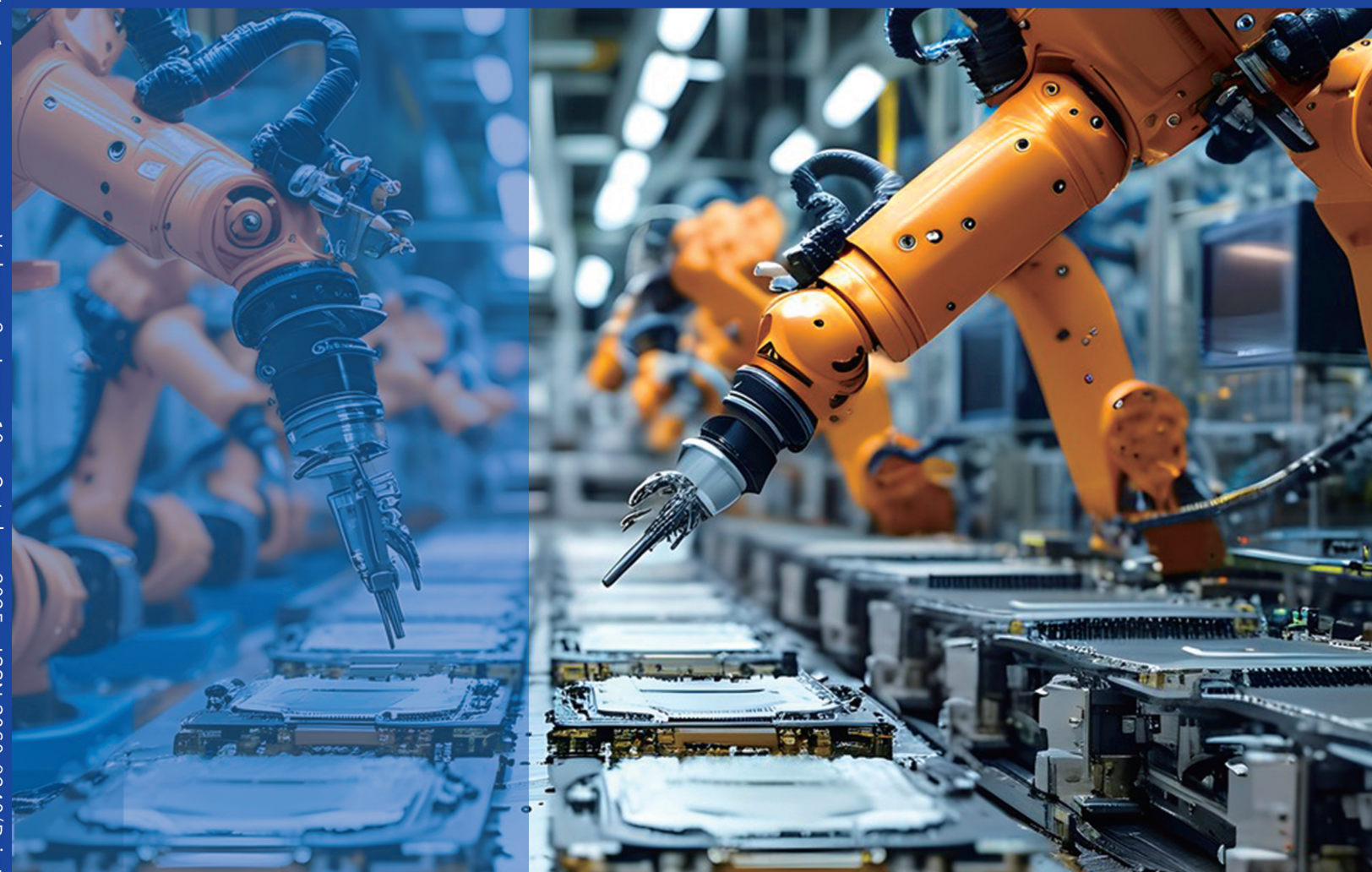


# 现代工业与技术

Modern Industry and Technology

Volume 2 • Issue 10 • October 2025 • ISSN 3060-9240(Print) 3060-9259(Online)



现代工业与技术  
Modern Industry and Technology  
Volume 2 • Issue 10 • October 2025 • ISSN 3060-9240(Print) 3060-9259(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：现代工业与技术

ISSN: 3060-9240 (纸质) 3060-9259 (网络)

出版语言：华文

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

出版社名称：新加坡南洋科学院

Serial Title: Modern Industry and Technology

ISSN: 3060-9240 (Print) 3060-9259 (Online)

Language: Chinese

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

Publisher: Nan Yang Academy of Sciences Pte. Ltd.

## 《现代工业与技术》征稿函

### Database Inclusion



Google Scholar



Crossref



China National Knowledge Infrastructure

### 版权声明/Copyright

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

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

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

Email: [info@nassg.org](mailto:info@nassg.org)

Tel: +65-65881289

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



### 期刊概况：

中文刊名：现代工业与技术

ISSN: 3060-9240 (Print) 3060-9259 (Online)

出版语言：华文刊

期刊网址：<http://journals.nassg.org/index.php/mit-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。

# 现代工业与技术

Modern Industry and Technology

Volume 2·Issue 10· October 2025·ISSN 3060-9240(Print) 3060-9259(online)

## 编委会

### 主 编

蒋 晶 郑州大学

### 编 委

李伟锋 华东理工大学

李 硕 重庆理工大学

李益国 东南大学

高学金 北京工业大学

郭乃信 通力电梯有限公司

- |    |   |  |
|----|---|--|
| 1  | 基于智能监测的低压内线安装施工质量管控技术研究<br>/ 高天勇            | 应用研究<br>/ 肖敏                                 |
| 4  | 城镇老旧小区改造工程施工技术难点与综合管理模式<br>创新研究<br>/ 周贤刚    | 41 输电线路无人机巡检缺陷识别与智能分类技术研究<br>/ 丁卓群 石珊        |
| 7  | 四轮定位对车辆轮胎偏磨的实验分析与调整策略<br>/ 陈少平              | 44 典型年份的一般工业固体废物产生及处理处置探讨<br>/ 张智芳           |
| 11 | 连退机组张力波动原因分析及控制优化<br>/ 王海阳                  | 47 新能源项目工程建设进度管理关键因素分析<br>/ 杨陈兵              |
| 14 | 混流式水轮机与发电机匹配特性对调速系统稳定性的<br>影响分析<br>/ 王海志    | 50 承压特种设备定期检验中的常见问题与解决措施<br>/ 郭鹏飞            |
| 17 | 钢水罐全氧燃烧烘烤技术在炼钢系统的应用及研究<br>/ 范尚东             | 53 锅炉压力容器管道的腐蚀问题及防护措施研究<br>/ 杨晓萌             |
| 20 | 新型飞机油门台智能化控制技术应用研究<br>/ 邹坤君                 | 56 光伏电站项目全生命周期工程建设管理关键路径与优<br>化策略<br>/ 赵昆    |
| 23 | 工业自动化生产线中的电气控制系统优化<br>/ 邹广坤                 | 59 汽轮机轴系找中心工艺优化及检修质量控制措施<br>/ 樊鹏             |
| 26 | 老旧货机安全适航能力提升方案研究<br>/ 薛金升 曲家洪               | 62 基于智能控制的脱硝系统喷氨优化策略研究<br>/ 杨澈               |
| 29 | 火电厂电动机常见故障及运维策略<br>/ 吴健男                    | 65 高压电机绝缘故障对运行能耗的影响分析及节能性防<br>范措施研究<br>/ 黄耀辉 |
| 32 | 面向碳中和目标的新能源智慧场站综合能效评估体系<br>构建<br>/ 张磊       | 68 化工园区基础设施系统化建设模式与运营管理优化路<br>径探析<br>/ 袁同斌   |
| 35 | 现代室内装修设计与施工工艺的协同优化策略、流程<br>规范及实践研究<br>/ 鞠兴明 | 71 电力系统继电保护中的故障分析与处理策略探讨<br>/ 吴哲             |
| 38 | 智慧建筑技术与建筑工程管理的深度融合路径及实践                     | 74 新能源项目施工过程中的安全风险识别与防控<br>/ 李志              |

- 1 Research on Quality Control Technology for Low-Voltage Internal Wiring Installation Based on Intelligent Monitoring  
/ Tianyong Gao
- 4 Research on Construction Technology Difficulties and Comprehensive Management Model Innovation of Urban Old Residential Area Reconstruction Project  
/ Xiangang Zhou
- 7 Experimental Analysis and Adjustment Strategy of Four-wheel Alignment on Vehicle Tire Wear  
/ Shaoping Chen
- 11 Analysis of the Cause of Tension Fluctuation and Control Optimization of the Repeatedly Unwinding Unit  
/ Haiyang Wang
- 14 Analysis of the Impact of Mixed-Flow Turbine-Generator Matching Characteristics on Speed Regulation System Stability  
/ Haizhi Wang
- 17 Application and Research of Full-Oxygen Combustion and Roasting Technology for Steel Molten Slab in the Steelmaking System  
/ Shangdong Fan
- 20 Application Research of Intelligent Control Technology for New Aircraft Throttle Table  
/ Kunjun Zou
- 23 Optimization of Electrical Control Systems in Industrial Automation Production Lines  
/ Guangkun Zou
- 26 Research on the improvement plan for the safe airworthiness of old cargo aircraft  
/ Jinsheng Xue Jiahong Qu
- 29 Common Faults and Operation and Maintenance Strategies of Electric Motor in Thermal Power Plant  
/ Jiannan Wu
- 32 Construction of an Integrated Energy Efficiency Evaluation System for Smart New Energy Stations Aiming at Carbon Neutrality  
/ Lei Zhang
- 35 Research on the Synergistic Optimization Strategy, Process Specification and Practice of Modern Interior Decoration Design and Construction Technology  
/ Xingming Ju
- 38 Research on the Deep Integration Path and Practical Application of Smart Building Technology and Construction Engineering Management  
/ Min Xiao
- 41 Research on Defect Recognition and Intelligent Classification Technology of UAV Inspection for Transmission Lines  
/ Zhuoqun Ding Shan Shi
- 44 Discussion on the Production and Disposal of General Industrial Solid Waste in Typical Years  
/ Zhifang Zhang
- 47 Key Factors Analysis in Construction Schedule Management of New Energy Projects  
/ Chenbing Yang
- 50 Common issues and solutions in regular inspections of pressure special equipment  
/ Pengfei Guo
- 53 Research on Corrosion Issues and Protective Measures for Boiler Pressure Vessels and Pipelines  
/ Xiaomeng Yang
- 56 Key Pathways and Optimization Strategies for Full Life Cycle Construction Management of Photovoltaic Power Station Projects  
/ Kun Zhao
- 59 Optimization of Centering Process and Quality Control Measures for Maintenance of Steam Turbine Shafting  
/ Peng Fan
- 62 Study on Optimization Strategy of Ammonia Injection in Denitration System Based on Intelligent Control  
/ Che Yang
- 65 Analysis of the Influence of High Voltage Motor Insulation Fault on Energy Consumption and Research on Energy Saving Preventive Measures  
/ Yaohui Huang
- 68 Analysis on the Systematic Construction Mode and Operation Management Optimization Path of Chemical Industrial Park Infrastructure  
/ Tongbin Yuan
- 71 Discussion on Fault Analysis and Treatment Strategy in Power System Relay Protection  
/ Zhe Wu
- 74 Identification and Prevention of Safety Risks in the Construction Process of New Energy Projects  
/ Zhi Li



# Research on Quality Control Technology for Low-Voltage Internal Wiring Installation Based on Intelligent Monitoring

Tianyong Gao

State Grid Northeast Branch Lüyuan Hydropower Company Yunfeng Power Plant, Ji'an, Jilin, 134200, China

## Abstract

As a critical component of power distribution systems, low-voltage internal wiring projects directly impact building power supply safety and system stability. Traditional quality control methods relying on manual inspections and empirical judgments suffer from issues like delayed monitoring, partial data, and tracing difficulties, making them inadequate for modern intelligent engineering management. With advancements in IoT, sensor networks, and data analytics, intelligent monitoring has emerged as a new direction for quality control in low-voltage wiring construction. This study focuses on intelligent monitoring technology to establish a dynamic control system integrating sensor perception, data acquisition, intelligent analysis, and decision feedback. By developing multidimensional monitoring models and quality indicator systems, the system achieves full-process visualization and traceability. Research results demonstrate that this framework reduces construction defect rates by over 30%, enhances construction efficiency by 25%, and significantly improves project safety and reliability. These findings provide practical evidence and technical support for the digital and intelligent transformation of electrical installation industries.

## Keywords

Intelligent monitoring; Low-voltage internal wiring; Construction quality

## 基于智能监测的低压内线安装施工质量管控技术研究

高天勇

国网东北分部绿源水力发电公司云峰发电厂，中国·吉林 集安 134200

## 摘要

低压内线工程是配电系统的重要组成部分，其施工质量直接影响建筑供电安全与系统稳定。传统质量管控依赖人工巡检与经验判断，存在监测滞后、数据片面和追溯困难等问题，难以适应现代工程的智能化管理需求。随着物联网、传感器网络与数据分析技术的发展，智能监测成为低压内线施工质量控制的新方向。本文以智能监测技术为核心，构建集传感感知、数据采集、智能分析与决策反馈于一体的动态管控体系，建立多维监测模型与质量指标体系，实现施工全过程的可视化与可追溯。研究表明，该体系可降低施工缺陷率30%以上、提高施工效率25%，显著提升工程安全性与可靠性，为电气安装行业数字化与智能化转型提供了实践依据与技术支持。

## 关键词

智能监测；低压内线；施工质量

## 1 引言

在现代建筑与基础设施工程中，低压电气内线安装是保障供配电系统安全可靠运行的基础环节。其施工质量直接影响系统的导电性能、绝缘安全与运行寿命。传统质量管控方式多依赖现场人工巡检、经验判断和定期检测，存在监测周期长、反馈滞后、问题识别不精准等问题。随着工程规模不断扩大及安全标准持续提高，传统管理模式已难以满足高标准、高复杂度的施工质量管理需求。信息化与智能化技术

的快速发展为工程质量控制提供了新的技术支撑。智能监测系统通过传感器、物联网终端、移动通信和云计算平台的协同作用，可实现施工过程的实时数据采集与动态分析<sup>[1]</sup>。特别是在低压内线施工中，通过布置温度、湿度、电流、电阻及拉力传感器，可全面监测导线敷设状态、接头质量与环境条件，从而实现精细化管理与智能化预警。本文以低压内线安装为研究对象，探讨基于智能监测的施工质量管控体系构建与关键技术，实现从“被动检查”向“主动控制”的转变，为提升电气安装工程质量和安全提供参考。

## 2 低压内线安装施工质量管控的现状与问题

### 2.1 传统施工质量管控的局限性

低压内线安装工程在传统管理模式，质量控制主要

【作者简介】高天勇（1971—），男，中国吉林集安人，本科，工程师，从事电力工程技术/生产运行—电力系统及其自动化/内线安装研究。

依赖人工巡检与经验判断。这种方式受主观因素影响较大，难以实现量化与持续性监管。施工现场多为隐蔽工程，电缆敷设、接头压接及绝缘处理等关键环节往往被结构封闭，人工检测难以及时发现潜在缺陷。传统检测仪器以离线测量为主，数据采集间隔长、覆盖范围有限，无法形成连续监测数据链，导致质量评估的滞后性与片面性。此外，质量问题多在工程后期或运行阶段暴露，追溯困难、责任划分不清，造成返工与工期延误。由于缺乏实时监控与数据支撑，施工质量管控仍停留在事后整改阶段，难以实现“预防为主”的质量管理目标，亟须向数字化、智能化转型。

## 2.2 复杂施工环境对质量监测的挑战

低压内线工程施工环境普遍复杂，常处于密闭、潮湿或高温区域，施工工序多、交叉作业频繁。导线敷设、支架固定及接头压接等环节对环境条件高度敏感，稍有偏差即可能影响系统稳定性。不同班组、不同施工区域间操作标准不统一，使得质量波动性较大。环境因素如湿度、电磁干扰、粉尘浓度等会对检测设备的精度和可靠性造成影响，导致传统抽检结果存在失真与遗漏。由于人工检测在覆盖范围、时间精度和响应速度上均存在局限，难以全面反映施工质量的动态变化。尤其在高密度配线和多回路布设场景中，传统检测手段无法对每个节点实现实时监控，监测数据呈现断点式分布，严重制约了工程质量的精细化管控与早期风险识别。

## 2.3 行业发展对智能化质量管控的需求

随着建筑业进入智能建造与数字化转型阶段，工程质量面临新的技术要求与政策引导。《智能建造技术标准》《建筑施工质量管理数字化指南》等文件的实施，为施工质量智能监测提供了制度依据和技术路线。低压内线作为建筑机电安装的重要组成部分，其施工质量直接关系到供电系统的安全与可靠性。传统依靠人工抽检与事后验收的模式已无法满足现代项目对精细化、实时化管理的需求。构建基于物联网、大数据与人工智能技术的智能监测系统，能够实现施工质量全过程的数据采集、实时评估与动态预警，形成“事前预防—事中控制—事后追溯”的闭环管控模式<sup>[2]</sup>。通过智能化质量管理，不仅能显著提升施工效率与工程可靠性，还为建筑业实现信息化、自动化与高质量发展提供了关键支撑。

# 3 基于智能监测的施工质量管控体系设计

## 3.1 总体架构设计

智能监测体系的总体架构遵循“感知—传输—数据—决策”四层结构，实现从现场数据采集到智能决策的全流程闭环管理。感知层通过布置温湿度、应力、电流、电压、位移等多类型高精度传感器，完成对施工过程关键参数的实时监测。传输层采用 LoRa、NB-IoT 及 4G/5G 等多通道通信方式，确保在不同施工环境下的数据稳定传输与低延迟响应。数据层基于云计算平台，负责多源异构数据的融合、清

洗与存储，并通过分布式计算架构支持高并发处理。决策层以大数据分析模型为核心，通过关联分析与智能算法生成质量评估报告和风险预警策略。系统在 PC 端与移动端实现可视化展示，支持多维度动态交互与全过程追踪，使项目管理人员能够实时掌握施工质量状态，提升工程管控的智能化与透明度。

## 3.2 监测指标体系的构建

低压内线施工质量监测体系的建立应遵循全面性与针对性原则，从材料性能、施工工艺、运行环境与安全防护四个维度构建多层指标体系。材料维度涵盖导线截面、绝缘层厚度、电阻率及接头压接强度，用于评估导体传输能力与绝缘安全性；工艺维度关注敷设张力、弯曲半径、支架间距及固定牢度，以量化施工规范性；环境维度监测温湿度、电磁干扰与粉尘浓度，用于分析外界条件对施工质量的影响；安全维度则聚焦漏电电流、接地电阻及回路温升等指标，用于评估系统运行安全水平。通过数据标准化、权重分配与层次分析法（AHP），建立动态质量评估模型，实现施工质量状态的实时量化与精准预判，为项目管理提供科学依据。

## 3.3 智能监测系统功能模块设计

智能监测系统以数据闭环与智能决策为目标，主要包括数据采集、边缘计算、数据分析、可视化展示与智能预警五个功能模块。数据采集模块实现多点同步采样与信号自校验，保障数据完整性与准确性；边缘计算模块在现场终端执行数据预处理与异常识别，减少云端计算压力并实现本地响应；数据分析模块依托机器学习算法（如随机森林、神经网络）进行模式识别与特征提取，实现从数据到知识的转化；可视化模块利用 BIM 平台与三维建模技术，动态展示施工进度与质量状态，支持交互式查询与趋势分析；智能预警模块通过阈值判断与趋势预测实现自动报警与风险提示，生成整改建议并记录处置结果，形成从检测、分析到决策的闭环管理体系，从而实现低压配电工程施工全过程的数字化、智能化质量控制。

# 4 关键技术研究与应用实现

## 4.1 传感器网络的优化布设技术

传感器网络的科学布设是智能监测系统实现高精度与高可靠性监控的关键。针对低压配电工程的施工特点，应结合电缆路径、节点密度及施工工序，采用“分区布点、分级采集”的布设策略。在导线连接处布设应力与温度传感器，可实时监测接头发热与应力变化，防止隐性质量缺陷；沿敷设路径分布位移与张力传感器，用于检测电缆受力状态与支架稳定性<sup>[3]</sup>。无线传感网络通过节点自组网与动态路由机制，实现信号的自愈传输与低延迟通信。采用低功耗蓝牙与 NB-IoT 通信协议，可在高粉尘、高湿度等复杂环境下保证数据传输稳定性与能源高效利用，为施工过程的连续监测与远程管理提供基础支撑。

## 4.2 多源数据融合与智能识别算法

多源异构数据融合技术是智能监测系统实现施工质量智能评估的核心环节。针对传感器数据的非线性与随机噪声特征，系统引入卡尔曼滤波与贝叶斯推断模型，对原始数据进行动态校正与噪声抑制，提取关键趋势特征。通过时序分析实现对异常波动的实时捕捉，进一步结合机器学习算法构建多维特征分类模型。以卷积神经网络（CNN）为代表的深度学习算法，可用于识别接线端子压接质量、绝缘层破损等微观缺陷，实现视觉与物理信号的联合判断。通过融合环境参数、施工工况与设备运行状态，系统可提前识别潜在风险，实现由被动检测向主动预测的转变，大幅提升了监测的智能化与前瞻性水平。

## 4.3 BIM 与智能监测的协同集成

BIM（建筑信息模型）技术为智能监测系统提供了可视化与数据协同平台。通过将传感器监测点与 BIM 模型空间坐标绑定，可在三维数字环境中实时呈现施工质量状态，实现设计、施工与监测数据的全周期融合。系统通过开放式数据接口与 BIM 平台互联，支持传感器数据、报警信息与施工进度同步更新，形成可追溯的数字化质量档案。管理人员可在模型中直观查看各监测点实时状态及历史记录，实现从平面数据到空间信息的动态转化。该集成模式不仅提升了施工管理的精细化与透明度，还为后期运维阶段的风险评估与决策支持提供了数据基础，推动建筑工程质量管理向智能化、可视化与生命周期管理方向发展。

# 5 智能监测系统的工程应用与效果评估

## 5.1 工程示范应用案例分析

在某大型城市综合体项目的低压配电工程中，针对传统施工质量管理依赖人工巡检、信息滞后及隐蔽工程难以实时追踪的问题，引入了智能监测系统进行全过程质量管控。系统共部署 186 个多功能传感节点，实时采集导线敷设、电缆连接、绝缘性能及环境参数等关键数据。监测终端通过无线网络与云平台连接，实现数据的远程存储与智能分析。平台基于 AI 算法自动识别异常信号并生成预警报告，现场管理人员可通过移动终端实时查看质量状态与施工进度。对比传统人工抽检方式，智能监测方案将返工率降低 32%，电缆接头合格率提升至 98.7%，有效提升了施工过程的可视化与精细化水平，为项目工期压缩与质量稳定提供了坚实保障。

## 5.2 系统运行稳定性与数据可靠性分析

智能监测系统在高湿度、高粉尘及强电磁干扰环境中进行了为期 90 天的连续运行测试，以验证其稳定性与数据

可靠性。结果显示，系统数据完整率达到 98.5%，异常识别准确率超过 95%，表明系统在复杂环境下仍具备较高的抗干扰与数据恢复能力。通过节点冗余布设与信号自校验算法，系统可自动识别信号漂移与数据丢失并执行修正，提高了监测结果的准确性与连续性。经多次对比测试，监测误差控制在  $\pm 3\%$  以内，完全满足电气工程质量监测的精度要求。该结果表明，系统在高负载运行与环境扰动条件下依然保持优良的稳定性与可靠性，为工程大规模推广提供了数据支撑与技术验证。

## 5.3 经济与社会效益评估

智能监测系统的应用显著降低了工程项目的管理成本与质量风险。通过自动化数据采集与智能分析，人工巡检频次减少 60% 以上，现场管理人员数量减少约 25%，项目总体施工成本下降约 8%。系统实时质量追溯功能有效避免了重复施工与材料浪费，提升了施工过程透明度与资源利用率。在社会效益层面，智能监测系统强化了施工安全风险的可视化管理，实现了安全、质量与进度的协同控制。其在项目管理数字化与智能化方面的创新实践，推动了建筑行业质量管理模式的变革，提升了企业品牌信誉与行业竞争力，对促进建筑业向信息化、智能化方向转型具有显著的示范和推广价值。

# 6 结语

基于智能监测的低压内线施工质量管控技术，为传统电气安装工程提供了新的质量保障途径。通过传感网络、数据融合、BIM 集成与智能分析的有机结合，实现施工质量的实时监控、动态评估与智能决策，推动工程管理从经验型向数据驱动型转变。研究与实践表明，该体系在提升工程质量、降低安全风险与提高施工效率方面具有显著成效。未来应进一步完善算法模型与标准体系，推动监测数据在区域工程平台中的共享与应用，实现跨项目、跨周期的全过程质量管理。随着 5G 通信、人工智能与数字孪生技术的融合发展，低压内线智能管控体系将朝着更高的智能化、可视化与自适应方向演进，为电气安装行业高质量发展提供坚实的技术支撑与实践范式。

## 参考文献

- [1] 柯毅.复杂低压室内线路串联故障电弧检测方法研究[D].昆明理工大学,2022.
- [2] 姚昊峰,姜佳伟,周金飞.农村低压电网接线及保护方式探讨[J].电力需求侧管理,2015,17(01):55-58.
- [3] 王刚.电力输电线路工程中的智能监测与故障诊断技术研究[J].科技资讯,2025,23(02):106-108.

# Research on Construction Technology Difficulties and Comprehensive Management Model Innovation of Urban Old Residential Area Reconstruction Project

Xiangang Zhou

Ji 'anshan Economic Development Co., Ltd., Jinggangshan Development Zone, Ji' an, Jiangxi ,343000, China

## Abstract

To address the prevalent technical challenges in urban old neighborhood renovations and the shortcomings in multi-stakeholder collaborative management, this study employs field research and comparative case analysis as an empirical framework. Using a representative renovation project as a case study, it systematically identifies key technical bottlenecks and practical governance challenges encountered during the renewal process. Based on these findings, the study proposes adaptive technological innovation strategies and optimization pathways for governance models. The research aims to provide a robust technical foundation and replicable reference for large-scale renovation of similar urban old neighborhoods in China.

## Keywords

Urban old residential areas; Construction technical challenges; Integrated management model; Modular construction;

# 城镇老旧小区改造工程施工技术难点与综合管理模式创新研究

周贤刚

吉安市井冈山开发区金庐陵经济发展有限公司, 中国·江西吉安 343000

## 摘要

针对当前城镇老旧小区改造普遍存在的施工技术难题与多方协同管理短板,本研究以典型改造项目为实证载体,采用实地调研与多案例比较分析相结合的研究范式,系统剖析老旧小区更新过程中遇到的关键技术瓶颈以及现实治理难题,在此基础上提出适配性技术革新策略与治理模式优化路径。此次研究,旨在为国内同类型城镇老旧小区规模化更新改造提供坚实的技术依据与可复制的参考依据。

## 关键词

城镇老旧小区; 施工技术难点; 综合管理模式; 模块化建造;

## 1 城镇老旧小区改造工程概况与挑战

### 1.1 老旧小区现状与改造需求

城镇老旧小区更新改造作为城市更新战略的关键实施环节,与居民居住质量提升及民生保障水平改善具有高度关联性。以北京市西城区三里河一区28号楼为典型样本,该建筑于20世纪70年代末期建成,主体为地上5层、半地下1层布局,共设3个单元,服务54户居民。历经近50年使用周期,该砖混结构建筑呈现出多维度性能衰退特征,供水管网锈蚀渗漏频发,围护结构保温性能不足导致冬季室内热

环境较差,电气系统过载跳闸现象突出,建筑主体存在结构性开裂现象,且未开展抗震加固与外墙节能改造,安全隐患与宜居性短板并存。此类问题在既有住区中具有普遍性,长沙县3614小区即为典型代表,该小区建成于20世纪80年代,投用时间超40年,存在公共环境品质低下、配套设施供给不足等突出问题,辖区内18栋建筑、65个单元均需开展系统性提质改造。从全国层面来看,2000年以前建成的住宅小区普遍存在消防设施老化失效、雨污管网堵塞渗漏、建筑外立面破损老化、内部道路损毁严重、适老化服务设施缺失及文化宣传载体不足等复合型问题。上述问题不仅直接降低居民日常生活质量,更对居民幸福感、获得感与安全感产生显著影响,凸显出老旧小区改造工作的紧迫性与必要性。广东省“十四五”期间相关数据显示,该省累计启动老旧小区改造项目1.1万个,覆盖居民230万户,完成投资

【作者简介】周贤刚(1989—),中国江西吉安人,本科,建筑工程、市政工程一级建造师,从事建筑工程、市政工程相关研究。

规模达 273 亿元，充分反映出老旧小区改造工程体量庞大、覆盖范围广泛、实施任务艰巨的现实特征<sup>[1]</sup>。

## 1.2 改造工程的主要特征与技术难点

老旧小区更新改造工程与常规新建工程项目存在本质差异，在实施过程中呈现出鲜明的特殊性与系统性复杂度。其一，作业空间极度受限，小区内部通行道路狭窄、建筑间距紧凑，大型施工装备与运输车辆难以正常进场就位，施工组织难度显著提升<sup>[2]</sup>。以石首市界山口街巷改造工程为例，项目地处山地边缘地带，场地地形条件复杂、坡度较大，大型机械无法通行作业，只能依靠人工开挖等传统工艺实施施工。其二，居民利益诉求呈现多元化特征，改造期间必须保障居民基本居住与生活秩序，居民对施工噪声、扬尘污染、临时断水断电等干扰因素的耐受度较低。其三，地下管网系统布局混乱，供水、排水、燃气、电力、通信等各类管线交叉敷设，且多数项目缺乏完整的原始竣工图纸与档案资料，施工过程中极易引发管线破损等安全事故。其四，建筑结构安全管控标准严苛，既有老旧建筑以砖混结构为主，整体抗震性能与结构承载力不足，改造过程中必须同步开展结构补强与抗震加固工作，进一步提升了工程实施难度。

## 1.3 管理模式面临的主要瓶颈

传统老旧小区更新治理模式多采用分散实施、多头管理的运行机制，由此引发一系列治理困境。建筑本体修缮与市政管线更新分属不同实施主体，各专业施工队伍之间缺乏协同联动与统筹衔接，造成场地重复开挖、工序交叉干扰等问题，大幅降低项目实施效率。资金供给结构较为单一，过度依托财政资金投入，社会资本参与动力不足、居民自筹比例偏低，资金保障体系难以持续稳定。改造完成后常态化运维机制缺位，多数小区因专业化物业管理缺失，人居环境迅速退化，重新出现环境脏乱、设施失修等现象。

# 2 老旧小区改造工程施工技术难点与创新方案

## 2.1 结构加固与抗震性能提升技术

结构安全隐患是老旧住宅改造中必须优先处置的关键技术难题。以北京市百子湾路 1 号楼为例，该建筑于 1976 年建成，主体为砖混结构，历经近五十年使用，结构性能持续退化，安全风险日趋显著。针对该楼栋结构缺陷与地下管网老化并存的复合型问题，朝阳区南磨房乡政府联合承建单位创新实施“整体周转、全域改造、一次性提升”的综合改造模式，在结构加固环节采用外套式抗震加固技术体系。该技术通过在既有砖混结构外侧增设现浇混凝土框架—剪力墙结构体系，使新增混凝土结构形成完整受力围护，全面承接上部荷载并与原结构协同工作，如同为既有建筑构筑一体化防护结构，从根本上化解结构安全隐患。该工艺具备多重优势：施工过程对居民居住干扰较小，可大幅缩短外迁过渡周期；新增结构与原有建筑形成共同受力整体，显著提升抗震与承载能力；同时可借助新增结构空间优化户型与功能布

局。在百子湾路 1 号楼项目中，改造团队结合多户合居的历史遗留问题，依托新增建筑面积优化空间分配方案，同步完成电表分户改造与智能水表更换，从根源上化解长期存在的费用分摊与计量纠纷。

## 2.2 模块化建造技术在“原拆原建”中的应用

针对结构损伤显著、加固经济性较差的危旧住宅，“原拆原建”已成为统筹居民安居需求与城市更新目标的重要实施路径。北京市西城区在该领域开展了系统性创新实践，于 2023 年推进桦皮厂胡同 8 号楼改建工程，成为全市首个运用混凝土模块化建造技术的原拆原建示范项目，为危旧楼房更新改造提供了可复制、可推广的实践范式。三里河一区 28 号楼作为西城区第二个模块化原拆原建落地项目，标志着该技术体系由试点探索阶段迈入规模化应用阶段。项目总建设规模约 3000 平方米，通过标准化设计将建筑整体拆解为 156 个预制模块单元，涵盖 6 类差异化户型。超过 90% 的构件加工与部品装配工序在工厂预制完成，现场仅实施模块吊装、节点连接与集成调试，整体工期较传统现浇模式缩短约 75%。该项技术革新有效破解了传统改造模式中施工周期长、噪声扬尘干扰大、居民生活影响显著等痛点问题。在技术体系构建方面，项目创新应用“空心剪力墙+双面墙模”模块化集成技术体系。外墙体系简化模板施工工序，显著提升模块装配效率；内墙采用双面模壳剪力墙结构，在提升结构整体性的同时，有效节约户内使用空间，强化绿色低碳建造效能。项目严格遵循北京市要求，对标绿色建筑三星标准，室内空间采用动静分区优化布局，集成高效保温隔热、无障碍电梯等适老化配套设施，全方位契合高品质宜居住宅的建设导向。

## 2.3 复杂条件下的管网更新与接入技术

既有住区管网更新改造的核心矛盾，集中体现为严苛施工条件与居民正常生活保障之间的协同冲突。石首市界山口片区燃气改造工程为破解此类难题提供了典型实践样本。该项目覆盖市防疫站小区、红星花园及界山口街巷共计 145 户居民，受山地边缘复杂地形与早期建设条件制约，区域内长期未接入市政管道燃气，居民长期依赖瓶装液化气，生活便利性与安全性均存在明显短板。项目实施过程中面临三重核心制约——界山口街巷坡度较大，大型施工机械难以通行作业；红星花园内部通道狭窄，老年居民占比较高，对施工干扰的容忍度极低；防疫站小区地下岩层分布广泛，土方开挖难度与施工风险显著偏高。针对上述约束条件，项目部采用“分段推进、人工开挖”的精细化施工模式，在无机作业空间的区段依靠人工掘进完成管线敷设。结合复杂管线路由条件，由设计人员驻场协同居民共同优化方案，最终确立“架空敷设与地理敷设相结合、避开主体结构”的定制化布设思路。针对陡坡地形构建分级调压系统，保障管网末端供气压力稳定。以高性能聚乙烯管材替代传统金属管材，降低自重并提升人工搬运与安装效率。在硬岩区段采用定向钻孔

施工技术,最大限度减少路面破除与环境扰动。通过全域化、系统化的管网更新工程,长期困扰居民的渗漏、堵塞等顽疾得到根本性解决,居住环境与设施保障能力显著提升。

### 3 老旧小区改造综合管理模式创新

#### 3.1 “整体统筹、一体实施”的片区改造模式

传统老旧小区更新改造多以独立院落为单元实施,难以从根本上破解公共空间紧缺、服务配套供给不足等区域性、系统性难题。湖北省十堰市郧阳区则形成了“一拆、二建、三管”的阶梯式改造路径。第一阶段对改造范围内的危旧墙体、危房及违法建设进行集中拆除,疏通街巷微循环,释放公共活动空间。第二阶段将腾退土地用于完善道路系统、增补停车位、营建绿地景观与休闲场所。第三阶段构建常态化运维管养机制,保障改造成果长效稳定、持续惠民。郧阳区城关镇北门社区郧山佳苑小区经改造后环境品质显著提升,成为“拆墙并院、整合提质”模式的典型示范。

#### 3.2 “政府引导+居民参与+市场运作”的多元共治机制

城镇老旧小区改造具有投资规模大、涉及主体多元的特征,单纯依靠财政资金投入难以形成长效支撑<sup>[1]</sup>。广州市通过实践创新,构建起“政府引导、公众参与、市场运作”的多元协同模式,推动形成共建共治共享的社区治理新体系。在居民参与机制方面,坚持改造前问需于民、改造中间计于民、改造后问效于民的全流程参与路径。在社会资本导入方面,白云区黄石花园采用EPCO一体化模式招标实施,吸引社会资本参与,将存量闲置公房改造为精装青年公寓并投入运营,已交付74套,出租率达91%。在多元资金共担机制上,北京市西城区三里河一区28号楼采用“政府补助+居民自筹”模式,为54户居民定制“一户一策一方案”精准服务<sup>[2]</sup>。北京市百子湾路1号楼则构建“政府补贴+产权单位出资+居民合理承担物业费”的多元筹资结构,既保障改造工程高效推进,也清晰界定后续运维管理权责,实现建设与管护的有机衔接。

#### 3.3 “自筹资金、自主更新”的原拆原建模式创新

针对危旧住宅改造成本居高不下、安全隐患难以根治等突出问题,广州市花都区先行先试,构建了多产权房屋拆除重建的全流程技术与管理体系。集群街2号楼作为首批试点项目,探索推行居民自筹资金实施更新,成为广东省首个以“居民自筹、自主更新”为核心模式的危旧房改造示范项

目。该模式的创新价值集中体现在三个方面:一是转变政府大包大揽的传统路径,切实强化居民在更新改造中的主体地位与主动意识;二是与传统征收拆迁模式相比,可有效降低财政资金投入约60%,显著提升资金使用效率;三是改造完成后房屋市场价值提升约1.6倍,实现政府、居民多方共赢。

#### 3.4 “建管并重、长效运营”的社区治理体系

老旧小区更新改造的可持续运行,高度依赖后期长效管护机制,业界素有“三分建设、七分管理”的实践共识,健全运维体系是巩固改造成果、实现长效惠民的核心保障。重庆市江北区塔坪片区创新推行片区化“大物业”统筹管理模式,将居住楼宇、社区商业、市政道路、公共街区统一纳入物业服务范畴,破除小区边界与服务条块分割,通过资源整合与业态互补增强物业服务自我造血与持续运营能力。广州市越秀区大塘街、海珠区青凤与青葵社区、黄埔区鱼珠街瓦壶岗社区等多个片区在改造完成后,均引入专业市场主体实施全域化治理与综合运维。其中鱼珠街瓦壶岗社区通过专业化物业服务企业进驻,全面承接环境卫生保洁、公共设施维保、安全隐患巡查、秩序维护等核心事务,对长期无物业老旧小区实施标准化、常态化运营管理,社区人居环境与服务水平得到根本性改善。

### 4 结语

城镇老旧小区改造是改善人居环境质量、推动城市高质量更新的关键举措。通过对典型地区实践案例的系统梳理与深度剖析,得出城镇老旧小区改造不只是物质空间层面的修缮与提质,更是基层治理体系与治理理念的深层次变革。应以全龄友好、宜居永续为基本导向,构建系统化、全过程的改造技术框架与实施路径,建立涵盖需求精准识别、场景模拟推演、功能耦合适配、多元主体协同、成效分级评价在内的闭环式改造模式,推动社区向共建、共治、共享的高品质宜居生活共同体转型。

#### 参考文献

- [1] 聂瑞峰.老旧小区改造项目施工管理特点及成本控制方法研究[J].建设机械技术与管理,2026,39(01):29-31.
- [2] 李开放,李蓉丽.城市老旧小区改造工程重难点及对策分析[J].建筑技术,2025,56(S1):22-23.
- [3] 任越.城镇老旧小区原拆原建自主更新模式研究[J].浙江建筑,2025,42(06):82-85.

# Experimental Analysis and Adjustment Strategy of Four-wheel Alignment on Vehicle Tire Wear

Shaoping Chen

ShangHai Yulu Automotive Technology Co., Ltd., Shanghai, China

## Abstract

This article conducts an in-depth analysis of the relationship between wheel alignment and tire wear, exploring corresponding adjustment strategies. By elaborating on the principles and technologies of wheel alignment, it clarifies the main factors affecting tire wear. The experimental design is rigorous, the testing process is comprehensive, and the data analysis methods employed are precise, ensuring the reliability and accuracy of the experimental data. The results indicate that proper wheel alignment has a significant effect on reducing tire irregular wear. The article also provides a detailed analysis of tire irregular wear and proposes targeted adjustment strategies, offering theoretical basis and practical guidance for tire irregular wear issue. In conclusion, this article summarizes the importance of wheel alignment in vehicle tire wear test and presents prospects for future research directions.

## Keywords

Four-wheel alignment; Vehicle tire wear; Experimental design; Data analysis; Adjust strategy

## 四轮定位对车辆轮胎偏磨的实验分析与调整策略

陈少平

上海御录汽车科技有限公司, 中国 · 上海 201800

## 摘要

本文围绕四轮定位对车辆轮胎偏磨的关系进行深入分析,探讨了相应的调整策略。通过阐述四轮定位的原理及技术,明确了车辆轮胎偏磨的主要影响因素。实验设计严谨,测试流程完整,采用的数据分析方法精确,确保实验数据的可靠性与准确性。实验结果表明,合理的四轮定位对减少轮胎偏磨有着显著效果。文章还对轮胎偏磨进行了详尽分析,提出了针对性的调整策略,为轮胎偏磨问题提供理论依据和实践指导。最终,本文总结了四轮定位在车辆轮胎磨耗试验中的重要性,并对未来研究轮胎磨耗、偏磨方向提出展望。

## 关键词

四轮定位; 车辆轮胎偏磨; 实验设计; 数据分析; 调整策略

## 1 引言

在车辆行驶过程中,四轮定位对于确保车辆行驶的操控性、舒适性和安全性至关重要,以及对轮胎偏磨有一定影响;四轮定位参数不合格会导致车辆跑偏,方向盘异常抖动,回正困难等问题,定位不准会导致轮胎发生偏磨。轮胎的不均匀磨耗还会影响轮胎的通过噪声、驾乘舒适性以及牵引和制动性等诸多性能,因此轮胎磨耗始终是国内外研究的一个热点问题【a】。

轮胎磨耗的研究方法主要有室外路试、室内转鼓测试以及数值分析法【b-c】。轮胎磨耗室外路试是最接近客户实车驾驶的磨耗方法,实验分析选择了 A00 级小型纯电动车进行测试,测试轮胎花纹为轿车轮胎花纹;测试严格按照

轮胎磨耗试验标准进行测试。测试设备包括 PBOX、GPS 和 TPMS。在采集数据阶段,记录好磨耗车辆在不同工况下的轮胎偏磨情况,包括轮胎主沟花纹深度、肩部花纹深度、硬度及轮胎不均匀磨耗问题。

根据《汽车轮胎道路磨耗试验方法》(GB/T 29041),实验对轮胎偏磨程度进行定量分析,磨耗试验总里程设定 9000km,每行驶 3000 公里进行换位并测量花纹深度。通过对不同工况(城市公路、山路、一般公路、高速)中的定位角度进行调整,优化了轮胎的接触面,减少了不均匀磨耗现象。

根据轮胎花纹每个阶段测量数据,对于有轮胎偏磨问题的车辆,进行车辆四轮定位参数调整,包括对前束角和外倾角的调整,以改善轮胎偏磨现象。

调整四轮定位参数的车辆,轮胎磨耗测试车辆经过 3000km 测试,结果反馈轮胎偏磨问题得到改善,轮胎预测平均里程公里数提高,且行驶操控性和安全性得到显著改

【作者简介】陈少平(1982—),男,中国江西吉安人,硕士,中级职称,从事汽车车轮轮胎研究。

善。进一步的磨耗数据分析表明，车辆定期进行四轮定位，不仅能改善轮胎偏磨问题，而且能够提高轮胎里程公里数。

## 2 车辆轮胎偏磨的影响因素

车辆轮胎磨损的影响因素主要包括四轮定位、驾驶习惯、路面状况、胎压、负载、以及气候条件等。合理的控制好胎压、定期进行四轮定位、调整合适的载重及改善驾驶行为是减少轮胎磨损的有效策略。

在所有的轮胎磨损影响因素里面，其中，静态初始轮胎定位参数——前束和外倾角是造成轮胎偏磨的重要因素【d-e】，四轮定位涉及到前束角、外倾角、内倾角和后倾角等多个参数，它们对轮胎的接地面积及磨损模式形成直接影响。四轮定位不当会导致轮胎偏磨、车辆跑偏等问题，进而影响轮胎寿命。外倾角过大会导致轮胎内侧偏磨，过小会导致外侧偏磨；前束角异常会导致轮胎偏磨问题或方向盘抖动问题；外倾角与前束角共同偏差容易引发胎面局部过度磨损，两者也是影响四轮定位参数的主要参数；四轮定位异常会显著加速轮胎磨损，缩短使用寿命，科学管理四轮定位可以延长轮胎寿命，同时还可以提升操控安全性和燃油经济性。

## 3 四轮定位的技术和影响

Walloch 认为轮胎花纹块大小或者刚度的不均匀会造成胎面花纹块前部磨损的不均匀，而对于具有前束角的驱动轮，其内侧胎肩的花纹块磨损较为严重。而 Stalnaker 的观点则是“在具有前束的驱动轮上，因为在外侧胎肩上存在着曲率造成的推力和前束造成的侧向力，使磨损主要出现在外侧胎肩；锯齿形磨损出现在经常制动的自由转动车轮上，在驱动轮上由于制动力和驱动力相互平衡则不会出现这种情况”。对于胎冠磨损和胎肩磨损的成因，Walloch 和 Stalnaker 的理论最具有代表性，他们认为由于轮胎的弯曲变形，导致了轮胎中间（胎冠）和轮胎边缘（胎肩）之间的周长差，其产生的轮胎内力作用在胎冠上如同驱动力，作用在胎肩上如同制动力；胎冠处内力与驱动力共同作用导致胎冠磨损加剧，而在自由转动的车轮胎肩处内力如同制动力，导致胎肩磨损加剧 [f]。

四轮定位是通过调整车辆四个轮胎之间的角度关系，通过优化轮胎与地面的接触，以提高车辆行驶稳定性、操控性和轮胎寿命。四轮定位主要涉及的技术参数包括前束角、外倾角、内倾角和后倾角。前束角指车轮中心线与车辆纵向中心线在水平面上的夹角。正前束角是为了补偿行驶中因驱动力导致的车轮外张；负前束角是为了提升转向灵敏性，常见于运动车型。外倾角是车轮中心线与垂直线的夹角。正外倾是为了增强转弯时的轮胎接地面积，负外倾是为了提升车辆直线行驶稳定性。

四轮定位的目的是基于车辆行驶过程中轮胎与地面之间的摩擦力，通过精确调整几何参数，最大化接触面积，降

低轮胎磨损。在实际调整中，技术人员会通过松动轮胎悬挂系统连接部件，如转向节、控制臂、衬套等，进行前束角和外倾角的微调。

四轮定位参数是造成轮胎异常磨损的主要原因，在车轮定位参数中，车轮外倾角和前束角对轮胎磨损有较大影响，如两者不能很好匹配，会加速轮胎的磨损，使轮胎的使用寿命大大缩短。车轮外倾角和前束角在汽车使用过程中要发生变化，一旦两参数的平衡被破坏，车轮就不可能是纯粹的向正前方向滚动，而会产生向内侧滑或向外侧滑，从而引起轮胎的偏磨损。车轮的外倾角过大，造成轮胎胎冠外侧磨损；车轮的外倾角过小或负外倾，造成轮胎胎冠内侧磨损；前束角过大，车轮内侧花纹沟边部起绒毛状磨损，或似荷叶边状的磨损，磨损痕迹从内到外，横过胎面；当前束角过小时，车轮外侧边部花纹沟起毛，磨损严重；

## 4 测试方法

测试方法按照 GB/T 29041 轮胎道路磨耗试验要求，轮胎磨耗试验总测试里程 9000km；试验胎压和载荷都按照标准要求要求进行。

测量数据要求，每 3000 公里为一个阶段，每个阶段花纹测量一次，即 3000km、6000km、9000km 时进行测量轮胎花纹沟深、检查轮胎磨损梯度、检查轮胎磨损均匀程度，观察轮胎有无异常。

对于轮胎换位原则为每行驶 3000km 进行前后交叉即 FL → RR、FR → RL、RL → FL、RR → FR 对调。轮胎换位时重新做动平衡并记录数据，轮胎换位方法如图 A.1 所示：

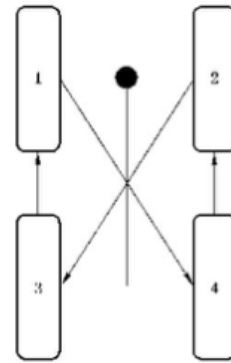


图 A.1 单车试验换位示意图

每个阶段前后需将磨耗轮胎车辆进行四轮定位测量。基于实验设计，四轮定位的具体参数调整包括前轮外倾值和前束值。四轮定位后的实地测试要求是将所有参数调整至用户手册要求的合理范围内。

PBOX 通过记录实时收集轮胎速度、径向加速度、纵向加速度、距离等参数。通过 GPS 可以记录车辆行驶轨迹。PBOX 能够精确测量、记录和分析车辆的各种动态性能参数（速度、加速、制动、G 值等）。GPS 记录驾驶员行车路线，保证驾驶的磨耗路线每一圈都一样。轮胎上安装好胎压监控

系统，确保轮胎胎压正常。

磨损评估采用轮胎花纹深度测量仪，测量轮胎胎面花纹深度，测花纹时首先要先做好轮胎标记，在轮胎胎侧上标记清晰轮胎方位和轮位（FR,FL,RR,RL）；轮胎磨损标识位置作为测量点，沿周向顺时针方向等间距（约 60°）划分六个测量点并将序号（1.2.3.4.5.6）清晰标记。确保试验过程中标记清晰可见。研究的花纹沟深度包括轮胎主沟和内外侧沟。

实验结束后，通过对每个阶段轮胎花纹数据进行剖析，从而分析出轮胎磨损的情况，再通过对比每阶段试验前后的四轮定位参数，来预测轮胎下阶段的偏磨并调整四轮定位参数。

本次测试车辆为 A00 级小型纯电动车，驱动电机为单电机，电机布置采用前置布置，驱动方式采用前置前驱，前悬架类型为麦弗逊式独立悬架，后悬架为扭力梁式非独立悬架。四轮定位指标为空载状态，因考虑到后悬架为扭力梁式非独立悬架，后轴四轮定位参数是不可调的，所以选择只调整前轴的外倾角和前束角。

## 5 四轮定位调整及轮胎偏磨分析

在本实验中，数据采集与分析方法主要包括轮胎磨损数据的获取、四轮定位参数的测定，以及最终的数据分析处理。

### 5.1 四轮定位调整

四轮定位参数根据车轮几何学原理进行精确测量。四轮定位是轮胎偏磨的主要因素，测量内容主要是前束角和外倾角，使用专业的四轮定位仪进行测试与校正。四轮定位仪的测量误差控制在 ±0.01°，确保了数据的有效性。在静态场景下，车辆需置于平坦水平的测试台上，并根据车辆制造商提供的初始标准值进行对比。

本次测试车辆初始阶段的四轮定位参数：前轴外倾角（左）为 0° 07'，前轴外倾角（右）为 -0° 32'，前轴前束角（左）为 0° 14'，前轴前束角（右）为 0° 13'；后轴外倾角（左）为 -0° 37'，后轴外倾角（右）为 -0° 27'，后轴前束角（左）为 0° 04'，后轴前束角（右）为 0° 10'；

在 0km, 3000km, 6000km,9000km 对轮胎进行花纹测量，根据花纹沟深偏磨情况，对四轮定位参数进行调整。为进一步验证四轮定位数据对轮胎偏磨影响，采用 3000km 和 6000km 对四轮定位进行测量以及调整。

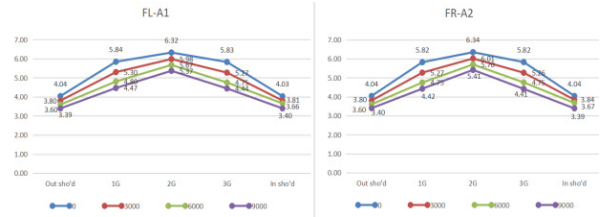
项目	初始标准值	位置	0km	3000km	3000km	6000km	6000km
			空载	调整后空载	调整后空载	调整后空载	调整后空载
前轴	外倾角	左	0°07'	-0°02'	-0°04'	-0°01'	-0°27'
		右	-0°32'	-0°47'	-0°37'	-0°40'	-0°49'
	前束	左	0°14'	-0°16'	0°06'	0°15'	0°04'
		右	0°13'	-0°20'	0°05'	0°03'	0°10'
后轴	外倾角	左	-0°37'	-0°46'	-0°37'	-0°35'	-0°32'
		右	-0°27'	-0°43'	-0°35'	-0°34'	-0°37'
	前束	左	0°04'	0°06'	0°07'	0°06'	0°05'
		右	0°10'	0°05'	0°04'	0°07'	0°06'

## 5.2 轮胎偏磨分析

实测试验车辆的轮胎的花纹主沟有 3 条，需测量轮胎花纹三条主沟花纹（1G、2G、3G）和内外二条侧沟花纹（Out sho' d 和 In

sho' d）。周向测量 6 个位置，取 6 个点的平均值作为测量结果，试验开始到结束的所有测量应由同一个人完成。在 0 公里、每个阶段结束后测量花纹沟深。

图 X 是试验车辆前轮各阶段轮胎花纹深度图，FL-A1 代表左前轮胎，FR-A2 代表右前轮胎：



从轮胎的各阶段花纹数据可以看出，每个阶段，轮胎都出现不同程度的偏磨。轮胎偏磨是轮胎磨损不均匀程度（如胎肩过度磨损、中心磨损、锯齿状磨损等）的体现。偏磨指数 ΔW 表示轮胎不同部分（如内侧 VS 外侧，或左胎 VS 右侧）的磨损程度。

磨耗性能偏磨分析的计算公式：

$$\Delta W = \frac{(Max RSD - Min RSD)}{Max RSD} * (GDP - TWI)$$

ΔW: 偏磨指数

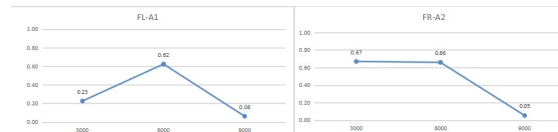
Max RSD: 测量的最大磨损量

Min RSD: 测量的最小磨损量

GDP: 初始测量最大沟深

TWI: 磨耗标记高度

每个阶段左前胎和右前胎的肩部磨耗指数如图 X 所示，FL-A1 代表左前轮胎，FR-A2 代表右前轮胎：



从轮胎的各阶段前胎肩部的磨耗指数可以看出，四轮定位的调整对轮胎的偏磨影响非常大，在 9000km 调整四轮定位参数后，轮胎偏磨指数大大降低，并趋于线性稳定，9000~15000 磨耗阶段，轮胎偏磨问题基本解决。

## 6 结语

四轮定位实验结果表明，车辆轮胎偏磨程度与四轮定位的参数存在密切关系。

针对不同路况，PBOX 数据分析显示，城市道路与高速公路的四轮定位需求存在显著差异。在城市道路行驶的车辆，通常需要更严格的前轮定位调整，以应对频繁的转弯和减速现象，而在高速公路情况下则可适当放宽对此参数的要求。

驾驶员因素对轮胎磨耗影响比较大，从国内现有的

资料看,对驾驶员对轮胎磨耗及偏磨的影响还不够深入,有待进一步研究探讨。驾驶苛刻度 DSN (Driving Severity Number) 作为轮胎偏磨损理论研究的重要方向,因此,驾驶苛刻度 DSN 是今后轮胎偏磨损理论研究的一个重要方向。

### 参考文献

- [1] 康凯.轮胎综合性能测试评价体系研究及验证[D]. 长春: 吉林大学, 2020.
- [2] 尹海山.轮胎磨耗及其温度场的理论与实验研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2017.
- [3] 张竞楠.轮胎胎面磨耗仿真分析及磨耗特性的研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2019.
- [4] 安相避,李树珉,马效.轮胎定位与轮胎磨损关系的分析[J].汽车研究与开发, 2002(2): 29—32.
- [5] 阚萍,王雷,王传磊,等.汽车前轮定位参数影响轮胎异常磨损研究[J]. 农业装备与车辆工程, 2016, 4(4): 4—7. 11.
- [6] 董保利.滚动轮胎稳态磨损及其主要影响因素分析[D].上海: 同济大学,2009.

# Analysis of the Cause of Tension Fluctuation and Control Optimization of the Repeatedly Unwinding Unit

Haiyang Wang

Shandong Iron and Steel Group Rizhao Co., Ltd., Rizhao, Shandong, 276800, China

## Abstract

Tension fluctuations in continuous rolling mills are critical factors affecting both operational stability and product quality. This study investigates the underlying mechanisms of tension variations through equipment, process, control, and material dimensions. Analysis reveals that insufficient equipment precision, process parameter deviations, delayed control system response, and material performance fluctuations are primary contributing factors. Based on these findings, the research explores control system response mechanisms and feedback strategies, while identifying existing optimization opportunities. By integrating production data and engineering practices, the paper proposes an optimized control model to enhance dynamic compensation capabilities, upgrades automated systems to improve response speed, and modifies key component performance to strengthen equipment stability. These targeted measures aim to effectively suppress tension fluctuations, reduce strip breakage risks, and provide theoretical support and technical references for achieving efficient and stable operation of continuous rolling mills.

## Keywords

Tandem reactor; Tension fluctuation; Control system; Process optimization; Stability enhancement

## 连退机组张力波动原因分析及控制优化

王海阳

山东钢铁集团日照有限公司, 中国·山东日照 276800

## 摘要

连退机组张力波动是影响其稳定运行与产品质量的关键因素。本文针对该问题,从设备、工艺、控制及材料维度剖析了张力波动的深层机理。分析表明,设备精度不足、工艺参数失调、控制系统响应滞后及材料性能波动是主要诱因。在此基础上,探讨了控制系统的响应机制与反馈策略,并指出了当前存在的优化空间。结合生产数据与工程实践,提出了优化控制模型以提升动态补偿能力,升级自动化系统以提高响应速度,并改进关键部件性能以增强设备基础稳定性。这些针对性措施旨在有效抑制张力波动,降低断带风险,为连退机组实现高效、稳定运行提供理论支撑与技术参考。

## 关键词

连退机组; 张力波动; 控制系统; 工艺优化; 稳定性提升

## 1 引言

连退机组作为钢铁企业中典型的连续式生产设备,在实现板带钢的组织均匀化与性能提升方面发挥着重要作用。机组内部的带钢传递过程依赖多个机架、卷取区与活套区的协同运行,张力调控贯穿整个生产流程,其稳定性决定了带钢在机组内的受力状态及形变过程。一旦张力出现波动,会直接干扰带钢运动节奏,使工艺区温度分布、变形抗力与冷却效率发生变化,引发产品缺陷甚至设备故障。因此,如何准确识别张力波动的来源、理解其传播机制,并构建高效的调控模型,是提升连退机组自动化水平的重要课题。尽管已有研究从机理建模、自动控制和工艺匹配等角度提出多种方

案,但在实际生产中仍普遍存在响应滞后、调节精度不足及设备耦合干扰较强的问题,使张力控制难以达到理想效果。基于此,本文系统分析连退机组张力波动产生的关键因素,并结合控制理论与工程应用探讨优化路径,以促进设备运行的可靠性和生产一致性的全面提升。

## 2 连退机组张力波动的主要影响因素

### 2.1 设备结构与机械系统特性对张力的不稳定影响

连退机组由多个机架、活套、传动辊及张力辊组成,机械系统的刚度、惯性和传动间隙对张力稳定具有直接影响。当传动系统中存在间隙或齿轮磨损时,带钢在速度调节过程中产生瞬时响应差异,进而引发张力跳变。部分老化设备由于轴承间隙增大或连接部件松动,会导致带钢在运动过程中出现微循环变速,使张力呈周期性波动。此外,活套区作为缓冲带钢长度变化的重要结构,对张力稳定具有关键作

【作者简介】王海阳(1996—),男,中国辽宁沈阳人,本科,助理工程师,从事材料成型及控制工程研究。

用,活套高度调节不稳定或响应迟滞均可能使张力在短时间内快速偏离设定值。辊面磨损、润滑条件恶化或辊径变化亦会影响轧制速度一致性,使辊间带钢受力分布出现不均衡,从而加剧张力波动。设备结构因素的复杂性决定了张力波动往往呈现多源叠加的特征,需要在精细化设备管理与实时监测中同步解决<sup>[1]</sup>。

## 2.2 工艺参数变化与带钢物理特性对张力的影响

连退机组内部的温度分布、带钢厚度变化、冷却速度及加热工艺均会对张力产生显著影响。带钢进入不同温区后,其弹性模量与热膨胀系数发生变化,若控制模型未充分考虑温度变化对材料力学性能的影响,则实际张力会偏离设定值。带钢厚度的小幅变化也会导致受力差异,在轧制速度不变的情况下产生张力失衡。此外,钢材内部组织不均或表面摩擦条件的变化会使其在机组中的运行阻力发生轻微波动,张力随之改变。退火气氛控制、炉内压力波动及卷取张力设定的变化也会引起整体张力链的调整,使波动呈现连续性和累积性。工艺参数的变化大多与材料本身特性耦合,使张力控制需要融合材料模型与实时检测数据,以避免过度依赖经验调节。

## 2.3 自动控制系统的响应性能与干扰因素

连退机组张力控制依赖速度控制系统、张力反馈系统及活套调节系统的协同工作,自动控制系统的精度直接决定张力的稳定性。在实际运行中,反馈信号存在采样延迟、传感器漂移或噪声干扰,导致控制系统无法及时对张力偏差作出准确调整。当控制算法对扰动变化的敏感度不足时,系统会呈现滞后补偿,从而引发二次波动。同时,复杂的生产工况中常存在多变量耦合,如速度调整影响活套状态、材料温度变化影响张力反馈,使控制模型在高动态条件下难以保持稳定。设备之间信息交互不充分、控制器参数未根据实际生产进行自适应优化,也会减弱调控效果,使张力在较长时间内处于非稳定区间。由此可见,控制系统的响应特性与模型适应性是张力稳定控制的核心环节。

# 3 张力波动的传播规律与系统耦合分析

## 3.1 张力波动沿带钢传递的链式反应机制

当某一工位出现速度波动、摩擦变化或材料参数突变时,张力偏差会沿带钢方向迅速传递,并在多个工位之间形成链式扰动。由于连退机组为连续传输设备,各工位之间的应力变化具有空间关联,局部张力的改变往往引发相邻区域的同步调整,使整体张力场呈现连续波动的特征。若系统无法及时消除该扰动,波动会在带钢内部积累并进一步放大,最终导致难以控制的张力失稳。不同传动区间的惯量差异、活套缓冲能力及张力反馈延迟等因素都会影响波动的传播速度与幅度,使波动呈现复杂的动力学特征。理解波动传播规律,有助于在控制策略中加入预测性调节,以抑制扰动在全线上扩散。

## 3.2 张力与速度控制之间的耦合关系

连退机组的速度控制与张力调节具有显著耦合特性,速度变化会直接影响带钢在各区域的受力状态。若速度控制系统对扰动响应不足,速度微变会转化为张力突变,并在不同速度段之间形成非线性耦合。此外,工艺温度、钢带刚度与辊间摩擦条件变化都会通过影响速度匹配,使张力难以维持在设定范围内。活套的加入虽然具有缓冲作用,但在控制系统滞后的情况下,活套高度变化会反向放大速度扰动,使张力波动更加复杂。速度-张力耦合的多变量特性决定了控制系统需采用模型化协同调节策略,而非简单依赖独立反馈回路<sup>[2]</sup>。

## 3.3 张力控制系统中反馈与前馈机制的动态失衡

张力控制通常依赖反馈调整与前馈补偿的组合,但两者之间若缺乏协调,会引发动态失衡。反馈控制具有稳定性好、能自动修正偏差的优势,但其在高速工况下的响应速度有限,存在天然滞后。前馈控制可提前对工艺变化进行补偿,但依赖预测模型的准确性,一旦模型误差加大,补偿量会直接形成扰动源。在实际运行中,反馈调节过于敏感会造成系统频繁震荡,过度平滑则会削弱控制能力。前馈补偿若与反馈矫正存在相位差,张力调节曲线会出现明显波动,这也是连退机组张力不稳定的常见原因之一。动态失衡的本质是控制策略缺乏对复杂扰动的全局协调,需要通过优化控制结构来实现两者的融合匹配。

# 4 张力波动控制策略的优化方向

## 4.1 基于精细化建模的张力调控优化路径

要提升张力控制效果,必须构建更贴合实际工况的动力学模型,包括带钢弹性模型、速度-张力耦合模型及传动系统惯量模型等。传统模型对工况变化的适应性有限,而精细化建模可将温度变化、带钢材质差异及设备磨损情况纳入变量,使控制参数随工况实时更新。结合数据驱动算法,可构建具有自适应特性的混合模型,从而提升预测能力与动态补偿精度。在模型基础上,通过参数辨识技术实时校正关键控制量,使张力控制系统对扰动具有更强的抵抗力。建模精度的提升不仅有助于提高控制性能,也为故障预测与设备健康管理奠定基础。

## 4.2 自动控制算法的升级与智能化发展

连退机组张力控制已逐步从传统PID调节向智能控制算法转变。通过引入模糊控制、自适应控制或模型预测控制(MPC),系统能够根据实时反馈自动调整参数,提高对非线性扰动的处理能力。尤其是MPC,可在未来时间窗口内预测张力变化趋势,提前进行调节,使系统能在复杂工况下保持稳定。此外,结合大数据与深度学习技术,可对影响张力的多源数据进行融合分析,构建智能化调控模型,实现对波动源的精确识别。随着工业互联网技术的发展,控制系统可通过边缘计算实现高速响应,使自动化水平显著提升。

### 4.3 关键设备性能提升与系统协同优化

除了控制系统优化,设备本体性能提升同样重要。提高辊系刚度、优化传动链结构、改善润滑条件可显著降低机械扰动源。活套系统的响应速度与调节精度直接决定张力缓冲能力,可通过升级伺服系统与采用高精度传感器提高其有效性。在系统级优化中,通过对各工位速度设定进行协调,使速度分配更符合理想张力曲线,有助于减少耦合扰动。工艺系统(温度、气氛、冷却速度等)与控制系统的协同管理亦能增强整体稳定性,使张力控制更具预见性与全局性。通过设备性能与自动控制的双向优化,可显著提升机组运行的连续性与一致性。

## 5 连退机组张力控制优化的工程实践路径

### 5.1 基于实时监测的动态调整机制构建

构建高效的实时监测系统是连退机组张力控制优化的核心环节。在连续化生产环境中,张力变化常呈现快速性与隐蔽性并存的特点,仅依靠传统周期性采样难以实现有效调控。因此,在关键工位布置高精度张力传感器、速度监测装置与位移采集模块,可实时捕捉带钢受力状态,为判断波动趋势提供高频数据支持。通过建立实时监测平台,实现数据采集、解析与可视化的即时处理,使操作者能够及时识别潜在异常。在此基础上,构建动态调整机制,使控制系统能够依据实时张力偏差自动修正速度匹配、活套高度或辊速分配,从而避免波动在传输链中扩散。同时结合工业数据库开展历史波动特征分析,可识别出具有规律性的扰动源,并通过数据模型构建预测端口,使系统具备前瞻性调整能力<sup>[3]</sup>。实时监测与动态调节系统的融合不仅提升张力控制的敏捷性,也为后续智能化控制奠定数据基础。

### 5.2 工艺参数协调与多维度协同管理

连退机组张力控制与工艺区运行具有高度耦合性,工艺参数的稳定性直接影响材料在传输过程中的受力状态。因此,有必要将温度控制、气氛调节、冷却速度及带钢物理性能管理纳入张力调控体系,从系统层面实现协同优化。温度波动会导致材料弹性模量与延伸特性的改变,若不及时调整张力设定值,往往会引发受力突变。通过实时监测炉温与带钢表面温度,可动态修正张力控制区间,使带钢在不同温度段均处于合理应力水平。此外,不同钢种因组织结构和成形特性不同,张力设定条件应随钢种变化而调整,以提升控制的针对性与可靠性。冷却策略、气氛组成及炉压变化亦可能对运行阻力产生影响,因此需要建立多维度工艺协同机制,

减少外部扰动对张力系统的冲击。稳定的工艺区运行不仅有助于确保材料性能的一致性,也为空间与时间维度上的张力稳定提供重要保障。

### 5.3 基于预测性维护的设备管理模式

设备因素是引发张力波动的重要隐性来源,尤其是辊系磨损、轴承间隙增大及传动系统衰减均会在无明显外部表现的情况下影响张力稳定性。因此,构建基于预测性维护的设备管理模式尤为关键。通过布置振动监测装置,可捕捉辊系运行平稳度变化;利用热成像技术能够识别轴承及传动构件的异常热分布;噪声分析则有助于判断传动链磨损程度。上述监测结果可输入健康评估模型,预测潜在故障的发展趋势,使维护活动从“事后修复”转向“事前干预”。在此基础上,建立设备健康档案,对关键部件如活套系统、驱动电机、张力辊进行周期性评估,根据磨损趋势制定最优检修周期,避免设备性能下降造成的张力扰动<sup>[4][5]</sup>。预测性维护模式不仅提升设备运行效率,还能显著降低因故障导致的张力失稳风险,为连退机组长期稳定运行提供可靠的工程保障。

## 6 结语

连退机组张力波动的形成与设备结构、材料特性、工艺条件及控制策略等多因素密切相关,其复杂性使张力控制成为生产过程管理的核心难点。通过对波动来源、传播规律及系统耦合特性的深入分析,可为控制策略优化提供方向。随着建模技术、智能控制算法及设备监测能力的不断提升,连退机组张力调控正向精细化、智能化方向发展。未来,建立基于大数据驱动的控制体系、完善设备健康管理机制、推动工艺与控制协同优化,将是提升机组稳定性的重要路径。通过持续的技术迭代与工程实践,连退机组有望实现更高水平的稳定运行,为钢铁企业提升产品质量与生产效率提供坚实保障。

### 参考文献

- [1] 唐智雁,李辉.宝钢1220mm连退机组炉内张力控制系统研究[J].宝钢技术,2016,(02):25-30.
- [2] 李洁,庄严,孙燕京,等.冷轧连退机组光整机张力波动的解析[J].自动化博览,2013,30(06):82-85.
- [3] 常生财,吕庆秋,赵志坚.连退机组炉区张力控制的研究与应用[J].设备管理与维修,2022,(17):20-23.
- [4] 孙晓梅.冷轧连退机组张力控制与应用[J].信息记录材料,2021,22(11):119-120.
- [5] 肖至勇,俞鸿毅,崔熙颖.连退机组入口活套张力控制与位置控制方法研究[J].机械工程与自动化,2020,(01):139-140.

# Analysis of the Impact of Mixed-Flow Turbine-Generator Matching Characteristics on Speed Regulation System Stability

Haizhi Wang

Yunfeng Power Plant, State Grid Northeast Branch Lüyan Hydropower Company, Ji'an, Jilin, 134200, China

## Abstract

The mixed-flow turbine-generator unit is a critical component in medium and low-head hydropower stations, where operational stability directly affects both hydropower utilization efficiency and grid security. Based on electromechanical coupling dynamics models and speed regulation control principles, this study analyzes the coupling mechanisms and parameter effects under variable operating conditions, with a focus on the roles of flow characteristic curves, inertia constants, and electromagnetic torque in stability. Through establishing nonlinear and linearized models, dynamic responses under different matching parameters are compared. Results demonstrate that optimal configuration of mechanical inertia and electromagnetic damping can significantly enhance speed regulation system stability, preventing oscillations during low-head and high-flow operations. These findings provide valuable engineering guidance for the matching design and stability control of mixed-flow turbine units.

## Keywords

Francis turbine; Generator matching characteristics; Speed control system

# 混流式水轮机与发电机匹配特性对调速系统稳定性的影响分析

王海志

国网东北分部绿源水力发电公司云峰发电厂, 中国·吉林 集安 134200

## 摘要

混流式水轮发电机组是中低水头水电站的关键设备, 其运行稳定性直接影响水能利用效率与电网安全。本文基于机电耦合动力学模型与调速控制原理, 分析两者在变工况下的耦合机理及参数影响, 重点探讨流量特性曲线、惯性常数与电磁转矩对稳定性的作用。通过建立非线性与线性化模型, 对不同匹配参数下的动态响应进行比较。结果表明, 合理配置机械惯性与电磁阻尼可显著提升调速系统稳定性, 避免机组在低水头、大流量工况下出现振荡。研究成果对混流式机组的匹配设计与稳定控制具有重要工程指导价值。

## 关键词

混流式水轮机; 发电机匹配特性; 调速系统

## 1 引言

混流式水轮机因效率高、适应性强而广泛用于中低水头水电站, 但其与发电机匹配不当易导致响应滞后、系统振荡甚至失稳。匹配特性不仅影响能量转换效率, 也决定调速系统的频率调节能力与动态稳定性。本文基于系统动力学模型, 定量研究混流式水轮机与发电机的匹配机理, 结合仿真验证, 揭示匹配特征对系统稳定性的影响规律, 并提出优化

控制思路, 为水电机组运行稳定与参数设计提供理论依据。

## 2 混流式水轮机与发电机匹配特性的理论基础

### 2.1 混流式水轮机的流量与转矩特性

混流式水轮机在能量转换过程中实现了水流动能与势能向机械功的转化, 其水力性能受导叶开度、水头、流量及转速等多因素耦合影响。水力转矩可表示为, 其中流量与导叶开度呈非线性关系。流量的变化不仅改变水力转矩, 还会引发水击效应与压力波动, 使机组动态响应出现滞后。当水头下降或负荷波动时, 流量与转速之间的比例关系偏离线性, 导致机组特性曲线的斜率变化, 表现为系统调节灵敏度降低与振荡倾向增强。特性曲线的形状决定了水轮机在不同

【作者简介】王海志(1978—), 男, 中国吉林集安人, 本科, 工程师, 从事混流式水轮发电机(水轮机、发电机、调速器)研究。

工况下的调速性能：较平缓曲线保证系统稳定但响应迟缓，而陡峭曲线虽提升响应速度，却易造成超调和不稳定。为实现高效稳定运行，需通过导叶开度调节及流道优化设计平衡流量惯性与水力动态特性，从而增强系统在负荷扰动下的自稳定能力。

## 2.2 发电机的电磁惯性与阻尼特性

发电机的电磁惯性与阻尼特性是调速系统实现能量平衡与动态稳定的核心。电磁转矩可表示为 $T_e = K_s(\omega - \omega_s) + D \frac{d\omega}{dt}$ ，其中同步常数 $K_s$ 决定发电机恢复同步的能力，阻尼系数 $D$ 影响系统能量耗散速率。惯性较大时系统响应滞后，负荷扰动后转速恢复慢；惯性过小时，系统易产生频率振荡。阻尼不足将导致振荡能量衰减不充分，而过高阻尼又可能引起系统惯性过补偿，使响应迟滞。理想的发电机匹配应在能量吸收与释放之间保持动态平衡。通过调节励磁系统参数，可优化电磁阻尼特性，实现对水轮机水力冲击的快速抑制。研究表明，合理的惯性与阻尼组合不仅可改善频率响应特性，还能扩大系统稳定运行区间，为调速系统的鲁棒控制提供支撑。

## 2.3 机组耦合特性的数学描述

混流式水轮发电机组作为典型的机电耦合系统，其动态过程可通过非线性微分方程进行描述。综合水轮机的水力特性与发电机的电磁特性，可得系统运动方程：

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_h - T_e - T_f$$

其中 $J$ 为系统总惯量， $T_f$ 表示摩擦阻力矩。方程揭示了机组机械输出与电磁反馈之间的能量平衡关系。当系统受到扰动时，水力转矩与电磁转矩的差值引起角速度变化，使系统进入动态调节状态。经小扰动线性化处理，可得特征方程 $a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0 = 0$ ，其根的实部与虚部决定系统的稳定性与响应特征。匹配参数变化将导致特征根位置迁移，影响阻尼比与自然频率。若特征根靠近虚轴，系统趋于振荡；若根全部位于左半平面，则系统稳定。通过合理设计惯性与阻尼匹配，可确保特征根分布于理想稳定区，实现机组运行的高效与可靠。

## 3 混流式机电系统的动态耦合机理

### 3.1 水轮机动态特性对系统响应的影响

混流式水轮机的流量惯性与水击效应是调速系统产生动态振荡的重要因素。在调节过程中，导叶开度变化引起瞬时流量突变，水流沿压力管道传播时出现滞后响应，形成典型的水力过渡过程。由水击方程 $\frac{dQ}{dt} + \frac{A}{L} \frac{dH}{dt} = 0$ 可知，水流惯性与管道弹性共同决定系统的动态稳定性。当调速系统响应过快而流量尚未稳定时，水头波动会反向作用于水轮机，产生负阻效应，导致“水锤—惯性”耦合振荡。若控制参数未与水力惯性匹配，机组在负荷突变后将出现频率摆动与能量损耗。通过调节导叶开度变化率与调速器增益，使系统响应

时间与水流惯性时间常数相近，可有效削弱振荡幅值，提高系统动态稳定性与负荷适应能力。

### 3.2 发电机电磁动态对调速性能的作用

发电机电磁阻尼在机组动态调节中起平衡作用，其变化直接影响系统的能量吸收与振荡衰减特性。负荷突变时，电磁转矩变化滞后于机械转矩，使发电机暂态电流形成反调节效应，吸收部分水轮机冲击能量，从而抑制转速偏差。若电磁阻尼系数过低，系统在扰动后易产生周期性震荡，稳定时间延长；而适度增加阻尼可提高系统衰减比，使频率恢复过程更平稳。研究表明，电磁阻尼与水轮机流量惯性呈负相关匹配关系，两者协同可显著扩大系统的稳定运行区间。通过励磁控制调整阻尼参数，可在不增加能耗的前提下优化系统响应速度，提升机组在变工况下的动态性能。

### 3.3 惯性匹配与稳定边界分析

混流式机组的整体稳定性取决于水轮机惯性矩与发电机转动惯量之间的匹配程度。系统线性化后，其稳定裕度可用阻尼比 $\xi = D/(2\sqrt{JK})$ 表示。当机械与电磁惯性比例失衡时，系统阻尼比下降，振荡趋强，响应曲线出现超调甚至失稳。频域分析结果表明，惯量比 $J_f/J_e$ 在1.2 ~ 1.5之间时，系统的响应速度与稳定性达到最优平衡，低于该范围会导致调节过敏感，超过则出现滞后与能量浪费。匹配优化应在快速性与能效之间取得平衡，通过合理分配惯量与阻尼，实现机组在多工况下的稳态运行，为调速系统的稳定控制提供理论依据。

## 4 调速系统稳定性影响因素分析

### 4.1 匹配参数对系统特征根的影响

通过特征方程数值分析可以看出，混流式水轮机与发电机的匹配参数对调速系统特征根分布具有决定性影响。水轮机流量系数、发电机阻尼系数及转动惯量的变化会直接改变系统特征方程的根轨迹。当水轮机流量惯性增大时，系统的等效阻尼下降，特征根实部逐渐逼近虚轴，系统表现出低频振荡趋势；若流量系数过大，还可能导致共振现象的出现。相反，当发电机阻尼增强或转动惯量增大时，系统根向左移，说明衰减速度加快，系统稳定性得到改善。通过多参数联合仿真发现，适当提高发电机阻尼能显著扩大系统的稳定裕度，而保持惯性比在1.2至1.5之间可获得理想的动态平衡。该结果为调速参数整定提供了定量依据，也揭示了在设计阶段控制匹配参数的重要性，以避免系统陷入准稳态振荡。

### 4.2 调速器特性与机电匹配的协同关系

调速器是混流式水轮发电机组控制系统的核心，其参数设置需与机电匹配特性保持动态协调。调速器的比例、积分和微分参数不仅决定控制响应速度，还直接影响水轮机惯性与发电机阻尼的相互作用。当比例增益设置过高时，系统的反应过快，水力惯性效应被放大，产生二次振荡并降低稳定裕度；而当增益过低，反馈调节能力不足，系统反应迟滞，

频率控制精度下降。研究表明,采用比例系数 0.6、积分时间常数 0.4、微分时间常数 0.05 的 PID 配置,可在多水头条件下保持系统响应的稳定与快速性,体现出机电参数与控制参数的耦合优化效果。合理的协同整定不仅提升了调速系统的动态性能,还改善了负荷扰动后的恢复过程,保证机组运行的平稳性与高效性。

### 4.3 非线性因素对稳定性的扰动效应

在实际水电站运行中,水流非正常特性、导叶动作滞后及机械摩擦阻力等非线性因素对系统稳定性造成显著扰动。由于这些非线性项随运行工况变化而动态调整,系统可能出现多稳态或准周期性响应。仿真结果表明,非线性扰动会导致系统稳定区间缩小,尤其在低水头与高流量工况下,水击效应与水流惯性叠加,使机组更易发生振荡。若控制策略未能及时修正,系统可能在负荷突变时陷入振荡甚至失稳。为削弱非线性影响,本文引入模糊控制与自适应控制策略,利用实时监测数据修正调速参数,使系统保持稳定阻尼比与响应灵敏度。实验结果显示,该方法能有效抑制由非线性耦合引起的动态波动,提升系统的鲁棒性与自恢复能力,确保机组在复杂水力环境下实现长期安全、稳定、高效运行。

## 5 匹配优化与系统改进策略

### 5.1 惯性与阻尼参数的优化配置

在混流式水轮发电机调速系统中,机械惯性与电磁阻尼的匹配关系直接决定系统的动态响应性能与稳定裕度。惯量参数主要影响系统的振荡周期与能量存储能力,而阻尼系数则决定系统的能量耗散与振荡衰减速率。通过多参数仿真分析表明,当系统的电磁阻尼与总惯量之比 ( $D_e / J_t$ ) 保持在 0.25 ~ 0.35 区间时,可获得最优的阻尼比与响应速度平衡,系统在负荷扰动下的稳定性显著增强。若阻尼偏低,机组在负荷突变后会产生持续振荡;若阻尼过高,则响应滞后,导致能量调节效率下降。为进一步优化参数匹配,可通过调节发电机励磁系统的电流控制策略来提高电磁阻尼,从而增强系统的抗扰能力。实验研究表明,优化后的参数配置可使系统振荡时间缩短约 40%,稳态误差降低至 0.05%,有效实现“快响应、高稳定、低能耗”的综合控制目标,为调速系统的工程优化提供了可量化依据。

### 5.2 智能调速与参数自适应控制

随着人工智能与自适应控制理论的成熟,基于 AI 算法的智能调速策略逐渐成为混流式水轮机组稳定控制的重要发展方向。传统 PID 控制依赖经验参数整定,难以适应多工况运行环境,而 AI 与模糊逻辑算法的引入使参数整定过程实现动态自学习与自优化。系统通过实时采集转速偏差、流量变化与负荷波动信号,利用深度学习模型或模糊规则库

对控制增益进行自动修正,确保控制器在不同工况下保持最优状态。该策略能在水头突降或负荷突变时快速调整比例、积分与微分参数,实现自适应调速控制。仿真结果表明,AI 自适应控制可将系统超调量降低约 20%,响应时间缩短 30%,同时显著提高稳态精度与抗干扰能力。该方法有效缓解了水力惯性带来的振荡效应,使调速系统具备环境感知、自我优化与智能决策能力,标志着混流式机组控制由传统被动响应向主动智能优化转型,为数字化水电系统的构建奠定了技术基础。

### 5.3 数字化仿真与在线监测应用

数字化与信息化技术的发展使水电机组进入“数字孪生+智能运维”的新阶段。通过构建基于实时数据驱动的动态仿真平台,可实现混流式水轮机与发电机匹配特性的在线监测与预测分析。系统利用传感器网络实时采集水头、流量、转速与振动信号,结合多物理场仿真模型,对机组运行状态进行数字化映射与动态演算。平台可在云端对比历史与当前运行数据,分析匹配参数偏离趋势并自动生成优化建议,实现预测性维护与参数自修正。当系统检测到振荡迹象或惯性失配时,可自动触发调速控制策略的调整,避免失稳风险。该模式突破了传统离线分析的时滞限制,形成集“监测—诊断—优化—反馈”于一体的智能闭环系统。实践表明,数字孪生技术的引入使参数异常识别速度提升约 50%,运行故障率降低近 30%。这一数字化与智能化融合的监测机制,不仅提高了机组运行的安全性与可靠性,也为现代水电站实现全生命周期的智能运维提供了技术支撑与应用范式。

## 6 结语

混流式水轮机与发电机的匹配特性是影响调速系统稳定性的关键因素。本文通过理论分析与模型仿真揭示了水轮机流量惯性、发电机电磁阻尼与惯性匹配对系统稳定域与响应特性的决定性作用。研究表明,合理配置机电惯性比与阻尼参数,可显著提升系统的抗扰能力与响应速度,避免频率振荡与能量损耗。进一步的优化应结合智能算法实现参数自适应控制,构建数字化监测体系,实现水电机组的高效、安全与智能运行。该研究为混流式水轮发电机调速系统的匹配设计与稳定控制提供了理论依据与实践参考,对中低水头水电站的运行优化具有重要应用价值。

### 参考文献

- [1] 任海波.活动导叶翼型与导叶数对中小型中高水头混流式水轮机性能的影响[D].西华大学,2023.
- [2] 邓佑林.泸定水电站4×230MW混流式水轮机研制.四川省,东方电气集团东方电机有限公司,2012-06-01.
- [3] 杨峰.高转速混流卧式水轮发电机组安装技术研究[J].黑龙江水利科技,2025,53(12):118-121.

# Application and Research of Full-Oxygen Combustion and Roasting Technology for Steel Molten Slab in the Steelmaking System

Shangdong Fan

Sichuan Dazhou Iron and Steel Co., Ltd., Dazhou, Sichuan, 635012, China

## Abstract

The steel water tank is a key container for holding high-temperature liquid metal in the steelmaking system, and it serves as a production link connecting the steelmaking furnace, the refining furnace, and the continuous casting process. The working lining baking process of the steel water tank is an important research topic for steel enterprises. This paper systematically studies the application mechanism of the full-oxygen combustion technology in the baking of the steel water tank, the performance of the equipment, and the on-site data tracking. It analyzes the influence of key parameters such as the oxygen-fuel ratio on the baking effect; by eliminating nitrogen heat loss and improving the thermal efficiency of the steel water tank baking, the baking time of the steel water tank is shortened to 36.5%, and the gas consumption is reduced by 30% to 50%; CO<sub>2</sub> emissions are simultaneously reduced, and the NO<sub>x</sub> emissions are cut by more than 80% [1]. This technology provides an effective path for the steel industry to achieve green and low-carbon, as well as cost reduction and efficiency improvement, and has wide application value.

## Keywords

Full-oxygen combustion; Steel ladle; Thermal efficiency optimization; Oxygen-fuel ratio; Energy conservation and emission reduction

## 钢水罐全氧燃烧烘烤技术在炼钢系统的应用及研究

范尚东

四川省达州钢铁有限责任公司, 中国·四川达州 635012

## 摘要

钢水罐是炼钢系统的盛装高温液态金属的关键容器, 是连接炼钢炉--精炼炉---连铸工序的生产纽带, 对钢水罐工作衬烘烤工艺是钢铁企业持续研究的重要课题。本文系统研究全氧燃烧技术在钢水罐烘烤中的应用机理、设备的性能及现场数据追踪, 分析氧燃比等关键参数对烘烤效果的影响; 通过消除氮气热损失, 提高钢水罐烘烤热效率, 钢水罐烧烤时间缩短至 36.5%, 燃气消耗降低 30%-50%; CO<sub>2</sub>排放同步减少, NO<sub>x</sub>排放量削减 80% 以上<sup>[1]</sup>。该技术为钢铁行业实现绿色低碳、降本增效提供了有效路径, 具有广泛的推广应用价值。

## 关键词

全氧燃烧; 钢水罐; 热效率优化; 氧燃比; 节能减排

## 1 引言

### 1.1 研究背景

钢水罐烘烤技术经过直燃式、预热式和蓄热式的发展, 烘烤效率越来越高, 但在长期使用过程中仍然存在以下几方面的问题:

传统钢包烘烤多采用空气助燃方式, 空气中 78% 的氮气不参与燃烧却带走大量热量, 导致热效率低下。

高温下氮气与氧气反应生成大量热力型 NO<sub>x</sub>, 造成严

重环境污染。

火焰刚性不足, 温度均匀性差, 为达到烘烤效果不得不延长烘烤时间;

为兼顾火焰刚性, 空气严重过剩, 无法准确控制氧燃比; 随着钢铁行业节能减排压力加大及绿色制造要求提升, 传统烘烤技术已难以满足现代生产对效率、成本及环保的综合需求, 开发高效清洁的烘烤技术成为行业迫切需求。

### 1.2 研究目的与意义

本文对某钢企钢水罐全氧燃烧技术的作用机理, 优化氧燃比、烘烤曲线等关键工艺参数, 结合工业实践数据验证技术经济性与环保效益, 助力行业实现节能减排、降本增效的绿色发展目标。

【作者简介】范尚东 (1972—), 男, 中国四川邻水人, 本科, 工程师, 从事钢铁冶炼研究。

## 2 全氧燃烧原理与特性

### 2.1 全氧燃烧的技术原理<sup>[2]</sup>

全氧燃烧技术的基本原理可以从燃烧反应机现清晰体现：

转炉煤气主要成分为 CO,CO<sub>2</sub>

空气助燃时： $2CO+O_2+3.76N_2=2CO_2+3.76N_2+$  热量

氧气助燃时： $2CO+O_2=2CO_2+$  热量

全氧燃烧减少了既不参加燃烧反应，也不促进燃烧反应的 N<sub>2</sub> 量，从而减少了烟气中 N<sub>2</sub> 带走的热量，达到节能的目的。

理论计算表明（图 2.1），在以转炉煤气为燃料，排烟温度达到~1000℃的钢包烘烤装置，采用全氧燃烧可以减少烟气体积~50%。

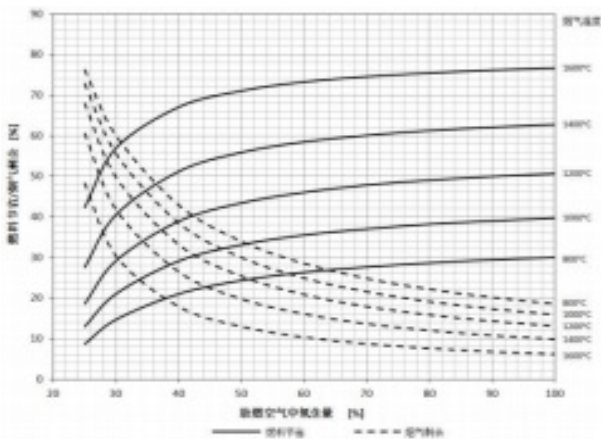


图 2.1 烟气量和节约燃料量对比

### 2.2 全氧燃烧技术特性

全氧燃烧采用稀氧燃烧技术，将燃气和氧气分别以高速喷射，使燃料和氧气与高温烟气快速混合，产生均匀的温度场，降低火焰温度，有利于实现包内温度

均匀和抑制热力型氮化物的产生。此外，还可以灵活调节火焰形状和温度分布（图 2.2）。

与常规燃烧烘烤相比，全氧燃烧烘烤具有以下特性：

采用全氧燃烧技术，改善了钢包内的温度分布，有利于炉衬的均匀加热和延长炉衬寿命。

采用全氧燃烧技术，提高了燃烧温度和火焰辐射能力，减少了钢水罐的烘烤时间。

完善的自动控制系统，减少工人操作难度，并确保烘烤按照工艺曲线进行。

精确的氧燃比（一般按 0.7~1.0）控制，有助于气氛调节，保证炉内气氛按照工艺要求控制。

高效的自动点火和火焰检测系统，严格的安全连锁逻辑控制，保证使用安全。

高效的节能效果，少量的燃烧产物和污染物，满足节能减排的环保要求<sup>[3]</sup>，同时有利于改善炉前和厂房内操作环境。



图 2.2 全氧烘烤火焰及装置

### 2.3 全氧燃烧的特殊技术要求

全氧燃烧节能效果明显，但是由于氧气是比转炉煤气更危险的气体，因此对燃烧的过程管控及设备稳定要求更高，安全管控属于本技术最重要事项。

全氧燃烧流速高，属于急速燃烧，必须有长明火，且长明火火焰刚性要强。

氧燃比必须控制稳定，如果氧燃比控制偏差过大，可能会出现微爆现象，整个烘烤过程氧燃比实时监测控制。

安全连锁多，阀门的稳定运行、控制精度要求高，要做到免维护状态。

氧气属于危险气体，对管道清洁度及焊接有特殊要求，同时对法兰等密闭有严格要求，管材选择及管路施工必须按照规范实施。

## 3 全氧燃烧设备系统组成

全氧燃烧设备采用专用设备，对燃烧的控制方式与常规的更加严格<sup>[3]</sup>。分为氧气阀组、燃气阀组、燃烧器、预接线控制柜等部分。

### 3.1 氧气及燃气控制阀组

燃烧控制阀组要实现如下功能（图 3.1）

#### 3.1.1 泄漏检测

系统每次启动都进行泄漏检测，确保系统时刻处于安全稳定状态。

#### 3.1.2 流量控制及监测

可按照烘烤曲线及设定流量的要求，准确控制氧气及燃气流量，并稳定氧燃比例，确保系统可以按照设定曲线及流量运行。

#### 3.1.3 安全保护

当系统压力及流量出现波动，或者火焰出现异常，按照设定程序进行报警及提示，紧急情况可以立即关闭系统。

#### 3.1.4 火焰监测

启动系统及运行系统过程中，全程监控燃烧情况，出现异常立即关闭系统。



图 3.1 框架式控制阀组

### 3.2 燃烧器

燃烧器由烧嘴本体、点火枪、纯氧点火烧嘴、中心主烧嘴、火焰检测、高温烧嘴砖、特殊绝缘绝热件组成。该燃烧器是经过特殊设计的，能耐高温，不需要水冷。

### 3.3 预接线控制柜

燃烧控制柜主要包含就地 PLC 控制，带触摸屏的 HMI 组态界面，系统开关和报警指示灯。

### 3.4 烘罐控制

由于整个烘烤受制于热电偶反馈的稳定情况，根据钢水罐烘烤工艺，整个控制方式分为三种：

#### 3.4.1 全自动曲线控制

完全按照设定烘烤曲线进行烘烤，也就是一键式烘烤。

#### 3.4.2 分段比例烘烤

按照小、中、大火三个阶段进行烘烤，每个阶段的流量和时间锁定。

#### 3.4.3 半自动人工烘烤

根据设定流量直接启动小、中、大火三种模式，每种模式可以独立设定。

### 3.5 管路流量及电气节点

管路系统分为氧气管路、转炉煤气管路、压缩空气 / 氮气管路，由于氧气的特殊性，对纯氧燃烧的管路系统详细要求如下。

氧气：TOP 点压力 ~10Bar，管道材料采用不锈钢材质。必须进行脱脂和酸洗处理，且焊接采用氩气保护。与烧嘴采用金属软管连接。

压缩空气（氮气）：TOP 点压力 6~8kg，管道材质为镀锌管，与烧嘴采用金属软管连接。

阀组控制电源：接入点为 220V，转换后 PLC 控制电压 24V。

## 4 全氧燃烧技术经济指标

某钢厂采用转炉煤气烘烤 80t 钢水罐跟踪数据。

改前（压缩空气 + 转炉气）烘烤器指标（见表 4-1）

改后（全氧燃烧）烘烤指标（见表 4-2）

对比能源消耗指标，单个钢水罐烘烤用燃气可节约 7080m<sup>3</sup>，全年能节约能源耗消约 110 万元，年减少 CO<sub>2</sub> 排放 1.5 万吨以上，烟气排放减少 70%

表 4-1

序号	烘烤状态	时间 (h)	烘烤温度 (°C)	煤气用量 (m <sup>3</sup> )
1	小火	~60	~350	~5800
2	中火	~48	~650	~9680
3	大火	~24	~900	~7600
4	合计	~132	/	23080

表 4-2

序号	烘烤状态	时间 (h)	烘烤温度 (°C)	煤气用量 (m <sup>3</sup> )
1	小火	~48	~350	~4700
2	中火	~36	~750	~7200
3	大火	~12	~1100	~4100
4	合计	~84	/	16000

## 5 技术应用注意事项与展望

### 5.1 应用注意事项

人员培训：操作人员需熟悉全氧燃烧原理与智能控制系统操作，避免人为失误导致参数偏离。

设备适配：传统烘烤器改造需更换高效节能型烧嘴，配套升级流量控制与温控系统，确保各组件协同运行；

安全防护：氧气管道需严格密封，避免泄漏引发安全事故；烘烤初期控制升温速率，防止钢水罐内衬因热应力过大产生裂纹；

### 5.2 全氧燃烧技术展望

未来在钢包烘烤中的应用将向三个方向发展：一是余热回收集成，采用蓄热或换热技术回收烟气余热，预热氧气或燃气，推动热效率突破 60%；二是智能化升级，结合大数据与 AI 技术实现烘烤曲线自适应优化，进一步提升控温精度与节能效果；三是随着低碳冶金政策的深入推进<sup>[4]</sup>，全氧燃烧技术将与钢水罐预热、精炼工艺协同优化，构建全流程节能降碳体系。

## 6 结语

全氧燃烧技术的核心优势在于消除氮气热损失、提升燃烧效率与火焰温度，烘烤钢水罐的时间缩短 30%-50%，NO<sub>x</sub> 排放削减 90% 以上；

通过优化氧燃比及烘烤曲线，精准操作参数控制，可进一步提升技术应用效果，兼具经济、环境与生产效益。

未来通过智能化升级、余热回收集成与多燃料适配，全氧燃烧技术在钢水罐烘烤中的应用将更加广泛深入，为钢铁行业实现高质量发展提供有力支撑。

### 参考文献

- [1] 山西建龙. 钢包全氧燃烧技术改造降碳效果分析[EB/OL]. 2021.
- [2] 全氧燃烧技术在钢包烘烤过程中的应用研究[J]. 维普期刊, 2025.[3]泰航全氧烤包器实现降本增效和减排环保的核心技术[EB/OL]. 搜狐网, 2025.
- [4] 泰航全氧烤包器怎样做到降本增效和减排环保[EB/OL]. 网易新闻, 2025.

# Application Research of Intelligent Control Technology for New Aircraft Throttle Table

Kunjun Zou

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

## Abstract

The intelligent control technology of the new aircraft throttle, as one of the key technologies in modern aviation, has gained widespread attention in recent years. This technology, by applying sensor technology, adaptive control algorithms, and real-time data processing systems, enables precise control of the aircraft throttle, improving flight safety and performance. The paper provides a detailed introduction to the design and implementation of related core technologies, including data acquisition, algorithm optimization, and decision support system applications. Finally, through case analysis, the practical effectiveness of the new throttle intelligent control technology is validated, demonstrating its significant advantages in enhancing aircraft performance and operational experience.

## Keywords

Intelligent control; Aircraft throttle; Flight safety; Control algorithm; Real-time data processing

## 新型飞机油门台智能化控制技术应用研究

邹坤君

北京青云航空仪表有限公司, 中国·北京 100000

## 摘要

新型飞机油门台智能化控制技术作为现代航空领域的关键技术之一,近年来得到了广泛关注。该技术通过应用传感器技术、自适应控制算法及实时数据处理系统,能够实现对飞机油门的精确控制,提高飞行安全性和飞行性能。文章详细介绍了相关核心技术的设计与实现,包括数据采集、算法优化及决策支持系统的应用。最后,通过案例分析,验证了新型油门台智能化控制技术的实际效果,表明该技术在提升飞机性能和操作体验方面具有显著优势。

## 关键词

智能化控制; 飞机油门台; 飞行安全; 控制算法; 实时数据处理

## 1 引言

随着航空技术的不断发展,飞机的自动化程度逐步提高,而油门控制系统作为飞行安全的重要组成部分,其智能化控制技术的应用显得尤为关键。传统的油门控制系统面临着响应迟缓、精度不高以及安全性不够等问题,而新型智能化控制技术通过集成传感器、实时数据处理和自适应控制算法,为解决这些问题提供了创新性的解决方案。油门台作为飞机控制系统中的核心组件,其智能化技术的应用不仅能够提升飞机的飞行性能,还能够有效增强飞行员的操控体验,从而提高航空安全性。本文将深入探讨新型飞机油门台智能化控制技术的需求分析、核心技术以及应用实例,以期为航空领域的智能化控制技术提供有价值的参考。

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

## 2 智能化控制技术概述

### 2.1 智能化控制技术的定义与发展历程

智能化控制技术是指通过先进的感知、处理和执行系统,使控制过程能够自适应、自动调整和优化,从而提升控制精度与效率。这一技术广泛应用于自动化领域,尤其是在航空航天、智能制造等高精度、高可靠性要求的行业中。智能化控制技术的发展可以追溯到20世纪中期,随着计算机技术、传感器技术及人工智能的突破,智能化控制逐渐从传统的自动化控制走向更高水平的自适应和智能化,并在飞行器、工业设备及交通管理等领域展现出显著优势。

### 2.2 新型飞机油门台的基本构成与工作原理

新型飞机油门台主要由传感器、控制器、执行器和执行指令系统组成。传感器用于采集与发动机控制相关的数据,如主泵开度、油门位置等信息,确保飞行器的推力调节与发动机状态匹配。控制器作为系统的核心,处理传感器信号,并根据设定的飞行任务和条件,指令执行器调节油门位置。执行器根据控制信号调节发动机的功率输出,确保飞行

器的平稳运行。控制器实时监测油门台的状态并将信息反馈给控制器，使系统能够根据实时数据进行自我校正，以优化操作精度和响应速度。通过这些组件的协同工作，油门台能够实现精确的推力控制，提升飞行安全性和性能表现。

### 2.3 智能化控制技术在航空领域的应用背景

航空领域对飞行安全、性能及效率的要求极为严格，智能化控制技术作为提升飞行器操作精度与可靠性的重要手段，正得到越来越广泛的应用。智能化控制技术的引入可以有效减少人为操控误差，优化飞行性能，提高飞行安全性，尤其在复杂气象条件和高负荷飞行任务中，其优势尤为显著。近年来，航空业通过将人工智能、数据分析及自动化控制结合在一起，不断推进飞行器自动化和智能化的进程。例如，在飞行器的自动导航、自动起降系统及发动机控制中，智能化控制技术已成为提升飞行器安全性与效率的核心技术。智能化控制在航空领域的应用不仅提升了飞行器的性能，还增强了飞行员的操控体验，推动了航空行业向更高水平的智能化发展<sup>[1]</sup>。

## 3 新型飞机油门台的智能化控制需求分析

### 3.1 飞行安全性对油门台控制系统的要求

飞行安全是航空领域的核心关注点之一，而油门台作为直接影响飞行控制的重要组件，其精确性和响应速度直接关系到飞行的安全性。随着航空技术的不断发展，飞行器的操控系统日益复杂，要求油门台能够精确调节发动机功率，以应对各种复杂的飞行环境和紧急状况。智能化控制技术能够实时监测飞行器的状态，自动调整油门的输出，避免因人为因素导致的操控错误。通过自适应算法，智能油门台能够在飞行员操作不当或突发情况出现时，迅速进行调整，从而保障飞行器的稳定性与安全性，确保飞行安全不受威胁<sup>[2]</sup>。

### 3.2 智能化控制对飞行性能提升的作用

智能化控制技术对飞行性能的提升主要体现在其对飞行过程的精细调控能力。通过实时数据采集与分析，智能油门台能够根据飞行环境的变化自动调整发动机输出，从而优化飞行器的升力、阻力和燃油效率。在复杂的飞行任务中，智能化控制系统能够根据实时数据自动调整油门，保证飞行器在不同工况下达到最佳性能。例如，在巡航、加速或爬升等不同飞行阶段，油门台通过精确的控制能够保持飞行器的稳定性与高效性，提高飞行任务的完成度。同时，智能化控制能够有效减少油耗，提升燃油经济性，降低航空公司的运营成本。

### 3.3 智能化控制技术在提高驾驶员操控体验中的价值

智能化控制技术不仅在飞行性能上展现出重要作用，还能显著提升飞行员的操控体验。通过与飞行员操作意图的实时对接，智能油门台能够根据飞行员的指令进行快速而精确的响应，减轻飞行员的操作负担。智能化控制能够实时感知飞行员的操控动作并提供及时反馈，使飞行员能够更加专

注于飞行任务的整体操作而不被琐碎的调节操作所困扰。此外，在突发情况或飞行员操作失误时，智能化系统能够提供必要的干预措施，从而有效避免操控错误，增强飞行员的信心 and 安全感。通过这种方式，智能化控制在提升飞行员工作舒适度和操作精度方面具有显著的价值<sup>[3]</sup>。

## 4 新型飞机油门台智能化控制技术的核心技术

### 4.1 传感器与数据采集技术

传感器与数据采集技术在智能化控制系统中承担“状态感知—信号转换—实时传输”的基础职能，用于对油门台操纵过程中的关键物理量进行连续监测，并将有效数据提供给控制与监控单元，以支撑油门指令的精确生成、执行一致性校核及安全保护逻辑触发。在新型飞机油门台中，核心传感器应以位置传感器与力传感器为主：位置传感器用于对油门操纵杆位移或角度进行高精度测量，形成油门指令的直接量化依据，保证系统能够实时掌握操纵杆的实际位置与变化速率；力传感器用于监测油门操纵杆的操纵力而非压力参数，数据采集系统负责对上述传感器输出信号进行调理与数字化处理，通常包括滤波、放大、隔离、标定补偿与 A/D 转换等环节，并在满足实时性的前提下完成同步采样与时间戳对齐，确保位置与推拉力数据在同一控制周期内可比可用，保障操纵指令准确传递、异常工况可检测可追溯以及控制策略有效落地的关键支撑。

### 4.2 自适应控制算法的设计与应用

自适应控制算法在智能化油门台中的应用，能够根据飞行器状态和环境的变化，自动调整控制策略以达到最佳飞行性能。该算法通过实时监测飞行器的动态响应，结合飞行任务的要求，调整控制参数，使油门台的响应与飞行器的需求相匹配。传统的油门控制算法通常依赖预设的模型，而自适应控制算法能够根据实时数据进行调整，具备更高的灵活性与自我优化能力。例如，在飞行器进入恶劣气候条件或执行高负荷飞行任务时，控制算法能够自动调节油门输出，确保飞行器稳定运行。自适应控制算法还包括模糊控制、神经网络控制等方法，通过不断地学习和修正控制模型，使系统在长期使用过程中不断提高效率，减少人为干预，提高系统的自动化水平。通过算法优化，油门台能够更好地响应飞行员的操作意图及环境变化，提升飞行安全性与飞行员操作的便捷性。

### 4.3 实时数据处理与决策支持系统

实时数据处理与决策支持系统是智能化控制技术中不可或缺的一部分，负责将各类传感器采集的数据进行高效处理和分析，以支持实时决策。通过高速数据传输和处理技术，系统能够在毫秒级别内完成数据的采集、过滤、融合和分析，快速响应飞行状态的变化。在飞机油门台的应用中，实时数据处理系统将来自不同传感器的数据进行整合，为控制系统提供全面的飞行信息<sup>[4]</sup>。决策支持系统基于处理后的

数据,结合飞行任务的要求和预设的飞行性能模型,自动生成最优控制策略。这些决策不仅考虑了飞行器当前的状态,还通过预测模型分析未来的飞行趋势,从而提前调整油门台的输出。实时数据处理与决策支持系统的优势在于其高效、精准的决策能力,能够在各种复杂环境下迅速作出反应,确保飞行器能够在不同飞行阶段保持最佳性能,减少因信息延迟或计算误差带来的安全风险。

## 5 新型飞机油门台智能化控制技术的应用实例分析

### 5.1 应用场景与技术需求

在我国商用飞机研制与应用过程中,以我国首型大型客机 Comac C919 为代表的机型对油门台智能化控制技术提出了现场实用化需求。该机型配备了先进的数字化航电系统和电传操纵系统,其发动机推力控制需要通过集成油门台、自动油门系统与飞行管理系统(FMS)进行协调控制,以满足不同阶段对空速、爬升率、巡航速度、下降率等参数的精确控制要求。我国民航对适航安全、燃油经济性和飞行性能的监管指标已明确规定自动控制系统应满足严格的响应时间及冗余可靠性要求,这就要求智能油门台能够实时采集飞行参数、执行动态控制,并实现高可靠性数据传输和容错处理。在航电架构中,油门台智能化技术应与数字飞行控制系统紧密融合,确保在各种复杂气象及飞行任务条件下能够维持预设的空速和推力策略,实现对发动机功率的自动匹配,提高整个系统的安全性及操作一致性。

### 5.2 技术实施过程与关键技术

针对 C919 等国产机型的油门台智能化控制实施,首先在机载控制计算平台中集成自动油门功能模块,该模块与油门操纵杆、发动机控制器(如 FADEC)及飞控计算机进行联动,通过电传线和数字总线实现数据交换。系统采用冗余传感器采集空速、高度、发动机转速等关键飞行数据,并通过高速总线传输至控制处理单元,再由自适应控制算法计算最优推力指令。实施过程中,在油门执行机构上安装高精度编码器和力矩传感器,以实时监测油门杆位置和状态,同时利用直接数字控制(DDC)技术驱动伺服执行器,使油门台能够按需求精确调整推力输出。开发团队通过地面仿真平台和飞行试验验证了油门智能控制逻辑,对关键算法参数进行了迭代优化,在风洞测试及高动态试飞中检验了系统的稳定性与响应性,确保控制指令在毫秒级内完成传输和执行,并

具备异常自诊断和切换能力,提高了系统整体的实施效果<sup>[5]</sup>。

### 5.3 应用效果与性能评估

油门台智能化控制技术在 C919 等国产客机上的应用取得了显著效果,通过将自动油门与飞行管理系统集成,使该系统能够在起飞、巡航、下降等阶段自动调节推力,实现航速保持、燃油优化等目标。在大量试飞数据分析中,智能油门台控制系统显著减少了飞行员的操作负担,使飞行状态误差维持在可接受范围内,并提高了燃油利用效率,统计数据显示该系统在巡航阶段的油耗降低率较传统手动控制平均减少数个百分点,提升了运营经济性。此外,该智能控制技术通过冗余设计和故障隔离机制,在飞行控制系统中表现出良好的容错性和高可靠性,有效降低了因操控失误导致的风险,增强了适航安全性。系统在多个气候条件和飞行工况下进行验证,表现出良好的动态响应能力,能够保证飞机在复杂空域条件下保持稳定飞行,有效提升飞行性能指标。

## 6 结语

通过对新型飞机油门台智能化控制技术的应用分析可以看出,该技术在提高飞行器操作精度、增强飞行安全性和提升飞行员操控体验方面具有重要作用。随着航空技术的不断进步,智能化控制系统在飞机中的应用日益广泛,特别是在如 C919 等国产飞机的研制过程中,智能油门台通过自适应控制算法、实时数据处理和冗余设计,已成功提高了飞行效率、优化了燃油消耗,并在复杂的飞行环境中展现了极高的可靠性。未来,随着技术的不断完善,智能化油门台将进一步推动航空系统的智能化发展,助力提升飞行安全性和航行性能,为航空行业带来更高的经济效益和技术革新。

### 参考文献

- [1] 褚迅迅,胡永伟.一种飞机电传油门台综合检测系统的设计与实现[J].工业控制计算机,2023,36(10):4-6+9.
- [2] 李星航.某国产化自动油门台控制系统设计[D].导师:刘文涛.哈尔滨工业大学,2021.
- [3] 张新明,陈茹.民用飞机二级子系统油门台的功能危害性分析[A].2020(第九届)民用飞机航电国际论坛论文集[C].中国航空学会:2020:17-20.
- [4] 马瑞聪.某型民用飞机自动油门台控制系统开发[D].导师:刘文涛.哈尔滨工业大学,2020.
- [5] 娄本山.基于429总线的飞机油门操纵杆自动控制系统研制[D].导师:李霞.哈尔滨工程大学,2020.

# Optimization of Electrical Control Systems in Industrial Automation Production Lines

Guangkun Zou

China National Materials Construction Co., Ltd., Beijing, 100176, China

## Abstract

With the rapid development of industrial automation, the application of electrical control systems in production lines has become increasingly widespread. By optimizing the electrical control system, it is possible to not only improve production efficiency but also effectively reduce energy consumption, ensuring the stability and reliability of the production process. This paper analyzes the functions and roles of electrical control systems in industrial automation production lines, discusses the main challenges in their practical application, and proposes optimization paths based on automation control theory. Through dual optimization of hardware and software, as well as the application of system integration and intelligent control technologies, the overall performance of the electrical control system can be significantly enhanced. By combining practical case studies, this paper further analyzes the technical paths and implementation strategies for optimizing electrical control systems, aiming to provide theoretical support and practical guidance for the optimization of industrial automation production lines.

## Keywords

Electrical control system; Automated production line; Optimization strategy; System integration; Intelligent control

# 工业自动化生产线中的电气控制系统优化

邹广坤

中材建设有限公司, 中国·北京 100176

## 摘要

随着工业自动化的快速发展, 电气控制系统在生产线中的应用愈加广泛。通过优化电气控制系统, 不仅能够提升生产效率, 还能有效降低能耗, 确保生产过程的稳定性与可靠性。本文分析了工业自动化生产线电气控制系统的功能与作用, 探讨了其在实际应用中的主要挑战, 并基于自动化控制理论提出了优化路径。通过硬件、软件的双重优化, 以及系统集成和智能化控制技术的应用, 可以显著提升电气控制系统的整体性能。结合实际案例, 本文进一步分析了电气控制系统优化的技术路径和实施策略, 旨在为工业自动化生产线的优化提供理论支持和实践指导。

## 关键词

电气控制系统; 自动化生产线; 优化策略; 系统集成; 智能化控制

## 1 引言

工业自动化生产线作为现代制造业的核心组成部分, 其电气控制系统是实现自动化、高效化生产的关键。随着工业生产规模的扩大和生产模式的不断变化, 传统电气控制系统面临着诸如系统稳定性差、能效低、生产效率不高等问题。因此, 提升电气控制系统的性能, 优化控制方案, 已成为工业自动化领域亟待解决的重要课题。近年来, 随着控制技术、智能化技术和大数据应用的进步, 电气控制系统的优化迎来了新的机遇。本文将重点分析电气控制系统的工作原理与现状, 探讨优化电气控制系统的理论基础, 并提出具体的技术路径和实施策略, 旨在提升工业自动化生产线的控制水平和

生产效益。

## 2 工业自动化生产线电气控制系统的功能与作用

### 2.1 电气控制系统的基本构成与工作原理

电气控制系统是工业自动化生产线中的核心部分, 主要由控制器、传感器、执行器和电气元件等组成。控制器一般采用 PLC 或 DCS 系统, 负责根据输入信号对系统进行指令发出, 调节设备的运行状态。传感器用于监测生产线中的各类数据, 如温度、压力、流量等参数, 确保生产过程符合预定要求。执行器则根据控制信号驱动生产设备进行动作, 如电动机驱动机械手臂的运动。电气元件如接触器、继电器和断路器等负责电流的开关控制, 确保电路的安全与稳定。电气控制系统通过实时监控与反馈调整, 确保生产线设备在最佳状态下运行, 实现高效、稳定的生产<sup>[1]</sup>。

【作者简介】邹广坤(1984—), 男, 中国河北唐山人, 本科, 工程师, 从事电气自动化研究。

## 2.2 电气控制系统在工业生产线中的应用

电气控制系统在工业生产线中扮演着至关重要的角色，广泛应用于机械制造、化工、汽车、电子等多个行业。在机械制造业中，电气控制系统用于自动化控制各类加工设备，实现生产流程的自动化与高效化。在化工行业，电气控制系统负责控制反应过程的温度、压力和流量等参数，确保化学反应的稳定进行。在汽车生产线中，电气控制系统通过控制机器人焊接、涂装等环节，提高生产精度与工作效率。通过高效的控制系统，生产线能够实现精确的调度与实时监控，提升产品质量，减少人力成本，确保生产的连续性与安全性。

## 3 工业自动化电气控制系统优化的理论基础

### 3.1 自动化控制理论与优化模型

自动化控制理论是电气控制系统优化的理论基础，它通过研究自动化控制规律，制定优化方案，确保系统高效、稳定地运行。常用的优化模型包括经典控制理论中的 PID 控制、模糊控制、现代控制理论中的状态空间模型等。PID 控制器通过比例、积分和微分的控制方式，实现对生产线设备的精确控制，广泛应用于温度、速度和位置控制。模糊控制则通过模糊逻辑算法，在处理不确定性和非线性系统时发挥重要作用，能够在复杂的生产环境中实现更好的控制效果。状态空间模型则为多变量、多目标系统提供了优化路径，通过对系统状态的综合分析与建模，进一步提升系统的性能和响应速度。

### 3.2 控制算法在电气控制系统中的应用

控制算法在电气控制系统中的应用广泛且至关重要，常见的控制算法包括 PID 控制、模糊控制、神经网络控制、最优控制等。PID 控制是最基础且常用的控制算法，适用于大多数线性控制系统，能够通过实时调节系统的比例、积分和微分参数，保证系统输出与目标设定值之间的最优匹配。模糊控制则不依赖于精确的数学模型，适用于非线性系统或不确定系统，能够根据系统的输入输出模糊规则进行控制。神经网络控制则通过模拟人脑的神经网络进行模式识别和学习，适应复杂的控制任务，尤其在复杂的非线性系统中具有优越性。最优控制算法则通过数学建模，寻找最优控制策略，实现系统性能的最大化，广泛应用于多目标优化问题中。

### 3.3 优化技术对电气控制系统性能提升的理论支撑

优化技术在电气控制系统中的应用，为系统性能的提升提供了强有力的理论支撑。通过引入优化算法，系统可以在满足约束条件的同时，达到最优的运行状态。常见的优化技术包括遗传算法、粒子群优化算法、模拟退火算法等，这些技术能够在较大的参数空间中找到全局最优解，提高控制系统的性能。遗传算法通过模拟生物进化过程，解决复杂的优化问题，适用于多目标、多约束的优化任务。粒子群优化算法通过模拟粒子群体的移动过程，寻找最优解，适合解决

参数调节问题。模拟退火算法则通过模拟物理退火过程，能够避免陷入局部最优解，适用于大规模的优化问题。应用这些优化技术，可以在电气控制系统的设计与运行过程中，进一步提高系统的精度、稳定性和可靠性。

## 4 工业自动化生产线电气控制系统优化实施的技术路径

### 4.1 电气控制系统优化需求分析与解决方案设计

在进行电气控制系统优化时，需求分析是关键的第一步。首先，需要对现有系统的性能数据进行详细的收集和分折。这包括电气控制系统的响应时间、功率消耗、设备运行稳定性、故障率等关键指标。比如，在某一生产线中，PLC 控制系统的响应时间为 200ms，而执行器的运动延迟为 1s，这导致了生产效率低下和产品质量不稳定。需求分析时，数据采集系统和传感器的精度也应被重点考虑，精度不足的传感器可能会导致控制信号的不准确，影响整个生产过程的稳定性。根据这些数据，解决方案的设计应包括硬件和软件两方面的优化。在硬件方面，可能需要更换更高效的 PLC，如更换传统的 S7-1200 PLC 为性能更强的 S7-1500 PLC，以提高控制处理速度。在软件方面，优化控制算法，比如使用 PID 自整定控制算法来减少系统响应时间和提高控制精度<sup>[2]</sup>。通过这些优化，电气控制系统的响应时间可以从 200ms 降低至 100ms，系统稳定性大幅提高。

### 4.2 优化实施过程中的技术选型与配置

优化实施过程中，技术选型应根据生产线的特点和需求来进行选择。首先，PLC 和 DCS 的选择要考虑生产线的规模与复杂性。例如，在中小型自动化生产线中，可以选择具备高速数据处理能力的 S7-1500 系列 PLC，而对于大型复杂的生产线，推荐使用基于 Ethernet/IP 协议的 DCS 系统，具备更强的分布式控制能力。在执行器方面，对于要求高精度调速的设备，应选用伺服电机和变频器，例如使用交流伺服电机（如 Yaskawa 或 Siemens 品牌）配合变频器以精确控制电机转速，提升设备的响应速度和精度。根据生产要求选择传感器也是技术选型的关键，对于高温或强腐蚀环境的生产线，应选用具有抗干扰能力的传感器，例如温度传感器采用 RTD（铂电阻温度探头），压力传感器选用精度为  $\pm 0.5\%FS$  的智能传感器。同时，数据传输采用 Ethernet 和 PROFIBUS 等工业通信协议，确保设备间的数据高效、稳定传输，并通过 SCADA 系统进行实时监控和远程控制。

### 4.3 电气控制系统优化实施的步骤与流程

电气控制系统的优化实施包括以下几个步骤：首先进行系统调研与数据采集，收集生产线各环节的详细运行数据，包括设备负载、运行温度、振动频率等。在数据采集过程中，可以通过在关键设备上安装传感器来实时监控设备状态，如压力传感器、温度传感器、流量传感器等。接下来，根据收集的数据进行性能瓶颈分析，识别出系统中需要优化

的部分,例如某些电机的启动时间过长或 PLC 的数据处理能力无法满足生产需求。然后,根据分析结果,选择合适的优化方案,如更换高效能 PLC 或执行器、改进控制算法等。系统测试与调试是最后一步,测试优化后的系统,监测生产线的响应时间、设备运行效率等,确保优化后的系统能够达到设计预期。如,通过优化后的系统,将 PLC 的响应时间缩短到 50ms,电机控制的精度提高到  $\pm 0.1\%$ 。优化实施后,还需要进行长期跟踪与数据分析,评估优化效果,确保系统稳定运行。

## 5 提升工业自动化生产线电气控制系统的优化策略

### 5.1 硬件优化策略与设备更新

硬件优化策略主要包括对电气控制系统中关键设备的更新与升级。例如,在设备更新过程中,将传统的直流电机驱动系统替换为更高效的伺服电机系统。伺服电机提供更高的调节精度和更快的响应速度,适用于需要精确控制速度和位置的生产线。此外,采用更高效能的 PLC 控制器,尤其是采用如 Siemens S7-1500 系列控制器,可以大幅提升数据处理速度和控制精度。这种 PLC 相比传统的 S7-1200 控制器,其处理速度提升了 40%,能够处理更多的输入输出点,适应复杂自动化需求。在传感器方面,选用更高精度的传感器,如精度达到 0.1%FS 的压力传感器与温度传感器,可以有效提高数据采集的准确性,减少设备运行中的误差<sup>[1]</sup>。

### 5.2 控制软件优化与算法改进

控制软件优化与算法改进是提升电气控制系统性能的重要手段。PID 控制算法是最常用的基础控制算法,通过调整比例、积分和微分参数,控制系统可以实现精确的反馈调节。在优化过程中,可以根据生产线的具体要求,使用自适应 PID 控制算法,根据实际生产环境中的负荷变化自动调整控制参数,从而提高系统响应速度和精度。为了进一步提高控制性能,利用模糊控制算法进行优化是一个有效的选择。模糊控制算法不依赖于系统的精确数学模型,适合处理不确定和复杂的生产环境,能够在不完全知识条件下优化系统。通过优化控制算法,能够提升系统的稳定性,使得生产线在负荷波动较大的情况下仍能维持高效、稳定运行。

### 5.3 系统集成与智能化控制技术应用

在工业自动化生产线中,系统集成与智能化控制技术的应用可以大幅提高电气控制系统的整体性能。通过将 PLC、SCADA、MES 等系统进行有效集成,形成一个全方位的数据监控与管理平台,实现从设备到生产过程的全面自动化管理。通过集成,生产数据可以实时传输到云平台,通过大数据分析技术进行实时监控与分析,为生产优化提供决策支持。同时,智能化控制技术,如机器学习和人工智能算法的应用,可以根据历史数据预测设备故障,优化设备的运行状态,减少不必要的停机时间。例如,基于人工智能的预测维护系统能够在设备出现故障前进行预警,极大地减少了设备故障对生产线的影 响<sup>[4]</sup>。通过这种集成与智能化控制技术的结合,能够有效提升生产线的自动化水平,提高生产效率和产品质量。

## 6 结语

通过对工业自动化生产线电气控制系统的优化研究,可以看出,优化技术在提升生产效率、降低能耗、提高设备稳定性方面具有重要作用。电气控制系统的优化不仅包括硬件设备的更新与改进,还涉及控制算法的优化与智能化技术的应用。随着技术的不断进步,自动化生产线的控制系统正朝着更高效、智能的方向发展。在实施优化过程中,结合具体的生产需求进行精准的技术选型与配置,能够实现更好的生产控制效果。优化后的电气控制系统能够大幅提升生产线的响应速度、精度及系统稳定性,减少故障停机时间,为企业带来更高的经济效益和市场竞争能力。未来,随着智能化与大数据技术的进一步发展,电气控制系统优化将继续推进,并为智能制造的发展提供更加坚实的基础。

### 参考文献

- [1] 谢卫彬.智能化电气控制系统在工业自动化中的应用与发展趋势[J].新疆钢铁,2025,(04):260-262.
- [2] 张泰然,王国录,董康猛.基于PLC的电气系统与机械传动协同控制技术研究[J].工程建设与设计,2025,(23):168-170.
- [3] 崔学森.电气自动化系统在工业生产中的应用研究[J].产业创新研究,2025,(18):74-76.
- [4] 白宇峰.PLC技术在自动化生产线中的应用[J].电子技术,2024,53(02):104-105.

# Research on the improvement plan for the safe airworthiness of old cargo aircraft

Jinsheng Xue Jiahong Qu

China Post Airlines Co., Ltd., Beijing, 100032, China

## Abstract

In recent years, China's civil aviation transportation has achieved significant development. The Party Group of the Civil Aviation Administration of China (CAAC) has conscientiously studied and implemented the spirit of the series of important instructions and directives issued by the state on civil aviation work, especially on civil aviation safety work, and has always regarded safety work as a top priority, ensuring a stable and controllable safety situation in the industry. However, with the rapid development of transportation aviation, the weaknesses of old cargo aircraft in terms of safety guarantee capabilities have become increasingly prominent. Old cargo aircraft have characteristics and difficulties different from passenger aircraft in various aspects such as airworthiness engineering management, aviation material support, and aircraft introduction. They are characterized by complex configurations, low reliability levels, high failure rates, difficulties in aviation material procurement and repair, and high aviation material support costs, resulting in many safety management issues, difficult management, high costs, and slow improvement for old cargo aircraft. To address the above industry challenges, this paper closely focuses on key aspects such as airworthiness management, technical control, and source governance, and proposes a plan to enhance the safety and airworthiness capabilities of old cargo aircraft. The aim is to provide theoretical references and insights for the high-quality and safe development of the cargo aviation industry.

## Keywords

Old cargo aircraft; Airworthiness; Safety management; Improvement plan

## 老旧货机安全适航能力提升方案研究

薛金升 曲家洪

中国邮政航空有限责任公司, 中国·北京 100032

## 摘要

近年来, 中国民航的运输航空取得了长足的发展。民航局党组认真学习贯彻国家关于民航工作特别是民航安全工作的系列重要指示批示精神, 始终把安全工作当作头等大事来抓, 确保了行业安全形势平稳可控。但是, 伴随着运输航空的快速发展, 老旧货机安全保障能力薄弱的短板也越发凸显。老旧货机在适航工程管理、航材保障、飞机引进等多方面均存在区别于客航的特点与难点, 存在构型复杂、可靠性水平低、故障率高、航材采购及送修困难、航材保障成本高等情况, 造成了老旧货机安全管理问题多、管理难、成本高、提升慢的局面。为破解以上行业难题, 本文紧紧围绕适航管理、技术管控、源头治理等关键环节, 提出老旧货机安全适航能力提升方案, 旨在为货运航空行业安全高质量发展提供理论借鉴与参考。

## 关键词

老旧货机; 适航能力; 安全管理; 提升方案

## 1 引言

今年, 国务院安委会将“持续深化基础薄弱、管控能力差的中小航空公司安全治理”作为《国务院安委会 2023 年考核工作要点》的重点任务。在中小航司安全治理工作中, 老旧货机适航管理因其机队特性、运行场景与保障体系的特殊性, 成为安全管控工作的重中之重, 为解决老旧货机适航安全薄弱环节, 补齐安全保障能力短板, 提升安全保障能力, 保证行业运行安全和高质量发展, 制定本方案。

## 2 总体要求

以新时代中国特色社会主义思想为指导, 深入贯彻党的二十大精神, 牢固树立和践行总体国家安全观, 完整、准确、全面贯彻新发展理念, 坚持问题导向、坚持系统观念、坚持守正创新, 着力破解瓶颈性、根源性、本质性问题, 抓短板、解难题, 通过构建系统化、规范化、精细化的老旧货机适航安全管理体系, 全面提升老旧货机适航安全保障能力, 持续优化飞机飞行品质, 全面提升老旧货机适航安全保障能力, 提升飞行品质, 降低全生命周期运行成本, 坚决守住“航空运行绝对安全、人民生命财产安全绝对安全”的底线。本方案以适航维修为核心抓手, 从管理体制、技术管控、源头治理、组织保障等方面提出具体的实施举措, 以助力老旧

【作者简介】薛金升(1983—)女, 中国河北文安人, 硕士, 助理工程师, 从事民航机务工程管理、机队规划研究。

货机适航安全保障能力实现系统性提升，为货运航空行业安全高质量发展筑牢技术与管理根基。

### 3 完善适航管理体制机制，加强人力资质建设

完善管理机制。在民航局层面建立老旧货机适航安全管理体制机制，明确行业主管部门、地区管理局、货运航空公司的三级管理职责，形成权责清晰、协同高效的管理体系，以行业安全运行要求为导向，推动老旧货机运营企业开展适航管理体系优化改进，针对老旧货机运行特点完善企业安全管理体系相关条款，进一步细化适航管理流程与操作规范。建立老旧货机运行经验教训总结与共享机制，行业主管部门定期收集、分析老旧货机运行过程中的典型案例与管控经验，为货运航空公司提供针对性指导。并结合行业发展实际，动态细化老旧货机适航安全监管要求，明确监管重点、监管频次与监管标准，提升行业监管的精准性与有效性<sup>[1]</sup>。（飞标司牵头，各地区管理局、相关航空公司参加）

加强老旧货机维修人员培养。根据机队引进计划，针对性地加强老旧货机维修人员的储备和培养。根据机队机型特点、规模布局匹配专业维修人员队伍，确保人员数量、专业能力与机队运行需求高度适配。进一步深化国际合作与技术交流，加强与 FAA、波音公司等国际航空管理机构与飞机制造企业的合作，引进先进的老旧货机维修管理理念与技术方法。加强结构工程管理人员培养，补齐老旧货机结构损伤评估、修复与管理的专业人才短板。强化一线维修人员以及安全质量相关检查员的针对性培训，充分发挥国内主流维修、维修、大修企业（MRO）的技术与经验优势，鼓励其依托自身老旧货机维修实践积累，开展专题技术培训、技能比武与行业技术交流互动，搭建老旧货机维修技术共享平台，推动行业整体维修技术水平与人员专业能力提升。（飞标司牵头，各地区管理局、相关航空公司参加）

### 4 强化技术状态管控，提升机队可靠性水平

优化保留放行管理。聚焦重要关键事件，改善老旧货机运行品质，加强老旧货机保留放行管理，系统梳理老旧货机各机型重要系统故障保留条目，结合机型适航要求与运行实际，制定差异化的故障保留审批标准、管控流程与解除时限，明确不同等级故障的保留权限与监管要求。加强故障保留阶段性动态管控，建立故障保留台账，实时跟踪故障处置进度，强化排故过程中的技术支持与资源调配，提升排故效率与航材保障精准性，最大限度缩短故障保留时间，减少带故障运行时长。定期分析故障保留处置数据，总结典型问题与改进方向，持续优化故障保留管理流程，实现老旧货机故障保留放行的规范化、精细化管理。（相关航空公司参加）

提升飞机结构管理水平。应用新技术手段强化结构业务信息采集，推动有条件公司建立结构业务信息与飞机三维模型的空间位置关联关系，依托数字化技术平台，运用结构损伤量化分析、数理统计建模、故障热力图呈现等技术方法，

构建老旧货机结构可靠性分析模型，强化机队结构可靠性动态管理。重点监控并分析单机与机队结构持续适航安全关键指标变化趋势，提前识别结构损伤潜在风险，制定针对性的预防与维修措施，实现老旧货机结构管理从“事后维修”向“事前预防、事中管控”的转变，进而为飞机结构安全保驾护航<sup>[2]</sup>。（飞标司牵头，各地区管理局、相关航空公司参加）

提升飞机可靠性水平。成立老旧货机专项工作组，组织国内相关货运航司专家，组建专业技术攻关团队。强化维修技术管理，统筹工程技术力量进行重点系统关键技术攻关，重点关注结构损伤、高寿部件、线路老化、油液渗漏，关键飞机零部件问题等典型故障和技术问题，针对性制定补充维护措施及 DMDOR 方案研讨，细化不同机型、不同运行年限老旧货机的维护周期、维护项目与技术标准。建立重大故障技术决策机制，明确重大故障的研判标准、处置流程与技术支撑体系，提升重大故障处置的科学性与时效性。并通过加强各公司技术交流和经验共享，收集分析国际同类机型典型重大机械原因不安全事件，深入剖析事故成因与防控措施，结合国内运行实际研究制定可行的预防与改进措施，以有效减少重大故障发生频次，实现老旧货机可靠性管理水平的不断提升。（飞标司牵头，各地区管理局、相关航空公司参加）

加强单机状态管控。按照已发布的《航空器投入运行和年度适航状态检查》（AC-121-FS-052R2）咨询通告，明确从型号符合性确认、技术资料审核、运行规范加入到适航状态持续监控的全流程操作标准。针对 CCAR-26 部持续适航与安全改进或者等效适航要求进行文件和记录检查，确保文件资料的完整性、准确性与有效性，夯实单机适航管理基础。在年度适航检查中要求特别关注涉及疲劳关键结构、电器线路互联系统、燃油箱系统涉及修理和改装状况，细化检查项目、检测标准与操作流程，强化对上述关键部位的适航管控。明确自查责任主体与考核要求，提升年检自查工作的执行力度与实施效果，确保单机适航状态持续符合运行要求。（飞标司牵头，各地区管理局、相关航空公司参加）

强化年检执行效果。依托于飞标管理手册第三卷《维修监察员手册》，深化老旧货机年度适航检查监管模式改革，摒弃传统普检模式中存在的形式化、走过场等问题，构建分级分类、重点聚焦、精准抽查的年检监管体系。根据货运航空公司的安全管理水平、机队技术状态、运行安全记录等指标，对航司与机队实施分级分类管理，针对安全管理基础薄弱、机队老化程度高的航司与重点机型，适当提高检查频次、扩大检查范围、细化检查项目。根据老旧货机适航安全关键环节与高频风险点，确定年检重点工作内容，实现检查资源的精准配置，真正发挥年检的机队状态管控作用和效果<sup>[3]</sup>。（飞标司牵头，各地区管理局、相关航空公司参加）

### 5 加强源头管控，提升机队构型管理能力

加强老旧货机构型管理。针对老旧货机来源复杂、构

型差异大的特点,加强货运航空公司老旧货机构型管理能力建设。各运营企业需建立老旧货机全生命周期构型管理台账,全面梳理每架飞机的原始构型、改装记录、部件更换情况等信息,实现构型信息的数字化、动态化管理。规范老旧货机改装全流程管理,明确改装项目的审批标准、技术要求、施工监管与适航验证流程,强化改装过程中的质量管控与技术审核,确保改装工作符合适航要求,从源头减少构型混乱问题,确保老旧货机构型管理的有效性和精细化。(各地区管理局、相关航空公司参加)

优化飞机引进管理。规范引进流程,把好老旧货机引进关,从引进源头降低机队构型的复杂性,加强引进过程中的综合评估,引导、鼓励、支持航空公司有序置换 B737 CL 等机型,避免和逐步减少货运航空公司机队“旧、杂、混”的情况。加强监修监改工程管理,针对客改货机型及过渡检环节,组建专业监修团队,全程跟踪施工过程,强化质量管控;结合飞机维修记录、技术资料全面审查,系统梳理飞机技术状态,精准识别潜在缺陷与安全隐患,利用客改货及过渡检的有利时机及时完成缺陷整改与性能优化。针对引进的老旧货机,制定个性化、系统化的持续适航管控措施,明确后续维修、检测与监控要求,确保飞机以良好的技术状态投入商业运行。(飞标司牵头,计划司、各地区管理局、相关航空公司参加)

强化航材供应保障。修订《航空器拆解》(AC-145-FS-017)咨询通告,与美国拆解协会 AFRA 协会签署合作备忘录,通过建立拆解件数据库和拆解件挂签等管控措施,确保拆解件合格可靠,解决老旧货机因停产导致的航材保障资源减少和保障成本高等问题。积极促进国内飞机拆解单位、关键部件维修单位和航材保税仓库建设,形成航材供应保障一体化和规模化。(飞标司牵头,各地区管理局、相关航空公司、维修单位参加)

## 6 加强组织保障,推动方案落地见效

加强组织实施。民航局成立专项工作组,统筹推动本

方案的落实落地,专项工作组由飞标司牵头组建,各相关业务司局、各地区管理局为成员单位,明确工作组职责分工与工作机制,定期召开工作推进会,跟踪方案实施进度,统筹推进各项专项工作与行动。方案实施过程中遇到的重大问题与重要事项,专项工作组需及时向民航局党组请示报告,确保方案实施方向正确、推进有力<sup>[4]</sup>。(飞标司牵头,各地区管理局参加)

健全落实机制。各地区、各有关单位健全贯彻落实工作机制,制定实施方案,建立工作台账,明确目标任务、时间表和路线图,层层压实责任。各地区管理局要会同有关单位,密切跟踪工作进展情况,加强统筹协调、事中事后评估,定期开展督查督办和检查抽查。各有关方面要注重总结巩固行动成果,对新情况新问题及时分析评估,建立健全风险识别和防范机制,做好风险管控和应对处置工作。(各地区管理局牵头,各相关单位参加)

## 7 结语

老旧货机安全适航能力提升是民航货运行业安全高质量发展的一环,为此,针对老旧货机适航安全领域的突出痛点与核心难题,需要从管理体制机制、技术状态管控、源头治理防控、组织保障落实四个方面构建针对性、系统化的提升方案。并通过民航局、各地区管理局、货运航空公司、维修企业等多方主体的协同发力,严格落实各项工作举措,层层压实安全责任,夯实民航货运行业安全发展根基,推动民航货运行业实现安全、高效、可持续的高质量发展。

## 参考文献

- [1] 贾旭颖.民航货机装载优化模型的构建与实现[D].中国民航大学,2018.
- [2] 朱钰,江小霞,石明霞.基于ARM的回转式起货机安全监控系统的研发[J].船舶工程,2015,37(02):63-67.
- [3] 徐刚.浅谈货机装载相关安全问题[J].空运商务,2007,(17):19-21.
- [4] 徐刚.浅谈货机载重平衡安全问题[J].空运商务,2007,(12):19-21.

# Common Faults and Operation and Maintenance Strategies of Electric Motor in Thermal Power Plant

Jiannan Wu

Liaoning Datang International Huludao Thermal Power Co., Ltd., Huludao, Liaoning, 125000, China

## Abstract

Thermal power plants operate with numerous auxiliary machines under continuous conditions, where motors play critical roles in coal feeding, induced draft supply, condensate circulation, circulating water systems, and desulfurization slurry processes. Field maintenance personnel primarily encounter progressive degradation caused by prolonged full-load operation, frequent start-stop cycles, and combined effects of dust, moisture, and vibration, rather than one-time failures. This paper focuses on common squirrel-cage induction motors and selected high-voltage motors, analyzing four high-frequency issues—insulation, bearings, rotors, and power circuits—by integrating unit maintenance schedules, team inspection protocols, and preventive testing requirements. The findings are systematically documented in executable work orders and handover records. The study concludes with a field-oriented O&M strategy package to reduce unplanned outages and spare parts consumption.

## Keywords

Thermal power plant; Electric motor; Common faults; Operation and maintenance; Strategy

## 火电厂电动机常见故障及运维策略

吴健男

辽宁大唐国际葫芦岛热电有限责任公司，中国·辽宁 葫芦岛 125000

## 摘要

火电厂辅机多、工况连续，电动机从给煤、送引风、凝结水、循环水到脱硫浆液等环节都承担关键拖动任务。运维人员在现场更常面对的是长期满负荷、启停频繁、粉尘潮气和振动叠加带来的渐进性劣化，而不是一次性失效。本文以常见笼型异步电动机及部分高压电动机为对象，结合机组检修节奏、班组点检路径和预防性试验要求，围绕绝缘、轴承、转子及电源回路四类高发问题展开归纳，并把缺陷发现、判据确认与处置闭环落到可执行的工单与交接记录中。文末提出面向火电现场的运维策略组合，用以降低非计划停运与备件消耗。

## 关键词

火电厂；电动机；常见故障；运维；策略

## 1 引言

火电厂电动机故障会导致电力系统整体运行的稳定性受到影响，还具有较大的安全隐患，必须要对火电厂电动机故障进行分析及处理<sup>[1]</sup>。现场经验表明，电动机故障多由小缺陷累积演变，早期常表现为温升、异音、振动或绝缘缓慢下降。运维若仅在跳闸后抢修，容易放大停机损失并诱发二次损伤。

## 2 火电厂电动机概述

火电厂电动机通常指在厂用电系统中为各类泵、风机、磨煤机、输煤及环保装置提供机械动力的旋转电机，主体以

三相笼型异步电动机为主，高压段常见 6kV 或 10kV 电压等级，低压段为 380V。运维人员更关注其在灰尘、潮气、温差与振动环境下的耐受能力，以及长期运行时的温升裕度与绝缘余量。按拖动对象不同，电机负载特性差异明显，风机类偏平方转矩，泵类多为近似平方或恒转矩，磨煤机与输煤机存在冲击与堵转风险，因此现场在选型与运行管理上会核对铭牌功率、绝缘等级与冷却方式是否匹配，并依据 GB/T 755 条款核算温升余量。检修周期内，班组还会按 DL/T 596 规定的预防性试验项目跟踪绝缘电阻与吸收比等指标，作为设备是否具备继续运行条件的判断依据。

## 3 火电厂电动机常见故障

### 3.1 定子绝缘受潮与老化

火电厂电动机常处于煤粉、飞灰和湿热并存的环境，端部线圈、引线包扎和接线盒最容易积灰吸潮，绝缘表面形成导电膜后，泄漏电流逐步增大并诱发爬电痕迹。高压电动

【作者简介】吴健男（1995—），男，中国吉林扶余人，本科，助理工程师，从事电力系统稳定控制、电气安全与运维管理。

机在启停、切换或电压波动时承受更高电应力，绝缘内部若存在气隙、绑扎松动、端部电场集中或局部过热点，老化会加速并出现绝缘电阻下降与吸收比变差的趋势。现场还常见冷却风道积灰堵塞或风扇效率下降导致绕组长期高温运行，温度循环使绝缘漆膜脆化、槽口垫条松动，随后在匝间薄弱点形成放电通道<sup>[2]</sup>。故障发展到后期，电机可能出现定子接地、相间短路或保护动作停机，检修时端部颜色变深与局部焦化往往具有指示意义。一些电机在检修拆检时可见槽楔松动、端部绑线磨损及引线护套龟裂，这些结构性松动会使局部电场集中并推动故障由表面向内部发展。

### 3.2 轴承磨损与润滑失效

辅机电机轴承故障在火电现场占比高，通常以轴承温度上升、振动加剧和噪声变化为先兆。粉尘或水汽进入轴承腔会使润滑脂乳化变质，滚道表面润滑膜破坏后产生粘着磨损与点蚀。检修中若轴承加热装配方法不当、压装受力传递到滚动体，或端盖止口与轴承座配合偏松，都会导致内外圈窜动并形成异常摩擦。泵类电机若联轴器对中偏差或管路应力传递到机座，会使轴承承受附加载荷并产生早期剥落。风机电机在高温季节散热条件变差，轴承温升裕度被压缩，更容易出现温度突升、保持架磨损与润滑脂碳化，最终引起抱轴或轴承卡滞。当轴承滚道出现麻点或剥落时，电机振动往往呈现随转速变化的周期性增强，同时轴向窜动会使联轴器间隙变化并带来二次噪声。

### 3.3 转子断条与气隙偏心

笼型异步电动机在重载启停、反冲或堵转冲击下，转子导条与端环连接处可能发生疲劳裂纹，进一步发展为断条或虚焊。故障早期电机仍可带负荷运行，但转矩脉动会引起电流波动、转速轻微起伏与机座振动增大，机组在并列多台设备时更容易被误判为工况波动。若断条数量增加，转子局部发热会使端环出现变色或金属腐蚀痕迹，转子动平衡状态也会随之改变。另一类问题是转子与定子气隙偏心，常由轴承间隙变化、端盖定位不良、键槽磨损或联轴器偏心引起，偏心会导致磁拉力周期性变化并叠加机械振动。长期运行后，偏心可能诱发定子擦碰、转子表面拉伤以及局部过热，严重时出现启动电流异常与保护拒动等连锁问题。在偏心加剧阶段，电机空载电流会偏离历史基线，振动在机座处升高，且伴随摩擦异声，提示气隙受力不均衡<sup>[3]</sup>。

### 3.4 电源回路异常与缺相运行

火电厂厂用电回路多、切换频繁，触头烧蚀、熔断器熔断、端子松动或电缆压接不良都可能造成缺相运行。三相电压不平衡会导致电流不平衡与损耗上升，使电机在额定负荷下也出现异常发热，并伴随转矩下降。缺相时电机转矩显著降低，若负载未及时卸除，剩余两相电流会迅速升高并造成绝缘热冲击，低压电机易出现引线烧蚀、接线柱发蓝和端子发热变形。现场还会遇到电源回路接地不良或中性点漂移造成的电压异常，使电机在轻载下也出现嗡鸣与温升异常。

此类故障往往与开关设备状态、一次回路接线质量及切换操作规范性密切相关。对大惯量风机与磨煤机电机，缺相或低电压下反复启动会使绕组热冲击加重，端部绑扎与引线固定点更易松脱并扩大接触发热。

## 4 火电厂电动机常见故障的运维策略

### 4.1 绝缘状态分层点检与干燥闭环

为把火电厂电动机绝缘类故障控制在可处置范围内，运维应建立运行点检与停机试验相衔接的分层点检和干燥闭环。运行班组按路线记录机座温度、冷却风量与风道阻塞、接线盒密封完好、端部积灰与凝露痕迹，并在每次启停后核对空间加热器投入、电缆入口密封圈压紧和呼吸孔畅通，发现潮痕时先核查排水孔、端盖结合面与就地箱门封条。计划停机时运维人员依据现场绝缘试验导则和预防性试验规程完成绝缘电阻、吸收比或极化指数测量，选用与设备电压等级匹配的兆欧表并统一计时点，同时记录环境温度与绕组温度，随后与同季节历史值或按温度修正后的同类数据对比，避免将季节温度波动误判为材料劣化。若测值偏低，人员先处理表面污染与受潮源，重点清扫端部、擦拭引线和瓷套盐污，恢复接线盒密封与排潮路径，检查冷却器渗漏与风道回潮，更换硬化垫圈并补涂防潮漆。需要烘干时现场优先利用空间加热器配合强制通风排潮或采用外加热风，控制升温速率与最高绕组温度，分阶段稳温并连续测量绝缘电阻回升趋势，防止热应力引起端部绑扎松动或槽楔位移<sup>[4]</sup>。烘干结束后在绕组温度回落并稳定后复测并留存记录，若指标仍不恢复则拆检槽楔紧固、端部绑扎与引线瓷套，按工艺补漆、重新包扎或更换局部绝缘材料，并以复测合格作为交付条件，交接班时由负责人对关键数据口头交底，明确下一次复测时间并在铭牌或就地箱标注异常点位。

### 4.2 轴承润滑与对中管理标准化

电动机轴承故障在火电厂多由润滑失当与对中偏差叠加触发，班组应把润滑与找正纳入同一套可追溯的标准作业。班组应建立润滑脂台账，按电机转速、轴承型式与环境粉尘选定基础油黏度与稠化剂体系，并明确混用禁忌与换脂步骤，现场加脂只允许使用同批次定量枪，避免随手补脂引起油脂性能漂移。运维人员应按油室有效容积核算填充率，常用电机滚动轴承宜控制在约三分之一到二分之一，遇高温或高速工况应下调，人员在加脂前后分别记录轴承壳体温度、振动与噪声变化，若加脂后温升持续走高人员应先排查过量搅拌与排脂不畅。运维人员应在拆装前复核轴承游隙、端盖止口配合与轴承座同轴度，人员还应测量迷宫密封磨损量并检查轴颈表面，发现油封硬化、座孔椭圆或轴颈拉伤时人员应先修复再装配，并按要求采用感应加热或热油加热配合压装，确保受力路径不通过滚动体。对中管理应实行泵组与风机分法校核，泵组人员应先松开管卡释放管路应力后再找正，并同时校核联轴器径向与端面跳动，工程案例指出

对中偏差与受力不均与循环水泵轴承温高相关。运行阶段应为关键电机设定温升与振动趋势阈值,出现缓慢爬升时人员先检查冷却、润滑补给、密封完好与地脚紧固,再安排计划停检复测对中与加脂量,试运时人员应监听轴承声并复测温度,高粉尘区域人员按拆检次数更换密封件而不只看外观。

### 4.3 转子与气隙问题的检修

火电厂辅机电动机出现启动拖长、电流摆动与振动抬升时,运维人员应按现象分解、判据确认、停检验证的路线把转子断条与气隙偏心逐项排除。运行比对阶段,运维人员在相同负荷与冷却条件下记录启动电流持续时长、稳态电流波动幅度、轴承振动与温升,并同步核查泵风机卡涩、叶轮积灰、汽蚀、阀门误位及润滑不足等外部阻力,同时对比是否出现周期性闷响或摩擦声以锁定检查方向。停机解体后,若怀疑断条,运维人员应先检查端环变色与局部发热痕、导条焊点裂纹、导条露头松动和连接区磨耗,再用百分表复测转轴径向跳动与轴颈圆度,结合动平衡历史与启停频次判断裂环扩展风险,并清理端环附近金属粉末与油泥烧结以识别磨耗来源。为避免把附属件松动当作断条,运维人员还应复测轴承游隙和轴向窜量,复核风扇、护环、联轴器及键连接间隙与紧固力矩,并对端环可疑区做染色或磁粉检验确认裂纹。若更符合气隙偏心,运维人员应在周向多点测量定转子气隙并记录最大最小差值,随后检查端盖定位销、止口配合、轴承座同轴度与底座水平度,复核地脚受力不均和联轴器找正,防止偏心由外部传入并诱发单边磁拉力。复装前运维人员必须清理转子风道异物并校对风扇紧固,复装后先空载试转建立电流与振动基线,再按阶梯负荷逐步加载,逐点复核电流、振动及气隙侧温升,确认无擦碰与局部过热后投入运行,并复核启停间隔与联锁动作。

### 4.4 一次回路巡检与保护配合复核

现场处置电源回路异常时,运维人员应把一次回路巡检与保护配合复核作为同一闭环。首先,低压电机回路在负荷高峰窗口开展柜内触头与端子专项检查,人员应核对断路器分合闸机构、接触器触头磨耗与弹簧压力,端子采用扭矩扳手复紧并做复紧标记,并对照 GB/T 14048.4 所列起动机与保护器件配合条款核对型号,随后对电缆头、母排搭接点、热继电器进出线实施红外或点温测温,温升偏离同柜同类回

路时应停电拆检接触面氧化、压接松动与导体断股,并复查屏蔽接地与护套完好<sup>[9]</sup>。其次,每次切换或检修送电后,值班人员应在空载与带载工况下复测线电压、三相电流及功率因数变化,若不平衡超出启动暂态且趋势不收敛,人员应沿回路逐段排查熔断器座接触、触头烧蚀、相线虚接、中性点松脱及端子压板偏斜,必要时测量回路电阻并对可疑点位复紧,禁止缺相拖载运行。再次,高压回路巡检应覆盖电缆终端密封、应力锥与避雷器连接、母线搭接面、隔离开关触指压力及柜内防潮加热,雨季同步检查凝露排水与加热器投退,并按规程复测绝缘电阻与回路电阻,发现端部渗潮或放电痕迹应立即封堵处理。最后,保护整定复核应以电机额定电流、起动方式与负载特性为基准,校核过载、缺相、堵转及接地保护的動作值和时限,检修后完成二次回路校验与跳闸回路通断试验。若出现误动或拒动,运维人员应先排除一次回路接触不良、互感器二次开路与接地回路松脱,再修订定值,并复核相序、压接标记与绝缘包覆。

## 5 结语

火电厂电动机故障呈现出由环境、负荷与装配细节共同驱动的特点,运维工作应避免单点处置而忽视链条因素。本文从绝缘、轴承、转子与电源回路四类常见故障出发,将点检、试验、检修与复核的关键动作落到可追溯记录与工序控制中,并强调用同工况对比与趋势判读减少误判。后续现场可结合检修资源与备件周期,持续优化这些工序的执行质量。

### 参考文献

- [1] 申帅权.火电厂电动机常见故障及运维对策分析[J].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术, 2023.
- [2] 孙阳军.试论发电厂的辅机电动机节能改造技术要点[J].新潮电子, 2023(7):126-128.
- [3] 郭臣.火电厂高压电动机故障处理的措施研究[J].工程建设与技术, 2024(9).
- [4] 徐明军,常晓杰,陈湘,等.火力发电厂辅机电动机常见故障处理与预防[J].电力设备管理, 2023(22):71-73.
- [5] 李鹤.火电厂电气运行常见故障排除及安全管理策略[J].电力设备管理, 2024(20):101-103.

# Construction of an Integrated Energy Efficiency Evaluation System for Smart New Energy Stations Aiming at Carbon Neutrality

Lei Zhang

State Power Investment Corporation Guizhou Jinyuan Weining Energy Co., Ltd., Weining County, Bijie, Guizhou, 553100, China

## Abstract

Against the backdrop of global carbon neutrality strategies and rapid development of the new energy industry, smart new energy stations serve as core carriers of energy transition. Their comprehensive energy efficiency directly impacts the progress toward carbon neutrality goals. Current energy efficiency evaluation systems for smart new energy stations face challenges including incomplete indicator frameworks, inadequate alignment between assessment methods and intelligent characteristics, and neglect of lifecycle energy efficiency, making it difficult to accurately reflect actual operational performance. This paper establishes an integrated energy efficiency evaluation system from five dimensions—energy production, transmission, consumption, management, and environmental impact—based on carbon neutrality requirements and leveraging the “source-grid-load-storage” coordination features and digital advantages of smart new energy stations. It proposes an evaluation method combining Analytic Hierarchy Process (AHP) and fuzzy comprehensive evaluation, while specifying implementation safeguards. The study aims to provide scientific basis for optimizing energy efficiency in smart new energy stations and facilitate the realization of carbon neutrality goals in the energy sector.

## Keywords

Carbon neutrality; Smart new energy stations; Comprehensive energy efficiency; System construction

## 面向碳中和目标的新能源智慧场站综合能效评估体系构建

张磊

国家电投集团贵州金元威宁能源股份有限公司, 中国·贵州 毕节 553100

## 摘要

在全球碳中和战略推进与新能源产业快速发展的背景下, 新能源智慧场站作为能源转型的核心载体, 其综合能效水平直接影响碳中和目标的实现进程。当前, 新能源智慧场站能效评估存在指标体系不全面、评估方法与智能化特征适配性不足、忽视全生命周期能效等问题, 难以精准反映场站实际能效状况。本文基于碳中和目标要求, 结合新能源智慧场站“源网荷储”协同特性与数字化优势, 从能源生产、传输、消费、管理及环境影响五个维度构建综合能效评估指标体系, 提出融合层次分析法与模糊综合评价的评估方法, 并明确体系实施的保障措施, 旨在为新能源智慧场站能效优化提供科学依据, 助力能源领域碳中和目标落地。

## 关键词

碳中和; 新能源智慧场站; 综合能效; 体系构建

## 1 引言

碳中和是应对全球气候变化、实现可持续发展的重要战略举措, 新能源产业作为碳中和的核心支撑, 其规模化发展已成为必然趋势。新能源智慧场站依托数字化、智能化技术, 实现了新能源发电、储能、调度与消纳的协同优化, 是

提升新能源利用效率、推动能源结构转型的关键平台。构建科学、全面的新能源智慧场站综合能效评估体系, 对于指导场站优化运营、提高能源利用效率、加速碳中和目标实现具有重要的理论与实践意义。

## 2 碳中和目标下新能源智慧场站综合能效评估的核心需求

### 2.1 全生命周期能效评估需求

碳中和目标强调能源系统从生产到消费全链条的低碳化, 新能源智慧场站的能效评估需突破传统“单一环节评估”局限, 覆盖场站规划、建设、运营及退役全生命周期。在规

【作者简介】张磊 (1987—), 男, 中国贵州六盘水人, 本科, 工程师, 从事新能源电站项目发电、工程建设管理研究。

划阶段,需评估选址、设备选型对后续能效的潜在影响;建设阶段需关注施工过程中的能源消耗与环境代价<sup>[1]</sup>;运营阶段需重点监测发电效率、储能利用率及调度优化水平;退役阶段则需考量设备回收与资源循环利用效率。只有通过全生命周期评估,才能全面反映场站的综合能效状况,避免“重运营、轻前期”或“重短期、轻长期”的评估偏差,确保场站在全生命周期内实现低碳高效运行。

## 2.2 多维度协同评估需求

新能源智慧场站融合了新能源发电、储能系统、智能调度平台及负荷管理模块,形成“源网荷储”协同运行的复杂系统。其能效水平受发电效率、储能转换效率、电网接入适配性、负荷响应速度等多因素影响,单一维度的能效指标无法体现系统整体协同效果<sup>[2]</sup>。例如,仅关注光伏组件的发电效率,忽视储能系统的充放电损失与调度策略的合理性,可能导致场站整体能效评估失真。因此,需从能源生产、传输、消费、管理等多维度构建评估体系,实现对场站系统协同能效的全面衡量,满足碳中和目标下对能源系统整体优化的要求。

## 2.3 智慧化特性适配需求

数字化、智能化是新能源智慧场站的核心特征,场站通过物联网、大数据、人工智能等技术实现设备状态实时监测、负荷精准预测与调度策略动态优化。这一特性要求能效评估体系充分结合智慧化技术的应用效果,将“数字化运维效率”“智能调度响应速度”“数据驱动的能效优化能力”等指标纳入评估范畴。例如,评估场站是否通过智能算法实现发电功率与负荷需求的精准匹配,是否依托大数据分析识别能效损耗关键点,从而体现智慧化技术对能效提升的赋能作用,避免传统评估方法与场站智慧化发展趋势脱节<sup>[3]</sup>。

## 2.4 环境与经济协同评估需求

碳中和目标不仅要求新能源智慧场站实现高能源效率,还需兼顾环境效益与经济效益的协同提升。一方面,场站运营需减少污染物排放,降低对周边生态环境的影响;另一方面,需通过能效提升降低运营成本,提高场站的经济可行性,为新能源产业规模化发展提供支撑。因此,综合能效评估体系需突破“单一能效指标”局限,融入环境影响与经济效益相关指标,实现“能效-环境-经济”三维协同评估,符合碳中和目标下可持续发展的核心要求。

# 3 新能源智慧场站综合能效评估现存问题

## 3.1 指标体系缺乏系统性与全面性

当前新能源智慧场站的能效评估指标多聚焦于发电环节,如光伏场站的首年衰减率、风电场站的可利用效率等,对储能系统、智能调度、负荷管理等关键环节的指标覆盖不足。例如,部分评估体系未纳入“储能系统充放电效率”“智能调度响应延迟时间”等反映智慧化协同效果的指标,导致评估结果无法体现场站整体能效水平<sup>[4]</sup>。同时,指标设置忽视环境与经济维度,缺乏对场站全生命周期碳排放、运营

成本与能效关联性的考量,难以满足碳中和目标下对能源系统多目标优化的评估需求,指标体系的系统性与全面性亟待提升。

## 3.2 评估方法与智慧化特性适配不足

传统新能源场站的能效评估多采用简单的数值计算或单一评价方法,未能充分结合新能源智慧场站的数字化、智能化特性。例如,场站通过大数据技术实现负荷预测与调度优化,其能效提升效果具有动态性与复杂性,传统静态评估方法无法实时捕捉这一动态变化;此外,人工智能算法在设备故障预警、能效异常诊断中的应用效果,也难以通过传统评估方法量化衡量。评估方法与智慧化特性的适配不足,导致评估结果无法准确反映智慧化技术对能效的提升作用,制约了评估体系的实践价值<sup>[5]</sup>。

## 3.3 数据支撑体系不完善

综合能效评估依赖大量精准、实时的数据,包括发电数据、储能数据、调度数据及环境数据等。当前部分新能源智慧场站存在数据采集不全面、数据标准不统一、数据质量参差不齐等问题:一方面,部分场站未实现全设备、全环节的数据采集,如忽视退役设备回收阶段的数据监测;另一方面,不同场站的数据格式与统计口径差异较大,导致数据难以共享与对比分析。数据支撑体系的不完善,直接影响评估指标的计算准确性与评估结果的可靠性,成为制约综合能效评估体系落地的关键瓶颈。

## 3.4 缺乏动态调整与反馈机制

新能源智慧场站的运行环境与技术水平处于动态变化中,其能效评估体系需具备相应的动态调整能力,以适应外部环境与内部技术的变化。当前多数评估体系为静态框架,指标权重与评估标准长期固定,无法根据场站实际运行状况与技术发展趋势进行调整。例如,随着人工智能调度算法的升级,场站的负荷匹配效率显著提升,但评估体系未及时调整相关指标的权重与评价标准,导致评估结果无法反映技术进步带来的能效提升。同时,评估结果与场站运营优化之间缺乏有效反馈机制,评估结论难以直接指导场站进行能效改进,降低了评估体系的实用价值。

# 4 面向碳中和目标的新能源智慧场站综合能效评估体系构建

## 4.1 评估体系构建原则

评估体系遵循系统性、科学性、动态性与协同性四大原则。系统性要求覆盖场站全生命周期与“源网荷储”全环节,避免评估偏差;科学性强调指标定义清晰、计算规范,结合智慧化特性提升评估准确性;动态性预留调整空间,适应技术、政策与运行变化;协同性兼顾能源效率、环境效益与经济效益的协同发展,实现三维协同评估。

## 4.2 综合能效评估指标体系框架

从五个维度构建指标体系:

能源生产能效:涵盖发电设备效率、稳定性及设备利

用效率,如光伏组件转换效率、弃电率等;

能源传输能效:评估储能转换、电网接入及传输线路损耗,如储能充放电效率、谐波畸变率;

能源消费能效:关注自用能占比、负荷匹配度与需求响应效率,体现源荷协同;

智慧管理能效:考察智能调度、数据监测与算法迭代能力,如调度指令准确率、算法更新频率;

环境经济协同能效:融合环境效益(碳排放强度)、经济效益(能效提升成本)与可持续性指标(设备退役循环利用)。

#### 4.3 综合能效评估方法选择

采用“层次分析法(AHP)+模糊综合评价法”组合评估。通过AHP邀请专家团队构建判断矩阵,确定各维度及指标权重;利用模糊综合评价法设定“优秀、良好、合格、不合格”四个等级,构建模糊矩阵并运算,将模糊结果转化为具体能效等级。该方法兼顾专家经验与指标模糊性,适配评估复杂性需求,提升结果准确性与可信度<sup>[6]</sup>。

### 5 新能源智慧场站综合能效评估体系实施保障措施

#### 5.1 完善数据支撑体系

数据是综合能效评估的基础,需从数据采集、标准统一、质量管控三方面完善支撑体系。在数据采集方面,依托物联网技术实现新能源智慧场站全设备、全环节的数据实时采集,覆盖发电、储能、调度、消费及环境监测等场景,确保数据全面性;在数据标准方面,联合行业协会与科研机构制定统一的新能源智慧场站能效数据标准,明确数据格式、统计口径与采集频率,实现不同场站数据的共享与对比;在数据质量管控方面,建立数据清洗、校验与异常处理机制,通过大数据技术识别并修正异常数据,保障数据的准确性与可靠性,为评估体系的有效运行提供数据保障。

#### 5.2 建立动态调整机制

结合新能源技术发展与碳中和政策要求,建立评估体系动态调整机制。定期组织专家团队对评估指标、权重分配与评价标准进行复盘,根据以下因素进行调整:一是技术迭代,如新型储能技术、AI调度算法的应用,需新增或优化相关指标;二是政策变化,如碳中和目标阶段性调整带来的低碳要求升级,需提高环境效益指标的权重;三是场站实践反馈,根据不同类型、不同规模新能源智慧场站的评估实践,优化指标设置的针对性与合理性。通过动态调整,确保评估体系始终与行业发展趋势、政策要求及场站实际需求保持一致。

#### 5.3 强化政企协同与行业联动

新能源智慧场站综合能效评估体系的落地需依托政府、企业、行业协会的协同合作。政府层面,可通过出台政策文

件,将综合能效评估纳入新能源场站的准入、补贴与评优标准,引导场站主动开展能效评估与优化;企业层面,新能源场站运营主体需建立内部能效评估团队,配备专业技术人员,确保评估工作常态化开展,并将评估结果与运营优化方案直接挂钩;行业协会层面,可搭建评估经验交流平台,组织开展评估技术培训,推广优秀场站的能效管理经验,推动行业整体能效水平提升。通过政企协同与行业联动,形成“政策引导-企业落实-行业推广”的良性循环,保障评估体系的广泛应用与实践价值。

#### 5.4 推动评估结果与运营优化深度融合

避免评估工作“形式化”,需建立评估结果与场站运营优化的反馈机制。一方面,针对评估中发现的能效短板,制定针对性的优化方案,如更换高效储能设备、升级调度算法;另一方面,将评估指标纳入场站运营绩效考核体系,明确各部门、各岗位的能效管理责任,如将“负荷匹配度”与调度团队绩效挂钩,“设备利用效率”与运维团队绩效挂钩,通过考核激励推动全员参与能效提升。同时,定期跟踪优化方案的实施效果,通过再次评估验证优化措施的有效性,形成“评估-优化-再评估-再优化”的闭环管理,持续提升新能源智慧场站的综合能效水平。

### 6 结语

在碳中和目标推动下,新能源智慧场站作为能源转型的核心载体,其综合能效水平的提升已成为行业发展的关键任务。当前新能源智慧场站能效评估存在指标体系不全面、方法适配性不足、数据支撑薄弱等问题,难以满足碳中和目标下对能源系统全链条、多维度优化的需求。本文构建的综合能效评估体系,从能源生产、传输、消费、智慧管理及环境经济协同五个维度设置指标,采用“层次分析法+模糊综合评价法”的组合评估方法,并通过完善数据支撑、建立动态调整机制、强化政企协同等措施保障体系落地,实现了对新能源智慧场站全生命周期、多维度协同能效的科学评估。

#### 参考文献

- [1] 李启钊,张福征.基于多因素模型的综合智慧能源评估指标体系优选算法[J].中外能源,2021,26(12):18-25.
- [2] 田茂君,薛惠锋.基于能源监管信息的新能源接入系统能效评估方法研究[J].西安理工大学学报,2016,32(01):120-126.
- [3] 滕佳伦,李宏仲.碳中和背景下综合智慧能源的发展现状及关键技术分析[J].综合智慧能源,2023,45(08):53-63.
- [4] 徐文林,方腾,徐勇,等.智慧能源站能效指标评估体系[J].湖南电力,2021,41(05):22-29.
- [5] 王永真,张靖,潘崇超,等.综合智慧能源多维绩效评价研究综述[J].全球能源互联网,2021,4(03):207-225.
- [6] 武昭原,周明,王剑晓,等.双碳目标下提升电力系统灵活性的市场机制综述[J].中国电机工程学报,2022,42(21):7746-7764.

# Research on the Synergistic Optimization Strategy, Process Specification and Practice of Modern Interior Decoration Design and Construction Technology

Xingming Ju

Ji 'anshan Economic Development Co., Ltd., Jinggangshan Development Zone, Ji' an, Jiangxi, 132000, China

## Abstract

With the upgrading of domestic consumption and the high-quality transformation of the construction industry, China's modern interior decoration sector has transitioned from extensive scale expansion to a refined quality enhancement phase. The disconnection between design and construction—two core components of interior decoration projects—has become a critical bottleneck hindering project implementation, schedule control, cost optimization, and quality assurance. Against this backdrop, promoting coordinated optimization of interior decoration design and construction techniques, and establishing a standardized end-to-end collaborative management system, has emerged as an inevitable trend for the industry's transformation. The synergy between design and construction fundamentally aims to break down professional barriers and process fragmentation, achieving information sharing, unified responsibilities, aligned objectives, and efficient coordination throughout the entire project lifecycle.

## Keywords

Modern interior decoration; Design and construction coordination; Optimization strategies; Process standardization

## 现代室内装修设计与施工工艺的协同优化策略、流程规范及实践研究

鞠兴明

吉安市井冈山开发区金庐陵经济发展有限公司, 中国·江西吉安 132000

## 摘要

随着我国居民消费升级与建筑行业高质量转型, 现代室内装修行业已从粗放式的规模扩张转向精细化的品质提升阶段。设计与施工作为室内装修工程的两大核心环节, 二者的脱节已成为制约项目效果落地、工期管控、成本优化与质量保障的核心痛点。在此背景下, 推动室内装修设计与施工工艺的协同优化, 构建标准化的全流程协同管理体系, 已成为室内装修行业转型升级的必然趋势。设计与施工的协同, 本质是打破二者的专业壁垒与流程割裂, 实现项目全生命周期的信息共享、权责统一、目标一致与高效联动。

## 关键词

现代室内装修; 设计与施工协同; 优化策略; 流程规范

## 1 引言

新时代背景下, 居民对室内空间的需求已从基础的功能性满足, 转向个性化、品质化、绿色化、智能化的多元需求, 对装修工程的设计效果还原度、施工质量、工期效率与成本可控性提出了更高要求。然而, 我国室内装修行业长期沿用“先设计、后施工”的线性管理模式, 设计端与施工端存在严重的信息壁垒与流程割裂, 普遍出现设计方案施工可行性不足、现场施工随意变更设计等问题。本文通过系统研究设计与施工协同的核心痛点、优化策略与流程规范, 旨在为室

内装修行业实现高质量发展提供可落地的实施路径。

## 2 现代室内装修设计与施工协同的行业痛点与根源分析

### 2.1 设计与施工双向信息壁垒, 专业认知严重脱节

信息不对称是设计与施工协同失效的核心根源。从设计端来看, 多数室内设计师专注于空间美学、功能布局与风格营造, 对现场施工条件、新型施工工艺、材料物理特性、机电管线安装规范等专业内容掌握不足, 导致设计方案存在“纸上谈兵”的问题。常见问题包括: 施工图深度不足, 关键部位节点详图、收口做法、工艺参数缺失; 复杂造型设计未考虑现场施工的可操作性; 机电点位设计与木作、硬装结构存在空间冲突, 无法满足施工规范要求。

【作者简介】鞠兴明(1993—), 中国江西吉安人, 本科, 工程师, 从事建筑工程、室内装修、消防研究。

从施工端来看，现场施工管理人员与作业班组普遍缺乏对设计理念、美学细节、空间尺度的精准理解，往往仅关注施工的便利性与成本控制，随意简化设计节点、替换装饰材料、调整空间尺寸，导致设计效果严重失真。

### 2.2 流程管理线性割裂，全链路管控体系缺失

传统室内装修项目采用“设计完成后再启动施工”的线性管理模式，流程的割裂直接导致全链路管控的失效。在项目前期策划与方案设计阶段，施工团队未介入，设计方案未经过施工可行性、成本可控性、工期合理性的前置评审，大量潜在风险在设计阶段未被识别，直至施工阶段才集中爆发，被迫进行大规模设计变更，直接造成工期延误与成本超支。

### 2.3 权责边界模糊不清，协同管理机制不健全

当前室内装修行业普遍缺乏标准化的设计与施工协同管理制度，项目参与方的权责边界划分不清晰，出现问题后互相推诿扯皮。设计方认为自身的核心职责是完成方案设计与图纸输出，施工落地的质量问题由施工方负责；施工方则认为施工过程中的所有问题均源于设计图纸的不合理，设计方应承担变更与返工的责任。这种权责的模糊性，直接导致项目实施过程中的矛盾频发，问题解决效率低下。

### 2.4 行业标准化体系不完善，复合型人才培养严重匮乏

我国室内装修行业的协同标准化建设仍处于起步阶段，缺乏全国统一的设计-施工协同标准，包括施工图设计深度规范、施工工艺与设计节点的对接标准、工序交接验收规范、协同管理流程标准等。各企业、各项目的执行标准不统一，行业乱象频发，制约了设计与施工协同的规模化推广。

此外，行业人才能力断层问题突出。室内设计专业的高校教育侧重美学与设计理论，缺乏施工工艺、工程管理等实践内容的教学；而施工从业人员多为技能型工人，缺乏设计理论与空间美学的系统学习，导致行业内“懂设计、通施工、善管理”的复合型人才严重匮乏，成为制约设计与施工深度协同的重要人才瓶颈<sup>[1]</sup>。

## 3 室内装修设计与施工工艺协同优化的核心策略

### 3.1 全周期前置协同策略，从源头规避协同风险

在项目启动阶段，立即组建由设计负责人、施工技术负责人、造价工程师、业主代表组成的四方协同项目组，明确各方的协同职责、沟通机制与决策流程，制定项目全周期协同计划，确保各方目标统一。

在概念方案与初步设计阶段，施工技术负责人全程参与方案研讨，从施工可行性、结构安全、消防规范、工期管控、成本控制等维度，对设计方案进行前置评审，针对空间布局、复杂造型、管线排布、材料选型等核心内容提出优化建议，确保设计方案在满足美学与功能需求的同时，具备可实施性与经济性。

### 3.2 基于 BIM 技术的数字化协同策略，打破信息壁垒

首先，构建全专业 BIM 三维模型，将空间布局、装饰造型、水电暖通、消防系统、定制木作、软装陈设等所有专业内容纳入同一模型，实现设计方案的三维可视化呈现，让

设计方、施工方、业主方能够直观、精准地理解设计意图，避免因图纸理解偏差导致的施工错误。其次，利用 BIM 模型的碰撞检测功能，提前排查出水电、暖通、消防、结构等专业之间的管线交叉冲突点，在设计阶段完成优化调整，彻底解决传统施工中“现场开槽凿墙、管线胡乱排布”的问题，避免现场返工，如下图所示。

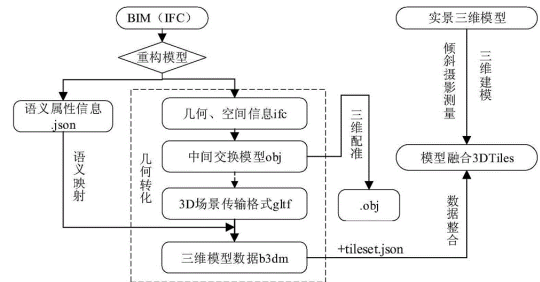


图 1 BIM 技术数字化

### 3.3 材料与工艺的双向适配优化策略，实现效果与效率的统一

材料选型与施工工艺的适配性，是设计效果精准落地的关键，必须建立设计与施工双向联动的材料-工艺适配优化机制。

一方面，推行“设计选材与施工工艺同步确认”制度，设计师与施工技术人员共同完成材料选型工作。设计师提出材料的美学效果、环保性能、功能需求，施工技术人员对材料的施工工艺难度、采购周期、成本造价、后期维护等进行专业评估，双方共同筛选出兼顾设计效果与施工可行性的材料方案，避免出现“设计选定的材料无法施工、现场替换的材料影响设计效果”的问题。

另一方面，基于成熟的施工工艺与工业化建造技术，反向优化设计方案。在不影响设计核心理念与空间美学效果的前提下，通过标准化、模块化、装配式的设计优化，简化施工流程，降低施工难度，减少现场湿作业，提升施工效率与质量稳定性。

### 3.4 成本与工期的动态协同管控策略，实现全周期目标可控

设计与施工的协同，最终要实现项目成本、工期、质量三大核心目标的统一管控，必须建立成本与工期的动态协同管控机制。

在成本管控方面，推行限额设计制度，在项目启动阶段确定总造价限额，将造价指标分解到每个空间、每个分项工程，设计方案的每一次调整，都必须同步完成成本测算，确保不突破限额指标。施工阶段，建立设计变更闭环管理机制，所有现场变更需求必须提交书面申请，经协同项目组三方评审，明确变更对成本、工期的影响，获批后由设计方出具正式变更图纸，方可实施，严禁口头变更与先施工后补续的行为，从根本上控制成本超支风险。

在工期管控方面，基于设计与施工的协同，制定科学合理的总进度计划与关键节点计划，明确设计出图、图纸会审、技术交底、材料采购、现场施工、分项验收等各环节的

时间节点与责任主体<sup>[2]</sup>。

## 4 设计与施工协同的全流程规范体系构建

### 4.1 项目启动与前期策划阶段规范

#### 4.1.1 协同组织架构规范

正式成立四方协同项目组，明确设计负责人为设计质量第一责任人，施工技术负责人为施工落地与工期第一责任人，造价工程师为成本管控第一责任人，业主代表为决策主体，制定《项目组岗位职责说明书》，清晰划分各方在各阶段的协同职责与权限，避免权责模糊。

#### 4.1.2 项目策划规范

协同项目组共同开展项目现场勘查，全面掌握建筑结构、现场条件、周边环境、规范限制等基础信息；共同与业主深入沟通，明确项目的功能需求、风格定位、造价限额、工期要求、环保标准等核心目标，编制《项目协同实施大纲》，明确设计深度标准、施工工艺标准、验收规范、关键协同节点计划、沟通机制、风险管控要求，作为项目全周期协同的纲领性文件。

### 4.2 方案设计与可行性论证阶段规范

#### 4.2.1 方案协同评审规范

概念方案与初步设计完成后，协同项目组组织正式的方案评审会，设计方全面汇报方案的设计理念、功能布局、空间规划、材料选型、机电系统规划等核心内容；施工方重点对方案的施工可行性、结构安全、消防规范符合性、工期合理性、施工难点等进行评审，出具专项评审意见；造价工程师同步出具方案成本测算报告，评估方案是否符合造价限额要求。

#### 4.2.2 方案优化规范

针对评审会提出的意见，设计方与施工方共同开展方案优化，在不改变设计核心理念的前提下，调整完善方案内容，解决潜在的施工与成本风险；最终形成《方案可行性评审纪要》与优化后的最终方案，经业主签字确认后，作为施工图设计的唯一依据。

### 4.3 施工图设计与技术交底阶段规范

#### 4.3.1 施工图设计深度规范

制定《施工图设计深度标准》，明确施工图必须包含完整的设计说明、平面布置图、地面铺装图、天花吊顶图、立面图、剖面图、关键部位节点详图、机电管线综合图、设备点位图、材料清单与工艺说明等内容；其中节点详图必须明确收口做法、材料参数、尺寸公差、施工工艺要求，确保施工人员可直接按图施工。

#### 4.3.2 分级技术交底规范

建立三级技术交底制度，第一级由设计负责人对施工项目部全体管理人员进行整体技术交底，全面传递设计理念、核心控制点、图纸核心内容；第二级由施工技术负责人对各施工班组进行分项工程技术交底，明确各分项工程的施工工艺、质量标准、图纸要求、安全规范；第三级由班组长对作业人员进行岗前交底，明确具体操作要求、尺寸精度、验收标准。所有交底均形成正式交底记录，全员签字确认，

归档留存<sup>[3]</sup>。

### 4.4 现场施工与动态变更阶段规范

#### 4.4.1 设计驻场巡检规范

建立设计驻场巡检制度，设计负责人每周至少1次驻场巡检，重点检查施工内容是否符合设计图纸要求，及时纠正施工偏差；针对防水工程、基层处理、管线隐蔽、饰面安装、定制构件安装等关键工序，施工方必须提前24小时通知设计方到场确认，验收合格后方可进入下道工序施工。

#### 4.4.2 设计变更闭环管理规范

建立严格的变更管理流程，任何单位或个人提出的变更需求，均需提交《设计变更申请表》，说明变更原因、变更内容、对成本与工期的影响；协同项目组对变更申请进行评审，评审通过后，由设计方出具正式的设计变更图纸与造价调整文件，施工方调整施工进度计划；所有变更信息在24小时内同步至所有相关方，变更文件与原图纸具有同等法律效力。

### 4.5 竣工验收与复盘归档阶段规范

#### 4.5.1 竣工验收规范

项目施工完成后，由施工方提交竣工验收申请，协同项目组三方共同开展竣工验收，严格按照设计图纸、施工工艺标准《建筑装饰装修工程质量验收标准》(GB50210-2018)进行全面验收；对验收中发现的问题，出具整改通知书，明确整改责任人和整改时限，整改完成后进行复验，复验合格后，各方签署竣工验收报告。

#### 4.5.2 项目复盘规范

项目交付后1个月内，协同项目组组织全周期复盘会，全面总结项目实施过程中协同管理的亮点、存在的问题、解决措施与经验教训，重点分析设计与施工协同中的薄弱环节，提出针对性的改进措施，形成《项目复盘报告》<sup>[4]</sup>。

## 5 结语

设计与施工的深度协同，是现代室内装修行业从粗放式发展向精细化、工业化、数字化转型的核心路径。本文通过系统分析行业现存的协同痛点与根源，提出了全周期前置协同、数字化赋能、材料与工艺双向适配、动态成本工期管控四大核心优化策略，构建了覆盖项目全生命周期的协同流程规范体系，并通过工程实践验证了其有效性。未来，随着装配式装修、人工智能、数字孪生技术的快速发展，室内装修行业的协同模式将进一步升级。

### 参考文献

- [1] 姚鹏程.基于人性化理念的住宅室内装修设计思路与实践探讨[J].居舍,2025,(34):7-9.
- [2] 许博超.室内装修设计中传统与现代元素的融合研究[J].陶瓷,2025,(07):130-132.
- [3] 李云云.基于传统文化符号的室内装修设计实践[J].鞋类工艺与设计,2025,5(03):192-194.
- [4] 贺雪宁.浅论室内装修设计风格与实用功能[J].百花,2025,(01):67-68.

# Research on the Deep Integration Path and Practical Application of Smart Building Technology and Construction Engineering Management

Min Xiao

Ji 'an Jihu Construction Engineering Co., Ltd., Ji' an, Jiangxi, 343000, China

## Abstract

Against the backdrop of advancing smart construction and new urbanization, the construction industry is undergoing a systemic transition from traditional to intelligent building practices. As the core driver of digital transformation, smart building technology, when deeply integrated with construction project management, serves as the key pathway to address the pain points of the industry's extensive development model and enhance value across the entire lifecycle. This paper focuses on the core logic of their deep integration, resolves practical bottlenecks in the fusion process, explores implementable and replicable integration pathways, and validates application effectiveness through case studies. These efforts hold significant theoretical and practical implications for promoting high-quality development in the construction industry, aiming to provide theoretical references and practical guidance for its digital transformation.

## Keywords

Smart building technology; Construction project management; Deep integration; Digital transformation

## 智慧建筑技术与建筑工程管理的深度融合路径及实践应用研究

肖敏

吉安吉湖建设工程有限公司, 中国·江西吉安 343000

## 摘要

在智慧建设与新型城镇化深度推进的背景下,建筑行业正经历从传统建造向智能建造的系统性转型。智慧建筑技术作为数字化转型的核心载体,与建筑工程管理的深度融合,是破解行业粗放式发展痛点、实现全生命周期价值提升的核心路径。基于此,本文聚焦二者深度融合的核心逻辑,破解融合过程中的现实瓶颈,探索可落地、可复制的融合路径,并结合实践案例验证应用成效,对推动建筑行业高质量发展具有重要的理论与现实意义,以期建筑行业数字化转型提供理论参考与实践指引。

## 关键词

智慧建筑技术; 建筑工程管理; 深度融合; 数字化转型

## 1 引言

传统建筑工程管理模式以阶段性管控、结果导向、人工经验决策为核心,设计、施工、运维等环节相互割裂,信息孤岛现象突出,难以适配新时代建筑项目大型化、复杂化、绿色化、智能化的发展需求。随着大数据、人工智能、BIM、数字孪生、物联网、5G等新一代信息技术的快速迭代,智慧建筑技术已从单一的功能应用,发展为覆盖建筑全生命

周期的技术集群。在此背景下,智慧建筑技术与建筑工程管理的融合,不再是简单的技术工具叠加,而是对管理理念、组织架构、业务流程、决策模式的全方位重构。

## 2 当前二者融合过程中面临的现实困境

### 2.1 技术应用碎片化,全流程融合程度不足

当前行业内多数项目的智慧建筑技术应用,仍停留在单点突破的浅度融合阶段,尚未形成覆盖全生命周期的一体化应用体系。很多项目的数字化应用局限在单一环节,或是在设计阶段完成基础的BIM建模,或是在施工阶段零散应用几项智慧工地功能,设计、施工、运维三大核心阶段的技术应用相互割裂,承载核心数据的数字模型无法实现全流

【作者简介】肖敏(1992—),中国江西吉安人,本科,从事工程项目进度、质量管理与风险控制;BIM在工程管理中的应用等专业方向的研究。

程的传递、迭代与复用。

与此同时，行业内还普遍存在“重硬件堆砌、轻软件落地”“重成果展示、轻实效应用”的误区，不少项目盲目搭建各类智慧化系统，却没有真正贴合工程管理的实际业务需求，技术应用与管理流程脱节，无法形成完整的管理闭环，自然也难以释放智慧建筑技术的核心价值<sup>[1]</sup>。

## 2.2 管理体系与技术应用不匹配，组织适配性不足

智慧建筑技术的深度应用，需要与之匹配的扁平化、协同化的管理组织与流程体系。但当前多数建筑企业仍沿用传统的层级化组织架构，设计、施工、成本、运维等部门相互独立，部门壁垒严重，难以适配数字化协同管理的需求。同时，管理流程仍以传统线下审批、人工管控为主，未能将数字化技术嵌入管理流程的核心环节，导致技术应用与管理流程“两张皮”。

## 2.3 数据壁垒突出，行业标准体系不完善

数据贯通是二者深度融合的核心基础，但当前行业内数据孤岛现象依然严重。一方面，不同软件厂商的系统数据格式、接口标准不统一，设计、施工、运维等不同阶段的软件数据无法兼容，导致模型与数据需要重复搭建，造成资源浪费；另一方面，项目建设涉及的建设单位、设计单位、施工单位、监理单位、运维单位等多方主体，缺乏统一的数据共享机制，数据流通存在壁垒，难以实现全流程的数据协同。此外，我国智慧建筑与智能建造领域的行业标准仍不完善，数据标准、技术标准、应用标准的不统一，进一步制约了技术的规模化应用与深度融合。

## 2.4 人才供给不足，数字化能力建设滞后

二者的深度融合，需要既懂建筑工程管理业务，又掌握数字化技术的复合型人才。当前行业内人才结构失衡问题突出：传统工程管理人员缺乏数字化思维与技术应用能力，难以将智慧建筑技术与实际管理业务结合；而数字化技术人员缺乏工程管理的专业知识，难以贴合项目管理的实际需求开发与应用系统。同时，行业内的人才培养体系滞后，高校相关专业的人才培养与行业实际需求脱节，企业内部的数字化培训体系不完善，分层级、全覆盖的人才培养机制尚未建立，成为制约二者深度融合的重要瓶颈。

## 2.5 投入产出错配，安全保障体系不健全

智慧建筑技术的前期软硬件投入较高，而其效益更多体现在项目全生命周期的长期价值，短期经济效益不明显，导致部分企业尤其是中小企业的应用积极性不足。同时，智慧建筑技术的应用涉及大量项目数据、建筑空间数据、用户隐私数据的采集与传输，当前行业内多数项目的数据安全保护体系不完善，数据分级分类管理、权限管控、加密防护等措施不到位，存在数据泄露、网络攻击等安全风险，也制约了技术的深度应用<sup>[2]</sup>。

# 3 智慧建筑技术与建筑工程管理深度融合的实现路径

## 3.1 搭建全生命周期一体化的技术融合架构，实现全流程数字贯通

以“数字孪生+BIM”为核心，搭建覆盖建筑全生命周期的一体化技术架构，是二者深度融合的技术基础。

在设计阶段，推行全专业BIM协同设计，通过BIM模型实现多专业图纸的碰撞检查与优化，从源头减少设计错漏碰缺，同时将设计模型与成本测算、进度计划结合，实现设计阶段的成本与进度前置管控；

在施工阶段，以BIM模型为载体，搭建智慧工地管理平台，融合物联网、AI、5G等技术，实现人员、机械、材料、质量、安全、环境的全要素数字化管控，通过数字孪生技术实现施工过程的虚实映射与仿真优化，对施工进度、成本偏差、安全隐患进行实时预警与闭环管理；

在运维阶段，将施工阶段迭代更新的竣工BIM模型，转化为数字孪生运维平台，整合设备运行、能耗监测、空间管理、应急安防等数据，实现运维阶段的智能化管控。通过全流程的模型传递与数据迭代，打破各阶段的技术壁垒，实现建筑全生命周期的数字贯通。

## 3.2 重构适配数字化转型的管理体系，实现技术与管理的双向赋能

管理体系的重构，是二者深度融合的核心保障。数字化技术的落地，从来不是单一工具的引入，而是对传统组织形态与管理逻辑的系统性重塑，首先要打破的就是横亘在专业与部门之间的固有壁垒。传统层级化的组织架构中，设计、施工、成本、运维等部门各自为政，信息传递层层衰减，根本无法适配数字化协同的核心要求。对此，项目层面需要搭建扁平化、强协同的管理组织，成立跨专业、跨部门的数字化专项管理团队，把全生命周期各环节的管理力量整合到同一协同框架内，从组织根源上打通多方主体的协同通道。

在此基础上，需要对工程管理的的全业务流程进行数字化重构，彻底扭转技术应用与管理流程“两张皮”的行业通病。要把数字化能力嵌入到管理流程的核心节点，用线上化、数据化的闭环管控，替代传统人工线下审批、事后复盘的粗放模式，让每一项管理动作都有数据支撑、每一次决策都有迹可循，真正实现从“结果管控”向“全过程动态管控”、从“经验驱动决策”向“数据驱动决策”的根本性转型。

## 3.3 完善行业标准与数据共享机制，打破数据壁垒

统一的标准体系与顺畅的数据共享机制，是破除数据壁垒、实现深度融合的重要前提。当前行业内数据孤岛的形成，根源在于标准的不统一与共享机制的缺失，想要从根本上解决这一问题，首先要从行业顶层设计入手，加快完善智慧建筑与智能建造领域的标准化体系。行业主管部门应牵头统筹，制定全国统一的智慧建筑技术数据标准、接口规范与

应用准则,对BIM模型交付、物联网数据采集、运维数据流转等核心环节做出统一规范,让不同软件、不同系统、不同参与方之间的数据有统一的对接标尺,从根源上解决数据不兼容的问题。

在统一的行业标准框架下,每个项目都需要搭建专属的协同数据平台,为全生命周期的数据贯通提供载体。要以项目建设单位为核心主导,搭建统一的项目数据中台,把设计、施工、监理、运维等各参与方、各阶段产生的项目数据全部整合到同一平台内,实现数据的统一存储、统一管理与授权共享<sup>[3]</sup>。

### 3.4 构建分层级的复合型人才培养体系,强化人才支撑

兼具工程管理专业能力与数字化技术素养的复合型人才队伍,是推动二者深度融合的核心动力。当前行业人才结构的失衡,已经成为制约数字化转型落地的关键瓶颈,想要破解这一难题,需要搭建覆盖全行业、分层级的人才培养体系,针对不同岗位、不同层级的从业者,开展精准化的能力培养。

对于项目管理层,培养重点要放在数字化转型思维与全流程数字化管理能力的构建上,推动管理理念的根本性转变,让管理层成为数字化融合的核心推动者;对于项目技术层,要聚焦BIM、数字孪生、大数据等核心技术的实操应用能力,同时强化技术与管理业务的融合能力,让技术人员成为连接技术与管理的核心桥梁;对于一线作业层,要重点开展智能设备、数字化系统的实操培训,让数字化工具真正落地到施工现场的每一个作业环节,打通数字化落地的“最后一公里”。

### 3.5 建立可持续的商业模式与安全防护体系,保障融合落地

可持续的商业模式与完善的安全防护体系,是二者深度融合能够长期落地、稳步推进的重要保障。当前不少企业对智慧建筑技术的应用持观望态度,核心原因之一在于前期投入与长期收益的错配,想要破解这一困境,需要构建符合行业发展规律的可持续商业模式。要引导企业摒弃“重展示、轻实效”的盲目投入模式,结合自身发展情况与项目实际需求,分阶段、分层次推进智慧建筑技术的应用,先从项目的核心痛点切入,实现单点突破,再逐步拓展至全生命周期的一体化应用。

在技术深度应用的同时,必须同步构建全流程的网络安全与数据安全防护体系。智慧建筑技术的全流程应用,伴随着项目核心数据、建筑空间数据、用户隐私数据的全生命周期采集与流转,数据安全已经成为不可忽视的核心问题。要严格遵循《数据安全法》《个人信息保护法》等相关法律法规的要求,建立完善的数据分级分类管理制度,对项目核心数据、个人隐私数据进行分级管控,构建覆盖数据采集、传输、存储、使用全流程的安全防护体系,为技术与管理的深度融合筑牢安全底线。

## 4 实践应用案例分析

本文以某省会城市智慧商务中心项目为例,验证二者

深度融合的实践成效。该项目为集办公、商业、酒店于一体的大型城市综合体,总建筑面积32万平方米,建筑高度220米,项目建设周期3年,涉及建设、设计、施工、监理、设备供应等20余家参与方,项目管理复杂度高、管控难度大。

项目以“全生命周期数字化管控”为核心,搭建了基于BIM+数字孪生的一体化工程管理平台,实现了智慧建筑技术与工程管理的深度融合。设计阶段,项目采用全专业BIM协同设计,完成了建筑、结构、机电、幕墙等12个专业的BIM建模,通过碰撞检查累计发现图纸错漏碰缺问题2300余项,提前完成设计优化,减少施工阶段设计变更80%以上,同时基于BIM模型完成工程量精准核算,实现了设计阶段的成本前置管控<sup>[4]</sup>。

施工阶段,项目搭建了智慧工地管理平台,融合物联网、AI、5G等技术,实现了全要素智能化管控。通过塔机安全监控系统、深基坑与高支模监测系统,实现了重大危险源的实时监测与预警;通过AI视频监控系统,实现了施工现场未佩戴安全帽、违规动火等安全隐患的智能识别,累计识别安全隐患3600余项,实现了隐患的闭环管理,项目施工期间零安全事故发生;通过BIM+大数据技术,实现了施工进度与成本的实时管控,进度偏差预警响应时间从传统的3天缩短至2小时,项目最终工期较计划缩短15%,建造成本较预算节约8.2%。

运维阶段,项目基于竣工BIM模型搭建了数字孪生运维平台,整合了机电设备、能耗监测、安防应急、空间管理等系统,实现了建筑运维的智能化管控。平台能够实现设备全生命周期管理,提前预警设备故障,设备维护响应效率提升60%;通过能耗实时监测与智能优化,项目整体能耗较同类型建筑降低22%,实现了绿色低碳运维<sup>[5]</sup>。

## 5 结语

智慧建筑技术与建筑工程管理的深度融合,是建筑行业数字化转型的必然趋势,是破解行业发展痛点、实现高质量发展的核心路径。二者的深度融合,绝非技术与管理的简单叠加,而是需要以全生命周期一体化技术架构为基础,以管理体系重构为核心,以标准体系完善、人才队伍建设、安全体系保障为支撑,实现技术与管理的双向赋能,最终达成建筑全生命周期价值最大化的目标。

## 参考文献

- [1] 林国强.智慧工地系统在建筑工程管理中的应用研究[J].新城建科技,2026,35(01):188-190.
- [2] 徐书建.智慧城市视域下建筑工程管理信息化技术应用研究[J].新城建科技,2025,34(12):182-184.
- [3] 李晶.5G+AI赋能智慧工地项目管理[J].中国建设信息化,2025,(21):70-73.
- [4] 谭国洪.智能建造驱动下的建筑工程管理模式创新研究[J].城市开发,2025,(21):129-131.
- [5] 何欣洋.智慧城市框架下建筑工程管理的信息技术应用研究[N].中国工业报,2025-11-03(016).

# Research on Defect Recognition and Intelligent Classification Technology of UAV Inspection for Transmission Lines

Zhuoqun Ding<sup>1</sup> Shan Shi<sup>2</sup>

1. Transmission Operation and Maintenance Branch, State Grid Wuhan Power Supply Company, Wuhan, Hubei, 430000, China

2. Substation Operation and Maintenance Branch, State Grid Wuhan Power Supply Company, Wuhan, Hubei, 430000, China

## Abstract

As the primary energy transmission infrastructure in power systems, transmission lines play a vital role in ensuring the safe and stable operation of power networks, which is crucial for socioeconomic development and public electricity supply. Traditional manual inspection methods suffer from inefficiency, high risks, and limited coverage, while drone inspections have become the industry standard due to their flexibility, extensive operational range, and cost-effectiveness. This study focuses on defect identification and intelligent classification technologies for drone inspections of transmission lines. It elucidates the significance of this research, analyzes current technological advancements, and proposes optimization recommendations. The findings aim to provide intelligent support for power line inspections, transitioning grid operations from “human-dominated” to “intelligent autonomous” management, thereby enhancing the precision and efficiency of power grid maintenance.

## Keywords

Transmission line; UAV inspection; Defect identification; Intelligent classification technology

# 输电线路无人机巡检缺陷识别与智能分类技术研究

丁卓群<sup>1</sup> 石珊<sup>2</sup>

1. 国网武汉供电公司输电运检分公司, 中国·湖北 武汉 430000

2. 国网武汉供电公司变电运维分公司, 中国·湖北 武汉 430000

## 摘要

输电线路是电力系统中能源输送的主要载体, 它的安全稳定运行关系到社会经济发展和人民生活用电。传统的手工巡检模式存在效率低、风险大、覆盖面不广等缺点, 无人机巡检因为灵活性高、作业范围广、成本低等优点成为行业主流。本文以输电线路无人机巡检缺陷识别和智能分类技术为研究对象, 说明技术研究的意义, 分析现有技术的发展现状, 给出相应的优化建议, 为电力输电线路巡检提供智能化支持, 把电网运维由“人工为主”变为“智能自主”, 提高电网运维的精细化、高效性。

## 关键词

输电线路; 无人机巡检; 缺陷识别; 智能分类技术

## 1 引言

电力工业是国民经济的基础性产业, 输电线路是电力能源传输的动脉, 分布范围广、地理环境复杂, 长期暴露在自然环境中, 易受雷击、覆冰、大风、鸟害等影响产生各种缺陷, 若不能及时发现并处理将导致线路故障, 造成大面积停电。传统的以人工巡检为主的方式需要工作人员登塔或者徒步巡查, 劳动强度大、效率低, 并且存在高空坠落、触电等安全隐患。随着无人机技术、人工智能技术的发展, 无人

机巡检在输电线路运维中得到了广泛应用, 但是缺陷识别主要依靠人工判读图像, 存在漏判、误判、效率低的问题。因此研究输电线路无人机巡检缺陷识别与智能分类技术, 提高巡检质量、降低运维成本、保证电网安全有着非常重要的现实意义。

## 2 输电线路无人机巡检缺陷识别与智能分类技术研究的意义

### 2.1 保障电网安全稳定运行的核心支撑

输电线路缺陷及时发现并且妥善处理是防止线路故障, 保证电网安全的重要环节。无人机巡检加智能缺陷识别技术, 可以对导地线断股、绝缘子破损、金具松动等各种缺陷

【作者简介】丁卓群(1994—), 男, 中国湖北武汉人, 硕士, 工程师, 从事输电运检研究。

进行快速捕捉并准确判定,极大地缩短了缺陷的发现周期,防止缺陷从“小隐患”发展成“大故障”。利用实时识别、分级预警的方式,给运维人员提供缺陷的位置及严重程度信息,帮助运维人员快速开展抢修工作,减少线路停电时间及故障损失,为电网的安全稳定运行筑牢技术防线<sup>[1]</sup>。

## 2.2 提升输电线路巡检效率与质量

传统的手工巡检模式下,一名运维人员一天只能完成10-15公里的线路巡检,并且受到地形、天气等条件的限制,无法做到对整条线路的无死角巡检。无人机巡检能冲破地理环境限制,用每小时30至50公里的速度完成巡检工作,工作效率得到3到5倍的提高。智能缺陷分类技术可以自动对无人机采集的图像视频进行处理分析,从大量的数据中精准地提取缺陷信息,消除人工判读时由于疲劳、经验不足而造成的漏判、误判问题,大大提高巡检数据处理效率和缺陷识别准确率<sup>[2]</sup>。

## 2.3 降低输电线路运维成本与安全风险

人工巡检要投入大量的人力、物力资源,高山、丘陵、沼泽等复杂的地形区还要架设临时通道,运维成本高。无人机巡检只需要一两个人来完成作业,不用大量人力物力投入,不需要通道搭建,从而大大减少人力物力的成本。无人机可以代替人工完成高空、复杂地形区域的巡检工作,减少运维人员直接接触高压线路和危险环境的机会,从根本上杜绝高空坠落、触电等安全事故的发生,保证运维人员的人身安全<sup>[3]</sup>。

## 2.4 推动智能电网建设的重要举措

智能电网的构建就是要把电力系统信息化、自动化、智能化。输电线路巡检属于电网运维的重要部分,它的智能化程度影响着智能电网的建设进度。无人机巡检缺陷识别与智能分类技术,依托无人机、人工智能、大数据等先进技术,完成巡检数据的自动采集、智能分析、高效应用,打破传统巡检模式的信息孤岛,创建起“巡检-识别-分析-决策-运维”的全流程智能化体系,给智能电网调度、运维决策赋予数据支撑,推进智能电网建设向纵深发展<sup>[4]</sup>。

# 3 输电线路无人机巡检缺陷识别与智能分类技术发展现状

## 3.1 无人机巡检硬件设备技术现状

目前用在输电线路巡检上的无人机主要有旋翼无人机、固定翼无人机和复合翼无人机。旋翼无人机操作灵活、可以悬停作业,适合近距离精细化巡检;固定翼无人机续航时间长、作业范围广,适合大范围线路普查;复合翼无人机结合了两者的优点,既可以续航又可以灵活作业。硬件上无人机搭载的传感器已经从单个可见光相机发展成红外热像仪、激光雷达、紫外成像仪等多种传感器融合的方案,可以对各种类型的缺陷进行检测。但是仍存在无人机在复杂环境下的续航能力不足、抗风抗干扰能力差、多传感器数据同步融合

精度不高等问题。

## 3.2 缺陷识别算法技术研究现状

缺陷识别算法是智能分类技术的核心,目前主要是基于传统图像处理算法和深度学习算法。传统的图像处理方法,使用边缘检测、阈值分割等方式获取缺陷特征,在简单背景情况下识别效果较好,但是它对复杂背景、光照变化等环境适应能力差,识别精度低。深度学习算法由于具有很强的特征学习能力,已经成为了目前缺陷识别的主要方法<sup>[5]</sup>。但是该类算法仍存在缺陷,例如对小尺寸缺陷(导地线微裂纹等)识别精度低,对于不同种类的缺陷泛化能力弱,模型训练需要大量标注数据。

## 3.3 缺陷智能分类技术应用现状

目前缺陷智能分类主要按照缺陷类型、严重程度等进行分类,常见的缺陷分类有导地线缺陷、绝缘子缺陷、金具缺陷、杆塔缺陷四大类,每类缺陷又细分为不同的子类型和严重程度(一般缺陷、严重缺陷、危急缺陷)。部分电力运维单位已经搭建起无人机巡检智能分析平台,可以完成巡检数据的自动上传、智能识别和分类统计<sup>[6]</sup>。但是应用过程中仍然存在分类标准不统一、不同地区线路缺陷特征不同导致分类精度下降、分类结果与运维需求匹配度不高、不能完全满足实际运维工作精细化的要求等问题<sup>[7]</sup>。

## 3.4 技术发展面临的行业环境现状

随着国家对于智能电网建设的大力支持,电力行业对于无人机巡检智能化技术的需求变得十分迫切,政策层面也出台了多份文件来推动电力巡检技术创新以及智能化转型。科研机构、高校和电力企业的合作越来越多,开展技术与试点应用,取得了较多技术成果。但是行业整体还存在着技术标准不健全、数据共享机制不完善、智能化技术落地成本高、运维人员技术素养低等问题,限制了缺陷识别与智能分类技术的大规模、常态化应用。

# 4 输电线路无人机巡检缺陷识别与智能分类技术优化策略

## 4.1 算法模型优化策略

针对目前缺陷识别算法小尺寸缺陷识别精度低、泛化能力弱、计算成本高等问题,优化算法模型结构和训练方式。一方面用 MobileNet、ShuffleNet 等轻量化网络对 YOLOv8、Faster R-CNN 等主流目标检测算法做剪枝和重构,压缩模型参数量、降低计算复杂度,用特征金字塔网络加强导地线微裂纹、金具小变形等小尺寸缺陷的特征提取能力,保证识别速度与精度的平衡。另一方面,用 CBAM 通道注意力机制和空间注意力机制让模型去关注缺陷的地方,减少复杂的背景(植被、云层等)干扰结果。利用迁移学习技术,用 ImageNet 等通用数据集预训练基础模型,用输电线路缺陷小样本数据微调模型,用半监督学习方法扩充有效训练样本,大大提高了模型对不同电压等级、不同地理环境下输电

线路缺陷的泛化能力<sup>[8]</sup>。

## 4.2 数据质量提升策略

高质量数据为缺陷识别和智能分类提供基础条件，在数据采集、标注、预处理的全过程中都要进行精细化管理。数据采集阶段按不同的缺陷种类（绝缘子破损、导地线断股等）优化无人机飞行高度、速度、拍摄角度，在雨雪、大雾等天气条件下调整相机的曝光参数和红外热像仪测温范围，使得图像纹理清晰、缺陷特征明显。同时采集可见光、红外、激光雷达三种类型的数据，给缺陷全方位特征提取提供数据支持。数据标注环节制定包含缺陷类型、位置、严重程度的标准化标注手册，用“机器预标注+人工初标+多人交叉审核”的方式，建立标注质量评分体系，对标注错误率超过5%的批次重新标注，保证标注数据的准确性、一致性。数据预处理方面，使用自适应直方图均衡化、高斯滤波对图像增强和去噪，采用旋转、翻转、随机裁剪、亮度对比度随机调整等方式进行数据扩充，结合红外与可见光图像融合，得到多模态特征数据，增强模型对复杂环境下缺陷的适应性<sup>[9]</sup>。

## 4.3 硬件设备适配策略

根据无人机巡检硬件在复杂环境下性能的瓶颈，做出相应的适配优化和技术升级。续航方面，用高能量密度的锂硫电池取代传统的锂电池，并且加上太阳能薄膜电池辅助供电系统，配合智能电池管理软件随时监控电池状况并调整充放电节奏，把多旋翼无人机的飞行时长由原来的20-30分钟增加到现在的45-60分钟；而且利用路径规划算法不断优化，避开重复飞行和无用航线，减少能耗。对无人机通信模块做电磁屏蔽，采用跳频通信、加密传输的方式抵抗高压线路的电磁辐射干扰，在山区、城市密集区等复杂电磁环境下的巡检数据稳定传输。多传感器适配上开发纳秒级的时间同步、毫米级的空间校准模块来解决可见光、红外、激光雷达数据采集不同步、空间错位的问题，使多个传感器能精准对接，进而达到多源数据融合的目的；推进设备模块化设计，使传感器接口标准化并可以实现快速更换、升级操作，降低后期维护费用。另外，改善无人机避障系统，融合激光雷达和视觉避障技术，加强在复杂地形的自主避障水平，保证巡检作业安全<sup>[10]</sup>。

## 4.4 落地应用保障策略

打破技术落地的最后一道障碍，建设全方位、多层次的落地应用保障体系。联合国家电网、南方电网等龙头企业、电力行业协会及科研院校，加快制定无人机巡检数据采集规范、缺陷识别分类分级细则、智能分析平台技术要求等一系列行业标准，规定好数据格式、接口协议、分类阈值等主要指标，使不同地区、不同单位的无人机巡检技术得以标准化且能够互联互通。在人才培养方面，形成了校企合作、岗中培训、技能竞赛的阶梯式人才培养方案；同高校合作创建

人工智能、无人机应用等专业，定向培养复合型技术人才；定期开展运维人员智能化技术培训，内容包括无人机操作、智能平台操作、缺陷识别结果分析等实践操作能力，用技能竞赛的形式以赛促学，提高一线员工技术应用水平。平台建设上，“边缘计算+云端协同”智能分析云平台，巡检现场设置边缘计算节点，对巡检数据实施实时预处理和初步识别，削减云端传输压力和延迟，云端平台担当大数据储存，模型训练改良，缺陷统计剖析，运维决策支撑等任务，融合GIS地理信息系统，做到缺陷位置可视化标注并自动创建运维工单，打通“巡检-识别-分析-决策-运维-反馈”全链条闭环管理，促使技术成果切实变成电网运维效能。

## 5 结语

综上所述，输电线路无人机巡检缺陷识别与智能分类技术是电力巡检智能化转型、电网安全稳定运行的支撑。本文通过对技术研究的意义以及发展现状的分析，提出了算法模型优化、数据质量提升、硬件设备适配、落地应用保障等一系列的优化策略。人工智能、无人机以及大数据等技术不断的进步，输电线路巡检会进入自飞行的全程智能化、智能识别的全程智能化、自动分类的全程智能化、精准决策的全程智能化。技术创新成果要转化，行业标准应用要健全，技术可靠实用经济，为智能电网发展提供强劲动力，促进电力行业高质量发展。

## 参考文献

- [1] 马晓伟,苑锦霞. 输电线路无人机巡检过程实时通信传输方法[J].无线互联科技,2024,21(24):8-10.
- [2] 刘严,刘吴欢. 人工智能下的输电线路无人机巡检技术[J].电工技术,2024,(S2):141-143.
- [3] 郝睿婧. 基于多旋翼无人机的输电线路巡检技术研究[J].电工技术,2024,(S2):556-558.
- [4] 卢自强. 基于无人机影像深度学习算法的输电线路无人机巡检路径规划[J].建设科技,2024,(S1):63-65.
- [5] 冯伦. 无人机巡检技术在输电线路智能监控系统中的集成与应用[J].建设科技,2024,(S1):81-83.
- [6] 刘维刚,刘新民,赵文瑞,等. 基于多时间尺度和VR的输电线路涉鸟故障无人机巡检方法[J].微型电脑应用,2024,40(12):255-258+263.
- [7] 冯伦. 多光谱图像融合技术在输电线路无人机巡检中的应用与效率分析[J].流体测量与控制,2024,5(06):8-11.
- [8] 王好阳. 基于无人机倾斜摄影的架空电力输电线路巡检方法[J].电气时代,2024,(12):88-91.
- [9] 姜诚,黄和燕,张兴华,等. 基于卫星导航的超高压输电线路无人机高效有序巡检研究[J].电网与清洁能源,2024,40(11):39-45.
- [10] 王涛,严永锋,汪滢,等. 架空输电线路无人机巡检图像缺陷识别方法研究[J].科学技术创新,2024,(24):132-135.

# Discussion on the Production and Disposal of General Industrial Solid Waste in Typical Years

Zhifang Zhang

Baotou Ecological Security Barrier Research Center (Baotou Ecological Environment Monitoring Center), Baotou, Inner Mongolia, 014060, China

## Abstract

Solid waste possesses unique dual attributes as both a “resource” and “environmental pollutant,” functioning as both a “source” and “sink” of pollution [1]. The management and disposal of solid waste are crucial for Baotou City’s “waste-free city” initiative, ecological conservation, and high-quality development. This study primarily analyzes data from 2022, a representative year during the 14th Five-Year Plan period, to examine the generation, utilization, and disposal of general industrial solid waste in Baotou City. It further investigates the spatiotemporal variations and evolution of these processes, identifies existing challenges, and proposes corresponding countermeasures and recommendations, aiming to provide valuable insights for related research.

## Keywords

General industrial solid waste; Ecological and environmental protection; High-quality development

## 典型年份的一般工业固体废物产生及处理处置探讨

张智芳

包头市生态安全屏障研究中心（包头市生态环境监测中心），中国·内蒙古 包头 014060

## 摘要

固体废物有其独特的双重属性，表现为“资源”和“环境”以及污染的“源”和“汇”<sup>[1]</sup>。固体废物的处理处置对包头市“无废城市”建设以及生态环境保护 and 高质量发展具有重要的意义。本文主要以“十四五”期间比较典型的2022年份的数据为分析对象，详细论述了包头市一般工业固废产生和利用处置情况及其时空分异和时空演变，进一步分析存在的问题，并提出相应的对策建议，以期对相关研究提供可参考价值。

## 关键词

一般工业固废；生态环境保护；高质量发展

## 1 引言

包头市作为我国的老工业基地及自治区最重要的工业城市，工业经济基础雄厚，产业门类齐全，已经发展成为我国重要的钢铁、铝业、装备制造及全国最大的稀土工业基地，被誉为“草原钢城”、“稀土之都”。在推动地区经济社会高速发展的同时，作为祖国北疆生态安全屏障的重要组成部分，生态环境保护以及资源可持续利用助力包头市高质量发展必将有更高的要求。固体废物污染防治，是连接着减污与降碳的桥梁，也是打好污染防治攻坚战的重要一环，做好固体废物源头减量、资源化利用以及处理处置，对助力祖国北疆生态安全屏障建设具有极为重要的意义。

## 2 一般工业固体废物产生和利用处置概况

### 2.1 一般工业固体废物产生情况

2018年-2024年，包头市一般工业固体废物产生呈先上升后下降的态势，其中2022年产生量最大，2023年较2022年减少约8万吨，2024年较2023年减少约11万吨，减少量相对于产生量可忽略不计，所以本文选择2022年为研究对象，分析一般工业固体废物产生及处理处置情况。2018年-2022年产生量持续上升，从4453万吨增至的6131万吨，年平均增长率为8.4%。2022年产生量虽然最高，但相较于前四年增速变缓，说明在“无废城市”试点期间及“十四五”期间，通过有效落实一系列政策、措施等，一般工业固废全过程治理效果比较显著。

### 2.2 各旗县区一般工业固废产生量时空分异

包头市各旗县区一般工业固体废物产生量与生产总值（GDP）在全市的占比情况如图1所示。2022年地区生产总值3749.9亿元，增长7.2%。从图1可以看出，各旗县区

【作者简介】张智芳（1985—），女，中国内蒙古呼和浩特人，硕士，工程师，从事生态环境保护研究。

生产总值与一般工业固废产生量的关系较复杂，昆区、九原区、土右旗、石拐区一般工业固废产生量在全市的占比与其生产总值的占比较为匹配，青山区、东河区、高新区则以相对较小的一般工业固废产生量贡献了相对较大的 GDP，其余旗县区 GDP 占比与一般工业固废产生量占比呈现“倒挂”现象，均是 GDP 贡献较小但产生了大量的一般工业固废。例如达茂旗 2022 年生产总值为 107.7 亿元，占全市生产总值 2.87%，但一般工业固废产生量高达 1456.57 万吨，占全市产生量 23.76%，与之相对，青山区一般工业固废产生量占比为 1.62%，但是 GDP 贡献为 20.18%。

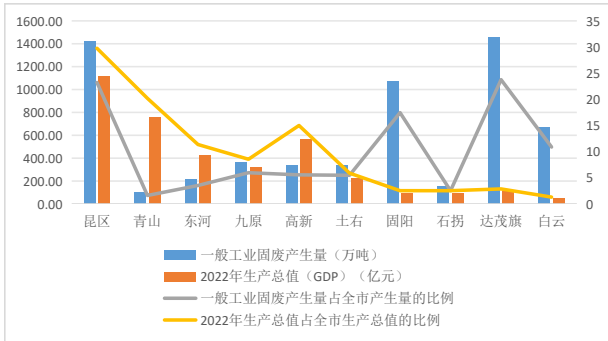


图 1 各旗县区一般工业固废产生量与生产总值 (GDP) 在全市的占比情况

### 2.3 一般工业固废利用处置能力及其时空演变

各旗县区一般工业固废综合利用、处置及贮存比例如图 2 所示。各旗县区利用处置量约 4100 万吨，利用量和处置量之比为 3.56，贮存量约 2038 万吨。大部分旗县区一般工业固废利用处置能力比较充足，其中利用处置率超过 90% 的旗县区有青山区、高新区、土右旗和达茂旗，利用处置率不足 50% 的旗县区有九原区、固阳县和白云区。

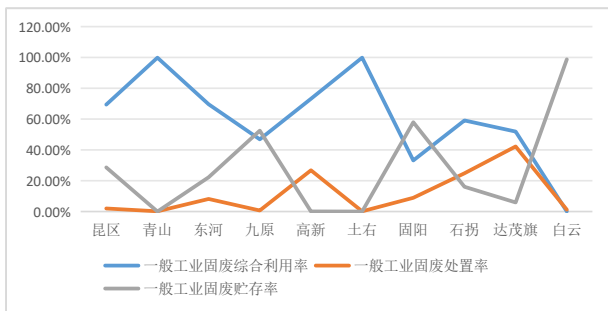


图 2 各旗县区一般工业固废综合利用、处置及贮存比例

## 3 一般工业固废治理存在的问题和挑战

### 3.1 产业结构偏重，一般工业固废产生强度较高

2022 年包头市一般工业固废达到近七年的峰值，近两年才呈现下降的趋势。究其原因，主要是包头市产业结构整体依然偏重，优势产业仍为钢铁、电力、装备制造、有色冶炼、矿业开发等，产业资源化、前端化、重型化明显，单位 GDP 所产生的一般工业固体废物量较大。更深的原因在于，

还未建立健全或者完善好节约集约资源循环利用观，绿色低碳的经济体系及生产生活方式、节约资源与环境保护的产业格局等还未全面形成，资源利用还存在简单粗放的模式。

### 3.2 一般工业固废利用途径单一，市场消纳能力有限

受地理位置影响，包头市一般工业固废资源化利用主要依靠本土能力，综合利用从业企业以中小型企业为主，企业数量较少，资源化利用实际能力缺口大。目前一般工业固废资源化利用途径主要有经济附加值较低的混凝土、环保砖、水泥、矿渣微粉等低端建材产品，产品结构单一，受近几年市场大环境影响较为明显，本地市场消纳能力有限。

### 3.3 尾矿的利用处置率不高导致一般工业固废贮存率偏高

尾矿产生量占一般工业固废总产生量的一半左右，综合利用率在 2022 年才达到 30%，大量的尾矿只能贮存，尤其含稀土尾矿作为战略资源不能利用处置只能暂时贮存，从而导致一般工业固废贮存率较高。

### 3.4 贮存率偏高伴随环境风险难以准确揭示

一般工业固废产生量大、类别复杂，个别类别综合利用率及处置率偏低导致贮存率偏高。尾矿库贮存过程隐蔽性泄漏等情景下污染物的释放、代谢、迁移和演化规律等基础性研究尚未深入开展<sup>[1]</sup>，对水环境的影响以及其他潜在环境风险难以准确把握。随着黄河流域生态保护和高质量发展等国家及区域重大战略的实施，固体废物对环境影响的潜在问题会更加明显。

### 3.5 固体废物高附加值综合利用和助力减污降碳动能不足

当前一般工业固体废物利用处置行业存在同质化竞争现象，龙头企业较少且规模普遍偏小，呈现出“小散弱”的行业格局<sup>[2]</sup>。与此同时，一般工业固体废物资源化利用技术水平还有待进一步提高，且地方性政策及配套标准尚在进一步完善中，导致附加值低利用水平低现象普遍，高水平深度利用能力及高附加值利用能力不足，助力实现减污降碳协同发展能力还需进一步提升。

## 4 对策与建议

固体废物污染防治一头连着减污，一头连着降碳，是打好污染防治攻坚战的重要一环，也是环保督察工作的重中之重，提升固体废物利用处置能力与水平，既有利于减少贮存量大所带来的的环境风险，还可以协同产生碳减排效应，对生态环境保护和高质量发展具有重要意义。

### 4.1 持续推动一般工业固体废物源头减量与综合利用

固废污染防治遵循的基本原则是“减量化、资源化、无害化”，提高源头减量与资源化利用水平，才可以为末端治理大大减轻压力。包头市近几年一般工业固废产生强度虽然逐年下降，综合利用水平较“无废城市”建设试点之前也有了较大提升，但是产生量总体基数仍然很大。建议从以下

几方面推动源头减量和资源化利用：（1）继续推动传统产业改造升级，特别是针对产废量大的、资源能源利用水平不高的行业企业，全面提升工艺、技术、能效水平，尽量做到对资源、原材料“吃干榨尽”，减少工业固体废物产生量和危害性<sup>[1]</sup>。（2）加快推动工业产业绿色化、智能化、低碳化发展水平。积极推进钢铁、有色冶炼、稀土等行业产业链“延链补链强链”，既能多元化发展产业，又能减少废弃物的排放，还能提高固体废物深度利用及高附加值利用水平，促进经济、社会、生态环境效益协同增效。（3）大力推动循环产业发展。着力推动重点园区循环化改造，通过链接共生、原料互供和资源共享在企业、园区之间提高资源能源利用效率，培育引领龙头企业发展并带动其他中小企业提升资源化利用技术水平。（4）强化大宗工业固体废物规模化利用。依据地方一般工业固废利用实际，持续推动冶炼废渣、粉煤灰等用于道路、场馆等公共工程建设，推进尾矿有价值组分高附加值利用、采矿废石制备砂源替代材料和回填利用、发展冶炼废渣制烧结透水砖产业等。

#### 4.2 加快发展一般工业固体废物利用处置先进技术

增强创新发展能力，重点发展固体废物高附加值综合利用技术，研发并推广应用冶金固体废物资源化回收处理技术、稀土资源回收及再利用技术、脱硫石膏高附加值材料技术、尾矿深度综合利用和无害化处理等技术先进、用渣量大、附加值高的先进技术，通过多源协同利用、废物全量化利用，实现一般工业固体废物高值利用，助力减污降碳协同增效。

#### 4.3 防范固体废物污染源环境风险隐患

做好固体废物污染源环境风险隐患排查，借助卫星遥感、无人机等科技手段，并结合综合执法等行政管理及群众监督方式，以河流湖库、农田、地质灾害易发多发区等环境敏感脆弱区为重点，开展固废堆场、矿山排土场、固废填埋场、尾矿库等风险隐患排查，深入推进固废排查整治力度。

#### 4.4 坚持系统观念，统筹一般工业固废与碳减排协同治理

固体废物污染治理是一项具有重大意义且过程复杂的系统工程，立足新发展阶段，固废污染治理需处理好多重关系，包括生态环境保护和经济高质量发展的关系、污染防治

和资源利用的关系以及污染防治与碳减排的关系<sup>[2]</sup>，需从经济社会可持续发展和生态文明建设的全局出发，协同推进防治工作，确保环境质量持续改善及生态安全。首先，加强一般工业固体废物从产生到处理处置全过程的协同治理，突出源头减量化、过程资源化、结果无害化，最大程度实现资源的循环利用以及环境的可持续发展；其次，围绕生态环境保护工作的整体性，强化一般工业固废与大气、水、土壤的协同治理，助力实现碳达峰碳中和。

#### 4.5 持续完善一般工业固废规范化管理体系

持续健全完善一般工业固体废物物联网监控平台，覆盖固体废物从产生、收集、贮存、运输、利用到处理处置全过程，推动实现一般工业固体废物全时段、多环节、智能化监管。探索建立综合性管理服务平台，整合各方面的基础数据，形成共享机制，打破数据壁垒，为相关职能部门开展联防联控工作提供数据基础。

### 5 结语

综上所述，包头市从2019年以来通过开展“无废城市”试点建设以及“十四五”期间持续推进“无废城市”建设，各项任务措施有效落地实施，持续提升“无废城市”建设水平，2022年一般工业固废产生量达到近七年峰值后开始呈现下降态势，综合利用率也较试点建设之前大幅提升，但包头市一般工业固体废物总体体量较大，在全过程治理方面还存在较大的挑战，借助黄河流域生态保护和高质量发展及祖国北疆生态安全屏障建设等重大战略，还需在固体废物源头减量、综合利用等方面持续发力。

#### 参考文献

- [1] 赵鑫. 黄河流域固废治理现状、问题与对策建议[J]. 环境科学研究, 2023(2):373-380.
- [2] 李静, 潘永刚, 孙书晶, 等. 2016—2021年我国危险废物环境管理及市场变化研究[J]. 环境保护, 2022, 50(17):52-57.
- [3] ZHANG H, DUAN Y, WANG H, et al. An empirical analysis of tourism eco-efficiency in ecological protection priority areas based on the DPSIR-SBM model: a case study of the Yellow River Basin, China[J]. Ecological Informatics, 2022, 70:101720.

# Key Factors Analysis in Construction Schedule Management of New Energy Projects

Chenbing Yang

Guizhou Jinyuan Weining Energy Co., Ltd., State Power Investment Corporation, Weining County, Bijie, Guizhou, 553100, China

## Abstract

Against the backdrop of global efforts to implement sustainable development concepts and accelerate energy structure transformation, new energy project construction has demonstrated vigorous growth. As crucial platforms for clean energy utilization, the progress management of new energy projects not only determines their timely commissioning and realization of economic and social benefits, but also exerts profound impacts on the stable development of the entire energy sector. This paper conducts an in-depth analysis of construction schedule management in new energy projects, examining key influencing factors from multiple perspectives. Through systematic research on these elements, the study aims to provide actionable insights for project management, enabling stakeholders to better grasp critical schedule control points. By ensuring smooth project advancement and timely completion of construction targets, this research ultimately contributes to the robust development of the new energy industry.

## Keywords

New energy projects; Engineering construction; Schedule management; Critical factors

## 新能源项目工程建设进度管理关键因素分析

杨陈兵

国家电投集团贵州金元威宁能源股份有限公司, 中国·贵州 毕节 553100

## 摘要

在当前全球积极践行可持续发展理念, 大力推动能源结构转型的背景下, 新能源项目工程建设呈现出蓬勃发展的态势。新能源项目作为清洁能源开发利用的重要载体, 其工程建设进度管理不仅关系到项目能否按时投入使用, 发挥应有的经济效益和社会效益, 还对整个能源行业的稳定发展有着深远影响。本文围绕新能源项目工程建设进度管理展开深入探讨, 从多个方面分析影响进度的关键因素。通过对这些因素的研究, 旨在为新能源项目工程建设提供有益的参考, 帮助项目管理者更好地把握进度管理要点, 确保项目顺利推进, 按时完成建设目标, 从而为新能源产业的健康发展提供有力保障。

## 关键词

新能源项目; 工程建设; 进度管理; 关键因素

## 1 引言

随着传统能源的日益枯竭以及其对环境造成的负面影响逐渐凸显, 新能源的开发利用成为了全球关注的焦点。新能源项目工程建设成为了能源领域的重要工作, 其建设进度管理的重要性不言而喻。合理的进度管理能够使项目按照预定的时间计划顺利进行, 保证项目按时投入使用, 为能源供应提供及时支持。同时, 有效的进度管理有助于控制项目成本, 提高资源利用效率, 避免因工期延误带来的额外费用支出。

## 2 新能源项目工程建设进度管理概述

新能源项目工程建设具有自身的特点, 这些特点对进度管理提出了特殊要求。新能源项目通常涉及到先进的能源技术和复杂的工程系统, 如风力发电项目中的风机设备、光伏发电项目中的光伏组件和逆变器等, 这些技术的应用需要专业的知识和技能。而且新能源项目的建设往往受到自然环境和地理条件的较大影响, 例如风电项目需要选择风资源丰富的地区, 光伏项目需要考虑光照条件和土地可用性等。

进度管理在新能源项目工程建设中扮演着核心角色。它是指对项目建设的各个阶段和环节进行合理的计划、组织、协调和控制, 以确保项目能够按照预定的时间节点顺利完成。通过有效的进度管理, 可以合理安排资源, 优化施工顺序, 及时发现和解决影响进度的问题, 保证项目建设的连续性和协调性。进度管理的目标是在规定的时间内, 以合理的成本

【作者简介】杨陈兵(1991—), 男, 中国云南曲靖人, 大专, 助理工程师, 从事新能源项目工程建设管理方面研究。

和质量标准完成项目建设任务，实现项目的预期效益<sup>[1]</sup>。

### 3 新能源项目工程建设进度管理的关键因素

#### 3.1 前期规划：项目进度的基石

可行性研究：作为项目前期规划的核心环节，承担着对项目全方位评估与论证的关键职责。它需从多个维度展开深入剖析，涵盖项目的必要性，即项目是否契合市场需求、社会发展趋势以及政策导向；技术可行性方面，要考量现有技术能否支撑项目顺利实施，技术难题有无有效解决方案；经济可行性上，需精准核算项目成本与预期收益，判断其是否具备经济合理性；环境可行性也不容忽视，要评估项目对周边生态环境、社会环境的影响程度。

倘若可行性研究不够充分，对项目实际情况缺乏全面、深入的了解，对潜在风险预估不足，那么在项目建设过程中，就极易出现设计变更、技术方案频繁调整等情况。这些问题的产生会打乱原有的施工计划，造成人力、物力、财力的浪费，进而严重影响项目的建设进度，甚至可能导致项目无法按期交付使用。

项目目标设定：明确、合理的项目目标能够为进度管理提供清晰的方向。项目目标包括建设工期、质量标准、投资预算等方面，这些目标之间相互关联、相互制约。如果在目标设定时没有充分考虑各方面的因素，导致目标不合理或不明确，会给进度管理带来困难。例如，过于紧张的工期目标可能导致施工过程中为了赶进度而忽视质量和安全，进而引发质量问题返工，影响整体进度<sup>[2]</sup>。

前期审批工作：新能源项目需要经过多个部门的审批，包括规划、环保、土地、能源等部门的许可。审批流程复杂、审批时间长是常见的问题。如果前期审批工作不及时、不顺利，项目无法按时获得建设许可，就会导致项目开工时间推迟，直接影响建设进度。

#### 3.2 资源配置：进度推进的保障

人力资源：人力资源是新能源项目工程建设的关键资源之一。项目需要各类专业人才，包括项目经理、工程师、技术工人等。人员的数量、素质和技能水平直接影响项目的进度。如果项目管理人员缺乏丰富的项目管理经验和组织协调能力，可能导致项目管理工作混乱，各环节之间的衔接不顺畅。技术工人如果技能不足，可能无法保证施工质量，从而需要返工，影响进度。而且人员的配备数量如果不合理，出现人员短缺或过剩的情况，也会对进度产生影响。人员短缺会导致施工力量不足，工作进度缓慢；人员过剩则可能增加管理成本，降低工作效率。

设备资源：设备资源是新能源项目工程建设的重要物质基础。新能源项目通常需要大量的专用设备，如风力发电机组、光伏支架安装设备、电气设备等。设备的供应情况直接影响项目的进度。如果设备供应商的生产能力不足、供货不及时，或者设备在运输过程中出现损坏、延误等问题，会

导致施工现场设备短缺，无法正常开展施工工作。设备的性能和可靠性也至关重要，如果设备在使用过程中频繁出现故障，需要进行维修和更换，会浪费大量的时间和精力，影响进度。

材料资源：材料资源是项目建设的基本要素。新能源项目所需的材料种类繁多，包括钢材、水泥、光伏组件、电缆等。材料的供应稳定性和质量直接影响项目的进度。如果材料供应商不能按时供应材料，或者材料质量不符合要求，需要进行退换货处理，会导致施工过程中中断或返工。而且材料的储备和保管也很重要，如果材料保管不当，出现损坏、丢失等情况，也会影响项目的正常进行<sup>[3]</sup>。

#### 3.3 技术因素：进度管理的技术支撑

技术方案合理性：技术方案的合理性是影响新能源项目工程建设进度的重要技术因素。技术方案需要根据项目的特点、要求和实际情况进行设计和选择。如果技术方案不合理，不能适应项目的实际条件，可能导致施工难度增大、施工效率降低。例如，在风电项目中，如果风机的选型和布局不合理，可能会影响风能的利用效率和风机的运行稳定性，增加施工和调试的难度。在光伏项目中，如果光伏组件的安装方式和电气连接方案不合理，可能会影响光伏发电系统的发电效率和安全性。

技术创新与应用：技术创新与应用在新能源项目中较为常见，但同时也给进度管理带来了一定的挑战。新能源领域技术发展迅速，新的技术和工艺不断涌现。在项目中应用新技术可以提高项目的性能和效益，但也可能面临技术不成熟、施工经验不足等问题。例如，一些新型的光伏材料和储能技术在应用初期可能存在性能不稳定、施工工艺不完善等情况，需要进行大量的试验和调试工作，这会增加项目的建设周期<sup>[4]</sup>。而且技术人员对新技术的掌握程度和应用能力也会影响进度，如果技术人员对新技术不熟悉，可能会导致施工过程中出现技术问题，影响施工进度。

技术难题解决能力：技术难题的解决能力也是影响进度的关键。在项目建设过程中，难免会遇到各种技术难题，如地质条件复杂导致的地基处理问题、设备安装过程中的技术故障等。如果项目团队缺乏解决技术难题的能力，不能及时有效地解决问题，会导致施工停滞，影响进度。而且解决技术难题可能需要花费大量的时间和资源，进一步延误项目的建设进度。

#### 3.4 外部环境：不可忽视的影响因素

政策法规：政策法规对新能源项目工程建设进度有着重要的影响。政府的能源政策、环保政策、土地政策等都会对项目的建设和进度产生直接或间接的影响。例如，政府出台的新能源补贴政策、可再生能源配额制度等政策，会影响项目的投资决策和建设积极性。如果政策发生变化，如补贴标准降低、政策支持力度减弱，可能会导致项目投资者对项目的预期收益产生影响，从而影响项目的推进速度。环保政

策和土地政策对项目的选址、建设和运营也有严格的要求，如果项目不符合相关政策规定，可能会面临整改、停工等问题，影响进度。

**自然条件：**自然条件是新能源项目工程建设不可忽视的外部因素。新能源项目通常对自然条件有较高的要求，如风电项目需要充足的风资源，光伏项目需要充足的光照条件。自然条件的变化，如恶劣的天气、自然灾害等，会对项目的施工进度产生严重的影响。例如，暴雨、暴雪、大风等恶劣天气会影响露天施工的进行，导致施工暂停。地震、洪水、泥石流等自然灾害可能会对已建成的工程设施造成破坏，需要进行修复和重建，从而延误项目的进度。

**社会环境：**社会环境也会对新能源项目工程建设进度产生影响。项目所在地的社会文化、风俗习惯、公众态度等都会对项目的建设和进度产生一定的作用。例如，项目如果涉及到征地拆迁等问题，如果与当地居民的沟通和协调工作不到位，可能会引发居民的不满和抵制，导致征地拆迁工作进展缓慢，影响项目的开工建设。而且社会舆论对新能源项目的关注度也越来越高，如果项目在建设过程中出现一些问题，受到社会舆论的关注和质疑，可能会给项目建设带来一定的压力，影响进度。

### 3.5 管理因素：进度有序推进的关键

**进度计划制定：**进度计划的制定是进度管理的重要环节。合理的进度计划需要根据项目的目标、任务、资源等情况进行科学的安排和规划。进度计划应该明确各个阶段和环节的工作内容、工作时间、责任人等，形成一个完整的时间表和路线图。如果进度计划制定不合理，工作安排不均衡，关键路径不清晰，会导致项目施工过程中出现工作脱节、资源浪费等问题，影响进度。而且进度计划应该具有一定的灵活性，能够根据实际情况进行调整和优化，以适应项目变化的需要。

**进度监控：**进度监控是保证项目按计划进行的重要手段。在项目建设过程中，需要对项目的实际进度进行实时的监控和跟踪，及时掌握项目的进展情况。通过对比实际进度和计划进度，及时发现进度偏差，并分析偏差产生的原因。如果进度监控不及时、不准确，不能及时发现进度问题，等问题积累到一定程度才被发现，可能会导致问题难以解决，影响项目的整体进度。而且进度监控需要建立有效的信息反馈机制，确保信息的及时传递和共享，以便项目管理者能够及时做出决策。

**风险管理：**风险管理是进度管理的重要组成部分。新

能源项目工程建设过程中面临着各种风险，如技术风险、市场风险、资金风险、自然风险等。这些风险如果得不到有效的识别、评估和应对，可能会对项目的进度产生严重的影响。例如，技术风险可能导致施工过程中出现技术难题，影响施工进度；资金风险可能导致项目资金短缺，无法按时支付工程款和采购材料，影响施工进度。项目管理者需要建立完善的风险管理体系，对可能出现的风险进行提前预测和评估，制定相应的风险应对措施，以降低风险对项目进度的影响<sup>[5]</sup>。

## 4 结语

新能源项目工程建设进度管理是一个复杂的系统工程，受到多种因素的综合影响。项目前期规划为项目提供了基础和方向，如果规划不合理，会导致后续工作中出现各种问题，影响进度。资源配置是项目建设的物质基础，人力资源、设备资源和材料资源的合理配置和有效利用是保证项目进度的关键。技术因素直接影响项目的施工难度和效率，合理的技术方案、有效的技术创新应用和强大的技术难题解决能力有助于提高项目进度。

为了确保新能源项目工程建设的顺利进行，项目管理者需要充分认识这些关键因素，采取有效的措施进行管理和控制。在项目前期，要进行充分的可行性研究和规划，合理设定项目目标，做好前期审批工作。在资源配置方面，要加强人力资源管理，提高人员素质和技能水平，合理配置设备和材料资源，确保资源的供应稳定和质量安全。在技术方面，要选择合理的技术方案，积极稳妥地应用新技术，提高技术难题解决能力。对于外部环境因素，要密切关注政策法规变化，做好应对自然条件变化的准备，加强与当地社会的沟通和协调。在管理方面，要制定科学合理的进度计划，加强进度监控，建立完善的风险管理体系。

### 参考文献

- [1] 李佩. 新能源发电项目工程建设及其控制策略探究[J]. 中国设备工程, 2025, (10): 245-247.
- [2] 李伟, 张鹏. 新能源发电基建项目降本增效体系的管理实施[J]. 中国电力企业管理, 2021, (04): 76-77.
- [3] 马春松. 新能源工程项目质量管理与项目进度控制研究[J]. 城市开发, 2024, (13): 146-147.
- [4] 胡正军. 新能源基建工程项目进度管理及影响因素分析[J]. 低碳世界, 2024, 14(08): 192-194.
- [5] 孔贵. 新能源工程项目质量管理与项目进度控制[J]. 现代物业(中旬刊), 2019, (11): 135.

# Common issues and solutions in regular inspections of pressure special equipment

Pengfei Guo

Henan Province Boiler Pressure Vessel Inspection Technology Science Research Institute Zhumadian Branch, Zhumadian, Henan, 463000, China

## Abstract

Regular inspections of pressure special equipment are crucial for ensuring industrial safety and continuous production. The scientific and standardized implementation of these inspections directly affects the effectiveness of risk control. In practice, inspection activities face numerous deep-seated issues: improper completion of inspection records leads to distorted safety assessments, lack of management of calibration certificates causes reliability crises in measurement data, and superficial testing of safety attachments renders protective mechanisms ineffective. This paper deeply analyzes the causes of these problems and proposes systematic solutions: establishing standardized inspection record templates and professional training systems to ensure uniformity and standardization in the inspection process and results; implementing calibration management ledgers and intelligent reminder mechanisms to ensure the stability of measurement equipment's metrological characteristics; formulating detailed safety attachment test procedures to strengthen the evaluation of equipment protection functions. Research shows that a comprehensive inspection system can effectively identify operational hazards, extend equipment lifespan, reduce unplanned downtime risks, and lay a solid foundation for enterprise safety production, making significant contributions to the modernization of special equipment supervision.

## Keywords

Pressure-bearing special equipment; Industrial production; Equipment inspection

## 承压特种设备定期检验中的常见问题与解决措施

郭鹏飞

河南省锅炉压力容器检验技术科学研究院驻马店分院, 中国·河南驻马店 463000

## 摘要

承压特种设备定期检验是确保工业安全与连续生产的关键环节,其科学规范实施直接关系到风险防控成效。实践中,检验活动面临诸多深层次问题:检验记录填写不规范导致安全评估失真,设备校准证书管理缺位引发测量数据可靠性危机,安全附件功能测试表面化使设备保护机制形同虚设。本文深入剖析这些问题成因,提出系统性解决策略:构建标准化检验记录模板与专业培训体系,确保检验过程与结果的规范统一;实施校准管理台账与智能提醒机制,保障测量设备计量特性稳定;制定精细化安全附件测试规程,强化设备防护功能评估。研究表明,完善的检验体系能有效识别运行隐患,延长设备使用寿命,降低非计划停机风险,为企业安全生产奠定坚实基础,对推动特种设备监管现代化具有重要价值。

## 关键词

承压特种设备; 工业生产; 设备检测

## 1 引言

承压特种设备作为工业基础设施核心组成,广泛分布于能源、化工、冶金等支柱行业,其运行状态直接影响国计民生与社会安全。此类设备在高温高压环境下长期服役,内蕴巨大能量,结构完整性一旦遭受破坏,极易引发重大安全事故,造成人员伤亡与经济损失。定期检验作为识别设备健康状态、发现潜在缺陷的专业手段,在预防灾难事故、保障生产连续性方面发挥着不可替代的作用。然而,检验实践

中依然存在诸多深层次问题,限制了检验活动的技术价值发挥。本研究立足行业实际,聚焦承压特种设备检验领域三个典型问题:检验记录管理失范、检测设备校准缺位、安全附件测试流于形式,分析其产生根源与危害后果,提出针对性解决方案,旨在完善检验质量控制体系,提升设备安全水平,为特种设备安全管理现代化提供理论与实践参考。

## 2 承压特种设备定期检验重要性

### 2.1 消除安全隐患

定期检验作为承压特种设备管理体系中至关重要的环节,承载着发现设备潜在缺陷与隐患的核心职能。科学规范的检验活动能全面评估设备结构完整性,及时识别材料疲

【作者简介】郭鹏飞(1990—),男,中国河南驻马店人,本科,从事承压特种设备检验研究。

劳、焊缝劣化、壁厚减薄等潜藏风险。正确实施的检验机制赋予设备管理者洞察力,使潜藏于表象之下的危险因素无所遁形。优质检验不仅在于技术手段的先进,更体现于检验思维的前瞻性,将可能演变为严重事故的微小征兆扼杀于萌芽状态。承压设备一旦失效,极易引发灾难性后果,而定期检验正是守护产业安全的第一道防线,为设备运行筑起坚实屏障,确保运行环境的安全可靠,为企业健康发展奠定基础<sup>[1]</sup>。

## 2.2 保障生产连续性

合理安排的定期检验制度为企业生产活动提供强力支撑,形成生产连续性的可靠保障。突发性设备故障往往导致意外停产,造成生产计划中断与资源浪费,而系统性检验活动能有效预知设备状态变化趋势,实现设备维护从被动应对向主动预防的转变。精细化的检验方案将检修活动纳入生产计划体系,使维护工作成为生产流程的有序组成部分。深入分析检验数据可揭示设备运行规律,指导设备管理者优化运行参数,延展设备使用周期。完善的检验管理体系使设备始终保持良好工况,减少非计划停机时间,提升整体生产效率。设备稳定运行构成企业核心竞争力,定期检验则是确保这一竞争力持续存在的关键措施<sup>[2]</sup>。

## 3 承压特种设备定期检验中的常见问题

### 3.1 检验记录填写不规范与不完整

规范完整的检验记录是承压特种设备安全管理中至关重要的环节,承载着设备使用全生命周期的关键信息。检验记录填写不规范与不完整问题普遍存在于现场检验工作中,表现为检验依据引用错误、检验项目遗漏、数据记录模糊或缺、检验人员签字不全等情形。此类问题本质上反映了检验过程的严谨度不足,破坏了检验工作的连续性与可追溯性。检验记录作为设备安全状态的重要证明文件,其完整性直接关系到后续风险评估的准确性与维护决策的合理性。当设备发生事故或出现异常状态时,不规范的检验记录将导致责任界定困难,甚至造成法律风险。完善的检验记录管理体系应建立在标准化表格应用与专业审核机制基础上,确保每一环节都有据可循,为设备安全运行提供坚实保障<sup>[3]</sup>。

### 3.2 检验设备校准证书过期或缺失

精确的检验设备是保证承压特种设备检测结果可靠性的基础条件。检验设备校准证书过期或缺失现象在行业内时有发生,导致测量数据可信度大幅降低。校准证书实质上是量值溯源的重要环节,证明检测设备符合计量标准并处于受控状态。当检验机构使用未经校准或校准证书逾期的设备进行检测时,所得数据存在系统性偏差风险,无法准确反映承压设备的真实状态。这种偏差累积可能引发严重判断失误,使潜在危险被掩盖。检验设备的计量特性会随时间推移而变化,定期校准正是确保其性能稳定的必要手段。建立检测设备校准管理台账,实施到期预警机制,落实校准责任制度,才能从源头上保证检验结果的科学性与权威性,为承压设备

安全运行奠定量化基础<sup>[4]</sup>。

### 3.3 安全附件功能测试流于形式

严谨的安全附件功能测试是承压特种设备安全屏障的最后防线,关系到设备运行中的应急响应能力。安全附件功能测试流于形式的问题长期困扰着行业发展,主要体现在测试程序简化、测试工况不足、测试结果记录粗略等方面。安全阀、爆破片、液位计等关键附件在承压设备中承担着限制参数、预警异常和紧急保护等核心功能,其性能状态直接影响设备安全边界。功能测试仅停留在表面,无法真实评估附件在极端工况下的响应特性,存在重大隐患。科学的测试应包含静态检查与动态验证两个层面,覆盖附件的灵敏度、可靠性与稳定性等关键指标。检验机构应强化测试规程的专业性与操作的标准化,确保每一项安全附件都经受全面评估,真正发挥其保护功能,为承压设备构筑牢固的安全防线<sup>[5]</sup>。

## 4 承压特种设备定期检验中的常见问题解决策略

### 4.1 应用标准化检验记录模板与培训

标准化检验记录模板是承压特种设备定期检验过程中确保检验质量与一致性的基础工具。合理设计的检验记录模板能够引导检验人员按照规范要求完成全部检验项目,避免因个人经验差异导致的检验遗漏或标准不一致。模板的标准化程度直接影响检验结果的可靠性与可追溯性,对设备安全运行具有关键作用。与此相辅相成的检验培训体系则是保障检验人员专业能力的必要措施,培训内容应涵盖法规标准解读、检验方法演示、典型缺陷识别等多个维度,形成理论与实践相结合的知识体系。检验记录模板的优化应考虑设备类型差异、检验重点区分以及数据记录规范化,同时保持必要的灵活性以应对特殊情况。

为了进一步优化承压特种设备使用中存在的问题,有关部门可以构建分级分类的检验记录模板库,按照压力容器、锅炉、管道等不同设备类型设计专用模板,在模板中明确检验部位、检验方法、判定标准等关键要素。模板设计宜采用结构化布局,便于检验数据的填写与后期统计分析。培训方面可建立“理论学习-模拟演练-实操考核”的培训流程,定期组织检验人员就新修订的标准规范、新型检测技术进行专题研讨。某省质监局推行的“一人一册”检验档案管理模式,将标准化检验模板与个人培训记录相结合,实现了检验质量的显著提升,设备安全事故发生率降低了近二成,检验效率提高了三成以上。

### 4.2 建立校准管理台账与到期提醒

校准管理台账系统作为承压特种设备检验质量保障的重要环节,承载着检测设备全生命周期管理的核心功能。精确的台账记录是保证检测数据可靠性的基石,涵盖仪器设备的基础信息、校准历史、性能变化趋势等关键数据。科学的台账结构设计应当突出时效性管理,将设备状态、校

准周期、责任人等要素有机整合。到期提醒机制则是台账管理的动态延伸,通过预设的时间节点触发提醒流程,确保校准工作的及时开展。台账与提醒系统的有机结合形成了闭环管理模式,规避了因校准延误引发的检测数据失准风险,提升了特种设备检验工作的整体质量水平。

为了进一步优化承压特种设备使用中存在的问题,有关部门可以采用分级授权的电子化台账系统,按照设备重要程度和风险等级,分别设置查看、编辑、审核三级权限。系统设置设备名称、型号、出厂编号、精度等级、校准周期、上次校准日期、下次校准日期等基础字段,同时增设使用频率、历史故障记录、责任人员等扩展信息,配合红黄绿三色状态标识直观显示仪器当前使用状态。系统可整合自动提醒功能,通过短信、邮件、系统弹窗等多渠道推送,在校准日期临近时分别于30天、15天、7天发出梯度提醒,对于关键设备还可设置3天和1天的强制提醒,确保相关人员及时响应。某大型石化企业实施的“双轨制”校准管理模式,将电子台账与实物标识相结合,在检测仪器上粘贴含二维码的色彩编码校准状态标签,绿色代表合格在用、黄色代表即将到期、红色代表已过期禁用。现场操作人员通过手机扫码即可查看设备详细校准信息和历史记录,配合移动终端查询功能和每日班前设备点检制度,使校准管理可视化程度大幅提升。实施一年来,该企业校准延误率从原来的12%下降至0.3%,设备完好率提升至99.2%,因仪器失准导致的质量偏差事件减少了87%,检测数据的准确性与可靠性获得显著改善。

#### 4.3 制定安全附件测试详细操作规程

安全附件测试操作规程是承压特种设备安全运行保障体系中的关键技术文件。规范的操作规程能够消除人为因素影响,保证测试过程的标准一致,确保测试结果的可靠性与准确性。安全阀、爆破片、压力表等安全附件作为设备的“最后防线”,其性能状态直接决定设备在异常工况下的安全裕度。详细操作规程的制定须立足于国家标准及行业规范,结合设备技术特点与运行环境,明确测试条件、测试步骤、判定标准等要素。规程内容的精准性与可操作性平衡是制定过程中的核心难点,过于原则化难以指导实际操作,过于繁琐则影响测试效率。完善的测试规程应包含前期准备、操作步骤、结果记录、异常处理等完整环节,构建起测试工作的全流程指导框架。

为了进一步优化承压特种设备使用中存在的问题,有关部门可以构建层级清晰的操作规程体系,在总则规程基础

上,针对安全阀、爆破片、液位计等不同类型安全附件制定专项测试规程,细化测试工具准备、测试环境要求、操作步骤描述等内容。规程宜采用图文结合方式,关键步骤配以清晰图示,便于现场人员理解执行。某大型发电集团推行的“一附件一规程”管理模式,为每类安全附件建立包含典型案例的详细测试手册,结合视频演示与现场实操培训,显著提升了测试人员的专业能力与测试质量。该集团统计数据显示,规范实施后安全附件失效率下降了40%,设备非计划停机次数减少了近半,经济效益与安全绩效双获提升。

## 5 结语

承压特种设备定期检验质量直接决定了设备安全边界的可靠程度,是防范重大事故的技术支撑。当前检验工作中的记录不规范、校准管理缺位、功能测试形式化等问题,反映了检验体系建设尚需完善。解决这些问题需系统思维,从制度设计、技术规范、人员培养等多维度协同发力。标准化检验记录体系构建了检验活动的规范框架,校准管理台账确保了检测数据的量值溯源,安全附件测试规程保障了防护机制有效性评估。随着工业数字化转型深入推进,检验技术面临新的发展机遇。智能检测装备、大数据分析平台正逐步应用于检验实践,推动检验模式向预测性、智能化方向演进。未来检验工作应强化风险导向理念,细化差异化检验策略,优化检验资源配置,建立检验质量评价体系,促进检验标准与国际接轨。监管部门与行业单位应共同努力,提升检验工作科学性与权威性,为承压特种设备安全运行构筑坚实屏障,促进工业生产安全稳定发展。

## 参考文献

- [1] 马正嘉,苏万斌,徐晓萌,等.基于RBI技术的特种设备安全检验研究动态与应用趋势分析[J].工业安全与环保,2025,51(05):59-66.
- [2] 孙凯,程康,徐海亮,等.智能网联特种设备科技与标准化需求剖析——以移动式承压设备为视角[J].中国标准化,2025,(09):92-96.
- [3] 田儒彰,熊穗平,刘宏宇.中国特种设备事故(2003—2023)统计分析及安全监管对策研究[J/OL].工业安全与环保,1-12[2025-05-23].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1640.X.20250328.1444.006.html>.
- [4] 韦保.科技创新与标准制定协同双轮驱动特种设备行业新质生产力增长[J].标准科学,2025,(03):11-15.
- [5] 刘松林.承压类特种设备风险管理问题探究[J].设备管理与维修,2025,(02):4-6.DOI:10.16621/j.cnki.issn1001-0599.2025.01D.02.

# Research on Corrosion Issues and Protective Measures for Boiler Pressure Vessels and Pipelines

Xiaomeng Yang

Henan Province Boiler Pressure Vessel Inspection Technology Research Institute Zhumadian Branch, Zhumadian, Henan, 463000, China

## Abstract

Boiler pressure vessel pipeline systems, as core equipment in power production, have corrosion issues that directly impact operational safety and economic benefits. This study thoroughly analyzes the corrosion mechanisms of boiler pressure vessels and pipelines and the key elements for constructing protective systems. It highlights the critical importance of anti-corrosion work in ensuring safe operation of equipment, proposing three major principles: systematic protection, scientific detection, and dynamic adaptation. Addressing practical engineering needs, the article elaborates on two main protective strategies: the integration of multiple detection technologies and the upgrading of surface protection processes. The integration of detection technologies emphasizes the synergistic application of ultrasonic, radiographic, and eddy current methods, while surface protection processes focus on building multi-layer barrier systems and studying material compatibility. Research findings indicate that a comprehensive anti-corrosion system effectively extends equipment lifespan, reduces unplanned downtime risks, and lays a solid foundation for the safe and stable operation of the power system, achieving dual values of economic efficiency and safe production.

## Keywords

Boiler; Pressure vessel piping; Pipe corrosion

## 锅炉压力容器管道的腐蚀问题及防护措施研究

杨晓萌

河南省锅炉压力容器检验技术科学研究院驻马店分院, 中国·河南驻马店 463000

## 摘要

锅炉压力容器管道系统作为电力生产核心装备,其腐蚀问题直接关系到运行安全与经济效益。本研究深入剖析了锅炉压力容器管道腐蚀机理及防护体系构建要素。研究阐明防腐工作对确保设备安全运行的重要意义,提出系统性防护、科学性检测与动态化适配三大原则。针对工程实际需求,文章详细论述多元检测技术融合策略与表面防护工艺升级策略两大防护路径。检测技术融合强调超声波、射线、涡流等多种手段协同应用,表面防护工艺则注重多层次屏障系统构建与材质匹配性研究。研究表明,完善的防腐体系有效延长设备寿命,降低非计划停运风险,为电力系统安全稳定运行奠定坚实基础,同时实现经济效益与安全生产的双重价值。

## 关键词

锅炉; 压力容器管道; 管道腐蚀

## 1 引言

锅炉压力容器管道系统作为电力生产核心装备,长期承受高温、高压与复杂介质环境挑战。腐蚀问题已成为影响此类设备运行寿命与安全可靠性的关键因素。电力设施腐蚀失效事故频发,造成巨大经济损失与安全隐患,亟需系统化防护对策。金属材料在苛刻工况下发生的电化学反应与化学变化,导致材料性能劣化,结构完整性受损。国内外研究表明,合理的防腐措施能显著延长设备使用寿命,降低维护成本。本研究立足电力工程实际,剖析锅炉压力容器管道腐蚀

机理与表现形式,建立防护原则体系,提出针对性防护策略与技术路径。文章围绕防护意义、原则与策略三个维度展开论述,旨在为电力设备腐蚀防护提供理论指导与实践参考。

## 2 锅炉压力容器管道的腐蚀问题防护的意义

### 2.1 筑牢安全运行防线

筑牢安全运行防线对于锅炉压力容器管道系统具有深远意义。腐蚀作为压力设备的主要失效机理,潜藏于系统各个环节,威胁着电力生产安全底线。完善的腐蚀防护体系犹如铸就了设备运行的铜墙铁壁,延长设备使用寿命的同时确保系统稳定运行。腐蚀防护工作事关设备完整性,关乎生产效率,牵系着能源供应安全与经济损失规避。压力容器管道

【作者简介】杨晓萌(1996—),女,中国河南驻马店人,本科,从事检验员研究。

系统腐蚀防护需从材料选择、结构设计、环境控制等多维度精心布局。科学防腐技术应用降低维修频率，缩短停机时间，为企业创造显著经济效益。现代防腐技术与工程实践相结合，形成系统化防护策略。规范化施工人员的操作规程与定期检测相得益彰，构建起多层次安全防护网络。电力企业将防腐工作置于核心安全管理位置，建立科学防护体系，方能确保设备全生命周期安全运行，守护电力生产安全长城<sup>[1]</sup>。

## 2.2 筑牢安全运行防线

筑牢安全运行防线是确保锅炉压力容器管道长期稳定运行的核心环节。防腐工作在整个安全体系中占据关键地位，完善的腐蚀防护策略可有效延长设备寿命，减少非计划停运风险。科学的防护理念建立在材料科学与电化学基础之上，要求对金属材料特性与环境介质作用机理有深刻理解。先进防护措施包括材料选型优化、表面处理技术、电化学保护与环境因素控制等多维度防御体系，形成多重屏障。定期检测与评估是防线构建的重要环节，包括壁厚测量、裂纹探伤与材料性能评价。企业安全管理体系应将防腐知识融入培训体系，提升施工人员专业素养。腐蚀防护工作应与设备全生命周期管理相结合，形成长效机制。防腐技术创新与应用是提升安全运行水平的持续动力，电力设备安全运行终将在科学防护理念指导下达到新高度。

## 3 锅炉压力容器管道的腐蚀问题防护原则

### 3.1 系统性防护原则

系统性防护原则要求将锅炉压力容器管道视为有机整体，在防腐工作中实施全局性考量与协同防护策略。遵循该原则实为必要，盖因腐蚀现象本质上是多种因素共同作用的复杂过程，单点防护难以从根本上解决问题。设备各部件间存在密切关联，某处腐蚀失控可能导致系统性危害。科学的防护体系应涵盖材料选型、结构设计、工艺控制、环境调节等多维度要素，形成完整的防腐链条。企业若能建立系统防护思维，可在设计阶段预见潜在腐蚀风险，运行期间精准识别薄弱环节，维护时统筹安排检修计划。系统性防护能有效降低因局部忽视引发的连锁故障，提升设备整体安全性，延长使用寿命，减少停机损失，确保锅炉压力容器管道在苛刻工况下保持长期可靠运行<sup>[2]</sup>。

### 3.2 科学性检测原则

科学性检测原则在锅炉压力容器管道腐蚀防护中占据核心地位。该原则要求检测工作必须建立在科学理论基础之上，采用精密仪器设备与标准化方法，确保检测结果的准确性与可重复性。科学性检测实质上反映了现代工程技术对精确性与客观性的追求。锅炉压力容器管道系统复杂多变，腐蚀机理与形态差异显著，单凭经验判断往往难以准确把握腐蚀本质与发展规律。唯有科学检测才能揭示材料微观结构变化、应力分布状态、电化学反应特性等关键因素，形成完整腐蚀评估体系。企业遵循科学性检测原则，可有效规避主观

臆断带来的风险，准确识别潜在危害，精准确定腐蚀类型、部位与程度，进而制定合理防护策略与修复方案。科学性检测构成了腐蚀防护决策的理性基础，提升了整体防护质量与效率，确保了电力设施安全运行与经济效益最大化。

### 3.3 动态化适配原则

动态化适配原则是锅炉压力容器管道防腐体系中的重要基石。锅炉压力容器管道在运行过程中面临多变的工况环境，温度、压力、介质成分等参数常有波动，单一静态防护措施难以应对复杂多变的腐蚀挑战。动态化适配原则要求防腐体系具备感知环境变化并作出相应调整的能力，实现防护措施与腐蚀环境的动态匹配。该原则深刻认识到腐蚀过程的非线性特性，强调防护手段需随工况变化而调整优化。在实际应用中，动态化适配表现为防腐材料选择的智能化、监测系统的实时性、防护措施的可调性等多个方面。电力企业遵循此原则，可减少因环境突变导致的腐蚀失效风险，延长设备使用寿命，降低维护成本。施工人员需深入理解设备运行的动态特性，预见性地设计防腐方案，确保防护效果在各种工况下均能保持最优状态。动态化适配非简单被动响应，而是基于预测分析主动调整的防护哲学，代表了现代防腐技术的发展方向<sup>[3]</sup>。

## 4 锅炉压力容器管道的腐蚀问题防护策略

### 4.1 多元检测技术融合策略

多元检测技术融合策略作为解决锅炉压力容器管道腐蚀问题的重要防护措施，已在电力行业安全管控体系中占据核心位置。该策略将不同原理、不同维度的检测技术有机结合，形成互补协同效应，显著提升对腐蚀问题的识别精度与预警能力。电磁超声、射线照相、超声相控阵、涡流探伤等无损检测技术在整合应用中发挥各自优势，突破单一技术的局限性。智能机器人巡检系统配合红外热成像技术，可实现对复杂管道系统的全方位监测。深度学习算法在多源数据分析中具备强大的模式识别能力，使检测结果从定性向定量转变。数字孪生技术与实时监控相结合，为管道腐蚀状态评估提供动态视角。检测数据云平台建立促进了信息共享与知识积累，使腐蚀防护决策更具科学性。远程监测与物联网技术引入则打破了时空限制，实现设备健康状态持续监控。多元检测方法组合应用于压力容器高温高压环境中，能够揭示材料微观结构变化与宏观腐蚀关系。电力企业建立完善的检测技术体系，融合定期检查与实时监测手段，才能真正构建起全生命周期的管道健康管理。检测技术融合策略应充分考虑检测对象特性，针对不同类型腐蚀问题选择最适宜的技术组合。施工人员需接受全面技术培训，掌握多种检测手段操作规范及综合分析能力。多元检测融合策略的系统化实施，将为锅炉压力容器管道安全运行保驾护航，为电力系统稳定运行奠定坚实基础<sup>[4]</sup>。

## 4.2 多元检测技术融合策略

多元检测技术融合策略在锅炉压力容器管道腐蚀预防中具有不可替代的价值,其核心在于将各类检测方法的优势有机结合,形成互补协同的完整体系。超声波测厚技术能够精确测量金属壁厚变化,涡流检测可识别表面及近表面缺陷,射线检测则透视揭示内部结构异常,磁粉检测对表面裂纹敏感,而红外热像技术则捕捉温度异常分布。这些单一技术在融合应用时需建立统一数据平台,实现检测数据标准化处理与综合分析,进而构建腐蚀状态评估模型。该模型应整合材料学、流体力学与电化学原理,对腐蚀速率与剩余寿命做出科学预测。检测数据时空关联分析尤为重要,通过建立设备腐蚀数据时间序列与空间分布图谱,呈现腐蚀演变规律。在实际应用层面,应根据设备特性与运行环境定制检测方案,确定最优检测周期与检测点布置。电力企业宜建立检测数据智能分析系统,融合专家经验与算法模型,对腐蚀风险进行量化评估与等级划分。多元检测结果交叉验证机制有助于消除单一技术局限性,提高诊断准确度。随着数字孪生技术发展,可构建锅炉压力容器管道虚拟模型,将检测数据实时映射至模型中,直观显示腐蚀状态变化。与此同时,检测技术融合策略应与预防性维护体系紧密衔接,为科学制定检修计划与更换周期提供决策依据,最终实现设备安全运行与经济效益的平衡。

## 4.3 表面防护工艺升级策略

表面防护工艺升级策略在锅炉压力容器管道防腐体系中具有关键地位,其核心价值在于构建多层次、高性能的屏障系统,有效阻断外界腐蚀因子与金属基材的接触。现代表面防护工艺已从传统单一涂层保护发展为综合性技术体系,涉及基体处理、底层处理、中间涂层与面层工艺等多个环节的协同优化。高温锅炉环境下,先进的陶瓷基复合涂层展现出优异的耐热性与化学稳定性,为设备提供长效保护。压力容器则适合采用金属喷涂与有机涂层复合防护技术,该技术融合了金属喷涂层的阴极保护功能与有机涂层的屏蔽特性。对管道系统而言,内外表面防护策略存在明显差异—内壁防护侧重耐介质性能,外壁则注重环境适应性。企业可注重防

护工艺与设备材质的匹配性研究,根据材料电化学特性选择相应的阴极保护或阳极保护方案。前处理工艺质量直接影响涂层附着力与使用寿命,喷砂、酸洗等表面处理技术需精确控制工艺参数。新型功能涂层如自修复涂层、纳米复合涂层等引入智能防护理念,赋予防护层主动应对腐蚀环境变化的能力。施工人员应严格遵循涂层厚度规范,确保关键部位如焊缝、法兰等薄弱环节获得加强保护。防护工艺升级还应考虑全寿命周期成本,平衡初始投入与长期维护支出。定期评估防护层状态并建立预测性维护体系,有助于实现锅炉压力容器管道系统的安全稳定运行与经济效益最大化。

## 5 结语

锅炉压力容器管道腐蚀防护工作构成电力设备全寿命周期管理核心环节。科学防护体系对确保设备安全运行、延长使用寿命具有重大价值。防腐工作应遵循系统性防护、科学性检测与动态化适配原则,综合考量材料特性、结构设计、环境因素与运行工况等要素。多元检测技术融合弥补单一方法局限性,提升缺陷识别能力;表面防护工艺升级则构建多层次防护屏障,阻断腐蚀环境与金属基材接触。防腐技术发展趋向智能化与数字化,功能涂层材料创新与物联网监测系统将成为技术突破重点。电力企业应强化腐蚀防护意识,健全防腐管理体系,加大技术研发投入,培养专业技术队伍,促进理论与实践深度融合。唯有建立完善的防腐体系,方能在复杂工况环境中确保设备长期稳定运行,为电力安全生产筑起坚实防线。

## 参考文献

- [1] 李国良.基于NN的锅炉压力容器压力管道裂纹检测方法分析[J].中国设备工程,2025,(05):212-214.
- [2] 孙建宝.锅炉压力容器及管道安装监督检验的优化[J].锅炉制造,2025,(02):59-61.
- [3] 秦之炜,孙嘉.锅炉压力容器及压力管道检验技术研究[J].中国机械,2024,(21):146-149.
- [4] 张国杰.锅炉、压力容器及压力管道检验中裂纹问题研究[J].中国高新技术,2024,(08):122-124.DOI:10.13535/j.cnki.10-1507/n.2024.08.38.

# Key Pathways and Optimization Strategies for Full Life Cycle Construction Management of Photovoltaic Power Station Projects

Kun Zhao

State Power Investment Corporation Guizhou Jinyuan Weining Energy Co., Ltd., Weining County, Bijie, Guizhou, 553100, China

## Abstract

The full life cycle construction management of photovoltaic power station projects encompasses planning and decision-making, design, construction, operation and maintenance, and decommissioning and recycling phases. The quality of management directly impacts project benefits and sustainability. Key pathways for each phase are as follows: Planning and decision-making phase involves collaborative resource evaluation and compliance approval; Design phase focuses on optimizing technical solutions and promoting standardized design; Construction phase requires dynamic control of progress, quality, and safety; Operation and maintenance phase emphasizes intelligent monitoring and preventive maintenance; Decommissioning and recycling phase prioritizes equipment disassembly and resource recycling. To address issues such as low collaboration efficiency and inadequate risk management, optimization strategies are proposed from three aspects: organizational structure, technical application, and management mechanisms. These include establishing a cross-phase collaborative management system, introducing BIM and IoT technologies, and improving risk early warning mechanisms, providing theoretical and practical references for industry development.

## Keywords

Photovoltaic power station; Full life cycle; Engineering construction management; Path and optimization

# 光伏电站项目全生命周期工程建设管理关键路径与优化策略

赵昆

国家电投集团贵州金元威宁能源股份有限公司, 中国·贵州 毕节 553100

## 摘要

光伏电站项目全生命周期工程建设管理覆盖规划决策、设计、施工、运维及退役回收阶段, 其管理质量直接影响项目效益与可持续性。各阶段关键路径为: 规划决策阶段协同资源评估与合规审批; 设计阶段优化技术方案并推进标准化设计; 施工阶段动态管控进度、质量与安全; 运维阶段强化智能化监测与预防性维护; 退役回收阶段重视设备拆解与资源循环利用。针对协同效率低、风险管控不足等问题, 从组织架构、技术应用、管理机制三方面提出优化策略, 包括构建跨阶段协同管理体系、引入 BIM 与物联网技术、完善风险预警机制, 为行业发展提供理论与实践参考。

## 关键词

光伏电站; 全生命周期; 工程建设管理; 路径与优化

## 1 引言

在“双碳”战略推动下, 我国光伏电站建设规模持续扩大, 项目全生命周期工程建设管理的复杂性与专业性日益凸显。本文围绕光伏电站项目全生命周期各阶段, 分析工程建设管理关键路径, 结合行业发展现状提出针对性优化策略, 旨在为光伏电站项目管理实践提供科学指导, 助力光伏产业实现可持续发展目标。

## 2 光伏电站项目全生命周期工程建设管理框架

### 2.1 全生命周期阶段划分

光伏电站项目全生命周期涵盖规划决策、设计、施工、运维及退役回收五个核心阶段, 各阶段既相互独立又紧密关联, 共同构成项目从筹备到终结的完整管理链条。规划决策阶段是项目启动的基础, 决定项目建设可行性与整体方向; 设计阶段是将规划方案转化为技术蓝图的关键环节, 直接影响项目施工效率与运营安全性; 施工阶段是实现项目实体建设的核心过程, 需兼顾进度、质量与成本管控; 运维阶段是保障项目长期稳定运行、提升发电效益的重要支撑; 退役回收阶段则聚焦设备资源循环利用, 符合绿色低碳发展要求,

【作者简介】赵昆(1993—), 男, 中国贵州威宁人, 本科, 助理工程师, 从事新能源项目建设管理研究。

各阶段的管理成效直接影响项目整体目标的实现<sup>[1]</sup>。

## 2.2 全生命周期管理核心目标

光伏电站项目全生命周期工程建设管理以“提质、增效、降本、控险”为核心。规划决策阶段科学评估资源与政策，提升项目可行性；设计阶段优化方案，兼顾发电效率、降低成本与运维难度；施工阶段精细管理，保障工期与质量，杜绝安全事故；运维阶段提升设备可靠性，减少故障停机，提高发电效益；退役回收阶段规范拆解与资源回收，降低污染，实现资源循环利用，推动全生命周期绿色化发展。

## 3 光伏电站项目全生命周期工程建设管理关键路径

### 3.1 规划决策阶段关键路径

#### 3.1.1 资源与政策评估

资源评估是规划决策阶段首要任务，要开展太阳能资源普查，通过实地监测与数据分析明确项目选址区太阳辐照度、日照时长等参数，保证能源供应，结合土地利用规划评估土地性质与可用性，避开禁止或限制建设区域。政策评估需梳理国家及地方新能源产业、补贴、税收优惠政策，分析时效性与稳定性，确保项目享受合规支持、降低投资风险。此外，还要评估当地电网接入条件，与电网公司沟通确定并网方案，保障项目建成后顺利并网，避免因电网问题闲置<sup>[2]</sup>。

#### 3.1.2 可行性研究与合规审批

可行性研究是项目立项核心依据，要从技术、经济、环境三维度综合分析。技术上，论证光伏组件等核心设备技术成熟度与适配性，确保方案符合标准；经济上，通过成本收益分析测算投资回报率等指标，评估盈利潜力；环境上，开展环评，分析项目对周边生态影响并提出保护措施<sup>[3]</sup>。合规审批环节，要按流程完成项目备案、用地预审等手续，建立审批进度跟踪机制，加强与政府部门沟通协调，防止因审批延误致项目建设延期。

### 3.2 设计阶段关键路径

#### 3.2.1 技术方案优化

技术方案优化是设计阶段的核心任务，需结合项目选址资源条件与建设目标，开展光伏阵列布局设计，通过模拟计算确定最佳安装倾角与间距，最大化利用太阳能资源，提升项目发电效率。同时，需优化逆变器选型与布置方案，根据项目规模与电网接入要求，选择适配的逆变器类型，合理规划逆变器安装位置，减少线路损耗。此外，还需开展储能系统集成设计，结合新能源发电间歇性特点，确定储能系统容量与运行策略，提升项目并网稳定性，降低弃光率。技术方案优化需兼顾先进性与经济性，在保证技术可靠性的前提下，优先选择性价比高的方案，避免过度追求技术先进导致成本过高。

#### 3.2.2 标准化与模块化设计

标准化设计需遵循国家及行业相关设计规范，统一光伏电站项目的设计标准与技术参数，包括设备选型标准、施

工工艺标准、图纸绘制标准等，确保项目设计成果具备通用性与可重复性，降低后期施工与运维难度。模块化设计则将光伏电站划分为若干独立的功能模块，如光伏阵列模块、逆变器模块、储能模块等，每个模块可实现标准化生产与现场组装，大幅缩短项目建设周期。同时，模块化设计便于后期设备维护与更换，降低运维成本，提升项目全生命周期管理效率。

### 3.3 施工阶段关键路径

#### 3.3.1 进度动态管控

施工进度管控需以项目总工期为目标，制定详细的施工进度计划，明确各分项工程的开工时间、完工时间与关键节点。采用进度管理工具建立进度跟踪机制，实时监控施工进度与计划的偏差，分析偏差原因并及时采取调整措施。例如，在光伏组件安装阶段，若因天气原因导致施工延误，可通过增加施工班组、延长有效工作时间等方式追赶进度。同时，需加强各施工环节的协同配合，如土建施工与设备安装的衔接，避免因工序脱节导致工期延误，确保项目按期完工<sup>[4]</sup>。

#### 3.3.2 质量与安全管控

光伏电站项目需构建全过程质量与安全管控体系。质量管控上，建立全过程监督体系，原材料进场时对光伏组件、电缆、支架等关键材料进行性能检测，确保符合设计要求；施工中加强光伏组件安装精度、逆变器接线质量等关键工序检查，避免影响发电效率与运行安全。安全管控方面，制定完善制度，开展施工人员安全培训，配备防护设备，定期排查隐患，重点防范高空坠落、触电等事故，保障施工零安全事故。

### 3.4 运维阶段关键路径

#### 3.4.1 智能化监测与诊断

运维阶段需构建智能化监测系统，通过在光伏组件、逆变器等设备上安装传感器，实时采集设备运行参数，如组件温度、逆变器输出功率、电网电压等，实现设备运行状态的实时监控。利用大数据分析技术对监测数据进行处理，建立设备故障诊断模型，能够及时发现设备异常运行情况，如组件热斑、逆变器故障等，并自动发出预警信号，通知运维人员进行维修。智能化监测与诊断系统的应用，可大幅提升设备故障识别效率，减少故障停机时间，保障项目持续稳定发电。

#### 3.4.2 预防性维护

预防性维护需根据设备运行规律与厂家维护建议，制定个性化的维护计划，定期对设备进行检修与保养。例如，定期清洁光伏组件表面灰尘，避免灰尘遮挡影响发电效率；定期检查逆变器散热系统，确保设备运行温度在正常范围；定期检测电缆接头，防止因接触不良导致线路损耗增加。同时，需建立设备维护档案，记录设备维护时间、维护内容与维护效果，通过数据分析优化维护计划，避免过度维护或维护不足，在保障设备可靠性的前提下，降低运维成本。

### 3.5 退役回收阶段关键路径

#### 3.5.1 退役评估与计划制定

退役回收阶段首先需开展退役评估,综合考虑设备使用年限、性能衰减程度与市场价值,确定设备退役时间与退役方式。对于性能严重衰减、维修成本过高的设备,应及时安排退役;对于仍具有一定使用价值的设备,可考虑转售或翻新再利用。根据退役评估结果制定详细的退役回收计划,明确设备拆解流程、回收责任主体与时间节点,同时制定环境保护方案,避免设备拆解过程中产生的废弃物对环境造成污染。

#### 3.5.2 设备拆解与资源循环利用

设备拆解需按照规范流程进行,优先拆解可回收利用的部件,如光伏组件中的玻璃、铝边框,逆变器中的金属元件等,避免暴力拆解导致资源损坏。拆解过程中需采取环保措施,对拆解产生的废弃物进行分类处理,有害废弃物需交由专业机构处置,确保符合环保要求。资源循环利用需与专业回收企业合作,建立资源回收产业链,将可回收部件进行加工处理后重新用于光伏电站建设或其他领域,提高资源利用率,实现项目全生命周期的绿色闭环。

## 4 光伏电站项目全生命周期工程建设管理优化策略

### 4.1 构建跨阶段协同管理体系

当前光伏电站项目各阶段管理存在脱节问题,规划决策阶段与设计阶段衔接不畅、施工阶段与运维阶段信息传递不及时,导致项目整体管理效率低下。为此,需构建跨阶段协同管理体系,建立项目全生命周期管理团队,团队成员涵盖规划、设计、施工、运维等各领域专业人员,实现从项目启动到退役的全程参与。通过建立信息共享平台,整合各阶段管理数据,如设计图纸、施工记录、运维数据等,确保信息在各阶段之间高效传递,避免信息孤岛。同时,定期召开跨阶段协同会议,协调解决各阶段衔接过程中存在的问题,实现项目全生命周期无缝衔接<sup>[9]</sup>。

### 4.2 引入先进技术提升管理水平

#### 4.2.1 BIM 技术应用

将 BIM 技术应用于光伏电站项目全生命周期管理,在设计阶段可构建三维可视化模型,直观展示项目设计方案,便于各专业人员进行协同设计,减少设计冲突;施工阶段可利用 BIM 模型进行施工模拟,优化施工流程,指导现场施工,同时通过 BIM 模型与现场实际施工的对比分析,及时发现施工偏差,确保施工质量;运维阶段可将 BIM 模型与设备运行数据相结合,实现设备可视化管理,便于运维人员快速定位设备故障位置,提高运维效率。BIM 技术的应用能够实现项目全生命周期的数字化管理,提升管理精度与效率。

#### 4.2.2 物联网与大数据技术应用

在运维阶段进一步深化物联网与大数据技术应用,扩大监测范围,除设备运行参数外,增加对环境参数的监测,

如风速、温度、降水等,分析环境因素对设备运行的影响,为预防性维护提供数据支撑。利用大数据技术构建项目全生命周期成本分析模型,通过对各阶段成本数据的分析,识别成本管控薄弱环节,优化成本控制策略。同时,利用大数据技术开展项目发电效益预测,结合历史发电数据与未来气象预测数据,预测项目短期与长期发电效益,为项目运营决策提供科学依据。

### 4.3 完善风险管控机制

光伏电站项目全生命周期面临政策、安全、设备故障等多阶段风险,需构建完善管控机制。首先,结合各阶段特点开展全生命周期风险识别,梳理潜在风险因素并建立风险清单;其次,采用定性与定量结合方法评估风险,分析发生概率与影响程度,确定风险等级;最后,分级制定应对策略——高等级风险制定专项防控方案并专人监控,中低等级风险制定常规措施并定期排查。同步建立风险预警机制,通过实时监测风险指标及时预警,确保风险及时管控,降低对项目的影响。

### 4.4 加强人才队伍建设

光伏电站项目全生命周期工程建设管理需大量跨领域、经验丰富的复合型人才。为此要加强人才队伍建设:一是制定培养计划,定期组织员工参加光伏技术、项目管理、智能化技术等专业培训,提升素养;二是建立引进机制,吸引全生命周期管理高端人才,优化人才结构;三是建立激励机制,通过绩效考核、职称评定等激发员工积极性和创造性。多管齐下打造高素质项目管理人才队伍,为项目全生命周期管理提供坚实人才保障。

## 5 结语

本文研究了光伏电站全生命周期五阶段(规划决策、设计、施工、运维、退役回收)的关键管理路径:规划需强化资源政策评估与合规审批;设计需优化技术方案并推进标准化;施工需动态管控进度与质量;运维需构建智能监测与预防性维护体系;退役需做好评估与资源循环利用。针对协同效率低、技术应用不足等问题,提出构建跨阶段协同体系、引入先进技术、完善风险管控、加强人才建设等优化策略,以提升管理水平与投资效益。

### 参考文献

- [1] 王新居.光伏电站全生命周期管理优化策略研究[J].光源与照明,2022,(12):94-96.
- [2] 刘佳.光伏项目全生命周期造价管控与收益率提升方法[J].上海质量,2025,(09):61-64.
- [3] 曹履薪.光伏电站工程建设项目管理的相关探究[J].山东工业技术,2017,(20):186.
- [4] 顾涛.基于EPC模式下光伏电站建设过程的项目管理研究[J].建筑技术开发,2020,47(16):61-62.
- [5] 王晓鑫.光伏电站工程建设过程的项目管理浅议[J].中国新技术新产品,2015,(03):137.

# Optimization of Centering Process and Quality Control Measures for Maintenance of Steam Turbine Shafting

Peng Fan

553303, Nayong Power Plant, Guizhou Jinyuan Co., Ltd., State Power Investment Corporation, Bijie, Guizhou, 553303, China

## Abstract

The shaft alignment process and maintenance quality of steam turbines are critical to their safe and stable operation. This paper explores the importance of shaft alignment, analyzing potential issues such as vibration amplification, bearing wear, and seal leakage caused by inaccurate alignment. Through innovations in measurement techniques and tool optimization, improved benchmark transfer and adjustment strategies, standardized tool management, standardized operational procedures, thermal expansion considerations, and enhanced personnel skills, the alignment process has been optimized. Additionally, quality control measures such as strengthened personnel management, rigorous process supervision, and stricter acceptance standards are proposed to improve alignment accuracy and maintenance quality, ensuring long-term stable and efficient operation of steam turbines.

## Keywords

Steam turbine; Shaft alignment; Process optimization; Maintenance quality; Control measures

## 汽轮机轴系找中心工艺优化及检修质量控制措施

樊鹏

国家电投集团贵州金元股份有限公司纳雍发电总厂, 中国·贵州 毕节 553303

## 摘要

汽轮机轴系找中心工艺及其检修质量对汽轮机安全稳定运行至关重要。本文深入探讨了汽轮机轴系找中心的重要性, 分析了找中心不准确可能导致的振动加剧、轴承磨损及密封泄漏等问题。通过测量技术革新与工具优化、基准传递与调整策略优化、工器具标准化管理、规范操作流程与热膨胀考量及提升人员技能水平等策略, 优化了找中心工艺。同时, 提出了加强人员管理、严格过程监督、强化验收标准等检修质量控制措施, 旨在提高汽轮机轴系找中心精度和检修质量, 保障汽轮机长期稳定高效运行。

## 关键词

汽轮机; 轴系找中心; 工艺优化; 检修质量; 控制措施

## 1 引言

汽轮机在工业生产中广泛应用, 是发电厂等工业领域的核心动力设备, 轴系作为汽轮机的关键组成部分, 其运行的稳定性和准确性直接影响着整个汽轮机的性能。轴系找中心工作是汽轮机安装和检修过程中的关键环节, 找中心精度不足会引发振动、磨损及泄漏等一系列问题, 严重影响设备寿命和运行效率。因此, 对汽轮机轴系找中心工艺进行优化, 并加强检修质量控制具有重要的现实意义。本文将围绕这两个方面展开深入研究, 旨在为提高汽轮机轴系的运行质量提供有效的方法和措施。

## 2 汽轮机轴系找中心的重要性

### 2.1 保证机组稳定运行

汽轮机在高速旋转过程中, 轴系的各个转子之间需要保持精确的同轴度。如果轴系找中心不准确, 转子在旋转时就会产生不平衡力, 从而引起机组的振动。长期的振动会使设备的零部件受到疲劳损伤, 降低设备的使用寿命, 甚至可能导致机组无法正常运行。通过精确的轴系找中心, 可以保证转子的平稳旋转, 减少振动, 为机组的稳定运行提供保障<sup>[1]</sup>。

### 2.2 减少设备磨损

当轴系找中心存在偏差时, 轴承所承受的负荷分布会不均匀。这会导致部分轴承承受过大的压力, 加速轴承的磨损, 缩短轴承的使用寿命。同时, 不均匀的受力还可能引起密封件的损坏, 导致介质泄漏, 影响设备的正常运行<sup>[2]</sup>。优化轴系找中心工艺, 提高找中心精度, 能够使轴承均匀受力, 减少设备磨损, 降低设备的维护成本。

【作者简介】樊鹏(1992—), 男, 中国贵州毕节人, 本科, 工程师, 从事火力发电厂机务检修研究。

## 2.3 提高发电效率

轴系找中心精度不足,会显著加剧汽轮机的机械损耗,具体表现为摩擦损失的增大以及振动引发的额外能量耗散。这些非必要的能量损耗直接削弱了汽轮机的整体运行效率,导致发电量下滑,影响企业的经济效益。相反,通过实施高精度的轴系找中心工艺,能够精准控制各部件间的相对位置,有效减少摩擦与振动,从而降低机械损失,提升汽轮机运行效率。这一优化措施直接促进了发电效率的提升,为企业创造了更为可观的经济收益。

## 3 汽轮机轴系找中心工艺优化

### 3.1 测量技术革新与工具优化

测量技术的升级是轴系找中心工艺优化的重要基石。传统百分表测量虽能满足基本需求,但存在接触摩擦、人为读数误差等问题,影响测量精度。激光对中仪的应用则带来了显著改进,它采用非接触测量方式,通过发射和接收激光束来测量轴系的同轴度等参数,有效避免了百分表与联轴器之间的接触摩擦,大幅减少了测量误差。同时,激光对中仪能够实时反馈测量数据,操作人员可依据实时数据及时调整轴系,极大提高了调整的效率和准确性,使测量结果更加客观、可靠<sup>[5]</sup>。

除了引入先进的激光对中仪,对传统找中心工具的改进也不容忽视。采用高精度百分表,其测量精度能达到更高标准,可更精准地反映轴系的微小位移。此外,设计合理的找中心支架也至关重要,它能确保百分表在测量过程中的稳定性,减少因支架晃动等因素导致的测量误差。通过这些工具的优化组合,可全面提升测量的精度和效率<sup>[7]</sup>。

### 3.2 基准传递与调整策略优化

基准传递的准确性直接影响轴系找中心的整体精度。建立“主基准转子→中间过渡转子→末级转子”的闭环校验逻辑是关键。在找中心过程中,先以主基准转子为基准,测量中间过渡转子与主基准转子的同轴度等参数;再以中间过渡转子为基准,测量末级转子与中间过渡转子的参数;最后通过反向测量等方式进行闭环校验。这种多转子互为基准的方式能够有效消除累积误差,确保整个轴系的同轴度符合要求,提高轴系找中心的精度。

调整策略的改进同样重要。联轴器对轮螺栓预紧力的分步释放策略可避免一次性紧固螺栓导致联轴器二次变形,从而影响轴系同轴度的问题。按照一定顺序和力度逐步拧紧对轮螺栓,能使联轴器均匀受力,保证安装质量。轴承标高调整的分阶段验证也不可或缺,在冷态下进行轴承标高调整后,需模拟热态膨胀补偿,通过计算热态下轴系的热膨胀量,复核冷态调整的余量是否合适,确保轴系在热态运行时也能保持良好的同轴度<sup>[4]</sup>。

### 3.3 工器具标准化管理

工器具的标准化管理是保障轴系找中心工艺稳定实施

的重要环节。专用百分表架的防偏斜设计可提高百分表测量的准确性,传统百分表架易偏斜导致测量误差,而专用百分表架通过合理设计结构,能保证百分表与联轴器的正确接触,减少误差。

激光对中仪的校准周期管理也不容忽视,定期校准可确保其测量精度。制定合理的校准周期,并严格按照周期对激光对中仪进行校准,能保证测量结果的可靠性。此外,调整垫片材质与厚度的精准控制也至关重要,它们直接影响轴承座的标高调整效果。通过对调整垫片的材质和厚度进行精准把控,可确保轴系找中心的调整精度<sup>[10]</sup>。

### 3.4 规范操作流程与热膨胀考量

规范的操作流程是保证找中心工作质量的基础。在找中心前,要对轴系进行全面检查和清理,确保轴系表面无杂物、无损伤,各部件安装位置正确。测量过程中,严格按照规定的测量点和测量方法操作,保证测量数据的准确性和一致性。例如,在测量轴向和径向间隙时,要明确测量的具体位置和角度,避免因测量位置不准确而导致数据偏差。调整过程中,遵循合理顺序,一般先调整轴向间隙,再调整径向间隙,每次调整幅度要适当,避免调整过度,并且每次调整后都要重新测量,确保调整效果符合要求。

汽轮机在运行过程中,温度变化会引起热膨胀,这对轴系的中心位置会产生影响。因此,在找中心时必须充分考虑热膨胀因素。根据汽轮机的设计参数和运行工况,准确计算轴系在不同温度下的热膨胀量,并预留出合理的热膨胀间隙。对于高温高压的汽轮机,热膨胀量相对较大,在找中心时要适当增大轴向间隙的预留值,防止因热膨胀导致轴系中心偏移过大而引起设备故障<sup>[6]</sup>。

### 3.5 提升人员技能水平

操作人员的技能水平和经验对找中心工作的质量起着决定性作用。加强对找中心操作人员的培训是提升其技能水平的有效途径。培训内容应涵盖找中心的基本原理、操作流程、工具的使用方法、测量数据的分析等方面。通过理论培训和实际操作相结合的方式,使操作人员能够熟练掌握找中心的技术要点。

定期组织操作人员进行技术交流和经验分享也十分重要,让他们能够学习到最新的找中心技术和方法,不断提高自己的业务水平。此外,建立完善的考核机制,对操作人员的技能水平进行定期考核,激励他们不断提高自己的技能,为轴系找中心工艺的优化提供有力的人才支持。轴系找中心工艺优化是一个系统工程,需要从多个方面入手,综合运用各种优化措施,不断提升工艺水平,以确保设备的稳定运行和性能发挥。

## 4 汽轮机检修质量控制措施

### 4.1 加强人员管理

检修人员的素质和责任心直接影响着检修质量。因此,

要加强对检修人员的管理。首先,严格选拔检修人员,选择具有丰富经验、专业技能高、责任心强的人员参与汽轮机检修工作<sup>[1]</sup>。其次,对检修人员进行全面的培训,包括汽轮机的结构原理、检修工艺、质量标准等方面的培训,使检修人员熟悉检修工作的各个环节和要求。在检修过程中,明确每个检修人员的职责和分工,做到责任到人。同时,建立有效的激励机制,对工作认真负责、检修质量高的检修人员给予奖励,对因工作失误导致检修质量问题的检修人员进行处罚,以提高检修人员的工作积极性和责任心。

#### 4.2 做好检修前准备工作

在汽轮机轴系检修前,要做好充分的准备工作。首先,要对设备进行全面检查和评估,了解设备的运行状况和存在的问题,制定详细的检修计划和方案。其次,要准备好检修所需的工具、材料和设备,确保工具齐全、材料合格、设备完好。同时,要对检修现场进行清理和布置,为检修工作创造良好的条件。

#### 4.3 严格过程监督

在汽轮机检修过程中,要对检修工作进行严格的监督。建立完善的过程监督体系,对检修的各个环节进行实时监控。例如,在零部件的拆卸过程中,监督拆卸方法是否正确,是否对零部件造成损伤;在零部件的清洗过程中,检查清洗是否彻底,是否按照规定的清洗工艺进行操作;在零部件的修复和更换过程中,检查修复和更换的质量是否符合要求,新零部件的规格和型号是否正确。同时,对检修过程中的各项记录进行严格审查,确保记录真实、准确、完整,以便在后续的检修和运行过程中能够进行追溯和分析。

#### 4.4 强化验收标准

制定严格、明确的验收标准是保证检修质量的关键。在汽轮机检修完成后,要按照既定的验收标准对检修质量进行全面验收。验收内容包括轴系的找中心精度、零部件的安装质量、设备的密封性能、润滑系统的运行情况等。对于轴系找中心精度,要严格按照设计要求进行测量和验收,确保轴系的同轴度、平行度等指标符合规定。对于零部件的安装质量,检查零部件的安装位置是否正确、连接是否牢固、间隙是否符合要求等<sup>[9]</sup>。对于设备的密封性能,通过打压试验等方法检查密封部位是否存在泄漏现象。只有当所有验收项目都符合标准要求时,才能判定检修质量合格,允许汽轮机投入运行。

#### 4.5 做好检修记录和档案管理

检修记录和档案是汽轮机检修工作的重要资料,它记录了检修过程中的各项信息,包括检修时间、检修内容、更

换的零部件、检修人员、验收结果等。做好检修记录和档案管理,对于后续的检修工作、设备运行维护和故障分析都具有重要的参考价值。在检修过程中,要求检修人员认真、详细地记录每一项检修工作,确保记录的真实性、准确性和完整性。检修完成后,对检修记录进行整理和归档,建立完善的检修档案。同时,利用信息化技术对检修档案进行管理,方便查询和检索,以便在需要时能够快速获取相关信息<sup>[8]</sup>。

#### 4.6 加强质量意识教育

质量意识是保证检修质量的思想基础。要通过开展质量意识教育活动,提高全体检修人员和相关管理人员的质量意识。通过培训、宣传等方式,让检修人员认识到检修质量的重要性,使他们自觉地遵守检修工艺和质量标准,认真对待每一项检修工作。同时,通过案例分析等方式,让检修人员了解因检修质量问题导致的设备故障和安全事故的严重后果,增强他们的责任感和使命感。此外,在企业内部营造一种重视质量的文化氛围,使质量意识深入人心,成为全体员工的自觉行为。

### 5 结语

汽轮机轴系找中心工艺的优化和检修质量控制是保障汽轮机安全稳定运行的关键环节。通过测量技术革新、基准传递优化、工器具标准化管理及规范操作流程等措施,可以有效提高轴系找中心的精度。同时,通过加强人员管理、严格过程监督、强化验收标准、做好检修记录和档案管理以及加强质量意识教育等检修质量控制措施,能够确保汽轮机检修工作的质量。在实际工作中,要将轴系找中心工艺优化和检修质量控制有机结合起来,不断探索和创新,提高汽轮机的运行可靠性和经济性,为工业生产的稳定发展提供有力的保障。未来,随着技术的不断发展,还需要进一步研究和应用更加先进的找中心工艺和检修质量控制方法,以适应不断提高的工业生产需求。

#### 参考文献

- [1] 胡箫,陈庆祥.汽轮机轴系中心调整的工艺方法[J].黑龙江科技信息,2014,(34):11.
- [2] 张春华.浅谈汽轮发电机组轴系中心[J].能源与节能,2013,(07):126-128.
- [3] 李塞,张春生.汽轮机轴系中心调整过程及误差探析[J].机械管理开发,2023,38(01):242-243+249.
- [4] 徐超超,夏建林,贾爱国,等.发电厂汽轮机轴系中心调整[J].电力设备管理,2019,(12):78-80.
- [5] 居强,杜进韡.多轴系汽轮发电机组中心调整过程分析[J].中国电力,2013,46(06):16-21.

# Study on Optimization Strategy of Ammonia Injection in Denitration System Based on Intelligent Control

Che Yang

Guizhou Xidian Electric Power Co., Ltd. Yaxi Power Generation Operation Branch, Zunyi, Guizhou, 563100, China

## Abstract

With the continuous improvement of environmental protection requirements, precise control of flue gas denitrification systems in coal-fired power plants has become increasingly crucial. Traditional ammonia injection control methods exhibit significant limitations under complex operating conditions, often resulting in low ammonia utilization efficiency and fluctuating emission indicators. Based on intelligent control theory, this study conducts an in-depth investigation into ammonia injection optimization for denitrification systems. By establishing an intelligent control model, designing optimized control strategies, and constructing a comprehensive control framework, the research effectively addresses the shortcomings of conventional control methods in response speed and control accuracy. The approach achieves significant reduction in ammonia slip rate while ensuring compliance with emission standards, thereby enhancing system operational stability and economic efficiency. This provides new technical means and methodological support for optimizing denitrification system operations.

## Keywords

Denitration system; Ammonia injection optimization; Intelligent control; Operation optimization

## 基于智能控制的脱硝系统喷氨优化策略研究

杨澈

贵州西电电力股份有限公司鸭溪发电运营分公司, 中国·贵州 遵义 563100

## 摘要

随着环保要求的不断提高, 燃煤电厂烟气脱硝系统的精准控制显得尤为重要。传统喷氨控制方法在应对复杂工况时存在明显局限性, 常导致氨气利用率偏低和排放指标波动。本文基于智能控制理论, 深入研究脱硝系统喷氨优化问题, 通过建立智能控制模型, 设计优化控制策略, 构建完善的控制体系框架。该研究有效解决了传统控制方法在响应速度和控制精度方面的不足, 实现了在保证排放达标的同时显著降低氨逃逸率, 提高了系统运行的稳定性和经济性, 为脱硝系统的优化运行提供了新的技术手段和方法支持。

## 关键词

脱硝系统; 喷氨优化; 智能控制; 运行优化

## 1 引言

我国环保政策不断趋紧, 火电厂氮氧化物排放的控制要求变得越发严格。在选择性催化还原脱硝系统当中, 喷氨量若不能精准控制, 就会直接左右脱硝效率以及运行成本。传统控制策略很难应对锅炉负荷、煤种改变等复杂工况, 极易引发氨气的浪费或者出现排放超标的情况。智能控制方法有着处理非线性、时变系统的独特长处, 给喷氨控制的改良带来了新思路<sup>[1]</sup>。通过探究智能控制技术在脱硝系统中的应用, 期望加强喷氨系统的自适应能力及其控制品质, 从而为做到环保与经济的协同发展提供技术参照。

## 2 脱硝系统与喷氨控制概述

### 2.1 脱硝系统基本原理

选择性催化还原脱硝系统对于现代燃煤电站削减氮氧化物排放十分关键。此系统把氨气当作还原剂, 在特定催化剂的作用下, 把烟气里的氮氧化物变成成无害的氮气和水。整个反应过程需在专门设计的 SCR 反应器里执行, 反应温度一般维持在 300 到 400 摄氏度之间。喷氨格栅会把氨气均匀地喷进烟气里面, 然后经由静态混合器充分混合, 再进入到催化层当中执行氧化还原反应<sup>[2]</sup>。催化剂的结构设计及其活性组分会左右反应效率, 合理的流场分布对于确保脱硝效果十分关键。系统运行时要维持合适的温度范围, 温度过高会造成催化剂烧结失活, 温度过低则容易致使铵盐沉积堵塞。

【作者简介】杨澈(1998—), 男, 土家族, 中国贵州铜仁人, 本科, 助理工程师, 从事控制系统与自动化优化研究。

## 2.2 喷氨控制方式与特点

传统喷氨控制大多采用固定摩尔比和常规 PID 控制这两种形式。固定摩尔比控制按照入口氮氧化物浓度以及烟气量来计算喷氨量,这种方式虽然控制起来比较简便,但是适应性却比较差。常规 PID 控制把出口氮氧化物浓度当作反馈信号,经由调整喷氨阀的开度去达成控制目的。这种控制方式在某种程度上确实改良了控制性能,不过对于存在较大时延和惯性的脱硝系统而言,其控制质量仍然不尽如人意。前述两种控制方式均需依靠精准的数学模型,而在实际操作过程中却很难应对负荷波动以及煤种改变之类的复杂情况。而且控制参数的整定成果会直接左右脱硝效率以及氨逃逸率,若是控制策略过于谨慎,则会造成氨气消耗量增多;而如果策略过激,则有可能引发排放超限。

## 2.3 喷氨控制存在的问题

传统喷氨控制方式在实际应用时会陷入诸多技术难点。其一为系统具有较大时延特点,即从喷氨量调节直至出口浓度产生变化,其间响应历时长久,造成控制行为往往落后于工况变动情况。其二在于系统存在非线性特征,譬如锅炉负荷有所起伏、燃料性质出现差异等情形下,对象属性就会发生大幅改变,预先设定好的控制参数无法满足全方位工况下的运行要求。其三便是氨逃逸率难以做到精准把控,若要维持脱硝效率并有效约束氨逃逸率,则须要更为前沿的控制手段<sup>[3]</sup>。这些问题使得系统频繁陷入过度控制或者控制不足的状况,不但影响环保指标,而且加大了运行成本。控制系统缺乏足够的鲁棒性与自适应能力,这限制了脱硝系统整体性能的优化。

## 3 智能控制与喷氨优化方法

### 3.1 智能控制方法概述

智能控制方法给复杂系统控制难题带来新解决思路。模糊控制把专家经验变成控制规则,以此应对系统存在的不确定因素与非线性特点。它无需依靠被控对象精准的数学模型,而是凭借模糊逻辑推导来执行智能判断。神经网络控制依靠自身学习和逼近功能,经由对过往数据的学习建立起系统输入与输出之间的联系。这两类方法都能够较好地顺应脱硝系统动态特性的改变情况,具有不错的稳定性<sup>[4]</sup>。而且,专家控制系统形成知识库并设置推理机之后,同样可以达成按照规则的智能控制。把这些智能手段融合起来,便给喷氨改良控制构筑了稳固的技术根基。

### 3.2 喷氨优化目标与策略

喷氨改良的重点在于保障排放达标状况之下的经济运行,这涵盖守住稳定的脱硝效率、把出口氮氧化物浓度控制在预定范围之内,并尽可能减小氨逃逸率。改良策略需综合考量诸多相互影响的因素,依靠先进控制算法达成多目标改良。凭借工况识别的自适应控制策略可遵照运行状态自行调节控制参数,以保证不同负荷下的控制质量。前馈-反馈合

成控制策略能够立即解决主要干扰带来的影响,加快系统的响应速率<sup>[5]</sup>。而且要形成氨逃逸率的约束控制机制,一旦监测到氨逃逸率不正常上升,便自动调整控制策略,从而保证系统运行处于安全区间之内。

### 3.3 优化模型构建方法

改良模型的形成属于智能控制得以执行的基本步骤。针对模糊控制模型而言,要明确输入与输出变量的论域以及隶属度函数,并创建起完备的模糊规则体系。一般情况下,输入变量涵盖氮氧化物浓度差值及其变率,而输出变量则是喷氨量的调节幅度。至于神经网络模型,则需确定网络架构、激活函数以及训练方法,凭借海量的历史数据来达成精确的对应联系。模型的输入部分应当覆盖那些对脱硝效率产生关键作用的因素,比如机组负荷、烟气流量、进出口氮氧化物浓度等等。在模型的验证阶段,重点在于考量其泛化能力及稳定性,从而保障无论处于何种工作状态之下,都能够维持较好的预测准确性<sup>[6]</sup>。而且,模型具备在线更新的功能,这使得它能够顺应设备特性所出现的逐步改变情况,进而保留住长久稳定的控制表现。

## 4 喷氨优化控制系统设计

### 4.1 系统总体结构设计

智能喷氨改良控制系统采取分层分布式结构,包含数据采集层、智能决策层以及执行控制层。数据采集层需及时采集过程参数、烟气分析仪数据、流量计数据以及温度压力信号等,并开展数据预处理和有效性验证。智能决策层为该系统的核心部分,其运行智能控制算法,遵照当前工况随时计算出理想的喷氨量设定值。执行控制层接收改良后的设定值,经由回路控制器促使执行机构达成精准的喷氨控制<sup>[7]</sup>。各层之间依靠即时数据库来实施数据交互,保障信息传递既及时又一致。系统具备完备的报警与保护机制,一旦监测到异常工况就会自动切换到备用控制模式,从而保障系统安全可靠地运行。

### 4.2 控制模块功能设计

系统融合诸多功能模块协同运作。智能设定值计算模块依靠先进的智能算法,随时求解理想的喷氨量,关键之处在于执行过训练的神经网络模型或者模糊推理机制。氨逃逸约束控制模块不断监测氨逃逸率的变动趋向,一旦预估可能出现超标情况就会自动产生修正信号,保证运行参数一直位于安全区间之内。前馈补偿模块遵照机组负荷以及入口氮氧化物浓度等前馈信号,事先调节控制输出,从而有效地应对系统存在的较大时延特点。自学习模块借助对运行数据加以分析,定时更新模型参数,使得系统可以顺应设备特征的长期改变。系统另外具备运行指导模块,给操作人员给予改良意见和故障判断信息。

### 4.3 系统实现流程设计

系统采用闭环控制架构,经由持续监测与调整来达成

改良控制的目的。第一步要做数据采集和预处理,其中包含信号滤波、数据校正以及工况识别等环节,从而给控制决策赋予可靠的数据支撑。接着调用智能算法模块,按照当下运行状况计算出初步改良设置值,并且结合氨逃逸约束展开安全校验<sup>[8]</sup>。经过修正后的设置值会发给执行机构,还要监测控制效果并记录运行数据。系统会定时对控制效果执行评定,依照性能指标的变化趋向自行调整控制参数。若检测到系统特征出现大幅改变的情况,则启动模型更新流程,重新训练神经网络或者调整模糊规则。这样的闭环改良机制可使控制系统长时间维持良好的控制性能。

## 5 系统测试与效果分析

### 5.1 测试方案与指标

系统检测需制订科学的检测方案,该方案要包含不同负荷工况及煤种条件。检测流程存在基准检测和改良检测这两个阶段,经由对比分析来考量改良成效。检测的负荷点应包含机组典型的运行区间,即高、中、低这三段负荷,每一段负荷都要维持足够长时间的稳定运行。性能评价指标体系包含控制品质指标、经济性指标以及设备运行指标这三类。控制品质指标着重关注出口氮氧化物浓度的波动幅度和控制精准度,经济性指标着重关注氨逃逸率和氨气消耗量,设备运行指标关乎执行机构的动作频次和幅度。这些指标必要同步收集并加以分析,以保证评定结果既全面又可靠。

### 5.2 测试结果分析

测试数据显示,改良系统在各负荷段的控制性能良好,其出口氮氧化物浓度的标准偏差大幅缩减,这表明系统具备较强的抗干扰能力与稳定性。在不同负荷变化期间,系统可快速跟进工况变化并及时调节喷氨量,防止出现传统控制方式常有的大幅波动状况。氨逃逸率得到有效的控制,平均值和峰值均明显减小,这表明改良系统既保证了脱硝效率又突出提升了氨气利用效率<sup>[9]</sup>。执行机构的动作曲线更为平滑,其动作幅度和频率较为恰当,有益于延长设备的使用寿命。这些改进显示出智能控制策略对于非线性、时变系统的处理具有优势。

### 5.3 优化效果评估

综合评定结果显示,智能改良控制系统在诸多方面收获了突出成果。就环保效益而言,该系统稳固提升了脱硝效率的稳定性,并促使排放浓度一直符合标准,从而减小了环保风险。从经济效益看,重点体现于氨气消耗量的缩减,因

为氨逃逸率有所下降且控制精度得到加强,预估能够节省不少运维成本。至于设备运行情况,喷氨调阀的动作变得更为平和,这样既削减了设备损耗,又拉长了检修间隔时间<sup>[10]</sup>。系统具备一定的自适应能力,可以保证在各种工况下维持较好的控制性能,进而减轻运行人员的工作压力。这些改动给电厂带来了直接的经济收益以及间接的安全保障,具备不错的推广价值。

## 6 结语

本研究形成起智能喷氨改良控制系统,有效地解决了传统脱硝控制中的关键技术难点。这个系统采取分层架构设计,并融入智能控制算法,做到了喷氨量的精确控制。经过检测结果显示,该系统既保证了排放达标,又突出减小了氨逃逸率,提升了控制系统的稳定性和适应性。智能控制策略得到恰当运用,给脱硝系统的精细运行给予了可靠的技术支持,表现出较好的工程应用价值。未来研究时应进一步完善系统的自学习功能,加强其对复杂工况的适应能力,也要探寻多目标协同改良的达成途径,从而为改善脱硝系统整体性能赋予更多技术手段。

## 参考文献

- [1] 邱崧峰.燃煤锅炉燃烧过程与脱硝系统优化控制技术探究[J].电力设备管理,2025,(19):69-71.
- [2] 宗成涛.混酸酸雾SCR脱硝自动控制系统设计与应用[J].山西冶金,2025,48(08):191-192+198.
- [3] 杨建军.烧结烟气脱硫脱硝返料智能控制系统设计及应用[J].冶金与材料,2025,45(04):22-24.
- [4] 黄国强,司瑞才,李佳,等.适应新型电力系统的火电机组脱硝系统控制策略优化研究[J].吉林电力,2024,52(03):47-51.
- [5] 杨祉聪.燃煤电站锅炉SCR脱硝系统建模及优化控制策略研究[D].福建理工大学,2024.
- [6] 陈皓炜.燃煤电厂SNCR脱硝系统模型辨识与智能控制[D].山西大学,2022.
- [7] 尹贵豪.燃煤循环流化床机组脱硝系统的智能控制研究及工业验证[D].浙江大学,2021.
- [8] 高泽明,杨慎敏,于晨杰.智能控制在火电机组脱硝系统中的应用[J].自动化应用,2020,(11):86-87+92.
- [9] 王朔.燃煤机组SCR脱硝系统神经网络控制策略研究[D].华北电力大学,2020.
- [10] 马康丰.火电机组SCR脱硝系统全工况建模与优化控制研究[D].华北电力大学(北京),2020.

# Analysis of the Influence of High Voltage Motor Insulation Fault on Energy Consumption and Research on Energy Saving Preventive Measures

Yaohui Huang

Guizhou Xidian Electric Power Co., Ltd., Yaxi Power Generation Operation Branch, Zunyi, Guizhou, 563100, China

## Abstract

This study systematically analyzes the intrinsic correlation mechanism between insulation faults and operational energy consumption in high-voltage motors, revealing how insulation degradation impacts motor efficiency through mechanisms such as increased dielectric loss and elevated leakage current. By quantifying the energy consumption increment characteristics and long-term cumulative losses caused by various insulation faults, we establish an energy consumption-based insulation condition monitoring system. The proposed diagnostic approach integrates online monitoring of key parameters, early fault warning, and energy efficiency evaluation. Building upon this foundation, we develop an energy-saving-oriented comprehensive insulation protection framework, encompassing insulation system optimization, preventive maintenance strategies, and lifecycle cost minimization solutions. These findings provide both theoretical underpinnings and practical guidance for achieving efficient and reliable operation of high-voltage motors.

## Keywords

High voltage motor; Insulation failure; Energy consumption; Energy saving measures; Condition diagnosis

## 高压电机绝缘故障对运行能耗的影响分析及节能性防范措施研究

黄耀辉

贵州西电电力股份有限公司鸭溪发电运营分公司, 中国·贵州 遵义 563100

## 摘要

本文系统分析了高压电机绝缘故障与运行能耗的内在关联机制, 深入揭示了绝缘劣化通过介质损耗增加、泄漏电流上升等途径对电机效率的影响规律。通过量化评估各类绝缘故障导致的能耗增量特征及其长期累积损失, 建立了基于能耗控制的绝缘状态监测系统, 提出了包括关键参数在线监测、故障早期预警和能效状态评估在内的诊断方法。在此基础上构建了以节能为导向的绝缘故障综合防护体系, 涵盖绝缘系统优化、预防性维护策略和全生命周期成本最小化方案, 为实现高压电机高效可靠运行提供了理论依据和实践指导。

## 关键词

高压电机; 绝缘故障; 运行能耗; 节能措施; 状态诊断

## 1 引言

高压电机被全面应用在电力、冶金、化工这些高耗能行业当中, 它的能效水平会对整个系统的运行经济性以及能耗控制产生很大影响。绝缘系统是高压电机非常关键的一部分, 其状态会直接左右电机的运行可靠性及其效率特征。伴随运行时间慢慢增长, 绝缘材料在电、热、机械以及环境应力的作用之下逐步出现恶化现象, 从而造成各种各样的绝缘故障发生。这些绝缘故障既会造成电机停止运行之类的事, 又会使额外损耗增多、效率降低, 使得运行能耗大幅上

升<sup>[1]</sup>。当下, 针对高压电机的节能研究大多侧重于设计改良和调速控制方面, 但是关于绝缘故障和能耗关联机制的系统剖析却比较少。所以, 要深入探究绝缘故障给运行能耗带来影响的原理, 创建依靠能耗控制的绝缘状态检测方法以及节能防护体系, 这对于达成高压电机高效又可靠的运行有着重要的理论意义和实际价值。

## 2 高压电机绝缘故障与能耗关联机理

### 2.1 绝缘故障的主要类型与特征

高压电机绝缘故障主要包含几种类型, 即绝缘局部放电、绝缘老化、绝缘受潮以及绝缘表面污染。局部放电源于绝缘内部电场过于集中而引发的气体电离情况, 它不断发展

【作者简介】黄耀辉(1997—), 男, 土家族, 中国贵州铜仁人, 本科, 助理工程师, 从事电气工程研究。

会渐渐破坏绝缘材料,生成导电路径。绝缘老化指材料长时间处于电热负荷之下时,其化学结构出现改变,这表现在介质强度减弱以及介电系数发生偏移之上。绝缘受潮时,水分子渗进绝缘体系当中,造成绝缘电阻减小、介质损耗变大。而绝缘表面污染说的是带有导电性质的污染物黏附于绝缘表面之后,创建起一条泄漏电流通道。各类绝缘故障有不同的发展进程和电气特点。局部放电会产生脉冲电流并造成电磁辐射,它的发展具备累加效应。绝缘老化速度较慢,主要体现在介质损耗因数增大和电容发生改变<sup>[2]</sup>。当绝缘受潮时,极化特性会有所改变,绝缘电阻也会大幅减小。而且,表面污染会使泄漏电流增多,局部温升现象更为严重。这些故障特征既显示了绝缘状况,又和电机的能量转换过程紧密相连。

## 2.2 绝缘劣化对电机运行效率的影响路径

绝缘劣化会经由许多途径对电机运行效率施加影响。当绝缘电阻缩减时,泄漏电流便会增多,进而引发额外的导电损耗。介质损耗因数若增大,绝缘材料在交变电场中产生的热量就会变多,这部分能量会直接转为成热能而散发出去。局部放电会消耗电场能量,而且还会生成臭氧、氮氧化物之类的活性物质,这会促使绝缘劣化情况加剧,从而陷入效率不断下降的恶性循环之中。绝缘性能若出现下降,其后果之一便是改变电机电磁场的分布情况,从而影响能量转换的效率。绝缘结构中的电容一旦发生改变,就会造成磁场分布产生畸变,进而加大铁损与杂散损耗<sup>[3]</sup>。当绝缘导热性能有所下降时,电机的温升现象会更为严重,而绕组电阻又因之增大,于是铜损便不自觉地增多。由绝缘故障所造成的局部过热,会改变相关材料的电磁特性,使得电机效率进一步下滑。这些影响途径彼此交织在一起,促使电机整体能耗水平得以提升。

## 2.3 故障状态下的附加损耗分析

绝缘出现故障时,电机产生诸多附加损耗。局部放电损耗源自绝缘内部气体的电离过程,属于直接的能量损耗,其大小与放电强度及频率有关。介质极化损耗由于绝缘材料在交变电场下不断极化所致,当介质损耗因数增大时,这种损耗也会变大。泄漏电流损耗源于绝缘电阻的减小,它的数值与运行电压和绝缘状态相关。表面泄漏损耗指的是由于绝缘表面污染而形成电流传导路径时所损失的能量<sup>[4]</sup>。局部过热引发的额外铁损和铜损属于绝缘故障的间接能耗体现。这些附加损耗在正常运行期间占比较低,但在出现绝缘故障时却大幅增多,这已成为电机能耗增大的关键因素。

# 3 绝缘故障对运行能耗的量化影响分析

## 3.1 绝缘故障与电机效率特性变化关系

绝缘故障会导致电机效率特性发生系统性改变。在轻载区域,介质损耗和局部放电损耗所占比重较高,使得效率大幅下降。接近额定负载时,附加铜损和铁损的影响变大,

效率曲线整体呈下行趋势。效率下降的程度同绝缘故障的种类及严重程度紧密相连,局部放电和绝缘受潮对效率的影响比较突出。电机效率特性出现变化,其表现形式包含最佳效率点发生偏移以及高效区变得狭小两种情况。当存在绝缘故障时,电机在更为狭窄的负载区间维持较高的效率,从而引发实际运行过程中能量损耗增多<sup>[5]</sup>。各类绝缘故障相互之间存在协同效应,使得效率下降幅度大于各个故障单独起作用时的累加值。效率特性变化规律给绝缘状况评定赋予了关键依据。

## 3.2 不同故障类型的能耗增量评估

各类绝缘故障所造成的能耗增量有着各自的特点。局部放电故障的能耗增量同放电量的平方成正比,随着故障的发展呈指数级增长。由于绝缘老化而产生的能耗增量比较缓慢,不过其与运行时间之间存在非线性关系。由绝缘受潮引发的能耗增量会受到环境湿度的大幅影响,具备突出的时变性质。表面污染故障的能耗增量与污染程度、成分有关,在潮湿环境下会快速增多。复合绝缘故障的能耗增量一般要比各个单一故障增量之和要大,其显示出较为突出的耦合效应。考量能耗增量时要考虑到电机的运行工况,处于不同的负载条件下,同样的绝缘故障其能耗表现会有所区别。创建精确的能耗增量模型乃是制订节能措施的根基所在。

## 3.3 长期运行下的累积能耗损失计算

绝缘故障引发的能耗损失会随运行时间持续累加。故障早期时,能耗提升速度较慢,不过随着故障程度加重,增速变快。累计的能耗损失和绝缘恶化速度紧密相关,而且受运行环境及工况的影响很大。长时间运行的情况下,即便只是微小的效率下滑,也会造成不小的额外能耗。计算累积能耗损失时要考量绝缘故障的发展进程与时间要素。故障发展快慢会决定能耗损失的汇集速度,运行时间长短也会影响总体损失数量。针对间歇运行的电动机而言,其累积能耗损失还会受到启停次数的影响。精准地计算长时间以来逐渐累积起来的能耗损失,可以给绝缘保养决策赋予有关经济性方面的分析参考。

# 4 基于能耗控制的绝缘状态监测与诊断方法

## 4.1 关键绝缘参数在线监测技术

在线监测关键绝缘参数,这是做到能耗控制的根基所在。局部放电监测经由考量放电脉冲来评定绝缘内部状况,从而体现能量损失的程度。介质损耗因数监测与绝缘材料的能量损耗特性存在直接联系,其属于效率评价的关键参数。而绝缘电阻监测则显示泄漏电流路径的发展情形,也同导电损耗有着直接相关性<sup>[6]</sup>。电容检测能够考量绝缘结构改变给电磁场分布造成的影响。表面泄漏电流检测可以体现污染级别以及这种污染对能耗产生的影响。温度检测则从侧面评定由绝缘故障引发的额外损耗。而多参数联合检测则能全方位了解绝缘状况及其对能耗的影响,进而为能效评定给予数据

支持。

## 4.2 故障早期预警与能效状态评估

经由监测数据创建起绝缘故障早期警报系统,该系统可在能耗大幅上升之前察觉到绝缘恶化的情况。警报阈值按照能耗的敏感性来设定,着重关注那些对效率影响较大的参数变动。能效状态评定会把绝缘参数和运行数据融合起来,用以衡量当下能效水平同理想状况之间的差别。能效状态评定要考量不同负载情况下的表现,创建全工况能效图谱。按照能效下降的速度与程度来划分警示级别,以此引导确定守护的优先顺序。早期发出的警示可防止绝缘故障演变成严重故障,缩减不必要的能耗损耗。能效状态的动态评定给预防性守护赋予决策参考。

## 4.3 诊断数据与能耗关联分析模型

创建诊断数据和能耗的关联分析模型,以此来量化绝缘参数变化给能耗造成的影响。统计模型会分析历史数据当中的相关规律,找出对能耗有影响的主要绝缘参数。机理模型按照电磁理论以及绝缘物理,推导出参数变化和能耗之间的定量关系。关联分析模型会把运行工况的影响纳入考量范围,从而改善其在不同条件下的适应能力<sup>[7]</sup>。该模型经由持续利用实际运行数据来做验证,逐步改良预测的准确性。关联分析能够达成从绝缘状态向能耗影响的转换,给节能控制供应一种理论手段。而且,模型所给出的内容会指引人们去选定监测参数并设置警报阈值。

# 5 节能导向的绝缘故障防范措施体系

## 5.1 绝缘系统优化与低损耗材料选用

绝缘系统改良着眼于提升能效。选用介质损耗因数较低的绝缘材料来缩减极化损耗,运用耐电晕材料控制局部放电并减小放电能量损失。改良绝缘结构设计以改善电场分布状况,从而减轻因局部场强大于限度而产生的额外损耗。选取高导热绝缘材料来减小运行温度,缩减由于绕组电阻提升而产生的铜损。运用防污闪绝缘结构以控制表面泄漏电流。从电气、热学以及力学性能方面综合考量绝缘系统的整体情况,在确保可靠性的情况下尽可能减小运行能耗。

## 5.2 预防性维护策略与能效管理融合

把能效指标归入绝缘预防性维护体系当中,按照能效状态来制订守护期限,也就是在能耗大幅上升之前就实施干预。守护举措着重解决那些对能耗影响很大的绝缘问题,从而提升守护资源的利用率。创建起绝缘守护能效评价的流程,把守护举措的节能成果予以量化。能效管理和绝缘守护方案配合制订,做到资源共享与信息共享<sup>[8]</sup>。把维护记录同能效数据联系起来展开分析,改良守护策略。预防性守护既要顾及设备的可靠性,也要重视运行的经济性,达成安全和

节能的兼顾。

## 5.3 全生命周期成本最小的综合防护方案

综合防护方案需兼顾初期投资及长期运行能耗成本,应选取全生命时段成本较低的绝缘系统与检测方案。不可仅仅着眼于低初始投资而漠视运行能效。要考量绝缘材料性能下降和能耗升高的时变特点,动态改良守护和更新策略。综合方案要协调设计、制造、运行以及守护各个阶段的绝缘经营措施,从而形成起一个完整的技术体系<sup>[9]</sup>。成本分析包含直接能耗损失以及间接效率下降所带来的经济损失,要全方位考量防护措施的经济性。通过技术经济对比,来确定在不同应用场景下最为理想的防护方案。

# 6 结语

高压电机绝缘故障与运行能耗密切相关。研究表明,绝缘劣化通过介质损耗增加、泄漏电流上升等途径显著影响电机能效,各类故障导致的能耗增量特征各异,长期运行将产生可观的累积能耗损失。基于能耗控制的绝缘状态监测方法可实现在线监测关键参数和故障早期预警,实现绝缘状态与能效状态协同评估<sup>[10]</sup>。提出的节能导向防护体系包括优化绝缘系统、预防性维护策略和全生命周期成本最小化方案,建立了完整的绝缘故障防护与能耗控制技术路线,为提升高压电机运行经济性提供理论依据和实施指导。

## 参考文献

- [1] 王浩浩.高压电机绝缘故障处理与分析[J].中国设备工程,2023,(S2):26-28.
- [2] 刘立灿.高压电机绕组常见绝缘故障及处理[J].冶金动力,2023,(01):1-3+34.
- [3] 张晨.高压电机绝缘故障的原因与对策分析[J].电子技术,2022,51(11):270-271.
- [4] 甄永在.厂用高压电机定子绝缘故障原因分析及预防措施[J].电机技术,2021,(03):49-51.
- [5] 赵健民.火电厂高压电机绝缘故障原因分析与对策[J].设备管理与维修,2018,(21):50-51.
- [6] 樊高义.高压电机绝缘离线测试轻便式装置研制[D].上海电机学院,2024.
- [7] 王浩浩.高压电机绝缘故障处理与分析[J].中国设备工程,2023,(S2):26-28.
- [8] 赵帅帅.大型电机绝缘性能直流参数智能测试装置研制[D].上海电机学院,2022.
- [9] 敬果.高压电机隐患治理的研究和应用[C]//中国机电一体化技术应用协会.第五届全国石油和化工电气设计与应用论文大赛论文集.中国石油四川石化有限责任公司,2021:106-111.
- [10] 刘进,罗仁江,杨勇.电机绝缘在线监测技术的应用实践[J].化工管理,2020,(35):137-138.

# Analysis on the Systematic Construction Mode and Operation Management Optimization Path of Chemical Industrial Park Infrastructure

Tongbin Yuan

Ji'an Yin Luling Construction Engineering Co., Ltd., Ji'an, Jiangxi, 343000, China

## Abstract

The systematic planning and coordinated development of infrastructure in chemical industrial parks, along with the enhancement of full-cycle operational management, serve as the cornerstone for ensuring high-quality and sustainable growth of the chemical industry and elevating the intrinsic safety standards of these parks. This paper systematically proposes practical pathways for the integrated development of chemical park infrastructure through three dimensions: unified spatial layout, modular functional configuration, and innovative investment and construction models. It further constructs a comprehensive strategic framework for optimizing infrastructure operational efficiency, focusing on three key aspects: empowerment through intelligent technologies, professional third-party management, and integrated park-level coordination. The research findings demonstrate that systematic construction and refined operations are mutually reinforcing prerequisites, collectively forming the core essence and critical drivers of full lifecycle management for chemical park infrastructure.

## Keywords

Chemical industrial park; Infrastructure; Systematic construction; Operation management

## 化工园区基础设施系统化建设模式与运营管理优化路径探析

袁同斌

吉安市银庐陵建筑工程有限公司, 中国·江西吉安 343000

## 摘要

化工园区基础设施的系统化统筹建设与全周期运营管理提质,是保障化工产业高质量可持续发展、提升园区本质安全水平的核心支撑。本文从空间布局一体化、功能配置模块化、投建模式创新三大维度,系统提出化工园区基础设施系统化建设的实操路径,围绕智慧化技术赋能、第三方专业化托管、园区级一体化统筹三大层面,构建基础设施运营效能优化的完整策略框架。研究结果表明,系统化建设与精细化运营互为前提而相互支撑,共同构成化工园区基础设施全生命周期管理的核心内涵与关键抓手。

## 关键词

化工园区; 基础设施; 系统化建设; 运营管理

## 1 引言

### 1.1 问题提出

化工园区作为现代石油化工与精细化工产业集聚发展的核心空间载体,其基础设施体系的完备性、网络化协同水平与全生命周期运营效能,直接决定园区可持续发展能力与本质安全保障等级。但园区基础设施建设与运维普遍存在重单体硬件配置、轻系统集成协同,重工程建设落地、轻长效运维管理的结构性矛盾<sup>[1]</sup>。部分园区虽在污水处理设施、公

共管廊系统、智慧化管控平台等方面投入大量资金,却因缺乏顶层设计与一体化统筹思路,导致各类设施与信息系统相互割裂、数据不通、业务脱节,难以形成整体效能与协同效益。如何实现基础设施系统化规划建设与全周期精细化运营的有机统一,已成为制约化工园区高质量发展亟待破解的关键议题。

### 1.2 概念界定与逻辑框架

化工园区基础设施系统化构建,是以园区整体效能最优为核心导向,对道路交通、公共管廊、公用工程、环保治理、应急保障、数字底座等各类设施子系统实施一体化统筹布局,达成空间资源集约配置、建设周期有序衔接、功能界面统一预留的全过程建设范式。运营管理提质则立足于设施全生命周期理念,依托体制机制革新与数字化技术支撑,

【作者简介】袁同斌(1993—),中国江西吉安人,本科,一级房建建造师、一级市政建造师,从事工程技术与管理方面的研究。

持续强化基础设施运行效能与综合服务水平。二者并非单向线性的时序关系，而是相互支撑、动态迭代、深度耦合的有机系统，系统化构建为高效运维提供坚实物理载体与系统保障，精细化运维则通过运行反馈与效能评估为后续设施升级与规划优化提供决策依据。依托上述理论逻辑，本文将从建设范式革新、运维路径优化、实证案例剖析三个维度开展系统性研究与深度解析。

## 2 化工园区基础设施系统化建设模式

### 2.1 空间一体化

传统化工园区基础设施建设长期采用分散化、碎片化的实施模式，道路交通与管网工程由建设主管部门统筹，污水处理设施由生态环境部门主导实施，智慧化管控系统则由信息化管理部门单独推进。这种条块分割、多头管理的治理结构，极易引发空间布局与功能系统的结构性错配，突出问题集中体现为。污水管网高程设计与道路竖向规划衔接不畅、公共管廊预留接口与企业实际需求不匹配、应急疏散通道与消防站点空间布局缺乏联动性。系统化建设强调以系统耦合理念重塑园区空间规划逻辑。一是构建基础设施综合廊道体系、二是推行设施接口标准化与冗余预留机制、三是搭建分级联动的应急保障设施网络<sup>[2]</sup>。

### 2.2 功能模块化

化工园区的演化进程呈现出清晰的阶段性规律，自初创期、扩张期至成熟稳定期，其基础设施的供给需求呈现阶梯式递增与结构性升级趋势。系统化建设须精准预判这一动态演进逻辑，推行模块化设计、弹性化扩容、渐进式落地的适应性建设策略。

以污水处理系统为例，可采用全域统一规划、单元分

期建设的实施路径：一次性完成污水处理场址管控、管网系统布局与整体工艺设计，而核心处理单元按照模块化组合方式分步建设、逐次投运，与园区企业入驻节奏、废水排放量精准匹配。当前国内化工园区智慧化建设普遍存在平台重复搭建、系统互不兼容、数据孤岛突出等问题，其核心在于前期缺乏统一的顶层架构与标准规范。系统化建设应确立“一平台统管、一标准贯通、一张图管控”的顶层设计。

### 2.3 建设模式创新

如表 1 所示，为化工园区基础设施三种建设模式比较。传统化工园区基础设施供给长期沿用企业分散自建、独立配套的模式，各入园企业需独立配置污水处理装置、供热锅炉、应急物资储备等配套条件，不仅引发重复建设、资源错配与投资冗余，更显著加剧园区整体安全管控与风险防控压力。系统化建设亟需推动基础设施供给模式由企业分散配建向园区统筹统建、共建共享、一体化服务转型。

井冈山经济技术开发区富滩工业园区以国有企业平台为载体，统筹投入约 6.5 亿元推进基础设施一体化集成建设，项目体系涵盖消防救援站、自来水厂扩容改造、危险化学品专用停车场、突发环境事件应急池、公共综合管廊等关键工程板块。通过实践探索，园区构建形成“平台统筹实施、专业力量承建、全域功能配套”的系统化建设模式，有效提升了基础设施的配置效率、空间集约度与综合承载能力。

津市绿色新材料产业园则创新采用投资人+EPC+O的央地合作共建模式，围绕产业布局、基础设施、运维管理实施全域一体化统筹设计与系统落地。该模式有效破解传统模式中投资主体与运维主体分离、建设与运营脱节的体制性障碍，推动专业机构深度嵌入基础设施全生命周期建设与管理环节，显著提升系统集成度与运行效能。

表 1 化工园区基础设施三种建设模式比较

模式类型	核心特征	投资主体	适用范围
企业自建模式	各自建设、分散配套	入驻企业	大型企业主导的园区
园区统建模式	统一规划、共享共用	政府/平台公司	中小企业集聚园区
央地协同模式	投资人+EPC+O一体化	央企+地方合作	高标准新建园区

## 3 化工园区基础设施运营管理优化路径

### 3.1 智慧化赋能

基础设施运维效能是决定化工园区本质安全等级与整体运行效率的关键维度。传统运维模式以事后响应、被动处置为核心特征，普遍存在设备故障后维修、警报触发后核查的滞后性短板，难以适配化工园区高风险、多变量、强耦合的复杂运行场景。智慧化升级的核心路径，在于构建全域实时监测、智能超前预警、多源联动处置的全流程闭环管控体系。富滩工业园区在消防救援站的建设过程中，同步推进智慧管控平台的一体化布设。业务用房融合消防办公与应急指挥双重功能，集成安全生产监测、应急联动处置、园区封闭化管理等核心应用模块，初步构建形成“数据统一汇聚、指

令统一调度、资源统筹配置”的智慧化运行管理体系，为中小型化工园区开展智慧化升级改造提供了可推广、可复制的实践模式。

### 3.2 专业化托管

化工园区基础设施覆盖污水处理、公共管廊、能源保障、应急处置等多元专业领域，园区管理主体普遍存在专业技术储备不足、运维经验欠缺、管理能力不匹配等现实问题。引入第三方专业机构实施全流程托管运营，已成为提升基础设施运维质效、保障系统稳定可靠的关键路径。工业污水处理环节是专业化托管模式应用成效最为突出的领域。化工废水具有组分复杂、毒性较高、水质水量波动剧烈等典型特征，其稳定达标运行难度显著高于常规市政污水处理系统。公共

管廊的安全运维同样高度依赖专业化技术支撑。公共管廊输送介质涵盖蒸汽、工艺物料、惰性气体等多种类型，服务关联企业数量众多，介质属性复杂、风险传导性强，微小泄漏均可能诱发链式安全事故。

### 3.3 一体化统筹

化工园区的综合运行效能并非单一企业运营能力的简单叠加，而是高度依赖于企业间资源共享、风险联防、业务协同的整体联动水平。运营管理体系优化必须突破单一企业本位的传统思路，立足园区全域构建一体化统筹协调与跨主体协同机制。应急管理领域的一体化统筹具备突出的现实必要性。富滩工业园区在应急保障设施的空间配置与功能组织上，全面贯彻一体化统筹规划理念。危险化学品专用停车场选址于振兴大道与文山大道交汇节点，整合重载停车位、空载停车位、初期雨水收集池及事故应急池等多元功能设施，与邻近的消防救援站、应急物资储备库形成高效协同的应急响应单元。同时，园区南侧与北侧事故应急池结合道路网络体系、封闭化围界设施进行一体化建设，由此构建形成“点一线一面”多维联动的全域应急防控格局，大幅提升了复杂工况与突发情景下园区的综合应急处置与风险抵御能力。

危险化学品运输车辆的统筹化调度与闭环监管同样具有显著实践成效。徐圩新区建成投用的危化品道路运输智慧管控平台，实现与交通运输部信息中心危化品车辆全量数据的对接贯通，整合车辆资质审核、企业“一企一档”管理、电子运单在线监管、车辆运行行为实时监测、综合绩效评价与全域可视化展示等核心功能，构建覆盖危化品运输全链条、全要素、全周期的闭环化管理模式<sup>[1]</sup>。

## 4 典型实践与验证

### 4.1 系统化建设筑基

湘乡经开区绿色化工园是基础设施系统化建设与一体化运维理念的典型实践载体。园区紧扣高端化、智能化、绿色化发展导向，在基础设施全域布局中，对污水处理系统、专用道路、智慧管控平台、专业消防站等关键子系统实施统筹规划、同步建设、协同落地。在设施建设方面，园区污水处理厂采用铁碳微电解+芬顿氧化组合处理工艺，设计日处理规模达1.5万立方米，实现废水全流程智能化监控与稳定达标运行。全长2.65公里的兴园路危化品专用运输通道已基本成型，为物料安全转运提供硬件支撑；封闭化管理与智慧化监管平台覆盖113.36公顷核心区域，实现周界安防系统与交通卡口的全域联动、数据互通与一体化管控。上述系统化建设模式，为园区基础设施全生命周期高效运营筑牢

了底层支撑。园区创新推行“三个一”精准服务机制——服务穿透至项目末梢、工作落地至现场一线、责任细化至具体岗位，推动基础设施供给与入园企业实际需求高效匹配、精准对接。

### 4.2 富滩工业园区系统化建设与一体化运营实践

井冈山经济技术开发区富滩工业园区是江西省推进化工园区认定申报、基础设施系统化提质升级的典型示范载体。园区严格对标省级化工园区认定规范与建设要求，聚焦综合管廊、专用通行道路、危化品专属停车场、事故应急池、专业消防救援站、智慧化管控平台等核心功能板块，实施全域统一规划、整体协同推进的一体化建设模式。

在空间统筹布局方面，园区同步实施振兴大道、文山大道两条产业专用道路工程，配套推进北侧箱涵构筑物与电力管网同步敷设，构建形成“主干路网、市政管网、应急通道”三维协同的基础设施格局。在功能系统构建方面，园区南北两侧事故应急池采用模块化设计、分阶段实施的建设思路，总有效容积达6100立方米，在满足现有入驻企业安全保障需求的同时，为园区远期拓展与产业扩容预留充足空间。在运营管控模式方面，园区以新建消防救援站为枢纽，嵌入一体化应急指挥中心，深度融合安全监测、应急联动处置、园区封闭化管理等系统功能，实现跨平台数据互通与业务协同。危化品专用停车场、消防取水码头、自来水厂等关键保障设施同步建成投用，基本形成“工程建设—常态运营—应急处置”全链条、全周期一体化管理架构。

富滩工业园区的实践充分证明，推动基础设施系统化建设与运营管理体系深度融合，是化工园区强化本质安全水平、推动高质量可持续发展的核心路径。

## 5 结语

推进化工园区基础设施系统化构建与全周期运营管理提质增效，是支撑化工产业高质量发展、筑牢本质安全底线的核心路径与战略选择。未来，随着人工智能、数字孪生、绿电与氢能等新兴技术深度融入园区建设，行业主体需协同推进数据资产整合积累与运营机制创新迭代，合力打造绿色低碳、智能高效的现代化化工园区发展新生态。

### 参考文献

- [1] 刘雅文.AI破局化工园区管理痛点五大智慧模块构建全链条运营新生态[J].中国石油和化工,2025,(10):20-21.
- [2] 陈建国.盐湖化工企业运营管理瓶颈的突破：基于薪酬与绩效考核体系的双轮驱动策略研究[J].今日财富,2025,(21):34-36.
- [3] 朱升干.化工园区中试基地运营维护管理模式及创新机制探究[J].浙江化工,2024,55(05):51-54.

# Discussion on Fault Analysis and Treatment Strategy in Power System Relay Protection

Zhe Wu

Chaoyang Yanshanhu Power Generation Co., Ltd., Chaoyang, Liaoning, 122000, China

## Abstract

The safe and stable operation of power systems is crucial for national economic development and social stability. Relay protection serves as the primary safeguard for electrical infrastructure. This paper focuses on analyzing critical components of relay protection systems, particularly fault diagnosis and mitigation strategies. The study first systematically categorizes common power system faults, including short circuits, ground faults, and line breakage faults. It then details analytical methodologies for these faults, covering fault data collection, characteristic analysis, and precise fault localization. Building on this foundation, the paper emphasizes troubleshooting approaches for malfunctioning protective devices and post-fault response protocols encompassing isolation, restoration, and preventive measures. Through evaluating implementation effectiveness and establishing continuous improvement mechanisms, the research aims to develop a comprehensive and robust fault prevention framework, thereby enhancing the overall reliability of power systems.

## Keywords

Power system; Relay protection; Fault analysis; Handling strategy; Reliability

## 电力系统继电保护中的故障分析与处理策略探讨

吴哲

朝阳燕山湖发电有限公司, 中国·辽宁朝阳 122000

## 摘要

电力系统要安全稳定运行,这对国家经济和社会生活十分关键。而继电保护则是捍卫电力系统安全的第一道屏障,本文意在深入探究继电保护领域的关键部分:故障分析及应对策略。文章先全面整理了电力系统中常见故障的基本种类,短路故障,接地故障以及断线故障等,然后细致论述了针对这些故障的分析手段,覆盖故障信息收集,特性分析并做到精准定位。在此基础上,论文着重论述了保护装置出现异常时的处理办法,还有故障发生之后的一系列应对措施,包含隔离,复原和防范等方面。对于处理效果的考量以及持续改善机制展开探讨,从而创建起较为完备且严谨的故障防御体系,以此来优化电力系统的整体可靠性。

## 关键词

电力系统; 继电保护; 故障分析; 处理策略; 可靠性

## 1 引言

电力系统是复杂的电能生产,输送与分配网络。它的连续性和稳定性是现代社会的根基。外部环境的干扰,设备的磨损,绝缘性能的下降等很多因素都会引起系统出现故障,而且这些故障如果不能及时,精准地切除掉,就有可能引发一系列反应,造成大规模停电,带来巨额的经济损失和社会动荡。继电保护装置就像是电力系统的“守护神”,它最重要的任务就是随时观察系统的运行状况,只要一有故障产生,就能自动而快速地找出故障部件,并将其隔离,最大程度地保留住未出故障部分的正常运行能力。所以,

深入剖析电力系统故障的本质规律,依此制订出科学合理的应对方案,这对于改善继电保护品质,捍卫电网安全十分关键。本文将会围绕故障种类,分析手段,装置异常处理,系统规划方案以及成果评价等方面实施全方位探讨。

## 2 电力系统故障基本类型

### 2.1 短路故障

短路故障属于电力系统当中最为常见而且危害极大的故障种类,即相与相之间或者相与地之间通过一个相对较小的阻抗而产生的非正常相连情况。短路故障一旦出现就会致使回路中的电流骤然上升,有可能增至额定电流的十几倍乃至几十倍之高。短路电流若极大,会产生严重的电动力效应与热效应,这会令发电机,变压器,输电线路等电气设备遭受机械损伤,还可能致使绝缘层发生热击穿。短路时,系统

【作者简介】吴哲(1990—),男,中国辽宁朝阳人,本科,工程师,从事继电保护研究。

电压会大幅下降,严重影响用户正常用电,甚至可能打破系统稳定性。

## 2.2 接地故障

接地故障指的是电力系统里带电导体同大地或者与地相接的部件之间的电气连通情况。在中性点有效接地系统当中,单相接地故障会生成比较大的短路电流,对于这种故障的分析和解决方法和短路故障比较类似。但是在中性点未接地或者是经过消弧线圈接地的系统里面,出现单相接地故障的时候,接地电流就比较小,系统中的线电压能够维持对称,可以允许短时间内带着故障继续运行。

## 2.3 断线故障

断线故障因外力破坏,材料疲劳或者连接点松动等因素致使输电线路一相或者多相导线发生断裂。该故障会令系统转入非全相运行状态,造成三相电流和电压出现严重不对称情况。这样的不对称现象会在旋转电机内形成负序电流,进而引发发电机转子过热及振动状况。断线有可能引发接地现象,从而造成复杂的复合故障,这给继电保护的判断和动作带来了更高的要求。断线故障不像短路故障会立即产生极大冲击,但它对系统稳定性以及设备安全造成的长远影响不可轻视,所以要求保护装置具有相应的检测能力。

## 3 继电保护故障分析方法

### 3.1 故障信息采集

全面而准确的故障信息是执行有效分析的根基。继电保护故障信息的收集大多依靠安装在网络各个节点的互感器,即电流互感器和电压互感器,这些互感器会把一次系统的高电压,大电流按照一定比例转换成标准的二次信号,以供保护装置实施测量。智能电网持续发展过程中,故障录波器,保护信息管理系统等设备得到全面应用,它们可以记录故障发生前后完整的电气量波形(包含电流,电压),保护装置的动作时序以及开入开出量等详细情况。

### 3.2 故障特征分析

故障特征分析就是从收集来的原始数据当中获取可用于区分故障类型及性质的关键信息。当系统出现故障的时候,电气量就会表现出不同于正常状态的突然变化特点:短路故障会引起电流急剧增大,电压急剧减小;接地故障会产生零序电流和零序电压;断线故障则主要体现为电流存在严重的不均衡现象。保护装置内置有算法,该算法会随时计算电气量的幅值,相位,阻抗,序分量等特征参数,把计算所得值与预先设定好的整定值做对比,就可以判断故障是否产生,故障的性质以及故障的大致范围。

### 3.3 故障定位方法

快速而准确地找到故障点的位置,这对加强线路巡视以及缩减修复时间十分关键。故障定位的方法大致可归为阻抗法和行波法两类。阻抗法依照的是故障发生时测量点所见阻抗与故障距离呈正比这一原理,经由计算故障回路阻抗

来推算故障距离。此方法原理较为简单,应用范围也较广,不过它的精度却容易受到系统运行方式,过渡电阻以及线路参数不对称等因素的影响。行波法则依靠故障瞬时产生的电压,电流行波在输电线路近乎光速的流传特性,经由测量行波抵达线路两端检测点的时间差来计算故障位置。

## 4 常见保护装置异常处理

### 4.1 保护误动处理

保护误动指的是电力系统既未发生故障,故障也不在其保护范围之内时,保护装置却错误地执行了跳闸操作,这种行为属于不正确的动作现象。保护误动会造成供电被无端切断,引发不必要的停电损失。应对保护误动首先要做的是精准地记录下动作的相关信息,包含动作时间,有关电气量的波形以及装置信号灯的指示情况等,然后借助保护信息经营系统来仔细展开分析。原因可能在于定值设置不合理,二次回路绝缘受损造成干扰,装置内部元件老化或者软件逻辑存在错误等方面。应对策略涉及重新核查并校正保护定值,查看二次回路的绝缘状况以及接线是否牢固,全方位地检测和考察保护装置。在找到原因并且解决相关问题之前,依照调度命令,对于存疑的保护措施必要时暂时退出运行,还要加大对其他保护措施的监测力度。

### 4.2 保护拒动处理

保护拒动指的是电力系统出现了应当响应的故障,可是保护装置却拒绝执行动作这样一种严重的异常状况。拒动带来的后果十分严重,也许会造成故障得不到及时切除,只能凭借后备保护或者上一级保护来执行动作,从而加剧停电的规模,还可能损害主要设备。对待拒动应当持有非常严谨而又彻底的态度。处理流程包含马上分析故障录波图,确认故障性质以及保护装置应有的动作行为,查看装置电源是否正常,保险是否熔断,检测保护装置的输入电流电压是否正常,出口回路是否完好,继电器动作功率是否充足。对装置自身执行模拟故障检测,验证其逻辑功能。如果确认装置有缺陷,就要立即执行修理或者更换,并且追溯同型号,同批次的装置是否存在共性隐患。

### 4.3 装置自检异常

现代微机保护装置一般都具有完备的自检功能,可以随时监测自身硬件(比如CPU,存储器,采样回路,电源模块)以及软件的健康状况。一旦自检程序察觉到异常就会发出告警信号,而且有可能闭锁那些可能会误动的保护功能。对待自检异常告警务必要尽快处理。运行人员收到告警之后,要记录下告警信息,依照告警内容大致判定故障的严重程度。如果是普通告警,可以加强观察,安排计划性的检修工作;而针对严重的告警,特别是那些可能造成保护功能丧失的告警,应当马上向调度请求退出保护运行,并告知检修人员前来处理。

## 5 故障处理策略

### 5.1 隔离策略

故障隔离属于故障处理的关键阶段，该环节期望尽快而精准地把故障元件从正常电网当中分离出来，阻止故障影响进一步扩大。隔离策略大多依靠继电保护系统自行运作：主保护充当第一层屏障，负责及时切除自身元件范围内的故障。主保护若出现拒动情况，则由后备保护执行隔离操作。后备保护包含近后备和远后备两种类型：近后备依靠本元件另一套保护来达到隔离目标；远后备则靠相邻电气元件的保护动作来做到，其动作时限要与主保护以及相邻元件的后备保护协调一致，从而符合选择性的需求。在复杂网络架构下，还须要凭借断路器失灵保护这种特别的隔离手段来保障可靠性。

### 5.2 恢复策略

故障元件得以有效隔离之后，系统便踏入了复原阶段。复原策略旨在快速让非故障区域恢复供电，而且要尽力让被隔离的完好元件重新投入运行。复原操作务必小心开展，以免造成新的故障。策略包括：自动重合闸装置会尝试对瞬时性故障线路实施重合，如果重合成功，就能立即恢复供电；备用电源自动投入装置可把负荷从故障线路转到备用线路；在调度中心的指挥之下执行网络重构，以此来改善潮流分布情况并防止设备出现过载现象。

### 5.3 预防策略

预防策略着眼于长远，旨在通过一系列措施降低故障发生的概率，防患于未然。这包括技术和管理两个层面。技术层面包括：加强设备状态监测，并按时执行检修工作，这样就能及时察觉到绝缘方面的瑕疵并予以解决；改良设备的运行环境，比如巩固线路的防雷，防风偏以及防覆冰措施；采用更为可靠的保护原理及硬件设施，从而优化保护系统自身抵御干扰的能力及其可靠性。管理层面包括：改良电网结构以提升系统运行方式的灵活性；制订详细的应急预案并定时开展演练；加强对运行守护人员的专业培训，从而提升他们处理事故的能力。防范策略对于形成坚强智能电网十分关键，也是做到由被动应对故障向积极防范风险过渡的重要因素。

## 6 处理效果评估与改进

### 6.1 效果评估指标

为了科学衡量故障处理体系的有效性，需要建立一套全面的评估指标体系。这些指标应涵盖可靠性、速动性、选择性和灵敏性等继电保护的基本要求。具体指标可包括：保护正确动作率、保护装置投运率、故障切除时间、平均停电持续时间、平均停电频率、供电可靠率等。长期对这些指标执行统计并加以对比分析，便能定量考量故障处理各个阶段的性能，从而找出系统中的薄弱点。比如某个线路的保护正确动作率始终处于低位，这表明该线路的保护设置或者设备

大概存在一些深层次的问题，应当着重去剖析并加以改善。

### 6.2 改进措施

基于效果评估发现的问题，需制定并实施针对性的改进措施。如果评估发现保护误动较多，改进措施可能包括：复核并改良保护定值计算方案以改善定值配合的合理性；加强二次回路的屏蔽与接地来减小电磁干扰；升级保护装置的硬件或者软件，从而改进其抗干扰能力以及逻辑判断的准确性。故障定位精度若不达标，可考虑采用更先进的行波测距装置，或者改良既有阻抗法定位的算法模型。针对恢复策略效率低的情况，可以改善配电自动化系统的逻辑，亦或是提升调度支持系统的辅助决策功能。这些改进举措需形成一个持续更新，循环管理的进程。

### 6.3 预防机制完善

完善的预防机制是故障处理体系持续提升的保证。要形成起系统化的经验反馈及学习机制。每次发生故障事件，特别是复杂的连锁故障时，都应该深入做根源分析，找到技术和经营方面的问题所在，把分析结果变成具体的技术准则，反事故措施或者规章制度。要积极采用新技术以提升预防能力：利用大数据和人工智能技术对大量的运行数据以及故障录波数据执行分析，找出故障前兆特征，从而做到故障的预测与警报；推行状态检修模式，按照设备即时的健康状况来安排检修，取代固定时段的检修，以此加强检修的针对性和效率。

## 7 结语

电力系统继电保护的故障分析与处理属于多环节，多技术的系统工程。要清楚故障的基本类型，用科学方法精确分析，还要妥善处理保护装置自身的异常，由此形成包含隔离，恢复和预防的层次化策略，再加上持续的效果评价与改进，这些一起形成了捍卫电网安全的坚强壁垒。电力系统朝着高比例新能源，高电力电子化方向发展时，故障特征会变得越发繁杂，这给继电保护技术带来了新难点。未来，仍然得持续推进故障机理研究，促使分析方法智能化，改善处理策略的自适应能力，这样就能创建起更可靠，高效又智能的电网安全保护系统。

### 参考文献

- [1] 张博华.电力系统继电保护故障分析与安全控制[J].大众用电,2025,40(04):46-47.
- [2] 卜昱家.电力系统继电保护中的隐性故障分析[J].集成电路应用,2025,42(03):190-191.
- [3] 王馨瑶,史宇.电力继电保护的故障分析与维修技术研究[J].张江科技评论,2024,(06):89-91.
- [4] 罗明飞,汤瑞,秦正升,等.基于信息技术的继电保护与故障诊断分析[J].集成电路应用,2024,41(03):256-257.
- [5] 邵磊,崔巍.变电站继电保护常见故障处理分析[J].光源与照明,2023,(10):234-236.

# Identification and Prevention of Safety Risks in the Construction Process of New Energy Projects

Zhi Li

Guizhou Jinyuan Weining Energy Co., Ltd., State Power Investment Corporation Limited, Weining, Guizhou, 553100, China

## Abstract

With the increasing global emphasis on environmental protection and sustainable development, new energy projects have experienced rapid growth. However, the construction process of new energy projects has uniqueness and complexity, facing numerous safety risks. This paper focuses on the construction process of new energy projects and deeply explores the identification and prevention of safety risks. Firstly, it elaborates on the characteristics of new energy project construction. Then, it identifies the safety risks existing in the construction process from multiple aspects, including risks caused by natural environment, technical processes, personnel management, and other factors. On this basis, targeted prevention and control measures are proposed, covering the improvement of the risk management system, strengthening personnel training and education, reinforcing on-site safety management, etc. The aim is to improve the safety of new energy project construction, reduce accidents, ensure the smooth progress of projects, and promote the healthy development of the new energy industry.

## Keywords

New Energy Project; Construction Process; Safety Risk Identification; Prevention and Control

## 新能源项目施工过程中的安全风险识别与防控

李志

国家电投集团贵州金元威宁能源股份有限公司, 中国·贵州 威宁 553100

## 摘要

随着全球对环境保护和可持续发展的重视, 新能源项目迎来了快速发展。然而, 新能源项目施工过程具有独特性和复杂性, 面临着诸多安全风险。本文聚焦新能源项目施工过程, 深入探讨安全风险的识别与防控。首先阐述了新能源项目施工的特点, 然后从多个方面详细识别了施工过程中存在的安全风险, 包括自然环境、技术工艺、人员管理等因素引发的风险。在此基础上, 针对性地提出了防控措施, 涵盖完善风险管理体系、加强人员培训教育、强化现场安全管理等内容。旨在提高新能源项目施工的安全性, 减少事故发生, 保障项目顺利推进, 推动新能源产业的健康发展。

## 关键词

新能源项目; 施工过程; 安全风险识别; 防控

## 1 引言

在全球应对气候变化、推动能源转型的大背景下, 新能源作为清洁能源的代表, 正逐渐成为能源领域的发展重点。新能源项目涵盖了太阳能、风能、水能、生物能等多种形式, 其建设对于减少对传统化石能源的依赖、降低碳排放具有重要意义。然而, 新能源项目施工过程不同于传统工程项目, 具有施工环境复杂、技术要求高、专业性强等特点。本文将围绕新能源项目施工过程中的安全风险识别与防控展开研究, 以为新能源项目的安全建设提供参考。

## 2 新能源项目施工特点

### 2.1 施工环境复杂

新能源项目的建设地点往往因其资源禀赋而具有显著的特异性与特殊性, 这在其施工环境层面构成了严峻的多维挑战。以风力发电项目为例, 其选址多集中于风能资源富集的偏远山区、沿海地带或开阔草原, 这些区域不仅地形起伏剧烈、地质条件复杂, 更常年受到强风、盐雾、高湿度等恶劣气候因子的持续侵蚀。施工团队需直面崎岖地形导致的机械设备转运困难、大宗材料运输效率低下, 以及因远离城镇而衍生的后勤保障薄弱、应急响应迟缓等一系列现实困境。尤其在山区进行风机基础开挖与塔筒吊装时, 陡峭的边坡不仅极大限制了大型吊装设备的作业半径与安全性, 暴雨季节还极易诱发山体滑坡、崩塌等次生地质灾害, 对人员与设施

【作者简介】李志(1989—), 男, 穿青人, 中国贵州人, 本科, 工程师, 从事新能源安全管理研究。

构成双重威胁<sup>[1]</sup>。

## 2.2 技术要求高

新能源项目涉及多项前沿技术体系，对工艺精度与专业能力要求极为严苛。以太阳能光伏发电为例，需深度掌握高效光伏电池制造技术、最大功率点跟踪算法、逆变器并网控制等核心技术，同时需熟悉组件安装角度优化、阴影遮挡分析等工程细节。风力发电领域则要求掌握叶轮气动设计、变桨距控制、塔筒振动监测等关键技术，并需具备机组吊装调试、电网接入调试等实操能力。新能源汽车充电设施建设更需集成电气系统设计、智能功率分配、安全防护标准等多维度技术。这些复杂技术的应用对施工人员提出双重挑战：既需精通理论原理，又需具备现场问题诊断与应急处理能力。任何技术操作失误或管理疏漏都可能引发设备故障、火灾甚至人员伤亡等重大安全风险，因此严格的技术培训与标准化作业流程至关重要。

## 2.3 专业性强

新能源项目施工依赖电气、机械、土建等多专业深度协同，各领域工作紧密交织，任何环节疏漏均可能引发连锁反应，危及整体安全与质量。以光伏电站为例，电气专业需精准定位设备安装点位并确保接地系统可靠，土建专业则需严格把控基础承重、防渗等参数，二者需通过 BIM 建模等技术实现施工进度与空间布局的实时同步。风力发电项目中，机械专业对塔筒、叶轮的安装精度直接影响电气系统的稳定运行，而土建基础沉降监测数据又需反哺机械安装方案调整。这种跨专业协同要求施工人员不仅精通本领域技能，更需具备跨学科沟通与问题预判能力，方能避免因配合失误导致的设备损坏、结构失稳甚至人身伤害等风险<sup>[2]</sup>。

# 3 新能源项目施工过程中的安全风险识别

## 3.1 自然环境引发的风险

**气象灾害：**新能源项目施工场地多处于自然环境较为恶劣的地区，容易受到气象灾害的影响。如狂风可能吹倒未固定好的施工设备、脚手架等，造成设备损坏和人员伤亡；暴雨可能引发洪水、山体滑坡等地质灾害，冲毁施工场地和临时设施，威胁施工人员的生命安全；暴雪会导致道路积雪结冰，影响施工物资的运输和施工人员的出行，增加滑倒、摔伤等事故的发生概率。

**地理条件：**复杂的地理条件也是施工过程中的安全隐患之一。在山区施工，地势起伏大，道路崎岖，施工机械和材料的运输难度大，容易发生车辆坠崖等事故。在高原地区，空气稀薄，施工人员容易出现高原反应，影响身体健康和工作效率，增加了施工过程中的安全风险。

## 3.2 技术工艺相关风险

**新技术应用风险：**新能源项目往往采用一些新技术、新工艺，这些技术和工艺在实际应用中可能存在不成熟的地方。施工人员如果对这些新技术、新工艺不熟悉，操作不当，

就容易引发安全问题<sup>[3]</sup>。例如，在一些新型太阳能电池板安装过程中，如果安装工艺不符合要求，可能会导致电池板松动、掉落，造成人员伤害和财产损失。

**施工工艺复杂：**新能源项目施工工艺复杂，涉及多个环节和工序。如果施工过程中某一工序出现问题，可能会影响后续工序的进行，甚至引发连锁反应，导致安全事故。例如，在风力发电机组安装过程中，塔筒的吊装是一项关键工序，如果吊装方案不合理、操作不规范，可能会导致塔筒倾倒，造成严重的安全事故。

## 3.3 人员管理风险

**安全意识淡薄：**部分施工人员安全意识淡薄，对施工过程中的安全风险认识不足，存在侥幸心理。在施工过程中，不遵守安全规章制度，如不佩戴安全帽、安全带等防护用品，随意进入危险区域，增加了安全事故发生的可能性。

**专业技能不足：**新能源项目对施工人员的专业技能要求较高，如果施工人员专业技能不足，无法正确操作施工设备和工艺，就容易引发安全问题。例如，在电气设备安装过程中，如果施工人员不具备电气知识和技能，可能会出现误操作，导致触电事故<sup>[4]</sup>。

**人员流动性大：**新能源项目施工过程中，人员流动性较大。新入职的施工人员需要一定的时间来适应工作环境和掌握施工技能，在这个过程中，容易出现安全问题。同时，人员频繁流动也会影响施工团队的稳定性和协作性，对施工安全产生不利影响。

## 3.4 设备材料风险

**设备故障：**施工过程中使用的各种设备，如起重机、挖掘机、发电机等，如果设备维护保养不当、老化失修，容易出现故障。设备故障可能会导致施工过程中断，甚至引发安全事故。例如，起重机在起吊重物时如果出现故障，可能会导致重物坠落，造成人员伤亡和财产损失。

**材料质量问题：**新能源项目施工所使用的材料，如光伏电池板、风力发电机叶片等，如果材料质量不符合要求，可能会影响工程质量和施工安全。例如，质量不合格的光伏电池板在长期使用过程中可能会出现开裂、短路等问题，引发火灾等安全事故。

## 3.5 管理风险

**安全管理制度不完善：**部分新能源项目施工单位安全管理制度不完善，缺乏明确的安全责任制度和操作规程。

**安全监管不到位：**在施工过程中，如果安全监管不到位，不能及时发现和消除安全隐患，就容易导致安全事故的发生。

# 4 新能源项目施工过程中的安全风险防控措施

## 4.1 完善风险管理体系

**建立风险评估机制：**在新能源项目施工前，对施工过程中可能存在的各种安全风险进行全面、系统的评估。根据

施工项目的特点、施工环境和施工工艺等因素,识别出可能存在的风险因素,并对风险的可能性和后果进行评估,确定风险等级。根据风险评估结果,制定相应的风险防控措施。

**健全安全管理制度:**建立健全安全管理制度,明确安全责任制,将安全责任落实到每个部门、每个岗位和每个人。制定完善的施工安全操作规程,规范施工人员的操作行为。加强对施工设备、材料的管理,建立设备维护保养制度和材料检验制度,确保设备正常运行和材料质量符合要求<sup>[5]</sup>。

**加强应急管理:**制定完善的应急预案,包括火灾、地震、洪水等自然灾害应急预案和设备故障、人员伤亡等事故应急预案。定期组织应急演练,提高施工人员的应急处置能力和自我保护意识。建立应急救援队伍,配备必要的应急救援物资和设备,确保在突发事件发生时能够及时、有效地进行救援。

#### 4.2 加强人员培训教育

**安全意识培训:**加强对施工人员的安全意识培训,提高施工人员对安全风险的认识和重视程度。通过安全培训、安全会议、安全宣传等方式,向施工人员普及安全知识和法律法规,使施工人员树立正确的安全观念,自觉遵守安全规章制度。

**专业技能培训:**根据新能源项目施工的特点和要求,对施工人员进行专业技能培训。培训内容包括施工工艺、设备操作、电气知识等方面。通过专业技能培训,提高施工人员的专业技能水平,确保施工人员能够正确操作施工设备和工艺,减少因操作不当而引发的安全事故。

**应急培训:**加强对施工人员的应急培训,提高施工人员的应急处置能力。培训内容包括应急预案的熟悉、应急处置流程的掌握、应急救援设备的使用等方面。通过应急培训,使施工人员在突发事件发生时能够迅速、有效地进行应急处置,减少事故损失。

#### 4.3 强化现场安全管理

**加强施工现场安全检查:**建立健全施工现场安全检查制度,定期对施工现场进行安全检查。安全检查内容包括施工设备、施工材料、施工人员的安全防护用品、施工现场的安全设施等方面。对检查中发现的安全隐患,要及时下达整改通知书,要求限期整改,确保施工现场安全。

**规范施工现场作业行为:**加强对施工现场作业行为的规范管理,要求施工人员严格按照施工安全操作规程进行作业。严禁施工人员违规操作、冒险作业。加强对施工现场的秩序管理,保持施工现场整洁、有序,减少因施工现场混乱而引发的安全事故。

**加强施工现场安全防护:**在施工现场设置必要的安全防护设施,如安全警示标志、防护栏杆、安全网等。为施工人员配备必要的安全防护用品,如安全帽、安全带、防护鞋等,并要求施工人员正确佩戴和使用。加强对施工现场安全防护设施和安全防护用品的检查和维修,确保其完好有效。

#### 4.4 加强设备材料管理

**设备维护保养:**建立设备维护保养制度,定期对施工设备进行维护保养。对设备进行日常检查、定期检查和专项检查,及时发现和排除设备故障和隐患。对设备进行清洁、润滑、紧固等维护保养工作,确保设备正常运行。

**材料质量控制:**加强对施工材料的质量控制,建立材料检验制度。对施工材料进行严格的检验和验收,确保材料质量符合要求。对不合格的材料,要坚决予以退场处理,严禁使用不合格的材料进行施工。

**设备材料存储管理:**合理规划设备材料的存储场地,对设备材料进行分类存放。加强对设备材料存储场地的管理,保持存储场地干燥、通风、整洁,防止设备材料受潮、生锈、损坏等。

#### 4.5 加强管理协调

**加强内部管理协调:**新能源项目施工单位要加强内部管理协调,建立有效的沟通机制和协调机制。各部门之间要加强信息共享和沟通交流,密切配合,形成工作合力。加强对施工进度、施工质量、施工安全等方面的协调管理,确保项目顺利进行。

**加强与外部单位协调:**新能源项目施工单位要加强与外部单位的协调,包括与建设单位、设计单位、监理单位、供应商等单位的协调。加强与外部单位的沟通交流,及时解决施工过程中出现的问题。积极配合建设单位、监理单位的工作,接受建设单位、监理单位的监督和管理,确保项目符合相关要求和标准。

### 5 结语

新能源项目施工过程中的安全风险识别与防控是保障项目顺利实施的关键。新能源项目施工具有施工环境复杂、技术要求高、专业性强等特点,面临着自然环境、技术工艺、人员管理、设备材料和管理等多方面的安全风险。通过对这些安全风险的准确识别,采取完善风险管理体系、加强人员培训教育、强化现场安全管理、加强设备材料管理和加强管理协调等防控措施,可以有效降低安全风险,减少安全事故的发生,保障施工人员的生命安全和身体健康,确保新能源项目施工的顺利进行,推动新能源产业的健康可持续发展。

#### 参考文献

- [1] 张坤.新能源EPC总承包项目建设过程的风险防范分析[J].水电与新能源,2020,34(03):26-27.
- [2] 王占超.屋面光伏发电项目施工安全风险预防探讨[J].水电与新能源,2024,38(02):69-71.
- [3] 王玉玉,吕超,王鹏,等.海上风电项目安全风险防控[J].船舶工程,2025,47(S1):144-147.
- [4] 郎作友.海南海上风电场建设的安全风险与防控[J].中国海事,2024,(10):42-45.
- [5] 于徽,李能斌,伍海蓉,等.浅谈海上风电平台的安全作业风险管控[J].中国水运(下半月),2021,21(20):33-34.