



科技创新与工程

Technological Innovation and Engineering

Volume 3 Issue 2 February 2026 ISSN 3060-8996(Print) 3060-8988(Online)



科技创新与工程

Technological Innovation and Engineering

Volume 3 · Issue 2 · February 2026 · ISSN 3060-8996(Print) 3060-8988(Online)

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



中文刊名：科技创新与工程
 ISSN：3060-8996（纸质） 3060-8988（网络）
 出版语言：华文
 期刊网址：http://journals.nassg.org/index.php/tie-cn
 出版社名称：新加坡南洋科学院

Serial Title: Technological Innovation and Engineering
 ISSN: 3060-8996 (Print) 3060-8988 (Online)
 Language: Chinese
 URL: http://journals.nassg.org/index.php/tie-cn
 Publisher: Nan Yang Academy of Sciences Pte. Ltd.

Database Inclusion



版权声明/Copyright

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

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

Nanyang Academy of Sciences Pte. Ltd.
 12 Eu Tong Sen Street #07-169 Singapore 059819
 Email: info@nassg.org
 Tel: +65-65881289
 Website: http://www.nassg.org



期刊概况:

中文刊名：科技创新与工程
 ISSN：3060-8996（Print） 3060-8988（Online）
 出版语言：华文刊
 期刊网址：http://journals.nassg.org/index.php/tie-cn
 出版社名称：新加坡南洋科学院

出版格式要求:

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

出刊及存档:

- 电子版出刊（公司期刊网页上）
- 纸质版出刊
- 出版社进行期刊存档
- 新加坡图书馆存档
- 谷歌学术（Google Scholar）等数据库收录
- 文章能够在数据库进行网上检索

作者权益:

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

评审过程:

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

科技创新与工程

Technological Innovation and Engineering

Volume 3 Issue 2 February 2026
ISSN 3060-8996 (Print) 3060-8988 (Online)

主 编

康继军

Jijun Kang

编 委

刘 敏 Min Liu

龚勤林 Qinlin Gong

陈 升 Sheng Chen

包 艳 Yan Bao

夏旭东 Xudong Xia

1	质量计量检验检测工作强化路径分析 / 刘彦麟	/ 龚云华
4	云计算技术在县级融媒体中心广播电视工程资源整合中的应用研究 / 韩雪莲	34 雷击导致西门子 7UM622 保护装置差动保护误动原因分析 / 陈晓峰
7	铝加工热轧机烟气处理技术及工程应用研究 / 马金伟	38 智能化计量检测技术在能源计量中的应用分析 / 任万杰 韩海涛
10	网络设备维修场地优化策略与实施效果评估 / 高玉章 苏锋	41 煤化工 EPC 项目采购进度控制关键节点与管理策略 / 马蕴霞 季旭 王靖凯
13	基于多参数综合分析的电子元器件质量检测方法研究 / 杨欢 薛明辉	44 太阳能 + 空气能复合能源——燃煤锅炉节能优化 / 张德财
16	基于因果推理的智能控制系统故障溯源与自愈策略 / 张文甫	49 地铁施工中地下车站防水施工技术分析 / 李扬
20	基于轮毂电机驱动力分配的电动汽车差速转向与稳定性协同控制研究 / 任锦玲	52 物联网软件技术的架构设计与性能优化研究 / 许润泽
25	压电电磁复合式自供电鼠标微能量收集机制探索 / 孔德一 袁诚彬 范鑫勃 郑文广	55 水利工程运行管理标准化的实践与创新 / 张浩然
28	基于图像识别技术的古钱币真伪鉴别初探——以清代铜钱为例 / 陈澜齐	58 外贴式仪表在石油化工行业的应用与发展 / 白瑞亭 吕慧娟
31	基于智能技术的山地光伏智慧工地安全监控管理创新	61 水库大坝坝基固结灌浆施工技术的探索 / 李思阳
		64 多工况下高温热炉场热损失控制与能效优化 / 王思锋 方奇

- 1 Analysis of the Strengthening Path for Quality Measurement Inspection and Testing Work
/ Yanlin Liu
- 4 Application of Cloud Computing Technology in the Integration of Radio and Television Engineering Resources in County-level Converged Media Center
/ Xuelian Han
- 7 Research on Flue Gas Treatment Technology and Engineering Application of Hot Rolling Mill in Aluminum Processing
/ Jinwei Ma
- 10 Optimization strategy and implementation effect evaluation of network equipment maintenance site
/ Yuzhang Gao Feng Su
- 13 Research on Quality Inspection Methods for Electronic Components Based on Multi-parameter Comprehensive Analysis
/ Huan Yang Minghui Xue
- 16 Fault Traceability and Self-healing Strategies for Intelligent Control Systems Based on Causal Inference
/ Wenfu Zhang
- 20 Research on Coordinated Control of Differential Steering and Stability for Electric Vehicles Based on Hub Motor Driving Force Distribution
/ Jinling Ren
- 25 Exploration of the Micro-energy Harvesting Mechanism for a Piezoelectric-electromagnetic Composite Self-powered Mouse
/ Deyi Kong Chengbin Yuan Xinbo Fan Wenguang Zheng
- 28 A Preliminary Study on Authenticity Identification of Ancient Coins Based on Image Recognition Technology — Taking Qing Dynasty Copper Coins as an Example
/ Lanqi Chen
- 31 Safety monitoring and management innovation of mountain photovoltaic intelligent construction site based on intelligent technology
/ Yunhua Gong
- 34 Analysis of the Cause of the Differential Protection Malfunction of Siemens 7UM622 Protection Device Caused by Lightning Strike
/ Xiaofeng Chen
- 38 Application Analysis of Intelligent Metering and Testing Technology in Energy Metering
/ Wanjie Ren Haitao Han
- 41 Key Nodes and Management Strategies of Procurement Schedule Control for EPC Project of Coal Chemical Industry
/ Yunxia Ma Xu Ji Jingkai Wang
- 44 Solar energy + air energy hybrid energy - energy-saving optimization of coal-fired boilers
/ Decai Zhang
- 49 Analysis of waterproofing construction technology in underground station during subway construction
/ Yang Li
- 52 Research on Architecture Design and Performance Optimization of Internet of Things Software Technology
/ Runze Xu
- 55 Practice and Innovation of Standardization of Operation and Management of Water Conservancy Project
/ Haoran Zhang
- 58 Application and Development of External Instrument in Petrochemical Industry
/ Ruiting Bai Huijuan Lv
- 61 Exploration of the Construction Technology of Consolidation Grouting for Dam Foundation of Reservoir
/ Siyang Li
- 64 Control of High-Temperature Furnace Field Heat Loss and Energy Efficiency Optimization Under Multiple Operating Conditions
/ Sifeng Wang Qi Fang

Analysis of the Strengthening Path for Quality Measurement Inspection and Testing Work

Yanlin Liu

Yunnan Qujing Inspection, Testing and Certification Institute, Qujing, Yunnan, 655000, China

Abstract

Quality measurement, as an important part of the technical support system and a key guarantee for promoting product quality improvement, has become an inevitable requirement for the high-quality development of the industry. It also plays an irreplaceable role in economic and social development. Measurement technology, as the core foundation of modern quality management, has achieved significant results by applying advanced detection methods to product quality control.

Keywords

quality measurement; Inspection and testing; Work optimization; Strengthening strategy

质量计量检验检测工作强化路径分析

刘彦麟

云南省曲靖市检验检测认证院, 中国·云南 曲靖 655000

摘要

质量计量作为技术支撑体系的重要环节, 推动产品质量提升的关键保障, 如今, 精准计量检测已成为产业高质量发展的必然要求, 对于经济社会发展也发挥着不可替代作用。计量技术作为现代质量管理的核心基础, 将先进检测方法应用于产品质量控制当中, 已经取得显著成效。然而在将新技术应用之前, 检测标准不统一, 进行方法验证不足, 将影响检测结果可靠性, 这样难以满足高质量发展需求, 制约检测体系建设。本文基于当前发展现状, 主要就质量计量检验检测工作面临的问题进行深入剖析, 并提出切实可行的强化路径, 以供参考。

关键词

质量计量; 检验检测; 工作优化; 强化策略

1 引言

随着市场经济的深入发展, 质量计量的精准性要求日益提高, 实现产品全生命周期质量控制。由于计量数据是产品质量评价的重要依据, 实现检测结果准确可靠进一步保障消费者权益。对于制造业高质量发展, 由于计量标准体系尚不完善, 搭建科学合理的检测体系能提升产品市场竞争力, 同时规范行业秩序, 企业能更好地满足国际标准要求, 这有利于增强产业核心竞争力, 使产品质量提升获得坚实技术支撑。现阶段, 国际标准化组织对计量检测工作提出更高要求。标准差异大, 致使检测方法不统一、数据可比性差、结果可靠性低、技术更新滞后等问题, 引发贸易壁垒、市场混乱、消费者信任危机等挑战, 严重影响产业发展。检测能力不足, 检测的科学性与规范性, 缺乏系统性规划, 存在技术瓶颈或管理漏洞。而计量检测工作亟待优化升级。因此, 探索

质量计量检验检测工作系统化、规范化的强化措施, 基于现代技术手段, 对提升检测效能和保障产品质量具有重要实践价值。

2 强化质量计量检验检测工作的意义

2.1 提升产品质量控制水平

产品质量的精准控制需要可靠计量数据支撑, 对检测精度和结果可靠性要求高。对于复杂产品的质量检测, 在实施全过程质量监控需要专业设备、技术人才和标准方法, 同时会增加企业运营成本。但在先进计量技术支持下, 将实现检测过程自动化智能化, 通过大数据分析进行质量趋势预测, 降低检测成本, 进而提升质量控制效率。从长远发展看, 企业的产品质量控制能力显著提升, 进一步优化生产工艺, 推动产品质量持续改进, 这对于企业市场竞争力提升具有决定性意义^[1]。

2.2 提升市场信任度与竞争力

在国际贸易当中, 计量检测结果需要国际互认, 因此检测标准必须符合国际规范。而在现代检测技术支撑下, 只

【作者简介】刘彦麟(1981-), 女, 中国山东潍坊人, 本科, 工程师, 从事质量检验检测研究。

需要执行统一标准，其余检测过程和结果分析由专业机构完成，这使得检测结果与国际标准实现无缝对接，进而提升产品国际认可度。计量检测作为质量保证体系的核心环节，检测结果的可靠性就是产品质量的“通行证”。在出口贸易中，精准的计量检测，质量检测被视为产品进入国际市场的“敲门砖”，依靠权威检测报告，在满足技术法规、市场准入、客户要求的同时，强化的产品国际竞争力。计量检测既是产品质量的“度量衡”，同时是企业信誉的“试金石”。实践中，良好的检测体系，企业市场形象显著提升。

2.3 有助于产业高质量发展

目前，质量计量检测已经融入产业链各环节的必要支撑，将先进检测技术引入产业质量控制体系，能有效预防质量问题，通过精准数据支持产品质量持续改进，保障生产过程中质量风险可控。计量检测作为连接研发与生产的桥梁，既是技术创新与产业应用的“转换器”，同时是质量提升的“助推器”。在制造业升级过程中，注重检测技术与生产流程融合，通过标准制定和技术创新，实现质量预测及过程优化，促进产业健康发展^[2]。

3 质量计量检验检测工作中的问题

3.1 标准体系不够完善

由于计量技术发展的不均衡性，检测标准并不完全适应新兴领域的检测需求，不同行业间标准差异明显。目前，部分企业对计量检测工作重视不足，忽视检测标准对产品质量的决定性影响，有些企业甚至认为计量检测属于可有可无的辅助环节，影响检测工作的系统性开展，在生产过程中不需要投入过多资源，这种观念严重阻碍先进检测技术应用。另外，部分检测机构的标准更新缺少与国际接轨的前瞻性，使检测工作应用新技术时缺少有效指导。企业的检测标准理念，会影响计量检测工作在质量管理体系中的实际效能^[3]。

3.2 技术能力有待提升

计量检测是科学理论与工程实践结合的综合性工作，属于专业技术服务领域，其中检测方法开发、设备校准维护等，以及数据分析解读等专业环节，缺一不可。检测工作想要达到国际先进水平，必须具备过硬的技术实力。目前，检测机构的技术能力普遍参差不齐，专业技术人员配备不够合理，导致检测结果可信度不高，影响企业决策。技术人员在完成基础检测以后，往往只关注数据记录和报告出具，这在复杂产品检测中又增加了技术难度。在实际检测工作过程中，检测机构存在技术能力不均衡的问题，对于新兴检测需求，且标准体系不完善，没有建立相应检测能力，方法验证和设备校准，这对检测工作整体发展造成制约。

3.3 管理机制存在缺陷

计量检测与质量管理体系存在衔接问题，在实际运行过程中，许多问题相互交织，对检测工作效能和结果可靠性影响显著。对于复杂的检测任务，需要多部门协同配合，如

果沟通机制不健全，被检测对象的特殊性会出现检测方案不适用的情况，采样不规范、操作失误等问题，会给检测结果带来不确定性风险。

4 质量计量检验检测工作强化策略

4.1 完善标准体系建设

检测工作需要系统化的标准支撑，计量检测工作应以国际标准为基准，从行业实际需求出发构建完整标准体系，才能确保检测工作科学规范。在标准制定过程中，行业主管部门要考虑到技术发展和市场需求的双重因素，明确标准适用范围，形成系统化、层次分明的标准框架，在标准实施过程中实现检测工作规范化，更有针对性地解决实际问题。标准体系建设应根据产业发展阶段特征，确定标准建设重点方向。当前标准体系存在问题在于企业对自身检测能力认识不足，对检测标准的执行缺乏系统规划。因此，行业在制定标准体系时，主管部门要制定分阶段实施策略，客观评估、技术需求等关键因素的影响，做好标准制定与产业发展的衔接工作，明确标准建设优先级，结合企业实际情况，保障标准的实用性和可操作性。在标准实施过程中，既要考虑标准的统一性，也要关注行业特殊性，这样能够更好满足差异化需求，充分适应各类检测场景。

4.2 提升技术支撑能力

检测技术能力提升需要持续投入，各环节之间紧密配合，即便设备先进，在检测方法不匹配情况下。研发部门和技术部门需要密切协作，做好技术储备及人才培养工作，最大限度避免出现技术断层后果。如果技术能力出现短板，就要及时补强。检测机构还应加强技术交流和经验分享，定期组织技术培训，提升专业素养，尽可能缩小技术差距，也要注重技术成果转化，避免技术闲置浪费，促进技术迭代升级，实现检测能力持续提升。检测机构要提升检测能力，不仅要引进先进设备，还要培养专业人才，同时优化检测流程，如果检测环节存在技术瓶颈或方法缺陷，则应及时调整检测方案，各检测环节应建立标准化操作流程进行技术规范。技术能力决定检测工作的专业水平，保障检测质量是检测机构的核心使命。目前，检测技术处于快速发展阶段，技术能力提升需要系统规划，主管部门则要提供政策支持，进而完善技术体系，提升整体检测能力。

4.3 在数字化转型中创新检测模式

在技术变革影响下，数字化转型的检测技术应用，有助于构建智能化检测体系，利用大数据分析技术。检测技术的创新发展，进一步拓展了检测服务的广度和深度，检测机构可借助云计算、物联网技术，能对检测过程进行实时监控，保证检测流程规范可靠具有可追溯性，更好地满足质量监管需求。检测机构的数字化转型需要顶层设计，通过系统集成和流程再造。对于复杂的检测任务，在数字化转型过程中积累的数据实现了质量预测和风险预警，同时提升检测效率。

对检测数据管理，数据安全是检测工作的重要保障。对检测流程优化，机构应建立标准化的操作规程，注重检测过程的精细化管理。检测技术的创新发展空间广阔，让检测机构通过数字化转型形成技术优势、服务优势。让检测工作借助人工智能、区块链、5G 通信技术。实现检测智能化、管理精细化、服务个性化效果，为质量提升奠定坚实基础。在技术支撑下，将实现检测流程标准化，通过智能化系统进行质量评估，提升效率，最终实现检测工作全面升级。

4.4 提高人员专业素质

无论检测设备多么先进还是方法多么科学，人员素质始终是关键所在，检测机构应该加强人才培养，为检测工作提供人才保障，并对技术人员进行持续培训，建立激励机制，正确引导专业发展。针对检测人员的专业能力提升是检测质量保障的基础，检测技术水平只有通过持续学习，才能适应技术发展需求。机构要建立人才培养机制，通过专业培训解决人员的技术短板问题，做好理论知识与实践技能的衔接工作，互相促进专业成长，通过考核评价对检测人员能力进行科学评估，保障检测工作的专业水准。从行业发展趋势来看，检测技术的复杂性提高，这也要求检测人员能力持续提升，从而适应技术变革需求。针对检测人员能力不足问题，可以制定分层次培训计划，并建立考核机制，进一步完善人才培养体系，对检测人员职业发展进行系统规划。实践中，检测机构一定要重视人才培养，从知识结构、技能水平、职业素养等维度，加大培训投入力度，确保检测能力得到全面提升。在日常工作中，检测人员也要主动学习，加快知识更新速度，在技术应用过程中，进一步提升专业判断能力。伴随着检测技术的快速发展，检测人员的专业素质也能够同步提升，检测能力得到持续增强，从而确保检测工作高质量开展。

4.5 建立协同工作机制

对于检测工作，应该构建多方参与的协作机制，在明确职责分工以后，再去建立统一的检测标准体系，保障检测结果互认，开展跨部门的检测能力评估，保障检测工作的一致性和可靠性，这有利于提升检测效率，也利于资源优化配置。检测机构要保障检测数据的准确性，加强过程监控和结果验证，进而提升检测工作的公信力。市场环境下，检测机构之间存在竞争关系，通过建立行业联盟，信息共享等机制，形成良性竞争格局，基于统一标准体系，达到了提升整体检测水平目的。同时，检测能力评估也要常态化开展，推动了检测技术进步，促进了标准统一，在行业发展中，提升了检

测公信力。不仅完善了检测体系的运行机制，检测工作的社会价值体现出行业责任担当。在检测工作的协同机制当中，可以整合资源和共享技术，做好能力验证和结果比对工作，进而提升检测结果的可信度，实现检测工作的标准化。检测机构结合技术创新与服务优化。实践中，检测机构在提供检测服务的同时，还要以客户实际需求为导向。检测机构与企业客户。检测机构，企业客户与监管部门并形成良性互动，通过建立标准化服务流程或质量反馈机制。检测机构并提升服务水平。

4.6 创新管理模式

检测工作需建立科学的管理体系，检测机构需从客户需求出发构建服务模式。检测机构并优化流程。改变传统检测服务模式，设立一站式服务中心，检测服务并非简单检测，而是咨询、检测、改进一体化服务。整合检测资源，组织专业服务团队，深度参与质量改进，提升客户满意度。深化检测服务与质量管理融合。建立服务评价机制，不再局限于检测结果，而是响应速度、问题解决、客户体验等多维度评价。机构对服务质量进行定期评估，为持续改进提供依据，客户可实时查询检测进度与结果。将服务理念贯穿检测全过程，提升服务体验。制定服务标准，明确服务流程细节，构建客户导向的服务体系。设置基于客户反馈的持续改进机制，确保服务质量不断提升。

5 结语

综上所述，检测工作想要实现高质量发展，就必须夯实技术基础。检测能力直接决定服务质量，随着技术不断进步，检测机构一定要做好技术储备与人才培养工作，逐渐完善质量管理体系，尽可能避免质量风险问题出现，减少检测误差，助力产业高质量发展的目标实现。检测机构应通过技术创新、服务优化等手段，为产品质量提升提供全方位技术支持。实现检测工作规范化，能促进产业升级，也提升企业的市场竞争力，保障产品质量安全，推动检测行业整体水平提升。

参考文献

- [1] 张秋丽.质量计量检验检测工作强化路径分析[J].中国标准化, 2024,(18):154-158.
- [2] 姜峰.质量计量检验检测工作强化路径分析[J].数字化用户, 2023,(11).
- [3] 代月媛.计量检测机构数字化转型的探索与实践分析[J].品牌与标准化, 2025,(2).

Application of Cloud Computing Technology in the Integration of Radio and Television Engineering Resources in County-level Converged Media Center

Xuelian Han

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

Abstract

Against the backdrop of integrated media and smart broadcasting development, this study systematically examines the application of cloud computing technology in resource integration for county-level media convergence centers. Through practical case studies at Kashgar Media Convergence Center, the research demonstrates cloud computing's tangible benefits in enhancing resource utilization efficiency, optimizing production and broadcasting workflows, and improving system resilience. The analysis focuses on four key dimensions: centralized resource management, coordinated media operations, cost-effective technology implementation, and intelligent development support. Addressing persistent challenges including infrastructure disparities, system compatibility gaps, operational capacity limitations, and security vulnerabilities, the paper proposes a comprehensive implementation roadmap featuring infrastructure consolidation, cloud-based service deployment, strengthened IT talent development, and enhanced security protocols.

Keywords

Cloud computing technology; County-level media convergence center; Broadcasting and television engineering; Resource integration

云计算技术在县级融媒体中心广播电视工程资源整合中的应用研究

韩雪莲

喀什市融媒体中心（喀什市广播电视台），中国·新疆喀什 844599

摘要

在融媒体与智慧广电建设背景下，本文系统分析云计算技术在县级融媒体中心广播电视工程资源整合中的应用实践。通过对工程资源集约化管理、融媒体业务协同运行、技术成本控制及智慧化发展支撑等方面的探讨，结合喀什市融媒体中心的实际案例，论证了云计算在提升资源利用效率、优化制播流程和增强系统弹性方面的现实成效。同时，针对基础设施不均衡、系统兼容性不足、运维能力薄弱及安全管理有待完善等问题，提出了以夯实基础设施、推进业务上云、强化运维人才保障和健全安全制度为核心的实施路径。

关键词

云计算技术；县级融媒体中心；广播电视工程；资源整合

1 引言

在融媒体建设不断深化与智慧广电加快推进的背景下，县级融媒体中心广播电视工程资源分散、利用效率不高等问题日益凸显^[1]。云计算技术以其弹性算力、集中管理和按需服务等优势，为广播电视工程资源整合提供了新的技术路径。探讨云计算技术在县级融媒体中心工程资源整合中的应用价值与实践成效，对于优化技术结构、提升运行效率及推动县级融媒体高质量发展具有重要现实意义。

2 云计算技术在县级融媒体中心广播电视工程资源整合中的价值

2.1 推动广播电视工程资源集约化管理，提升资源配置整体效率

传统县级广播电视工程在设备配置与系统建设上多以业务条线为单位，形成相对独立的技术模块，导致服务器、存储和网络资源重复建设、闲置率较高。引入云计算技术后，可通过虚拟化与集中调度方式，对计算、存储和网络资源进行统一管理 with 动态分配。例如在喀什市融媒体中心项目中，将原来零散分布在各机房的播出保障服务器、媒体资产服务器逐渐迁移到私有云平台后，服务器物理节点数下降约 30%，服务器平均使用率从不到 40% 提高到 65% 以上，

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

解决了工程资源长年闲置不用的情况。集约化管理提升了资源利用率，为后期发展提供了延展性^[2]。

2.2 支撑融媒体业务协同运行，增强内容生产与传播能力

融媒体业务注重跨媒体协同、一体化采集编辑播出，对广电工程建设的资源整合提出了更高的要求，在云架构下，可以将多个采编播、媒资、传输系统的软硬件设备都放在同一个平台上，并按照一定的标准进行交互，达到共享和协作的目的。喀什市融媒体中心建设中，将新闻采编、融媒体发布、新媒体分发等多个子系统放到云平台之上，实现节目的素材在不同业务系统的快速调用。运行数据显示，云化改造后，节目素材跨系统调取时间缩短约40%，多终端同步发布效率明显提升，有效支撑了融媒体业务的协同运行与快速响应。

2.3 降低技术系统建设与运维成本，提升工程投入产出效益

传统的广电工程建设一般是一次性集中采购、独立部署的方式进行，前期投入大，后期扩展及维护成本高；而云计算以资源池和弹性扩展的特点实现工程建设从“重资产投入”到“弹性投入”。喀什市融媒中心工程资源云化后，进一步压缩高端专机配置规模，推广使用通用服务器和集中式存储架构。测算表明，在建成云平台后，每年运维及电能费用相比改造前节省约20%；业务新增扩容周期比改造前平均缩短了60%左右，项目建设投资效益显著提升^[3]。

3 云计算技术在县级融媒体中心广播电视工程资源整合中的困境

3.1 信息基础设施建设不均衡，制约云计算技术落地应用

云计算平台对于互联网宽带、机房条件以及底层设备的要求相对较高，而多数县级融媒中心的信息基础设施建设还较为薄弱，在实际应用中仍然存在部分采用普通专线或者窄带宽的情况，无法实现高分辨率摄像机上云制作节目以及大量数据上传下载的要求。比如，喀什市融媒体中心在建设初期，没有进行网络改造的情况下，主要业务出口带宽不到1Gbps，云端素材上传、下载高峰期平均时延达到30s多，严重影响节目的生产与播出速度。

此外，机房供电冗余、环境监控及硬件标准化程度不足，也在一定程度上限制了云计算平台的稳定部署，导致云化应用难以全面铺开。

3.2 系统兼容与数据整合难度较大，影响资源共享效果

由于县级融媒体中心广播电视工程系统的建设时间不同，所使用的设备厂家也不同，技术标准存在差异，在将多种异构的广播电视系统接入到基于云计算的平台中，存在接口不统一、数据格式不规范的问题。实际应用过程中发现，

有些原有的播控系统与新的云平台进行数据交换，需要经过二次开发或者借助一些中间软件才能实现相互之间的兼容。增加了技术难度及时间成本。喀什市融媒体中心在进行媒资上云的过程中，由于历史采集的节目资源信息描述格式不同，近五成的历史资料都需要二次加工整理，在后期融合方面的时间成本也大大增加。这类问题削弱了云计算在资源共享和快速调用方面的优势，也影响了工程资源整合的整体效果。

3.3 技术运维与专业人才储备不足，限制平台稳定运行

相较于传统的单机及专用设备运维方式，云计算环境下广播电视工程运维有较大差别，在虚拟化管理、网络安全以及系统调度等方面对技术人员提出了新的要求。但是，当前县级融媒体中心技术人员基本还是由传统的广播电视工程建设人员构成，对于云平台的维护尚缺乏足够的经验。喀什市融媒体中心在云平台刚建设好投入使用的时候，由于技术人员对资源调度和故障定位不够熟悉，个别系统的平均处置时间超过了40分钟，远远大于传统系统的处理时间。同时，受制于编制和经费条件，外部技术支持依赖度较高，内部运维能力提升相对缓慢，成为影响云计算平台长期稳定运行的重要因素^[4]。

3.4 安全管理与运行机制不完善，增加系统应用风险

基于云计算技术的应用，广播电视工程资源更加集中统一，在安全管理和运行上提出了新的挑战。而在具体实施过程中，部分县级融媒体中心的安全管理、权限控制以及风险评估等工作不到位，一些云平台在建设初期只注重功能上的满足，并没有充分考虑到数据分类防护、访问日志及灾难恢复等问题。在对喀什市融媒体中心的运行评估过程中，发现在初期搭建云平台时，备份周期相对较长，对于重要的业务数据异地备份率不到80%，当出现系统故障后，存在一定的运行风险。此外，安全管理制度与技术措施衔接不够紧密，也增加了云计算技术在工程资源整合中的不确定性，需要在后续实践中持续完善。

4 云计算技术在县级融媒体中心广播电视工程资源整合中的策略

4.1 完善云计算基础设施布局，夯实广播电视工程技术支撑

将云计算技术合理地运用到县级融媒体中心广播电视工程整合资源的过程中，前提是信息平台具有稳定性以及可靠性。由于县一级的网络环境以及硬件设施比较落后，所以要以补齐短板为原则，强化基础建设工作，并提高自身的工作能力，在这个基础上做好对云计算基础设施的规划。具体实践中，喀什市融媒体中心采用逐步进行网络升级改造的方式，将核心业务出口带宽从原来的千兆级提升到万兆级，并优先保证高清节目的制作、云端媒资调取以及向不同平台分

发等高并发业务的需求。升级完成后, 高峰时段云端素材传输平均时延下降约40%, 为云计算平台稳定运行奠定了基础。

从物理层面上讲, 采用标准服务器群集以及虚拟化资源整合了之前分散建设的计算及存储单元, 并逐步淘汰老旧、维护难度大的独立机器, 在满足广电工程建设需求的前提下完成数据中心供电、空调和安防系统的相应升级, 形成具有双电源、监控管理、基本容错功能的云计算平台环境。

4.2 推进业务系统上云整合, 提升资源协同与共享水平

广播电视工程资源融合的目的就是要打破各业务系统之间壁垒, 实现业务互通、资源共享。因此, 应该将云计算作为一体化载体, 逐步推动制播网、媒资网、播出控制网以及新媒体平台业务系统入云融合。按照“成熟一批、上线一批”的原则, 首先考虑将媒资管理系统、非线性编辑系统等对实时性要求不是特别高的业务迁移到云计算平台上进行虚拟化部署。

注重在系统集成中打通各系统的数据接口及业务流程, 统一各系统间的数据定义及数据交换格式, 实现各系统间的互联互通。如在上云集成之后, 将原有的电视节目、新媒体产品及历史资料集中到一个媒资系统进行管理, 在一定程度上实现了节目资源的有效复用, 提高了节目的利用效率; 原本的节目复用率为不到30%, 而现在达到了60%以上。大大降低了重复存储造成的资源浪费, 并借助云服务灵活伸缩的优势在大型集会及集中转播过程中动态增加算力和存储容量确保大流量高峰时段系统的稳定性, 提高了广播节目建设中资源的共享程度。

4.3 加强技术运维与人才培养, 保障云平台高效稳定运行

云计算背景下广播电视工程运维更为复杂, 对于相关技术人员提出了更高的要求, 所以应该在实现云计算的同时, 做好相关的技术运维体系构建以及技术人才培育工作。喀什市融媒体中心在进行云平台维护过程中, 从“机架为中心”转变为以“平台为中心”, 通过对统一云平台监控及管理系统的建立来实现计算资源利用率、存储负载以及网络状态的监视。

人员保障方面, 通过编制年度技术培训大纲, 加强云计算底层架构、虚拟资源管理、云环境下的信息安全等方面的集中学习, 技术人员每年平均专业技术培训时间达到40小时及以上, 并根据实际需求安排骨干力量参加上级部门或厂家的技术研讨及现场操作培训, 提高其在云平台运营以及出现问题处理方面的实际水平。据相关的运行资料显示, 在技术的运维体制逐渐完善的条件下, 云平台出现的问题的平

均解决时间由之前的四十分钟减少到十五分钟之内, 并且系统的稳定性能得到了明显的改善, 为广播电视工程资源的整合提供了不断的保证。

4.4 健全安全管理与制度体系, 促进云计算应用规范发展

由于广播电视工程资源经过云计算后的数据集中度和系统复杂度大大提高, 在运用云计算的过程中不能忽略对系统的安全管理, 应当以技术和制度双管齐下的方式加强安全管理, 建立“数据、系统、人员”的全方位安全体系。喀什市融媒体中心在使用云计算平台进行节目制作播出过程中, 针对广播电视业务特点, 逐步建立数据分级管理、访问权限管理和日志审计机制, 实现关键业务数据的分级授权、全流程留痕^[5]。

从技术层面来看, 引入防火墙、入侵检测及数据备份系统, 对云平台上服务的运行情况进行动态监测, 在此基础上实现本地、异地双备份模式下的数据备份体系。实际工作中, 中心将重要业务信息的备份频次从每星期一次改为每天一次, 异地备份比例达到95%以上, 有效地降低系统的运行风险。另外, 以制度的形式明确技术岗位责任和技术工作流程, 使得技术安全与管理安全能够互为补充地发挥作用, 在广播电视工程中对云计算技术进行合理利用和发展。

5 结语

综上所述, 利用云计算手段实现县级融媒体中心广播电视工程整合具有可行性和扩展性, 并能从根本上解决广播电视工程碎片化以及利用率不高等问题, 为融媒体业务融合及智慧广电发展提供有力支撑。随着网络平台夯实、业务应用上云和管理维护跟进, 云计算可以大大提高工程系统运行的稳定性和投产出比。今后随着技术条件及管理方式的不断成熟, 云计算将会在县级融媒体工程领域有更深入的应用, 并将在服务好公共文化建设和增强基层主流媒体服务水平等方面发挥更大的作用。

参考文献

- [1] 曾瑞杰.基于云计算的广播电视内容分发系统设计及实现[J].电视技术,2025,49(08):85-88.
- [2] 尹奉知.人工智能驱动的广播电视工程技术创新研究[J].中国传媒科技,2025,(05):145-149.
- [3] 阴立鹏,王海波.广电制播系统与云计算技术的探索与思考[J].数字传媒研究,2024,41(04):72-75.
- [4] 张蔚.基于融媒体主要技术支撑下的网络舆情控制探赜[J].网络安全技术与应用,2023,(05):159-161.
- [5] 黄红伟.广西广播电视与网络视听智慧监测监管的探索和实践[J].中国广播电视学刊,2022,(05):129-132.

Research on Flue Gas Treatment Technology and Engineering Application of Hot Rolling Mill in Aluminum Processing

Jinwei Ma

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

Abstract

During aluminum processing hot rolling operations, emulsified liquid evaporation at high temperatures generates substantial oil-laden smoke emissions. Improper treatment may lead to workshop smoke dispersion, chimney oil drift, and white mist emissions, causing environmental pollution, increased environmental risks, and higher maintenance costs. This paper proposes an integrated "old equipment retrofit + multi-stage condensation filtration" solution addressing critical issues in domestic flue gas treatment systems, including excessive filtration velocity, incomplete purification, and lack of automatic cleaning capabilities, in accordance with the Technical Guidelines for Emergency Emission Reduction Measures in Key Industries During Severe Air Pollution. The solution details process design, key equipment selection, construction planning, and analyzes technical feasibility and application benefits. Practical implementation demonstrates that this approach maintains filtration velocity at 2-2.5 m/s, significantly improves oil mist purification efficiency, achieves compliant flue gas emissions, reduces maintenance costs, and provides reliable technical references for hot rolling flue gas treatment in aluminum processing industries.

Keywords

aluminum processing; hot rolling mill; oil mist flue gas; multi-stage filtration; condensation recovery

铝加工热轧机烟气处理技术及工程应用研究

马金伟

河南中孚高精铝材有限公司, 中国·河南 巩义 451200

摘要

铝加工热轧机在生产过程中因乳化液受高温蒸发后会产生大量含油雾的烟气, 若处理不当易出现车间内烟气逸散、烟囱飘油、白雾排放等问题, 不仅污染环境, 增加环保事件风险, 还会增加设备维护成本。本文结合《重污染天气重点行业应急减排措施制定技术指南》要求, 针对国内现有烟气处理系统过滤风速过高、净化不彻底、无法自动清洗等关键问题, 提出“旧设备改造+多级冷凝过滤”的集成处理方案。详细阐述了方案的工艺设计、关键设备选型、施工组织计划, 并对技术可行性和应用效益进行分析。实践表明, 该方案可将过滤风速控制在2~2.5m/s, 油雾净化效率显著提升, 实现烟气达标排放, 同时降低维护成本, 为铝加工行业热轧机烟气处理提供可靠的技术参考。

关键词

铝加工; 热轧机; 油雾烟气; 多级过滤; 冷凝回收

1 引言

1.1 研究背景与意义

铝加工行业作为有色金属压延的重要分支, 其热轧机在高温轧制过程中, 为保障轧制效率和产品质量, 需使用大量轧制油进行润滑和冷却, 由此产生大量含油雾的烟气。这类烟气中含有非甲烷总烃等挥发性有机物, 若直接排放或处理不彻底, 会出现烟囱飘油、冬季或阴雨天白雾弥漫等现象, 对厂区及周边大气环境造成污染, 同时也会腐蚀周边设备、影响生产环境整洁。

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

随着国家环保政策的日益严格, 《重污染天气重点行业应急减排措施制定技术指南》等规范对有色金属压延行业的污染治理技术提出了明确要求, 规定油雾处理需采用多级回收+挥发性有机物治理技术^[1]。在此背景下, 研发高效、稳定、经济的铝加工热轧机烟气处理技术, 不仅是企业满足环保排放要求的必然选择, 也是推动行业绿色低碳发展的重要举措。

1.2 国内外研究现状

目前, 国内外针对工业油雾烟气处理的技术主要包括机械过滤法、冷凝法、静电吸附法、吸附法等^[2]。机械过滤法因结构简单、成本较低、维护便捷等特点, 在工业领域应用广泛, 但传统机械过滤设备存在过滤风速难控制、滤网易堵塞、需频繁更换等问题。冷凝法通过降低烟气温度使油雾

凝结回收,可有效降低后续处理负荷,但单一冷凝技术难以实现超净排放。静电吸附法净化效率高,但对烟气温度和粉尘含量敏感,易发生放电现象,维护要求较高。

现有研究多聚焦于单一技术的优化,而针对铝加工热轧机烟气量大、油雾浓度波动大、排放要求高的特点,将多级冷凝与机械过滤相结合的集成处理技术研究仍有待深入。本文结合实际工程案例,提出“沉降+冷凝+多级丝网过滤”的集成方案,解决传统技术存在的不足,实现烟气高效处理。

1.3 研究内容与技术路线

本文以现有铝加工行业主流热轧车间的油雾烟气处理设备配置为依托,主要研究内容包括:一是分析现有烟气处理系统存在的关键问题;二是结合环保规范要求,设计集成化烟气处理方案;三是优化关键设备结构与参数;四是制定科学的施工组织计划;五是分析方案的技术可行性与应用效益。技术路线为:问题诊断→规范解读→方案设计→设备选型→施工规划→效益分析。

2 铝加工热轧机烟气处理技术背景与需求分析

2.1 热轧机烟气特性分析

铝加工热轧机产生的烟气主要为含乳液油雾烟气,具有以下特性:一是烟气量大,通常热轧机排烟净化装置单台风机处理风量可达200000m³/h;二是油雾颗粒粒径分布广,既有大颗粒油滴,也有微小油雾颗粒;三是烟气温度较高,入口烟气温度通常不超过100℃;四是烟气中含有轧制油成分,具有一定粘性,易粘附在设备和管道内壁,造成堵塞和腐蚀。

2.2 现有处理系统存在的问题

现有常规油雾净化系统存在以下关键问题:一是过滤风速过高(4~5m/s),导致油雾穿透过滤装置,净化不彻底,出现烟囱飘油现象;二是冬季或阴雨天可见大量雾气从烟囱冒出,未实现“消白”要求;三是系统无法自动清洗,滤网频繁更换,维护成本显著增加;四是现有设备净化效率不足,难以满足非甲烷总烃达标排放要求。

2.3 环保规范要求

根据《重污染天气重点行业应急减排措施制定技术指南》中有色金属压延行业企业分级管控绩效要求,油雾处理需采用多级回收+挥发性有机物治理技术^[1]。冷凝器的设置不仅是合规治理技术的要求,同时有利于实现“消白”效果。因此,设计方案需满足多级处理要求,确保净化后烟气非甲烷总烃浓度达标,同时解决白雾排放问题。

3 铝加工热轧机烟气处理方案设计

3.1 方案设计原则

结合项目实际需求和环保规范要求,方案设计遵循以下原则:一是严格执行国家环保政策与标准,确保烟气达标排放;二是结合烟气特性,采用技术先进、质量可靠的净化技术和设备,缓解烟囱飘油现象;三是实现自动化控制与管

理,减少日常维护量,提升管理水平;四是设备布置紧凑合理,因地制宜优化布局,节约用地;五是兼顾一次性投资与运行维护费用的经济性;六是优先选用标准系列产品,提升设备可更换性。

3.2 总体处理方案设计

针对现有系统存在的问题,结合环保规范要求,提出“1级沉降室+1级冷凝+1级折流板粗过滤+1级圆丝不锈钢过滤丝网中过滤+1级扁丝不锈钢过滤丝网精过滤”的多级集成处理方案。同时,结合检修维护需求,设计分仓室切换阀门及反吹蒸汽连锁控制系统,实现在线清洗功能,保障系统长期稳定运行。

方案总体思路为:首先通过沉降室实现大液滴沉降分离,降低后续处理负荷;随后利用冷凝器回收部分油雾,实现“消白”初步效果;再通过多级过滤单元逐级截留不同粒径的油雾颗粒,确保净化效率;最后通过优化烟囱结构,进一步捕集残留液滴,实现达标排放。

3.3 工艺流程设计

轧机排烟罩收集的含乳液烟气在引风机的引导下,依次经过以下处理环节:一是在大尺寸沉降室,完成大液滴沉降;二是冷凝器段,通过冷凝作用回收部分油雾,降低烟气温度和油雾浓度;三是新增油雾净化器,在2~2.5m/s的优化过滤风速下,依次经过折流板粗过滤、圆丝不锈钢丝网中过滤、扁丝不锈钢丝网精过滤,油雾颗粒经碰撞、吸附、凝结后形成大液滴,在重力作用下流至集油槽;四是烟囱,利用出口特殊设计(伞形风帽+筒形风帽)捕集未被冷凝的残留液滴,最终达标排入大气。

4 关键设备设计与选型

4.1 设备组成

改进后的油雾净化系统主要由排烟管道、水冷冷凝器、新增分仓式油雾净化器、烟囱(结构改进)、回收油收集系统、蒸汽管道、压缩空气管道、电气控制系统、仪表及配套支架、平台、梯子等组成。各设备协同工作,确保烟气处理效果和系统稳定运行。

4.2 核心设备设计与选型

4.2.1 排烟管道

排烟管道采用钢制矩形/圆形管道,材质选用Q235,壁厚4mm,通过增设加筋结构增强强度。管道设计一定坡度,坡向油雾净化设备,便于冷凝乳液汇集收集,最终排入轧机地下室^[2]。同时,在管道上设置人孔、取样孔等辅助接口,方便设备检修和烟气检测。

4.2.2 水冷冷凝器

水冷冷凝器布置在新油雾净化器前,采用水-气冷凝器,换热管选用不锈钢管,具有耐腐蚀、传热效率高的特点^[4]。内部设置蒸汽吹扫管,防止换热管堵塞;底部设置排油口,回收冷凝油雾。冷凝器的设置不仅提升油雾回收效率,还能

有效降低烟气温度，助力“消白”，满足环保规范要求。

4.2.3 新增油雾净化器

新增油雾净化器采用机械过滤除雾法，选用丝网除沫器，具有除油效率高、结构简单、压力降小、重量轻等特点。设备内部设计三级过滤单元：一级折流板过滤，采用压型加沟槽结构，截留大颗粒油污；二级粗过滤，由多层大目数不锈钢网固定而成，吸附捕集细小雾滴；三级精过滤，采用小目数不锈钢网，截留微小油雾颗粒。每级过滤单元均配备蒸汽清洗系统，实现在线清洗。

为提升清洗效果和运行稳定性，设备内部分为多个仓室，可逐一封闭清洗；采用模块式结构设计，过滤网可人工取出，便于维护。通过增大设备截面积提升过滤面积，将过滤风速控制在 $2\sim 2.5\text{m/s}$ ，确保除雾效率，设备阻力 $\leq 1200\text{Pa}$ 。选用不锈钢网丝叠成的滤网，耐磨性强、易清洗，解决传统玻璃纤维滤网易堵塞、需频繁更换的问题。

4.2.4 烟囱烟帽

针对可能出现的烟囱飘油问题，在排气筒出口设置伞形风帽+筒形风帽的双重结构。气流先撞击伞形风帽，油滴通过惯性碰撞粘附在内壁，形成大颗粒后落入烟囱或筒形风帽底盘；气流转弯向下时，部分油滴随气流落入底盘；最终气流垂直向上从筒形风帽排出，控制排出速度在 $5\sim 10\text{m/s}$ ，确保液滴充分下落。风帽收集的油（雨天为油水混合物）靠重力流入轧机地下室废油箱。同时，对烟囱法兰、烟道口进行加固，提升结构稳定性。

4.2.5 气动风阀与控制系统

考虑到轧制油聚积可能出现的火灾隐患，在风管上设计测温仪表，与分仓清洗切换的气动开关阀联动。当检测到风管内温度达到 100°C 时进行超温报警；当温度达到 $130\sim 150^\circ\text{C}$ 时，全部阀门与风机同时关闭，防止火势蔓延。设定值可根据实际运行情况调整，提升系统安全性。

4.3 回收油收集系统

烟囱或油雾净化器产生的冷凝油靠重力流入乳化液集油坑，实现资源回收利用，降低能源浪费和环境污染。

5 方案技术可行性与应用效益分析

5.1 技术可行性分析

本文中所提到的“多级沉降+冷凝+丝网过滤”集成技术，各环节协同作用，可有效解决现有系统存在的问题。通过对原有设备的改造可实现大液滴沉降，降低后续处理负荷；冷凝器的设置实现油雾回收和“消白”，满足环保规范；多级丝网过滤系统在优化的 $2\sim 2.5\text{m/s}$ 风速下，可高效截留不同粒径的油雾颗粒，确保净化效率；在线清洗和连锁控制系统保障系统长期稳定运行。关键设备选用成熟可靠的产品，结构设计合理，技术参数符合项目需求，方案技术可行性高。

5.2 环境效益分析

方案实施后，预计油雾净化效率可显著提升，烟囱飘油现象得到有效缓解，冬季或阴雨天白雾排放问题得到解决，净化后烟气非甲烷总烃浓度达到排放要求，显著改善厂区及周边大气环境质量。同时，冷凝回收的油雾可重新利用，减少资源浪费和环境污染，具有良好的环境效益。

5.3 经济效益分析

经济效益主要体现在两个方面：一是减少滤网更换成本，采用的不锈钢滤网耐磨性强、易清洗，无需频繁更换，降低维护材料费用；二是降低人工维护成本，系统实现自动化控制和在线清洗，减少日常维护工作量，降低人工成本。

5.4 社会效益分析

项目的实施有助于企业满足环保政策要求，规避环保处罚风险，提升企业环保形象。同时，改善厂区生产环境，保障员工身体健康，增强员工工作积极性。此外，方案为铝加工行业热轧机烟气处理提供了可借鉴的技术方案，推动行业绿色低碳发展，具有良好的社会效益。

6 结论与展望

6.1 结论

本文针对铝加工热轧机烟气处理存在的过滤风速过高、净化不彻底、无法自动清洗、维护成本高等问题，提出“旧设备改造+多级冷凝过滤”的集成处理方案，得出以下结论：

(1) 该方案遵循环保规范要求，工艺流程合理，关键设备选型科学，可有效提升油雾净化效率，实现烟气达标排放；(2) 在线清洗和连锁控制系统的设计，保障系统长期稳定运行，减少维护工作量和成本；(3) 方案实施后，具有良好的环境效益、经济效益和社会效益，技术可行性高，适合在铝加工行业热轧机烟气处理项目中推广应用。

6.2 展望

未来可进一步优化方案设计，探索采用智能化监测与控制系统，实现烟气参数的实时监测和设备运行状态的智能调节，提升系统运行效率。同时，可研究新型高效过滤材料，进一步提升净化效率和滤网使用寿命。此外，可开展不同铝加工工艺烟气特性的研究，针对不同工况设计个性化的处理方案，推动铝加工行业烟气处理技术的不断创新和发展。

参考文献

- [1] 中华人民共和国生态环境部. 重污染天气重点行业应急减排措施制定技术指南[Z]. 北京: 生态环境部, 2023.
- [2] 王文宾, 李志锋, 戎娜. 工业油雾净化方法的研究现状[J]. 科技风, 2014, 18(045): 53-58.
- [3] 马文宏, 邱钧. 铝箔轧制油雾净化方法的应用及展望[J]. 有色金属设计, 2011, 38(03): 33-37.
- [4] 郭向毅, 崔冠波, 张敬礼, 蔡永光. 一种轧机烟气轧制油多级净化装置: CN202021773605.1[P]. 2021-5-14.

Optimization strategy and implementation effect evaluation of network equipment maintenance site

Yuzhang Gao Feng Su

Naval Aviation University Qingdao Campus, Qingdao, Shandong, 266041, China

Abstract

With the rapid development of network technology, the scale of use of network equipment continues to expand, and the demand for maintenance is also increasing. As the core place for equipment maintenance, the rationality and efficiency of maintenance sites directly affect the quality and efficiency of maintenance work. This article focuses on the optimization of network equipment maintenance sites. Firstly, it analyzes the problems existing in the current maintenance sites, proposes targeted optimization strategies, clarifies the specific steps of optimization implementation, and finally constructs a scientific effect evaluation system to measure the optimization results. The research aims to provide ideas for the construction and improvement of network equipment maintenance sites, enhance the operational efficiency of maintenance sites, and ensure the smooth progress of network equipment maintenance work.

Keywords

network devices; Maintenance site; Optimization strategy; Implementation steps; effect evaluation

网络设备维修场地优化策略与实施效果评估

高玉章 苏锋

海军航空大学青岛校区, 中国·山东 青岛 266041

摘要

随着网络技术的快速发展, 网络设备的使用规模不断扩大, 维修需求也日益增加, 维修场地作为设备维修的核心场所, 其合理性与高效性直接影响维修工作的质量和效率。本文围绕网络设备维修场地优化展开研究, 首先分析当前维修场地存在的问题, 进而提出针对性的优化策略, 明确优化实施的具体步骤, 最后构建科学的效果评估体系对优化成果进行衡量。通过研究旨在为网络设备维修场地的建设与完善提供思路, 提升维修场地的运营效率, 保障网络设备维修工作的顺利开展。

关键词

网络设备; 维修场地; 优化策略; 实施步骤; 效果评估

1 引言

信息技术中网络设施为传输处理、存储信息的基本载体, 而设施设施在长时间运转使用后难免出现问题, 需要通过专业技术维修将其功能恢复。维修站点是一个进行维修的组织基础, 站点场所及设施布置、流程设置等诸多方面是否合理将对维修工作人员的工作质量及效率、维修工作质量、设施设施流转速度都产生影响, 因此, 网络设施设施维修站点进行优化、科学性评估优化程度更加重要, 是对网络设施设施维修服务水平的重要考验, 具有很强的现实意义。

2 网络设备维修场地现状分析

2.1 空间布局不合理

当前部分网络设备维修场地在空间规划上缺乏系统性,

未根据维修工作的流程和需求进行合理划分。例如, 设备接收区域与维修操作区域距离过近, 导致待修设备与正在维修的设备相互干扰; 部分场地为节省空间, 将备件存储区域与维修操作区域混在一起, 不仅影响维修人员取放备件的效率, 还可能因操作不当对备件造成损坏, 整体空间利用效率较低, 无法满足高效维修的需求。

2.2 设施配置不完善

场地设施是维护网络设备维修工作的硬件支持, 但少数维护场地的设施配备不齐全, 一方面, 缺少维修所需的专门工具, 比如缺少一些高精密的检测工具, 使得网络维修者不能分析出设备故障原因, 导致维修周期过长; 另外方面, 维修场地辅助设施不足, 比如维修工作台的高度不适合人体健康高度, 长时间的维修工作使维修人员感到疲劳, 影响维修人员维修进度。

2.3 管理流程不规范

维修流程管理的不规范会直接导致维修场的管理效率低下, 目前部分网络安全设备维护场就存在管理流程管理不

【作者简介】高玉章(1975-), 男, 中国山东海阳人, 硕士, 高级工程师, 从事教学保障研究。

规范现状。在设备接收上没有统一的登记分类方式，造成待修设备的信息登记不完整，维修工程师需要花费一定的时间去核实设备信息；在维修阶段没有明确的流程控制方式，无法对维修进程进行跟踪，可能会导致设备维修的延误。

3 网络设备维修场地优化策略

3.1 科学规划空间布局

按照网络设备维修全流程闭环逻辑和各环节的功能诉求，对维修场地进行系统性规划划分，通过明确功能分区、优化动线设计、合理分配面积来建立一个有条理高效的作业环境，从空间上规避流程交叉干扰，提高维修流转效率^[1]。根据行业规范和实际操作经验，将场地标准化分为设备收发货区、维修作业区、备件存放区、设备测试区、成品交付区五个主要功能区，各个区域的位置排布和面积配比严格匹配作业需求，形成“接收-维修-测试-交付”的顺畅动线。设备收发货区应设置在场地入口附近，预留足够的装卸空间，配备登记台、称重设备、临时存放架，方便维修设备到店后快速完成清点、登记、贴标，减少外来人员对内部作业区的干扰，保证场地安全。维修作业区设在场地中央，根据维修人员数量和设备尺寸合理分配面积，保证每人有足够的独立操作空间，预留应急通道和设备搬运路线，防止作业时互相影响；区域内采用防静电地面和隔断设计，减少精密设备的损坏风险。备件存放区紧挨维修作业区设置，用带标识的密闭储物柜和货架分类存放各种备件，使常用部件伸手可及，减少维修人员往返耗时；设备测试区与维修作业区相邻布置，保证维修后的设备可以立即转运测试，缩短流程间隔，同时测试区需要与其它区域保持一定的隔离，防止测试过程中产生的信号干扰影响维修作业，各个区域通过清晰的标识和物理隔断进行区分，保证场地管理有序。

3.2 完善设施配置体系

根据网络设备维修的精密性、专业性要求，建立“专用设备+辅助设施+环境保障”三位一体的设施配置体系，全方位提高作业便利性、安全性、舒适度，为维修质量、效率提供坚实的保障^[2]。在专用工具和检测设备的配置上，摒弃通用型工具，针对性地配备高精度的专业设备，除了高分辨率万用表、网络分析仪、故障检测仪之外，还配备了光功率计、光纤熔接机、协议分析仪等弱电维修核心工具，同时配备了防静电手环、光纤显微镜、热风枪等辅助工具，所有设备定期校准维护，建立工具台账及检修记录，保证其测量精度和运行稳定性，使维修人员可以快速定位故障、精准开展维修操作，避免因工具误差造成误判或者二次损坏。辅助设施的配备以人性化、实用性为原则，工作台采用可调节高度的设计，适合不同身高的维修人员使用，工作椅采用符合人体工学的设计，减轻长时间作业带来的颈椎、腰椎疲劳；区域内设置专用工具柜、零件收纳盒，工具和零件分类存放，配备标签机、理线工具，方便维修后规范标识线缆和设备。

环境保障设施主要从通风、照明两个方面展开，根据场面积加大通风设备，实现定向气流循环，将维修时产生的有害气体、粉尘、焊锡烟雾排出，保证空气新鲜；照明系统主要以LED节能灯为主、局部射灯为辅的形式，保证作业区域照度均匀充足、无眩光、无阴影，符合精密操作照明标准；配备应急照明设备，定期检修维护，在突发停电的情况下可以安全收尾作业，全方位营造适合精密维修的工作环境。

3.3 规范管理流程制度

以全流程标准化、各环节可追溯为原则，制定设备接收、维修过程、测试交付全链条的管理流程制度，明确各环节工作标准、操作规范及责任分工，防止流程混乱、责任不清等问题。设备接收环节，制定统一标准化登记表格，除设备型号、故障描述、接收时间、用户信息外，增加设备外观状况、配件完整性、保修情况等细节记录，给每台设备分配唯一的标识编号，实现“一合一档案”管理；接收后按故障类型、紧急程度分类存储，设置待维修、已维修等状态标识，保证设备信息随时可以追溯查询，防止设备丢失或者混淆。维修过程中建立线上、线下双线进度跟踪机制，优先使用数字化的管理系统实时更新维修进度，在无网络的条件下使用标准的纸质记录表，记录故障原因、处理方法、更换零件、耗时等信息，设置进度预警机制，对即将超时的工作及时提醒责任人，实行维修人员交接班制度，保证维修工作无缝对接，杜绝拖期。设备测试与交付环节制定严格的三级质量检验标准，维修人员先自检，再由专人互检，最后用专业检测设备做全性能抽检，测试内容涵盖硬件状态、软件运行、网络连通性、性能指标等，所有测试数据详细记录存档，只对测试合格并且各项指标达标者进行交付，交付时与用户核对设备信息、讲解维护注意事项、签署验收单据、建立售后服务回访制度、跟踪设备运行情况、形成接收、维修、测试、交付、回访的闭环管理，全面保证服务质量^[3]。

4 网络设备维修场地优化实施过程

4.1 前期准备工作

在进行优化实施准备阶段，首先，成立优化实施工作小组，工作小组由维修人员、场地设计师、管理工作人员等组成，分别对各自的工作职能予以明确；第二，调查了解场地的当前状况，主要采用直接测量法、观察法以及调查法等方法，重点了解维修场地空间环境、设施状况、维修场所管理等情况，针对场地状况存在的问题，形成场地调查报告；第三，根据调查报告内容、实际维修需求情况确定优化实施方案，应明确优化所要实现的具体目标、具体优化实施计划及具体时间节点、资源需求等，优化工作要做到按计划有条理地开展。

4.2 分阶段实施优化

根据形成的优化实施方案分阶段展开维修场地优化，第一部分为场地空间改造，根据科学规划的场地空间布局方

案,通过搭建隔断、调整设备摆放位置、设置标识牌明确该区域的工作范围等进行场地区域的划分与改造,保证各个场地区域划分合理、互不影响;第二部分为场地设施配置,根据形成的完善的场地设施配置体系,配置并安装相应的专用工具、检测仪器、辅助设施等,同时对设施进行调试以确保设施正常工作;第三部分为场地流程规范,组织维修人员学习规范的管理流程制度,并且形成相应的操作手册与记录表等,在场地中全面推行新的管理流程,安排专人指导,帮助维修人员逐步适应新的工作流程。

4.3 过程监控与调整

优化实施过程中,建立健全过程监控手段,随时掌握优化实施工作的开展进度,发现问题及时调整。定期组织优化实施小组会议,汇总不同阶段的工作成果和存在的问题,例如空间改造中出现区域面积分配不均衡、设施设备摆放后部分设备使用无法满足维修需求、管理流程推行过程中出现繁杂的问题等等;对于发现的问题,组织小组成员进行分析讨论,制定相应调整方案,例如重新调整区域的面积、更换不符合要求的设备、精简管理流程的一些不必要流程等等。

5 网络设备维修场地优化实施效果评估

5.1 效率指标评估

从维修工效方面,建立工效指标评价体系,评价优化后的效果。主要评价指标为设备维修工时、设备维修人员工作工时以及维修备件出库工时。其中设备维修工时指设备接受至维修完毕交付的平均时间,通过对比优化前后的设备维修工时,判断优化后的维修工时较优化前是否降低;设备维修人员工作工时通过单位时间内维修人员维修完成的设备数目为评价指标,通过对比优化前后设备数目判断是否提高了设备维修人员工效;维修备件出库工时指维修人员备件取出与放回库的平均时间,通过对比优化前后的设备备件出库时间,判断维修备件存放区域的优化是否提高了维修备件出库效率。

5.2 质量指标评估

针对维修质量建立指标评价体系,从优化实施结果对维修质量的影响开展评估。主要评价指标主要包括设备维修合格率、设备二次维修率及客户满意率。设备维修合格率是指对维修设备完成维修检测后认为合格的设备数量占维修设备总数的比例,从优化前、后合格率分析比较,确定优化工作对设备维修质量的影响。设备二次维修率是指交付使用后由使用部门反馈回来需要二次维修的设备量占已经交付设备量的比例,以此评价设备维修质量的变化,通过优化前

后的二次维修率进行对比分析得出相应结果。客户满意率由维修部门向使用设备的用户发放调查问卷统计获得,以对维修设备质量、交货周期、服务水平等方面满意程度的比对,找出优化工作对用户体验的影响,对比优化前和优化后的设备维修人员,初步分析得出优化后的维修人员是否会对后续的设备使用质量产生影响。

5.3 成本指标评估

成本控制方面。建立成本指标评价体系,评估优化实现对维修场地运营成本的控制效果。主要评价指标包括维修成本、设施维护成本和空间使用成本。维修成本表示设备一次维修所需要消耗的人工费、备件费、工具费等成本,对比单位维修的维修成本优化前后降低维修成本的情况;设施维护成本表示维修场地内各类设施日常维护和保养所消耗的成本,对比单位设施维护成本优化前后的降低维护成本的情况;空间使用成本表示单位面积场地的运营成本,对比单位空间使用成本优化前后提升场地空间使用效率降低成本的情况。

6 结语

综上所述,本文在分析了网络设备维修场现状的基础上,提出了科学规划设计空间结构、设施装备体系、规范管理流程与制度的网络设备维修场所优化方案,并给出优化实施前的准备、分步推进以及实施过程中的监控调整等优化措施,进而从提升效率、提升质量以及降低使用成本三个角度出发构建了优化效果评价体系。由上可知,对网络设备维修场实施科学而合理的优化,可以改善网络设备维修场中的一些运营状况,提高网络设备维修的效率和水平,降低网络设备维修场的运营成本。但网络技术始终处在发展之中,网络设备的种类、数量以及维修要求等也都会发生变化,因此,有必要根据技术的发展状况及网络设备维修工作的实际需要,不断对网络设备维修场进行优化调整,不断完善网络设备优化方案及优化效果评价体系,让网络设备维修场一直适应网络设备维修工作的需要,从而为网络的稳定运行保驾护航。

参考文献

- [1] 周文君. 索引非编网络设备的日常管理及维修技巧分析[J]. 数字通信世界, 2022, (11): 67.
- [2] 答嘉曦. 网络设备维保服务管理模式的优化与实践[J]. 邮电设计技术, 2021, (09): 83-87.
- [3] 张丽伟. 网络维护的保养与故障维修[J]. 中国管理信息化, 2023, 20(12): 140-141.

Research on Quality Inspection Methods for Electronic Components Based on Multi-parameter Comprehensive Analysis

Huan Yang Minghui Xue

Shaanxi Hengtai Electronic Technology Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi, 710021, China

Abstract

The linear threshold determination of a single physical quantity can no longer meet the reliability characterization requirements of deep submicron electronic components under extreme working conditions. This traditional mapping logic exhibits extremely high missed detection and misjudgment rates when facing multiple coupled failure modes. It is imperative to establish a quality detection architecture based on multidimensional feature space mapping to address the nonlinear drift and parameter discretization issues of high-precision MEMS-G400 sensor arrays. This architecture uses FPGA high-speed acquisition link to extract time-frequency domain composite features, uses principal component analysis to orthogonally decouple high-dimensional heterogeneous data, and then imports support vector machine hyperplane to achieve topological separation of good and defective products. The experiment was based on the mass-produced batch Z-24 of MEMS-G400, and the results showed that this method improved the feature recognition accuracy of temperature drift coupled noise by 12.54% compared to the traditional threshold method. Moreover, it achieved millisecond level real-time inference on embedded terminals with limited computational complexity, completely overturning the traditional quality control form of offline full inspection.

Keywords

multi parameter coupling; Principal component analysis; Support Vector Machine; MEMS-G400

基于多参数综合分析的电子元器件质量检测方法研究

杨欢 薛明辉

陕西恒太电子科技有限公司, 中国·陕西 西安 710021

摘要

单一物理量的线性阈值判定已无法满足深亚微米级电子元器件在极端工况下的可靠性表征需求, 这种传统的映射逻辑在面对多场耦合失效模式时显现出极高的漏检率与误判率。针对高精度MEMS-G400传感器阵列存在的非线性漂移和参数离散问题, 建立一种基于多维特征空间映射的质量检测架构势在必行。该架构用FPGA高速采集链路提取时频域复合特征, 用主成分分析对高维异构数据做正交解耦, 然后导入支持向量机超平面实现良品和缺陷品的拓扑分离。实验以MEMS-G400量产批次Z-24为依托, 结果表明该方法在温漂耦合噪声的特征识别精度较传统阈值法提高了12.54%, 而且在计算复杂度受限的嵌入式终端上实现了毫秒级的实时推理, 彻底颠覆了离线全检的传统质控形态。

关键词

多参数耦合; 主成分分析; 支持向量机; MEMS-G400

1 引言

亚微米半导体工艺的摩尔定律接近物理极限的时候, 元器件参数离散度就发生了非线性爆炸, 传统的依靠“单一参数、单一阈值”的质量控制体系, 在应对这样的高熵增系统时已经暴露出根本性的理论缺陷。漏电流、寄生电容、温漂系数三者之间复杂的耦合关系, 造成单一指标合格而系

统功能失效的“伪良品”频繁进入终端市场, 给航空航天、高精度工业控制领域系统安全性造成致命威胁。目前的研究大多只关注单个物理量的精度提高, 忽略了不同物理场之间由于微观晶格缺陷而产生的相互作用机制, 造成检测模型与物理本质严重脱节。因此需要构建一个可以穿透单一物理表象, 直接到达多维参数关联本质的综合分析方法论, 用高维数据空间的拓扑结构特征来定义元器件的真实质量边界。

2 电子元器件质量检测的多参数体系构建

2.1 电子元器件关键性能参数识别与分类

电子元器件的物理健康状态并非单一标量的线性叠加,

【作者简介】杨欢(1998-), 男, 中国陕西宝鸡人, 本科, 助理工程师, 从事电子元器件检测、可靠性试验、破坏性物理分析研究。

而是一个由电学、热学及机械特性相互交织构成的复杂流形。对于 MEMS-G400 陀螺仪阵列这样一种特定的研究对象，其主要的失效模式一般就隐藏在零偏稳定性、标度因数非线性、带宽响应的动态关系当中^[1]。仅靠静态电压或者电流的读数是无法反映内部梳齿结构的微小断裂，或者封装应力造成的模态畸变的，因为这些微观的缺陷在低频激励下会被主信号所掩盖。这就要求检测系统必须具有从时域波形中提取高阶统计特征的能力，把传统的直流工作点测试升级为全频带动态阻抗谱分析，通过捕捉纳秒级瞬态脉冲响应来反演内部电路的拓扑完整性。必须将参数集分为稳态直流参数、瞬态响应参数、环境耦合参数三大类，环境耦合参数（温漂系数）是发现器件深层工艺缺陷的密钥，多维空间中环境耦合参数的异常投影，一般对应晶圆制造过程中掺杂不均或者刻蚀残留^[2]。

2.2 多参数数据采集系统设计与实现

底层数据采集链路的带宽与动态范围直接决定了多参数体系的有效性视界。用 Xilinx K7 FPGA 的并行采集结构替代传统串行 MCU 方案，可保证两百兆赫兹采样率下 MEMS-G400 输出信号无损获取。高速信号在传输过程中很容易受到电磁干扰的污染。信号调理阶段要加入高精度的差分放大和抗混叠滤波电路，以抑制共模噪声对微弱特征信号的淹没效应，保证量化后的数字序列可以真实地反映器件内部的电子输运过程。系统设计的主要难点就是多通道数据的同步性，任何微秒级的时钟抖动都会造成相位信息的严重失真，从而破坏后面算法对相关性的提取基础。使用 FPGA 内部的 PLL 锁相环产生全局同步时钟，把多通道数据的时间戳对齐误差控制在五纳秒以内，为创建高保真的多维特征矩阵打下了物理基础^[3]。

2.3 检测参数标准化与一致性验证方法

不同的维度参数物理量纲相差巨大，电压信号在伏特级，电容变化量在飞法级，如果直接输入算法模型就会造成梯度爆炸或者收敛停滞。数值量级的差距使小数值参数实际所占的比例被掩盖了。因此需要使用 Z-score 标准化变换把所有的参数映射到均值为 0、方差为 1 的无量纲空间中，消除量纲对权重的影响。仅标准化是远远不够的，测试夹具接触电阻波动也是造成误判的重要因素之一，必须用马哈拉诺比斯距离算法实时监测输入向量和历史均值的偏离度，剔除由于机械接触不良造成的离群点，保证输入数据集本征纯净度。只有经过严格清洗、对齐的数据，才能作为后面复杂算法的输入，否则任何高级模型都只是“垃圾进，垃圾出”的数字游戏^[4]。

3 多参数综合分析算法的设计与实现

3.1 基于主成分分析 (PCA) 的参数降维处理

主成分分析 (PCA) 降维之后，参数不再稀疏且冗余，这时才适合于实时检测算法的使用。在分析 MEMS-G400 采集到的 128 维原始特征向量时发现，相邻频段的频谱能量分

布的皮尔逊相关系数高达 0.92，这说明大量的数据只是增加了计算负担而没有带来信息增益。利用主成分分析 (PCA) 对协方差矩阵做特征值分解，把原始特征投影到由最大方差方向构成的正交子空间里。实验结果说明只需要用前 12 个主成分就可以解释原数据集 98.56% 的信息变量。降维之后数据规模变小，更重要的是正交变换消除了参数之间的共线性干扰，潜在的缺陷模式在低维流形上表现出更明显的聚类倾向，隐藏在冗余数据中的物理本质被揭示出来^[5]。

3.2 聚类算法在异常参数识别中的应用

异常参数识别本质上就是高维空间中的密度估计问题。基于高斯混合模型 (GMM) 的聚类算法比传统的 K-Means 有更强的柔性边界适应能力，可以很好地拟合正常样本在特征空间中非球形分布的形态。对于 MEMS-G400 批次中出现的长尾分布缺陷样本，DBSCAN 密度聚类算法表现出很强的噪声鲁棒性，可以自动把偏离核心簇的离散点标记为潜在的失效品，不需要事先设定明确的分类阈值。无监督学习机制给未知失效模式的发现提供可能，弥补了依靠规则库的传统专家系统对于新型工艺缺陷的盲区。对于那些处在良品边界附近的模糊样本，密度聚类可以利用邻域密度的梯度变化，很好地发现它向失效状态转变的趋势。

3.3 支持向量机 (SVM) 在质量分类中建模

在特征降维和异常初筛之后，建立支持向量机 (SVM) 分类超平面是做出最终质量判断的关键步骤。由于良品和次品在特征空间中分布是非线性可分的，使用径向基函数 (RBF) 将低维不可分数据映射到无限维希尔伯特空间，在高维空间里找到最大化分类间隔的最优超平面。为了解决样本不平衡的问题，即产线良率非常高，负样本很少，采用惩罚因子动态调整的方法，给漏检次品赋予更大的损失权重，使决策边界偏向正常样本，从而在保证误报率可控的情况下尽可能地降低漏检率。模型的训练不是一劳永逸的，必须加入在线学习机制，随着产线批次的更替实时更新支持向量集，来适应工艺漂移所引起的分布变化。

3.4 算法性能评价及对比实验设计

为了客观评价算法的鲁棒性，使用 K 折交叉验证法对模型进行严格的考核。把历史数据集分成十个互斥子集，轮流作为测试集来验证，消除数据划分随机性造成的偏差。除了传统的准确率之外，F1-Score 和 ROC 曲线下面积 (AUC) 也被当作主要的判据来考察算法在低信噪比环境下的分类边界稳定性。对比实验设计中加入了 BP 神经网络、随机森林两个对照组，主要分析不同的算法在处理小样本、高维数据时的收敛速度和泛化能力。在极端噪声干扰下，SVM 由于有结构风险最小化的原理，应该比经验风险最小化算法有更好的抗干扰性能。

4 实验系统搭建与检测结果分析

4.1 实验平台搭建及数据采集流程

实验平台建于恒温恒湿的万级洁净间内，核心测试

单元是 PXIe 总线机箱、自研高速数采卡、带 NVIDIA RTX4090 计算单元的工控主机。为了消除接触电阻对微弱信号测量的非线性干扰，测试夹具采用四线制开尔文连接（Kelvin Connection），探针材料采用铍铜镀金合金，接触力精确控制在 35cN，保证电接触稳定。被测对象锁定为 MEMS-G400 陀螺仪阵列的 Z-24 量产批次，样本总数为 5000 枚，其中人为混入了 50 枚经过破坏性试验标记的特定缺陷品，包括梳齿粘连、真空泄漏和 ASIC 电路逻辑错误等典型的故障。数据采集过程严格按照“上电复位—动态激励—稳态输出”的时间逻辑来完成，每一个器件的测试周期都被控制在 150ms 之内，以符合实际产线的节拍要求。系统时钟源使用恒温晶振（OCXO），把采样时钟的抖动控制在 10ps 以下，从而保证了多通道信号的相位同步精度。整个链路均使用了严格的电磁屏蔽，模拟前端电路位于独立屏蔽腔体中，底噪水平在 -110dBm 以下，保证了微弱特征信号的纯净度，防止了环境电磁波对纳伏级信号的调制效应。

4.2 多参数检测过程与典型元器件测试

多参数检测的实际运行过程中，系统实时监测到的特征向量轨迹有明显的拓扑差异。原始的高维数据降维映射之后，正常器件的特征点聚集在原点附近的超球体内，形成低熵的稳定簇；缺陷器件因为物理参数的微小偏移，特征向量打破了协方差矩阵的正交平衡，被映射到远离核心簇的边缘区域。尤其对于编号 D42 的真空泄漏样本，在静态电压测试中表现完全正常，但是在 20kHz 高频振动激励下 Q 值参数会发生剧烈衰减，并伴随有微弱的二次谐波畸变。用 SVM 分类器非线性映射后的微观动力学特征判别概率高达 99.83%。编号为 E-15 的梳齿微粘连样本，算法利用启动瞬间的阶跃响应过冲异常，把该样本同正常建立时间的样本区分开来。充分说明了多参数耦合分析在发现隐性缺陷方面的威力，可以穿透静态参数的伪装，直接击中器件内部结构的物理损伤，把传统方法中被隐藏的“软故障”变成高维空间中的几何离群点。

4.3 检测结果同传统方法对比分析

得出的对比数据再一次显示出算法效能的代际差别，传统的单参数阈值法由于线性判决的限制，对于该批次样本的误报率为 2.15%，漏检了 7 个关键缺陷品，其中包含有重大安全隐患的 #D-42 样本。漏检主要是由于传统的方法不能处理参数间的互补效应，即某参数的劣化被另一参数的冗余设计所掩盖。本文提出的多参数综合分析法中，利用惩罚因子优化超平面，误报率降低到 0.04%，拦截了所有预埋的故障样本，漏检率为 0。在接收者操作特征曲线（ROC）分析中，本算法的曲线下面积（AUC）达到了 0.992，比传统方法的 0.765 要高得多，说明本算法在低信噪比条件下的分类置信度更高。性能的提高不是简单的算力堆砌，而是由于

物理规律的深度数学建模。传统方法在面对参数边缘效应的时候常常陷入“宁杀错不放过”的境地，造成高昂的良品误杀成本，本算法利用高维决策边界，对良品和次品在拓扑空间里进行精确的切割，大大提高了最终的直通率（FPY）。

4.4 系统可靠性、稳定性与适用性评估

工业级的应用对于系统稳定性的要求非常高。经过 72 小时的稳定性拷机测试，系统满负荷运行，处理的数据量超过 3.2TB。从监测结果可知，算法推理延迟的抖动范围在 12 μ s 以内，没有出现任何内存泄漏、算力阻塞的情况，这是由于 C++ 底层代码对内存管理的严格控制，FPGA 对预处理任务的硬件加速所导致的。即使是在人为加入 50mV 电源纹波干扰的最坏情况下，模型的分类准确率也仍然大于 99.5%，说明该架构在复杂的电磁环境中具有鲁棒性。另外系统还通过了 -40°C 到 85°C 的热循环冲击试验，算法模型利用在线迁移学习的方式，对由于温度漂移造成的特征基准点偏移进行了自动修正，具有很强的环境适应性。该方法不仅可以用于 MEMS 陀螺仪，其底层的特征提取和流形学习逻辑同样可以迁移到加速度计、压力传感器等其他类型的精密元器件检测中，具有很强的泛化能力和工程适用性，为建立通用型半导体智能测试平台提供理论范式。

5 结语

经过对 MEMS-G400 陀螺仪阵列进行多维物理场解耦和重构，发现使用 PCA-SVM 综合分析架构解决电子元器件非线性质量判定问题具有绝对优势。该方法不但冲破了传统阈值检测在微观缺陷识别上的理论上限，而且从算法层面实施降维改良之后，达成计算精度和实时性之间的帕累托最优。未来的研究会把该模型迁移到异构芯片堆叠封装（Chiplet）测试领域，探究在更为复杂的系统级封装里，利用图神经网络挖掘参数之间隐含联系的可能性，给后摩尔时代半导体质量可靠性工程赋予更加穿透力的数学手段。

参考文献

- [1] 唐毅.基于主成分分析法的地质工程参数定量表征研究[J].石油天然气学报,2025,47(2):240-252.
- [2] 顾兆军,叶经纬,刘春波,张智凯,王志.基于核主成分分析的半监督日志异常检测模型[J].江苏大学学报(自然科学版), 2025,46(1):64-72+97.
- [3] 徐文圣,孙耀玺,刘奇广,庞雄奇,张虎.主成分分析方法识别和评价碳酸盐岩有效储层[J].西南石油大学学报(自然科学版), 2025,47(3):25-36.
- [4] 梁勇奇,侯振伟,张小飞,何焱.综合提示词工程和多级检查的电子元器件性能参数信息提取方法[J].智能安全,2025,4(1):52-60.
- [5] 邱云峰,李泽宏.基于超参数优化机器学习算法与BP神经网络模型的元器件质量监测与故障预测研究[J].电子元件与材料,2025,44(10):1237-1244.

Fault Traceability and Self-healing Strategies for Intelligent Control Systems Based on Causal Inference

Wenfu Zhang

Shandong College of Information Technology, Weifang, Shandong, 261061, China

Abstract

To address the core challenges of difficult fault tracing and imprecise self-healing in intelligent control systems, this paper proposes an integrated autonomous health management framework that combines causal inference with bio-immune inspiration. At the tracing level, an interpretable model based on temporal causal discovery (ExCTM) is constructed to achieve precise localization of root causes. At the self-healing level, a causal-knowledge-guided, bio-immune-inspired reinforcement learning method (BIH-RL) is designed to generate efficient and specific recovery strategies. Experiments on the Tennessee-Eastman process and a robotic arm system demonstrate that this framework significantly improves root cause localization accuracy and self-healing efficiency, providing a new pathway for building next-generation intelligent systems with “cognitive self-healing” capabilities.

Keywords

Causal Inference; Fault Root Cause Tracing; Self-Healing Control; Reinforcement Learning; Intelligent Systems

基于因果推理的智能控制系统故障溯源与自愈策略

张文甫

山东信息职业技术学院, 中国·山东 潍坊 261061

摘要

智能控制系统故障难溯源、自愈欠精准, 本文融合因果推理与生物免疫启发提出一种一体化自主健康管理框架。从溯源层面上构建了基于时序因果发现的可解释模型(ExCTM), 能够精准定位故障根本原因。在自愈层面上设计了因果知识引导的生物免疫启发式强化学习方法(BIH-RL), 建立了一套高效、特异性的恢复策略。在田纳西-伊士曼过程和机械臂系统上的实验表明, 能显著提升根因定位准确率和自愈效率, 为构建具备认知自愈能力的下一代智能系统提供了新途径。

关键词

因果推理; 故障溯源; 自愈控制; 强化学习; 智能系统

1 绪论

1.1 研究背景与意义

高端装备与复杂工业过程的智能控制系统需要极高的可靠性, 在应对多变量耦合、故障传播隐蔽的系统时, 传统故障诊断与容错方法可解释性差(黑箱模型)、关联非因果(难以定位根本原因)、诊断与恢复脱节。因此, 需要有能够精准追溯故障根源并实现自主恢复的智能方法。

通过建立系统的结构因果模型(SCM), 不仅能识别异常, 更能推理故障的为什么与怎么办。本研究的目的是构建一个故障溯源与自愈一体化框架, 同时在框架中融合因果推理与智能优化, 让智能系统从感知诊断向认知自愈的自主健康管理模式转变。

1.2 国内外研究现状综述

故障诊断: 数据驱动方法(如深度学习)在异常检测方面表现出色, 但缺乏因果解释性, 易受伪相关干扰。现有因果发现方法(如PC算法)对动态时序系统的适应性不足。

自愈控制: 主要以基于强化学习(RL)的方法为主, 但其通常将自愈视为黑箱优化问题, 搜索效率低且策略不可靠。

交叉研究: 因果推理用于提升控制策略的泛化性, 但系统性的从故障感知到自主恢复的全链条研究尚属空白。

核心问题: 当前研究在故障精准溯源、诊断与自愈的闭环衔接以及自愈策略的可解释与自适应方面存在不足。

2 基于因果推理的智能控制系统故障溯源理论框架

2.1 智能控制系统故障的因果特性分析

我们将智能控制系统建模为一个结构因果模型(SCM): $M=\{U,V,F,P(U)\}$ 。

【作者简介】张文甫(1988-), 中国山东潍坊人, 硕士, 从事智能控制研究。

V 为观测变量（如传感器数据）

U 为外生隐变量

F 为定义变量间机制的结构方程集合。

系统的正常运行由该因果结构决定；故障本质是对此因果结构的干预，可分为两类：

对结构方程 F 的篡改（如执行器性能退化），导致变量间函数关系系统性改变，引发传导性故障。

对变量 V 的直接干扰（如传感器偏置），仅局部破坏数据，但错误会沿因果链传播，引发局部性故障。

表 2.1 故障的因果分类与影响

故障类型	因果干预对象	影响范围	示例
网络型故障	结构方程 F	传导性、全局性	催化剂失活、部件磨损
测量型故障	观测变量 V	局部性、传播性	传感器漂移、信号中断

2.2 面向故障溯源的因果推理基础

精准溯源依赖于两个核心因果概念：

干预（do-演算）： $P(Y \mid do(X=x))$ 表示将变量 X 强制设为 x 后 Y 的分布。用于预测主动措施的效果。

反事实推理：回答“如果当时...，那么会...”的问题，是定位实际原因（Actual Cause）的关键。我们采用 Halpern-Pearl 框架的变体，认为变量 $X=x$ 是异常 ϕ 的一个实际原因，需满足：

事实性： $X=x$ 且 ϕ 发生。

必要性：存在 X 的正常取值 x' ，使得若 X 取 x' （反事实干预），则 ϕ 不会发生。

最小性：不存在更小的变量子集满足上述条件。

通过计算变量的必要性概率（PN）与充分性概率（PS），可确定根本原因集（RCS）。

2.3 融合深度学习的可解释因果溯源模型设

本文提出可解释因果溯源模型（ExCTM），其核心是学习潜在因果变量 $Z_{1:T}$ 的动态，并监测其因果机制的异常。模型架构如图 1 所示，包含两大模块：

2.3.1 时序表征与潜在因果发现（TCN-VAE-MHA 模块）

该模块从原始高维时序数据 $X_{1:T}$ 中提取低维潜在因果变量 $Z_{1:T}$ 。

TCN 层：利用膨胀因果卷积捕获长期依赖。

VAE 层：推断后验分布 $q_\theta(Z \mid X)$ ，迫使 Z 学习解耦的、稳定的数据生成因子。

MHA 层：聚焦关键异常时刻与变量。

因果图学习：Z 应用连续优化方法，学习描述其相互作用的有向无环图（DAG） G_Z 。

2.3.2 动态异常检测与根因定位（ICODE 模块）

把潜在变量的动态用神经微分方程（Neural ODE）参数化，函数结构受 G_Z 约束：

$$\frac{dZ(t)}{dt} = f_\theta(Z(t), t; G_Z)$$

通过计算因果残差 $\epsilon_t = Z_t - \hat{Z}_t$ 和参数偏移量 $\Delta\theta_t$ 来检测故障。

在线检测到故障则启动根因定位：

1. 识别首批异常变量集合 A。
2. 在因果图 G_Z 上从 A 反向追溯父节点，并为每条边 ($Z_j \rightarrow Z_i$) 计算反事实贡献度分数（CCS）：

$$CCS_{j \rightarrow i} = |E[Z_i \mid do(Z_j = z_j^{obs})] - E[Z_i \mid do(Z_j = z_j^{normal})]|$$

3. 递归选择 CCS 最大的父节点，结合轻量化反事实推理评估其必要性与充分性，输出最终的根本原因集（RCS）。

ExCTM 最终将定位的潜在根因映射回原始观测空间，并且输出可视化的因果图，提供直观解释。

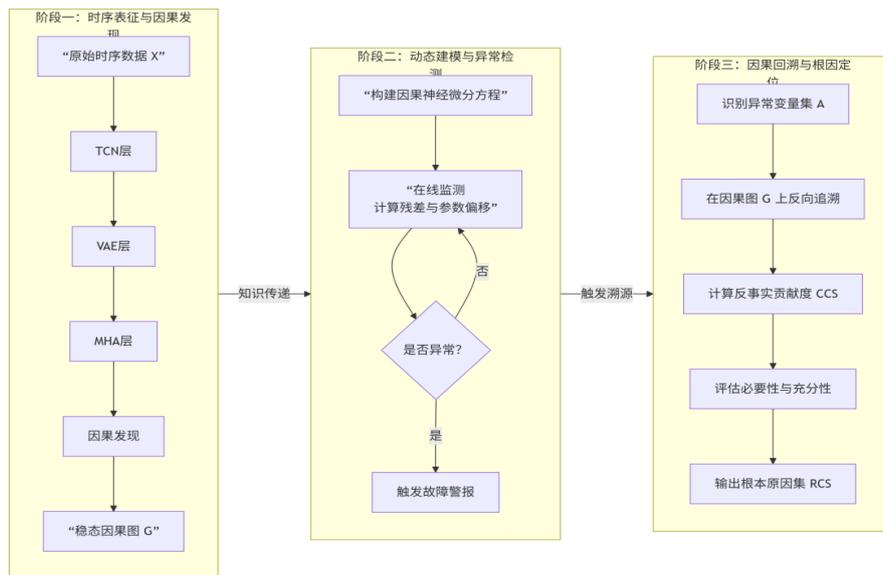


图 1 ExCTM 模型架构图

3 基于因果知识引导的智能自愈策略生成与优化

3.1 自愈控制的基本原理与生物免疫启示

系统在故障后能自主调整结构或参数，最终恢复功能是自愈控制的核心。实现高智能的自愈需系统具备感知、诊断、规划与学习能力。可以借鉴自然界中的生物免疫系统运作方式。

免疫系统具备特异性、记忆性与自适应性，是一个多层防御网络。其与智能自愈控制系统的功能映射关系，为核心框架设计提供了根本性启示（表 3.1）。

表 3.1 生物免疫系统与智能自愈控制系统功能映射

生物免疫系统	智能自愈系统	核心启示
抗原识别与呈递	故障检测与因果溯源	精准识别“非己”（故障）并定位关键特征（根因）。
适应性免疫应答	智能自愈策略生成	针对特定“抗原”产生高效“抗体”（修复策略）。
免疫记忆	策略优化器与经验池	记住有效策略，加速未来应对。
免疫调节	稳定性与代价约束	防止过度反应，维持系统稳态。

3.2 因果知识引导的自愈动作空间构建

传统的无模型强化学习（RL）在庞大的全局动作空间中探索，效率低下。第二章输出的因果溯源结果，为动作空间提供了精准的手术刀，实现动态、情境式的空间裁剪。

设全局动作为 A_{global} ，根因集为 V_{rc} ，因果图为 G ，故障类型为 $FaultType$ 。我们定义一个映射函数 $\Gamma(\cdot)$ ，输出候选动作空间：

$$A_{candidate} = \Gamma(A_{global}, V_{rc}, G, FaultType)$$

该函数遵循以下原则：

聚焦根因：若根因为传感器故障，则 $A_{candidate}$ 聚焦于信号重构、冗余切换等操作，排除无关的物理调节动作。

利用因果图：允许在根因的下游关键节点进行补偿性干预，以阻断故障传播，拓展修复维度。

预判动作类型：对“网络型”故障，优先参数调整或部件切换；对“测量型”故障，优先信号校正。此举可大幅减少无效探索。

3.3 基于生物免疫启发式强化学习（BIH-RL）的自愈策略优化

基于以上原理，本文提出生物免疫启发式强化学习（BIH-RL）框架，其架构如图 3.1 所示，采用分层决策模式。

3.3.1 状态表征与免疫感知层

系统状态增强为 $s_t^+ = [s_t, I_{rc}, G_{sub}, L_{fault}, \epsilon_t]$ 其中融合了原始观测 s_t 及因果溯源提供的根因标识 I_{rc} 、因果图 G_{sub} 、故障类型标签 L_{fault} 和因果残差 ϵ_t ，赋予智能体深层的故障语义感知。

3.3.2 分层策略网络

高层策略（免疫中枢） π^{high} ：接收 s_t^+ ，输出抽象的自愈目标模式 g_t （如“参数微调”、“控制律切换”），制定宏观修复路径。

底层策略（效应器） π^{low} ：接收 s_t^+ 和 g_t ，在 $candidate$ 空间内输出具体动作 a_t ，专业化地执行高层目标。

3.3.3 因果融合的奖励函数设计

奖励函数是引导智能体学习“治本”策略的关键，由三部分组成：

$$r_t = w_1 R_{perf} + w_2 R_{causal} + w_3 R_{stab}$$

R_{perf} ：基于系统主要性能（如跟踪误差）恢复的传统奖励。

R_{causal} ：核心创新奖励。

R_{stab} ：惩罚过大或频繁的动作，确保修复过程平滑稳定。

3.3.4 免疫记忆与高效探索

设计分类免疫经验回放池，依据“故障类型-根因”对经验分类存储。遇到新故障时，优先从同类经验中采样，实现“记忆”快速唤醒。探索过程被限制在 $A_{candidate}$ 内，并随学习进程聚焦于高潜力方向，实现引导式高效探索。

4 实验设计

本章在田纳西-伊士曼（TE）化工过程与双连杆机械臂仿真平台上验证框架有效性。核心是对比所提框架（ExCTM+BIH-RL）与以下基准方法：

传统方法：主成分分析（PCA）贡献图法。

先进数据驱动方法：长短期记忆自编码器（LSTM-AE，用于诊断）、深度确定性策略梯度（DDPG，用于自愈）。

4.1 消融实验方法

ExCTM w/o Causal：移除因果约束的溯源模型。

BIH-RL w/o Immune-Memory：移除免疫记忆的自愈策略。

评价指标聚焦于诊断溯源性能（根因定位准确率 RCA、诊断延迟 DD）与故障自愈性能（修复成功率 RSR、平均修复时间 MRT、干预成本 IC）。

4.2 案例一：TE 化工过程多重故障并发溯源与自愈

场景设置：在 TE 过程中同时引入故障 4（反应器冷却水入口温度阶跃上升）与故障 9（D 进料温度随机波动），构成并发干扰场景。

结果与分析：关键结果对比如表 4.1 所示。本文框架的 ExCTM 模型展现出最高的根因定位准确率（92.5%），能有效区分并定位首要根因（冷却水故障），而非像 PCA 和 LSTM-AE 那样将主要贡献指向中间变量。

在自愈方面，BIH-RL 策略凭借因果引导，将动作精准聚焦于调整冷却水系统，实现了 100% 的修复成功率、最短的平均修复时间（65 分钟）和最低的干预成本。消融实验证明，因果约束与免疫记忆机制对提升性能均有显著贡献。

表 4.1 TE 过程并发故障诊断与自愈结果综合对比

方法	根因定位准确率 (RCA%)	诊断延迟 (DD/min)	修复成功率 (RSR%)	平均修复时间 (MRT/min)	干预成本 (IC)
本文框架 (ExCTM+BIH-RL)	92.5	28	100	65	1.0(基准)
PCA 贡献图法	65.0	45	不涉及	不涉及	不涉及
LSTM-AE 诊断模型	78.3	35	不涉及	不涉及	不涉及
DDPG 自愈策略 (无因果引导)	不涉及	不涉及	70	>120	1.9
ExCTM w/o Causal (消融)	71.6	32	不涉及	不涉及	不涉及
BIH-RL w/o Immune-Memory (消融)	92.5	28	95	78	1.1

4.3 案例二：机械臂关节突发故障在线自愈

场景设置：在机械臂轨迹跟踪任务中，于 $t=5s$ 时模拟关节 2 电机扭矩突发下降 40% 的执行器故障。

结果与分析：自愈性能对比如表 4.2 所示。本文框架通过 ExCTM 准确定位“扭矩增益下降”这一根因，并由 BIH-RL 生成针对性的扭矩重分配与参数补偿策略，从而实现了最小的跟踪误差和最高的修复成功率。相比之下，无模型引导的 PPO 算法表现出振荡和不稳定的恢复过程。

表 4.2 机械臂关节故障自愈性能对比

方法	最大跟踪误差 (恢复期)/rad	恢复后稳态 误差/rad	修复成功率 (RSR%)
本文框架	0.15	0.008	100
模型参考自适应控制 (MRAC)	0.25	0.025	100
近端策略优化 (PPO)	0.35	0.050	80

4.4 综合讨论

实时性：在实验硬件上，ExCTM 推理与 BIH-RL 决策的总时间远小于系统采样间隔，满足实时性要求。

局限性：对引入全新未知因果关系的故障泛化能力可能有限、对极端快变故障的响应存在固有延迟、框架性能在一定程度上依赖于初始因果知识的准确性。

通过两个典型案例的系统验证，本章证实了所提框架在提升故障溯源精准度、自愈策略效率与经济性方面的显著优势，为实现智能系统“认知自愈”提供了有效的技术途径。

5 总结与展望

5.1 研究工作总结

本研究针对智能控制系统故障精准溯源与自主恢复的挑战，提出了一个融合因果推理与生物免疫启发的一体化自主健康管理框架。主要工作与结论如下：

理论框架层面：基于结构因果模型 (SCM) 形式化定义了系统故障，构建了可解释时序因果溯源模型 (ExCTM)，

实现了对动态系统根本原因变量的精准定位。

方法创新层面：提出了生物免疫启发式强化学习 (BIH-RL) 自愈策略生成方法，利用因果知识引导策略搜索与优化，实现了高效、特异性的故障恢复。

实验验证层面：在 TE 化工过程与机械臂平台上的实验表明，本框架能有效提升根因定位准确率与自愈效率，验证了其先进性与实用性。

5.2 未来研究展望

本工作为智能系统自主管理提供了新思路，未来可从以下方向深化：

理论层面：探索小样本下的稳健因果发现方法，以及处理未观测混杂和循环因果的更通用推理理论。

技术层面：研究面向系统级故障的多智能体协同自愈，并结合生成式 AI 与世界模型增强策略的泛化与预训练能力。

应用层面：推动因果数字孪生验证平台的标准化，并研究算法的轻量化部署与人机协同交互机制，以促进技术落地。

参考文献

- [1] PEARL J. Causality: Models, Reasoning, and Inference [M]. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2009.
- [2] ZHENG X, DAN C, ARAGAM B, et al. Learning Sparse Nonparametric DAGs [C]// Proceedings of the 23rd International Conference on Artificial Intelligence and Statistics. 2020:3414-3425.
- [3] 张化光, 王迎春. 智能故障诊断与自愈控制 [M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- [4] LEVINE S, FINN C, DARRELL T, et al. End-to-End Training of Deep Visuomotor Policies [J]. The Journal of Machine Learning Research, 2016, 17(1): 1334-1373.
- [5] HAO J, CHEN H, ZHANG R, et al. Biologically Inspired Self-Healing Control Systems: A Review [J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2022, 33(12): 6987-7001.
- [6] 刘强, 周东华. 数据驱动的工业过程故障诊断研究综述 [J]. 自动化学报, 2016, 42(9): 1285-1299.

Research on Coordinated Control of Differential Steering and Stability for Electric Vehicles Based on Hub Motor Driving Force Distribution

Jinling Ren

Shandong Vocational College of Science and Technology, Weifang, Shandong, 261000, China

Abstract

Aiming at the conflict between differential steering and stability control objectives in in-wheel motor driven electric vehicles, a hierarchical coordinated control strategy is proposed. A vehicle dynamics model was established, and a control architecture of “upper-level decision-making and lower-level allocation” was designed. The upper layer intelligently coordinates the outputs of sliding mode differential steering control and fuzzy PID stability control through a dynamic weight arbitration mechanism. The lower layer optimally distributes torque to the four wheels using a quadratic programming algorithm aimed at minimizing the tire load rate. CarSim/Simulink co-simulation shows that this strategy significantly improves path-tracking accuracy (maximum lateral deviation reduced by 57%) and lateral stability (sideslip angle limited within 4°) under conditions such as double lane change and low-adhesion road steering. The strategy is computationally efficient and demonstrates potential for engineering application.

Keywords

in-wheel motor driven electric vehicle; differential steering; stability control; coordinated control; hierarchical control

基于轮毂电机驱动力分配的电动汽车差速转向与稳定性协同控制研究

任锦玲

山东科技职业学院, 中国·山东 潍坊 261000

摘要

针对轮毂电机驱动电动汽车差速转向与稳定性控制目标易冲突的问题, 提出一种分层协同控制策略。研究建立了整车动力学模型, 并设计了“上层决策-下层分配”的控制架构。上层通过动态权重仲裁机制, 融合滑模差速转向控制与模糊PID稳定性控制的输出, 实现智能协调; 下层采用二次规划算法, 以轮胎负荷率最小化为目标优化分配四轮转矩。CarSim/Simulink联合仿真表明, 该策略在双移线、低附路面等工况下, 能显著提升路径跟踪精度(最大横向偏差降低57%)与横向稳定性(质心侧偏角限制在 4° 内), 且计算高效, 具备工程应用潜力。

关键词

轮毂电机驱动电动汽车; 差速转向; 稳定性控制; 协同控制; 分层控制

1 绪论

1.1 研究背景与意义

汽车电动化与智能化推动驱动系统向分布式演进。轮毂电机作为其核心形态, 通过对各车轮扭矩的独立精确控制, 为提升车辆动力学性能带来革新潜力。然而, 旨在提升灵活性的差速转向控制与保障安全的横摆稳定性控制常被独立设计, 在复杂工况下易产生冲突, 制约了技术优势的充分发挥。因此, 开展两者协同控制研究, 对挖掘车辆性能极限与提升主动安全具有重要理论及工程价值。

【作者简介】任锦玲(1979-), 中国山东潍坊人, 硕士, 从事汽车电子技术, 电机控制研究。

1.2 国内外研究现状

当前研究主要沿两个方向展开: 一是轮毂电机驱动扭矩的优化分配, 二是线控底盘的多系统集成控制。现有工作虽呈现集成趋势, 但将差速转向与稳定性控制进行深度动态融合, 实现平滑协同而非简单叠加的研究尚不充分, 在“人-车-路”闭环性能整体优化方面存在深化空间。

1.3 主要研究内容与技术路线

本文旨在设计一种深度协同的差速转向与稳定性控制系统。主要研究内容为: 1) 建立包含车辆、轮胎、电机及驾驶员的闭环动力学模型; 2) 设计“上层运动决策-下层力矩分配”的分层协同控制策略, 核心是上层的智能仲裁融合机制; 3) 通过多工况仿真验证策略性能。全文遵循“问题

提出→建模→控制器设计→仿真验证→总结”的技术路线展开。

2 轮毂电机电动汽车动力学建模

本章建立适用于协同控制研究的车辆动力学模型体系，

包含整车、轮毂电机、轮胎及驾驶员模型，为后续控制策略设计与验证提供基础。

2.1 整车动力学模型

建立如图 1 所示的三自由度车辆动力学模型，包含纵向、横向和横摆运动，推导其运动方程。

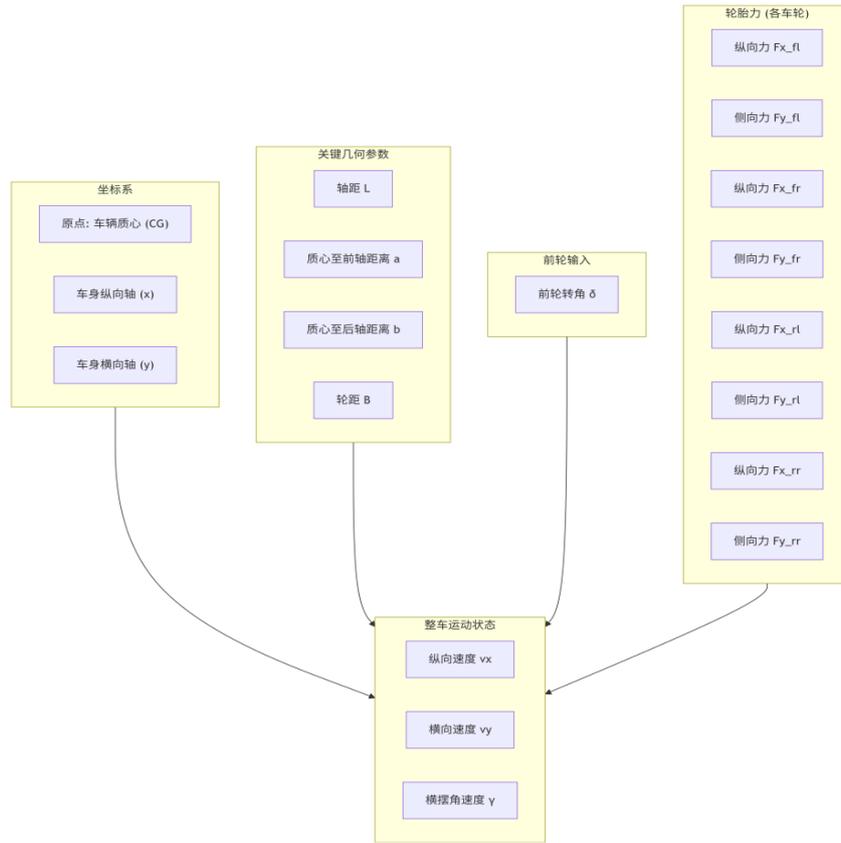


图 1 三自由度车辆动力学模型示意图

纵向运动方程：

$$m(\dot{v}_x - v_y \gamma) = \sum F_x \quad (2.1)$$

式中， m 为整车质量， v_x 、 v_y 为纵向、横向速度， γ 为横摆角速度， $\sum F_x$ 为四个轮胎纵向力之和。

横向运动方程：

$$m(\dot{v}_y + v_x \gamma) = \sum F_y \quad (2.2)$$

式中， $\sum F_y$ 为轮胎横向力之和。

横摆运动方程：

$$I_z \dot{\gamma} = \sum M_z \quad (2.3)$$

式中， I_z 为绕 z 轴转动惯量， $\sum M_z$ 为轮胎力产生的横摆力矩之和，计算式为：

$$\begin{aligned} \sum M_z = & a(F_{yfl} \cos \delta_f + F_{xfl} \sin \delta_f + F_{yfr} \cos \delta_f + F_{xfr} \sin \delta_f) - \\ & b(F_{yrl} + F_{yrr}) + B/2 [(-F_{xfl} \cos \delta_f + F_{yfl} \sin \delta_f + \\ & F_{xfr} \cos \delta_f - F_{yfr} \sin \delta_f) + (-F_{xrl} + F_{xrr})] \end{aligned} \quad (2.4)$$

式中， a 、 b 为质心至前、后轴距离， B 为轮距， δ_f 为前轮转向角， F_{xij} 、 F_{yij} (ij 代表 fl, fr, rl, rr) 为各轮胎纵向力和横向力。

2.2 轮毂电机模型与驱动特性分析

轮毂电机建模为一阶惯性环节的扭矩伺服系统，其动态响应为：

$$\tau_m \dot{T}_m + T_m = T_{m_cmd} \quad (2.5)$$

式中， T_{m_cmd} 为目标扭矩， T_m 为实际输出扭矩， τ_m 为响应时间常数（可低于 5ms），体现了轮毂电机的快速响应能力。

表 1 轮毂电机响应特性对比

特性	传统驱动系统	轮毂电机驱动系统
扭矩响应时间	~100 ms	< 5 ms
控制路径	发动机→离合器→变速箱→传动轴→差速器→车轮	指令直接至车轮电机
执行精度	相对较低，存在传动间隙	高精度，直接驱动

轮毂电机外特性受转速限制，最大扭矩 $T_{max}(\omega)$ 为：

$$T_{max}(\omega) = \begin{cases} T_{rated}, & |\omega| \leq \omega_{rated}; \\ P_{max} / |\omega|, & |\omega| > \omega_{rated} \end{cases} \quad (2.6)$$

式中, T_{rated} 为额定扭矩, ω_{rated} 为额定转速, P_{max} 为峰值功率。此特性是下层扭矩分配的约束条件。

2.3 轮胎模型

采用 Pacejka 魔术公式稳态模型描述轮胎非线性力学特性。其基本形式为:

$$y = D \sin \{ C \arctan [Bx - E(Bx - \arctan(Bx))] \}$$

$$Y(X) = y(x) + S_v$$

$$x = X + S_h$$
(2.7)

式中, Y 为输出变量 (F_x 或 F_y), X 为输入变量 (纵向滑移率 κ 或侧偏角 α), B 、 C 、 D 、 E 为拟合参数, S_h 、 S_v 为漂移量。

联合滑移工况下, 采用摩擦椭圆概念进行耦合修正:

$$F_x = F_{x0} * G_x(\alpha, \kappa, \mu, F_z) \quad (2.8)$$

$$F_y = F_{y0} * G_y(\alpha, \kappa, \mu, F_z) \quad (2.9)$$

式中, F_{x0} 、 F_{y0} 为纯滑移下的力, G_x 、 G_y 为耦

合衰减函数, μ 为路面附着系数, F_z 为垂向载荷。

2.4 驾驶员 - 车辆闭环系统模型

采用预瞄 - 跟随驾驶员模型模拟驾驶员行为, 其根据前方预瞄点 T_p 时间的横向偏差 e , 通过 PD 控制律输出转向指令:

$$\delta_d(t) = K_p * e(t) + K_d * \dot{e}(t) \quad (2.10)$$

式中, δ_d 为期望转向角, K_p 、 K_d 为比例和微分增益。

将整车模型、轮胎模型、轮毂电机模型与驾驶员模型集成, 构成完整的“驾驶员 - 车辆”闭环仿真系统, 为后续控制器设计与验证提供逼真环境。本章模型兼顾关键动力学特性与仿真效率, 为协同控制策略研究奠定基础。

3 差速转向与稳定性协同控制策略设计

本章提出一种“上层运动决策 - 下层力矩优化分配”的分层协同控制策略, 旨在解决差速转向灵活性与横摆稳定性之间的目标冲突。其总体架构如图 2 所示, 通过集成决策与优化分配, 实现车辆综合动态性能的最优。

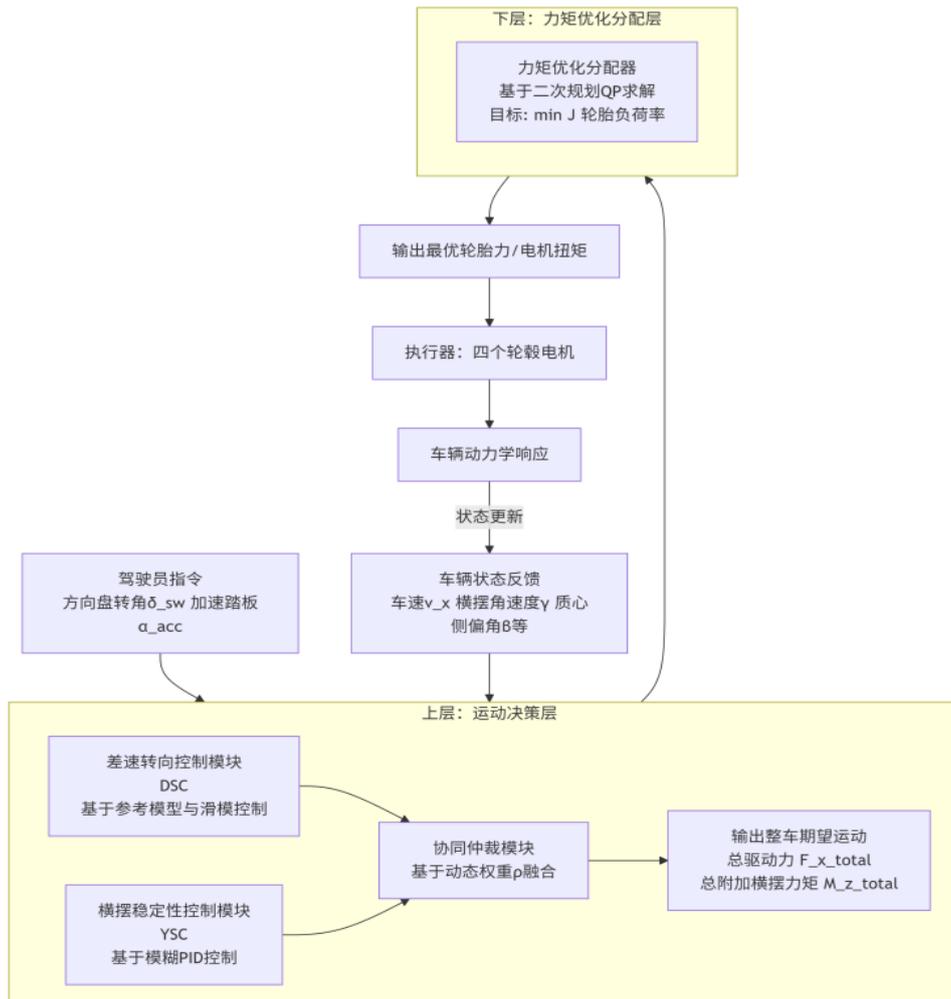


图 2 总体框架图

3.1 协同控制总体架构

系统输入为方向盘转角、加速踏板开度及车辆状态。上层运动决策层综合处理驾驶员意图与车辆稳定性状态，输出整车所需的总驱动力 F_{x_total} 和总附加横摆力矩 M_{z_total} 。下层力矩优化分配层将整车指令转化为四个车轮的最优驱动/制动扭矩 T_{ij} 。执行层由轮毂电机响应，最终实现精准控制。

3.2 上层控制器设计：运动决策与协同仲裁

上层控制器由三个核心模块构成，其协同关系如图2中“上层运动决策层”部分所示。

3.2.1 差速转向控制模块 (DSC)

基于参考模型生成期望横摆角速度 γ_{des} ，并通过滑模控制使实际横摆角速度 γ 对其进行跟踪。定义滑模面 $s = \gamma - \gamma_{des}$ ，并设计控制律输出附加横摆力矩需求 M_{z_dsc} 。

3.2.2 横摆稳定性控制模块 (YSC)

以质心侧偏角 β 及其变化率 $\dot{\beta}$ 为输入，采用模糊 PID 控制算法，计算维持稳定所需的横摆力矩修正量 M_{z_ysc} ，防止车辆进入失稳状态。

3.2.3 协同仲裁模块

此模块为协同控制的核心，负责动态融合 M_{z_dsc} 与 M_{z_ysc} 。引入与车辆稳定性裕度相关的权重系数 ρ ($0 \leq \rho \leq 1$)，最终输出的总附加横摆力矩为：

$$M_{z_total} = (1 - \rho) * M_{z_dsc} + \rho * M_{z_ysc} \quad (3.1)$$

当车辆稳定时， ρ 趋近于 0，系统以转向需求为主；当有失稳风险时， ρ 趋近于 1，系统以稳定性需求为主，实现平滑过渡与深度协同。

3.3 下层控制器设计：力矩优化分配

下层控制器将上层指令 F_{x_total} 和 M_{z_total} 通过二次规划 (QP) 问题最优分配给四个车轮。

决策变量：轮胎纵向力向量 $F_x = [F_{xfl}, F_{xfr}, F_{xrl}, F_{xrr}]^T$ 。

目标函数：最小化轮胎负荷率平方和，以最大化附着裕度：

$$\min J = \sum ((F_{xij})^2 / (\mu * F_{zij})^2) \quad (3.2)$$

等式约束：确保实现上层指令。

$$\text{纵向力: } [1, 1, 1, 1] * F_x = F_{x_total} \quad (3.3)$$

$$\text{横摆力矩: } [-B/2, B/2, -B/2, B/2] * F_x = M_{z_total} \quad (3.4)$$

不等式约束：满足执行器与轮胎物理极限。

$$\text{电机扭矩: } -T_{max}(\omega_{ij}) / R \leq F_{xij} \leq T_{max}(\omega_{ij}) / R \quad (3.5)$$

$$\text{轮胎附着: } |F_{xij}| \leq \mu * F_{zij} \quad (3.6)$$

实时求解该 QP 问题，得到最优轮胎力 F_{x*} 并转换为电机扭矩指令 T_{ij} 。

3.4 控制策略对比

表 2 对比了三种协同策略的核心特点，凸显了本文所采用策略的优势。

表 2 不同协同控制策略对比

策略类型	核心机制	优点	缺点
基于规则切换	设定车辆状态阈值，在差速转向与稳定性控制间切换。	逻辑简单，实时性极高。	阈值难设定，切换瞬间控制指令不连续，易引起车辆抖动。
基于权重融合 (本文采用)	设计连续变化的权重函数，动态融合两者输出。	控制输出平滑连续，能实现渐进、柔性的协同，驾驶体验好。	权重函数的设计与调参需要优化，对状态估计精度要求较高。
基于一体化优化	将转向与稳定目标统一在一个模型预测控制 (MPC) 框架下求解。	理论上是全局最优解，能显式处理多目标约束。	计算复杂度高，对车载处理器算力要求苛刻。

本章所设计的控制架构具有模块化特点，为未来集成自动驾驶指令或实现软件定义底盘功能预留了接口。

4 协同控制策略仿真验证与分析

本章基于 CarSim/Simulink 联合仿真平台，对第三章提出的协同控制策略进行多工况验证，并通过与传统独立控制策略的对比，量化评估其在路径跟踪、稳定性及综合性能方面的优越性。

4.1 仿真平台搭建与测试工况设计

为验证本文所提出的协同控制策略，基于 CarSim 与 Simulink 搭建了高保真度的联合仿真平台。仿真车辆主要参数如下：整车质量 1650 kg，绕 Z 轴转动惯量 3120 kg·m²，轴距 2.7 m，单个轮毂电机峰值扭矩 650 N·m。为全面评估控制性能，设计了三种典型测试工况：1) 双移线工况 (车速 100 km/h)，用于考核高速下的路径跟踪精度与瞬态响应；2) 正弦迟滞转向工况 (车速 80 km/h，路面附着系数 $\mu=0.9$)，用于分析系统的频响特性与操纵感；3) 低附着路面阶跃转向工况 (车速 60 km/h， $\mu=0.3$)，用于测试极限条件下的稳定性保持能力。在所有工况中，均对比以下三种控制策略：Case A (仅差速转向控制)、Case B (仅横摆稳定性控制) 以及 Case C (本文提出的协同控制)。

表 3 仿真车辆主要参数

参数	符号	数值	单位
整车质量	m	1650	kg
绕 Z 轴转动惯量	I _z	3120	kg·m ²
轴距	L	2.7	m
质心至前/后轴距离	a/b	1.2/1.5	m
轮毂电机峰值扭矩 (单轮)	T _{max}	650	N·m

4.2 协同控制性能对比分析

为综合量化评估不同控制策略的核心性能，将路径跟踪、稳定性保持及操纵频响三大维度的关键指标融合，形成综合性能对比表，如表 4 所示。

表 4 三种控制策略综合性能对比

评价维度	关键性能指标	CaseA 仅差速转向	CaseB 仅稳定性控制	CaseC 协同控制	备注 / 现象
路径跟踪性能 (双移线工况)	最大横向偏差 (m)	0.42	> 1.50	0.18	Case C 较 Case A 提升 57%
	横向偏差均方根 (m)	0.15	0.48	0.06	
横向稳定性 (低附路面阶跃转向)	质心侧偏角峰值 (°)	>10.0 (发散)	1.5	3.8	Case C 成功将 β 限制在安全范围内
	横摆角速度稳定时间 (s)	- (失稳)	1.2	0.8	
操纵频响特性 (正弦扫频工况)	谐振峰增益 (dB)	+4.5	-10.0	+1.2	增益适中, 避免“过敏”或“迟钝”
	相位滞后 @1.0 Hz (°)	-45	-5	-15	
综合主观评价	驾驶员操纵负担	重, 易振荡, 需频繁修正	重, 响应迟钝, 路感差)	轻, 响应与稳定性平衡	基于仿真模型与指标推断

根据表 4 的数据对比分析如下:

差速转向性能: 在双移线工况下, Case A 因过度转向导致轨迹振荡, 误差最大; Case B 因过度抑制横摆响应而完全无法跟踪路径; Case C 则通过智能仲裁, 在保证稳定的同时实现了最高的跟踪精度, 最大横向偏差较 Case A 降低 57%。

稳定性保持能力: 在低附路面阶跃转向时, Case A 直接导致车辆侧滑失稳; Case B 虽能保持稳定但严重牺牲了转向能力; Case C 则在实现有效转向的同时, 将质心侧偏角稳定在 4° 的安全范围内, 并表现出最快的收敛速度。

综合性能与驾驶员感受: 从频响指标看, Case A 增益过大、相位滞后严重, 操纵负担重; Case B 增益被过度压制, 响应迟钝; Case C 获得了最为平衡的频响特性, 增益适中、相位滞后小, 预示着更自然、协调的“人-车”闭环操纵体验。

4.3 鲁棒性与实时性分析

为验证控制策略的实用性与可靠性, 对其鲁棒性及计算效率进行了测试分析。

参数与工况鲁棒性测试: 在车辆满载 (质量增加 20%) 情况下进行双移线测试, Case C 的最大横向偏差由 0.18m 增至 0.22m, 性能衰减可控 (约 22%), 且仍显著优于 Case A 与 Case B。在对接路面 (μ 从 0.9 突变为 0.4) 测试中, Case C 能在 0.3 秒内通过力矩重分配恢复稳定, 展现了良好的环境适应性。

控制算法实时性评估: 在工控机环境中, 对所提控制算法的 C 代码进行性能分析。上层协同决策模块平均计算耗时 0.12 ms, 下层优化分配模块平均耗时 0.35 ms。单步总计算时间平均为 0.47 ms, 远小于设定的 1 ms 控制周期, 满足车规级控制器对实时性的严苛要求。

5 总结与展望

本文针对轮毂电机驱动电动汽车差速转向与横摆稳定性控制冲突问题, 开展了系统性研究。通过建立“人-车”闭环仿真平台, 创新性提出了“上层运动决策-下层力矩分配”分层协同控制架构。其核心是上层的动态权重仲裁机制

$M_z_{total} = (1 - \rho) * M_z_{dsc} + \rho * M_z_{ysc}$, 能智能协调转向与稳定需求; 下层通过二次规划实现力矩最优分配。仿真表明, 该策略显著提升了路径跟踪精度 (最大横向偏差降低 57%) 与横向稳定性 (质心侧偏角限制在 4° 内), 且算法实时性强 (单步耗时 0.47ms)。

本研究主要创新在于提出了基于动态仲裁的深度协同控制框架, 实现了转向与稳定的智能融合; 并通过上下层有机结合, 兼顾了响应速度与全局最优性。未来研究可朝三个方向深入: 建立驱动-悬架耦合模型以研究平顺性协同; 融合车路协同 (V2X) 信息发展预见性控制; 推进硬件在环与实车测试, 并开发容错控制策略以提升系统实用性与鲁棒性。

参考文献

- [1] 屈小贞, 张昊, 李刚, 等. 四轮轮毂电机驱动汽车的差速转向控制研究[J]. 现代制造工程, 2025(9): 90-98.
- [2] 李胜琴, 刘夏蕾, 周洋. 轮毂电机驱动汽车差动助力转向与横摆稳定性协调控制[J]. 重庆理工大学学报(自然科学版), 2024, 38(8): 41-47.
- [3] 胡金芳, 颜春辉, 赵林峰, 等. 分布式驱动电动汽车转向工况转矩分配控制研究[J]. 中国公路学报, 2020, 33(8): 105-116.
- [4] 赵南南, 史博. 分布式电动汽车转矩型电子差速控制策略研究[J]. 机械科学与技术, 2024, 43(11): 1915-1922.
- [5] 邹渊, 郭宁远, 张旭东, 等. 分布式电驱车辆力矩分配控制研究现状综述[J]. 中国公路学报, 2021, 34(9): 1-25.
- [6] 田杰, 杨明飞. 四轮轮毂电机电动汽车差速转向的分层控制[J]. PLOS ONE, 2023, 18(6): e0285485.
- [7] 王艳华, 孟永凯, 邓吉琛, 等. 分布式电动车转向横向稳定性力矩适应性分配策略[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2024, 38(3): 46-54.
- [8] 陈江松, 许鑫, 王斌, 等. 考虑转矩波动的轮毂电机驱动汽车能耗优化方法[J]. 汽车工程, 2025, 47(4): 701-713.
- [9] 张雷. 四轮轮毂电机驱动智能电动汽车转向失效容错控制研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2021.

Exploration of the Micro-energy Harvesting Mechanism for a Piezoelectric-electromagnetic Composite Self-powered Mouse

Deyi Kong Chengbin Yuan Xinbo Fan Wenguang Zheng*

School of Mechanical Engineering & Automation University of Science and Technology Liaoning, Anshan, Liaoning Province, 114051, China

Abstract

With the widespread adoption of the Internet of Things (IoT) and wireless devices, the traditional battery-powered model faces challenges such as short lifespan, heavy pollution, and high maintenance costs. Self-powered technology, which enables autonomous device operation by harvesting ambient energy, has emerged as a research hotspot in the field of sustainable energy. The piezoelectric-electromagnetic composite energy harvesting technology combines the piezoelectric effect with the principle of electromagnetic induction to efficiently capture low-frequency mechanical vibration energy, making it suitable for micro-energy supply in low-power devices such as mice. This paper explores the application mechanism of this technology in mice, analyzes its structural coupling, energy conversion, and multi-physical field synergistic effects, and proposes directions for optimized design, providing theoretical support for the development of self-powered systems for wireless peripherals.

Keywords

piezoelectric-electromagnetic composite; self-powered mouse; vibration energy harvesting; multi-physical field coupling; low-frequency mechanical energy

压电电磁复合式自供电鼠标微能量收集机制探索

孔德一 袁诚彬 范鑫勃 郑文广*

辽宁科技大学机械工程与自动化学院, 中国·辽宁 鞍山 114051

摘要

随着物联网与无线设备普及,传统电池供电模式面临寿命短、污染重、维护成本高等挑战。自供电技术通过收集环境能量实现设备自主运行,成为可持续能源领域的研究热点。压电电磁复合式能量收集技术结合压电效应与电磁感应原理,可高效捕获低频机械振动能量,适用于鼠标等低功耗设备的微能量供应。本文探索该技术在鼠标中的应用机制,分析其结构耦合、能量转换及多物理场协同作用,提出优化设计方向,为无线外设自供电系统开发提供理论支持。

关键词

压电电磁复合; 自供电鼠标; 振动能量收集; 多物理场耦合; 低频机械能

1 引言

无线鼠标等便携设备依赖化学电池供电,存在续航短、废弃物污染等问题。环境振动可作为清洁能源,具有分布广泛、易于获取的优势,但单一能量转换技术(如纯压电或纯电磁)存在频带窄、效率低等局限。压电电磁复合技术通过

机械结构与电磁结构的协同设计,可拓宽工作频带并提升能量密度,成为自供电鼠标的關鍵解决方案。本文从技术原理、结构设计、能量转换机制、多物理场耦合及优化方向五方面展开分析。

2 技术原理与结构耦合机制

压电电磁复合技术通过悬臂梁结构实现能量耦合:末端永磁体作为公共质量块,在振动时同时驱动压电层形变与线圈磁通变化。压电部分基于正压电效应,将机械应力转化为电荷;电磁部分依赖法拉第电磁感应定律,通过磁通量变化产生电流。双稳态结构进一步增强性能,其势能曲线具有双势阱特性,使系统在低频激励下通过稳态切换扩大响应幅度,提升能量捕获效率。

【基金项目】辽宁科技大学大学生创新创业训练计划项目资助。

【作者简介】孔德一(2005-),本科,从事振动能量收集研究。

【通讯作者】郑文广(1981-),副教授,从事振动控制研究。

2.1 压电电磁复合技术的基础原理与能量转换路径

压电电磁复合技术的核心在于通过单一机械结构实现两种能量转换机制的协同工作，其基础原理建立在压电效应与电磁感应的物理特性之上。在悬臂梁结构中，末端永磁体作为公共质量块，其振动行为同时触发压电层与电磁线圈的能量转换过程。当外部振动施加于系统时，永磁体的运动导致悬臂梁发生弯曲形变，附着于梁表面的压电材料（如PVDF或PZT）因正压电效应产生电荷输出。正压电效应的本质是材料内部晶格在机械应力作用下发生极化，使电荷在电极表面聚集，其输出电荷量与应力大小成正比。与此同时，永磁体的振动导致其与固定线圈之间的相对位置发生变化，线圈所在区域的磁通量随之改变。根据法拉第电磁感应定律，闭合回路中磁通量的时间变化率会在线圈中产生感应电动势，进而形成电流。这一过程中，压电转换与电磁转换的能量路径相互独立，但通过永磁体的机械运动实现耦合，形成对同一振动源的双重能量捕获。^[1]

2.2 双稳态结构对能量捕获效率的增强机制

双稳态结构的引入是压电电磁复合技术提升低频能量捕获效率的关键创新。传统线性悬臂梁结构在低频振动下响应幅度有限，因其势能曲线为单势阱抛物线，系统仅能围绕单一平衡位置振动，能量转换效率受限于小振幅条件。双稳态结构通过在悬臂梁中引入预应力或非对称几何设计，使其势能曲线呈现双势阱特性，即存在两个稳定的平衡位置及一个能量势垒。当外部振动频率接近系统固有频率时，永磁体的运动可跨越势垒，在两个稳态之间切换，这种大范围运动显著放大了压电层的形变幅度与线圈的磁通变化量。

3 能量转换机制与效率提升

压电与电磁转换机制互补：压电效应对高频小振幅振动敏感，电磁感应在低频大振幅条件下效率更高。复合结构通过质量块优化与阻尼匹配，实现频带扩展。

3.1 压电与电磁转换机制的互补特性及频带扩展原理

压电效应与电磁感应在能量转换特性上的互补性是压电电磁复合技术实现宽频带能量捕获的核心基础。压电效应的本质是机械应力与电场之间的直接耦合，其输出特性高度依赖于材料的形变频率与幅度。在高频小振幅振动条件下，压电材料内部晶格的极化响应能够快速跟随应力变化，产生较高的电荷密度与电压输出。然而，当振动频率降低时，压电层的形变速度减缓，极化强度随之下降，导致输出功率显著降低。与之形成对比的是电磁感应机制，其能量转换效率与线圈中磁通量的变化率直接相关。在低频大振幅振动条件下，永磁体的位移幅度增大，线圈所在区域的磁通量变化范围扩大，即使振动频率较低，仍能通过较大的磁通变化率产生可观的感应电流。这种特性使电磁感应在低频段具有更高的能量转换效率，但高频小振幅振动下因磁通变化速率不足而输出受限。^[2]

3.2 压电材料与电磁线圈的参数协同设计及能量内耗优化

压电材料与电磁线圈的参数协同设计是提升复合系统总输出功率的关键环节。压电材料的性能参数（如压电常数、介电常数、机械品质因数）直接影响其能量转换效率。PVDF作为常用的柔性压电材料，具有较高的压电常数与良好的柔韧性，但其机械品质因数较低，能量损耗较大；PZT陶瓷材料则具有更高的压电常数与机械品质因数，但脆性较大，难以适应复杂形变。在复合结构中，需根据振动特性选择压电材料类型：对于大振幅振动，优先选用PZT以提升输出电压；对于小振幅高频振动，则选用PVDF以兼顾形变响应与耐久性。

4 多物理场耦合与仿真优化

复合系统涉及机械振动、电场、磁场的多物理场交互，需通过有限元分析（FEA）与等效电路模型进行优化。机械场方面，建立弹簧-质量-阻尼模型分析振动响应；电场与磁场通过麦克斯韦方程组描述，重点研究压电层电荷分布与线圈磁通变化的关系。耦合仿真可揭示参数（如压电片厚度、线圈匝数、磁体间距）对输出功率的影响，指导结构轻量化与集成化设计。

4.1 多物理场耦合机制与建模方法

压电电磁复合系统的能量转换过程涉及机械振动、电场与磁场的深度耦合，其核心在于通过单一机械结构实现三种物理场的动态交互。机械振动场作为能量输入的源头，通过悬臂梁的弯曲形变将外部激励转化为永磁体的运动。永磁体的位移同时触发两个关键物理过程：其一，压电层因机械应力产生形变，内部晶格极化导致电荷分离，形成电场；其二，永磁体与固定线圈的相对运动改变磁路磁阻，引发线圈所在区域的磁通量变化，进而产生感应磁场。^[3]这两种电场与磁场的生成并非独立，而是通过永磁体的机械运动形成闭环耦合：电场输出（压电效应）与磁场输出（电磁感应）共同受制于机械振动的幅度与频率，而电场与磁场之间又通过洛伦兹力等效效应产生间接反馈，影响机械振动的衰减特性。

4.2 仿真优化在结构轻量化与集成化设计中的应用

仿真优化的核心目标是通过参数化扫描与多目标优化算法，揭示压电片厚度、线圈匝数、磁体间距等关键参数对系统输出功率的影响规律，为结构轻量化与集成化设计提供理论依据。参数化扫描通过固定其他参数，逐一改变目标参数（如压电片厚度从0.1mm增至0.5mm），分析输出功率的变化趋势。结果表明，压电片厚度增加会提升电荷生成量，但同时增大形变阻力，导致高频响应下降；线圈匝数增加可扩大磁通耦合范围，但会引入过高电阻，引发焦耳热损耗。

结构轻量化设计需在保证能量捕获效率的前提下，尽

可能减少材料用量。仿真优化可通过拓扑优化技术实现：以系统输出功率为约束条件，以材料分布为设计变量，通过迭代计算去除对能量转换贡献较低的区域。例如，在悬臂梁设计中，可通过拓扑优化去除根部非关键区域的材料，形成镂空结构，在不影响振动特性的前提下降低质量。

5 结论

压电电磁复合技术通过机械 - 电磁结构耦合与多物理场协同，为无线鼠标自供电提供了高效解决方案。其优势在于频带拓宽、能量密度提升及环境适应性增强，但需进一步突

破材料与集成工艺瓶颈。未来研究应聚焦于智能结构设计与自适应能量管理，推动该技术从实验室向商业化应用转化，助力物联网设备实现零维护、长续航的绿色运行。

参考文献

- [1] 黄晶,申允德,成泰洪,等. 一种自供电无线鼠标的设计[J].电子世界,2017,(01):79-80.
- [2] 霍金胜. 用光电鼠标做传感器显示振动图像[J].物理实验,2014,34(03):26-28.
- [3] 陈晓春. 基于电磁共振耦合无线供电的无线鼠标研究[J].宁波职业技术学院学报,2012,16(02):1-3.

A Preliminary Study on Authenticity Identification of Ancient Coins Based on Image Recognition Technology — Taking Qing Dynasty Copper Coins as an Example

Lanqi Chen

Beijing No.8 High School, Beijing, 100032, China

Abstract

Ancient coins are important carriers of historical and culture. Qing Dynasty copper coins bring challenges to authenticity identification due to their large quantity in existence and a great number of counterfeits. Taking 60 Qing Dynasty copper coins (30 genuine ones and 30 counterfeit ones) as research samples, this paper initially explores the path of authenticity identification of simple image recognition technology realized by Excel. By collecting and preprocessing sample images, extracting the core features of characters, decorative patterns and patina, quantifying features and conducting data analysis with Excel, a simple identification model is constructed. The research results show that this method can effectively capture the authenticity features of ancient coins with a relatively high identification accuracy. In addition, the tool is easily accessible and simple to operate, which is suitable for primary collectors and student groups to use.

Keywords

Image recognition technology; Qing Dynasty copper coins; authenticity identification; Excel; feature extraction

基于图像识别技术的古钱币真伪鉴别初探——以清代铜钱为例

陈澜齐

北京市第八中学, 中国·北京 100032

摘要

古钱币是历史文化的重要载体, 清代铜钱因存世量大、仿品繁多, 给真伪鉴别带来挑战。本文以60枚清代铜钱(真品30枚、仿品30枚)为研究样本, 初探基于Excel实现简易图像识别技术的真伪鉴别路径。通过采集样本图像并预处理, 提取文字、纹饰、包浆核心特征, 利用Excel进行特征量化与数据分析, 构建简易鉴别模型。研究表明, 该方法能有效捕捉古钱币真伪特征, 鉴别准确率较高, 且工具易获取、操作简便, 适合初级收藏爱好者与学生群体应用。

关键词

图像识别技术; 清代铜钱; 真伪鉴别; Excel; 特征提取

1 引言

1.1 研究背景与意义

古钱币承载特定历史时期文化与经济信息, 清代铜钱作为封建王朝末期主流货币, 铸造规范、流通广泛, 是收藏热门。其标准化特征源于清政府货币管理制度与统一铸造体系, 《清文献通考》有官方尺寸标准, 为真伪鉴别提供依据。但收藏热度上升使低成本仿品大量出现, 部分难辨。造假手段复杂, 有材质替代、形制仿造、后期作旧, Excel普及度高, 有数据统计等功能, 可实现简易特征量化与鉴别分析。本文结合中

学生实践条件, 用Excel替代专业软件, 以少量样本实验, 探索低成本、易操作的古钱币真伪鉴别方法, 降低技术门槛, 为文化保护与市场规范提供支撑, 培养跨学科实践能力。

1.2 国内外研究现状

目前, 图像识别技术用于古钱币鉴别已获初步进展, 国内外学者多以专业软件和复杂算法构建鉴别模型, 但因依赖专业设备和技术储备, 难以普及。传统鉴定方法中, 尺寸与重量测量是清代铜钱鉴定基础, 其科学性与标准化程度影响鉴定结果可靠性; 钱文特征分析是核心, 张宏斌等指出联用技术可为钱文微观特征研究提供参照; 材质检测技术虽能提供成分分析数据, 但面临技术瓶颈与历史信息缺失挑战, 因古钱币材质微观结构改变, 现有技术难还原原始铸造特征。

现代科技用于文物鉴定方面, 离子迁移谱技术在假币

【作者简介】陈澜齐(2010-), 女, 满族, 中国湖北天门人, 在读中学生, 从事古钱币研究。

检测高效且能优化数据,吴秋香团队据此构建快速分析模型,该技术适用于现场快速筛查;数字全息技术检测文物表面缺陷高精度且无损,周文静等在壁画检测中的应用为古钱币表面分析提供范式;光声成像技术提取多层文物信息有深度分辨与材料表征能力,朱耀文等证明其对多层纸质文本成像效果,对清代铜钱包浆层分析有借鉴价值。

图像识别技术发展上,手机拍照用于文物数字化设备普及、操作简易、数据即时优势,可高精度测量尺寸并记录参数,为文物数字档案标准化奠基;Excel处理图像数据有简易应用潜力,可实现数据可视化等功能,为图像特征参数分析提供路径。

现有研究缺乏针对清代铜钱简化研究,未考虑普通群体工具可及性,存在高精设备与简易技术分析结果缺乏等效验证、多模态数据融合有算法瓶颈、技术适配性研究不足等问题。本文从中学生视角出发,简化样本和工具,聚焦实用与可操作,弥补现有研究普及性不足。

1.3 研究内容与方法

核心研究内容:以60枚清代铜钱(涵盖康熙、乾隆、嘉庆等常见年号,真品30枚、仿品30枚)为样本,通过图像采集与预处理,提取真伪关键特征,利用Excel完成特征量化、数据统计与鉴别分析,验证该方法的可行性。

研究方法:(1)文献研究法:查阅清代铜钱特征、仿品鉴别要点、Excel数据处理相关资料以及各类现代检测技术在文物鉴定中的应用文献,奠定理论基础。(2)样本采集法:通过正规文物店、资深收藏者捐赠、收藏市场标注仿品等渠道,收集60枚清代铜钱样本,经资深收藏者初步鉴定,确保样本真实性。(3)实验法:用手机采集样本图像并预处理,提取核心特征并量化,利用Excel进行数据整理、特征分析,构建简易鉴别模型。(4)对比分析法:将Excel辅助鉴别结果与单一资深收藏者的传统经验鉴别结果对比,分析准确率与优缺点。

1.4 研究创新点与不足

创新点:样本规模精简(60枚),实验工具选用普及度极高的Excel,操作流程简化,适合中学生与初级收藏者学习应用;聚焦清代常见年号铜钱,针对性强、实用性强;结合手机拍照的便捷性,充分利用Excel在数据处理中的简易应用潜力,构建了低成本、易操作的鉴别路径。

不足:样本仅涵盖部分常见年号,未涉及稀有版别;依赖手动提取与量化特征,精度有限;鉴别模型简易,对高仿品识别能力有待提升;未建立与专业检测技术数据的交叉验证机制。后续可扩大样本范围、优化特征提取方式,提高鉴别精度。

2 相关理论基础

2.1 清代铜钱真伪核心特征

2.1.1 真品核心特征

清代铜钱均为圆形方孔,直径2.2-2.8厘米,重量2.5-4.5克,尺寸重量规范;正面铸年号+“通宝”,背面铸满文,

文字笔画均匀、转折自然,与钱体结合紧密;包浆为自然氧化形成,颜色均匀、质地温润,不易脱落;材质以黄铜为主,色泽均匀无明显杂质。

2.1.2 仿品主要特征

仿品尺寸重量多与真品不符,边缘粗糙、方孔歪斜;文字僵硬、笔画不均,易出现模糊或错别字;包浆多为人工伪造,颜色单一、质地干涩,易脱落;材质多为廉价金属,色泽杂乱,部分有锈蚀斑点。

2.2 基于Excel的简易图像识别核心逻辑

本文所述简易图像识别,核心是通过图像观察提取古钱币真伪关键特征,将特征转化为可量化的数据,利用Excel进行数据统计、对比分析与规律判断,实现真伪鉴别。核心步骤包括:图像采集与预处理、特征提取与量化、Excel数据处理与鉴别、结果统计。Excel的核心作用的是:整理特征量化数据、通过函数计算与图表分析,找出真伪样本的特征差异,建立简易判别标准,完成真伪鉴别与结果统计。

3 实验设计与实施

3.1 实验样本准备

本次实验共采集60枚清代铜钱样本,涵盖康熙、乾隆、嘉庆、道光4个常见年号,每个年号15枚(真品7-8枚、仿品7-8枚),总计真品30枚、仿品30枚。样本来源:正规文物店购买真品15枚、资深收藏者捐赠真品15枚;收藏市场购买标注仿品20枚、线上正规渠道购买仿品10枚。所有样本经1名具有10年以上收藏经验的爱好者鉴定,确保真伪准确,同时对每枚样本编号(记录年号、尺寸、重量等基础信息)。

3.2 实验设备与软件

实验设备与软件均选用易获取、操作简单的类型,具体如下:(1)图像采集设备:普通智能手机(分辨率1080P及以上,支持自动对焦);(2)图像处理辅助工具:手机自带图片编辑功能(裁剪、亮度调节);(3)核心分析软件:Microsoft Excel 2021(具备数据统计、函数计算、图表制作功能);(4)辅助工具:普通放大镜(放大倍数10倍)、电子秤(精度0.01克)、卡尺(精度0.01厘米)。

3.3 实验步骤

实验严格按照“图像采集-预处理-特征提取量化-Excel分析鉴别-结果统计”流程开展,步骤简化且可操作,具体如下:

3.3.1 图像采集

将60枚样本逐一放置在平整桌面,避免强光直射与阴影干扰,用手机垂直拍摄样本正面、背面图像,每面拍摄1张,确保图像清晰、无倾斜、无遮挡,能清晰呈现文字、纹饰与包浆特征。拍摄完成后,按样本编号分类存储图像。

3.3.2 图像预处理

利用手机自带图片编辑功能,对采集的图像进行简单预处理:裁剪图像,保留铜钱主体区域,去除多余背景;调节亮度与对比度,使文字、纹饰特征更清晰,便于后续观察提取。

预处理完成后,同步更新图像存储,与原始图像对应归档。

3.3.3 特征提取与量化

结合清代铜钱真伪核心特征,选取3类易观察、可量化的关键特征,通过肉眼观察、放大镜辅助、卡尺与电子秤测量,提取并转化为量化数据,具体特征及量化标准如下:(1)尺寸重量特征:用卡尺测量铜钱直径(单位:厘米)、厚度(单位:厘米),用电子秤测量重量(单位:克),直接记录具体数值;(2)文字特征:观察文字清晰度、笔画均匀度,按标准量化打分(1-5分),5分:文字清晰、笔画均匀、无模糊;3-4分:文字较清晰、笔画基本均匀、轻微模糊;1-2分:文字模糊、笔画不均、有错别字;(3)包浆特征:观察包浆自然度,按标准量化打分(1-5分),5分:包浆自然、颜色均匀、质地温润;3-4分:包浆较自然、颜色基本均匀、轻微干涩;1-2分:包浆人工伪造、颜色单一、质地干涩易脱落。

将60枚样本的3类特征量化数据,逐一记录在Excel表格中,构建样本特征量化数据库。

3.3.4 Excel 数据处理与鉴别

打开Excel 2021,新建工作表,命名为“清代铜钱真伪鉴别分析表”,按以下步骤完成数据处理与鉴别:第一步:数据录入。在表格中设置列标题:样本编号、年号、真伪(先隐藏,鉴别后填写)、直径、厚度、重量、文字得分、包浆得分、综合得分。将之前提取的量化数据逐一录入对应单元格。第二步:综合得分计算。在“综合得分”列,利用Excel求和函数(SUM)计算,公式:综合得分=直径规范分+重量规范分+文字得分+包浆得分。其中,直径规范分:符合2.2-2.8厘米得2分,超出范围得0-1分;重量规范分:符合2.5-4.5克得2分,超出范围得0-1分(规范分根据样本实际情况手动赋值后求和)。综合得分满分为12分。第三步:建立鉴别标准。通过Excel筛选功能,单独提取已知真品样本的综合得分,计算真品平均综合得分(本次实验真品平均得分为9.2分),设定鉴别标准:综合得分 ≥ 8 分判定为“真品”,综合得分 < 8 分判定为“仿品”。第四步:真伪鉴别。根据上述标准,对60枚样本逐一判定真伪,将结果填写在“真伪”列中,完成基于Excel的简易图像识别鉴别。

3.3.5 结果统计

利用Excel统计功能,完成鉴别结果统计:在表格中插入数据透视表,统计真品识别正确数、真品识别错误数、仿品识别正确数、仿品识别错误数;利用COUNTIF函数计算鉴别总准确率、真品识别准确率、仿品识别准确率(准确率=正确识别数量/总数量 $\times 100\%$);插入柱状图,直观呈现鉴别结果,利用Excel的数据可视化功能清晰展示分析结果。

4 实验结果与分析

4.1 基于 Excel 的鉴别结果

按照上述实验步骤,完成基于Excel的清代铜钱真伪鉴

别,60枚测试样本的鉴别结果统计,真品样本30枚,识别正确数27枚,识别错误数3枚,原因是这3枚真品长期流通,磨损严重,尺寸重量略超出标准范围,文字与包浆得分较低,导致综合得分低于8分,准确率90.0%;仿品样本30枚,识别正确数26枚,识别错误数4枚,原因是这4枚仿品为高仿品,尺寸重量接近真品标准,人工伪造的文字与包浆相似度较高,得分偏高,综合得分 ≥ 8 分,准确率86.7%;共计检测样本数60枚,识别正确数53枚,识别错误数7枚,准确率88.3%。

4.2 实验结论

通过实验分析,得出以下结论:

(1)基于Excel的简易图像识别方法,对清代铜钱真伪鉴别总准确率达88.33%,能够满足初级鉴别需求,适合中学生与普通收藏爱好者使用;

(2)该方法具备工具易获取、操作简便、客观性强、效率较高的特点,有效弥补了传统经验鉴别门槛高、主观性强的不足;

(3)长期流通的样本由于磨损严重会影响实验结论,高级仿品的工艺水平也会影响实验结论,因此,结合传统人工鉴别方法可提高鉴别效率和准确率。

5 优化建议与未来展望

5.1 现有方法的优化建议

针对本次实验的不足,对基于Excel的鉴别方法提出以下优化建议:一是优化特征提取,增加纹饰规整度等易量化特征,提高鉴别精度;二是完善鉴别标准,扩大样本规模,基于更多样本制定更具适应性的综合得分标准;三是提升数据精度,采用精度更高的测量工具,减少人工测量与观察的误差;四是简化操作流程,在Excel中设置自动计算综合得分与自动判定真伪的函数公式,无需手动计算与判断。

5.2 未来研究展望

未来可从以下方面开展更深入的研究:一是扩大样本范围,增加清代稀有年号与版别的铜钱样本,完善特征数据库与鉴别标准;二是优化Excel功能应用,利用Excel的数据分析工具包,构建更科学的鉴别模型;三是结合手机图像识别小程序,实现特征的自动提取与量化,进一步简化操作流程;四是探索跨学科融合,结合基础的历史知识与计算机操作能力,深化古钱币鉴别与传统文化研究。

参考文献

- [1] 徐维焱. 美国大都会艺术博物馆藏四子部落札萨克银印辨伪[J]. 故宫博物院院刊, 2021, 228(04): 28-39+109.
- [2] 吴秋香,李志豪,王迪,等. 基于离子迁移谱的假币用纸快速检测及溯源[J]. 分析测试学报, 2022, 41(11): 1652-1657.
- [3] 顾伟. 照片类电子档案元数据真实性研究[J]. 档案学研究, 2022, 184(01): 92-96.
- [4] 朱耀文,林星羽,于瀛洁. 光声成像技术在文物保护领域的发展现状[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(24): 63-76.

Safety monitoring and management innovation of mountain photovoltaic intelligent construction site based on intelligent technology

Yunhua Gong

Huaneng Lancangjiang New Energy Co., Ltd., Dali, Yunnan, 671000, China

Abstract

The purpose of this study is to explore the innovative path of safety monitoring and management of mountain photovoltaic smart site based on intelligent technology, so as to improve the efficiency and cost-effectiveness of safety management. By analyzing the application advantages of intelligent technology, it is pointed out that it can enhance real-time perception and dynamic early warning ability, upgrade the intelligent level of risk identification and decision support, and optimize the whole life cycle management. Then put forward the management strategy: build a multi-dimensional perception network to realize real-time risk capture, integrate AI algorithm and big data analysis to improve the accuracy of early warning, build a digital management platform to achieve closed-loop control of security process, strengthen the integration of production and education and standard construction to promote the in-depth application of technology. The introduction of intelligent technology can promote the transformation of mountain photovoltaic site safety management to active prevention, data-driven and system coordination, and provide effective support for the safe development of the industry.

Keywords

intelligent technology; mountain photovoltaic; smart construction site; security Monitoring

基于智能技术的山地光伏智慧工地安全监控管理创新

龚云华

华能澜沧江新能源有限公司, 中国·云南大理 671000

摘要

研究旨在探索基于智能技术的山地光伏智慧工地安全监控管理创新路径,以提升安全管理效能与成本效益。通过分析智能技术应用优势,指出其可增强实时感知与动态预警能力、升级风险识别与决策支持智能化水平、优化全生命周期管理。进而提出管理策略:构建多维度感知网络实现风险实时捕捉,融合AI算法与大数据分析提升预警精准度,打造数字化管理平台达成安全流程闭环管控,强化产教融合与标准建设推动技术深度应用。智能技术的引入可推动山地光伏工地安全管理向主动预防、数据驱动、系统协同转型,为行业安全发展提供有效支撑。

关键词

智能技术; 山地光伏; 智慧工地; 安全监控

1 引言

山地光伏项目作为清洁能源发展关键方向,其建设环境繁杂、施工风险众多,传统安全监控方式难以契合动态化、精细化管理要求,智能技术的高速进步为解决这一难题运用了新途径,借助物联网、人工智能、大数据等技术的深度整合,可达到对山地光伏工地安全风险的实时察觉、智能剖析以及闭环管理。本文着重于智能技术在山地光伏安全监控里的应用优势与管理创新策略,以实现探索凭借技术赋予能量提升安全管理效率,给行业高质量发展提供理论支撑以及实

践参照。

2 将智能技术应用于山地光伏智慧工地安全监控的优势

2.1 实时感知与动态预警能力显著增强

山地光伏工地的地形多数情况下较为复杂、环境变更更多端,传统安全监控依靠人工巡检与固定摄像头方式,其监测盲区很大、响应也较为滞后,智能技术的运用借助部署物联网传感器、无人机巡检系统以及边缘计算设备等,打造出多维度、全覆盖的实时感知网络,传感器可全天候收集环境数据,像地质位移、气象变化等,以及设备状态,如支架倾斜、组件温度异常之类,借助AI算法对数据给予动态剖析,可精确识别潜在风险。举例来说,传感器若检测到山体的微

【作者简介】龚云华(1975-),男,中国云南石林人,硕士,副高,从事新能源工程建设安全管理研究。

小位移或者支架应力异常情况时，系统马上可触发预警，并且经由多级联动机制传达给现场负责人，把事故预防从“事后处置”转变为“事前干预”，智能监控系统支持按照实际情况调整监测频率，遇到恶劣天气或者高风险时段可自动加大数据采集密度，提高了安全管理的时效性以及精准度^[1]。

2.2 风险识别与决策支持智能化升级

山地光伏工地的安全风险隐蔽性极为强，关联性也十分复杂，传统的监控方式需依赖人工经验展开判断，特别容易出现漏判或者误判的状况，智能技术运用计算机视觉、深度学习等算法，实现了对安全隐患展开自动化识别以及分级的管理工作，举个例子来说，AI视觉系统可实时分析施工人员的操作行为，自动将未佩戴安全帽、违规攀爬等危险动作识别出来，并且借助语音提示或者设备联动即时给予纠正，该系统有挖掘历史风险数据的功能，建立起风险预测模型，提前把高发区域与时间段识别出来，为管理人员给予科学决策的依据。智能监控平台选用多源数据进行集成，借助可视化技术将动态风险地图生成，使得管理者可直观地把工地安全态势掌握住，快速调配资源对突发情况进行应对，大幅提高了应急响应效率以及资源利用率^[2]。

2.3 全生命周期管理与成本效益优化

山地光伏项目建设周期偏长、施工条件极差，以往安全监控要用大量人力开展设备维护和数据记录工作，使得管理成本过高而且效率非常低，运用智能技术凭借自动化和数字化办法，达成了安全监控的全生命周期管理，智能设备有自诊断以及远程维护功能，可实时监察设备运行状况，自动对故障发出预警并且指导远程修复，减少了人工巡检次数和停机时间，系统自动生成标准化安全报告以及审计日志，契合合规性要求的给项目复盘以及优化提供了数据支撑。运用智能监控的精准预警以及快速响应机制切实降低了事故发生率，避免了因为安全事故致使的工期延误和经济损失，从长远来讲，智能技术的规模化运用推动了安全管理从“被动应付”朝着“主动防控”转变，给山地光伏项目的可持续建设提供了技术保障和成本优势。

3 基于智能技术的山地光伏智慧工地安全监控管理策略

3.1 构建多维度感知网络，实现安全风险实时捕捉

山地光伏工地地形复杂、气候多变，传统人工巡检难以完全覆盖安全隐患，借助引入智能技术，运用物联网传感器、高清摄像头以及无人机巡检系统进行部署，构建覆盖设备状态、环境参数以及人员行为的立体化感知网络，在设备方面，光伏组件可安装电流电压传感器以及热斑检测仪，实时对组件健康状态给予监测，防止因组件故障导致火灾或者发电效率降低，逆变器与汇流箱依靠功率传感器以及故障诊断模块，动态反馈设备运行参数，提前对过载、短路等风险给予预警^[3]。就环境监测而言，微气象站可整合风速风向、

温度湿度、降雨量以及辐照度传感器，并结合地质位移监测装置，对暴雨、大风、山体滑坡等自然灾害构建预警机制，人员行为监控借助AI视频分析技术，借助固定摄像头与移动布控球捕捉未佩戴安全帽、违规攀爬、未实施安全交底等行为，系统自动识别后触发本地警报并且推送至管理终端。多维度感知网络的构建，让安全监控从“被动响应”转变为“主动预防”，极大提高风险发现效率。

3.2 融合AI算法与大数据分析，提升风险预警精准度

在山地光伏工程施工中，安全风险具有隐蔽性强、突发性高、影响范围广等特点。传统依赖人工巡检与经验判断的监控模式，不仅效率低下，更易因视觉疲劳、认知盲区或主观疏忽导致风险漏判，难以满足复杂环境下的精细化安全管理需求。而人工智能(AI)与大数据技术的深度融合，为构建“早识别、早预警、早干预”的智能风控体系提供了全新路径。

深度学习驱动的AI视频分析技术，可做到对施工现场全天无间断的高精度行为识别，依靠在典型山地光伏场景当中收集众多标注数据，对专用卷积神经网络或者时空行为识别模型展开训练，系统就可以实时捕捉并且解析人员动作轨迹、设备运行状况以及环境动态，举例来说，一旦工人没系安全带进行攀爬、或是在非指定区域操作重型机械，AI模型就可马上识别成违规行为，同时自动触发告警。并且借助气象传感器数据，系统可对强风、雷暴等恶劣天气下的高风险作业时段预测，提前给现场负责人推送“暂停高空作业”等智能预警建议，将被动响应转变成主动防范。

平台把设备故障日志、环境监测记录、人员考勤以及违章历史等多源异构数据进行汇聚，借助关联规则挖掘、聚类分析及时序预测模型，将风险发生的内在规律给揭示出来，就好比，系统可发现“某施工班组午后高温时段违章率上升明显”亦或是“雨季前逆变器周边区域故障频频发生”这类隐性关联，同时依据此来生成动态的“安全风险热图”，直观呈现工地各个区域的风险等级分布状况。管理者可以根据热图以此来对资源配置给予优化——给高频违规区域增派安全员、调整作业班次，或者有针对性地开展警示教育，实现精准防控，AI以及大数据的协同构成了“感知—分析—决策—优化”的智能闭环，每一次的预警响应与处置结果作为新数据又回流到模型当中，不断提高算法准确率和预测能力，促进安全管理体系自我进化。

3.3 打造数字化管理平台，实现安全流程闭环管控

山地光伏工地地形复杂、作业分散、风险点多，传统依赖人工记录与纸质台账的安全管理模式，普遍存在信息孤岛、响应滞后、责任模糊等弊端，难以满足现代工程对精细化、实时化安全管理的需求。依托智能技术构建统一的数字化管理平台，可有效整合“人、机、环、管”全要素数据，打造“监测—预警—处置—反馈”一体化的闭环管控体系，从根本上提升安全治理效能。

运用为每位工人绑定二维码“数字身份证”或是选用人脸识别闸机的方式，系统可自动开展实名制准入验证工作，并且可以实时对其在工地内的动态轨迹给予追踪，该平台有集成人员资质证书、安全培训记录以及历史违规行为等功能，能生成个性化的安全履历情况，保证高空作业、电气操作这类特种岗位全部做到持证上岗，从源头上杜绝无证作业的风险。依靠接入光伏支架、逆变器、施工机械等设备的物联网传感器，实时对振动、温度、电流等运行参数进行采集，并且和历史维护数据一并结合起来，借助 AI 算法对故障趋势与剩余寿命进行预测，一旦触发风险阈值，系统便会自动生成工单，同时把工单推送给对应的运维人员，以实现“早发现、早干预”，避免由于设备失效而引发安全事故。

在应急响应这方面，平台大大提高协同效率，当火灾、边坡滑移或者触电之类的险情被感知层识别之后，系统马上定位事故坐标，自动开启应急预案：联动切断相关区域电源，调取最近的监控画面，规划最为优化的疏散路径，同时借助移动端 APP 向现场人员精准推送避险指令，将应急响应时间缩短 50% 以上。每日巡检记录、隐患整改状态以及事故统计等数据自动进行归集，形成多维度可视化报表，管理者可依据这些生成的报表来展开绩效评估——比方说某班组月度违章次数超出标准，系统会自动扣减其安全积分，并且强制安排再培训，这样就形成了一个“检查—整改—考核—提升”的良性循环。

3.4 强化产教融合与标准建设，推动智能技术深度应用

山地光伏电站因地形复杂、气候多变、运维困难，对安全监控提出更高要求。智能技术虽为提升监测精度与响应效率提供了可能，但其落地常受限于高成本、高功耗、算力依赖强及系统兼容性差等问题。要实现智能监控在山地光伏场景中的规模化、可持续应用，必须以产教融合夯实技术根基，以标准建设打通推广路径。

光伏企业应当与高校、科研机构联合起来，共同构建“山地光伏智能安全监控联合实验室”，围绕实际痛点展开协同创新工作，比如说，针对偏远山地供电不方便这一问题，展开合作来研发功耗低、能实现自供能的环境传感器，鉴于边

缘计算资源有限这种实际状况，去开发轻量化的 AI 模型，要使其可在成本低的嵌入式设备上实现高效运转。企业可以开放真实场站，将其作为实习实训基地，让学生在进行部署调试、排查故障的过程中积累经验，培育出对光伏系统原理有所掌握，又精通智能感知以及数据分析的复合型人才，给技术迭代以及运维保障提供人力方面的支撑。

加快标准体系建设乃是保障系统互操作性以及可靠性的基础所在，建议可由行业协会带头，联合上龙头企业以及科研单位来制定《山地光伏智能安全监控技术规范》，从硬件、通信直至平台功能设定出统一的门槛，比方说，明确红外热成像传感器测温的误差需小于等于正负 2℃，视频监控应当支持 4K 分辨率以及低照度提高，要强制规定数据传输采用“光纤主干加上 4G/5G 备份”这样的双链路机制，以此来杜绝信号出现中断的风险，规定监控平台要集成“设备状态自检 - AI 异常初筛 - 人工复核确认”的三级数据清洗流程，保证预警的准确率不低于 98%。统一标准可避免“信息孤岛”以及重复建设的问题，还可以极大地降低中小企业在进行设备选型、开展系统集成以及后期进行维护过程中的试错成本。

4 结语

智能技术的深度应用为山地光伏智慧工地安全监控带来了管理范式的革新。通过构建多维度感知网络、融合 AI 与大数据分析、打造数字化管理平台及强化产教融合与标准建设，安全管理实现了从“被动应对”到“主动预防”、从“经验驱动”到“数据驱动”的跨越。未来，随着技术的持续迭代与行业协同的深化，智能安全监控将成为山地光伏项目建设的标配，助力清洁能源产业在安全、高效、可持续的轨道上稳步前行。

参考文献

- [1] 饶艳伟,胡熠甜. 智慧工地管理系统在海上风电项目中的应用[J]. 科技视界, 2025, 15 (32): 48-52.
- [2] 李继伟,方占正,陈涛,等. 基于AI智能分析技术的智慧光伏工地安全管控[J]. 科技与创新, 2025, (12): 91-93+100.
- [3] 李宝峰,田宏亮,杨孟宇,等. 智慧工地安全管理平台在分布式光伏项目中的应用研究[J]. 现代工程科技, 2025, 4 (04): 157-160.

Analysis of the Cause of the Differential Protection Malfunction of Siemens 7UM622 Protection Device Caused by Lightning Strike

Xiaofeng Chen

Shenzhen Datang Baochang Gas Power Generation Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong, 518110, China

Abstract

To accommodate diverse system operating modes, imported international brand microcomputer protection systems typically adopt open-source parameter configuration. While most relay protection engineers prioritize setting power calculation values, they often overlook system operating mode configurations. This paper analyzes a case where differential protection malfunction occurred in a Siemens 7UM622 device at a Shenzhen power plant due to improper system mode settings in its shunt equipment. The study provides a detailed analysis of key parameter configuration principles for Siemens protection systems, proposing that imported microcomputer protection should incorporate expanded system operating mode configurations. This recommendation can serve as a reference for the application of imported microcomputer protection systems.

Keywords

relay protection setting, Siemens 7UM622 protection, differential protection, lightning strike, neutral point

雷击导致西门子 7UM622 保护装置差动保护误动原因分析

陈晓峰

深圳大唐宝昌燃气发电有限公司, 中国·广东 深圳 518110

摘要

进口国际品牌的微机保护为了适应多种系统运行方式,一般对装置的参数都采取开源的方式进行设置,大多数继保工作人员对电量计算的整定值比较重视,而对保护装置配置的系统运行方式可能会忽略,本文通过对深圳某电厂忽略设备系统方式设置导致西门子7UM622保护装置差动保护误动的实例,对西门子保护的参数设置要点进行详细的分析,提出了国际品牌微机保护整定值应增加系统运行方式的设置,可以推广至进口品牌的微机保护参考应用。

关键词

继电保护整定 西门子7UM622保护 差动保护 雷击 中性点

1 引言

微机保护定值的整定是确保电力系统安全稳定运行的关键环节,主要根据保护装置的特性和电力系统参数,合理设置各项整定值,以保障继电保护动作的可靠性,大多数国产继电保护装置在设计设备选型时已选定继电保护装置的形式,现场的整定计算主要以电量计算整定值的输入为主,而一些进口品牌微机保护装置如西门子、施耐德等品牌为了适应各种运行工况,其参数的设定范围很宽广,不仅包含了整定的电量参数,还需要设定保护的主设备的连接方式,CT的极性等等,因此对于进口品牌的微机保护需要根据不同的运行方式对保护对象的各种型式进行设定,防止保护误

动。深圳某电厂曾发生一起因雷击导致发变组差动保护误动的案例,特对此现象进行详细的分析如下。

2 案例经过

深圳某燃机电厂为两套9E燃气蒸汽联合循环机组,以双母线接入深圳电网110kV系统,双母线分段运行,其中2号机组采用单元接线接入1号母线,2号主变型式为Y/△-11分级绝缘,采用中性点经隔离刀闸接地与间隙接地的模式运行,发变组保护由发电机保护(装置型号为西门子7UM6225),主变高压侧后备保护(装置型号为西门子7SJ6865),零序和间隙零序保护(装置型号为西门子7SJ6865)组成。7UM622主保护为发变组纵差保护,采用比率差动工作原理,没有配置专门的主变差动和发电机差动保护,中性点接有零序保护和间隙零序保护。

某雷雨天气,机组满负荷2号主变中性点地刀分开运行,

【作者简介】陈晓峰(1977-),男,中国海南琼山人,本科,工程师,从事电力系统自动化研究。

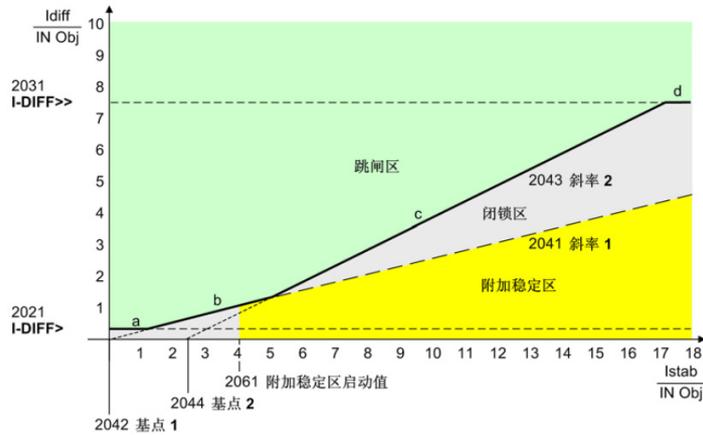


图3 西门子 7UM622 差动保护曲线

根据录波数据整理了故障时的动作数据如表 1 所示。

表 1

相别	起始值	斜率	差动电流	制动电流	整定动作值	结论
A	0.4In	0.25	1.6In	2.56In	0.64In	动作区内
B	0.4In	0.25	1.56In	1.6In	0.4In	动作区内
C	0.4In	0.25	1.45In	4.72In	1.18In	动作区内

从表 1 看出，实际差动电流大于整定动作值，差动电流动作值落入跳闸区域范围内，西门子 7UM622 比率差动保护跳闸出口真实反应了实际检测数据。

3.2 区外故障差动保护动作原因

从故障现象及故障地点来看，对于西门子 7UM6225 差动保护而言为区外故障，问题的关键是差动电流三相均衡，与正常的区内故障有很大的差异。主要原因是西门子 7UM622 保护对于主变中性点接地和主变中性点不接地对于差动电流的算法不同。

对于中性点不接地系统，因为发生单相接地时，不会产生零序电流，两侧电流算法如图 4 所示。由图 4 可知， $IA=L1, IB=L2, IC=L3$ ，星型侧直接将线电流作为差动保护 1 侧的计算电流。

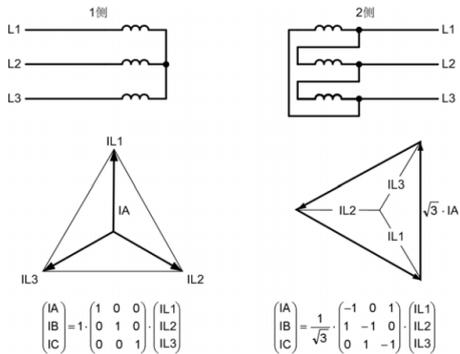


图 4 主变中性点不接地系统向量及电流算法

对于中性点接地系统，因为发生单相接地时，三相会产生同向量的零序电流，两侧电流算法如图 5 所示。由图 5

可知：

$IA=(2L1-L2-L3)/3=(3L1-L1-L2-L3)/3=(3L1-(L1+L2+L3))/3$ ，在星型侧没有故障的情况下， $L1+L2+L3=0$ ，则 $IA=L1$ 。星型侧亦直接将线电流作为差动保护中 1 侧的计算电流。

然而，在出现故障的情况下， $L1+L2+L3 \neq 0$ ，则：

$$IA=(3L1-(L1+L2+L3))/3=(3L1-3L0)/3=L1-L0$$

显然，星型侧将每相线电流中的零序电流消除之后作为差动保护中 1 侧的计算电流。

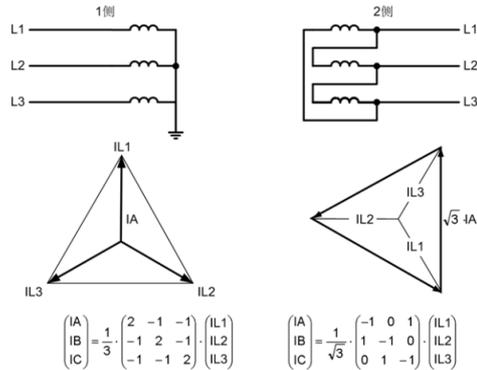


图 5 主变中性点接地系统向量及电流算法

根据深圳中调的信息，在机组跳闸时，110kv 变电站 C 相单相接地，导致主变中性点间隙击穿，因此 2 号主变由中性点不接地运行转为中性点接地运行方式，图 6 为区外故障时系统示意图，显然 C 相发生单相接地时，在主变星型侧会产生零序电流；因为主变三角形侧为不接地系统，因此主变星型侧的零序电流不会传递到三角形侧。

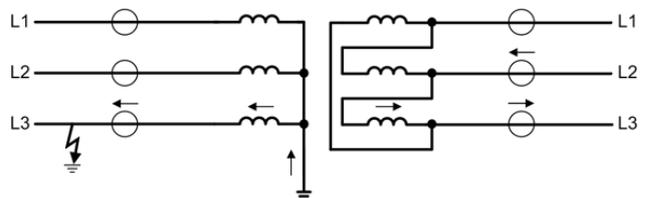


图 6 变压器外部接地故障时各相电流的分布示意图

检查 7UM622 发变组保护装置中设置主变运行方式设置为中性点不接地 (Isollate)，微机保护装置的差动电流计算以中性点不接地方式进行计算，如图 7 算式。在图七算式中，右侧为三角形侧差动保护的计算电流，左侧为星型侧差动保护的计算电流。星型侧 L1、L2、L3 包含正序分量、负序分量和零序分量。三角形侧 L1、L2、L3 包含正序分量、负序分量。根据电力系统叠加法，两侧正序分量和负序分量通过差动电流算法相互抵消。星型侧零序电流则无法抵消，算入差动保护差动电流中，所以即便区外故障，仍然计算出差流，导致差动保护出口。

$$\begin{pmatrix} IA \\ IB \\ IC \end{pmatrix} = 1 \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} IL1 \\ IL2 \\ IL3 \end{pmatrix} \qquad \begin{pmatrix} IA \\ IB \\ IC \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \begin{pmatrix} -1 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} IL1 \\ IL2 \\ IL3 \end{pmatrix}$$

图 7 变压器中性点不接地各相差动电流算法

因此，本次保护在区外故障时动作的主要原因是 7UM622 保护装置中设置主变运行方式设置为中性点不接地，当区外发生单相接地导致主变中性点间隙被击穿成为了中性点接地运行，零序电流不平衡导致差动电流的算法出现了差异，因此保护装置认定区内故障出口跳闸。

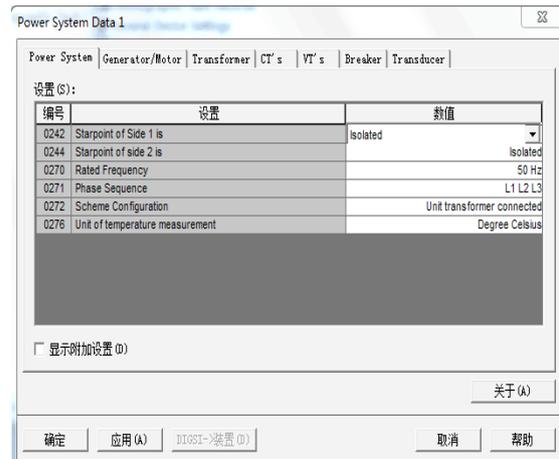


修改前

4 修正措施

西门子 7UM622 保护的整定值设置与国产的南瑞、南自、四方等品牌不尽相同，国产品牌的保护整定设定主要以电压变比、电流变比及计算的电量整定值为主，不涉及系统运行方式、CT 极性等参数，因此《中国南方电网大型发电机变压器继电保护整定计算规程》里只对各电量保护定值的计算做了详细的要求，而对系统运行方式、CT 极性等参数未在定值清单里进行详细的描述和要求，而国际品牌的微机保护为了适应各种不同型的设备，对电力系统运行方式、CT 极性、电压电流变比都采取了开源的方式，由用户自行设定，因此在调试阶段大多数继电保护工作人员会对此设定忽略或重视程度不够，因此有可能出现微机保护系统运行方式为出厂设置，在特殊工况下不能真实反应被保护设备的实际运行工况，必须对此参数进行修改。修改保护装置定值时使用笔记本电脑采用专门的软件进行连接，如图 8 所示进行修改：

在软件中将 0244 由 Isollate 改为 Solid Earthed，即主变高压侧由中性点不接地改为直接接地，修改完成后再也没有出现误动。



修改后

图 8 西门子 7UM622 系统定值修改图

5 结论

进口国际品牌的微机保护为了适应多种系统运行方式，一般对装置的参数都采取开源的方式进行设置，大多数继电保护工作人员对电量计算的整定值比较重视，对保护装置配置的系统运行方式可能会忽略，一旦设置不当，极有可能出现保护误动的情形，因此当配置进口品牌的微机保护时，需要根据不同的运行方式对保护对象的各种型式进行设定，防止保护误动，这点与国产品牌微机保护的要求不一样，需要引起

广大继电保护工作人员的重视。

参考文献

- [1] Q/CSG110034-2012 《中国南方电网大型发电机变压器继电保护整定计算规程》南方电网企业标准，2012年5月发布。P28-30
- [2] 西门子用户功能手册《SIPROTEC 4 7UM6X多功能电机保护装置用户功能手册》P70-78
- [3] 南瑞继保《PCS-985BT电厂变压器保护装置说明书》P1-9页
- [4] 国电南自《DGT801U系列数字式发电机变压器保护装置技术说明书》P1-2页

Application Analysis of Intelligent Metering and Testing Technology in Energy Metering

Wanjie Ren Haitao Han

Ili Prefecture Inspection, Testing and Certification Research Institute, Yining, Xinjiang, 835000, China

Abstract

As the energy structure transformation deepens and refined management models are fully implemented, traditional energy measurement systems can no longer meet the core requirements of modern energy management systems for high precision, real-time performance, and traceability. Intelligent metering technologies, leveraging integrated applications of cutting-edge technologies including sensors, IoT, big data, and AI, enable automated data collection, remote transmission, intelligent analysis, and dynamic monitoring of energy metrics. This significantly enhances measurement accuracy, system operational efficiency, and comprehensive management standards. This paper systematically analyzes the current application status of intelligent metering technologies in core energy measurement fields such as electricity, natural gas, and petroleum. Through concrete engineering case studies and field measurement data, it elucidates the working principles, technical characteristics, and application outcomes of key technologies including smart meters, ultrasonic flowmeters, mass flowmeters, and online component analyzers. The study further explores practical challenges encountered during technology adoption, such as data security protection, unified technical standards, and system integration. It proposes future directions for technological innovation and policy support frameworks, aiming to provide theoretical and practical references for the intelligent transformation of energy measurement systems.

Keywords

intelligent metering and testing; energy metering; big data analysis

智能化计量检测技术在能源计量中的应用分析

任万杰 韩海涛

伊犁州检验检测认证研究院, 中国·新疆 伊宁 835000

摘要

伴随能源结构转型进程的深化与精细化管理模式的全面落地,传统能源计量模式已无法匹配现代能源管理体系对高精度、实时性、可追溯性的核心要求。智能计量检测技术依托传感器、物联网、大数据及人工智能等前沿技术的集成应用,实现能源数据的自动化采集、远程化传输、智能化分析与动态化监控,大幅提升计量数据精准度、系统运行效能与全流程管理水平。本文对智能计量检测技术在电力、天然气、石油等核心能源计量领域的应用现状展开系统性剖析,结合具体工程实践案例与实测数据,阐释智能电表、超声波流量计、质量流量计、在线成分分析仪等关键技术的工作原理、技术特征及应用成效,进一步探究该技术推广应用过程中面临的数据安全防护、技术标准统一、系统协同集成等现实挑战,就未来技术融合创新方向与政策配套支撑体系提出展望,旨在为能源计量体系的智能化转型升级提供理论与实践参考。

关键词

智能化计量检测; 能源计量; 大数据分析

1 智能化计量检测技术

能源计量是能源管理、贸易结算、能效评估及政策制定的核心技术支撑。传统能源计量模式以机械式计量仪表为载体,依托周期性人工抄表模式开展工作,存在计量精度偏低、数据时效性不足、数据易被篡改、人工运维工作量繁重等固有缺陷。智能计量检测技术是一项集成现代传感技术、

微电子技术、通信技术与数据处理技术的综合性技术体系,可实现能源消耗量的自动化、连续性、高精度测量,并依托网络完成计量数据的远程传输与智能化管控^[1]。其核心组成架构包含智能传感单元、数据采集与处理单元、通信模块、数据管理与分析平台四个方面。

在智能传感单元方面,以电子式电能计量芯片、超声波换能器、科里奥利质量流量传感器等高精度传感器为核心载体,承担原始能源数据的实时化、高精度采集任务。在数据采集与处理单元方面,内置微处理器模块,对采集的原始信号依次开展滤波、放大、模数转换及初步运算处理,生成累计电量、瞬时流量、累计质量等标准化计量数据。在通信

【作者简介】任万杰(1985-),男,中国河南周口人,硕士,高级工程师,国家一级注册计量师,从事质量管理与计量检测研究。

模块方面,兼容RS-485、电力线载波等有线通信方式与无线通信模式,保障计量数据向数据中心或云平台实施安全、稳定的远程传输。在数据管理与分析平台方面,负责海量计量数据的接收、存储与管理,依托大数据分析、人工智能算法开展数据校验、异常工况诊断、负荷预测、能效评估等工作,为能源管理决策提供科学的数据支撑。该技术体系的落地应用,推动能源计量领域实现从单一计量器具向计量系统,乃至计量生态系统的层级跃升,达成了从数据采集到价值挖掘的全流程智能化转型。

在全球视野下,能源精细化管控体系构建、碳交易市场机制落地、智能电网建设提速及工业互联网深度赋能,共同构成智能计量检测技术迭代发展的核心驱动力。以欧盟为例,其颁布的《能源效率指令》中,已对各成员国智能计量系统的规模化推广作出强制性规范。在我国,国家电网有限公司于“十二五”时期便已全面启动智能电表换装工程与用电信息采集系统的建设工作。据国家电网有限公司社会责任报告披露的数据,截至2023年末,其经营区域内智能电表覆盖率已突破99%,用电信息采集成功率稳定保持在99.5%以上。在油气领域,国际贸易交接结算、管道资源公平准入、管输损耗精准管控等现实需求,对计量精度与运行可靠性提出严苛标准。例如,中国石油天然气集团有限公司西气东输管道沿线各分输站,均已配备高精度超声波流量计用于贸易交接计量,其配套标准装置的测量不确定度优于0.1%。

2 智能化计量检测技术在电力计量中的应用

电力计量领域是智能化技术应用起步最早且发展最为成熟的领域,其核心技术装备为智能电表与用电信息采集系统。

2.1 智能电表的技术特点与应用数据

相较于传统机械式电表或电子式电表,智能电表集成计量、数据存储、信息通信、事件记录、费率调控等多元功能^[2]。以我国现阶段广泛应用的单相智能电表为研究样本,其核心技术参数详见下表1。

表1 典型单相智能电表主要技术参数表

参数类别	技术指标	备注
准确度等级	1级或0.5S级	在5%I _b 至I _{max} 范围内误差不超过±1%或±0.5%
电流规格	5(60)A,10(100)A等	括号内为最大电流,宽量程设计
通信方式	载波(PLC)、微功率无线、RS-485、NB-IoT	支持多种通信方式,适应不同安装环境
数据存储	至少存储12个月的历史月用电量数据	支持数据冻结与查询
费控功能	支持远程/本地费控,具备跳闸、合闸指令执行能力	实现预付费或后付费管理
事件记录	失压、失流、断相、开盖、清零、校时等事	用于异常分析与防窃电

2.2 用电信息采集系统架构与大数据应用

用电信息采集系统普遍采用“主站—集中器—采集器/

智能电表”三级架构体系。主站系统作为数据汇聚、运算处理与指令下发的核心枢纽,其大数据分析功能的核心应用场景主要涵盖线损精细化管理、负荷预测与需求侧管控、电能质量监测、用户用电行为分析与增值服务供给维度。线损精细化管理维度,通过对台区总表与用户分户表计量数据开展实时协同校验,实现台区线损的动态核算,精准定位高损台区与线路异常节点。例如,某市级供电企业应用该技术方案后,台区日线损可核算率由75%提升至100%,年度综合线损率降低0.3个百分点。负荷预测与需求侧管控维度,基于历史负荷数据与实时监测数据构建预测模型,开展短期、中期用电负荷预测,为发电计划编制、电网调度优化提供科学依据。同时,可向终端用户推送分时电价激励信号,引导用户实施削峰填谷用电策略。电能质量监测维度,部分高端智能电表配置相关功能模块,可实现电压、频率、谐波等电能质量指标的实时监测,为供电质量提升与用户端用电设备安全防护提供数据支撑。用户用电行为分析与增值服务供给维度,通过深度挖掘用户用电行为特征与负荷模式,可为用户提供能效诊断分析报告、定制化用电优化建议等个性化增值服务。

3 智能化计量检测技术在天然气计量中的应用

天然气计量主要涵盖贸易交接计量与生产过程计量两大类,对计量精度、运行稳定性及系统安全性提出严苛要求。

3.1 超声波流量计成为贸易计量主流

气体超声波流量计凭借无运动部件、宽量程比、高计量精度、支持在线故障诊断等技术优势,已成为大型天然气输配场站贸易交接计量场景中的主流优选计量仪表。以某进口品牌六声道气体超声波流量计为典型样本,在标准参比工况条件下,该型仪表计量精度等级可达0.5级,最大量程比可达到1:400。

其智能化特征具体体现在在线实时诊断功能、压力温度在线动态补偿功能、数据远程传输与集中监控功能三个方面。通过对各声道信号质量、声波传播速度、信噪比及流速剖面等核心参数开展持续性监测,一旦侦测到管道内壁脏污附着、介质结垢沉积、流体流态异常等工况,即刻触发预警响应机制,保障计量过程的稳定可靠性。集成高精度压力与温度传感模块,对工况状态下的压力、温度参数进行实时采集,参照《天然气计量系统技术要求》(GB/T 18603)等国家标准,自动将工况体积换算为标准状态下的体积参数,降低人工换算等中间环节引入的计量误差^[3]。流量数值、压力、温度及设备诊断状态等全量数据,通过远程终端单元实时上传至数据采集与监视控制系统,实现计量数据的集中化监控与设备的远程化运维管理。

3.2 智能体积修正仪与网络化管理系统

在中小流量天然气计量场景中,涡轮流量计、膜式流量计等传统计量仪表仍保持广泛应用态势,但其配套的智

能体积修正仪（下称智能积算仪）已完成智能化技术迭代升级。该设备不仅可完成介质温度与压力参数的动态补偿运算，还集成了IC卡预付费管控、无线远程数据传输、智能阀控、异常用气工况诊断等多元功能。国内某城市燃气企业为逾10万户工商业用户部署搭载NB-IoT通信模块的智能积算仪。该计量管理系统月度自动抄表成功率达99.5%以上，依托内置大数据分析模型，可精准识别用户异常用气模式。2023年度，该系统累计主动甄别并处置各类用气安全隐患与计量纠纷超800起，显著提升燃气计量与安全管控水平。

4 智能化计量检测技术在石油及液体能源计量中的应用

石油及其衍生品的计量工作涵盖开采、集输、储运、销售等全流程环节，智能化计量技术的核心要义在于提升贸易交接计量的公平公正性与生产过程计量的精准性。

在成品油终端销售环节，智能化发油系统集成流量计、控制终端、防溢油检测探头、静电接地监测装置、车牌识别系统、视频监控单元等多元设备。作业人员依托IC卡或移动终端APP完成自助提油操作，系统可自动开展订单核验、装车流程联锁管控、计量数据实时采集及单据自动生成打印等系列操作。该系统实现提油单据至物流数据的全流程数字化转型，所有交易环节中的油品品类、交割数量、作业时间、运输车辆及客户信息均实现精准记录与全流程可追溯，为供应链体系优化、库存精细化管控及舞弊行为甄别提供了关键性技术支撑。

5 技术挑战与发展趋势

尽管智能化计量检测技术已取得阶段性显著成效，但在规模化推广应用进程中仍面临诸多亟待突破的现实挑战。

5.1 数据安全与隐私防护

海量高粒度能源消费数据涉及用户隐私与商业机密范畴，如何防范数据在传输、存储、应用全生命周期内发生窃取、篡改或滥用风险，成为亟待解决的核心问题。需强化通信加密、访问权限管控、数据脱敏等技术防护手段，同时推动相关法律法规体系的健全完善。

5.2 标准协议与互联互通

不同厂商的设备与系统存在技术壁垒及标准不统一问题，引发“信息孤岛”效应，抬升系统集成与运维管理成本。亟待构建并完善统一的国家及行业标准体系，破除技术兼容障碍。

5.3 长期运行可靠性验证

智能化计量设备长期处于复杂现场工况下运行，其电

子元器件服役寿命、传感器性能长效稳定性、软件系统抗攻击能力等均需持续开展验证与优化提升工作。

5.4 海量数据处理与价值挖掘

如何从PB级计量数据中高效、智能地挖掘提取高价值信息，对数据分析算法模型与计算支撑平台提出更高层级的技术要求。

未来该技术的发展趋势将聚焦于技术深度融合应用、感知层智能化升级、系统级协同智能构建、服务模式创新拓展四大方向。技术深度融合应用中，5G通信、边缘计算、数字孪生、区块链等新一代信息技术将与智能化计量技术实现深度融合。感知层智能化升级方向中，计量传感终端将集成更多自感知、自诊断、自校准功能模块，同时朝着微型化、低功耗、多参数集成化方向演进。系统级协同智能构建中，从单点设备的智能化，向全计量系统乃至能源系统的协同智能化方向升级演进。依托“云-边-端”协同架构，实现更精准的能源调度管控、更高效的故障预测与健康管理。服务模式创新拓展中，基于智能化计量数据资源，将衍生出多元增值服务形态，例如深度能效优化服务、碳排放精准核算及交易服务、基于用能行为特征的金融保险产品创新等。

6 结语

智能计量检测技术是能源领域数字化转型进程中的核心支撑性基础设施。该技术在电力、天然气、石油等核心能源领域的规模化应用实践充分验证，其可从底层逻辑层面提升能源计量工作的精准性、实时性与可靠性，显著降低全流程管理成本与运营风险敞口，为能源贸易公平化、利用高效化、运营安全化及决策科学化筑牢坚实的数据底座。针对数据安全防护、技术标准统一等现实挑战，亟需产业界、学术界与政策制定部门开展协同攻关，持续推动技术迭代创新与标准体系的完善构建。未来，伴随更多前沿技术的深度融合与渗透，智能计量领域将实现从“数据计量”到“智慧计量”的范式跃迁，在构建清洁低碳、安全高效的现代能源体系进程中发挥更为关键的支撑作用。

参考文献

- [1] 吕鲁望.基于移动互联网的计量检测智能化管理体系开发[J].信息记录材料,2021,22(08):153-155.
- [2] 厉旻,卢小犇,李何良.基于智能化管理的压力传感器计量检测方法[J].自动化技术与应用,2024,43(09):8-11+20.
- [3] 王惠君,王凯,武宏璋,等.基于AI大模型的计量检测机构智能化升级路径探索[J].衡器,2025,54(06):47-49.

Key Nodes and Management Strategies of Procurement Schedule Control for EPC Project of Coal Chemical Industry

Yunxia Ma Xu Ji Jingkai Wang

China Aerospace Changzheng Chemical Engineering Co., Ltd., Beijing, 100000, China

Abstract

Coal chemical EPC projects involve large-scale facilities with numerous professional interfaces, and critical equipment and special materials often have long lead times. Any deviation in procurement progress can significantly delay the synchronization of design drawings, construction organization, and commissioning. From the perspective of the general contractor's procurement management, this paper combines the common supply structures of China's coal-to-olefins, gasification, and public auxiliary systems to identify the most vulnerable nodes in the bidding, manufacturing inspection, transportation, and unpacking and handover processes. It also summarizes the executable criteria and responsibility interfaces for on-site implementation. The study suggests that procurement progress control should adhere to the principles of verifiable milestones, quantifiable supplier actions, and inspectable interface conditions, forming a node list that spans the entire lifecycle. These practices help reduce risks of incomplete deliveries and temporary construction rework, ensuring timely project commissioning.

Keywords

coal chemical EPC project; procurement schedule control; key milestones; management strategies

煤化工 EPC 项目采购进度控制关键节点与管理策略

马蕴霞 季旭 王靖凯

航天长征化学工程股份有限公司, 中国·北京 100000

摘要

煤化工EPC项目装置规模大、专业接口多, 关键设备与特材长周期明显, 采购进度一旦偏离, 往往会把设计出图、施工组织与试车投产同步拖慢。本文以总承包商采购管理视角, 结合中国煤制烯烃、气化及公辅系统的常见供货结构, 梳理招标订货、制造检验、运输到场与开箱移交等环节中最易失控的节点链条, 并归纳现场可执行的判定口径与责任界面。研究认为, 采购进度控制应以里程碑可核对、供方动作可量化、接口条件可验收为原则, 形成贯穿全周期的节点清单。相关做法有助于降低到货不成套与临建返工风险, 支撑项目按期投产。

关键词

煤化工EPC项目; 采购进度控制; 关键节点; 管理策略

1 引言

进入新时期以来, 随着石油化工行业步入转型发展阶段, EPC 总承包模式凭借其全流程集成化管理优势, 在大型石油化工工程建设领域得到了广泛应用^[1]。具体到煤化工中, EPC 总承包商常在设计、采购与施工并行的条件下压缩关键路径, 而采购受供方产能、制造工序、运输组织与现场条件影响, 计划偏差更易向后传导。中国关于煤制油化工与炼化总承包项目的相关研究提示, 长周期设备订货时点、制造关键检验节点以及到货成套性, 是采购进度控制的主要难点。基于此, 文章通过查阅相关文献资料以及结合自身工作实践情况下, 先界定煤化工 EPC 项目采购进度控制的关

键节点, 再提出与节点对应的管理策略, 以提升交付确定性。

2 煤化工 EPC 项目采购进度控制关键节点

2.1 采购策划与清单锁定节点

煤化工 EPC 项目的采购能否按期推进, 往往在策划阶段就已埋下伏笔, 因此清单锁定被业内视为采购进度的首个刚性节点。采购负责人通常在初设向施工图深化的衔接期介入, 依据总体进度与各装置开工窗口, 识别长周期设备、关键材料与需要提前订货的特殊件, 形成先行采购清单, 并与设计团队核对界面范围、接口条件与成套边界, 完成采购包划分与招标计划。该节点的核心输出是可发标、可签约的采购清单包, 至少应包含规格书或数据表编号、数量与备量、交货地点、分批交付需求、检验与验收依据、以及与付款节点相匹配的交付范围。由于煤化工装置并行多、接口密集, 策划阶段还会同步梳理业主供货、专利商成套供货与总包自

【作者简介】马蕴霞(1992-), 女, 中国甘肃兰州人, 本科, 工程师, 从事采购管理研究。

采的交叉边界,明确各自需提交的资料、检验要求与到货时间口径,避免后续出现供货责任争议^[1]。内部控制相关规范也强调请购与审批、供应商管理、实施采购、验收及入库等环节的关键性,提示采购节点需要以规范输出形成可追溯链条。在实际执行中,该节点最容易受到设计成熟度波动的影响,例如关键设备参数未定、接口条件待澄清、或专利包边界调整,都会导致清单反复与采购包拆分重组。另一个常见触发点是清单漏项与规格不一致,特别是阀门、管件、仪表元件等数量大且型号繁杂的物资,若在锁定阶段未完成统一口径校核,后续补采往往穿插在施工高峰期,直接挤占仓储、卸货与安装资源,形成时间损失。

2.2 关键设备技术文件确认与下单节点

关键设备技术文件确认与下单节点是煤化工项目采购链条的放行点,一旦定稿即形成制造与交货的基准。该节点围绕气化炉、空分压缩机、合成反应器、大型换热器等关键设备展开,重点是把工艺包参数、设计条件与制造验收要求固化到数据表、技术规格书与图纸清单中,明确材质、压力温度等级、接口尺寸、备品备件范围、检验试验项目以及资料提交清单,使供方报价、制造与后续安装不再依赖口头解释。技术文件确认还需要完成与详细设计的边界核对,确保管口方位、基础荷载、驱动方式、润滑冷却介质与公用工程条件一致,否则下单后将以返工、补强或现场改造的形式显性化^[2]。由于供方资料回传直接影响管道布置与土建基础细化,节点内还需同步明确总图、基础图与关键外形图的提交版本与时间基准。节点完成的标志是技术附件与商务条款对应无歧义,形成正式订单或合同,并锁定交货期、关键资料提交日期、制造关键点与出厂验收条件。

2.3 制造关键工序与放行见证点

煤化工关键设备多处于高温高压和强腐蚀工况,制造周期长且工序复杂,采购进度不能只盯发运日期,而应识别对周期影响最大的工序节点。典型节点包括锻件与厚板到厂、关键材料复验与炉批号核对、焊接工艺评定完成、关键焊缝无损检测合格、热处理曲线确认与尺寸复测通过、压力试验或性能试验完成,以及成套机组联试、转子动平衡与轴系对中记录齐全。上述工序一旦出现返修或试验不合格,往往直接吞噬浮时,并连带推迟涂装、包装、装箱与发运。节点完成的判定应以供方出具的检验记录、第三方或监造见证记录、不符合项关闭与放行签字为依据,同时需确认铭牌标识、随货文件目录与装箱清单的首版成型,否则到场后仍可能因资料缺项造成开箱停滞^[3]。

2.4 到货验收与现场接口移交节点

到货并不等于节点完成,煤化工装置现场往往以系统为单位组织安装与试压,设备材料只有在完成验收并实现接口移交后,才真正转化为施工可用资源。该节点通常覆盖运输到场、开箱清点、外观与数量核查、随箱文件核对、必要的复验与抽检、以及向施工单位或仓储单位的责任移交等环

节,属于采购与施工的交接界面。采购管理研究与内部控制规范均将验收、入库与付款节点紧密关联,强调通过验收把供货风险隔离在现场使用之前。煤化工项目的特点是设备配套件多、随机资料要求严格,尤其是动设备、成套撬装与仪表阀门等,若验收阶段未核对接口与随箱资料,后续在安装或联动试车时往往因缺件、证书不全或标识不清被迫停等。另一方面,现场施工窗口有限,若到货集中而仓储堆放、吊装通道与防护条件准备不足,则会出现堆存损坏、错发错用与二次搬运,进而造成隐性工期损耗。因此,到货验收节点的完成标志一般不仅包括实物验收结论,还包括资料包齐套与开箱记录、缺陷项处理状态、以及与施工单位签认的移交记录。

3 煤化工 EPC 项目采购进度控制关键节点的管理策略

3.1 以里程碑门槛牵引采购策划与清单锁定

采购进度能否被真正控制,首先取决于项目把需求从概念清单落到可询可订的时间点是否明确。煤化工项目设备材料专业多、接口密集,若采购策划不齐或采购边界反复调整,采购策划只能停留在名录层面,询价、比价与合同谈判会被动拉长,并引发供方重复报价与条件差异。该节点的判定口径应落实到四项齐套,即主要工艺参数与布置条件达到询价精度,技术规格书与适用标准形成受控版本,供货范围与界面分工细化到附配件、伴随资料与备品备件,现场基础与安装约束能够反推到到货分批方案^[4]。以气化炉、空分主冷、压缩机组等为例,应同步明确配套润滑油站、冲洗包、随机工具与备件清单的归属,避免后续漏项补采。同时完成供方预审名单与招标文件关键条款口径统一,减少澄清往返。采购负责人应组织设计、施工、开车及运行代表完成界面确认,形成缺项清单与关闭日期,确保请购包一经签发即进入稳定采购通道,并将该节点纳入总控计划进行周度跟踪。(二)以技术文件一次性通过为目标组织确认与下单

关键设备下单节点的本质是技术边界闭合,管理上应把文件交付当作进度里程碑而非附属工作。采购在发标前先完成关键参数清单化,将装置工况、材质等级、检验与试验要求、备品备件范围等列为不可缺项,并要求供应商在投标阶段提交对照表,便于评审时一次性识别偏离。合同谈判阶段,采购应推动技术协议与商务合同同步定稿,避免出现技术协议未签而合同已生效导致后续反复澄清。对跨专业接口设备,采购需组织设计、施工与厂家开展集中会审,形成统一的接口责任分界和交付清单,并明确谁提供、谁复核、谁签认的闭环。进入合同执行后,采购以文件交付计划作为首要催办对象,将图纸、计算书、材料证明、检验计划等分批交付并与付款节点挂钩,促使厂家把资料准备纳入生产主线。对需要长周期原材料或需专项审批的部件,采购应在下单时同步锁定原材料批次与关键外协资源,并设置技术澄

清时限与一次性答复机制,超过时限的事项通过例外审批处理,避免技术问题在供应链末端无序发散。

3.2 制造里程碑验收与放行纪律

煤化工 EPC 项目中为把采购进度控制落到制造端可核查的节点上,总包应以制造里程碑验收和发运放行为主线,建立可执行的见证与签认纪律。第一,开工前由采购牵头组织设计、质量与监造联合审查检验与试验计划,按设备重要性划分 H 点、W 点、R 点控制方式,明确关键工序通知时限、第三方介入范围、资料提交清单与最终放行签字人,并明确里程碑验收表单、电子签章路径与资料归档编码,将节点要求写入开工交底与周滚动计划,形成可对照的里程碑台账。第二,关键工序实施前监造人员提前到厂核对原材料炉批号与标识移植、工艺卡版本、焊工与无损检测人员资格、量具校准有效期及首件确认记录,同步核查检验工装状态与环境条件,对不具备开工条件的工序签发整改通知并锁定复核日期,必要时调整排产顺序并同步更新交货预测,避免先做后补的隐性等待。第三,对试验失败、返修返工或尺寸偏差,项目要求供方提交原因分析、影响评估与返修工艺,影响评估应覆盖工期、成本与交付接口,明确返修焊口范围、热处理与复验项目,按 ITP 重新设置复验见证点并规定抽检比例,涉及同批材料或同类缺陷时扩大复核批次,同时将处置结论录入不符合项台账并闭环到后续工序放行条件。第四,发运前由采购会同质量开展出厂预验收,逐项核对装配完整性、涂装厚度与防护措施、包装防潮防震与封签完整性、吊点标识与随箱备件,检查合格证、材质证明、试验报告和装箱清单齐套性,对欠交文件形成清单并设定补交期限,与付款节点联动,完成放行记录与发运单证归档,并同步给现场收货、吊装与安装策划。

3.3 以到货即具备安装条件为目标完成验收与接口移交

煤化工装置现场节奏紧,材料设备到货后若不能快速验收与移交,现场堆存和二次倒运会直接吞噬安装窗口。采购应在发运前完成到货验收方案的统一,明确验收依据、抽检比例、缺陷分级、资料核对与封存保管要求,并将易损件、随机文件与专用工具纳入到货清点清单。到货验收时,采购

与施工、仓储和质量人员联合实施外观、数量、标识与随箱资料核查,针对关键设备同步核对接口尺寸、地脚螺栓孔位、接管方位与配套件,避免安装阶段再暴露结构性不匹配。对不合格项,采购不以先收后改替代管理,应按缺陷等级采取隔离、限期整改或退换货,并将整改完成作为移交条件,确保现场领取的是可用设备。接口移交环节,采购将设备资料包、合格证明、检验记录、备件清单与开箱记录一并移交施工单位,施工单位签认后再完成责任转移,同时保留与供应商的索赔与追责证据。对需要现场技术服务的设备,采购提前固化到场服务时间与人员资质要求,并把服务到位作为最终验收的一部分,使安装与后续调试的接口连续^[5]。为减少现场等待,采购在首批到货前核查堆放条件与吊装通道,并与施工单位约定开箱顺序和临时保管责任。对分批到货的系统设备,采购按系统划分移交批次,做到到货、验收、移交同步推进,避免零散件长期积压。

4 结语

煤化工 EPC 项目采购进度控制的难点在于长周期设备、跨专业接口与现场窗口的耦合,而解决路径应回到可验证、可交接的节点管理。本文从清单锁定、技术文件确认下单、生产监造交付、到货验收移交四个节点入手,提出以里程碑门槛、合同化约束、制造过程受控与现场接口闭环为主线的管理策略。后续实践中,采购团队还需在组织分工、资源投入与跨部门协同上持续校准,确保节点成果按期形成并顺畅交付。

参考文献

- [1] 王家柳.煤化工项目EPC总承包管理的实践研究[J].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术, 2020(12):2.
- [2] 强宇.EPC总承包模式下煤化工项目合同管理存在的问题及措施探讨[J].企业改革与管理, 2021(24):2.
- [3] 刘雄杰,王佳佳.EPC总承包企业外协外购产品质量管理方法的探索和实践[J].物流技术, 2020, 39(10):4.
- [4] 高少卿.煤化工采购合规管理与供应链韧性构建研究[J].中国化工贸易, 2025(30):16-18.
- [5] 葛庆瑞.试析大型煤化工项目物资采购管理策略[J].石油石化物资采购, 2023(14):10-12.

Solar energy + air energy hybrid energy - energy-saving optimization of coal-fired boilers

Decai Zhang

Lanzhou Yuanda Zhicheng Technology Co., Ltd., Lanzhou, Gansu, 730030, China

Abstract

In response to the issues of high energy consumption, severe pollution, and high operating costs associated with traditional coal-fired boiler heating in coal mines in Gansu Province, this paper takes Jingmei Energy Dahuishu Branch as the research object and proposes an energy-saving renovation scheme using a “solar + air source heat pump” hybrid energy system to replace the original coal-fired boiler. Through theoretical analysis, system design, equipment selection, implementation process, and operational data verification, this scheme achieves efficient and clean supply of heat for coal mine bathing. After renovation, the system saves approximately 1,682 tons of standard coal annually, reduces CO₂ emissions by approximately 4,313 tons, has an investment recovery period of about 2.55 years, and achieves a comprehensive energy-saving rate of 88.78%. The research results show that the “solar + air source heat pump” hybrid energy system has significant economic, environmental, and social benefits in coal mine bathing heating in arid and semi-arid regions of Northwest China, providing a replicable technical path and management experience for similar projects.

Keywords

solar energy; air energy; composite energy; coal mine bathing; energy-saving renovation; low-carbon transition

太阳能 + 空气能复合能源——燃煤锅炉节能优化

张德财

兰州远大至成科技有限公司, 中国·甘肃 兰州 730030

摘要

针对甘肃地区煤矿传统燃煤锅炉供热存在的能耗高、污染重、运行成本大等问题, 本文以靖煤能源大水头分公司为研究对象, 提出“太阳能+空气能”复合能源系统替代原燃煤锅炉的节能改造方案。通过理论分析、系统设计、设备选型、实施过程及运行数据验证, 该方案实现了煤矿洗浴用热的高效清洁供应。改造后系统年节约标煤约1682吨, 减少CO₂排放约4313吨, 投资回收期约2.55年, 综合节能率达88.78%。研究结果表明, “太阳能+空气能”复合能源系统在西北干旱半干旱地区煤矿洗浴供热中具有显著的经济、环境和社会效益, 为同类项目提供了可复制的技术路径和管理经验。

关键词

太阳能; 空气能; 复合能源; 煤矿洗浴; 节能改造; 低碳转型

1 引言

1.1 研究背景

中国“双碳”目标(2030年前碳达峰、2060年前碳中和)的提出, 对高耗能行业的节能减排提出了更高要求。煤炭行业作为中国能源体系的支柱, 同时也是能源消费和碳排放的重点领域, 其绿色转型迫在眉睫。据《中国能源统计年鉴 2022》数据显示, 煤炭开采和洗选业能源消费占全国工业总能耗的 12.3%, 其中供热系统能耗占比超过 40%。传统燃煤锅炉因热效率低(平均约 60%)、污染物排放量大(SO₂、NO_x、粉尘等), 已成为制约煤矿企业可持续发展的瓶颈。^[1]

【作者简介】张德财(1990-), 男, 本科, 工程师, 从事建筑节能与智能控制技术研发, 新能源技术在工业领域的应用研究与工程实践研究。

甘肃地处西北干旱半干旱区, 具有丰富的太阳能资源(年日照时数 2200-3000 小时, 年太阳总辐射量 4800-6400MJ/m²)和空气能资源(冬季低温环境下空气源热泵仍能稳定运行)。然而, 受限于技术认知和经济成本, 多数煤矿仍沿用燃煤锅炉供热, 导致能源浪费和环境污染问题突出。以靖煤能源大水头分公司为例, 原燃煤锅炉系统年耗煤量达 2640 吨, 年碳排放超 5000 吨, 不仅增加了企业运营成本, 还面临日益严格的环保监管压力。在此背景下, 探索清洁高效的替代能源系统成为煤矿企业的重要课题。“太阳能+空气能”复合能源系统凭借其能源互补性强、运行成本低、环境友好等优势, 逐渐成为研究热点。本文以靖煤能源大水头分公司为案例, 系统研究该系统的设计、实施及运行效果, 旨在为西北煤矿绿色转型提供技术参考和实践依据。^[2]

1.2 国内外研究现状

1.2.1 国外研究进展

欧美发达国家在太阳能与空气能复合供热领域起步较早。德国自2000年起推行“可再生能源供热法”，鼓励太阳能与热泵联合系统应用，截至2022年，全国已建成此类系统超50万套，平均节能率达70%以上。瑞典学者Lund等(2019)通过模拟分析发现，太阳能+空气源热泵系统在北欧寒冷地区的年综合能效比(SCOP)可达3.2-3.8，较单一空气源热泵提升25%-30%。美国能源部(DOE)2021年发布的报告显示，复合能源系统在商业建筑中的应用可使碳排放减少40%-60%，投资回收期缩短至4-6年。^[3]

1.2.2 国内研究进展

中国对太阳能与空气能复合供热的研究始于21世纪初。清华大学江亿院士团队(2015)提出“多能互补分布式能源系统”理论，强调太阳能与空气能的动态耦合机制。近年来，随着“煤改清洁能源”政策的推进，相关研究进入快速发展阶段。王伟等(2020)在《暖通空调》发表的论文指出，北方地区太阳能-空气源热泵联合系统的平均节能率为65%-75%，但存在冬季低温环境下热泵效率下降的问题。李强等(2022)通过对内蒙古某煤矿的案例研究发现，采用低温型空气源热泵(-25℃环境下COP≥2.0)可有效解决寒冷地区供热稳定性问题。尽管国内外研究已取得一定成果，但针对西北干旱半干旱地区煤矿洗浴系统的专项研究仍较少，尤其在系统集成优化、极端天气应对、长期运行维护等方面缺乏系统性总结。本文通过实际工程案例，填补了这一领域的研究空白。

1.3 研究意义与创新点

1.3.1 研究意义

(1)环境效益：替代燃煤锅炉可减少SO₂、NO_x、粉尘等污染物排放，助力甘肃“蓝天保卫战”目标的实现；(2)经济效益：降低煤矿企业能源采购成本和环保税支出，提升盈利能力；(3)社会效益：推动煤炭行业绿色转型，为西北地区能源结构调整提供示范。

1.3.2 创新点

(1)提出“太阳能优先、空气能辅助、智能调控”的复合能源系统架构，实现能源利用效率最大化；(2)针对西北干旱半干旱地区气候特点，优化设备选型(如高集热效率集热器、低温型热泵)，解决冬季低温环境下的运行稳定性问题；(3)通过实际运行数据验证系统性能，为同类项目提供可量化的技术参数和投资回报分析。

2 项目概况与需求分析

2.1 煤矿基本情况

靖煤能源大水头分公司位于甘肃省白银市平川区，地理坐标为东经105°12'，北纬36°45'，海拔1600米。矿井设计产能180万吨/年，服务年限50年，现有职工820人，

其中一线生产人员650人。矿区属温带大陆性气候，冬季寒冷干燥(极端最低温-25℃)，夏季炎热少雨(极端最高温38℃)，年均降水量200-300mm，年日照时数2800小时，太阳能资源丰富。原供热系统采用2台DZL4-1.25-A II型燃煤蒸汽锅炉(额定蒸发量4t/h，工作压力1.25MPa)，配套1台板式换热器(换热量200kW)将蒸汽转化为55℃热水，供应职工浴室。系统于2010年投运，设计寿命15年，目前已接近退役年限。^[4]

2.2 用能需求分析

2.2.1 热负荷计算

根据《建筑给水排水设计规范》(GB 50015-2019)，煤矿洗浴热水需求计算公式为：

$$Q = \eta m \times c \times (t_2 - t_1)$$

其中：

m为日用热水量(300吨/日)；

c为水的比热容(4.186kJ/kg·℃)；

t₂为热水温度(55℃)；

t₁为冷水温度(当地年均冷水温度10℃)；

η为系统热效率(原燃煤锅炉效率58%)。

计算得日用热量：

$$Q = 0.58300000 \text{kg} \times 4.186 \text{kJ/kg} \cdot \text{cdot} \text{°C} \times (55 - 10) \text{°C} \approx 97.8 \text{GJ}$$

折合功率：

$$P = 24 \times 3600 \text{s} \times 97.8 \times 106 \text{kJ} \approx 1132 \text{kW}$$

考虑同时使用系数(0.8)和热损失(10%)，实际设计热负荷为：

$$P_{\text{设计}} = 1132 \text{kW} \times 0.8 \times 1.1 \approx 996 \text{kW}$$

2.2.2 负荷特性分析

通过对原系统运行数据的统计分析(2021年全年)，得出以下结论：(1)时间分布：热水需求集中在早7:00-9:00(占全日用量40%)和晚18:00-20:00(占全日用量35%)，其余时段用量较小；(2)季节变化：冬季(11月-次年3月)因气温低，热水用量增加15%(职工洗澡频率提高)，夏季(6月-8月)用量减少10%；(3)瞬时峰值：早高峰瞬时热负荷达50kW，晚高峰达45kW，平均热负荷30kW。^[5]

2.3 原系统痛点分析

2.3.1 能耗高、效率低

原燃煤锅炉热效率仅58%，远低于国家现行标准(GB 24500-2020要求燃煤锅炉热效率不低于78%)。经实测，锅炉排烟温度高达180℃，大量显热随烟气流失。此外，煤炭运输、储存过程中的损耗占总耗煤量的5%-8%。

2.3.2 污染严重

燃煤锅炉每年排放SO₂约12吨、NO_x约8吨、粉尘约15吨，远超《锅炉大气污染物排放标准》(GB 13271-2014)中重点地区限值要求。2021年，企业因超标排放被环保部门处罚3次，累计罚款25万元。

2.3.3 运行成本高

燃料成本：年耗煤量 2640 吨，按 2021 年均价 850 元/吨计算，年燃料费用 224.4 万元；

人工成本：需配备 3 名专职司炉工，年工资支出 18 万元；

维护成本：锅炉本体、辅机设备及管道年维护费用约 12 万元；

环保成本：环保税按污染物排放量计征，年支出约 15 万元。合计年运行成本约 269.4 万元。

3 “太阳能 + 空气能”复合能源系统设计

3.1 技术路线选择

基于甘肃气候特点和项目需求，确定“太阳能优先、

空气能辅助、智能调控”的技术路线，具体设计原则如下：

- (1) 能源互补性：利用太阳能的间歇性和空气能的连续性，实现全年稳定供热；
- (2) 气候适应性：针对冬季低温环境，选用超低温设备（如 -20℃ 低温型空气源热泵）；
- (3) 经济合理性：通过设备优化配置，平衡初期投资与长期运行成本；
- (4) 智能化管理：采用 PLC 控制系统实现无人值守，降低运维难度。^[6]

3.2 系统组成与工作原理

系统主要由太阳能集热系统、空气源热泵机组、储热水箱、集热水箱、智能控制系统及辅助设备（水泵、阀门、管道等）组成，其工作原理如图 1 所示。

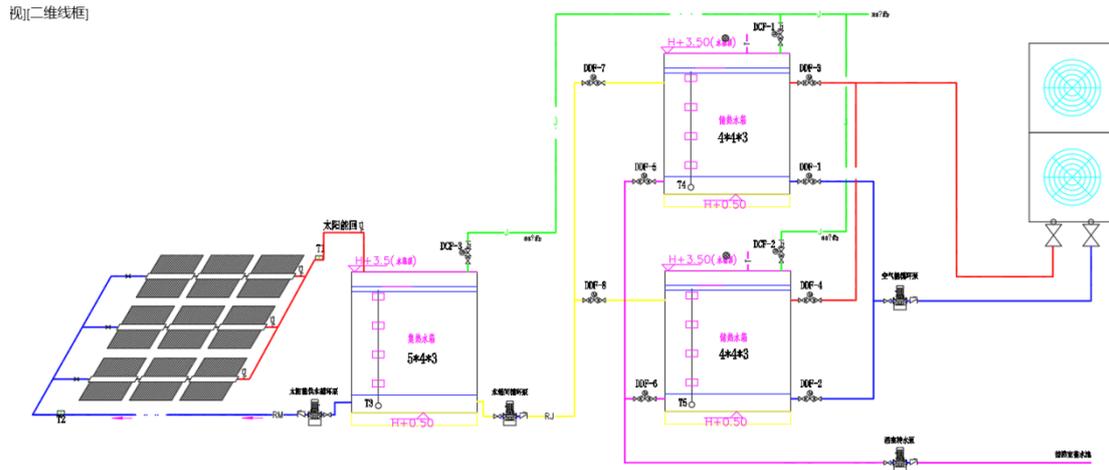


图 1 太阳能 + 空气能洗浴热水系统图

3.2.1 太阳能集热系统

集热器类型选择：对比全玻璃真空管集热器和平板集热器，前者在低温环境下集热效率更高（≥ 55% vs. 45%），且抗冻性能更好，故选用全玻璃真空管集热器；

集热面积计算：根据日均用热水量 300 吨（晴天工况）、集热器效率 55%、太阳辐射度 5kWh/m²·d，计算得集热面积：

$$A = Q_{需} / (I \times \eta) = 300000 \text{kg} \times 4.186 \text{kJ/kg} \cdot \text{d} \cdot \text{d} \times 45^\circ \text{C} / (5 \times 3.6 \text{MJ} / \text{m}^2 \cdot \text{d} \times 0.55) \approx 5700 \text{m}^2$$

安装方式：集热器阵列采用南北向布置，倾角 45°（与当地纬度一致），间距 1.5m，避免前后排遮挡。

3.2.2 空气源热泵机组

机型选择：选用低温型空气源热泵（型号：RASRW 300S-PS-BP），其技术参数为：额定制热量 90kW，-20℃ 环境下 COP ≥ 2.02，输入功率 25.2kW；

数量配置：根据峰值热负荷 90kW，配置 12 台机组（10 用 2 备）并联运行（单台制热量 90kW，总制热量 900kW），满足极端天气下的供热需求。

3.2.3 储热水箱与换热系统

水箱容积计算：按“日用水量的 50%+ 调节水量”设计，即 V=300 吨 × 50% 吨=150 吨，实际选用 3 台 60 吨不锈钢保温水箱（总容积 180 吨）；

保温设计：水箱外壳采用 304 不锈钢，内胆厚度 3mm，中间填充聚氨酯泡沫保温层（厚度 100mm，导热系数 ≤ 0.024W/m·K），热损 ≤ 5%/d。^[7]

3.2.4 智能控制系统

核心组件：西门子 S7-200 SMART PLC 控制器、温度传感器（PT100，精度 ± 0.5℃）、压力传感器（量程 0-1.0MPa）；

控制逻辑：

当水箱水温 < 45℃ 且光照强度 > 500W/m² 时，启动太阳能集热器；

当水箱水温 < 40℃ 或光照强度 < 300W/m² 时，启动空气源热泵；

当环境温度 < 5℃ 时，热泵机组开启电辅热功能（功率 10kW），防止蒸发器结霜。

3.3 关键技术参数

设备名称	型号 / 规格	主要技术参数
全玻璃真空管集热器	Φ58×1800mm	集热面积 2m ² /组, 集热效率 ≥ 55%, 工作温度 -30℃~200℃
低温型空气源热泵	RASRW300S-PS-BP	额定制热量 50kW, -25℃环境下 COP ≥ 2.0, 输入功率 22kW, 噪音 ≤ 55dB
不锈钢保温水箱	60m ³ /台	材质 304 不锈钢, 保温层厚度 100mm, 热损 ≤ 5%/d
PLC 控制器	S7-200 SMART	数字量输入 16 点, 输出 12 点, 模拟量输入 4 路, 通信接口 RS485

4 项目实施与运行效果

4.1 改造实施过程

项目于 2022 年 3 月启动, 分为四个阶段实施:

4.1.1 前期准备阶段 (2022 年 3 月 -4 月)

现场勘查: 测量矿区安装位置、周边遮挡物高度及距离;

方案设计: 委托兰州远大至成科技有限公司完成系统设计图纸 (包括设备布局图、管道走向图、电气原理图);

审批备案: 取得靖煤集团立项批复、环保部门环评备案 (备案号: 甘环备 [2022] 012 号)。

4.1.2 设备采购与加工阶段 (2022 年 5 月 -6 月)

设备招标: 通过公开招标采购太阳能集热器 (天普新能源科技有限公司)、空气源热泵 (广东芬尼克兹节能设备有限公司)、水箱 (山东华昇容器有限公司);

加工定制: 根据现场尺寸定制集热器支架 (镀锌钢材, 厚度 5mm)、管道保温层 (橡塑海绵, 厚度 50mm)。

4.1.3 安装施工阶段 (2022 年 7 月 -8 月)

土建施工: 地面夯实找平, 开挖管道沟槽 (深度 1.2m, 宽度 0.8m);

设备安装: 依次安装集热器阵列 (500m²)、热泵机组 (12 台)、水箱 (3 台)、水泵及控制系统;

管道连接: 采用无缝钢管 (DN50-DN100) 连接各设备, 焊接后进行水压试验 (试验压力 1.5 倍工作压力)。

4.1.4 调试与验收阶段 (2022 年 9 月)

单机调试: 分别测试集热器集热效率 (晴天工况下达 58%)、热泵制热量 (-20℃环境下 COP=2.1)、水箱保温性能 (24 小时温降 ≤ 3℃);

系统联调: 模拟早高峰、晚高峰及夜间工况, 验证能源切换逻辑 (切换响应时间 ≤ 30s);

竣工验收: 通过靖煤集团组织的专家验收, 各项指标均达到设计要求。

4.2 运行效果分析

4.2.1 节能效益

改造后系统年运行时间为 360 天 (与煤矿生产周期同步), 通过分项计量统计, 各能源介质消耗量如下:

能源类型	年消耗量	折标煤系数	折标煤量 (吨)
电力	188 万 kWh	0.1229kgce/kWh	231
煤炭	0	0.7143kgce/kg	0

原燃煤锅炉年耗标煤量 1890 吨, 改造后年耗标煤量 231 吨, 节能率达 88.78%, 年节约标煤 1659 吨。

4.2.2 经济效益

初始投资: 太阳能集热系统 160 万元, 热泵机组 185 万元, 水箱、水泵及控制系统 25 万元, 安装工程费 35 万元, 合计 415 万元;

年运行成本: 电费 (0.515 元/kWh × 188 万 kWh = 96.82 万元) + 维护费 (10 万元) = 106.82 万元;

年收益: 原系统运行成本 269.4 万元 - 现系统运行成本 106.82 万元 = 162.58 万元;

投资回收期: 静态回收期 = 415 万元 ÷ 162.58 万元/年 ≈ 2.55 年

4.2.3 环境效益

碳减排: 年减少 CO₂ 排放 = (原标煤耗量 - 现标煤耗量) × 碳排放系数 = (1890 - 231) 吨 × 2.6tCO₂/tce = 4313 吨;

污染物减排: 年减少 SO₂ 排放 = 1890 吨 × 0.0165 = 31.2 吨 (原排放系数 0.0165tSO₂/tce), NO_x 排放 = 1890 吨 × 0.0074 = 14.0 吨 (原排放系数 0.0074tNO_x/tce), 粉尘排放 = 1890 吨 × 0.0096 = 18.1 吨 (原排放系数 0.0096tce)。

4.3 长期运行稳定性分析

项目投运以来 (2022 年 10 月 -2025 年 9 月), 系统运行稳定, 未出现重大故障。关键性能指标如下:

太阳能保证率: 晴好天气下, 太阳能贡献率达 70%-80%; 阴雨天贡献率降至 10%-20%, 热泵自动补热;

热泵 COP 值: 冬季 (-10℃ ~ -20℃) 平均 COP=2.1, 夏季 (15℃ ~ 25℃) 平均 COP=3.5;

水箱水温波动: 24 小时内水温波动范围控制在 ±2℃ 以内, 满足洗浴用水要求。

5 讨论与建议

5.1 技术优势总结

(1) 能源互补性强: 太阳能与空气能的季节、昼夜特性形成天然互补, 解决了单一能源系统稳定性差的问题;

(2) 适应西北气候: 低温型热泵与高集热效率集热器组合, 克服了冬季低温对系统效率的影响;

(3) 智能化程度高: PLC 控制系统实现无人值守, 降低运维成本 (原系统需 3 名司炉工, 现仅需 1 名兼职管理员);

5.2 存在问题与改进方向

5.2.1 极端天气应对能力不足

2023 年 1 月, 白银市遭遇连续 7 天暴雪天气, 光照强度 < 200W/m², 热泵机组满负荷运行满足供热需求。建议:

增加电辅热容量 (如配置 200kW 电加热管);

与矿区备用柴油发电机联动, 作为应急热源。

5.2.2 集热器效率受沙尘影响

当地春季风沙较大，集热管表面积灰导致集热效率下降约 8%。建议：

每月定期清洗集热管（采用高压水枪冲洗）；

5.2.3 政策支持力度有待加强

目前甘肃省对新能源项目的补贴主要集中在光伏发电领域，对太阳能热利用和空气能项目的支持力度不足。

建议：

出台专项补贴政策（如按节能量给予 0.1 元 /kWh 奖励）；

将复合能源系统纳入“绿色矿山”建设评价指标体系。

5.3 推广前景展望

“太阳能 + 空气能”复合能源系统在靖煤大水头分公司的成功应用，为西北煤矿绿色转型提供了可复制的模板。据测算，若甘肃省内 50% 的煤矿（约 200 家）采用该系统，年可节约标煤约 36 万吨，减少 CO₂ 排放约 93 万吨，经济和环境效益显著。未来研究方向包括：

多能互补系统优化（如“光伏 + 光热 + 空气能 + 储能”）；

人工智能算法在能源调度中的应用；

系统全生命周期成本分析与风险评估。

6 结论

本文以靖煤能源大水头分公司为案例，系统研究了“太阳能 + 空气能”复合能源系统在煤矿洗浴供热中的应用。

通过理论分析、系统设计、设备选型、实施及运行数据验证，得出以下结论：

该系统年节能率达 88.78%，年节约标煤 1659 吨，减少 CO₂ 排放 4313 吨，投资回收期约 2.55 年，具有显著的经济和环境效益；

针对西北干旱半干旱地区气候特点，采用“太阳能优先、空气能辅助、智能调控”的技术路线，可实现全年稳定供热；

系统运行过程中需重点关注极端天气应对和设备维护，通过增加电辅热、定期清洗集热器等措施提升可靠性。

本研究成果为西北煤矿绿色转型提供了技术参考和实践依据，对推动煤炭行业“双碳”目标实现具有重要意义。

参考文献

- [1] 国家能源局. 煤炭工业“十四五”节能减排综合工作方案[Z]. 2021.
- [2] 王伟, 李强. 太阳能-空气源热泵联合供热系统在北方地区的应用[J]. 暖通空调, 2020, 50(6): 89-94.
- [3] 甘肃省发展和改革委员会. 甘肃省“十四五”能源发展规划[R]. 2021.
- [4] GB/T 2589-2020, 综合能耗计算通则[S].
- [5] Lund H, et al. A review of solar and air-source heat pump systems for district heating[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019, 101: 1-12.
- [6] 江亿. 中国建筑节能发展路径研究[J]. 中国工程科学, 2015, 17(1): 1-8. [7] 李强, 等. 低温空气源热泵在煤矿供热中的应用研究[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(3): 210-215.
- [7] 美国能源部. 2021年分布式能源系统研究报告[R]. 2021.

Analysis of waterproofing construction technology in underground station during subway construction

Yang Li

Sinohydro Bureau 7 CO., LTD. Chengdu, Sichuan, 610213, China

Abstract

Underground stations are frequently exposed to high groundwater levels and saturated strata, subjecting them to continuous pressure throughout construction and operation. Field experience indicates that water infiltration primarily occurs at construction joints, expansion joints, wall-penetrating pipes, bolt holes, and corners. Without prompt remediation, these areas may develop leakage pathways, complicating subsequent repairs. To address this, we analyze common leakage patterns in both open-cut and closed-cut station construction methods and propose targeted control measures to enhance waterproofing quality.

Keywords

underground station; waterproofing construction; technical points; maintenance contro

地铁施工中地下车站防水施工技术分析

李扬

中国水利水电第七工程局有限公司, 中国·四川成都 610213

摘要

由于地下车站经常处于地下水位高、地层含水量大的环境,因此在整个施工和运营过程中都要承受着地下水的压力。从施工现场的经验来看,渗漏水的主要部位集中在施工缝、变形缝、穿墙管、螺栓孔洞及阴阳角等位置,如果没有及时处理,极易出现渗水通道,并且后期维修难度大。为此,我们结合了车站的明挖及暗挖常见渗漏情况,探讨相关的控制措施,旨在提高防水施工质量。

关键词

地下车站; 防水施工; 技术要点; 养护控制

1 引言

随着城市化进程的不断推进,地铁作为解决城市交通拥堵、提高城市交通效率的重要手段,其建设规模和速度都在不断增加。地下车站作为地铁系统中的关键节点,其防水施工质量直接关系到整个地铁系统的安全与稳定。因此,深入研究和优化地下车站的防水施工技术,对于提高地铁工程的整体质量具有重要意义。

2 地下车站关键部位常见渗漏问题

2.1 水平施工缝与后浇带界面渗漏

地下车站底板一侧墙、侧墙一顶板交接处一般会设置水平施工缝或者后浇带,此类部位构成渗漏水的“高发区”。当首仓混凝土浇筑完成后,若有大量泌水聚集、浮浆层厚度过大,而二次浇筑前又未及时剔除浮浆层、凿毛不到位,那么就会造成后浇处的两仓接合面糙度差、结合不牢,使得后

浇混凝土接口处产生微小裂缝。再者,因次级界面应力集中的影响,该裂缝随之延伸长大,从原先的细小裂缝逐步发展成为线性渗漏源。最后,后浇带两边的钢筋布置密集,常出现振捣棒插不进去或插不到位情形,或者止水带在支模、绑扎、浇筑冲击中发生位移,翼缘未裹严实等,都可能带来绕水漏水问题。

2.2 变形缝与沉降缝多层构造失效

为了解决温度应力及地基不均匀沉降所带来的不利影响,地下车站主体结构常采用分段形式设置变形缝或沉降缝。然而车站主体部分结构层次较为复杂、空间有限,容易形成长期渗漏点。中埋式钢边橡胶止水带要求处于缝中心并保证钢边翼缘展开到位,若现场对定置钢筋或者夹具固定不足,加上浇筑混凝土过程中受侧压力影响,极易造成止水带扭曲、褶皱、局部上浮,甚至钢边被混凝土中的钢筋头割断,大大缩小有效止水宽度,进而留下后期漏水隐患。其次,止水带接头采取硫化或热熔连接方式时,如果温度、压力控制不符合工艺要求会出现接头边缘裂口,引起渗水;另外止水带钢边锚固孔位偏差较大也会产生局部夹持不牢,形成薄弱点。

【作者简介】李扬, (1989-), 男, 中国四川成都人, 本科, 工程师, 从事轨道交通工程施工及管理研究。

2.3 围护结构接缝与复合墙叠合界面渗漏

地下车站明挖施工常用连续墙或者咬合桩为支护结构,也有围护作为主体受力构件的,所以墙体幅间接缝、止浆墙局部缺陷以及围护墙与内衬之间的结合面都可能成为渗漏通道。在连续墙成槽过程中,如果泥浆比重、黏度控制不好,槽壁局部塌边掉土,容易造成接缝处有残留沉渣或软泥;后续因接头凿除或刷壁不净,还会出现“夹泥缝”。一旦这些缝隙对准迎水面就会产生条状渗水。而对于“围护+内衬”这种复合墙结构来说,倘若围护墙表面有破损、露筋没有处理好、孔洞没有封堵,那么在浇筑内衬混凝土之后,围护墙和内衬之间势必会出现空隙,引导地下水到达中板和顶板边缘,产生渗漏,而且这种隐性渗漏不容易查找定位^[2]。

2.4 穿墙套管、孔洞与锚孔点源渗漏

车站主体结构内的穿墙管线套管、预留孔洞、止水螺杆孔、二次锚固孔均具有“点源渗漏”特征,其共性是孔口处结构变化大、界面多,一旦有水灌入即呈现集中受压状态,且渗漏径路短、发展快。其次,如果穿墙套管并未设置止水环或止水环与套管焊接不严、不连续,地下水将沿套管外壁与混凝土间的缝隙窜流。再者,套管与管道之间仅用普通水泥砂浆填塞,在干湿交替作用下套管周围也会存在破裂脱落风险,加之昼夜温差的影响,管道支撑处逐渐呈现环向渗漏。在机电安装阶段,如果新增加电缆孔、风水管穿越口,而未按防水做法要求施工时,现场凿孔会损坏局部保护层,使得孔口周围出现细微裂缝并带有铁锈的黄褐色水迹渗水。

3 地铁施工中地下车站防水施工技术要点

3.1 抗裂抗渗混凝土体系与温控养护控制

车站主体结构自防水策略是利用抗裂抗渗混凝土和温控养护把“裂缝源头”压住,使其在施工波动情况下依然保证抗渗指标。(1)配合比与材料应落实到拌合站参数上:试配时抗渗等级可较设计提高一级,固定水胶比、胶凝材料用量及外加剂掺量,杜绝施工现场随意加水;其次,采用矿粉+粉煤灰复掺降低水化热并填充孔隙;迎水面或后浇带附近可少量掺硅灰细化毛细孔,限制坍落度防止流动性过大,同时进场检查氯离子、碱含量,减少钢筋锈蚀导致的隐性裂缝。(2)浇筑振捣工序决定“渗流通道”能否被切断:底板、侧墙按分仓分层对称推进,避免冷缝;泵送落点跟随浇筑,随浇随移,并及时二次抹面,以防出现集中泌水引起弱化;钢筋密集部位则用短间距快插慢拔振捣,其中角部、穿墙管及预埋件部位搭配小振幅棒补振,止水带及止水钢板周边不得长时间强行振捣;模板拼缝处要先贴止浆条,一旦出现蜂窝麻面、气泡和漏浆现象于初凝前进行补浆和压平,拆模后对孔洞用聚合物砂浆封堵,使其结构表皮完整致密,以达到防水效果。(3)温控监测和保湿养护的价值在于减少温度裂缝及干缩裂缝产生:大体积底板铺设测温点,按GB50496要求控制里表温差不大于25℃,表面与环境温差

不大于20℃,同时限制降温速率。建议夏季在夜间进行浇筑,骨料要进行遮阳降温、拌和用水降温;冬期则利用覆膜及保温被蓄热;拆模时分段拆卸以减小温差,顶板覆膜加湿或者薄层蓄水、侧墙喷淋保湿不少于14d,浇筑结束后2h内完成覆盖,雨期设置排水沟防止表面冲刷起砂,最后形成测温养护台账留查^[2]。

3.2 施工缝与后浇带复合止水及预埋修复通道

施工缝及后浇带是车站结构最容易出现“先湿后漏”的部位,现场控制应做到“界面干净、装稳止水、留好修复通道”,具体而言:一是界面处理满足验收要求。首仓混凝土终凝后,采用机械凿毛或者水冲毛化方式剔除表层浮浆,直至露出坚实骨料并达到凿毛深度要求,确保在二次浇筑前用钢丝刷+高压水彻底清除泥浆、脱模剂、锈蚀物等杂物,必要时用吸水布拭去水分。注意控制好基面饱和和表干状态(不要让表面过干吸水或过湿水造成冷缝)。二是复合止水要防止“偏、翘、断”。中埋式钢边橡胶止水带应卡于中心位置,利用定位筋及夹具进行定位,在浇筑前检查翼缘是否已经打开并且是否已与钢边夹紧组合完整,在钢筋末端需采用保护套件加以防护,以免钢筋剪切受伤;遇水膨胀止水条应放在预留槽中用专用胶贴牢且钉压条固定,不得有突出点和断开点,在振捣时切勿直接冲击避免其移位;接头应根据施工图纸规定用专用设备制作成品,并经过生产厂家质检部门确认热熔/硫化后质量标准,搭接长度、加热时间和外观饱满度形成记录,便于后期追溯,最大限度满足现场要求。三是预埋注浆管以后期“少拆少凿”为技术要点。应做到底板一侧墙水平缝沿线排布注浆管,并且在拐角处设置固定卡留出外接口,端部封堵后做通水及压力保压试验,分段编号以便定位。处理线状渗水时,优先采取预埋注浆管系统进行压注超细水泥浆或水泥-水玻璃浆,须严格按照“低压起注-稳压扩散-一见回浆封闭”的工艺控制方法进行封孔养护。第四,后浇带封闭浇筑、分层对称方式推进,在止水带两侧加强振捣,拆模后马上对表面缺陷进行当班修补。面向需要补强的部位,采用刮抹法在缝两侧约200mm宽处刷结晶型材料,再抹聚合物水泥防水砂浆,把边缘压实。浇筑结束后24h立即检查背水面湿带,更新问题清单,为夜间注浆施工交底^[3]。

3.3 变形缝“主止水+密封+导排”组合工艺

变形缝受温差收缩、列车动荷载及周围土体沉降共同作用,其宽度会不断扩大,如果仅用一种止水带封闭,则容易产生止水带定位偏离、褶皱以及黏结不良等问题,最终导致条带状渗漏。实践表明,“主止水+密封+导排”的组合方式值得推广,通过逐层落实承压止水、变形适应、渗水控制,保证可操作性和可检修性。具体操作步骤为:第一,主止水为埋设型钢边橡胶止水带,背水侧设置背贴式橡胶止水带作为第二道防线,施工前先做一段试拼装样板校核中线与孔位的匹配程度,在绑扎时利用定位钢筋、限位夹具和防

偏移卡具来固定止水带,使钢边锚固孔对准模板孔位,不允许随意开孔破坏受力筋。浇筑振捣时要注意避开翼缘,按照“短插快拔、分区循环”办法浇筑,时刻关注止水带的上浮、跑偏及尖锐骨料刮破,止水带外侧可安排固定块进行保护。第二,转角部位与接头位置都属于易漏水区域,优先选择工厂预制转角、预制接头件,现场焊接应严格控制温度和压力工况,之后再 将焊缝冷却进行复验与拉拔检验,防止有虚焊或拉扯产生渗水漏洞。第三,填塞料选用闭孔回弹封闭性回弹材料分层塞紧至弹性恢复 60% (厚度按弹性恢复量定),并在其表面嵌入耐水密封胶。先除净基底表面的浮浆、油污、杂物、松散颗粒再打胶,待干燥后刷涂界面处理剂;合理控制胶缝的宽深比,溢出胶液连续收口,并保证胶体与背贴止水带无断线粘连。第四,背水侧预留凹槽,安装不锈钢接水盒,接水口顺坡接入排水支管,盒内设可拆滤网防堵塞,并用密封胶封堵周边留检修口;富水地段或者沉降敏感区预埋可到达止水带翼缘的注浆嘴和导管,以期在渗漏时分段进行低压注浆补强,注意注浆前先用接水盒的回水量判断渗漏位置,并进行分区封堵。

3.4 大面设防与点源封堵相结合

地下车站主体结构的防水施工首先要杜绝后期找漏返工,坚持“大面铺得住、点源封得死”的基本做法。第一,大面设防宜选择预铺反粘材料,底板垫层须先找平、扫净,起砂处补浆,尖石子、钢筋头剔除;再把阴阳角做成圆弧,施工前做一指宽的附加层,并提前预留侧墙翻边、顶板收头的宽度,沿放样线将大面积整体铺开,用配套胶条或热风焊搭接边,焊接完成后立即用压辊压紧、做针孔检查,如发现起鼓现象立即放气、补贴。第二,大面质量不是只注重表面的检查就能达到,还应在班前给作业班组进行技术交底,制定“搭接宽度、焊缝连续、破损补片、收头压条”控制清单,例如,材料到场要抽测厚度和外观,再进行现场试焊确

认风温、风速、行走速度;钢筋绑扎、支模前做好隐蔽验收并加装一层保护层,浇筑时让布料口避开卷材边,防止被振捣棒扎破,划破立马补片,拆模后翻边、穿墙口等重点部位要勘验复查。第三,将穿墙套管、预留孔洞及螺杆孔作为防水重点,凡设有穿墙套管均需加止水环且满焊,并对四周进行分层压实振捣以防止根部蜂窝。其次,管道与套管之间的空隙先用遇水膨胀止水胶塞实再行压实,再在外侧设置 20 ~ 30mm 的凹槽便于封边,同时孔洞补强与结构面保持齐平,不得留有薄边。第四,点源封堵早期应尽快修补到位,并建立缺陷台账(注明部位、工法、材料批次与拍照留存),方便日后复检及追溯,同时预留好后浇带两侧及施工缝结合部位的加强带,防止后浇筑的防水层被挤偏^[4]。

4 结语

综上所述,地下车站防水的核心是将施工过程高频出现的薄弱点变成过程控制链路,通过把细部节点做好,坚持“结构自防水为基础、复合止水为重点、导排与修复为保障”的防渗漏思路,形成材料检验、样段引路、隐蔽验收和台账追溯的闭环管理。这一整套体系能够确保问题及早发现并解决,真正做到提高车站主体结构防水可靠性和耐久性的目的。

参考文献

- [1] 青山雄. 地铁车站结构防水施工处理技术应用[J]. 中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术, 2024(002):000.
- [2] 廖家全, 王军鹏. 地铁车站富水砂层地下连续墙渗漏水原因分析及预防治理[C]//2024年全国工程建设行业施工技术交流会论文集(上册). 2024.
- [3] 王江华. 超深地铁车站地下连续墙受力性能及防水施工关键技术研究[J]. 建筑机械, 2025(5).
- [4] 李引雄. 基于双导洞PBA法的城市轨道交通地下暗挖车站施工技术[J]. 建筑技术, 2025(7).

Research on Architecture Design and Performance Optimization of Internet of Things Software Technology

Runze Xu

Zhengzhou Haotian Digital Intelligence Technology Co., Ltd., Zhengzhou, Henan, 450000, China

Abstract

This paper reviews the development status and research background of IoT software, analyzes existing IoT software architectures in terms of their types, characteristics, and limitations, and establishes the core requirements and fundamental principles of system architecture. Based on hierarchical architecture principles, a comprehensive IoT system architecture is proposed, with detailed analysis of the primary functions and design concepts of the perception layer, transport layer, platform layer, and application layer. Key technologies at each layer are discussed in depth. Furthermore, efficient, cost-effective, and high-performance network topologies for heterogeneous networks are investigated across the perception, transport, and platform layers.

Keywords

Internet of Things (IoT); Software architecture; Architecture design; Performance optimization; IoT software technology

物联网软件技术的架构设计与性能优化研究

许润泽

郑州皓天泽数智科技有限公司, 中国·河南 郑州 450000

摘要

对物联网软件发展状况和研究背景进行梳理,对已有的物联网软件体系结构种类、特征和缺陷进行了剖析,确定体系结构的核心要求和基础原理。根据层次化的体系结构,提出了一个完整的IoT系统体系结构,并对其中的感知层、传输层、平台层和应用层的主要功能和设计思想进行了分析,重点讨论了各个层的关键技术。从感知层、传输层和平台层三个层次,研究面向异构网络的高效、低成本、高效率的网络拓扑结构。

关键词

物联网; 软件架构; 架构设计; 性能优化; 物联网软件技术

1 引言

设计层次分明、耦合度低、可扩充性好、适应性强的IoT系统结构,对每一层的关键组件进行了详细的阐述。本项目以此为基础,研究面向应用的物联网体系结构的性能瓶颈问题,设计有目标的性能优化方法,进行多策略的协调运行,以提高其运行效率、稳定性和可扩展性。为设计、开发和优化物联网应用程序系统奠定了基础。

2 物联网软件技术的架构设计研究

2.1 现有物联网软件架构分析与对比

三层体系结构是物联网最基本也是最经典的体系结构,关键在于将整个物联网的软件体系分为感知层、传输层和应用层,每个层都有自身的职责分工,协同工作。感知层是整个体系结构的最下层,作用是对整个物联网终端进行数据

的收集和控制,其中包括传感器、RFID阅读器和智能终端等,这些装置可以通过各种传感器来获得外界的温度,湿度,压力,位置等信息,把相关信息传送到传送层。传输层是信息传输的关键承载单元,将感知层收集到的信息传输到应用层,并向传感层发送来自应用层的控制命令。在这个体系结构的最上层,则是处理、分析和展示传输层所传送的数据,与特定的应用环境相联系,发展出与之相对应的各种应用,给使用者带来诸如设备监测、数据统计、智能决策等各种不同的业务^[1]。

2.2 物联网软件架构的总体设计

感知层作为物联网软件架构的底层,是数据采集与设备管控的核心层次,其核心定位是“感知物理世界、采集核心数据、管控终端设备”。感知层的总体设计思路是基于多样化的感知设备,实现对物理世界各类参数的数据采集,支持多种类型终端设备的接入,实现对终端设备的统一管控与状态监测。确保数据采集的准确性、实时性与完整性,为整个物联网软件系统提供可靠的数据支撑。感知层涵盖了各类

【作者简介】许润泽(1989-),男,中国河南三门峡人,本科,从事物联网平台研究。

感知设备、终端控制器、数据采集模块等，能够接入传感器、RFID设备、智能仪表、工业终端、智能家居设备等多种类型的终端设备，支持模拟信号、数字信号等多种类型数据的采集，通过内置的通信模块，将采集到的数据传输至传输层，同时接收传输层转发的应用层控制指令，实现对终端设备的启停、参数调整等管控操作。为了提升感知层的适配性与扩展性，感知层采用标准化的设备接入协议，支持新类型终端设备的快速接入，无需对架构进行大规模修改。

2.3 架构核心模块设计与实现思路

该系统的主要任务是对各个终端采集到的各种信息进行采集，保证采集的准确性、实时性和完整性。模块化的思想数据获取模块采取了模块化的结构，实现对各种传感设备的各种数据的获取，包含了温度、湿度、压力等数据以及开关等数据。该功能包括数据采集接口、数据预处理和数据缓冲两个部分，其中数据采集接口用于与各种传感器件进行接口，并从传感器件中接受数据的传输；数据预处理部分主要是对数据进行净化、滤波和校正，剔除异常数据和多余数据，校正误差数据，保证数据精度。在传送信道处于闲置状态的情况下，将缓冲后的信息传送到传输层。实施思想以STM32为中心，配以ADC采集模块，GPIO接口模块等为主要功能，能够采集模拟量、数字量和量的数据。在对采集到的资料进行预处理时，利用平均滤波和门限判定两种方法对采集到的数据进行消噪，利用门限判定法对采集到的数据进行检测和排除，保证了采集结果的精度。在缓存中使Flash内存，以达到暂存的目的，并提供了断电保护，防止了数据的遗失；该模块具有可设置的收集频率，使用者能够根据自己的需要，对其进行灵活地调节，还能够将数据的实时性和能量的控制相结合^[2]。

3 物联网软件架构的性能优化策略研究

3.1 物联网软件架构性能瓶颈分析

而以无线传感器网络为中心的感知层，由于其所处的物理环境较为复杂，导致其在传感器网络中的传输效率和能量调控能力已成为其研究的重要瓶颈。有些终端装置的采集频率设定得不够合理，或者是太频繁，造成了数据的重复，增大了数据传送和处理负担，还耗费了许多电力，降低了装置工作年限。或者由于采样的次数太少，使得获取的信息不够及时，不能适应实际的需要。在感知层，多数终端使用的是一种简单的收集模式，缺少对收集策略进行动态调节，在实际工作中由于外界条件的改变而不能适应外界条件的改变，从而降低了收集的效率和能耗。传感器的访问数目太大时，会发生装置碰撞，造成数据收集失败或者丢包，从而使收集的效率变得更低^[3]。

3.2 感知层性能优化策略

采用最优的收集策略，提高了收集的效率，降低重复的数量。数据收集效率低和数据冗余是影响传感器网络数据

收集效率的关键因素，通过对数据收集机制的研究，可以提高数据收集效率，减小冗余数据，减轻数据的传递和处理负担。针对实际工作中所面临的实际问题，提出了基于实时监测和实时监测的方法。本项目通过在移动终端上构建“温度、湿度、气压等参数”传感单元，实现对外界条件（如温度、湿度、气压等）的实时监控，在外界条件发生剧烈改变的情况下，增加采样频次，保证数据收集的实时和精度。在微小的外界条件下，采用减小采样次数的方法，减小了数据的冗余性和能量消耗。该方法以外界条件的改变大小为输入，以频率为输出值，构建了一种模糊控制律，对收集的次数进行了动态调节^[4]。

3.3 传输层性能优化策略

最佳的资料传送路径，减少资料传送时延，提高传送效能。不合适的数据传送是造成传送时延较大的一个重要因素，对传送路线进行优化可以有效地减少传送时延，提高传送效率。提出了一种新的基于网络拓扑结构的新的路径选择方法，对网络中的网络状况（带宽、时延、质量等）进行实时监控，并随网络状况的改变，对传输路由进行动态的调整，并从中选出最佳的传输通路。提出一种基于无状态按需路由的AODV路由优化方法，依据网络连接质量和时延实时选取最佳路由。对网络拓扑进行迅速自适应，在某个节点发生失效后，可迅速找到备用路由，保证了数据的连续和高效。该方法在原有AODV路由协议中加入链路质量评价部件，通过对链路丢包率、传输时延等指标的综合评价，对链路的性能进行评价，优选出具有较高性能的路由用于传输，从而减少传输时延，提高传输效率^[5]。

为验证所提优化方法的有效性，搭建仿真实验环境进行测试，实验选取传统AODV路由协议作为对照组，在相同网络拓扑（节点数量50个、链路带宽100Mbps）、相同数据传输量（1000MB）及不同网络负载（轻载、中载、重载）场景下，对比两种方法的传输时延、丢包率及传输效率三项核心指标。实验结果表明，所提优化方法在轻载场景下，传输时延较传统AODV协议降低28.3%，丢包率控制在0.5%以内，传输效率提升31.7%；在中载场景下，传输时延降低35.1%，丢包率降至0.8%，传输效率提升37.2%；在重载场景下，尽管网络环境复杂，该方法仍能将传输时延降低42.6%，丢包率控制在1.2%以下，传输效率提升45.8%，且在节点失效模拟测试中，备用路由切换时间 $\leq 50\text{ms}$ ，有效保障了数据传输的连续性和稳定性，充分证明了该优化方法在减少传输时延、提升传输效能方面的显著优势^[6]。

3.4 平台层性能优化策略

对资料进行最佳化，提高资料的处理效能，降低资料的堆积。在平台层面，数据的处理效率低下是制约其发展的一个重要因素，通过对其进行合理的分析，可以提高系统的运行速度，降低系统的运行成本，为系统的运行和运行提供实时数据支撑。通过对采集过程进行分析，提出“前置—平

行“分散储存”的整体过程，减少了数据的加工过程，提高了系统的工作效率。数据处理部分，将数据清洗和过滤等预处理工作与核心数据分析和挖掘分离开来，采取了一种管道化的方法，当预处理工作结束之后，立刻将数据传送到并行处理器，防止数据的积累。对数据处理和数据储存组件进行了优化，将经过加工的数据线路保存到缓存中，然后将其进行批量地写到数据储存模组中，从而降低了写资料的数量，提高了处理的效率^[7]。

3.5 优化策略的协同实现

研究传感器和传输器之间的协作关系，构建传感和传输的协调机制。数据收集的频率和数量直接关系到数据在传输层的利用率和传输效率，数据的发送质量也会对网络的数据收集和传送的选择产生重要的影响。构建了传感器和传输层的联合调控方法，以达到二者的动态协作。传感层和传输层对网络状况和传输信息进行共享，而传输层则利用协议变换模块和数据传输模块，向感测层的装置访问模块和数据获取模块提供网络带宽、传输时延、链路质量等的网络状况。例如感测层通过向传输层提供数据采集的频率、数量和设备状态等相关的数据，作为传输层路由和带宽分配的依据。在网络带宽不足或网络拥塞时，感测层的数据收集模块会在接收端主动地减小数据收集次数，对数据进行压缩和滤波等预处理，以减轻传输层的负荷。在网络状态良好且带宽充足的情况下，传感器网络中的信息获取模块将会在一定程度上提升采样的速率，保证数据的实时精度^[8]。基于传感器网络中节点的分布状态和节点的优先权，在网络中实时地进行路由和最优路由优化，保证网络中的高效率 and 可靠数据传输。如在感知层的工业监测装置收集到突发事件（比如器件失效）时，首先对其进行标识，然后在传送层接收到消息后，对其进行最优路由配置，以保证应急数据能够被迅速传送到平台层面，并能在短时间内引发错误预警和处置^[9]。

4 结论

本项目的研究将为我国物联网的软件体系结构和性能提升提供一种切实可行的方法和技术途径，进一步完善我国的物联网技术研究体系，促进我国物联网的标准化和高效率发展，促进我国物联网行业的高品质发展。然而该研究还面临以下不足：（1）所提的最优方案多建立在理论和仿真基

础上，缺少具体的实施和应用检验，且算法的实用性和有效性亟待提高。（2）缺乏面向物联网体系结构的安全优化方法，尤其是在大规模的物联网环境下，其安全问题更加凸显，有必要对其进行深入的安全优化研究。（3）所提出的体系结构和优化方法，在超复杂异质网络环境下的适应性还不够强，很难充分适应某些高端复杂的应用。

为解决以上问题，本项目在已有的物联网系统基础上，结合工业互联网、智慧医疗等典型物联网系统，结合已有的实验结果，对所提出的理论和方法进行改进。深入研究基于区块链和人工智能等新兴科技的物联网体系结构和安全保护机制，解决被窃取、篡改和非法访问等安全问题，提高车联网的安全性能。研究适合于复杂异质信息系统的体系结构和算法，引入人工智能和大数据等新技术，进行体系结构的适应性调节和智能决策，提高体系结构对极其复杂的应用场景适应性。重点研究边缘计算、云计算、5G等新兴科技与物联网的软件体系结构，并在此基础上进行创新，提高体系结构的运行效率、可扩展性和可靠性，促进物联网的不断发展。

参考文献

- [1] 庄序序,江志晃,李圳然,等. 基于STM32和物联网的智能输液监控系统设计[J].工业控制计算机,2026,39(01):140-142.
- [2] 罗书洋,刘雅琪,申毅,等. 基于物联网的智能家居安防检测系统设计[J].仪表技术,2026,(01):29-31+65.
- [3] 刘喜文,杨新健,郜楚婷. 基于物联网的压力管道检验检测系统设计及应用[J].石油化工设备,2026,55(01):48-53.
- [4] 刘壮,刘淑荣,秦少祥,等. 基于物联网的智能灌溉控制系统设计[J].物联网技术,2026,16(02):95-98.
- [5] 陈亚莉. 基于物联网技术的数字媒体实训室管理系统设计[J].物联网技术,2026,16(02):156-158.
- [6] 王旭,钟杰,龚敏,et al.基于物联网技术的三层架构医用耗材管理信息系统设计及应用评估[J].中国医学装备, 2025, 22(8):111-117.
- [7] 郑日美.计算机软件技术支持下的物联网数据系统设计与测试[J].软件, 2025(3).
- [8] 严明磊.物联网技术在电气自动化远程监控系统中的设计与实现[J].Electronic Communication & Computer Science, 2025, 7(9).
- [9] 严明磊.物联网技术在电气自动化远程监控系统中的设计与实现[J].Electronic Communication & Computer Science, 2025, 7(9).

Practice and Innovation of Standardization of Operation and Management of Water Conservancy Project

Haoran Zhang

Ili Kazakh Autonomous Prefecture, Xinjiang Production and Construction Corps, 7th Division, Irrigation Management Office of Kuaitun River Basin Water Conservancy Project, Kuaitun, Xinjiang, 833200, China

Abstract

As a vital component of national infrastructure, water conservancy projects are crucial for flood control, water resource allocation, and ecological conservation. With socio-economic development and technological progress, standardizing the operation and management of these projects has become a key approach to enhancing efficiency, ensuring safety, and achieving sustainable development. This paper systematically examines innovations and practices in water conservancy project management standardization through six dimensions: establishing standardized management systems, ensuring operational safety, applying information technology, innovating maintenance models, developing standardized evaluation mechanisms, and promoting high-quality development in water conservancy.

Keywords

standardized management; operational safety; information technology; innovation mechanism

水利工程运行管理标准化的实践与创新

张浩然

新疆生产建设兵团第七师伊犁哈萨克自治州奎屯河流域水利工程灌溉管理处，中国·新疆 奎屯 833200

摘要

水利工程是国家基础设施的重要组成部分，关系到防洪安全、水资源配置、生态保护等多方面利益。随着社会经济的发展和科技进步，水利工程运行管理标准化已成为提升工程效益、保障工程安全、实现可持续发展的重要途径。基于标准化管理体系构建、工程运行安全监管、信息化技术应用、管护模式创新实践、标准化评价机制及水利高质量发展六个维度，本文对水利工程运行管理标准化的创新与实践进行系统性探讨。

关键词

标准化管理；运行安全；信息技术；创新机制

1 引言

在标准化管理体系构建方面，水利工程运行管理需建立健全覆盖全生命周期的标准规范体系，确保各环节有章可循、有据可依。工程运行安全监管应强化风险预警与应急处置能力，通过智能化监测手段提升安全防控水平。信息化技术应用应推动大数据、物联网等技术与水利工程深度融合，构建数字化、网络化的智慧管理平台。管护模式创新实践需探索政府引导、市场运作、社会参与的新型管护机制，形成多元化协同治理格局。

2 标准化管理体系构建

标准化管理体系是水利工程运行管理的基础和保障。构建科学完善的标准化管理体系，需要从制度建设、组织架构、标准制定等多个维度进行系统规划。

首先，制度建设是标准化管理体系的核心。水利工程运行管理标准化制度应包括管理规程、操作规范、技术标准等不同层次的内容。管理规程主要规定管理机构的设置、职责分工、工作流程等宏观管理要求；操作规范则针对具体工程设施的操作、维护、检修等工作制定详细步骤；技术标准则是为工程设计、施工、验收提供技术依据。这些制度文件应当相互衔接、协调一致，形成一个完整的制度体系。

其次，组织架构是标准化管理体系的支撑。水利工程运行管理组织应当根据工程规模、重要程度和管理需求，建立分级负责、权责明确的管理架构。大型水利工程通常设立管理局（处）作为管理主体，下设各专业管理部门和基层管理单位，形成层级分明的管理网络。同时，应当明确各层级、各部门的职责权限，建立协调联动机制，确保管理工作的有序开展。

第三，标准制定是标准化管理体系的关键。水利工程运行管理标准应当遵循科学性、系统性、可操作性原则，结

【作者简介】张浩然（1973-），男，中国新疆奎屯人，本科，副高级工程师，从事水利水电工程运行管理研究。

合工程特点和实际需求进行制定。标准制定过程中，应当充分借鉴国内外先进经验，广泛征求各方意见，确保标准的科学性和适用性。同时，标准应当定期评估和修订，及时反映技术进步和管理创新成果，保持标准的时效性和先进性^[1]。

3 工程运行安全监管

工程运行安全是水利工程管理的首要任务，标准化监管是确保工程安全运行的重要保障。工程运行安全监管标准化主要包括风险防控、日常监测、应急处置等方面内容。

风险防控是安全监管的基础。水利工程运行过程中面临的风险包括洪水、地震、地质灾害等自然风险，以及设计缺陷、施工质量、设备老化等人为风险。标准化风险防控体系应当建立风险识别、评估、分级和管控的完整流程。通过定期开展风险排查，建立风险台账，制定针对性防控措施，实现风险的全过程管控。特别是对于重大风险源，应当制定专项防控方案，明确责任人和管控措施，确保风险可控。

日常监测是安全监管的关键。水利工程运行安全监测包括大坝安全监测、渗流监测、变形监测、应力应变监测等多个方面。标准化监测体系应当明确监测项目、监测频率、数据采集和分析方法等要求。通过建立自动化监测系统，实现对工程运行状态的实时监控和数据采集。同时，应当建立监测数据分析和预警机制，及时发现异常情况，采取应对措施，防止安全事故发生。

应急处置是安全监管的保障。水利工程运行过程中可能发生溃坝、决口、设备故障等突发事件，标准化应急管理体系应当包括应急预案、应急队伍、应急物资、应急演练等内容。应急预案应当针对不同类型的突发事件，制定详细的处置流程和措施，明确责任分工和协调机制。应急队伍应当定期培训和演练，提高应急处置能力。应急物资应当储备充足，定期检查更新，确保应急需要。通过定期开展应急演练，检验应急预案的可行性和有效性，提高应急处置能力。

4 信息化技术应用

信息化是水利工程运行管理标准化的重要支撑，通过信息化技术的应用，可以提高管理效率、降低管理成本、提升管理水平。

首先，水利工程运行管理信息化平台建设是实现标准化的基础。信息化平台应当整合工程管理、运行监测、安全预警、应急指挥等功能，实现信息资源的共享和业务流程的协同。通过建立统一的数据标准和接口规范，实现各类信息的互联互通和高效利用。同时，平台应当具备良好的可扩展性和兼容性，能够适应技术发展和业务需求的变化。

其次，物联网技术在水利工程运行管理中的应用是实现标准化的关键。通过在大坝、闸门、泵站等关键部位安装传感器、监测设备等，实现对工程运行状态的实时监测和数据采集。物联网技术可以实现对水位、流量、应力、变形等参数的自动采集和传输，提高监测数据的准确性和及时性。

同时，物联网技术还可以实现对闸门、泵站等设备的远程控制和操作，提高运行管理的效率和精度。

第三，大数据分析技术在水利工程运行管理中的应用是实现标准化的创新。通过对工程运行监测数据、气象水文数据、管理数据等的多维度分析，可以挖掘数据背后的规律和价值，为工程运行管理提供科学依据。大数据分析技术可以实现对工程运行状态的评估和预测，为工程维护和管理提供决策支持。同时，大数据分析还可以发现管理中的问题和不足，为管理改进提供方向。

5 管护模式创新实践

水利工程运行管理标准化不仅需要完善的标准体系和先进的技术支撑，还需要创新管护模式，提高管理效能。

首先，专业化管护模式是标准化管理的重要方向。传统的水利工程管护往往依靠工程管理部门自身力量，存在人员不足、专业能力有限等问题。专业化管护模式通过引入专业管护队伍，利用其专业技术和经验，提高管护质量和效率。专业化管护队伍可以根据工程特点和管护需求，制定科学的管护方案，实施精细化管护。同时，专业化管护还可以实现规模效应，降低管护成本。专业化管护通过集中资源、统一规划和标准化作业，能够有效降低单位面积的管护成本。这种规模效应使得管护单位能够优化人力资源配置，减少重复建设和资源浪费，同时通过批量采购设备和材料获得价格优势，从而实现整体运营成本的显著下降^[2]。

其次，市场化管护模式是标准化管理的创新实践。市场化管护模式通过引入竞争机制，将工程管护推向市场，通过招标、委托等方式选择管护单位。市场化管护可以打破地域和行业限制，吸引优质资源参与工程管护，提高管护质量和效率。同时，市场化管护还可以建立科学的绩效考核机制，将管护效果与管护费用挂钩，激励管护单位提高服务质量。市场化管护通过建立科学的绩效考核机制，能够有效将管护效果与管护费用直接挂钩，形成激励相容的制度安排。这种机制不仅能够客观评估管护单位的工作成效，还能通过经济杠杆激励管护单位主动提升服务质量和管理水平，从而实现资源的最优配置和管护效能的最大化。

第三，社会化管护模式是标准化管理的有益补充。社会化管护模式通过引导社会力量参与工程管护，形成政府主导、社会参与、多元共治的管护格局。社会化管护可以充分发挥社会组织、志愿者、当地群众等的作用，形成管护合力。特别是对于小型水利工程，可以探索“以奖代补”、“先建后补”等激励机制，调动社会力量参与管护的积极性。特别是对于小型水利工程，可以探索“以奖代补”、“先建后补”等激励机制，调动社会力量参与管护的积极性。这些机制通过将传统的政府直接投入方式转变为绩效导向的奖励模式，能够有效激发市场主体和农民群众的参与热情。同时，建立科学合理的考核评估体系，确保工程质量和管护效果，实现

水利工程可持续发展与社会力量参与的良性互动。

6 标准化评价机制

标准化评价是检验水利工程运行管理标准化成效的重要手段,通过建立科学的评价机制,可以促进标准化工作的持续改进和提升。

首先,评价指标体系是标准化评价的基础。评价指标体系应当全面反映水利工程运行管理的各个方面,包括管理体系、运行安全、信息化水平、管护效果等。指标设置应当遵循科学性、系统性、可操作性原则,既有定量指标,也有定性指标;既有过程指标,也有结果指标。同时,指标应当根据工程特点和管理需求进行差异化设置,体现评价的针对性和公正性。

其次,评价方法是标准化评价的关键。评价方法应当包括自我评价、专家评价、第三方评价等多种形式,形成全方位、多角度的评价体系。自我评价由工程管理部门定期开展,对照标准要求进行自查自纠;专家评价邀请行业专家进行,利用其专业知识和经验进行深入评估;第三方评价由独立的专业机构进行,保证评价的客观性和公正性。多种评价方法的结合,可以提高评价的科学性和可靠性。

第三,评价结果是标准化评价的落脚点。评价结果应当作为改进工作的重要依据,针对评价中发现的问题和不足,制定整改措施,明确责任人和完成时限。同时,评价结果还应当与绩效考核、奖惩激励等挂钩,形成有效的激励约束机制。同时,评价结果还应当与绩效考核、奖惩激励等挂钩,形成有效的激励约束机制。具体而言,评价结果应作为绩效考核的重要依据,直接影响员工的薪酬调整、职位晋升及荣誉表彰等激励措施,同时对于表现不佳者则需采取相应的约束与改进措施。这种将评价结果与奖惩激励紧密结合的做法,能够充分调动组织成员的积极性和创造性,促进个人与组织共同发展。通过评价-反馈-改进的闭环管理,促进标准化工作的持续改进和提升。

7 水利高质量发展

水利工程运行管理标准化是实现水利高质量发展的重要途径,通过标准化建设,可以提高工程效益、保障工程安全、促进可持续发展。

首先,标准化可以提高工程效益。通过建立科学的运行管理标准,优化调度方案,提高水资源利用效率,实现工程效益的最大化。标准化建设可以减少运行过程中的浪费和损耗,降低运行成本,提高经济效益。同时,标准化建设还可以优化工程功能,提高工程的服务能力和水平,满足经济社会发展对水利的需求。标准化建设通过规范工程运行流程

和技术标准,能够显著优化工程功能,提高工程的服务能力和水平,从而更好地满足经济社会发展对水利的需求。这种管理方式不仅确保了工程设施的高效运行,还能延长使用寿命,降低维护成本,实现资源的优化配置。在当前水利事业高质量发展的背景下,标准化建设已成为提升水利服务效能、保障水安全的重要支撑,为经济社会发展提供了坚实的水利保障^[1]。

其次,标准化可以保障工程安全。通过建立完善的安全监管标准,加强风险防控和日常监测,及时发现和处置安全隐患,确保工程安全运行。标准化建设可以提高应急处置能力,减少突发事件造成的损失,保障人民生命财产安全。同时,标准化建设还可以延长工程使用寿命,降低工程风险,为工程可持续运行提供保障。

第三,标准化可以促进水利可持续发展。通过建立绿色运行管理标准,推动水利工程运行与生态环境保护的协调发展。标准化建设可以减少工程运行对生态环境的影响,促进水资源节约和生态环境保护。同时,标准化建设还可以促进水利工程与区域发展的协调,实现工程效益、经济效益和社会效益的统一,推动水利事业可持续发展。

结束语

水利工程运行管理标准化是一项系统工程,需要从管理体系、安全监管、信息化应用、管护模式、评价机制等多个方面进行系统规划和创新实践。水利工程运行管理标准化是一项系统工程,需要从管理体系、安全监管、信息化应用、管护模式、评价机制等多个方面进行系统规划和创新实践。这项工作要求构建科学规范的管理体系,强化全过程安全监管,推动信息技术深度融合,创新管护模式,并建立科学合理的评价机制。只有通过多维度协同推进,才能实现水利工程运行管理的标准化、规范化和精细化,提高工程运行效率和安全保障能力,为水利事业可持续发展提供坚实支撑。通过标准化建设,可以提高工程效益、保障工程安全、促进水利高质量发展。未来,随着科技进步和管理创新,水利工程运行管理标准化将不断深化和发展,为水利事业可持续发展提供有力支撑。我们应当积极探索和实践,不断完善标准化体系,创新管理方式,提高管理水平,为推动水利事业高质量发展作出新的更大贡献。

参考文献

- [1] 张文洁.工程运行管理全面提质增效有力支撑国家水安全和水利高质量发展[J].中国水利,2025,(24): 20-23+27.
- [2] 卢飞.水利工程中泵站安全运行管理研究[J].水上安全,2025,(21): 23-25.
- [3] 王富建.水利工程运行管理中远程监控技术的应用[J].大众标准化,2025,(14):151-153.

Application and Development of External Instrument in Petrochemical Industry

Ruiting Bai Huijuan Lv

Inner Mongolia Tongwei Silicon Energy Co., Ltd., Baotou, Inner Mongolia, 014010, China

Abstract

With the petrochemical industry's heightened demands for production safety and environmental protection, external-mounted instruments have emerged as a critical solution for tank level and temperature monitoring, thanks to their non-contact measurement, installation without drilling, and leak-proof advantages. Through technical applications and case studies, this paper elucidates their working principles, technical features, and practical outcomes, with a focus on innovative implementations in crude oil storage tanks, high-temperature vaporizers, and Safety Instrumented Systems (SIS). It highlights their value in enhancing safety and reducing maintenance costs, while anticipating trends toward intelligent and high-precision technologies. Research demonstrates that external-mounted instruments, utilizing sonar ranging and frequency-modulated ultrasonic technologies, overcome the measurement challenges of traditional instruments in crystalline or highly corrosive media, as well as the difficulties of post-installation modifications requiring drilling. These advancements provide crucial support for industrial technological upgrades.

Keywords

petrochemical industry; external-mounted instruments; non-contact measurement; hole-free; technological innovation

外贴式仪表在石油化工行业的应用与发展

白瑞亭 吕慧娟

内蒙古通威硅能源有限公司, 中国·内蒙古 包头 014010

摘要

随着石油化工行业对安全生产、环保节能要求的提高,外贴式仪表凭借非接触测量、免开孔安装、无泄漏风险等优势,成为储罐液位、温度监测的关键技术。基于技术应用与案例研究,梳理其工作原理、技术特点及应用效果,重点分析在原油储罐、高温汽化器、SIS系统等场景的创新应用,总结提升安全性、降低维护成本的价值,展望智能化、高精度化趋势。研究显示,外贴式仪表通过声呐测距、变频超声波等技术,解决传统仪表在易结晶、强腐蚀性介质中的测量难点及后期改造开孔难题,为行业技改升级提供关键支撑。

关键词

石油化工; 外贴式仪表; 非接触测量; 免开孔; 技术创新

1 引言

石油化工行业作为国家能源战略核心领域,生产过程涉及原油、液化气等大量高危介质存储与传输。据中国石油和化学工业联合会数据,2024年我国石化行业总产值达16.28万亿元,涉危化品储存企业超3万家。传统仪表需开孔安装,存在泄漏风险、维护困难等问题,尤其在高腐蚀、高温高压工况下,接触式仪表寿命短、故障率高,直接威胁生产安全。

应急管理部报告显示,仪表失效导致的重大事故占比较高,液位测量装置故障是主因之一。外贴式仪表通过外部非接触测量,实现“不动火、不清罐、不开孔”安装,杜绝

泄漏隐患,已广泛应用于球罐、卧罐等多种罐型,并拓展至安全联锁、智能诊断等场景。本文结合技术发展、案例应用及行业数据,系统阐述外贴式仪表的技术演进、应用实效与发展方向,为行业技术选型与创新提供参考。

2 外贴式仪表的技术原理与分类

外贴式仪表的核心在于利用声波、超声波等物理信号在罐壁中的传播特性,通过外部传感器检测介质状态。从技术发展历程来看,外贴式测量技术经历了三个主要阶段,声导波技术,超声波共振技术,以及现在的智能声呐技术。这种演进使得测量精度从最初的 $\pm 5\%$ 提升到目前的 $\pm 0.5\%$,适用范围也从常温常压扩展到高温高压工况。

2.1 外贴式液位计

以声呐式外测液位计为代表,采用微振动分析技术和声呐测距原理。通过校准探头实时补偿液体声速变化,精度

【作者简介】白瑞亭(1988-),男,中国内蒙古包头人,本科,工程师,从事化工仪表自动化研究。

达 $\pm 1\text{mm}$ ，基于时差法测量原理，利用容器不同高度的两个传感器测量声波传播时间差计算声速，将温度变化引起的测量误差控制在 0.1% 以内。采用数字信号处理 (DSP) 技术，通过小波变换和神经网络算法，有效过滤罐壁腐蚀、沉积物等干扰信号，在液面波动 30% 时仍保持测量稳定。

技术参数方面，测量范围 $0\text{--}35\text{m}$ ，工作温度 $-60^\circ\text{C}\sim+220^\circ\text{C}$ ，压力适用范围真空至 6.4MPa 。针对低温液化气体（如 LNG）测量，采用特殊设计低温探头，解决传统仪表在 -160°C 极低温环境下无法工作的问题^[1]。

2.2 外贴式液位开关

基于超声波壁内传播衰减原理，通过检测罐壁中超声能量变化判断液位状态。以西安定华 ELL-SA 系列为例，其创新点包括：

变频超声波技术：动态调节发射频率（ $50\text{kHz}\text{--}200\text{kHz}$ 自动寻优），消除温度漂移和气泡干扰，介质密度变化 $\pm 20\%$ 时测量稳定性仍保持 $\pm 2\text{mm}$ 以内。

多探头冗余设计：四探头阵列（如 SA-XE 型）采用 2×2 矩阵排列，通过空间分集和频率分集技术提升容错能力，单个探头失效仍可正常工作，可靠性达 SIL3 等级。

安装采用强磁吸附或专用胶粘剂固定，力矩控制在 $30\text{--}50\text{N}\cdot\text{m}$ ，适配碳钢、不锈钢、玻璃钢等材质罐体的专用安装套件，兼顾牢固性与罐壁保护。

2.3 外贴式温度变送器

采用热传导补偿算法，通过建立罐壁温度与介质温度之间的数学模型，结合环境温度、风速等参数，实现介质温度的精确推算，间接反映介质温度。采用二线制 $4\text{--}20\text{mA}$ 输出，适用 $-40^\circ\text{C}\sim 150^\circ\text{C}$ 范围，精度 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 。其优势在于避免内衬腐蚀、结垢影响，尤其适合强腐蚀介质。对于壁厚在 $10\text{--}50\text{mm}$ 范围内的容器，测量误差可控制在 $\pm 1^\circ\text{C}$ 以内。

此外，外贴式超声波流量计目前在工业应用中也有广泛应用，技术原理类似，通过检测流体流动对声波信号的调制实现流量测量，在管道监测中逐步推广。这种流量计采用时差法或多普勒效应原理，特别适合腐蚀性介质和高压管道的流量监测^[2]。

3 外贴式仪表在石油化工行业的应用案例

外贴式仪表在石油化工领域的应用主要集中在储罐液位监测、安全连锁保护、极端工况适配三大场景。根据中国特种设备检测研究院的统计，截至 2025 年，全国在用的外贴式仪表数量已超过 15 万台，覆盖了全国 85% 以上化工企业。

3.1 储罐液位监测与安全管理

原油、液化气等储罐需连续监测液位以防冒顶或抽空。根据 API 2350 标准要求，各类石油储罐必须配备独立的液位监测装置。外贴式仪表凭借免开孔特性，成为技改首选：

球罐应用：某石化企业丙烯球罐采用 ELL-FI-CE 液位

计，替代传统雷达液位计解决介电常数波动导致的“失波”问题，安装于罐壁底部，通过校准探头补偿温度变化，精度长期保持 $\pm 1\text{mm}$ 。项目实施后年维护费用降低 65% ，避免非计划停车 2 次，直接经济效益达 320 万元。

浮顶罐优化：SA-XE 液位开关采用多通道校准技术，纵向布置传感器消除浮盘密封件干扰，实测信号差异达 400mV ，信噪比 $\geq 21\text{dB}$ 。舟山国家石油储备基地应用显示，误报率从 5.3% 降至 0.2% 以下，显著提升安全性。

我国战略石油储备基地已全面采用外贴式仪表监测系统，舟山基地安装 1280 台，实现 256 个储罐实时监控，仪表平均无故障时间达 15 万小时，远超传统仪表的 8 万小时^[3]。

3.2 安全仪表系统 (SIS) 中的关键作用

在 SIL 认证连锁系统中，外贴式液位开关作为冗余检测单元，显著提升可靠性，满足 IEC 61511 标准 SIL2 以上等级要求。

原油罐区 SIS 系统：某项目采用 1 台 SIL3 级外贴液位开关与雷达、电子远传液位计构成“三取二”逻辑，连锁关闭进料阀，故障诊断功能使系统响应时间 $< 500\text{ms}$ ，满足紧急停车要求。

高温汽化器连锁：多晶硅三氯氢硅汽化器（ 117°C ）应用中，外贴式液位开关通过高频超声波穿透沸腾介质，测量准确率 100% ，连续运行超 1 年无故障。

在剧毒介质（光气、氰化氢）储罐中，非接触特性消除泄漏风险，使重大危险源风险等级降低 1-2 级；在强腐蚀介质（氢氟酸）测量中，使用寿命达传统仪表 5 倍，维护成本降 80% 。

4 外贴式仪表的优势与经济效益分析

根据中国石油和化学工业联合会的调研数据，外贴式仪表在石油化工行业的应用已产生显著的经济和社会效益。以下从多个维度进行详细分析：

4.1 安全优势

非接触式安装杜绝开孔带来的泄漏点，特别适合有毒、易燃介质。统计数据显示，采用外贴式仪表后，储罐区泄漏事故发生率降低了 95% 以上。在液化天然气 (LNG) 储罐等极端低温场合，外贴式仪表完全避免了传统安装方式可能导致的保冷层破坏问题。从安全生命周期成本角度分析，外贴式仪表的应用使安全仪表的验证测试时间缩短了 70% 。传统的液位计需要定期进行校验，而外贴式仪表可以通过自诊断功能实现在线验证，大大降低了安全维护的人工成本和风险^[4]。

4.2 经济效益

安装成本降低 70% ：免清罐、不动火，大幅缩短工期。某液化气球罐改造中，外贴式安装仅需 4 小时，较传统法兰式的 3 天停机时间，单个储罐可避免直接经济损失 $150\text{--}200$ 万元。

维护成本节约：诊断功能减少人工巡检，年维护费用

从 800 元/台降至 200 元/台。某千万吨级炼化项目年维护成本降低超 300 万元。

停机损失避免：山东某氯碱厂应用后年避免非计划停车 2 次，单次节约 80 万元，10 台储罐改造后投资回收期不到 6 个月。

全生命周期成本分析显示，外贴式仪表寿命 15-20 年（传统仪表的 2-3 倍），综合安装、维护及停产损失，10 年总拥有成本比传统仪表低 50% 以上。

4.3 技术效益

精度提升：自校准技术使液位测量误差 $\leq 0.1\%$ 。现代外贴式仪表采用温度、压力多参数补偿算法，在 $-50^{\circ}\text{C} \sim +200^{\circ}\text{C}$ 的工作温度范围内，精度指标保持稳定。

适应性广：已测试介质包括液氨、硫酸、原油等上百种，粘度范围覆盖至 $30\text{mPa}\cdot\text{s}$ 。特别是在高粘度介质（如渣油、沥青）测量方面，外贴式仪表通过低频超声波技术，解决了传统仪表无法准确测量的难题。

从智能化程度来看，新一代外贴式仪表普遍支持工业互联网（IIoT）接口，可以通过 4G/5G 网络实现远程监控和预测性维护。某智能工厂应用案例显示，通过大数据分析，外贴式仪表的故障预警准确率达到 95%，实现了从预防性维护到预测性维护的转变。

5 挑战与发展趋势

尽管外贴式仪表在石化行业应用成效显著，但仍面临技术挑战与发展瓶颈。

5.1 当前挑战

根据行业专家访谈和市场调研数据，当前主要存在以下问题：一是信号干扰，罐壁锈蚀或厚度不均会吸收超声能量，导致测量误差增大至 3-5%，老旧储罐改造时尤为突出。二是极端工况极限，温度超过 220°C 需升级探头材料，高频振动下信号稳定性有待提升。三是标准化不足，安装规范与国家标准体系尚不完善，不同产品存在兼容性问题。从市场应用看，该仪表在新项目中占比较低，多用于改造，主要受初始投资较高和技术人才缺乏制约。

5.2 技术创新方向

技术创新主要体现在四个方向：一是智能化与 AI 深度融合，仪表集成 AI 算法以自动过滤干扰信号并实现自诊断，提升了测量精度与稳定性。二是多功能参数集成，设备从单一液位测量演进为同时监测温度、密度等多参数，简化了系统架构。三是无线物联与云平台协同，通过集成 5G/NB-IoT 技术实现数据实时上云，支持远程监控与预测性维护，降低了运维成本。四是非侵入式安装成为标配，无需开孔且不接触介质，彻底杜绝泄漏风险，安装维护更安全便捷。

5.3 行业趋势

从全球看，该技术正向标准化、智能化、集成化演进。欧美已将其列为化工厂安全改造推荐技术，IEC 正在推进国际标准制定。中国企业的竞争力也在提升，例如定华电子的

i-Tank 系统，实现了罐区远程监控并与外测仪表等设备无缝集成，其专利技术已纳入行业标准，应用于石化、军工等领域。未来，该技术可向数字孪生深化，通过三维建模与实时数据驱动实现预防性维护。

6 结论与建议

6.1 结论

外贴式仪表通过非接触测量技术，成功解决了石油化工行业高危介质的监测难题，在安全、经济、环保方面展现出显著价值。其核心优势在于：

本质安全：免开孔设计彻底消除泄漏风险，特别是在剧毒、易燃易爆介质监测方面具有不可替代的优势。

技改便利：不停产安装，大幅降低改造成本。安装时间短，投资回收期短。

技术成熟：声呐、超声波技术经千余案例验证，可靠性高。目前已达到 SIL3 安全等级，测量精度稳定在 $\pm 0.5\%$ 以内，使用寿命超过 15 年。

从行业发展来看，外贴式仪表正在从单一的过程参数的测量向多参数监测、智能化诊断方向发展。与物联网、大数据等新技术的深度融合，将进一步拓展其应用空间和价值空间。

6.2 建议

基于研究结果，提出以下建议：

企业应用层面：优先在 SIS 系统、高温腐蚀工况中推广应用，特别是在涉及重大危险源的场合，建立完善的外贴式仪表维护规程和培训体系，充分利用其预测性维护功能，降低全生命周期成本。

行业发展层面：加快国家标准体系建设，规范产品性能和要求，加强产学研合作，突破高温高压等极端工况技术瓶颈，推动传统仪表制造企业转型升级，提升产业竞争力。

政策支持层面：将外贴式仪表纳入安全技术改造推荐目录，设立专项扶持资金，鼓励中小企业应用新技术，加强国际交流合作，参与国际标准制定。

未来，随着材料科学、智能算法的进步，外贴式仪表将向更高精度、更广适应性方向发展。特别是在碳达峰、碳中和目标背景下，外贴式仪表在能源计量、碳排放监测等新领域将发挥更大作用，为石油化工行业智能化转型提供核心支撑。

参考文献

- [1] 中国石油和化学工业联合会. 2022年中国石油化工行业发展报告[R]. 北京, 2023.
- [2] API 2350, Overfill Protection for Storage Tanks in Petroleum Facilities[S].
- [3] 西安定华电子股份有限公司. ELL系列外贴式仪表技术手册[Z]. 2023.
- [4] 李桂香. 外贴式仪表在石化装置SIS系统中的应用研究[J]. 自动化仪表, 2023,44(2):1-6.

Exploration of the Construction Technology of Consolidation Grouting for Dam Foundation of Reservoir

Siyang Li

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

Abstract

Consolidation grouting, a critical concealed procedure prior to concrete placement, enhances the integrity and uniformity of rock formations adjacent to dam foundations. However, the on-site process—combining simultaneous drilling, slurry preparation, and grouting—becomes particularly complex under unstable geological conditions. This process is intricately intertwined with excavation, reinforcement binding, cooling water pipe installation, and formwork support, where any procedural oversight may significantly compromise grouting efficacy. To address these challenges, this study proposes targeted measures to optimize consolidation grouting operations, offering actionable and reusable organizational recommendations for reservoir dam foundation consolidation grouting construction.

Keywords

reservoir dam; dam foundation treatment; consolidation grouting; construction technology

水库大坝坝基固结灌浆施工技术的探索

李思阳

中国水利水电第七工程局有限公司, 中国·四川成都 610213

摘要

固结灌浆是混凝土浇筑前的一个重要隐蔽工程,用于提高靠近坝基岩石整体性和均匀性,但施工现场是边钻孔、边制浆、边灌浆的过程,在地质条件不稳定情况下,与开挖、钢筋绑扎、冷却水管安装以及模板支护等多项工序形成相互交织,稍有一项措施没有做好,将大大制约灌浆效果。基于此,本文围绕固结灌浆过程中存在的问题,提出可指导灌浆施工开展的针对性措施,以期水库大坝坝基固结灌浆施工提供可操作、可复用的组织建议。

关键词

水库大坝; 坝基处理; 固结灌浆; 施工技术

1 引言

在水利水电工程建设的具体过程当中,固结灌浆技术有着极其广泛的应用范围,主要应用在中国水电工程的破碎岩体综合处理方面,此种技术对于全面提升岩体整体强度,对于保障岩体完整性和渗透性有着重要的功能和作用。在此基础之上,本文主要对水利水电工程建设过程当中,大坝坝基固结灌浆施工技术进行了全方位的分析 and 探讨,旨在进一步提升该技术的应用水平,维护水利水电工程的正常运转。

2 坝基固结灌浆技术概述

灌浆施工中,用水泥浆液将各种径流孔隙、裂缝及碎带填充密实,有助于增加坝基整体强度、控制坝基固结变形以及减少渗水通道,这一过程称为坝基固结灌浆。其处理

深度一般是覆盖开挖后的松动带,且向下延伸一定厚度的基岩范围,现场多见孔深约5~15m左右,灌浆常按照孔深分段进行,每段长度约2~5m左右,使用卡塞分段灌、孔内循环灌注法,为了确保灌浆质量,可利用简易压水试验来检查孔段吸浆量,并在此前提下,通过调节灌浆压力、浆液浓度以及变浆规律等措施来调整参数,防止选用参数值与实际脱钩。值得注意的是,虽然固结灌浆和帷幕灌浆有相似作用,但两者侧重不同,如:帷幕灌浆是形成一道连续的防渗墙;而固结灌浆则是为了增强坝基邻近区的整体性、密实性与稳定性,其在承压能力以及抗渗能力方面获得显著效果^[1]。正因如此,孔网布置多为梅花形、矩形布孔,按照由稀到密、分序加密原则来确定孔距和排距。

3 水库大坝坝基固结灌浆施工难点与风险点

3.1 孔网布置精度与造孔质量控制风险

坝基固结灌浆孔网布置受到坝段分缝、廊道边界、止水构造、仓面分层以及已浇筑层压实厚度等条件限制,在现场仅能提供有限的作业面积,从而难以实现孔位“可布置空

【作者简介】李思阳(1991-),男,中国四川眉山人,本科,工程师,从事水利水电施工及经营管理研究。

间”等于孔位“可施工空间”。在此情况下，固结灌浆效果无法得到保障，风险集中在孔位、孔斜、孔口封闭三个方面，举个例子，放样孔位不准或者孔斜控制不到位，可能会造成孔间搭接不充分，进而产生盲区；而孔距过密的话又会造成孔间距太小，存在重复加固的现象；如果孔口封堵不好，施工过程中就会发生漏浆、串浆，甚至灌浆不合格情况，需要反复停灌或返工补孔，增加处理成本与返工风险。

3.2 岩体非均质与裂隙连通造成吸浆异常

坝址基岩在现场不是一块整体，而是完整块体与破碎带相间分布，有一些位置还夹有断层泥、软弱夹层，节理裂隙也多，局部还可能存有卸荷裂隙或小空洞，故不同坝段内各孔段的可灌性差别较大。就拿坝肩开灌来说，如果前期未找到高透区的方向及连通通道，那么开灌后浆液容易顺着主裂隙溢流而出，造成开仓前吸浆量骤增，压力难立，使回浆在坡脚或邻孔外冒；当碰到泥化夹层、细碎带，浆液被阻隔不易流出还可能出现“拒灌”现象，造成压力短时间内急剧上升，处理不当会使该处发生新的裂缝。

3.3 灌浆压力控制与坝基抬动、开裂风险

固结灌浆一般在坝基混凝土具有一定的压实厚度且强度达到设计值后进行，但基于一些敏感区域，像断层槽、薄覆岩段以及靠近止水区的位置，它们对压力变化反应明显，如果压力过大，会使浆液在裂隙尖端产生劈裂效应，从而造成坝基混凝土产生轻微抬动、微裂缝发展，甚至导致施工缝被顶开；如果压力过小，不仅无法将灌浆浆液压入深部，更无法克服滤失阻力及渗流水头的压力，最终造成只在表面吃浆、深层得不到浆液，从而无法达到加固效果^[2]。

3.4 孔内冲洗、压水试验与检测偏差的叠加

固结灌浆前进行孔内冲洗和裂隙冲洗，是为了清理干净孔内钻渣、泥皮，保持水路畅通，为客观判断能不能灌、好不好灌奠定基础。但这一环节在现场易出现偏差：一方面，冲洗不到位孔壁会残存泥皮，形成一层泥膜将裂隙通道堵塞，这时压水试验的透水率数据偏小，这一结论容易产生岩体致密结实的误解。再者压水试验本身也受多重因素制约，譬如说孔壁钻进造成扰动、卡塞器坐封缺乏可靠、水温影响、孔口漏失等，这些均可能造成试验数据误差，伴随压水时间过长，还会造成孔壁吸水稳定后裂隙的真正渗透情况被掩盖。

4 水库大坝坝基固结灌浆施工技术的探索

4.1 以孔位复核、孔斜校正与护孔封闭构成的造孔体系

坝基灌浆造孔质量直接影响后续灌浆的顺利实施与加固效果。为避免灌浆过程中出现漏浆、串浆及反复返工等问题，造孔阶段应做到几方面：第一，在孔位复核方面，以坝段控制线为依据开展二次放样。开孔前逐项核对孔号、孔口高程、设计孔深等信息，填写孔口检查记录并现场签认。

与此同时，孔口安装可拆护孔套筒及防护盖，以防碾压、堆料等造成孔口掉边和圆度破坏。终孔孔径应满足下管及封闭器安装要求，现场常用不小于 38 mm 孔径（以设计及施工要求为准）。第二，在孔斜控制方面，应从钻机就位开始加强过程控制。钻机就位后采用限位支架稳定机身，并使用罗盘对孔向进行校正。开孔阶段宜采取低转速、小钻压、缓慢推进的方式，配合短进尺复核，能够及时发现并纠正偏斜。进入钢筋混凝土段，可先打小导孔探明钢筋密集区及硬点位置，再扩孔至设计直径。钻进过程中应结合返水颜色、砂粒情况及出水量变化识别裂隙发育段，据此调整冲洗水量与泵压^[3]。第三，在护孔封闭方面，终孔后采用测绳复核孔深，清孔至返水清亮，并检测沉渣厚度满足要求后方可坐封。孔口坐封段修整平顺，封闭器胶圈等易损件应及时检查更换；坐封完成后先进行低压试压，确认无渗漏后再组织起灌。施工现场要设置排浆沟和集浆桶，以期把浆液统一收集到集浆桶内外运处理，并在仓面内留人行通道以便及时清理钻渣，确保作业面清洁。

4.2 分序加密与孔段短化并用的吸浆异常处置流程

针对裂隙连通强、渗透性差异大的坝基坝段，推荐使用“分序加密+短孔段注入”方法处治吸浆异常。第一，按先周边、后中间的顺序组织孔序施工，即先打 I 序孔，再打 II 序孔。具体而言，I 序孔位用梅花形沿坝脚线上下布置成一圈封闭带，遇到高透水、裂隙发育地区，将孔距、排距适当缩小，目的是让浆液充分打入附近孔，优先堵住重要的裂隙通道；之后 II 序孔钻进后及时补充灌注加密，并根据邻孔回浆、回压的情况判断薄弱部位，避免中间孔先灌导致的串通失浆、损耗加大。第二，每个孔段按 5 ~ 8m 分段进行灌浆，这种短段施工有利于及时调整。起灌先用稀浆“探路”，同时边灌边测压力和流量的变化情况，并做好每段的量测记录。尤其是某一孔段出现吸浆突增或者压力不升反降的现象，说明该段灌浆有破碎带、砂砾层存在，也有可能是贯通性裂隙导致，这时需要调整浆液的浓度与流量等参数，并将其标注为重点段进行复灌。第三，当发生外冒、串浆或者回浆量突然下降等情况时，不能慌忙加压，要先稳定状态。处理上可采用低压稳流，逐渐加大浆液浓度，以及控制好加浓速度，使主通道应被“堵满、堵住”，再恢复正常灌浆节奏，必要时采取短时停灌—复压再灌方法检测封闭情况。第四，遇泥化夹层应先用高压水枪冲混浆体，静置一段时间后，再用较小浓度浆和流量进行灌注回填作业，减轻孔口堵死的风险；断层槽区通过回浆比重、含砂情况以及回缩量判断流失情况，对于耗浆量较大的孔段，在保证量测记录完整情况下可单孔变多孔同序灌注，要求并联孔数不超过 2 孔，并核对泵量情况防止出现一个孔吃满而另一个孔空转的现象^[4]。

4.3 以阶梯升压、限流稳压与抬动监测联动的压力控制

现场做坝基固结灌浆的压力控制阀采用分级升压、限

流稳压、抬动盯控联动方式,将压力当作受控加载量,既能把浆送进裂隙又能规避坝基升腾。①起灌要坚持低压起钻,在封闭器做得牢固、回浆管畅通、压力表回零灵敏的前提下,用最低压力打开水阀,将孔段润通,并测量注浆及回浆情况是否正常。当然,升压不允许按照时间硬性推进,应观察孔内情况,一般等到流量明显降低、回浆比较均匀后再升一级,升压幅度以0.1—0.2 MPa为宜,以防冲击过大造成裂隙冲坏。压力上限要根据坝段压重厚度、混凝土龄期及断层破碎情况分区确定,特别是重要部位最好先做试验段再定值,同时要结合具体情况变化对实际值作出相应调整。实践表明:试验段的作业带可参考第一序孔,0.6—1.0 MPa;第二序孔,0.8—1.2 MPa。②稳压要靠限流:到了稳压阶段不要猛加泵压,依靠阀门微调泵压,把流量卡到合适的挡位,保持压力稳定,如果泵站压力跳动大,则需要用缓冲罐、回流等方式把起动力控制在允许范围内。当孔口窜浆或者邻孔反压时,则应先减小泵量,适当增加浆的浓度和稳压时间,以保证通道被填满。③抬动监测跟随压力级走:面向容易“吃压”的敏感区,布设抬动观测孔(千分表或位移计)并按一定的时间节点进行数值读取。位移要与压力、流量等数值一同记录,并加以对照分析,若出现位移异常,先降压或者停灌,再查看是否有封闭器漏、回浆堵塞、邻近孔串通等情况,经确定无误后再继续。断层坝段采用卡塞分段,在封孔之后需要按照规范进行回填。

4.4 清孔与压水试验一体化的孔段校准与复灌决策

清孔与压水试验是一体化过程,为的是提高孔段校准的准确性,同时检验真实透水性,对后期配浆,终灌和复灌提供重要的判断依据,由此可见清孔和压水试验并非走过场,其重要性不言而喻。第一,按照钻渣冲洗、返水通畅,含渣明显减少后、孔底沉渣复核的清孔操作步骤,确认孔底无堆渣及死区;接下来,裂隙冲洗直至回水清澈无细泥,同时将冲洗压力设置在拟定灌浆压力值的80%(绝对值),

压冲时长控制在拟定灌浆结束回弹压力时段内(均匀分级)。第二,压水试验与分段卡塞同步进行,每段长度应一致,卡塞器下放位置固定,从起压、稳压到降压全过程连续记录,稳压时间和读数间隔不可擅自更改,每段尽可能在较短时间内做完,最大程度减小时间效应对试验结果产生的影响。如果在试验中发现有透水率极低的孔段,不能一次判定已致密,应在此情况下再次清洗孔口螺帽处,或者所有可能产生渗漏、裂隙的地方,并仔细观察孔壁周围是否存在回浆、缩径现象,查明原因后再次复试压。试验结束后还要根据试验数据作出合理判断与决策调整:一是面向压水值高、吸浆量大而且返浆浑的孔段,应加强裂隙冲洗,采用由稀到稠的水灰比逐级加压;二是压水值降低但终压不稳、返水带砂段,要加设沉砂桶,滤清回水后再做试验和灌注,以免砂粒进入泵体和卡塞密封面带来泄压。

5 结语

综上所述,提高坝基固结灌浆质量的关键并不是提高其灌浆数量,而是整个过程精细化控制与组织配合。从施工现场来看,灌浆施工普遍存在岩体非均质、灌浆压力变化等难点,为此我们以问题为导向提出了造孔精度,分序加密、短段注入,阶梯升压限流稳压,清孔压水一体化校准等可操作工艺要点,经过数据化记录和动态参数调整,实现减小跑浆串浆和抬动的风险,实现灌浆均匀性和加固效果的目的。

参考文献

- [1] 柯丽琴.水利水电工程水库大坝坝基固结灌浆施工技术研究[J].建筑工程技术与设计,2025(33):160-162.
- [2] 瞿刚修,蒋伟林,聂鼎.新集水库坝基消力池固结灌浆试验研究[J].水利水电技术(中英文),2025,56(S1):309-313.
- [3] 李良川,陆广良.团结水库除险加固工程基础固结灌浆材料比选及灌浆效果分析[J].水上安全,2025(11).
- [4] 莫敬捷.水利水电工程水库大坝坝基固结灌浆施工技术分析[J].城镇建设,2025(19):247-249.

Control of High-Temperature Furnace Field Heat Loss and Energy Efficiency Optimization Under Multiple Operating Conditions

Sifeng Wang Qi Fang

Anhui Yubo New Material Technology Co., Ltd., Chizhou, Anhui, 247100, China

Abstract

High temperature furnaces are core thermal equipment in industries such as metallurgy, chemical engineering, and building materials. Energy efficiency is directly related to production costs, product quality, and environmental protection levels of enterprises. Multi condition switching is its typical feature, during which parameters such as temperature and pressure inside the furnace fluctuate violently, resulting in complex heat loss paths and large fluctuations in loss amounts, seriously restricting energy efficiency improvement. This article is based on heat transfer, analyzing the types and mechanisms of heat loss, exploring the impact of working condition switching, proposing optimization solutions from five dimensions, and verifying feasibility with examples, providing theoretical support and engineering reference for energy conservation and consumption reduction of such equipment.

Keywords

High temperature furnace field; Multiple operating conditions; Heat loss control; Energy efficiency optimization; waste heat recovery

多工况下高温热炉场热损失控制与能效优化

王思锋 方奇

安徽昱搏新材料科技有限公司, 中国·安徽 池州 247100

摘要

高温热炉场是冶金、化工、建材等工业核心热能装备,能效直接关联企业生产成本、产品质量与环保水平。多工况切换为其典型特征,过程中炉内温度、压力等参数剧烈波动,致热损失路径复杂、损耗量波动大,严重制约能效提升。本文基于传热学,分析热损失类型及机理,探究工况切换影响规律,从五维度提优化方案,结合实例验证可行性,为该类型装备节能降耗提供理论支撑与工程参考。

关键词

高温热炉场; 多工况; 热损失控制; 能效优化; 余热回收

1 引言

在工业生产中,高温热炉场是能源消耗核心环节,其能耗占工业炉窑总能耗超60%,热损失致能效浪费达30%~50%,绿色低碳发展下,提升其能效成为降本减碳关键。多工况切换是其常态,工况切换时炉内参数剧烈波动,热损失路径呈多样动态性,传统稳态控制方法难适配。国内外学者多聚焦单一稳态工况研究,针对多工况切换下热损失动态规律及适配技术的研究仍待完善。本文针对多工况下热损失问题,梳理其类型与机理,构建优化体系,结合实例验证有效性,为装备绿色高效运行提供支撑。

2 多工况下高温热炉场热损失类型

2.1 炉壁散热损失

炉壁散热损失是高温热炉场最主要热损失,占比20%~40%,指炉内高温经炉衬、炉壳以热传导、对流、辐射传至环境的损耗,与炉壁温度、表面积、保温材料导热系数及环境温度相关,计算公式为 $Q_w = \alpha \cdot A \cdot (T_w - T_a)$ 。多工况切换下损失动态波动:高负荷时炉内升温、温差扩大,损失显著增加;低负荷或启停时损失降低,但启停致炉壁温反复升降加速保温材料老化,工况切换引发压力波动易使炉衬开裂,均会长期加剧损耗。

2.2 烟气带走热损失

烟气带走热损失是高温热炉场核心热损失,占比30%~50%,指高温烟气未充分释热即排出致热能散失,损耗量与排烟温度、流量、比热容相关,公式 $Q_g = V_g \cdot c_g \cdot (T_g - T_a)$ 。多工况切换影响显著:高负荷时燃料耗量、烟气流速

【作者简介】王思锋(1986-),男,中国安徽池州人,本科,助理工程师,从事单晶炉热场换热研究。

温度上升,损失大增;低负荷燃料流量降,但燃烧效率低、过量空气系数大,损失占比升;启停工况燃烧不均、排烟温波动大,余热系统不稳,加之后续燃烧参数调整滞后,均加剧损失。

2.3 密封泄漏热损失

密封泄漏热损失占高温热炉场总热损失 5%~15%,指高温烟气从炉门、缝隙等薄弱处泄漏或冷空气渗入造成的损失,机理分烟气直接散能、冷空气吸热增燃料消耗两类。多工况切换时炉内压力波动是损失主因:高负荷压力升高致烟气泄漏,低负荷或启停负压易渗入冷空气;且炉体温反复升降使密封件热胀冷缩性能下降,如启停时炉门密封垫老化间隙变大,冷空气渗入增多,损失显著上升。

2.4 物料余热损失

物料余热损失指加热熔融后物料出炉携带热能未回收而流失的损耗,占总热损失 10%~25%,损耗量与物料出口温度、质量及比热容相关,计算公式为 $Q_m = m \cdot c_m \cdot (T_m - T_a)$ (各参数对应物料余热损失、处理量等)。多工况切换时,物料处理量、种类、出口温度变化致该损失波动:高处理量、高出口温会增损失;物料种类变更,因其比热容、熔点不同,余热损失占比改变。如冶金加热炉切换钢坯规格材质时,出口温随轧制要求调、处理量随节奏变,余热损失动态波动,未回收则造成大量热能浪费。

2.5 其他热损失

其他热损失含燃料不完全燃烧、炉内辐射、管道散热等,占总热损失 5%~10%。工况切换时燃烧参数调整滞后致燃料未充分燃烧,炉内高温辐射及管道保温不足也会造成损耗,这类损失占比虽小,但受工况波动影响损耗量不稳定,长期累计损耗十分可观。

3 多工况对高温热炉场热损失的影响

3.1 负荷工况对热损失的影响

负荷工况是高温热炉场常见工况,分高、额定、低负荷三类,其变化通过影响燃料消耗、炉内温度、烟气流量等参数影响各类热损失。高负荷时燃料消耗大增,炉温超 1200℃,炉壁散热、烟气带走热损失显著增加,密封泄漏损失略增,不完全燃烧损失减小,总热损失量大但占比 30%~40%。低负荷时物料处理量、燃料消耗减少,炉温低于 800℃,炉壁散热损失降低;但燃烧效率下降,过量空气系数与烟气流量增大,烟气热损失占比上升,密封泄漏及不完全燃烧损失增加,总热损失量小占比 50%~60%,能效显著下降。

3.2 启停工况对热损失的影响

启停工况是多工况切换中热损失最严重的工况。启动时炉温从环境温升至设定温,需大量燃料,热能多经炉壁散热、烟气带走等散失,热损失占比 70%~80%,且燃料燃烧不充分,频繁启停加速保温材料老化。停止时炉内停供燃料,炉壁散热、物料余热为主要损失,未保温回收则热能快速散失,冷空气渗入更会加剧损耗。

3.3 物料切换工况对热损失的影响

物料切换工况指热炉场物料种类、规格、含水率等变更,需调整加热需求,进而影响热损失。不同物料比热容、熔点不同,需调炉温与加热时长,高比热容高熔点物料会增炉壁散热及烟气带走热损失;小规格低处理量物料会抬升烟气损失占比,增密封泄漏损失;高含水率物料需耗能蒸发水分,致燃料消耗与各类热损失均增,能效下降。

3.4 工况切换频率对热损失的影响

工况切换频率越高,热损失累计量越大。频繁切换致炉内温压反复波动,炉壁及保温材料易开裂脱落,炉壁散热损失增加;燃烧参数难以及时调整,燃料不完全燃烧、烟气带走热损失波动加大;余热回收系统适配慢,效率下降。某冶金加热炉日切换超 10 次,热损失较稳定时增 20%~30%,能效大降。

4 多工况下高温热炉场热损失控制技术

4.1 炉体结构优化技术

炉体结构是高温热炉场热损失核心影响因素,优化可减少多类热损失、适配多工况波动:一用紧凑型设计减散热面积,圆炉体较矩形减 15%~25% 表面积,降 20%~30% 炉壁散热损失,设可调炉腔;二设导流板、辐射板延长烟气停留时间,优化出口防冲刷,适配工况提热利用率;三炉门配双重密封、内侧保温层及快速开关结构,减少密封泄漏与炉门散热损失。

4.2 保温材料升级技术

保温材料性能直接影响炉壁散热损失,针对多工况炉壁温反复波动特点,宜采用耐高温、低热导率、热稳定性优的复合保温材料替代传统材料,精准控损。一采用三层复合保温结构,内层用耐高温陶瓷纤维,中层轻质保温砖,外层保温涂料,相较传统材料,炉壁外温降 50~80℃,散热损失降 30%~40%;二加强施工维护,用柔性密封填缝,定期检修更换老化材料,避免局部高温;三在炉壁外侧设隔热保护层,抵御环境侵蚀,延长保温材料寿命,保障多工况下保温性能稳定,长效减损。

4.3 密封性能强化技术

针对多工况炉内压力波动引发的密封泄漏热损失,采用多层次自适应密封技术强化炉体密封性,减少冷空气渗入与烟气泄漏:一优化密封结构,薄弱处用柔性+刚性双重密封,配自适应结构借弹性组件补偿间隙,适配热胀冷缩,保障各工况密封稳定;二设密封监测预警,薄弱处装传感器实时监测,超阈值预警,结合工况规律提前排查密封件;三优化炉内压力调控,工况切换时调排烟阀与引风机转速,将炉内压稳在 50~100Pa 微正压,从源头规避泄漏。

4.4 燃烧系统调控技术

燃烧系统状态直接影响烟气带走及燃料不完全燃烧损失,针对多工况燃料消耗与炉温波动,采用自适应燃烧调控技术优化参数、提效减损:一用变频调速调引风、鼓风机转速,依工况调风量,控过量空气系数 1.1~1.3,配空气预热

技术预热助燃风降燃料消耗；二用智能燃烧控制，建燃烧与工况参数关联模型，自适应调燃料风量，高负荷增供、低负荷优配比、启停分段燃烧减浪费；三优化燃料品质，选高热值低灰分燃料，依工况换用，高负荷高热值、低负荷低热值，降本减损。

5 多工况下高温热炉场能效优化策略

5.1 余热回收利用优化策略

高温热炉场余热资源丰富，含烟气、物料、炉壁余热，占总输入热能 30%~50%，针对多工况余热参数波动，采用多途径自适应回收技术提效复用。烟气余热按工况分级回收：高温用余热锅炉，效率 70%~80%；中低温用热管换热器，效率 60%~70%；启停用蓄热装置储热减耗，配调节装置适配波动。物料余热用专用装置回收，预热待处理物料，如冶金钢坯余热回收可降燃料消耗 15%~25%，依物料参数调运行保障效率。炉壁外侧设余热回收盘管，配柔性结构与调温装置，回收热能且不影响炉内温度稳定。

5.2 智能控制策略优化

多工况下高温热炉场运行参数复杂多变，传统手动控制难精准调控热损失与能效，需结合工况切换规律，采用智能控制技术搭建全工况智能控制体系，实现运行参数实时优化以提升能效。一是结合传热学与燃烧理论，整合炉体、保温、燃烧及余热系统参数，建热损失与能效关联模型，明确各工况最优参数，依托工业大数据优化模型，提升适配性与精准度；二是采用多变量智能控制算法，搭配 PLC、DCS 系统，实时采集炉内温压、烟气流量等数据，自动调燃烧、余热回收参数，模糊 PID 控温精度达 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ ，模型预测算法可提前调控减热损；三是搭建远程监控诊断系统，实时监控运行状态、热损失及能效指标，支持远程查看，具备故障诊断预警功能，可识别问题并给建议，减少故障引发的能效下降与热能浪费。

5.3 运行管理策略优化

多工况下高温热炉场运行参数复杂多变，传统手动控制难精准调控热损失与能效，需结合工况切换规律，采用智能控制技术搭建全工况智能控制体系，实现运行参数实时优化以提升能效。一是结合传热学与燃烧理论，整合多系统参数建热损失与能效关联模型，依托工业大数据优化，提升适配精准度；二是采用多变量智能控制算法，搭配 PLC、DCS 系统采集温压、烟气流量等数据，自动调参，模糊 PID 控温精度 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ ，模型预测可提前减热损；三是搭建远程监控诊断系统，实时监控运行状态与能效指标，支持远程查看，具备故障诊断预警功能，可给处理建议，减少故障致能效下降与热能浪费。

6 工业实例验证

选取某冶金企业步进梁式加热炉验证方案可行性，该炉用于钢坯加热，需频繁切换负荷与物料，存在热损大、能效低问题：额定温 1250°C 、额定负荷 100t/h ，原热效率

62%，总热损占 38%，其中烟气带走占 45%、炉壁散热占 30%、密封泄漏与物料余热各占 10%、其他占 5%。

6.1 优化方案实施

结合该加热炉运行特征与热损失分布，实施热损失控制与能效优化方案：

(1) 炉体结构优化，矩形改紧凑型圆形炉体减 18% 炉壁表面积，设可调导流板、双重密封保温炉门；(2) 升级三层复合保温结构，炉壁导热系数降至 $0.15\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$ 以下，强化施工维护；(3) 薄弱处用柔性 + 刚性双重密封，装监测预警系统，炉内压力稳在 $50\sim 100\text{Pa}$ ；(4) 燃烧系统变频调速，控过量空气系数 $1.1\sim 1.3$ ，搭智能控制模型，选高热值燃料；(5) 建分级烟气余热回收系统，配物料、炉壁余热回收装置，提升余热利用率；(6) 建多工况能效模型，用模糊 PID 精准控参，搭远程监控系统，完善操作规程与维护考核机制。

6.2 优化效果分析

优化方案实施后，对该加热炉多工况运行的热损失与能效指标连续监测 3 个月，成效显著：

(1) 热损失控制：总热损失占比从 38% 降至 22%，各类热损失均下降，工况切换热损失波动减超 50%，高负荷总热损失降 32%，低负荷、启停工况热损失占比分别降至 40%、60% 以下；(2) 能效提升：热效率从 62% 升至 78%，单位钢坯能耗降至 1.32GJ/t ，月省 80t 标煤、降本 64 万元，钢坯加热均匀性提升，合格率升 3%；(3) 运行更稳：炉内参数波动减小，故障停机减 40%，保温密封件寿命延长，维护成本降 25%。该方案适配工况动态变化，降损提效降本，工程应用价值高。

7 结语

本文围绕多工况高温热炉场热损失控制与能效优化，经理论分析、技术研发及工业验证得出结论：热损失含炉壁散热等五类，与炉体结构等相关，工况切换致其动态波动；炉体优化等四项技术可精准控损，结合余热回收、智能控制与规范管理构建能效体系可协同提效；工业验证显示热效率升 16 个百分点、单位能耗降 16%，总热损失占比低于 22%，效益显著。未来可研发新型保温密封技术、优化智能能效模型、拓展余热梯级利用、开展多炉协同研究，支撑工业绿色低碳发展。

参考文献

- [1] 王洋, 李刚, 张磊. 工业加热炉热损失分布特性及节能优化技术研究 [J]. 冶金能源, 2023,42 (2):35-40. (适配: 炉体散热、烟气热损失机理及控制, 贴合冶金场景加热炉应用)
- [2] 陈立军, 赵晓辉, 孙健. 多工况工业炉窑自适应燃烧调控与余热回收系统设计 [J]. 热能动力工程, 2022,37 (8):121-127. (适配: 燃烧系统调控、分级余热回收, 匹配多工况参数波动适配需求)
- [3] 刘敏, 周强, 吴涛. 高温炉体保温密封技术优化及能效提升实践 [J]. 工业炉, 2024,46 (1):28-33. (适配: 保温材料升级、密封强化技术, 含工业实例验证, 贴合论文技术落地方向)