

水利电力 科学与技术

Water Conservancy and Electric Power
Science and Technology



ART AND DESIGN PRESS INC.

(626 810 4480)

119 S Atlantic Blvd, Suite 300D

Monterey Park, CA 91754

Copyright © 2025 by ART AND DESIGN PRESS INC.

Complimentary Copy



Editors-in-Chief

Jian Zhao

Harbin Center for Integrated Natural Resources Survey, China Geological
Survey

Editorial Board Member

Jinze Fu

State Grid Jibei Electric Power Co., Ltd. Tangshan Fengrun District Power
Supply Branch

Shiyuan Zhang

Jingdezhen Water Conservancy Planning and Design Institute

Li Zhan

Jingdezhen Water Conservancy Planning and Design Institute

Yan Li

Liaoning Hongyanhe Nuclear Power Co., LTD.



水利电力科学与技术

Water Conservancy and Electric Power
Science and Technology

第3卷 第11期 2025年11月刊

主管 ART AND DESIGN PRESS INC.

主办 ART AND DESIGN PRESS INC.

编辑 《水利电力科学与技术》编辑部

ISSN(O): 2995-438X

ISSN(P): 2995-4371

地址: 119 S Atlantic Blvd, Suite 300D Monterey
Park, CA 91754

网址: <https://www.artdesignp.com>

本刊说明:

凡向本刊所投稿件, 全体作者需签署论文著作权
转让声明书和论文发表承诺书, 声明、承诺及相关事
项如下:

- 作者将论文的复制权、发行权、网络传播权、翻
译权、汇编权、信息网络传播权、改编权等著作
权在世界范围内免费转让 给本刊。
- 论文不侵犯他人著作权和其他权利, 否则作者将
承担由此产生的全部责任, 并赔偿由此给出版单
位造成的全部损失。
- 论文署名作者享有该作品的完全著作权, 署名作
者的身份真实。
- 论文未曾以任何形式公开发表过。
- 作者所投本刊稿件, 本刊编辑部拥有修改权。

水利工程 | HYDRAULIC ENGINEERING

- 001 水工建筑工程检测: 基于水利水电工程的技术管理路径 陈远彪
Hydraulic Engineering Construction Inspection: A Technical Management Approach
Based on Water Conservancy and Hydropower Projects Chen Yuanbiao
- 004 智慧水利框架下渠道引水工程安全监测与智能调控系统构建 刘铁刚
Construction of Safety Monitoring and Intelligent Regulation System for Canal
Diversion Projects under the Framework of Smart Water Conservancy Liu Tiegang
- 007 高标准鱼塘尾水治理的成本管理策略研究 张洪泉
The Study on Cost Management Strategy of Tailwater Treatment in
High-standard Fish Pond Zhang Hongquan

电力工程 | POWER ENGINEERING

- 011 新能源光伏发电、储能及电动汽车充电桩的技术开发 刘宗文
与 EPC 项目管理探索
Exploration of Technical Development and EPC Project Management for
New Energy Photovoltaic Power Generation, Energy Storage, and
Electric Vehicle Charging Stations Liu Zongwen
- 014 电力工程项目全过程管理的优化策略研究 李桂裕
Research on the Optimization Strategy of the Whole Process Management
of Power Engineering Project Li Guiyu
- 017 配电网工程施工管理: 复杂问题解决与技术创新 吴超鹏
Construction Management of Distribution Network Engineering: Complex Problem
Solving and Technological Innovation Wu Chaopeng
- 020 PCB 制造业能源管理在碳中和目标下的发展路径探讨 张如兴
Exploring the Development Path of Energy Management in the PCB Manufacturing
Industry under the Carbon Neutrality Goal Zhang Ruxing
- 023 电力工程线路设计中的关键技术与优化策略研究 陈捷
Research on Key Technologies and Optimization Strategies in
Power Engineering Line Design Chen Jie
- 026 电气自动化技术在新型环保电厂核心技术应用与未来趋势 孙文超
Application and Future Trends of Electrical Automation Technology in Core
Technologies of New Environmental Protection Power Plants Sun Wenchao
- 029 电力设计在电力工程中的应用及发展趋势探究 肖鸣
Exploration of the Application and Development Trends of
Power Design in Power Engineering Xiao Ming
- 032 装配式建筑电气预埋精准定位施工技术及其全站仪坐标控制方法研究 冯海蓝
Research on Precision Positioning Construction Technology and
Total Station Coordinate Control Method for Prefabricated Building
Electrical Pre embedding Feng Hailan
- 035 电力工程继电保护调试与电气试验中的质量检验路径分析 成祥玉
Analysis of Quality Inspection Path in Relay Protection Debugging and Electrical
Testing of Power Engineering Cheng Xiangyu

038	电气工程领域供配电智能化控制系统的设计与施工管理探究 Design and Construction Management Exploration of Intelligent Control System for Power Supply and Distribution in the Field of Electrical Engineering	柏斗 Bai Dou
041	机电安装工程管理在锂离子电池制造中的应用与优化 Application and Optimization of Electromechanical Installation Engineering Management in Lithium-ion Battery Manufacturing	黄荣惯 Huang Rongguan
044	基于工业风扇产品的 EC 永磁变频外转子同步电动机磁场与极弧系数探究 Research on Magnetic Field and Pole Arc Coefficient of Ec Permanent Magnet Variable Frequency External Rotor Synchronous Motor Based on Industrial Fan Products	黄禄财 Huang Lucai
047	新能源投资领域中光伏与风电项目的投资及技术管理剖析 Analysis of Investment and Technical Management of Photovoltaic and Wind Power Projects in the Field of New Energy Investment	源超鸿 Yuan Chaohong
050	电气工程视角下泛光照明落地性的实现路径研究 Research on the Implementation Path of Floodlighting Landing Performance from the Perspective of Electrical Engineering	陈婧 Chen Jing
053	电力工程管理中技术管理与工程风险管理协同探究 A Collaborative Exploration of Technical Management and Engineering Risk Management in Electric Power Engineering Management	龚文仪 Gong Wenyi
056	风电机组齿轮箱故障诊断与剩余寿命预测 —— 基于振动信号与深度学习 Fault Diagnosis and Remaining Useful Life Prediction of Wind Turbine Gearboxes — Based on Vibration Signals and Deep Learning	张晓伟 Zhang Xiaowei
059	火电厂热工自动化改造实践与效能分析 Practice and Efficiency Analysis of Thermal Automation Transformation in Thermal Power Plants	余强 Yu Qiang

水工建筑工程检测： 基于水利水电工程的技术管理路径

陈远彪

广东丰源建设工程检测有限公司，广东 河源 517000

DOI:10.61369/WCEST.2025110002

摘 要： 本文围绕水工建筑工程检测展开，阐述其特殊性，强调在水利水电工程技术管理框架下，应综合运用多种技术手段及管理方法。通过实证分析，验证基于水利水电工程的技术管理路径成效，同时指出当前智能检测装备集成和多源数据融合的不足，展望区块链技术应用前景。

关 键 词： 水工建筑工程检测；技术管理路径；智能检测设备

Hydraulic Engineering Construction Inspection: A Technical Management Approach Based on Water Conservancy and Hydropower Projects

Chen Yuanbiao

Guangdong Fengyuan Construction Engineering Testing Co., LTD., Heyuan, Guangdong 517000

Abstract： This paper focuses on the inspection of hydraulic construction projects, elaborates on its particularity, and emphasizes that under the framework of water conservancy and hydropower engineering technology management, multiple technical means and management methods should be comprehensively applied. Through empirical analysis, the effectiveness of the technical management path based on water conservancy and hydropower projects is verified. At the same time, the deficiencies of the current integration of intelligent detection equipment and the fusion of multi-source data are pointed out, and the application prospects of blockchain technology are prospected.

Keywords： hydraulic engineering construction inspection; technical management path; intelligent detection equipment

引言

随着水利工程建设不断推进，水工建筑工程检测的重要性日益凸显。2008年颁布的《水利工程质量检测管理规定》进一步强调了规范检测行为、保障工程质量的要求。水工建筑结构因材料、荷载及环境的特殊性，在质量控制上需专门标准与方法。其工程检测技术特征复杂，管理需求贯穿全生命周期。从智能检测设备应用到质量控制体系构建，从技术管理路径优化到实证分析等多方面，都致力于提升检测的科学性与可靠性。尽管已取得成效，但仍存在智能检测装备集成及多源数据融合等不足，未来可借助新技术如区块链实现突破。

一、水工建筑工程检测的技术特征与管理需求

（一）水工建筑结构的特殊性分析

水工建筑结构具有诸多特殊性。从材料特性看，水工建筑常需承受水压力、水流冲刷等，对材料的抗渗性、耐久性要求极高，如大坝需采用抗渗性良好的混凝土材料^[1]。在荷载方面，除常规重力荷载外，水压力、渗透压力等动态荷载不可忽视，其变化复杂，对结构稳定性影响大。以大坝为例，水位涨落带来的水压力变化频繁，要求结构能适应这种动态荷载。就环境适应性而言，水工建筑长期处于水下或潮湿环境，需抵抗水的侵蚀、冻融循环等，这与传统建筑工程所处环境差异显著。这种特殊性使得

水工建筑在质量控制上不能照搬传统建筑工程模式，需针对其材料、荷载、环境特点，制定专门的质量控制标准与方法，以确保工程的安全性与可靠性。

（二）水利水电工程技术管理框架

水工建筑工程检测处于水利水电工程技术管理框架之中，其技术特征体现为检测涉及水工结构的各个方面，需综合运用多种专业技术手段，如无损检测、材料性能检测等，精准获取工程结构状态信息。管理需求层面，设计审查阶段要依据水工建筑工程特点，对检测方案、技术标准进行严格审核，确保检测能为设计优化提供可靠依据^[2]。施工监控阶段，需实时把控检测数据，保障施工质量符合设计要求。运维检测阶段，通过长期监测数据的

分析，及时发现潜在安全隐患，为运维决策提供支撑。各阶段相互关联，共同致力于提升水工建筑工程的安全性与可靠性，构建完善的全生命周期技术管理体系。

二、工程检测技术的关键管理路径

（一）数字化检测技术应用

在水工建筑工程检测中，智能检测设备如超声波探伤、三维激光扫描等在混凝土缺陷识别方面有着重要应用。超声波探伤通过发射超声波穿透混凝土结构，依据反射波特性判断内部缺陷，能精准定位缺陷位置、大小等信息，为工程质量评估提供关键依据^[3]。三维激光扫描可快速获取混凝土表面的三维数据，构建高精度模型，直观呈现表面形态及潜在缺陷。针对这些数字化检测技术，需严格管理数据标准。确保数据采集的规范性，明确各项参数设置要求；保证数据处理的准确性，制定科学的算法与流程；注重数据存储与传输的安全性，防止数据丢失或泄露，以此提升水工建筑工程检测的科学性与可靠性。

（二）检测过程的质量控制体系

在水工建筑工程检测中，检测过程的质量控制体系至关重要。建立覆盖人员资质、设备校验、检测流程、数据复核的四级质量控制节点。人员资质方面，确保参与检测的人员具备专业知识与技能，持有相应资格证书。设备校验环节，对检测所需的仪器设备按规定周期进行校准与维护，保证其精度与可靠性。检测流程要严格遵循标准规范，保证操作的准确性与一致性。数据复核则对检测所得数据进行再次审核，杜绝错误与疏漏。此外，针对异常数据处理，应提出明确管理规范，规定如何分析异常原因、采取何种纠正措施等^[4]。通过这样完善的质量控制体系，保障水工建筑工程检测结果的准确性与可靠性。

三、技术管理路径的优化策略

（一）检测技术创新与管理协同机制

1. BIM技术与检测数据融合

在水工建筑工程检测基于水利水电工程的技术管理路径优化中，BIM技术与检测数据融合是关键策略。通过将BIM技术集成到检测流程，能够实现检测结果的可视化呈现，让复杂的检测数据以直观、易懂的三维模型形式展现，帮助管理人员与技术人员快速理解结构状态。同时，借助BIM技术对检测数据的深度分析，可有效进行结构安全预判。如结合实时监测数据与BIM模型，运用数据分析算法，提前预测结构可能出现的安全隐患，为及时采取加固、维修措施提供依据。这种融合能打破技术与管理之间的壁垒，促进检测技术创新与管理的协同，提升水利水电工程检测的整体效率与质量^[5]。

2. 风险预警决策支持系统

在水工建筑工程检测的技术管理路径优化中，检测技术创新与管理协同机制至关重要。一方面，通过不断创新检测技术，如采用先进的无损检测手段、智能传感器等，提高检测数据的准确

性与时效性。另一方面，要加强管理协同，打破部门壁垒，确保检测技术成果能迅速应用于实际管理流程。在风险预警决策支持系统方面，基于检测大数据构建风险评估模型。利用大数据分析技术挖掘潜在风险特征，精准设置预警阈值。当风险指标接近阈值时，启动相应的管理响应机制，如及时安排维护、调整工程运行参数等^[6]。这种优化策略能有效提升水工建筑工程检测的整体效能，保障水利水电工程安全稳定运行。

（二）管理流程标准化建设

1. 多层级检测档案管理系统

在水工建筑工程检测基于水利水电工程的技术管理路径中，管理流程标准化建设与多层级检测档案管理系统至关重要。对于管理流程标准化，应全面梳理检测各环节，从检测方案制定到结果报告，依据水利行业标准明确每一步骤的操作规范、质量要求与时间节点，确保流程统一、高效。在多层级检测档案管理系统方面，设计符合水利行业标准的电子化档案存储架构，该架构应具备分层分类存储功能，方便不同层级人员访问与管理。同时制定数据追溯与共享管理规范^[7]，数据追溯可精准定位每一项检测数据的来源、修改记录等，保障数据准确性与可靠性；共享管理规范则明确不同层级人员的数据使用权限，在保证数据安全的前提下实现高效共享，提升整体技术管理水平。

2. 跨部门协同管理平台

技术管理路径的优化策略需注重管理流程标准化建设与跨部门协同管理平台搭建。在管理流程标准化建设方面，应明确设计、施工、监理、检测四方在各个环节的工作标准与规范，比如对检测指标、数据记录方式、报告格式等制定统一标准，确保各方工作有序衔接，减少因标准差异产生的问题^[8]。搭建跨部门协同管理平台，实现设计、施工、监理、检测四方的实时信息交互，打破部门间信息壁垒。平台可设置专门板块供各方上传和共享资料、发布工作进展、提出问题与解决方案，同时基于此平台落实责任追溯制度，通过记录各方操作与信息交互，在出现问题时能快速精准定位责任主体，从而提升水工建筑工程检测技术管理整体效能。

四、管理路径实践验证与改进

（一）典型工程应用案例分析

1. 大坝安全检测项目实证

在大坝安全检测项目实证中，选取重力坝检测数据具有重要意义。通过对重力坝渗流监测数据的分析，可清晰观察到管理路径在实际应用中对渗流状态把握的精准度，判断渗流是否处于安全可控范围，确保大坝不因渗流问题而引发安全隐患。在结构稳定性评估方面，依据管理路径所采用的方法，利用重力坝的结构参数及相关监测数据进行计算与分析，能准确评估重力坝在不同工况下的稳定性。结果表明，基于水利水电工程的技术管理路径在重力坝渗流监测与结构稳定性评估中应用效果良好，但也发现一些细节可优化。基于此实证分析，为管理路径的进一步改进提供了数据支撑与方向指引，以更好地保障水工建筑工程安全^[9]。

2. 输水隧洞检测管理实践

在输水隧洞检测管理实践中,着重分析管片错台检测数据管理流程。通过对实际工程输水隧洞管片错台检测数据的收集、整理与分析,构建起科学合理的数据管理流程^[10]。在此过程中,详细记录每一处管片错台的具体数值、位置等信息,运用专业软件进行数据处理与可视化展示。基于此流程,评估基于水利水电工程的技术管理路径对施工质量控制和提升作用。结果显示,该技术管理路径使得施工人员能精准掌握管片错台情况,及时发现潜在质量问题并采取针对性措施,显著提高了输水隧洞施工质量,有效保障了隧洞结构稳定性与运行安全性,为类似水工建筑工程检测管理提供了可靠的实践参考。

(二) 管理成效综合评价体系

1. 多维评价指标构建

在水工建筑工程检测基于水利水电工程的技术管理路径中,多维评价指标构建极为关键。检测效率作为重要指标,衡量检测工作开展的速度,快速完成检测任务能保障工程进度;数据准确率关乎检测质量,准确的数据是后续工程决策的依据,哪怕微小的数据偏差都可能导致严重后果;问题整改率反映对检测出问题的处理力度,及时且高效的整改才能真正提升工程质量。将这些因子纳入综合评估模型,能从不同维度全面、客观地评价管理成效,为后续管理路径的实践验证与改进提供量化依据,助力水利水电工程技术管理水平不断提升,确保水工建筑工程的安全与稳定运行。

2. 模糊综合评价法应用

在水工建筑工程检测的管理成效综合评价体系中,模糊综合评价法具有重要应用。针对某流域水电工程检测管理体系,先构建评价因素集,涵盖诸如检测技术准确性、人员操作规范性、设备运行稳定性等多个方面。接着确定评语集,例如优秀、良好、一般、较差等不同等级。运用专家权重法为各评价因素赋予权重,以反映其在整体体系中的重要程度。在此基础上,依据模糊数学原理,通过隶属度函数确定各因素对不同评语的隶属程度,进而得到模糊评价矩阵。将权重向量与模糊评价矩阵进行合成运算,得出综合评价结果,直观呈现该水电工程检测管理体系的实际成效。根据此结果,可针对性地对管理路径进行实践验证,发现不足并加以改进,提升水工建筑工程检测的技术管理水平。

(三) 持续改进机制设计

1. PDCA 循环管理应用

在水工建筑工程检测中应用 PDCA 循环管理,计划阶段,依

据水利水电工程特点与相关标准,制定详细检测计划,明确检测指标、方法与频率。执行阶段,检测人员严格按照计划开展工作,如实记录检测数据。检查阶段,对检测数据深度分析,对比标准判断工程质量状况,查找偏差与潜在问题。处理阶段,针对发现的问题,分析原因并制定纠正措施,将成功经验标准化,用于指导后续检测工作。通过不断循环,实现检测管理的持续改进,提升水工建筑工程检测的准确性与可靠性,为水利水电工程质量提供坚实保障。

2. 动态调整策略研究

针对新型建筑材料和施工工艺,要设计一套科学合理的持续改进机制。该机制需以定期评估检测标准的适应性为基础,分析在水工建筑工程实际检测中,现有标准是否准确反映材料和工艺特性,是否满足水利水电工程的质量安全需求。同时,开展动态调整策略研究。一方面,关注行业前沿技术发展,了解新型建筑材料和施工工艺的最新动态,以便及时将相关技术要点融入检测标准;另一方面,结合水工建筑工程检测实践反馈,对标准进行有针对性的调整,确保检测标准能紧跟材料与工艺变化,为水利水电工程技术管理提供精准有效的支撑,推动水工建筑工程检测工作不断完善和优化。

五、总结

在水工建筑工程检测中,基于水利水电工程的技术管理路径已取得显著实施效果。通过对检测流程的优化、人员专业能力的提升以及先进技术的应用,提高了检测的准确性与效率,为水工建筑的质量与安全提供了有力保障。然而,当前研究仍存在一些不足。智能检测装备集成方面,各类设备之间的兼容性与协同性有待加强,未能充分发挥整体效能;多源数据融合也面临挑战,不同类型数据的融合精度和效率较低,影响检测结果的全面性与深度。未来,区块链技术有望在检测数据可信管理中大放异彩。其分布式账本、加密算法等特性,可确保检测数据的真实性、不可篡改,提升数据管理的安全性与可信度,为水工建筑工程检测技术管理开辟新路径。

参考文献

- [1] 张朕. 基于行为隐空间功构映射的智能视觉检测装备设计研究 [D]. 东华大学, 2023.
- [2] 黄体文. 基于 BIM 的水利建筑工程概预算编制研究 [D]. 华北水利水电大学, 2022.
- [3] 李淑倩. 东深供水工程线性水利遗产研究 [D]. 华南理工大学, 2022.
- [4] 杨蕴鹏. 基于图像处理的水工结构钢表面锈蚀特征检测与评估 [D]. 三峡大学, 2021.
- [5] 许凯飞. 基于倾斜圆路径的机床误差检测研究 [D]. 杭州电子科技大学, 2023.
- [6] 张胜利. 水利水电工程施工技术管理研究 [J]. 你好成都 (中英文), 2023, (33): 0232-0234
- [7] 曾德升. 水利水电工程施工技术管理研究 [J]. 价值工程, 2021, 40(23): 54-56.
- [8] 王振伟. 试论水利水电工程混凝土施工技术管理 [J]. 砖瓦世界, 2021(13): 299.
- [9] 彭光玉. 试论水利水电工程混凝土施工技术管理 [J]. 科技风, 2021(9): 190-191.
- [10] 侯万军, 侯博超. 水利水电工程施工技术管理研究 [J]. 水利水电科技进展, 2021, 41(5): 10002

智慧水利框架下渠道引水工程 安全监测与智能调控系统构建

刘铁刚

黑龙江省中部引嫩工程和江东灌涝区管护中心，黑龙江 齐齐哈尔 161006

DOI:10.61369/WCEST.2025110019

摘 要： 智慧水利发展进程中，渠道引水工程显现设施陈旧老化、信息传递延迟、调控方式粗犷等弊病，人工巡检为主的传统运维模式，已无法适配现代化供水灌溉的实际需求，依托智慧化建设思路，搭建融合多元感知、智能研判、动态预警、自主调控功能的体系架构，借助监测数据自动采集、云边端协同运算分析、趋势智能推演等技术手段，达成渠道运行态势的可视化呈现与精细化管控，为工程安全稳定运行、调度方案科学优化、用水效率提升降耗提供有力技术保障。

关 键 词： 智慧水利；渠道引水工程；安全监测；智能调控；数字孪生

Construction of Safety Monitoring and Intelligent Regulation System for Canal Diversion Projects under the Framework of Smart Water Conservancy

Liu Tiegang

Central Nenjiang River Diversion Project and Jiangdong Irrigation and Waterlogging Area Management and Protection Center, Qiqihar, Heilongjiang 161006

Abstract： In the development process of smart water conservancy, canal diversion projects have exhibited issues such as outdated and aging facilities, delayed information transmission, and crude regulation methods. The traditional operation and maintenance model, primarily relying on manual inspections, can no longer meet the actual needs of modern water supply and irrigation. Relying on the concept of smart construction, a system architecture integrating multiple sensing, intelligent analysis, dynamic early warning, and autonomous regulation functions is established. Through technical means such as automatic collection of monitoring data, cloud-edge-end collaborative computing analysis, and intelligent trend inference, visual presentation and refined management and control of canal operation conditions are achieved. This provides strong technical support for the safe and stable operation of the project, scientific optimization of scheduling plans, and improvement of water use efficiency and reduction of consumption.

Keywords： smart water conservancy; canal diversion project; safety monitoring; intelligent regulation; digital twin

引言

国家大力推动智慧水利建设的宏观环境中，渠道引水工程在灌区输水保障、洪涝灾害防御、水资源合理分配等方面的价值愈发突出，人工巡查主导的传统管理模式，存在监测响应迟缓、数据资源零散、调控措施粗放等缺陷，难以契合现代水利工程对于高效运转、安全防护、精细管理的运行要求，立足智慧化发展理念，打造涵盖状态监测、风险预警、安全防护、智能调控的一体化系统，成为增强工程运行稳定性、提高水资源利用效能的核心路径。

一、智慧水利框架下渠道引水工程安全监测系统总体架构

（一）渠道引水工程智慧监测的总体设计思路

渠道引水工程智慧监测工作以“感知—传输—平台—应用”作为整体架构，注重全要素覆盖、全流程贯穿与全周期跟进

的系统化规划，感知层借助各类传感器、视频监控终端等设施完成运行状态的实时捕捉，传输层依靠稳定可靠的物联网组网实现监测数据的高效输送，平台层负责开展数据整合处理、专业模型分析以及风险趋势研判，应用层则聚焦管理调度实施、应急风险预警与决策制定辅助等实际需求。监测范畴囊括渠道结构安全状况、水流流量与水位动态变化、渠坡稳固程度、渗漏病害发展走

向以及突发险情自动甄别等核心内容，围绕上述监测内容搭建科学完备的指标体系，保障各监测要素间的相互衔接与交叉校验，布设规划需结合渠道功能等级、沿线地形地貌、水力运行特征以及风险点位分布状况加以调整完善，让监测站点既能够实现全域有效覆盖，又具备重点清晰、布设经济的特性，达成监测效能与建设成本的协调统一。

（二）多源感知设备与监测技术体系构建

多源感知体系是支撑智慧监测系统稳定运行的核心基础，需结合渠道实际运行特性与潜在风险类型开展差异化配置，常规监测工作中，水位、流量、渗压、位移、雨量等各类传感器承担实时数据采集职责，通过科学布设监测点位可实现水力参数与结构变形状态的不间断监控；针对重点防护区段或人工巡查难以涉足的区域，可运用无人机航测、倾斜摄影以及三维激光扫描等技术获取高精度地形地貌与结构形变数据，实现空间范围的快速全面监测；巡检作业开展过程中，依托北斗 / GPS 定位技术实现巡检轨迹的全程管控，同时结合视频监控与 AI 智能识别技术完成漂浮物阻水、渠道结构破损、非法取水等异常情况的自动甄别与分类处置，切实提升巡检工作效率与异常事件的发现能力。通过多类型、多尺度监测手段的有机组合，能够形成“点位精准监测—巡检动态监测—空间全域监测”相互补充的综合感知体系，为后续数据深度分析与应用提供丰富且可靠的数据支撑。

（三）数据采集与无线传输网络设计

数据采集与传输环节需结合渠道空间分布特点、网络信号覆盖条件、现场环境制约因素等选择适配的物联网技术，例如 NB-IoT 技术适用于低功耗、广覆盖的应用场景，LoRa 技术更适合短距离自组网数据传输，4G/5G 技术则能够满足视频流数据与高频次监测数据的传输需求。在监测现场部署边缘计算节点，可完成数据的初步筛选处理、无效信息过滤以及异常情况的快速响应，减少原始数据传输总量并提升现场异常事件的处置效率；监测数据完成汇聚整合后，需运用多源异构数据融合技术实现结构监测信息、图像视频数据、水力运行参数等不同格式数据的统一管理与关联分析，同步建立完善的数据质量管控机制，对监测数据中的异常数值、缺失记录以及噪声干扰进行识别与校正，保障监测结果的准确性与可用性，通过搭建安全稳定、实时高效的数据采集与传输体系，可为渠道引水工程安全监测与智能调控工作的开展筑牢数据根基。

二、渠道工程安全监测数据处理与智能预警模型

（一）数据预处理与云边协同分析

渠道工程监测数据来源广泛且格式繁杂，受外界环境因素干扰极易出现异常数值、数据缺失以及噪声干扰等问题，因此需在数据处理初期实施系统化预处理操作。一般可采用统计学校正、模型插值补全与小波滤波降噪等技术手段完成数据纠偏与去噪，保障监测数据的连续性与可信度，计算任务部署层面，依托边缘节点开展现场数据清洗、格式标准化转换、异常事件初步判定等快速响应工作，当异常情况突发时能够立即触发本地预警机制或

执行应急控制指令，从而降低系统整体响应延迟并减轻云端数据处理压力；经边缘节点筛选后的大量基础监测数据上传至云平台，开展集中存储、多维度关联分析与预警模型训练等工作，借助云端强大的并行计算能力支撑大规模监测数据的实时处理、发展趋势分析与风险等级演算，构建云边协同模式下的高效数据管理体系。

（二）渠道运行安全状态识别与健康诊断

渠道工程运行状态识别与健康诊断是预警体系构建的核心环节，主要针对结构失稳、渗漏病害发展、边坡塌陷隐患、溃口风险等典型病害类型开展分析，通过对水位波动变化、渗压分布规律、位移发展趋势、排水量异常波动等特征数据的深度挖掘，可搭建渠道结构安全行为特征模型。运用支持向量机、随机森林、卷积神经网络等机器学习与深度学习技术，对监测数据开展模式识别分析，实现病害类型精准判别与风险发展趋势预测；结合物理机制模型进行综合研判，能够进一步提升诊断结果的准确性与模型的泛化能力，在此基础上，搭建渠道安全状态评估指标体系，对工程运行状况实施分级评价，同时制定风险等级划分标准，为后续预警发布与调度方案制定提供科学依据，形成从前端数据感知到后端健康诊断的完整闭环体系。

（三）预警模型构建与分级响应机制

预警体系搭建过程中，需综合运用阈值判定法、趋势预测法以及多模型融合算法，实现对不同类型风险的灵敏识别，通过设定水位急剧抬升、流量分配失衡、位移增速异常等关键参数阈值，可实现险情的快速报警；结合时间序列预测模型、深度预测模型等技术手段，能够提前预判渗漏病害发展、边坡变形加剧等潜在隐患的演变趋势；多模型融合策略的应用可有效提升复杂工况条件下的风险识别准确率。险情自动识别算法针对异常流量波动、水位突变、地表位移加速等特征信号开展实时分析，模型触发预警后可根据风险等级启动差异化响应流程，涵盖短信或平台消息提示、自动声光报警、闸门启闭联动调控、紧急引排水方案执行等措施，实现预警信息推送与调度控制操作的联动响应，通过构建科学完善的预警模型与分级响应机制，能够显著提升渠道引水工程的风险识别能力与应急处置效率。

三、智能调控系统设计与运行策略

（一）智能调控系统整体架构

渠道引水工程智能调控系统整体架构围绕供水均衡稳定、水资源高效利用、工程运行安全三大核心目标搭建，依托自动化闸门、提水泵站、跨区域调水枢纽等多层级执行设施建设，实现对渠道内水量大小、水位高低及水体流态的精准化调控。系统将各类监测数据作为核心输入要素，实时捕捉水位波动、水流速度、结构运行状态等关键参数，经诊断模块完成运行状态的全面分析，再由决策模块参照既定调度准则与优化模型生成针对性控制方案，最后通过执行模块落实闸门开度调节、泵站启停操作、流量科学分配等具体动作，构建形成“监测—诊断—决策—执行”的闭环控制流程。

（二）渠道水力特性分析与调度模型构建

精准掌握渠道水力特性是调控系统模型搭建与调度决策生成的重要前提，通过测流仪器实测、无人机航测扫描、三维地形建模分析等技术手段，采集渠道糙率系数、纵向坡度、断面几何形态、水流速度分布等关键参数，以此建立能够反映工程真实水力特征的基础信息数据库。基于该数据库搭建水动力分析模型，可实现不同来水工况下渠道流量变化、水位升降、水面线演进趋势的实时演算，为调度指令下达提供扎实科学依据；在水资源供需匹配层面，引入灌区用水需求预测模型，综合分析农作物灌溉周期、区域天气变化趋势、用户实际用水需求等因素，构建动态供需平衡调度机制，让水量分配方案更加贴合灌区生产生活实际，提升引水效率与供水分配公平性。

（三）智能控制策略与优化算法应用

在控制方法选取上，系统结合渠道实时运行工况与实际调控需求，引入 PID 控制、模糊控制、神经网络算法等多种智能控制技术，其中 PID 控制技术适用于闸门开度调节等连续型控制任务，模糊控制技术能够在复杂非线性工况下维持系统运行稳定性，神经网络与深度学习算法可依托历史运行数据挖掘调控内在规律，赋予系统自适应调控能力。在优化策略制定上，采用多变量多目标优化模型，统筹兼顾供水效率提升、水资源损耗降低、工程运行安全等多重要求，实现各项调控参数的最优组合配置，同时，基于人工智能预测的超前调度机制，可在降雨、干旱等天气突变或突发险情发生前，提前调整渠道水位与输水流量，增强系统抗风险能力；面对异常运行工况，异常检测模型可自动触发纠偏调控策略，保障渠道输水作业的连续性与稳定性。

四、系统集成与工程应用示范

（一）平台集成与数字孪生技术应用

系统集成工作以综合监控平台为核心载体，通过可视化操作界面实现水位、流量、设备运行状态、风险预警信息的集中展示，后台同步完成水动力模型、智能调度模型、安全诊断模型的集成运算，为指挥调度人员提供快速决策支撑。数字孪生渠道采用“实时监测数据驱动+物理实体模型仿真”的混合构建方式，以渠道三维立体结构、实时运行工况、安全监测指标为核心要素，达成物理实体与虚拟模型的同步映射，在新疆玛纳斯灌区引水工程的实践应用中，数字孪生技术实现平均 2 秒级的实时仿真反馈，能够在水位异常抬升前 15 分钟精准预测风险发展趋势。

（二）工程示范应用场景与效果分析

该智慧监测调控系统已在河北滦河引水工程、山东黄水东调一期工程、四川都江堰外江输水渠道等多个项目中开展示范应

用，覆盖灌区农业引水、城市生活供水、山区长距离输水三类典型渠道工程场景，在河北滦河引水工程应用案例中，智能监测系统投用后，渠道输水过程中的水资源损耗率由 12.3% 下降至 7.1%，调度指令响应时间从平均 25 分钟缩短至 6 分钟，工程险情发现率提升幅度约 40%，在都江堰外江渠道试运行阶段，系统通过人工智能识别技术累计自动发现 62 起边坡渗漏隐患苗头，隐患提前处置率高达 90%，成功规避两起可能发生的局部坍塌风险。如表 1 所示。

表 1 智慧水利监测与调控系统在典型渠道引水工程中的应用效果对比

工程名称	调度响应时间缩短	水损失率降低	险情发现率提升	用户满意度
河北滦河引水工程	25 分钟→6 分钟	12.3%→7.1%	+40%	4.7 / 5
四川都江堰外江输水渠道	18 分钟→7 分钟	9.8%→6.4%	+35%	4.6 / 5
山东黄水东调一期工程	30 分钟→10 分钟	11.5%→6.9%	+37%	4.8 / 5

从三项示范工程的应用数据能够看出，智慧监测与智能调控系统在提升调度效率、提高水资源利用率、增强风险防控能力等方面成效显著，工程管理者满意度较高，系统整体应用效果具备推广价值与实践意义。

（三）存在问题与系统优化方向

在工程实际应用过程中，系统运行仍面临部分限制因素。例如偏远地区布设的传感器受泥沙磨损、强风侵袭等恶劣环境影响，年故障率维持在 6% 左右；山区渠道通信链路稳定性欠佳，雨季时段数据传输丢包率可上升至 3% - 5%；系统兼容性方面，不同厂家生产的监测设备通信协议存在差异，导致系统集成成本增加，与此同时，海量监测数据在共享应用环节还需应对数据安全加密、访问权限控制、隐私信息保护等多重挑战。

五、结语

基于智慧水利理念搭建的渠道引水工程安全监测与智能调控系统，在数据感知、状态诊断、风险预警、调度管理等环节形成协同高效的技术体系，显著提升了工程运行安全水平与供水调控精准度，实际应用成效突出，尽管系统在传感器耐久性、多模型融合精度、数字孪生虚实耦合度等方面仍需进一步深化完善，但该系统在水利工程信息化、智能化发展进程中具备广阔应用前景，将为渠道工程全周期综合治理提供重要技术支撑。

参考文献

- [1] 班飞飞. 长距离调水工程运行绿色智慧化评价研究 [D]. 华北水利水电大学, 2024.DOI:10.27144/d.cnki.ghbse.2024.000319.
- [2] 林运东, 张龙, 刘勇. 智慧水利现状与发展展望 [J]. 黑龙江水利科技, 2025, 53(04): 162-164.DOI:10.14122/j.cnki.hskj.2025.04.043.
- [3] 邹雯. S 市智慧水利建设问题及对策研究 [D]. 西南大学, 2025.
- [4] 张中泽. 智慧水利在农业用水权改革中的应用与实践——以金安区改革试点为例 [J]. 江淮水利科技, 2025, (04): 59-64.DOI:10.20011/j.cnki.JHWR.202504012.
- [5] 孙永春. 基于有限元的引水渠道填筑工程边坡稳定性分析 [J]. 中国水能及电气化, 2025, (04): 28-32+47.DOI:10.16617/j.cnki.11-5543/TK.2025.04.06.

高标准鱼塘尾水治理的成本管理策略研究

张洪泉

中国融通农业发展集团有限公司, 北京 100080

DOI:10.61369/WCEST.2025110023

摘 要： 随着水产养殖业的快速发展，鱼塘尾水排放带来的水体污染问题日益突出，已成为制约行业可持续发展的关键瓶颈。为破解高标准鱼塘尾水治理“高成本、低效益”的现实困境，推动水产养殖业绿色可持续发展，本文以成本管理理论、环境经济学理论为支撑，系统剖析高标准鱼塘尾水治理的成本构成与管理现状，识别当前成本管理在核算、控制、融资等环节存在的核心问题及成因。从技术优化、核算体系、融资机制、政策保障等维度，构建全流程成本管理策略，为降低治理成本、提升治理效率提供理论参考与实践指引，推动养殖业向绿色、高效、可持续方向转型。

关 键 词： 高标准鱼塘；尾水治理；成本构成；成本管理；策略优化

The Study on Cost Management Strategy of Tailwater Treatment in High-standard Fish Pond

Zhang Hongquan

China Rongtong Agricultural Development Group Co., Ltd. Beijing 100080

Abstract： With the rapid development of aquaculture, the problem of water pollution caused by tail water discharge from fish ponds has become increasingly prominent, which has become a key bottleneck restricting the sustainable development of the industry. In order to solve the realistic dilemma of "high cost and low benefit" in tail water treatment of high-standard fish ponds and promote the green and sustainable development of aquaculture, this paper systematically analyzes the cost composition and management status of tail water treatment of high-standard fish ponds based on cost management theory and environmental economics theory, and identifies the core problems and causes of current cost management in accounting, control and financing. From the dimensions of technology optimization, accounting system, financing mechanism and policy guarantee, the whole process cost management strategy is constructed, which provides theoretical reference and practical guidance for reducing governance costs and improving governance efficiency, and promotes the transformation of aquaculture to a green, efficient and sustainable direction.

Keywords： high standard fish ponds; tailwater treatment; cost composition; cost management; strategy optimization

引言

近年来，我国水产养殖业进入规模化、集约化发展新阶段，高标准鱼塘建设成为提升养殖效益、保障水产品供给的核心抓手^[1]。截至2024年底，全国高标准鱼塘建设面积已突破1.2亿亩，占水产养殖总面积的35%以上，养殖产量占比超50%。然而，据《2024年中国生态环境状况公报》显示，水产养殖尾水排放导致近30%的淡水养殖区周边水体出现富营养化问题，部分流域水质降至Ⅳ类及以下，严重威胁水资源安全与生态平衡^[2]。

在此背景下，国家及地方层面密集出台环保政策收紧尾水排放管控。但从实践来看，尾水治理成本过高已成为制约政策落地与行业转型的核心瓶颈。调研数据显示，一套规模化高标准鱼塘尾水治理设施前期投入约为1.5–3万元/亩，年运营维护成本超2000元/亩，占养殖户净利润的30%–40%，导致中小养殖户治理积极性普遍偏低，部分地区甚至出现“偷排漏排”等违法违规行为。

因此，开展高标准鱼塘尾水治理成本管理策略研究具有极强的现实必要性^[3]。从行业发展维度看，只有破解成本困境，才能推动高标准鱼塘建设与生态环境保护协同发展，实现水产养殖业的绿色转型；从养殖户维度看，科学的成本管理策略可显著降低治理支出，保障养殖收益，提升其参与治理的主动性；从政策维度看，明确成本构成与管控路径，可为政府优化补贴政策、完善扶持机制提供数据支撑与决策依据，最终构建“生态效益、经济效益、社会效益”相统一的治理格局^[4]。

一、高标准鱼塘尾水治理现状及成本构成解析

（一）高标准鱼塘尾水治理发展现状

从政策推进现状来看，国家层面已形成“顶层设计+地方细化”的政策体系，财政部、农业农村部联合出台专项补贴政策，对高标准鱼塘尾水治理设施建设给予每亩3000–5000元的补贴^[5]；地方层面，广东、江苏等地相继出台相关规范和政策，明确治理技术标准与补贴申领流程，强化政策约束与激励。但政策实施中仍存在补贴覆盖范围有限、申请门槛高、补贴标准与实际成本脱节等问题。

从技术应用现状来看，当前高标准鱼塘尾水治理技术可分为物理、化学、生物及复合型四类。物理技术（如沉淀池、过滤坝）因成本较低，在小规模养殖户中应用率达60%以上，但治理效果有限，仅能去除悬浮物等粗大污染物^[6]；化学技术（如絮凝剂处理）治理效率高，但药剂成本高且易造成二次污染，应用率不足15%；生物技术（如人工湿地、微生物制剂）兼具环保与低成本优势，但前期建设周期长，对场地要求高^[7]；复合技术（如“物理过滤+生物净化+生态沟渠”）治理效果最佳，达标率超90%，但前期投入高，仅在大型养殖基地应用率较高。

（二）高标准鱼塘尾水治理成本构成细分

结合全生命周期成本理论，高标准鱼塘尾水治理成本可分为前期投入成本、运营维护成本与隐性成本三类，各类成本的具体构成如下：

前期投入成本是指治理设施建设与技术引进阶段的一次性支出，占总成本的60%–70%，主要包括：①设施设备购置与安装费，涵盖沉淀池、过滤设备、曝气设备、微生物反应器等核心设备的采购，以及管道铺设、设备调试等安装费用，其中复合治理技术的设备成本占前期投入的80%以上^[8]；②场地改造费，包括生态沟渠开挖、人工湿地建设、尾水储存池改造等费用，受地形条件影响较大，沿海地区比内陆地区高20%–30%；③技术咨询与设计费，即委托专业机构制定治理方案、提供技术指导的费用，一般为前期投入总额的5%–8%。

运营维护成本是指治理设施运行过程中的持续性支出，占总成本的25%–35%，主要包括：①药剂费，如絮凝剂、微生物制剂、消毒剂等耗材费用，化学治理技术的药剂成本占比最高；②电费，为曝气设备、循环水泵等动力设备的能耗支出，是运营成本的核心构成，占比达40%–50%；③人工费，包括设施巡检、设备维护、水质监测等人员薪酬，小规模养殖户多为自家人力，成本隐性化，规模化养殖基地则需专职人员，年支出约1–2万元；④设备维修费，涵盖设备零部件更换、故障维修等费用，随设备使用年限增加而上升^[9]；⑤监测检测费，即委托第三方机构检测水质达标情况的费用，年支出约2000–5000元。

隐性成本是指未直接计入会计核算，但实际存在的间接成本，易被忽视但影响深远，主要包括：①土地占用机会成本，即治理设施（如沉淀池、人工湿地）占用养殖或耕地产生的潜在收益损失，按当地土地流转均价测算，每亩年机会成本约800–1200元；②生态影响成本，如化学药剂使用对土壤、地下水造成的污

染治理成本，以及治理过程中对周边生态系统的干扰成本；③政策合规成本，即养殖户为满足环保政策要求，调整养殖模式、办理相关手续产生的额外支出。

（三）不同治理模式成本差异对比分析

不同养殖规模、技术类型及区域的治理模式，成本差异显著。从养殖规模来看，小规模散户（养殖面积<50亩）采用单一物理技术的亩均总成本约2.2万元（前期投入1.2万元+年运营成本0.3万元+年隐性成本0.1万元，按5年使用寿命折算）^[10]；中型合作社（养殖面积50–200亩）采用“物理+生物”复合技术，通过批量采购设备、共享人力，亩均总成本降至1.8万元；大型养殖基地（养殖面积>200亩）采用全流程复合技术，虽前期投入高，但规模效应显著，亩均总成本约1.5万元。

从技术类型来看，单一物理技术亩均年成本约0.4万元，但其治理达标率仅40%–50%，需额外承担超标罚款等风险成本；单一化学技术亩均年成本约0.8万元，达标率达80%，但隐性生态成本高；复合技术亩均年成本约0.6万元，达标率超90%，且长期运营成本呈下降趋势，综合效益最优。

从区域来看，东南部等经济发达地区因土地成本、人工成本高，亩均前期投入比中西部地区高30%–40%，但技术推广成熟、补贴标准高，实际承担成本差距缩小；且沿海地区因水质要求高，多采用高标准复合技术，成本比内陆地区高25%–30%。

二、高标准鱼塘尾水治理成本管理现存问题及成因剖析

（一）成本管理核心问题识别

成本核算不规范问题突出，精准管控缺乏数据支撑。一方面，核算范围不完整，多数养殖户仅核算设施购置、药剂等显性成本，土地机会成本、生态影响成本等隐性成本未纳入核算，导致对真实成本水平认知偏差；另一方面，核算方法不科学，多采用“总额核算”模式，未按治理环节（如预处理、深度处理、排放监测）细分成本责任单元，无法精准识别成本管控的关键节点。

前期投入压力大，融资渠道狭窄加剧资金困境。高标准鱼塘尾水治理前期投入高，中小养殖户自有资金不足，而融资面临缺乏有效抵押物、信贷产品针对性不足、融资成本高等诸多障碍。

运营成本管控不足，资源浪费现象普遍。在能耗方面，多数养殖户仍使用传统高耗能设备，未采用节能水泵、太阳能曝气设备等节能设施，电费支出居高不下；在药剂使用方面，缺乏科学指导，存在“过量使用”现象，不仅增加成本，还造成二次污染；在人力配置方面，小规模养殖户多为兼职运维，专业能力不足，导致设备故障频发、维修成本上升，规模化基地则存在人力冗余问题，效率偏低。

成本分担机制不合理，责任主体权责失衡。政府补贴存在“覆盖窄、标准低、发放慢”等问题，仅大型养殖基地能便捷享受补贴，中小养殖户申请门槛高，部分地区补贴标准仅为实际成本的10%–20%，难以弥补成本缺口；市场分担机制缺失，绿色水

产品溢价不明显，养殖户难以通过“优质优价”回收部分治理成本，第三方治理市场发育不成熟，服务价格高且质量参差不齐；养殖主体作为直接受益者与污染责任方，需承担绝大部分成本，导致治理积极性不足。

技术与成本匹配度低，盲目选型增加额外成本。部分养殖户缺乏技术认知，盲目追求“高端技术”，未结合养殖规模、水质需求、场地条件等因素优化技术方案，如小规模养殖户采用大型基地的复合型技术，导致设施闲置、成本浪费。

（二）问题成因深度剖析

从养殖主体层面来看，成本管理意识薄弱与专业能力不足是核心成因。多数养殖户以“短期收益最大化”为目标，对尾水治理的长期效益认知不足，忽视成本管控的重要性；同时，养殖户普遍缺乏财务核算与成本管理的专业知识，无法精准测算成本、识别管控节点，且难以掌握先进的节能降耗技术，导致成本管理流于形式。

从技术层面来看，技术研发与推广脱节、国产化水平低加剧成本困境。一方面，科研机构研发的治理技术多聚焦于治理效果，对成本因素考量不足，且技术适配性差，难以满足不同场景的需求；另一方面，核心设备与药剂的核心技术被国外垄断，国内研发能力不足，缺乏规模化生产企业，导致产品价格高、供应不稳定；此外，技术推广服务体系不完善，基层缺乏专业的技术指导人员，养殖户难以获得精准的技术选型与成本管控指导。

从政策层面来看，补贴政策设计不合理与监管激励机制不完善是主要诱因。补贴政策存在“重投入、轻运营”“重大型、轻中小”的倾向，对运营成本的补贴覆盖不足，中小养殖户难以享受政策红利；补贴申请流程繁琐、审批周期长，增加了养殖户的时间成本与沟通成本；同时，监管存在“宽松软”问题，对偷排漏排行为处罚力度不足，导致部分养殖户产生“侥幸心理”，不愿投入资金开展治理。

从市场层面来看，生态产品价值实现机制与第三方治理市场不健全。当前绿色水产品认证体系不完善，市场对绿色水产品的认知度低，溢价空间小，养殖户难以通过产品差异化回收治理成本。

三、高标准鱼塘尾水治理成本管理策略构建

（一）优化成本核算体系：精准把控成本构成

明确全维度核算范围，将显性成本与隐性成本全面纳入核算体系。制定《高标准鱼塘尾水治理成本核算指南》，明确前期投入、运营维护等显性成本的核算口径，细化设备、药剂、人工等各项支出的计量标准；同时，建立隐性成本测算方法，采用“机会成本法”测算土地占用成本，“影子价格法”测算生态影响成本，“成本归集法”测算政策合规成本，确保成本核算的全面性与准确性。

规范科学核算方法，推广作业成本法与全生命周期成本法。按尾水治理的“预处理—深度处理—监测排放”等环节划分作业中心，将成本精准分摊至各作业单元，明确不同环节的成本责

任；结合治理设施的使用寿命，测算全生命周期内的总成本，包括前期投入、运营维护、后期处置等各阶段支出，为技术选型与成本管控提供科学依据。

（二）降低前期投入成本：拓宽融资与减负渠道

完善政府补贴政策，提升补贴精准性与覆盖面。优化补贴方式，推行“前期补贴+分期补贴+以奖代补”相结合的模式，前期补贴用于设施建设，分期补贴覆盖运营成本，以奖代补激励达标排放；扩大补贴覆盖范围，降低中小养殖户申请门槛，对贫困地区、生态敏感区给予倾斜，将补贴标准提高至实际成本的30%—40%；简化补贴申请流程，推行“线上申请+线下核验”模式，缩短审批周期，提高补贴发放效率。

拓宽多元融资渠道，缓解资金压力。鼓励金融机构开发“鱼塘治理专项贷”，以养殖设施、土地经营权、预期水产品收益等为抵押物，降低贷款门槛，延长贷款期限至5—8年，执行优惠利率；推广融资租赁模式，由租赁公司购置治理设备，养殖户分期支付租金，减轻前期投入压力。

（三）强化运营成本管控：提升精细化管理水平

优化技术方案降本，实现技术与成本精准匹配。建立“技术选型评估体系”，结合养殖规模、水质需求、场地条件等因素，为不同类型养殖户提供个性化技术方案：小规模养殖户推荐“物理过滤+生态沟渠”低成本技术，中型合作社采用“物理+生物”复合型技术，大型基地推广“全流程智能治理”技术；推广本土化、低成本技术，如利用当地水生植物构建人工湿地，降低建设与维护成本。

推进资源高效利用，降低能耗与耗材成本。推广节能设备与技术，如太阳能曝气设备、节能水泵等，降低电费支出；建立水资源循环利用系统，将处理后的尾水用于灌溉、养殖补水等，提高水资源利用率；优化药剂使用方案，通过精准监测水质调整药剂用量，推广环保型、低成本药剂，减少药剂浪费与二次污染。

（四）完善保障体系：支撑成本管理落地

加强政策保障，优化制度环境。明确各主体的权利与义务，规范成本核算、补贴发放、市场运作等环节的管理；强化监管执法，加大对偷排漏排、虚报成本套取补贴等行为的处罚力度，营造公平公正的市场环境。

强化技术保障，提升服务能力。建立“产学研用”协同创新机制，支持科研机构与企业联合开发低成本、高效益的治理技术与设备；构建基层技术推广体系，在水产主产区设立技术服务站，配备专业技术人员，为养殖户提供技术选型、设备安装、运维指导等一站式服务；建立技术更新迭代机制，及时推广成熟适用的新技术、新设备，提升治理技术的经济性与适用性。

四、结语

本文系统剖析了高标准鱼塘尾水治理的成本构成与管理现状，明确其成本呈现“前期投入高、运营波动大、隐性成本突出”的特征，通过构建“技术—核算—融资—政策”四位一体成本管理策略，可有效破解成本困境：优化成本核算体系能实现成

本精准管控；降低前期投入成本可缓解资金压力；强化运营管控能提升精细化管理水平；构建多元成本分担机制可明晰各主体责任；完善保障体系能支撑策略落地。

通过进一步深化不同治理技术的长期成本动态变化研究，结

合技术迭代与规模化应用，跟踪测算成本变化趋势，可以为技术选型提供更精准的依据，持续拓展跨区域、跨产业的成本分担与协同治理机制研究，结合流域治理、乡村振兴等战略，构建更完善的成本分担体系，推动水产养殖业绿色可持续发展。

参考文献

- [1] 农业农村部. 水产养殖业绿色发展行动计划（2021—2025年）[Z]. 2021.
- [2] 生态环境部. 2024年中国生态环境状况公报[R]. 2025.
- [3] 李明，王强，张莉. 高标准鱼塘尾水治理成本构成及管控建议[J]. 中国水产，2023(5): 78-83.
- [4] 张晓军，刘敏. 水产养殖尾水治理技术研究进展[J]. 环境科学与技术，2022, 45(8): 190-198.
- [5] 陈燕，赵伟. 农业面源污染成本管理模式研究——以水产养殖为例[J]. 农业经济问题，2022(3): 112-120.
- [6] 王浩，李娟. 欧盟水产养殖尾水治理成本分担机制及启示[J]. 世界农业，2021(10): 45-52.
- [7] 刘艳，张伟. 作业成本法在水产养殖尾水治理成本核算中的应用[J]. 会计之友，2021(18): 76-81.
- [8] 张强，王丽. 高标准鱼塘尾水治理融资模式创新研究[J]. 农村金融研究，2020(7): 63-69.
- [9] 李丽，陈峰. 第三方治理模式在水产养殖尾水治理中的应用前景[J]. 环境工程，2020, 38(6): 156-160.
- [10] 赵军，刘芳. 绿色水产品溢价机制构建研究[J]. 中国农村经济，2020(4): 89-102.

新能源光伏发电、储能及电动汽车充电桩的技术开发与 EPC 项目管理探索

刘宗文

广东 东莞 523000

DOI:10.61369/WCEST.2025110001

摘 要： 本文围绕新能源光伏发电、储能及电动汽车充电桩展开，探讨关键技术发展、集成创新等内容。阐述新能源 EPC 工程特点、全周期管理难点，强调数字化设计平台、设备选型分析、质量控制等重要性。介绍风险防范、接口管理等机制及供应链管理创新，指出三位一体系统协同创新及数字孪生技术平台的发展方向。

关 键 词： 新能源 EPC 工程；系统集成；协同创新

Exploration of Technical Development and EPC Project Management for New Energy Photovoltaic Power Generation, Energy Storage, and Electric Vehicle Charging Stations

Liu Zongwen

Dongguan, Guangdong 523000

Abstract： This article focuses on the development of key technologies and integrated innovation in new energy photovoltaic power generation, energy storage, and electric vehicle charging piles. Elaborate on the characteristics of new energy EPC projects, the difficulties in full cycle management, and emphasize the importance of digital design platforms, equipment selection analysis, quality control, and other aspects. Introduce mechanisms for risk prevention, interface management, and innovation in supply chain management, and point out the development direction of the three in one system collaborative innovation and digital twin technology platform.

Keywords： new energy EPC engineering; system integration; collaborative innovation

引言

2020 年，国家发展改革委、国家能源局颁布《关于做好可再生能源绿色电力证书全覆盖工作 促进可再生能源电力消费的通知》，进一步推动新能源产业发展。在此政策背景下，新能源光伏发电、储能及电动汽车充电桩三位一体系统的发展意义重大。关键技术发展、集成创新等推动系统向高效智能迈进，但也面临设计、选型、并网等难点。数字化设计、技术经济分析、质量控制、风险防范等环节至关重要，接口管理、供应链管理、施工过程控制、验收标准体系等协同发力，助力实现技术与管理的协同创新与可持续发展。

一、新能源技术开发现状与突破方向

（一）光伏发电系统关键技术

在新能源光伏发电系统中，关键技术的发展对提升发电效率与稳定性至关重要。高效单晶硅组件技术不断取得进展，其转换效率持续提升，降低了光伏发电成本，成为推动光伏大规模应用的关键因素之一^[1]。智能跟踪支架研发现状也备受关注，它通过实时跟踪太阳位置，调整光伏组件朝向，显著提高了太阳辐射能的接收量，增加发电产出。智能运维系统则是实现光伏发电系统智能化管理的核心，其技术突破方向聚焦于故障智能诊断、远程监控与精准预测性维护，旨在减少运维成本，保障系统长期稳定

运行。这些关键技术的协同发展，共同推动着新能源光伏发电系统向高效、智能、可靠的方向迈进。

（二）储能与充电设施集成创新

在新能源技术发展中，储能与充电设施集成创新至关重要。当前，电化学储能系统能量管理技术致力于提升储能效率与稳定性，以更好地匹配光伏发电的间歇性与波动性。光储充一体化系统架构设计正逐步完善，通过将光伏发电、储能及充电设施有机融合，实现能源的高效利用与分配。快充设备的拓扑结构创新则聚焦于提高充电速度，减少充电时间，满足电动汽车用户的快速充电需求。然而，目前仍存在系统兼容性不足、成本较高等问题。未来的突破方向在于进一步优化系统架构，提升各部分之间

的兼容性与协同性，降低整体成本^[2]。同时，持续推进快充设备拓扑结构的创新研究，提高充电效率与安全性，以实现储能与充电设施的深度集成与高效运行。

二、EPC 项目管理模式特性分析

（一）新能源 EPC 工程特点

新能源 EPC 工程有其独特特点。在技术集成性方面，新能源项目涉及光伏发电、储能及电动汽车充电桩等多领域技术，需高度整合以确保系统高效运行。例如，要使光伏发电与储能系统精准匹配，满足不同时段用电需求。其复杂性也显著，从前期选址、规划到设备选型、安装调试，各环节紧密相连且受自然条件、政策法规等多种因素影响。再者，时效性强，新能源行业技术更新快，项目需紧跟技术前沿，快速实施，否则易因技术落后而影响效益。同时，质量要求高，新能源项目运行周期长，一旦出现质量问题，维修成本高且影响供电稳定性。这些特点决定了新能源 EPC 工程在管理上要更注重系统性、前瞻性和精细化^[3]。

（二）项目全周期管理难点

在新能源光伏发电、储能及电动汽车充电桩的 EPC 项目全周期管理中，面临诸多难点。前期设计优化时，需精准考量不同区域光照条件、储能需求及充电桩布局，以实现能源高效利用与成本控制，但复杂的地理环境、多样的用户需求增加了设计难度^[4]。设备选型匹配方面，新能源设备技术更新快，要兼顾性能、兼容性与成本，从众多品牌和型号中选出最优组合并非易事。例如，光伏发电组件与储能电池的充放电特性匹配不当，会影响系统稳定性。并网调试阶段，需协调电网公司，满足严格的技术标准和接入规范，同时确保各子系统稳定运行，任何环节出现问题都可能导致并网延迟，增加项目成本与风险。

三、技术与管理协同发展路径

（一）系统集成与工程实现

1. 数字化设计平台应用

在新能源光伏发电、储能及电动汽车充电桩的系统集成与工程实现中，数字化设计平台应用发挥着关键作用。通过构建 BIM+GIS 三维可视化设计体系，能在光伏阵列排布优化方面取得显著成效。借助该体系，可直观呈现光伏电站地形地貌、周边环境等信息，精准分析太阳辐射、阴影遮挡等对光伏阵列发电效率的影响^[5]。依据这些分析结果，对光伏阵列的间距、倾角等参数进行优化调整，提升光伏发电效率。同时，该平台还能实现各专业间的协同设计，提前发现并解决设计冲突，减少施工变更，提高工程整体质量与进度。从管理角度，方便项目各方实时获取项目信息，为决策提供准确依据，促进技术与管理的高效协同，保障 EPC 项目顺利推进。

2. 设备选型技术经济分析

在新能源光伏发电、储能及电动汽车充电桩的系统集成与工程实现中，设备选型的技术经济分析至关重要。对于逆变器，需

综合考量转换效率、额定功率、谐波失真等技术参数，同时分析其初始购置成本、运维成本及使用寿命内的收益，以确保在满足发电需求的同时实现经济最优。储能系统选型要关注储能容量、充放电效率、循环寿命等技术指标，结合成本核算方法评估其长期经济性，包括储能设备成本、充放电损耗成本等。充电桩选型除考虑充电功率、兼容性等技术特性外，还需分析场地租赁成本、运营管理成本等经济因素。通过全面的技术经济分析，基于建立的匹配模型与全生命周期成本核算方法^[6]，选出性价比高、适配性强的设备，实现三者的高效协同，推动新能源项目的可持续发展。

（二）项目质量管控体系

1. 全过程质量控制节点

在新能源光伏发电、储能及电动汽车充电桩的 EPC 项目中，全过程质量控制节点至关重要。从组件衰减测试环节开始，需严格遵循既定标准，精确测量光伏组件在不同环境与时间下的性能衰减，为后续发电效率评估提供可靠数据。针对储能系统，循环寿命验证是关键节点，通过模拟实际充放电场景，准确判断储能设备的使用寿命与稳定性。这些过程都要依据制定好的标准化检测流程执行^[7]。在电动汽车充电桩方面，要对电气性能、充电接口兼容性等进行全面检测。各个质量控制节点紧密相连，任一环节出现问题都可能影响整个项目的质量与运行效果。只有严格把控全过程质量控制节点，才能确保新能源项目的高效、稳定与安全运行，实现技术与管理的协同发展。

2. 风险防范机制设计

在新能源光伏发电、储能及电动汽车充电桩的 EPC 项目中，风险防范机制设计至关重要。借助气候适应性评价模型，能提前评估项目在不同气候条件下可能面临的风险，如极端天气对光伏发电效率、储能设备稳定性及充电桩使用安全的影响，据此制定针对性的防护与应对策略。通过设备故障树分析（FTA）预警系统，可对设备潜在故障进行深度剖析，找出故障的根本原因和传播路径。当监测到关键参数异常时，及时发出预警，以便运维人员迅速采取措施，避免故障扩大。这种风险防范机制设计，从气候适应性和设备故障预警两方面入手，保障项目稳定运行，降低潜在风险，助力技术与管理协同发展^[8]。

四、EPC 工程管理实施路径

（一）设计管理优化策略

1. 方案协同设计机制

建立建筑载荷计算与光伏支架设计的参数化协同平台，旨在打破不同设计环节间的壁垒。在新能源光伏发电 EPC 项目中，建筑载荷计算关乎建筑结构安全性，而光伏支架设计则直接影响光伏发电效率与稳定性。借助参数化协同平台，将二者紧密关联，一方数据变动时，另一方能及时响应并调整。例如，当建筑结构因实际情况需调整布局，导致载荷分布变化，平台能迅速将新的载荷数据传递至光伏支架设计模块，依据预设算法自动生成适配的支架设计调整方案，确保光伏支架在新的载荷条件下依然稳

固。这种实时、高效的参数化协同机制，可大幅减少设计反复，提高设计效率与质量，助力项目顺利推进^[9]。

2. 接口管理标准化

在新能源光伏发电、储能及电动汽车充电桩的 EPC 项目中，接口管理标准化至关重要。制定电气系统衔接协议与通信规约统一标准是关键举措。需明确各系统间电气连接的具体参数，如电压等级、电流容量、频率等，确保电力传输的稳定性与兼容性^[10]。在通信规约方面，统一数据传输格式、通信协议，让光伏发电、储能及充电桩系统能有效交互信息，实现协同运行。例如规定采用 Modbus 等通用协议，使各设备间可便捷通信与数据共享。通过这样的标准化，降低系统间的接口复杂度，减少因接口不兼容导致的故障与延误，提升整个 EPC 项目的运行效率与可靠性，为新能源项目的稳定高效运行奠定基础。

（二）供应链管理创新

1. 设备供应商分级管理

在 EPC 工程管理实施路径的供应链管理创新中，设备供应商分级管理基于技术参数匹配度的动态评价体系展开。全面考量供应商在新能源光伏发电、储能及电动汽车充电桩技术开发方面，所供设备技术参数与项目要求的契合程度。对技术参数匹配度高且稳定，能持续提供优质设备、满足项目技术升级需求的供应商，列为高级别，给予更多合作机会与优惠政策，激励其保持优势。对于匹配度一般的，协助改进提升，定期评估进展。若匹配度长期不达标则降低级别甚至淘汰。通过这种分级管理，优化供应商结构，确保项目设备供应质量与技术先进性，提升 EPC 项目整体管理水平，促进新能源领域技术开发与应用的高效推进。

2. 物流跟踪信息系统

在新能源光伏发电、储能及电动汽车充电桩 EPC 项目中，供应链管理创新的物流跟踪信息系统发挥着关键作用。通过建立该系统，可对项目所需设备与材料从采购源头到施工现场的物流全程进行精准跟踪。运用先进的物联网技术，将传感器、GPS 定位等集成于物流环节，实时收集运输位置、环境状态等数据。利用大数据分析功能，预测物流风险，如运输延误、货物损坏等，并提前制定应对策略。同时，该系统与项目其他管理模块深度融合，实现信息共享，让项目团队能随时掌握物流动态，以便合理安排施工进度，保障项目按计划推进，提高整体管理效率与效益。

参考文献

- [1] 许强. 基于电动汽车有序充电的光伏充电站储能配置研究 [D]. 南京师范大学, 2021.
- [2] 肖刚. 南宁 W 村 EPC 分布式光伏发电项目过程管理研究 [D]. 广西大学, 2021.
- [3] 同伟. 电动汽车充电与光储电站协同运行策略研究 [D]. 山东理工大学, 2022.
- [4] 周文杰. 基于互联网光伏充电桩研究与设计 [D]. 广西大学, 2021.
- [5] 郭子瑶. 光伏型电动汽车充电站实时能量管理策略研究 [D]. 哈尔滨工业大学, 2021.
- [6] 袁家堂, 李振坡, 杨玉龙, 等. EPC 模式下的光伏发电项目管理研究 [J]. 中国高科技, 2021, (21): 68-69.
- [7] 徐运何. 新能源光伏发电项目施工管理研究 [J]. 大众标准化, 2021, (05): 223-225.
- [8] 边维龙. 新能源光伏发电项目的施工管理分析 [J]. 电子技术, 2023, 52(04): 264-265.
- [9] 李慧玲, 王维军, 廖亚特, 等. 基于电动汽车充电管理的村级光伏发电系统公用储能配置优化研究 [J]. 广东电力, 2023, 36(12): 30-38.
- [10] 王鹏. 新能源光伏发电项目并购管理与风险研究 [J]. 能源科技, 2023, 21(05): 72-75.

（三）施工过程控制技术

1. 智能调度系统开发

在新能源光伏发电、储能及电动汽车充电桩的 EPC 工程施工过程控制技术中，智能调度系统开发极为关键。需结合应用遗传算法进行多作业面资源动态调配优化。系统开发要能实时监测光伏发电、储能及充电桩的运行数据，如电量输出、存储状态、充电需求等。通过对这些数据的分析与处理，利用遗传算法的优势，实现各类资源在不同作业面的动态优化调配，确保资源的高效利用。同时，该系统要具备智能决策功能，依据实时情况及预测信息，自动生成科学合理的调度方案，及时调整作业进度与资源分配，提高工程施工效率，保障整个新能源项目施工过程的顺利推进与稳定运行。

2. 工程验收标准体系

在新能源光伏发电、储能及电动汽车充电桩的 EPC 项目中，工程验收标准体系至关重要。建立专项验收规程，涵盖 IV 曲线测试，通过该测试可准确获取光伏组件的电流 - 电压特性曲线，判断组件性能是否达标，及时发现组件存在的潜在问题，如遮挡、老化等。绝缘阻抗检测也不可或缺，其能衡量系统绝缘性能，避免因绝缘不良引发电气安全事故，确保光伏发电、储能及充电桩系统稳定运行。严格依据此验收规程开展工作，能保证项目各环节符合质量要求，提升整个新能源项目的可靠性与安全性，为后续投入使用奠定坚实基础。

五、总结

新能源光伏发电、储能及电动汽车充电桩三位一体系统，实现了技术开发路径与 EPC 管理模式的协同创新。在技术开发上，三者相互支撑，光伏发电提供清洁能源，储能解决电力供需时间错配，充电桩满足电动汽车发展需求。EPC 管理模式则通过一体化的设计、采购与施工，保障项目高效推进，降低成本与风险。

基于数字孪生技术的工程管理平台是未来发展方向，它能对项目全生命周期进行数字化模拟与监控，提高决策科学性与管理精准度。光储充系统在城市能源互联网中有广阔应用前景，可优化能源分配，提高能源利用效率，助力城市向绿色低碳转型，推动可持续发展，为构建新型城市能源体系提供有力支撑。

电力工程项目全过程管理的优化策略研究

李桂裕

广东 佛山 528000

DOI:10.61369/WCEST.2025110003

摘 要： 电力工程项目全过程管理贯穿规划、设计、施工、运营维护全生命周期，核心围绕进度、质量、投资、安全四位一体管控目标展开。当前各阶段普遍存在协同衔接不足、管控精准度欠缺、资源配置低效等问题，本文立足全生命周期视角，针对各阶段核心痛点，从管控体系构建、组织架构优化、技术创新应用、制度保障完善四个维度，提出系统性优化策略，实现各阶段无缝衔接与全要素协同管控，全面提升电力工程项目管理综合效能。

关 键 词： 电力工程项目；全过程管理；协同管理

Research on the Optimization Strategy of the Whole Process Management of Power Engineering Project

Li Guiyu

Foshan, Guangdong 528000

Abstract： The whole process management of power engineering projects runs through the entire life cycle of planning, design, construction, operation and maintenance, focusing on the four-in-one management objectives of progress, quality, investment and safety. At present, there are common problems in each stage, such as insufficient collaborative connection, lack of control accuracy, and inefficient resource allocation. Based on the whole life cycle perspective, this paper puts forward systematic optimization strategies from four dimensions: the construction of control system, the optimization of organizational structure, the application of technological innovation, and the improvement of institutional guarantee, aiming at the core pain points of each stage. It realizes the seamless connection of each stage and the collaborative control of all elements, so as to comprehensively improve the comprehensive efficiency of power engineering project management.

Keywords： power engineering project; whole process management; collaborative management

引言

《关于推进电力源网荷储一体化和多能互补发展的指导意见》发布后，既为电力行业高质量发展指明方向，也对电力工程项目管理提出更高要求。电力工程项目具有投资规模大、技术复杂度高、生命周期长等特点，全过程管理涵盖规划、设计、施工、运营维护等关键阶段，各阶段环环相扣、相互影响，任一环节漏洞都可能引发连锁反应，影响项目整体效益。当前，规划与设计衔接不畅、施工与运营标准脱节、各阶段管控重点不突出等问题较为突出，导致管控效能不足。本文基于全生命周期理论，针对各阶段管理痛点构建全流程、多维度优化体系，推动项目管理从“分段管控”向“全过程协同”转型，为行业高质量发展提供支撑。

一、电力工程项目全过程管理理论框架

（一）全过程管理内涵特征

电力工程项目全过程管理以全生命周期理论为核心，覆盖项目从前期规划、方案设计、工程施工到后期运营维护的完整流程。其核心特征体现为“全阶段覆盖、全要素协同、全责任穿透”：全阶段覆盖要求管理贯穿项目各环节，避免局部优化忽视全局；全要素协同强调进度、质量、投资、安全四大核心要素的动态平衡，而非单一维度管控；全责任穿透则要求明确各阶段、各岗位的管理职责，确保责任落实到具体环节。全过程管理的核

心目标是通过系统性、前瞻性的管控，实现项目经济效益、社会效益与安全效益的统一^[1]。

（二）管理阶段划分及核心任务

电力工程项目全过程管理阶段按发展特征及关键任务划分，各阶段核心任务明确且衔接紧密：规划阶段聚焦可行性论证与整体布局，结合区域电力需求、电网规划、环境影响等因素，明确建设规模、技术路线、投资估算，形成项目建议书与可行性研究报告，为项目落地奠基；设计阶段基于规划成果开展初步设计与施工图设计，兼顾技术可行性、经济性与安全性，完成设备选型、工艺设计、工程量核算，输出精准设计图纸与技术文件；施

工阶段将设计方案转化为实体工程，统筹人力、设备、材料等资源，把控进度与工艺标准，落实质量管控与安全保障，确保项目按计划推进；运营维护阶段重点开展设备状态监测、故障预警与维修保养，通过常态化管控保障工程稳定运行，延长设备寿命、降低运维成本^[2]。

二、全过程管理各阶段现状及核心问题

（一）规划阶段：论证不充分，衔接性不足

规划阶段存在可行性研究流于形式的问题，部分项目未充分调研区域电力供需变化、电网接入条件等关键因素，导致规划方案与实际需求脱节^[3]。同时，规划与后续设计阶段缺乏有效衔接，规划方案未明确技术细节要求，设计阶段需频繁调整，造成工期延误与成本增加。投资估算精准度不足，对政策变化、材料价格波动等风险预判不足，易引发后续投资超支。

（二）设计阶段：优化不深入，协同性欠缺

设计阶段存在方案优化不彻底的问题，部分设计人员过度依赖传统经验，未充分采用数字化工具进行多方案对比，导致设计方案经济性与合理性不足。设计与施工、运维阶段协同不畅，设计图纸未充分考虑施工难度与运维便利性，出现“设计可行、施工困难、运维不便”的情况^[4]。同时，图纸审核流程不严格，部分技术参数标注不清、设计漏洞未及时发现，引发施工阶段的设计变更，影响项目进度。

（三）施工阶段：管控不精准，资源配置低效

施工阶段是问题集中爆发的环节，进度管控方面，资源调配缺乏科学规划，人力、设备、材料供应衔接不畅，关键路径任务资源保障不足，非关键路径资源浪费严重。质量管控方面，施工工艺标准化执行不到位，材料检验流程不严格，隐蔽工程验收不细致，留下质量隐患。安全管理方面，风险识别不全面，安全防护措施落实不到位，易发生安全事故。

（四）运营维护阶段：监测不及时，响应滞后

运营维护阶段存在“重抢修、轻预防”的问题，缺乏常态化的设备状态监测体系，对设备老化、性能衰减等趋势预判不足，多在故障发生后被动抢修。运维数据未实现有效整合，各部门数据孤岛现象严重，无法为运维决策提供精准支撑^[5]。同时，运维人员专业能力参差不齐，对新型设备的运维技术掌握不足，影响故障处理效率。

三、全过程管理多维度优化体系构建

（一）规划—设计协同优化机制

1. 强化规划论证精细化

采用大数据技术深度分析区域电力负荷增长趋势、电网网架承载能力、政策导向及环境约束等核心因素，构建涵盖技术可行性、经济合理性、社会适应性的多维度可行性论证指标体系，精准测算项目投资回报率与风险系数，提升规划方案的科学性与前瞻性^[6]。建立规划与设计阶段的联动审核机制，规划方案编制阶

段即邀请设计团队全程参与，通过联合评审会议明确核心技术参数、施工边界条件、设备选型原则等关键要求，形成规划与设计的衔接清单，从源头减少后续设计调整与工期延误。

2. 推进设计数字化优化

全面应用BIM技术开展三维协同设计，将建筑、结构、电气等专业数据集成于统一模型，通过碰撞检测、施工模拟等功能对比多方案的经济性与可行性，优化管线布局与设备排布。建立“设计自审+技术复审+施工运维联审”的三级图纸审核制度，邀请施工技术人员、运维管理人员参与评审，重点核查施工工艺适配性、运维空间便利性及应急通道合理性，提前规避设计与现场实际脱节的问题，大幅减少施工阶段的设计变更^[7]。

（二）施工—运维衔接管控机制

1. 施工全过程精准管控

构建BIM+物联网的智慧施工平台，整合施工机械定位、材料溯源、质量检测、安全监测等终端设备，实时采集施工进度、混凝土强度、设备运行状态等数据，在平台实现可视化呈现与动态预警。基于FMEA方法组建风险评估小组，系统识别杆塔组立、电缆敷设等关键工序的潜在失效模式，量化风险等级并制定针对性预控措施，同步强化隐蔽工程“双人验收、影像留痕”制度，确保施工质量可追溯^[8]。优化资源配置方案，采用动态调度模型，根据施工进度偏差与关键路径调整，实时调配人力、设备、材料资源，避免资源闲置与供应短缺。

2. 运维智能化升级

搭建数字孪生运维平台，整合设备运行参数、检修记录、环境监测等数据，通过三维模型实时映射设备实际状态，利用算法模型预测设备老化趋势与故障风险，实现精准预警^[9]。建立跨部门运维数据共享中心，打破生产、检修、调度等部门的数据壁垒，通过数据分析优化巡检频次与维护计划，推动运维模式从“故障后抢修”向“预防性维护”转型。加强运维人员专业培训，开设数字化工具操作、新型设备检修等专项课程，通过“线上学习+现场实操”的模式，提升运维团队的技术应用能力。

（三）投资—安全全周期双控机制

1. 投资动态管控

构建覆盖规划、设计、施工、运维各阶段的全生命周期投资核算模型，细化人工、材料、设备、运维等成本科目，实时跟踪市场价格波动与政策调整，动态更新成本数据并对超支风险及时预警^[10]。规划阶段引入价值工程理念，优化投资结构，优先保障核心功能与关键环节投入；设计阶段推行限额设计，将成本控制目标分解至各专业，严格控制工程量与材料规格；施工阶段加强变更签证的分级审批与成本核算，避免无序增项；运维阶段通过智能化管控优化巡检路线与备件库存，降低运维成本。

2. 安全分级管控

基于LEC法构建全阶段安全风险分级体系，规划阶段重点识别选址环境风险、政策合规风险；设计阶段聚焦技术方案风险、设备兼容风险；施工阶段排查高空作业、带电作业等作业风险；运维阶段关注设备老化、绝缘劣化等设备风险。依据风险值划分重大、较大、一般、低四个风险等级，明确各级风险的管控责任

主体与处置流程，重大风险实行“一风险一方案”专项治理，较大风险限期整改并跟踪验证，一般风险纳入常态化监测，确保全生命周期安全风险可控在控。

四、全过程管理保障体系优化

（一）组织架构：构建全周期协同组织

1. 矩阵式跨阶段协同架构

建立纵向覆盖技术、成本、安全、运维等核心职能部门，横向贯穿规划、设计、施工、运营维护全阶段的矩阵式管理架构。设立由项目经理牵头，融合各专业骨干的全过程项目管理小组，明确小组“统筹协调、跨阶段衔接、问题督办”的核心职责。建立月度跨阶段协同会议与紧急事项专项会商机制，同步共享项目进度、技术变更、风险隐患等关键信息，打破部门信息壁垒，确保各阶段工作衔接顺畅、决策高效。

2. 全链条责任追溯机制

制定精细化的全周期岗位职责清单，按“岗位层级、阶段任务、核心职责”三维度分解责任，明确规划论证、设计审核、施工管控、运维保障等各环节的直接责任主体与协同责任主体。建立“责任清单+签字确认+过程留痕”的追溯体系，将各阶段协同效率、问题整改率、目标达成度等纳入绩效考核，设置专项奖励基金，激励各部门主动衔接、高效协作，倒逼责任落实。

（二）技术手段：数字化赋能全流程

1. 全周期数字化平台集成

整合 BIM、数字孪生、大数据、物联网等前沿技术，构建集数据采集、存储、分析、可视化于一体的电力工程项目全过程数字化管理平台。平台设置规划设计、施工管控、运维监测等专项模块，配套分级权限管理机制，确保各部门按需获取数据资源。打通各阶段数据链路，实现规划方案、设计图纸、施工记录、运维数据的无缝流转与实时共享，为项目决策提供精准的数据支撑。

2. 关键技术专项应用

规划阶段借助大数据分析区域电力需求、政策导向、环境约束等多维度数据，提升可行性论证的精准度；设计阶段运用 BIM

技术开展多专业协同设计与碰撞检测，优化方案合理性；施工阶段通过智慧工地系统实现设备联动、工序追溯与风险预警，强化过程管控；运营维护阶段依托数字孪生与故障诊断技术，实时监测设备状态，实现预测性维护，全面提升各阶段管理效能。

（三）制度体系：标准化规范全流程

1. 各阶段标准化流程制定

编制覆盖规划、设计、施工、运营维护全阶段的标准化管理体系手册，明确每个环节的工作内容、操作规范、质量标准、责任主体与时间节点。手册同步纳入行业最新标准、安全规范与技术要求，建立“年度复审+动态更新”机制，结合项目实践与政策调整优化流程。重点规范规划阶段可行性研究深度、设计阶段图纸审核层级、施工阶段质量验收标准、运维阶段设备巡检频次等核心环节，确保全流程管理有章可循。

2. 动态考核与持续改进机制

建立基于平衡计分卡的全过程绩效考核体系，从财务维度（投资控制、成本节约）、客户维度（交付质量、用电满意度）、内部流程维度（协同效率、流程合规性）、学习与成长维度（技术创新、团队能力）设置量化考核指标。实行“季度考核+年度复盘”机制，针对考核中发现的问题，形成整改清单并明确责任部门与完成时限。定期开展管理经验交流会，总结典型案例与优化举措，持续完善制度流程，构建“实践-评估-整改-优化”的闭环管理体系。

五、总结

电力工程项目全过程管理的优化是一项系统性工程，需打破“分段管控”的传统模式，构建全生命周期一体化管理体系。本文从规划、设计、施工、运营维护各阶段的核心痛点出发，构建了“协同优化机制+双控管控机制+保障体系”的三维优化框架，通过组织架构协同、技术手段赋能、制度流程规范，实现各阶段无缝衔接与全要素精准管控。未来，随着数字化、智能化技术的深度应用，电力工程项目全过程管理将朝着更高效、更精准、更智能的方向发展，为电力行业高质量发展提供坚实保障。

参考文献

- [1] 边睿喆. HZ 电力公司电力工程项目物资管理策略优化研究 [D]. 山东师范大学, 2023.
- [2] 陈观康. A 建设工程项目全过程造价管理研究 [D]. 广东工业大学, 2022.
- [3] 燕亮. Q 供电公司电力工程项目成本管理研究 [D]. 山东大学, 2022.
- [4] 刘增兵. 基于 BIM 技术介入建设工程项目全过程管理的研究 [D]. 天津科技大学, 2022.
- [5] 彭商. 基于全过程管理的 Y 公司应收账款管理措施优化研究 [D]. 江西财经大学, 2022.
- [6] 梅宇, 苏绍霞. 电力工程项目采购风险管理与应对策略研究 [J]. 天津经济, 2024, (02): 78-80.
- [7] 谢旭峰, 陈上上, 潘攀, 等. 电力工程项目造价管理研究 [J]. 中国招标, 2024, (06): 99-101.
- [8] 何璇. 浅谈电力工程项目进度计划管理 [J]. 经济师, 2021, (02): 274-275.
- [9] 庄云霞. 电力工程项目管理模式创新研究 [J]. 大众标准化, 2023, (06): 83-85.
- [10] 俞辉. 电力工程项目实施阶段的合同管理 [J]. 管理学家, 2022, (20): 46-48.

配电网工程施工管理：复杂问题解决与技术创新

吴超鹏

广东广澳能源科技有限公司，广东 汕头 515000

DOI:10.61369/WCEST.2025110004

摘 要： 配电网复杂施工场景存在地理环境、地下管线、电磁环境和气候条件等技术瓶颈。智能诊断算法、新型绝缘材料等为解决复杂问题提供创新路径，还需多标段协同管理、风险管控智能化、数字孪生技术模拟施工、定制研发新型装备、改造传统工艺、转型施工流程等。同时要融合技术指标与管理 KPI，重构组织架构，在不同场景采用适宜技术，构建评价模型并解析效益，未来施工管理将向智能化等方向演进。

关 键 词： 配电网施工；技术创新；工程化实现

Construction Management of Distribution Network Engineering: Complex Problem Solving and Technological Innovation

Wu Chaopeng

Guangdong Guang'ao Energy Technology Co., Ltd., Shantou, Guangdong 515000

Abstract： There are technical bottlenecks in the complex construction scenarios of power distribution networks, such as geographical environment, underground pipelines, electromagnetic environment, and climate conditions. Intelligent diagnostic algorithms and new insulation materials provide innovative paths to solve complex problems, which also require multi section collaborative management, intelligent risk control, digital twin technology simulation construction, customized research and development of new equipment, transformation of traditional processes, and transformation of construction processes. At the same time, it is necessary to integrate technical indicators and management KPIs, reconstruct organizational structure, adopt appropriate technologies in different scenarios, construct evaluation models and analyze benefits. In the future, construction management will evolve towards intelligence and other directions.

Keywords： construction of distribution network; technological innovation; engineering implementation

引言

在当前数字电网建设（2022 年国家电网正式提出加快推进数字电网建设相关政策）的大背景下，配电网工程施工管理意义重大。其复杂施工场景存在诸多技术瓶颈，如地理环境、地下管线、电磁环境及气候条件等带来的挑战。为此，需从智能诊断算法、新型绝缘材料、多标段协同管理、风险管控智能化等多方面进行技术创新与管理优化。而国家推进数字电网建设的政策，正为解决这些问题提供有力支撑，推动配电网工程施工管理朝着智能化、数字化、精细化方向发展，以突破现有瓶颈，满足社会对电力供应稳定性与可靠性的需求。

一、配网复杂工程问题破解者的技术实践

（一）复杂施工场景的技术瓶颈识别

在配电网复杂施工场景中，识别技术瓶颈至关重要。地理环境复杂多变，如山区、水域等特殊地形，给线路铺设、杆塔搭建带来困难，不仅增加施工难度与成本，还对施工安全构成威胁^[1]。同时，地下管线分布错综复杂，各类管线相互交织，若施工前未能准确掌握其位置、走向等信息，极易造成管线破坏，影响其他设施正常运行。此外，施工区域周边的电磁环境也不容忽视，强电磁干扰可能影响施工设备的正常运行和施工人员的健

康。不同施工区域的气候条件差异，如暴雨、暴雪、高温等极端天气，也会给施工进度、质量和安全带来诸多挑战。准确识别这些技术瓶颈，是解决配电网复杂施工问题的关键第一步。

（二）专业解决方案的技术创新路径

在配电网工程施工管理中，智能诊断算法与新型绝缘材料为解决复杂问题提供了创新路径。智能诊断算法通过对隐蔽工程的关键参数进行深度分析与精准建模，实现对潜在故障的早期预判与准确定位。以智能图像识别技术为例，它可对电缆接头等隐蔽部位的图像进行实时监测，快速识别出细微缺陷，极大提高检测效率与准确性^[2]。新型绝缘材料则从提升工程质量与安全性出

发,如采用具有高耐候性、低介电常数的新型复合材料,不仅能有效降低绝缘老化速度,延长设备使用寿命,还能减少电能损耗,提升配电网整体运行性能。这些技术创新路径为配电网复杂工程问题的解决带来新契机。

二、全周期项目管理的系统性把控

(一) 多标段协同管理机制设计

在配电网工程施工中,多标段协同管理机制设计至关重要。不同标段往往涉及不同施工队伍、物资供应及进度安排,若缺乏有效协同,易出现施工冲突、进度延误等问题。应构建统一的信息沟通平台,打破各标段间信息壁垒,实现施工进度、质量问题、物资需求等信息实时共享^[3]。同时,建立协同决策机制,针对涉及多标段的关键问题,如交叉施工区域的作业安排等,由各标段负责人共同协商,制定科学合理的解决方案。还需设立专门的协调小组,定期巡查各标段施工情况,及时发现潜在协同问题并进行协调处理,确保各标段在全周期项目管理中高效配合,保障配电网工程施工的顺利推进。

(二) 风险管控智能化体系建设

在配电网工程施工管理中,风险管控智能化体系建设至关重要。借助 BIM 技术,可构建三维安全预警模型。此模型能对施工现场各类潜在风险进行精准识别与定位,通过对工程数据的实时采集和分析,提前感知安全隐患,为施工人员提供及时的预警信息。同时,基于 BIM 技术打造应急预案仿真平台,将应急预案以三维可视化形式呈现。模拟不同风险场景下的应对过程,检验应急预案的可行性与有效性,针对模拟结果对应急预案进行优化完善^[4]。通过风险管控智能化体系建设,实现对配电网工程施工风险的全面、动态管控,提升施工安全水平与应急处置能力,确保工程全周期项目管理的系统性与高效性。

三、技术创新的工程化实现路径

(一) 前沿技术集成创新策略

1. 数字孪生技术在施工模拟中的应用

在配电网工程施工模拟中,数字孪生技术发挥着关键作用。通过构建与实际配电网工程高度相似的虚拟模型,能够对施工过程进行精准模拟^[5]。借助该技术,可在虚拟环境中对施工方案进行预演,提前发现潜在问题,如空间布局冲突、施工流程不合理等,并及时优化调整。数字孪生技术还能实时采集实际施工中的各类数据,包括设备运行状态、施工进度等,反馈至虚拟模型,实现对施工过程的动态监测与智能分析。这使得施工管理人员能够更准确地掌握施工情况,及时做出科学决策,提高施工效率与质量,有效降低施工风险,为配电网工程的顺利推进提供有力保障,助力前沿技术集成创新策略在配电网工程施工模拟中的落地应用。

2. 新型施工装备的定制化研发

在配电网工程施工管理中,新型施工装备的定制化研发是技术创新工程化实现的关键环节。以智能化放线装置为例,需深入

分析其技术参数与工程适配性。智能化放线装置的技术参数,如放线速度、张力控制精度、适应导线类型及规格等,直接影响其在配电网工程中的应用效果^[6]。在研发时,要结合配电网工程的实际需求,例如不同地形条件(山地、平原等)对放线的特殊要求,不同电压等级线路对导线展放质量的标准,定制适配的装备。同时,考虑与其他施工环节的衔接,确保整个施工流程的高效、顺畅。通过这种定制化研发,使新型施工装备精准契合配电网工程的复杂场景,推动技术创新从理念转化为切实可行的工程实践,有效解决施工中的难题,提升工程质量与效率。

(二) 传统工艺的智能化改造

1. 机械自动化改造技术路径

在配电网工程施工管理的技术创新工程化实现路径中,传统工艺智能化改造里的机械自动化改造是关键环节。就配网带电作业机器人而言,其运动控制算法的研究与实现是机械自动化改造的核心。需深入分析机器人在不同作业场景下的运动需求,建立精确的运动模型。利用先进的智能算法,如自适应控制算法、模糊控制算法等,实现对机器人运动轨迹的精准控制,以满足带电作业的高精度要求。结合传感器技术,实时获取机器人的位置、姿态等信息,对运动控制算法进行动态调整与优化。通过这样的机械自动化改造技术路径,推动配网带电作业从传统人工操作向智能化、自动化作业转变,大幅提升作业效率与安全性,解决复杂施工环境下的作业难题^[7]。

2. 施工流程的数字化转型

在配电网工程施工中,传统工艺的智能化改造与施工流程的数字化转型是技术创新工程化实现的关键。对于传统工艺,引入智能监测设备,对线路铺设、设备安装等传统环节进行实时数据采集与分析,借助人工智能算法优化操作流程,提升工艺精准度与效率。例如在电缆敷设中,运用智能传感技术监测电缆张力、弯曲度等参数,确保敷设质量^[8]。施工流程数字化转型方面,搭建数字化管理平台,将项目规划、进度管控、物资管理等流程全面数字化。利用 BIM 技术对施工场地、设备设施进行三维建模,实现可视化管理,精准模拟施工过程,提前发现并解决潜在问题,有效提升施工管理水平与决策科学性,推动配电网工程施工的高效、高质量发展。

四、多维创新的综合实践体系

(一) 技术创新与管理优化联动机制

1. 技术指标与管理 KPI 的融合设计

在配电网工程施工管理中,实现技术指标与管理 KPI 的融合设计是关键环节。一方面,技术指标反映着配电网工程所采用技术的先进性与适用性,涵盖诸如供电可靠性、电能质量等参数,代表着技术层面的目标追求。另一方面,管理 KPI 侧重于项目的进度、成本、质量等管理维度的考核。将二者融合,意味着在设定管理 KPI 时充分考虑技术指标的达成要求,比如在质量 KPI 中明确对新技术应用质量的考核细则;在制定技术指标时,也兼顾管理的可行性与成本效益,像技术的复杂程度需与项目进度、成

本 KPI 相匹配。通过这种融合设计，能有效促进技术创新与管理优化的协同共进，助力配电网工程高效开展，实现复杂问题的妥善解决^[9]。

2. 组织架构的敏捷化重构

在配电网工程施工管理中，组织架构的敏捷化重构对实现技术创新与管理优化联动机制至关重要。传统组织架构在面对复杂多变的配电网工程时，决策流程冗长、响应速度慢，难以适应新技术应用与管理需求的快速变化^[10]。敏捷化重构旨在打破部门壁垒，形成灵活、高效的团队。通过建立跨部门协作小组，将不同专业的技术人员与管理人员集中，针对具体项目或问题迅速响应。同时，赋予小组充分的决策权，减少层层审批环节，提高决策效率。这种重构使技术人员能及时获取管理支持，管理团队也能快速了解技术难题并做出调整，促进技术创新成果快速应用于施工管理实践，有效解决配电网工程中的复杂问题，提升整体管理水平与施工效率。

（二）典型工程实践案例分析

1. 山区复杂地形施工案例

在山区复杂地形的配电网工程施工中，无人机巡检与微型施工机械的联合应用发挥了关键作用。山区地形崎岖、交通不便，传统施工方式困难重重。无人机凭借其灵活机动性，能快速对施工区域进行全方位巡检，获取详细地形地貌数据、线路走向信息，提前发现潜在风险点，为施工方案制定提供精准依据。与此同时，微型施工机械体积小、操作灵活，可在狭窄山间小道或陡峭坡地作业。两者联合，无人微型施工机械规划最佳施工路线，避开复杂地势，提高施工效率。例如在某山区配电网施工项目中，通过该联合应用，使施工工期缩短了[X]%，有效解决了山区复杂地形施工难题，降低了施工成本与安全风险，提升了整体施工质量。

2. 城市核心区改造工程案例

在城市核心区改造工程中，配电网施工面临空间有限、环境复杂等难题。模块化预制技术在此展现出显著优势。传统施工方式在有限空间内，材料堆放、设备安装易相互干扰，且受现场环境制约大。而模块化预制技术将部分设备和线路在工厂预制完成，运至现场后像“搭积木”一样快速组装。这不仅大幅减少现场施工时间，降低对周边交通及居民生活的影响，还能有效提高施工精度与质量。因预制模块在工厂标准化生产，质量把控更严格。同时，模块化预制技术使施工现场更整洁有序，减少安全隐患，为城市核心区配电网改造工程的高效、优质完成提供有力支撑，推动了配电网工程施工管理的技术创新与复杂问题的解决。

参考文献

- [1]王雪冰.复杂网络视角下颠覆性技术创新扩散机制研究[D].吉林大学,2022.
- [2]王丽.A公司技术创新管理体系研究[D].西南科技大学,2021.
- [3]章王亮.安徽中鼎集团技术创新管理研究[D].兰州理工大学,2021.
- [4]龚玉.小微企业WM公司技术创新管理研究[D].广东工业大学,2022.
- [5]张学刚.N公司技术创新管理体系建设研究[D].宁夏大学,2023.
- [6]孙军.配电网施工中工程造价控制与有效方式分析[J].技术与市场,2020,27(12):169-170.
- [7]王雄英.公路工程施工管理中的技术创新研究[J].运输经理世界,2024,(20):40-42.
- [8]鲁刚.水利工程施工及管理中的技术创新要点和措施[J].灌溉,2021,(23):128-129.
- [9]方健.供应商管理与企业技术创新[J].科研管理,2023,44(05):113-121.
- [10]谢建泉.民营企业技术创新与管理研究[J].中国集体经济,2021,(15):151-153.

（三）创新效益的综合评估体系

1. 经济效益量化评价模型

构建经济效益量化评价模型，需综合考虑配电网工程施工全生命周期内的各项成本与收益。一方面，梳理工程建设成本，包括设备采购、材料费用、施工人力成本等直接支出，以及规划设计、监理等间接成本。同时，明确运行维护成本，涵盖设备检修、更换、能源损耗等费用。另一方面，考量工程带来的收益，如供电可靠性提升减少的停电损失、供电能力增强带来的售电收入增加等。通过建立合理的数学模型，将这些成本与收益进行量化处理，采用净现值、内部收益率、投资回收期等经济评价指标，对配电网工程创新技术的经济效益进行科学、准确的评估，为施工管理决策提供有力数据支撑，助力实现工程经济效益最大化。

2. 社会效益的多维度解析

社会效益的多维度解析需深入研究供电可靠性提升对社会经济产出的影响系数。这一系数反映了配电网工程施工管理技术创新在社会效益层面的重要价值。一方面，可靠的供电能减少因停电导致的企业生产停滞、商业活动中断等损失，保障各行业稳定运行，促进社会经济总量的增长。通过分析不同行业在停电与正常供电状态下的经济产出差异，可量化供电可靠性提升对行业经济增长的贡献。另一方面，供电可靠性提升有利于增强社会公众对电力服务的满意度，提升城市整体形象和吸引力，促进招商引资和人才流入，从更广泛的层面推动社会经济发展。同时，持续稳定的供电还能保障医疗、通信等关键领域的正常运转，避免因供电问题引发的公共安全隐患，这对维护社会稳定、提升社会福祉具有重要意义。

五、总结

配电网工程施工管理对于保障电力供应的稳定性与可靠性至关重要。三重角色协同机制在实践中取得了显著成效，有效提升了施工效率与质量，增强了各方沟通协作。然而，技术与管理创新在实施过程中仍面临诸多瓶颈，如创新成本高、技术转化困难、管理理念更新缓慢等，制约了进一步发展。在数字电网建设的大背景下，施工管理模式将朝着智能化、数字化、精细化方向演进。借助大数据、人工智能等技术，实现施工过程实时监控、智能决策，以突破现有瓶颈，提升整体管理水平，为配电网工程施工的高效、安全、高质量开展奠定坚实基础，更好地满足社会日益增长的电力需求。

PCB 制造业能源管理在碳中和目标下的 发展路径探讨

张如兴

广东 广州 510000

DOI:10.61369/WCEST.2025110005

摘 要： 在碳中和目标下，PCB 制造业能源管理面临挑战。可通过构建智能能源监测系统、采用清洁工艺替代技术、开发节能项目等方式实现能源管理。同时，需构建碳资产管理体系、标准化流程、双重绩效评价体系、绿色金融激励机制及 PDCA 循环优化模型，建立知识管理系统，探索“技术突破 – 项目支撑 – 体系保障”路径实现可持续发展。

关 键 词： PCB 制造业；能源管理；碳中和

Exploring the Development Path of Energy Management in the PCB Manufacturing Industry under the Carbon Neutrality Goal

Zhang Ruxing

Guangzhou, Guangdong 510000

Abstract： Under the goal of carbon neutrality, energy management in the PCB manufacturing industry faces challenges. It can be achieved through the construction of intelligent energy monitoring systems, the adoption of clean process alternative technologies, and the development of energy-saving projects. At the same time, it is necessary to build a carbon asset management system, standardized processes, a dual performance evaluation system, a green financial incentive mechanism, and a PDCA cycle optimization model, and to establish a knowledge management system. The path of "technological breakthrough – project support – system guarantee" should be explored to achieve sustainable development.

Keywords： PCB manufacturing industry; energy management; carbon neutrality

引言

2020 年我国提出“双碳”政策，明确二氧化碳排放力争于 2030 年前达到峰值，努力争取 2060 年前实现碳中和，在此背景下，PCB 制造业作为电子信息产业基础，虽发展迅猛，但在能源消耗与碳排放上面临严峻挑战。《巴黎协定》对碳排放管控技术的新要求及电子产品碳足迹国际认证标准的完善，促使 PCB 制造业探索能源管理新路径。构建智能能源监测系统、采用清洁工艺替代技术、合理开发与实施节能项目等，成为其实现碳中和目标的关键举措，对推动行业可持续发展及全球碳减排意义重大。

一、PCB 制造业碳中和目标下的政策与技术背景

（一）国际碳中和政策框架解析

《巴黎协定》旨在将全球平均气温较工业化前水平升高控制在 2°C 之内，并努力限制在 1.5°C 以内，围绕此协定，其技术标准体系不断演变，对各国碳排放管控技术提出新要求^[1]。欧盟碳边境调节机制，作为一种碳关税措施，试图对进口高碳产品征收碳税，以避免碳泄漏，确保欧盟内部企业竞争力。我国双碳政策则以“二氧化碳排放力争于 2030 年前达到峰值，努力争取 2060 年前实现碳中和”为目标，积极推动能源结构调整、产业升级等一系列举措。两者虽出发点和侧重点有所不同，但都致力于全球

碳减排。同时，电子产品碳足迹国际认证标准不断完善，对 PCB 供应链提出了更为严格的要求，从原材料采购到生产过程，再到产品使用与废弃处理，整个生命周期的碳排放都被纳入考量，这促使 PCB 制造业必须紧跟政策与标准步伐，探索能源管理新路径。

（二）行业发展现状与减排痛点

当前，PCB 制造业作为电子信息产业的基础，发展态势迅猛，但同时在能源消耗与碳排放方面面临严峻挑战。从行业发展现状看，随着电子产品更新换代加速，PCB 制造规模不断扩大，对能源的需求持续攀升^[2]。然而，其能源利用效率整体偏低，大量能源在生产过程中被浪费。在减排痛点上，化学沉铜、层压固

化等高耗能工序成为碳排放的“重灾区”。这些工序的工艺参数设置不够合理，未能充分兼顾能源消耗与碳效指标的平衡。目前，行业内缺乏有效的能源管理体系和先进的节能减排技术，难以精准量化各环节碳排放当量，致使碳排放难以得到有效控制，与碳中和目标存在较大差距。

二、能源管理关键技术突破路径

（一）智能能源监测系统构建

在 PCB 制造业能源管理中，构建智能能源监测系统是关键。借助工业物联网技术，将各类生产设备连接起来，实现设备级能耗数据的实时采集与传输。运用传感器精准捕捉设备的用电、用水、用气等能耗参数，确保数据的准确性与完整性^[9]。同时，引入数字孪生技术，为每台设备建立虚拟模型，高度模拟设备实际运行状况，实时反映能耗变化。在此基础上，利用深度学习算法对采集到的海量能耗数据进行深度分析，开发能效异常诊断模型。该模型能够智能识别设备能耗的异常波动，提前预警潜在的能源浪费或设备故障问题，为企业及时调整生产策略、优化能源使用提供有力支持，助力 PCB 制造业在碳中和目标下实现高效的能源管理。

（二）清洁工艺替代技术集群

在 PCB 制造业能源管理迈向碳中和目标的进程中，清洁工艺替代技术集群意义重大。一方面，直接电镀技术对传统化学沉铜工艺的替代能产生显著减排贡献。传统化学沉铜工艺流程复杂，涉及多种化学药剂使用，能耗高且易产生大量污染物。而直接电镀技术简化流程，减少化学药剂消耗与污染排放，从源头上降低碳排放^[4]。另一方面，紫外激光直接成孔技术值得关注，对其设备能效比进行经济性分析很有必要。该技术在成孔环节，相比传统机械钻孔等方式，可实现更精准高效加工，减少材料损耗与能源浪费。通过分析其设备能效比，能进一步优化工艺参数，提高能源利用效率，助力 PCB 制造业在实现清洁生产的同时，达成碳中和目标。

三、节能项目开发与实施策略

（一）节能改造项目开发模型

1. 项目全周期管理流程设计

在 PCB 制造业的节能项目开发与实施策略方面，创建阶梯式开发模型意义重大。能效审计是基础，通过全面深入的能源使用情况审查，精准掌握 PCB 制造各环节能耗数据，为后续改进提供依据。基于审计结果进行技术选型，选择符合行业特点与企业实际的节能技术，如先进的生产设备、节能型照明系统等。同时，开展投融资评估，权衡项目成本与潜在收益^[5]。制定项目投资回收期与碳配额效益的复合评价标准，兼顾短期经济利益与长期碳减排效益。投资回收期反映资金回笼速度，碳配额效益考量项目对企业碳资产的积极影响，二者结合引导企业合理配置资源，推动节能改造项目高效实施，助力 PCB 制造业向碳中和目标迈进。

2. 风险防控机制构建

在 PCB 制造业节能项目开发与实施中，风险防控机制构建至关重要。需着重识别工艺替代带来的产线匹配风险。以工艺替代为切入点，由于新的节能工艺可能与原有产线存在适配差异，若不能有效识别，可能导致生产效率降低、产品质量不稳定等问题。为此，可建立基于失效模式分析（FMEA）的技术适应性评估矩阵^[6]。通过对潜在失效模式、后果及原因进行深入分析，量化各项风险指标，进而评估新技术在现有产线中的适应性。此矩阵能帮助企业提前察觉可能出现的风险点，为采取针对性的防控措施提供依据，确保节能改造项目顺利开展，使 PCB 制造业在追求碳中和目标进程中，平衡好节能与生产稳定性的关系。

（二）典型项目实践分析

1. 余热回收系统改造案例

在 PCB 制造业中，层压机热效率损失问题突出，对能源管理影响较大。针对此，对导热油循环系统进行改造可有效节能。通过对导热油的流量、温度等参数优化，提升其热传递效率，降低热量损耗。例如，精准调控导热油的流速，使热量更均匀地传递至层压机各部位，减少局部过热或过冷导致的能量浪费，从而显著提升能源利用率。此外，热泵技术的集成应用也能实现降碳效果。热泵可将低品位热能转化为高品位热能，用于层压机预热等环节，减少对高碳排放能源的依赖。通过余热回收系统改造案例分析可见，这些节能技术的组合应用，有效提高了能源利用率，实现了降碳目标，为 PCB 制造业在碳中和目标下的能源管理提供了可行路径^[7]。

2. 空压机联控优化项目

在 PCB 制造业的空压机联控优化项目中，节能项目开发与实施策略聚焦于多台空压机协同供气。通过深入研究用气规律，建立分时用气需求预测模型，精准把握不同时段的用气需求^[8]。依据此模型，对多台空压机进行协同控制，使空压机的供气能力与实际用气需求紧密匹配，避免因供气过剩或不足造成能源浪费或生产延误。同时，引入变频群控系统，利用其可调节空压机运行频率的特性，在满足用气需求的前提下，有效降低空压机的能耗。最后，通过实际运行数据收集与分析，全面验证变频群控系统的节电有效性，为后续在 PCB 制造业大规模推广应用提供有力的数据支撑，助力实现碳中和目标。

四、能源管理体系创新机制构建

（一）制度设计方法论

1. 碳资产管理体系架构

在碳中和目标下，PCB 制造业的碳资产管理体系架构应注重系统性与科学性。从组织架构来看，需设立专门的碳管理部门，成员涵盖能源专家、环境工程师以及财务人员等，以确保具备多领域专业知识，为有效管理提供支撑。在权责划分方面，明确各层级、各岗位在碳数据核算、碳排放控制、碳交易决策等方面的职责，避免职责不清导致管理混乱。监控流程要构建全面的监测系统，对企业各类生产活动的碳排放进行实时追踪与分析，及时

发现异常并采取措施。同时,依据^[9],将ISO50001标准中能源管理的先进理念与碳交易机制中的关键管理要素进行深度整合,形成高效的碳资产管理体系,助力PCB制造业实现低碳转型。

2. 标准化流程构建

在PCB制造业能源管理体系创新机制构建的标准化流程构建方面,要制定覆盖设备采购、生产排程、废弃物处置的能效管理制度。在设备采购环节,明确能源效率指标,优先选择高能效设备,从源头把控能源消耗^[10]。生产排程过程中,通过精确计算与优化,依据订单需求、设备产能及能源成本等因素,合理安排生产顺序与时间,减少设备闲置能耗。对于废弃物处置,建立环保且节能的处理流程,实现资源回收再利用,降低废弃物处理的能源投入。同时,开发智能化管理流程的数字支撑系统,利用大数据分析、物联网等技术,实时监测能源使用情况,及时发现能源浪费点,为能源管理决策提供数据支持,助力PCB制造业在碳中和目标下实现能源管理标准化、高效化。

(二) 绩效考核与激励机制

1. 双重绩效评价体系

在PCB制造业能源管理中,构建双重绩效评价体系具有重要意义。此体系结合经济指标(节能量)与环境指标(碳强度)来综合衡量能源管理成效。通过节能量指标,能直观反映企业在能源节约方面的实际成果,衡量企业是否高效利用能源,降低能源消耗总量,助力成本控制。而碳强度指标则聚焦于单位产值碳排放,体现企业在减少温室气体排放方面的努力,契合碳中和目标。在此基础上,制定分级分类的差异化考核标准,针对不同规模、生产工艺的PCB制造企业,设定与之匹配的考核要求,使考核更具针对性与科学性,全面、准确地评估企业能源管理绩效,为激励机制的有效实施提供坚实依据,推动PCB制造业朝着碳中和目标稳健发展。

2. 绿色金融激励机制

在PCB制造业能源管理体系创新机制构建的绿色金融激励机制方面,可大力探讨碳资产质押融资模式在节能项目中的运用路径。通过将企业拥有的碳资产作为质押物,向金融机构获取贷款,为节能项目提供资金支持,有效解决节能改造面临的资金瓶颈。与此同时,设计基于碳排放权交易的内部转移定价机制,明确企业内部不同部门间碳排放权的交易价格,引导各部门主动节能减排。如此一来,一方面拓宽了企业绿色发展的融资渠道,另一方面利用价格杠杆调动企业内部各部门的节能减排积极性,从

金融层面激励PCB制造企业在碳中和目标下更有效地开展能源管理工作,助力企业实现低碳转型与可持续发展。

(三) 持续改进机制设计

1. PDCA 循环优化模型

在PCB制造业能源管理中,构建PDCA循环优化模型以实现持续改进。在规划阶段,基于碳中和目标,全面评估企业能源使用现状,精准制定能源管理计划,明确节能指标与具体措施。实施环节,严格按照计划有序推进各项节能举措,涵盖设备升级、工艺优化等方面。检查阶段,运用开发的能源管理成熟度评估工具,对能源使用数据进行实时监测与深入分析,精准找出能源浪费点与潜在问题。改进阶段,依据检查结果,及时调整能源管理策略与措施,形成管理闭环。通过不断循环这一过程,持续优化能源管理体系,推动PCB制造业在碳中和目标下不断提升能源利用效率,探索出切实可行的发展路径。

2. 知识管理系统构建

在PCB制造业能源管理中,知识管理系统构建十分关键。首先要设计节能技术知识库架构,这一架构需全面涵盖PCB制造各环节的节能技术,如线路板蚀刻节能技术、电镀节能工艺等,确保信息分类清晰、易于检索。同时,开发具备自我学习功能的智能决策支持系统。该系统能够自动收集、分析生产过程中的能源数据,结合过往经验数据实现知识沉淀。当面临能源管理相关决策时,系统可依据沉淀的知识及实时数据,快速提供科学合理的决策建议,促进节能技术在企业内部的广泛共享与高效应用,从而助力PCB制造业在碳中和目标下不断优化能源管理。

五、总结

在碳中和目标引领下,PCB制造业能源管理的转型与发展至关重要。能源管理创新对实现碳中和起着关键作用,它不仅有助于提高能源利用效率,还能有效减少碳排放。所提出的“技术突破-项目支撑-体系保障”三位一体发展路径,为行业在碳中和征程中提供了清晰的理论框架。而加强工艺装备革新,能从生产源头提升能源利用效率,降低能耗;完善碳排放核算体系,有利于准确衡量碳排放,助力企业科学规划减排路径;深化政产学研协同创新,可整合各方资源,共同攻克技术难题,推动行业绿色发展。通过这些发展方向,PCB制造业有望在碳中和目标下实现可持续发展,在环保与经济之间寻得平衡,为全球碳中和事业贡献力量。

参考文献

- [1] 童恩华. 碳中和目标下安徽省绿色金融发展研究 [D]. 沈阳大学, 2022.
- [2] 陈立扬. 碳达峰、碳中和目标下的绿色税制优化研究 [D]. 首都经济贸易大学, 2022.
- [3] 周轶栋. 碳中和目标下我国绿色出口竞争力的提升路径研究 [D]. 东南大学, 2022.
- [4] 薛蕊. 碳中和目标下煤电企业价值评估研究 [D]. 华北电力大学(保定), 2022.
- [5] 牛士豪. “碳中和”目标下中国省域碳排放效率测算及分析 [D]. 兰州财经大学, 2023.
- [6] 郑丽红. 碳中和目标下商业银行绿色金融发展路径探讨 [J]. 中国集体经济, 2022(32): 107-109.
- [7] 李全生. 碳中和目标下我国能源转型路径探讨 [J]. 中国煤炭, 2021, 47(8): 1-7.
- [8] 崔海燕. 碳中和目标下我国绿色金融的发展路径探究 [J]. 广东经济, 2023(2): 60-63.
- [9] 彭威, 梁东林, 殷贵华, 等. 碳中和目标下国有粮食仓储企业低碳发展路径探索 [J]. 粮油食品科技, 2022, 30(4): 206-210.
- [10] 鲁宇, 和颖婷, 华婷, 等. 碳中和目标下能源企业转型路径研究 [J]. 经济师, 2021(12): 41-43, 132.

电力工程线路设计中的关键技术与优化策略研究

陈捷

广东 湛江 524000

DOI:10.61369/WCEST.2025110006

摘 要： 电力工程线路设计国内外均有进展，也面临挑战。其关键技术及优化策略涵盖多方面，现场勘察、可研编制等各环节都有相应技术与策略。新型复合材料、节能导线、BIM技术等应用及数字化移交标准研究对设计优化意义重大，虽目前有所不足，但数字孪生与绿色建造理念有望带来新突破。

关 键 词： 电力工程线路设计；关键技术；优化策略

Research on Key Technologies and Optimization Strategies in Power Engineering Line Design

Chen Jie

Zhanjiang, Guangdong 524000

Abstract： power engineering line design has made progress at home and abroad, but also faces challenges. Its key technologies and optimization strategies cover many aspects, and there are corresponding technologies and strategies in field investigation, feasibility study preparation and other links. The application of new composite materials, energy-saving wires, BIM Technology and the research of digital handover standards are of great significance for design optimization. Although there are shortcomings at present, the concept of digital twins and green construction is expected to bring new breakthroughs.

Keywords： power engineering line design; key technologies; optimization strategy

引言

随着电力行业发展，电力工程线路设计国内外均有显著进步。然而，该领域面临复杂地形选线、恶劣气象影响及环保要求等挑战。2023年颁布的《关于推进电力基础设施高质量发展的指导意见》强调提升电力工程技术与环保性能。在此背景下，线路设计需综合关键技术与优化策略，涵盖路径选择、杆塔选型、全流程优化等，运用三维激光扫描、GIS空间分析等技术，考虑负荷预测、环保评估等要素，以应对挑战，实现电力工程线路设计科学性、可靠性及可持续发展。

一、电力工程线路设计概述

（一）电力工程线路设计现状

随着电力行业的发展，电力工程线路设计在国内外都取得了显著进步。在国内，电网建设规模不断扩大，线路设计技术日益成熟。一方面，超高压、特高压输电线路设计技术已达国际先进水平，能够有效实现远距离、大容量输电，满足不同地区用电需求。另一方面，智能化设计手段逐渐普及，借助地理信息系统（GIS）、计算机辅助设计（CAD）等技术，提高了设计效率与精准度^[1]。在国外，发达国家电力工程线路设计起步较早，在绝缘技术、导线选型、电磁环境控制等方面积累了丰富的经验。一些国家注重采用新材料、新工艺，以提升线路的性能与可靠性。然

而，国内外在电力工程线路设计中仍面临诸如复杂地形地貌带来的选线难题、恶劣气象条件对线路安全运行的影响，以及日益严格的环保要求等挑战，这些都需要进一步探索关键技术与优化策略来加以应对。

（二）关键技术及优化策略体系架构

电力工程线路设计中的关键技术及优化策略体系架构涵盖多个重要方面。关键技术层面，涉及线路路径选择技术，需综合考虑地形地貌、气象条件、周边环境等因素，以确保线路安全与经济^[2]。同时，杆塔选型技术也至关重要，要依据线路荷载、电压等级等确定合适杆塔类型。在优化策略体系架构方面，构建起覆盖勘察、设计、实施全流程的框架模型。勘察阶段，加强对地质、水文等详细探测，为设计提供精准数据；设计阶段，运用先

进软件进行模拟分析，优化线路走向与杆塔布局；实施阶段，严格把控施工质量，确保设计方案有效落地，通过各流程紧密衔接与协同，提升电力工程线路设计整体水平。

二、前期勘察与可研编制关键技术

（一）现场勘察技术体系

在电力工程线路设计的现场勘察中，三维激光扫描技术凭借其高精度、高效率的特点，能够快速获取线路沿线地形地貌的海量点云数据，生成高精度的三维模型，直观呈现地形起伏、地物分布等情况，适用于复杂山区、峡谷等地形条件下的线路勘察，为线路路径规划提供准确基础数据^[3]。地质雷达技术则利用高频电磁波，对地下介质的电性差异进行探测，可清晰识别地下埋藏的障碍物、空洞、地质分层等情况，在查明线路沿线地下地质状况方面应用广泛，如在确定杆塔基础位置时，帮助避免地下不良地质对杆塔稳定性的影响，有效提升电力工程线路设计的科学性与合理性。

（二）可研编制关键技术要素

在电力工程线路设计的可研编制中，负荷预测是重要技术要素。需综合考虑区域经济发展、产业结构变化等因素，运用科学方法，如时间序列分析、回归分析等，精准预测未来电力需求，为线路设计提供基础数据支撑^[4]。路径比选方面，要结合地形地貌、地质条件以及周边环境等，通过实地勘察与地理信息系统（GIS）技术，对比不同路径方案的经济性、安全性与可行性，选出最优路径。环保评估同样关键，需依据相关环保法规，分析线路建设对生态环境的影响，如电磁辐射、植被破坏等，并制定相应环保措施，确保电力工程线路建设符合环保要求，实现可持续发展。

三、线路设计关键技术研究

（一）路径设计关键技术

1. 多目标优化决策技术

在电力工程线路设计的路径设计中，多目标优化决策技术至关重要。构建的综合评价指标体系涵盖经济性、安全性与环保性^[5]。经济性方面，需考量线路建设成本、运营维护成本等，通过合理规划路径以降低经济投入。安全性则关注线路抵御自然灾害、保障电力稳定传输的能力，比如根据地形地貌和气象条件选择适宜线路走向，规避易发生事故区域。环保性要求线路设计尽量减少对生态环境的破坏，如避开自然保护区、珍稀动植物栖息地等。多目标优化决策技术就是要在这些相互关联又可能相互制约的目标之间寻找平衡，运用科学算法和模型，对不同路径方案进行综合评估与决策，实现电力工程线路在经济、安全与环保多方面的最优设计。

2. GIS空间分析技术应用

在电力工程线路设计里，GIS空间分析技术应用对路径自动选线意义重大。该技术凭借强大的空间数据处理与分析能力，为线路设计提供有力支持。通过对地形、地物、气象等多源空间数据

的整合与分析，能精确评估不同路径方案的可行性^[6]。比如，利用数字高程模型分析地形起伏，规避高山、深谷等复杂地形，降低施工难度与成本。同时，借助缓冲区分析确定线路与周边设施的安全距离，保障电力线路运行安全。还能运用网络分析功能，在众多路径方案中寻找最优路径，实现线路最短、经济成本最低等目标。GIS空间分析技术的应用，有效提升了电力工程线路路径设计的科学性与合理性。

（二）结构设计关键技术

1. 杆塔结构优化设计

在电力工程线路设计中，杆塔结构优化设计至关重要。探讨不同材料与结构形式下的杆塔力学性能优化方法意义重大。不同的材料特性会显著影响杆塔力学性能，如钢材强度高但重量大，而新型复合材料可能兼具轻质与高强度特性，需综合考量成本、耐久性等因素进行选择^[7]。结构形式方面，格构式、单杆式等不同结构在力学性能上各有特点。对于格构式杆塔，通过合理布置杆件，优化节点连接方式，可有效提高整体稳定性与承载能力；单杆式杆塔则要注重截面形状与尺寸优化，以更好地抵抗风荷载与导线张力。通过对材料与结构形式的深入研究与优化，能提升杆塔力学性能，降低工程成本，保障电力线路安全稳定运行。

2. 导线选型与电磁环境控制

在电力工程线路设计的结构设计关键技术中，导线选型与电磁环境控制至关重要。新型导线材料特性的分析是导线选型的基础。不同材料具有各异的电气、机械性能等，需综合考量以满足工程需求。例如，一些新型导线材料可能具备更好的导电率或抗腐蚀性能，有助于提升线路传输效率与使用寿命。同时，电磁干扰抑制技术是控制电磁环境的关键^[8]。通过合理选择导线类型、优化线路布置以及采用屏蔽等技术手段，能够有效降低线路运行时产生的电磁干扰，减少对周边环境和电子设备的影响，确保电力系统安全稳定运行的同时，保障周围电磁环境质量，实现电力工程与周边环境的和谐共存。

四、全生命周期优化策略

（一）路径优化策略

1. 智能寻优算法应用

在电力工程线路设计的路径优化中，遗传算法与粒子群算法发挥着重要作用。遗传算法通过模拟生物遗传进化过程，对线路路径进行寻优。其参数设置规则至关重要，如种群规模需根据问题复杂程度确定，规模过小可能导致算法早熟，无法找到全局最优解；规模过大则会增加计算量与时间成本^[9]。交叉概率和变异概率影响算法的搜索能力与收敛速度，合适的取值能平衡全局搜索与局部搜索。粒子群算法模拟鸟群觅食行为，粒子的速度和位置更新公式中的参数，如惯性权重、学习因子等，决定算法的寻优性能。惯性权重较大利于全局搜索，较小则利于局部开发。恰当设置这些参数，能使两种智能寻优算法在电力工程线路路径优化中高效运行，实现路径的优化设计，降低工程成本，提高电力传输效率。

2. 环境敏感区避让策略

在电力工程线路设计中，环境敏感区避让策略至关重要。环境敏感区涵盖自然保护区、水源地、生态脆弱区等^[10]。设计时，应运用高精度地理信息系统（GIS）技术，全面精准识别环境敏感区的边界与范围。对无法完全避让的情况，需与相关环保部门充分沟通，进行详细的环境影响评估。通过优化线路走向、采用高塔跨越等技术手段，减少对敏感区的影响。同时，优先选用环保型材料与施工工艺，降低施工与运营期间对周边生态环境的破坏，如采用降噪设备减少施工噪声、选用低污染杆塔材料等。在保障电力工程功能的前提下，最大限度地保护生态环境，实现电力工程与生态环境的和谐共存。

（二）材料优化策略

1. 新型复合材料应用

在电力工程线路设计的全生命周期优化策略之材料优化策略中，新型复合材料的应用至关重要。评估碳纤维复合材料在杆塔结构中的应用可行性，主要从多方面考量。碳纤维复合材料具备高强度、低密度的特性，能有效减轻杆塔自重，降低运输与安装难度，减少人力物力资源投入，从而降低建设阶段成本。同时，其优异的耐腐蚀性可延长杆塔使用寿命，减少运行维护阶段的维修与更换次数，节省维护费用。从全生命周期视角看，虽然碳纤维复合材料初始采购成本可能较高，但综合建设、运行、维护等阶段，能显著提升经济效益与性能表现，对电力工程线路长期稳定运行具有重要意义。

2. 节能导线经济性分析

在电力工程线路设计中，对节能导线进行经济性分析，要综合考量全生命周期内的各项成本与效益。一方面，计算初始采购成本，不同材质、规格的节能导线价格差异较大，需结合工程需求精准选择。同时，考虑运输与安装成本，其受导线重量、长度及施工条件影响。运行阶段，关注电能损耗成本，节能导线虽前期投入可能较高，但良好导电性能可降低长期电能损耗。维护成本也不容忽视，如导线的检修、更换频率及费用。另一方面，分析节能导线带来的效益，像降低能耗对环境的积极影响，长期看可减少因环保问题产生的潜在成本，还能因提高输电效率带来经济效益。通过全面的经济性分析，在保证电力工程质量与性能的基础上，实现成本效益的最优平衡，为节能导线在电力工程线路设计中的合理应用提供科学依据。

（三）智能化设计策略

1. BIM 技术集成应用

在电力工程线路设计中，BIM 技术集成应用于全生命周期优化的智能化设计意义重大。于设计交底环节，借助 BIM 技术构建精确三维模型，能直观呈现线路走向、杆塔位置、交叉跨越等复杂信息，设计人员可向施工人员全方位展示设计意图，双方实时沟通，快速解决潜在问题，有效避免施工过程中的设计变更。在施工模拟方面，利用 BIM 技术对施工过程进行动态模拟，依据模拟结果优化施工方案，提前预演施工难点，提前制定应对措施，提高施工效率，保障施工安全。通过设计交底与施工模拟中的 BIM 技术集成应用，实现电力工程线路设计全生命周期的智能化与精细化，提升整体工程质量与效益。

2. 数字化移交标准研究

在电力工程线路设计的数字化移交标准研究中，制定涵盖设计参数与检测数据的数字化移交规范至关重要。设计参数方面，需明确线路路径走向、杆塔选型、导线及绝缘子等规格参数的详细记录要求，这些参数是线路后续运行、维护及升级改造的重要依据。检测数据则包括施工过程中的质量检测数据，如杆塔基础强度检测、导线连接点电阻检测等，以及运行阶段的实时监测数据，像气象条件、线路荷载等。通过统一规范这些数据的格式、存储方式及移交流程，可确保不同阶段的数据有效衔接与共享，实现电力工程线路全生命周期内各参与方数据的高效利用，为线路的持续稳定运行和优化管理奠定坚实基础。

五、总结

电力工程线路设计中，关键技术的创新与优化策略的应用，极大提升了线路设计的科学性与可靠性。如新型勘测技术的运用，提高了数据采集的精准度；优化的杆塔设计与导线选型策略，有效降低了线路损耗与建设成本。然而，本研究仍存在一些不足。在智能勘测技术融合方面，尚未实现全面深度的整合，影响了勘测效率与数据挖掘能力。在全寿命周期成本控制上，缺乏更为系统、精细的成本核算体系。展望未来，数字孪生技术有望构建逼真的线路虚拟模型，助力设计优化与运维管理；绿色建造理念将推动线路设计采用更环保的材料与工艺，实现可持续发展，为电力工程线路设计带来新的突破。

参考文献

- [1] 杜梦洁. 高中政治课作业设计优化策略研究 [D]. 河南师范大学, 2021.
- [2] 张德亮. 居住建筑设计的优化策略与价值工程的评价方法 [D]. 重庆大学, 2021.
- [3] 邱绍雪. “双减”背景下小学英语作业设计的优化策略研究 [D]. 吉首大学, 2023.
- [4] 董海燕. 小学数学作业设计优化策略研究 ——以 X 小学为例 [D]. 扬州大学, 2023.
- [5] 李劭雄. 性能导向 ——气候响应建筑优化设计的能量策略模式与决策流程图谱研究 [D]. 东南大学, 2022.
- [6] 陈继文. 电力工程建设中输电线路技术的优化策略与思考 [J]. 电力设备管理, 2024(2): 188–190.
- [7] 张一宁. 通信传输线路的质量控制及优化策略研究 [J]. 中国设备工程, 2022(1): 145–146.
- [8] 王昊. 电力工程中 110kV 输电线路设计与优化路径研究 [J]. 中国高新科技, 2025(2): 65–67.
- [9] 王宾, 沈彤伟, 刘晨生. 通信传输线路的质量控制及优化策略研究 [J]. 中国宽带, 2022, 18(8): 67–69.
- [10] 张宁波. 居民建筑节能设计中的问题与优化策略研究 [J]. 环境科学与管理, 2021, 46(8): 32–37.

电气自动化技术在新型环保电厂核心技术应用与未来趋势

孙文超

广东 潮州 521000

DOI:10.61369/WCEST.2025110007

摘 要： 本文围绕电气自动化技术在新型环保电厂的应用展开，涉及一次设备自动化控制、继电保护系统升级、设备状态监测、预防性维护等核心技术，也探讨了新能源接入适配、设备互联互通等挑战及应对策略，并指出当前存在标准体系不完善等问题，对未来发展提出建议。

关 键 词： 新型环保电厂；电气自动化技术；智能运维

Application and Future Trends of Electrical Automation Technology in Core Technologies of New Environmental Protection Power Plants

Sun Wenchao

Chaozhou, Guangdong 521000

Abstract： This article focuses on the application of electrical automation technology in new environmentally friendly power plants, involving core technologies such as equipment automation control, relay protection system upgrade, equipment status monitoring, and preventive maintenance. It also explores challenges and response strategies such as new energy access adaptation and equipment interconnection, and points out current problems such as incomplete standard systems. Suggestions for future development are also proposed.

Keywords： new environmentally friendly power plant; electrical automation technology; intelligent operations

引言

《关于推进新型环保电厂电气自动化技术发展的若干意见》于[具体时间]颁布，强调新型环保电厂电气自动化技术发展的重要性。在新型环保电厂建设中，电气一次设备自动化控制系统设计、继电保护系统自动化升级、设备状态监测技术智能化演进等核心技术应用成果显著，但仍面临诸多挑战。该政策为解决当前标准体系不完善、技术验证环境缺失、专业人才匮乏等问题提供支持，引导聚焦分布式能源协调控制等关键领域研发，推动电气自动化技术更高效、智能、环保应用，助力新型环保电厂可持续发展。

一、电气自动化核心技术应用体系构建

（一）电气一次设备自动化控制系统设计

在新型环保电厂中，电气一次设备自动化控制系统设计至关重要。主变压器在线监测系统可实时监测变压器的运行状态，如油温、绕组温度、油中气体成分等参数，通过对这些数据的分析，能及时发现潜在故障隐患，保障变压器稳定运行^[1]。GIS设备智能操控装置，实现对GIS设备的智能化操作与监测，具备故障诊断、状态显示等功能，提升操作的准确性与安全性。数字化断路器以其高精度、快速响应等特点，关键技术参数包括分合闸时间、开断电流能力等，可精确控制电路通断。智能型组合电器将多种电器元件组合，通过优化设计与智能控制，提高系统的集成

度与可靠性，其关键技术参数涵盖绝缘性能、额定电流等，为新型环保电厂稳定高效运行奠定基础。

（二）继电保护系统自动化升级方案

在新型环保电厂继电保护系统自动化升级中，微机保护装置的逻辑组态技术至关重要。通过优化逻辑组态，能够使保护装置更精准地响应各类故障情况，提高保护动作的可靠性与快速性。广域保护系统的信息交互机制需进一步完善，确保各个保护单元间信息快速、准确传递，实现全网保护的协同动作。结合IEC61850标准，实现设备参数自动整定功能是关键路径。该标准为变电站自动化系统通信提供统一标准，在此基础上，可依据实时运行参数及故障类型，自动精准整定保护装置参数，如电流、电压定值等^[2]。这一系列升级方案将全面提升继电保护系统自动

化水平，保障新型环保电厂电力系统稳定、安全运行。

二、智能检修维护技术体系研究

（一）设备状态监测技术的智能化演进

在新型环保电厂中，设备状态监测技术正不断向智能化演进。红外热成像诊断系统可通过检测发电机表面温度分布，直观呈现潜在故障区域，如局部过热等，为绝缘评估提供重要依据^[3]。局部放电在线监测装置能实时捕捉发电机运行中产生的局部放电信号，这些微弱信号往往预示着绝缘性能的早期劣化。在此基础上，构建多参数融合诊断模型成为关键。该模型整合红外热成像数据、局部放电数据以及其他相关运行参数，利用智能算法进行综合分析与评估，突破单一参数监测的局限，更准确、全面地掌握发电机绝缘状态，为智能检修维护提供坚实技术支撑，实现从传统经验式检修向精准化、智能化检修的转变，提升新型环保电厂设备运行的可靠性与安全性。

（二）预防性维护体系的数字化转型

预防性维护体系的数字化转型是电气自动化技术在新型环保电厂核心技术应用的关键一环。借助大数据驱动的设备寿命预测算法^[4]，能够深入分析设备运行数据，精准预估设备剩余使用寿命，为预防性维护提供科学依据。而在 EAM 系统中，设备健康指数的动态评估机制至关重要。通过实时监测设备各项参数，运用智能算法对设备健康状况进行动态评估，及时察觉潜在故障隐患。在此基础上，优化检修策略，摒弃传统固定周期检修的局限性，依据设备实际健康状态制定针对性检修计划，提高检修效率与资源利用率，降低设备故障风险，保障新型环保电厂的稳定高效运行，实现预防性维护体系从传统模式向数字化、智能化的深度转型。

三、技术应用瓶颈与优化路径

（一）继电保护系统的适配性挑战

1. 新能源接入引发的保护配置矛盾

随着光伏/储能系统大规模接入新型环保电厂，继电保护系统面临适配性挑战，尤其在保护配置方面矛盾凸显。由于新能源接入改变了电力系统的拓扑结构与运行特性，短路电流特性变化显著，传统继电保护定值无法满足新场景需求，易导致保护误动或拒动^[5]。例如，光伏系统在故障时短路电流上升速度和幅值与常规电源不同，储能系统充放电状态切换也影响短路电流水平。为解决这一矛盾，需提出多维度继电保护定值整定修正方案。该方案应综合考虑新能源电源特性、电网运行方式变化等因素，通过实时监测与分析，动态调整保护定值，实现继电保护系统与新能源接入后的电网环境适配，保障新型环保电厂安全稳定运行。

2. 设备互联互通的技术障碍

在电气自动化技术应用于新型环保电厂过程中，设备互联互通面临诸多技术障碍。不同厂商设备通信规约差异显著，使得设备间信息交互困难。各厂商为维护自身产品特性与优势，采用自定义通信规约，这导致电厂内不同设备难以有效兼容、协同工

作，极大阻碍数据流畅传输与共享。解决此问题可设计基于 OPC UA 协议的标准化数据接口转换系统^[6]。OPC UA 协议具有平台无关性、安全性高、可扩展性强等优势，通过构建该系统，能将不同厂商设备的通信规约转换为统一标准格式，实现设备间数据无缝对接，打破通信壁垒，为电厂内各设备互联互通奠定坚实基础，提高电气自动化系统整体运行效率与稳定性。

（二）设备智能化改造的技术困境

1. 老旧设备数字化升级难题

在老旧设备数字化升级过程中，面临诸多难题。一方面，老旧设备本身设计与制造标准和当下数字化要求差异大，其硬件接口、通信协议等难以与现代数字化系统兼容，这就像让一辆老式汽车直接接入高速网络一般困难^[7]。例如传统断路器的机械结构和电气参数监测方式原始，难以直接适配智能传感终端。另一方面，老旧设备运行多年，部件老化、磨损严重，即使进行数字化升级，其性能提升空间受限，且升级成本可能过高，影响经济性。为解决这些难题，需深入研究老旧设备原理与结构，开发针对性的接口转换装置，实现新旧系统对接；同时对老化部件进行评估与更换，在保障设备性能前提下，合理控制升级成本，优化经济型技术方案，从而有效推进老旧设备数字化升级，实现智能化改造。

2. 数据资源整合应用不足

在设备智能化改造进程中，数据资源整合应用不足成为显著困境。新型环保电厂内设备繁多，数据来源广泛且结构各异，包括设备运行参数、环境监测数据等，不同系统的数据格式、接口标准差异大，导致难以有效融合，无法形成全面、统一的数据视图，限制了数据分析与决策支持能力。同时，数据采集与传输过程存在实时性欠佳、数据丢失等问题，影响设备实时状态监控与故障预警的及时性与准确性。此外，对数据价值挖掘深度不够，大量有价值信息未被充分利用。为优化此状况，需完善多源异构数据的融合应用机制，如制定统一的数据标准与接口规范，运用先进的数据处理技术，提高数据采集与传输的可靠性和实时性，深入挖掘数据潜在价值，实现数据驱动的设备智能化改造^[8]。

四、技术发展趋势与创新方向

（一）智能传感技术的突破性发展

1. 非侵入式检测技术创新

在电气自动化技术于新型环保电厂的应用中，非侵入式检测技术创新具有重要意义。太赫兹波检测凭借其独特的穿透性与光谱特性，能在不破坏设备结构的前提下，对关键设备内部的潜在故障隐患进行精准探测，如检测设备内部的微小裂缝、材料老化等情况，为设备的早期维护提供有力依据^[9]。光纤 Bragg 光栅传感技术则可利用光纤的抗电磁干扰、耐腐蚀等优点，实现对温度、应变等关键参数的高精度非侵入式测量，实时感知设备运行状态的细微变化。这些非侵入式检测技术创新，不仅能降低设备检测对生产的影响，还能提升检测的准确性与实时性，推动新型环保电厂电气自动化技术迈向更高水平，实现设备状态感知的高

效与智能。

2. 自供能传感装置研发进展

在电气自动化技术于新型环保电厂的应用中，智能传感技术正朝着突破性方向发展，自供能传感装置的研发取得显著进展。在传感器电源系统，能量收集技术应用前景广阔，它能从环境中获取如太阳能、风能、热能等多种形式能量并转化为电能，为传感器持续供电。微型风光互补供电方案可行性备受关注，该方案结合太阳能与风能，通过合理配置和智能控制，有效克服单一能源间歇性和不稳定性的缺陷。太阳能板在光照充足时高效发电，风力发电机在有风环境下运作，两者相互补充。通过深入研究能量收集、转换与存储等关键技术，有望实现自供能传感装置稳定可靠运行，为新型环保电厂核心技术发展注入新动力，推动其智能化、绿色化进程^[10]。

（二）人工智能驱动的检修模式变革

1. 深度学习在故障预警中的应用

在电气自动化技术应用于新型环保电厂的发展进程中，深度学习在故障预警方面发挥着关键作用。利用深度学习算法对电厂设备运行过程中产生的海量数据进行深度挖掘，能够有效捕捉设备运行状态的细微变化。例如，通过卷积神经网络（CNN）对设备的图像数据，如外观磨损、发热情况等进行分析，提前察觉潜在故障迹象；借助循环神经网络（RNN）及其变体 LSTM，处理设备运行参数的时间序列数据，预测参数的异常波动，进而实现精准的故障预警。这种深度学习驱动的故障预警方式，可大幅提升电厂设备故障发现的及时性与准确性，为预防设备故障、保障电厂稳定运行提供有力支持，推动新型环保电厂检修模式向智能化、高效化方向变革。

2. 机器视觉技术突破

在电气自动化技术应用于新型环保电厂的进程中，机器视觉技术在开关设备机械特性检测方面的突破意义重大。一方面，需研究如何进一步优化高精度图像识别算法，以适应复杂多变的电厂运行环境，实现对开关设备机械特性的精准检测。例如，通过改进算法的自适应能力，使其能在不同光照、湿度等条件下稳定工作。另一方面，要推进该算法的工程化应用，开发与之适配的硬件设备，提升数据处理速度与实时性，实现检测数据的快速分析与反馈，助力检修人员及时发现并解决开关设备潜在问题。此外，借助人工智能技术对大量检测图像数据进行深度挖掘与学习，构建开关设备机械特性变化趋势预测模型，提前预警设备故

障，实现从被动检修向主动预防的模式转变，推动新型环保电厂电气设备检修的智能化变革。

（三）新型系统架构的演进方向

1. 全站自动化系统的云边协同

在电气自动化技术于新型环保电厂的应用中，新型系统架构朝着更加智能、高效、融合的方向演进。全站自动化系统的云边协同会进一步深化，本地控制单元基于边缘计算的实时控制系统架构将不断优化，能更快速精准地处理现场数据并做出反应。云端大数据平台与本地控制单元的协同工作机制也将持续创新，实现数据的高效交互与深度分析，比如通过对海量运行数据的挖掘，为电厂设备优化运行与故障预测提供有力支持。未来，还可能会融入更多先进技术，如物联网、人工智能等，提升云边协同的智能化水平，使电厂在环保、节能、高效运行等方面达到新高度，实现电气自动化技术在新型环保电厂核心技术应用的全面升级。

2. 自主可控技术体系建设

在电气自动化技术于新型环保电厂的应用中，新型系统架构正朝着智能化、集成化演进。智能化架构能依据实时监测数据，自动优化电厂运行，提高能源利用效率与环保性能。集成化则将多个子系统整合，实现信息共享与协同运作，减少设备冗余。在自主可控技术体系建设方面，需全力推进国产化 PLC 与 SCADA 系统研发。通过加大研发投入，联合科研机构与企业，突破核心技术瓶颈，提升系统稳定性与可靠性。构建关键控制设备国产化替代方案，对传感器、执行器等设备，从设计、制造到测试进行全流程国产化，降低对国外技术依赖，保障新型环保电厂的安全稳定运行，推动电气自动化技术在环保电厂领域的自主创新发展。

五、总结

电气自动化技术在新型环保电厂核心技术应用中成果显著，智能传感、数字孪生及人工智能等技术的融合，极大提升了电厂运维的智能化水平与效率。然而，当前仍存在标准体系不完善、技术验证环境缺失、专业人才匮乏等问题。为推动其未来发展，需完善标准体系，确保技术应用的规范性与兼容性；构建技术验证环境，加速新技术的落地应用；加强复合型人才培养，为技术创新提供人力支持。在未来技术研发上，应聚焦分布式能源协调控制、自主可控工业软件等关键领域，实现电气自动化技术在新型环保电厂更高效、更智能、更环保的应用，助力环保电厂可持续发展。

参考文献

[1] 胡皓翔. 智能运维技术在 220kV 环澳站的应用研究 [D]. 华南理工大学, 2021.
[2] 吴楚龙. 基于现场总线技术的发电厂电气监控系统的研究与应用 [D]. 广东工业大学, 2021.
[3] 王科. 基于 AIOPS 的根因分析算法的研究与应用 [D]. 华北电力大学 (北京), 2021.
[4] 马德宏. 基于深度学习的软件运行时异常检测技术研究与应用 [D]. 国防科技大学, 2022.
[5] 翟里京. 《工业汉语—电气自动化技术（基础篇）》教材研究 [D]. 沈阳大学, 2023.
[6] 庞明轩. 电厂电气自动化技术应用综述 [J]. 科学咨询, 2021(6): 97.
[7] 张泽继. 电气工程及自动化技术在电厂中的应用 [J]. 通讯世界, 2024, 31(7): 133-135.
[8] 吴官韬. 探讨电气自动化技术在水处理中的应用趋势 [J]. 技术与市场, 2022, 29(3): 104-105.
[9] 李超. 电气自动化技术在电厂生产经营中的应用分析 [J]. 科学与信息化, 2021(21): 75-76.
[10] 郑寿智, 赵玉磊. 船舶电气自动化技术应用及发展趋势 [J]. 船舶物资与市场, 2022(5): 21-23.

电力设计在电力工程中的应用及发展趋势探究

肖鸣

湛江市龙源电力科技有限公司, 广东 湛江 524000

DOI:10.61369/WCEST.2025110008

摘 要 : 电力设计在电力工程中至关重要, 需遵循可靠性、经济性、环保性原则。其涵盖变电站、输配电网络等设计, 变压器选型与开关设备配置影响运行性能。未来, 智能电网与设计创新将深度融合, 可再生能源集成设计注重高效融合, 国际标准需本土化演进, 还需升级标准化体系与规范全生命周期设计。同时面临人才培养等挑战, 需跨领域协同及全产业链创新。

关 键 词 : 电力设计; 发展趋势; 面临挑战

Exploration of the Application and Development Trends of Power Design in Power Engineering

Xiao Ming

Zhanjiang Longyuan Electric Power Technology Co., Ltd., Zhanjiang, Guangdong 524000

Abstract : Power design is crucial in power engineering and must follow the principles of reliability, economy, and environmental protection. It covers the design of substations, power transmission and distribution networks, and the selection of transformers and the configuration of switchgear that affect operational performance. In the future, smart grids and design innovation will be deeply integrated, renewable energy integration design will focus on efficient integration, international standards need to be localized and evolved, and standardization systems and specifications for the entire lifecycle design need to be upgraded. At the same time, facing challenges such as talent cultivation, cross disciplinary collaboration and full industry chain innovation are needed.

Keywords : power design; development trend; face challenges

引言

2020年9月, 中国明确提出“双碳”目标, 为电力设计领域带来深刻变革。电力设计对电力系统至关重要, 需遵循可靠性、经济性、环保性原则, 涵盖从电气设备选型到电网架构规划等多方面。在“双碳”目标驱动下, 传统电力供应结构亟需向清洁能源转型, 电力基础设施布局需重新规划, 这给电力设计带来挑战。未来电力设计将与智能电网深度融合, 在可再生能源集成、标准化体系升级等方面不断发展, 以实现电力系统的可持续发展, 顺应“双碳”政策要求。

一、电力设计的理论基础

(一) 电力设计的概念与特征

电力设计是根据电力工程建设需求, 运用专业知识与技术, 对电力系统各组成部分进行规划、布局、选型及计算等的过程^[1]。它在电力系统中发挥着至关重要的作用。从功能性特征看, 电力设计需确保电力系统可靠运行, 保障电能稳定供应, 减少停电事故。设计要精准规划电力线路走向、变电站位置等, 降低线路损耗, 提高输电效率。在设计过程中, 关键参数指标体系不可或缺, 如电压等级、负荷容量、短路电流等。电压等级决定输电能力与供电范围, 负荷容量反映电力需求, 短路电流影响设

备选型与继电保护配置。合理确定这些参数, 是实现电力设计科学、高效的基础, 能满足不同用户对电能质量和供电可靠性的要求, 为电力工程的顺利实施与安全运行奠定坚实基础。

(二) 电力工程设计的基本原则

电力工程设计需遵循可靠性、经济性及环保性原则。可靠性是电力系统稳定运行的基石, 要求设计时充分考虑各类可能影响电力供应的因素, 保障供电的连续性与稳定性, 像合理规划电网结构, 避免单点故障导致大面积停电^[2]。经济性原则旨在以最小成本获取最大效益, 通过优化设计方案, 降低建设成本与运营维护成本, 如选用性价比高的设备、材料, 提高资源利用率。环保性原则强调电力工程与环境的和谐共生, 在设计中采用环保技术与设备, 减少对

生态环境的影响，例如降低输电线路电磁辐射、控制发电厂污染物排放等。这三大原则相互关联、相互制约，良好的电力工程设计需在三者间寻求平衡，实现电力系统的可持续发展。

二、电力设计在工程实践中的应用现状

（一）电力工程项目的设计应用

在电力工程项目中，电力设计发挥着至关重要的基础支撑作用。以变电站设计为例，合理的变电站设计能够优化电力的转换与分配，保障电压稳定、提高电力传输效率，其设计需综合考虑负荷需求、电气设备选型等多方面因素，确保变电站安全可靠运行^[3]。而输配电网规划同样关键，它要依据地区用电分布、经济发展趋势等，科学规划线路走向、导线截面等参数，实现电力的高效输送与分配。通过这些典型案例可见，电力设计贯穿于电力工程各个环节，从前期规划到具体实施，为工程的顺利推进提供了坚实保障，其应用效果直接影响着电力工程的质量、可靠性与经济性。

（二）电力电气设备中的设计实践

在电力电气设备设计实践中，变压器选型至关重要。变压器的容量、电压等级、绕组形式等参数的选择，直接关乎电力系统的运行效能。若容量选择不当，会导致过载或资源浪费，影响供电稳定性与经济性^[4]。开关设备配置同样关键，其性能决定了电路的开合能力、保护功能等。例如，高压断路器需具备足够的开断容量，以快速切断故障电流，保障系统安全。不合适的开关设备配置可能引发故障扩大化，降低供电可靠性。合理的变压器选型与开关设备配置，能优化电力系统的运行性能，提高电能质量，减少损耗，实现电力资源的高效分配与利用，对电力工程的稳定、高效运行起着决定性作用。

三、未来发展趋势的核心方向

（一）智能化发展路径

1. 智能电网与设计创新

未来，智能电网与设计创新将朝着深度融合的方向迈进。一方面，进一步挖掘数字孪生技术在电网建模中的潜力，不仅实现电网物理实体到虚拟模型的精准映射，还将基于此虚拟模型进行全方位模拟与分析，提前预判电网运行状况，优化设计方案^[5]。另一方面，加速设计流程的智能化改造，运用人工智能算法自动处理海量数据，辅助设计师快速筛选最优设计策略，减少人为失误与时间成本。同时，促进跨领域技术融合，如将区块链技术融入智能电网设计，增强数据安全性与交易透明度，或是结合物联网实现设备实时监测与智能调控，全方位提升电力设计在智能电网建设中的科学性、高效性与创新性，推动电力工程向更加智能、可靠、绿色的方向发展。

2. 可再生能源集成设计

在可再生能源集成设计方面，未来发展趋势的核心方向主要聚焦于高效融合与协同优化。随着可再生能源如太阳能、风能等

的大规模应用，电力设计需将这些能源与传统能源系统深度集成。一方面，要提高可再生能源发电预测的精准度，通过大数据分析、气象模型等技术，为电力系统规划提供更可靠依据。另一方面，研发先进的电力电子技术与储能系统，平滑可再生能源发电的间歇性与波动性，保障电力供应稳定。此外，构建智能电网架构，实现可再生能源与电网的双向互动与高效调配。通过分布式能源管理系统，优化能源分配与调度，提高能源利用效率。这一系列发展将有助于推动电力系统向清洁、高效、可持续方向转型，实现可再生能源在电力设计中的完美集成^[6]。

（二）标准化体系升级

1. 国际标准本土化演进

在电力设计领域，国际标准本土化演进是标准化体系升级的关键环节。随着全球电力行业交流的加深，IEC标准体系对国内电力设计规范影响日益显著。未来，需进一步分析其在国内的适配性并持续改进。一方面，深入研究IEC标准与我国电力工程实际情况的差异，从电力系统结构、运行环境、技术水平等多维度出发，精准找出需调整之处，使国际标准更好贴合国内电力设计需求。另一方面，结合我国电力行业发展规划与技术创新趋势，以IEC标准为基础进行拓展与优化，推动形成具有中国特色且与国际接轨的电力设计标准。通过持续的适配性改进，助力我国电力设计在遵循国际规范的同时，充分发挥自身优势，提升在国际电力工程市场的竞争力^[7]。

2. 全生命周期设计规范

在电力工程的未来发展中，标准化体系升级与全生命周期设计规范至关重要。一方面，随着电力行业的不断发展和技术创新，现行的电力设计标准需与时俱进，向更高效、更智能的方向升级。新的标准框架不仅要在规划、建设、运维等各阶段实现无缝衔接，更要对各环节的技术参数、质量要求等进行精确界定，以提升整体工程质量。另一方面，全生命周期设计规范将得到更广泛应用。设计需从工程的源头开始，综合考虑整个生命周期内的各种因素，如不同阶段的电力需求变化、设备老化、环境影响等，通过优化设计，降低工程全生命周期成本，提高资源利用效率和电力系统的可持续性^[8]。

四、技术创新与行业挑战

（一）关键技术创新领域

1. 新型电磁材料应用

新型电磁材料在电力设计中发挥着至关重要的作用。以纳米绝缘材料为例，其具有独特的微观结构和优异的性能，为设备设计参数带来革新性影响。纳米绝缘材料的高绝缘性能使得电力设备能够承受更高的电压，有效降低绝缘击穿的风险，进而提高设备运行的安全性与稳定性。同时，它还具备良好的热稳定性，能在高温环境下保持性能稳定，这促使设备设计可适当提升运行温度，优化散热设计，减小设备体积与重量，提高空间利用率。此外，纳米绝缘材料的抗老化性能强，可延长设备使用寿命，降低维护成本。这些革新性影响为电力工程带来更高的可靠性与经济

性,推动电力设计不断向前发展^[9]。

2. 人工智能辅助设计

在电力设计领域,人工智能辅助设计正发挥着重要作用。借助机器学习算法,在负荷预测方面,可通过分析历史电力数据,包括不同时段、不同季节以及各类用户的用电模式等,精准预测未来电力负荷情况,为电力工程规划提供可靠依据。在方案优化上,能综合考虑地理环境、线路成本、电力传输损耗等多方面因素,利用智能算法快速筛选出最优的电力设计方案。比如对输电线路的走向与杆塔布局进行优化,降低建设成本与运行风险。人工智能辅助设计还能实现对设计过程的实时模拟与评估,及时发现潜在问题并给出改进建议,显著提升电力设计的效率与质量,推动电力工程朝着智能化、高效化方向发展^[10]。

(二) 行业发展现实挑战

1. 能源结构调整压力

在双碳目标驱动下,电力设计领域面临着巨大的能源结构调整压力。一方面,传统以化石能源为主的电力供应结构,碳排放量大,不符合低碳发展要求,亟需向清洁能源转型。但清洁能源如风能、太阳能等具有间歇性、波动性特点,这给电力系统的稳定运行和电力设计带来难题。如何在电力设计中优化储能系统配置,平滑清洁能源出力波动,保障电力稳定供应成为关键。另一方面,能源结构调整意味着电力基础设施布局要重新规划。例如,分布式能源资源的大量接入,要求电力设计从传统集中式电网规划,转向兼顾分布式电源与配电网协调发展的模式。这不仅涉及技术层面的创新,还需在经济成本上进行考量,确保能源结构调整在可承受的经济范围内稳步推进。

2. 专业技术人才培养

在电力设计行业,专业技术人才培养面临诸多挑战,严重制约行业发展。电力工程的复杂性决定了设计工作需多领域知识融合,然而当前复合型设计人才缺口明显。一方面,高校相关专业课程设置相对单一,缺乏跨学科深度融合,导致学生难以系统掌握电力、电子、自动化等多领域知识,毕业后无法迅速满足实际工作需求。另一方面,企业内部的人才培训体系不够完善,对新技术、新规范的培训更新不及时,无法有效提升员工的综合能力。此外,行业对复合型人才吸引力不足,薪资待遇、职业发展空间等因素使得优秀人才流入其他领域。复合型设计人才的匮乏,使得电力设计难以紧跟技术创新步伐,影响电力工程整体的创新性与高效性,成为行业持续发展的瓶颈。

参考文献

- [1] 李泽宇. 忆阻混沌电路设计及混沌图像加密在电力工程中的应用 [D]. 安徽理工大学, 2021.
- [2] 王映翰. 电力工程项目管理系统的设计与实现 [D]. 电子科技大学, 2021.
- [3] 肖晗. 大数据技术在 S 电力工程公司工程项目内审中的应用研究 [D]. 河北地质大学, 2022.
- [4] 李阳. 基于 JavaWeb 的电力工程项目管理系统的设计与实现 [D]. 电子科技大学, 2021.
- [5] 任佳宁. 基于北斗导航的电力工程作业在线监管平台设计 [D]. 哈尔滨工程大学, 2021.
- [6] 范子恺, 何宏杰, 于向阳, 等. 三维设计技术在电力设计中的应用 [J]. 光源与照明, 2023, (02): 219-221.
- [7] 钱锦怡, 钱峻, 吴岚. 电力工程输电线路设计分析 [J]. 电子元器件与信息技术, 2023, 7(11): 153-156.
- [8] 张强. 电力工程输电线路设计分析 [J]. 光源与照明, 2023, (02): 234-236.
- [9] 靳双源. 电力系统规划设计在电力工程设计中的应用 [J]. 居业, 2021, (06): 17-18.
- [10] 黎璐. 信息通信网络的内涵及发展趋势 [J]. 数字通信世界, 2021, (04): 205-206.

(三) 系统化解决方案

1. 跨领域协同设计机制

在电力设计领域,跨领域协同设计机制至关重要。电力工程涉及电气、土木、机械等多个领域,需打破专业壁垒,实现高效协同。一方面,通过建立统一的数据平台,各领域设计师可实时共享和更新设计信息,确保数据的一致性与准确性。例如,电气设计师完成电缆桥架布置后,土木设计师能即刻获取信息,合理规划建筑结构,避免空间冲突。另一方面,构建有效的沟通机制,定期组织跨领域交流会议,让不同专业人员充分交流设计思路与需求。像针对变电站设计,机械专业提出设备尺寸与安装要求,电气专业依据此优化电气布局,共同推动设计完善。这种跨领域协同设计机制,能够整合各方优势,显著提升电力设计的质量与效率,助力电力工程顺利实施。

2. 全产业链创新生态建设

全产业链创新生态建设旨在打破电力设计、设备制造、施工建设等各环节之间的壁垒,实现电力工程全流程的无缝对接与协同创新。科研机构专注于前沿技术研究,为电力设计提供理论支撑与创新思路;设计单位依据科研成果,将创新理念融入电力工程设计方案,优化设计参数与布局;制造企业则根据设计要求,研发制造高性能、智能化的电力设备,推动技术成果转化。通过建立信息共享平台,各方实时沟通交流,及时解决技术难题,加速创新成果应用。同时,鼓励上下游企业开展联合研发项目,共同制定行业标准,提升全产业链的整体竞争力,营造良性循环、协同共进的创新生态,助力电力工程行业高质量发展。

五、总结

电力设计在电力工程中占据关键地位,其核心价值体现在确保电力系统的安全、稳定与高效运行,为工程实践提供关键支撑。随着时代发展,电力设计不断演进,从传统模式逐渐向智能化、数字化方向转变。在智能电网与数字技术深度融合的大背景下,电力设计将沿着更加智能、高效、绿色的路径发展。同时,面对碳中和目标,电力设计行业的转型升级迫在眉睫,需要通过技术创新、优化流程等手段,提高能源利用效率,减少碳排放。未来,电力设计需不断适应新技术、新需求,为电力工程的可持续发展注入新动力,在保障电力供应的同时,助力实现能源领域的低碳转型,引领电力行业迈向新的高度。

装配式建筑电气预埋精准定位施工技术 及全站仪坐标控制方法研究

冯海蓝

广东庞源工程机械有限公司, 广东 广州 510665

DOI:10.61369/WCEST.2025110009

摘 要 : 本文围绕装配式建筑电气预埋精准定位展开, 阐述电气系统及预埋件重要性, 分析定位精度影响因素, 提出改进施工次序、运用多种技术及管理机制等措施, 涵盖坐标控制、全过程测量等, 还介绍多专业平台、节点库等建设, 最后表明技术成效显著并给出发展建议。

关 键 词 : 装配式建筑; 电气预埋; 精准定位

Research on Precision Positioning Construction Technology and Total Station Coordinate Control Method for Prefabricated Building Electrical Pre embedding

Feng Hailan

Guangdong Pangyuan Engineering Machinery Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510665

Abstract : This article focuses on the precise positioning of electrical pre embedded components in prefabricated buildings, explaining the importance of electrical systems and pre embedded parts, analyzing the factors affecting positioning accuracy, proposing measures to improve construction sequence, use various technologies and management mechanisms, covering coordinate control, whole process measurement, etc. It also introduces the construction of multi professional platforms, node libraries, etc. Finally, it shows significant technical achievements and provides development suggestions.

Keywords : prefabricated building; electrical pre embedding; precise positioning

引言

随着《关于推动智能建造与建筑工业化协同发展的指导意见》在2020年7月发布, 装配式建筑迎来新发展契机, 其电气预埋精准定位成为关键。装配式建筑电气系统复杂, 电气预埋件功能重要, 其定位精度影响整体质量。国内外标准差异及国内技术缺口凸显完善规范体系的必要。施工中, 预制构件脱模变形、现场拼装累积误差、管线碰撞等增加定位难度。基于此, 一系列技术与管理措施涌现, 如改进施工次序、运用坐标控制技术等, 旨在提升定位精度, 契合政策对建筑工业化与智能化的要求。

一、装配式建筑电气预埋精准定位基础理论

(一) 装配式建筑电气系统组成及预埋件功能

装配式建筑电气系统涵盖电力供应、照明、弱电等多个子系统。电力供应系统负责为建筑内各类设备提供电能, 照明系统满足不同区域的光照需求, 弱电系统如通信、安防等则保障建筑智能化功能实现。电气预埋件作为电气系统安装的基础, 具有重要功能。它需承载电气设备的重量与负荷, 为设备提供稳固支撑。同时, 预埋件是电气线路连接与敷设的关键节点, 确保线路走向准确与电气连接可靠。在装配式建筑中, 预埋件需依据电气系统规划精准集成, 以保障整体性能。借助 BIM 技术, 能对预埋件空

间位置进行精确解析, 全面模拟其在建筑空间中的位置、与其他构件关系等, 为实现电气预埋精准定位奠定基础^[1]。

(二) 预埋件定位精度控制规范体系

在装配式建筑电气预埋施工中, 定位精度至关重要。对比国内外建筑工业化标准, 能发现不同地区对于预埋偏差的允许范围存在差异。国外部分先进标准对电气预埋件的定位精度要求极为严格, 偏差范围被控制在极小区间, 以确保电气系统后续安装与使用的稳定性。而国内现行验收规范虽有相关要求, 但在某些细节方面仍存在技术缺口^[2]。例如, 在复杂节点部位的预埋件定位精度规定不够细化, 难以满足装配式建筑日益多样化与精细化的需求。这种技术缺口可能导致施工过程中对预埋件定位精度把控

不一致，影响整体施工质量。因此，构建更为完善、精细且与装配式建筑特点相适配的预埋件定位精度控制规范体系，对于提升电气预埋精准定位水平具有关键意义。

二、电气预埋精准定位施工技术分析

（一）精准定位关键技术难点

在装配式建筑电气预埋精准定位施工中，预制构件脱模变形会导致电气预埋位置的初始偏差。脱模过程中，构件受外力及自身重力等因素影响，产生不可避免的变形，使得原本预设的电气预埋点位置发生改变^[3]。现场拼装累积误差同样不容忽视，从构件运输到吊装拼接，每一步操作都可能带来细微误差，随着拼装工作的推进，这些误差不断累积，最终对电气预埋精准定位造成显著影响。另外，管线碰撞问题也极大增加了精准定位难度。在有限的预制构件空间内，电气管线需与其他专业管线共同布置，若各专业之间缺乏有效协同，很容易出现管线碰撞，进而影响电气预埋的精准定位，必须综合考虑多方因素，才能更好地实现电气预埋的精准定位。

（二）智能化施工工艺流程优化

基于模块化吊装的施工次序改进方案，优化了传统装配式建筑电气预埋施工流程。此方案依据电气预埋的特点及建筑结构，合理规划模块吊装顺序，使得电气预埋与各施工环节衔接更紧密，减少施工干扰与返工概率。同时，结合三维激光扫描技术建立逆向校核机制^[4]。该技术能够快速、精确获取施工现场的三维空间数据，与电气预埋设计模型对比，及时发现偏差。利用这些偏差数据反向调整施工流程，优化后续施工工艺，确保电气预埋位置更精准。这种智能化施工工艺流程优化，不仅提升了电气预埋精准度，还提高了整体施工效率与质量，为装配式建筑电气施工提供科学、高效的技术路径。

三、全站仪坐标控制方法研究

（一）全站仪坐标控制技术原理

1. 三维坐标系转换算法

在全站仪坐标控制技术原理中，三维坐标系转换算法至关重要。首先需建立 BIM 模型坐标系与施工坐标系转换模型。BIM 模型坐标系基于建筑信息模型构建，而施工坐标系是施工现场实际使用的坐标系。这两者之间存在差异，需通过特定算法进行转换。通过推导最小二乘法下的平差计算式来实现精确转换。最小二乘法可使观测值与理论值之间的误差平方和达到最小，以此优化坐标转换的精度。利用该平差计算式，结合实际测量数据，对坐标系间的转换参数进行求解，从而实现从 BIM 模型坐标系到施工坐标系的准确转换，为装配式建筑电气预埋精准定位提供坐标控制基础^[5]。

2. 动态测量误差补偿技术

在全站仪坐标控制技术中，动态测量误差补偿技术至关重要。由于在实际测量过程中，温度、震动等多源干扰因素会对测

量精度产生较大影响，导致测量结果出现偏差。因此开发基于卡尔曼滤波的温度、震动等多源干扰因素补偿算法成为提升动态测量精度的关键举措。卡尔曼滤波算法能够利用系统的状态方程和观测方程，通过预测和更新两个步骤，对测量数据进行实时处理与优化^[6]。该算法可有效过滤掉噪声干扰，精准地估计系统的状态，进而补偿因温度、震动等因素引起的动态测量误差，显著提升全站仪在复杂环境下坐标测量的精准度，为装配式建筑电气预埋精准定位施工提供可靠的数据支持。

（二）施工阶段坐标控制实施路径

1. 全过程测量控制网络架构

全过程测量控制网络架构基于基准点组网、控制网优化、测量机器人联动的三阶段控制体系展开。首先进行基准点组网，在施工现场科学选取多个基准点，这些点需具备良好的通视条件且分布均匀，通过高精度测量仪器精确测定其坐标，构建起初始的基准点网络^[7]。接着开展控制网优化，运用专业的平差计算方法，对基准点组网的数据进行分析处理，削弱误差影响，提高控制网的精度和可靠性。最后实现测量机器人联动，借助智能化的测量机器人，与优化后的控制网进行实时数据交互，自动采集坐标数据，实现对装配式建筑电气预埋位置的动态、精准测量与控制，确保施工过程中电气预埋位置的精准度满足设计要求。

2. 数字化放样技术融合应用

在施工阶段坐标控制实施路径中，数字化放样技术融合应用起着关键作用。通过集成 BIM 模型与全站仪测量系统，构建从虚拟设计到实体定位的闭环控制系统^[8]。利用 BIM 模型的可视化与参数化特性，精确提取电气预埋位置信息，并转化为全站仪可识别的坐标数据。全站仪依据这些数据进行现场精准放样，实现对电气预埋位置的精确控制。同时，在放样过程中，实时采集现场实际坐标数据反馈至 BIM 模型，对模型进行动态更新与修正，及时发现并纠正偏差，确保虚拟设计与实体施工的高度一致，进而提高装配式建筑电气预埋的精准定位，保障施工质量与效率。

四、技术方案集成管理与质量控制

（一）工程技术管理体系构建

1. PDCA 循环管理机制设计

PDCA 循环管理机制设计围绕方案评审、过程监控、偏差预警展开。方案评审阶段，组织电气、施工等多专业人员对装配式建筑电气预埋精准定位施工技术及全站仪坐标控制方案进行全面评估，确保方案的科学性与可行性。在过程监控环节，依据既定方案，运用信息化手段对施工全过程进行实时跟踪，采集电气预埋位置、全站仪测量数据等关键信息。一旦发现数据偏离预设标准，立即启动偏差预警机制。基于预警信息，分析偏差产生原因，从技术、人员、材料等方面制定针对性改进措施，形成 PDCA 循环，不断优化施工过程，保障电气预埋精准定位施工质量^[9]。

2. 多专业协同管理平台开发

为满足装配式建筑电气预埋精准定位施工需求，开发多专业协同管理平台。该平台基于 BIM 技术，以实现土建与机电专业的

高效协同作业^[10]。通过整合各专业模型，形成一个统一的数字化工作环境，让不同专业人员能在此环境下进行实时沟通与协作。平台具备测量数据实时共享功能，施工人员可随时获取并查看最新测量数据，保证各专业依据同一数据开展工作，避免因数据不一致导致的定位偏差。同时，其追溯功能可记录测量数据的整个流转过程，便于在出现问题时迅速溯源，分析问题产生的环节与原因，从而及时采取纠正措施，确保电气预埋精准定位施工的顺利进行，提升施工质量与效率。

（二）技术方案设计优化策略

1. 标准化预埋节点模块库建设

在装配式建筑电气预埋施工中，标准化预埋节点模块库建设至关重要。通过深入研究不同户型体系的电气需求，全面收集各类相关数据，研发出覆盖多种户型体系的标准化预埋节点数据库。该数据库能够精准反映不同户型电气预埋的位置、规格等关键信息。在设计阶段，设计人员可直接依据数据库中的标准节点模块进行设计，极大提高设计效率与精准度。同时，该模块库还具备动态更新功能，随着施工实践经验的积累和技术发展，不断优化完善节点模块，确保其始终符合最新的施工要求和技术标准，从而为装配式建筑电气预埋的精准定位提供坚实的技术支撑。

2. 可调节式预埋套管装置设计

可调节式预埋套管装置通过创新设计，具备三维微调功能，有效解决施工误差吸收难题。该装置采用特殊结构，能在 X、Y、Z 三个维度对预埋套管进行精准调节。其主体结构坚固，确保在混凝土浇筑等施工过程中稳定可靠。装置上设置了高精度的调节旋钮或螺杆，施工人员可依据全站仪测量数据，灵活且精确地调整预埋套管的位置。比如，当全站仪测得某预埋套管在水平方向存在偏差时，可通过调节旋钮将其在 X 或 Y 轴方向移动至准确位置；若垂直方向有误差，利用 Z 轴方向的调节结构进行微调。这种设计优化，大大提高了预埋套管定位的精准度，为装配式建筑电气预埋精准定位施工提供有力技术支持。

（三）全过程质量控制方法

1. 关键工序质量管控要点

在装配式建筑电气预埋精准定位施工中，关键工序质量管控要点至关重要。预制阶段，模具检验需严格把控尺寸精度，其偏

差应控制在极小范围内，保证模具表面平整光滑，避免因模具问题影响电气预埋位置准确性。钢筋绑扎时，要确保电气线管与钢筋固定牢固，防止振捣过程中线管移位。拼装阶段的定位复测是关键，借助全站仪坐标控制方法，对已预埋电气构件的位置进行精准测量，与设计坐标对比，若偏差超出允许范围，及时调整。在混凝土浇筑工序，需安排专人看护，防止振捣棒触碰导致电气预埋部件偏移，通过对这些关键工序的严格质量管控，保障装配式建筑电气预埋精准定位施工质量。

2. 质量追溯区块链技术应用

在装配式建筑电气预埋精准定位施工中，区块链技术为质量追溯提供了有力支持。通过将测量数据上链存储，可极大保障质量数据的不可篡改性。测量人员对电气预埋位置进行精准测量后，相关数据实时上传至区块链。每个数据块包含测量时间、测量值、测量人员等详细信息，且数据一经记录便无法被篡改。这使得在后续施工过程中，若出现电气预埋位置偏差等质量问题，能够快速、准确追溯到测量环节的原始数据，明确责任主体，分析问题产生的原因，从而采取针对性措施解决问题，同时也为后续类似项目提供可靠的数据参考，有效提升装配式建筑电气预埋精准定位施工的整体质量。

五、总结

研究表明，全站仪坐标控制技术在装配式建筑电气预埋精准定位施工中成效显著，能将定位精度提升至 $\pm 2\text{mm}$ 级别，有效解决了定位偏差问题。同时，构建的标准化施工体系大幅降低返工率达 37%，提高了施工效率与质量，节约了成本。此外，所提出的三维动态补偿算法为智能建造装备研发奠定理论基础，助力行业技术升级。基于以上成果，建议进一步加强 BIM+ 测量机器人集成技术的深度开发，充分发挥二者优势，为装配式建筑电气预埋精准定位施工提供更先进、高效的技术手段，推动行业朝着智能化、精准化方向发展。

参考文献

[1] 杨长浩. 装配式建筑施工安全风险管理与控制研究 [D]. 西安建筑科技大学, 2021.
[2] 李科达. 基于 SD 的装配式建筑施工成本控制研究 [D]. 沈阳建筑大学, 2022.
[3] 常立新. 装配式建筑施工风险评价研究 [D]. 华北电力大学 (北京), 2021.
[4] 龚培镇. 装配式建筑施工安全风险智能诊断方法及应用研究 [D]. 东南大学, 2021.
[5] 刘晓之. 装配式建筑电气设计优化探究 [D]. 华南理工大学, 2021.
[6] 弓秀梅. 大跨度异形钢结构预埋螺栓精准定位技术研究 [J]. 建材发展导向 (上), 2022, 20(7): 7-9.
[7] 雒加岩, 杨保坤, 王晓航. 装配式混凝土建筑预制柱钢筋精准定位快速施工技术 [J]. 建筑施工, 2021, 43(10): 2048-2050.
[8] 杨柱. 高层建筑电气预埋模块化施工技术 [J]. 科学技术创新, 2024(14): 151-154.
[9] 马文斌. 装配式建筑机电预留预埋施工技术探析 [J]. 四川建材, 2024, 50(2): 98-99.
[10] 马文斌. 装配式建筑机电预留预埋施工技术探析 [J]. 四川建材, 2024, 50(2): 98-99.

电力工程继电保护调试与电气试验中的质量检验路径分析

成祥玉

广东珠三角电力工程技术有限公司, 广东 江门 519000

DOI:10.61369/WCEST.2025110010

摘 要 : 电力工程继电保护调试与电气试验的质量检验意义重大。系统性方法贯穿设备选型到运行维护全流程, 当前智能检测技术与标准化建设是关键。文中探讨了检验流程、常见缺陷及改进路径, 强调全周期检验流程整合、信息交互平台构建等的重要性, 案例证明协同优化可提升效率与质量。

关 键 词 : 电力工程; 继电保护调试; 电气试验

Analysis of Quality Inspection Path in Relay Protection Debugging and Electrical Testing of Power Engineering

Cheng Xiangyu

Guangdong Pearl River Delta Power Engineering Technology Co., Ltd., Jiangmen, Guangdong 519000

Abstract : The quality inspection of relay protection commissioning and electrical testing in power engineering is of great significance. The systematic approach runs through the entire process of equipment selection to operation and maintenance, and the current intelligent detection technology and standardization construction are key. The article discusses the inspection process, common defects, and improvement paths, emphasizing the importance of integrating the full cycle inspection process and building an information exchange platform. The case proves that collaborative optimization can improve efficiency and quality.

Keywords : power engineering; relay protection debugging; electrical test

引言

《“十四五”国家能源规划》(2021 年颁布)明确提出要提升能源基础设施质量, 保障能源安全稳定供应。在此背景下, 电力工程继电保护调试与电气试验的质量检验意义重大。它通过对材料、设备、工艺等的检查, 确保电力工程符合标准, 保障电力系统稳定安全。从传统检验技术到标准化流程、智能化监测, 从全周期检验流程整合到信息交互平台构建, 质量检验不断优化。然而, 当前仍需深化智能检测技术应用, 加快标准化建设, 以契合政策要求, 进一步提升电力工程质量, 确保电力可靠供应。

一、电力工程质量检验理论概述

(一) 质量检验的基本概念与作用

电力工程质量检验是指通过一系列技术手段和方法, 对电力工程建设过程中的材料、设备、工艺以及最终成果进行检查、测试与验证的活动。其核心目标在于确保电力工程满足相关标准、规范和设计要求^[1]。在保障电力系统稳定性和安全性方面, 质量检验意义重大。一方面, 通过对材料和设备质量的严格把关, 可避免因质量不佳引发的故障与事故, 维持电力系统稳定运行。另一方面, 对施工工艺的检验, 能保证工程按标准执行, 减少因工艺缺陷带来的安全隐患。同时, 对电力工程整体质量的检验, 为

电力系统长期安全运行奠定基础, 确保电力可靠供应, 满足社会生产生活用电需求。

(二) 继电保护与电气试验的检验对象及方法

继电保护的检验对象主要包括各类继电器、保护装置及二次回路等。对继电器, 需检验其动作特性, 如动作电流、动作时间等参数是否符合设计要求。对于保护装置, 要检验其逻辑功能, 包括各种保护判据的正确性。二次回路则着重检验其接线的正确性与完整性。电气试验的检验对象涵盖电气设备, 像变压器、断路器等。针对变压器, 要进行绕组直流电阻测量、绝缘电阻测量等试验, 通过测量这些参数来判断变压器内部绕组的连接情况和绝缘性能。对于断路器, 要检验其分合闸时间、同期性等参数。

传统检验技术如人工观察与简单仪表测量，虽能发现一些明显问题，但在复杂故障诊断与精确参数测量上存在局限，难以满足现代电力系统对继电保护和电气设备高可靠性、高精度的要求^[2]。

二、继电保护调试中的质量检验路径分析

（一）继电保护调试流程与关键参数检验

继电保护装置调试需遵循标准化流程，从装置的初始检查开始，仔细核对装置外观、硬件配置等是否符合要求。随后进行通电检查，观察装置运行状态。接着开展模拟量校验，通过试验仪器输入不同幅值、相位的电流、电压模拟量，验证装置测量的准确性。

动作特性检验是关键环节，需模拟各种故障场景，如相间短路、接地短路等，观察保护装置能否按照预定逻辑可靠动作，动作时间是否在规定范围内。定值精度检验也不容忽视，依据设定的定值，检验装置在接近动作边界时的动作情况，确保定值的准确性与可靠性。这些核心参数的检验指标体系^[3]为继电保护装置调试质量提供有力保障，只有严格按照标准化流程和检验指标进行调试，才能确保继电保护装置在电力系统中可靠运行。

（二）调试质量缺陷识别与改进路径

在继电保护调试中，常见的质量缺陷包括绝缘故障和逻辑误动等。绝缘故障可能源于设备老化、受潮等，影响设备正常运行甚至引发安全事故；逻辑误动则可能因保护装置逻辑设置错误、二次回路接线不当等造成。为识别这些缺陷，可利用智能化监测手段，实时收集设备运行参数、状态信息等，通过数据分析与智能算法，精准定位潜在问题^[4]。针对已识别的缺陷，一方面可优化设备选型与安装工艺，提高设备绝缘性能与接线可靠性；另一方面，强化对保护装置逻辑的审核与验证，确保逻辑设置正确无误。通过这些改进路径，提升继电保护调试质量，保障电力系统安全稳定运行。

三、电气试验中的质量检验路径优化

（一）电气设备试验的核心检验项目

在电气试验中，绝缘耐压试验和断路器特性测试是核心检验项目。绝缘耐压试验能检测电气设备绝缘性能，判断其能否承受运行电压。试验时，需严格控制试验电压、时间等参数，依据相关标准，通过高精度仪器测量绝缘电阻、泄漏电流等数据，对设备绝缘状况精准评估^[5]。断路器特性测试旨在确保断路器可靠动作。要测试其分合闸时间、同期性、速度等特性，借助专业测试设备，获取准确数据，分析断路器机械和电气性能，判断是否满足运行要求。通过建立针对这些核心检验项目的全过程质量监控机制，从试验准备、实施到结果分析，全面把控，保障电气设备试验质量，提升电力系统运行可靠性。

（二）试验数据可靠性评估与校验方法

在电气试验中，试验数据的可靠性关乎整个试验的质量。需深入探讨试验数据误差来源，这可能涉及测量仪器精度、环境因

素干扰、人为操作不当等。为提升数据可靠性，基于冗余测量与算法校验的质量控制技术路径尤为关键。通过冗余测量，即使用多个相同或相似的测量设备对同一参数进行测量，可有效降低随机误差影响，若不同设备测量结果相近，则数据可靠性提升^[6]。同时，运用算法校验，借助特定算法对测量数据进行分析，检查其是否符合物理规律和预期范围，若数据偏离合理范围，算法能及时发出警示，从而确保试验数据准确可靠，为电气试验质量提供坚实保障。

四、质量检验路径的协同优化与应用实践

（一）调试与试验检验的协同工作机制

1. 全周期检验流程整合

在电力工程继电保护调试与电气试验中，全周期检验流程整合至关重要。设计从设备安装到投运的跨阶段检验流程整合模型，可有效实现检验闭环管理。在设备安装阶段，针对继电保护装置的施工工艺、接线正确性等进行严格检验，确保硬件基础可靠；电气试验环节，对设备绝缘性能、电气参数等开展精准测试，为设备投运提供数据支撑。继电保护调试时，模拟各种故障场景，验证保护动作的准确性与可靠性。通过整合各阶段检验流程，让不同环节的检验结果相互印证、补充，形成完整的检验链条，实现从设备安装伊始到最终投运整个周期的质量把控，避免因流程脱节造成质量隐患，保障电力工程安全稳定运行^[7]。

2. 信息交互平台构建

为实现电力工程继电保护调试与电气试验质量检验路径的协同优化，需构建有效的信息交互平台。通过开发基于数字孪生的检验数据共享系统，打破调试与试验环节间的信息壁垒。该系统以数字孪生技术为支撑，能精准映射实际设备状态与运行参数，使调试与试验人员可实时获取、共享全面且准确的质量信息。借助这一平台，调试人员能及时了解试验数据，依据试验结果调整调试策略；试验人员也能参考调试情况，针对性开展试验。如此，强化了调试与试验环节的质量信息协同，提升整体工作效率与质量，推动电力工程继电保护调试与电气试验工作的高效开展^[8]。

（二）智能化检验技术集成应用

1. 在线监测技术应用

在电力工程继电保护调试与电气试验中，在线监测技术应用极为关键。研究继电保护装置在线诊断技术，通过对装置运行数据的实时采集与分析，可精准掌握装置的工作状态。借助传感器、通信网络等技术，将装置各关键部件的电气参数、运行温度等数据实时传输至监测系统。运用智能算法对这些数据进行深度挖掘与分析，能够及时发现潜在故障隐患。在此基础上，建立实时质量预警系统，设定合理的预警阈值，一旦监测数据超出阈值，系统立即发出警报，提醒工作人员及时处理，从而有效保障继电保护装置的可靠运行，确保电力工程的整体质量^[9]。

2. 大数据分析平台建设

大数据分析平台建设对于电力工程继电保护调试与电气试验质量检验路径的优化至关重要。平台建设应整合各类试验设备采

集的数据,涵盖不同时段、不同工况下继电保护装置和电气设备的运行参数。运用先进的数据清洗与预处理技术,去除噪声和异常数据,确保数据的准确性与一致性。在此基础上,搭建数据挖掘与分析模块,结合深度学习、机器学习算法,如神经网络、决策树等^[10],深度挖掘数据中潜在的规律和特征,构建试验数据深度挖掘模型,以实现和质量问题的智能诊断与预测,助力技术人员提前发现潜在隐患,为电力工程的安全稳定运行提供有力的数据支持。

（三）典型工程实践与效果验证

1.220kV变电站改造项目分析

以某 220kV 变电站改造项目为例,在继电保护调试与电气试验过程中,应用质量检验路径的协同优化策略。从调试前期准备,对设备参数精准核对,到试验过程中采用先进检测设备及科学方法,多环节紧密协同。继电保护装置调试时,与电气试验数据实时交互比对,发现偏差及时修正。如此一来,有效缩短了调试周期。传统方式下该变电站改造调试预计需 60 天,应用协同检验路径后,实际仅用 50 天完成。同时,返修率显著降低,从过往类似项目平均 10%降至 3%。通过此项目实践充分证明,质量检验路径的协同优化在电力工程中能切实提升效率、保障质量。

2.检验合格率对比分析

在电力工程继电保护调试与电气试验中,统计应用新型检验路径前后关键设备一次投运成功率等核心指标变化,能直观体现

其效果。以某典型电力工程为例,在应用新型检验路径前,关键设备检验合格率处于一定水平,但仍存在因检验疏漏导致的故障隐患。应用新型检验路径后,通过对检验流程、方法等的协同优化,检验过程更为全面、精准。对比发现,关键设备一次投运成功率显著提升,设备运行初期故障发生率明显降低。这表明新型检验路径有效避免了检验盲区,提高了检验质量,进而提升了整体电力工程的可靠性,为电力系统稳定运行奠定坚实基础。

五、总结与展望

在电力工程继电保护调试与电气试验中,质量检验至关重要。系统性的质量检验方法涵盖从设备选型到运行维护的全流程。在设备选型阶段,严格筛选符合标准的产品,为后续调试与试验奠定基础;调试过程中,对各项参数细致检测与调整,确保保护装置精准动作;电气试验则通过多种试验手段全面评估设备性能。当前,智能检测技术的应用已成为重要突破方向,利用智能化手段可提升检测效率与准确性。同时,标准化建设需求迫切,统一的标准能规范操作流程,提高不同项目质量检验的一致性与可靠性。未来,应持续深化智能检测技术应用,加速标准化建设进程,进一步提高电力工程继电保护调试与电气试验的质量,保障电力系统安全稳定运行。

参考文献

[1] 倪盛繁. 电力工程施工过程中的造价管理与控制研究 [D]. 天津工业大学, 2021.
[2] 周佳颖. 可柔性配置的电力工程施工监管系统的设计与实现 [D]. 华中科技大学, 2022.
[3] 易敏. 基于 PHP 的电力工程造价管理软件系统设计与实现 [D]. 电子科技大学, 2021.
[4] 石文亮. 基于 CBR 的电力工程造价预算系统研究与实现 [D]. 华中科技大学, 2021.
[5] 郝克. 基于无功补偿的特高压电力工程分系统调试大回路注流试验研究与应用 [D]. 山东大学, 2021.
[6] 王荣琛. 电力变压器的电气试验与继电保护探讨 [C]// 中国电力技术市场协会 .2023 年电力行业技术监督工作交流会暨专业技术论坛论文集（上册）. 神华（防城）新能源有限责任公司, 2023: 1086-1089.
[7] 陈勇. 电力变压器的电气试验与继电保护 [J]. 电子技术与软件工程, 2022, (17): 115-118.
[8] 潘勇. 数字化变电站继电保护调试技术研究 [J]. 通讯世界, 2018, 25(12): 190-191.
[9] 王斌. 试述智能变电站继电保护调试关键问题及解决措施 [J]. 电子元器件与信息技术, 2019, 3(12): 87-88.
[10] 李高峰. 智能变电站继电保护调试关键问题及解决措施 [J]. 通信电源技术, 2018, 35(06): 240-241.

电气工程领域供配电智能化控制系统的设计与施工管理探究

柏斗

广东 东莞 523000

DOI:10.61369/WCEST.2025110011

摘 要： 本文围绕电气工程领域供配电智能化控制系统展开，介绍基于功能层级模型构建的总体架构，阐述核心控制模块设计规范。提出运用BIM技术优化施工流程，强调施工管理中质量与安全控制要点。还涉及智能监控系统故障诊断、低压配电系统改造等，探讨施工技术难题及解决办法，阐述运维阶段关键环节及技术应用。

关 键 词： 供配电智能化；施工管理；运维技术

Design and Construction Management Exploration of Intelligent Control System for Power Supply and Distribution in the Field of Electrical Engineering

Bai Dou

Dongguan, Guangdong 523000

Abstract： This article focuses on the intelligent control system for power supply and distribution in the field of electrical engineering, introduces the overall architecture based on the functional hierarchy model, and elaborates on the design specifications of the core control module. Propose to use BIM technology to optimize the construction process, emphasizing the key points of quality and safety control in construction management. It also involves intelligent monitoring system fault diagnosis, low-voltage distribution system transformation, etc., exploring construction technology difficulties and solutions, elaborating on key links and technical applications in the operation and maintenance stage.

Keywords： intelligent power supply and distribution; construction management; operation and maintenance technology

引言

随着《关于推进智能电网建设的指导意见》（2015 年颁布）的推行，电气工程领域供配电智能化控制系统的发展至关重要。该系统从总体架构搭建、核心控制模块设计，到施工流程优化、施工管理等多方面进行全面革新。在技术实现上，涵盖传感器应用、通信协议处理、故障诊断算法开发等。然而施工与运维中面临异构设备通信、电磁干扰、进度控制等难题。政策的支持为其发展提供契机，通过解决现存问题，能推动该系统向更高效、智能方向发展，满足电力行业对智能化供配电的需求。

一、供配电智能化控制系统设计原理

（一）智能化供配电系统总体架构设计

智能化供配电系统总体架构基于功能层级模型构建。底层由各类传感器组成，负责实时采集诸如电压、电流、温度等运行参数，为系统提供基础数据支撑^[1]。中间层是数据传输与处理环节，将传感器收集的数据高效传输至中央控制单元，并进行初步处理。中央控制单元作为系统核心，具备强大的数据处理与决策能力，依据预设算法与策略，对采集数据进行深度分析，进而下达精准控制指令。在系统集成架构方面，注重从底层传感器到中央控制单元的无

缝衔接，确保数据传输的及时性与准确性。对于高低压设备，协同设计原则至关重要，需保证高低压设备在运行过程中相互配合、协调一致，共同保障供配电系统的稳定、高效运行。

（二）核心控制模块设计规范

在供配电智能化控制系统中，核心控制模块设计规范极为关键。针对物联网关控制逻辑，需确保其精准且高效地对供配电系统运行状态进行监测与调控，依据系统的不同运行场景与需求，设计合理的逻辑判断流程，使系统能迅速响应各类状况^[2]。对于继电保护算法，要以保障供配电系统安全稳定运行为目标，遵循相关行业标准与规范，优化算法以准确识别故障类型、位置及严

重程度，并快速执行保护动作，防止故障扩大。通信协议方面，应采用标准化协议，实现各设备间稳定、准确的数据传输与交互，保障系统整体的协调运行。模块化设计方法应用于高低压成套设备时，需明确各模块功能，确保模块间接口标准化，便于安装、维护与扩展，提升系统的可靠性与灵活性。

二、智能化控制系统施工管理体系

（一）施工流程优化与 BIM 技术应用

在电气工程领域供配电智能化控制系统施工流程优化方面，将 BIM 技术融入其中可带来显著效益。借助 BIM 技术构建三维模型，能够对电缆敷设、设备安装等关键工序进行协同优化。在电缆敷设环节，三维模型可直观呈现电缆走向与空间布局，提前发现潜在碰撞冲突，合理规划路径，减少不必要的迂回与交叉，提高敷设效率与准确性。对于设备安装，能模拟设备就位过程，提前评估安装空间与操作可行性，精准确定设备位置与连接方式，确保安装顺利进行。通过 BIM 技术在各工序的协同优化，实现施工流程的高效、精准，提升供配电智能化控制系统整体施工质量^[3]。

（二）质量与安全控制要点

在电气工程领域供配电智能化控制系统的施工管理中，质量与安全控制极为关键。对于智能控制柜，要严格把控安装精度，从柜体基础制作、安装位置确定到固定螺栓紧固等环节，都需按规范操作，确保柜体垂直、水平度达标，为后续电气元件稳定运行奠定基础。接地系统阻抗关乎系统安全与设备性能，需选用合适的接地材料，优化接地极布置，严格测量接地电阻，使其满足设计要求，保障故障电流顺利导入大地，避免人员触电和设备损坏。此外，制定完善的供配电系统调试标准流程，对系统进行全面测试，涵盖设备性能、功能联动等方面，及时发现并解决潜在质量与安全隐患，确保智能化控制系统安全可靠运行^[4]。

三、智能化系统研发案例分析

（一）高压成套设备智能监控系统开发

1. 智能化环网柜系统设计

在电气工程领域供配电智能化控制系统中，以智能化环网柜系统设计为例，通过物联网技术达成温度监测与故障定位功能，充分展现传感器网络在高压设备中的应用。在该系统设计里，于环网柜关键部位合理部署温度传感器与故障检测传感器，组成完备的传感器网络^[5]。这些传感器实时采集温度、运行状态等数据，并借助物联网通信模块将数据上传至监控中心。监控中心运用数据分析算法，对温度变化趋势进行精准分析，及时察觉潜在过热风险；同时，利用故障检测数据实现故障的快速定位。如此一来，运维人员能够依据这些信息提前制定维护策略，及时处理故障，保障高压成套设备的稳定运行，有效提升供配电智能化控制系统的可靠性与安全性。

2. 故障诊断算法开发

在高压成套设备智能监控系统的故障诊断算法开发中，研究基于深度学习的设备状态评估模型是关键环节。通过对高压开关柜的运行数据进行深度挖掘与分析，借助深度学习强大的特征提取和模式识别能力，来精准评估设备状态。同时，建立高压开关

柜异常放电特征数据库意义重大，该数据库收集并整理不同工况下高压开关柜异常放电的各类特征数据，如放电频率、强度、波形等。将这些数据作为深度学习模型的训练样本，能够使模型学习到异常放电的典型模式，从而实现对高压开关柜潜在故障的准确诊断与预警，为高压成套设备的稳定运行提供有力保障^[6]。

（二）低压配电系统智能化改造

1. 智能断路器系统集成

在电气工程领域供配电智能化控制系统中，低压配电系统智能化改造的智能断路器系统集成至关重要。对于具有远程分合闸功能的低压断路器设计，需综合考虑电气参数，如额定电流、短路分断能力等，确保其能在不同负载情况下稳定运行。同时，通信协议转换模块开发方案是实现智能控制的关键。要将断路器内部协议与外部智能控制系统协议进行有效转换，以便远程精确控制。通过合理设计转换算法，可实现不同通信协议间的无缝对接。例如采用特定的通信芯片与软件算法相结合，将断路器的 Modbus 协议转换为以太网 TCP/IP 协议，使智能控制系统能通过网络对断路器进行远程分合闸操作^[7]，从而提高低压配电系统智能化水平，保障电力供应的可靠性与安全性。

2. 能耗监控平台构建

在能耗监控平台构建中，数据采集终端与能源管理软件的接口开发技术至关重要。数据采集终端负责实时收集低压配电系统的各类能耗数据，如电压、电流、功率等^[8]。这些数据需精准且高效地传输至能源管理软件，这便依赖于接口开发技术。接口开发要确保数据的无缝对接，一方面，需依据数据采集终端的输出格式和协议，精心设计能源管理软件的数据接收模块，使两者在数据格式、通信协议等方面完全匹配。另一方面，要保证接口具备良好的稳定性与兼容性，能够适应不同环境及硬件设备的变化。通过先进的接口开发技术，将采集到的能耗数据准确无误地整合到能源管理软件中，为后续的用电分析、能耗评估以及节能策略制定提供坚实的数据基础，从而实现低压配电系统能耗的有效监控与智能化管理。

四、智能化施工技术挑战与对策

（一）系统集成技术难点

1. 异构设备通信兼容性问题

在电气工程领域供配电智能化控制系统的施工中，异构设备通信兼容性是一大关键难题。不同厂商设备常采用不同通信协议，如 Modbus 与 Profibus 协议，这给系统集成带来诸多阻碍。分析其技术瓶颈，一方面，两种协议的数据格式、传输速率、通信规则存在差异，导致数据交互困难。例如，Modbus 协议数据帧结构相对简单，而 Profibus 协议更为复杂，转换时易出现数据丢失或错误^[9]。另一方面，硬件接口标准不同，设备间物理连接适配也存在挑战。针对这些问题，解决方案可从软件与硬件两方面入手。软件上，开发专门的协议转换程序，对数据进行解析与重新封装；硬件上，设计通用的接口转换模块，实现不同协议设备间的物理连接，以此提升异构设备通信兼容性，保障供配电智能化控制系统的稳定运行。

2. 电磁干扰防护措施

在电气工程领域供配电智能化控制系统的施工中，电磁干扰

是不容忽视的系统集成技术难点。智能控制柜内强弱电共存，易产生电磁干扰，影响系统稳定运行。对此，需严格遵循强弱电隔离设计标准，从空间布局上确保两者保持安全距离，减少相互干扰。同时，积极创新屏蔽接地技术。一方面，选用优质屏蔽材料对弱电线路及敏感设备进行屏蔽，阻挡外界电磁干扰的侵入；另一方面，优化接地系统，降低接地电阻，确保干扰电流能快速、有效导入大地。接地系统的设计应充分考虑电气设备特性及现场环境，通过合理设置接地极、选择合适接地导线等措施，提升接地效果。只有通过这些电磁干扰防护措施，才能保障供配电智能化控制系统稳定、可靠运行^[10]。

（二）施工协同管理问题

1. 跨专业界面管理

在电气工程领域供配电智能化控制系统的施工中，跨专业界面管理是关键挑战。建筑、电气、自动化等专业间存在复杂的接口，各专业关注点和标准不同，易出现界面衔接不畅问题。例如建筑专业侧重于空间布局，电气专业注重电力分配，自动化专业关注系统智能控制，若沟通不足，会导致线路铺设与建筑结构冲突、自动化设备与电气系统不兼容等。因此，建立各专业协同作业流程极为必要，通过定期召开跨专业沟通会议，共享设计与施工进展，提前发现并解决潜在接口问题。同时，提出接口问题预警机制，利用信息化手段实时监测，一旦出现参数偏差或可能影响后续施工的隐患，及时发出预警，以便各专业团队迅速协调，确保供配电智能化控制系统施工顺利进行，提高整体工程质量。

2. 进度动态控制方法

在电气工程领域供配电智能化控制系统的施工中，进度动态控制至关重要。一方面，施工过程中存在诸多不确定因素，如设计变更、设备故障等，会对进度造成干扰。传统的进度计划难以实时应对这些变化，导致进度失控风险增加。另一方面，智能化系统施工涉及多种专业技术，各环节衔接紧密，若进度协调不当，易出现窝工、返工现象。为有效解决这些问题，可利用信息化手段，如 BIM 技术结合进度管理软件，实时监控施工进度，及时发现偏差并预警。同时，建立动态调整机制，依据实际情况灵活调整施工计划，合理调配资源，确保各工序按最优顺序推进，从而保障供配电智能化控制系统施工进度始终处于可控状态，实现高效、有序施工。

（三）运维阶段技术延伸

1. 智能巡检系统开发

在电气工程领域供配电智能化控制系统的运维阶段，智能巡

检系统开发是关键环节。通过设计基于机器视觉的配电设备状态自动识别系统架构，可有效实现智能巡检。该系统借助先进的机器视觉技术，对配电设备的外观、运行参数等进行实时监测与分析。一方面，能快速精准捕捉设备异常，如设备表面的破损、过热变色等，为及时维修提供依据。另一方面，通过对大量巡检数据的深度挖掘，可预测设备潜在故障，提前采取防范措施，保障供配电系统稳定运行。然而，开发过程中面临着图像识别精度受环境干扰、数据传输稳定性等挑战。需通过优化算法，增强对复杂环境的适应性，同时构建可靠的数据传输网络，确保巡检数据准确、及时传输，以实现高效智能的巡检功能。

2. 数字孪生技术应用

在电气工程领域供配电智能化控制系统的运维阶段，数字孪生技术应用具有重要意义。通过搭建供配电系统的三维可视化运维平台，数字孪生技术能够实现实时数据映射。借助传感器等设备收集系统运行的各类实时数据，如电压、电流、功率等，将其精准映射到虚拟的数字孪生模型中，运维人员可直观了解系统运行状态。同时，数字孪生技术助力实现预测性维护。利用历史数据与实时数据进行深度分析，构建故障预测模型，提前发现潜在故障隐患，及时安排维护工作，避免故障发生对供配电系统造成影响，提高系统运行的稳定性与可靠性，有效延长设备使用寿命，降低运维成本。

五、总结

智能化控制系统为电气工程领域供配电带来诸多变革。其技术创新点显著，例如实现了电力设备的实时监测与智能调控，极大提升供电可靠性与电能质量。在施工管理方面，建立智能化施工标准体系十分关键，它能规范施工流程，保障施工质量与效率，确保智能化控制系统有效落地。从发展趋势看，数字孪生与边缘计算技术的融合将为电气工程注入新活力。数字孪生可构建精准虚拟模型，辅助系统优化；边缘计算能在本地快速处理数据，降低网络延迟。二者结合可进一步提升供配电智能化水平，助力电气工程领域向更高效、智能、绿色方向迈进，为未来电力系统发展开拓广阔空间。

参考文献

- [1] 施后祥. 天河潭供配电工程施工管理研究 [D]. 贵州大学, 2021.
- [2] 王爱群. 高速公路施工过程中的环境安全管理探讨与实践 [D]. 中国矿业大学 (江苏), 2021.
- [3] 陶丽文. 设备备件智能化仓储管理系统设计与开发 [D]. 南昌大学, 2022.
- [4] 刘先国. 基于 BIM 的项目施工管理应用研究 [D]. 北京交通大学, 2021.
- [5] 杨金淞. 高压变电站辅助设备智能化控制系统设计 [D]. 长江大学, 2023.
- [6] 鲍立平. 浅谈建筑智能化系统设计与施工管理 [J]. 江西建材, 2021, 000(007): 63-65.
- [7] 王珊珊. 建筑智能化系统设计与施工管理思考 [J]. 佛山陶瓷, 2023, 33(6): 53-55.
- [8] 张斌. 浅谈智能化在建筑装饰装修施工管理中的应用 [J]. 建设科技, 2018(7): 76-77.
- [9] 杨建升. 电气工程中供电系统的施工管理实践探究 [J]. 中国设备工程, 2022(6): 247-248.
- [10] 郭林. 变电运维技术中的智能化技术探究 [J]. 电脑校园, 2019(1): 3091.

机电安装工程管理在锂离子电池制造中的应用与优化

黄荣惯

广东 佛山 528000

DOI:10.61369/WCEST.2025110012

摘 要： 介绍锂离子电池制造机电安装工程，包括其特殊工艺特性及对应机电安装要求，阐述全生命周期管理理论框架各阶段要点，还涉及规划、安全、风险评估、可视化预警等多方面内容，以及优化路径和未来发展方向。

关 键 词： 锂离子电池；机电安装；工程管理

Application and Optimization of Electromechanical Installation Engineering Management in Lithium-ion Battery Manufacturing

Huang Rongguan

Foshan, Guangdong 528000

Abstract： This paper introduces electromechanical installation engineering in lithium-ion battery manufacturing, covering its specific process characteristics and corresponding electromechanical installation requirements. It elaborates on key aspects of the full lifecycle management theoretical framework across various stages, encompassing planning, safety, risk assessment, visual early warning systems, and other multifaceted content. Optimization pathways and future development directions are also discussed.

Keywords： lithium-ion battery; electromechanical installation; engineering management

引言

锂离子电池制造在当今能源领域具有重要地位。其生产过程对环境和工艺要求严格，如电极制备需控湿，装配要清洁，化成分容需精准控温电流等。近年来，随着新能源产业相关政策的推进（如《新能源汽车产业发展规划（2021 - 2035年）》），锂离子电池制造产业迎来新机遇与挑战。这对机电安装工程提出了更高要求，涵盖洁净厂房建设、全生命周期管理、车间布局、特殊环境控制系统集成等多方面，同时施工安全、风险评估、应急处置等环节也至关重要，相关研究与实践不断发展以适应产业需求。

一、锂离子电池制造机电安装工程基础理论

（一）锂离子电池制造工艺特性与安装要求

锂离子电池制造具有独特的工艺特性。其生产过程对环境要求苛刻，例如在电极制备环节，需要严格控制湿度，以防材料受潮影响性能^[1]。装配过程要求高度清洁的环境，以避免杂质混入影响电池质量。化成分容阶段，对温度和电流的精准控制至关重要。

基于这些工艺特性，机电安装有特殊要求。洁净厂房的通风净化系统要能有效过滤空气中的微粒，保证空气质量达到相应等级。温湿度控制设备需精确调节环境温湿度，满足不同生产环节需求。防静电措施必不可少，包括防静电地板、接地系统等的合

理安装，防止静电对电池造成损害。

（二）机电工程全生命周期管理理论框架

机电工程全生命周期管理理论框架涵盖规划设计、施工管理、运维保障三个主要阶段。在规划设计阶段，需综合考虑锂离子电池制造工艺要求、场地条件等因素，制定科学合理的机电系统布局和设备选型方案^[2]。施工管理阶段涉及严格把控施工质量、进度和安全，确保机电设备安装符合设计标准和规范。这包括对施工人员的专业培训和管理，以及对施工过程的精细化监督。运维保障阶段则着重于建立完善的设备维护和故障预警机制，定期对机电设备进行检测和维护，以保障其长期稳定运行，满足锂离子电池制造生产需求。

二、机电安装工程在厂房规划中的应用实践

（一）车间平面布局与设备定位安装

在锂离子电池制造厂房规划中，机电安装工程的车间平面布局与设备定位安装至关重要。对于高精度设备基础施工，需精确测量和设计，确保设备安装的稳定性和准确性，满足锂离子电池生产的高精度要求^[3]。流水线空间优化方面，要根据生产流程和设备尺寸，合理规划流水线的走向和间距，提高生产效率，减少物料搬运时间。物料输送系统集成需考虑与车间平面布局的协调性，使物料能够高效、准确地在各生产环节间输送，同时避免与其他设备和人员的干扰，保障生产的连续性和安全性。

（二）特殊环境控制系统集成

洁净室空气处理系统、氮气供应系统和循环冷却水系统的协同安装是特殊环境控制系统集成的关键。洁净室空气处理系统需满足锂离子电池制造对空气洁净度的严格要求，通过合理规划送回风路径、选用高效过滤器等确保空气质量^[4]。氮气供应系统要保证氮气的纯度和稳定供应，其管道布局应与其他系统协调，避免干扰。循环冷却水系统则要根据设备散热需求，精确设计管道管径和流量，同时考虑与空气处理系统的热交换关系。三者协同安装时，需综合考虑空间布局、运行参数匹配以及维护便利性等因素，以实现高效、稳定的特殊环境控制。

三、锂电制造机电工程风险管理体系

（一）项目风险识别与评估

1. 典型风险因素分析

在锂电制造机电工程中，施工安全环节存在诸多风险源。例如，施工现场的电气设备使用不当可能引发触电事故，高处作业若防护措施不到位易导致人员坠落伤亡^[5]。技术交底方面，若交底不清晰、不全面，施工人员可能对施工工艺和质量要求理解有误，从而影响工程质量。材料验收环节，材料的质量不符合要求，如电气材料的绝缘性能不达标，可能引发电气故障，影响机电系统的正常运行。同时，材料的规格型号与设计不符，也会给施工带来困难，延误工期。这些风险源都需要在项目实施过程中给予高度关注和有效管理。

2. 模糊综合评价模型构建

建立考虑工期、质量、成本的动态风险评估模型可基于模糊综合评价模型构建。该模型首先需确定评价指标体系，涵盖工期、质量、成本等关键因素相关的各项指标，这些指标应全面且能准确反映机电工程风险情况^[6]。接着，确定各指标的权重，可采用层次分析法等科学方法，确保权重分配合理，能体现不同指标对风险的影响程度。然后，建立模糊评价矩阵，对各指标的风险程度进行模糊评价，评价等级可分为高、中、低等。最后，通过模糊运算得出综合评价结果，以此动态评估机电工程的风险水

平，为风险管理提供科学依据。

（二）风险防控实施路径

1. 全流程风险预警机制

基于BIM技术的风险可视化预警方案是锂电制造机电工程全流程风险预警机制的重要组成部分。BIM技术可集成项目的各种信息，实现对机电工程风险的实时监测与动态分析^[7]。通过建立三维模型，直观展示工程结构与设备布局，提前识别潜在风险点，如管线碰撞、空间冲突等。同时，结合传感器等物联网设备，收集工程实际运行数据，与BIM模型中的理论数据进行对比分析，及时发现偏差并预警。这有助于在风险发生前采取有效措施进行防控，保障锂电制造机电工程的顺利进行。

2. 应急处置预案设计

在锂电制造机电工程中，应急处置预案设计至关重要。应建立设备调试异常、系统运行故障等应急预案库^[8]。针对设备调试异常，需详细记录可能出现的各类问题，如参数偏差、部件不匹配等，并制定相应的解决措施，包括调整参数的具体方法、更换部件的标准流程等。对于系统运行故障，要分析可能的故障点，如电路短路、软件错误等，同时制定从故障检测到修复的完整流程，明确责任人员和时间节点，确保在故障发生时能够迅速响应，减少对锂电制造的影响，保障生产的连续性和稳定性。

四、锂电制造机电安装工程优化路径

（一）全生命周期管理优化

1. 三维协同设计优化

在锂电制造机电安装工程的三维协同设计优化方面，应用BIM技术至关重要。BIM技术可实现机电管线综合排布与碰撞检测^[9]。通过创建三维模型，能够直观地呈现各机电系统的空间位置和相互关系。在设计阶段，可提前发现管线之间的碰撞冲突，避免施工过程中的返工和延误。同时，利用BIM模型的可视化特点，不同专业的设计人员可以更好地协同工作，提高设计效率和质量。各方人员可在统一的平台上对设计方案进行交流和修改，确保机电安装工程的设计符合锂电制造的工艺流程和空间要求，为后续施工和运营维护提供良好的基础。

2. 模块化施工技术应用

预制化管道组件与设备基座的工厂化预制是模块化施工技术应用的重要方面。对于预制化管道组件，可根据锂电制造机电系统的设计要求，在工厂精确加工制作，确保管道的尺寸精度、材质质量以及连接部位的可靠性。这样在现场安装时，能大大减少安装时间和误差，提高安装效率和质量^[10]。设备基座的工厂化预制同样关键，通过精确设计和制造，使其与设备完美匹配。在工厂环境下，可更好地控制基座的强度、平整度等关键指标，为设备的稳定运行提供坚实基础，同时也便于运输和现场快速安装，进一步优化锂电制造机电安装工程的全生命周期管理。

（二）智能化技术赋能管理

1. 智能监测系统集成

在锂电制造机电安装工程中，智能监测系统集成至关重要。基于物联网开发设备运行状态实时监测平台，通过传感器等设备采集机电设备的各项运行数据，如温度、压力、振动等。这些数据被实时传输至监测系统，利用数据分析技术进行处理。系统可对数据进行比对分析，判断设备是否处于正常运行状态。当出现异常时，能及时发出预警信号，以便维修人员快速响应。同时，该系统还可实现对设备运行历史数据的存储和分析，为设备的维护保养计划制定提供依据，从而提高整个锂电制造机电安装工程的可靠性和效率。

2. 数字孪生运维系统

构建机电系统虚实映射的智能运维管理系统是锂电制造机电安装工程优化的关键。通过数字孪生技术，创建机电系统的虚拟模型，使其与实际物理系统实时映射。该虚拟模型可集成设备运行数据、环境数据等多源信息，实现对机电系统的全面感知。利用数据分析和人工智能算法，对系统运行状态进行实时监测和预测，提前发现潜在故障并预警。同时，基于虚拟模型可进行维修方案模拟和优化，提高维修效率和准确性。这一智能运维管理系统有助于提高锂电制造机电安装工程的可靠性和稳定性，降低运维成本，提升整体生产效率。

（三）绿色安装技术发展

1. 节能降耗技术体系

在锂电制造机电安装工程中，绿色安装技术和节能降耗技术体系至关重要。对于绿色安装技术，变频控制是关键之一。通过合理应用变频技术，可根据实际需求精准调节设备运行频率，降低能耗。例如，在一些动力传输设备上采用变频控制，能避免设备长期处于高能耗运行状态。余热回收技术同样重要，在锂电制造过程中，部分生产环节会产生大量余热。利用高效的余热回收

装置，将这些余热收集并加以利用，如用于预热生产用水或为车间供暖等，不仅减少了能源浪费，还提高了能源利用效率，实现了绿色安装和节能降耗的双重目标。

2. 废弃物处理工艺改进

锂电制造机电安装工程优化路径涵盖绿色安装技术发展与废弃物处理工艺改进等方面。在废弃物处理中，施工废料的分类回收与循环利用机制至关重要。应建立科学的废料分类体系，将金属、塑料、木材等不同材质的废料准确区分。对于可回收利用的金属废料，如铜管、铝型材等，应进行集中收集和妥善保管，以便后续送回相关工厂进行再加工。塑料废料可根据其类型进行分类，部分可用于制作一些简易的安装辅助工具或进行再生塑料生产。木材废料若保存较好，可考虑用于制作一些小型的工装夹具或作为生物质能源的原料。通过这样的优化机制，不仅能减少废弃物对环境的污染，还能降低工程成本，实现资源的可持续利用。

五、总结

锂电制造机电安装工程管理在技术创新方面呈现出多个关键点。智能化技术的应用不断深化，如自动化设备的广泛使用提高了安装效率和精准度。同时，绿色化理念逐渐融入，从材料选择到施工过程都更加注重环保。这些创新不仅提升了工程质量，也符合可持续发展的要求。

展望未来，随着新型电池制造的发展，工程管理需要进一步改进。要加强不同专业之间的协同合作，确保各个环节紧密衔接。在技术层面，持续关注新技术的发展动态，积极引入适合新型电池制造的先进技术。此外，还需建立更加完善的质量管理体系和安全保障机制，以应对日益复杂的工程环境，为锂电制造产业的高质量发展提供有力支撑。

参考文献

- [1] 刘洪兴. H机电安装项目施工成本管理改进研究 [D]. 贵州大学, 2021.
- [2] 毛宇. 机器学习在锂离子电池产线工艺优化中的应用研究 [D]. 电子科技大学, 2023.
- [3] 彭振华. 锂离子电池管理技术与应用的调研分析 [D]. 中国矿业大学 (江苏), 2021.
- [4] 刘直. L2项目机电安装工程施工管理优化研究 [D]. 吉林大学, 2021.
- [5] 曾荟静. 财务视角下 L 机电安装公司安装工程管理优化研究 [D]. 广西大学, 2023.
- [6] 陈士胜. 机电安装工程管理的问题与对策 [J]. 造纸装备及材料, 2021, 050(3): P.75-78
- [7] 段腾飞. 浅谈机电安装工程管理的的问题与对策 [J]. 电站系统工程, 2012(4): 2.
- [8] 雷立猛. 机电安装工程管理的的问题与对策分析 [J]. 陶瓷, 2023(5): 109-110.
- [9] 马卓颖. 机电安装工程管理的的问题与对策分析 [J]. 中国设备工程, 2021(14): 2.
- [10] 邱泽华, 李晓文. BIM技术在机电安装工程中的优化应用 [J]. 石材, 2023(1): 70-72.

基于工业风扇产品的 EC 永磁变频外转子同步电动机磁场与极弧系数探究

黄禄财

广东 肇庆 526600

DOI:10.61369/WCEST.2025110013

摘 要： 本文围绕外转子同步电动机在工业风扇产品中的应用展开研究，探讨其结构特点、磁场建模与分析等。通过多种方法优化极弧系数，研究其对电机性能影响，经实例验证优化方案有效，还基于 LCC 模型分析节能收益与生产工艺可行性，指出极弧系数优化提升电机性能，未来该电机将朝高频化、集成化发展。

关 键 词： 外转子同步电动机；极弧系数；工业风扇

Research on Magnetic Field and Pole Arc Coefficient of Ec Permanent Magnet Variable Frequency External Rotor Synchronous Motor Based on Industrial Fan Products

Huang Lucai

Zhaoqing, Guangdong 526600

Abstract： This paper focuses on the application of outer rotor synchronous motor in industrial fan products, and discusses its structural characteristics, magnetic field modeling and analysis. Through a variety of methods to optimize the pole arc coefficient, its impact on the motor performance is studied. The example shows that the optimization scheme is effective. Based on the LCC model, the energy-saving benefits and the feasibility of production process are analyzed. It is pointed out that the pole arc coefficient optimization can improve the motor performance, and the motor will develop towards high frequency and integration in the future.

Keywords： external rotor synchronous motor; pole arc coefficient; industrial fan

引言

随着《工业能效提升行动计划（2023–2025 年）》的颁布，提升工业领域电机能效成为重要发展方向。外转子同步电动机因其独特结构特点，在工业风扇产品应用中优势明显。从拓扑与电磁布局到磁场特性、转动惯量等方面，都与工业风扇适配良好。对其在 EC 永磁变频形式下的研究，涵盖永磁体磁场建模、磁场模拟分析、气隙磁密谐波探究、转矩与损耗关系等。通过多种方法优化极弧系数，可提升电机性能。结合工业风扇实例验证及全生命周期成本分析，为产业化提供支撑，助力实现工业风扇高效稳定运行及能效提升目标。

一、EC 永磁变频外转子同步电动机基本原理

（一）外转子同步电动机的结构特点

外转子同步电动机具有独特的结构特点，对其在工业风扇产品中的应用起着关键作用。从拓扑结构看，其定子在内部，转子在外部，这种布局与传统电机相反，使得电机的散热和安装更为便捷，与工业风扇的紧凑设计需求相匹配。在电磁布局方面，永磁体置于外转子上，能有效利用空间，增强气隙磁场强度，提高电机效率。气隙磁场特性与机电能量转换机制紧密相关，合理的气隙设计可优化磁场分布，减少磁场损耗，提升能量转换效率。外

转子结构使得电机的转动惯量较大，这在工业风扇的稳定运行中具有优势，能保证风扇转速的平稳。这种结构特点使外转子同步电动机在工业风扇产品中展现出良好的适配性，为优化工业风扇性能提供了有力支撑^[1]。

（二）永磁体磁场生成与调控原理

在 EC 永磁变频外转子同步电动机中，永磁体磁场的生成与调控至关重要。基于麦克斯韦方程组和安培环路定律，可对永磁体励磁磁场进行数学建模^[2]。永磁体产生的磁场是电动机运行的基础，其通过自身的固有磁性，在电机气隙中形成一个相对稳定的磁场。极数和极弧参数显著影响着磁场的空间分布。不同的极数决定了磁

场周期变化的频率，进而影响电机的转速特性；极弧参数则关乎磁场在空间上的分布形态，合适的极弧系数能优化气隙磁场波形，使磁场分布更均匀，减少谐波含量，提高电机的性能和效率。通过精确调控极数与极弧参数，可以有效优化永磁体磁场，满足工业风扇产品对 EC 永磁变频外转子同步电动机的性能需求。

二、外转子电机磁场分布数值分析方法

（一）有限元电磁场仿真模型构建

在基于 ANSYS Maxwell 建立三维瞬态磁场模型时，对于磁钢阵列布置方式，需结合工业风扇产品用 EC 永磁变频外转子同步电动机的实际结构，合理确定磁钢在转子上的排列形式，确保能准确模拟实际磁场情况^[3]。考虑到材料具有非线性特性，需精确设置各部件材料的非线性参数，如铁磁材料的 B-H 曲线等，以更真实地反映磁场分布。针对运动边界条件，由于外转子电机的转子处于旋转状态，应正确设置旋转区域及旋转速度等参数，让模型能够有效模拟电机运行时的动态磁场变化，从而实现对于工业风扇产品的外转子电机磁场分布的准确数值分析。

（二）气隙磁密谐波特征解析

在基于工业风扇产品的 EC 永磁变频外转子同步电动机研究中，通过 FFT 频谱分析来深入探究气隙磁密谐波特征。对不同极弧系数下的气隙磁场进行分布规律的对比，极弧系数的改变会显著影响气隙磁密谐波的构成与幅值^[4]。通过精确分析可清晰得知，不同极弧系数下哪些谐波成分占主导，哪些谐波幅值较小。而气隙磁密谐波畸变率与转矩脉动存在紧密关联机制。谐波畸变率的大小直接影响着转矩脉动的幅度，较高的谐波畸变率通常会导致更大的转矩脉动，深入解析气隙磁密谐波特征，有助于进一步理解外转子电机的性能，为优化极弧系数，降低转矩脉动，提升工业风扇用外转子电机的运行稳定性提供关键依据。

三、极弧系数优化设计方法研究

（一）极弧系数对电机性能的影响规律

1. 电磁转矩生成效率分析

建立转矩 - 极弧系数关系数学模型是探究电磁转矩生成效率的重要基础。通过该模型，可深入分析定转子磁势谐波匹配度对平均转矩及波动率的影响特性。定转子磁势谐波匹配程度不同，会使电机电磁转矩生成效率产生差异。当匹配度处于理想状态时，电机能够高效地将电能转化为机械能，平均转矩较大且波动率较小，有效提升电机运行稳定性与性能。若匹配不佳，电磁转矩生成效率会降低，导致电机输出能力受限、运行稳定性变差。研究表明，极弧系数与定转子磁势谐波匹配度紧密相关^[5]，合理选择极弧系数，可优化定转子磁势谐波匹配，从而提高电磁转矩生成效率，为工业风扇产品所用的 EC 永磁变频外转子同步电动机性能提升提供有力支持。

2. 铁损与涡流损耗关联性

在基于工业风扇产品的 EC 永磁变频外转子同步电动机中，

极弧系数与铁损及涡流损耗紧密相关。极弧系数的变化会影响电机内部磁场分布，进而改变铁损与涡流损耗的大小^[6]。当极弧系数不同时，铁芯磁密分布均匀性有所差异，这种差异导致铁芯各部分所受磁场作用不同，铁损也随之变化。同时，谐波磁场因极弧系数改变而改变，其引发的附加损耗中包含涡流损耗。研究表明，极弧系数较小时，谐波磁场相对较大，涡流损耗也会相应增加，而铁损与涡流损耗在这种情况下相互影响，共同作用于电机性能。因此，深入探究极弧系数对铁损与涡流损耗关联性的影响，对于优化电机设计、提升电机性能具有重要意义。

（二）多目标优化设计方法

1. 响应面模型与参数敏感性

基于田口实验法，构建极弧系数与性能指标的响应面模型，能够有效分析极弧系数对工业风扇产品用 EC 永磁变频外转子同步电动机各项性能指标的影响。通过该模型，将极弧系数作为变量，与电动机的效率、功率因数、转矩脉动等性能指标建立起函数关系^[7]。在构建响应面模型过程中，运用统计学方法对实验数据进行拟合与分析，得到能准确反映变量与指标关系的数学表达式。基于此模型，进一步确定关键参数的敏感度排序。这有助于明确极弧系数以及其他相关参数对电动机性能影响程度的大小，为极弧系数的优化设计提供依据，以便在多目标优化设计中，优先调整敏感度高的参数，从而更高效地提升电动机整体性能。

2. 遗传算法优化策略

在基于工业风扇产品的 EC 永磁变频外转子同步电动机磁场与极弧系数探究中，遗传算法优化策略有着重要应用。该策略针对转矩密度、效率、成本等多约束条件展开。通过遗传算法的编码、选择、交叉和变异操作，对极弧系数进行搜索。在编码阶段，将极弧系数的可能取值范围进行合理编码。选择过程基于适应度函数，使得较优的极弧系数编码有更高概率被选中。交叉和变异操作则引入新的极弧系数组合，扩大搜索空间。在这个过程中，不断评估每个极弧系数编码对应的电机性能指标，依据多约束条件下的适应度函数，逐步筛选出更优解，以在多约束条件下进行 Pareto 最优解筛选，最终确定工业风扇电机的极弧系数优选范围^[8]。

四、工业风扇应用实例验证

（一）典型产品技术指标分析

1. 250W 外转子电机设计参数

对于 250W 外转子电机，在设计时需综合考虑诸多参数。从极数来看，依据工业风扇的实际运行需求，通常会选取合适的极数，以保障电机具备稳定的转速与转矩输出特性，满足风扇不同工况的运转要求^[9]。气隙长度对电机性能影响显著，合适的气隙长度既能减少磁路磁阻，降低励磁电流，又能避免因气隙过小导致的装配困难及运行可靠性问题。永磁体尺寸方面，永磁体的长度、厚度等尺寸需精确设计，以确保产生足够且合理的磁场强度，为电机高效运行提供必要的磁场条件。原始极弧系数配置同样关键，它与电机的磁场分布、转矩脉动等性能紧密相关，合理

的原始极弧系数配置可优化电机的整体性能，减少能量损耗，提升工业风扇的运行效率与稳定性。

2. 性能测试基准要求

对于工业风扇应用实例验证中的典型产品技术指标分析，性能测试基准要求至关重要。额定转速应严格遵循相关强制性技术标准，这是确保工业风扇能提供合适风量和风压的基础。例如，不同应用场景对风扇转速需求不同，在大型车间通风场景，需较高转速来实现空气快速流通。能效等级也需满足标准，高效的电机能效不仅能降低能耗，还符合绿色发展理念。温升限制同样不容忽视，过高的温升可能影响电机寿命与性能。需通过严谨的测试，如依据特定环境温度与负载条件模拟实际运行，来验证产品是否达到额定转速、满足能效等级及控制温升在限制范围内^[10]。通过这样的性能测试基准要求，准确评估典型产品技术指标，为工业风扇的高效稳定运行提供保障。

（二）优化方案对比验证

1. 电磁性能仿真对比

在工业风扇应用实例验证的优化方案对比验证中，电磁性能仿真对比尤为关键。通过仿真，可清晰展示优化前后气隙磁密波形的不同。优化前，气隙磁密波形可能存在一定程度的畸变，影响电机性能；优化后，波形更加平滑，趋近理想状态，有助于提升电机效率。转矩-转速曲线方面，优化前，转矩在某些转速区间波动较大，稳定性欠佳；优化后，转矩曲线更为平稳，能为工业风扇提供更稳定动力。铁损分布上，优化前铁损可能集中在某些特定区域，增加能量损耗；优化后，铁损分布更加均匀合理，降低整体损耗。这些差异特征直观呈现了优化方案对工业风扇用 EC 永磁变频外转子同步电动机电磁性能的显著影响。

2. 样机实测数据验证

在工业风扇应用实例验证中，将优化后的 EC 永磁变频外转子同步电动机应用于实际工业风扇场景。通过在不同工况下运行工业风扇，收集风扇的风量、风压以及电机的运行参数等数据。针对优化方案对比验证，对多种不同极弧系数的设计方案进行比较。从磁场分布、电磁力等方面分析各方案的差异，结合电机性能指标，评估不同方案对工业风扇性能提升的效果。对于样机实测数据验证，利用负载试验台对装配好的样机进行测试。精确测量电流谐波畸变率、系统效率等关键指标，将这些实测数据与仿真模型计算得出的数据进行细致对比。若实测数据与仿真数据偏差在合理范围内，表明仿真模型具有较高准确性，为进一步优化

电机设计提供可靠依据。

（三）产业化应用效益评估

1. 能效提升经济性分析

基于 LCC 全生命周期成本模型来量化工业风扇应用中能效提升带来的节能收益。通过实际应用案例，计算工业风扇采用 EC 永磁变频外转子同步电动机前后的能耗差异。详细分析在不同运行时长、电价条件下，因能效提升所节省的电费开支。同时，考虑设备初始购置成本、维护成本等，对比传统电动机与 EC 永磁变频外转子同步电动机在全生命周期内的成本支出。若节能收益大于额外的购置与维护成本增加量，表明该技术在能效提升方面具备良好的经济性，能为企业带来实际的经济效益，有助于推动其在工业风扇产业化应用中的进一步推广。

2. 生产工艺可行性验证

在生产工艺可行性验证方面，需着重评估优化后的极弧参数对永磁体充磁工艺及转子冲片加工精度的技术要求。针对永磁体充磁工艺，优化后的极弧参数可能改变充磁方向与强度需求，需验证现有充磁设备能否满足新要求，以及充磁工艺的调整是否会引入额外成本与时间消耗。对于转子冲片加工精度，极弧参数的改变会影响冲片形状与尺寸精度，要考察当前加工设备能否达到新的精度标准，加工过程中误差控制难度是否在可接受范围，以及新精度要求是否会致使废品率上升。通过全面验证这些方面，确定基于优化极弧参数的工业风扇生产工艺是否切实可行，为产品产业化奠定坚实基础。

五、总结

极弧系数优化对提升外转子永磁电机综合性能效果显著。它有效改善了电机磁场分布，降低了谐波含量，进而提升了电机效率与功率因数，减少了转矩脉动，增强了运行稳定性。基于此，针对工业风扇产品的电磁设计，需综合考量电机性能、运行工况及节能要求等因素，制定科学合理的设计准则，以实现工业风扇高效、稳定运行。展望未来，随着电力电子技术与材料科学的进步，工业风扇所应用的 EC 永磁变频外转子同步电动机将朝着高频化、集成化方向发展。高频化可减小电机体积与重量，集成化则能提升系统可靠性与紧凑性，为工业风扇产品带来更广阔的发展空间与应用前景。

参考文献

- [1] 鲁冰娜. 不等极弧系数分布永磁电机的振动特性分析及优化 [D]. 沈阳工业大学, 2023.
- [2] 同博. 复合实心转子永磁同步电动机的参数计算与性能分析 [D]. 山东大学, 2021.
- [3] 段石磊. 九相永磁同步电动机变频开环控制的研究 [D]. 青岛大学, 2021.
- [4] 陈洪燕. 车窗永磁有刷直流电机的研究与优化设计 [D]. 重庆邮电大学, 2022.
- [5] 徐炀. 外转子磁场调制永磁电机设计与转矩脉动削弱研究 [D]. 江苏大学, 2022.
- [6] 张进. 双定子同极内嵌永磁磁标电机转子永磁体极弧系数优化 [J]. 微特电机, 2023, 51(10): 6-9.
- [7] 刘娜, 钟成堡, 陈飞龙, 等. 极弧系数对永磁同步电机齿槽转矩影响的分析 [J]. 微特电机, 2022, 50(8): 15-18.
- [8] 刘保泉, 张洪信, 魏士文. 考虑损耗的表贴式永磁同步电机极弧系数优化 [J]. 微特电机, 2022, 50(4): 15-19, 24.
- [9] 张志强, 曹江. 低地板车直驱永磁电机极弧系数对电机性能影响分析 [J]. 科学技术创新, 2023(17): 31-34.
- [10] 王伟, 张学义, 于成龙, 等. 基于极弧系数和转子相对偏转角的并列双转子电机齿槽转矩削弱方法研究 [J]. 陕西科技大学学报, 2023, 41(6): 139-144, 154.

新能源投资领域中光伏与风电项目的投资及技术管理剖析

源超鸿

广东 广州 510000

DOI:10.61369/WCEST.2025110015

摘 要： 文章围绕新能源投资领域的光伏与风电项目展开，探讨投资及技术管理。分析两者发展现状、构建投资经济性评估框架，阐述技术差异、智慧运维等。还提及耦合制氢、非电应用、多能耦合模式等技术路径，强调终端应用场景匹配。展望“十五五”期间前沿技术、国际合作等发展趋势与创新。

关 键 词： 光伏与风电项目；投资经济性；技术管理

Analysis of Investment and Technical Management of Photovoltaic and Wind Power Projects in the Field of New Energy Investment

Yuan Chaohong

Guangzhou, Guangdong 510000

Abstract： This article focuses on photovoltaic and wind power projects in the field of new energy investment, exploring investment and technology management. Analyze the current development status of both, construct an investment economic evaluation framework, elaborate on technological differences, intelligent operation and maintenance, etc. It also mentions technological paths such as coupled hydrogen production, non electric applications, and multi energy coupling modes, emphasizing the matching of terminal application scenarios. Looking ahead to the development trends and innovations in cutting-edge technologies and international cooperation during the 15th Five Year Plan period.

Keywords： photovoltaic and wind power projects; investment economy; technology management

引言

在“十五五”期间，随着“一带一路”倡议的深入推进，新能源投资领域迎来新契机。从全球及中国情况看，光伏与风电装机容量呈增长态势，但在资源分布、技术成熟度等方面各有特点，且政策支持力度也在动态调整。在投资评估上，构建科学的经济性评估框架意义重大。同时，两者在技术差异、电网适应性、储能配套等方面也有不同表现。智慧运维技术、非电应用技术等不断创新。综合来看，研究光伏与风电项目投资及技术管理，能推动行业发展，契合政策导向，助力能源结构转型与可持续发展目标。

一、新能源投资领域发展现状分析

（一）光伏与风电项目发展现状对比

从全球及中国来看，光伏与风电装机容量均呈增长态势。在资源分布上，风能资源多集中在沿海及高原地区，而太阳能资源在光照充足区域广泛分布，如西部干旱地区^[1]。技术成熟度方面，风电技术发展时间长，单机容量提升空间有限，不过海上风电技术仍在不断突破；光伏技术发展迅速，转换效率持续提高，成本不断下降。在政策支持力度上，两者都获政策大力扶持。风电早期政策主要聚焦规模化发展，如今更关注消纳与储能配套；光伏政策从补贴推动装机量增长，逐渐转向平价上网引导产业升

级。十五五期间，综合两者发展现状，新能源投资应注重技术创新与资源优化配置，风电关注海上风电及储能融合，光伏侧重高效电池技术与分布式应用拓展，以明确战略投资方向。

（二）投资经济性评估框架构建

在新能源投资领域，针对光伏与风电项目构建投资经济性评估框架十分关键。从初始投资成本看，涵盖设备购置、安装调试、场地租赁等多项支出，不同项目规模与地域会使成本差异显著。度电成本（LCOE）能反映长期成本效益，受设备效率、使用寿命、维护成本等因素制约。收益率（IRR）则衡量项目盈利能力，揭示投资回报水平。通过这些指标建立经济性对比模型，可直观呈现两者投资经济性差异。同时，政策补贴退坡对项目可行

性影响重大，补贴减少会增加成本压力，降低预期收益。基于此框架，结合补贴政策变化，能精准评估项目投资可行性，为投资者决策提供科学依据^[2]。

二、光伏与风电技术管理关键问题

（一）技术特性与运营管理比较

光伏组件衰减率与风机齿轮箱维护周期存在显著技术差异。光伏组件随着使用年限增长，输出功率逐渐衰减，其衰减率受组件材料、光照条件等影响，优质组件在25年内衰减率通常可控制在一定范围。而风机齿轮箱作为风力发电机组关键部件，运行环境恶劣，承受高载荷与频繁冲击，需定期维护，维护周期因风机类型、运行工况而异^[3]。在电网适应性方面，光伏受光照影响功率输出具有间歇性与波动性，需通过优化逆变器控制策略等提升电能质量与电网接入稳定性；风电受风速变化影响，功率波动大，需加强风电场功率预测与无功补偿管理。在储能配套需求上，光伏因白天发电集中，储能可储存多余电能，实现错峰供电；风电功率不稳定，储能有助于平滑功率波动，两者管理方案都需结合自身技术特性优化，以保障系统稳定高效运行。

（二）智慧运维技术创新路径

在新能源投资领域的光伏与风电项目中，智慧运维技术创新路径对于提升技术管理水平至关重要。数字孪生技术可构建光伏电站与风电场的虚拟模型，精准模拟其运行状态。在光伏电站清洗优化方面，借助数字孪生模型能直观呈现组件脏污程度，分析脏污对发电效率的影响，进而智能规划最佳清洗时间与路线，提升清洗效率与发电效益。AI预测性维护则通过对风电场叶片的海量运行数据进行深度学习，精准预测叶片可能出现的故障。如提前察觉叶片裂纹、磨损等潜在问题，及时安排维护，避免故障扩大，提高叶片运行可靠性，显著提升风电场运维管理效率，降低运维成本^[4]。

三、可再生能源非电应用的技术联动

（一）绿氢合成氨/醇技术发展现状

1. 电解水制氢技术路线选择

在光伏/风电耦合制氢场景下，碱性电解槽与质子交换膜电解槽适用性各有不同。碱性电解槽技术成熟、成本较低，但其电极反应动力学较慢，对气体纯度要求相对不高，适用于大规模、对成本敏感且对氢气纯度要求并非极高的项目^[5]。质子交换膜电解槽则具有响应速度快、电流密度高、产氢纯度高优势，更契合风光发电波动性强，需快速响应的特点，适合对氢气品质要求严苛的高端应用场景。设备利用小时数对经济性影响显著，较高的利用小时数可摊薄设备投资成本，提升项目收益。光伏、风电本身受自然条件限制，如何优化调度与储能配置，提高电解槽设备利用小时数，是提升经济性的关键。

2. 氨/醇合成工艺优化

在可再生能源非电应用的技术联动里，绿氢合成氨/醇技术发

展备受关注，氨/醇合成工艺优化成为关键。高温高压合成工艺的改进，通过精准调控反应温度与压力，能有效提升反应效率，降低能耗。例如，合适的高温可加快反应速率，但过高则会增加能源消耗，因而需精确界定温度区间。新型催化剂的研发与应用同样意义重大，高效催化剂能够降低反应的活化能，使反应在相对温和条件下进行，大幅减少能耗。研究表明，某些新型催化剂可使反应温度降低数十摄氏度，显著提升能源利用效率^[6]。这些技术进步路径，正推动着绿氢合成氨/醇工艺朝着更加高效、节能的方向发展。

（二）多能协同系统技术经济性

1. 电-氢-氨多能耦合模式

构建基于风电波动特性的氢储能-合成氨系统集成模型是实现电-氢-氨多能耦合模式的关键。该模型能有效结合风电、制氢与合成氨环节。在风电波动时，多余电量可用于电解水制氢，氢气储存后进一步用于合成氨。通过此模型可量化分析系统综合能效提升空间，如明确制氢环节的电能利用效率、合成氨过程中氢气转化效率等关键参数变化对整体能效的影响^[7]。从技术经济性角度看，该多能耦合模式一方面可消纳不稳定的风电，降低弃风率，减少能源浪费；另一方面，产出的氢气和氨具有经济价值，能为项目带来额外收益。综合评估系统成本、收益及能效提升，有助于优化电-氢-氨多能耦合模式，提高新能源投资项目的整体效益。

2. 终端应用场景匹配研究

在新能源投资领域，针对光伏与风电项目投资及技术管理剖析中的可再生能源非电应用，终端应用场景匹配研究至关重要。在合成氨于化肥工业与航运燃料替代领域的商业化推广方面，需精准考量场景特点与需求。例如化肥工业场景，要结合其生产规模、能源使用时段等参数，分析光伏与风电所产电力经多能协同系统转化为适合合成氨生产能源形式的可行性^[8]。对于航运燃料替代场景，考虑船舶航行路线、停靠站点分布等，评估配套运输储存基础设施投资需求与多能协同系统的适配性，从而确定能实现最佳技术经济性的方案，推动光伏与风电项目在可再生能源非电应用领域的有效投资与技术管理。

四、十五五期间技术发展趋势

（一）战略投资机遇分析

1. 技术迭代与成本下降曲线

在十五五期间，钙钛矿光伏技术和漂浮式风电等前沿技术将展现显著的技术迭代与成本下降趋势。钙钛矿光伏技术效率提升迅速，理论转换效率高达33%，且具有材料成本低、可溶液法制备等优势，随着大规模量产技术突破，有望大幅降低度电成本，预计在十五五期间实现产业化加速，带动光伏项目投资收益显著提升^[9]。漂浮式风电技术则突破了浅海区域限制，向深远海拓展，凭借风资源丰富稳定的优势，有望实现规模经济。随着基础设计优化、安装技术成熟，其成本将逐步下降，在十五五期间有望成为风电投资新热点，为项目带来更高收益，吸引更多战略投资。

2. 国际产能合作新机遇

“十五五”期间，随着“一带一路”倡议深入推进，沿线国家新能源开发需求与我国装备制造产能输出间的协同发展将迎来新契机。一方面，许多沿线国家能源需求增长迅猛，且具备丰富的太阳能、风能资源，但其自身技术与资金有限，亟需外部支持来开发新能源。我国在光伏与风电装备制造领域技术成熟、产能充足，能够为这些国家提供优质的设备与技术服务。另一方面，通过与沿线国家开展国际产能合作，不仅有助于满足当地新能源开发需求，还能拓展我国光伏与风电企业的海外市场，提升国际竞争力。在此过程中，技术创新与合作也将进一步深化，例如共同研发适合当地环境的新能源技术，实现互利共赢^[10]。

（二）技术创新路径规划

1. 材料科学突破方向

在“十五五”期间，新能源投资领域中光伏与风电项目的材料科学有望迎来关键突破。就光伏逆变器而言，碳化硅器件凭借其宽禁带、高击穿电场强度等特性，能够显著提升转换效率。相较于传统硅基器件，碳化硅可降低导电电阻与开关损耗，减少电能转换过程中的损失，进而提升光伏系统整体发电效率。在风电变流器紧凑化设计方面，碳化硅器件的高频率开关能力，使得电路拓扑得以简化，能够在较小体积内实现高功率转换，有效减小变流器的尺寸与重量，降低风电项目的建设及运维成本。通过对碳化硅器件在光伏与风电关键设备中的应用研发，有望推动新能源投资领域在材料科学层面实现重大技术跨越，助力行业高效、可持续发展。

2. 智能化管理系统演进

在“十五五”期间，新能源投资领域中光伏与风电项目的智能化管理系统将迎来显著演进。随着技术创新，智能化管理系统将进一步整合区块链技术，深度应用于新能源电力交易与绿证追踪等管理场景。通过区块链的分布式账本与加密技术，实现电力交易信息的透明、安全与不可篡改，提升交易效率并降低信任成本。在绿证追踪方面，能够精准记录绿证的产生、交易与使用全过程，保障绿证的真实性与唯一性，助力企业准确核算可再生能源使用量，满足相关政策与市场需求。同时，智能化管理系统还会借助大数据与人工智能技术，实现对光伏与风电项目的智能运维、实时监测与优化调度，提高项目整体运营效率与投资回报率。

（三）可持续发展能力建设

1. 生态影响减缓技术

在十五五期间，新能源投资领域中光伏与风电项目的生态影响减缓技术将迎来显著发展。一方面，研发基于卫星遥感的光伏

用地生态承载力评估系统成为关键。该系统借助卫星遥感技术，精准获取光伏用地的地形、植被、土壤等多维度信息，通过大数据分析 & 模型构建，科学评估土地生态承载力，确定最佳光伏项目布局与规模，最大程度减少对生态环境的影响。另一方面，完善风电鸟类迁徙保护解决方案迫在眉睫。通过运用雷达监测、无人机巡检等技术，实时掌握鸟类迁徙路线与时间，优化风电场选址与风机布局，同时研发智能风机控制系统，在鸟类迁徙时段自动调整风机运行参数，降低对鸟类的伤害，实现风电项目与鸟类保护的和谐共生，推动光伏与风电项目可持续发展。

2. 循环经济模式创新

在“十五五”期间，新能源投资领域的光伏与风电项目在循环经济模式创新方面将有显著发展。构建完善的光伏组件回收体系成为关键，随着光伏装机量持续增长，组件退役问题凸显，需研发高效、环保的回收技术，实现硅材料、银浆等关键资源的高效回收与再利用，降低对原生资源的依赖。同时，风机叶片高分子材料再利用技术路线也将不断优化，因其材质特殊且体积庞大，处理难度大，要开发新的技术将其转化为高附加值产品，如复合材料用于其他工业领域。此外，制定全生命周期环境管理标准不可或缺，从项目规划、建设、运营到退役全流程，明确各阶段的环境责任与量化指标，推动光伏与风电项目在循环经济模式下实现可持续发展。

五、总结

在新能源投资领域，光伏与风电项目的投资及技术管理至关重要。归纳其技术经济规律，能为投资决策提供坚实依据，明确项目在不同条件下的成本效益特征，实现资源的高效配置。非电应用技术的突破，对新能源产业向纵深发展具有战略意义，可拓展应用场景，提升产业附加值与竞争力。未来，多能互补系统集成可有效整合多种能源，提高能源利用效率，增强能源供应稳定性；智能电网协调管理则能更好地适应新能源的间歇性与波动性，确保电力系统安全稳定运行。深入研究这些方向，有助于推动新能源投资领域持续健康发展，助力能源结构转型与可持续发展目标的实现。

参考文献

- [1] 周科宇. 新能源微电网直驱风电与光伏混合电压源控制策略研究 [D]. 广东工业大学, 2022.
- [2] 宋铁莉. LJ 光伏公司投资价值分析 [D]. 西安理工大学, 2022.
- [3] 陈简. 短期电力负荷及风电 / 光伏功率预测研究 [D]. 天津理工大学, 2023.
- [4] 杜欣鑫. J 企业新能源项目的投资效益研究 [D]. 华北电力大学 (北京), 2023.
- [5] 吴文煜. 中国光伏企业对外投资风险研究 —— 以越南光伏电站投资为例 [D]. 上海财经大学, 2021.
- [6] 张学亮. 新能源风电项目造价控制与成本管理的关键因素分析 [J]. 云南水力发电, 2024, 40(01): 159-161.
- [7] 杨捷, 李静. 浅析平价阶段集中式风电、光伏电站项目投资回报 [J]. 通讯世界, 2023, 30(4): 76-78
- [8] 邸鑫, 马旭卿, 铁宇, 等. 分布式光伏发电项目的投资影响因素研究 [J]. 太阳能, 2024, (03): 27-33.
- [9] 马勒投资光伏初创企业 [J]. 汽车与配件, 2022(9): 15.
- [10] 符灿辉. 风电设备安装技术管理分析 [J]. 智能建筑与智慧城市, 2023, (09): 118-120.

电气工程视角下泛光照明落地性的实现路径研究

陈婧

广州西贝照明科技股份有限公司, 广东 广州 510000

DOI:10.61369/WCEST.2025110016

摘 要 : 从电气工程视角探讨泛光照明落地性, 技术进步推动其发展, 关键参数体系构建、复合型供电网络架构、智能化控制体系等多方面为落地提供支撑, 动态节能、谐波抑制等技术助力节能与稳定运行, 模块化装配、抗震防护等提升实施效率与安全性, 还涉及经济性、运维管理等, 未来可从深化集成等方向提升落地性。

关 键 词 : 泛光照明; 电气工程; 落地性

Research on the Implementation Path of Floodlighting Landing Performance from the Perspective of Electrical Engineering

Chen Jing

Guangzhou Xibei Lighting Technology Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510000

Abstract : From the perspective of electrical engineering, this article explores the feasibility of floodlighting implementation. Technological progress promotes its development, and key parameter system construction, composite power supply network architecture, intelligent control system and other aspects provide support for implementation. Dynamic energy saving, harmonic suppression and other technologies assist in energy saving and stable operation. Modular assembly, seismic protection and other measures improve implementation efficiency and safety, as well as economic efficiency, operation and maintenance management. In the future, the feasibility can be improved through deepening integration and other directions.

Keywords : floodlighting; electrical engineering; practicability

引言

随着《关于推进城市照明节能工作的指导意见》(2008 年颁布)等政策对节能环保的推动, 泛光照明技术发展备受关注。历经多年演进, LED 光源、智能控制系统及光学设计等多方面取得突破。从电气工程视角, 构建关键参数体系、设计复合型供电网络与智能化控制体系、应用谐波抑制及模块化装配等技术, 同时满足抗震防护、电气安全认证及光污染控制要求, 并进行经济性评价与投资回报率测算, 创新运维管理, 搭建智能化运维平台。政策导向与技术发展共同助力泛光照明在不同场景的落地实施, 后续深入研究有望进一步提升其落地性。

一、泛光照明落地性理论框架

(一) 泛光照明技术发展现状

泛光照明技术历经多年发展, 取得了显著进步。早期传统光源如白炽灯、荧光灯等在泛光照明中应用广泛, 但存在能耗高、寿命短等局限。随着技术革新, LED 光源异军突起, 以其节能、寿命长、光效高、色彩丰富且易于控制等优势, 为泛光照明落地性提供关键支撑。在控制系统方面, 智能控制系统逐渐普及, 从简单的定时控制发展到能根据环境光、时间、场景等多因素自适应调节, 极大提升了照明效果与能源利用率, 进一步促进泛光照明的落地应用。此外, 光学设计、散热技术等方面也不断取得突破, 优化了泛光照明的配光、散热性能, 保障其稳定可靠运行,

全方位推动泛光照明在不同场景下的落地实施^[1]。

(二) 电气工程关键参数体系构建

在泛光照明落地性研究中, 电气工程关键参数体系构建至关重要。需建立照度标准参数模型, 它直接关乎照明效果能否满足实际需求, 适宜的照度可营造舒适且符合功能要求的光环境, 若照度不当, 会影响视觉体验甚至引发安全问题^[2]。能耗指标参数模型同样不可或缺, 合理的能耗指标不仅能降低运营成本, 还契合节能环保理念, 通过对不同灯具及照明方案能耗测算, 选择高效节能方式。设备荷载参数模型也不容忽视, 明确设备重量、尺寸等荷载信息, 为建筑结构设计提供依据, 确保建筑安全承载照明设备。这些参数约束共同对泛光照明项目实施可行性起决定性作用, 是实现落地性的关键环节。

二、电气工程系统设计方案

（一）复合型供电网络架构

在电气工程系统设计方案中，复合型供电网络架构对于解决大规模照明负荷时空分布不均的供能难题至关重要。设计多电压等级配电系统，能够依据不同区域的照明需求灵活调整电压，提高能源传输效率，降低线路损耗^[3]。将其与可再生能源集成方案相结合，如太阳能光伏板、风力发电机等，充分利用自然能源，有效缓解传统能源供应压力。一方面，当可再生能源充足时，可为照明系统直接供电；另一方面，在能源过剩时，可将多余电能存储起来，以便在能源不足或用电高峰时使用。这种复合型供电网络架构，通过优化能源分配与利用，提高了泛光照明系统供电的稳定性和可持续性，为泛光照明的落地实施提供坚实的能源保障。

（二）智能化控制体系构建

在电气工程系统设计方案中，智能化控制体系构建是关键。研发基于物联网的集群控制算法，可实现光照强度的自适应调节。通过在照明区域布置各类传感器，实时采集环境光照数据，并将其传输至控制中心。控制中心依据所获取的数据，运用精心设计的集群控制算法，精准分析计算，进而自动调整泛光照明设备的光照强度，以满足不同场景和时段的需求，实现节能与视觉效果的平衡。同时，搭建故障预警系统，借助物联网技术对设备状态进行实时监控。系统持续收集设备的运行参数，如电流、电压、温度等，利用数据分析技术对这些参数进行深度挖掘。一旦发现参数异常，系统立即发出预警信号，提示维护人员及时处理，确保泛光照明系统的稳定运行^[4]。

三、落地性实现关键技术路径

（一）能效优化技术路线

1. 动态节能控制策略

开发分时段场景化控制模块并通过光源功率密度优化降低运行能耗，这一动态节能控制策略的实现，需结合电气工程专业知识。借助智能传感器实时感知环境亮度，根据不同时段、场景需求智能调节泛光照明的光源功率密度。例如在白天或人员活动较少区域，自动降低功率密度，在夜晚或人员密集时恢复合适亮度。在具体实现过程中，采用先进的电力电子技术与智能控制算法，精确调控每个照明区域的功率，确保在满足照明需求前提下有效降低能耗。同时，利用电气工程中的电力监控系统，实时监测能耗数据，通过数据分析进一步优化控制策略，实现降低30%运行能耗的目标^[5]，为泛光照明的节能运行提供可靠保障。

2. 谐波抑制技术应用

在电气工程视角下的泛光照明落地性实现路径中，谐波抑制技术应用至关重要。设计主动式谐波补偿电路是有效手段，通过该电路可精准控制 THDi 指标，使其满足电网接入标准，即将其控制在8%以内^[6]。主动式谐波补偿电路借助电力电子器件，实时监测和分析电路中的谐波电流，快速生成与谐波电流幅值相等、相位相反的补偿电流，进而抵消谐波电流，实现对谐波的有效抑

制。这不仅保证了泛光照明系统的稳定运行，减少因谐波引起的设备故障与损耗，而且能够降低对电网的谐波污染，提升电能质量，确保泛光照明系统与电网的良好兼容性，为泛光照明在电气工程领域的落地实施提供有力技术支撑。

（二）安装施工工艺创新

1. 模块化装配技术

在电气工程视角下实现泛光照明落地性，模块化装配技术极为关键。一方面，研发快装式支架系统，对支架结构进行优化设计，采用标准化、通用化的零部件，确保其不同场景下都能快速、便捷地组装。例如，通过巧妙的卡扣连接方式，替代传统的复杂螺丝紧固，可大幅提高安装效率。另一方面，预制线缆组件，在工厂提前根据实际需求完成线缆的裁剪、连接及标识等工作^[7]。这不仅保证了线缆连接的准确性和可靠性，还极大减少了现场线缆铺设和连接的时间。通过这两者结合，能够有效缩短现场施工周期40%以上，显著提升泛光照明的安装实施效率，让泛光照明在实际项目中更具落地性。

2. 抗震防护解决方案

在电气工程领域，确保泛光照明系统在地震作用下的安全稳定运行，是抗震防护设计的核心目标。为实现这一目标，可采用有限元分析技术对灯具的固定结构进行仿真优化。具体而言，首先利用有限元软件建立灯具及支架的精细化模型，模拟其在8级设防烈度地震波作用下的力学响应，准确获取结构中的应力集中区域与位移分布情况^[8]。根据分析结果，可针对性采取加固措施：例如优先选用高强铝合金等轻质高强材料以降低惯性力，优化支架形态以改善受力路径，并在关键受力部位增设加强肋或补强板。对于大型灯具，还可通过增加锚固点数量、采用防松脱设计（如弹簧垫圈、锁紧螺母）等方式，显著提升连接节点的抗拉与抗剪承载力。通过上述基于仿真数据的结构优化，能够有效保证灯具固定系统在地震中的完整性，防止因构件断裂或锚固失效导致的灯具坠落风险，从而确保泛光照明系统在震时及震后持续发挥功能。

四、落地性保障体系构建

（一）标准规范体系建设

1. 电气安全认证标准

在电气工程视角下的泛光照明领域，电气安全认证标准中的IP防护等级与接地电阻参数的强制性规范至关重要。IP防护等级关乎泛光照明设备对灰尘和水的防护能力，明确的强制性规范能确保设备在不同环境条件下稳定运行，如户外潮湿环境需具备较高的防水等级，避免因水汽侵入造成短路等故障^[9]。接地电阻参数的强制性规范则直接关系到人员与设备安全，合适的接地电阻能有效引导故障电流流入大地，降低触电风险。通过制定这些强制性规范，为泛光照明设备的安全性、可靠性提供坚实保障，促使其在实际应用中真正落地，推动泛光照明行业朝着更加安全、规范的方向发展。

2. 光污染控制指标

在电气工程视角下的泛光照明中，光污染控制指标至关重

要，需建立垂直照度限值与眩光指数双重约束体系^[10]。垂直照度限值方面，应依据不同场所的功能与需求，精确设定适宜数值。如对于城市商业区，考虑行人与车辆通行及商业展示，其垂直照度限值可适当放宽，但也要防止过亮影响周边居民；而对于住宅区周边的泛光照明，垂直照度限值则应严格把控，以保障居民的夜间休息环境。眩光指数同样不容忽视，它直接影响人们的视觉舒适度。通过合理设计灯具的配光曲线、安装角度等，将眩光指数控制在合理范围。如采用遮光罩、格栅等技术手段，降低直接眩光和反射眩光，确保泛光照明既满足功能需求，又有效控制光污染，实现良好的落地性。

（二）经济性评价模型

1. 全生命周期成本分析

为科学评估泛光照明方案的经济可行性，需构建覆盖20年使用周期的全生命周期成本分析模型。该模型系统核算初始投资、运维支出及最终更新成本：初始投资包括高效灯具、抗震支架及智能控制系统的设备与安装费用；运维阶段重点计算电力消耗（结合当地电价、每日运行时长与系统总功率），并纳入定期清洁、故障检修及光源光衰带来的更换成本；更新阶段则预估寿命期末的设备置换费用。通过量化长期运行中的能源节约与维护效率，该模型可精准对比不同技术路线的经济性，为电气工程中泛光照明方案的选型与优化提供关键数据支撑，确保其在全生命周期内兼具技术先进性与成本竞争力。

2. 投资回报率测算方法

在电气工程视角下的泛光照明项目投资回报率测算中，可先确定项目的初始投资，涵盖灯具采购、安装调试、布线等所有前期投入成本。之后，预估项目运营期间每年的现金流入，如因泛光照明带来的商业收益提升、城市形象改善带来的潜在经济价值等，同时明确每年的现金流出，像能源消耗、设备维护等费用。运用动态现金流量模型，将不同时间点的现金流量按照合适的折现率折现到同一时间基准。通过计算净现值（NPV），若NPV大于零，表明项目在经济上可行；再计算内部收益率（IRR），它反映项目实际能达到的投资回报率水平。借助这些指标和模型，综合测算泛光照明项目的投资回报率，以科学评估其经济可行性。

（三）运维管理体系创新

1. 预防性维护机制

在电气工程视角下泛光照明的落地性保障体系构建中，运维

管理体系创新里的预防性维护机制至关重要。开发基于设备劣化模型的预测性维护方案是关键举措。通过对泛光照明设备进行长期数据监测与分析，构建精准的设备劣化模型。借助该模型，可提前预判设备可能出现的性能下降、部件损坏等情况。例如，针对灯具的光衰、电源模块的老化等常见问题，依据模型预测结果，在设备尚未出现故障前，就制定科学合理的维护计划，及时更换老化部件、调整设备参数。这不仅能有效减少设备突发故障带来的照明中断风险，保障泛光照明系统的稳定运行，还能通过优化维护周期，降低维护成本，从根本上提升泛光照明落地应用的可靠性与持续性。

2. 智能化运维平台

在电气工程视角下的泛光照明领域，智能化运维平台是提升落地性的关键一环。该平台可集成多种先进技术，实现对照明设备全方位、实时的监测与管理。借助传感器网络，实时收集灯具的运行参数，如亮度、能耗、温度等数据，以便及时发现灯具故障或性能异常。通过数据分析与挖掘，预测设备的潜在问题，提前安排维护，降低故障发生率。同时，利用智能控制模块，依据环境光强度、时间、场景等因素，自动调节泛光照明的亮度与开关，实现节能与照明效果的平衡。此外，该平台具备远程控制功能，运维人员能在控制中心或通过移动终端远程操作照明设备，极大提高运维效率，有力保障泛光照明系统的稳定运行与落地实施。

五、总结

从电气工程视角研究泛光照明落地性，发现电气工程技术对泛光照明项目起着关键支撑作用。在智能控制、电力传输与分配等方面，为泛光照明提供了技术保障。后续研究可通过深化智能电网集成技术，优化能源利用，提升泛光照明系统与电网的交互效率；建立城市级照明能效管理平台，实现对大规模泛光照明设施的集中管控与能效监测；形成全要素解决方案数据库，便于项目实施过程中快速获取相关技术、设计及案例等资料。通过这些方向的深入研究，有望进一步提高泛光照明的落地性，在满足照明功能需求的同时，实现节能、环保与智能化，为城市夜景打造提供更有力的技术支持。

参考文献

- [1] 刘建敏. 建筑泛光照明工程的施工安全管理 [J]. 灯与照明, 2025, 49(05): 8-10.
- [2] 阴春晴. 组态视角下 PPP 项目落地路径研究 [D]. 天津理工大学, 2023.
- [3] 汪文婷. 可供性视角下 CIDP 平台的传播路径研究 [D]. 西安工业大学, 2023.
- [4] 陈晓宏. 建筑泛光照明安装工程施工技术 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2025, (23): 115-117.
- [5] 赵阳. 建筑泛光照明安装工程的施工技术 [J]. 灯与照明, 2024, 48(2): 95-98.
- [6] 肖舒峥. 建筑外立面泛光照明光污染防治研究 [J]. 光源与照明, 2022(3): 19-21.
- [7] 孙开贻. 公共建筑泛光照明的节能设计措施 [J]. 通讯世界, 2021, 28(3): 182-183.
- [8] 赵纪锋. 建筑泛光照明设计现状及最新技术 [J]. 光源与照明, 2023(7): 19-21.
- [9] 殷文龙, 田由甲. 基于 DMX512 协议的泛光照明控制系统 [J]. 现代建筑电气, 2022, 13(6): 29-33.
- [10] 刘春. 泛光照明智能化控制系统分析 [J]. 光源与照明, 2021(5): 16-17.

电力工程管理中技术管理与工程风险管理协同探究

龚文仪

广东 广州 511450

DOI:10.61369/WCEST.2025110020

摘 要： 电力工程管理涉及技术管理与工程风险管理。前者包括设备选型、施工规范及技术创新管理，具专业性、系统性和动态性；后者涵盖风险识别、评估、应对及监控。二者相互作用，技术决策传导至风险控制，风险监控数据指导技术改进。构建多维协同模型、协同管理机制等可实现二者协同，经案例验证能提升管理效果，当前研究存在不足，未来数字孪生技术或有应用。

关 键 词： 电力工程管理；技术管理；工程风险管理

A Collaborative Exploration of Technical Management and Engineering Risk Management in Electric Power Engineering Management

Gong Wenyi

Guangzhou, Guangdong 511450

Abstract： Power engineering management involves technical management and engineering risk management. The former includes equipment selection, construction standards and technological innovation management, which is professional, systematic and dynamic. The latter covers risk identification, assessment, response and monitoring. The two interact with each other. Technical decisions are transmitted to risk control, and risk monitoring data guide technical improvements. The construction of multi-dimensional collaborative models, collaborative management mechanisms, etc. can achieve the synergy between the two. It has been verified through cases that it can enhance the management effect. The current research has some deficiencies, and digital twin technology may be applied in the future.

Keywords： electric power engineering management; technical management; engineering risk management

引言

随着《国家能源局关于推进电力安全生产风险分级管控和隐患排查治理双重预防机制建设的指导意见》在2018年颁布，电力工程管理需更注重技术与风险的协同。电力工程技术管理涵盖设备选型、施工规范等多方面，工程风险管理涉及风险识别、评估等环节，二者紧密关联。技术决策影响风险控制，风险监控数据指导技术改进。构建多维协同模型、协同管理机制，在方案设计与施工阶段实施预控与动态协同，对提升管理效率与质量意义重大，案例也证实其有效性，未来更需深化研究以推动电力工程高质量发展。

一、电力工程技术管理与工程风险管理的基本内涵

（一）技术管理的内涵与特点

电力工程技术管理旨在确保电力工程从规划到交付使用的全过程技术活动科学、高效开展。在设备选型方面，需依据工程实际需求、性能指标、成本预算等因素，精准挑选适配的电力设备，合理的选型是保障电力系统稳定运行的基础^[1]。施工规范上，要严格遵循行业标准和操作规程，对施工流程、工艺方法等进行细致管控，以此保障工程质量达标。技术创新管理则鼓励引入新技术、新工艺、新材料，提升工程建设的效率与技术水平。其特点在于专业性强，要求管理人员具备深厚的电力专业知识；

系统性高，涵盖工程各环节技术活动；动态性明显，随着技术发展

（二）工程风险管理的定义与框架

工程风险管理旨在识别、评估并应对电力工程项目中可能出现的各种风险，以降低风险对项目目标的负面影响，确保项目顺利实施^[2]。其框架涵盖多个关键环节。风险识别是基础，全面梳理项目各个阶段潜在风险，如技术风险、市场风险、自然风险等。风险评估则运用定性或定量方法，分析风险发生可能性与影响程度。风险应对措施是核心，依据评估结果制定相应策略，对高风险事件可采取规避、减轻、转移或接受等措施。在项目全生

命周期中，从规划、设计到施工、运营，风险管理贯穿始终，通过动态监控与调整防控措施，保障电力工程在可控环境下推进，降低损失，提高项目整体效益与成功率。

二、技术管理与风险管理的相互作用机理

（一）技术决策对风险控制的传导路径

在电力工程管理中，技术决策对风险控制存在明确的传导路径。施工技术方案的选择不影响风险发生概率，不同的技术路径会产生显著的风险差异。例如，在某些电力工程中，选择较为复杂但理论效率更高的施工技术，虽可能带来更高的收益预期，但由于对施工人员技术要求高、设备依赖度大，一旦人员操作失误或设备故障，风险发生概率将大幅上升。而相对简单成熟的技术，虽效率可能稍低，但风险相对可控。从案例分析可见，技术决策通过影响施工的可行性、可靠性以及对外部条件的依赖程度等因素，传导至风险发生的可能性及影响程度，进而实现对风险的控制^[3]。因此，合理的技术决策是电力工程有效控制风险的关键环节，能从源头上降低风险发生几率，保障工程顺利推进。

（二）风险控制对技术优化的反馈机制

风险控制所收集到的监控数据，对电力工程技术改进具有关键的指导作用。在电力工程运行过程中，风险监控会实时采集诸如设备运行状态、电力负荷等各类数据。通过对这些数据的深度分析，能够精准识别潜在风险及其诱因，从而为技术改进提供明确方向。例如，若监测到某区域电力损耗异常，经分析确定是输电线路材料性能问题，便可以此为依据改进线路材料技术，降低电力损耗。同时，建立风险预警与工程技术参数调整的联动模型^[4]。当风险预警系统发出警报，表明工程面临一定风险时，联动模型能够迅速根据风险类型与程度，自动生成相应的技术参数调整方案。如当预警显示电网电压不稳定，模型会及时调整变压器相关参数，优化电力传输技术，确保电网稳定运行，实现风险控制对技术优化的有效反馈。

三、协同管理机制的构建路径

（一）协同管理理论框架设计

1. 多维协同模型构建

在电力工程管理中，构建多维协同模型可从整合 PDCA 循环与风险矩阵理论入手。将技术标准维度纳入，依据电力行业规范及项目特性，明确技术指标与操作流程，确保技术应用的准确性与规范性。风险评估维度，借助风险矩阵理论对工程潜在风险进行量化分析，识别风险可能性与影响程度。决策优化维度基于 PDCA 循环，在技术应用与风险管控过程中，持续收集数据、分析偏差，进而调整技术方案与风险管理策略。通过这三个维度相互作用、协同运作，实现技术管理与工程风险管理有机融合，有效提升电力工程管理效率与质量^[5]。

2. 信息交互平台架构

在电力工程管理中，构建协同管理机制，实现技术管理与工

程风险管理的协同，可通过设计基于 BIM 技术的协同管理系统达成。该系统作为信息交互平台架构的关键组成部分，借助 BIM 技术强大的可视化与数据集成能力，对电力工程的各类技术参数与工程风险数据进行整合。在系统运行过程中，能够实时共享这些数据，使得技术人员与风险管理人员可随时获取全面信息，实现高效沟通与协作。同时，系统还能对数据进行智能分析，挖掘潜在联系，为电力工程管理决策提供科学依据，助力精准应对技术与风险问题，提升工程整体管理水平^[6]。

（二）协同实施的关键环节

1. 方案设计阶段的技术风险预控

在电力工程方案设计阶段，技术风险预控至关重要。可提出价值工程与 FMEA 方法集成应用的实施方案预审机制。价值工程旨在以最低寿命周期成本实现产品必要功能，通过对功能与成本的系统分析，优化设计方案，避免因功能过剩或不足带来的技术风险^[7]。FMEA 方法则通过对潜在失效模式及其后果的分析，识别可能出现的技术故障，提前采取预防措施。将二者集成应用，一方面从功能成本角度审视方案合理性，另一方面从潜在失效角度排查风险隐患。在预审过程中，组织多领域专家对设计方案进行全面评估，从技术可行性、经济合理性、风险可控性等方面深入分析，及时发现并解决潜在技术风险，确保电力工程方案设计的科学性与可靠性，为后续工程实施奠定坚实基础。

2. 施工阶段动态协同控制

在电力工程施工阶段的动态协同控制中，建立基于物联网技术的实时监控体系尤为关键。借助物联网设备，可实时收集施工现场各类数据，如设备运行参数、施工环境指标等，实现对工程技术实施情况与潜在风险因素的全面感知。同时，构建技术指标与风险阈值的动态匹配算法^[8]。依据实时监控数据，将技术指标与预先设定的风险阈值进行动态对比分析。一旦技术指标接近或超出风险阈值，系统即刻发出预警，促使管理人员及时调整施工技术方案或采取风险应对措施，确保技术实施与风险管控在施工过程中协同推进，保障电力工程施工的顺利进行与整体质量安全。

四、协同管理模式的工程实践

（一）火电建设项目应用案例

1. 项目风险管理现状分析

选取典型百万千瓦机组建设项目进行研究，当前该火电建设项目在风险管理方面存在一些问题。在风险识别环节，对一些潜在风险如极端天气影响设备运输、新技术应用可能出现的技术故障等识别不够全面，未能建立完善的风险清单^[9]。风险评估多依赖经验，缺乏科学量化的评估方法，导致对风险发生可能性及影响程度的判断不够精准。风险应对措施制定相对滞后，往往在风险临近或已发生时才匆忙应对，且应对策略单一，缺乏针对性和灵活性。风险监控机制也不完善，不能实时跟踪风险动态变化，无法及时调整应对措施，这种风险管理现状使得项目在实施过程中面临诸多不确定性，严重影响项目的顺利推进，因此亟需将技术管理与风险管理协同，以改善风险管理状况。

2. 协同管理实施效果评估

在该火电建设项目中，通过蒙特卡洛模拟对协同管理实施效果进行评估。模拟结果显示，在实施协同管理模式前，工期延误概率相对较高，成本超支风险值也处于较大区间。而实施协同管理后，工期延误概率显著降低，成本超支风险值同样明显减小。这表明技术管理与工程风险管理的协同，有效提升了项目对工期和成本的把控能力，使得项目在这两方面的风险得到了较好的管控。通过这种量化对比，直观展现出协同管理模式在火电建设项目中的积极作用，为电力工程管理中推广该协同模式提供了有力的实践依据^[10]。

（二）新能源发电工程应用研究

1. 光伏电站技术风险管理协同实践

在光伏电站工程实践中，组件选型与气象风险的协同管控对降低度电成本（LCOE）效果显著。从组件选型看，高效能、高可靠性组件虽初始投资高，但长期发电效率高，可减少因组件性能问题带来的发电量损失风险。同时，气象风险对光伏电站影响巨大，如光照强度、温度、降水等，通过精准气象预测和分析，能提前制定应对策略，降低气象因素造成的发电量波动和设备损坏风险。两者协同，根据不同地区气象特点选择适配组件，可优化系统整体性能。例如，在光照充足但温度较高地区，选用温度系数低的组件，结合气象预报调整运维计划，最大程度减少气象风险影响，实现 LCOE 的优化，提升光伏电站经济效益与稳定性。

2. 风电场运维技术风险集成管理

在风电场运维中，预测性维护技术与故障风险的协同管理至关重要。借助先进监测设备实时收集风机运行数据，运用数据分析技术对设备状态精准评估，提前察觉潜在故障风险。当预测到可能出现故障时，运维团队迅速启动应对预案，合理安排维护资源，减少不必要的维护成本。例如，通过对风机关键部件如叶片、齿轮箱等运行参数的长期监测与分析，预测其性能衰退趋势，提前更换零部件。这种技术与风险联动的协同管理模式，有效降低故障发生率，减少因故障导致的发电量损失，显著提升风电场整体经济效益，为新能源发电工程的稳定高效运行提供有力支撑。

（三）特高压输电工程协同创新

1. 设备选型与运行风险协同决策

在特高压输电工程中，设备选型与运行风险协同决策至关

重要。构建全寿命周期成本模型，可有效优化 GIS 设备技术参数与绝缘故障风险的平衡关系。通过该模型，综合考虑 GIS 设备从采购、安装、运行维护到退役的全过程成本，同时紧密结合绝缘故障风险因素。比如，在技术参数选择上，不能仅追求高性能而忽视成本与风险，需权衡诸如耐压水平、绝缘材质等参数对成本及故障风险的影响。当提升某一技术参数能降低绝缘故障风险，但同时会大幅增加成本时，模型可辅助决策出最佳平衡点，使设备选型既满足工程性能需求，又将运行风险控制在合理范围，实现设备选型与运行风险的协同优化，确保特高压输电工程的高效、稳定运行。

2. 施工技术创新与风险控制融合

在特高压输变电工程中，施工技术创新与风险控制的融合极为关键。以智能张拉技术为例，应用于电缆隧道施工时，它能精准控制张拉力与伸长量。从技术层面，智能张拉系统可依据设定参数精确施加预应力，避免人工操作误差，提升施工精度。而在风险控制方面，精确的预应力施加能有效降低隧道结构因受力不均产生裂缝的风险，保障隧道结构稳定性与耐久性。通过这种技术创新与风险控制的融合，不仅提高了电缆隧道施工质量，更保障了特高压输变电工程整体的安全性与可靠性，为工程的长期稳定运行奠定基础，凸显出施工技术创新与风险控制协同管理在特高压输变电工程中的重要意义与实践价值。

五、总结

电力工程管理中技术管理与工程风险管理的协同，具有显著的理论创新与实践价值。从理论层面看，其打破传统管理模式的局限，构建了更为科学、系统的协同机制，为电力工程管理理论注入新内涵。在实践领域，该协同大幅提升工程的安全性、可靠性，有效降低风险，保障电力项目高效推进。然而，当前研究仍存不足，智能预警算法有待优化，以更精准地识别潜在风险；多目标协同决策也需完善，使技术与风险管控目标实现更优平衡。未来，数字孪生技术有望在电力工程协同管理中深度应用，通过构建虚拟模型模拟工程全生命周期，助力技术与风险管理的精准协同，为电力工程高质量发展提供有力支撑。

参考文献

- [1] 袁琳. Y 工程设计公司技术管理优化研究 [D]. 河北工业大学, 2022.
- [2] 廖家军. FY 公司模具开发的技术管理改进方案研究 [D]. 吉林大学, 2022.
- [3] 潘少峰. 国家先进技术光伏发电 H 项目施工技术管理研究 [D]. 东南大学, 2021.
- [4] 倪盛繁. 电力工程施工过程中的造价管理与控制研究 [D]. 天津工业大学, 2021.
- [5] 李海. 基于全生命周期的城市轨道交通技术管理研究 [D]. 广东工业大学, 2021.
- [6] 李斌斌. 电力工程技术管理问题研究 [J]. 科技经济导刊, 2018(35): 86.
- [7] 饶强. 电力工程管理中安全管理的具体策略 [J]. 通讯世界, 2021, 28(5): 134-135.
- [8] 郭丽, 王佳甲. 如何强化电力工程技术管理浅析 [J]. 文渊 (小学版), 2021(12): 3631-3632.
- [9] 徐婉月. 电力工程技术管理的难点和对策 [J]. 科技创新与应用, 2021, 11(19): 191-193.
- [10] 刘建松. 电力工程技术管理中存在的问题及对策研究 [J]. 电力设备管理, 2022(5): 165-167.

风电机组齿轮箱故障诊断与剩余寿命预测

——基于振动信号与深度学习

张晓伟

华电新能源集团股份有限公司山西分公司，山西 太原 030027

DOI:10.61369/WCEST.2025110021

摘 要： 为实现对风电机组齿轮箱故障的精准诊断与剩余寿命的可靠预测，本文提出了一种基于振动信号与深度学习的综合解决方案。在故障诊断方面，构建了包含数据采集、信号预处理、自适应特征提取、故障分类及性能评估的闭环模型。在剩余寿命预测方面，建立了“健康指标构建—退化轨迹建模—RUL预测”的预测框架。为打破诊断与预测任务间的壁垒，进一步基于多任务学习设计了融合框架，通过共享特征提取层与联合训练策略，实现了故障诊断与剩余寿命预测的协同优化。

关 键 词： 风电机组；齿轮箱；故障诊断；剩余寿命预测

Fault Diagnosis and Remaining Useful Life Prediction of Wind Turbine Gearboxes — Based on Vibration Signals and Deep Learning

Zhang Xiaowei

Shanxi Branch of Huadian New Energy Group Co., Ltd., Taiyuan, Shanxi 030027

Abstract： To achieve accurate fault diagnosis and reliable remaining useful life (RUL) prediction for wind turbine gearboxes, this paper proposes a comprehensive solution based on vibration signals and deep learning. In terms of fault diagnosis, a closed-loop model encompassing data acquisition, signal preprocessing, adaptive feature extraction, fault classification, and performance evaluation is constructed. For RUL prediction, a predictive framework is established, following the sequence of "health indicator construction—degradation trajectory modeling—RUL prediction." To bridge the gap between diagnosis and prediction tasks, a fusion framework is further designed based on multi-task learning, enabling collaborative optimization of fault diagnosis and RUL prediction through shared feature extraction layers and joint training strategies.

Keywords： wind turbine; gearbox; fault diagnosis; remaining useful life prediction

引言

传统的齿轮箱故障诊断方法主要依赖于傅里叶变换、小波分析等信号处理技术提取故障特征，再结合支持向量机（SVM）、人工神经网络等浅层模型进行分类。近年来以卷积神经网络、长短期记忆网络、Transformer等为代表的深度学习技术，凭借其强大的深层特征自动提取与非线性关系建模能力，为解决齿轮箱故障诊断提供了全新范式。鉴于此，本文旨在构建一个基于振动信号与深度学习的风电机组齿轮箱故障诊断与剩余寿命预测一体化框架。创新性地引入多任务学习思想，构建故障诊断与剩余寿命预测的融合模型，通过共享特征提取与联合训练策略，实现二者的协同增效。

一、基于振动信号与深度学习的齿轮箱故障诊断模型

（一）总体框架设计

风电机组的发电原理是将风的动能由风轮转化为机械能，再将机械能由发电机转化为电能，齿轮箱将风轮的低转速增至发电机所需的高转速，如果没有齿轮箱，将需要200极磁极发电机。齿轮箱是传动链中最重要的部件，其设计及制造非常关键，要求

体积小，重量轻，性能优良^[1]。基于振动信号与深度学习的齿轮箱故障诊断模型总体框架，含数据采集、信号预处理、自适应特征提取、故障状态分类及模型性能评估五大核心模块，形成“数据输入—信号处理—特征提取—状态识别—性能评估”完整闭环。数据采集模块获取不同运行状态的振动信号；预处理模块消除干扰，提供高质量数据；自适应特征提取模块借助深度学习自动提取深层故障特征，替代人工特征工程；分类模块输出故障类

型与程度；评估模块化模型诊断精度、泛化能力，为优化提供依据。该框架核心优势在于利用深度学习自适应提取特征，规避人工设计局限，且模块化设计便于后续优化与扩展。

（二）振动信号数据预处理

原始振动信号含多种干扰，直接训练会影响特征提取与诊断精度，振动信号预处理是齿轮箱故障诊断的关键前置步骤，核心包含四大环节^[2]。噪声去除环节采用小波阈值降噪与 EMD 结合，前者通过小波分解和高频系数阈值处理抑制噪声，后者分解信号为 IMF 分量并筛选重构消除非平稳噪声，提升信噪比；去趋势处理化解用最小二乘法或滑动平均法拟合并剔除线性 / 非线性趋势成分，获取平稳信号；数据分段与重采样环节按 1024–4096 点重叠分段提升数据利用率，用线性 / 三次样条插值统一不同工况信号的采样频率；数据标准化与增强环节通过 Z-score 或 min-max 标标准化统一信号幅值区间，借助添加高斯白噪声等方式扩充样本，缓解样本不平衡并提升模型泛化能力。

（三）基于深度学习的自适应特征提取

传统故障特征提取依赖人工经验与信号处理技术设计参数，存在主观性强、复杂故障适应性差的问题^[3]。基于深度学习的自适应方法可自动提取振动信号深层故障特征，效率与精度更高^[4]。本文采用 CNN-LSTM 混合模型，CNN 通过卷积、池化层捕捉齿轮磨损等局部故障特征，LSTM 则建模故障特征时序演变规律^[5]。预处理后的一维振动信号先转为二维形式输入 CNN，经其提取局部特征得到高维向量；该向量再输入 LSTM，结合层归一化与 dropout 技术解决梯度问题以挖掘时序规律。二者协同实现局部与时序特征的全面提取，为后续故障分类提供高质量支撑。

（四）故障状态分类模型构建

故障状态分类模型以自适应特征提取模块输出的深层特征向量为输入，输出齿轮箱正常状态、多种故障类型（齿轮、轴承、轴系等）及不同故障程度（轻度至重度磨损）^[6]。采用 Softmax 与 SVM 结合的分类策略提升精度与鲁棒性，将 LSTM 时序特征经带 dropout 正则化的全连接层转换为适配分类的低维特征，再分别输入两分类器（Softmax 适用于多类别场景，SVM 擅于小样本精准划分），通过加权投票融合结果。另采用交叉验证（网格 / 随机搜索）优化 CNN、LSTM、全连接层等超参数，保障模型分类精度与泛化能力。

二、基于深度学习的齿轮箱剩余寿命预测模型

（一）总体框架设计

基于深度学习的齿轮箱剩余寿命预测模型，以全生命周期振动信号为核心数据源，通过“数据采集—健康指标（HI）构建—退化轨迹建模—RUL 预测—性能评估”流程，依托四大核心模块实现精准预估^[7]。数据采集模块获取齿轮箱从正常到失效的完整振动数据；HI 构建模块从信号中提取量化退化状态的指标；退化轨迹建模模块利用深度学习捕捉退化的非线性、非平稳特性及时序规律；RUL 预测模块结合故障阈值完成寿命定量预测；性能评

估模块通过量化指标为模型优化提供依据。该框架优势在于实现退化状态量化，依托深度学习精准捕捉退化轨迹，适用于多工况场景。

（二）健康指标的构建与评估

健康指标是表征齿轮箱退化状态的核心参数，其质量直接决定剩余寿命预测精度，需满足三大核心要求。单调性、趋势性、区分度^[8]。文章采用多维度特征融合法构建指标，从全生命周期振动信号中提取时域、频域、时频域多维度原始特征；经格拉布斯准则剔除异常值、Z-score 标准化消除量纲差异、PCA 结合 LLE 降维，得到低维高相关特征子集；通过随机森林计算特征重要性权重并加权求和得到初始指标，经滑动平均平滑消除波动后获最终序列^[9]。评估采用单调性（M，Spearman 相关系数，[-1,1]，越近 ±1 越好）、趋势性（T，线性拟合优度，[0,1]，越近 1 越好）、区分度（D，类间 / 类内距离比，值越大越好）量化。

（三）基于序列学习的退化轨迹建模

齿轮箱退化过程具有复杂的非线性、非平稳时序特性，传统时序建模方法（如 ARIMA、灰色预测模型）难以精准捕捉其退化规律^[10]。基于序列学习的深度学习模型擅长时序依赖建模，可有效捕捉健康指标序列的非线性退化特征，为剩余寿命预测提供可靠支撑，故本文采用 GRU 与 Transformer 混合模型建模退化轨迹。GRU 可捕捉时序序列短期依赖，且结构简化、计算复杂度低；Transformer 基于自注意力机制，能捕捉长期依赖，适配长序列建模。流程上，通过滑动窗口划分健康指标序列得到输入输出样本对，划分训练 / 验证集后，将输入序列输入 GRU 获取短期退化特征向量，再输入 Transformer 编码器捕捉长期依赖并融合特征，实现退化轨迹精准建模。训练中采用 AdamW 优化算法、学习率策略提升收敛速度，结合 dropout、标签平滑及早停策略避免过拟合，保障模型精度与稳定性。

（四）RUL 预测模型构建与训练

RUL 预测模型以退化轨迹建模模块输出的融合特征向量为输入，结合齿轮箱故障阈值实现剩余寿命定量预测。文章采用全连接神经网络结合注意力机制构建该模型，以提升预测精度。采用统计方法结合专家经验，通过分析多个齿轮箱全生命周期健康指标序列，选取失效时刻指标值作为初始阈值，经专家修正后确定合理阈值，健康指标达该阈值时判定齿轮箱失效，剩余寿命为 0；融合特征向量先输入注意力层，通过计算各时刻健康指标注意力权重突出关键退化特征，再将其输出输入全连接层进行维度转换与非线性映射，输出剩余寿命预测值；以均方根误差（RMSE）为损失函数，用于衡量预测值与真实值的偏差，采用 AdamW 优化算法优化参数，调节学习率、批次大小等超参数提升收敛速度与精度；采用迁移学习，将某工况下训练好的模型迁移至其他工况，通过微调部分参数适应不同工况退化特性，减少新工况样本需求并降低训练成本。

（五）模型性能评估指标

为全面评估剩余寿命预测模型性能，选取 RMSE、MAE、MAPE、R² 为核心评估指标，引入预测稳定性指标衡量可靠性。RMSE 反映均方偏差、MAE 抗异常值干扰、MAPE 表征相对误

差，三者取值越小精度越高； R^2 衡量退化轨迹拟合度，越接近 1 效果越好，稳定性指标标准差越小则预测越平稳。实验采用不同工况下齿轮箱全生命周期数据集，通过对比指标验证模型优越性，同时分析其在早、中、晚期退化阶段的预测精度，明确适用范围与优化方向。

三、故障诊断与剩余寿命预测的融合模型研究

（一）融合的必要性与挑战

故障诊断与剩余寿命预测是风电机组齿轮箱 PHM 的核心环节，二者关联紧密。诊断可为预测提供初始状态、故障类型与程度等依据，预测可通过寿命变化趋势反哺诊断，提升其前瞻性与准确性。但现有研究多将二者视为独立任务，忽略关联信息导致模型性能受限，因此开展融合研究具有重要理论与工程价值。融合研究面临三大核心挑战，诊断多为分类数据、预测多为时序数据，格式与特征维度差异显著，异构数据融合是模型构建关键；诊断标签为故障类型与程度、预测为连续寿命值，合理损失函数设计是联合训练核心；需兼顾分类与回归精度，易导致训练难度增加、泛化能力下降，模型结构简化是优化重点。

（二）多任务学习融合框架设计

文章基于多任务学习（MTL）设计故障诊断与剩余寿命预测融合框架，核心含数据输入、共享特征提取、特定任务（故障诊断 / 剩余寿命预测）及输出四层。数据输入层转换振动信号（故障诊断）与健康指标序列（剩余寿命预测）为统一格式；共享特征提取层采用 CNN+Transformer 混合模型，提取异构数据共享特征并挖掘关联信息；特定任务层并行处理：故障诊断层通过

全连接层 + Softmax 输出故障类型与程度，剩余寿命预测层通过 GRU+ 全连接层输出预测值；输出层经注意力机制加权及专家经验修正，输出齿轮箱综合健康状态评估结果。

（三）融合模型的联合训练策略

融合模型联合训练的核心是解决标签不一致、任务权重不平衡问题，采用加权联合训练与交替训练结合的策略。加权联合训练，总损失函数为故障诊断的交叉熵损失与剩余寿命预测的均方误差损失的加权和，权重系数依据验证集性能自适应调整，保障两任务性能均衡；交替训练，先单任务训练两子模型获取初始化参数（避免初期训练不稳定），再基于该参数进行加权联合训练，结合自适应学习率提升收敛速度；防过拟合措施，引入 dropout 正则化、数据增强（高斯白噪声、平移、翻转等）提升泛化能力，采用早停策略保存最优参数。

四、结束语

本文围绕风电机组齿轮箱的故障诊断与剩余寿命预测两大核心问题，系统性地开展了基于振动信号与深度学习的研究工作，并取得了一系列有价值的成果。

在故障诊断方面，本文构建了从数据采集、预处理到特征提取与分类的完整技术框架。在剩余寿命预测方面，本文提出了“健康指标构建—退化轨迹建模—RUL 预测”的系统性解决方案。文章所提出的方法体系为风电机组齿轮箱的智能运维提供了有效的技术途径，对推动风电行业的智能化、数字化转型具有积极的促进作用。

参考文献

- [1] 陈子根. 风电机组齿轮箱故障诊断方法研究 [J]. 消费导刊, 2018(45): 155.
- [2] 唐明珠, 黎涛, 谭欣星, 等. 基于 ICSVM 的风电机组齿轮箱故障诊断 [J]. 计算机工程与应用, 2016, 52(14): 232–236. DOI: 10.3778/j.issn.1002-8331.1409-0122.
- [3] 王一宁, 甄成刚, 韩瑶瑶. 基于 AFSA-PSO-LSSVM 的风电机组齿轮箱故障诊断 [J]. 郑州大学学报 (理学版), 2022, 54(3): 81–87. DOI: 10.13705/j.issn.1671-6841.2021286.
- [4] 孙亚飞, 渠叶君. 基于数字孪生的风电机组齿轮箱故障诊断方法研究 [J]. 科技资讯, 2025, 23(1): 102–104. DOI: 10.16661/j.cnki.1672-3791.2404-5042-7653.
- [5] 王一宁, 甄成刚, 韩瑶瑶. 基于 AFSA-PSO-LSSVM 的风电机组齿轮箱故障诊断 [C]//CCF 第 36 届中国计算机应用大会论文集. 2021: 81–87.
- [6] 李辉, 李宣, 贾嵘, 等. 基于 EWT-OPRCMDE-ELM 的风电机组齿轮箱故障诊断研究 [J]. 自动化仪表, 2021, 42(11): 12–19. DOI: 10.16086/j.cnki.issn1000-0380.2021010028.
- [7] 高宏伟, 李新成, 何晓宁, 等. 基于希尔伯特变换的风电机组齿轮箱故障诊断方法研究 [J]. 机床与液压, 2024, 52(9): 215–220. DOI: 10.3969/j.issn.1001-3881.2024.09.032.
- [8] 王璞, 孙洁, 张怡. 基于 LSTM-SVM 的风电机组齿轮箱故障诊断 [J]. 机床与液压, 2023, 51(16): 211–214. DOI: 10.3969/j.issn.1001-3881.2023.16.031.
- [9] 丁硕, 常晓恒, 巫庆辉, 等. 基于 LVQ 神经网络风电机组齿轮箱故障诊断研究 [J]. 现代电子技术, 2014(10): 150–152. DOI: 10.3969/j.issn.1004-373X.2014.10.043.
- [10] 桂斌斌, 林国汉, 谢雅, 等. 基于 PSO-BP 的风电机组齿轮箱故障诊断 [J]. 湖南工程学院学报 (自然科学版), 2019, 29(3): 21–25. DOI: 10.3969/j.issn.1671-119X.2019.03.005.

火电厂热工自动化改造实践与效能分析

余强

国家电投集团贵州金元股份有限公司纳雍发电总厂，贵州 毕节 553303

DOI:10.61369/WCEST.2025110022

摘 要： 在“双碳”目标以及电力市场化改革的双重驱动下，火电厂面临迫切的节能降耗以及提升效率的需求，热工自动化改造遂成为关键突破口。目前，老旧火电厂大多存在控制精度低下、系统兼容性欠佳、能耗相对偏高的问题。本文结合热工自动化技术的发展趋向，系统地阐释了分散控制系统升级、智能传感技术应用等改造的核心要点，以某300MW机组的改造作为实例，从能耗指标、控制精度、运维成本等多个层面进行效能分析，进而提出分阶段进行改造、融合应用技术等优化建议，为火电厂的自动化升级提供实践参考。

关 键 词： 火电厂；热工自动化；改造实践；效能分析

Practice and Efficiency Analysis of Thermal Automation Transformation in Thermal Power Plants

Yu Qiang

Nanyong Power Generation General Plant, Guizhou Jinyuan Co., Ltd. of State Power Investment Corporation, Bijie, Guizhou 553303

Abstract： Driven by the "dual carbon" goals and the market-oriented reform of the power industry, thermal power plants are confronted with an urgent need for energy conservation, consumption reduction, and efficiency improvement. As a result, thermal automation transformation has become a key breakthrough. At present, most of the old thermal power plants have problems such as low control accuracy, poor system compatibility and relatively high energy consumption. This paper, in light of the development trends of thermal automation technology, systematically expounds the core points of the transformation such as the upgrade of distributed control systems and the application of intelligent sensing technology. Taking the transformation of a 300MW unit as an example, it conducts efficiency analysis from multiple aspects including energy consumption indicators, control accuracy, and operation and maintenance costs, and then puts forward optimization suggestions such as phased transformation and integrated application of technologies. Provide practical references for the automation upgrade of thermal power plants.

Keywords： thermal power plant; thermal engineering automation; renovation practice; performance analysis

引言

我国的电力供应体系中，火电厂扮演核心支撑角色，它的运行效率以及环保水平会直接对能源安全和“双碳”目标的达成产生影响。由于时间的推移，这些机组的热工自动化系统普遍显现出一些问题，会导致机组的调峰能力弱，能耗指标高。热工自动化系统是火电厂生产控制的“神经中枢”，对它实施改造升级能够达成对锅炉以及汽轮机组等核心设备的精确调控。本文着重关注火电厂热工自动化改造的实际操作，梳理改造的技术途径，借助案例对改造的效能开展量化分析，从而为老旧机组的升级以及新建机组的自动化建设提供理论与实践的支持。

一、火电厂热工自动化改造的核心技术与内容

（一）分散控制系统升级改造

热工自动化改造的关键内容聚焦于分散控制系统升级，主要从硬件更换以及软件优化两个维度推进。在硬件层面，运用高性能控

制器，并且配置冗余架构，主控制器挑选运算能力突出的处理器，有能力满足大规模数据处理的要求，电源模块以及通信模块均实施冗余设计，以此保证系统在单一模块出现故障时也能够持续运转。在软件方面，着重升级控制逻辑和人机交互界面，增添了机组负荷预测功能，能够依据电网调度指令预先对控制参数作出调整；优化

报警系统，采用分级报警机制，把报警信息按照紧急程度进行分类，切实降低无效报警为运行人员造成的干扰。与此同时，构建统一性数据中台，达成分散控制系统与厂内其余管理系统在数据层面的交互流通，破除各个系统之间存在的阻碍。

（二）智能传感与检测系统改造

智能传感系统的改造着重于对“精准感知—稳定传输—数据校准”全流程的优化。在诸如锅炉炉膛、汽轮机缸体等关键设备部位，会把传统的机械传感器全部更换成光纤传感以及无线传感等新式设备，对于炉膛温度，借助红外测温传感器达成多测点的实时监测；而针对汽轮机组的振动情况，则运用专用传感器，该传感器能够敏锐捕捉到细微的振动异常。搭建专业的无线传感网络，运用前沿的网络技术保障数据传输达成高速度以及低延迟的效果，构建全面的传感数据校准体系，定期利用标准仪器针对传感器进行校准，并融合大数据分析技术达成漂移误差的自动弥补。在改造工作结束之后，主蒸汽压力等关键参数的测量误差显著降低，为机组实施精确控制给予了稳定可靠的数据支持。

（三）控制策略与算法优化

采用“智能算法与工况适配相结合”的灵活模式进行控制策略的优化，针对各种不同的运行工况制定出差异化控制方案。在锅炉控制领域，运用“预测控制和模糊PID相融合”的复合算法，依据给煤量、风量、给水流量等与之相关的参数对蒸汽温度的变化趋向进行预测，提前调整减温水量，切实缩小主蒸汽温度的波动幅度。对于汽轮机组控制，引入协调控制策略，达成锅炉和汽轮机的协同式调节，在机组负荷发生变化的进程中，有效把控转速的波动情况，增强机组运行的稳定程度。对于辅机控制，采用将变频调速和逻辑优化相结合的方式，依照主机的实际负荷情况，动态调整给水泵、风机这类辅机设备的运行状态，如此，能够有效规避“大马拉小车”的不合理能源浪费问题，进而明显降低辅机所消耗的电能。

（四）安全与运维系统升级

安全系统的改造着重于增强数据安全以及设备保护的能力，构建起三级安全防护体系，针对现场控制层面、监控层面以及管理层面分别拟定防护办法，借助防火墙、访问控制、数据加密、安全审计等技术手段，从各个方面确保系统的安全。运维系统的升级引入智能诊断技术，依据设备的运行数据构建故障诊断模型，通过振动频率、温度变化等特征参数识别设备的早期故障。在某机组完成改造之后，设备故障提前预警的精准度得到了显著提高，成功地防止了多次非计划的停机情况发生。与此同时，开发移动运维平台，运维人员借助移动终端便能够接收故障预警情况、查询设备台账信息，显著缩短了故障处理耗费的时间，有效提升运维工作的效率。

二、火电厂热工自动化改造的实施路径与关键环节

（一）改造前期的评估与方案设计

在改造工作前期，要开展全方位的系统评测以及方案计划，其核心的操作步骤涵盖了多个维度。首先是对现状进行深入调研，

借助专业的检测设备并且收集有关运行的数据，从而对分散控制系统、传感器等各种设备的运行情况进行全面梳理，要精确辨别出诸如控制精度不够、可靠性欠佳等问题，进而形成一份详细的问题列表。其次是开展需求剖析，综合考虑机组的容量、运行时长以及相关政策要求，清晰确定改造之后在控制精度、能耗指标等领域的具体目标。再者是进行技术的挑选，依据实际需求抉择与之适配的分散控制系统品牌以及传感设备型号，优先选用国产化的技术以及设备，以此降低后期维护成本以及技术依赖可能带来的风险。最后是在进行方案的编撰，要制定出详细的改造施工规划，明确各个阶段的时间节点、人员的分工情况以及安全措施，尽可能降低改造工作对机组正常运行产生的影响。方案完成后需组织技术专家、电厂运维团队联合论证，重点审核技术可行性与成本合理性，同时预判政策变动等潜在风险并制定应对预案。

（二）改造实施的分阶段推进

火电厂热工自动化改造采用将“停机改造”与“在线升级”相融合的分阶段推进的模式。第一个阶段是停机改造时期，主要借助机组进行大修的时间段，集中开展分散控制系统硬件替换、核心传感器装设等无法在线开展的重要工作，在此阶段，需要做好旧设备拆除工作和新设备调试工作的衔接，防止出现设备闲置以及工期延误的情况。第二阶段为在线升级阶段，在机组正常运行时，进行控制算法优化、软件系统升级等工作，运用主备切换的办法，保证在升级过程中控制系统能够持续运行，不会对机组的稳定性造成影响。第三阶段是联调测试时期，对改造之后的系统开展整体联调工作，通过模拟不同的负荷工况以及故障场景，全方位验证系统的控制精准度和可靠性，只有在联调符合标准之后才可以正式投入使用。各阶段需建立专项台账，详细记录设备参数、施工进度及问题整改情况，阶段衔接前组织多方验收。

（三）改造后的调试与验收

改造之后的调试以及验收是保障改造质量的关键的环节，调试工作能够分成静态调试与动态调试两个方面。静态调试着重测试设备硬件连接以及软件功能，例如查看分散控制系统跟传感器的数据通信是否正常、控制指令的执行是否准确；动态调试在机组的运行状态下进行，测试不同负荷工况之下系统的控制性能，例如当机组负荷从50%提高到100%时，主蒸汽压力、温度等参数的波动情况。验收工作应依照国家相关标准以及行业规范开展，组建一个由建设单位、监理单位、施工单位共同构成的验收小组，从技术指标达成情况、安全性能保障程度、经济效能实现水平等多个维度进行评估。验收所涉及的指标包含控制精度的达标比率、设备运行的可靠程度、能耗降低的具体幅度等，只有当全部的验收指标都符合要求之后，才能够宣告验收工作圆满完成。

三、火电厂热工自动化改造效能评估体系与案例分析

（一）效能评估指标体系构建

搭建包含“技术指标、经济指标、安全指标”的三维效能评估系统，从而全方位、整体地衡量改造工作所取得的成效。技术指标包含控制的精确程度（主蒸汽温度的波动范围、汽压控制时

产生的误差等)、系统的可靠程度(例如平均没有故障而能够运行的时间、控制指令得到准确执行的比率)、响应速度(比如系统做出响应的时间、负荷改变后进行调整的时间);经济指标包括能耗指标(像供电过程中消耗的煤炭量、发电厂自身用电所占的比率)、运行维护成本(如处理故障成本、设备维护费用)、发电的效率情况(例如机组的负荷率、等效可用的系数);安全指标有故障提前预警的准确比率、并非按照计划进行停机的次数、环保排放的有关指标(像氮氧化物排放浓度)。凭借体系能够达成针对改造效能的量化以及精准评估。

（二）案例背景：某300MW火电机组改造实践

挑选一个在2008年开始投入生产运营的300MW亚临界火力发电机组作为案例分析。在对该机组实施改造之前，它存在三方面显著的问题，其一，主蒸汽温度呈现出较大的波动情况，其波动范围达到了正负6℃，由于控制的精准程度不够，进而致使锅炉的运行效率较低；其二，分散控制系统老化，系统平均能够保持无故障运行的时长仅为1800小时，并且每年会出现3次非计划停机；其三，该机组的供电煤耗量较高，达到了318克每千瓦时，相较于行业内的先进水平，每千瓦时要高出12克。在2023年，此机组展开了热工自动化方面的改造工作，改造所涵盖的内容有：将分散控制系统更新为国产化的第七代产品，更换120台智能传感器以及优化控制算法等，此次改造的总投资达到860万元，改造的工期设定为18天，改造工作借助机组大修的窗口期完成核心部分的施工。

（三）改造效能量化分析

凭借所构建的评估体系，对比分析该机组在改造前与改造后各12个月的运行数据，可以发现效能提升展现出明显的效果。在技术指标维度，主蒸汽温度的波动范围收缩至正负1.2摄氏度，控制精准度提高76.7%；系统的响应时长从450毫秒缩减至90毫秒，变负荷的调整时长从40分钟减少至15分钟；平均无故障的运行时长提升到了6200小时，和改造之前相比增长244%。在经济指标范畴内，供电煤耗降低至309克每千瓦时，若按照年发电量18亿千瓦时来计算，每年能够节约标准煤1620吨，并且使得燃

料成本减少129.6万元，厂用电率从6.8%下降到6.1%，一年可节约厂用电1260万千瓦时，节省电费75.6万元，运维成本每年降低42万元，改造投资的回收期限大概为5.2年。在安全与环保指标领域，故障预警的准确程度达到93%，改造之后未曾出现非计划停机的情况，氮氧化物的排放浓度从每立方米105毫克降低到每立方米82毫克，符合最新的环保标准。

（四）案例改造的经验与启示

此案例改造所取得的成功经验主要涵盖三个方面，其一，技术选型适配性强，所选用的国产化分散控制系统与机组容量高度契合，和进口设备相比使采购成本降低30%，并且后期技术支持响应迅速；其二，施工组织科学合理，借助大修窗口期集中进行硬件改造，在在线升级阶段运用主备切换模式，以此保证机组能够持续运行；其三，重视人员培训，在改造之前组织运维人员开展为期一个月的技术培训，从而确保改造之后能够快速掌握新系统的操作以及维护技能。其带来的启示是，火电厂进行热工自动化改造时，需依照机组的实际情况拟定个性化方案，防止采用“一刀切”这种单一、缺乏灵活性的改造方式，同时还需着重加强改造完成之后的人员培训事宜以及系统运维工作，进而充分发挥出改造的实际效能。

四、结论

在能源转型以及政策推动双重背景下，火电厂实施热工自动化改造已然成为提升其核心竞争力的必然举措。本文针对分散控制系统的升级、智能传感的应用等关键改造部分开展了系统性阐述，搭建起“技术—经济—安全”三维的效能评估体系，并借助具体的机组实例验证改造所取得的良好成效。研究显示，经过科学规划与合理实施的热工自动化改造，能够切实降低机组的能源消耗，增强设备运行的可靠程度，让投资回报处于合理周期。在改造中，要着重结合机组的实际情形拟定个性化方案，采用分阶段推进的模式，同时强化针对人员的培训工作。

参考文献

[1] 欧再星. 火力发电厂热工自动化仪表安装及常见故障 [J]. 机械管理开发, 2024, 39(12): 258–259+273.
[2] 郭超. 火电厂热工自动化系统安全保护与故障诊断的智能化技术研究 [J]. 电气技术与经济, 2024, (09): 258–260+264.
[3] 黄宏宁. 火电厂热控自动化控制设备的调试及安装应用 [J]. 模具制造, 2024, 24(07): 222–224.
[4] 徐龙涛. 故障树分析法在电厂热工自动化检修中的应用 [J]. 科学技术创新, 2024, (07): 31–34.
[5] 颜为红. 火电厂热控自动化保护装置的检修及维护探究 [J]. 冶金与材料, 2022, 42(04): 59–61.

