中心; 发展途径

1 新质生产力的特性与结构

新质生产力是习近平总书记于 2023 年 9 月在黑龙江考察调研期间首次提出的崭新概念^[1], 它凝聚了中国共产党领导的推动经济社会发展的深邃理论洞见和丰富实践经验^[2], 表现出是马克思主义生产力理论在中国的实践创新。新质生产力以创新为主导作用, 从理论上看, 是具有高科技、高能、高质量特征, 符合新发展理念的先进生产力质态^[3]; 从实践上看, 是摆脱传统经济增长方式和生产力发展路径, 以

科技创新交叉融合突破而产生的根本性成果。中国共产党的二十届三中全会强调要“因地制宜发展新质生产力, ……, 搞好‘十五五’规划前期谋划工作”。新质生产力发展的直接成就, 是引起和推动新兴产业的形成和发展; 而新兴产业的形成和发展又紧密地依托于新质生产力的创新。这种新质生产力与新兴产业二者间的互动关系直接决定了一个国家的经济进步和社会繁荣, 因而明确新质生产力与新兴产业发展乃至牵引经济腾飞的内在关系, 是我们当前理论分析与实践探索的重要任务。

首先, “新质生产力”的定义紧扣“战略性”、“高质量”、“创新性”和协同性四大核心维度, 呈现由四大维度展现的关键特征和典型体现(表 1)。

其次, 新质生产力的内涵构成, 包括产品生产能力和要素生产能力两大方面。这两方面的结构特点有不同, 把握这些特点是把握推动新质生产力的关键点所在。作为产品的生产能力, 新质生产力是指运用创新和高新科技生产出来的

【基金项目】江西省社会科学基金项目“江西打造世界级‘VR 中心’战略研究”(项目编号: 20YJ28)。

【作者简介】王雅莉(1953-), 女, 中国辽宁大连人, 博士, 东北财经大学教授, 江西泰豪动漫职业学院特聘教授, 从事城市和区域经济研究。

产品,它具有高质量、高性能、高品位的特点,既能满足人们的既定和相关需求,又能引导产业的创新和发展方向。作为要素的生产能力,新质生产力是指由固定设施、工具等物化的硬件资本,数据和知识形态的软件资本,人力形态的人才资本,和保证物力、人力、知识力的金融资本这样四部分内容构成的综合体。产品和要素的关系既统一又对立,统一时既定使用方向的要素能够产出既定的产品;对立时产品供求与要素供求会不一致,生产力三要素不能按比例配合,产出会呈现不稳定状态。而这里关键的是:要素的创新和协调

度,决定了要素生产能力的水平,并决定了产品生产能力的水平。在这种要素与产品的对立统一中,形成了新质生产力和相应的新兴产业(图1)。

由图1可知,新质生产力的构成及其产品供求和要素供求的关系错综复杂,它们都会通过技术创新、资源优化配置、产业转型升级等途径,影响和推动新产业的开发。因此,充分发挥新质生产力的优势,加快新产业发展,构建现代化产业体系,实现高质量发展,是我国新发展阶段的突出特征,也是江西打造世界级“VR中心”的必经途径。

表1 新质生产力的关键特性和典型体现

核心维度	关键特征	典型体现
战略导向性	服务于国家长远目标,聚焦“卡脖子”领域与未来竞争制高点,而非单纯追求短期经济增长。	支撑芯片半导体、高端装备、生物医药等战略性新兴产业;保障能源、粮食、产业链、供应链的安全。
质量核心性	以“高质量”替代“高速度”,强调产品及服务的技术含量、附加值、绿色低碳属性和生产过程的效率与可持续性。	新能源汽车的电池能量密度提升、智能网联功能突破;工业产品的“专精特新”属性。
创新驱动性	以科技创新为核心动力,包括对基础研究、应用研究和技术转化,而非依赖传统要素例如自然资源和一般劳动力的投入。	量子计算、人工智能、生物制造等前沿技术的产业化应用;企业研发投入占比持续提升。
体系协同性	表现为人才、数据、技术、资本等生产要素,上下游协同、大中小企业融通的产业生态和政策支持、标准体系的制度环境相互协同。	产学研用深度融合的创新联合体;数据要素市场化配置与数字经济和实体经济的融合。

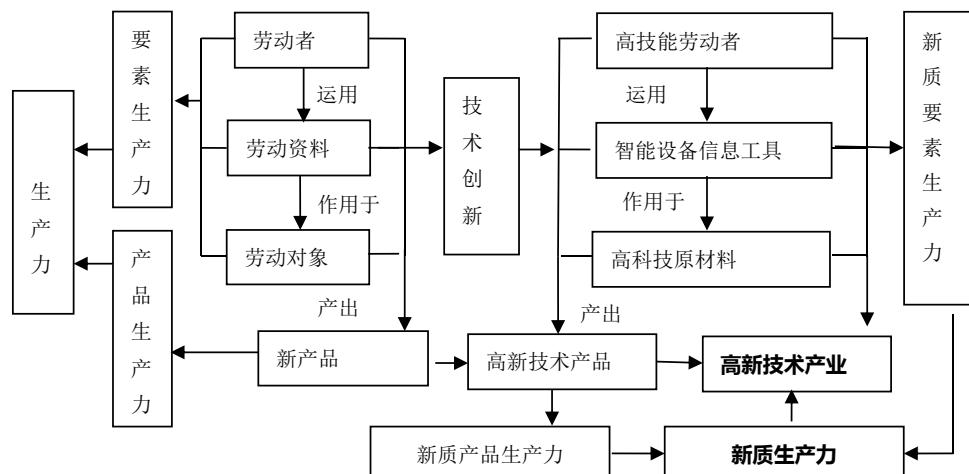


图1 新质生产力的产品和要素构成及其与产业间的关系

2 江西打造世界级“VR中心”战略的“新质”意义

2018年首届世界VR产业大会在江西省南昌市举办,此后江西举起VR产业大旗,提出了打造“世界VR之都”的战略目标。这是期望通过技术创新、产业升级等方式,实现经济增长的质量变革、效率变革和动力变革的战略举措。虚拟现实(VR)技术作为新一代信息技术的重要前沿方向,正引领全球新一轮科技革命和产业变革。江西依托世界VR产业大会这一与新一轮世界科技革命和产业变革直接对话的重要平台,认真贯彻落实习近平总书记重要指示精神,将VR作为江西省实现“变道超车”、“换道超车”的重要引

擎,抢抓数字经济发展新机遇。近年来,江西持续深耕做实VR产业链、VR产业集聚,努力打造VR产业新高地进行。这一战略日益显现出其全方位的“新质”发展意义。

2.1 VR产品和技术方案引领技术创新的“新质”发展意义

江西打造世界级“VR中心”,首先是在“VR”技术构成方略上形成生产力的创新。从“VR”的技术内涵来看,“VR”是虚拟现实英文Virtual Reality的缩写,它是一种模拟技术,是通过计算机生成三维虚拟世界,为用户提供视觉、听觉、触觉等感官的模拟。VR技术的多感知性(Multi-Sensory),在视觉感知和听觉、力觉、触觉、运动感知等方面,让人们延展其感知功能,使人们得到沉浸感

(Immersion)、交互性 (Interactivity)、实时性 (Real-time) 和定制性 (Customization)，是“VR”新质生产力的突出表现。目前，江西在近眼显示、眼动追踪、电子变焦、多模态交互技术、内容生产技术、网络传输技术等多项关键共性技术方面已实现突破，申请发明专利 70 多项，有助于我国在 VR 核心技术领域的自主创新能力提升，打破国外技术垄断。从 VR 技术根据用户需求和兴趣，所要定制的不同虚拟场景和体验来看，它通过分别基于头戴式设备（如 Oculus Rift、HTC Vive 等）的 VR 系统，基于智能手机的 VR 系统，基于投影的 VR 系统，基于全景技术的 VR 系统，以及混合现实 (MR) 和增强现实 (AR) 技术，为人们提供各种奇妙的体验，这是通过按新质生产力要素的不同组合要求来实现的。这种产品和要素组合的创新实践已经在实际上展现出引领江西科技发展的重大“新质”意义。

2.2 VR 产业布局推动江西产业结构升级的“新质”发展意义

《江西省虚拟现实与行业应用融合发展行动计划 (2023-2026 年)》明确提出了 VR 核心技术突破行动，聚焦近眼显示、多模态交互、内容生产、网络传输等技术的研发应用，提升核心技术在终端产品上的易用性和适配度，强化虚拟现实与 5G 、人工智能、大数据、云计算等新一代信息技术的深度融合，增强产业发展内生动力。这是我国首个省级 VR 产业规划。目前，江西已经建成南昌 VR 科创城，将进一步推动虚拟现实产业标准化建设和技术成果转化，从硬件制造到软件研发，再到应用场景开发，构建完整的 VR 产业链。同时，南昌作为“世界 VR 产业大会”的永久落户地，将积极依托建于南昌的国家虚拟现实创新中心、国家职业教育虚拟仿真实训基地等公共服务平台，集聚产学研用等各方面资源，攻关产业薄弱环节，夯实 VR 产业基础。2026 年，江西将会进一步健全虚拟现实产业链，突破核心元器件、终端设备和内容生产工具等方面的虚拟现实关键技术，培育具有较强竞争力的虚拟现实骨干企业，形成技术、产品、服务和应用协同推进的产业发展格局¹。由此，江西产业结构转换和升级的“新质”发展意义将全面展现。

2.3 VR 产品生产、销售和应用促进 VR 技术与各行业深度融合的“新质”发展意义

在传统产业数字化、智能化转型方面，VR 技术发挥着巨大作用。它与文旅、工业、教育等领域不断加深融合，产生了产业融合生成新产业的发展效应。例如“VR + 文旅” IP，利用 VR 技术提升江西旅游的体验感和知名度；“VR + 工业”应用场景，围绕电子信息、中医药、新能源、电力、双碳、新材料等领域，推广支持多人协作和模拟仿真的虚拟现实开放式服务平台，在开发设计、制造装配、产品展示、销售服务、运营维护等产品全生命周期构建虚实融合的新型解决方案，实现智能化生产、可视化管理、数字化决策。企业数字化、智能化转型又推动了 VR 和工业互联网的深度融合，为

各行业发展注入新的活力和动力。与此同时，南昌 VR 产业基地、中国 (南昌) 虚拟现实 VR 产业基地等一批产业园区相继建成，吸引了华为、阿里、HTC 等一批国内外知名企落户，构成 VR 硬件、软件、内容制作、应用服务等全产业链生态。《江西省虚拟现实与行业应用融合发展行动计划 (2023-2026 年)》提出了工业、教育、文化旅游、体育娱乐、医疗健康、商贸、车联网及智慧城市等九大重点行业应用领域。江西 VR 战略以“融合”彰显了其对区域空间集聚扩散的“新质”发展意义

2.4 VR 产品功能通过扩展社会需求相应引起人才需求和提升城市竞争力的“新质”意义。

VR 产品的使用功能向人们提供了一种全新消费模式，扩展了社会需求，这相应地引起对相关专业人才和培训教育的需求。对此，江西通过建设国家职业教育虚拟仿真实训基地等平台，针对研发、设计到运营、维护等各个环节，培养了大量 VR 专业人才，同时也吸引了外地人才流入，为当地创造了众多就业机会，促进了就业增长。对相关专业人才不断增加的需求，自然形成了 VR 产业版图中极具辨识度的“江西名片”和城市名片，吸引了全球 VR 产业巨头的关注，提升了城市知名度和影响力。这种以需求吸引人才和投资，推动城市高质量发展的区域竞争力模式，彰显了江西以要素创新的“新质”发展意义。

3 江西打造世界级“VR 中心”的战略途径

VR 产业是新质生产力的重要组成部分，江西实施打造世界级“VR 中心”战略，必将是通过新质生产力赋能 VR 产业的途径。

3.1 提升技术研发能力，创新研发模式，推动技术创新

世界级“VR 中心”需要汇聚国内外 VR 领域的顶尖企业和科研机构，合作开展关键技术研发，突破虚拟现实产业的发展瓶颈。通过激励技术创新，提高 VR 技术的核心竞争力，以新质生产力面貌展现 VR 技术及其产品的形态。大力鼓励企业加大研发投入，引进先进技术，实现技术创新，培育具有自主知识产权的核心技术。工业制造类企业应融合设计、仿真、实验验证数据，培育 VR 驱动型产品研发新模式，提升企业创新能力。同时，鼓励加强与国内外知名企业和科研机构的交流合作，提升 VR 技术水平，提高 VR 产业的竞争力。

3.2 建立 VR 产业创新平台，培育新兴产业

VR 技术的结果必然形成 VR 产业及其后续的产业链。“VR 中心”的建设，涉及到包括硬件、软件、内容制作与分发、应用与服务等各个环节的产业，这些产业链的完善将有助于培育新质生产力，推动产业结构升级。国家虚拟现实创新中心正式落户江西南昌，这是虚拟现实领域唯一一个国家级制造业创新中心。通过这个平台，江西将聚焦制约我国虚拟现

实产业发展的关键共性技术难题，推动我国虚拟现实产业高质量发展。

3.3 强化产业协同，促进产业集聚，形成产业生态体系

“VR 中心”建设必将吸引众多企业入驻，形成产业集聚效应。产业集聚有助于企业之间的交流与合作，共享资源、技术和人才，降低生产成本，提高生产效率，从而促进新质生产力的要素能力提升。全力打造“世界级 VR 中心”，江西要联创电子行业龙头企业。通过引进国内外优质企业、研究机构和人才，推动产业链上下游企业协同发展，形成产业集群效应。建立产业生态，积极引进国内外 VR 龙头企业，培育产业链上下游企业，打造完整的 VR 产业链。

3.4 打造人才培养基地，加强与国内外高校、研究机构的合作

依托高校、科研院所等资源，培养一批具备创新能力、实践能力和国际视野的虚拟现实产业人才，包括 VR 研发、设计、运营等专业人才。同时鼓励企业引进高层次人才，促进国际交流与合作，引进国外先进技术和管理经验。这些人才将助力企业创新发展，提高产业整体水平，推动知识形态的新质生产力的进步。

3.5 扩大产业和区域影响力

世界级“VR 中心”建设会提高江西虚拟现实产业在国际市场的地位，故要在全球范围内推广与应用 VR 技术，带动相关产业链发展，促进区域经济的增长。要持续地推动虚拟现实技术在教育、医疗、文化、旅游等领域的应用，挖掘市场需求，为新质生产力提供广阔的发展空间。实现生产与

应用的深度融合，助力江西产业转型和升级。由此，区域经济增长将为新质生产力发展提供有力支撑，实现经济高质量发展。

此外，江西打造世界级“VR 中心”的战略途径，离不开政府政策的支持。主要是基础设施加强建设、产业融合推动、公共服务平台以及在区域政策、产业政策、人才政策、贸易政策、财政政策上予以支持。要在充分运用中央既定政策的基础上，进一步考虑因地制宜、主导产业、体制创新、国际化等发展原则，把握住抢占先机的优势，建设落实协同推进的机制，找好和清楚融合发展的路径，形成发展的自觉，就能够全面实现江西打造世界级“VR 中心”的宏伟战略。

参考文献

- [1] 张辛欣、严赋憬.第一观察 | 习近平总书记首次提到“新质生产力”[Z]. 新华网,转自中国西藏网 (http://www.tibet.cn/cn/politics/202309/t20230912_7484206.html) 2023-09-10.
- [2] 刘洋.深刻理解和把握发展新质生产力的内涵要义[J].红旗,转引自新华网, (<http://www.xinhuanet.com/politics/20240102/cfd4907e807a4fd68b93c19ec7466399/c.html>) 2024-01-02
- [3] 刘珂君 岳小乔 冯慧文 皇甫凌雨.习近平的新质生产力“公开课”[Z].光明网, (<https://baijiahao.baidu.com/s?id=1792825744111850987&wfr=spider&for=pc>), 人民日报客户端.2024-03-07
- [4] 王雅莉、张曼.对第四产业形成的思考[J].经济问题, 1997, (6).人大复印刊物《社会主义理论与实践》1997(8)全文转载.
- [5] 赖熹姬.江西 VR 产业发展研究[J].中共南昌市委党校学报, 2020, (1) -18.

Research on Optimization of Vulcanization Process and Enhancement of Strength and Reliability of Fuel Belt Joints in Thermal Power Plants by

Weiguo Zhou

Jilin Thermal Power Plant, Guoneng Jilin Longhua Thermal Power Co., Ltd., Jilin, Jilin, 132021, China

Abstract

As a critical component in material supply systems for thermal power plants, fuel belt conveyor systems rely heavily on belt joints—vulnerable parts whose strength and vulcanization processes directly determine operational safety and efficiency. In high-temperature and heavy-load environments, joints in some thermal power plants frequently experience delamination and fractures, jeopardizing equipment integrity and production continuity. This study systematically analyzes joint failure mechanisms under typical operating conditions and identifies technical limitations in conventional vulcanization processes. Through structural optimization of joints, refinement of vulcanization parameters, application of novel vulcanizing agents, and intelligent temperature control systems, significant improvements in joint strength and durability were achieved. Mechanical tests and field evaluations demonstrate that optimized processes increased joint strength by over 20% while markedly reducing failure rates. The research proposes systematic optimization pathways and quality assurance measures, providing theoretical and engineering support for safe belt operations and sustainable development in thermal power plants.

Keywords

Thermal power plant; Fuel conveyor belt; Joint vulcanization; Process optimization; Strength and reliability; Failure mechanisms

火电厂燃料皮带接头硫化工艺优化及强度可靠性提升研究

周维国

国能吉林龙华热电股份有限公司吉林热电厂，中国·吉林吉林 132021

摘要

燃料皮带运输系统是火电厂物料供应的关键环节，皮带接头作为易损部位，其强度与硫化工艺直接关系到系统的安全与高效运行。部分火电厂因高温、高载荷等环境，接头易脱层、断裂，威胁设备安全和生产连续性。本文基于典型工况，系统分析了接头失效机理，梳理了传统硫化工艺的技术瓶颈。通过优化接头结构、改进硫化参数、应用新型硫化剂和智能温控，实现了接头强度与耐久性的显著提升。力学试验与现场测试表明，优化工艺使接头强度提升20%以上，失效率明显下降。研究提出了系统优化路径和质量保障措施，为火电厂皮带安全运行和高质量发展提供了理论与工程支撑。

关键词

火电厂；燃料皮带；接头硫化；工艺优化；强度可靠性；失效机理

1 引言

火电厂作为我国能源结构中的主力发电方式，其燃料供应链高度依赖皮带运输系统的高效稳定运行。燃料皮带机承担着煤炭等物料从接卸到锅炉的连续输送任务，皮带的安全可靠性直接决定了机组的运行安全与生产效率。在整个皮带系统中，接头处因受力复杂、工艺难度大，是易损薄弱环节。实际生产中，皮带接头常因工艺不规范、材料老化、环境恶劣等多重因素出现强度下降、脱层开裂、早期失效等问题，导致输送中断、设备损坏，甚至影响发电机组安全稳定

运行。

皮带接头的制作工艺主要包括机械接头与硫化接头两大类。硫化接头因其整体性好、强度高、运行平稳而被广泛应用于火电厂等高强度工业输送场合。然而，硫化接头的实际性能与其工艺流程密切相关，受接头结构设计、硫化材料配比、温度压力控制、现场操作质量等多因素影响，稍有偏差即可能导致接头强度不达标、早期失效等严重后果。如何在复杂工况下提升硫化接头的强度与可靠性、降低失效率与维护成本，已成为火电厂皮带运维管理的技术难题与研究重点。

本文以火电厂燃料皮带运输系统为研究对象，结合典型失效案例和力学测试数据，系统分析接头硫化的失效机制与主要影响因素，探讨工艺参数优化与新材料、新技术应用

【作者简介】周维国（1974-），男，中国山东安丘人，本科，工程师，从事机车检修、燃料皮带研究。

路径,提出了强度可靠性提升的系统性解决方案。研究旨在为火电厂燃料皮带接头硫化工艺标准化、智能化、绿色化提供理论依据和实践经验,助力设备安全高效运行和电力行业可持续发展。

2 火电厂燃料皮带接头失效机理分析

2.1 接头失效类型及特征

燃料皮带接头失效通常表现为接头部位的剥离、断裂、脱层、龟裂等多种形式。剥离失效多发生在粘接层或硫化层,断裂则集中在力学应力集中的搭接区。脱层和龟裂常与环境老化、温度冲击、材料疲劳等相关。失效初期常伴有局部开裂、鼓包、边缘翘起等征兆,若未及时干预,易在持续运行或突发冲击载荷下发生彻底断裂。失效特征具有明显的渐进性和突发性,给皮带系统带来较大安全隐患。

2.2 失效的主要影响因素

燃料皮带接头的失效机理复杂多样,既与结构设计的科学性密切相关,也深受材料性能、工艺参数控制以及现场操作质量等多重因素影响。实践中,若接头搭接长度不足、胶层厚度分布不均匀、斜口角度设计不合理,容易造成应力集中,显著削弱接头整体的力学承载能力。此外,硫化所用的粘接剂和胶料若配比不当,或材料本身耐温、耐湿、耐腐蚀性能较差,极易在服役过程中出现老化失效,导致粘结力下降、层间脱离加剧。工艺过程中的温度、压力及硫化时间等参数若控制不严,亦会导致硫化反应不充分,形成虚接、夹杂或气泡等工艺缺陷,使得接头胶层结合力下降,降低其服役寿命。与此同时,现场操作的规范性直接影响最终成品质量。若操作流程不规范、搭接面清洁度不达标、压力分布不均匀,或受外部环境温湿度变化影响,均可能在局部区域形成硫化薄弱点,成为早期失效的隐患。这些影响因素相互交织、相互作用,是造成火电厂燃料皮带接头早期剥离、断裂及失效的主要根源,也是硫化工艺优化和接头可靠性提升亟须关注和系统解决的重点。

2.3 典型失效案例剖析

某大型火电厂多条主燃料皮带在高温高湿季节,接头处出现开裂与剥离,现场检测发现搭接区粘结不牢、胶层厚薄不均、硫化温度波动大。力学试验显示失效接头拉伸强度不足设计要求 60%,疲劳循环寿命下降明显。通过材料分析,发现部分硫化胶料老化加速,微观结构存在多处微裂纹和杂质。该案例说明,工艺参数失控与材料性能衰减共同导致接头早期失效,需系统优化接头硫化工艺与质量控制流程。

3 接头硫化工艺的传统技术与不足

3.1 传统硫化工艺流程及技术要点

传统接头硫化工艺在火电厂燃料皮带的维护与运行保障中应用广泛,其流程主要涵盖下料、搭接、涂胶、加压、加热、保温以及冷却等关键环节。具体来看,下料与搭接阶段要求作业人员对皮带材料进行精准裁切,确保搭接区域表

面平整、无杂质残留,这对于后续胶层的均匀性和粘结质量具有重要影响。涂胶环节通常采取人工多层刷涂方式,操作时需将专用粘结剂均匀施加在搭接面,随后进行自然风干,以便形成良好的粘接界面。加压和加热环节多借助电热板与手动液压装置,通过对接头区域施加适宜压力和温度,促使胶层发生充分硫化反应。实际操作中,硫化温度一般控制在 145℃至 155℃之间,压力保持在 1.0 至 1.2MPa 左右,保温时间则需结合胶层实际厚度和环境温度作相应调整,以确保硫化过程均匀彻底。在硫化工序完成后,通常需进行自然冷却,待温度降至常温后方可拆模并进行外观及力学强度检查,以判断接头的成品质量。整体来看,传统硫化工艺对操作工人的经验水平、现场环境和设备条件均提出较高要求,稍有疏忽便可能影响接头成品的整体性能与运行寿命。

3.2 传统工艺存在的主要问题

传统燃料皮带接头硫化工艺虽然经过多年工程实践检验,但在现代火电厂高强度、长距离输送与复杂运行环境下,仍暴露出诸多技术短板和质量隐患。首先,工艺参数波动较大是当前生产中普遍存在的问题。由于工艺环节中人工操作占比较高,现场温度、压力和时间等关键参数易受操作人员技能差异、设备状态波动及现场环境变化等因素影响,导致硫化过程难以实现精准、可控,最终造成接头产品批次间性能一致性差,可靠性不足。其次,硫化材料适应性相对较弱。部分国产硫化剂、粘结剂对火电厂高温、高湿、油污等特殊工况的耐受性有限,易出现胶层老化、脱层等失效现象,直接影响接头服役寿命和运行安全。此外,传统工艺在搭接结构设计上存在一定局限,常采用单一 45° 斜口或直口形式,未能充分结合皮带运行时的多方向载荷分布,导致局部应力集中,疲劳损伤加剧,降低了接头整体的力学性能与长期服役能力。更为突出的是,当前大多数现场硫化过程缺乏智能监控和质量追溯手段,质量管控主要依赖人工巡检和经验判断,难以及时发现工艺异常与质量缺陷,影响接头成品的稳定性和现场运维效率。随着皮带输送系统运行规模的扩大和自动化水平的提升,传统工艺的这些短板已成为制约皮带接头可靠性提升和火电厂运维效率的关键瓶颈,迫切需要通过新材料、新技术和智能化工艺手段进行系统升级与优化。

3.3 对生产安全与经济效益的影响

传统硫化工艺的不稳定性直接导致接头失效率高,皮带维护与更换频繁,影响燃料供应连续性与电厂经济效益。接头失效还可能引发生产事故,造成设备损坏与人员伤害,带来安全与环保双重风险。因此,优化接头硫化工艺、提升强度可靠性,是保障电厂高效安全运行的必然要求。

4 接头硫化工艺优化与新技术应用

4.1 接头结构与材料的优化设计

针对皮带接头受力特性,采用多层错位斜口、阶梯搭接、波纹齿型等力学优化结构设计,分散搭接应力,减少局部应

力集中, 提高整体承载能力。在材料选择方面, 优选高耐温、耐磨、抗老化性能优异的新型橡胶基体和复合硫化剂, 提升粘结层的内聚力和界面结合强度。引入纳米填料或功能助剂, 增强胶层抗疲劳和自愈合能力, 提高接头长期服役寿命。结构与材料的协同优化是接头强度可靠性提升的核心基础。

4.2 硫化工艺参数的精细化控制

硫化工艺参数对接头性能影响显著。本文提出基于智能温控的精细化工艺控制方法, 通过数字温控系统和压力闭环反馈, 实现硫化全过程温度、压力、时间的精准调节。优化温度曲线, 防止局部过热或冷斑, 保证硫化反应均匀进行。采用多点压力分布监测装置, 调节液压系统实现搭接面受力均匀。针对不同厚度和结构的接头, 制定差异化硫化保温曲线, 提升工艺适应性。精细化控制大幅度提升了接头成品率和强度一致性, 降低了人工误差与批间波动。

4.3 新型硫化剂与智能温控技术应用

在硫化材料方面, 引入高性能新型硫化剂和增强型粘结剂, 改善传统材料耐温、耐湿和抗老化性能。部分新型硫化剂可在较宽温度窗口内实现快速反应, 有效缩短硫化周期, 提高生产效率。智能温控系统集成热电偶、红外、无线监测等多种传感技术, 实时监测硫化板温度分布, 实现自动调节与异常报警, 确保关键工艺环节无死角监控。硫化全过程可实现数据存储与追溯, 为后期质量管理和工艺优化提供数据支撑。新材料与智能温控技术的深度融合, 有效提升了接头硫化工艺的安全性和可靠性。

5 皮带接头强度可靠性提升的现场应用与评价

5.1 力学性能测试与失效寿命对比

通过静态拉伸、剪切强度、疲劳循环等力学试验, 对比分析传统与优化工艺下皮带接头的强度表现。实验数据显示, 优化工艺接头的极限拉伸强度提升 20% 以上, 剪切强度和疲劳寿命也明显优于传统工艺。优化后的多层搭接结构能有效分散载荷, 提高抗冲击和耐久性能。现场长期运行监测表明, 优化工艺接头在连续高载荷和复杂工况下的失效率显著降低, 平均寿命延长 30% ~ 50%, 大幅降低了维护与更换频率。

5.2 工程应用效果与经济技术分析

在某大型火电厂主皮带机应用中, 通过优化硫化工艺, 皮带接头在连续运行半年内未出现脱层与断裂等故障, 显著提升了皮带系统的整体稳定性和燃料输送效率。与优化前相比, 设备维护成本降低了约 25%, 燃料供应中断时间减少近 80%, 大幅提升了机组的运行保障能力。系统化的工艺优化不仅带来了直接的经济效益, 还有效降低了因接头失效

导致的安全风险和生产事故。工程实践表明, 优化后的接头强度和可靠性有了质的飞跃, 为新型硫化工艺在火电厂的推广应用提供了有力的实证支撑, 也为燃料皮带系统的高效、安全运行积累了宝贵经验。

5.3 现场质量控制与标准化管理措施

为有效保障皮带接头硫化工艺的质量, 建议在施工现场建立标准化操作流程和多级质量检验体系。首先, 应制定详细的工艺操作规程, 明确各环节参数控制、操作要点及质量验收标准, 规范化每一步作业。引入智能监控系统, 对硫化温度、压力、时间等关键工艺参数进行实时采集、分析与报警, 实现全过程的自动记录和数据留存, 确保工艺可控、过程可溯、质量可追。同时, 加强对施工人员的技能培训和岗位责任制落实, 提升操作人员的专业水平和质量意识。建立健全质量事故追溯与责任倒查机制, 及时发现并纠正操作失误或工艺偏差, 形成闭环管理。通过上述标准化与精细化的质量管理措施, 不仅可大幅降低接头失效风险, 夯实接头强度的可靠性, 还为燃料皮带运输系统的安全、稳定和高效运行提供坚实保障。

6 结语

燃料皮带接头作为火电厂物料输送系统的关键环节, 其强度与可靠性直接关乎机组的安全运行与经济效益。本文基于典型工况与失效案例, 系统分析了接头失效的主要机理和传统硫化工艺的技术瓶颈, 提出了结构设计优化、材料创新、工艺参数精控与智能温控等系统性改进措施。实验与现场应用均表明, 工艺优化显著提升了接头强度和寿命, 降低了失效率与运维成本。未来应进一步推进硫化工艺的数字化、智能化、绿色化发展, 加强新材料与智能监控的融合创新, 完善标准化管理与质量追溯体系。通过工艺升级与管理创新, 为火电厂燃料皮带系统的高质量运行提供坚实技术保障, 为能源行业的安全高效与可持续发展作出积极贡献。

参考文献

- [1] 邓毅坤.火电厂燃料系统皮带机滚筒胶面磨损研究[J].设备管理与维修,2024,(20):72-75.
- [2] 范嘉良,齐志攀.谈火电厂循环流化床锅炉燃料输送系统设计[J].科技创业家,2012,(19):125.
- [3] 李浩.火电厂燃料输煤系统运行安全探析[J].电力设备管理,2025,(04):240-242.
- [4] 刘盛雷,万伟.火电厂新型封闭式带式燃料输送机研究[J].电气技术与经济,2024,(07):201-204.
- [5] 周铁梁,火电厂燃料输送系统智能管控关键技术研究与应用.北京市,华电重工股份有限公司, 2020-12-16.

Research on Fault Diagnosis and Maintenance Process Optimization of High-Pressure Cylinder Blade Wear in Thermal Power Plant Steam Turbines by

Feng Gao

National Energy Jilin Electric Power Engineering Technology Co., Ltd., Changchun, Jilin, 130114, China

Abstract

As core components of thermal power plants, high-pressure cylinder blades directly affect unit operational efficiency and safety through wear issues. With prolonged high-load operation cycles, blade wear leads to performance degradation and even severe failures. This study systematically investigates the causes, manifestations, and hazards of blade wear, synthesizes modern diagnostic methods including acoustic emission analysis, vibration monitoring, and metallographic inspection, and establishes a multidimensional fault diagnosis system. The research explores online/offline blade detection, quantitative assessment, trend prediction, and comparative analysis of repair techniques such as laser cladding and cold spraying with optimization pathways. Experimental and case studies demonstrate that process optimization and systematic diagnostics significantly enhance blade reliability, extend service life, and reduce maintenance costs, providing theoretical and practical support for safe and efficient operation of thermal power plant steam turbine cylinders.

Keywords

Thermal power plant; Steam turbine; High-pressure cylinder blades; Wear faults; Diagnostic technology; Maintenance repair; Process optimization

火电厂汽轮机高压缸叶片磨损故障诊断与检修修复工艺优化研究

高峰

国能吉林电力工程技术有限公司，中国·吉林长春 130114

摘要

汽轮机高压缸叶片作为火电厂核心部件，其磨损问题直接影响机组运行效率与安全。随着机组高负荷、长周期运行，叶片磨损导致性能下降甚至诱发严重故障。本文梳理了叶片磨损的成因、表现及危害，系统总结声发射、振动分析、金相检测等现代诊断方法，构建了多维故障诊断体系。研究探讨了叶片在线与离线检测、定量评估及趋势预测，并对比分析激光熔覆、冷喷涂等修复工艺及其优化路径。试验与案例表明，工艺优化和系统性诊断可显著提升叶片可靠性、延长寿命、降低维修成本，为火电厂汽轮机高压缸的安全高效运行提供理论与实践支撑。

关键词

火电厂；汽轮机；高压缸叶片；磨损故障；诊断技术；检修修复；工艺优化

1 引言

火电厂汽轮机高压缸叶片处于极端高温、高压和高速流体冲刷的复杂工况中，是能量转换链条中最为关键的机械部件之一。其结构完整性和表面性能直接决定了汽轮机的效率、稳定性和安全性。随着我国电力行业对机组高参数、大容量、长周期经济运行的要求不断提高，叶片磨损、腐蚀、裂纹等失效现象频发，严重影响设备健康和发电效益。特别

是高压缸叶片，长期承受着高速蒸汽流冲刷、灰尘颗粒侵蚀及动态载荷交变，其磨损过程具有隐蔽性、渐进性和突发性，极易在机组运行后期诱发更大范围的二次故障，增加检修和更换成本，甚至引发全厂停机事故。

传统的叶片磨损检修多依赖定期停机、目视检查与经验判断，存在检测精度低、诊断滞后和修复方案单一等问题。近年来，随着现代无损检测、智能诊断与表面修复工艺的快速发展，为高压缸叶片磨损故障的精准识别和高效修复提供了新的技术途径。针对实际生产需求，如何建立高效、精准的磨损故障诊断体系，探索多元修复与强化技术，提升叶片服役性能，已成为汽轮机运维领域亟须解决的关键课题。

【作者简介】高峰（1980-），男，中国吉林长春人，本科，工程师，从事火电厂汽轮机检修研究。

本文将系统梳理火电厂高压缸叶片磨损故障的诊断理论与检测方法,分析当前主流修复工艺存在的问题,提出基于多源信息融合的诊断模式和表面修复工艺优化路径。通过实验室力学试验与现场应用对比,验证工艺优化的工程成效,为火电厂汽轮机叶片安全高效运行提供理论支撑和实践参考。

2 汽轮机高压缸叶片磨损故障机理及特征分析

2.1 叶片磨损故障的形成机理

高压缸叶片长期在高温、高速蒸汽环境下工作,承受着复杂的气流冲刷、温差交变和机械载荷。蒸汽中携带的微小颗粒和氧化物在冲击叶片表面时,会造成物理磨损和表层金属疲劳。此外,局部涡流、蒸汽湿度波动和化学介质腐蚀,也会加剧叶片的点蚀、腐蚀和表面剥蚀。随着运行时间的增长,磨损区容易积聚微裂纹,进而引发疲劳裂纹扩展,最终导致叶片截面削薄、强度下降,甚至发生断裂失效。不同叶片材料和制造工艺对磨损的敏感性存在差异,但大多数高压缸叶片磨损呈现出由轻度表层剥蚀到深层结构损伤的渐进演变过程。

2.2 磨损故障的主要表现与危害

在实际运行中,汽轮机高压缸叶片磨损多表现为表面划痕、麻点、局部缺口、裂纹和片根磨薄等。轻度磨损时叶片表面光泽度下降,表面粗糙度增大,随之蒸汽流道效率降低,能量损失加剧。严重时磨损处发生微裂纹或断口,局部叶片甚至整体折断,诱发汽轮机振动、动不平衡、轴承损坏等连锁故障,危及整个机组的安全。磨损导致的气动性能退化,不仅降低了汽轮机发电效率,还会加快其他零部件的损伤速率,显著缩短机组检修周期,增加全寿命周期运行成本。

2.3 高压缸叶片磨损的影响因素

汽轮机高压缸叶片的磨损程度受多种因素影响,包括蒸汽参数、杂质含量、材料工艺、运行负荷、启停频次、维护保养水平等。高温高压蒸汽加剧了金属材料的氧化与热疲劳反应,杂质颗粒含量增加则提升了机械冲刷的强度。不合理的启停操作与负荷波动,会使叶片长期处于热应力和机械应力交变状态,加剧局部磨损。材料选择、热处理工艺、表面涂层性能、现场润滑管理等因素亦对叶片的耐磨性能和寿命有重要影响。因此,系统性磨损防控与工艺优化需从多环节、多因素入手,协同提升叶片的运行可靠性。

3 叶片磨损故障诊断技术体系研究

3.1 基于声发射与振动分析的在线检测技术

声发射与振动分析是当前汽轮机叶片磨损故障在线诊断的主流手段。通过在高压缸外壳或关键支承部位布设高灵敏度传感器,实时采集叶片工作时的振动、冲击和高频信号。声发射信号能反映叶片表面损伤、微裂纹扩展等早期微观变化,而振动分析则可有效识别叶片断裂、失重、根部松动等

宏观异常。采用时域、频域、时频联合等信号处理方法,可提取磨损相关的特征参数,实现故障类型的智能识别与分级预警。在线检测技术显著提升了磨损故障发现的及时性和准确性,为机组的预防性维护和检修决策提供了数据支持。

3.2 金相检测与无损探伤方法的应用

针对已发现异常部位或大修期间的叶片,金相检测与多种无损探伤技术为磨损评估与失效分析提供了有力手段。金相显微镜分析可揭示叶片材料的组织结构变化、表层硬化程度和微裂纹分布,辅助判定磨损损伤的深度与类型。超声波探伤、磁粉探伤、渗透检测等无损检测方法可对叶片内部缺陷、微小裂纹进行精准定位,避免人为破坏,保障后续修复工艺的针对性和有效性。结合材料力学试验与断口分析,可以系统评估叶片剩余寿命和安全裕度,为修复决策和技术方案制定提供科学依据。

3.3 多源信息融合的智能诊断系统

随着工业物联网和人工智能技术的发展,多源信息融合的叶片智能诊断系统逐渐成为大型火电厂的趋势。系统集成声发射、振动、温度、压力、工况等多维数据,通过数据采集终端上传至云平台,利用大数据挖掘和深度学习算法,实现叶片磨损的状态评估、趋势预测与异常报警。智能诊断系统支持远程监控、自动诊断和专家决策,能够跨越人工巡检的局限,实现对机组健康状态的全周期管理。多源融合与智能算法的结合,大幅提升了故障诊断的准确率和响应速度,为现代火电厂设备智能运维提供了坚实基础。

4 叶片检修修复与工艺优化路径

4.1 常规叶片修复工艺及局限性

目前火电厂对磨损叶片的修复主要采取补焊、打磨、机械加工等常规手段。对表面轻度磨损区域,可采用手工打磨、局部补焊修复和精细抛光,去除表层损伤并恢复叶片表面光洁度。对于局部缺口和中度磨损部位,常用堆焊或补焊合金材料修复叶片截面,后续进行机械加工和热处理,以恢复力学性能。重度磨损及断裂叶片则多采用更换新件的方式。传统修复工艺实施成本低、工艺简单,但存在修复层附着力弱、热影响区硬度降低、修复区域耐磨性能不足等问题,难以满足高负荷机组对叶片长期服役性能的高要求。

4.2 激光熔覆与冷喷涂等表面强化工艺

针对高压缸叶片磨损的复杂工况,激光熔覆、冷喷涂等新型表面强化技术被广泛研究和应用。激光熔覆利用高能激光束将合金粉末与叶片基体局部熔融,形成致密的高性能冶金结合层,显著提升叶片表面耐磨性和抗腐蚀能力。冷喷涂技术以高压气流将金属粉末高速喷射沉积于叶片表面,在低热输入下形成高附着力的强化层,避免了热影响区组织软化,有利于保护叶片本体性能。这些新型工艺可根据磨损区域和叶片材料特性灵活选用,有效延长修复后叶片的服役寿命和维修周期,提升汽轮机运行经济性与安全性。

4.3 修复工艺参数优化与智能管控

为了实现修复效果的最优化,需对补焊、熔覆、喷涂等修复工艺的温度、速度、材料配比等参数进行系统优化。利用有限元仿真与力学试验,分析不同参数对修复区域残余应力、结合强度、耐磨性能的影响,制定针对性参数窗口。结合自动化修复装备和数字化管控平台,实现工艺参数的智能设定、实时监控和过程追溯,提升修复质量的一致性与可控性。通过现场对比应用和失效分析,不断完善工艺流程,推动叶片修复技术向智能化、标准化和绿色化方向发展。

5 工程应用实践与效果评估

5.1 现场应用案例与对比分析

以某大型火电厂为工程实践对象,结合实际运行工况,全面应用了智能化叶片磨损故障诊断系统及激光熔覆修复技术。通过在高压缸区域布设多源传感器及数据采集终端,实时监控叶片振动、温度、声发射等特征信号,并结合数据驱动的故障识别算法,对疑似磨损区域实现了精准定位。系统支持分级预警和定量损伤评估,为检修方案的制定提供了科学依据。针对发现的中重度磨损叶片,现场采用激光熔覆技术实施修复,通过高能激光束将合金粉末与基体局部冶金结合,形成高致密性、耐磨耐蚀的修复层。现场回装后的叶片在高温高压下连续运行半年,未见二次剥蚀、疲劳裂纹等失效现象。经力学与微观结构测试,修复后叶片的极限强度、硬度和表面耐蚀性均优于传统补焊及机械加工工艺,寿命提升 30% 以上。同期对比未优化修复工艺的叶片,发现其运行期间振动信号明显增强,能耗高、故障率高。综合现场运行数据,智能诊断与激光修复工艺显著提升了汽轮机整体运行效率与稳定性,有效降低了突发事故风险,充分证明了工艺优化的工程价值和推广前景。

5.2 经济效益与安全性提升分析

通过引入先进的叶片磨损诊断和修复技术,火电厂在维护经济性和运行安全性方面均取得了显著进步。首先,修复后叶片服役寿命大幅延长,更换频率明显下降,显著节省了备品备件和材料采购成本。其次,智能诊断系统可提前发现隐患,减少计划外停机和抢修事件,提高机组可利用率,保障了发电任务的连续性和调峰能力。工艺优化还带来了更低的人工和维护投入,由于故障处理更加高效,检修周期得以延长,检修间隔时间显著增长,机组整体开机率提升,运行风险得到有效管控。通过对多个机组的经济测算,采用新型修复工艺后的年均维护成本降低 20% 以上,单次大修周期延长 10% ~ 15%,设备资产利用率和经济回报同步增长。更重要的是,叶片失效概率降低,极大减少了因断裂、飞片

等恶性事故导致的机组非计划停机和设备连带损伤。整体来看,智能诊断与工艺优化双轮驱动,不仅增强了设备本体的安全性,还提升了火电厂全周期经济效益,实现了安全与效益的协同提升。

5.3 工艺推广与运维管理建议

为全面发挥高压缸叶片智能诊断及修复工艺优化的效果,火电厂应加快新技术的规模化推广应用步伐。首先,要建立以叶片健康状态为核心的设备全寿命周期管理体系,完善状态监测、在线诊断与远程智能运维平台,实现从被动检修到主动预防的管理模式转变。建议定期开展人员技能培训和跨厂技术交流,提高一线检修和运维人员对智能诊断系统及先进修复工艺的认知与操作水平。应同步推进检修工艺流程的标准化与数字化,完善数据归档和质量追溯机制,确保每一次修复操作均可被精确回溯和评估。以工程实践反馈为依据,逐步形成针对不同机组、不同环境条件下的磨损防控与修复工艺标准体系,不断总结和优化经验。未来,火电厂还应重视与科研院校和设备制造商的产学研深度合作,推进诊断与修复技术的持续创新和适应性升级,全面提升设备智能运维与本质安全水平,为我国电力行业高质量发展提供坚实保障。

6 结语

汽轮机高压缸叶片磨损故障是制约火电厂机组安全经济运行的核心难题之一。本文围绕叶片磨损机理、诊断技术与修复工艺优化开展系统研究,提出了基于多源检测的智能诊断体系和以激光熔覆、冷喷涂等为代表的新型修复工艺路径。现场应用与对比试验表明,优化后的诊断与修复技术显著提升了叶片服役性能、延长了检修周期、降低了运行风险和维护成本。未来,火电厂应继续加强智能化监测与修复技术创新,推动设备全生命周期健康管理,助力我国电力装备高质量、可持续发展。

参考文献

- [1] 郭琳琳,钟福成.汽轮机镶嵌式阻汽片结构优化改造研究[J].科技创新与应用,2025,15(07):47-50.
- [2] 赵帅,潘宏刚,张野,等.不同负荷下汽轮机末级叶片疲劳寿命研究[J].沈阳工程学院学报(自然科学版),2024,20(03):27-31.
- [3] 李思琦,杨宇,李孝品,等.核电机组汽轮机低压叶轮叶根槽应力腐蚀裂纹扩展寿命分析[J].发电设备,2023,37(04):248-252.
- [4] 吕磊,涂安琪,谭晓蒙,等.350 MW汽轮机低压转子叶片断裂原因分析及建议[J].内蒙古电力技术,2023,41(03):97-100.
- [5] 刘传亮,江路毅.热电联产汽轮机调节级叶片断裂的分析与改进[J].汽轮机技术,2023,65(01):66-70+38.

Study on Energy Efficiency Improvement through Coupled Operation of Waste Heat Utilization System and Circulating Water System in Thermal Power Plants by

Yu Zhipu

Guoneng Jilin Jiangnan Thermal Power Co., Ltd., Jilin, Jilin, 132011, China

Abstract

Thermal power plants generate substantial waste heat during power generation. Efficient recovery and utilization of this waste heat are crucial for enhancing unit energy efficiency and reducing energy consumption per unit. As a critical component of thermal systems, the circulating water system not only performs cooling and heat transfer functions but also serves as an important platform for waste heat recovery. Under the pressure of energy conservation, emission reduction, and low-carbon transition, deep coupling between waste heat utilization and circulating water systems has become a key research focus. This paper reviews types of waste heat and current utilization status in thermal power plants, analyzes energy flow characteristics in circulating water systems, and explores coupling principles and optimization models. Through case studies, it summarizes technical pathways and achievements in integrated operation of waste heat recovery and circulating water systems. Research demonstrates that system coupling optimization can maximize waste heat utilization while effectively controlling circulating water energy consumption, which holds significant value for green transformation and high-quality development of thermal power plants.

Keywords

Thermal power plant; Waste heat utilization; Circulating water system; Coupled operation; Energy efficiency improvement; Energy conservation; System optimization

火电厂余热利用系统与循环水系统耦合运行的能效提升研究

于志璞

国能吉林江南热电有限公司, 中国 · 吉林 吉林 132011

摘要

火电厂在发电过程中会产生大量余热, 其高效回收与利用对提升机组能效、降低单位能耗具有重要意义。循环水系统作为热力系统的重要组成部分, 不仅承担冷却与传热功能, 也是余热回收的重要平台。在节能减排和低碳转型压力下, 余热利用与循环水系统的深度耦合成为关键课题。本文梳理了火电厂余热类型与利用现状, 分析循环水系统能量流动特征, 探讨两者的耦合原理与优化模式。结合典型案例, 总结了余热回收与循环水系统集成运行的技术路径及成效。研究表明, 系统耦合优化能够最大化利用余热资源、有效控制循环水能耗, 对火电厂绿色转型和高质量发展具有重要价值。

关键词

火电厂; 余热利用; 循环水系统; 耦合运行; 能效提升; 节能减排; 系统优化

1 引言

我国火电厂长期承担着电力系统基荷和调峰任务, 在能源消耗和碳排放方面占有重要比重。伴随“双碳”目标推进和节能环保政策日益收紧, 火电厂面临的能效提升与减排压力日趋严峻。传统亚临界及超临界机组在发电过程中, 会释放大量中低品位余热资源, 包括烟气余热、汽轮机排汽余热、冷却水余热等, 若直接排放将造成能源浪费与环境负担。循环水系统作为机组冷却和余热回收的主要载体, 在实际运

行中往往存在能量梯级利用不足、能耗偏高等问题, 导致余热利用与系统整体能效提升的空间被压缩。

近年来, 火电厂余热利用系统与循环水系统的耦合运行逐渐受到业界重视。通过系统集成与优化设计, 推动余热回收技术与冷却水系统高效协同, 可有效实现能源的多级利用与能耗的动态平衡。然而, 耦合过程中的工艺复杂性、系统匹配性、运行控制精度等因素, 对工程设计与管理提出了更高要求。本文在系统分析火电厂余热类型及循环水系统功能的基础上, 梳理国内外余热耦合利用的主要技术路径, 结合典型应用案例, 深入探讨耦合优化的实践模式与成效。文章旨在为火电厂实现高效余热利用、降低循环水能耗提供理论依据与实践参考, 助力行业绿色低碳转型升级。

【作者简介】于志璞 (1980-), 男, 中国吉林通化人, 本科, 工程师, 从事热能与动力工程研究。

2 火电厂余热与循环水系统的基本原理与现状

2.1 火电厂余热类型及其能量分布

火电厂在发电及辅助生产过程中，会产生大量余热资源，主要包括锅炉排烟余热、汽轮机排汽余热、冷却水余热及设备表面散热等。其中，锅炉排烟余热因烟气温度高、流量大，具有较高的回收潜力；汽轮机排汽余热则蕴含于凝汽器排汽和冷却水中，是系统最大量的低品位热能。冷却水余热多表现为温度升高，若不加以利用，直接排放不仅造成热污染，还导致热能白白损失。设备表面散热虽然总量有限，但在整体热平衡中也不可忽视。不同类型余热资源的品位、温度和流量存在显著差异，合理分级回收利用，有助于实现能源梯级利用和系统能效最大化。

2.2 循环水系统的功能与运行特征

循环水系统是火电厂热力系统中的重要组成部分，主要承担着凝汽器冷却、设备冷却、热交换等任务。系统通过取用天然水体（水库、河流等）作为冷源，借助循环水泵实现冷却水的连续流动与热量传递。循环水在通过凝汽器吸收蒸汽余热后，温度升高，再经冷却塔或喷淋池释放热量，完成热量的空间转移。实际运行中，循环水系统受负荷波动、环境温度变化、设备性能等多重因素影响，易出现能耗偏高、水温过高、系统效率波动等问题。如何提升循环水系统的冷却效率、降低能耗，并与余热回收系统实现有效耦合，成为提升电厂能效的关键环节。

2.3 余热利用与循环水系统协同的现实意义

将余热利用系统与循环水系统进行深度耦合，不仅能够提升系统整体热效率，还能有效降低厂区冷却水能耗，实现能源与环境效益的协同。通过对烟气、排汽等余热资源的分级回收与利用，减少冷却水系统负荷，提高回收热量的经济价值。同时，耦合系统有助于降低循环水温升，减轻冷却塔运行压力，减少水资源消耗。更为重要的是，协同优化能够实现厂区余热资源的最大化开发，为区域供热、城市集中供暖、工艺用热等提供多样化的能源服务，为火电厂转型发展拓展了新路径。

3 余热利用系统与循环水系统的耦合原理与技术模式

3.1 耦合原理及能量流动机制

余热利用系统与循环水系统的耦合，本质上是以循环水为载体，集成多种余热回收与转化单元，通过工艺优化和能源管理，实现系统能量流动的梯级利用和损失最小化。具体来说，烟气余热、排汽余热等高温热能，可通过热交换器、热泵等设备转移至循环水系统，提高冷却水温度，为后续的供暖或工艺用热提供热源。低温余热则可通过热泵技术或热能提升装置实现品位提升，实现热量的深度回收和循环利用。在整个能量流动过程中，通过工艺流程的合理设计、设备参数的精准匹配和智能化的运行控制，实现余热资源的

多级梯次回收与循环水系统能耗的动态平衡。

3.2 主要技术模式及集成方案

耦合优化可依据电厂规模、热源类型和用能需求选择不同的技术模式。常见模式包括：锅炉烟气余热与循环水系统串联耦合，通过烟气—水换热器将高温烟气热能传递给冷却水，提升水温用于区域供热或热泵系统；汽轮机排汽余热深度回收模式，利用凝汽器改造、增设热网加热器或换热站，将凝汽器排汽热量经循环水系统转移至外部供热负荷；余热与循环水多源复合回收模式，将锅炉、汽轮机和厂区其他余热源的热量通过集成管网和热力站，统一调度与分配，实现厂区能源系统的一体化管理。此外，部分电厂还探索了与污水源、地源热泵等新能源技术的耦合，进一步提升余热回收的广度与深度。

3.3 耦合过程中的关键控制与优化点

实现余热利用系统与循环水系统高效耦合，关键在于工艺参数的动态匹配与运行控制的智能化。需要对余热源温度、冷却水流量、水温、热负荷变化等进行实时监测与调节，保障各环节热量平衡与设备高效运行。热交换装置的设计需兼顾换热效率与运行安全，防止结垢、腐蚀等问题影响系统稳定性。运行中应结合负荷预测和能效评价模型，动态调整各回收环节参数，实现热量分配与循环水流动的自适应调控。通过智能化控制平台和数据分析工具，可实现系统能耗的实时监控、故障预警与优化运行，为耦合系统的高效、稳定运行提供有力支撑。

4 典型案例分析与系统优化实践

4.1 锅炉烟气余热与循环水系统耦合供热实践

以某沿海大型火电厂为例，该厂采用锅炉烟气—循环水耦合回收系统，将锅炉烟气排放前设置高效换热器，将部分余热传递至循环水系统。经余热回收后，冷却水温度适度提升，可为城市集中供热和工业用户提供稳定热源。系统投运后，不仅显著降低了烟气排放温度，减少了热损失，同时提升了城市供热的能源利用效率。与传统供热模式相比，该耦合系统实现了能源的梯级利用与多用途转化，大幅降低了单位供热能耗，为火电厂余热资源开发和能源结构优化提供了成功范例。

4.2 汽轮机排汽余热深度回收与循环水集成改造

某内陆火电厂针对长期存在的汽轮机凝汽器排汽余热大量流失及循环水系统高温季节负荷压力过大的问题，实施了以凝汽器与循环水系统联合优化为核心的系统改造。在此次改造中，厂方通过在凝汽器出口侧增设高效热网加热器，将部分高温冷却水引入城市热网换热单元，实现排汽余热的深度分级回收。该系统引入智能调控装置，可根据城市供热负荷、机组运行参数和环境温度等动态调整热量分配路径，实现热网余热回收效率的最优化。通过对换热环节的智能联动与实时参数调整，既显著降低了凝汽器端温度，提高汽轮

机循环效率，又有效缓解了夏季高温期间冷却水系统的运行压力。改造后，机组单位发电煤耗明显下降，余热综合利用率大幅提升，年节约标煤量数千吨，二氧化碳等温室气体排放同步减少。该厂的余热深度回收与循环水系统集成运行模式，为同类火电厂探索高效、低碳、经济运行提供了成功范例，实现了经济效益与环保效益的良性统一。

4.3 多源余热协同回收与循环水系统一体化运行

部分新建大型电厂结合厂区多源余热特点，采用“余热集成管网+循环水协同回收”模式，将锅炉、汽轮机、变压器冷却等各类余热统一纳入能源管理系统，通过多级换热与热能分配，实现全厂余热资源的最大化利用。循环水系统与余热利用系统一体化运行，不仅提升了能源系统的综合热效率，还为区域供热、园区工业用热等多种需求提供了灵活能源支持。系统投运后，通过数据平台实现全流程能耗监测和运行优化，保障了耦合系统的安全、经济、稳定运行，为行业推广奠定了坚实基础。

5 能效提升成效与推广难点

5.1 耦合系统带来的能效提升

通过将余热利用系统与循环水系统进行深度耦合，火电厂在节能降耗方面取得了实质性进展。系统运行数据显示，余热回收的利用率大幅提升，许多示范项目的供热能效提高了10%以上，显著优化了能源流动路径。受益于余热回收的充分利用，机组单位发电煤耗持续下降，厂用电率同步降低，系统综合能效水平实现质的飞跃。同时，循环水系统由于冷却负荷的减轻，冷却塔运行所需的电能消耗下降，水资源的消耗强度也得到有效控制。部分项目年节约标煤量可达数千吨，二氧化碳、氮氧化物等主要污染物排放量也随之减少。整体能效的提升不仅显著提升了企业的经济效益，增强了市场竞争力，更为推动火电厂绿色低碳转型、促进区域能源优化配置和生态环境保护提供了有力支撑。这种耦合优化模式已成为火电行业能源管理与减排增效的重要方向，对推动能源行业实现可持续发展具有积极的现实意义和广阔的推广前景。

5.2 推广应用中存在的技术与管理难点

尽管余热耦合系统的优点突出，但在大范围推广过程中仍面临诸多挑战。一方面，不同电厂热源类型、负荷特性、现有系统布局等条件差异大，耦合系统的设计和改造需因地制宜，缺乏标准化方案。部分老旧机组受制于设备参数与场地条件，余热回收改造难度较大。另一方面，系统集成度高、运行过程复杂，对运行人员的专业素养和系统运维能力提出

更高要求。智能化管理平台的建设和数据分析能力的提升仍需持续投入。管理层面对节能项目的长期效益认知不充分，部分企业存在投入动力不足、技术采纳意愿不强等问题。

5.3 未来推广的对策与建议

针对当前存在的难点，建议在政策层面加大余热耦合利用的支持力度，推动相关标准体系建设与经验交流。技术层面，应鼓励电厂与科研院所、设备制造企业联合攻关，开发适应不同机组和热源条件的标准化、模块化耦合技术装备。运营管理方面，重视高素质运维团队建设，提升智能化运维和数据分析能力。积极探索合同能源管理、能效共享等创新商业模式，分担企业投资压力，激发节能改造积极性。通过多元协同推进，有望实现余热耦合利用系统的广泛落地，助力火电行业整体能效跃升。

6 结语

火电厂余热利用系统与循环水系统的深度耦合，为行业实现能效提升和绿色低碳发展提供了新路径。本文系统梳理了余热类型与循环水系统运行机制，剖析了耦合原理与主流技术模式，结合典型工程案例，论证了系统性集成优化的显著成效。实践表明，科学规划与精准实施余热耦合项目，能够大幅提升火电厂能源利用效率，降低单位能耗与碳排放，为区域能源系统优化配置和环境友好型社会建设提供坚实支撑。面向未来，随着数字化、智能化等新兴技术的持续融合，余热利用与循环水系统协同运行将实现更高水平的智能管理与能效提升。行业应加大创新投入，强化政策支持，完善标准规范，推动余热耦合利用系统在更广范围、更高层级落地实施。通过持续努力，火电厂必将在能源革命与绿色转型进程中发挥更加积极和持久的作用。

参考文献

- [1] 李聚涛,徐锦祥.火电厂烟气余热耦合提质利用热泵系统的设计与实现[J].大众科技,2025,27(02):29-31+41.
- [2] 孙亦鹏,刘建华,程亮,等.火电厂空气预热器旁路余热利用系统经济性分析[J].热能动力工程,2021,36(03):93-99.
- [3] 陈程,陈鑫,徐凤,等.火电厂乏气-烟气余热耦合提质利用热泵系统研究[J].制冷技术,2020,40(05):41-46+52.
- [4] 马长亮.火电厂烟气余热利用系统取水方案优化[C]//中国动力工程学会环保技术与装备专业委员会.2017燃煤电厂“石膏雨”“有色烟羽”深度治理技术交流研讨会论文集.大唐三门峡发电有限责任公司;2017:101-103.
- [5] 周崇波,陈静,任怀民.火电厂循环水余热利用热泵系统运行优化的初探[J].能源与环境,2015,(06):24-25+29.

Analysis of Causes and Design of Adaptive Alignment Correction Device for Coal Conveying Belts in Thermal Power Plants by

Dongsheng Xu

Jilin Longhua Thermal Power Plant, Guoneng Group, Jilin, Jilin, 132000, China

Abstract

As a critical component of fuel transportation systems in thermal power plants, the operational stability of coal conveying belts directly impacts the safety and efficiency of coal supply to generating units. The frequent occurrence of belt misalignment stems from complex factors including equipment structure, installation precision, operating environment, coal flow distribution, and maintenance practices. This issue not only reduces conveying efficiency but also poses significant safety hazards such as belt damage, coal spillage, blockages, and even fires. This study systematically investigates multidimensional causes of conveyor belt misalignment, evaluates the applicability and limitations of traditional correction methods, and proposes a novel correction device based on multi-sensor intelligent perception and adaptive control principles. Experimental and field application results demonstrate that this device enables dynamic monitoring and rapid adjustment of belt operation status, significantly enhancing system intelligence. It provides robust safeguards for safe, efficient, and environmentally friendly coal transportation in thermal power plants.

Keywords

Thermal power plant; Coal conveying belt; Misalignment mechanism; Adaptive correction device; Intelligent control; System safety

火电厂输煤皮带跑偏原因分析及自适应纠偏装置设计与应用

徐东升

国能吉林龙华热电股份有限公司吉林热电厂，中国·吉林吉林 132000

摘要

输煤皮带作为火电厂燃料输送系统的重要组成部分，其运行的稳定性直接关系到机组供煤的安全与效率。皮带跑偏问题频发，成因复杂，既有设备结构、安装精度、运行环境等因素，也受到煤流分布与运维水平的影响。皮带跑偏不仅降低输送效率，还易引发皮带损坏、撒煤、堵塞乃至火灾等重大安全隐患。本文系统梳理了输煤皮带跑偏的多维成因，分析了传统纠偏措施的适用性与不足，提出基于多传感器智能感知与自适应控制原理的新型纠偏装置设计。实验与现场应用结果表明，该装置能够实现皮带运行状态的动态监测和快速调节，极大提升了系统智能化水平，为火电厂输煤系统的安全、高效与绿色运行提供了坚实保障。

关键词

火电厂；输煤皮带；跑偏机理；自适应纠偏装置；智能控制；系统安全

1 引言

火电厂作为我国能源结构的重要支柱，其安全稳定运行高度依赖于燃料输送系统的连续性和可靠性。输煤皮带作为实现煤炭高效自动化运输的核心设备，其运行状态直接影响着锅炉燃烧的稳定性与发电厂经济效益。随着大型机组及智能化水平的不断提升，皮带输送系统的长度与复杂性显著增加，但皮带跑偏现象却仍频繁发生，成为困扰生产一线和运维管理的顽疾。皮带跑偏轻则造成撒煤污染、设备磨损加剧，重则导致皮带撕裂、断裂甚至安全事故，大幅增加运维

难度与运行风险。本文围绕火电厂输煤皮带跑偏的机理、现有技术的局限，重点探讨智能自适应纠偏装置的系统设计与应用成效，旨在为火电厂燃料系统智能化安全运维提供理论参考与实践经验。

2 输煤皮带跑偏问题的机理分析

2.1 皮带结构设计及制造误差的影响

输煤皮带结构的科学性和制造精度，是保障其长期稳定运行的基础。皮带机系统中的托辊、驱动滚筒、改向滚筒等关键部件，如其轴线与皮带中心线发生微小偏差，便会造成张力分布不均，从而在皮带运行过程中产生横向分力，诱发跑偏现象。皮带本体制造环节，若出现厚度或宽度不均、接头处理不规范等问题，也会改变受力平衡，形成横向应力，

【作者简介】徐东升（1978-），男，中国吉林吉林人，本科，工程师，从事燃料输煤研究。

增加偏移概率。此外，托辊组装精度不高、支架刚性差等结构性误差，随着皮带连续运行会逐渐积累，导致初期的微小位移演变为长期的系统性偏移。皮带材料在长期高负荷运行中逐渐老化，局部疲劳损伤使弹性模量下降，进一步削弱了对运行轨迹的自我修正能力。这些结构和制造上的细节疏忽，不仅加剧皮带跑偏现象，还影响设备的安全性与使用寿命，成为运维管理中的突出隐患。

2.2 安装与调试工艺的不足

安装调试环节直接决定输煤皮带系统的起始状态和长期稳定性。实际工作中，若未能严格执行中心线测量、水平找正和支架牢固等工艺要求，极易造成设备整体或局部的偏斜，埋下跑偏隐患。托辊或滚筒的轴向、径向微小偏移，张紧装置受力不均，均会导致皮带受力分布失衡，在运行中表现为持续性或周期性偏移。皮带接头未能实现精确对中，张紧力设定过大或过小，都会影响皮带张力的均匀性，导致系统在启停、负载变化等工况下产生不可预知的偏移。调试阶段如果忽略托辊与皮带本体之间的适配性，以及润滑状态维护，微小误差将长期积累，最终演化为严重的跑偏问题。安装与调试质量的细微波动，往往是后续设备维护难度加大的根本原因，对生产效率和安全运行带来不容忽视的挑战。

2.3 运行环境与煤流分布的影响

火电厂输煤皮带所处的高温、高湿及多尘环境，为设备的长期平稳运行带来了多重考验。运行过程中，煤粉及杂物极易在托辊和滚筒表面积聚，导致转动阻力增大，支撑效果下降，局部托辊甚至可能失效，进而引发皮带偏移。煤流分布的不均或落煤管布局不合理，会造成皮带两侧载荷差异明显，张力分布失衡，加剧跑偏现象。设备在长期运行中，如遇托辊卡滞、表面损坏或异物卡阻，均可能在短时间内诱发局部甚至全线偏移。环境温度的剧烈波动，带来设备的热胀冷缩，进一步改变皮带的受力状态。煤流波动与皮带运行速度的复杂耦合作用，不断扰动皮带的受力平衡，增加自动纠偏的难度，对系统智能化运行和稳定性提出了更高要求。

3 现有输煤皮带纠偏技术评述

3.1 传统机械纠偏装置的应用与不足

传统机械纠偏装置如自动调心托辊、锥形托辊、限位轮等，主要依靠其结构自适应调节能力，通过皮带与托辊间的物理相互作用力，局部修正皮带的运行轨迹。这类装置在结构简单、易于布置的同时，能够在一定程度上缓解皮带的轻微跑偏问题。然而，实际运行中，托辊磨损、润滑条件不良及煤粉堆积等因素，都会削弱装置的调节灵敏度，导致纠偏效果有限。刚性限位轮虽能强行约束皮带位置，但易造成皮带边缘局部磨损甚至损伤。尤其在皮带长度不断增加、输送能力显著提升的现代火电厂，传统机械纠偏装置难以实现高精度、智能化的动态调整，表现出调节响应滞后、维护工作量大和长期运行稳定性不足等突出问题，难以满足安全高

效输送系统的实际需求。

3.2 电气与液压辅助纠偏方案的探索

为弥补传统机械纠偏装置响应滞后和调节精度不足的问题，部分火电厂开始应用电气与液压辅助纠偏系统。此类系统通常通过高灵敏度传感器实时监测皮带偏移量，利用智能控制器驱动自动调心滚筒或液压推杆等执行机构，主动修正皮带运行轨迹。电气纠偏具备响应速度快、调节精度高、适应复杂工况的优势，而液压系统则因其大力矩输出和优良的稳定性，适合应对重载、大型皮带输送场景。然而，这些高端系统存在投资成本较高、结构复杂、维护技术要求高等问题。在高粉尘、高湿度的火电厂输煤环境中，传感器和执行机构易受污染或腐蚀，影响整体运行的可靠性和寿命。因此，如何提升系统防护能力与自适应性能，减少故障发生，保障长周期安全运行，成为电气和液压纠偏技术持续发展的关键。

4 自适应智能纠偏装置的设计原理与关键技术

4.1 系统结构与工作原理

自适应智能纠偏装置综合运用了多传感器信息采集、智能控制算法以及高精度执行机构，实现对输煤皮带跑偏问题的动态感知与精准调节。系统主要由激光或红外位置检测单元、边缘计算模块、智能控制器和自适应执行机构组成。检测单元可对皮带边缘位置、张力等参数进行实时采集，并将数据传输至边缘计算模块进行初步分析。智能控制器则根据采集到的偏移量和趋势，结合运行工况及历史数据，生成最优调节指令，驱动步进电机、伺服液压装置等执行机构，对托辊或滚筒进行微调，实现高效纠偏。该系统能够自主识别多种异常工况，并具备在线学习和自适应优化能力，可以针对不同煤流变化、载荷波动等复杂扰动，自动调整调节策略，提升纠偏的智能化与可靠性，满足现代火电厂输煤系统的安全运行需求。

4.2 多传感器融合与数据处理

为保障系统对皮带运行状态的高精度、全方位监测，自适应纠偏装置采用激光、红外、超声波等多种类型传感器进行协同布置，实时获取皮带边缘位置、张力、速度及煤流分布等多维数据。所有采集信号首先经过边缘计算模块处理，完成初步滤波、去噪与特征提取，以剔除环境噪声和误差影响。多源信号融合后输入智能控制系统，采用神经网络、模糊控制等算法，实现对皮带真实跑偏信号与干扰信号的有效区分，提高了异常检测的准确率和系统鲁棒性。数据融合技术不仅增强了系统对复杂工况变化的适应力，也为后续的动态建模和设备故障预测提供了坚实数据基础，推动了输煤皮带纠偏管理向智能化、信息化和软硬件一体化运维迈进。

4.3 智能控制策略与执行机构优化

智能控制系统在多传感器融合数据的基础上，能够动态调整纠偏执行机构的动作幅度与响应速度，满足不同工况

下的纠偏需求。系统广泛应用自适应模糊控制、PID 调节等算法, 根据煤流、载荷及皮带速度的实时变化自动优化调节参数, 实现精准响应和能耗优化。执行机构多采用步进电机、伺服驱动或液压推杆等高性能组件, 并配备智能反馈装置, 能够实时监控调节效果, 防止过调或出现反向振荡等不良现象。高端装置还引入基于深度学习的预测模型, 提前预判皮带运行趋势, 动态修正调节路径。通过对执行机构结构和材料的不断优化, 显著提升了其环境适应性和运行耐久性, 为长周期、复杂工况下输煤系统的稳定纠偏提供了坚实保障。

5 自适应纠偏装置的工程应用与效果分析

5.1 典型火电厂现场应用案例

在实际工程应用中, 某大型沿海火电厂在其主输煤皮带线上全面部署了自适应智能纠偏装置, 取得了显著成效。该厂以往在多处关键区段存在皮带频繁跑偏、撒煤、堵塞等顽疾, 给运维带来极大压力。自智能纠偏系统投入运行后, 装置通过多类型传感器实时采集皮带运行数据, 智能控制模块动态分析偏移趋势并精准驱动执行机构, 实现对皮带轨迹的实时修正。运行数据显示, 传统系统皮带中心线平均每百米偏移 12mm, 应用智能纠偏装置后, 偏移量降低至 3mm 以下, 撒煤和皮带磨损问题明显改善。智能报警和远程诊断功能大幅提升了故障发现和响应速度, 使技术人员能在第一时间内制定维修决策, 降低了人工巡检频率和非计划停机次数。设备维护周期由原来的每月两次延长至季度检查, 减少了维护工作量和备品备件消耗。系统运维效率提升显著, 保障了燃料连续稳定供应, 推动了厂区煤炭物流数字化管理进程。该案例充分验证了自适应智能纠偏装置在复杂工况下的适用性和经济性, 为行业提供了可复制的示范经验。

5.2 性能测试与运行可靠性分析

为全面评估自适应智能纠偏装置的技术优势, 相关团队对装置的核心性能进行了多轮实验和实地测试。首先, 传感器灵敏度测试结果显示, 在高粉尘、高湿环境下, 激光与红外双重监测依然可精准捕捉皮带边缘细微偏移, 灵敏度高于传统单一检测手段。控制系统响应时间普遍小于 0.8 秒, 能在皮带发生初始偏移时迅速介入调节, 极大降低了偏移发展为系统性故障的风险。执行机构的微调精度达到 2mm 以内, 保证了长距离、大载荷皮带的平稳运行。现场试验还发现, 装置在不同煤流分布、皮带速度和负载变化条件下, 均展现出良好的自适应调节能力和工作稳定性。设备长期运行

期间, 托辊和执行机构的磨损速率显著降低, 维护工作量减少, 平均无故障工作时间 (MTBF) 较以往提升约 20%。多项测试数据表明, 自适应智能纠偏装置在技术性能和运行可靠性方面均处于行业领先水平, 能够为火电厂实现精细化、智能化管理提供坚实技术支撑。

5.3 经济与社会效益评价

自适应智能纠偏装置的推广应用, 为火电厂带来了显著的经济效益和社会价值。在经济层面, 系统有效降低了因皮带跑偏引发的设备故障和非计划停机, 节省了大量维修费用和备件消耗。输煤系统稳定性提升, 保障了锅炉燃料连续供应, 提升了机组出力和供电可靠性, 进而增加了电厂的经济效益。设备维护周期的延长与智能预警系统的辅助, 显著降低了一线工人的劳动强度和检修风险, 实现了降本增效。社会层面, 智能纠偏装置提升了煤炭输送自动化和信息化水平, 减少了因撒煤、堵塞等问题造成的环境污染和安全事故, 推动了能源行业向安全、高效、绿色方向发展。智能运维平台的建设与大数据分析能力的提升, 为煤炭物流管理的数字化、智慧化转型提供了强有力的支撑。

6 结语

火电厂输煤皮带跑偏作为系统安全与效率的核心隐患, 成因复杂、治理难度大。本文系统分析了结构、工艺、环境等多维因素, 评述传统纠偏技术局限, 提出基于多传感器智能感知和自适应控制的新型纠偏装置设计。现场应用与实验数据表明, 该装置响应速度和调节精度显著提升, 有效降低非计划停机率与运行成本, 为燃料系统安全高效运行提供了保障。随着工业物联网与智能制造发展, 自适应智能纠偏系统将在火电厂及更多工业场景广泛应用, 推动行业智能化与绿色升级。

参考文献

- [1] 谢敏, 刘洪军, 李磊. 基于卷积神经网络的火电厂输煤皮带偏移与撕裂识别技术研究[J]. 中国战略新兴产业, 2025,(15):164-169.
- [2] 李虎, 王哲. 火电厂输卸煤燃料系统多维度无人值守综合监控平台设计研究[J]. 中国高新科技, 2025,(14):13-15.
- [3] 胡伟. 火电厂燃煤输送系统机械设备维护工艺研究[J]. 现代制造技术与装备, 2025,61(02):142-144.
- [4] 姜尧, 张艳宾, 马文韬, 等. 智慧化巡检技术在火电厂输煤栈道的应用与优化设计[J]. 中国高新科技, 2024,(21):120-122.
- [5] 何明. 输煤系统输煤皮带机常见故障诊断与检修探析[J]. 内蒙古煤炭经济, 2024,(06):112-114.

Evolution of hot research topics in civil-military integration in space

Tong Yang Hongbo Dong Yunfeng Lu

Aerospace University, Beijing, 101400, China

Abstract

The strategy of military-civilian integration has been confirmed as a national strategy since 2015 and then been deepened as integrated national strategies and strategic capabilities in 2017. The aerospace sector is one of the key sectors driving the development of military-civilian integration in the defense science and technology industry, and it is also an emerging field for consolidating and enhancing the integrated national strategies and strategy capabilities. We examined the evolution of research hotspots related to military-civilian integration in the aerospace sector based on publicly available literature from CNKI since 1990, employing emergent and clustering analysis methods in bibliometrics. We outlined the characteristics and trends of the research. It indicated that relevant researches can be broadly categorized into four phases: before 2000, 2000—2015, 2015—2018, and 2019 onwards. Overall, these studies reveal a shift driven by policy direction—transitioning from a one-way military-to-civilian conversion toward deeply military-civilian integration, and evolving from aerospace technology-driven industry development to enhanced systematic design.

Keywords

aerospace, military-civilian integration, integrated national strategies and strategic capabilities, bibliometrics

太空领域军民融合研究热点演变

杨彤 董鸿波 陆云峰

航天工程大学, 中国 · 北京 101400

摘要

军民融合自2015年上升为一项国家战略,后又于2017年深化为一体化国家战略体系和能力。太空领域是推动国防科技工业军民融合深度发展的重点领域之一,也是巩固提高一体化国家战略体系和能力的新兴领域。本文基于1990年以来CNKI公开发表的文献资源和文献计量的突现和聚类分析方法,探究太空领域军民融合相关研究热点的演变,梳理我国在该领域研究的趋势特征。结果表明相关研究主要分为2000年以前、2000—2015年、2015—2018年、2019年以后四个阶段,整体呈现出在政策牵引下,由单向的军转民向军民深度融合转变、由航天技术驱动发展向系统化顶层设计提升的特征。

关键词

太空;军民融合;一体化国家战略体系与能力;文献计量

1 引言

随着新一轮科技革命快速发展,战争空间向太空、电磁、网络等新兴领域拓展,特别是太空已经成为大国博弈的焦点、国家安全的“高边疆”。2015年习近平首次提出将“军民融合发展上升为国家战略”,强调包括太空在内的军民共用性强的新兴领域贯彻军民融合发展理念。2017年6月,习主席在中央军民融合发展委员会第一次全体会议上首次提出,“逐步构建军民一体化的国家战略体系和能力”的重大命题。后在党的十九大报告中提出“坚持富国和强军相统一……形成军民融合深度发展格局,构建一体化的国家战略体系和能力”。

构建一体化的国家战略体系和能力的思想,是我党在军民深度融合的基础上,首次提出的宏大战略思想。实施军民融合发展战略是构建一体化国家战略体系和能力的必然选择。太空领域不仅是武器装备发展的制高点,推动航天科技创新和产业结构转型的新空间,更是推动形成全要素多领域高效益的军民融合深度发展格局,巩固和提高一体化国家战略体系和能力的关键阵地。

文献计量是追踪某一领域研究热点和发展动向,把握科研方向的重要工具。长期以来,我国学者对航天技术的“军民两用”“军转民”等相关问题进行研究,形成了一系列的研究成果,其中不乏综述性文章,但缺少文献计量角度的分析。本研究以公开发表在CNKI上的文献资料为数据源,借助CiteSpace软件,采用聚类分析、突现分析等文献计量方法,挖掘有记录以来该领域的研究热点并进行可视化,揭示研究热点的演化轨迹和发展趋势,以期为我国加快太空领域军民

【作者简介】杨彤(1996-),女,中国山西阳泉人,博士,讲师,从事公共管理研究。

深度融合、巩固和提高一体化国家战略体系和能力相关研究提供参考。

2 数据与方法

本研究的来源为 1990—2025 年期间公开发表的、被 CNKI 收录的期刊文献、学术论文、报纸文章等，检索日期为 2025 年 9 月 16 日。按照“太空领域相关主题词 + 军民融合及其相关主题词”设计检索词进行检索。其中，太空领域相关主题词包括太空、航天、卫星、遥感、星座、星群等；军民融合及其相关主题词包括军民融合、军民一体化、军民结合、军民两用、寓军于民、军转民、民参军。考虑到一体化国家战略体系与能力是与军民融合战略一脉相承的战略思想，因此军民融合相关主题词也包括一体化国家战略体系与能力、一体化的国家战略能力。经人工筛选剔除不相关文献，共检索到 772 条有效记录，其中期刊文章 584 篇，学位论文 108 篇，报纸文章 36 篇，会议文章 37 篇，其他文献 7 篇（图 1）。

本研究利用 CiteSpace 软件进行文献计量分析。我们对文献做了以下预处理：一是利用 CiteSpace 软件转换中文文献格式；二是对于缺少摘要和关键词的报纸文章和部分期刊文章，根据原文内容，通过人为判读结合人工智能工具的方式为添加 300 字左右的摘要和 3-5 个关键词。参数设置文本处理的词汇来源为主题、摘要和关键词字段，以下统称为“主题词”。突现分析可以用来探测某一个主题词在某一段衰落或者兴起的情况。聚类分析是指按照相似性将分析对象集合分组为多个类的过程。聚类的质量可以通过 Q 值和 S 值来评估，一般认为 Q 值大于 0.3 和 S 值大于 0.5 意味着聚类结果是合理的。

3 主题词时序演变

图 1 展示了 1990 年以来太空领域军民融合相关研究的发文量。相关研究发文数量在 2018 年达到 118 篇的峰值，在 2015—2020 年发文数量呈现大高峰，且分别在 1995、2000、2010 年前后形成小高峰。

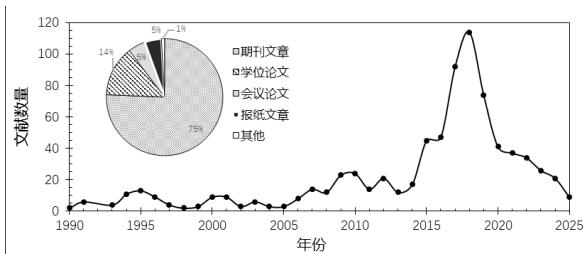


图 1 1990—2025 年太空领域军民融合相关研究发文数量

从 1990—2025 年主题词突现情况（图 2）可以看出，太空领域军民融合相关研究最早是以“军民结合”或“军转民”的概念出现（1990 年），1996 年首先以太空领域“军民融合”作为主题被研究。大致可以分为 1990—2000 年、

2000—2015 年、2015—2018 年和 2018—2025 年四个阶段。

90 年代的相关研究以“军民结合”和“军转民”为主线，二者分别在 1990—2011、1990—2008 年间是相关研究的热点，强调航空航天工业从军用为主向军民结合、以民养军，参与市场经营^[1, 2]。1995 年开始，“军民两用”一词被频繁讨论。这一时期研究受到改革开放以来政策的影响。从十一届三中全会确立以经济建设为中心的基本路线，要求国防和军队建设服从和服务于国家经济建设大局以来，20 世纪 80 年代，我国国防工业的指令性军工科研任务锐减，大量国防工业企业生产设备闲置、人力过剩。1982 年，邓小平指出国防工业“军民结合、平战结合、军品优先、以民养军”的十六字方针。这一时期军民结合集中地体现在军转民的单向驱动上，这符合先把经济建设搞上去的国家建设总目标^[3]。90 年代，随着国际战略格局演变，经济建设和国防建设成为我国现代化建设中两大战略性任务。江泽民指出“寓军于民，是把这两项战略性任务有机统一起来的重要举措”。民用工业能力和民营经济的发展开始加入到军工生产行列，即“民参军”打破了军工行业的军民分立发展的状况。但从文献角度看，该时期并未明显有太空领域“民参军”相关主题研究的突现，这是因为我国民用航天领域在该时期尚未形成规模，航天领域仍处于以军为主，进一步发展民品的阶段，航天军转民开始走向规模经济和高技术附加值的道路，提出了汽车、计算机、应用卫星三大支柱民品的发展战略^[4]。

进入 21 世纪，我国社会主义市场经济体制不断完善、胡锦涛明确指出“建立和完善军民结合、寓军于民的武器装备科研生产体系、军队人才培养体系和军队保障体系……走出一条中国特色军民融合式发展路子”。太空领域军民融合相关研究在“产业化”、“技术转移”等方面展开，利用航天领域在信息技术、新材料、新能源等军民两用技术方面的优势，促进高技术发展^[5, 6]，构建军民一体化的产业结构^[10, 11]，推动国家整体经济实力增长。

2015 年明确将“军民融合”上升为国家战略之后，研究主题词逐渐统一为“军民融合”一词。2015—2019 年前后以军民融合、转型升级、商业航天、技术创新等为主，逐渐关注点提升至军民融合发展模式^[9, 10]、体制机制^[11, 12]、产业化集群^[13-15]等更加具有顶层筹划意味的主题上来。同时，由航天技术军民两用扩展到通信^[16, 17]、商业航天^[18, 19]、微小卫星和卫星导航^[20, 21]、新能源^[22]等广泛领域。

2017 年，习近平在中央军民融合发展委员会第一次全体会议上指出，要‘逐步构建军民一体化的国家战略体系和能力’。一体化，实际上就是实现军民深度融合时所达到的一种状态。军民融合深度发展是推动一体化国家战略体系与能力构建的重要路径^[23]。从 2018 年开始，学术界逐渐出现军民融合与一体化国家战略体系和能力相关理论研究^[24-26]，也针对航天企业军民一体化发展模式改进^[27]、通导遥等航

天技术向应急管理、物联网、空天信息智能服务等领域扩展等应用实践进行探讨^[0, 29, 30]，但研究较为分散，并未形成主题词突现。

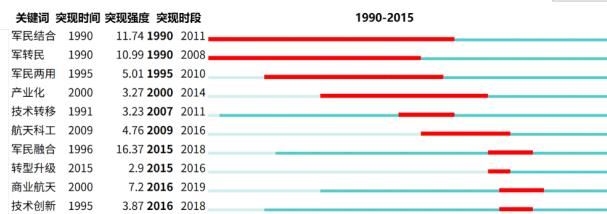


图 2 1990—2025 年 TOP10 主题词突现情况

4 主题词聚类特征

主题词聚类结果如图 3，Q 值为 0.53，S 值为 0.64，结果合理。太空领域相关研究围绕“军民融合”主要有八大主题，按照聚类中包含关键词（节点）数量多少顺序，分别是军民融合、技术创新、军民结合、军转民、技术转化、航天、航天企业、航天事业和弹性。军民融合聚类中，被引频次最高的是政策法规、发展战略、一体化、转型升级等主题词，以解读军民融合和一体化国家战略体系和能力相关理论研究、以及在军民融合政策背景下的企业产业发展战略、卫星大数据综合应用、航天装备保障等。

按照聚类中主题词年份顺序，分别是航天事业（2000 年以前）、军民结合、军转民（2000—2015 年）、军民融合、技术创新、技术转化、航天、航天企业（2015—2019 年）、弹性（2020 年以后）。航天事业聚类以国防工业“十六字方针”为核心展开航天军品技术优势分析和军转民研究。军民结合和军转民聚类以航天技术产业化、军转民促进民品发展为主。技术创新聚类集中于卫星、商业航天、资产证券化等军民两用技术创新；技术转化聚类以航天科技的产业发展、资源配置、军地协同创新等为主；航天企业聚类体现了这一时期军工企业需求军民一体化发展模式改革和业务扩展；航天聚类体现了航天领域对国际合作的更多关注。2020 年以来，弹性聚类体现了对太空安全领域的重视，关注美国太空政策变化，强调深化军民融合激发商业航天的创新力和灵活性，以提升太空感知能力。

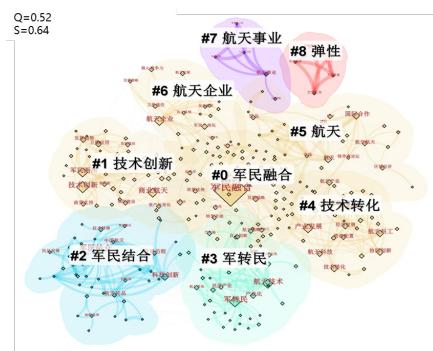


图 3 1990—2025 年主题词聚类情况

5 小结：太空领域军民融合研究的演变特征和趋势

太空领域军民融合研究演变特征和趋势可以总结为以下三点。一是由单向“军转民”到双向“军民深度融合”演进。从主题词演变阶段可以看出，相关研究从以军用技术溢出为主的单向“军转民”逐渐向体制改革、机制创新、多源融资等军民双向互动的军民深度融合转变。二是由底层航天技术驱动发展向系统化顶层设计提升。早期研究聚焦航天领域军民两用技术的挖掘，关注航天技术的军转民应用，以促进民品产业发展。后期逐渐提升到军民融合顶层设计方面，包括政策法规、发展战略、发展模式、产业集群等。同时，关注商业航天、导通遥一体化、卫星物联网等新兴民商领域，强调构建一体化国家战略体系和能力。三是政策导向牵引热点趋势。整体上太空领域军民融合研究热点受到政策导向，1990 年代受“十六字方针”驱动，研究围绕军转民；2000 年后呼应“寓军于民”政策，探索军民两用技术；2015 年军民融合国家战略确立后，集中探索军民融合发展模式；2017 年一体化国家战略体系与能力提出后，向太空安全、国际合作等领域扩展。2020 年后“弹性”聚类的出现表征了对太空安全的关注，在一体化国家战略体系与能力的思想指引下，太空领域军民融合研究可能进一步向巩固和提高国家一体化战略体系和能力服务，向智能化、全球化延伸。

参考文献

- [1] 董德馨. 军转民、内转外对航空航天工业的管理和科技人员的新要求[J]. 国防科工委继续工程教育, 1990(02):38-39.
- [2] 辛黎升, 张开宾. 航天产业向民用工业的转移[J]. 军民两用技术与产品, 1991(07):1-4.
- [3] 孙力, 王莺. 军民融合战略的历史演进及内在逻辑[J]. 中国浦东干部学院学报, 2018, 12(2):68-76.
- [4] 谭邦治. 对航天军转民军民结合的回顾与思考(上)[J]. 航天技术与民品, 2000(03):1-4.
- [5] 江海容. 基于产业链构建的军民两用卫星技术转移研究[D]. 南京航空航天大学, 2009.
- [6] 刘凡. 军民两用技术转移视角下长三角区域产业结构升级研究[D]. 南京航空航天大学, 2009.
- [7] 张箐. 产业融合视角下战略性新兴产业军民融合发展模式研究[D]. 北京理工大学, 2015.
- [8] 李枫, 马前进. 航天制造企业军民融合发展模式探索与实践[J]. 军民两用技术与产品, 2016(23):44-47.
- [9] 李楠, 马忠成. 航天军工企业走军民融合道路策略探索[J]. 卫星应用, 2015(03):61-63.
- [10] 沈益平, 刘杰奇, 张朋. 军工科研院所践行军民融合典型案例——北京航天发射技术研究所探索军民融合发展的经验与体会[J]. 中国航天, 2017(10):29-31.
- [11] 胡红安, 李洋. 我国军民融合产业集群竞争力提升因素分析——以西部航空航天制造业集群为例[J]. 科技进步与对策,

- 2014,31(08):120-125.
- [12] 张永军. 军民融合多元化集群化发展[J]. 西部大开发, 2016(09):62-63.
- [13] 景越. 军民融合背景下航空航天产业集群的区域经济耦合效应研究[D]. 西安财经大学, 2021.
- [14] 李广侠, 杜锋. 卫星移动通信的军民融合与发展[J]. 卫星应用, 2015(10):7-12.
- [15] 徐亚冲, 赵越. “军民一体化”应急体系下新型协作通信应用模式研究[J]. 移动通信, 2015,39(06):51-55.
- [16] 郝志松, 高芳. 军民融合助力下的商业航天蓄势待发[J]. 情报工程, 2017,3(04):32-38.
- [17] 何颖. 从太空探索技术公司的成功看中国商业航天发展之路[J]. 卫星与网络, 2018(12):22-25.
- [18] 李晓箭. 加强军民融合促进微小卫星产业发展增强国家太空体系健壮性[J]. 国防科技, 2016,37(01):1-3.
- [19] 杨建飞. 中国北斗卫星系统军民协同融合的机理、路径与政策选择[J]. 金融经济, 2016(10):25-27.
- [20] 滕冀. 银隆新能源:打造军民融合战略下国防建设的实力之钛[J]. 人民公交, 2016(11):71.
- [21] 石宁, 王涛, 陈小炜. 基于一体化国家战略体系和能力推动军民结合深度发展的研究[J]. 中国军转民, 2025(15):65-66.
- [22] 王莺, 孙力. 军民融合与国家战略体系的一体化[J]. 理论与改革, 2018(04):70-78.
- [23] 廉振宇, 顾桐菲, 薛奇, 等. 一体化国家战略体系和能力研究——概念、框架与构建途径[J]. 科学学研究, 2023,41(04):615-622.
- [24] 薛武, 丰松江, 张占月, 等. 太空安全领域一体化国家战略体系和能力发展的思考[J]. 中国航天, 2024(03):32-36.
- [25] 朱昕晨. 航天制造型企业军民一体化发展研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2016.
- [26] 李德仁. 论军民深度融合的通导遥一体化空天信息实时智能服务系统[J]. 网信军民融合, 2018(12):12-15.
- [27] 张博, 胡娟, 桂振文. 面向军民融合的卫星物联网系统和应用研究: 第十七届卫星通信学术年会[C], 中国北京, 2021.

Automotive eHMI Interaction Design: Current Status, Challenges and Future Trends

Zhe Chen

Beijing University of Technology, Beijing, 100144, China

Abstract

As autonomous driving advances to L3 and beyond, the external human-machine interface (eHMI) has become pivotal in ensuring hybrid vehicle safety and enhancing human-vehicle collaboration efficiency. This paper reviews relevant research and case studies, systematically analyzing the current status of eHMI technology implementation, design principles, and effectiveness evaluation, while addressing core challenges including standardization gaps and insufficient multi-user interaction compatibility. The study reveals that eHMI is transitioning from “single-function transmission” to “multimodal intelligent interaction,” and from “vehicle-centric” to “user experience-oriented” approaches. Future development will focus on four key directions: AI-driven personalized interactions, AR and multimodal integration, multi-user collaborative interaction, and trust-building through affective computing.

Keywords

automotive eHMI; interaction design; current status; trends; human-machine interaction

汽车 eHMI 交互设计：发展现状、挑战与未来趋势

陈哲

北方工业大学，中国 · 北京 100144

摘要

随着自动驾驶迈向L3及以上级别，汽车外部人机交互界面（eHMI）成为保障混合交通安全、提升人车协同效率的核心。本文梳理相关研究与案例，系统分析 eHMI 的技术实现、设计原则及有效性评估现状、面临的标准化缺失、多用户交互适配不足等核心挑战。研究显示：eHMI 正从“单一功能传递”转向“多模态智能交互”、从“车辆中心”转向“用户体验导向”，未来将聚焦AI互动个性化、AR与多模态融合、多用户协同交互及情感计算信任构建四大方向。

关键词

汽车EHMI；交互设计；现状；趋势；人机交互

1 引言

随着自动驾驶技术的快速发展，汽车正从传统交通工具向智能移动空间转变，汽车外部人机交互界面（External Human-Machine Interface, eHMI）作为连接自动驾驶车辆与行人、其他道路使用者的重要媒介，其设计与优化日益受到关注。与传统车内 HMI 不同，eHMI 主要面向车外人员，通过视觉、听觉等多种方式传达自动驾驶车辆的意图、状态和决策，以建立有效的人车交互关系。

在当前混合交通环境中，自动驾驶车辆与人类驾驶者、行人等共存，eHMI 设计直接影响道路交通安全与效率。研究表明，优质的 eHMI 能显著提升行人对自动驾驶车辆的信任度和接受度，减少交互中的不确定性与冲突。然而，目前 eHMI 设计仍面临信息表达方式标准化、不同交通场景适应

性、多用户交互复杂性等诸多挑战。

本文系统梳理汽车 eHMI 交互设计的发展现状，分析其核心技术与设计原则，探讨未来发展趋势，为相关研究与实践提供参考，重点关注 eHMI 的信息编码方式、动效设计、位置布局等关键要素及其对人车交互有效性和安全性的影响。

2 汽车 EHMI 发展现状

2.1 eHMI 的概念与功能定位

汽车 eHMI 是自动驾驶车辆外部用于与车外人员交互的界面系统，核心功能是向行人、非机动车驾驶者等传达车辆的状态、意图和决策信息。与传统车内 HMI 相比，其设计需兼顾外部环境复杂性、多用户交互特点及信息传达的即时性与准确性。

根据国际标准化组织（ISO）定义，自动驾驶车辆需通过 eHMI 传达行驶状态、让行状态和重新开始行驶状态三种主要状态，这些信息的有效传达对行人与自动驾驶车辆的安

【作者简介】陈哲（2001-），男，中国山东曹县人，硕士，从事交互设计、汽车设计、ehmi研究。

全交互至关重要。研究显示,清晰明确的 eHMI 设计能显著提升行人对车辆意图的理解能力,减少交互不确定性与潜在冲突^[1]。从功能定位看,eHMI 首先要保障车辆状态的透明度,帮助行人理解自动驾驶车辆;其次需传达车辆让行、继续行驶等意图,引导行人做出正确决策;同时通过人性化设计建立情感连接,增强行人对自动驾驶车辆的信任感与接受度。

2.2 eHMI 设计核心原则与技术表现形式

基于现有研究,eHMI 设计已形成系列核心原则,德国航空航天中心(DLR)研究团队提出的 17 条原则涵盖“如何通信”与“何时通信”两大维度:“如何通信”需遵循清晰性与明确性、通信副作用考量、一致性及 dHMI 与 eHMI 一致性;“何时通信”则要求车辆处于 SAE L3 及以上级别时永久传达驾驶模式、在混合交通环境中主动传达行驶意图、与弱势道路使用者交互时优先启用 eHMI,为系统开发提供系统性指导。当前 eHMI 技术实现以视觉显示为核心,同时探索多模态融合,依据显示特点分为多种类型:灯光带显示、文本显示、图标/符号显示、投影显示及生物运动显示(通过点光源模拟动物运动传递意图,利用人类对生物运动的敏感性提升理解效率),且视觉与听觉融合能提升信息传达效果。

2.3 eHMI 的有效性评估研究

现有研究采用多种方法,从多个关键维度评估 eHMI 的有效性。理解准确性是重要评估指标,主要考察行人对 eHMI 传达信息的理解程度,研究表明,文字编码的 eHMI 在理解准确性上通常优于图标编码,具象图标又优于抽象图标。

反应时间是核心评估内容,即行人对 eHMI 信号做出反应的时长。研究发现,视线受限情况下,设计优良的 eHMI 可显著缩短驾驶员反应时间,提升安全性。

信任度与接受度评估聚焦行人对 eHMI 传达信息的信任程度及对自动驾驶车辆的接受程度,研究显示,eHMI 的透明度和一致性是影响信任的关键因素。满意度评估关注行人对 eHMI 设计的主观感受,相关研究发现,行人对文字编码的 eHMI 满意度普遍高于图标编码,尤其当文字以行人中心视角表达时(如“请您通行”而非“我让行”)。

交互效率评估主要衡量 eHMI 促进车辆与行人高效交互的能力,研究表明,适时的 eHMI 通信能提高行人与车辆交互的效率和可预测性。

2.4 eHMI 设计面临的主要挑战

尽管 eHMI 研究取得显著进展,但仍面临诸多挑战,制约其广泛应用与效果优化。标准化问题突出,当前不同制造商的 eHMI 信号差异明显,甚至相互矛盾,导致行人难以建立统一心理模型理解自动驾驶车辆行为^[2]。

复杂交通环境中,过多 eHMI 信号可能引发信息过载,增加行人认知负担,反而降低交互效率。文化差异给 eHMI 设计带来难题,不同文化背景的行人对符号、颜色和动效的

理解可能存在差异,不利于 eHMI 全球化应用^[3]。

自动驾驶车辆常需同时与多名行人交互,但现有研究多聚焦单车单人交互场景,对多用户交互的复杂性考虑不足。eHMI 需根据光照、天气等环境条件、交通场景及用户特征动态调整,以确保信息可感知性与有效性,而当前 eHMI 在适应性与动态调整方面仍有欠缺。

信任校准问题不容忽视,eHMI 需平衡透明度与复杂性,过度透明可能导致信息过载,透明度不足则可能降低信任度,如何实现有效信任校准是当前研究热点。

3 汽车 EHMI 交互设计的发展趋势

3.1 人工智能驱动的个性化 eHMI

人工智能技术的快速发展深刻改变 eHMI 设计范式,推动其从标准化向个性化、从被动响应向主动交互转变,在多方面展现变革作用。

在用户特征识别与适应上,借助计算机视觉和传感器技术,eHMI 系统可识别行人年龄、性别、身体状态等特征,并据此调整信息呈现方式。例如,针对儿童或老年人,eHMI 可能采用更大字体、更简单符号和更明显动效^[4]。

基于机器学习算法,eHMI 系统能分析行人行为模式,预测其意图并主动提供相关信息。比如,当系统检测到行人有过街意图时,可提前显示让行信号,减少交互延迟^[5]。

AI 技术还赋予 eHMI 个性化内容生成能力,能根据用户偏好和历史交互数据生成个性化交互内容。例如,系统可学习特定用户对信息呈现方式的偏好,动态调整文本风格、颜色方案和动效类型。

结合情感计算技术,eHMI 可识别行人情绪状态,并相应调整交互策略。例如,面对焦虑的行人,系统可能采用更柔和的颜色和更舒缓的动效,以缓解其压力。研究表明,AI 驱动的个性化 eHMI 能显著提升用户体验与交互效率,增强用户对自动驾驶系统的信任,但个性化也带来隐私保护和算法偏见等挑战,需在设计中重视并解决。

3.2 多模态交互与增强现实技术融合

多模态交互与增强现实(AR)技术的融合应用,正成为 eHMI 发展的重要趋势,为车辆与行人交互提供更自然、直观的方式,在多维度展现独特价值。

多模态信息融合打破单一模态信息呈现局限,有机结合视觉、听觉、触觉等多种模态,有效提升信息传达效率与准确性。研究表明,这种融合方式能降低单一模态的疲劳度和认知负荷,增强用户对复杂信息的理解能力。

增强现实抬头显示(HUD)技术可将 eHMI 信息直接投射到驾驶员视野中,实现信息无缝融合,既提高信息可感知性,又减少驾驶员注意力分散。环境投影技术借助车辆前大灯或专用投影设备,将 eHMI 信息投射到路面或周围环境,打造动态、情境化的交互界面,尤其适用于无明确人行横道路口等复杂或非标准交互场景。

基于生物运动特征的交互方式是最新研究方向, 通过分析行人步态和身体语言识别其意图, 进而调整车辆行为; 同时, eHMI 也可通过模拟生物运动模式传达车辆意图, 利用人类对生物运动的天生敏感性提升交互效率。

多模态交互与 AR 技术的融合为 eHMI 设计提供更多可能, 但也带来交互复杂性增加和认知负荷管理等挑战, 未来研究需探索如何在不增加用户负担的前提下, 充分发挥多模态交互的优势。

3.3 基于情感计算的信任构建机制

信任是自动驾驶技术广泛应用的关键因素, eHMI 在建立和维持用户信任方面发挥重要作用, 基于情感计算的信任构建机制正成为 eHMI 设计的重要趋势, 涵盖多个关键环节。

通过分析行人面部表情、语音特征和生理信号, eHMI 系统可识别用户情绪状态, 并相应调整交互策略。例如, 面对焦虑的行人, 系统可能采用更柔和的颜色和更舒缓的动效, 以减轻其压力, 这是情感识别与反馈在信任构建中的具体应用^[4]。

eHMI 还将提供更多关于车辆决策过程和环境感知结果的信息, 帮助用户理解系统行为的原因和逻辑。研究表明, 透明度是建立信任的关键因素, 体现了透明度与可解释性的重要价值。

eHMI 传达的信息需与车辆行为高度一致, 并在不同情境下表现出可靠的行为模式, 这种一致性有助于建立稳定的心理模型, 增强用户信任, 是一致性与可靠性原则的核心要求。

不同用户对自动驾驶系统的信任水平和影响因素各不相同, 未来 eHMI 将能根据用户特征和历史交互数据, 提供个性化的信任校准策略。例如, 对技术持怀疑态度的用户可能需要更多的系统状态信息和解释, 即便最先进的自动驾驶系统也可能出现错误或意外情况, 因此 eHMI 需设计有效的错误处理和恢复机制以维持用户信任。研究表明, 透明的错误解释和负责任的恢复策略能够减轻信任损伤。

基于情感计算的信任构建机制, 让 eHMI 不仅具备信息传达功能, 更能建立情感连接, 切实增强用户对自动驾驶系统的接受度和信任, 这一趋势深刻反映了人机交互从功能性向情感性的转变方向。

3.4 多用户协同交互设计

自动驾驶车辆往往需要同时与多个行人进行交互, 这种多用户场景下的协同交互设计正成为 eHMI 研究的重要方向, 在多个层面展现出独特的设计需求和研究重点。

研究表明, 群体行为会显著影响个体对 eHMI 的理解和反应, 因此未来 eHMI 设计需要充分考虑群体动力学因素, 包括社会影响、从众行为和信息传播机制等, 以更好地适应多用户交互场景。先进的 eHMI 系统应具备多目标信息定向能力, 能够识别多个目标用户, 并向不同用户定向传达不同的信息, 例如车辆可以向左侧的行人显示“请通行”, 同

时向右侧的行人显示“我正在停车”。

未来 eHMI 不仅要传达车辆意图, 还应承担起支持多方协同决策的功能, 比如在复杂路口, eHMI 可以与行人的移动设备交互, 协商最佳的通行顺序和方式。eHMI 设计还需更加注重融入当地的社会规范和非正式交通规则, 例如在不同文化背景下对优先权的不同理解, 这种文化敏感性有助于提高 eHMI 的有效性和接受度。

4 结论

本研究系统梳理汽车 eHMI 交互设计的发展现状与趋势, 得出一系列关键结论。

设计原则层面, eHMI 已形成涵盖“如何通信”与“何时通信”的核心原则体系, 清晰性、一致性、副作用考量等原则为系统开发提供全面且系统的指导, 确保 eHMI 在实际应用中的安全性与有效性。

技术实现方面呈现多样化特征, 灯光带显示、文本显示、图标/符号显示、投影显示及生物运动显示等多种形式各有优势与适用场景, 同时视觉与听觉等多模态融合应用逐步推进, 进一步提升了信息传达的效率与准确性。

有效性评估体系已趋于多元, 从理解准确性、反应时间到信任度、满意度、交互效率等多个维度, 为 eHMI 设计优化提供扎实的实证依据, 不同编码方式的 eHMI 在各评估指标上呈现出差异化表现。

然而, eHMI 设计仍面临诸多挑战, 标准化缺失导致不同制造商信号差异明显, 信息过载、文化差异、多用户交互复杂性、动态适应性不足、信任校准难题等, 共同制约着 eHMI 的广泛应用与效果优化。

未来发展趋势清晰明确, AI 驱动的个性化交互、多模态与 AR 技术融合、从驾驶员中心到乘客中心的设计转变以及基于情感计算的信任构建机制, 将成为 eHMI 交互设计的核心发展方向, 推动其从单一功能向多功能、静态向动态、车辆中心向用户中心持续演进。

参考文献

- [1] Tan, Z., Tian, S., Yang, Z., Li, C., Luo, C., et al. (2024). The Interaction Effects of Autonomous Vehicle Deceleration Style and Ehmi Presence on Pedestrian Crossing Intentions in the Chinese Traffic Environment. SSRN.
- [2] Wilbrink, M., Cieler, S., Weiß, S. L., Beggiato, M., Joisten, P., et al. (2023). Principles for External Human-Machine Interfaces. Information.
- [3] Zheng, N., Li, J., Zhang, Y., & Tei, K. (2025). Exploring the Impact of eHMI Display Location and Vehicle Type on Pedestrian Perceptions: A VR User Study. IEEE Access.
- [4] 吴泽鹏. (2024). 基于情境意识的自动驾驶车辆与行人交互场景下的 eHMI 设计研究. 北京交通大学.
- [5] 李芷洁. (2025). 基于 AHP 的汽车车外人机交互设计研究. 《鞋类工艺与设计》.

Research on Intelligent Applications for Liquefied Petroleum Gas Terminals Based on the Kunlun Large Model

Jingui Zhou¹ Zhe Li² Lingxiang Li³ Xicheng Liu⁴

1. China National Petroleum Corporation (CNPC) Natural Gas Sales Guangxi Branch, Nanning, Guangxi, 530022, China

2. Sales Branch of China National Petroleum Corporation, Beijing, 100000, China

3. Guangxi CPC Kunlun Energy Co., Ltd., Nanning, Guangxi, 530022, China

4. PetroChina Kunlun Gas Co., Ltd. Guangxi Branch, Nanning, Guangxi, 530022, China

Abstract

Liquefied petroleum gas (LPG), as an important clean energy source, faces many challenges in the terminal industry in supply chain management, safety production, steel cylinder traceability, customer service, and data integration. Traditional operating models and information technology methods are no longer suitable for the digital transformation needs of modern energy enterprises, and new technological breakthroughs are urgently needed. In February 2025, China National Petroleum Corporation (CNPC) released the first large-scale model in the energy industry, the “Kunlun Model,” providing key technical support for the intelligent upgrading of LPG business. This article conducts in-depth research on the application of this model in the LPG terminal industry and proposes six intelligent solutions. Research has confirmed that relying on the “Kunlun Model” to promote intelligent transformation is an effective way for the LPG terminal industry to respond to challenges and achieve high-quality development, and has important reference value for promoting the digitalization process of the energy industry.

Keywords

Kunlun Model; Liquefied petroleum gas terminal; artificial intelligence; Digital transformation; Digital twins.

基于昆仑大模型的液化石油气终端行业智能应用研究

周锦贵¹ 李喆² 李凌翔³ 刘熙成⁴

1. 中国石油天然气股份有限公司天然气销售广西分公司, 中国·广西南宁 530022

2. 中国石油天然气股份有限公司销售分公司, 中国·北京 100000

3. 广西中油昆仑能源有限公司, 中国·广西南宁 530022

4. 中石油昆仑燃气有限公司广西分公司, 中国·广西南宁 530022

摘要

液化石油气 (LPG) 作为重要清洁能源, 其终端行业在供应链管理、安全生产、钢瓶溯源、客户服务及数据融合等领域面临诸多难题, 传统运营模式与信息化手段已无法适配现代能源企业数智化转型需求, 亟需新技术突破。2025 年 2 月, 中国石油发布能源行业首个大模型——“昆仑大模型”, 为 LPG 业务智能化升级提供关键技术支撑, 本文围绕该模型在 LPG 终端行业的应用方案展开深入研究, 提出六大智能化解决方案。研究证实, 依托“昆仑大模型”推进智能化转型, 是 LPG 终端行业应对挑战、实现高质量发展的有效途径, 对推动能源行业数智化进程具有重要参考价值。

关键词

昆仑大模型; 液化石油气终端; 人工智能; 数智化转型; 数字孪生。

1 引言

液化石油气 (LPG) 作为清洁能源重要成员, 广泛应用于家庭、工业、交通领域, 凭借其高热值、低污染的特性, 可减少温室气体排放, 助力全球实现碳中。但 LPG 终端行

业面临诸多困境, 严重制约了行业的升级发展。随着能源市场转型加速, 传统运营模式已难以适配现代企业需求, 引入人工智能技术实现升级, 成为 LPG 企业的必然选择。“昆仑大模型”其兼具通用大模型能力与能源领域专业知识, 在安全合规、智能化生产管理等场景潜力巨大, 为能源行业数智化转型提供关键技术支撑。引入“昆仑大模型”AI 技术可破解行业 LPG 行业困境, 助力行业实现从“经验驱动”到“智能驱动”的跨越。

【作者简介】周锦贵 (1983-), 男, 壮族, 中国广西南宁人, 本科, 经济师, 从事人工智能在液化石油行业的应用、液化石油气行业发展趋势和发展策略研究。

2 人工智能在能源行业的应用研究现状

近年,人工智能深度变革全球能源系统,渗透勘探、开采、运输等全价值链,推动行业数字化转型,国内外已初步形成数据驱动、智能决策的能源 AI 体系。

国际上, AI 应用从单一功能升级为系统方案:斯坦福大学等用机器学习提升油气储层识别精度,欧洲机构开发深度学习管网系统强化输气安全,GE、西门子借神经网络实现设备预测性维护,加州大学伯克利分校用强化学习优化电网调度。

国内进展突出:中石油、中石化联合高校推出油田智能识别与故障诊断系统,长输管道智能监控系统实现腐蚀预测与泄漏定位,清华大学与国家电网合作提升变压器寿命预测精度,国网能源研究院模型缓解新能源调度压力。

技术路径上,机器学习与深度学习是核心,LSTM 等算法提升能源需求预测精度,图像识别结合无人机实现输电线路缺陷识别,声纹与振动分析用于设备故障预警。大模型兴起后,能源 AI 进入新阶段,2025 年 2 月,中国石油发布能源行业首个大模型——“昆仑大模型”,为 LPG 业务智能化升级提供关键技术支撑。

3 LPG 终端行业现状与核心痛点深度分析

3.1 LPG 行业信息化与智能化现状分析

当前 LPG 行业信息化研究多集中于 ERP、CRM、钢瓶溯源等基础系统,虽在整合流程、提升客户满意度等方面发挥作用,但整体停留在“信息化”阶段,仅完成业务数字化记录,未达“智能化”深度应用。现有系统割裂,数据不通、形成“信息孤岛”,无法支撑跨业务分析,决策支持局限于报表生成与基础查询,难以实现多维度协同优化与预测,行业智能化明显滞后于 AI 发展。当前研究的核心空白是缺乏以 AI 大模型为核心的顶层智能架构,方案多聚焦单一痛点,未串联全业务环节。为此,本研究提出以“昆仑大模型”为智能中枢的 LPG 终端一体化方案,推动行业从分散信息化向系统性智能化转型,提供理论与实践支撑。

3.2 LPG 终端行业核心痛点深度分析

根据目前 LPG 终端行业数字化现状,可归纳出六大核心痛点,其背后均反映行业系统性、结构性问题:一是供应链协同难。供应链含采购、运输、库存等多环节且动态性强,但采购凭经验、无多因素预测模型,运输缺实时监控易违规,库存静态未联动需求与资源,导致供需适配差。二是安全管控能力不足。LPG 易燃易爆但安全管理依赖人工与制度,关键工序无自动化联锁、智能识别技术,安检记录难实时上传分析,潜在风险无法实时预警,事故隐患高。三是钢瓶管理低效。钢瓶作为核心资产,虽用二维码 / RFID,但漏扫错扫致信息链断裂,难实现全生命周期可视化管理,流失、超期未检问题突出,且依赖人工操作,无自动预警干预机制。四是客户体验差。客户期待电商化服务体验,但行业仍以“电话订购 + 人工派单”为主,APP 使用率低,配送延迟、

投诉处理慢,尤其农村区域服务滞后,客户流失严重。五是运营成本高。行业属劳动密集型,人力成本占比高,设备自动化低、维护频繁、能源效率差,且气价波动时无灵活应对机制,抗风险能力弱。六是数据孤岛与价值挖掘不足。业务系统数据海量但独立,无统一数据中台,难共享融合,跨领域分析无法开展,数据价值未挖掘,企业决策仍靠经验,数据驱动能力欠缺,制约发展。

最终结果是,大量蕴含巨大价值的经营数据未能得到充分挖掘与利用,企业决策依旧过度依赖传统经验,在数据驱动管理优化与业务创新方面的能力明显不足,严重制约了企业在数字化时代的发展。

4 基于昆仑大模型的智能应用方案

为系统性破解 LPG 终端行业痛点,需突破局部优化和单点信息化的传统路径,转向以 AI 与大模型为核心的平台化、智能化方案。昆仑大模型作为能源行业首款大规模预训练模型,具备强大的自然语言处理、多模态数据融合与智能推理能力,可为行业构建“智慧大脑”,推动从行业数字化向智能化转型。

4.1 构建智能供应链体系

依托“昆仑大模型”的场景构建、AI 中台、智能体及 API 核心能力,结合企业现有业务系统,搭建覆盖需求预测、采购决策、库存管理与物流优化的 LPG 智能供应链体系,解决传统模式信息滞后、依赖人工、效率低等问题,实现全链路精准预测、动态优化与风险可控。

4.1.1 智能需求预测模型

传统 LPG 需求预测依赖人工、误差大,昆仑大模型用深度神经网络,融合历史购销、季节、天气、节假日及经济指标等数据,捕捉变量非线性关系,实现 7-30 天高精度预测,准确率较传统方法提升 30% 以上,助力企业科学规划库存与生产,降本并增强市场响应力。

4.1.2 智能采购决策系统

集成全球市场价格、供应商绩效、物流成本等实时数据,生成最优采购策略;评估供应商履约状况,建绩效评级体系,推荐最佳采购时机与量;含风险评估模块,识别地缘政治、天气等风险并制定应对策略,保障供应连续与成本可控。

4.1.3 库存智能管理系统

建库存数字孪生模型,实时监测并动态优化库存;依销售、需求与气源在途情况提策略建议,模拟不同策略成本与风险;结合地域、季节差异(如北方冬增储、南方夏调库),平衡库存成本与供应稳定。

4.1.4 智慧物流与路径优化

集成地图 API,依实时交通、天气、订单紧急度动态规划最优路径,应对突发情况;借物联网监控车辆位置、温压数据,识别运输资质与安全风险。预计可降采购、库存、配送成本 5-8%,优化库存 20-30%,提升配送效率 15-20%。

4.2 推进场站数智化与自动化升级

依托“昆仑大模型”的场景构建、AI 中台等能力，改造现有生产管理系统，结合图像识别与多源数据融合技术，搭建覆盖设备巡检、生产监控、质量控制的智能场站体系，提升生产安全性、操作规范性与产品质量稳定性。

4.2.1 生产操作全流程智能监控

通过智能摄像头、传感器、物联网设备实时采集卸车、充装、抽残、储运数据，借助计算机视觉与深度学习算法，自动识别人员操作规范度、安全装备佩戴情况、设备状态，联动钢瓶管理功能核验钢瓶进出站、充装及库存数据，异常时即时告警并生成处置建议；还可基于历史数据优化设备检修周期与充装计划，提升管理效率。

4.2.2 质量自动化控制体系

整合在线色谱仪、泄漏检测仪、视觉传感器构建实时质量监控系统，监测 LPG 组分含量、充装重量及钢瓶外观缺陷，发现异常立即报警以阻止不合格产品流出；通过机器学习分析历史质量数据，动态优化检测参数与工艺设置，自动生成质量分析报告，为管理决策提供依据。

4.2.3 智能化生产管理优化

依托大模型数据分析能力，挖掘生产历史数据识别瓶颈环节并提出优化策略，如依据槽车卸车时间规律优化调度、按钢瓶充装耗时差异合理排序、根据设备运行数据预测故障风险并实施预防性维护；应用后预计生产效率提升 20% 以上，产品不合格率降低 60%，安全事故发生率减少 80%，实现降本增效与安全管理统一，助力 LPG 企业从人工经验依赖转向数据驱动的智能化运营，为行业数字化提供实践路径。

4.3 打造智能安全监控与风险预警体系

针对液化石油气（LPG）行业安全风险，依托“昆仑大模型”，融合计算机视觉、物联网传感、AR 及知识图谱技术，构建覆盖实时监测、风险预警、应急决策的智能安全体系，推动安全管理从被动响应转向主动防控。

4.3.1 实时监控与多模态风险感知

集成高清摄像头与智能传感器，对 LPG 储存、运输、充装全流程不间断监测；借助多模态数据融合技术，协同分析视频、传感器及业务数据，提升复杂工况风险识别能力，系统可实时识别未佩戴安全防护装备、违反操作规程等行为，并触发三级告警机制，实现 30 秒内快速响应。

4.3.2 预测性维护与设备健康管理

通过分析设备振动、温度等时序数据，建立预测性维护模型，实现关键设备健康监测与故障预警，预计可提前 3-6 个月预警隐患，大幅减少非计划停机时间与维护成本。

4.3.3 智能安检与 AR 辅助决策

系统还引入 AR 智能眼镜辅助入户安检，自动识别管道锈蚀、阀门泄漏等隐患，实时推送处置方案，使安检效率提升 50%。同时，通过对送气工操作过程的视频分析，有效规范作业行为，减少服务纠纷。

4.3.4 应急响应与智能决策支持

突发事故时，系统基于知识图谱与实时数据，15 秒内生成应急方案（含疏散路线、关断程序、资源调度），并联动相关部门处置，提升应急决策准确性、降低损失。通过建立“监测 - 预警 - 处置 - 追溯”闭环管理机制，该系统有效降低事故发生率和非计划停机时间，为 LPG 行业提供了可推广的智能安全管理解决方案。

4.4 构建钢瓶全生命周期智慧管理系统

依托昆仑大模型，融合钢瓶管理与 ERP 数据，运用大数据处理及机器学习算法，搭建钢瓶全生命周期智能化管控系统，实现钢瓶流转实时监测、智能分析与多维度预警，提升管理精细化水平与资产安全性。

4.4.1 流转动态跟踪与异常告警

整合超高频传感器、视频解析及物联网设备，自动跟踪钢瓶进站、充装、装车、出站等关键环节，智能识别未扫码出站、流转超时、区域异常等违规行为并实时告警，预计可降低企业钢瓶管理混乱事件发生率 80% 以上。

4.4.2 缺陷自动识别与流失预警

通过图像识别技术，自动检测钢瓶破裂、变形等缺陷，降低安全事故风险；同时构建流失风险预测模型，结合客户行为、流转轨迹等数据建立风险评分体系，精准识别疑似流失钢瓶并多方式预警。

4.4.3 提高资产效益

系统具备资产效益分析功能，通过分析周转率、使用效率等指标优化资产配置，实时监控库存并自动预警账实不符；每月生成异常清单与预警汇总报表，为决策提供数据支持，推动钢瓶管理从传统人工向智能化转型。

4.5 推行智能客户服务与精准营销

依托“昆仑大模型”，液化石油气终端企业搭建集智能客服、精准营销、数据驱动决策于一体的客户运营体系，推动服务与运营向智能化、精准化转型。

4.5.1 智能客服与自动化服务系统

基于自然语言处理（NLP）和语音识别技术，提供 7×24 小时智能客服，处理价格查询、订单跟踪、气瓶预约等高频需求；支持多轮对话与方言识别，提升服务覆盖与体验。通过机器学习分类咨询并做情感分析，优化服务短板，预计缩短维修响应时间 30%、降低投诉率 40%。

4.5.2 客户洞察与精准营销体系

整合多维度数据构建动态客户画像，用聚类算法识别客户群体、制定差异化策略；分析用气行为实现个性化推荐与流失预警（如向工商业用户提供专属保障、向居民推季节性优惠），预计降低客户流失率 35%。

4.5.3 数据智能驱动的经营决策支持

大模型集成多系统数据构建企业“数字孪生体”，生成动态经营看板；支持自然语言查询（NLQ），将管理者获取数据时间从 30 分钟缩至 5 分钟内；定期自动生成分析报告，提供业务洞察与优化建议，预计大幅降低成本。

4.5.4 持续优化与价值提升

通过持续学习机制优化客户画像、推荐模型与决策算法，适配市场与企业需求；实施后预计显著提升客户满意度与收入，增强市场竞争力与运营效率。

4.6 破除数据孤岛，构建经营决策数据智能平台

基于“昆仑大模型”构建的经营决策数据智能方案，为液化石油气终端企业打造了完整的数据采集、处理分析与应用体系，有效解决了数据孤岛和分析滞后问题，实现了数据驱动的智能决策。

4.6.1 智能数据采集与整合

依托“昆仑大模型”，为液化石油气终端企业打造数据采集、处理分析、应用一体化方案，解决数据孤岛与分析滞后问题，实现数据驱动智能决策。

4.6.2 数据融合与智能处理

通过物联网传感器、业务管理系统实时采集生产、设备、营销等多维度数据，建立统一数据标准与接口规范，形成企业级数据资源池，奠定深度分析基础。

4.6.3 数字孪生与可视化决策看板

基于融合数据构建企业“数字孪生体”，通过可视化决策看板实时展示关键运营指标，支持管理者直观把握企业状况，及时发现问题并优化决策。

4.6.4 自动报告生成与决策建议

系统具备自动报告生成能力，定期生成含业务洞察与优化建议的分析报告，通过自然语言生成技术转化为易懂表述，为管理层提供科学决策依据。

4.6.5 持续优化与价值实现

方案通过持续学习优化分析模型与决策算法，提升企业运营效率。经测算，借助该方案优化运营方式，综合运行成本可降低 15% 以上，效率提升 30% 以上，最终实现从经验决策向数据决策的转变。

5 方案可行性分析

5.1 技术可行性剖析

昆仑大模型以千亿级参数规模与能源行业专业知识，在语义理解、知识推理、多模态数据处理上能力突出，契合 LPG 终端业务需求。方案采用云边端协同架构，云端依托高性能 GPU 集群完成核心计算，边缘端通过模型压缩与蒸馏技术实现轻量化部署，平衡处理能力与响应速度；现有云计算平台提供弹性算力，降低企业自建算力中心成本与门槛。系统集成采用 API 网关与微服务架构，通过标准化接口及 ETL 工具，实现与钢瓶管理、ERP、营销等现有系统无缝对接；容器化部署与持续集成机制保障系统扩展性与可维护性，支持快速迭代升级。

5.2 经济可行性分析（ROI 分析）

方案初期投入 300-500 万元，含软硬件采购与系统开发。长期收益显著：智能安全监控降低事故风险，避免千万级潜在损失；运营成本降 20-30%，钢瓶流失减 50% 以上；供应链与配送优化提效 25-35%；服务质量提升带动 10-15%

业务增长。投资回报周期 2-3 年，内部收益率（IRR）25-30%，首年建基础见成效，次年全面增收益，第三年进入稳定盈利阶段，投资价值显著。

综上，昆仑大模型在 LPG 终端行业应用具备显著的技术与经济可行性，结合科学实施与有效管理，可为企业数字化转型提供坚实支撑。

6 结论与展望

6.1 研究结论

本研究聚焦“昆仑大模型”在 LPG 终端行业的应用，分析行业痛点后构建智能化转型框架。作为能源行业首个专业大模型，其依托自然语言处理、多模态数据融合等能力，可解决 LPG 终端供应链复杂、安全隐患多、运营低效、数据价值挖掘不足等问题。

研究提出智能供应链优化、智能场站、智能安全管理等六大应用方案，形成“数据采集 - 处理分析 - 智能决策”全链路方案。研究测算显示，方案能降采购成本 5-8%、提运输效率 10-15%、减钢瓶流失率 40-50%，还可提升安全管理水平与品牌形象，为传统能源企业数字化转型提供路径，印证 AI 与能源行业融合的可行性。

6.2 未来展望

未来 LPG 终端智能化将呈多趋势：与 RPA 融合实现“感知 - 决策 - 行动”闭环；深化数字孪生应用提升运营测试效率；引入区块链实现钢瓶流转与气检信息溯源；借边缘计算与 5G 部署轻量模型提升响应实时性。行业将朝“全面感知、自动运行、智能决策”智慧生态演进，昆仑大模型将推动其向更智能、绿色、高效方向发展，为能源数智化转型升级提供重要示范。

参考文献

- [1] 李德毅, 等. 人工智能导论[M]. 第2版. 北京: 清华大学出版社, 2023.
- [2] 中国石油天然气集团有限公司. 昆仑大模型白皮书[R]. 2025.
- [3] 孙旭东, 等. 基于深度学习的液化石油气需求预测模型研究[J]. 天然气工业, 2023, 43(5): 110-118.
- [4] 李建华. 智慧能源：数字化转型与创新发展[M]. 北京: 机械工业出版社, 2022.
- [5] 气团网科技（深圳）有限公司. 基于多源数据融合的社区LPG 智慧周转仓预警系统及方法: CN118608042B[P]. 2025-01-07.
- [6] 中国石油天然气股份有限公司. 基于深度学习的液化气泄漏视频图像自主监测方法及系统: CN119649281A[P]. 2025-03-22.
- [7] 秦川物联. 用于智慧燃气的燃气泄漏智能预警方法和物联网系统: CN202310092419.3[P]. 2025-08-26.
- [8] 刘强, 等. 能源行业人工智能应用白皮书[R]. 北京: 中国人工智能产业发展联盟, 2024.
- [9] 国家能源局. 关于加快推进能源数字化智能化发展的若干意见 [Z]. 2023-12.
- [10] 陈晓华, 等. 数字孪生技术在智慧能源系统中的应用研究进展 [J]. 自动化学报, 2024, 50(2): 245-264.

Research on the Construction of a Comprehensive Early Warning System for Fire Steel Cylinder Explosion Prevention

Tailiang YU¹ Jungang Wang¹ Shouyun Wang¹ Yihan Liu²

1. Changzhou Metro Group Co., Ltd., Changzhou, Jiangsu, 213000, China

2. Jiangsu Rongxia Safety Technology Co., Ltd., Changzhou, Jiangsu, 213000, China

Abstract

Gas fire extinguishing systems are widely used in places sensitive to fire extinguishing media, such as data centers, rail transit, and power substations, due to their residue free and non-conductive characteristics. As the core of the system, the fire steel cylinders that store a large amount of high-pressure fire extinguishing media have been in service for a long time and face the risk of leakage or even explosion. The comprehensive anti explosion warning system for fire steel cylinders uniformly lays anti explosion detection lines (linear sensors) on the outer wall of the cylinder, combined with high-precision temperature and pressure sensors, to monitor the micro deformation, environment, and multi-dimensional parameters such as pressure and temperature inside the cylinder in real time, achieving full chain coverage of “centralized control regional coordination on-site perception”. The fundamental transformation from “passive disaster relief” to “active disaster prevention” has been achieved, providing strong technical support for the safe operation of fire steel cylinders.

Keywords

Steel cylinder deformation; Pressure changes; Explosion prevention; Digital firefighting; Comprehensive warning

消防钢瓶防爆裂综合预警系统的构建研究

俞太亮¹ 王军港¹ 王守运¹ 刘益晗²

1. 常州地铁集团有限公司, 中国·江苏常州 213000

2. 江苏荣夏安全科技有限公司, 中国·江苏常州 213000

摘要

气体灭火系统因其无残留、不导电的特性, 被广泛应用于数据中心、轨道交通、电力变电站等对灭火介质敏感的场所。作为系统核心, 大量储存高压灭火介质的消防钢瓶长期服役, 面临着泄漏甚至爆裂风险。消防钢瓶防爆裂综合预警系统通过在钢瓶外壁均匀敷设防爆裂探测线(线型传感器), 结合高精度温度与压力传感器, 实时监测钢瓶的微变形量、环境及瓶内压力、温度等多维参数, 实现“集中管控-区域协同-现场感知”的全链条覆盖。实现了从“被动救灾”到“主动防灾”的根本转变, 为消防钢瓶的安全运行提供了强有力的技术保障。

关键词

钢瓶形变; 压力变化; 防爆裂; 数字消防; 综合预警

1 引言

气体灭火系统因不导电、无残留, 可高效保护精密设备、贵重文献及易损设施, 广泛应用于数据中心、电力变电站、轨道交通等场所^[1]。气体(灭火介质)以高压的形式贮存在

消防钢瓶中, 钢瓶贮存压力为 15MPa(以 IG541 为例)。由于钢瓶的材质、生产工艺、介质腐蚀等因素的影响, 钢瓶存在爆裂的风险。近年来我国一些采用气体灭火系统的场所, 多次出现气瓶爆炸事件。

以城市轨道交通为例, 设备多数在地下安装使用, 消防上属高危场所, 又属于人员密集场所, 一旦发生爆炸事故, 损失巨大, 影响恶劣。因此对消防钢瓶的综合监控, 可以防止消防钢瓶爆裂这类恶性事故的发生。

2 消防钢瓶爆裂原因分析

钢瓶环境温度过高, 压力超标, 形变是消防钢瓶爆裂主要原因^[2], 我们研究这些参数变化对建立钢瓶防爆裂综合预警系统有非常重要的意义。

【作者简介】俞太亮(1977-), 男, 中国江苏常州人, 硕士, 高级工程师, 中国城市轨道交通协会技术装备委员会专家、江苏省城市轨道交通运营安全技术研究中心管理委员会委员、常州市人工智能学会副理事长, 从事轨道交通智能运维、新线运营筹备、既有线设备升级改造、车辆运营管理、安全管理等领域研究。

2.1 环境温度变化对消防钢瓶安全的影响

消防钢瓶（以 IG541 气体灭火剂瓶组为例）的贮存环境温度范围为 0 ~ 50 °C，应考虑该温度变化对变形量参数的影响。根据理想气体状态方程 ($pV=nRT$) 在物质的量 (n) 不变时的推论 $P1V1/T1=P2V2/T2$ (P- 压力, V- 体积, T- 温度)^[3]，由于气瓶材质为 30CrMo 合金钢，热膨胀系数很小，其热胀冷缩因素可忽略不计，因此，IG541 气瓶在 20 °C 时的充装压力为 15MPa，各温度下对应的压力变化如表 1 所示，该压力变化会引起相应的气瓶变形。

表 1 IG541 系统储存压力随温度变化参考值 [4]

储存温度 /°C	0	10	20	30	40	50
储存压力 /MPa	13.5	14.3	15.0	15.7	16.5	17.2

2.2 压力变化对消防钢瓶安全的影响

消防钢瓶是储存灭火剂的核心容器，其内部压力直接关系到气灭系统的安全性、有效性及可靠性，是消防设施能否在火灾中发挥作用的“生命线”。IG-541 气体出厂时标准充装压力为环境温度 20°C 时 15MPa，当温度降低或升高时，压力也随之下降或升高（如表 2 所示）。若实际测量压力，低于对应温度时的压力，则判断钢瓶泄漏。

表 2 惰性气体灭火剂瓶组工作压力 [5]

灭火剂瓶组类别	贮存压力 (20°C 时) /MPa	最大工作压力 (50°C 时) /MPa	最小工作压力 (0°C 时) /MPa
IG-01 气体灭火剂瓶组	15.0	17.2	14.0
	20.0	23.2	18.0
IG-100 气体灭火剂瓶组	15.0	17.2	13.6
	20.0	23.2	18.0
IG-55 气体灭火剂瓶组	15.0	17.2	14.0
	20.0	23.2	18.0
IG-541 气体灭火剂瓶组	15.0	17.2	13.6
	20.0	23.2	18.0

当存储压力高于泄放动作压力设定值时，消防钢瓶将进行自动安全泄放程序。如表 3 所示，IG541 存储温度 20°C 时 15MPa，其安全泄放动作压力设定值为 24MPa。

表 3 典型的灭火系统灭火剂瓶组的安全泄放装置设定值 [5]

灭火剂瓶组类别	贮存压力 (20°C 时) /MPa	泄放动作压力设定值 /MPa
IG-01 气体灭火剂瓶组	15.0	24.0
IG-100 气体灭火剂瓶组		
IG-55 气体灭火剂瓶组	20.0	32.5
IG-541 气体灭火剂瓶组		
内贮压式七氟丙烷灭火系统	2.5	5.9
	4.2 ^a	7.5
	4.2 ^b	9.4
	5.6	11.0

^a 指瓶组充装密度为 1120kg/m³ 时。

^b 指瓶组充装密度为 950kg/m³ 时。

2.3 钢瓶形变对消防钢瓶安全的影响

IG541 钢瓶是一种合金结构钢，具有良好的韧性和塑性，当前被广泛应用于消防钢瓶的制造。结合材料力学中的应力-应变特性（尤其是塑性材料的破坏规律）^[6]，我们对气瓶爆破的各阶段进行详细拆解及关键逻辑说明。

2.3.1 弹性变形阶段（可恢复稳定状态）

当内部压力逐渐升高时，气瓶壁材料受拉应力 / 压应力（取决于压力方向，通常为环向拉应力为主）作用，进入弹性变形阶段。此阶段遵循胡克定律（ $\sigma=E \varepsilon$ ， σ 为应力， E 为弹性模量， ε 为应变），变形完全可逆即若卸载（停止加压），气瓶会恢复原尺寸^[7]。

由于弹性变形的可逆性，气瓶体积随压力的变化呈线性关系（ $V=V_0(1+\varepsilon)$ ）， V_0 为初始体积， ε 为线应变， V 为变形后的体积）。此时气瓶处于安全贮存状态，无永久损伤。

2.3.2 屈服阶段（不可逆塑性变形开始）

当压力继续升高，材料内部应力达到屈服极限时，进入屈服阶段。此时材料的原子间滑移开始加剧，晶体结构发生不可逆调整，即使应力不再增加（或小幅波动），应变也会持续增大（即“屈服平台”）。

屈服阶段的变形是不可逆的（残余变形），意味着气瓶的结构完整性已被破坏。若继续使用，残余变形会累积，导致局部应力集中，最终引发爆破。因此，屈服极限是气瓶的“安全警戒线”，超过此值必须报废。

2.3.3 强化阶段（塑性变形持续，抵抗能力恢复）

屈服阶段后，材料发生加工硬化（又称“冷作硬化”）——塑性变形使晶体中的位错密度增加，位错运动受阻，导致材料的强度（屈服极限、抗拉强度）提高，塑性（延伸率）下降。此时，即使气瓶继续发生塑性变形（应变增大），其抵抗进一步变形的能力反而增强（对应应力 - 应变曲线中“屈服平台”后的上升段），变形速率（单位压力变化对应的应变变化）会减慢^[8]。

强化阶段是气瓶“过载保护”的重要机制——当压力意外超过设计压力时，材料通过加工硬化延缓破坏，为泄压或维修争取时间（但需注意，强化阶段的变形仍是不可逆的，最终会导致失效）。

2.3.4 破坏阶段（强度耗尽，断裂失效）

当压力升高至抗拉强度极限时，材料无法再通过加工硬化提高强度，此时局部应力集中（如焊缝缺陷、表面划痕、内部腐蚀等薄弱处）会导致该区域的有效应力超过极限，进入破坏阶段。对于塑性材料（如钢材），破坏阶段通常表现为颈缩现象（局部截面急剧缩小），随后从薄弱处撕裂破裂（爆破）^[8]。

破坏阶段是材料储存的弹性应变能突然释放的过程，表现为爆破瞬间的碎片飞散和能量冲击，具有极强的危险性。

因此对钢瓶形变的在线监测可以对消防钢瓶的爆裂风

险提供预警，防止钢瓶爆裂事故的发生。

3 消防钢瓶防爆裂综合预警系统解决方案

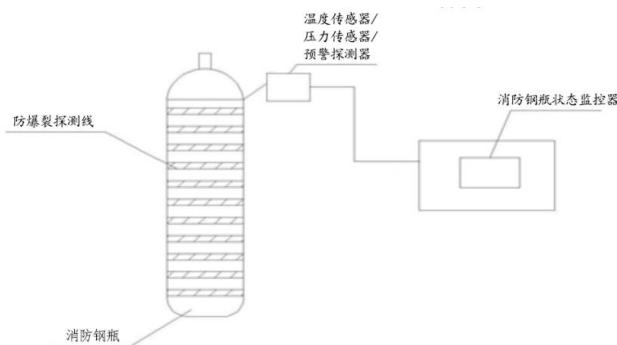


图 1 消防钢瓶防爆裂综合预警系统的组成

消防钢瓶防爆裂综合预警系统由温度传感器、压力传感器、防爆裂探测线、预警探测器、消防钢瓶状态监控器组成（如图 1 所示）。

防爆裂探测线均匀地缠绕在消防钢瓶上，用环氧胶固化在钢瓶的外壁上。测量钢瓶的微变量，当钢瓶发生 0.4% 的形变时发出声光报警信号。

温度传感器、压力传感器、预警探测器固定在钢瓶上，当出现温度、压力异常发出明显不同声光信号，提醒值班人员及时处理。

消防钢瓶状态监控器安装在消防控制室，实时监控每个钢瓶的温度、压力、微变形量等状态信息，综合分析钢瓶的安全性，为用户决策提供依据^[8]。

3.1 钢瓶状态探测器具有以下功能

1) 钢瓶状态探测器具有温度探测功能，探测精度不小于 0.5 级。

2) 钢瓶状态探测器具有压力探测功能，探测精度不小于 0.5 级。

3) 钢瓶状态探测器具有微变形量探测功能，并能进行温度补偿。

4) 具有报警阈值的修改应通过操作权限（密码）保护，且只能现场设置。

3.2 钢瓶状态监控器应有以下功能

1) 信息采集功能、报警功能、自检功能和信息显示、状态查询与分析功能，信息采集范围至少应包含 SSU 信息与自身状态^[5]。

2) 中文功能标注和信息显示功能。

3) 本机故障报警，类别至少应有主电源故障、备用电源故障、备用电源输出电压低于欠压电压、通信故障、数据储存故障，以及探测器与主机之间连接线路的故障（短路、开路、并接负载）。

4 消防钢瓶防爆裂综合预警数据应用平台功能

2024 年，江苏省消防救援总队印发《“数字消防”实

施方案》，明确要求“推广应用基层成熟的火灾风险评估、监测预警等模型算法，提升火灾防控工作质效”。物联网与 AI 技术的成熟，恰好为“数字消防”提供了技术落地路径——通过“物联感知+智能分析”，将消防钢瓶从“静态设备”转化为“动态数据节点”^[9]。消防钢瓶防爆裂综合预警数据应用平台的构建，是物联网（感知互联）与 AI（数据智能）技术发展的必然结果。

4.1 平台组成

消防钢瓶防爆裂综合预警系统，采集信息应至少包括驱动装置安装状态、驱动装置动作状态、选择阀动作状态、信号反馈装置动作状态、瓶组状态参数（如压力、液位、质量、瓶组储存环境温度等）、灭火系统基本参数（瓶组数量、地理位置、灭火系统类型、用户单位、生产者等）、操作记录等信息^[10]。

消防钢瓶防爆裂综合预警数据应用平台采用三级分层分布式架构，以“集中管控-区域协同-现场感知”为核心逻辑，实现消防钢瓶全生命周期状态监测与防爆裂预警的全链条覆盖（如图 2 所示）。

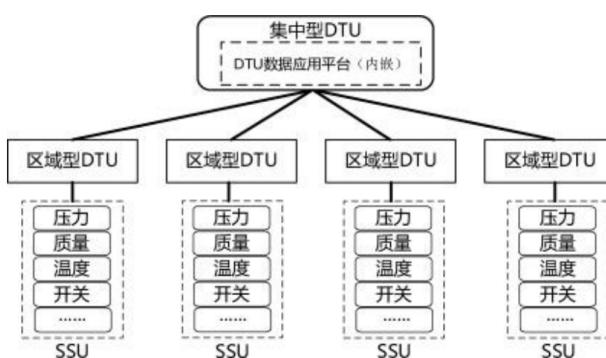


图 2 集中型 DTU、区域型 DTU 和 SSU 连接关系示例 [5]

4.2 平台架构解析

集中型 DTU（数据传输单元）与数据应用平台，作为整个系统的“大脑”，承担数据汇聚、处理、存储及业务应用的核心功能。

1) 集成多区域型 DTU 上传的海量异构数据（压力、温度、质量、开关状态等），通过边缘计算或云计算实现数据清洗、关联分析及模型训练；

2) 内嵌消防钢瓶防爆裂预警算法（如基于压力-温度耦合模型的泄漏预测、基于振动信号的裂纹识别模型），实时输出风险等级评估与预警决策；

3) 提供可视化交互界面，支持多维度数据展示（如钢瓶状态热力图、预警事件时空分布）、报表生成及远程配置管理；

4) 对接城市轨道交通综合监控系统（ISCS）、消防指挥中心等外部平台，实现跨系统联动（如自动触发消防喷淋、通风系统联动）。

区域型 DTU 集群作为区域级“神经中枢”，实现分布

式数据采集与本地化智能处理。按城市轨道交通线路、站点或设备区域（如车辆段、主变电所）划分，覆盖半径通常≤500米，降低长距离通信延迟与网络负载。其核心功能如下：

- 1) 接入辖区内多个 SSU（现场感知单元）数据，通过 LoRa/NB-IoT/工业以太网等通信技术实现本地化数据中继^[11]；
- 2) 集成轻量化边缘计算模块，预处理异常数据（如过滤瞬时噪声、触发本地预警阈值），减少无效数据上传；
- 3) 支持区域级冗余备份，当集中型 DTU 故障时，可独立运行并缓存关键数据，保障业务连续性。

SSU（现场感知单元）与传感器集群作为“神经末梢”，实现钢瓶状态的多参数实时感知^[11]。实时在线监测以下参数：

- 1) 压力传感器：监测钢瓶内灭火剂压力（如七氟丙烷压力值），实时预警超压/低压异常（压力波动超过±10% 额定值触发预警）；
- 2) 温度传感器：监测钢瓶表面及环境温度，预警高温环境下的材料老化加速风险（温度超过 60℃持续 30 分钟触发预警）；
- 3) 爆裂预警探测器：监测钢瓶微变形量，当钢瓶发生 0.4% 的形变时发出声光报警信号。

4.3 价值提升维度解析

消防钢瓶防爆裂综合预警平台不仅是安全隐患的“终结者”，更是消防管理模式的“革新者”。通过三级架构的协同联动，其价值从单点设备监控升级为覆盖“人-设备-场景-管理”的立体化安全生态。

安全价值：从“被动救灾”到“主动防灾”。通过毫米级数据采集（压力精度±0.1MPa、温度实时监测）和 AI 算法，将钢瓶爆裂预警提前至隐患萌发阶段，相比传统人工巡检实现指数级安全提升。

管理价值：降本增效与流程再造。通过平台推送风险提示，通知运维人员远程核查。自动生成预警工单，记录钢瓶编号、风险类型、处置时间等信息，对接运维管理系统实现“监测-预警-维修-复检”全流程数字化闭环。

数据价值：数据资产沉淀，决策效率指数级提升。通过分析历史预警数据，识别钢瓶老化周期规律（如某型号钢瓶使用 8 年后泄漏率显著上升），优化全生命周期更换计划，避免过度维护或维护不足。

技术价值：打破传统单一压力监测的局限性。通过“压力+质量+温度+状态”多参数建模，将爆裂预警准确率提升至 95% 以上。支持模块化扩展，可根据实际应用场景动态增减区域型 DTU 节点，降低初期建设成本。

5 技术难点

微变形监测是钢瓶主防爆监控的主要技术难点。

5.1 测试原理

线型传感器的电阻为固定值，施加一定电压后，产生

稳定的电流。传感器紧贴气瓶外壁，若气瓶发生变形、局部鼓包，线性传感器会拉伸变形，使长度伸长、截面缩小。电阻计算公式如式（1）所示^[12]。

$$R = \frac{\rho \cdot L}{S} \quad (1)$$

长度 L 增大，截面 S 减小时，电阻 R 会增大，电参数的变化导致电流降低。因此可通过电参数的变化监测气瓶的微变形。

考虑温度对传感器特性的影响，将相同长度的传感器放入高低温试验箱，测量 0~50℃ 温度下输出的电参数，掌握变化规律，通过软件进行修正。

5.2 实施方案

气瓶微变形监测，采取在气瓶表面缠绕防爆裂探测线的方法，具体如图 1 所示，气瓶表面缠绕的防爆裂探测线圈数相同且间距均匀四根线探测器和监控器。防爆裂探测线可将气瓶的体积变化转换为电参数变化，通过有线形式传输至数据探测器。探测器将钢瓶的状态信息上传给监控器。

5.3 钢瓶爆裂预防

前文论述了气瓶爆破经历以下 4 个阶段：弹性变形阶段→屈服阶段→强化阶段→破坏阶段。弹性变形阶段，气瓶体积随内部压力线性变化；屈服阶段，气瓶失去抵抗变形的能力，开始发生塑性变形；强化阶段，气瓶恢复抵抗变形的能力，但依然继续塑性变形；破坏阶段，达到强度极限，气瓶承压能力降低，加剧塑性变形，最后从薄弱处撕开破裂。

在整个变化过程中，仅第 1 阶段是可恢复的稳定贮存状态，一旦到达屈服极限，将发生不可恢复的塑性变形，气瓶应报废。经测试，当钢瓶的形变超过 1% 时，钢瓶将达到屈服极限。微变形监测要实现的是当形变达到 0.4% 时，探测线将物理变化转化为电参数信号，通过 RS485 总线传输至数据采集器，触发预警。

6 结论

本文通过对消防钢瓶的压力、变形量等因素研究，论证采用在气瓶表面均匀敷设线型传感器的方法，对钢瓶微变形进行监测，可有效防止钢瓶爆裂，并提出构建消防钢瓶防爆裂综合预警系统，为消防钢瓶的安全管理提供可量化、可持续的解决方案。

参考文献

- [1] 王海宾.气体灭火系统在建筑消防中的应用研究[J].工程建设（维泽科技），2024, 7(3):165-167.
- [2] 公安部天津消防研究所. GA 124-2017 气体灭火系统及零部件性能要求和试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [3] 王永雄.理想气体状态方程的多维进阶推导探究[J].中学教学参考, 2024(32).
- [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 国家市场监督管理总局. GB 50263—2007 气体灭火系统施工及验收规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2007.

- [5] 国家市场监督管理总局, 中国国家标准化管理委员会. GB 25972-2024 气体灭火系统及部件[S]. 北京: 中国标准出版社, 2024.
- [6] 李毅, 王志滨. 恒温下结构钢的应力-应变关系[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2013(4):735-740.
- [7] 罗培林."胡克(Hooke)定律"的革新与理论和实验数据的格式化整理和应用[C]. 钢结构工程研究(七)——中国钢结构协会结构稳定与疲劳分会2008年学术交流会论文集. 2008.
- [8] 魏陆原, 杨飞, 延睿, et al. 结构钢材全过程真实应力-应变关系研究 [J]. Engineering Mechanics / Gongcheng Lixue, 2025, 42(4).
- [9] 吴志毅, 徐秀会, 韩鹏. 消防设施云管理系统的应用[J]. 通信与信息技术, 2022(003):000.
- [10] 王建国, 李志强, 张磊. 基于多传感器融合的特种设备形变监测方法研究[J]. 中国安全科学学报, 2021, 31(5): 156-163.
- [11] 张颖, 张浩, 胡安林. 基于MPGA-BP神经网络的消防钢瓶综合安全评价[J]. 科学技术与工程, 2025(14).
- [12] 郑懿, 邹学成, 李福敏. 地铁气体灭火系统气瓶微变形监测技术研究[J]. 消防科学与技术, 2024, 43(3):369-373.

Research on the path and mechanism of transforming scientific research achievements into regional development impetus under the strategy of building Hunan into a strong education province

Gang Chen Yimei Li Xiaoning He

School of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou, Hunan, 412008, China

Abstract

Under the guidance of the “Strong Education Province” strategy, Hunan has prioritized scientific innovation as its core focus, deepened reforms in research systems, and accelerated the commercialization of achievements from universities and research institutes. This paper examines the essence, role, and bottlenecks of technology transfer, proposing a five-pronged approach encompassing policy guidance, stakeholder collaboration, platform support, market orientation, and talent cultivation. Through case studies, it summarizes Hunan’s experiences in integrating science with economy, fostering industry-academia-research-application synergy, and enhancing institutional incentives with financial services. The study concludes that while progress has been made in technology transfer, challenges remain including inefficient innovation chains, insufficient demand alignment, and inadequate incentive mechanisms. Recommendations include deepening industry-education integration, improving technology transfer systems, refining incentive policies, strengthening regional innovation platforms, building diversified investment financing systems, and optimizing talent management frameworks. Looking ahead, technology transfer will drive high-quality regional development in Hunan and provide valuable references for other regions.

Keywords

Strong Education Province; Technology Transfer; Regional Development Drivers; Industry-Education Integration; Innovation Mechanisms; Hunan

湖南教育强省战略下科研成果转化区域发展动力的路径与机制研究

陈刚 李毅梅 何小宁

湖南工业大学交通与电气工程学院, 中国 · 湖南 株洲 412008

摘要

在“教育强省”战略引领下,湖南以科技创新为核心,深化科研体制改革,推动高校和科研院所成果转化。本文梳理科研成果转化的内涵、作用与瓶颈,提出“政策引导—主体协同—平台支撑—市场导向—人才保障”五位一体路径。通过典型案例,总结湖南在科技与经济融合、产学研用协同、制度激励与金融服务等方面的经验。研究认为,湖南成果转化已取得进展,但仍面临创新链条不畅、需求对接不足和利益机制欠缺等问题。文章建议深化产教融合、完善技术转移体系、健全激励政策、强化区域创新平台、构建多元投融资体系、优化人才机制。展望未来,科研成果转化将助力湖南区域高质量发展,并为其他地区提供参考。

关键词

教育强省; 科研成果转化; 区域发展动力; 产教融合; 创新机制; 湖南

1 引言

“教育强省”战略是湖南推动高质量发展和中部崛起的重要举措。湖南科教资源丰富,但长期存在“成果多、转化低”的问题,创新链与产业链衔接不足。近年来,省委、省政府出台多项政策,如“科技成果转化三年行动计划”“技术转移促进条例”等,推动产学研用协同,构建创新平台,初步形成以科技创新驱动区域发展的格局。然而,成果转化

【基金项目】湖南省哲学社会科学工作办公室、湖南省教育科学规划领导小组《教育强省的支撑服务效能研究》(项目编号: JJ248590)。

【作者简介】陈刚(1977-),男,中国湖南新化人,博士,教授,从事工业自动化研究。

动力不足、市场对接不畅、技术转移人才匮乏等问题仍存。本文在梳理现状与政策的基础上,提出优化路径与机制创新,为教育与经济深度融合提供参考。

2 湖南教育强省战略与科研成果转化的现实基础

2.1 湖南教育强省战略的提出与推进

湖南作为中部经济大省,高度重视教育优先发展和创新驱动发展战略。“教育强省”目标明确提出以人才培养为核心、以科技创新为引领,推动教育资源优化配置,全面提升基础教育、高等教育、职业教育质量,增强高等院校和科研机构服务区域经济社会发展的能力。近年来,湖南大力推进“双一流”高校建设、职业教育提质扩容、校地校企协同育人、国际化合作交流等重点工程,培育出中南大学、湖南大学、国防科技大学等一批具有全国影响力的高水平高校,形成了以高校为主体、科研院所和企业协同参与的创新人才高地。省级层面持续完善教育经费投入、科研项目引导、创新创业激励等制度,出台多项成果转化奖励政策,有效提升了高校和科研人员创新创业的积极性,为科研成果转化提供了坚实基础。

2.2 湖南高校及科研机构创新能力与成果产出状况

近年来,湖南高校和科研院所在国家自然科学基金、国家重点研发计划、技术发明奖、科技进步奖等项目上取得丰硕成果。以中南大学为代表的高校,重点突破新材料、生物医药、智能制造等领域,打造了若干全国领先的创新平台。湖南大学、湖南师范大学、湖南农业大学等高校在土木工程、教育技术、农林科学等方向持续发力,形成了一批具有自主知识产权的重大科技成果。省属科研院所如湖南省农科院、冶金研究院等不断加强原始创新和产业技术研究,支撑区域优势产业发展。全省专利授权量、科技成果登记数、技术合同成交额等指标保持较快增长,为成果转化提供了丰富的“源头活水”。但与东部沿海发达地区相比,湖南在成果高效转化、创新链与产业链深度对接、产学研用一体化等方面仍有明显提升空间。

2.3 湖南科研成果转化面临的主要瓶颈

尽管湖南高校和科研院所科技创新活力充沛,科技成果总量持续增长,但成果转化率依然偏低,难以充分释放创新驱动力。当前主要瓶颈集中体现在:一是高校科研评价与成果转化导向不强,重论文、轻转化现象突出;二是技术转移机构与服务体系尚不健全,缺乏专业化中介和高水平技术经理人,成果“从实验室到市场”存在诸多障碍;三是企业与高校信息不对称、需求对接不畅,合作机制不完善,企业创新主体作用发挥不充分;四是投融资渠道单一、成果转化风险高、金融服务与知识产权保护体系不完善;五是激励约束机制不健全,科研人员成果转化收益分配缺乏保障,创新积极性受限。上述问题在一定程度上制约了湖南科研成

果向区域发展动力的高效转化。

3 科研成果转化驱动区域发展的路径设计

3.1 深化产教融合,构建多元协同创新机制

科研成果转化区域发展动力,关键在于产教深度融合和多元主体协同创新。湖南应以高校和科研院所为技术创新源头,推动其与地方政府、龙头企业、产业园区、创新联盟等主体构建开放协同创新共同体。在机制设计上,可推行“高校+企业+政府”三螺旋创新模式,强化共建研发平台、联合技术攻关、产业化示范等协同创新机制。鼓励高校与本地骨干企业签订“订单式”“任务型”研发协议,将企业需求、产业痛点、区域发展方向提前嵌入科研立项、成果转化和人才培养全过程。通过设立产教融合试点示范基地、共建“工程师学院”“产业学院”“创新工场”,促进科研、教育、产业三位一体互动。加快省级科技成果转化引导基金、产业技术创新联盟建设,为协同创新和成果转化提供资金和政策支持。培育一批面向主导产业的技术转移专业化机构和中介服务平台,完善创新链与产业链、人才链、资金链深度耦合的支撑体系。

3.2 完善科技成果转化服务体系

加快构建全省科技成果转化服务体系,是提升湖南科研成果转化效率的核心环节。首先,健全省级和区域性技术转移中心、科技成果转化基地网络,优化成果信息发布、供需对接、交易撮合、价值评估、法律服务、投融资支持等“一站式”服务流程。鼓励高校、科研院所设立专业化技术转移机构和技术经理人团队,推进技术经纪人、成果推广专员等新兴职业发展。加快推进知识产权运营、技术标准制定、成果登记备案、科技成果评价等环节规范化、标准化建设,为成果转化营造良好的法治和市场环境。省级层面可推动建设湖南省科技成果转化大数据平台,实现信息资源开放共享、项目动态跟踪、市场需求精准匹配。积极对接“科技金融”“产融结合”新模式,发展科技保险、成果质押融资、天使投资、科技成果转化基金等多元金融服务。完善高校科研人员成果转化收益分配、知识产权归属、岗位激励等政策,最大程度调动科技人才创新创业积极性。

3.3 强化区域创新平台和孵化链条建设

区域创新平台和孵化链条是成果转化区域发展新动能的重要桥梁。湖南应加快推进省级以上重点实验室、工程研究中心、产业技术研究院等创新平台建设,推动高端创新资源向本地主导产业集聚。鼓励高校、科研院所与地方政府、园区、龙头企业联合共建创新创业孵化器、成果转化中试基地、产业化示范园等实体平台,构建“基础研究—技术攻关—成果转化—产业转化—市场推广”全链条服务体系。推动各类科技园区、大学科技园与区域创新平台联动发展,吸引科技型中小企业、高新技术企业、高层次创新人才落户发展。完善创新平台“揭榜挂帅”“众包众创”等创新

激励机制,形成高效高质的科技成果孵化和快速产业化通道。创新公共服务平台建设,强化技术标准、检测认证、科技咨询、市场推广等全方位服务能力。通过多层次孵化体系提升科技成果转化率和新兴产业孵化能力,增强湖南区域经济的自主创新和持续发展动力。

4 科研成果高效转化的保障机制与实践创新

4.1 优化政策环境与激励机制

健全的政策环境和激励机制是推动科研成果转化落地见效的前提。湖南应持续完善科技成果转化相关法规制度,出台细化的成果转化奖励办法、科研人员收益分配、岗位创新激励政策。健全科研评价导向,将成果转化成效纳入高等院校和科研院所考核体系,淡化论文、专利数量等“唯论文、唯帽子”评价,突出技术转移、产业化应用、社会经济效益等实际转化指标。省级财政应加大对高校和科研机构成果转化的资金支持力度,建立稳定的科技成果转化专项基金,支持高风险、高潜力科技项目中试孵化。完善科研人员“持股激励”“成果转化提成”“科技入股”等政策,明确成果转化中的知识产权归属、收益分配、法律风险等关键环节。

4.2 完善产学研用深度融合和利益分配机制

产学研用一体化是科技成果高效转化的关键。湖南应推动高校、科研院所、企业、政府、投资机构多方协同,完善协同创新机制。通过联合研发、联合孵化和“政产学研用金”共建,明确成果开发、知识产权和收益分配的权责关系,激发企业主体作用。完善“揭榜挂帅”“委托开发”等机制,推动产业链上下游联动,精准对接技术供给与市场需求。探索收益共享、风险共担的分配模式,健全成果转化评价体系,提升全链条效能与利益协同。

4.3 创新科技金融服务与知识产权保护机制

科技金融与知识产权体系是成果转化的重要保障。湖南应加快发展多元科技金融服务,推动银行、创投、担保、保险等深度参与,创新质押融资、转化保险、成果基金等工具,破解融资难题。强化科技成果与资本市场对接,支持优质企业上市融资。完善知识产权确权、转让、维权等服务,提升法律保护与市场激励。建设省级知识产权运营平台,推动高校院所与技术转移融合。引进知识产权与科技金融人才,建立成果转化信用评价体系,营造公平竞争环境。

5 典型案例分析与经验启示

5.1 湖南高水平高校产学研用协同转化模式

近年来,湖南多所高校探索出产学研用协同创新和成果转化的特色模式。中南大学以“校企联合实验室+工程技术中心”为平台,推动关键技术联合攻关与成果转化落地。湖南大学聚焦智能制造、轨道交通等战略新兴产业,与本地龙头企业开展深度技术合作,建设“高校+产业园区+创新企业”协同创新生态圈。湖南农业大学紧密结合区域农

业发展需求,依托“产学研联盟”“科技小院”“专家工作站”等载体,推进新品种、新技术快速转化推广。

5.2 科研院所技术转移与创新平台建设实践

湖南科研院所积极推进技术转移机构和创新平台建设,提升科技成果转化服务能级。湖南省农科院围绕现代农业产业链,构建“科研+推广+企业”三位一体的成果转化机制,推动智能农机、优质种业、绿色植保等成果规模化应用。冶金、化工、机械等领域的省属科研院所加强与行业龙头企业共建技术转移中心和中试基地,培育一批产业技术创新联盟和科技服务平台。通过举办科技成果对接会、创新创业大赛、科技成果路演等活动,促进科研成果、项目、人才、资本高效集聚与协同创新。省级技术转移示范机构建设取得积极成效,为全省成果转化体系完善提供了样板和经验。

5.3 地方政府创新驱动与区域协同发展案例

湖南部分市州探索“政府引导+平台搭建+市场机制”三位一体的创新驱动发展路径。长沙高新区依托高水平大学和科研院所资源优势,构建高新技术企业孵化链、科技金融服务体系、产业技术联盟网络,打造科技成果转化和产业集聚的示范高地。岳阳、株洲等地出台“揭榜挂帅”“创新券”等政策,激励高校和企业深度对接,培育一批区域协同创新和科技成果转化典型。地方政府在政策制定、平台建设、要素配置、创新服务等方面积极作为,推动全省创新资源向重点产业和优势区域集聚,提升区域创新能级和经济发展质量。

6 结语

湖南教育强省战略为高质量发展注入动力,高校和科研院所成果成为经济转型的重要引擎。当前在政策引导、协同创新、平台支撑、金融服务和人才激励等方面仍需发力。未来应完善产教融合和成果转化体系,优化利益分配和人才机制,推动创新链与产业链深度融合。通过强化科技金融、知识产权保护和成果孵化链条建设,吸引多元资本参与,促进科技成果与主导产业对接。不断积累“湖南经验”,将为全国教育强省和区域创新体系建设提供借鉴。

参考文献

- [1] 杨颖.教育强国战略下加快湖南教育强省建设路径探索[J].当代教育论坛,2025,(02):1-6.
- [2] 许建兰.关于湖南“教育强省”战略的思考[J].教育教学论坛,2011,(18):145-146.
- [3] 谢剑虹.湖南省高等职业教育专业与新兴产业对接的问题与对策[J].岳阳职业技术学院学报,2022,37(02):1-6.
- [4] 唐琴.湖南省高等教育对经济增长的影响研究[D].湘潭大学,2011.
- [5] 杨颖.教育强国战略下加快湖南教育强省建设路径探索[J].当代教育论坛,2025,(02):1-6.

Preparation of a Thermally Conductive Adhesive for Fiber Optic Coils and Its Impact on the Coil's Temperature Characteristics

Xu Xiong Yanhong Ding* Shuicheng Xiong

School of Materials Science and Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou, Hunan, 412000, China

Abstract

This paper addresses the issue of Shupe error in fiber optic gyroscopes caused by temperature variations. By synergistically modifying boron nitride (BN) with tannic acid (TA) and copper sulfate (CuSO_4), BN@TACu filler was prepared and incorporated into a polyurethane acrylate (PUA) matrix, successfully developing a BN@TACu/PUA thermally conductive and UV-curable adhesive. The effects of filler content on the thermal conductivity, thermal stability, mechanical properties, and UV-curing behavior of the composite were systematically investigated. The results indicate that at a BN@TACu filler content of 6 wt%, the thermal conductivity of the composite reaches $0.48 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, representing a 129% improvement compared to pure PUA. The composite also exhibits excellent thermal stability, a 6.90% increase in elongation at break, and achieves complete UV curing. When applied to the encapsulation of fiber optic coils, temperature cycling tests demonstrate that the compensated bias stability reaches $0.0184^\circ/\text{h}$, a 23.9% enhancement over the pure PUA system, significantly improving the temperature performance of the fiber optic coil.

Keywords

Fiber optic coil; thermally conductive adhesive; boron nitride; surface modification

光纤环圈导热固化胶的制备及其对环圈温度特性的影响

熊旭 丁燕鸿* 熊水城

湖南工业大学材料科学与工程学院, 中国 · 湖南 株洲 412000

摘要

本文针对光纤陀螺中温度变化引起的Shupe误差问题, 通过单宁酸(TA)与硫酸铜(CuSO_4)协同改性氮化硼(BN), 制备了BN@TACu填料, 并将其与聚氨酯丙烯酸酯(PUA)基体复合, 成功研制出BN@TACu/PUA导热固化胶。系统研究了填料含量对复合材料导热性能、热稳定性、力学性能及光固化行为的影响。结果表明, 当BN@TACu填料含量为6 wt%时, 复合材料的导热系数达 $0.48 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, 较纯PUA提升129%, 热稳定性优异, 断裂伸长率提高6.90%, 且可实现完全光固化。将其应用于光纤环圈封装, 温度循环实验显示, 补偿后的零偏稳定性为 $0.0184^\circ/\text{h}$, 较纯PUA体系提升23.9%, 显著改善了光纤环圈的温度特性。

关键词

光纤环圈; 导热固化胶; 氮化硼; 表面改性

1 引言

光纤环圈是光纤陀螺的核心部件, 由偏光光纤和固化胶构成, 其性能直接影响陀螺的整体性能^[1]。环境温度变化会引发Shupe误差, 导致陀螺输出产生零偏漂移^[2]。尽管对称绕制法在一定程度上可以抑制该误差, 但光纤环圈内部热应力与温度分布不均问题仍存在。传统固化胶在受热不均时

易开裂, 从而影响光纤环圈的结构稳定性和光学性能。本文从固化胶材料入手, 通过添加导热填料以改善环圈温度场分布。本文系统研究了填料含量对复合材料的导热性、热稳定性、力学性能及光固化行为的影响规律, 并探讨了其对光纤环圈温度特性的改善效果。

2 导热固化胶的制备

2.1 单宁酸络合铜离子改性氮化硼(BN@TACu)的制备

将0.054g TA和6g BN分散于200mL去离子水中, 超声处理30min后, 磁力搅拌8h。将1.12g的 CuSO_4 溶于另一份200mL去离子水中, 所得溶液倒入上述混合液, 充分混合。用2mol/L NaOH调节pH至7.4, 于50℃下搅拌反应

【作者简介】熊旭(2000-), 男, 中国湖南浏阳人, 硕士, 从事冶金物理化学及能源材料研究。

【通讯作者】丁燕鸿(1968-), 女, 中国湖南攸县人, 博士, 副教授, 从事新能源材料研究。

4h。反应结束后, 用去离子水和无水乙醇各清洗三次, 60℃ 干燥 24h, 即可得到 BN@TACu。

2.2 BN@TACu/聚氨酯丙烯酸酯复合材料 (BN@TACu/PUA) 的制备

将 PUA 树脂用甲基丙烯酸异冰片酯稀释, 60℃ 预热 15min 后, 加入不同质量分数 (2wt%、6wt%、10wt%) 的 BN@TACu 填料混合均匀, 再加入光引发剂 184 和 4265, 搅拌至分散均匀。混合物经真空脱泡 30min 后注入模具, 紫外固化制得样品, 分别记为 PUA-A1、PUA-A2 和 PUA-A3。另以未改性 BN 按相同步骤制备对照样品, 制备了不同填料含量的 BN/PUA (分别为 2wt%、6wt% 和 10wt%), 记为 PUA-B1、PUA-B2 和 PUA-B3。

3 结果与讨论

3.1 BN@TACu 填料的 XRD 和 FTIR 分析

BN 和 BN@TACu 的 XRD 谱图如图 1(a) 所示。BN@TACu 在 26.8°、41.6°、55.1° 和 75.9° 处出现衍射峰, 分别对应 BN 的 (002)、(100)、(004) 和 (110) 晶面, 未出现新相峰且峰位无显著偏移, 表明 TA 通过非共价作用修饰 BN 表面, 未改变其晶体结构。图 1(b) 为 BN、TA 和 BN@TACu 的 FTIR 谱图。BN 在 806cm⁻¹ 和 1383cm⁻¹ 处的峰分别对应 B-N 键的面外弯曲振动和面内伸缩振动^[3]。BN@TACu 在 805cm⁻¹ 和 1385cm⁻¹ 处仍保留 B-N 键特征振动峰。此外, O-H 键的伸缩振动从 3395cm⁻¹ (TA) 蓝移至 3406cm⁻¹ (BN@TACu)^[4], 表明 TA 和 BN 之间发生了非共价功能化。

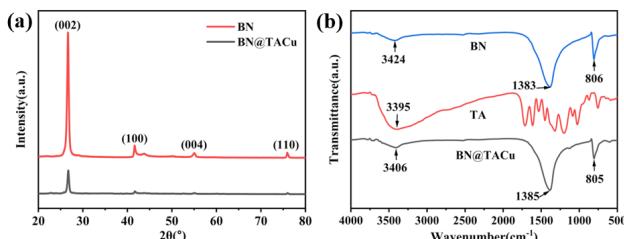


图 1 (a) BN 和 BN@TACu 的 XRD 图; (b) BN、TA 和 BN@TACu 的 FTIR 图

3.2 BN@TACu 填料和 BN@TACu/PUA 复合材料的微观结构

SEM 图像显示, BN 呈二维片状结构, 表面光滑平整, 粒径约 10 μm (图 2a)。BN@TACu 表面可见明显片状附着物 (图 2b), 结合 EDS 中 O 和 Cu 元素分布与附着区域基本一致, 表明 TACu 成功修饰于 BN 表面。纯 PUA 的断裂面比较光滑 (图 2f)。随着 BN@TACu 填料含量增加, 断面逐渐粗糙, 填料分布趋于连续。低含量时填料被基体包裹, 呈“海岛结构”^[5]; 含量提高后, 填料相互接触形成局部导热网络 (图 2h)。图 2(i) 可见 TACu 纳米片附着在 BN 表面。

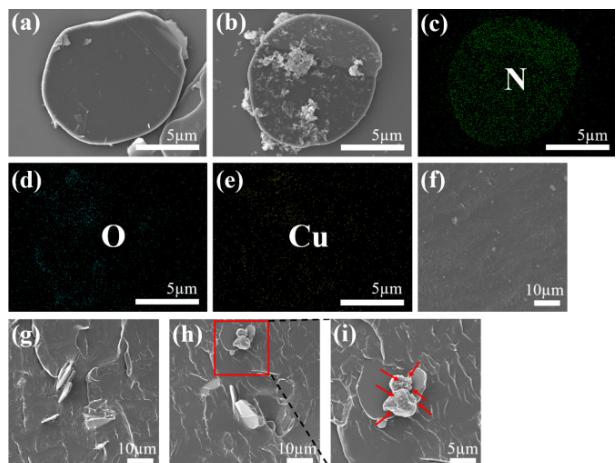


图 2 (a) BN 和 (b) BN@TACu 的 SEM 图像; (c) (d) (e) BN@TACu 填料的 N 元素、O 元素、Cu 元素的元素图谱; (f) PUA 断裂面的 SEM 图; (g) PUA-A1 断裂面的 SEM 图; (h, i) PUA-A3 断裂面的 SEM 图

3.3 BN@TACu/PUA 复合材料的热重分析和导热性能分析

图 3(a)、(b) 和表 1 展示了三种复合材料的热重分析结果, 其中 T5%、T10% 分别为失重 5% 和 10% 时所对应的温度。三者均呈现两个主要的热分解阶段, 第一阶段主要是聚丙烯酸酯链热解, 第二阶段主要是残余的聚氨酯分子链的分解。PUA-A1、PUA-A2 和 PUA-A3 失重 5wt% 的温度分别为 257.5℃、260.2℃ 和 250.1℃。其中 PUA-A2 的初始分解温度最高, 热稳定性最优。800℃ 时残炭率分别为 2.0wt%、6.3wt% 和 10.6wt%, 与填料含量呈正相关。DTG 曲线显示 (图 3b), 第一阶段 PUA-A3 的最大分解速率温度 (286.4℃) 明显低于 PUA-A1 和 PUA-A2, 进一步表明其热稳定性相对较差。第二阶段中三者的最大分解速率温度接近, 表明在经历了初始分解后剩余的聚合物骨架相似, 分解行为也趋于一致。

纯 PUA 的导热系数仅为 0.21W/(m · K)。随着填料含量的增加, 两类复合材料导热性能均显著提升, 且 BN@TACu 填料体系始终优于未改性 BN 体系 (图 3c)。含 6wt%BN@TACu 填料的 PUA-A2 导热系数达到 0.48 W/(m · K), 较纯 PUA 提升了 129%, 是 PUA-B2 (0.40 W/(m · K)) 的 1.2 倍。含 10wt% 填料的 PUA-A3 的导热系数为 0.78 W/(m · K), 较纯 PUA 提升了 271%。

3.4 BN@TACu/PUA 复合材料的力学性能和光固化速度

力学性能测试表明 (图 4), 随着填料含量增加, 复合材料的拉伸强度呈下降趋势。然而, 其断裂伸长率均高于纯 PUA (5.65%), 可见 BN@TACu/PUA 复合材料显示出较好的柔韧性。含 6wt% 填料的 PUA-A2 的断裂伸长率达 6.04%, 较纯 PUA 提升了 6.90%。

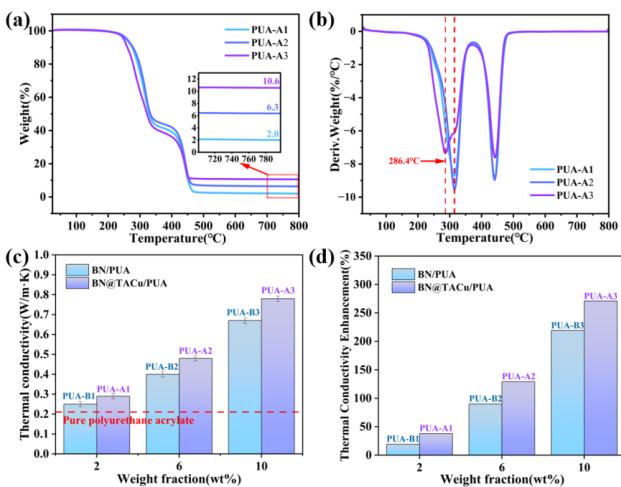


图 3 三种复合材料的 (a) TG 曲线和 (b) DTG 曲线; 不同填料添加量下的 BN/PUA 和 BN@TACu/PUA 复合材料的 (c) 导热系数和 (d) 导热系数增量

表 1 三种复合材料的热失重数据

样品	T _{5%} (°C)	T _{10%} (°C)	800°C剩余质量 (wt%)
PUA-A1	257.5	274.1	2.0
PUA-A2	260.2	278.2	6.3
PUA-A3	250.1	260.3	10.6

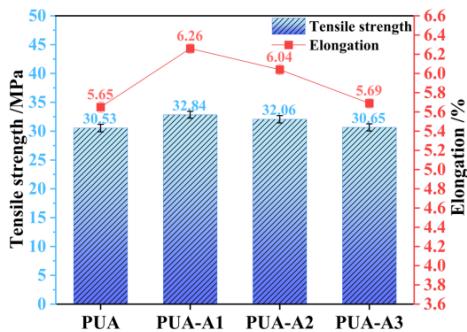


图 4 纯 PUA 和三种复合材料的拉伸强度和断裂伸长率

导热填料对胶液的固化程度、透光性以及固化后的性能均会造成一定的影响。制备 7 组不同胶液各 3 份, 脱泡后固化, 观察胶液的固化状态, 结果如表 2 所示。当填料含量 $\leq 6\text{wt\%}$ 时, BN@TACu 体系仍可实现完全固化, 而同等含量下的未改性 BN 体系 (PUA-B2) 已出现底部未固化现象。这归因于 TA 对 BN 的表面修饰有效抑制了其团聚, 提升了填料在基体中的分散性, 从而降低了其对紫外光的散射与阻碍。

3.5 复合材料对光纤环圈温度特性的影响

尽管 PUA-A3 在这六组复合材料中导热性能最优, 但其成膜难、固化慢限制了实际应用。因此, 选择在导热率、热稳定性、力学性能及光固化速度间取得最佳平衡的 PUA-A2 进行后续研究。分别使用纯 PUA 胶和 PUA-A2 胶绕制光纤环, 对比两组光纤环在温度循环 (-45°C ~ 70°C) 过程中的零偏变化趋势, 观察其输出表现, 结果如表 3 所示。

实验结果表明, PUA-A2 胶所制光纤环的常温零偏和补偿后的零偏稳定性及极差均优于纯 PUA 胶绕制的光纤环, 归因于 PUA-A2 胶具有更高的导热率和热稳定性, 能够更好地匹配光纤的热特性, 减少热应力引起的双折射变化。

表 2 填充不同填料的胶液 20min 后的光固化状态

编号	填料	4mm 厚度胶液光固化状态
PUA	None	全固
PUA-B1	2wt% BN	全固
PUA-B2	6wt% BN	底部少量未固
PUA-B3	10wt% BN	底部少量未固
PUA-A1	2wt% BN@TACu	全固
PUA-A2	6wt% BN@TACu	全固
PUA-A3	10wt% BN@TACu	底部少量未固

表 3 两组光纤环的温度性能

编号	常温零偏 (°/h)	补后极差 (°/h)	补后零偏 (°/h)
PUA-A2 环	0.0461	0.0501	0.0184
纯 PUA 环	0.0527	0.0611	0.0242

4 结论

为抑制光纤陀螺中的 Shupe 误差, 本文成功制备了 BN@TACu/PUA 导热固化胶。通过 TA 与 Cu^{2+} 的协同改性 BN, 显著增强了其与 PUA 基体的界面相容性。当 BN@TACu 填料含量为 6wt% 时, 复合材料的导热系数达到 0.48 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, 较纯 PUA 提升了 129%, 并兼具良好的热稳定性和力学性能。光纤环温度循环实验表明, 采用 PUA-A2 胶封装的光纤环补偿后零偏稳定性为 $0.0184^{\circ}/\text{h}$, 较纯 PUA 胶体系提升了 23.9%。

参考文献

- [1] Dranitsyna E V, Egorov D A, Untilov A A. Current State and Development Prospects of Fiber-Optic Gyroscopes[J]. Gyroscopy and Navigation, 2024, 14(4): 277-289.
- [2] 谭泓, 刘俊成, 刘伟, 等. 光纤陀螺 Shupe 效应温度补偿模型研究 [J]. 舰船电子工程, 2024, 44(07): 56-62.
- [3] Jin X, Li W, Liu Y, et al. Self-constructing thermal conductive filler network via reaction-induced phase separation in BNNSs/epoxy/polyetherimide composites[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2020, 130: 105727.
- [4] Zhao L, Yan L, Wei C, et al. Aqueous Phase Exfoliation and Functionalization of Boron Nitride Nanosheets Using Tannic Acid for Thermal Management Applications[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2020, 59(37): 16273-16282.
- [5] Suh D, Moon C M, Kim D, et al. Ultrahigh Thermal Conductivity of Interface Materials by Silver-Functionalized Carbon Nanotube Phonon Conduits[J]. Advanced materials, 2016, 28(33): 7220-7227.

Comparative analysis of total phosphorus determination and monitoring

Haidi Cao

Dingxi Hydrology and Water Resources Survey Center, Dingxi, Gansu, 743000, China

Abstract

Under neutral conditions, potassium persulfate (or nitric perchloric acid) was used to dissolve the sample of total phosphorus, and all the phosphorus contained in it was oxidized to orthophosphate. In the acidic medium, orthophosphate and ammonium molybdate reaction, in the presence of antimony salt to produce phosphorus molybdenum heteropoly acid, immediately produce blue complex. The sulfate is the oxidizing agent, the unfiltered water sample is dissolved, and the total phosphorus is determined by ammonium molybdate spectrophotometer. The digestion with nitric perchloric acid needs to be carried out in the fume Hood. The mixture of perchloric acid and organic matter is easy to be dangerous after heating. It is necessary to dissolve the sample first, and then add nitric acid perchloric acid for digestion.

Keywords

dissolve; Surface water; Industrial; Wastewater; Water chemical analysis;

总磷的测定及监测对比分析

曹海迪

甘肃省定西水文水资源勘测中心, 中国·甘肃 定西 743000

摘要

总磷在中性条件下用过硫酸钾(或硝酸—高氯酸)使试样消解, 将所含磷全部氧化为正磷酸盐。在酸性介质中, 正磷酸盐与钼酸铵反应, 在锑盐存在下生成磷钼杂多酸后, 立即生成蓝色的络合物。硫酸盐为氧化剂, 将未经过滤的水样消解, 用钼酸铵分光光度计测定总磷。用硝酸—高氯酸消解需要在通风橱中进行, 高氯酸和有机物的混合物经加热易发生危险, 需将试样先用消解, 然后再加入硝酸—高氯酸进行消解。

关键词

溶解; 地面水; 工业废水; 水化学分析;

1 引言

为确保地表水分析方法结果的系统性、科学性、准确性、制定了本标准。适用于江河、湖泊、水库、运河、渠道等具有使用功能的地表水水域。防治水污染, 保护江河、湖泊、运河、渠道、水库和海洋等地面水以及地下水水质的良好状态, 保障人体健康、维护生态平衡、促进国民经济和城乡建设的发展, 对总磷进行测定及监测对比分析。

2 总磷测定时, 需要选择相关的化学试剂:

硫酸(H_2SO_4), 密度为 1.84g/mL。

硝酸(HSO_3), 密度为 1.4g/mL。

高氯酸($HCLO_4$), 优级纯, 密度为 1.68 g/mL。

硫酸(H_2SO_4), 1+1。

【作者简介】曹海迪(1985-), 女, 中国甘肃定西人, 本科, 高级工程师, 从事水资源保护研究。

硝酸, 约 $c(1/2 H_2SO_4) = 1mol/L$ 。将 27 mL 硫酸加入 1000 mL 水中。

氢氧化钠($NaOH$), 1mol/L 溶液。将 40 g 氢氧化钠溶于水中, 并稀释到 1000mL。

过硫酸钾($K_2S_2O_8$), 50g/L 溶液: 将 5 g 过硫酸钾溶解于水, 并稀释至 100 mL。

磷标准贮备溶液, 在天平称取 $0.2197 \pm 0.0001g$ 于 110°C 干燥 2 小时在干燥器中放冷的磷酸二氢钾(KH_2PO_4), 用水溶解后转移至 1000mL 容量瓶中, 加入大约 800mL 水、加 5mL 硫酸用水稀释至标线并混匀。

磷标准使用溶液, 将 10mL 的磷标准溶液转为 250mL 的容量瓶中, 用水稀释混匀。

3 总磷测定时, 实验室使用的常见仪器和测定的方法及消解。

选择蒸气消毒器和压力锅。

250mL 磨口刻度管。

使用分光光度计测比。

在试样中加入 4mL 过硫酸钾，将具塞刻度管的盖塞紧后，用一块小布和线将玻璃塞扎紧，放在大烧杯中置于高压蒸气消毒器中加热，相同温度的 120℃ 情况下，保持 30 分钟后停止加热，用过硫酸钾消解时，需先将试样调至中性。

硝酸消解的时候，取 25mL 的试样于锥形瓶中，加数粒玻璃珠，再加 2mL 数量硝酸，在电热板上加热浓缩至 10mL 数量。等待制冷后加 5mL 硝酸，再加热浓缩至 10mL 放冷。加 3mL 高录酸，加热至高录酸冒白烟，可在锥形瓶上加小漏斗或调节电热板温度，使消解液在锥形瓶内壁保持回流状态，直至剩下 3—4mL 等待放冷。加水 10mL，加 1 滴酚酞指示剂，滴入氢氧化钠溶液呈微红色，再滴入硫酸溶液使微红刚好退去，混匀即可。

4 总磷测定时的工作曲线

取相同的 7 支具塞刻度管，分别加入 0.00、0.50、

1.00、3.00、5.00、10.00、15.0、磷酸盐标准溶液，加水至 25mL，进行测定处理，以水做参比，测定吸光度。

测定总磷的曲线如下：

取相同的磷标准使用液，标准溶液浓度 2.0mg/L。

标准溶液(mL)	0.00	0.50	1.00	3.00	5.00	10.0	15.0
吸光度	标样值 (A ₁)	0.005	0.037	0.065	0.188	0.306	0.596
度	A ₁ — A ₀	0.00	0.032	0.060	0.183	0.301	0.591

已知条件：相关系数 r=1.0

斜率 b=0.0592

截距 a=0.002

回归方程 y=bx+r=0.0592x+0.002

$$\rho (p) = (A - 0.002) \cdot 16.9 \cdot 2.0 / V s$$

取 9 天相同天然水样、加标水样、统一标样、空白样做检测分析表如下：

序号	分析日期	采样(地点)	取样体积	吸光度				含量
				I	II	平均	空白	
1	1.1	空白	50	0.007				
2	1.1	空白	50	0.007				
3	1.1	0.1C	50	0.096			0.007	0.059
4	1.1	0.1C	50	0.095			0.007	0.058
5	1.1	0.9C	50	0.803			0.007	0.537
6	1.1	0.9C	50	0.804			0.007	0.538
7	1.1	天然水样	50	0.526			0.007	0.349
8	1.1	天然水样	50	0.528			0.007	0.351
9	1.1	加标水样	50	0.620			0.007	0.413
10	1.1	加标水样	50	0.620			0.007	0.414
11	1.1	统一标样	50	0.631			0.007	0.420
12	1.1	统一标样	50	0.630			0.007	0.420
13	1.2	空白	50	0.005				
14	1.2	空白	50	0.005				
15	1.2	0.1C	50	0.098			0.005	0.062
16	1.2	0.1C	50	0.097			0.005	0.061
17	1.2	0.9C	50	0.803			0.005	0.538
18	1.2	0.9C	50	0.805			0.005	0.539
19	1.2	天然水样	50	0.525			0.005	0.350
20	1.2	天然水样	50	0.524			0.005	0.349
21	1.2	加标水样	50	0.626			0.005	0.418
22	1.2	加标水样	50	0.622			0.005	0.416
23	1.2	统一标样	50	0.608			0.005	0.406
24	1.2	统一标样	50	0.611			0.005	0.408
25	1.3	空白	50	0.006				
26	1.3	空白	50	0.006				
27	1.3	0.1C	50	0.099			0.006	0.062
28	1.3	0.1C	50	0.098			0.006	0.061
29	1.3	0.9C	50	0.800			0.006	0.535
30	1.3	0.9C	50	0.799			0.006	0.535

续表

序号	分析日期	采样(地点)	取样体积	吸光度				含量
				I	II	平均	空白	
31	1.3	天然水样	50	0.528			0.006	0.532
32	1.3	天然水样	50	0.527			0.006	0.351
33	1.3	加标水样	50	0.628			0.006	0.419
34	1.3	加标水样	50	0.630			0.006	0.420
35	1.3	统一标样	50	0.612			0.006	0.408
36	1.3	统一标样	50	0.609			0.006	0.406
37	1.4	空白	50	0.006				
38	1.4	空白	50	0.005				
39	1.4	0.1C	50	0.095			0.0055	0.059
40	1.4	0.1C	50	0.098			0.0055	0.061
41	1.4	0.9C	50	0.800			0.0055	0.536
42	1.4	0.9C	50	0.799			0.0055	0.535
43	1.4	天然水样	50	0.523			0.0055	0.348
44	1.4	天然水样	50	0.525			0.0055	0.350
45	1.4	加标水样	50	0.622			0.0055	0.415
46	1.4	加标水样	50	0.624			0.0055	0.417
47	1.4	统一标样	50	0.612			0.0055	0.409
48	1.4	统一标样	50	0.608			0.0055	0.406
49	1.5	空白	50	0.007				
50	1.5	空白	50	0.007				
51	1.5	0.1C	50	0.099			0.007	0.061
52	1.5	0.1C	50	0.102			0.007	0.063
53	1.5	0.9C	50	0.803			0.007	0.537
54	1.5	0.9C	50	0.800			0.007	0.535
55	1.5	天然水样	50	0.525			0.007	0.349
56	1.5	天然水样	50	0.527			0.007	0.350
57	1.5	加标水样	50	0.622			0.007	0.414
58	1.5	加标水样	50	0.624			0.007	0.416
59	1.5	统一标样	50	0.606			0.007	0.404
60	1.5	统一标样	50	0.608			0.007	0.405
61	1.6	空白	50	0.005				
62	1.6	空白	50	0.006				
63	1.6	0.1C	50	0.097			0.0055	0.061
64	1.6	0.1C	50	0.094			0.0055	0.058
65	1.6	0.9C	50	0.803			0.0055	0.538
66	1.6	0.9C	50	0.799			0.0055	0.535
67	1.6	天然水样	50	0.527			0.0055	0.351
68	1.6	天然水样	50	0.528			0.0055	0.352
69	1.6	加标水样	50	0.628			0.0055	0.419
70	1.6	加标水样	50	0.623			0.0055	0.416
71	1.6	统一标样	50	0.608			0.0055	0.406
72	1.6	统一标样	50	0.609			0.0055	0.407
73	1.7	空白	50	0.007				
74	1.7	空白	50	0.007				
75	1.7	天然水样	50	0.525			0.007	0.349
76	1.7	天然水样	50	0.524			0.007	0.348
77	1.7	天然水样	50	0.527			0.007	0.350
78	1.7	天然水样	50	0.525			0.007	0.349

续表

序号	分析日期	采样(地点)	取样体积	吸光度				含量
				I	II	平均	空白	
79	1.8	空白	50	0.006	0.007	0.065		
80	1.8	天然水样	50	0.527			0.0065	0.351
81	1.8	天然水样	50	0.526			0.0065	0.350
82	1.8	天然水样	50	0.529			0.0065	0.352
83	1.8	天然水样	50	0.525			0.0065	0.349
84	1.9	空白	50	0.007	0.007	0.007		
85	1.9	天然水样	50	0.526			0.007	0.349
86	1.9	天然水样	50	0.528			0.007	0.351
87	1.9	天然水样	50	0.527			0.007	0.350
88	1.9	天然水样	50	0.525			0.007	0.349

5 精密度偏性检验如下

加标回收率检验

空白批内标准差及检测限			项 目	说 明	结 果
项目	说 明	结 果			
空白批内标准差 S_{wb}	$\sqrt{\frac{\sum x^2 - 1/n \sum X^2}{m(n-1)}}$	4.08×10^{-2}	平均回收率	见上表	100%
零浓度标准差	$\sqrt{2}x \times S_{wb}$	5.77×10^{-4}	回收率	当 $95\% < \bar{P} < 105\%$ 时; \bar{P} 合格 是	
检测限	$2t_f \times \sqrt{2}x \times S_{wb}$	2.24×10^{-3}	合格检验	当 \bar{P} 在此范围之外时; \bar{P} 不合格 否	

分析批内批间变异, 检验总标准差

项目	说 明	0.1C	0.9C	天然水样	加标水样	统一标样
批内变异 (a)	$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x(x_{ij} - \bar{x}_i)^2 / [m(n-1)]$	1.67×10^{-6}	1.25×10^{-6}	1.00×10^{-6}	1.92×10^{-6}	1.58×10^{-6}
批间变异 (b)	$\sum_{i=1}^m n_i (\bar{x}_i - \bar{X})^2 / m(n-1)$	4.40×10^{-6}	3.58×10^{-6}	2.40×10^{-6}	9.1×10^{-6}	6.31×10^{-6}
变异显著性检验 (F) 检验	当 $b/a < F_{0.05}$ 时; 无显著性差异 当 $F_{0.05} < b/a < F_{0.01}$ 时; 显著性证据不足 当 $b/a < F_{0.01}$ 时; 有显著性差异	N				
总变异 f	$a + (b-a)/n$	3.04×10^{-6}	2.42×10^{-6}	1.70×10^{-6}	5.51×10^{-6}	3.23×10^{-5}
总标准差 St	\sqrt{f}	1.74×10^{-3}	1.56×10^{-3}	1.30×10^{-3}	2.35×10^{-3}	5.68×10^{-3}
指标检出限 w	测得浓度的 5% 或检出限两者最大值为 w	3.0×10^{-3}	2.68×10^{-2}	1.75×10^{-2}	2.08×10^{-2}	2.04×10^{-2}
总标准差检验	当 $St < w$ 时, 总标准差合格 当 $St > w$ 时, 总标准差不合格	是	是	是	是	是

6 实验室质量控制考核与比对试验内控表如下

标准	A	0.005	0.037	0.065	0.188	0.306	0.596	0.895		
曲线	C	0.00	0.020	0.040	0.120	0.200	0.400	0.600	测定上线	r
批数		1	2	3	4	5	6			
空白	A ₁	0.007	0.005	0.006	0.006	0.007	0.005	\bar{X}	S	
	A ₂	0.007	0.005	0.006	0.005	0.007	0.006			
	C ₁	0.003	0.002	0.003	0.003	0.003	0.002	0.003	0.006	
	C ₂	0.003	0.002	0.003	0.002	0.003	0.003			

续表

0.1C	C ₁	0.059	0.062	0.062	0.059	0.061	0.061	0.060	0.0017
	C ₂	0.058	0.061	0.061	0.061	0.063	0.058		
0.9C	C ₁	0.537	0.538	0.535	0.536	0.537	0.538	0.536	0.0015
	C ₂	0.537	0.539	0.535	0.535	0.535	0.535		
天然水样	C ₁	0.349	0.350	0.325	0.348	0.349	0.351	0.350	0.0013
	C ₂	0.351	0.349	0.351	0.350	0.350	0.352		
加标水样	C ₁	0.413	0.418	0.419	0.415	0.414	0.419	0.416	0.0023
	C ₂	0.414	0.416	0.420	0.417	0.416	0.416		
统一标样	C ₁	0.420	0.406	0.408	0.409	0.404	0.406	0.409	0.0054
	C ₂	0.420	0.408	0.406	0.406	0.405	0.407		

7 质量控制与对比实验内控结果

$$S_{\text{空}} = \sqrt{\frac{(0.003-0.003)^2+(0.003-0.003)^2+(0.002-0.003)^2+(0.002-0.003)^2+(0.003-0.003)^2+(0.003-0.003)^2+(0.002-0.003)^2+(0.003-0.003)^2+(0.002-0.003)^2+(0.003-0.003)^2}{11}} = \sqrt{3.64 \times 10^{-7}} = 0.0006$$

$$S_{0.1C} = \sqrt{\frac{(0.059-0.060)^2+(0.058-0.060)^2+(0.062-0.060)^2+(0.061-0.060)^2+(0.062-0.060)^2+(0.061-0.060)^2+(0.059-0.060)^2+(0.061-0.060)^2+(0.061-0.060)^2+(0.061-0.060)^2}{11}} = \sqrt{2.91 \times 10^{-6}} = 0.0017$$

$$S_{0.9C} = \sqrt{\frac{(0.537-0.536)^2+(0.537-0.536)^2+(0.538-0.536)^2+(0.539-0.536)^2+(0.535-0.536)^2+(0.536-0.536)^2+(0.535-0.536)^2+(0.537-0.536)^2+(0.535-0.536)^2+(0.538-0.536)^2}{11}} = \sqrt{2.27 \times 10^{-6}} = 0.0015$$

$$S_{\text{天}} = \sqrt{\frac{(0.349-0.350)^2+(0.351-0.350)^2+(0.350-0.350)^2+(0.349-0.350)^2+(0.352-0.350)^2+(0.351-0.350)^2+(0.348-0.350)^2+(0.350-0.350)^2+(0.349-0.350)^2+(0.351-0.350)^2}{11}} = \sqrt{1.64 \times 10^{-6}} = 0.0013$$

$$S_{\text{加}} = \sqrt{\frac{(0.413-0.416)^2+(0.414-0.416)^2+(0.418-0.416)^2+(0.416-0.416)^2+(0.419-0.416)^2+(0.420-0.416)^2+(0.415-0.416)^2+(0.417-0.416)^2+(0.416-0.416)^2+(0.419-0.416)^2}{11}} = \sqrt{5.18 \times 10^{-6}} = 0.0023$$

$$S_{\text{统}} = \sqrt{\frac{(0.420-0.409)^2+(0.420-0.409)^2+(0.406-0.409)^2+(0.408-0.409)^2+(0.408-0.409)^2+(0.408-0.409)^2+(0.408-0.409)^2+(0.409-0.409)^2+(0.406-0.409)^2+(0.404-0.409)^2}{11}} = \sqrt{2.95 \times 10^{-5}} = 0.0054$$

8 质控图

表一

分析方法		钼酸铵分光光度法					浓度单位			mg/L	
n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
x	0.349	0.351	0.350	0.349	0.352	0.351	0.348	0.350	0.349	0.350	0.351
0.352	0.349	0.348	0.350	0.349	0.351	0.350	0.352	0.349	0.349	0.351	0.350
x	0.349										

质控图的计算:

$$\bar{X} = 0.350 \quad S = 0.0012$$

$$\bar{X} + S = 0.351 \quad \bar{X} - S = 0.349$$

$$\bar{X} + 2S = 0.352 \quad \bar{X} - 2S = 0.348$$

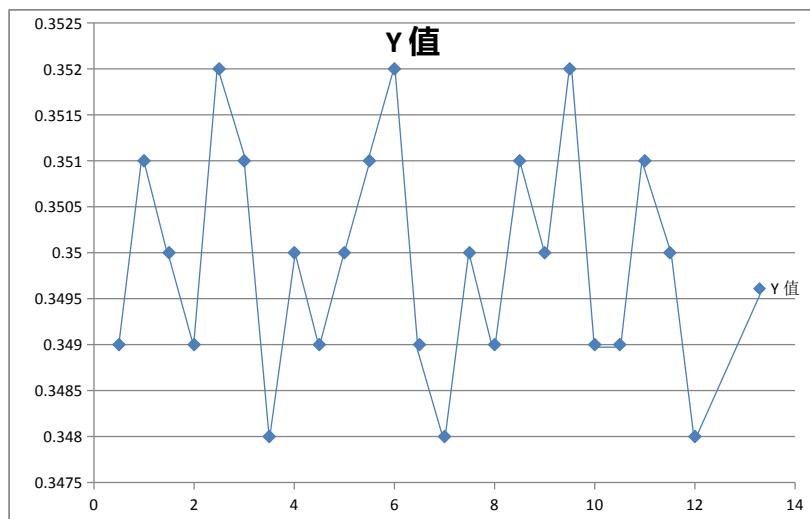
$$\bar{X} + 3S = 0.354 \quad \bar{X} - 3S = 0.346$$

9 结论

用硝酸—高氯酸消解需要在通风橱中进行, 高氯酸和

有机物的混合物经加热易发生危险, 需将试样先用硝酸消解, 然后再加入硝酸—高氯酸进行消解, 绝不可把消解的试样蒸干, 水样中的有机物用过硫酸钾氧化不能完全破坏时, 可用此法消解。

精密度与准确度中, 实验室内相同对标准偏差 0.75%, 再现性实验室间相对标准偏差为 1.5%, 准确度相对误差为 +1.9%。



表二

参考文献

- [1] 张胜军.钼酸铵分光光度法测定总磷的应用分析[J].中国资源综合利用,2025,43(04):51-53.DOI:CNKI:SUN:ZWZS.0.2025-04-011.
- [2] 赵飞燕.钼酸铵分光光度法测定总磷精密度偏性试验分
析评价[J].山西水利,2023,(05):23-25.DOI:CNKI:SUN:SXLS.0.2023-05-015.
- [3] 李春芳,钟悦,蒙健娇,等.水质总磷的测定——钼酸铵分光光度法中三种消解方法的比对分析[J].山东化工,2022,51(19):139-143.
DOI:10.19319/j.cnki.issn.1008-021x.2022.19.004.

Offshore wind turbine tower condition assessment method based on subjective-objective integration

Qiu Di¹ Djiang Chen¹ Junbo Zhang¹ Yanchao Zhang² Jiaxi Li¹

1. Zhejiang Huadong Engineering Consulting Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang, 311100, China
2. Shaneng New Energy (Dongying) Co., Ltd., Dongying, Shandong, 257000, China

Abstract

Offshore wind turbines are of great significance in promoting energy transformation and economic development, and the harsh marine environment seriously threatens the safety of offshore wind turbines. Offshore wind turbine condition assessment is a key link to ensure the safe operation of wind turbines. It is a critical issue to be solved how to use multiple assessment methods to realize the real-time study and judgment of the service state of offshore wind turbine structures. In this study, the existing hierarchical analysis method (AHP) is extended, and the AHP is combined with the ordered weighted average method (OWA) and entropy weight method (EWM) to develop a real-time hybrid assessment method (HAHP) for real-time damage assessment and early warning. The real-time integrated assessment method obtained in this study reduces the subjective random influence in the assignment process and eliminates the negative influence of entropy value not reflecting knowledge and experience, making the evaluation results more objective. The comprehensive assessment method proposed in this study is of guiding significance for the comprehensive assessment of early warning programs for large-scale marine engineering structures such as offshore wind power.

Keywords

Offshore wind turbines; Structural health monitoring; Subjective-objective assessment methods.

基于主 – 客观一体化的海上风电塔筒状态评估方法

徐狄¹ 陈大江¹ 张军波^{1*} 张燕超² 李佳禧¹

1. 浙江华东工程咨询有限公司, 中国 · 浙江 杭州 311100
2. 山能新能源 (东营) 有限公司, 中国 · 山东 东营 257000

摘要

海上风电对于推动能源转型, 推动经济发展具有重要意义, 恶劣的海洋环境严重威胁海上风机安全。海上风电状态评估是保证风机安全运行的关键环节。如何运用多种评估方法, 实现海上风电塔筒结构的精准评估, 实现海上风电结构服役状态的实时研判, 成为亟待解决的关键问题。本研究对现有的层次分析法 (AHP) 进行了扩展, 并将 AHP 与有序加权平均法 (OWA) 和熵权法 (EWM) 相结合, 开发出用于实时损害评估和预警的实时综合评估方法 (HAHP)。本研究所得到的实时综合评估方法既减少了赋值过程中的主观随机影响, 又消除了熵值不能反映知识经验的负面影响, 使评价结果更加客观。本研究所提出的综合评估方法对于海上风电等大型海洋工程结构的综合评估预警方案具有指导意义。

关键词

海上风电; 结构健康监测; 主 – 客观评估方法

1 引言

海上风电作为一种清洁、可再生的能源, 在全球能源转型中扮演着越来越重要的角色, 对于缓解能源压力, 推动

【基金项目】 山东能源渤中海上风电项目 (项目编号 HDY-SC33-20240028)。

【作者简介】 徐狄 (1986–), 男, 中国浙江杭州人, 本科, 工程师, 从事海上风电施工技术研究。

【通讯作者】 张军波 (1987–), 男, 中国浙江上虞人, 博士, 工程师, 从事工程数字化研究。

能源转型, 推动经济发展, 促进可持续发展具有重要意义 [1]。然而, 海上风电虽然拥有巨大的发展潜力, 但其建设和运营也面临着严峻的挑战, 尤其是恶劣的海洋环境, 对风机设计、建造和维护提出了更高的要求。海上风电结构服役更偏向于深远海环境, 这导致海上风电更容易遭受风 - 浪 - 流耦合极端环境的影响, 严重威胁海上风机安全 [2]。海上风电状态评估是保证风机安全运行的关键环节。通过多种评估方法的综合应用, 可以及时识别潜在问题, 预测未来故障, 并采取相应的措施, 确保风机安全可靠运行, 提高风电场发电效率, 降低运营成本, 促进海上风电产业健康发展 [3]。因此, 如何运用多种评估方法, 实现海上风电塔筒结构的精准评估, 实现海上风电结构服役状态的实时研判, 成为亟待解决的关

键问题 [4]。

目前, 国内外学者关于主观和客观的评估方法已进行了相关研究。层次分析法 (AHP) 是一种多目标决策方法, 由美国运筹学家 Satty T.L. 于 20 世纪 70 年代提出 [5]。它通过构建层次结构模型, 将复杂的决策问题分解为多个层次和因素, 然后通过两两比较的方式确定各因素之间的相对重要性, 最终计算出各因素的权重, 为决策提供依据。有序加权平均法 (OWA) 是利用过去若干个按照时间顺序排列起来的同一变量的观测值并以时间顺序变量出现的次数为权数, 计算出观测值的加权算术平均数, 以这一数字作为预测未来期间该变量预测值的一种趋势预测法 [6]。在熵权法 (EWM) 中, 熵是系统无序程度的一个度量。根据信息熵的定义, 对于某项指标, 可以用熵值来判断某个指标的离散程度, 其信息熵值越小, 指标的离散程度越大, 该指标对综合评价的影响 (即权重) 就越大, 如果某项指标的值全部相等, 则该指标在综合评价中不起作用 [7]。因此, 可利用信息熵这个工具, 计算出各个指标的权重, 为多指标综合评价提供依据。如何消除主观评价中主观性过重的影响, 同时削弱客观评价无倾向性可能带来的异常, 将多种评估方法的有机结合, 是十分重要的问题。

2 主 – 客观一体化方法模型构建

海上风电塔筒安全监测拟以物联网设备监测等多种技术相结合, 获取监测时段内海上风电塔筒结构安全情况。结合其他社会经济、重大工程建设等资料, 依据《固定式海上风力发电机组设计要求》(GB/T 31517.1-2022) 等评估标准, 将评估指标分成三个等级, 其中包括一个一级指标, 二个二级指标, 六个三级指标, 并建立区域海上风电塔筒安全风险评估模型。本研究对现有的层次分析法 (AHP) 进行了扩展, 并将 AHP 与有序加权平均法 (OWA) 和熵权法 (EWM) 相结合, 开发出用于实时损害评估和预警的实时综合评估方法 (HAHP)。HAHP 计算过程由主观和客观两部分组成, 主观权重计算由 OWA 修正 AHP 法组成, 客观权重计算由 EWM 法组成, 最后得到综合权重。HAHP 的计算流程图如下图 1 所示。



图 1 HAHP 计算流程图

3 海上风电塔筒结构主观评估体系研究

OWA 理论是一种离散数据加权方法, 可以有效降低主观极值偏差对权重准确性的影响。OWA 理论与 AHP 的结合可以有效修正 AHP 方法得到的权重, 考虑不同指标的相对重要性和层次重要性顺序的影响, 更全面地对海上风电塔筒结构进行评价。

3.1 层次分析法计算主观权重

海上风电塔筒结构实时安全风险评估模型的技术标准定义如下:

$$A_j = \sum_{i=1}^n (w_i C_{i,j}) \quad (2-1)$$

其中, A_j 表示第 j 个时间步长下的海上风电塔筒结构安全风险指数, $C_{i,j}$ 表示第 j 个时间步长下第 i 个三级评估指标的风险分值, w_i 表示第 i 个评估指标与时间无关的权重, 其中 $\sum_{i=1}^n (w_i) = 1$ 。其中 i 、 n 和 j 分别表示三级指标数、指标总数和时间步长。图 2 表示根据评估指标建立的三级实时安全风险指数评估系统。

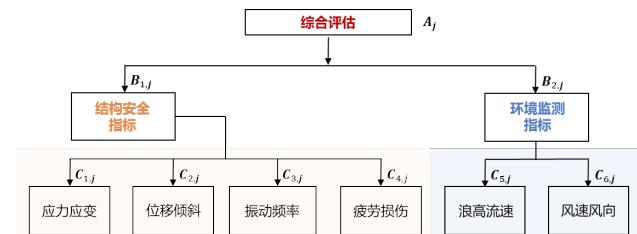


图 2 海上风电塔筒结构安全风险指数评估系统

根据 T-HAHP 方法, 求解与时间无关的权重指标 w_i 的过程实质上就是求解判断矩阵最大特征根对应的特征向量, 其中特征向量代表元素的重要性。计算公式如式 2-2 所示。

$$w_i = \frac{M_i}{\sum_{i=1}^n M_i} = \frac{\sqrt[n]{\prod_{j=1}^n a_{ij}}}{\sum_{i=1}^n M_i} \quad (2-2)$$

其中, M_i 是第 i 行元素乘积的 n 次根。

判断矩阵是否满足一致性的标准是 $CR_j \leq 0.1$, 即当 $CR_j > 0.1$ 时, 矩阵不满足一致性要求, 需要重建。的计算公式如式 2-3 所示。

$$CR_j = \frac{CI_j}{RI} \quad (2-3)$$

其中, $CI_j = (\lambda_{\max,j} - n)(n - 1)$, n 代表矩阵的阶数。当 $n=1, 2$ 时, 判断矩阵完全一致, 无需检查。 RI 是通过大量实验计算出的平均一致性指数。对于固定数量的阶数 n , 随机构建一个成对比较矩阵 $A_{i \times j}$, 其中 A_{ij} 是来自 $1, 2, \dots, 9, 1, 1/2, \dots, 1/9$ 的矩阵。在构建足够数量的矩阵 A_{ij} 后, 求矩阵最大特征值的平均值 RI 。对于不同阶数 n , 平均一致性指数 RI 的值如下表 1 所示。

$\lambda_{\max,j}$ 是矩阵在第 j 个时间步的最大特征根, 其值如式

2-4 所示。

$$\lambda_{\max,j} = \sum_{i=1}^n \frac{\sum_{i=1}^n w_i C_{i,j}}{n w_i} \quad (2-4)$$

表 1 平均一致性指数 RI

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0	0	0.52	0.89	1.12	1.26	1.36	1.41	1.46	1.49

根据图 2 所示的系统层次结构, 对同一标准层之间的要素进行两两比较, 并根据相对重要性赋值采用 0-9 标度法构建判断矩阵。利用求和法计算单一标准下的权重向量, 并进行一致性检验。具体计算结果见表 2。第 j 个时间步的海上风电塔筒结构的指标权重如表 3 所示。海上风电塔筒结构指标的相对权重是根据专家打分和相关评价标准制定的。

表 2 第 j 个时间步的各层级权重向量的计算和一致性检验

A_j	$B_{1,j}$		$B_{2,j}$		w	一致性检验		
$B_{1,j}$	1		2		0.67	矩阵完全相同 无需检验		
$B_{2,j}$	0.5		1		0.33			
$B_{1,j}$	$C_{1,j}$	$C_{2,j}$	$C_{3,j}$	$C_{4,j}$	w	一致性检验		
$C_{1,j}$	1	1	1/2	2	0.22	$\lambda_{\max,j} = 4$ $CI_j = 0$ $RI = 0.89$ $CR_j = 0$		
$C_{2,j}$	1	1	1/2	2	0.22			
$C_{3,j}$	2	2	1	4	0.44			
$C_{4,j}$	1/2	1/2	1/4	1	0.11			
$B_{2,j}$	$C_{5,j}$		$C_{6,j}$		w	一致性检验		
$C_{5,j}$	1		0.5		0.33	矩阵完全相同 无需检验		
$C_{6,j}$	2		1		0.67			

表 3. 三级指标权重

二级指标	三级指标	权重
结构安全指标 $B_{1,j}$	应力应变 ($C_{1,j}$)	0.148
	位移倾斜 ($C_{2,j}$)	0.148
	振动频率 ($C_{3,j}$)	0.294
	疲劳损伤 ($C_{4,j}$)	0.073
环境监测指标 $B_{2,j}$	浪高流速 ($C_{5,j}$)	0.11
	风速风向 ($C_{6,j}$)	0.22

3.2 有序加权平均法修正主观权重

接下来, 利用 OWA 理论对 AHP 计算结果进行修改的过程如下:

权重重排

将 s 位专家使用 AHP 得出的某指标的得分 $(b_{11,j}, b_{12,j}, \dots, b_{1s,j})$ 按降序重新排序, 重新排序后的数据为 $(r_{0,j}, r_{1,j}, r_{2,j}, \dots, r_{s-1,j})$, $r_{0,j} < r_{1,j} < r_{2,j} < \dots < r_{s-1,j}$ 。

确定加权向量

新数据 r_{ij} 的加权向量 v 可由 $C_{s-1,j}^{ij}$ 确定:

$$v = \frac{C_{s-1,j}^{ij}}{\sum_{i=0}^{s-1} C_{s-1,j}^{ij}} = \frac{C_{s-1,j}^{ij}}{2^{s-1}} \quad (2-5)$$

其中, $C_{s-1,j}^{ij}$ 是在 $s-1, j$ 选择 i, j 数据后的组合数, $i = 0, 1, 2, \dots, s-1$ 。

计算基础权重

根据权重向量对数据进行加权, 得出指数的绝对权重

$$\overline{w_{ij}} = \sum_{i=0}^{s-1} v \times r_{ij} \quad (2-6)$$

修改后的权重如下式所示:

$$w_{ij} = \frac{\overline{w_{ij}}}{\sum_{i,j=1}^s \overline{w_{ij}}} \quad (2-7)$$

4 海上风电塔筒结构客观评估体系研究

熵最初是热力学中反映物质热运动无序程度的一种符号。后来人们将其引入信息论, 用来衡量整体的无序程度。EWM 是一种计算权重的客观方法。在赋值过程中不添加人为主观因素, 能相对真实地反映指标之间的关系。权重的确定步骤如下:

构建初始矩阵

假设评价中有 n 个指标和 s 个评价者, 构建初始数据矩阵 $\mathbf{L} = (l_{im})_{n \times s}$, 其中 l_{im} 为第 m 个评价者评价第 i 个评价因子的风险等级。

定义指标熵

第 i^h 个指标的熵如式 3-1 和式 3-2 所示。

$$\overline{l_{im}} = \frac{l_{im}}{\sum_{i=1}^n l_{im}} \quad (0 \leq l_{im} \leq 1) \quad (3-1)$$

$$e_i = -c \sum_{m=1}^s \overline{l_{im}} \ln \overline{l_{im}} \quad (3-2)$$

其中, $c = \frac{1}{\ln s}$, 并假设当 $\overline{l_{im}}$ 等于零时, $\overline{l_{im}} \ln \overline{l_{im}}$ 等于零。

计算熵权

第 i^h 个评价指标的熵权 H_i 由公式 3-3 计算得出。

$$H_i = \frac{1-e_i}{n-\sum_{i=1}^n e_i} \quad (3-3)$$

获取指标的熵权

计算所有评价指标的熵权, 得出桥梁上部结构安全评价因子的权重列向量

$$H = (H_1, H_2, \dots, H_n)^T.$$

5 海上风电塔筒结构主 – 客观综合评估体系研究

本研究将 OWA-AHP (主观) 与熵法 (客观) 相结合, 并采用加法合成法合成权重。这两种方法相辅相成, 既减少了赋值过程中的主观随机影响, 又消除了熵值不能反映知识经验的负面影响, 使评价结果更加客观。设 $Q_{i,i}$ 为由 OWA-AHP 和 EWM 合成的第 i 个指标的最终权重。

$$Q_{i,j} = \beta w_i + (1 - \beta) H_i \quad (4-1)$$

其中 $Q_{i,j}$ 表示时间序列下 w_i 和 H_i 的线性组合。

建立使 OWA-AHP 和 EWM 的权重平方差之和最小的函数如公式 4-2 所示。

$$mins = \sum_{i=1}^n [(Q_{ij} - w_i)^2] + [(Q_{ij} - H_i)^2] \quad (4-2)$$

解得 $\beta = 0.5$, 具有普遍性, 因此第 i 个指标的综合权重如下:

$$Q_{ij} = 0.5w_i + 0.5H_i \quad (4-3)$$

最终, 利用 HAHP 对海上风电塔筒结构进行评价的专

家得分、AHP 权重、OWA 修正权重、熵权重和综合权重如表 4 所示。将所得分数与表 5 中的评判标准进行比较, 即可确定海上风电塔筒结构的预警等级。根据表 4 中各项指标的权重, 海上风电塔筒结构安全风险评估结果为

$$A_j = 0.1495C_{1j} + 0.1165C_{2j} + 0.229C_{3j} + 0.2575C_{4j} + 0.079C_{5j} + 0.173C_{6j} \quad (4-4)$$

表 4 使用 HAHP 对海上风电塔筒结构进行评估的专家评分、AHP 权重、OWA 修正权重、熵权重和综合权重

指标	专家 1	专家 2	专家 3	专家 4	专家 5	AHP 权重	OWA-AHP 权重	EWM 权重	Q
B1	2	2.5	4	1.5	3	0.67	0.68	/	/
	1	2	1.5	1	1	0.33	0.32	/	/
B1	C1	0.5	0.6	1	0.3	0.45	0.148	0.15	0.149
	C2	0.4	0.7	0.8	0.4	0.55	0.148	0.16	0.073
	C3	0.8	1	1.5	0.6	1.85	0.294	0.31	0.148
	C4	0.3	0.2	0.7	0.1	0.15	0.073	0.07	0.2575
B2	C5	0.3	0.5	0.5	0.5	0.36	0.11	0.12	0.038
	C6	0.7	1.5	1	0.5	0.64	0.22	0.2	0.146

表 5 海上风电塔筒结构预警级别的判断标准

分数	预警等级
[90, 100]	I
[80, 90)	II
[70, 80)	III
[60, 70)	IV
[0, 60)	/

6 结语

本研究结合其他社会经济、重大工程建设等资料, 依据国家规范和评估标准, 建立区域海上风电塔筒安全风险评估模型。本研究对现有的层次分析法 (AHP) 进行了扩展, 并将 AHP 与有序加权平均法 (OWA) 和熵权法 (EWM) 相结合, 开发出用于实时损害评估和预警的实时综合评估方法 (HAHP)。本研究所得到的实时综合评估方法既减少了赋值过程中的主观随机影响, 又消除了熵值不能反映知识经

验的负面影响, 使评价结果更加客观。本研究所提出的综合评估方法对于海上风电等大型海洋工程结构的综合评估预警方案具有指导意义。

参考文献

- [1] 丰力, 张莲梅, 韦家佳, 等. 基于全生命周期经济评估的海上风电发展与思考[J]. 中国电力, 2024, 57(09): 80-93.
- [2] 耿大洲, 查浩, 黄洁亭, 等. 迈向深水远岸的海上风电关键技术展望与思考[J]. 水力发电, 2024, 1-8.
- [3] 马士东, 姚法仍, 刘其常, 等. 基于大数据的海上风电风机环境腐蚀性分析[J]. 船舶工程, 2024, 46(S1): 123-127+183.
- [4] 刘占领, 黄远远. 基于海上风电结构安全监测系统的研究[J]. 船舶工程, 2024, 46(S1): 166-171.
- [5] 郭金玉, 张忠彬, 孙庆云. 层次分析法的研究与应用[J]. 中国安全科学学报, 2008, (05): 148-153.
- [6] 高丽红, 徐格宁, 杨萍. 基于最大熵有序加权平均法的门座起重机结构可靠度优化分配[J]. 起重运输机械, 2011, (11): 1-5.
- [7] 罗毅, 李昱龙. 基于熵权法和灰色关联分析法的输电网规划方案综合决策[J]. 电网技术, 2013, 37(01): 77-81.