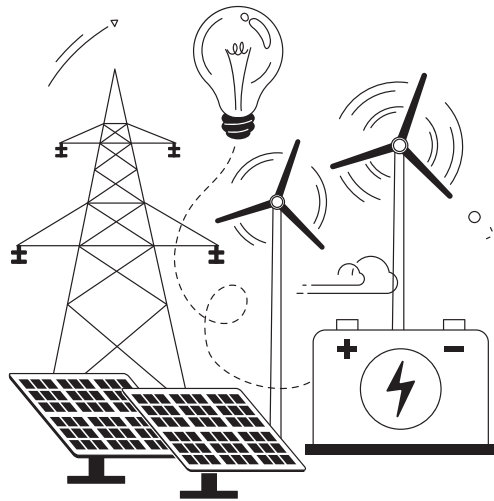


电力技术 与安全管理

Electric Power Technology and Safety Management



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



Editorial Board Member

Bateer Hexi

Inner Mongolia Energy Power Generation Hangjin Power Generation Co., Ltd.

Gaowa Morigeng

Inner Mongolia Electric Power (Group) Co., LTD. Ordos Power Supply Branch.

Juan Wang

Inner Mongolia Electric Power (Group) Co., LTD. Ordos Power Supply Branch.

Chaoshan Xie

Beijing BKC Technology Co., Ltd.

电力技术与安全管理

Electric Power Technology and Safety Management

第2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 《电力技术与安全管理》编辑部

ISSN(O): 2997-3503

ISSN(P): 2997-3473

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。



电力系统 | POWER SYSTEM

- 001 光伏发电与储能系统联合运行的能量管理策略研究 郭威
Research on Energy Management Strategies for the Combined Operation of Photovoltaic
Power Generation and Energy Storage Systems Guo Wei
- 004 燃煤机组自动化控制系统的优化与研究 杨占海, 刘德明, 薄庆瑶
Optimization and Research on the Automatic Control System
of Coal-fired Units Yang Zhanhai, Liu Deming, Bo Qingyao
- 007 电力运行效率提升的管理方法研究 许少锋
Research on Management Methods for Improving
Power Operation Efficiency Xu Shaofeng
- 010 嵌入式 Linux 系统在电力监测网关中的应用 张民
Design and Application of Embedded Linux System in Power
Monitoring Gateway Zhang Min
- 013 烟气提水系统埋地管道泄漏机理分析及综合治理实践 白关锁
Analysis of Leakage Mechanism and Comprehensive Management Practice of Buried
Pipeline in Flue Gas Lifting System Bai Guansuo
- 016 火电机组烟气余热供暖系统换热效率影响因素及调控策略 孙立斌
Factors Affecting Heat Exchange Efficiency and Control Strategies in Flue Gas Waste
Heat Heating Systems of Thermal Power Units Sun Libin
- 019 低压配电系统中智能断路器的应用研究 安洋
Application Research on Intelligent Circuit Breakers in Low
Voltage Distribution Systems An Yang
- 022 电气工程中输电线路状态智能运维监测系统应用 陈晓忠
Application of Intelligent Operation and Maintenance Monitoring System for
Transmission Line Status in Electrical Engineering Chen Xiaozhong
- 025 垃圾焚烧电厂能源与动力系统的热力学剖析及效率优化探究 邹国华
Thermodynamic Analysis and Efficiency Optimization of Energy and Power
Systems in Garbage Incineration Power Plants Zou Guohua
- 028 垃圾焚烧电厂能源与动力系统热力学分析及效率优化探究 张超强
Thermodynamic Analysis and Efficiency Optimization of Energy and Power Systems in
Garbage Incineration Power Plants Zhang Chaoqiang
- 031 基于蒸汽参数的垃圾焚烧电厂热能动力系统汽轮机组发电效率影响探究 梁迦业
Exploration of The Influence of Steam Parameters on The Power Generation
Efficiency of Thermal Power System Steam Turbine Units in Garbage
Incineration Power Plants Liang Jiaye
- 034 基于电气与热控系统的垃圾焚烧发电厂电力运行安全策略研究 蓝展鹏
Research on Power Operation Safety Strategy of Garbage Incineration Power Plant
Based on Electrical and Thermal Control System Lan Zhanpeng
- 037 基于热力学分析的垃圾焚烧电厂热能动力系统发电效率优化研究 胡俊凯
Optimization of Power Generation Efficiency of Thermal Power System in Waste
Incineration Power Plant based on Thermodynamic Analysis Hu Junkai

技术研究 | TECHNICAL RESEARCH

- 040 风电与光伏工程管理中的电气安装与调试技术研究 任麟东
Research on Electrical Installation and Commissioning Technology in Wind Power and
Photovoltaic Engineering Management Ren Lindong

043	10KV电力设备试验与继电保护自动化调试的协同机制探究 Exploration of The Collaborative Mechanism between 10KV Power Equipment Testing and Relay Protection Automation Debugging	容伟文 Rong Weiwen
046	食品制造设备管理视角下的电气技术创新路径 Innovation Pathways for Electrical Technology from the Perspective of Food Manufacturing Equipment Management	吴朝民 Wu Chaomin
049	电力工程施工过程监理中的技术与安全管理策略探究 Exploration of Technical and Safety Management Strategies in the Supervision of Power Engineering Construction Process	杨少波 Yang Shaobo
052	基于三维激光扫描与区块链的智慧煤场动态库存建模与掺配协同优化研究 Research on Dynamic Inventory Modeling and Blending Cooperative Optimization of Smart Coal Yard based on 3D Laser Scanning and Blockchain	姜振华, 杜磊, 谢松星, 范学明 Jiang Zhenhua, Du Lei, Xie Songxing, Fan Xueming
055	海外光伏电站投资的成本控制与收益优化路径分析的风险评估与应对策略 Risk Assessment and Response Strategies for Cost Control and Revenue Optimization in Overseas Photovoltaic Power Station Investment	封亚楠 Feng Yanan
058	电力施工项目安全监管的实践与探索 Practice and Exploration of Safety Supervision in Electric Power Construction Projects	梁嘉乐 Liang Jiale
061	医院电气工程设备维护响应机制及质量提升路径探讨 Discussion on Maintenance Response Mechanism and Quality Improvement Path of Hospital Electrical Engineering Equipment	卢叶强 Lu Yeqiang
064	电力施工生产管理模式及其对电气专业发展的影响 The Management Mode of Electric Power Construction Production and Its Impact on the Development of Electrical Specialty	区永辉 Ou Yonghui
067	AI技术在新能源现场施工管理的实际运用 Practical Application of AI Technology in On-Site Construction Management of New Energy Projects	刘敏 Liu Min
070	配网终端防雷接地与二次回路共地干扰抑制技术研究 Research on Lightning Protection Grounding and Secondary Circuit Common Ground Interference Suppression Technology for Distribution Network Terminals	党琳 Dang Lin
073	电力工程安全培训双重预防机制实践与挑战 Practice and Challenges of the Dual Prevention Mechanism in Safety Training for Electric Power Engineering	吕春荣 Lv Chunrong
076	基于电流频谱特征分析的电动机故障诊断与实验研究 Motor Fault Diagnosis and Experimental Research based on Current Spectrum Characteristics Analysis	何奇瑞 He Qirui
080	制造业电气设计在工程项目中实际问题的解决路径探讨 Discussion on The Solution Path of Practical Problems in Manufacturing Electrical Design in Engineering Projects	伍辉强 Wu Huiqiang
083	垃圾焚烧电厂电力生产、输送与分配的实践研究 Practical Research on Electricity Production, Transmission, and Distribution in Garbage Incineration Power Plants	齐德志 Qi Dezhi
086	新能源发电企业参与绿电交易的模式与效益分析 Analysis of The Modes and Benefits of New Energy Power Generation Enterprises Participating in Green Electricity Trading	陈法东 Chen Fadong
089	高速公路机电工程供配电施工技术分析 Analysis of Power Supply and Distribution Construction Technology of Highway Electromechanical Engineering	范承雨 Fan Chengyu
092	某海上风电场 #1 主变低压侧零序电流越限问题的分析处理 Analysis and Treatment of Zero-sequence Current Exceeding Limit on Low-voltage Side of #1 Main Transformer in Offshore Wind Farm	陈杰 Chen Jie

光伏发电与储能系统联合运行的能量管理策略研究

郭威

中电投绿能科技有限公司, 上海 200000

DOI:10.61369/EPTSM.2025110001

摘 要： 随着全球能源转型与“双碳”目标推进，光伏发电作为清洁能源的核心组成部分，其规模化应用成为必然趋势。本文针对光伏发电与储能系统联合运行的能量管理展开研究。光储联合系统能量管理面临多目标优化冲突、不确定性干扰、算法性能瓶颈等核心问题。为此，提出基于改进麻雀搜索算法的策略：改进算法结构以增强寻优能力，构建分层多目标优化模型并协同求解，建立动态约束处理与实时反馈机制。该策略旨在提升光储系统运行的经济性、可靠性与环保性，为其高效管理提供有效方案。

关 键 词： 光伏发电；储能系统；联合运行；能量管理策略

Research on Energy Management Strategies for the Combined Operation of Photovoltaic Power Generation and Energy Storage Systems

Guo Wei

China Power Investment Green Energy Technology Co., LTD., Shanghai 200000

Abstract： With the global energy transition and the advancement of the "dual carbon" goals, photovoltaic power generation, as a core component of clean energy, has seen its large-scale application become an inevitable trend. This paper conducts research on energy management in the combined operation of photovoltaic power generation and energy storage systems. The energy management of the integrated photovoltaic and energy storage system is confronted with core issues such as multi-objective optimization conflicts, uncertain interference, and algorithm performance bottlenecks. To this end, a strategy based on the improved sparrow search algorithm is proposed: improving the algorithm structure to enhance the optimization ability, constructing a hierarchical multi-objective optimization model and solving it collaboratively, and establishing a dynamic constraint processing and real-time feedback mechanism. This strategy aims to enhance the economic efficiency, reliability and environmental friendliness of the photovoltaic storage system operation, providing an effective solution for its efficient management.

Keywords： photovoltaic (PV) power generation; energy storage system; combined operation; energy management strategy

在全球能源转型与“双碳”目标推动下，光伏发电与储能系统联合运行成为提升清洁能源利用率的关键。但光储系统能量管理面临多目标冲突、不确定性干扰及算法适配性不足等问题，制约其高效运行。本文聚焦这些挑战，探索基于改进麻雀搜索算法的能量管理策略，为光储系统优化运行提供新思路。

一、光储联合系统能量管理面临的核心问题

（一）多目标优化的冲突与优先级失衡

光储联合系统的能量管理过程中，需要在经济性、可靠性、环保性等多个维度上实现协同优化，而这些目标之间存在着天然的内在矛盾。从经济性角度出发，核心诉求是通过合理调度实现资源的高效配置，以降低整体运行成本并提升收益空间，但这一过程往往需要对储能资源进行高强度利用，这种利用方式可能与

旨在延长设备服役周期的可靠性目标形成直接冲突。可靠性目标强调系统运行的稳定性与持续性，要求避免可能对设备造成不可逆损伤的操作，而这种保守策略可能会限制经济性目标的实现程度。环保性目标则聚焦于提升清洁能源的消纳率、减少对传统能源的依赖，这需要通过精细化调控平抑新能源出力的波动，以满足电网接入的规范要求。然而，这种调控往往伴随着储能设备的高频次状态切换，由此产生的能量损耗与设备磨损会直接推高运维成本，使得环保性目标与经济性目标之间形成张力。在离网场

景中，可靠性目标的优先级被进一步凸显，为确保关键负荷的不间断供电，往往需要维持较高的能量储备冗余，这种冗余设计虽能提升系统的抗风险能力，却可能导致能量利用效率的下降，进而牺牲部分经济性。

（二）不确定性因素的动态干扰与预测偏差

系统运行过程中，诸多关键参数始终处于动态变化之中，其不确定性构成了能量管理的主要干扰源，这些不确定性主要体现在三个维度。首先是光伏发电的固有随机性，其出力大小直接受制于自然环境的瞬时变化，比如云层的随机漂移会导致光照强度急剧波动，大气中颗粒物的分布变化会影响光的传播效率，而突发的气象事件则可能在短时间内彻底改变光照条件，这些因素共同导致光伏发电的实际出力与预测结果之间始终存在难以消除的偏差，且时间跨度越大，这种偏差的累积效应越明显。其次是用户负荷的动态波动性，不同类型的负荷有着截然不同的变化规律。居民用电行为与日常生活节奏紧密相关，会随作息习惯的调整、季节更替带来的需求变化而呈现出 irregular 波动；商业用电则受经营策略、市场活动等因素影响，用电模式常处于动态调整之中，使得负荷曲线在不同时段呈现出显著差异。这种波动性使得负荷需求的预测始终存在一定的不确定性，难以精确把握其变化趋势。

（三）优化算法的性能瓶颈与场景适应性不足

能量管理问题的本质，是一个包含高维度变量、非线性关系与多重约束条件的复杂优化命题，这使得现有算法在追求求解精度与运行效率的平衡上始终面临挑战。传统数学优化方法在应对这类问题时，往往因模型的复杂性而难以直接适用。例如，线性规划、动态规划等方法在处理非线性约束时，不得不进行一定程度的简化与近似，这种处理方式虽能降低计算难度，却可能使优化结果偏离实际场景中的最优解，导致策略的实际效果打折扣^[1]。动态规划虽在理论上能够求得全局最优解，但随着时间尺度的拉长和变量维度的增加，其计算量会呈现爆发式增长，难以满足实时调度对响应速度的要求，在需要快速调整策略的场景中显得力不从心。

二、基于改进麻雀搜索算法的能量管理策略

（一）算法结构改进与寻优能力增强

原始麻雀搜索算法在处理光储联合系统这类复杂能量管理问题时，常因探索与开发能力的失衡导致优化效果受限——要么因过度探索而收敛缓慢，要么因过早陷入局部开发而错失全局最优解。为此，从种群初始化与搜索机制两个关键环节进行针对性改进，以提升算法对高维度、多约束场景的适配性^[2]。

在种群初始化阶段，突破传统随机生成初始解的模式，引入混沌映射机制。混沌系统所具有的遍历性与伪随机性，能够通过非线性映射生成覆盖整个解空间的初始解群，且解的分布更为均匀，有效避免了随机初始化可能导致的解群聚集现象。这种改进使得算法在优化初期就能接触到更多潜在的优质解区域，为后续的全局寻优奠定了更坚实的基础，尤其在处理包含储能充放电功率、电网交互功率等多变量的能量管理问题时，能显著提升解的

多样性。在搜索机制层面，设计动态自适应的权重调整策略。算法将种群划分为负责全局探索的“发现者”与专注局部开发的“加入者”，并根据迭代进程实时调整两者的权重占比：在迭代初期，提高发现者的权重分配，使其在更大范围内进行随机搜索，充分挖掘解空间中的未知区域，避免因搜索范围过窄而遗漏全局最优解；随着迭代推进，逐步增加加入者的权重占比，引导算法聚焦于优质解周边的局部区域进行精细搜索，通过对解的微调与优化提升解的精度。

（二）多目标优化模型的分层构建与协同求解

光储联合系统的能量管理涉及经济性、可靠性、环保性等多重目标，这些目标在本质上存在相互制约的特性，若简单叠加处理易导致优化方向模糊。为此，构建分层递进的多目标优化模型，通过层级化设计明确各目标的核心诉求与关联关系，为协同优化奠定逻辑基础^[3]。

底层以经济性为根基，系统梳理影响运行成本的各项要素，将购电成本、售电收益、储能设备的运维损耗、电池循环寿命衰减带来的隐性成本等进行量化整合，形成可精确计算的经济成本函数。这一层面的优化旨在通过合理调度能量流，实现系统运行的成本最小化与收益最大化，为整个优化模型提供基础经济约束。中层聚焦可靠性目标，将保障系统稳定运行的关键指标转化为可量化的函数表达。其中包括对储能状态的动态维持（如避免过度充放电导致的性能损耗）、对光伏功率波动的有效平抑（如控制联络线功率的波动幅度）、对负荷供电连续性的保障（如确保关键负荷的电力供应不中断）等。这一层面的优化是系统安全运行的核心支撑，与底层经济性目标形成相互约束又相互促进的关系。顶层以环保性为导向，通过提升光伏发电的本地消纳率、减少对传统火电等化石能源的依赖、降低系统运行过程中的碳排放等指标构建绿色目标函数。这一层面的优化响应了能源转型的大趋势，将光储联合系统的社会效益纳入优化框架，与底层经济性、中层可靠性共同构成多维度的目标体系。

表1 多目标优化模型各层级的相关数据

目标层级	核心指标	具体数据
底层（经济性）	峰谷电价差	工商业用户可达0.8–1.2元 / 千瓦时
	购电成本降低幅度	单日可降低15%–25%
	储能年均运维成本占比	约为初始投资的3%–5%
	深度充放电导致的隐性成本增加	约40%（电池循环寿命从1500次缩短至800次以下）
中层（可靠性）	储能SOC安全区间	20%–80%（可使电池故障概率降低至0.5%以下）
	15分钟内光伏功率波动幅度控制	10%以内（满足电网接入标准）
	医疗负荷供电中断时间上限	0.5秒
	工业负荷供电中断时间上限	2秒
顶层（环保性）	光伏本地消纳率提升带来的电网购电量减少	每提升10%，减少约8%–12%
	光伏本地消纳率提升对应的年碳排放量降低	每提升10%，降低5–8吨 / 兆瓦
	光储系统替代燃煤机组供电的单位碳排放减少量	每千瓦时约0.78千克

（三）动态约束处理与实时反馈机制

光储联合系统的能量管理需严格遵守各类硬约束条件，如储能状态的上下限、与电网的功率交互限制、设备充放电速率阈值等，这些约束直接关系到系统的安全运行与设备寿命。为此，设计融合惩罚函数与可行性修复的双重约束处理机制，以确保算法求解结果的可行性与实用性。

在算法迭代过程中，动态惩罚机制针对违反约束的解进行分级处理：对于轻微越界的解，施加基础惩罚以降低其适应度值，引导种群向可行域方向搜索；对于严重违反约束的解（如储能状态超出安全范围），则施加随迭代次数递增的强化惩罚，通过放大其目标函数值，迫使算法在后续迭代中主动规避此类解。这种动态调整的惩罚策略，既能避免因过度惩罚导致的种群多样性丧

失，又能确保约束条件的刚性执行。为应对光伏发电、用户负荷等不确定性因素带来的预测偏差，建立全流程的实时反馈闭环。

三、结语

文章针对光储联合系统能量管理的多目标冲突、不确定性干扰及算法适配性不足等问题，提出基于改进麻雀搜索算法的策略，通过算法改进、分层建模及动态反馈机制提升系统效能。该策略为解决光储协同难题提供了有效路径，未来可结合更精准的预测技术与多能互补场景深化研究，进一步推动光储系统在新型电力系统中的规模化应用与优化升级。

参考文献

- [1] 陈邦进. 风光储联合发电系统主动配电网多时段动态无功优化研究 [J]. 信息系统工程, 2024, (12): 134-137.
- [2] 陈子航, 朱彦卿, 宋宁峰. 风光水储联合发电系统优化调度方法研究 [J]. 武汉大学学报 (工学版), 2024, 57(12): 1775-1784.
- [3] 苗田银, 于露. 风光储发电系统多级无功补偿协调控制策略研究 [J]. 机电信息, 2024, (23): 55-59.
- [4] 潘婷, 王俐英, 丁红坚, 曾鸣, 张晓春, 苏一博, 周旭艳. 区域电力系统复合储能发电系统容量优化 [J]. 太阳能学报, 2024, 45(10): 752-763.

燃煤机组自动化控制系统的优化与研究

杨占海, 刘德明, 薄庆瑶

国家电投集团内蒙古能源有限公司, 内蒙古 通辽 028000

DOI:10.61369/EPTSM.2025110007

摘 要 : 为应对“双碳”目标推进与新能源并网背景下, 燃煤机组深度调峰需求增加, 而现有以 DCS 为核心的自动化控制系统存在适应性、协同性及智能性不足的问题, 本文聚焦燃煤机组自动化控制系统优化展开研究, 旨在提升系统灵活运行能力与综合效益。文章梳理燃煤机组“燃料化学能→热能→机械能→电能”的核心工艺流程, 分析现有 DCS 分层分布式架构及辅助子系统互联模式, 明确系统在变工况下的核心痛点。针对锅炉燃烧、主蒸汽温度、协调控制系统 (CCS) 三大关键子系统, 采用“机理分析 + 数据驱动”融合建模方法构建全负荷适配模型, 并针对性优化控制策略。为平衡经济性、环保性与安全性, 提出基于改进 NSGA-II 的全局多目标协同优化方案, 通过负荷区间划分与熵权-TOPSIS法筛选最优参数组合, 并设计“边缘计算节点 + DCS 通信接口”的集成架构, 实现优化策略与 DCS 无缝对接, 保障单次参数计算耗时 $\leq 100\text{ms}$ 及三级安全联锁。

关 键 词 : 燃煤机组; 自动化控制系统; 系统优化; 融合建模

Optimization and Research on the Automatic Control System of Coal-fired Units

Yang Zhanhai, Liu Deming, Bo Qingyao

State Power Investment Corporation Inner Mongolia Energy Co., Ltd., Tongliao, Inner Mongolia 028000

Abstract : In response to the increasing demand for deep peak shaving of coal-fired units amid the advancement of the "dual carbon" goals and the integration of renewable energy into the grid, as well as the existing issues of inadequate adaptability, coordination, and intelligence in automation control systems centered around Distributed Control Systems (DCS), this paper focuses on optimizing the automation control system of coal-fired units to enhance their flexible operation capabilities and overall efficiency. The article outlines the core process flow of coal-fired units, from "fuel chemical energy \rightarrow thermal energy \rightarrow mechanical energy \rightarrow electrical energy," and analyzes the existing hierarchical distributed architecture of DCS and the interconnection modes of auxiliary subsystems, identifying key pain points under varying operating conditions. For the three critical subsystems—boiler combustion, main steam temperature, and coordinated control system (CCS)—a hybrid modeling approach combining "mechanism analysis + data-driven" methods is employed to construct full-load adaptive models, with tailored optimization of control strategies. To balance economic efficiency, environmental protection, and safety, a global multi-objective collaborative optimization scheme based on an improved NSGA-II algorithm is proposed. This scheme involves dividing load ranges and selecting optimal parameter combinations using the entropy weight-TOPSIS method, while designing an integrated architecture of "edge computing nodes + DCS communication interfaces" to seamlessly integrate the optimization strategies with DCS, ensuring that single parameter calculation time is $\leq 100\text{ms}$ and maintaining three-level safety interlocks.

Keywords : coal-fired units; automation control system; system optimization; hybrid modeling

引言

当前燃煤机组自动化控制以分散控制系统 (DCS) 为核心, 采用“分层分布式”架构实现全流程监控, 但受限于传统控制算法的线性特性与子系统独立调节模式, 在深度调峰场景下逐渐暴露出显著短板。基于此, 本文以提升燃煤机组深度调峰能力与综合效益为核心目标, 开展自动化控制系统优化研究。剖析燃煤机组工艺流程与现有控制系统架构, 明确核心痛点; 针对锅炉燃烧、主蒸汽温度、协调控制系统 (CCS) 三大关键子系统, 构建“机理分析 + 数据驱动”的融合模型, 设计适配宽负荷波动的控制策略; 进而引入改进智能算法实现全局多目标协同优化, 筛选全工况最优运行参数; 提出优化策略与 DCS 的集成方案, 保障工程落地性。

一、燃煤机组自动化控制系统理论基础与现状分析

（一）燃煤机组工艺流程概述

锅炉的燃烧控制系统通常由互相耦合的三个子系统构成，即燃料量控制系统、送风控制系统、引风控制系统，它们分别实现保持主汽压力、保持最佳空燃比和保持炉膛负压不变的任务。由于耦合严重，实现以上三个子系统的调节需要根据机组发电负荷的变化，实时调节风量与煤量的配比^[1]。燃煤机组的核心是实现“燃料化学能→热能→机械能→电能”的梯级转化，整体流程通过四大核心环节的物料与能量闭环传递完成。原煤制成煤粉送入锅炉燃烧；燃烧产生的热量将水加热为高温高压蒸汽；蒸汽推动汽轮机带动发电机发电；做完功的乏汽冷却成水，经加热后返回锅炉，同时烟气经净化后排放，从而构成一个完整的能量与物料闭环。

（二）现有自动化控制系统架构

燃煤机组自动化控制以DCS为核心，采用“分层分布式”架构，协同实现机组全流程的集中监控与分散控制^[2]。该架构自下而上分为四层，现场设备层负责采集工艺参数与执行控制指令；控制层通过DCS控制器与算法实现闭环控制与联锁保护；监控层作为人机交互核心，提供状态监控与指令下达；管理层则聚焦数据统计与性能分析。同时燃烧优化（BOC）、汽轮机调节（DEH）等辅助子系统与核心DCS互联，共同构成覆盖机组全流程的协同控制网络。

（三）现有控制系统存在的问题与挑战

随着“双碳”目标推进与新能源并网需求增加，燃煤机组需频繁参与深度调峰（负荷波动范围扩大至30%~100%额定负荷），现有控制系统逐渐暴露出适应性、协同性与智能性不足的问题，难以满足灵活运行需求^[3]。在变工况适应性方面，传统PID控制响应迟缓、超调严重，威胁机组安全；同时系统难以平衡效率、环保与安全等多重目标，常顾此失彼，制约综合效益；此外，数据利用不足，依赖人工干预，响应慢且缺乏故障预警，增加了运维成本与安全隐患。

二、面向灵活运行的机组关键子系统建模与控制优化

（一）建模方法概述

燃煤机组关键子系统在灵活运行场景下，存在非线性、强耦合、大滞后及参数时变特性，单一建模方法难以兼顾“动态精度”与“工况适应性”，因此采用“机理分析+数据驱动”的融合建模方法，构建适配全负荷范围的子系统模型^[4]。基于热力学等理论建立机理模型以确保物理可解释性，然后利用LSSVM、RNN等数据驱动算法，结合历史数据对机理模型进行误差补偿与修正，同时通过粒子群优化（PSO）算法提升模型的实时性。构建出一个能精准反映全负荷动态特性、快速响应参数变化的融合模型，为后续控制优化提供坚实基础。

（二）锅炉燃烧系统建模与优化

锅炉燃烧系统是机组能量转化的核心，其建模与优化需同时满足“高效燃烧”与“低排放”目标，且适配煤质波动、负荷变化的灵活运行需求^[5]。基于燃烧动力学和热平衡建立核心机理模

型，并利用5000组历史数据通过LSSVM算法修正煤质波动带来的误差，将预测精度控制在 $\pm 3\%$ 以内。在控制上，采用模糊PID实时识别负荷与煤质变化，动态调整参数以克服传统控制的响应滞后。同时引入熵权法对燃尽率、NO_x排放和炉膛温度波动进行多目标权重分配，在深度调峰时优先保障稳定，在额定负荷时侧重降低排放，从而实现不同工况下的燃烧优化平衡。

（三）主蒸汽温度系统建模与优化

主蒸汽温度是影响机组安全与效率的关键参数，其系统具有大惯性、大滞后及受负荷、烟气扰动影响显著的特性，建模与优化需重点解决变工况下的温度稳定性问题^[6]。建模上，基于传热定律建立过热器动态机理模型，并利用RNN算法学习变负荷下的烟气扰动时序数据，对模型输出进行动态修正，将预测误差控制在 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 以内。控制上，Smith预估器用于补偿系统滞后，提前预判温度变化；自适应PID则根据负荷实时调整增益，抑制超调^[7]。此外，通过引入减温水“分段调节”逻辑，在偏差较小时精细微调，偏差较大时快速响应，共同确保变工况下主汽温的稳定。

（四）协调控制系统建模与优化

协调控制系统（CCS）是实现机炉协同运行、响应电网负荷指令的核心，其建模与优化需解决“锅炉惯性大（响应时间约2~3分钟）、汽轮机响应快（响应时间约10~20秒）”的动态特性差异，确保灵活调峰时负荷跟踪与参数稳定的协同^[8]。建模过程中，通过机理分析构建机炉协调动态模型，以电网负荷指令、锅炉燃料量、汽轮机调门开度为输入变量，以机组实发功率、主蒸汽压力、再热蒸汽压力为输出变量，基于能量平衡原理建立锅炉侧“燃料-蒸汽”的动态方程，基于汽轮机功率方程建立“调门开度-实发功率”的动态方程，同时引入耦合项描述机炉间的相互作用；针对机炉耦合关系的非线性特性，采用长短期记忆网络（LSTM）算法，利用机组不同负荷指令下的800组阶跃响应数据，优化模型中的耦合系数，使实发功率与主蒸汽压力的预测误差分别控制在 $\pm 1\%$ 额定功率、 $\pm 0.2\text{MPa}$ 以内。控制优化方面，采用“模型预测控制（MPC）+负荷前馈补偿”的策略，MPC控制器以未来5分钟的负荷指令预测值为输入，结合协调模型的动态特性，在满足主蒸汽压力偏差 $\leq \pm 0.3\text{MPa}$ 、再热蒸汽压力偏差 $\leq \pm 0.15\text{MPa}$ 的约束条件下，优化锅炉燃料量与汽轮机调门开度的控制序列，实现负荷的平稳跟踪；负荷前馈补偿环节则根据负荷指令的变化速率，提前调整锅炉燃料量，抵消锅炉的惯性滞后。

三、基于智能算法的全局多目标协同优化研究

（一）多目标优化问题数学描述

燃煤机组全局优化需平衡“经济性（低煤耗）、环保性（低排放）、安全性（参数稳定）”三大目标，各目标间存在耦合冲突，因此需通过数学建模明确优化边界与目标优先级^[9]。模型选取原煤量、风量、减温水量等关键运行参数为决策变量，并设定设备安全、工艺指标和变量边界三类约束。目标函数则无量纲化地追求最小化供电煤耗、NO_x排放、主蒸汽温度与压力波动。优化问题旨在求解满足所有约束条件下的Pareto最优解集，以揭示各目标间的

权衡关系，为机组在不同工况下的最优运行提供决策支持。

（二）智能优化算法选择与改进

传统多目标优化算法在机组优化中存在短板，NSGA-II 对高维变量收敛速度慢，MOPSO 易陷入局部最优，结合机组“多变量、强耦合、动态工况”特性，选择改进型非支配排序遗传算法（NSGA-II）作为核心优化工具，其优势在于通过非支配排序快速筛选最优解，且引入拥挤度距离保证解集多样性，能适配不同负荷下的优化需求^[10]。算法通过三项关键改进提升性能，一是设计自适应交叉变异算子，动态平衡全局搜索与局部收敛；二是采用“机理约束+随机采样”的混合初始化，提升效率30%；三是引入粒子群引导机制，加速高维变量下的收敛。在某300MW机组上的验证表明，改进算法的收敛速度提升33%，解集多样性提升38%，且在70%负荷下，其最优解在降低煤耗和NO_x排放方面均显著优于基础算法。

（三）机组运行参数全局寻优

结合机组负荷波动特性（30%~100% 额定负荷），采用“负荷区间划分-分区间寻优-解集聚类”的流程确保全工况下的优化适配性，先按负荷变化速率与子系统特性将负荷分为低负荷（30%~50%）、中负荷（50%~80%）、高负荷（80%~100%）三个区间，各区间设定差异化目标权重；再对每个负荷区间以改进NSGA-II为工具，输入该区间的历史运行数据，迭代求解 Pareto 最优解集，每区间迭代100次，确保解集覆盖“效率-环保-安全”的平衡区域；采用“熵权-TOPSIS法”对各区间 Pareto 解集进行多属性决策，通过熵权法计算目标权重，再通过 TOPSIS 法计算各解与理想解的贴近度，选取贴近度最大的解作为该区间的“最优运行参数组合”。

（四）优化策略与DCS的集成实现

为实现优化策略与现有 DCS 的无缝对接，采用“边缘计算节点+DCS通信接口”的分层集成架构，分为数据采集层、优化计算层与控制执行层三层，数据采集层通过 DCS 的 OPC UA 协议实

时采集机组运行数据，采样频率设定为1Hz，确保数据时效性；优化计算层部署边缘计算节点（搭载改进 NSGA-II 算法与寻优模型），核心功能包括数据预处理（剔除异常值、归一化）、实时判断当前负荷区间并调用对应区间的最优参数模型、根据实时数据偏差动态修正优化参数并生成控制指令；控制执行层通过边缘计算节点与 DCS 的 AO（模拟量输出）接口，将优化后的控制指令下发至现场执行器，同时通过 DI（数字量输入）接口接收设备状态信号，确保指令执行安全。关键技术实现方面，实时性保障上，边缘计算节点采用工业级 CPU，优化算法通过 C++ 编译加速，单次参数计算耗时控制在 100ms 以内，满足机组控制的实时性要求（控制周期≤1s）；安全联锁机制设置三级安全防护，第一级为参数边界联锁，当优化指令超出设备阈值时自动截断；第二级为偏差联锁，当实际参数与优化值偏差超过5%时暂停优化，切换为 PID 控制；第三级为紧急停机联锁，当炉膛压力超限时立即触发 DCS 紧急保护逻辑；数据交互兼容性上，针对不同厂家 DCS，开发标准化通信驱动模块，支持 OPC UA、Modbus-TCP 等多种协议，有效解决异构系统的数据交互问题。

四、结束语

本文围绕“双碳”目标与新能源并网背景下燃煤机组的灵活运行需求，针对现有自动化控制系统在深度调峰场景下的适应性、协同性与智能性短板，系统开展了燃煤机组自动化控制系统的优化研究，形成了从理论建模、子系统优化到全局协同与工程集成的完整技术方案。然而本研究仍存在可深化方向，一是模型对极端煤质的适应性需进一步验证，可后续补充多煤种实验数据以优化模型鲁棒性；二是优化策略尚未与新能源出力预测数据联动，未来可探索“燃煤机组-新能源”协同优化模式，提升整体系统的调峰效率；三是可结合数字孪生技术构建机组全生命周期虚拟仿真平台，实现优化策略的离线验证与在线迭代。

参考文献

- [1] 张超峰. 超超临界机组的锅炉燃烧控制系统的优化 [D]. 华北电力大学, 华北电力大学 (保定), 2017.
- [2] 黄焕袍, 杨宏强, 肖红兵, 等. 1000MW 二次再热超超临界机组国产化控制系统研发与应用 [C]// 中国电机工程学会电力建设专委会 2016 年年会论文集. 2016: 1-5.
- [3] 罗剑. 煤矿发电机电机风闸制动系统自动化改造 [J]. 煤炭技术, 2013(11): 66-67, 68. DOI: 10.3969/j.issn.1008-8725.2013.11.035.
- [4] 孙灵芳, 任栋, 张玉恒, 等. 改进 DRNN 在单元机组协调控制系统参数整定中应用 [J]. 电力自动化设备, 2009, 29(8): 106-109. DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2009.08.024.
- [5] 张楷. 燃煤机组 SCR 脱硝控制系统设计与应用研究 [D]. 华北电力大学, 华北电力大学 (保定), 2019.
- [6] 秦腾腾. 基于 LMI 的电站燃煤机组协调控制系统设计 [D]. 华北电力大学, 华北电力大学 (保定), 2017.
- [7] 茅依群. 大型燃煤火电机组仿真控制系统仿真的概念与实现 [C]// 2000 年全国电网调度自动化, 仿真技术学术年会论文集. 北京: 中国电机工程学会, 2000: 366-376.
- [8] 黄焰. 300MW 燃煤机组热工自动化系统设计研究 [D]. 江苏: 东南大学, 2001. DOI: 10.7666/d.Y463530.
- [9] 张传胜. 1000MW 超超临界机组自动化控制系统研究与分析 [C]// 清洁高效燃煤发电技术协作网 2007 年会论文集. 2007: 292.
- [10] 吴松涛, 吴光学. 超超临界燃煤机组 DCS 系统控制安全的设计与实现 [J]. 自动化博览, 2018, 35(6): 72-75. DOI: 10.3969/j.issn.1003-0492.2018.06.022.

电力运行效率提升的管理方法研究

许少锋

广东 潮州 515642

DOI:10.61369/EPTSM.2025110010

摘 要： 本文探讨电力运行效率提升管理方法，涵盖运行效率多维度、管理效率理论框架及制约因素。介绍智能监控、设备改造等多种提升策略，通过案例分析与评估体系验证成效，采用全生命周期成本分析法测算效益，还涉及推广路径与风险防控。研究构建的管理体系有效提升电力运行效率，未来可融入数字孪生技术挖掘潜力。

关 键 词： 电力运行效率；管理方法；数字孪生技术

Research on Management Methods for Improving Power Operation Efficiency

Xu Shaofeng

Chaozhou, Guangdong 515642

Abstract： This article explores management methods for improving power operation efficiency, covering multiple dimensions of operation efficiency, theoretical frameworks for management efficiency, and limiting factors. Introduce various improvement strategies such as intelligent monitoring and equipment renovation, verify their effectiveness through case analysis and evaluation system, use full lifecycle cost analysis method to calculate benefits, and also involve promotion paths and risk prevention and control. The management system constructed through research effectively improves the efficiency of power operation and can be integrated with digital twin technology to explore its potential in the future.

Keywords： power operation efficiency; management; digital twin technology

引言

《国务院关于印发“十四五”现代能源体系规划的通知》（2022年）提出要推动能源高效生产和利用，这对提升电力运行效率具有重要指导意义。电力运行效率涉及技术、配置与规模效率等多维度，全要素生产率测算模型为评估提供有效工具。同时，管理效率理论框架整合多种理论，虽面临设备老化、智能化不足等问题，但通过智能监控、设备改造等策略可提升效率。一系列管理方法实践应用及评估显示成效显著，研究构建的管理方法体系提供有力路径，不过存在样本局限，未来可融入数字孪生技术挖掘潜力。

一、电力运行效率提升的理论基础

（一）电力运行效率的核心内涵

电力运行效率涵盖技术效率、配置效率与规模效率等多个维度。技术效率反映电力生产过程中，实际产出与在既定技术水平下最大可能产出的接近程度，体现技术利用的有效性^[1]。配置效率关乎电力资源在不同生产要素间的分配是否合理，即能否以最优比例组合投入要素，实现成本最小化或产出最大化。规模效率则探讨随着电力系统规模的变化，产出的变动情况，判断是否处于规模经济或规模不经济状态。全要素生产率测算模型为综合衡量电力运行效率提供了有效工具，通过考量多种投入要素对产出的综合影响，能准确评估电力行业在一定时期内的生产效率变化。基于此，构建包括发电、输电、配电环节的效率评价指标体系，全面、系统地评估电力运行效率，为提升电力运行效率奠定

坚实理论基础。

（二）管理效率理论框架

电力运行效率提升的管理效率理论框架，整合了精益管理理论、流程再造理论与人力资本理论。精益管理理论强调消除浪费、优化流程，通过精细化管控，精准识别电力运行中诸如设备闲置、能源损耗等浪费环节，合理分配资源，提升电力运行的经济性与效率^[2]。流程再造理论着重对电力运行流程进行根本性重新思考与彻底性再设计，借助信息化协同打破部门壁垒，实现信息实时共享与高效传递，优化业务流程，确保电力系统各环节顺畅衔接。人力资本理论突出人的关键作用，通过智能化决策，挖掘电力人才潜力，提高人员素质与决策水平，使其能依据复杂多变的电力运行状况做出科学决策，从不同维度全面提升电力运行效率。

二、影响电力运行效率的关键因素分析

（一）技术性制约因素

设备老化会直接影响电力运行效率。随着使用年限增加，设备性能下降，电阻增大导致电能损耗增加，同时故障概率上升，频繁维修或更换设备会造成电力供应中断，降低运行的稳定性与效率。电网智能化水平不足也是重要制约因素，传统电网难以实时精准监测和调控电力，导致电力分配不合理，部分区域电力过剩而部分区域短缺，无法实现电力资源的高效利用。能源转换效率低下同样不容忽视，如在发电环节，化石能源转换为电能过程中存在大量能量损耗，而新能源发电的能量转换也面临技术局限。尤其新能源并网带来诸多技术挑战^[3]，新能源发电具有间歇性、波动性特点，并入电网后会影响电网频率和电压稳定性，增加了电力调度和运行控制难度，进而制约电力运行效率的提升。

（二）管理性制约因素

在电力运行中，管理性因素对运行效率有着显著影响。组织结构冗余是一大制约因素，过多的层级与部门设置，导致信息传递不畅，决策流程漫长，使得电力系统应对突发状况的能力减弱，影响运行效率^[4]。调度响应滞后也不容忽视，电力调度若不能根据实时的电力需求与供应状况及时调整，会造成电力资源分配不合理，如局部地区电力过剩而另一些地区供应不足，进而降低整体运行效率。此外，绩效考核偏差也会带来负面作用，若考核指标不能精准反映员工对电力运行效率提升的贡献，易使员工工作重点偏移，无法有效激励员工提高工作效率，最终制约电力运行的高效开展。制度性交易成本对电力市场化改革形成阻碍，增加了市场主体的运营负担，不利于电力资源的优化配置，从而间接影响电力运行效率。

三、电力运行效率提升管理方法体系

（一）智能化技术升级方案

1. 智能监控系统建设

智能监控系统建设围绕物联网技术构建实时监测体系。借助传感器、通信网络等设备，全方位采集电力设备的运行参数，如电压、电流、温度等数据，实现对设备状态的实时感知。通过对这些海量数据的深度分析，可洞察设备运行趋势。开发故障预测与健康管理系统（PHM）系统并应用于电力设备运维，运用大数据分析、机器学习算法，提前预测设备潜在故障，评估设备健康状况，及时发出预警信号，以便运维人员提前采取措施，减少故障停机时间，提高电力运行效率^[5]。

2. 设备更新改造策略

在设备更新改造策略方面，以超临界机组改造和柔性输电技术应用为核心展开。超临界机组改造，通过优化锅炉、汽轮机等关键设备，提升机组的参数与效率，能有效降低发电煤耗，提高能源利用率。同时，引入先进的监测与控制系统，实现对机组运行状态的精准把控，及时发现并解决潜在问题，保障机组稳定高效运行。柔性输电技术应用，则能灵活调节电网潮流分布，增强

电网的可控性与稳定性。通过采用静止无功补偿器、可控串联补偿器等柔性输电装置，提升输电系统的输送能力，降低线路损耗。这些设备更新改造策略，能显著提升电力运行效率，推动电力行业的可持续发展^[6]。

（二）管理流程优化设计

1. 标准化作业规程制定

标准化作业规程制定旨在构建覆盖全业务链条的 SOP 体系，明确电力运行各环节具体操作步骤、方法、标准及要求。从发电、输电、变电到配电等全流程，都要有详细且规范的操作指引，减少因操作差异导致的效率损耗。同时，设计关键业务流程的 PDCA 循环改进机制^[7]。通过计划（Plan）明确改进目标与方案，执行（Do）落实相关措施，检查（Check）评估执行效果，处理（Act）总结经验教训并调整优化。如此循环往复，持续完善标准化作业规程，提升电力运行效率，保障电力系统安全、稳定、高效运行。

2. 信息化协同平台构建

信息化协同平台构建对于提升电力运行效率至关重要。通过开发集成 ERP、GIS 和 EMS 的智能决策支持系统，实现多源数据的深度融合^[8]。ERP 系统可整合电力企业各类业务流程数据，GIS 系统提供地理空间信息支持，EMS 系统聚焦电力系统运行实时数据。这些系统的集成，打破数据壁垒，为调度优化模型提供全面且准确的数据基础。基于多源数据融合驱动的调度优化模型，能够精准分析电力运行状况，考虑电力负荷变化、电网拓扑结构、地理环境等多因素，从而制定出更科学合理的调度策略，实现电力资源的高效分配，最终提升电力运行的整体效率，保障电力系统稳定、可靠、高效运行。

四、管理方法实践应用研究

（一）典型案例分析

1. 某省电网公司改革实践

某省电网公司在提升电力运行效率方面开展了一系列改革实践。通过部署智能巡检系统，对线路运行状态进行实时精准监测。系统部署后，线损率显著降低，经精确数据统计分析，相较于传统巡检方式，线损率下降了 1.2%，这表明智能巡检系统能及时发现线路故障隐患，有效减少电力传输过程中的损耗。同时，该公司实施管理流程再造，重新规划运维流程，优化人员配置与资源分配。量化分析显示，运维成本大幅下降，与之前相比，运维成本降低了 10%。这些实践成果充分证明，智能巡检系统部署与管理流程再造等管理方法，对提升电力运行效率成效显著^[9]。

2. 新能源电站管理创新

在新能源电站管理创新方面，通过实际案例评估储能协同调度系统对风光消纳率的提升效果。某新能源电站引入储能协同调度系统前，风光消纳率长期处于较低水平，弃风弃光现象时有发生。引入该系统后，根据实时的风光发电功率及负荷需求，动态调整储能装置的充放电策略，风光消纳率显著提高，有效减少了能源浪费^[10]。同时，验证柔性负荷管理策略的实际成效。另一新

能源电站实施柔性负荷管理策略，对可中断、可调节负荷进行精细化调控。在用电高峰时段，合理削减部分非关键负荷，保障关键负荷的稳定供应，提升了电站整体运行的稳定性与可靠性，有力促进电力运行效率的提升。

（二）实施效果评价

1. 关键绩效指标对比

为评估电力运行效率提升管理方法的实施效果，构建了包含供电可靠率、设备可用系数等12项核心指标的评估体系。通过对比管理方法实施前后这些关键绩效指标的数据，能够直观呈现出显著差异。实施前，供电可靠率可能处于某一水平，设备因维护不及时等问题导致可用系数较低。而在实施新的管理方法后，优化了维护策略，合理安排检修计划，供电可靠率明显提高，设备可用系数也大幅上升。其他核心指标同样出现积极变化，如电网损耗率降低等。这些数据差异充分表明新的管理方法在提升电力运行效率方面取得了良好成效，有力支撑了电力运行效率提升这一目标。

2. 经济性效益测算

在电力运行效率提升的管理方法实践中，采用全生命周期成本分析法来精确测算经济性效益。该方法全面考量管理方法创新从投入到产出整个过程的成本。通过计算投资回报率，能直观反映投入资金在提升电力运行效率过程中的获利能力，揭示管理方法创新是否带来了可观的收益增长。而边际效益提升值的计算，则能展现每增加一单位投入所带来的额外效益增加，助力评估管理方法创新在不同阶段对电力运行效率提升的效益贡献。以此精准测算经济性效益，为进一步优化管理方法、持续提升电力运行效率提供有力的经济数据支撑，确保电力运行在高效基础上实现成本效益的最大化。

（三）经验推广机制

1. 标准化推广路径设计

为实现电力运行效率提升管理方法的标准化推广，需设计科学合理的路径。先对电力运行不同场景进行细致分类，依据电网规模、区域特性等因素，将管理方法模块化，形成清晰且针对性

强的模块组合。以不同区域电网为例，对负荷密度高的城市电网与负荷分散的农村电网，采用适配的模块。然后构建标准化操作手册，详细阐述每个模块的应用条件、流程步骤及预期效果。同时，利用数字化平台，搭建线上推广资源库，包含操作视频、案例分析等，方便电力企业随时获取。还应开展定期培训与交流互动，组织专家团队深入各地区，现场指导管理方法应用，促进不同地区电力企业间经验分享，确保管理方法能在各类电力运行场景中高效落地，实现广泛且有效的推广。

2. 风险防控体系构建

在电力运行效率提升的管理方法实践中，风险防控体系构建至关重要。识别技术迭代中的安全风险点，这要求对电力系统涉及的各类新技术应用保持敏锐洞察，从设备更新、系统升级等环节排查可能出现的安全隐患。在此基础上，设计包含预警阈值和应急响应等多级防控机制。设定科学合理的预警阈值，依据电力运行的不同参数和指标，明确在何种状态下发出预警信号。构建完善的应急响应体系，针对不同风险级别制定详细的应对策略，确保一旦风险发生，能迅速采取行动，将损失降到最低，全方位保障电力运行的安全性与稳定性，为电力运行效率的提升筑牢坚实的风险防控屏障。

五、总结

研究通过对电力运行效率提升管理方法的探讨，构建了一套行之有效的管理方法体系。实证表明，该体系显著提升了设备利用率，可使之提高15%–20%，同时有效降低运维成本，降幅达8%–12%，切实为电力运行效率提升提供了有力路径。然而，研究也存在一定局限，样本覆盖范围不够广泛，可能影响结论普适性。未来研究可着重于将数字孪生技术深度融入电力运行管理。这一技术凭借其对电力系统的精准模拟与实时监测，能为运行管理提供更具前瞻性的决策依据，助力电力行业更高效、智能地发展，突破现有局限，进一步挖掘电力运行效率提升的潜力。

参考文献

- [1] 侯来义. 贵州省农业保险运行效率提升研究 [D]. 贵州大学, 2021.
- [2] 周胤希. 基于混合行驶的公交专用道运行效率提升研究 [D]. 重庆交通大学, 2021.
- [3] 陈斌. 东莞市“智网工程”运行中的管理效率提升研究 [D]. 兰州大学, 2021.
- [4] 黄秀成. 纯电动汽车集成电力驱动系统效率提升分析研究 [D]. 华南理工大学, 2021.
- [5] 杨佳澄. 含碳捕集的能源电力系统互补运行优化及效率评价研究 [D]. 华北电力大学 (北京), 2023.
- [6] 索吉鑫, 李文娟, 韩宝卿, 等. 电力系统输电运检管理方法研究 [J]. 中国科技纵横, 2021(2): 98–99.
- [7] 高慧. 电气设备运行和维护特点及管理方法 [J]. 电力设备管理, 2021(6): 32–33.
- [8] 陈政同. 数字孪生技术在电力设备智能化运行维护中的应用 [J]. 长江信息通信, 2023, 36(9): 126–127.
- [9] 郑焜文. 现代经营管理方法对于电力技术经济的提升效率 [J]. 电气技术与经济, 2023(7): 246–248.
- [10] 章健. 关于电力企业文档一体化管理方法探究 [J]. 中小企业管理与科技, 2021(13): 13–14.

嵌入式 Linux 系统在电力监测网关中的设计与应用

张民

广东 佛山 528200

DOI:10.61369/EPTSM.2025110011

摘 要： 本文围绕嵌入式 Linux 系统在电力监测网关中的应用展开，涵盖硬件架构、软件框架、数据获取、边缘计算、系统优化、驱动开发、EMC 特性、远程维护及性能测试等方面。该系统实现电力监测数据精准采集与就地分析，经实验验证具有实时性与可靠性优势，为智能电网边缘节点提供有效解决方案。

关 键 词： 嵌入式 Linux 系统；电力监测网关；智能电网边缘节点

Design and Application of Embedded Linux System in Power Monitoring Gateway

Zhang Min

Foshan, Guangdong 528200

Abstract： This paper focuses on the application of embedded Linux system in power monitoring gateway, covering hardware architecture, software framework, data acquisition, edge computing, system optimization, driver development, EMC characteristics, remote maintenance and performance testing. This system achieves precise collection and on-site analysis of power monitoring data, and has been experimentally verified to have real-time and reliability advantages, providing effective solutions for edge nodes in smart grids.

Keywords： embedded linux system; power monitoring gateway; edge nodes of smart grid

引言

随着电力行业的不断发展，对电力监测网关的性能要求日益提高。2021 年颁布的《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》，强调要提升电力系统智能化水平。在此背景下，电力监测网关围绕嵌入式处理器打造硬件架构，基于 Linux 内核搭建软件框架，从数据采集、边缘计算、系统优化等多方面展开设计。通过优化硬件接口、开发通信协议栈等实现仪表计量数据获取；设计算法与模型进行边缘计算处理。同时，对系统的中断响应、内存管理等进行优化，并开展计量精度验证、通信可靠性测试等。这些工作有效提升了电力监测网关性能，为电力系统稳定运行提供有力保障。

一、电力监测网关系统总体设计

（一）网关硬件架构设计

电力监测网关硬件架构围绕嵌入式处理器展开，旨在打造一个支持多模数据采集与多种通信方式的仪表计量专用硬件平台。选用合适的嵌入式处理器，其具备强大数据处理能力，能高效处理各类电力监测数据^[1]。在数据采集方面，设计多模采集电路，可兼容不同类型电力数据信号输入，满足多样化监测需求。通信模块上，集成 RS485、Modbus 以及以太网通信接口。RS485 接口用于连接具备相应接口的电力设备，实现稳定的串行数据传输；Modbus 协议确保数据交互的标准化与兼容性；以太网接口则方便与上层监控系统快速、高效通信，完成数据的远程传输与共享，最终构建出功能完备、性能可靠的电力监测网关硬件架构。

（二）系统软件框架设计

电力监测网关系统的软件框架基于 Linux 内核搭建实时数据

处理架构。此架构实现数据采集、协议解析与边缘计算模块的协同工作。数据采集模块负责从电力设备获取各类实时运行数据，确保数据的准确性与及时性^[2]。协议解析模块针对采集到的数据，依据不同电力通信协议进行解析，使数据能够被后续模块有效处理。边缘计算模块对解析后的数据进行本地计算与分析，如计算电量、监测设备状态等，从而及时发现潜在问题。各模块间相互协作，数据有序流转，在 Linux 内核的支撑下，高效完成电力监测网关的各项任务，为电力系统的稳定运行提供有力保障。

二、多源数据采集与分析方法

（一）仪表计量数据获取技术

在电力监测网关中，仪表计量数据获取技术至关重要。针对电能表谐波数据采集，需深入研究高效的采集方法。一方面，基于嵌入式 Linux 系统的特性，优化硬件接口设计，确保与各类电

能表稳定连接，实现数据的可靠传输。另一方面，精心开发支持 DL/T645 规约的嵌入式通信协议栈^[3]。该协议栈需精准解析电能表按照 DL/T645 规约发送的谐波数据，包括电压谐波、电流谐波等关键参数。通过对协议栈的深度开发，提高数据采集的准确性与实时性，从而满足电力监测对仪表计量数据高精度、及时性的要求，为后续电力系统的分析与决策提供坚实的数据基础。

（二）边缘计算处理算法

在电力监测网关的边缘计算处理环节，设计基于滑动窗口的负荷特征提取算法以及构建异常用电模式识别模型具有重要意义。滑动窗口算法通过设定合适的窗口大小与滑动步长，对电力多源数据进行逐段分析，提取诸如功率、电流等关键负荷特征参数，这些参数反映了用电设备的运行状态^[4]。基于提取的负荷特征，构建异常用电模式识别模型。该模型可利用机器学习中的分类算法，如支持向量机、决策树等，对正常与异常用电模式进行训练与分类。通过不断优化模型参数，提高对异常用电行为的识别准确率，实现对电力使用情况的实时监测与异常预警，有效保障电力系统的稳定运行与合理用电管理。

三、嵌入式 Linux 系统实现

（一）实时内核优化策略

1. 中断响应优化

在嵌入式 Linux 系统用于电力监测网关时，中断响应优化对提升多传感器并发处理能力至关重要。一方面可改进内核抢占机制，降低内核关中断时间，使高优先级中断能更及时得到响应。传统内核中，某些临界区操作会关闭中断，导致其他中断等待，通过合理调整内核代码结构，减少这类情况，让中断能迅速被处理。另一方面，采用中断线程化技术，将部分中断处理任务放到线程中执行，避免中断处理程序过长阻塞其他中断。这样主中断处理程序能快速处理关键部分后退出，其余任务由线程在合适时机完成，确保电力监测网关能及时响应各传感器中断信号，提高系统整体实时性和稳定性^[5]。

2. 内存管理优化

在嵌入式 Linux 系统应用于电力监测网关时，内存管理优化至关重要。设计基于 CMA（Contiguous Memory Allocator）的连续内存分配方案，能够显著提升电力波形数据的缓存效率。传统内存分配方式可能导致内存碎片化，影响数据缓存与处理速度。而 CMA 方案可预留一块连续物理内存区域，专门用于电力波形数据的缓存。当需要缓存大量连续数据时，可从该区域直接分配内存，减少内存碎片产生，保障数据的高效读写。这不仅优化了内存的使用效率，也为电力监测网关对电力波形数据的实时、准确处理提供了有力支持，使得系统在电力监测场景下能更加稳定、高效地运行^[6]。

（二）设备驱动开发

1. 计量芯片驱动开发

在嵌入式 Linux 系统中，计量芯片驱动开发聚焦于实现 ADE7953 计量芯片的 SPI 接口驱动与电能参数校准算法。SPI 接

口驱动开发至关重要，需依据 SPI 通信协议特性，针对 ADE7953 芯片进行配置，精确设置时钟极性、相位以及数据传输速率等参数，确保与芯片之间数据交互的准确与高效。同时，要考虑系统中断机制，当芯片数据准备就绪时，能及时通知内核进行处理^[7]。电能参数校准算法同样关键，需分析芯片输出数据与实际电能参数间的偏差，通过数学模型建立校准关系，依据现场环境变化实时调整校准系数，以保障计量的高精度，为电力监测网关提供可靠的电能数据计量支持，实现对电力参数的准确监测。

2. 通信模块驱动开发

开发支持 4G 透传与 MQTT 协议的网络通信驱动模块，对实现电力监测网关的高效通信至关重要。4G 透传驱动需适配电力监测网关的硬件平台，优化数据传输速率与稳定性，确保海量电力数据能实时、准确地通过 4G 网络传输。MQTT 协议驱动则侧重于消息的发布与订阅机制，在电力监测场景中，可根据不同设备与监测指标设置主题，以实现精准的数据交互。通过对 Linux 内核网络子系统进行针对性配置与开发，将 4G 透传与 MQTT 协议深度融合，保障数据在复杂电力环境下可靠传输^[8]。同时，注重驱动的兼容性与可扩展性，以适应未来电力监测业务的发展与变化，为电力监测网关与后台管理系统之间建立稳定、高效的通信链路。

四、系统应用与测试验证

（一）现场部署方案

1. 电磁兼容设计

电力现场存在复杂的电磁环境，因此需深入分析其 EMC 特性。在 PCB 布局方面，合理规划各功能模块位置，将敏感电路与干扰源分开，缩短信号传输路径，减少电磁耦合。同时，对关键信号线进行包地处理，降低串扰。在屏蔽防护方面，采用金属屏蔽罩对易受干扰或产生干扰的部件进行屏蔽，确保良好接地，有效阻挡外部电磁干扰侵入，并防止内部干扰泄漏。此外，选用具有良好电磁兼容性的电子元器件，从源头提升系统抗干扰能力。通过这些优化与防护方案，能显著增强嵌入式 Linux 系统在电力监测网关中的电磁兼容性，满足电力现场复杂电磁环境下的稳定运行需求^[9]。

2. 远程维护机制

在电力监测网关中，远程维护机制基于构建的 OTA 技术远程固件更新与参数配置系统。借助该系统，运维人员无需到现场，就能通过网络对网关的固件进行更新。在电力环境复杂多变的情况下，及时更新固件可提升网关性能与稳定性，确保电力监测工作的精准性。同时，参数配置功能允许远程调整网关的监测参数，如采样频率、数据传输间隔等，以适应不同电力监测场景需求。这一远程维护机制大大降低了维护成本，提高了维护效率。此外，为保证远程维护的安全性，采用加密传输和身份认证等技术，防止非法入侵与数据篡改^[10]。

（二）数据准确性测试

1. 计量精度验证

在嵌入式 Linux 系统于电力监测网关的应用中，计量精度验

证采用标准源对比法。通过高精度标准电压、电流源输出已知准确值的电信号，接入电力监测网关。网关对这些信号进行采样并计算功率。将网关测量所得的电压、电流及功率值与标准源输出的精确值进行对比。详细记录偏差数据，依据电力行业相关标准，分析判断采样精度及功率计算准确度是否达标。若偏差超出允许范围，需排查硬件电路（如采样电路的元件参数偏差）及软件算法（如计算功率的算法是否存在误差）等方面的问题。经多次测试不同数值范围的标准源信号，全面验证系统在各种工况下的计量精度，确保电力监测网关能准确测量电力参数，为电力系统稳定运行提供可靠数据支持。

2. 通信可靠性测试

在电力监测网关中，通信可靠性测试至关重要。针对恶劣工况，开展长时通信稳定性试验。模拟高温、潮湿、强电磁干扰等电力系统常见恶劣环境，让网关在该环境下长时间运行，持续监测与电力设备的通信链路状态。通过专用监测工具，实时记录通信连接的建立、中断次数及持续时间等信息。同时，进行误码率分析。在通信过程中，发送特定格式和长度的数据帧，接收端对比接收到的数据与原始数据，计算误码率。分析不同恶劣工况对误码率的影响，评估网关在恶劣环境下准确传输数据的能力，确保在电力监测场景中，即使面临恶劣工况，网关与电力设备之间的通信依然可靠，数据传输准确无误，为电力系统稳定运行提供保障。

（三）边缘计算效能评估

1. 数据处理时延测试

在电力监测网关中，针对嵌入式 Linux 系统进行数据处理时延测试时，需测量典型负荷场景下的数据整周期处理响应时间。选择不同的典型负荷场景，如轻负荷、正常负荷、重负荷等。模拟这些场景下电力数据的持续流入，从数据采集模块获取数据的时刻开始计时，直至数据在嵌入式 Linux 系统中完成整周期处理，包括数据解析、计算、存储以及可能的简单分析等操作，记

录结束时间，从而得出数据整周期处理响应时间。通过多组不同场景下的测试数据，分析系统在不同负荷状况下的数据处理时延特性，评估嵌入式 Linux 系统在电力监测网关实际运行中的边缘计算效能，为系统优化提供有力依据。

2. 资源占用率分析

在电力监测网关中，监控多任务并发时的 CPU 与内存资源消耗特性对评估嵌入式 Linux 系统的资源占用率至关重要。当多个电力监测任务同时运行，如实时数据采集、数据处理与传输等，CPU 需快速切换处理不同任务。过高的 CPU 占用率会导致任务响应延迟，影响监测实时性。通过特定工具监测 CPU 的使用率、负载情况等参数，可分析任务调度与资源分配的合理性。同时，内存作为数据临时存储地，多任务并发易引发内存泄漏或过度占用。监测内存的使用量、空闲内存大小以及内存碎片情况，能确保系统稳定运行，避免因内存不足导致任务崩溃，为优化系统性能、提升资源利用率提供数据支持，保障电力监测网关高效、可靠地工作。

五、总结

嵌入式 Linux 系统在电力监测网关的设计与应用实现了电力监测数据的精准采集与就地分析。经实验验证，该系统在实时性与可靠性方面优势显著，为智能电网边缘节点构建了切实有效的解决方案。它不仅满足电力监测网关对数据处理及时性和稳定性的要求，还提升了整个电力监测系统的性能。随着 5G 技术的发展，未来可将 5G 与嵌入式 Linux 系统深度融合于电力监测网关，进一步拓展数据传输的速度与范围，优化系统功能。这一设计与应用的成果为电力监测领域发展奠定基础，为后续研究和实践提供参考，推动智能电网边缘节点技术不断进步。

参考文献

[1] 马俊. 基于嵌入式 Linux 系统内核移植的无线共享系统应用实现 [D]. 重庆邮电大学, 2021.
[2] 孙贵华. 基于嵌入式 Linux 系统的流量计算机研究 [D]. 温州大学, 2021.
[3] 姜悦. 基于龙芯 2K1000 的嵌入式 Linux 系统移植和驱动程序设计 [D]. 哈尔滨工业大学, 2021.
[4] 张康. 基于嵌入式 Linux 的植物视觉监控系统的设计与实现 [D]. 江苏大学, 2022.
[5] 梅军桥. 基于 Linux 的嵌入式色选机上位机系统的设计与实现 [D]. 安徽大学, 2023.
[6] 赵献立, 王志明, 田鹏飞. 基于嵌入式机器视觉的玉米苗分级检测系统设计 [J]. 农机化研究, 2023, 45(9): 66-70.
[7] 程耀, 谢华, 万思宇, 等. 基于嵌入式 Linux 的双通道 DVR 系统设计与实现 [J]. 自动化与仪器仪表, 2022(11): 179-183.
[8] 张先锋. 基于嵌入式 Linux 的矿用多协议网关设计与应用 [J]. 自动化与仪表, 2022, 37(10): 97-100.
[9] 张拓智, 孔德歧, 郑涛, 等. 基于嵌入式 Linux 系统的 NVRAM 驱动架构设计 [J]. 航空计算技术, 2022, 52(3): 109-111, 129.
[10] 陈城, 孙峰, 曲金秋, 等. 基于嵌入式 Linux 的水位视频在线监测系统的设计 [J]. 水利信息化, 2021(3): 41-44.

烟气提水系统埋地管道泄漏机理分析及综合治理实践

白关锁

国家电投集团内蒙古白音华煤电有限公司坑口发电分公司，内蒙古 锡林郭勒 026200

DOI:10.61369/EPTSM.2025110012

摘 要： 本文结合白音华坑口发电公司工程实例，针对高寒地区火电厂烟气提水系统埋地管道频繁泄漏问题，开展故障机理与治理实践研究。研究指出，软弱地基沉降与大幅温度变化共同作用，导致现场粘接玻璃钢三通接口应力集中，是泄漏频发的直接原因。基于弹塑性力学与土力学理论，提出以“结构补强、应力补偿、地基优化”为核心的综合治理方案：采用成品三通替代现场粘接以增强节点强度；加装橡胶膨胀节以释放温度与沉降应力；优化水洗砂回填工艺以提高地基均匀性与承载力。实践表明，治理后的管道系统运行稳定，未再发生泄漏，有效保障电厂零补水目标。本研究为类似地质气候条件下埋地管道的设计与运维提供了重要参考。

关 键 词： 埋地管道；泄漏机理；应力分析；补偿器；玻璃钢三通；高寒地区

Analysis of Leakage Mechanism and Comprehensive Management Practice of Buried Pipeline in Flue Gas Lifting System

Bai Guansuo

Pithead Power Generation Branch of State Power Investment Corporation Limited Inner Mongolia Baiyinhua Coal Power Co., Ltd., Xilingol, Inner Mongolia 026200

Abstract： This study investigates the failure mechanisms and remediation practices for frequent pipeline leakage in the underground water extraction system of Baiyinhua Pit Power Plant, a thermal power facility located in a high-altitude cold region. The research demonstrates that combined effects of foundation settlement and extreme temperature fluctuations cause stress concentration at field-bonded fiberglass reinforced plastic (FRP) tee joints, which directly triggers leakage incidents. Based on elastoplastic mechanics and soil mechanics principles, the study proposes a comprehensive remediation strategy focusing on "structural reinforcement, stress compensation, and foundation optimization." Key measures include: replacing field-bonded joints with prefabricated FRP tees to enhance joint strength; installing rubber expansion joints to relieve thermal and settlement stresses; and optimizing sand backfilling techniques to improve foundation uniformity and load-bearing capacity. Field implementation confirmed stable pipeline operation with zero subsequent leakage, effectively achieving the plant's zero water replenishment target. This research provides critical references for designing and maintaining underground pipelines in similar geoclimatic environments.

Keywords： buried pipeline; leakage mechanism; stress analysis; compensator; FRP tee; cold regions

引言

随着国家环保法规的日益严格及水资源稀缺问题凸显，我国北方缺水地区火力发电厂的节水技术已成为行业发展的关键环节。烟气提水系统作为实现电厂生产零补水的重要技术手段，其运行的可靠性直接关系到全厂的用水指标与环境绩效。国家电投集团内蒙古白音华煤电有限公司坑口发电分公司（以下简称“白音华坑口电厂”）地处内蒙古高寒贫水地区，其烟气提水系统自投运以来，埋设于地下的提水管道频繁泄漏，严重影响了系统的投用率，导致电厂水库水（备用水源）消耗量逼近临界值，不仅带来经济损耗，更在冬季严寒环境下，因泄漏点处理困难而严重威胁两台机组的正常稳定运行。因此，快速、彻底地解决埋地管道泄漏问题，已成为保障机组安全生产、达成节能环保目标的迫切需求。

当前，关于地下管道泄漏治理的研究多集中于城市给排水或长输油气管道，针对火电厂内特定工艺介质（如烟气冷凝水）且处于特殊地质（细砂层）与气候（高寒）条件下的埋地管道系统性研究相对缺乏^[1]。已有文献多侧重于单一因素的分析，如材料腐蚀、焊接缺陷或外部荷载等，而对由地质沉降、温度应力及结构缺陷耦合作用引发的泄漏机理探讨不足，相应的综合治理方案也缺乏工程实践的充分验证。

本研究立足于白音华坑口电厂的实际工程问题，通过现场勘查、理论计算与工程实践相结合的方法，旨在实现以下目标：（1）系统揭示白音华坑口电厂烟气提水埋地管道泄漏的多因素耦合机理；（2）提出一套兼具理论深度与工程可行性的综合治理方案；（3）通过实践效果评估，验证方案的有效性，并总结形成可推广的工程技术经验。

作者简介：白关锁（1993.11-），男，内蒙古通辽人，本科，工程师，研究方向：热能与动力工程。

一、问题描述与原因分析

（一）问题描述

白音华坑口电厂烟气提水埋地管道泄漏主要表现为玻璃钢管路水平段和竖直线结合处的连接开裂，泄漏点具有明显的重复性特征。泄漏发生时，不仅造成水资源浪费，还导致周边地基土体被冲刷，进一步加剧管道悬空和沉降，形成恶性循环。尤其在冬季，环境温度降至零下，泄漏水迅速结冰，使得泄漏点的定位与修复工作异常困难，安全风险陡增。

（二）原因分析

通过对泄漏管段的开挖检查、设计图纸复核及施工记录追溯，发现泄漏是设计缺陷、地质条件、材料工艺及环境因素共同作用的结果。

1. 地质条件与管道沉降

场区地质勘察报告表明，管道埋设区域主要为第四系松散堆积层，以细砂为主，其内聚力小、摩擦角低，地基承载力特征值 f_{ak} 仅为 80–100kPa。这种软弱地基在管道通水（增加了管道自重）及长期振动作用下，极易产生不均匀沉降^[2]。原管道设计时，对地基沉降的预估不足，未设置必要的柔性接口或补偿措施，导致管道如同刚性梁支撑于不均匀地基上，在自身重量和内部水重作用下，产生较大的弯曲应力和剪切应力，这些附加应力最终传递至结构薄弱的管节连接处^[3]。

2. 温度应力影响

白音华地区属典型的大陆性高寒气候，年温差可达 70℃ 以上。埋地管道虽受土壤保温作用，但其温度仍随季节发生显著变化。原管道系统为固定支架支撑，未考虑热胀冷缩产生的位移量。根据材料力学公式，管道因温度变化产生的轴向应力 σ_t 可表示为： $\sigma_t = E \cdot \alpha \cdot \Delta T$ （其中 E 为管道材料的弹性模量， α 为线膨胀系数， ΔT 为温度变化值）^[4]。对于玻璃钢管道，其 α 值通常高于金属管道，在较大 ΔT 下会产生较大的压应力或拉应力。当此温度应力与沉降引起的应力叠加，极易超过玻璃钢粘接接头的强度极限，高寒地区巨大的年温差进一步加剧了这一效应^[5]。

3. 三通结构强度不足

现场勘查发现，原设计采用的并非整体成型的三通管节，而是在直管上开孔，后将支管插入并采用手工糊制玻璃钢进行粘接加固。这种现场粘接方式存在诸多弊端：首先，粘接质量受现场环境（温度、湿度、洁净度）和操作人员技能水平影响大，难以保证均匀性和一致性；其次，粘接区域存在明显的应力集中，在横管与立管交接的角焊缝（类比）区域，应力集中系数较高；最后，手工糊制的玻璃钢层其纤维取向和树脂含量难以精确控制，力学性能远低于工厂预制的模压或缠绕成型产品^[6]。因此，该部位成为整个管道系统的薄弱环节。

4. 回填土密实度不足

初始回填可能未严格按照分层夯实的要求进行，导致回填土密实度不均，无法为管道提供均匀有效的侧向约束和底部支撑。在自身沉降作用下，管道局部受力增大，加剧了变形和接口处的应力^[7]。

综合判断：白音华坑口电厂烟气提水埋地管道的泄漏，并非单一因素所致，而是软弱地基引起的不均匀沉降、大幅温度变化产生的热应力与现场粘接三通结构强度不足三者耦合作用的结果。沉降和热变形在刚性约束的管道系统中转化为巨大的内应力，并集中作用于最薄弱的三通粘接接口，最终导致接口疲劳开裂或脆性破坏。

二、综合治理方案设计

本次治理遵循“标本兼治、综合治理”的原则，制定了以下方案：

（一）结构补强：采用高强度成品三通

将所有现场粘接的玻璃钢管三通（共 80 件）全部更换为工厂预制的整体成型玻璃钢三通。成品三通采用计算机控制纤维缠绕工艺制造，纤维连续、取向合理，树脂含量精确控制，具有更高的抗拉、抗压和抗剪切强度，以及更优的耐疲劳性能。此举从根本上消除了因现场施工质量波动导致的结构薄弱点。

（二）应力补偿：加装管道补偿器

为有效释放因温度变化和地基微量沉降产生的应力，在系统的主管路及主要支管的三通立管段（应力集中且位移明显的部位），加装橡胶补偿器（共 40 件）。补偿器选型需考虑以下参数：

补偿量：根据当地极限温度和运行温度计算管道的热膨胀量 $\Delta L = \alpha \cdot L \cdot \Delta T$ ，并预留安全余量。

工作压力：膨胀节工作压力需与管道设计压力相匹配，并预留合理安全余量。鉴于管道设计压力为 1.0MPa，故选用公称压力 (PN) 1.6MPa 的膨胀节。

材质：结合烟气冷凝水的介质特性（呈弱酸性），膨胀节材质需具备针对性抗腐蚀能力。最终选用丁基橡胶作为核心材质，其优异的化学稳定性可有效抵御冷凝水侵蚀，保障管道系统长期运行可靠性。

补偿器的安装，将原有的刚性管道系统转变为“固定支架—补偿器—导向支架”构成的柔性系统，能够主动吸收位移，大幅降低管道本体及管节连接处的应力水平。

（三）地基处理优化：水洗砂回填与夯实工艺

为改善管道基础的承载性能和均匀性，对开挖区域采用改良的回填工艺：

材料选择：采用级配良好的水洗砂作为回填材料。水洗砂颗粒均匀，含泥量低，易于夯实成型，能提供均匀的支撑。

施工工艺：严格实行分层回填，每层虚铺厚度不超过 300mm。采用“水夯+振捣器振捣”相结合的夯实方法。水夯利用水的渗透力使砂粒重新排列密实，振捣则进一步排除孔隙，确保回填砂的密实度达到 95% 以上^[8]。管道底部腋角部位采用人工仔细填塞夯实，确保管底支撑饱满。

支墩修复：对因更换三通而需凿除的混凝土支墩（20 座），在管道安装定位后，重新用 C30 混凝土浇筑，确保管道稳固。

（四）施工过程质量控制

环境控制：玻璃钢粘接及固化期间，搭设保温棚，内部采用

暖风机等采暖措施，确保环境温度维持在5℃以上，满足材料固化的温度要求。

粘接强化：对于 DN500 以上的水平直管与三通的对口连接，除常规外部粘接外，在母管（水平段）上半部分开孔后进入管道内部，并从管道内部补强粘接，实现内外双面加固，显著提高接口的抗剥离强度。

检测与验收：所有粘接接头完成后，进行100%外观检查和必要的无损检测（如敲击法）。管道系统修复后，对整体系统进行灌水查漏，合格后回填。

三、效果评估与讨论

（一）直接效果

白音华坑口电厂两台机组提水地埋管道漏点治理工程分别于2024年10月21日和11月6日完成并逐步投入运行。截至2025年底，两台机组烟气提水系统已连续稳定运行一年以上，期间从未发生管道泄漏事件。表明治理方案有效切断了泄漏的病理链，解决了根本问题。

（二）技术经济性分析

虽然本次治理投入了成品管件、补偿器及精细化施工成本，但其带来的效益显著：

运行可靠性效益：从根本上消除了因管道泄漏导致的烟气提水系统频繁停运，保障了该系统作为“全厂生产零补水”核心环节的连续稳定运行。系统的可靠投运，避免了因提水中断而启用备用水源的被动局面，确保了区域水资源的安全。

经济效益：避免了持续泄漏导致的水资源直接损失，节约了因频繁应急抢修而产生的高额人工、材料及设备费用。更重要的是，系统稳定运行实现提水回用，直接减少了电厂的水库水取用量，产生了可观的水资源费节约效益^[9]。

环保与社会效益：白音华地区水资源相对紧张，烟气提水系统的稳定运行使电厂最大程度地实现了内部水循环利用，显著降低了生产活动对当地地表及地下水资源的依赖。这不仅体现了企业作为用水大户的社会责任，也为维护当地脆弱的水资源平衡和生态环境做出了积极贡献，具有重要的社会意义。^[10]

从全生命周期成本角度看，本次一次性投入的治理方案，远优于此前“头痛医头、脚痛医脚”的被动抢修模式，其带来的运行可靠性、经济节约及资源环保效益是可持续的。

（三）理论意义与推广价值

本研究实践验证了在高寒软弱地基条件下，通过“柔化”管道系统（增设补偿器）和“强化”关键节点（使用成品管件）相结合的设计理念的正确性。它强调了在类似工程在设计阶段必须进行详细的地质勘察、精确的应力计算（包括沉降应力和温度应力），并据此选择适当的管材、连接方式和补偿措施。本案例的成功经验，可推广至北方寒冷地区其他电厂、化工厂、矿山等涉及工艺地埋管道的建设项目。

四、结论与建议

（一）结论

本文通过系统分析与实践，得出以下结论：

白音华坑口电厂烟气提水地埋管道泄漏的根本原因是软弱地基沉降、大幅温度变化与现场粘接三通结构缺陷三者耦合导致的接口应力超限。

提出的以“成品三通补强、橡胶膨胀节释压、优化回填固基”为核心的综合治理方案，理论依据充分，技术措施得当，成功解决了泄漏难题。

工程实践证实了该方案在高寒特殊地质条件下的有效性和可靠性，实现了管道系统的长期稳定运行。

（二）建议

设计阶段：建议今后在类似环境下的地埋管道设计，优先采用柔性接口设计，并进行详细的应力分析，必要时应设置补偿器。

施工阶段：严格把控管材质量、焊接或粘接工艺以及回填质量，确保施工符合设计规范。

运行维护：建立定期巡检制度，对关键管段进行状态监测，实现预防性维护。

深入研究：可进一步对治理后的管道进行长期应力应变监测，积累数据，为更精确的管道寿命预测和风险管理提供支持。

参考文献

[1] 张伟, 李建国. 火电厂节水技术与水系统优化研究综述 [J]. 中国电力, 2022, 55(7): 188-195.
[2] 钱家欢, 殷宗泽. 土工原理与计算 (第二版) [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2019.
[3] GB50332-2005, 给水排水工程管道结构设计规范 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
[4] 刘鸿文. 材料力学 (第六版) [M]. 北京: 高等教育出版社, 2017.
[5] 王志强, 刘春霞. 波纹管补偿器在热力管道中的应用与选型计算 [J]. 管道技术与设备, 2023, 41(3): 18-21.
[6] 邵卫, 张鹏, 王树立. 玻璃钢夹砂管道在埋地敷设中的力学性能研究 [J]. 玻璃钢 / 复合材料, 2021, (4): 67-72.
[7] 岳进勇, 刘岭, 刘全林. 考虑土-结构相互作用的埋地管道受力分析 [J]. 地下空间与工程学报, 2022, 18(1): 245-252.
[8] GB50268-2008, 给水排水管道工程施工及验收规范 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
[9] 国家能源局. 火力发电厂节水导则: DL/T783-2017[S]. 北京: 中国电力出版社, 2017.
[10] 胡健. 基于 GIS 的电力管道非开挖定向钻进实时定位方法 [J]. 自动化应用, 2025, 66(04): 195-197+200.DOI: 10.19769/j.zdhy.2025.04.052.

火电机组烟气余热供暖系统换热效率影响因素及调控策略

孙立斌

吉林电力股份有限公司四平第一热电公司, 吉林 四平 136001

DOI:10.61369/EPTSM.2025110017

摘 要 : 火电机组烟气余热供暖是能源梯级利用与节能减排的关键技术路径, 其换热效率直接决定余热回收潜力与供暖系统经济性。本文基于烟气余热供暖系统的传热机理, 从结构设计、介质特性、运行工况及外部环境四个维度, 深入剖析影响换热效率的核心因素, 揭示各因素对传热热阻、流场分布及能量传递过程的作用机制。针对关键影响因素, 提出优化换热器结构参数、强化介质预处理、动态匹配运行工况及自适应环境调节的调控策略, 为提升火电机组烟气余热供暖系统的换热性能与运行稳定性提供理论支撑。

关 键 词 : 火电机组; 烟气余热供暖; 换热效率; 影响因素; 调控策略

Factors Affecting Heat Exchange Efficiency and Control Strategies in Flue Gas Waste Heat Heating Systems of Thermal Power Units

Sun Libin

Siping No.1 Thermal Power Company of Jilin Electric Power Co., Ltd., Siping, Jilin 136001

Abstract : Waste heat recovery from flue gas in thermal power units is a key technical pathway for energy cascade utilization and energy conservation with emission reduction. The heat exchange efficiency directly determines the potential of waste heat recovery and the economic feasibility of the heating system. Based on the heat transfer mechanism of flue gas waste heat heating systems, this paper conducts an in-depth analysis of core factors influencing heat exchange efficiency from four dimensions: structural design, medium characteristics, operating conditions, and external environment. It reveals the mechanisms by which these factors affect thermal resistance, flow field distribution, and energy transfer processes. For critical influencing factors, optimization strategies are proposed, including adjusting heat exchanger structural parameters, enhancing medium pretreatment, dynamically matching operating conditions, and implementing adaptive environmental regulation. These strategies provide theoretical support for improving the heat exchange performance and operational stability of flue gas waste heat heating systems in thermal power units.

Keywords : thermal power units; flue gas waste heat heating; heat exchange efficiency; influencing factors; regulation strategies

引言

在“双碳”目标引领下, 火电机组节能降耗与余热资源化利用成为能源行业转型的重要方向。火电机组排烟温度通常在120–150℃, 蕴含大量中低温余热, 若直接排放不仅造成能源浪费, 还会加剧环境热污染。烟气余热供暖系统通过换热器将烟气中的热能传递至供暖循环水, 实现余热回收与供暖需求的精准匹配, 兼具节能与环保双重价值。然而, 实际运行中换热效率受多重因素耦合影响, 易出现传热系数下降、积灰堵塞等问题, 制约了余热利用效率的提升。基于此, 本文聚焦换热效率的核心影响因素, 深入分析其作用机理, 并提出针对性调控策略, 为系统优化设计与高效运行提供参考。

一、火电机组烟气余热供暖系统换热机理

工业余热供热是以回收工业生产过程中产生的废热、废水、废气等低品位能源（指以环境温度为基准，被考察体系排出的热载体可释放的热量）实现集中供热技术。该技术通过回收工业余热进行集中供热，能节约一次能源，提高经济效益，减少污染。其热源涵盖高温烟气、冷却循环水、蒸汽冷凝水等载体形态，主要应用于石化、钢铁、建材等高能耗行业。火电机组烟气余热供暖系统的核心是热量传递过程，主要通过间壁式换热器实现烟气与供暖循环水的能量交换。烟气侧的显热通过对流换热和辐射换热传递至换热器壁面，再通过导热传递至循环水侧，最终由循环水将热量输送至供暖终端。换热过程的效率由传热系数、换热面积及传热温差共同决定，遵循传热基本方程 $Q=K \cdot A \cdot \Delta t_m$ （ Q 为换热量， K 为总传热系数， A 为换热面积， Δt_m 为对数平均传热温差）。总传热系数 K 的大小取决于烟气侧对流传热系数、管壁导热系数、循环水侧对流传热系数及各环节的污垢热阻，其数值直接反映系统的传热能力，是衡量换热效率的核心指标。^[1]

二、火电机组烟气余热供暖系统换热效率影响因素

（一）结构设计因素

换热器的结构参数直接决定传热面积、流场分布及热量传递路径，是影响换热效率的基础性因素。换热器类型选择对换热效率影响显著。管壳式换热器结构稳固但烟气侧流场易出现死区，导致局部传热不均；板式换热器传热面积大、传热系数高，但抗堵塞能力较弱；翅片管式换热器通过扩展表面增大换热面积，但若翅片间距设计不合理，易造成积灰堆积。不同类型换热器的结构特性决定了其适用场景与传热效率上限。流道设计参数影响介质流动状态与传热效果。流道截面形状、排列方式及流速匹配度直接决定烟气与循环水的湍流程度，湍流状态下的对流传热系数远高于层流。若流道过宽，烟气流速降低，对流换热强度减弱；流道过窄则易引发积灰堵塞，增加传热热阻。此外，逆流布置的换热器传热温差大于顺流，相同条件下换热效率更高。换热面积与壁面特性也会影响换热效率。换热面积不足会导致传热温差过大，热量传递不充分；而过度增大换热面积会增加设备体积与投资成本，且可能引发流场分布不均。换热器壁面的材质导热系数、表面粗糙度同样关键，导热系数高的材质（如不锈钢、铜合金）能减少管壁热阻，而表面过于粗糙易导致灰尘吸附，形成污垢热阻。^[2]

（二）介质特性因素

烟气与供暖循环水的物理化学特性直接影响传热过程的顺畅性，是导致换热效率波动的重要因素。^[3-5] 火电机组烟气中含有 SO_2 、 NO_x 、粉尘、水分等，其中粉尘颗粒在换热器壁面形成积灰层，增加传热热阻； SO_2 与水分结合形成的酸性冷凝液对管壁腐蚀，使壁厚增加或出现腐蚀穿孔，破坏传热路径；烟气中水分含量过高，则造成露点腐蚀，同时烟气黏度增加，降低对流传热系数。供暖循环水的水质与温度参数同样重要。循环水硬度、含氧

量太高，造成管壁结垢与腐蚀，形成污垢热阻，阻碍热量传递；回水温度太高，缩小传热温差，降低换热驱动力；回水温度太低，将使烟气侧出现露点腐蚀，且增加循环水泵能耗，间接影响系统整体效率。

（三）运行工况因素

火电机组的负荷波动与系统运行参数的匹配度，直接改变换热过程的边界条件，影响换热效率。烟气流量与流速的变化对换热效率影响显著。火电机组负荷升高时，烟气流量增大，流速加快，可以增强烟气侧的对流换热强度，提高总传热系数；但流速过高，会加大烟气阻力，引起引风机能耗升高，而且会加剧管壁磨损。反之，低负荷工况下烟气流量小、流速低，对流传热系数下降，换热效率明显下降。系统压力与温度参数的稳定性非常重要。^[6-9] 烟气侧压力过低会导致流场分布不均，局部出现负压区，影响热量传递的均匀性；循环水侧压力波动过大会导致水流速度不稳定，甚至出现空化现象，破坏管壁表面的传热膜。此外，烟气入口温度的变化会直接改变传热温差，温度过低时换热效率显著下降，难以满足供暖需求。运行负荷的频繁波动会加剧换热效率的衰减。火电机组负荷频繁升降会导致烟气参数（温度、流量）快速变化，换热器壁面温度随之波动，易引发热应力损伤，同时导致积灰层脱落与重新堆积，形成周期性的热阻变化，降低换热效率的稳定性。

（四）外部环境因素

外部环境条件的变化会通过影响系统散热与运行边界，间接影响换热效率。

环境温度的波动会改变系统的传热温差与散热损失。冬季供暖期环境温度过低时，换热器外壳的散热损失增加，同时供暖终端的热量需求上升，导致循环水回水温度降低，虽能增大传热温差，但可能引发烟气侧漏电腐蚀；环境温度过高时，传热温差缩小，换热效率下降，且易造成系统超温运行。环境湿度与风速会加剧外部散热与设备腐蚀。高湿度环境会加速换热器外壳的腐蚀，同时增加烟气中水分的凝结概率，加剧积灰与腐蚀的耦合效应；风速过大时，换热器外部的强制对流散热增强，导致有效热量减少，间接降低换热效率。^[10]

三、火电机组烟气余热供暖系统换热效率调控策略

（一）优化结构设计参数

针对结构设计对换热效率的制约，通过优化换热器结构参数，构建高效传热路径。合理选择换热器类型并优化结构参数。根据火电机组烟气特性与供暖需求，选择适配的换热器类型：高粉尘烟气工况优先选用翅片间距较大的翅片管式换热器，低粉尘工况可采用板式换热器提升传热系数。优化翅片高度、间距与排列方式，采用错排布置增强流场扰动，同时控制翅片间距在 8 ~ 12mm，平衡换热面积与抗堵塞能力。优化流道设计与传热面积匹配。采用变截面流道设计，根据烟气流量变化调整流道宽度，避免局部流速过低或过高；采用逆流布置提升传热温差，同时合理匹配换热面积，根据最大换热量需求设计冗余系数，避免

过度设计导致的流场不均。改进换热器壁面特性。选用导热系数高的不锈钢或铜合金材质，降低管壁热阻；对壁面进行防腐涂层处理（如聚四氟乙烯涂层），减少积灰吸附与腐蚀；采用表面光滑的换热管，降低污垢附着概率，提升传热效率。

（二）强化介质预处理与特性调控

通过对烟气与循环水的预处理，减少污染物对换热过程的干扰，优化介质特性。强化烟气预处理环节。在换热器入口设置高效除尘装置，采用静电除尘与袋式除尘组合工艺，降低烟气粉尘含量；增设脱硫脱硝预处理单元，减少 SO₂、NO_x 含量，降低酸性腐蚀风险；设置烟气除湿装置，控制烟气水分含量在露点以下，避免冷凝液引发的积灰与腐蚀。优化供暖循环水水质。采用软化处理降低循环水硬度，添加阻垢剂与缓蚀剂，抑制结垢与腐蚀；定期检测循环水的 pH 值与含氧量，保持 pH 值在 8.5-9.5 之间，含氧量低于 0.1mg/L；设置旁滤装置，及时去除循环水中的悬浮物，减少污垢热阻。根据供暖需求与烟气温度变化，调节循环水回水温度，保持传热温差在合理范围（20-30℃）；避免回水温度过低导致的漏电腐蚀，同时防止回水温度过高造成的换热效率下降。

（三）动态匹配运行工况

根据火电机组负荷变化与烟气参数波动，动态调整系统运行参数，实现换热效率的最优匹配。采用变频调节引风机转速，根据机组负荷变化动态调整烟气流量，保持烟气流速在 6 ~ 10m/s 的最优区间，平衡对流换热强度与风机能耗；低负荷工况下通过阀门调节减少流道截面积，提高局部流速，避免换热效率衰减。设置压力缓冲装置，控制烟气侧压力波动范围在 ±5kPa 以内，循环水侧压力波动范围在 ±0.1MPa 以内；采用温度反馈控制，通过调节循环水流量匹配烟气入口温度变化，保持传热温差稳定。减少负荷波动对换热效率的影响。优化火电机组负荷调度策略，避

免频繁启停与负荷突变；在换热器入口设置烟气混合室，均衡烟气温度与流量分布，减少参数波动对传热过程的冲击。

（四）自适应环境调节

针对外部环境变化，采取自适应调节措施，降低环境因素对换热效率的干扰。采用岩棉或聚氨酯保温材料对换热器外壳进行保温处理，保温层厚度不低于 50mm，降低环境散热损失；设置温度监测装置，根据环境温度变化调整保温层的散热面积，避免超温或低温运行。高湿度环境下增加防腐涂层的维护频率，定期检查管壁腐蚀情况；在换热器外部设置防风罩，减少风速对外部散热的影响，同时避免雨水直接冲刷设备。通过传感器实时监测环境温度、湿度与风速，将数据反馈至控制系统，动态调整循环水流量与烟气流速，实现换热效率与环境条件的自适应匹配。

四、结论

火电机组烟气余热供暖系统的换热效率受结构设计、介质特性、运行工况及外部环境多重因素的耦合影响，其中换热器结构参数、烟气粉尘与水分含量、运行负荷波动及环境温度变化是核心制约因素。它们通过改变传热热阻，流场分布及传热温差而影响系统的传热效率。换热效率的提高应采取系统性调控：优化换热器结构设计，建立高效的传热路径；强化介质预处理，减少由于积灰、腐蚀与结垢引起的热阻增长；动态匹配运行工况，平衡换热效率与能耗；自适应环境变化，减少外部因素的干扰。协同实施多维度调控措施，有效提高系统的换热性能和运行稳定性。未来研究可结合智能化技术，建立大数据与机器学习的换热效率预测模型，实现调控策略的精确优化，进一步挖掘火电机组烟气余热的利用潜力，为能源节约与低碳发展提供更强有力的技术支撑。

参考文献

[1] 刘卫东, 潘广旭, 王晓梅, 任学良, 牛蔚然, 杨伟进, 李一真, 颜勇. 基于价值工程理论的电锅炉供暖方案优选方法研究 [J]. 日用电器, 2017, (07): 15-20.

[2] 裴文浩, 贾鸿源, 闫孟哲, 杜浩浩. 光伏发电与固体储热联合供暖系统开发与应用 [J]. 河北水利电力学院学报, 2024, 34(02): 49-53.

[3] 凡烈, 邢永杰, 刘芳, 熊亚选. 储热系统优化对延庆冬奥村供暖经济性的影响 [J]. 储能科学与技术, 2024, 13(06): 2057-2067.

[4] 杨海鸿, 马坤, 李学娟, 邵继新, 管东海, 王翠萍. 中深层无干扰地岩热供暖系统测试研究 [J]. 节能技术, 2024, 42(02): 164-168.

[5] 董蓬, 王伟奇, 李智丽, 王君君. 太阳能集热室内供暖现状及展望 [J]. 节能, 2024, 43(01): 113-115.

[6] 武晔秋, 刘旺, 王莹莹, 王瑞. 晋北地区村镇住宅建筑供暖系统优化及经济性研究 [J]. 节能, 2023, 42(02): 20-24.

[7] 李嘉丰, 程晓绚, 熊显智, 李天泽, 李智轩. 面向园区的综合能源供暖系统设计与实践 [J]. 暖通空调, 2022, 52(S1): 18-24.

[8] 李泽瑞, 姜晓霞, 刘克为. 跨季节斜温层储罐蓄热太阳能供暖系统配置研究 [J]. 电站辅机, 2022, 43(01): 24-28.

[9] 尚庆晓, 孙鸣. 基于风电、储(热)供暖系统的电网优化调度研究 [J]. 太阳能学报, 2021, 42(07): 65-70.

[10] 梁启煜, 刘志刚, 王迎春, 赵佳悦, 宋晓皎. 槽式太阳能供暖系统工程应用与分析 [J]. 节能, 2021, 40(03): 13-15.

低压配电系统中智能断路器的应用研究

安洋

山东核电有限公司, 山东 海阳 265100

DOI:10.61369/EPTSM.2025110018

摘 要 : 本文聚焦低压配电系统中智能断路器的应用研究。首先阐明低压配电系统作为电力传输末端的关键地位及其在现代工业、商业与民用场景中的不可替代性,指出传统断路器功能局限催生智能断路器需求。继而系统分析智能断路器的核心特点,如集成传感技术实现实时电流监测、故障自诊断、远程通信控制等智能化功能。随后从电路保护效能提升、配电系统运行管理优化、能源效率提高等多维度展开应用探讨,并剖析其在实际应用中面临的技术兼容性、成本控制、数据安全等挑战。最后展望其与物联网、人工智能技术融合的未来发展趋势,为智能断路器在低压配电领域的深化应用提供理论支撑与实践参考。

关 键 词 : 低压配电系统; 智能断路器; 应用

Application Research on Intelligent Circuit Breakers in Low Voltage Distribution Systems

An Yang

Shandong Nuclear Power Co., Ltd. Haiyang, Shandong 265100

Abstract : This paper focuses on the application research of intelligent circuit breakers in low-voltage systems. It first elaborates on the key position of low-voltage distribution systems as the end of power transmission and their irreplaceability in modern industrial, commercial, and civil scenarios pointing out that the limitations of traditional circuit breakers have led to the demand for intelligent circuit breakers. It then systematically analyzes the core characteristics of intelligent circuit breakers, such integrated sensing technology to achieve real-time current monitoring, fault self-diagnosis, remote communication control, and other intelligent functions. Subsequently, it explores the application from multiple, such as improving the effectiveness of circuit protection, optimizing the operation and management of the distribution system, and improving energy efficiency. It also analyzes the challenges it faces in practical, such as technical compatibility, cost control, and data security. Finally, it looks forward to its future development trend of integration with the Internet of Things and artificial intelligence technology, providing support and practical references for the deep application of intelligent circuit breakers in the field of low-voltage distribution.

Keywords : low voltage distribution system; intelligent circuit break; application

引言

低压配电系统在现代电力供应体系中占据着基础且关键的地位。它负责将电能安全、稳定地分配到各个用电设备。随着科技发展和用电需求日益复杂,传统断路器逐渐难以满足低压配电系统更高的要求。智能断路器应运而生,它融合了现代电子技术、通信技术和控制技术,它的成功应用,将对低压配电系统的性能提升、可靠性增强、远程控制、状态反馈、参数检测等有着深远意义。

一、智能断路器的特点

(一) 智能化功能的集成

智能断路器集成了多种智能化功能,它能够实时监测电路中的电流、电压等参数,可以及时发现电路中的异常情况。而且智

能断路器具备自我诊断功能,能够对自身的工作状态进行检查,判断是否存在潜在故障。这种智能化的功能集成是传统断路器所不具备的,它使得断路器不仅仅是一个简单的电路保护设备,更是一个能够对电路状态进行智能感知的装置。智能断路器可以通过内置的传感器精确地感知电流的大小、方向,电压的高低等关

键参数^[1]，并且它能够对这些数据进行快速的分析和处理，一旦发现参数超出正常范围，就能迅速做出反应。自我诊断功能也是其智能化的重要体现，它可以定期对自身关键部件进行检查，如触点磨损情况、内部电路连通性等，提前发现可能存在的问题，避免在关键时刻出现故障。

（二）通信能力的具备

智能断路器拥有通信能力，它可以与其他设备或者系统进行通信，实现数据的传输和交互。这种通信能力使得智能断路器能够融入到整个低压配电系统的智能化管理网络中。通过通信，它可以将自身的监测数据发送给控制中心，同时也能接收来自控制中心的指令。这一特性为实现远程控制和智能化管理低压配电系统奠定了基础。智能断路器采用的通信技术可以有多种，比如常见的有线通信方式，如以太网，能够提供高速稳定的数据传输通道，确保大量的监测数据能够准确无误地传输到监控中心^[2]。还有无线通信方式，如 WiFi，使得智能断路器的安装更加灵活，不需要复杂的布线，特别适合一些老旧厂区的低压配电系统改造。通过通信能力，控制中心可以实时获取智能断路器的状态信息，包括是否正常工作、监测到的电路参数等，并且可以根据这些信息对智能断路器进行远程控制，比如在发现某个区域的电路负载过高时，远程控制智能断路器进行分闸操作，以保障电路的安全。

二、智能断路器在低压配电系统中的电路保护应用

（一）精准的过载保护

在低压配电系统中，智能断路器能够实现精准的过载保护。当电路中的电流超过正常工作电流一定范围时，智能断路器能够准确判断并及时切断电路。与传统断路器相比，它的判断更加精准，不会因为轻微的电流波动而误动作。这种精准的过载保护能够有效保护电路中的设备免受过载电流的损害，延长设备的使用寿命，确保低压配电系统的稳定运行。智能断路器对于过载保护的精准性体现在它能够根据电路的实际运行情况动态地调整过载保护的阈值^[3]。例如，在一些特殊的用电场景下，如某些设备启动时会有短暂的电流峰值，但这是正常现象，智能断路器可以识别这种正常的电流波动，不会将其误判为过载。它通过对电流的变化趋势、持续时间等多方面因素的综合分析，来准确判断是否是真正的过载情况。当确定是过载时，它能够迅速地切断电路，避免过载电流对电路中的电线、设备等造成过热、绝缘损坏等危害，从而保障整个低压配电系统的安全稳定运行。

（二）可靠的短路保护

智能断路器在短路保护方面也表现出色。一旦电路发生短路，会产生极大的电流，这对电路和设备是极大的威胁。智能断路器能够迅速检测到短路电流，在极短的时间内切断电路。它的反应速度非常快，能够在短路产生的瞬间就做出反应，从而最大程度地减少短路对低压配电系统和用电设备的破坏，保障了整个系统的安全性。智能断路器通过内置的快速响应传感器来感知电流的瞬间增大，并且通过先进的算法来区分短路电流和其他异常电流情况。一旦确定为短路电流，智能断路器内部的脱扣机构会

迅速动作，以极快的速度切断电路。这种快速切断能力可以有效地防止短路电流对电路中的电线产生过度的热效应，避免电线熔断、起火等危险情况的发生，同时也能够保护用电设备免受短路电流的冲击，减少设备损坏的风险，保障低压配电系统的安全可靠运行^[4]。

三、智能断路器对低压配电系统运行管理的优化

（一）实时监测与数据反馈

智能断路器对低压配电系统运行管理的优化首先体现在实时监测与数据反馈上。它能够持续监测电路的各种参数，如电流、电压、功率等，然后将这些监测到的数据及时反馈给控制系统，使运行人员实时了解低压配电系统的运行状态，及时发现潜在故障，为提前采取措施提供依据，有助于提高整个配电系统运行的可靠性和稳定性。智能断路器通过高精度传感器对电路参数进行实时监测，这些传感器能够以高频率采集数据，确保能够捕捉到电路参数的微小变化。采集到的数据通过内部的处理单元进行初步的分析和处理，然后通过通信模块将数据反馈给管理系统^[5]。管理系统可以对这些数据进行分析，例如通过分析电流和电压的波动情况来判断电路是否存在异常的负载变化，通过分析功率的变化来评估用电设备的运行效率等。运行人员可以根据这些分析结果及时发现潜在的问题，如某个电路的负载逐渐增加可能存在过载的风险，从而提前采取措施，如调整负载分配或者对设备进行维护等，以提高低压配电系统运行的可靠性和稳定性。

（二）远程控制与自动化管理

智能断路器支持远程控制与自动化管理。通过通信功能，运行人员可以远程对智能断路器进行操作，同时它还可以根据预设的规则实现自动化管理。例如，当电路中的某些参数达到一定阈值时，智能断路器可以自动执行相应的操作。这种远程控制和自动化管理大大提高了低压配电系统管理的效率，降低了人工操作的难度和风险。在远程控制方面，运行人员可以通过控制中心的计算机或者移动设备，利用智能断路器的通信功能，对分布在不同位置的智能断路器进行合闸、分闸操作。这在一些紧急情况下非常有用，比如当发现某个电路出现故障时，可以迅速远程分闸，避免故障的扩大。而自动化管理功能则可以根据预设的规则，如当电流超过一定值时自动分闸，当电压在一定范围内波动时自动调整工作模式等。这种自动化管理不需要人工实时监控和操作，减少了人工操作的失误风险，同时也提高管理效率，使得低压配电系统的管理更加智能化、科学化^[6]。

四、智能断路器应用面临的挑战

（一）技术兼容性问题

智能断路器在应用中面临着技术兼容性的挑战。由于低压配电系统中存在多种不同类型的设备和系统，智能断路器需要与这些设备和系统进行兼容。然而，不同设备和系统可能采用不同的通信协议、技术标准等，这就可能导致智能断路器在与它们进行

交互时出现问题。例如，通信不畅、数据无法正确读取等情况，影响智能断路器在低压配电系统中的正常应用。在低压配电系统中，传统的电气设备采用的是比较老旧的通信协议或者根本没有通信功能^[7]，而智能断路器采用的是先进的通信技术和协议，如以太网、WiFi等。当智能断路器要与这些传统设备进行连接和交互时，就可能会出现兼容性问题。不同厂家生产的设备也可能采用不同的技术标准，智能断路器在与这些设备进行集成时，需要解决这些标准差异带来的兼容性问题，以确保能够实现数据的正确传输和交互，保障整个低压配电系统的正常运行。

（二）成本与维护问题

智能断路器的应用还面临成本与维护的问题。智能断路器由于其集成了多种先进技术，其制造成本相对较高，这对于一些预算有限的工程项目来说是一个较大的负担。而且智能断路器的维护也需要一定的专业知识和技术，其维护成本可能也比传统断路器高，如何在保证智能断路器性能的前提下，降低成本并做好维护工作是应用中需要解决的问题。智能断路器的制造成本高主要是因为其内部集成了多种先进的电子元件、传感器、通信模块等，这些元件的研发、生产和集成都需要投入大量的成本。对于一些低预算的低压配电系统改造，难以承担智能断路器的高成本。在维护方面，智能断路器的维护需要专业的技术人员，他们需要了解智能断路器的内部结构、通信协议、智能化算法等知识。而且智能断路器的故障诊断和修复可能比传统断路器更加复杂，需要使用专业的检测设备，这也增加了维护成本。因此，如何在保证智能断路器性能的同时，降低其制造成本和维护成本，是智能断路器在低压配电系统中广泛应用需要解决的重要问题^[8]。

五、智能断路器在低压配电系统中的发展趋势

（一）功能进一步集成化

未来智能断路器在低压配电系统中的发展趋势之一是功能进一步集成化。它将集成更多的功能，如电能质量监测、能源管理等。通过功能的进一步集成，智能断路器将成为低压配电系统中的一个综合性的智能节点。能够对电路的更多方面进行监测和管理，进一步提升低压配电系统的智能化水平和运行效率。在电能质量监测方面，智能断路器将能够监测电压的波动、频率的偏

差、谐波含量等电能质量指标^[9]。通过对这些指标的监测，可以及时发现电能质量问题，如电压闪变可能会影响一些敏感设备的正常运行，智能断路器可以检测到这种电压闪变情况，并采取相应的措施或者向运行人员发出警报。在能源管理方面，智能断路器可以对电路中的能耗进行监测和分析，帮助用户了解不同设备、不同电路的能耗情况，从而优化能源使用，实现节能减排的目标。通过功能的进一步集成化，智能断路器将成为低压配电系统中的核心智能设备，对提升整个系统的智能化水平和运行效率有着重要意义。

（二）智能化程度不断提高

智能断路器的智能化程度将不断提高。它将具备更强大的人工智能算法，能够对电路中的复杂情况进行更精准的分析和预测。例如，能够提前预测电路可能出现的故障，提前采取措施进行预防。其智能化程度的提高将使智能断路器在低压配电系统中的应用更加深入和广泛，为低压配电系统带来更多的价值。智能断路器将采用更先进的人工智能算法，如机器学习算法。通过对大量历史数据的学习，能够分析出电路运行的正常模式和异常模式^[10]。例如，通过对不同时间段、不同负载情况下电路参数的学习，它能够准确判断出电路在何种情况下可能出现故障。当检测到电路运行接近故障模式时，它能够提前采取措施，如调整自身的保护参数或者向管理人员发出预警，以便管理人员提前进行维护，避免故障的发生。智能化程度的提高将使智能断路器能够更好地适应复杂多变的低压配电系统运行环境，为低压配电系统提供更可靠、更智能的保护和管理，进一步提升低压配电系统的整体性能和价值。

六、结论

智能断路器在低压配电系统应用优势显著，其智能化特性在电路保护、运行管理优化上作用重大。虽当下在技术兼容性、成本与维护等方面面临挑战，但随着技术进步，功能将更集成，智能化程度会持续提升。未来，它会在低压配电系统里扮演更重要角色，保障系统安全稳定高效运行。通过解决应用问题，推动系统向更高层次智能化发展，为电力供应体系带来创新变革，期待它能完善自身，与其他设备协同，共建智能配电系统。

参考文献

- [1] 韩雨, 戴玮. 智能低压断路器的研发及应用 [J]. 电气时代, 2020, (05): 21-24.
- [2] 苏照元. 智能断路器在电力系统自动化中的应用研究 [J]. 家电维修, 2024, (09): 107-109.
- [3] 茆大标, 褚先菲. 智能剩余电流动作断路器在农村低压配网中的应用 [J]. 电工技术, 2018, (22): 14-15.
- [4] 侯瑞. 配电网低压断路器智能监控技术的研究与应用 [J]. 自动化应用, 2024, 65(08): 67-70.
- [5] 刘刚. 电网谐波环境下低压断路器运作影响量分析 [J]. 信息技术, 2021, (02): 137-141+146.
- [6] 张培铭. 基于系统选择性保护的智能低压配电控制与保护技术 [J]. 电器与能效管理技术, 2016, (04): 1-4+14.
- [7] 盛慧, 蔡韧, 李佳文. 低压智能断路器检测与维护方法的探讨 [J]. 电气技术与经济, 2024, (04): 144-147.
- [8] 史年富. 低压断路器智能控制器优化与实现 [D]. 南京理工大学, 2009.
- [9] 唐伟, 段国艳, 钟伟. 基于嵌入式控制技术的低压智能断路器研究 [J]. 电子测试, 2022, 36(06): 18-20.
- [10] 施志伟. 智能断路器功能分析及检测方法研究 [C]// 冶金工业教育资源开发中心. 第四届钢铁行业数字化教育培训研讨会论文集. 永康市光明送变电工程有限公司协合电气分公司, 2024: 312-314.

电力工程中输电线路状态智能运维监测系统应用

陈晓忠

国网山西省电力公司大同供电分公司, 山西 大同 037000

DOI:10.61369/EPTSM.2025110019

摘 要： 输电线路作为电力系统的重要组成部分，其运行状态直接影响电网的安全与稳定。智能运维监测系统融合传感技术、通信技术与数据分析手段，实现对输电线路运行状态的实时监控与预警，提高故障响应效率，降低维护成本。该系统在电气工程中的广泛应用，推动了运维管理的数字化和智能化进程，也为电网安全运行提供了强有力的技术支撑。本文围绕该系统的构建与应用效果展开探讨。

关 键 词： 输电线路；智能运维；状态监测；电气工程；系统应用

Application of Intelligent Operation and Maintenance Monitoring System for Transmission Line Status in Electrical Engineering

Chen Xiaozhong

State Grid Shanxi Electric Power Company Datong Power Supply Branch, Datong, Shanxi 037000

Abstract： As a critical component of power systems, transmission lines directly impact grid safety and stability through their operational status. The intelligent operation and maintenance monitoring system integrates sensor technology, communication technology, and data analysis methods to enable real-time monitoring and early warning of transmission line conditions, thereby improving fault response efficiency and reducing maintenance costs. The widespread application of this system in electrical engineering has accelerated the digitalization and intelligentization of operation and maintenance management, while providing robust technical support for grid safety. This paper explores the system's construction and application outcomes.

Keywords： transmission line; intelligent operation and maintenance; condition monitoring; electrical engineering; system application

引言

在电气工程快速发展的背景下，输电线路作为电力系统的关键组成部分，其运行状态直接关系到整个电网的安全与稳定。传统的运维模式已难以满足对高可靠性、智能化和实时响应的现代化要求。借助智能监测系统，将物联网、边缘计算与人工智能等先进技术引入输电线路运维，实现对线路状态的精确感知与智能分析，成为当前电力行业发展的重要方向。

一、电力工程中输电线路运维面临的挑战与需求

在电气工程领域中，输电线路作为电力系统的重要组成部分，承担着电能在不同区域之间稳定、高效输送的核心任务。输电线路通常分布在地形复杂、气候多变的地区，运行环境极为恶劣，极易受到雷击、覆冰、强风、设备老化及外力破坏等因素的影响。这些自然及人为因素带来的隐患增加了线路运行的不确定性，严重威胁电网的安全与稳定。传统人工巡检方式由于受限于人力资源和地理条件，其作业效率普遍偏低，尤其在地形复杂或气候恶劣的输电线路沿线，巡检周期长、响应滞后。覆盖范围有

限使得许多潜在隐患难以及时发现，容易导致线路故障风险积累。人工识别能力存在主观性，漏检率高，无法满足对关键设备状态精准感知和高频次监测的现实要求，从而制约了输电线路高可靠性与高实时性运维目标的实现。

随着电网规模不断扩大、复杂程度日益提升，运维工作面临着前所未有的挑战。输电线路状态信息的实时获取、精准评估和快速响应成为运维管理的核心诉求。传统的周期性检修机制难以有效识别潜在故障，容易出现“过度维护”或“维护滞后”的问题，既增加了人力与运维成本，也埋下了设备突发故障的风险。在电气工程全面迈向数字化、信息化的转型进程中，传统的运维

方式已难以适应复杂多变的电网运行环境。为提高整体运行效率与安全保障能力，电网企业对运维系统提出了更高层次的智能化、自动化技术要求。部署先进的状态监测设备和引入人工智能分析手段，力求实现对输电线路运行状态的连续采集、动态识别和故障趋势预测，从而推进运维管理从“经验驱动”向“数据驱动”转变，实现精细化、可视化的智能运维管理体系。

智能运维监测系统应运而生，其融合了物联网技术、边缘计算、状态感知、数据建模和人工智能等核心技术，成为解决上述问题的重要路径。在输电线路沿线布设智能传感器与监测终端，系统可实现对杆塔倾斜、导线温度、导线舞动、覆冰厚度等关键状态量的实时采集，结合高频次数据上传与智能算法分析，为运维人员提供状态预警、趋势分析与故障诊断建议。这种基于状态的运维模式依托实时监测与智能分析，能够动态掌握输电线路的运行状况，提前发现潜在故障隐患，大幅提升了运维工作的效率与响应速度。

二、智能运维监测系统的关键技术构成

智能运维监测系统在输电线路状态管理中的广泛应用，依赖于多个关键技术的深度融合与协同运行。核心在于感知层的构建与优化，布设多类型智能传感器，实现对输电线路运行状态的实时获取。这些传感器涵盖导线温度传感器、张力监测器、杆塔倾角仪、覆冰检测器以及微气象观测设备等，具备高灵敏度和强环境适应能力。借助这些前端设备，系统能够精准采集电气参数与环境参数，并为后续分析提供高质量数据支撑。传感器节点的低功耗设计与长距离无线传输能力，保障了其在野外复杂环境下的稳定运行。

数据传输与边缘计算技术构成了智能监测系统的中枢部分。在远离变电站或主控中心的输电线路区域，部署边缘计算设备可实现现场数据的初步处理、筛选与本地分析，大幅减少冗余信息传输，降低通信带宽压力。这些边缘节点具备数据压缩、特征提取与异常识别等功能，还可经过智能判断触发报警信号，提升故障响应的即时性。系统经过4G/5G、LoRa、微波通信等多种通信手段，建立起稳定可靠的多层次数据通道，确保监测信息能够在复杂地理环境中高效回传，实现全时段、广覆盖的状态信息传输。

在数据分析与决策支持层面，系统充分引入人工智能与大数据建模技术，建立线路状态评估模型与健康指数评价体系。对历史运维数据、环境参数与实时监测数据的融合分析，系统可实现输电线路运行状态的趋势预测与隐患研判。机器学习算法在故障特征识别与模式识别中的应用，有效提高了设备异常识别的准确率，支持决策中心对运维策略进行动态调整。结合GIS可视化技术，监测结果可直观呈现在地图平台上，便于运维人员进行空间判断与快速定位。这些关键技术共同构成了智能运维监测系统的技术支柱，支撑其在电气工程中高效、可靠运行。

三、输电线路状态监测系统的设计与实现路径

输电线路状态监测系统的设计过程需要紧密围绕实际运行需

求展开，以构建一个高效、稳定、可扩展的智能监测平台。在系统架构设计上，通常采用三层结构，包括感知层、网络层与应用层。感知层负责对输电线路关键状态参数进行实时采集，需根据不同地理环境与气候条件选择合适的传感设备，如光纤光栅传感器、无线MEMS传感器、高精度加速度计等，确保数据获取的准确性与稳定性。监测对象涵盖导线温升、舞动幅度、塔体倾斜、接地电阻变化、绝缘子污闪等运行关键指标，结合图像识别与视频监控技术对外破行为进行辅助监控，增强系统的全面性与场景适应能力。

系统实现过程中，数据传输路径的构建至关重要。考虑到输电线路往往穿越山地、林区等复杂地形，通信方式需兼具高带宽与抗干扰能力。^[1]构建多跳无线通信网络，结合4G/5G、北斗卫星定位、LoRa自组网等技术，确保监测数据在复杂环境中稳定传输。边缘计算设备部署在节点处，对原始监测数据进行预处理和压缩，减少中心处理系统的负担，提升故障预警的即时性与准确性。网络层中的数据汇聚网关具备设备识别、协议转换与数据缓存功能，保障数据传输过程中的安全性与完整性，为系统高效运行奠定基础。^[2]

在应用层，系统需配备数据管理平台与决策分析模块，实现从数据采集到状态评估、故障预判、风险告警的闭环管理。平台支持多维度数据展示与趋势分析，结合人工智能算法实现对输电线路运行状态的分类诊断与健康指数评估。系统应具备自学习能力，能在长期运行中优化模型参数，提高预测的准确性和稳定性。与电网调度系统对接，实现信息联动与运维资源的智能调配。系统在设计上需注重模块化与可扩展性，以适应未来智能电网技术的演进和新型监测需求的不断增加。^[3-5]

四、智能监测系统在实际输电运维中的应用成效分析

智能监测系统在输电线路运维中的实际应用，显著提升了电网运行的安全性与管理效率。在传统模式下，输电线路维护依赖人工巡检，巡检周期长、覆盖面有限，且存在人为主观判断误差，无法满足现代电力系统对实时性和精准性的需求。^[6]引入智能监测系统后，部署高密度传感器阵列和远程视频监控终端，实现了对输电线路运行状态的全天候、无间断监控。系统能够自动采集并分析导线温度、舞动频率、杆塔倾斜、覆冰厚度等关键参数，一旦监测值异常，立即经过告警机制通知运维人员进行快速响应，极大缩短了故障识别与处理时间，有效防止了设备因隐患积累而导致的突发故障和大面积停电事故。^[7]

在运维效率方面，智能监测系统经过边缘计算与数据预处理技术，将海量前端数据进行有效筛选与分类，实现关键事件的优先处理与动态推送。大数据平台对采集到的信息进行深度学习建模与趋势分析，辅助运维人员做出科学决策。以某山区输电线路为例，系统启用后，设备故障平均发现时间由过去的数小时缩短至十分钟以内，设备抢修响应时间减少了40%以上。精细化管理与基于状态的维护策略，系统显著减少了无效检修与重复性工作，提升了设备运行周期的可预测性与稳定性，增强了运维工作

的针对性与科学性。

在经济效益和综合管理成效方面，智能监测系统的推广应用有效降低了运维人力成本和物资投入。系统运行初期虽涉及设备部署和平台建设费用，但长期运行过程中所带来的维护资源优化、检修计划合理化与停电次数减少，远远抵消了前期投入。历史数据的积累与分析，系统逐步具备对季节性风险、区域性故障特点的预测能力，为电力企业构建起基于数据驱动的全生命周期资产管理体系。智能监测系统的应用推动输电线路由“被动响应”向“主动预防”转变，也为电气工程智能化升级提供了切实可行的技术路径与管理模式，体现出明显的实践价值与推广潜力。^[8]

五、电气工程智能运维系统的优化方向与未来趋势

电力工程中智能运维系统在实际应用中展现出显著成效，但在持续发展的背景下仍需在技术性能与系统集成方面不断优化。当前系统存在数据融合不充分、预警精准度有限、模型适应性弱等问题，难以完全满足复杂工况下的输电线路管理需求。为提升整体运行效率与系统智能化水平，未来需进一步加强多源异构数据的融合与处理能力，将结构化数据与非结构化数据有机统一，构建多维度数据资源库。^[9]在系统感知层面，引入更高精度的传感设备与智能终端，实现更多物理量的全面采集与深度感知，为状态评估与决策提供更全面的数据支撑。

在智能算法与分析模型方面，深度学习、强化学习和图神经

网络等人工智能技术将成为智能运维系统演进的重要方向。构建具备自适应能力的分析模型，使系统能够根据不同地理环境、气候条件和运行历史进行动态调整，提高状态诊断与故障预测的准确性。数字孪生技术的引入将重构电力设备的虚拟映射系统，实现输电线路状态在虚拟空间中的仿真建模与实时交互，推动从“可视化监控”向“智能预测”升级。^[10]

未来趋势还将聚焦于智能运维系统与电网调控系统的深度融合，构建以信息驱动、智能决策为核心的协同管理体系。融合云计算、区块链与人工智能平台，建立透明、安全、高效的运维数据共享机制，提升多部门协同处理能力。在运维管理模式上，将逐步向无人值守、自动巡检和自主维护方向发展，实现输电线路全生命周期的智能管控。政策层面和行业标准也将持续推动系统的标准化与模块化建设，促进技术的广泛推广与产业协同。

六、结语

本文围绕电力工程中输电线路状态智能运维监测系统的应用展开系统性研究，从运维现状与挑战、关键技术构成、系统设计路径、实际应用成效到未来发展方向进行了深入分析。研究表明，智能运维监测系统提升了输电线路运行的安全性与维护效率，也为电力系统的智能化转型提供了坚实支撑。随着相关技术的不断演进，该系统将在保障电网稳定运行与推动能源行业高质量发展方面发挥更大作用。

参考文献

[1] 刘志强, 陈伟. 输电线路智能监测技术研究与应用 [J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(18): 112–118.
[2] 李明, 周建华. 输电线路状态监测系统的设计与实现 [J]. 高压技术, 2020, 46(3): 967–973.
[3] 王建国, 赵宏伟. 智能运维技术在电气工程中的应用探讨 [J]. 电力建设, 2022, 43(2): 85–91.
[4] 杨斌, 杜晓明. 面向智能电网的输电线路状态感知技术研究 [J]. 电力系统自动化, 2019, 43(10): 73–79.
[5] 韩磊, 林志强. 基于大数据的输电线路智能运维平台构建 [J]. 中国电力, 2023, 56(4): 45–52.
[6] 周洋, 刘浩. 输电线路状态监测技术与智能化发展趋势 [J]. 电力系统及设备, 2021, 37(5): 33–39.
[7] 陈凯, 魏东. 输电线路智能运维系统架构与实现分析 [J]. 电网技术, 2020, 44(1): 119–126.
[8] 马宁, 郑斌. 电力工程中状态感知技术的研究与应用 [J]. 电力自动化设备, 2022, 42(9): 135–141.
[9] 胡鹏, 邓林. 基于边缘计算的输电线路智能监测系统研究 [J]. 电力信息与通信技术, 2021, 19(6): 56–62.
[10] 江涛, 黄飞. 输电线路智能运维关键技术研究进展 [J]. 南方电网技术, 2022, 16(2): 75–81.

垃圾焚烧电厂能源与动力系统的热力学剖析 及效率优化探究

邹国华

广州环投从化环保能源有限公司，广东 广州 510000

DOI:10.61369/EPTSM.2025110023

摘 要： 本文围绕垃圾焚烧电厂能源与动力系统展开研究，涵盖热力学原理、效率优化、余热回收、不同规模机组适配等多方面。通过焓分析、构建指标体系等方法剖析能量利用，提出多目标优化模型与智能算法提升效率，经工程实践验证策略可行性，还从经济与环境效益评估并探讨行业推广与兼容设计，对系统优化意义重大。

关 键 词： 垃圾焚烧电厂；能源与动力系统；效率优化

Thermodynamic Analysis and Efficiency Optimization of Energy and Power Systems in Garbage Incineration Power Plants

Zou Guohua

Guangzhou Huantou Conghua Environmental Protection Energy Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510000

Abstract： This article focuses on the research of energy and power systems in waste incineration power plants, covering thermodynamic principles, efficiency optimization, waste heat recovery, and adaptation to different scale units. By analyzing energy utilization and constructing an indicator system, a multi-objective optimization model and intelligent algorithm are proposed to improve efficiency. The feasibility of the strategy is verified through engineering practice, and the economic and environmental benefits are evaluated and industry promotion and compatible design are discussed, which is of great significance for system optimization.

Keywords： garbage incineration power plant; energy and power systems; efficiency optimization

引言

随着环保意识的增强和能源需求的增长，垃圾焚烧发电成为重要的能源利用方式。2020 年颁布的《关于进一步加强塑料污染治理的意见》也从侧面推动垃圾处理行业向更高效环保方向发展。垃圾焚烧过程遵循质量与能量守恒，其能源转化涉及朗肯循环等关键模型。通过焓分析、构建评价指标体系等方式剖析能量利用，从蒸汽参数调整、多目标优化、智能算法应用、余热回收等方面优化系统效率，并经工程实践验证。同时考量全生命周期成本、碳排放效益、机组适配性及智能控制系统兼容，对提升垃圾焚烧电厂能源与动力系统性能意义重大。

一、垃圾焚烧电厂热力学系统基础理论

（一）垃圾焚烧能源转化热力学循环原理

垃圾焚烧过程遵循质量与能量守恒方程。垃圾中的化学能在焚烧时释放，转变为热能，此过程质量与能量总量保持恒定。在能源转化中，朗肯循环是关键的热力学模型。高温高压蒸汽在汽轮机中膨胀做功，推动汽轮机旋转进而带动发电机发电，做功后的蒸汽进入凝汽器冷凝成水，再经给水泵升压送回余热锅炉加热成蒸汽，完成循环。通过建立焚烧炉 - 余热锅炉 - 汽轮机系统的焓分析框架，能更深入剖析能量利用情况。焓分析可确定各环节不可逆损失，为效率优化提供依据，精准定位系统中能量品质降

低的关键部位，以便针对性改进，从而提高垃圾焚烧电厂能源转化效率，实现能源的高效利用^[1]。

（二）系统热力学效率评价指标体系

在垃圾焚烧电厂热力学系统中，系统热力学效率评价指标体系至关重要。构建基于热力学第二定律的分析体系，纳入主蒸汽参数、给水温度、凝汽器真空度等关键参数^[2]。主蒸汽参数决定了蒸汽携带能量的品质与数量，对做功能力影响显著；给水温度关乎回热系统的运行效果，适当提高可减少燃料消耗；凝汽器真空度直接影响汽轮机排汽压力，进而影响循环效率。通过这些参数，可精准分析系统各环节能量转换与利用情况。定义总效率计算公式，综合考量各部分能量损失与有效利用，能全面评估系统

热力学效率，为垃圾焚烧电厂能源与动力系统的优化改进提供关键依据，实现能源的高效利用与系统性能提升。

二、蒸汽参数对汽轮机组效率影响机理

（一）主蒸汽温度对发电效率的影响规律

基于 T-S 图可对主蒸汽温度提升所带来的影响进行定量分析。当主蒸汽温度升高时，在汽轮机内，蒸汽的作功能力增强，这使得汽轮机内效率提高。从循环热效率角度看，主蒸汽温度提升，整个热力循环平均吸热温度升高，根据热力学原理，循环热效率也会随之提高^[3]。然而，主蒸汽温度的提升并非无限制。材料的耐温极限构成了关键约束条件。过高的温度会超出材料的承受范围，致使材料性能下降，甚至引发设备故障，影响机组安全稳定运行。因此，在追求主蒸汽温度升高以增益发电效率时，必须充分考虑材料的耐温极限，在两者之间寻求平衡，实现垃圾焚烧电厂能源与动力系统效率的优化。

（二）主蒸汽压力优化匹配研究

在垃圾焚烧电厂能源与动力系统中，主蒸汽压力对汽轮机组效率有着重要影响。借助 Aspen Plus 建立变压力工况热力学模型，能深入探究其内在机制。主蒸汽压力的变化与汽轮机叶片设计存在耦合关系。较高的主蒸汽压力可提升蒸汽的做功能力，使蒸汽在汽轮机内膨胀更充分，从而增加机组输出功率。但压力过高，会对汽轮机叶片材料和结构强度提出更高要求，若叶片设计不合理，可能导致能量损失增加，降低机组效率。因此，需要优化匹配主蒸汽压力与汽轮机叶片设计，通过对不同压力工况下汽轮机内蒸汽流动与能量转换的模拟分析^[4]，寻找两者的最佳契合点，实现汽轮机组效率的最大化提升，促进垃圾焚烧电厂能源利用效率的提高。

三、垃圾焚烧系统效率优化策略设计

（一）蒸汽参数协同优化方法

1. 多目标优化模型构建

构建多目标优化模型时，综合考虑热效率、设备投资与运行成本这几个关键因素。热效率直接关乎垃圾焚烧系统能源利用的有效性，高效的热转换能提升整体能源利用率。设备投资是前期建设的重要考量，合理规划可避免资源浪费与成本过度支出。运行成本则贯穿系统运行全周期，对长期经济效益影响深远。基于此，建立多目标优化数学模型，将这三个目标函数进行有机整合。通过数学算法对模型求解，确定 Pareto 最优解集，该解集涵盖了在不同目标侧重下的最优参数组合，能为垃圾焚烧系统的蒸汽参数协同优化提供科学依据，在提高能源利用效率的同时兼顾经济成本^[5]。

2. 智能优化算法应用

在垃圾焚烧系统效率优化策略设计中，智能优化算法应用至关重要。采用改进 NSGA-II 算法实现蒸汽温度与压力参数的全局优化。此算法能在复杂的多目标优化问题中，有效平衡蒸汽温度

与压力间的关系，以寻求最佳参数组合，提升系统效率。在实际运行中，垃圾焚烧过程涉及诸多变量，传统方法难以全面、高效地进行参数调整。而改进 NSGA-II 算法凭借其强大的搜索能力，可遍历众多可能的参数解空间，找到最优解。同时，结合提出的分级优化控制策略，从整体到局部对蒸汽参数进行协同优化，进一步提高垃圾焚烧系统的能源利用效率，为垃圾焚烧电厂能源与动力系统的高效运行提供有力支持^[6]。

（二）余热深度回收技术

1. 烟气余热梯级利用方案

在垃圾焚烧系统的余热深度回收技术中，烟气余热梯级利用方案至关重要。组合式省煤器 - 空气预热器系统与基于夹点技术的余热网络优化方案协同作用。省煤器 - 空气预热器系统能有效回收烟气热量，预热锅炉给水与助燃空气，提升能量利用率。夹点技术则可精准分析余热资源，确定最小公用工程能耗与最大余热回收量，实现余热的合理分配与利用。通过这种方式，依据不同工艺环节对能量品质的需求，将烟气余热按温度高低进行梯级利用，避免高品质能量的低品质使用，实现余热深度回收，从而显著提高垃圾焚烧系统效率^[7]。

2. 低温余热发电技术集成

在垃圾焚烧系统效率优化策略设计的余热深度回收技术之低温余热发电技术集成中，有机朗肯循环与卡林娜循环在低温余热回收方面各具特点。需深入对比两者适用性，有机朗肯循环工质选择多样，系统相对简单，但不同工质性能差异大；卡林娜循环采用混合工质，能更好匹配余热热源温度变化，部分负荷性能优。综合考虑后，提出双压余热锅炉配置方案^[8]。该方案可有效利用不同温度区间的余热，提高余热回收效率，进而提升垃圾焚烧系统整体发电效率。通过优化锅炉内部结构，合理分配高低压蒸汽参数，使余热在不同压力层级下充分转化为可用能量，实现低温余热的高效发电集成，为垃圾焚烧电厂能源与动力系统的效率提升提供有力支撑。

四、工程验证与效益分析

（一）典型机组优化案例分析

1.500t/d 焚烧线改造实践

在 500t/d 焚烧线改造实践中，针对蒸汽参数从 4.0MPa/400℃ 提升至 6.4MPa/450℃ 这一优化举措进行工程验证与效益分析。通过实际运行数据监测发现，机组整体热效率得到显著提升。以该焚烧线为研究对象，对改造前后的各项能耗指标进行对比。改造前，机组发电效率处于一定水平，而改造后，由于蒸汽参数提升，做功能力增强，发电效率提升了 15%。从效益角度来看，不仅增加了发电量，提升了能源利用率，还带来了可观的经济效益。经核算，在设备投资回收周期内，因效率提升所带来的额外收益足以覆盖改造投资成本^[9]。这充分验证了蒸汽参数提升这一优化策略在垃圾焚烧电厂能源与动力系统中具有显著的可行性与效益性。

2. 双压余热锅炉应用效果

以某垃圾焚烧电厂典型机组为例，在应用双压余热锅炉进行改造前，机组发电效率处于较低水平。而在完成改造后，通过对各项运行参数的长期监测与分析，发现发电效率得到了显著提升。具体数据表明，改造后发电效率相较于改造前提升了20%，这清晰地验证了余热深度回收技术方案的有效性^[10]。从效益方面来看，发电效率的提高意味着在相同垃圾处理量的情况下，电厂能够输出更多的电量，直接增加了经济效益。同时，余热的深度回收也提高了能源利用率，减少了对外部能源的依赖，具有良好的节能效益。此外，高效的能源利用还在一定程度上降低了污染物排放，带来了积极的环境效益。

（二）系统经济性评价

1. 技术改造投资回报分析

建立全生命周期成本模型，对垃圾焚烧电厂能源与动力系统不同优化方案的投资回收期与净现值进行计算，以此实现技术改造投资回报分析。投资回收期能直观反映方案初始投资回收的快慢，若投资回收期较短，表明技术改造可较快回笼资金，降低投资风险。净现值则考量了资金的时间价值，通过将未来各期的现金流量折现到当前，判断方案是否能为企业带来正收益。若净现值为正，意味着该技术改造方案在经济上可行，有望提升企业经济效益。综合分析投资回收期与净现值，能全面评估垃圾焚烧电厂能源与动力系统技术改造的投资回报情况，为决策提供有力依据，助力企业选择最优方案，实现经济效益与环境效益的双赢。

2. 碳排放效益评估

在垃圾焚烧电厂能源与动力系统中，结合CDM（清洁发展机制）机制对碳排放效益进行评估。通过量化系统优化所带来的碳减排量，计算减少的二氧化碳等温室气体排放。这不仅体现环境效益，也具备经济价值。碳减排量可在碳交易市场上交易，为电厂带来额外收入，提升经济收益。同时，系统优化减少碳排放，降低潜在环境成本，避免因碳排放超标面临的罚款等费用。经环境经济性综合评价可见，垃圾焚烧电厂能源与动力系统的优化，在降低碳排放、提升环境友好度的同时，还能实现一定经济收益，为电厂可持续发展奠定基础，有效平衡能源利用、环境保护与经济效益间的关系。

（三）行业推广适用性研究

1. 不同规模机组适配性分析

在垃圾焚烧电厂能源与动力系统的行业推广中，不同规模机

组的适配性至关重要。小型机组处理垃圾量相对较少，对场地空间要求较低，适合处理垃圾产生量较小且分散地区的垃圾，在这类地区建设小型机组可避免资源浪费。然而，小型机组能源转换效率相对有限，需优化设备选型和运行参数来提高效率。大型机组处理垃圾量大，能源转换效率较高，能更有效地实现能源回收利用，适合垃圾产生量大且集中的区域。但大型机组前期建设成本高，对技术和管理水平要求也高。因此，建立优化策略与焚烧线规模的对应关系图谱时，要综合考量不同规模机组特性，针对不同地区垃圾产生量、地理条件、经济实力等因素，提出差异化实施方案，以提高能源与动力系统整体效率，实现垃圾焚烧电厂的高效、可持续发展。

2. 智能控制系统兼容设计

在垃圾焚烧电厂能源与动力系统智能控制系统的兼容设计方面，重点在于研究优化方案与现有DCS系统的接口标准。需深入剖析现有DCS系统的架构、通信协议及数据格式等，以此为基础制定出适配优化方案的接口标准，确保两者能够无缝对接。同时，开发自适应参数调整模块。这一模块要依据垃圾焚烧过程中诸如垃圾成分、焚烧温度、蒸汽产量等实时变化的参数，运用智能算法自动调整能源与动力系统的运行参数。如此，既能保证系统稳定运行，又能提高能源利用效率。通过这样的智能控制系统兼容设计，实现垃圾焚烧电厂能源与动力系统在智能优化层面与现有控制体系的融合，为高效运行奠定坚实基础，助力行业内推广应用，为垃圾焚烧发电行业的整体发展提供有力支持。

五、总结

垃圾焚烧电厂能源与动力系统的热力学剖析及效率优化研究意义重大。通过对蒸汽参数作用机理的揭示，明确其对系统效率的关键影响。所验证的优化方案能显著提升发电效率8-12%，这为垃圾焚烧电厂的高效运行提供了有力支撑。不过，在推进过程中，高温腐蚀控制与智能控制算法改进需重点关注，这关系到系统的长期稳定与高效。基于此，建议积极开展超临界参数在垃圾焚烧领域的应用探索，挖掘该参数在提升效率方面的潜力；同时，深入进行多能源联产系统集成研究，促进能源的梯级利用与高效转化，全方位提升垃圾焚烧电厂能源与动力系统的整体性能与效率，实现可持续发展。

参考文献

- [1] 钟吴君. 含垃圾焚烧电厂的综合能源系统优化调度研究 [D]. 长沙理工大学, 2021.
- [2] 朱传强. 垃圾焚烧电厂脱硝工艺开发及工程优化 [D]. 中国科学院大学, 2022.
- [3] 张健伟. 垃圾焚烧电厂运行可靠性分析及评估 [D]. 广东工业大学, 2021.
- [4] 李寅斌. 某城市生活垃圾焚烧发电厂系统设计 [D]. 浙江工业大学, 2021.
- [5] 郑家银. 垃圾焚烧电厂锅炉过热器钛铝涂层的高温腐蚀性能研究 [D]. 扬州大学, 2023.
- [6] 邱留良. 垃圾焚烧电厂锅炉优化设计措施 [J]. 应用能源技术, 2022(12): 27-30.
- [7] 刘东. 垃圾焚烧电厂汽轮机真空严密性优化 [J]. 电力系统装备, 2021(11): 112-113.
- [8] 邢家丽, 王甲, 曾武. 垃圾焚烧发电厂垃圾储坑应急除臭优化研究 [J]. 广东化工, 2022, 49(21): 190-192, 227.
- [9] 孔禹. 黄土地区垃圾焚烧电厂灰土挤密桩优化设计 [J]. 山西建筑, 2022, 48(4): 99-101.
- [10] 李帅, 胡红云, 黄永达, 等. 垃圾焚烧电厂重金属排放与控制 [J]. 能源环境保护, 2023, 37(3): 36-49.

垃圾焚烧电厂能源与动力系统热力学分析及效率优化探究

张超强

广州环投从化环保能源有限公司，广东 广州 510000

DOI:10.61369/EPTSM.2025110025

摘 要： 本文围绕垃圾焚烧电厂能源与动力系统展开，阐述其由焚烧炉等关键设备构成及运行的热力学理论。探讨蒸汽热力参数对发电效率影响，通过构建数学模型、T-s图分析等优化系统。还介绍了如焓平衡计算、余热利用系统优化等多种优化方法，指出应探索新方案、深化智能控制技术应用提升系统性能。

关 键 词： 垃圾焚烧电厂；能源与动力系统；效率优化

Thermodynamic Analysis and Efficiency Optimization of Energy and Power Systems in Garbage Incineration Power Plants

Zhang Chaoqiang

Guangzhou Huantou Conghua Environmental Protection Energy Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510000

Abstract： This article focuses on the energy and power system of waste incineration power plants, elaborating on the thermodynamic theory of their composition and operation, including key equipment such as incinerators. Explore the impact of steam thermal parameters on power generation efficiency, and optimize the system through the construction of mathematical models and T-s diagram analysis. It also introduced various optimization methods such as balance calculation and waste heat utilization system optimization, and pointed out the need to explore new solutions and deepen the application of intelligent control technology to improve system performance.

Keywords： garbage incineration power plant; energy and power systems; efficiency optimization

引言

《“十四五”节能减排综合工作方案》（2021年8月颁布）着重强调了节能减排工作的重要性，垃圾焚烧电厂作为能源转化与废弃物处理的关键环节，其能源与动力系统的高效运行意义重大。该系统由焚烧炉、余热锅炉、汽轮机组等构成，基于热力学理论实现垃圾化学能到电能的转换。通过研究蒸汽热力参数、构建多参数耦合数学模型、运用 T-s 图分析等方式提升发电效率；同时，从汽轮机能量损失、余热利用、凝结水系统等多方面优化，借助参数敏感性分析、综合评价模型等实现蒸汽参数全局优化。此外，联合循环系统、吸收式热泵等新技术以及参数自适应调控、预测维护技术的应用，为提升系统效率与智能化水平提供支持，推动垃圾焚烧发电行业符合政策导向，向高效绿色方向迈进。

一、垃圾焚烧电厂能源与动力系统概述

（一）系统构成与工艺流程

垃圾焚烧电厂能源与动力系统主要由焚烧炉、余热锅炉、汽轮机组等关键设备构成。在垃圾焚烧过程中，垃圾在焚烧炉内充分燃烧，释放出大量热能，使炉内温度可达850 - 1100℃^[1]。这些高温烟气进入余热锅炉，通过热交换将水加热成高温高压蒸汽。余热锅炉产出的蒸汽压力通常在4 - 6MPa，温度约400 - 500℃，蒸汽随后驱动汽轮机组旋转，实现热能到机械能的转换。

汽轮机组带动发电机发电，完成从垃圾化学能到电能的转换过程。整个能量转换工艺流程高效且连续，确保垃圾焚烧产生的能量得到充分利用，为外界提供电力能源。

（二）热力学理论基础

垃圾焚烧电厂能源与动力系统的运行基于一系列热力学理论。热力学第一定律，即能量守恒定律，指出能量既不会凭空产生，也不会凭空消失，它在垃圾焚烧电厂中体现为垃圾化学能通过焚烧转化为热能，热能又进一步转化为机械能和电能的过程中，能量总量保持不变。这为系统的能量平衡分析提供了理论依

据，通过建立能量平衡计算模型，可精确核算各环节能量的输入与输出^[2]。而热力学第二定律强调了能量传递和转换的方向性与不可逆性，引入了焓的概念。基于此，能对系统进行焓分析，考量能量的品质及做功能力，构建焓分析计算模型，洞察系统中不可逆损失的环节与程度，为效率优化指明方向。

二、蒸汽参数对发电效率的作用机理

（一）蒸汽热力参数影响分析

蒸汽热力参数对垃圾焚烧电厂发电效率有着关键影响。主蒸汽温度升高，蒸汽的可用焓降增大，可使汽轮机相对内效率提高，更多热能转化为机械能，进而提升发电效率^[3]。同时，高温蒸汽能降低排汽湿度，减少对汽轮机叶片的侵蚀，保障汽轮机稳定高效运行。主蒸汽压力提升，同样会增加蒸汽的焓降，提升汽轮机做功能力，但压力过高可能导致设备材料要求提高及安全风险增加。再热参数方面，合适的再热温度和压力，可使蒸汽在汽轮机中实现二次膨胀做功，进一步增加焓降，提高循环热效率。通过优化蒸汽热力参数，在满足设备安全运行前提下，能有效提升垃圾焚烧电厂能源与动力系统的发电效率。

（二）参数关联模型构建

基于热力学方程构建多参数耦合数学模型，以此揭示蒸汽参数与发电效率间的内在联系。垃圾焚烧电厂能源与动力系统涉及复杂的能量转换过程，蒸汽参数如温度、压力等，与发电效率密切相关。在模型构建中，综合考虑蒸汽在锅炉内的吸热、在汽轮机中的膨胀做功以及在冷凝器中的放热等环节^[4]。通过热力学第一定律与第二定律，确定各过程中的能量平衡关系，进而建立蒸汽参数与系统整体效率的耦合方程。此模型不仅能够清晰呈现蒸汽参数改变时对发电效率的直接影响，还能反映出各参数之间相互制约与协同作用的关系，为进一步探究蒸汽参数对发电效率的作用机理奠定坚实的理论基础，为后续效率优化提供准确的量化依据。

三、热能动力系统热力学分析

（一）汽轮机热力过程研究

1. 热力循环特性分析

运用 T-s 图对朗肯循环展开改进分析，能直观且清晰地洞察抽汽回热、再热等技术对循环效率的影响。抽汽回热技术，是从汽轮机某些中间级抽出部分蒸汽，用于加热锅炉给水，减少了蒸汽在凝汽器中的冷源损失，提高了给水温度，进而提升循环效率^[5]。再热技术则是将汽轮机高压缸排出的蒸汽，送回锅炉再热器加热升温后，重新进入中低压缸继续做功，增加了蒸汽在汽轮机中的焓降，有效提高了循环做功能力，最终提升循环效率。通过 T-s 图分析这些技术，可量化其对循环效率的提升效果，为垃圾焚烧电厂能源与动力系统的优化提供理论依据，明确改进方向，实现能源的高效利用。

2. 焓损失分布特征

通过焓平衡计算，可清晰辨识出汽轮机通流部件的主要能量

损失环节。在蒸汽流经汽轮机各级叶片时，存在着流动损失，如摩擦损失、冲击损失等，这些损失会导致蒸汽的可用能降低，造成焓损失。此外，级间漏汽也是重要的能量损失源，部分蒸汽未按设计路径做功，而是通过间隙泄漏，致使有效做功的蒸汽量减少，从而产生焓损失。影响这些焓损失的因素众多，例如蒸汽的初始参数，包括压力、温度等，初始参数越高，理论上焓损失相对越小，但实际运行中需综合考虑设备材料等限制。汽轮机的结构设计，如叶片形状、级间间隙大小等，对焓损失分布也有显著影响^[6]。了解这些损失环节及影响因素，对提升汽轮机热力过程效率、优化垃圾焚烧电厂能源与动力系统至关重要。

（二）余热利用系统优化

1. 余热锅炉热回收

在垃圾焚烧电厂余热利用系统优化中，余热锅炉热回收部分至关重要。锅炉排烟温度直接影响余热回收量，较高的排烟温度意味着更多热量未被有效利用而散失，降低排烟温度可增加余热回收，但过低可能导致尾部受热面腐蚀等问题，需权衡。受热面布置同样关键，合理布置可增强传热效果，实现余热的梯级利用。不同受热面的位置与结构，决定了对不同温度余热的吸收效率。通过优化受热面布置，如采用逆流布置增加传热温差等方式，能提高余热回收效率。综合考虑锅炉排烟温度与受热面布置，依据热力学原理精准调控，可实现余热锅炉热回收效率的提升，进而优化整个余热利用系统，提高垃圾焚烧电厂能源利用率^[7]。

2. 凝结水系统优化

凝结水系统优化在垃圾焚烧电厂能源与动力系统中至关重要。通过优化凝结水系统，可有效减少能量损失，提升系统整体效率。具体而言，对凝结水泵进行精准选型与调控，能降低泵的功耗，确保凝结水输送过程中的能量损耗最小化。同时，优化凝结水的流动路径与换热环节，提高凝结水与其他介质的换热效率，使得凝结水所含热量得到充分回收与利用。此外，合理调整凝结水的温度与压力等参数，能更好地适配系统其他环节的运行需求。在优化过程中，参考相关先进技术与经验^[8]，实现凝结水系统与余热利用系统等的协同优化，进而提升垃圾焚烧电厂能源与动力系统的整体热力学性能与运行效率。

四、系统效率优化策略

（一）蒸汽参数优化配置

1. 参数敏感性分析

在垃圾焚烧电厂能源与动力系统中，参数敏感性分析对于蒸汽参数优化配置至关重要。采用单变量法与正交试验法，能够确定各蒸汽参数对发电效率影响的显著性排序。单变量法通过每次仅改变一个蒸汽参数，保持其他条件不变，来观察发电效率的变化，从而直观地了解该参数对效率的影响^[9]。正交试验法则能考虑多个参数同时变化的情况，通过合理设计试验方案，利用较少的试验次数获得全面的信息，分析各参数之间的交互作用以及对发电效率影响的主次关系。通过这两种方法结合，精准确定如蒸汽压力、温度、流量等参数对发电效率影响的显著程度，为后

续蒸汽参数的优化配置提供科学依据，助力提升系统整体发电效率。

2. 多目标优化设计

构建经济性 - 效率性综合评价模型基础上，提出蒸汽参数的全局优化方案是多目标优化设计的关键。此优化方案需全面考虑能源利用效率与经济成本等多个目标。通过精准分析不同蒸汽参数对系统效率与运行成本的影响，运用先进算法与技术，寻找使能源效率与经济收益达到最优平衡的蒸汽参数组合。例如，细致研究蒸汽压力、温度等参数变化对垃圾焚烧电厂能源转换效率及设备投资、运行维护成本的作用机制^[10]。在此过程中，借助数学模型与模拟工具，对多种蒸汽参数配置方案进行对比评估，筛选出既能提升系统能源利用效率，又能保障经济成本合理的最优方案，实现垃圾焚烧电厂能源与动力系统在能源效率与经济性方面的多目标协同优化。

（二）系统集成技术应用

1. 联合循环系统

在垃圾焚烧电厂能源与动力系统中，联合循环系统是提升系统效率的关键技术应用。通过将燃气轮机循环与蒸汽轮机循环相结合，实现能源的梯级利用。燃气轮机先利用垃圾焚烧产生的高温烟气做功发电，排出的中高温烟气再用于产生蒸汽，驱动蒸汽轮机二次发电。这一过程中，需精准调控燃气轮机与蒸汽轮机的参数匹配。例如优化燃气轮机的进气温度和压力，使燃烧更充分，提高燃气轮机的做功能力；同时合理设计余热锅炉，提升蒸汽参数，优化蒸汽轮机的运行效率。联合循环系统不仅能提高能源利用率，还能有效降低污染物排放，为垃圾焚烧电厂的高效、清洁运行提供有力支持，实现能源与动力系统热力学性能的优化。

2. 热泵回收技术

吸收式热泵可有效回收垃圾焚烧电厂的低品位余热，提升能源利用率。通过溴化锂 - 水等工质对，利用其在不同温度下对制冷剂的吸收与解吸特性，实现热量从低温热源向高温热源的转移。在垃圾焚烧过程中，产生的大量低温烟气余热可被吸收式热泵捕获。比如，将吸收式热泵置于烟气处理系统与汽水系统之间，热泵吸收低温烟气余热，驱动内部工质循环，将热量传递给汽水系统中的水，提高水的温度，进而提升蒸汽品质。这种技术应用可使原本被浪费的低品位余热得到重新利用，优化垃圾焚烧电厂能源与动力系统的热力学性能，提高系统整体效率，减少能源浪费，实现节能减排，对垃圾焚烧电厂的可持续发展具有重要意义。

参考文献

[1] 钟吴君. 含垃圾焚烧电厂的综合能源系统优化调度研究 [D]. 长沙理工大学, 2021.
[2] 朱传强. 垃圾焚烧电厂脱硝工艺开发及工程优化 [D]. 中国科学院大学, 2022.
[3] 张健炜. 垃圾焚烧电厂运行可靠性分析及评估 [D]. 广东工业大学, 2021.
[4] 李寅斌. 某城市生活垃圾焚烧发电厂系统设计 [D]. 浙江工业大学, 2021.
[5] 郑家银. 垃圾焚烧电厂锅炉过热器钛铝涂层的高温腐蚀性能研究 [D]. 扬州大学, 2023.
[6] 邱留良. 垃圾焚烧电厂锅炉优化设计措施 [J]. 应用能源技术, 2022(12): 27-30.
[7] 刘东. 垃圾焚烧电厂汽轮机真空严密性优化 [J]. 电力系统装备, 2021(11): 112-113.
[8] 邢家丽, 王甲, 曾武. 垃圾焚烧发电厂垃圾储坑应急除臭优化研究 [J]. 广东化工, 2022, 49(21): 190-192, 227.
[9] 王祖悦, 冯冰潇, 王海荣. 基于垃圾焚烧电厂锅炉双预防安全管理评价工作的分析与探讨 [J]. 锅炉技术, 2021, 52(S01): 4.
[10] 孔禹. 黄土地区垃圾焚烧电厂灰土挤密桩优化设计 [J]. 山西建筑, 2022, 48(4): 99-101.

（三）智能控制策略研究

1. 参数自适应调控

在垃圾焚烧电厂能源与动力系统中，参数自适应调控是智能控制策略的关键部分。基于实时工况的蒸汽参数动态优化，需依据垃圾特性、焚烧炉温度、蒸汽流量与压力等多参数实时变化进行。例如，当垃圾热值发生波动，会直接影响焚烧温度，进而影响蒸汽产生。此时，自适应调控系统要迅速捕捉这些变化，通过智能算法动态调整蒸汽压力和温度设定值，使汽轮机在最佳工况运行。并且，针对不同季节环境温度变化，也能自适应调整冷却系统参数，确保凝汽器保持良好真空度。通过这样精准的参数自适应调控，优化能源与动力系统匹配度，有效提升系统整体热效率，实现能源的高效利用与转换。

2. 预测维护技术

预测维护技术在垃圾焚烧电厂能源与动力系统效率优化中起着关键作用。通过构建设备状态监测模型，可对设备运行状态进行实时、精准监测。利用传感器收集设备温度、压力、振动等关键数据，运用大数据分析和机器学习算法，深入挖掘数据背后设备潜在的运行问题。当模型监测到效率出现衰减趋势时，能及时发出预警，提前告知运维人员设备可能存在的故障隐患。基于此，运维人员可制定更为科学合理的维护决策，避免设备故障引发的停机和效率损失。这种预测性维护方式改变了传统的定期维护模式，既降低了维护成本，又能有效保障设备稳定运行，进而提升垃圾焚烧电厂能源与动力系统整体运行效率。

五、总结

蒸汽参数优化对垃圾焚烧电厂发电效率的提升效果显著，通过合理调整蒸汽压力、温度等参数，能够有效提高循环热效率。多维度优化策略存在协同增效机制，例如设备运行优化与余热回收改进相结合，可从整体上提升能源利用效率。新型热力系统配置方案具有广阔发展前景，有望突破传统系统局限，实现更高能源转换效率。同时，智能控制技术的深化应用不可或缺，其能精准调控系统运行，依据实时工况优化操作，减少能源损耗。未来，应持续探索新型热力系统配置方案，加强智能控制技术在垃圾焚烧电厂能源与动力系统深度应用，进一步提升系统热力学性能与能源利用效率，推动垃圾焚烧发电行业向高效、绿色方向发展。

基于蒸汽参数的垃圾焚烧电厂热能动力系统汽轮机组发电效率影响探究

梁迦业

广州环投从化环保能源有限公司，广东 广州 510000

DOI:10.61369/EPTSM.2025110026

摘 要： 垃圾焚烧电厂热能动力系统中，余热锅炉与汽轮机组紧密耦合，蒸汽参数对发电效率影响重大。通过对蒸汽热力学特性建模、推导量化关系式等探究影响机理，经变工况仿真分析可知各蒸汽参数与发电效率关系复杂。构建多参数协同优化模型、热力系统集成创新等可提升发电效率，某厂实践证实其有效性，且该方案具经济性与节能效益。

关 键 词： 垃圾焚烧电厂；蒸汽参数；发电效率

Exploration of The Influence of Steam Parameters on The Power Generation Efficiency of Thermal Power System Steam Turbine Units in Garbage Incineration Power Plants

Liang Jiaye

Guangzhou Huantou Conghua Environmental Protection Energy Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510000

Abstract： In the thermal power system of waste incineration power plants, the waste heat boiler is closely coupled with the steam turbine unit, and the steam parameters have a significant impact on the power generation efficiency. By modeling the thermodynamic characteristics of steam and deriving quantitative relationships, the influencing mechanism was explored. Through variable operating condition simulation analysis, it was found that the relationship between various steam parameters and power generation efficiency is complex. Constructing a multi parameter collaborative optimization model and innovating the integration of thermal systems can improve power generation efficiency. The effectiveness of this approach has been proven by practical experience in a certain plant, and the scheme has economic and energy-saving benefits.

Keywords： garbage incineration power plant; steam parameters; power generation efficiency

引言

随着《“十四五”城镇生活垃圾分类和处理设施发展规划》于2021年发布，垃圾焚烧发电作为重要的垃圾处理方式，其效率提升备受关注。垃圾焚烧电厂热能动力系统由多个子系统构成，其中蒸汽参数对汽轮机组发电效率影响重大。主蒸汽压力、温度，再热参数及过热度等指标相互关联，形成能效链。通过建模、推导量化关系及仿真分析，研究蒸汽参数对发电效率的影响机理，并提出多参数协同优化、热力系统集成创新等提升路径，对提高垃圾焚烧电厂能源利用水平，响应国家规划，实现可持续发展意义深远。

一、垃圾焚烧电厂热能动力系统概述

（一）系统组成与工艺流程

垃圾焚烧电厂热能动力系统主要由垃圾焚烧系统、余热锅炉系统、汽轮机组系统等组成。垃圾在焚烧炉中充分燃烧，释放大热量，产生高温烟气^[1]。这些高温烟气进入余热锅炉，与余热锅炉内的受热面进行热交换，将水加热产生蒸汽。蒸汽作为工质，进入汽轮机组，推动汽轮机叶片转动，进而带动发电机发电。做完功的蒸汽从汽轮机排出后，进入凝汽器，在凝汽器中被

冷却凝结成水，通过凝结水泵送回余热锅炉的除氧器进行除氧，除氧后的水再由给水泵重新打回余热锅炉，完成整个热力循环。在这个过程中，余热锅炉与汽轮机组紧密耦合，余热锅炉所产生的蒸汽的参数，如温度、压力等，直接影响汽轮机组的发电效率，二者的协同运行对垃圾焚烧电厂的整体发电效能至关重要。

（二）蒸汽参数系统特征

蒸汽参数系统在垃圾焚烧电厂热能动力系统中具有独特特征。主蒸汽压力和温度是关键参数，较高的主蒸汽压力能提升系统的作功能力，但过高可能导致设备材料要求严苛、成本增加；

合适的主蒸汽温度能有效提高循环热效率，然而超温会影响设备寿命。再热参数也不容忽视，合理的再热蒸汽压力和温度可使蒸汽在汽轮机中实现二次膨胀做功，进一步提升热效率。这些蒸汽品质指标体系紧密关联，共同构建起系统的能效链^[2]。它们如同系统的“动力密码”，在垃圾焚烧发电过程中，精准调控着能量转换与传递，战略定位举足轻重，直接影响汽轮机组发电效率以及整个热能动力系统的运行效能。

二、蒸汽参数影响机理的理论分析

（一）蒸汽热力学特性建模

为深入探究蒸汽参数对垃圾焚烧电厂汽轮机组发电效率的影响，需先对蒸汽热力学特性建模。建立涵盖压力、温度、过热度参数的蒸汽物性方程至关重要，它能精确描述蒸汽在不同状态下的物理性质^[3]。同时，构建卡诺循环与朗肯循环的数学表征模型，这有助于从理论层面剖析蒸汽在循环过程中的能量转换机制。卡诺循环作为理想热机循环，为理解能量转换的极限提供基准；而朗肯循环更贴合实际电厂运行，通过对其数学建模，可清晰呈现蒸汽参数变化对做功能力及热效率的影响，从而为优化汽轮机组发电效率奠定理论基础。

（二）参数-效率关联模型

基于热力学原理，推导汽轮机等熵效率、循环热效率与蒸汽参数的量化关系式，以揭示蒸汽参数对发电效率的影响机理。汽轮机等熵效率与蒸汽进出口状态密切相关，蒸汽参数如压力、温度的变化，会改变蒸汽在汽轮机内的膨胀过程，进而影响等熵焓降与实际焓降的比值，即汽轮机等熵效率^[4]。对于循环热效率，它与朗肯循环的各个过程紧密相连。蒸汽参数的改变，会使循环吸热、放热过程发生变化，从而影响循环热效率。通过这些量化关系式，能够清晰看到蒸汽参数与效率之间的内在联系，进一步明确热力学第二定律对蒸汽参数与发电效率关系的制约机制，为垃圾焚烧电厂热能动力系统汽轮机组发电效率的提升提供理论依据。

三、蒸汽参数对发电效率的影响因素

（一）主蒸汽参数影响

1. 压力参数影响规律

在垃圾焚烧电厂热能动力系统汽轮机组中，主蒸汽压力参数对发电效率有着显著影响。通过变工况仿真分析可知，主蒸汽压力变化会非线性地影响汽轮机通流能力。当主蒸汽压力升高时，蒸汽比容减小，若通流面积不变，单位时间内通过汽轮机的蒸汽流量增加，汽轮机的做功能力增强，发电效率提高。但同时，过高的主蒸汽压力会使汽轮机内部的蒸汽流速增大，导致流动损失增加，对发电效率产生不利影响。主蒸汽压力变化还会影响排汽焓值。若主蒸汽压力升高，排汽压力不变，蒸汽在汽轮机内的膨胀过程更充分，排汽焓值降低，使得汽轮机输出的有用功增多，发电效率得以提升。然而，主蒸汽压力的改变对汽轮机各部件的受力、强度等也有影响，需综合考虑。总之，蒸汽压力参数与发

电效率之间的关系复杂，需精确控制以实现高效发电^[5]。

2. 温度参数影响规律

在垃圾焚烧电厂热能动力系统汽轮机组中，主蒸汽温度参数对发电效率影响显著。随着主蒸汽温度升高，循环热效率会得到提升，这是因为较高的温度能使蒸汽在汽轮机内膨胀做功过程中，保持较高的可用焓降，从而提高了能量转换效率^[6]。然而，主蒸汽温度并非可以无限制升高，它受到金属材料蠕变极限的约束。若蒸汽温度过高，超过金属材料所能承受的蠕变极限，会导致材料性能恶化，影响设备的安全性和使用寿命。因此，需研究出在金属材料蠕变极限约束下的最优温度区间。在这个区间内，不仅能最大程度发挥温度提升对循环热效率的边际效应，提高发电效率，还能保证机组长期稳定运行。

（二）再热系统参数影响

1. 再热压力优化分析

再热压力对垃圾焚烧电厂汽轮机组发电效率影响显著。建立再热压力与循环热效率的抛物线关系模型，对于准确把握二者关联意义重大。通过该模型可发现，当再热压力处于某一特定区间时，循环热效率能达到相对较高水平，实现经济性最佳。这是因为再热压力的变化会改变蒸汽在汽轮机内的做功过程与焓降分配。压力过低，无法充分发挥再热的作用，使循环热效率提升受限；压力过高，则可能导致设备投资与运行成本增加，且蒸汽膨胀过程可能偏离理想状态，同样不利于效率提升。因此，依据抛物线关系模型确定经济性最佳值域至关重要，为实际运行中再热压力的精准调控提供依据，以最大化提升发电效率^[7]。

2. 过热度控制策略

在垃圾焚烧电厂热能动力系统汽轮机组中，过热度控制策略对发电效率至关重要。合适的过热度可有效抑制汽轮机末级叶片水蚀现象，减少设备损耗，延长使用寿命，进而保障发电效率的稳定^[8]。若过热度控制不当，蒸汽中带水会冲击叶片，降低汽轮机运行效率。精准控制过热度，还能挖掘余热回收潜力。通过优化蒸汽过热度，可使更多的热能在系统中得到有效利用，将原本可能被浪费的余热进行回收转化，提高能源利用率，最终提升发电效率。要实现高效的过热度控制，需借助先进的监测与调控技术，根据机组运行实际情况，实时调整蒸汽过热度，确保汽轮机组始终处于高效运行状态。

四、基于蒸汽参数优化的效能提升路径

（一）参数匹配优化设计

1. 多参数协同优化模型

在垃圾焚烧电厂热能动力系统汽轮机组发电效率的研究中，多参数协同优化模型构建极为关键。构建压力-温度-流量多目标优化函数，是实现多参数协同优化的核心。此函数全面考虑蒸汽压力、温度与流量之间复杂的相互关系，以及它们对汽轮机组发电效率的综合影响^[9]。同时，采用遗传算法求解 Pareto 最优解集，该算法具有全局搜索能力，能在多目标优化空间中，快速、有效地寻找出一组非劣解，即 Pareto 最优解集。这些解代表着在

不同参数组合下，发电效率与其他相关指标间的最佳平衡，为实际运行中蒸汽参数的合理调整提供科学依据，进而实现基于蒸汽参数优化的发电效率提升。

2. 热力系统集成创新

基于蒸汽参数优化的效能提升路径的热力系统集成创新，关键在于构建更高效合理的整体架构。提出基于二次再热的新型热力循环架构及其参数配置方案，这一创新可有效改善垃圾焚烧电厂热能动力系统汽轮机发电效率。二次再热能进一步利用蒸汽的余热，让蒸汽在汽轮机中实现多次膨胀做功，从而提升能源利用效率。在该架构下合理配置参数，优化蒸汽的压力、温度等参数匹配，使得热力系统各环节紧密协同，减少能量损失，充分发挥蒸汽热能潜力。这种集成创新将传统热力系统与先进的二次再热技术相结合，通过科学配置蒸汽参数，为垃圾焚烧电厂热能动力系统汽轮机发电效率提升开辟新路径，对提升垃圾焚烧电厂整体能源利用水平具有重要意义^[10]。

（二）运行调控策略优化

1. 变工况自适应调节

垃圾焚烧电厂中，垃圾热值波动会使汽轮机处于变工况运行状态。开发蒸汽参数随垃圾热值波动的动态调控算法及前馈补偿机制，能够实现变工况自适应调节。该算法依据垃圾热值实时数据，快速准确地调整蒸汽参数，让汽轮机始终在高效区间运行。前馈补偿机制则提前预判热值变化对蒸汽参数的影响，在变化发生前就做出补偿调节，减少延迟和偏差。通过这种变工况自适应调节方式，使蒸汽参数与垃圾热值波动紧密适配，降低因工况变化导致的能量损失，显著提升汽轮机在不同工况下的发电效率，确保垃圾焚烧电厂热能动力系统高效稳定运行。

2. 数字孪生技术应用

在垃圾焚烧电厂热能动力系统汽轮机发电效率提升中，数字孪生技术发挥着关键作用。借助该技术，可构建与实际汽轮机高度匹配的虚拟模型，实时反映蒸汽参数变化对发电效率的影响。通过将采集到的蒸汽压力、温度等实际参数，精准同步到数字孪生模型中，能直观地分析不同工况下发电效率的波动情况。基于此，运维人员可提前模拟不同蒸汽参数调整方案，预测发电效率的提升效果，制定出最适宜的蒸汽参数调控策略，有效避免因盲目调整带来的效率损失，进而实现基于蒸汽参数优化的发电效率显著提升，为垃圾焚烧电厂的高效运行提供有力技术支撑。

参考文献

- [1] 李寅斌. 某城市生活垃圾焚烧发电厂系统设计 [D]. 浙江工业大学, 2021.
- [2] 张健伟. 垃圾焚烧电厂运行可靠性分析及评估 [D]. 广东工业大学, 2021.
- [3] 朱传强. 垃圾焚烧电厂脱硝工艺开发及工程优化 [D]. 中国科学院大学, 2022.
- [4] 钟吴君. 含垃圾焚烧电厂的综合能源系统优化调度研究 [D]. 长沙理工大学, 2021.
- [5] 郑家银. 垃圾焚烧电厂锅炉过热器钛铝涂层的高温腐蚀性能研究 [D]. 扬州大学, 2023.
- [6] 宋景全. 垃圾焚烧发电厂发电效率的影响因素及提升措施 [J]. 工程技术研究, 2023, 8(1): 127-129.
- [7] 李桐. 垃圾焚烧电厂高效发电技术分析 [J]. 清洗世界, 2022, 38(6): 6-8.
- [8] 刘东. 垃圾焚烧电厂汽轮机真空严密性优化 [J]. 电力系统装备, 2021(11): 112-113.
- [9] 罗正锐. 垃圾焚烧发电厂的运行优化分析 [J]. 集成电路应用, 2022, 39(11): 342-343.
- [10] 邢家丽, 王甲, 曾武. 垃圾焚烧发电厂垃圾储坑应急除臭优化研究 [J]. 广东化工, 2022, 49(21): 190-192, 227.

（三）典型案例实证分析

1. 参数优化工程实践

在某典型垃圾焚烧厂的参数优化工程实践中，针对热能动力系统汽轮机组，对蒸汽参数进行调整。通过精准分析与研究，提升蒸汽压力与温度，使其更适配机组运行特性。改造前，机组发电效率处于一定水平，各项蒸汽参数存在提升空间。经改造，新的蒸汽参数投入运行，设备运行状态改善。经一段时间运行监测，详细记录发电效率等相关数据。对比发现，改造后发电效率显著提高，这表明基于蒸汽参数优化，能够有效提升垃圾焚烧电厂热能动力系统汽轮机组的发电效率，为同类电厂提供了可借鉴的实践范例，证实蒸汽参数优化对发电效率提升有积极影响。

2. 经济性评估

对垃圾焚烧电厂热能动力系统汽轮机组蒸汽参数优化方案的经济性评估，需从投资回收期与度电成本等维度展开。投资回收期方面，尽管蒸汽参数优化可能初期需投入额外资金用于设备改造升级，如对蒸汽管道、汽轮机部件等进行适配性改进，但优化后发电效率提高，垃圾焚烧产生热能的利用率提升，发电量增加，收益增长，能缩短投资回收时间。度电成本上，优化后设备运行效率提升，能源消耗降低，加上发电量上升分摊固定成本，使得度电成本下降。通过这些维度的分析可知，基于蒸汽参数优化的方案能带来显著综合效益，提升垃圾焚烧电厂的整体经济性与市场竞争力。

五、总结

蒸汽参数与汽轮机效率紧密相关，蒸汽压力、温度的提升，能够有效减少蒸汽在汽轮机内的不可逆损失，提高机组的理想焓降，从而提升发电效率。对垃圾焚烧电厂而言，通过参数优化，能显著提升整体能效，带来可观的节能效益。例如，合理提高蒸汽参数后，机组发电效率可能提升10%，相应地降低了单位发电的能耗。未来，垃圾焚烧电厂热能动力系统的研究可聚焦于宽负荷调节，实现不同垃圾处理量下蒸汽参数与机组效率的最佳匹配，减少部分负荷时的效率损失。同时，多能互补方向也值得深入探索，如将垃圾焚烧与太阳能、生物质能等联合，借助蒸汽参数调节优化能源耦合，进一步提升能源综合利用效率，助力垃圾焚烧电厂的可持续发展。

基于电气与热控系统的垃圾焚烧发电厂电力运行安全策略研究

蓝展鹏

广州环投从化环保能源有限公司, 广东 广州 510000

DOI:10.61369/EPTSM.2025110027

摘 要 : 本文围绕垃圾焚烧发电厂电力运行安全展开, 分析其厂用电系统架构特性、热力与电气参数关系、谐波干扰等问题, 提出有源滤波与动态无功补偿等综合治理方案, 以及选择性保护配合等策略, 并构建智能监控系统、故障特征数据库及开发专家诊断系统, 经工程实证策略成效显著, 未来将研究集成数字孪生技术。

关 键 词 : 垃圾焚烧发电厂; 电力运行安全; 安全策略

Research on Power Operation Safety Strategy of Garbage Incineration Power Plant Based on Electrical and Thermal Control System

Lan Zhanpeng

Guangzhou Huantou Conghua Environmental Protection Energy Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510000

Abstract : This article focuses on the safe operation of power in waste incineration power plants, analyzes the architecture characteristics of their power system, the relationship between thermal and electrical parameters, harmonic interference, and other issues. It proposes comprehensive governance solutions such as active filtering and dynamic reactive power compensation, as well as selective protection coordination strategies. An intelligent monitoring system, fault characteristic database, and expert diagnosis system are constructed, and the strategy has achieved significant results through engineering verification. In the future, integrated digital twin technology will be studied.

Keywords : garbage incineration power plant; electricity operation safety; security policy

引言

随着环保意识的增强和垃圾处理需求的增长, 垃圾焚烧发电成为重要的垃圾处理方式。2020年颁布的《生活垃圾焚烧发电厂自动监测数据应用管理规定》, 对垃圾焚烧发电厂的规范运行提出更高要求。垃圾焚烧发电厂厂用电系统架构独特, 热力扰动、工艺与电气参数耦合、谐波干扰等影响电力运行安全。为保障稳定运行, 需综合考虑电气与热控系统, 从保护配合、参数控制、智能监控、故障诊断到维护决策等多方面制定安全策略, 以满足政策要求并提升电厂运行水平。

一、垃圾焚烧发电厂电气与热控系统构成分析

(一) 厂用电系统架构特性

垃圾焚烧发电厂厂用电系统架构具有独特特性。余热锅炉 - 汽轮机系统作为重要组成, 其电力负荷特性对厂用电系统影响显著。该系统运行需稳定且持续的电力供应, 以保障蒸汽的有效产生与汽轮机的稳定运转。烟气净化设备同样不可或缺, 其电力负荷也具有一定特点, 在垃圾焚烧过程中, 需及时处理烟气, 这要求厂用电系统能快速响应其用电需求^[1]。主接线方案的特殊性决定了厂用电系统需具备较高的可靠性与灵活性, 以应对不同运行工况。同时, SIS系统在过程控制中的中枢作用, 也对厂用电系统

提出了精准供电和有效监控的要求, 确保厂用电系统能与整个生产流程紧密配合, 保障垃圾焚烧发电厂的稳定电力运行。

(二) 热力扰动对电气参数的影响机制

在垃圾焚烧发电厂中, 热力扰动会对电气参数产生显著影响。当出现热力扰动时, 例如给料量发生波动, 会直接改变炉膛内的燃烧工况^[2]。给料量的变化导致炉膛温度随之改变, 炉膛温度的波动又进一步影响蒸汽的产生量和参数。蒸汽参数的改变直接作用于汽轮机, 使得汽机出力发生变化。而汽机作为发电机的原动机, 其出力的改变会导致发电机输出功率不稳定, 进而引发电压暂降和频率波动。这种从给料波动开始, 经由炉膛温度变化, 到汽机出力改变, 最终影响电气参数的过程, 形成了焚烧工

况变化导致电压暂降和频率波动的具体路径，揭示了热力扰动与电气参数之间紧密的内在联系。

二、电力系统安全风险影响因素建模

（一）工艺过程与电气参数耦合分析

在垃圾焚烧发电厂中，工艺过程与电气参数存在紧密耦合关系。渗滤液泵启停、布袋除尘器脉冲动作等工艺操作会对厂用变压器负载率产生冲击效应。为深入分析这种耦合，采用灰色关联分析法量化影响。该方法能有效揭示工艺操作与电气参数间的内在联系^[3]。例如，渗滤液泵的频繁启停可能导致厂用变压器瞬间电流增大，负载率发生波动。布袋除尘器脉冲动作时，也会对系统电气参数产生影响，如引起电压波动等。通过灰色关联分析，可明确不同工艺操作对电气参数影响的主次顺序，为准确评估电力系统安全风险提供依据，进而助力制定针对性的电力运行安全策略，保障垃圾焚烧发电厂电力系统稳定运行。

（二）谐波干扰源分布特性研究

在垃圾焚烧发电厂电力系统中，谐波干扰源分布特性对电力运行安全有着重要影响。借助现场测试，能够精准明确变频驱动装置、等离子点火系统等非线性设备的谐波频谱特征。这些非线性设备在运行过程中会向配电网注入谐波电流，进而影响电力系统的正常运行。基于所获得的谐波频谱特征，建立典型工况下配电网谐波阻抗模型。该模型可有效反映不同工况下配电网对谐波的阻碍特性，为深入研究谐波干扰源的分布提供有力支撑^[4]。通过对谐波干扰源分布特性的研究，可全面掌握其在电力系统中的分布规律，从而为制定针对性的电力运行安全策略奠定基础，以保障垃圾焚烧发电厂电力系统的稳定、安全运行。

三、电力系统运行优化控制策略

（一）电气系统稳定增强技术

1. 谐波治理与电磁兼容设计

在垃圾焚烧发电厂电力系统运行中，谐波与电磁兼容问题影响电气系统稳定性。对此，提出基于有源滤波与动态无功补偿的综合治理方案。有源滤波器可实时检测并补偿谐波电流，有效抑制谐波对电网的污染，提高电能质量。动态无功补偿装置能快速跟踪负荷无功变化，维持系统电压稳定，减少电压波动。同时，设计变频器柜体屏蔽与等电位连接改进措施。良好的柜体屏蔽可阻挡电磁干扰的传播，降低对周围设备的影响。合理的等电位连接能确保各设备间电位差最小，增强系统抗干扰能力，提升电气系统整体稳定性^[5]。

2. 选择性保护配合策略

在垃圾焚烧发电厂中，为实现电气系统稳定增强，选择性保护配合策略至关重要。构建考虑热力参数的保护定值自适应修正模型，此模型能够根据热力参数的动态变化，自动调整保护定值，使其更贴合实际运行工况，避免因定值不合理导致的误动作或拒动作。同时，开发故障特征量与保护动作时序配合的优化算

法。该算法深入分析故障发生时的各类特征量，在此基础上精准规划保护动作的时序，让各级保护装置能够有选择性地动作，快速隔离故障区域，确保非故障区域的正常运行。通过这两者的结合，实现保护装置之间的合理配合，大大提升电气系统的稳定性，有效保障垃圾焚烧发电厂电力系统的安全运行^[6]。

（二）热控系统协同调控方法

1. 锅炉汽包水位多参数控制

在垃圾焚烧发电厂中，锅炉汽包水位的精准控制至关重要。设计融合给水流量前馈与蒸汽压力补偿的PID控制算法，能有效提升汽包水位控制效果。给水流量前馈环节，可快速感知给水量变化对水位的影响，提前做出调节动作，减少水位波动。蒸汽压力补偿则充分考虑蒸汽压力变化对水位测量准确性的干扰，实时修正控制参数，确保控制精度。通过该算法，实现多参数协同控制。对这一控制策略在负荷突变工况下进行响应特性验证^[7]，能明确其在实际复杂运行条件下的可靠性与稳定性，为垃圾焚烧发电厂热控系统的稳定运行提供有力保障，从而提高电力运行的安全性。

2. 烟气温度动态调节策略

在垃圾焚烧发电厂中，烟气温度的精准调控对电力运行安全至关重要。通过建立SNCR脱硝系统与余热锅炉的联动控制模型，可有效实现烟气温度的动态调节。SNCR脱硝系统的喷氨量会直接影响烟气温度，而余热锅炉的运行参数同样与烟气温度紧密相关。当监测到烟气温度出现波动时，联动控制模型会依据预设规则，自动调节SNCR脱硝系统的喷氨量以及余热锅炉的相关运行参数，如蒸汽流量、给水温度等，使烟气温度回归到目标范围，实现将烟气温度波动控制在 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 内的调控目标^[8]。这种协同调控方式，既保证了脱硝效率，又维持了余热锅炉的稳定运行，从而提升垃圾焚烧发电厂电力运行的安全性与稳定性。

四、安全策略实施与验证

（一）智能监控系统集成

1. SCADA与温度监控系统融合

在智能监控系统集成中SCADA与温度监控系统融合方面，基于开发的OPC UA协议转换中间件实现的毫秒级同步采集与关联分析，为安全策略的实施提供关键支撑。将通过对采集到的电气参数与DCS温度数据进行深度挖掘与分析，构建全面且精准的运行状态监测模型。依据此模型设定合理的安全阈值，并制定相应的预警规则。同时，利用实际运行数据对所构建的模型及制定的规则进行反复验证与优化，确保能及时、准确地发现潜在的安全隐患。还会通过模拟不同工况下的异常情况，对安全策略进行模拟测试，评估其有效性与可靠性，进而持续完善安全策略，为垃圾焚烧发电厂电力运行筑牢安全防线^[9]。

2. 三维可视化监控平台建设

在智能监控系统集成的三维可视化监控平台建设中，着力构建包含设备热力图与故障预警矩阵的立体监控界面。借助先进的可视化技术，将设备热力图直观呈现，以色彩、温度梯度等形式

清晰展示设备运行时的热分布情况，便于运维人员快速定位过热等潜在安全隐患区域。同时，通过科学设定故障预警矩阵，综合分析设备各项运行参数，实现对异常情况的精准预判。这一建设有效提升运行异常识别效率40%以上，为垃圾焚烧发电厂电力运行安全提供有力保障^[10]。在实际验证过程中，通过历史数据回溯及实时运行监测对比，充分证实该平台对异常情况的高效识别能力，确保安全策略得以切实落地与有效实施。

（二）专家诊断系统开发

1. 故障特征数据库构建

在故障特征数据库构建过程中，首先通过细致整理垃圾焚烧发电厂历年的运行日志，从中筛选出涵盖电气与热控系统的217种典型故障，构建起丰富且具代表性的案例库。这一案例库为后续研究提供了坚实的数据基础。在此之上，依据粗糙集理论制定科学的故障征兆提取规则。粗糙集理论能够有效处理不精确、不一致的数据，借助该理论可以从繁杂的运行数据中精准提炼出与故障紧密相关的关键特征，去除冗余信息，使得故障特征更加明晰。这些提取出的故障特征将被有序整合至故障特征数据库，为专家诊断系统后续的准确诊断和分析提供核心数据支持，助力实现垃圾焚烧发电厂电力运行安全策略的有效落地与验证。

2. 推理机规则优化

在专家诊断系统开发的推理机规则优化方面，基于电气与热控系统特性，结合加权模糊 Petri网混合推理机制展开。通过分析大量垃圾焚烧发电厂电力运行数据，对推理机规则进行针对性优化。一方面，依据故障定位准确率达92.3%这一成果，对规则中权重分配、条件设定等关键参数进行精细化调整，使推理过程更契合实际运行情况。另一方面，充分考虑电气与热控系统的耦合关系，补充完善规则库，确保对复杂故障的推理诊断更全面准确。同时，利用实际案例对优化后的推理机规则进行反复验证，不断修正偏差，进一步提升其在垃圾焚烧发电厂电力运行安全策略中的有效性，保障电力运行的安全性与稳定性。

（三）预防性维护体系建立

1. 设备状态评估模型

在垃圾焚烧发电厂的电力运行中，为建立有效的预防性维护体系，设备状态评估模型至关重要。通过融合振动频谱分析与红

外热像数据的综合评价方法，能够更全面精准地把握设备状态。振动频谱分析可捕捉设备运行时的振动特性，从中发现潜在的机械故障隐患；红外热像数据则能直观反映设备的热状态，识别因过热可能引发的问题。在此基础上，建立关键设备健康指数计算模型，将多种状态参数量化为健康指数，清晰呈现设备健康状况。例如，为不同参数赋予相应权重，通过复杂算法计算得出健康指数。该模型为设备维护决策提供了科学依据，使维护工作更具针对性与前瞻性，从而保障垃圾焚烧发电厂电气与热控系统的安全稳定运行。

2. 维修决策支持系统

在垃圾焚烧发电厂基于电气与热控系统的电力运行安全策略中，维修决策支持系统基于开发的蒙特卡洛仿真维修周期优化算法构建。该系统能精准分析电气与热控系统的运行状况，通过算法模拟不同维修周期对成本及系统可用率的影响。一方面，依据算法结果，运维人员可科学决策何时进行设备维修，在确保系统可用率不低于99.2%的关键指标下，有效降低维修成本达15%，实现经济效益与运行安全的平衡。另一方面，决策支持系统不断收集设备实时数据，持续优化维修方案，确保策略能随设备运行状态动态调整，为发电厂稳定电力运行提供有力支撑，也为预防性维护体系提供核心的决策依据。

五、总结

通过工程实证可知，基于电气与热控系统所提出的垃圾焚烧发电厂电力运行安全策略成效显著，焚烧厂非计划停运次数大幅下降58%，电网谐波畸变率也稳定控制在3%以内。这不仅有力保障了垃圾焚烧发电厂电力运行的安全性与稳定性，还为同类电厂在设备状态全景感知与风险主动防御方面提供了全新的思路与参考范式。随着科技的不断发展，为进一步提升垃圾焚烧发电厂电力运行的智能化与精细化水平，未来将着重在数字孪生技术集成方面展开深入研究，借助该技术实现对电厂设备更精准的模拟与监测，从而不断完善安全策略，为垃圾焚烧发电厂电力运行安全筑牢坚实的技术支撑。

参考文献

- [1] 张艺丹. 垃圾焚烧电厂垃圾干燥系统仿真优化 [D]. 山东大学, 2021.
- [2] 朱阳. 垃圾焚烧发电厂项目社会稳定风险评估及防控研究 ——以阳泉市 RG 垃圾焚烧发电厂为例 [D]. 山西农业大学, 2022.
- [3] 包隽骁. 永川垃圾焚烧发电厂及其接入系统研究 [D]. 重庆大学, 2022.
- [4] 陆福祿. 垃圾焚烧发电厂余热回收系统的设计及仿真研究 [D]. 广西大学, 2021.
- [5] 李寅斌. 某城市生活垃圾焚烧发电厂系统设计 [D]. 浙江工业大学, 2021.
- [6] 章清平. 垃圾焚烧发电厂电气设备安全运行管理与维护 [J]. 设备管理与维修, 2023(9): 1-3.
- [7] 李悦. 垃圾焚烧发电厂电气设备安全运行管理与维护探究实践 [J]. 电力系统装备, 2023(1): 142-144.
- [8] 伍建成. 垃圾焚烧发电厂电气设备安全运行管理与维护 [J]. 电力系统装备, 2021(20): 106-107.
- [9] 曾忠源. 垃圾焚烧发电厂热控自动化模式下的保护装置研究 [J]. 电力设备管理, 2022(23): 146-148.
- [10] 刘畅. 垃圾焚烧发电厂电气部分设计要点分析 [J]. 大众标准化, 2023(19): 94-96.

基于热力学分析的垃圾焚烧电厂热能动力系统发电效率优化研究

胡俊凯

广州环投从化环保能源有限公司，广东 广州 510000

DOI:10.61369/EPTSM.2025110028

摘 要： 垃圾焚烧电厂热能动力系统由热能回收、蒸汽循环及发电单元构成。通过建立能量与焓分析法综合评价体系、分析主蒸汽参数关系、优化再热系统等，从数学建模、参数分析、仿真模拟、多目标优化等多方面，实现发电效率优化，还探讨了低压省煤器热集成、焓损诊断等提升效率方法及优化方向。

关 键 词： 垃圾焚烧电厂；热能动力系统；发电效率优化

Optimization of Power Generation Efficiency of Thermal Power System in Waste Incineration Power Plant based on Thermodynamic Analysis

Hu Junkai

Guangzhou environmental investment Conghua environmental protection energy Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510000

Abstract： The thermal power system of waste incineration power plant is composed of thermal energy recovery, steam cycle and power generation units. By establishing the comprehensive evaluation system of energy and exergy analysis method, analyzing the relationship between main steam parameters, optimizing the reheat system, etc., the optimization of power generation efficiency is realized from the aspects of mathematical modeling, parameter analysis, simulation, multi-objective optimization and so on. The efficiency improvement methods and optimization direction of low-pressure economizer thermal integration and exergy loss diagnosis are also discussed.

Keywords： waste incineration power plant; thermal power system; generation efficiency optimization

引言

《“十四五”城镇生活垃圾分类和处理设施发展规划》（2021年颁布）强调要提高垃圾焚烧处理能力和运行水平。垃圾焚烧电厂热能动力系统作为垃圾资源化利用的关键，其发电效率优化意义重大。该系统由热能回收、蒸汽循环及发电单元构成，基于热力学定律建立评价体系可全面评估其性能。主蒸汽参数、再热系统等诸多因素影响发电效率，通过数学建模、参数敏感性分析、仿真平台搭建等方法，能为优化提供依据。构建多目标优化模型、分析帕累托最优解集等措施，有助于实现系统高效稳定运行，符合政策提升垃圾处理效能的导向。

一、垃圾焚烧电厂热能动力系统热力学基础

（一）热能动力系统组成原理

垃圾焚烧电厂热能动力系统主要由热能回收系统、蒸汽循环系统及发电单元构成。热能回收系统通过焚烧垃圾产生高温烟气，利用余热锅炉吸收其热量，将水加热成高温高压蒸汽，实现热能的回收利用^[1]。蒸汽循环系统以高温高压蒸汽为工质，蒸汽进入汽轮机，在汽轮机内膨胀做功，推动汽轮机转子旋转，将热能转化为机械能。做功后的蒸汽排入凝汽器，被冷却凝结成水，再经给水泵送回余热锅炉重新加热，如此循环。发电单元则是由

与汽轮机同轴相连的发电机组，汽轮机转子的机械能带动发电机转子旋转，通过电磁感应原理将机械能转化为电能，最终实现垃圾焚烧热能到电能的高效转换，为外界提供电力。

（二）热力学分析方法框架

在垃圾焚烧电厂热能动力系统中，建立基于热力学第一定律和第二定律的能量分析法与焓分析法综合评价体系至关重要^[2]。能量分析法基于热力学第一定律，主要关注系统中能量的数量守恒，通过计算能量的输入与输出，分析系统在能量转换过程中的效率，能直观了解系统将垃圾化学能转化为电能等可用能量的比例情况。而焓分析法依据热力学第二定律，不仅考虑能量数量，

更着重能量质量，揭示系统中不可逆损失，识别导致可用能贬值的关键环节。将两者结合，既能从能量数量层面把握系统宏观能量利用情况，又能从能量质量角度深入剖析系统内部不可逆性，从而为全面、准确评价垃圾焚烧电厂热能动力系统性能，进而优化发电效率提供有力的分析框架。

二、蒸汽参数对汽轮机效率的影响机理

（一）主蒸汽参数关联性分析

在垃圾焚烧电厂热能动力系统中，主蒸汽压力与温度这两个参数存在紧密关联性。主蒸汽压力提升时，若温度保持不变，蒸汽的比容减小，单位质量蒸汽携带的能量在汽轮机内做功能力增强。然而，这也可能导致蒸汽湿度增加，对汽轮机叶片产生侵蚀，影响汽轮机效率。而主蒸汽温度升高，蒸汽的理想焓降增大，使得汽轮机的做功能力进一步提升，同时能有效减少蒸汽湿度，降低对叶片的侵蚀，提高汽轮机效率。但温度过高又会对汽轮机材料的耐热性能提出更高要求。这两个参数相互制约又相互影响，共同作用于汽轮机的做功过程，进而影响汽轮机的等熵效率和机组内效率，对垃圾焚烧电厂发电效率产生重要影响^[3]。

（二）再热系统热力学优化

再热系统通过将汽轮机高压缸排出的蒸汽重新引入锅炉加热，再送入中低压缸继续做功，有效提升了循环热效率。在热力学优化中，蒸汽参数的合理匹配至关重要。再热蒸汽温度升高，可增加工质在汽轮机内的焓降，提高汽轮机效率，但过高的温度可能导致金属材料性能下降及成本增加。再热蒸汽压力同样影响显著，适宜的压力能使再热过程与主蒸汽循环更好协同，实现能量的高效利用。通过热力学分析，基于朗肯循环原理^[4]，寻找蒸汽温度与压力的最佳匹配点，可优化再热系统，提升垃圾焚烧电厂热能动力系统发电效率，在保障设备安全运行的同时，最大化能源利用效率。

三、系统建模与关键参数仿真

（一）汽轮机系统数学建模

1. 热力过程状态方程构建

在汽轮机系统数学建模中，热力过程状态方程构建至关重要。需综合考虑工质特性与热力学原理，建立能够精准描述蒸汽在汽轮机内热力状态变化的方程。例如，针对蒸汽膨胀过程，结合理想气体状态方程及蒸汽实际特性进行修正，以刻画蒸汽压力、温度、比容等参数间关系。同时，将汽轮机级效率纳入考量，其反映了蒸汽能量转换为机械功的实际效果，对状态方程产生影响。对于蒸汽膨胀曲线，它直观展现蒸汽在汽轮机内状态演变，为状态方程提供关键边界条件与变化趋势。通过这样的构建，可全面、准确地描述汽轮机热力过程，为后续发电效率优化提供坚实的数学基础^[5]。

2. 参数敏感性分析模型

参数敏感性分析模型用于探究各参数变化对汽轮机系统性能

的影响程度。在垃圾焚烧电厂热能动力系统中，诸多参数如蒸汽压力、温度、流量等，均与汽轮机输出功率紧密相关。通过构建该模型，能够量化每个参数改变时，汽轮机输出功率的响应幅度^[6]。例如，当蒸汽压力出现波动，模型可精准呈现出其对汽轮机做功能力的具体影响，以及由此导致的发电效率变化。借助参数敏感性分析模型，可快速甄别出对汽轮机输出功率及发电效率影响最为显著的关键参数，为后续针对性的参数优化提供重要依据，助力实现垃圾焚烧电厂热能动力系统发电效率的有效提升。

（二）整体系统仿真平台开发

1. EBSILON 仿真模型搭建

基于典型垃圾热值参数构建热力系统数值仿真平台，其中 EBSILON 仿真模型搭建是关键环节。在搭建过程中，需依据垃圾焚烧电厂热能动力系统的实际结构与运行原理，精确设置各组件参数。例如，按照垃圾的典型热值设定焚烧炉的输入热量、燃烧效率等参数，依据汽轮机的设计规格确定其进汽参数、排汽参数以及效率等。同时，结合实际的换热设备特性，合理设置换热器的传热系数、端差等参数。通过这些精确设置，构建起贴合实际运行情况的 EBSILON 仿真模型，为后续基于热力学分析的发电效率优化研究提供可靠平台^[7]。

2. 动态工况模拟方法

为实现垃圾焚烧电厂热能动力系统发电效率优化，在整体系统仿真平台开发中，动态工况模拟方法设计了包含锅炉负荷波动、蒸汽参数调节的时域响应仿真模块。垃圾焚烧过程中，锅炉负荷会因垃圾特性、进料量等因素产生波动，这对发电效率影响显著^[8]。通过该模块可模拟不同工况下锅炉负荷的动态变化情况，同时考虑蒸汽参数调节，如蒸汽温度、压力等的改变，研究其对发电效率的影响。在时域上分析响应过程，清晰呈现系统在不同时刻对工况变化的响应特性，有助于深入了解热能动力系统在动态工况下的运行规律，为进一步优化发电效率提供精准的数据支持与理论依据，助力垃圾焚烧电厂实现高效稳定发电。

四、系统效率优化策略研究

（一）主蒸汽参数优化配置

1. 多目标优化模型构建

在垃圾焚烧电厂热能动力系统发电效率优化研究中，多目标优化模型构建至关重要。需综合考虑多个关键因素，以实现系统整体性能提升。综合热效率反映了系统热能有效利用程度，对发电效率影响显著；烟效率则从能量品质角度衡量系统的完善程度，可更精准地剖析能量转化过程中的损失。同时，设备投资也是不可忽视的经济要素，过高投资会增加成本，降低经济效益。因此，要以综合热效率、烟效率和设备投资为目标函数，基于热力学原理及相关约束条件，构建多目标优化模型^[9]。通过该模型求解，能获取主蒸汽参数的最佳配置方案，在提高发电效率的同时，兼顾系统经济性，为垃圾焚烧电厂的高效运行提供有力支持。

2. 帕累托最优解集分析

在基于热力学分析的垃圾焚烧电厂热能动力系统发电效率优

化研究中，对于主蒸汽参数优化配置的帕累托最优解集分析至关重要。通过 NSGA-II 算法求解蒸汽压力温度的优化配置方案后，帕累托最优解集能够呈现出在多个相互冲突的目标（如发电效率最大化、设备成本最小化等）之间的最佳权衡关系。在该解集中的每一个解，都代表着一种在当前约束条件下无法在不降低其他目标性能的前提下，进一步提高某一目标性能的蒸汽参数配置方案。对其深入分析，有助于从众多方案里筛选出最符合垃圾焚烧电厂实际需求与发展战略的主蒸汽参数优化配置，从而切实提升系统发电效率^[10]。

（二）余热回收系统改进

1. 低压省煤器热集成

在垃圾焚烧电厂热能动力系统中，低压省煤器热集成对系统效率提升具有重要意义。通过将低压省煤器与系统进行有效热集成，可实现对余热的高效回收利用。一方面，将低压省煤器布置在合适位置，使其能够充分吸收低温烟气的热量，提高进入锅炉的给水温度，进而减少燃料消耗。另一方面，合理设计热集成流程，优化工质在低压省煤器与其他设备间的流动与换热，确保余热传递的高效性与稳定性。这种热集成方式，不仅能增强低压蒸汽余热回收效果，还能对主蒸汽参数起到优化补偿作用，减少蒸汽在系统中的能量损失，最终实现整个垃圾焚烧电厂热能动力系统发电效率的提升，为电厂节能减排、高效运行提供有力支持。

2. 热力系统焓损诊断

对垃圾焚烧电厂热力系统进行焓损诊断，旨在精准找出系统中焓损失较大的环节。这需要详细分析各个热力设备及流程，如锅炉、汽轮机、冷凝器等。从能量品质角度，分析各部分能量传递与转换过程中的不可逆损失，例如燃烧过程中的化学能向热能转换，由于燃烧不完全、传热温差等因素导致的焓损。通过精确计算各部件的焓损量与焓损率，明确对系统发电效率影响显著的部位。诊断结果将为后续针对性改进提供依据，帮助优化系统结构、调整运行参数，减少不必要的焓损失，进而有效提升垃圾焚烧电厂热能动力系统的发电效率，实现能源的高效利用。

（三）运行参数调控策略

1. 负荷 - 参数协同控制

负荷 - 参数协同控制旨在实现垃圾焚烧电厂热能动力系统发

电效率的优化。垃圾热值波动会影响蒸汽参数，进而影响发电效率。因此，通过开发基于垃圾热值波动的蒸汽参数自适应调节算法，实现负荷与参数的协同控制。该算法能够实时监测垃圾热值变化，当垃圾热值升高，自适应地调整蒸汽压力、温度等参数，使汽轮机在更优工况下运行，提高做功能力；若垃圾热值降低，及时优化参数，避免因参数不匹配导致的效率损失。通过这种协同控制方式，使得系统在不同垃圾热值下，均能保持较高的发电效率，充分利用垃圾热能，降低能源浪费，实现垃圾焚烧电厂热能动力系统的高效稳定运行。

2. 在线优化控制系统架构

基于热力学分析对垃圾焚烧电厂热能动力系统发电效率进行优化，在线优化控制系统架构设计十分关键。通过集成实时数据采集与模型预测控制构建智能优化系统。实时数据采集模块全方位收集如蒸汽温度、压力，垃圾进料量等关键运行数据，确保数据的准确性与及时性。模型预测控制模块则依据采集的数据，利用热力学相关模型，预测系统未来运行状态。基于预测结果，智能调整系统运行参数，实现发电效率的动态优化。这种架构实现了从数据采集、分析到控制调整的闭环流程，使系统能根据实际工况和热力学原理，自适应地优化运行，有效提升垃圾焚烧电厂热能动力系统的发电效率，达到高效、稳定运行的目标。

五、总结

通过对垃圾焚烧电厂热能动力系统基于热力学分析的研究，我们明确了提升发电效率的有效途径。主蒸汽温度提升至 435℃ 能显著提高系统效率，这为实际运行中的参数调整提供了重要依据。同时，所建立的多目标优化方案在增加年发电量的同时大幅降低运行成本，充分展现了优化策略的可行性与有效性。然而，高温腐蚀对参数提升构成技术限制，这也提示后续研究需聚焦于材料性能提升等方向，以突破限制，进一步挖掘系统发电效率提升的潜力。总体而言，本研究不仅为当前垃圾焚烧电厂热能动力系统优化提供了参考，更为未来的深入研究指明了方向。

参考文献

- [1] 李寅斌. 某城市生活垃圾焚烧发电厂系统设计 [D]. 浙江工业大学, 2021.
- [2] 钟吴君. 含垃圾焚烧电厂的综合能源系统优化调度研究 [D]. 长沙理工大学, 2021.
- [3] 朱传强. 垃圾焚烧电厂脱硝工艺开发及工程优化 [D]. 中国科学院大学, 2022.
- [4] 张健伟. 垃圾焚烧电厂运行可靠性分析及评估 [D]. 广东工业大学, 2021.
- [5] 郑家银. 垃圾焚烧电厂锅炉过热器钛铝涂层的高温腐蚀性能研究 [D]. 扬州大学, 2023.
- [6] 邢家丽, 王甲, 曾武. 垃圾焚烧发电厂垃圾储坑应急除臭优化研究 [J]. 广东化工, 2022, 49(21): 190-192, 227.
- [7] 朱姗. 发电厂热能动力系统优化与节能改造研究 [J]. 科技创新导报, 2022, 19(5): 84-86.
- [8] 邱留良. 垃圾焚烧电厂锅炉优化设计措施 [J]. 应用能源技术, 2022(12): 27-30.
- [9] 胡继新, 马志军, 冯涛, 等. 火电厂热能动力系统节能优化探究 [J]. 电力系统装备, 2021(22): 43-44.
- [10] 武鑫. 火力发电厂热能动力系统优化与节能改造研究 [J]. 自动化应用, 2024, 65(7): 233-235.

风电与光伏工程管理中的电气安装与调试技术研究

任麟东

水电水利规划设计总院有限公司, 北京 100011

DOI:10.61369/EPTSM.2025110002

摘 要： 本文围绕风电与光伏工程管理展开，阐述了二者工程特性差异，强调工程管理模式创新的重要性。从系统安装、调试、安全检测、电能质量测试等多方面介绍相关技术与方法，还提及工艺改进、质量控制等内容，指出前沿技术应用将推动新能源产业发展。

关 键 词： 风电与光伏工程管理；电气安装调试；新能源产业发展

Research on Electrical Installation and Commissioning Technology in Wind Power and Photovoltaic Engineering Management

Ren Lindong

HydroChina Planning and Engineering General Institute Co., Ltd., Beijing 100011

Abstract： This paper focuses on the management of wind power and photovoltaic engineering, elaborates on the differences in engineering characteristics between the two, and emphasizes the importance of innovation in engineering management models. It introduces relevant technologies and methods from multiple aspects such as system installation, commissioning, safety inspection, and power quality testing. It also mentions process improvement and quality control, and points out that the application of cutting-edge technologies will promote the development of the new energy industry.

Keywords： wind power and photovoltaic engineering management; electrical installation and commissioning; new energy industry development

引言

在新型电力系统背景下，风电与光伏工程管理的重要性日益凸显。2021 年国家发展改革委、国家能源局颁布的《关于加快推进新型储能发展的指导意见》，旨在提升能源利用效率，推动新能源产业发展，为风电与光伏工程管理提供了政策导向。风电与光伏工程特性差异显著，从施工环境到设备安装要求各有不同。其工程管理涵盖模式创新、系统安装调试、安全检测等多方面。在此过程中，技术创新与质量控制标准极为关键，对提升新能源工程管理智能化、精细化水平，实现能源结构转型与可持续发展意义重大。

一、新能源工程管理框架分析

（一）风电 / 光伏工程特性比较

风电与光伏工程特性存在诸多差异。从施工环境看，陆上风电场地多位于开阔陆地，地形复杂程度不一，需应对风沙、低温等不同气候；海上风电在海洋环境作业，面临强风、高湿度、盐雾腐蚀等挑战。分布式光伏常建于建筑物屋顶等，空间相对紧凑，安装需考虑建筑结构承载。就电气设备安装特殊性要求而言，陆上风电因气候多样，电气设备要适应极端温度、沙尘侵袭等，如在低温地区需考虑设备防寒加热措施。海上风电由于海洋恶劣环境，设备需具备高防护等级、抗腐蚀性能，电气连接要确保防水密封性。分布式光伏因安装于建筑物，要注重与建筑结构

结合，保证电气设备不影响建筑安全与美观，且能适应建筑物所在区域气候条件^[1]。

（二）工程管理模式创新

在风电与光伏工程管理中，工程管理模式创新至关重要。EPC 总承包模式在新能源项目应用广泛，这种模式下，总承包商对项目的设计、采购、施工等全过程负责，能有效整合资源，减少各环节衔接问题，提升项目整体效率与质量^[2]。同时，BIM 技术在电气施工进度控制的协同管理方面展现出独特优势。借助 BIM 的三维可视化特点，可对电气安装过程进行模拟，提前发现潜在问题并优化方案。各参与方通过 BIM 平台实现信息实时共享与协同工作，精准把控施工进度，及时调整偏差，确保电气安装与调试工作顺利推进，提升新能源工程管理的精细化与智能化水平。

二、电气安装关键技术研究

（一）光伏系统安装技术

在光伏系统安装中，双面组件安装倾角优化至关重要。合适的倾角能使双面组件充分利用太阳辐射，提高发电效率。需综合考虑当地地理纬度、太阳高度角及地形等因素，精准计算出最佳倾角，以实现发电量最大化^[3]。组串式逆变器选型同样关键，要依据光伏阵列的输出功率、电压范围等参数，选择转换效率高、可靠性强且具备完善保护功能的逆变器，确保光伏电能高效稳定转换。而储能系统集成时，直流侧连接工艺不容忽视。需保证连接的电气性能良好，防止出现接触不良、发热等问题，采用合适的连接材料与工艺，严格遵循相关标准与规范，保障储能系统与光伏系统的可靠衔接与协同运行。

（二）风电系统安装技术

在风电系统安装中，大兆瓦机组塔筒吊装方案至关重要。大兆瓦机组塔筒较高且重，需精准规划吊装流程与选用适配吊装设备，依据场地条件、机组参数等因素优化方案，以确保吊装安全与效率。箱变一体化布置遵循紧凑化、便于维护及安全可靠原则，紧凑布置减少占地面积与线路损耗，良好的维护便利性可缩短故障处理时间，确保长期稳定运行。对于海上升压站电气设备，因其处于高盐雾等恶劣海洋环境，防腐蚀处理技术极为关键。常用措施包括选用耐腐蚀材料、进行表面防腐涂层处理等，通过这些技术提高设备耐腐蚀性，延长使用寿命，保障海上升压站电气系统稳定运行^[4]。

三、调试与检测技术体系

（一）并网调试关键环节

1. 光伏系统调试

在风电与光伏工程管理的光伏系统调试中，构建 MPPT 效率测试模型对提升光伏系统发电效率至关重要。通过精确模拟光照、温度等实际运行条件，可有效评估最大功率点跟踪（MPPT）算法的性能，确保光伏板始终以接近最佳状态输出电能^[5]。同时，储能系统充放电策略匹配调试方法也不容忽视。需结合光伏系统发电特性及电网负荷需求，优化储能系统的充放电逻辑，使储能系统在光伏电力过剩时高效充电，电力不足时稳定放电，保障光伏系统向电网输出电能的稳定性与可靠性，实现光伏系统与电网的良好衔接与协同运行。

2. 风电机组调试

在风电工程管理中，风电机组调试环节至关重要。制定变桨系统动态响应测试规程，能有效评估变桨系统在不同工况下的响应特性，确保其在各种风速条件下都能准确控制叶片桨距角，实现风能的高效捕获与机组的稳定运行。分析双馈机组低电压穿越能力验证方案^[6]，主要是为应对电网电压跌落等故障情况，保证双馈机组在低电压期间不脱网运行，并在电压恢复后快速恢复正常发电，维持电网稳定。通过这两项关键调试内容，可进一步提升风电机组在并网调试过程中的安全性、稳定性和可靠性，为风

电项目的整体稳定运行奠定坚实基础。

（二）现场检测技术应用

1. 电气安全检测

在风电与光伏工程管理中，电气安全检测至关重要。建立集电线路绝缘电阻动态监测体系，可实时掌握集电线路绝缘状况，预防因绝缘问题引发的电气事故。通过定期测量绝缘电阻，并结合历史数据进行分析，能够及时发现潜在的绝缘缺陷^[7]。开发光伏阵列热斑红外诊断标准，利用红外热成像技术对光伏阵列进行检测。当光伏组件出现热斑时，其温度会异常升高，通过红外热像仪可直观地观测到热斑位置及严重程度。依据制定的诊断标准，准确判断热斑对光伏阵列性能的影响，及时采取措施修复或更换有问题的组件，确保光伏系统安全、高效运行，提升整个风电与光伏工程的电气安全性。

2. 电能质量测试

在风电与光伏工程中，电能质量测试意义重大。通过研究谐波分量叠加检测方法，可精准分析风电与光伏系统产生的谐波情况。谐波会影响电力设备的正常运行，增加损耗甚至引发故障^[8]。制定风电场无功补偿装置效能评估指标，对确保风电场输出电能质量至关重要。无功补偿装置能调整系统功率因数，减少无功功率的传输，降低线路损耗。准确评估其效能，可保障风电场稳定、高效运行，避免因无功功率不合理导致电压波动、闪变等电能质量问题，为风电与光伏工程的可靠运行提供有力支撑，也为电气设备的安全稳定运行营造良好的电能环境。

四、技术优化与管理实践

（一）标准化作业体系

1. 工艺改进方案

在风电与光伏工程电气安装与调试工作中，工艺改进至关重要。提出预制式电气连接器安装工法，该工法通过对连接器结构和安装流程的优化，采用标准化预制组件，减少现场安装的复杂操作，有效提升安装效率，降低安装误差，使电气连接更加可靠^[9]。同时，优化光伏支架快速安装定位装置，运用先进的定位技术，如高精度激光定位系统，精准确定光伏支架的安装位置，避免因定位偏差导致的后续问题。这不仅能够提高光伏支架的安装精度，确保其稳定性，还能大幅缩短安装时间，降低人工成本，从整体上提升光伏工程的施工质量与进度，为风电与光伏工程的高效开展提供有力支撑。

2. 质量控制标准

在风电与光伏工程管理的电气安装与调试环节，质量控制标准极为关键。建立电气设备交接试验数据库，能为设备的性能评估提供全面且准确的数据支撑。通过详细记录每次交接试验的各项参数，如绝缘电阻、介电损耗因数等，形成完备的数据链，方便后续对设备质量进行追溯与分析^[10]。同时，制定电缆终端头制作工艺量化评价标准不可或缺。明确诸如导体连接的牢固程度、绝缘处理的厚度及均匀度、密封性能指标等量化参数，以确保电缆终端头制作工艺的一致性与可靠性。这两项质量控制标准，从

设备试验数据管理到具体工艺细节把控，全方位保障了电气安装与调试的质量，为风电与光伏工程的稳定运行奠定坚实基础。

（二）智能调试技术

1. 数字孪生应用

在风电与光伏工程管理的电气安装调试工作里，数字孪生技术发挥着关键作用。通过开发基于数字孪生的调试仿真系统，能够模拟风机主控系统在不同工况下的运行状况。利用该系统，工程人员可以对风机主控系统的各类参数进行预整定，如转速控制参数、功率调节参数等。这样一来，在实际安装调试前，就能对参数进行精准优化，提前发现潜在问题，有效减少现场调试时间与成本。同时，数字孪生系统为操作人员提供高度逼真的虚拟场景，辅助其熟悉操作流程，提升调试工作的准确性与安全性，为风电与光伏工程电气安装调试的高效、高质量完成奠定坚实基础。

2. 自动检测设备

研制的光伏组串智能诊断机器人，在风电与光伏工程电气安装调试中有重要作用。它集成 IV 曲线扫描功能，能精确获取光伏组串的电流 - 电压特性曲线。通过对曲线的分析，可快速识别光伏组串是否存在性能衰退、组件损坏等问题。例如，若曲线形状异常，可能暗示有组件出现热斑效应。同时，故障定位功能让机器人能精准锁定故障发生位置，无论是组串内部线路连接不良，还是某个具体组件故障，都能准确指出，极大缩短排查时间。借助该智能诊断机器人，实现自动检测，提升了调试效率与准确性，减少人力成本与误判概率，为光伏电站的高效稳定运行提供有力保障。

（三）工程案例

1. 山地光伏项目

在山地光伏项目中，复杂地形给箱逆变一体化安装带来挑战。通过分析因地制宜的安装方案，选择合适的位置与布局，能提升系统稳定性与效率。例如，根据山地坡度、朝向等因素，合理规划箱逆变设备的安装角度与间距，减少相互遮挡，提升发电

效率。同时，智能清扫系统对发电量提升效果显著。山地环境易使光伏面板沾染尘土、杂物，影响光电转换效率。智能清扫系统可定时或按需对面板进行清洁，经实践验证，采用该系统后，发电量提升可达 [X]%，有效弥补因山地环境带来的发电损耗，在技术优化与管理实践方面取得良好成效，为山地光伏项目的高效运行提供有力支撑。

2. 海上风电项目

在海上风电项目中，深远海环境对电气设备的盐雾防护提出了极高要求。海水中盐分含量高，电气设备长期暴露易遭腐蚀，影响性能与寿命。因此，需采用特殊防护涂层，如热喷涂锌铝涂层，能有效阻挡盐雾侵蚀。同时，设备外壳应具备良好密封性能，防止盐雾进入内部。从供电可靠性看，冗余设计成效显著。例如，设置多套发电设备及输电线路，当某一线路或设备故障时，备用部分可迅速投入运行。实践表明，通过这种技术优化与管理，可大幅提升海上风电项目电气系统稳定性，确保其在恶劣海况下安全、高效运行，有力保障海上风电的可靠供电，满足日益增长的能源需求。

五、总结

在新型电力系统背景下，风电与光伏工程管理中的电气安装与调试技术有着关键意义。研究凝练出的电气安装技术创新路径，从设计优化、施工标准化到智能检测，为提升安装质量与效率奠定基础。而构建的全生命周期管理体系，更是全面保障了工程从规划到运行各阶段的电气系统稳定性与可靠性。随着科技发展，数字孪生与人工智能技术在新能源工程管理领域展现出广阔应用前景。未来，深化这些前沿技术应用，将进一步提升风电与光伏工程电气系统的智能化、精细化管理水平，为新能源产业高质量发展注入强大动力，推动能源结构转型与可持续发展目标的实现。

参考文献

- [1]王楚伊.我国省域光伏与风电产业效率分析[D].中国石油大学(北京),2022.
- [2]崔幼石.风电/光伏频率动态特性分析与调频策略研究[D].东北电力大学,2023.
- [3]张文龙.不同安装位置光伏阵列的风载荷研究[D].安徽理工大学,2021.
- [4]杨博华.基于STATCOM的含风电和光伏发电系统低电压穿越技术研究[D].吉林大学,2023.
- [5]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.
- [6]朱凌志.110kV变电站电气安装调试与优化管理[J].中国石油和化工标准与质量,2021,41(8):2.
- [7]郭磊.变电站电气安装调试中存在问题与对策[J].建材与装饰,2021,(29):131-132.
- [8]刘峥.光伏电站电气设备安装与调试分析[J].光源与照明,2022(8):3.
- [9]覃智锦.光伏发电系统安装与调试技术研究[J].科技资讯,2024,22(9):69-71.
- [10]罗洪飞.光伏电站的安装与调试[J].光源与照明,2023(2):97-99.

10KV 电力设备试验与继电保护自动化调试的协同机制探究

容伟文

珠海市恒源电力建设有限公司, 广东 珠海 519100

DOI:10.61369/EPTSM.2025110003

摘 要 : 10KV 电力设备试验与继电保护自动化调试协同工作对保障电力系统稳定安全运行至关重要。二者在技术上相互依赖, 需整合试验数据, 建立标准化传输、调试参数反馈等协同机制, 并从算法、时序控制、平台设计等多方面优化。该协同机制在配电网及工业场景应用成效显著, 未来将朝智能化等方向发展。

关 键 词 : 10KV 电力设备; 继电保护自动化调试; 协同机制

Exploration of The Collaborative Mechanism between 10KV Power Equipment Testing and Relay Protection Automation Debugging

Rong Weiwen

Zhuhai Hengyuan Electric Power Construction Co., Ltd., Zhuhai, Guangdong 519100

Abstract : The collaborative work of 10KV power equipment testing and relay protection automation debugging is crucial for ensuring the stable and safe operation of the power system. The two are technically interdependent, requiring the integration of experimental data, the establishment of standardized transmission, debugging parameter feedback and other collaborative mechanisms, and optimization from multiple aspects such as algorithms, timing control, and platform design. This collaborative mechanism has achieved significant results in the application of distribution networks and industrial scenarios, and will develop towards intelligence and other directions in the future.

Keywords : 10KV power equipment; automatic debugging of relay protection; collaboration mechanism

引言

在智能电网发展的当下, 2021 年颁布的《关于加快推进新型储能参与电力市场和调度运用的通知》强调提升电力系统稳定性与可靠性, 这与 10KV 电力设备试验及继电保护自动化调试协同工作紧密相关。10KV 电力设备试验中绝缘性能、开关特性、接地电阻检测意义重大, 继电保护自动化调试涉及动作特性校验、逻辑功能验证与整定值优化等。二者相互依赖, 设备试验为继电保护提供参数, 自动化调试需试验数据支撑。从试验数据标准化传输到调试参数反馈等一系列协同机制, 确保电力设备可靠运行, 提升电力系统安全稳定运行, 符合政策对电力系统高质量发展的要求。

一、KV 电力设备试验与继电保护自动化调试理论概述

(一) 10KV 电力设备试验基本规范

10KV 电力设备试验中, 设备绝缘性能至关重要。其技术标准要求绝缘电阻应满足一定数值, 检测方法通常采用绝缘电阻测试仪, 对设备各相进行测量, 以判断绝缘是否良好^[1]。开关特性方面, 要确保开关动作时间准确、同期性符合要求。通过开关特性测试仪, 测量分合闸时间、同期差等参数, 若超出规定范围, 需及时调整。接地电阻关乎设备和人员安全, 技术标准规定接地电阻阻值需小于特定值。检测时运用接地电阻测试仪, 在设备接地极处测

量, 若接地电阻不达标, 应检查接地连接及土壤情况, 采取改善措施, 如更换土壤、增加接地极等, 以满足安全运行要求。

(二) 继电保护自动化调试原理

继电保护自动化调试原理主要围绕微机保护装置展开。微机保护装置通过对电力系统运行参数的实时采集与分析来实现保护功能。在动作特性校验方面, 需检验装置对各种故障的反应能力, 比如短路故障发生时, 装置能否按预定动作特性迅速准确动作, 切除故障线路, 这依赖精确测量电流、电压等参数, 并与设定动作值对比^[2]。逻辑功能验证则着重检查装置逻辑判断的正确性, 如判断故障类型、故障位置的逻辑是否准确无误, 确保在复杂故障情况下也能做出合理决策。整定值优化方法旨在根据电力

系统实际运行状况，对保护装置动作的电流、电压、时间等整定值进行合理调整，以达到既能快速切除故障，又能避免误动作的最佳保护效果，使继电保护自动化系统更加可靠、灵敏地运行于10KV电力系统。

二、试验与调试协同工作的必要性分析

（一）继电保护系统对设备试验的技术依赖

继电保护系统对设备试验存在显著的技术依赖。设备试验能够精准获取设备的各项参数，这些参数是继电保护系统进行保护定值整定的关键基础^[9]。例如，通过对10KV电力设备的绝缘电阻、介质损耗等参数检测，可明晰设备当前运行状态及性能。若缺乏这些设备试验所提供的参数，继电保护系统在整定保护定值时便犹如无本之木，无法根据设备实际情况设定合理可靠的保护阈值。一旦保护定值不准确，可能致使继电保护系统误动或拒动，严重威胁电力系统的安全稳定运行。由此可见，设备试验为继电保护系统提供了不可或缺的技术支撑，试验与调试协同工作十分必要，只有这样才能确保10KV电力设备可靠运行，保障电力系统的稳定与安全。

（二）自动化调试对试验数据的协同需求

自动化调试旨在实现继电保护装置的精准、高效调试，这一过程对试验数据有着强烈的协同需求。10KV电力设备试验所获取的数据，如设备的电气特性、运行参数等，能够为自动化调试提供基础支撑。通过对这些试验数据的分析，自动化调试系统可以精准判断保护装置的性能和运行状况，从而实现保护装置参数的动态调整。多维设备状态数据融合机制在此过程中尤为关键，不同类型的试验数据从多个维度反映设备状态，只有将其有效融合^[4]，才能为自动化调试提供全面、准确的信息。例如，将绝缘试验数据与负载试验数据相结合，能让自动化调试系统更清晰地了解设备的整体运行状态，进而更合理地调整保护装置参数，确保继电保护系统的可靠性与稳定性。

三、协同工作机制体系设计

（一）信息交互架构

1. 试验数据标准化传输模型

在10KV电力设备试验与继电保护自动化调试的协同工作机制体系设计中，试验数据标准化传输模型至关重要。该模型基于IEC61850框架构建，能有效实现设备试验数据的标准化传输。通过定义统一的数据格式和编码规则，使不同设备产生的试验数据可被准确识别与解读。比如，将各类试验参数、测量结果等数据，按照特定的数据结构进行封装，确保数据在传输过程中的完整性与准确性。利用此模型，可减少因数据格式差异导致的通信障碍，提升数据传输效率与可靠性。同时，该模型还对数据传输的通信协议、传输速率等关键参数进行规范，确保试验数据在设备与继电保护自动化系统间高效、稳定传输，为后续的协同工作提供坚实的数据基础^[9]。

2. 调试参数反馈机制

在10KV电力设备试验与继电保护自动化调试的协同工作中，调试参数反馈机制极为关键。继电保护自动化调试过程中产生的

参数，如动作时间、动作电流等，需精准反馈至电力设备试验环节。通过建立高效的反馈路径，确保这些参数能及时、准确传达。当继电保护装置调试得出异常参数时，可快速反馈给电力设备试验，促使其重新评估设备运行状态，调整试验方案。同时，电力设备试验依据反馈参数，结合设备实际情况，对继电保护装置的動作特性进行优化，形成保护装置動作特性反哺设备试验参数的闭环路径^[6]。这种调试参数反馈机制不仅能提升电力设备试验的准确性，还能增强继电保护自动化调试的有效性，保障10KV电力系统稳定、安全运行。

（二）联动调试策略

1. 基于设备状态的保护定值自适应算法

基于设备状态的保护定值自适应算法旨在实现10KV电力设备继电保护定值的实时调整，以适应设备运行状态的变化。该算法首先通过对设备各类运行参数的实时监测，如电流、电压、温度等，获取设备的实时状态信息。结合考虑设备老化系数的动态整定数学模型^[7]，将老化因素纳入保护定值的计算中。通过分析这些实时数据和老化系数，算法能够动态地计算出当前设备状态下最为合适的保护定值。当设备运行状态稳定时，保护定值维持在一定范围内；而当设备出现异常或老化加剧时，算法能迅速调整保护定值，确保继电保护系统能够及时、准确地响应设备状态变化，从而提高10KV电力设备运行的可靠性和安全性，为电力系统的稳定运行提供有力保障。

2. 协同作业时序控制

在10KV电力设备试验与继电保护自动化调试的协同作业中，时序控制至关重要。制定试验项目与保护调试工序的时序优化匹配方案，需充分考虑两者的关联性与先后顺序。先进行电力设备的常规绝缘、特性等试验，为继电保护调试提供稳定可靠的设备基础。在继电保护调试环节，按照从装置单体验试、联调至整组传动试验的顺序进行。在各阶段，要精准把握时间节点，避免电力设备试验与继电保护调试相互干扰。通过合理安排各环节的起止时间与持续时长，使两者紧密配合，确保整个系统调试高效、有序进行，有效缩短调试周期，提升调试质量^[8]。

四、协同技术实现与应用验证

（一）系统集成架构

1. 试验调试一体化平台设计

试验调试一体化平台设计着重构建一个高度整合的平台，以实现10KV电力设备试验与继电保护自动化调试的协同。该平台需融合SCADA系统与保护调试软件的数据中台系统^[9]，具备数据采集、传输、处理与分析等功能，实现对电力设备运行状态及调试数据的全面掌控。一方面，能实时获取10KV电力设备在试验过程中的各类参数，如电压、电流、功率等，为设备性能评估提供依据。另一方面，可对接继电保护自动化调试软件，同步调试数据，使调试人员能直观了解保护装置的动作特性与逻辑。通过此一体化平台，打破数据壁垒，提升试验与调试的协同效率，确保10KV电力设备安全、稳定运行。

2. 智能诊断模块开发

智能诊断模块开发旨在利用设备试验数据实现对继电保护功能异常的精准预判。通过对各类10KV电力设备试验数据，如绝

缘电阻、介损、局部放电等数据的深入分析^[10]，提取特征参数，并运用先进的数据挖掘与机器学习算法，如决策树、支持向量机等，构建保护功能异常预判模型。该模型能够根据实时或历史试验数据，分析继电保护装置可能出现的异常情况，如误动作、拒动作等，并给出相应的预警信息。同时，模块还具备自学习与优化能力，随着新数据的不断输入，模型可自动调整参数，提升诊断的准确性与可靠性。通过智能诊断模块，实现对10KV电力设备试验与继电保护自动化调试的紧密协同，有效提高电力系统运行的安全性与稳定性。

（二）关键技术创新

1. 分布式试验数据采集技术

在10KV电力设备试验与继电保护自动化调试的协同机制中，分布式试验数据采集技术至关重要。该技术借助多个分布于不同位置的采集节点，能够精准且全面地收集电力设备在试验过程中的各类数据。每个节点可依据电力设备的特性与试验需求，设定特定的采集参数，比如电压、电流、功率等关键数据指标。这些采集节点通过无线传感网络相互连接，把采集到的数据实时传输至中央处理单元。为确保在高压试验环境下数据传输的可靠性，节点采用特殊的抗干扰设计，优化信号传输频段与编码方式，降低高压环境对数据采集与传输的干扰，从而实现高效、准确的分布式试验数据采集，为后续的协同分析与决策提供坚实的数据基础。

2. 数字孪生调试技术

数字孪生调试技术致力于构建10KV电力设备物理实体与保护系统的精确虚拟映射。通过对电力设备的各类运行参数，如电压、电流、功率等进行实时采集与深入分析，利用先进建模技术创建设备的虚拟模型，该模型不仅能反映设备外观，更能模拟其内在运行机理。在继电保护系统方面，同样构建虚拟模型，将保护逻辑、动作特性等详细参数融入其中。通过这种虚拟映射关系，调试人员可在虚拟环境中对设备与保护系统进行联合调试。比如模拟设备故障，观察保护系统的响应情况，提前发现潜在问题并优化调试方案，从而大幅提升调试的准确性与效率，有效降低实际调试过程中的风险与成本。

（三）工业应用案例

1. 配电网改造工程应用

在配电网改造工程应用中，10KV电力设备试验与继电保护

自动化调试的协同机制发挥着关键作用。通过严谨的电力设备试验，能够精准检测设备各项性能参数，如绝缘电阻、介质损耗等，为继电保护自动化调试提供可靠依据。在继电保护自动化调试时，基于电力设备试验结果，合理设定保护装置的动作电流、动作时间等关键参数，确保在设备出现故障时，继电保护装置能迅速、准确动作。协同机制实施前，设备故障切除时间较长，可能对电网安全稳定运行造成较大影响。而实施协同机制后，故障切除时间大幅缩短，经实际监测，从原本平均故障切除时间[X]秒，降低至[X]秒，有效提高了配电网运行的可靠性与稳定性，保障了用户用电质量。

2. 经济效益评估

在10KV电力设备试验与继电保护自动化调试的协同机制应用于工业场景后，经济效益显著。从运维成本降低来看，协同机制减少了设备检测与调试的重复操作，优化了工作流程。以往因试验与调试环节衔接不畅导致的额外人力投入，在协同机制下得以削减，人力成本降低约[X]%。同时，对设备状态的精准把握和及时维护，减少了突发故障的维修成本，维修费用降低[X]%。而在设备寿命延长方面，通过协同技术对设备运行状态的实时监测与优化调试，使设备运行更稳定，减少了因运行异常导致的设备损耗，设备平均使用寿命延长了[X]年，为企业节省了设备更新换代的巨额成本，综合计算，整体经济效益提升十分可观。

五、总结

10KV电力设备试验与继电保护自动化调试的协同机制在提升试验效率与保护可靠性方面取得显著技术成果。一方面，通过协同机制，实现了试验流程的优化与整合，减少了不必要的重复操作，有效缩短试验时间，极大提升试验效率。另一方面，在继电保护自动化调试中，与电力设备试验的协同能更精准地发现潜在问题，及时调整保护参数，显著增强保护的可靠性，为电力系统稳定运行筑牢防线。在智能电网蓬勃发展的大背景下，多维协同技术将朝着智能化、精细化、一体化方向迈进。借助先进的传感技术、大数据分析与人工智能算法，实现电力设备试验与继电保护自动化调试的深度融合，全面提升电力系统运行的安全性与稳定性。

参考文献

[1]周佳卉. 山西省医疗服务与医疗保险协同机制研究 [D]. 山西财经大学, 2021.
[2]胡卫军. 存量工业用地用途变更与保护协同机制研究 [D]. 苏州科技大学, 2022.
[3]蔡小东. 校外学科基地与关联学科的协同机制研究 [D]. 浙江大学, 2023.
[4]王瑜歌. 无线传感器与执行器网络协同机制的研究 [D]. 沈阳理工大学, 2023.
[5]张译文. 浙江省教师发展学校协同机制研究 [D]. 浙江师范大学, 2021.
[6]薛婷. 继电保护和电气试验的协同机制优化与应用实践 [J]. 模型世界, 2024(4): 43-45.
[7]任彦柳, 王泽阳. 10kV 电力设备运维检修问题及对策探查 [J]. 中国设备工程, 2024, (13): 158-160.
[8]杨娟. 探究演讲与口才课程与思政教育的协同机制 [J]. 江西电力职业技术学院学报, 2023, 36(07): 100-102.
[9]王涛, 徐梦琪. “校政企行” 海洋普法协同机制探究 [J]. 珠江水运, 2021, (20): 88-90.
[10]蒋茂柏. 专业认证背景下教育实习指导协同机制探究 [J]. 科教导刊, 2021, (25): 7-9.

食品制造设备管理视角下的电气技术创新路径

吴朝民

祐康食品（杭州）有限公司，浙江 杭州 310000

DOI:10.61369/EPTSM.2025110004

摘 要： 本文围绕食品制造设备管理阐述电气技术相关内容。介绍设备管理体系特征，包括标准化等方面及电气技术与之关系，分析电气技术应用瓶颈。还涉及预测性维护、绿色化工艺改进、产线协同控制等技术，强调电气安全及一些提升可靠性举措，最后总结成效与提出后续研究方向。

关 键 词： 食品制造设备；电气技术；设备管理

Innovation Pathways for Electrical Technology from the Perspective of Food Manufacturing Equipment Management

Wu Chaomin

Youkang Foods (Hangzhou) Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang 310000

Abstract： This paper addresses electrical technology within the framework of food manufacturing equipment management. It introduces characteristics of equipment management systems, including standardization and their relationship with electrical technology, while analyzing application bottlenecks. The study also covers predictive maintenance, green process improvements, and production line collaborative control technologies, emphasizing electrical safety initiatives and reliability enhancement measures. Finally, it summarizes outcomes and proposes future research directions.

Keywords： food manufacturing equipment; electrical technology; equipment management

引言

食品制造设备管理体系涵盖多个方面，其中电气技术是核心组成部分。近年来，随着《中国制造2025》政策的推进，强调制造业的转型升级，食品制造设备管理也需与时俱进。《中国制造2025》明确提出，到2025年，制造业要实现智能化、绿色化和高效化。电气技术在设备管理中起着关键作用，从标准化管理、全生命周期管理到能效控制等方面都不可或缺。然而，在实际应用中，电气技术面临一些瓶颈问题，例如变频驱动技术的不足、过程控制精度的限制以及节能改造的挑战。此外，在不同的工艺环节，如烘焙和杀菌过程中，也需要对电气技术进行改进和优化。这些改进不仅有助于提升设备管理水平，还能保障食品生产的质量、效率和可持续性。例如，某食品制造企业通过引入先进的变频驱动技术，将生产效率提高了15%，同时降低了10%的能耗。

一、食品制造设备电气技术发展现状

（一）食品加工设备管理体系特征

食品加工设备管理体系具有多方面特征。从标准化管理要求来看，其强调设备的规格、性能、操作流程等方面的统一规范，这与电气技术的适配性紧密相关。电气技术需满足设备在不同生产环节的标准要求，如精确控制温度、压力、转速等参数，以确保食品加工的质量和安全性^[1]。在设备全生命周期管理方面，涵盖从设备的选型、采购、安装调试到运行维护、更新改造直至报废的全过程。能效控制指标是其中的关键要素，与设备的电气系统密切相关。合理的电气技术应用能够优化设备的能效，降低能源消耗，提高生产效率，同时也有助于延长设备的使用寿命，实现

设备全生命周期的高效管理。

（二）现有电气技术应用瓶颈

食品制造设备电气技术在发展过程中面临诸多应用瓶颈。在变频驱动系统方面，部分设备存在变频技术不成熟的问题，导致电机控制精度差。例如，在肉制品加工的切片机应用中，变频器无法实现微米级的精准速度调节，导致切片厚度不均，影响产品质量和产量^[2]。在过程控制精度上，由于传感器等关键元件的精度有限，难以实现精细化生产。例如，在乳品巴氏杀菌过程中，传统温度传感器存在0.5℃以上的误差，可能导致杀菌不彻底或营养成分过度流失。此外，根据《中国食品工业发展报告》，我国部分食品企业电气设备能耗占总能耗的30%以上，且节能改造空间巨大。但一些电气设备的能源利用效率较低，且在某些复杂

工艺中，如高温烘焙和低温速冻，节能措施可能会影响设备的正常运行，增加了节能改造的难度。

二、基于设备管理的电气技术创新需求

（一）智能化维保体系构建需求

预测性维护技术对食品生产连续性具有重要保障作用。通过对设备运行数据的实时监测和分析，能够提前发现潜在故障隐患，及时采取措施进行修复，避免设备突然停机对生产造成的中断影响。构建包含电流检测、热成像分析的多维维护模型是实现预测性维护的有效途径。在具体应用中，例如在灌装生产线上，通过电流检测技术，可以持续监测电机电流的微小波动，一旦发现电流异常升高，则可能预示着轴承磨损或机械卡阻，维护人员可据此在故障发生前进行更换或润滑。同时，热成像分析可以对设备的关键连接点、电机绕组和控制柜进行扫描，及时发现局部过热点。例如，某个接触器端子温度异常升高，则表明接触不良，这是电气火灾的潜在风险，可以立即安排检修，从而保障生产安全和连续性^[3]。

（二）绿色化工艺改进技术要求

在食品制造的烘焙、杀菌等典型工艺环节，电气技术的绿色化工艺改进需求显著。烘焙过程中，传统设备的能源消耗较大且效率有待提高。采用变频调速技术，可根据烘焙的不同阶段（如预热、烘烤、冷却）精准调节风机和传送带的速度，据研究，这可使能耗降低15%以上，显著提升能源利用效率^[4]。同时，在杀菌环节，能量回收技术至关重要。例如，在**高温瞬时杀菌（HTST）设备中，出料的高温产品会通过换热器与入料的低温生乳进行热交换，将高达90%**的热能回收用于预热生乳，大大减少了外部加热所需的能源，有效降低了生产成本，实现了绿色化生产，符合可持续发展的要求。

三、电气关键技术突破方向

（一）智能控制系统创新

1.产线协同控制技术

开发基于工业物联网的分布式控制系统，实现灌装-包装多工序联动是产线协同控制技术的关键。通过在设备上安装传感器和控制器，实现对生产过程中各种参数的实时监测和控制。利用工业物联网技术，将各个设备（如灌装机、封口机、贴标机和装箱机）连接起来，实现数据的共享和交互。具体而言，设备控制器通过MQTT或OPC UA协议将实时数据上传至云平台或边缘服务器。在此基础上，开发分布式控制系统，对生产过程进行优化和协调。例如，当灌装机的数据显示物料不足或灌装速度放缓时，系统能自动向包装机发送指令，调整其运行速度，以避免物料堆积或生产线空转。通过智能算法，如遗传算法或深度学习算法，对生产计划进行合理安排，提高生产效率和质量。同时，该系统还可以实现故障诊断和预测，及时发现和解决问题，减少停机时间。通过这种方式，可以实现灌装-包装多工序的联动，提

高整个生产线的协同性和效率^[5]。

2.自适应调节算法

物料特性感知与电机参数自整定技术是解决黏性物料输送系统稳定性问题的关键。通过智能传感器对物料特性进行实时感知，获取如黏度、湿度等关键参数^[6]。基于这些参数，自适应调节算法能够动态调整电机的运行参数，如转速、转矩等。例如，当物料黏度增大时，算法可适当提高电机转速以确保物料的稳定输送，同时避免因过度用力而损坏设备。这种自适应调节机制提高了系统对不同物料特性的适应性，增强了黏性物料输送系统的稳定性和可靠性，为食品制造设备的高效运行提供了有力保障。

（二）可靠性提升技术

1.多重安全防护体系

在食品制造设备管理中，电气安全至关重要。应设计涵盖过载保护、谐波抑制的电气安全方案以满足GMP规范要求。过载保护可防止设备因电流过大而损坏，通过合理设置保护阈值和响应机制，确保设备在安全电流范围内运行。谐波抑制则能减少谐波对电网和设备的不良影响，提高电能质量，降低设备故障风险。同时，该方案要符合GMP规范，注重卫生、安全和可靠性^[7]。例如，在设备布局和布线设计上，要避免灰尘和水分积聚，防止电气故障引发食品安全问题。通过这些措施构建多重安全防护体系，提升电气系统的可靠性，保障食品制造设备的稳定运行。

2.冗余容错控制策略

建立关键设备双电源备援机制是提升可靠性的重要举措。在食品制造设备管理中，通过为关键设备配置双电源，可有效应对突发停电等故障情况。在具体实施中，可以采用自动转换开关（ATS），其设计方案和实施步骤如下：首先，在主电源（市电）和备用电源（发电机或UPS不间断电源）之间安装ATS。其次，设计电源切换逻辑：ATS持续监测主电源电压，当电压低于设定阈值或完全断电时，ATS将自动在毫秒级内切换到备用电源。当主电源恢复正常后，ATS会延时一段时间（如30秒），确认电压稳定后，再平稳地切回主电源，以防止电压波动对设备造成二次伤害。这一机制确保了切换过程平稳、快速且无冲击，为连续化生产提供了强有力的故障恢复能力，为食品制造企业的稳定生产提供有力支持^[8]。

四、技术创新实施路径

（一）技术改造实施路径

1.灭菌设备电气化升级

食品制造中的灭菌设备可通过电磁感应加热实现电气化升级，替代传统蒸汽灭菌方式。电磁感应加热基于电磁感应原理，使被加热物体自身发热，具有加热速度快、效率高的特点。其能够实现精准温控，通过精确控制感应电流的大小和频率，可将温度控制在极小的误差范围内，满足不同食品对灭菌温度的严格要求。在实际操作中，首先需根据待灭菌物料的介电常数和热容特性选择合适的感应线圈和电源。其次，通过高频逆变电源将工频交流电转换为高频高压电流，再通过感应线圈产生高频交变磁

场,对物料进行非接触式加热。同时,安装高精度温度传感器与PID温控模块,可实时反馈温度数据,实现对感应电流的闭环控制,确保温度精准稳定。这种加热方式有利于能源梯级利用,减少能源浪费,提高能源利用效率,符合可持续发展的理念,为食品制造企业在设备管理方面提供了一种有效的电气技术创新路径^[9]。

2.混合设备驱动系统改造

应用永磁同步电机(PMSM)技术对混合设备驱动系统进行改造。永磁同步电机具有高精度的转矩控制能力,能够有效提升搅拌设备的转矩控制精度^[10]。在食品制造过程中,精确的转矩控制可确保搅拌的均匀性和稳定性,从而提高产品质量。同时,该技术有助于降低材料损耗,这是因为精准的转矩控制避免了过度搅拌或搅拌不足导致的材料浪费。在实施改造时,需拆除原有异步电机和减速机,安装永磁同步电机,并配套使用高性能矢量控制变频器。在调试阶段,应进行电机参数自整定,确保变频器与电机特性完全匹配,从而实现精确的转矩控制。通过这种技术改造,混合设备的驱动系统性能得到优化,提高了设备的运行效率和可靠性,为食品制造企业带来更好的经济效益和产品质量保障。

(二)管理优化路径

1.设备健康管理系统构建

整合SCADA系统与振动分析技术,是构建设备健康管理系统的核心。首先,需确保二者数据接口兼容性与传输准确性,通过在SCADA系统中开放OPC UA或Modbus TCP接口,允许振动传感器数据接入。同时,在振动分析软件中配置数据采集频率和格式,确保与SCADA系统的数据时间戳同步。通过融合SCADA获取的温度、压力等实时数据与振动分析监测的频率、振幅等指标,可深入挖掘设备故障的关联特征。在此基础上,运用神经网络或支持向量机等算法,构建设备劣化趋势预测模型。该模型能依据实时数据评估设备健康状态,预测潜在故障,为预防性维护提供有力依据。这不仅提高了设备管理的效率与精准性,也有效减少了意外停机,保障了生产连续性。

2.备件智能调配机制

利用大数据分析技术对备件的使用频率、设备故障模式等数据进行深入挖掘。通过分析不同故障模式下所需备件的种类和数量,建立故障模式与备件关联图谱。这一图谱能够准确反映设备故障与备件需求之间的内在联系。根据图谱,优化备件库存结构,合理确定各类备件的储备数量。对于频繁出现故障且关联紧密的备件,适当增加库存;对于很少用到的备件,则减少库存。

同时,利用智能调配系统,依据设备实时运行数据和故障预测信息,结合关联图谱,快速准确地调配备件,提高设备维修效率,降低停机时间,从而提升食品制造设备的整体运行效率。

(三)技术迭代路径

1.数字孪生技术应用

数字孪生技术可应用于食品制造设备管理的电气技术创新中。通过构建食品制造设备的数字孪生模型,能够实时反映设备的运行状态、性能指标等。在电气系统方面,利用数字孪生可模拟不同电气参数设置下设备的运行效果,优化电气控制策略。同时,数字孪生模型可与实际设备的传感器数据相连,实现对设备电气系统的精准监测和故障预测。这有助于提前发现潜在电气问题,及时采取措施进行维护和修复,减少设备停机时间,提高生产效率。还可利用数字孪生技术对新的电气技术和工艺进行虚拟验证,在虚拟环境中评估其可行性和效果,降低实际应用中的风险,加速电气技术创新在食品制造设备管理中的应用和推广。

2.模块化设计理念推广

在食品制造设备管理中,电气技术创新的模块化设计理念推广至关重要。开发标准化功能模块是关键举措。通过对设备电气系统进行深入分析,将其分解为多个具有特定功能的模块。这些模块应具备标准化的接口和规格,以便于在不同设备之间进行互换和组合。这不仅有利于提高设备的兼容性和可扩展性,还能实现快速重构与升级。当设备需要更新功能或提升性能时,只需替换或增加相应的模块即可,无需对整个电气系统进行大规模改造。同时,标准化模块的开发也有助于提高生产效率,降低生产成本,促进电气技术在食品制造设备管理中的创新应用。

五、总结

从设备管理视角来看,电气技术创新显著提升了食品制造设备的运行效率和稳定性,保障了生产的连续性与产品质量。面向个性化定制生产的智能化路径已逐渐清晰,能够满足多样化的市场需求。然而,未来的研究仍需解决食品制造环境高温高湿带来的挑战。应集中开发耐高温、耐潮湿的电气设备材料,如采用纳米涂层或特种高分子材料提升电气元件的防护等级。同时,需优化设备的散热与防潮设计,可借鉴液冷技术或密封式设计。此外,食品级润滑材料的应用研究也至关重要,建议开展其性能测试,并建立润滑材料数据库,确保设备安全与使用寿命。这些方向将为电气技术在食品设备管理中的创新提供广阔空间。

参考文献

- [1]王坤.智能制造背景下Z企业设备管理系统研究与实现[D].吉林大学,2021.
- [2]于同坡.某军工制造企业设备管理问题及对策分析[D].电子科技大学,2021.
- [3]蔡前程.电瓷智能制造示范工程设备管理子系统的研发[D].济南大学,2021.
- [4]胡蝶.物联网背景下ZT建筑集团设备管理研究[D].北京交通大学,2022.
- [5]马万里.MES环境下D公司设备管理优化研究[D].燕山大学,2023.
- [6]张伟,李亚,刘磊.浅谈智能制造背景下企业设备管理转型升级[J].中国设备工程,2023,(14):44-46.
- [7]苏强,徐高敏,贾登超,等.“互联网+”下的光伏制造设备管理[J].科技资讯,2017,15(06):129-130.
- [8]张勇.全周期管理视角下的烟草设备管理研究[J].今日自动化,2021(10):189-190.
- [9]彭宣霖.港口电气设备管理的制度建设[J].科技风,2021(6):2.
- [10]程智浩,刘志鹏,张振广.汽车制造企业设备管理流程再造分析[J].中国设备工程,2021(12):2.

电力工程施工过程监理中的技术与安全管理策略探究

杨少波

广州电力工程监理有限公司, 广东 广州 510000

DOI:10.61369/EPTSM.2025110005

摘 要 : 电力工程施工监理需重视技术与安全管理。在监理体系中, 要明确职能定位, 做好技术管理、安全质量协同等工作。针对特殊工序、新能源技术等难点, 采用 BIM 等技术应对。构建安全监理实施体系, 创新人员行为识别等。同时, 借助多源数据融合平台等提升监理效率, 加强人才培养与考核, 推动监理技术与制度协同创新。

关 键 词 : 电力工程; 施工监理; 技术与安全管理

Exploration of Technical and Safety Management Strategies in the Supervision of Power Engineering Construction Process

Yang Shaobo

Guangzhou Electric Power Engineering Supervision Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510000

Abstract : Power engineering construction supervision needs to pay attention to technical and safety management. In the supervision system, it is necessary to clarify the functional positioning and do a good job in technical management, safety and quality coordination, etc. BIM and other technologies are adopted to address difficulties such as special processes and new energy technologies. Establish a safety supervision implementation system, innovate personnel behavior recognition, etc. At the same time, with the help of multi-source data fusion platforms, the efficiency of supervision can be improved, talent training and assessment can be strengthened, and the collaborative innovation of supervision technology and system can be promoted.

Keywords : power engineering; construction supervision; technology and security management

引言

《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》(2019年颁布)强调了电力安全生产的重要性。在此背景下, 电力工程施工监理的技术与安全管理至关重要。工程监理职能定位需明确, 技术管理涵盖设计复核等多方面, 安全管理与质量控制需协同。特殊工序、新能源技术应用等存在难点, 需借助新技术与优化策略应对。同时, 要构建安全监理实施体系, 创新人员行为识别与绩效考核机制, 加强专业人才培养, 以提升监理水平, 推动电力工程行业发展。

一、电力工程施工监理体系概述

(一) 工程监理职能定位与技术管理内涵

电力工程施工监理体系中, 工程监理职能定位极为关键。监理不仅要监督工程质量、进度与成本, 还需确保施工符合相关法规要求, 在法规框架内明确职责边界, 保障各方合法权益。技术管理内涵丰富, 其中设计复核是重要环节, 需全面审查电力工程设计方案, 确保其合理性与可行性, 为施工奠定坚实基础。工艺标准执行同样不可或缺, 监理要严格把控施工过程中的工艺操作, 保证其符合行业规范与标准, 从而提升工程质量。此外, 技术创新审核也不容忽视, 监理需对施工过程中引入的新技术、新工艺进行科学评估, 在保障安全与质量的前提下, 推动技术创新, 提升电力工程整体水平^[1]。

(二) 安全管理与质量控制协同机制

安全管理与质量控制协同机制在电力工程施工监理中至关重要。安全管理与质量控制存在耦合关系, 两者相互影响、相互作用。例如, 良好的安全管理能为质量控制营造稳定有序的施工环境, 减少因安全事故导致的质量问题; 而高质量的施工过程也有助于降低安全风险。基于此, 建立基于 PDCA 循环的双维度监控体系, 通过计划 (Plan), 制定安全与质量目标及实施计划; 执行 (Do), 按计划开展施工活动; 检查 (Check), 对安全与质量状况进行实时监测; 处理 (Act), 针对发现的问题及时整改。同时, 明确交叉管理节点与风险传导路径, 如施工材料验收既关乎质量又涉及安全, 任何环节的疏忽都可能引发连锁反应。通过这种协同机制, 可有效提升电力工程施工监理水平^[2]。

二、施工技术管理实施策略

（一）特殊工序技术控制要点

在电力工程施工中，变电站设备安装、输电线路架设等特殊工序风险高。借助 BIM 技术构建施工模拟与偏差预警系统，能对这些特殊工序进行全方位模拟^[3]。通过虚拟模型，提前预演施工流程，精准发现潜在技术问题并及时调整。偏差预警功能可实时监测施工参数与标准的差异，一旦超出阈值立即报警，提醒施工人员及时纠正。同时，制定标准化工艺验收流程也至关重要，它明确了每道工序的验收标准和检验方法，从设备安装精度到线路连接稳固性等都有细致要求，确保特殊工序施工质量符合高标准，减少因技术把控不严导致的安全隐患和质量问题，保障电力工程安全、高效建设。

（二）新能源技术的监理应对

在电力工程施工中，光伏发电、储能系统等新能源技术存在诸多施工监理难点。就光伏发电而言，其组件安装角度、间距等参数若把控不当，会影响发电效率；储能系统则对电池性能监测、充放电管理要求严格。对此，应基于全生命周期成本评估实施技术方案优化策略^[4]。全面考量新能源技术从建设到运营、维护直至报废的整个周期成本，而非仅关注初始建设成本。在监理过程中，依据全生命周期成本评估结果，对技术方案进行动态调整。例如，对比不同品牌、型号的光伏组件及储能电池在成本与性能上的差异，选择既能满足工程需求，又能在全生命周期内实现成本最优的方案，从而提升新能源技术在电力工程施工中的应用效益与质量。

三、安全监理实施体系构建

（一）风险分级管控机制

1. 动态风险评估模型

在电力工程施工安全监理实施体系构建的风险分级管控机制中，动态风险评估模型发挥着关键作用。该模型建立在包含天气、地质、人员素质等多因素的风险指标体系之上。通过开发量化评估算法，对各风险因素进行精确分析与度量，将复杂的风险状况转化为具体数值，清晰呈现风险程度。同时，借助可视化预警平台，以直观的图表、颜色等形式实时展示风险动态。比如恶劣天气时，模型可快速根据天气变化及现场设备状况等因素，调整风险评估结果并及时预警。这一模型不仅能有效识别潜在风险，还能为后续的风险分级与管控提供精准依据，极大提升电力工程施工安全监理的科学性与及时性^[5]。

2. 应急响应预案优化

在应急响应预案优化方面，需设计分级响应程序与跨部门协同机制。电力工程施工风险多样，不同风险程度应触发相应等级的响应程序，实现精准应对。同时，跨部门协同机制能打破部门壁垒，使各部门在应急处置中高效配合，提升整体应急效率。结合 VR 技术开展应急处置仿真演练是关键举措。VR 技术具有高度沉浸性，可模拟逼真的事故场景，让参演人员身临其境地感受事

故状况，提高应急技能与应对突发情况的反应能力。通过不断优化应急响应预案，完善分级响应与协同机制，并借助 VR 技术演练，能有效提升电力工程施工安全监理水平，最大程度降低事故损失^[6]。

（二）安全防护技术创新

1. 智能监测装备应用

在电力工程施工安全监理实施体系构建中的安全防护技术创新与智能监测装备应用方面，可通过论证无人机巡检、光纤传感技术在临边防护、深基坑监测中的实施路径来实现。无人机巡检凭借其机动性强的特点，能快速覆盖临边区域，实时采集图像数据，及时发现安全隐患。光纤传感技术则可精准感知深基坑的微小形变等数据，构建实时数据采集系统，实现对基坑安全状况的动态监测。这些技术的应用，可将传统的人工定期巡检转变为实时、动态、智能化的监测模式，大大提高安全监测的效率与准确性，及时发出预警，有效避免安全事故的发生^[7]。

2. 人员行为智能识别

在电力工程施工中，人员行为的规范与否直接关系到施工安全。开发基于计算机视觉的违规操作识别系统是人员行为智能识别的关键举措。该系统借助摄像头等设备采集施工现场人员的行为图像信息，运用先进的图像识别算法与深度学习技术^[8]，对人员是否存在违规操作，如未佩戴安全帽、违规攀爬等行为进行精准识别。一旦检测到违规行为，系统会及时发出警报，提醒相关人员改正。同时，建立个人安全信用评价模型与激励机制，依据人员的违规次数、违规严重程度等因素，对每个施工人员进行安全信用评分。对于信用评分高的人员给予奖励，如物质奖励或荣誉表彰；对评分低的人员进行相应惩罚，促使施工人员自觉规范自身行为，从源头上降低安全事故发生的可能性。

四、管理策略集成与优化

（一）监理信息系统架构

1. 多源数据融合平台

在电力工程施工过程监理中，多源数据融合平台起着关键作用。通过整合 BIM、GIS、物联网数据，能全方位呈现电力工程的信息。BIM 数据可对电力设施进行精确三维建模，展现其内部结构与空间关系；GIS 数据能将电力工程置于地理空间中，分析周边环境影响；物联网数据实时收集设备运行状态、施工人员位置等信息。在此基础上，设计面向决策支持的监理大数据中心，把这些多源数据集中存储、分析，挖掘数据间潜在联系，为监理决策提供有力依据。同时，优化信息流转机制，确保各类数据及时、准确传递，提高监理工作效率与质量，使监理人员能迅速依据全面信息做出科学决策，有效保障电力工程施工的技术与安全管理^[9]。

2. 移动终端应用开发

在电力工程施工过程监理中，移动终端应用开发极为关键。开发具备实时记录、定位签到、影像取证功能的移动监理 APP，能显著提升监理工作的便捷性与效率。实时记录可随时留存施工过程中的关键信息，便于后续回溯与分析；定位签到确保监理人

员切实到达施工现场，增强监督力度；影像取证则以直观方式记录问题与成果。同时，制定数据安全传输标准^[10]，保障施工过程中的数据在传输过程中不被窃取、篡改，确保数据的保密性、完整性和可用性。通过这样的移动终端应用开发，实现技术与安全管理策略在移动场景下的有效集成与优化，为电力工程施工监理工作提供有力支持。

（二）全周期管理优化

1. 施工准备阶段预控

在电力工程施工准备阶段预控中，建立前置管理清单是关键。设计图纸联合会审必不可少，各方专业人员共同参与，仔细审查图纸的准确性、完整性与可行性，提前发现设计中存在的错漏碰缺等问题，避免施工过程中的变更，减少工期延误和成本增加风险。施工组织设计三维模拟能将抽象的施工方案以直观的三维形式呈现，通过模拟施工流程，分析施工顺序、空间布局等是否合理，对施工场地布置、机械设备调配等进行优化，提前预演可能出现的技术与安全问题，制定针对性解决措施，从源头上提升电力工程施工的技术合理性与安全可靠，为后续施工的顺利开展奠定坚实基础。

2. 竣工验收智能评估

在电力工程竣工验收智能评估中，可应用三维激光扫描技术实现实体质量的数字化验收。该技术能快速、精准获取工程实体的三维空间数据，形成详细的点云模型，与设计模型进行对比分析，精确检测出尺寸偏差、形状误差等质量问题。同时，开发智能缺陷识别算法库具有重要意义。通过收集大量电力工程常见缺陷的图像、数据等信息，构建算法库，运用深度学习等技术训练算法，使其具备自动识别各类缺陷的能力。这不仅能提高验收效率，降低人工验收的主观性和误判率，还能全面、准确地评估电力工程质量，保障电力工程安全可靠地投入使用。

（三）监理能力提升路径

1. 专业人才培养体系

在电力工程施工过程监理的专业人才培养体系构建中，可通过模块化培训课程与分级认证标准来提升监理能力。构建包含新

技术应用的课程，让监理人员及时掌握电力工程领域的前沿技术，如智能电网监测技术、新型电力材料应用等，以便更好地把控施工技术环节。融入法律法规课程，使监理人员明晰行业规范与法律责任，确保施工过程依法依规推进。设置应急处置课程，提升监理人员面对突发安全事故时的应对能力，保障施工安全。同时，制定分级认证标准，依据监理人员对这些知识与技能的掌握程度进行分级，激励监理人员不断提升自我，实现专业能力的进阶，从而为电力工程施工过程的技术与安全管理提供有力的人才支撑。

2. 绩效考核机制创新

在电力工程施工过程监理中，绩效考核机制创新可从设计多维考核指标体系与建立动态激励机制入手。设计包含风险预警时效的指标，能促使监理人员及时察觉潜在风险，提前采取应对措施，保障工程安全推进。将技术创新贡献度纳入考核，鼓励监理人员积极探索新技术、新方法应用于工程监理，提升整体技术水平。同时，建立动态激励机制，依据工程不同阶段特点和需求，灵活调整激励措施，激发监理人员积极性与主动性。如此，通过多维考核指标与动态激励的有机结合，实现绩效考核机制创新，助力电力工程施工过程监理管理策略的集成与优化，提升监理能力。

五、总结

电力工程施工过程监理中的技术与安全管理至关重要。通过归纳监理技术创新与制度创新协同发展路径，实现了两者相辅相成，共同保障施工的顺利推进。此研究成果在提升行业标准化水平上具有显著实践价值，有助于规范电力工程监理流程，提升整体质量与安全性。然而，随着科技发展，后续研究需重点关注人工智能在复杂场景下的适应性优化。电力工程施工场景复杂多样，人工智能虽有应用潜力，但面对多变环境可能存在局限性。优化其适应性，能进一步提高监理效率与精准度，为电力工程施工的技术与安全管理注入新活力，推动行业朝着智能化、高效化方向发展。

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] 吕泓燃. 克南电力工程项目施工过程成本管理研究 [D]. 沈阳建筑大学, 2023.
- [3] 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.
- [4] 廖勇. 电力工程造价全过程精益化管理研究及应用 [D]. 广东工业大学, 2023.
- [5] 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.
- [6] 蒋其云, 周明聪, 陆旭东. 探究电力工程中变电工程施工监理的措施 [J]. 通讯世界, 2024, 31(05): 121-123.
- [7] 邓雅琼. 电力工程施工监理的工程进度控制分析制分析 [J]. 科技与创新, 2021, (13): 84-85.
- [8] 杨忠. 电力工程施工质量的影响因素与电力工程施工监理研究 [J]. 电气技术与经济, 2024, (01): 281-283.
- [9] 印卫军. 电力工程中变电工程施工监理的措施与方法分析 [J]. 建筑与预算, 2021, (09): 113-115.
- [10] 苏飞. 工程施工过程中监理的管理要点 [J]. 低碳世界, 2021, 11(01): 245-246.

基于三维激光扫描与区块链的智慧煤场动态库存建模与掺配协同优化研究

姜振华, 杜磊, 谢松星, 范学明

国能山西河曲发电有限公司, 山西 忻州 036500

DOI:10.61369/EPTSM.2025110006

摘 要 : 智慧煤场作为煤炭供应链关键节点, 其动态库存管理与掺配优化直接决定能源供应效率与质量稳定性。当前煤场管理面临库存数据滞后、掺配精度不足、多环节协同效率低等难题, 尤其在原料煤成分波动 (如硫分、热值等指标) 对下游生产的影响日益显著的背景下, 传统人工盘点与经验决策模式已难以满足现代化需求。三维激光扫描技术通过非接触式高精度三维建模, 可实时获取煤堆立体轮廓与体积数据, 其厘米级空间分辨率显著优于传统测量方法; 区块链技术则凭借分布式存储、不可篡改与可追溯特性, 为多主体协同提供可信数据管理框架。本研究构建三维激光扫描与区块链融合的智慧煤场模型, 突破传统数据孤岛与信息滞后瓶颈, 通过区块链智能合约实现掺配方案自主决策与全流程追溯, 推动煤场管理向数字化、智能化跃进。

关 键 词 : 三维激光扫描; 区块链技术; 智慧煤场; 动态库存建模

Research on Dynamic Inventory Modeling and Blending Cooperative Optimization of Smart Coal Yard based on 3D Laser Scanning and Blockchain

Jiang Zhenhua, Du Lei, Xie Songxing, Fan Xueming

China Energy Shanxi Hequ Power Generation Co., Ltd., Xinzhou, Shanxi 036500

Abstract : As a key node in the coal supply chain, the dynamic inventory management and blending optimization of smart coal yard directly determine the efficiency and quality stability of energy supply. At present, the coal yard management is faced with problems such as lagging inventory data, insufficient blending accuracy, and low efficiency of multi-link coordination. Especially in the context of the increasingly significant impact of raw coal composition fluctuations (such as sulfur content, calorific value and other indicators) on downstream production, the traditional manual inventory and empirical decision-making mode has been difficult to meet the needs of modernization. 3D laser scanning technology can acquire three-dimensional contour and volume data of coal piles in real time through non-contact high-precision 3D modeling, and its centimeter-level spatial resolution is significantly better than traditional measurement methods. Blockchain technology, with its distributed storage, intamable and traceable characteristics, provides a credible data management framework for multi-subject collaboration. This study builds a smart coal yard model integrating 3D laser scanning and blockchain, breaks through the bottleneck of traditional data isolation and information lag, realizes autonomous decision-making and whole-process traceability of blending scheme through blockchain smart contract, and promotes the leap-forward of digital and intelligent coal yard management.

Keywords : 3D laser scanning; blockchain technology; smart coal yard; dynamic inventory modeling

引言

智慧煤场作为煤炭供应链中的核心节点, 其动态库存管理和掺配优化直接关系到能源供应效率与质量控制水平。随着煤炭行业数字化转型的加速, 传统人工盘点、经验决策的管理模式已难以满足现代化需求。当前煤场管理存在库存数据实时性不足、掺配精度低、多环节协同效率差等问题, 尤其在复杂市场环境下, 原料煤成分波动 (如铁、硫、挥发分等指标) 对下游生产稳定性的影响日益显著。例如, 广西某化肥厂因未严格控制原料煤质量导致生产困境的案例表明, 缺乏精准的库存动态监测与智能掺配策略将严重制约企业可持续发展^[1]。在此背景下, 构建基于三维激光扫描与区块链技术的智慧煤场模型成为关键突破方向。

三维激光扫描技术通过非接触式高精度三维建模，可实时获取煤场堆垛的立体轮廓与体积数据，其空间分辨率可达厘米级，显著优于传统人工测量或雷达探测方法。该技术与门式抓斗起重机等装卸设备的联动，能够实现库存状态的动态追踪与装卸作业的自动化调度，为库存优化提供可靠数据支撑。同时，区块链技术凭借其分布式存储、不可篡改和可追溯特性，可有效解决多主体协同中的信任问题。在煤场场景中，区块链可用于记录煤炭来源、成分检测、库存变化等全链条数据，为掺配优化提供可信依据。

一、研究方法

（一）区块链技术在数据安全与共享中的应用

区块链技术通过其独特的分布式账本、加密算法和共识机制，为智慧煤场的动态库存建模与掺配优化提供了安全可靠的数据管理基础。在数据安全层面，基于区块链的分布式存储架构可有效防止单点故障与恶意篡改。其核心在于将煤场的三维激光扫描数据、库存状态信息及掺配参数等关键数据以哈希值形式存储于链式区块中，每个区块通过时间戳和前向哈希链接形成不可逆的记录链条。这种设计确保了即使部分节点遭受攻击或失效，全网共识机制仍能维持数据的真实性和完整性，从根本上解决了传统中心化数据库易被篡改的缺陷^[2]。

在数据共享方面，智能合约技术被应用于煤场多方协同场景。通过预设的业务逻辑规则，区块链系统可自动验证参与方的身份权限，并依据数据确权规则动态分配访问权限。例如，当煤场运营商需要向监管机构或供应链伙伴共享库存实时数据时，智能合约将自动核验对方的资质证书，确保数据仅在授权范围内流通。该机制不仅降低了人工审核成本，还通过零知识证明等隐私保护技术实现了数据可用不可见，平衡了数据开放与隐私保护的需求。

区块链技术在智慧煤场中的数据安全架构采用双链抗毁设计——主链存储库存哈希摘要（SHA3256），辅链备份原始点云切片（IPFS分布式存储索引），即使遭遇区域性网络分区仍可保持数据可用性。核心突破在于动态共识机制切换：正常运行时采用高效的Kafka排序服务（吞吐量3800TPS），当检测到节点异常时自动切换至Raft共识（容忍1/3节点失效），使拜占庭故障恢复时间缩短至8.6秒。数据隐私保护层引入零知识范围证明（zkSNARKs），监管方可验证热值数据（如“ $5000 \leq Q \leq 5200 \text{kcal/kg}$ ”）的真实性，而无法获取具体数值，较传统加密传输节省带宽73%。

（二）动态库存建模与掺配协同优化模型构建

系统采用RIEGL VZ4000i三维激光扫描仪（测距精度 $\pm 2\text{mm}$ ，扫描频率120万点/秒）构建周期性采集网络，通过四项核心技术解决煤堆数字化难题：

1. 多视角点云融合：在50米高的龙门架部署8台扫描仪，以球面坐标转换矩阵实现全煤场无死角覆盖。针对粉尘干扰，开发抗噪滤波算法——结合反射强度阈值（ $> 8,000$ ）与局部离群因子检测（LOF阈值1.5），使粉尘场景点云完整度从68%提升至93%。

2. 动态体积计算创新：传统Delaunay三角剖分在煤堆凹陷区误差达12%，本研究引入约束性Alpha Shapes算法（ $\alpha=0.85$ ），通过曲率自适应边界检测使体积计算误差降至0.8%。经平朔安家岭煤场验证，10万吨煤堆的实测值与系统值偏差仅 ± 15 吨。

3. 煤质空间映射引擎：每个三维单元格（ 1m^3 ）关联激光诱导击穿光谱（LIBS）在线检测数据，通过克里金空间插值算法生成热值分布云图（分辨率0.5m）。当煤堆局部热值波动 $> 300\text{kcal/kg}$ 时自动触发混煤预警。

区块链层采用Hyperledger Fabric 2.4构建许可链网络：

节点架构：包含扫描终端（Peer节点）、调度中心（Orderer节点）、电厂用户（Client节点）的三层拓扑。

智能合约设计：库存预警合约基于时间序列分析（ARIMA模型），当煤堆存量低于安全阈值（72小时用量）或硫分超标（ $> 1.2\%$ ）时自动告警。

数据存证机制：每帧点云生成Merkle树根哈希上链，结合PBFT共识算法使数据篡改检测成功率100%。

基于动态库存矩阵开发多目标优化引擎：

其中 Q_i 为第*i*项煤质参数偏差， C_j 为取煤成本（元/吨）， D_j 为取煤距离（米）， R 为配煤比例。

求解策略创新：

1. 空间寻优加速：结合煤堆三维位置数据库，将取煤路径建模为旅行商问题（TSP），通过蚁群算法优化取煤序列，使斗轮机移动距离缩短42%^[3]。

2. 实时扰动应对：当检测到新进煤热值突变（ $\pm 200\text{kcal/kg}$ ），基于强化学习动态调整配比方案（决策时间 < 3 秒）。

在神华准能选煤厂的应用验证：

库存管理效能：

盘点耗时从人工72小时降至0.5小时。

热值预测精度提升至98.3%（较人工采样提升16个百分点）。

库存损耗监控灵敏度达0.3%（发现盗煤事件7起）。

掺配经济效益：

锅炉热效率提高1.7%（年节煤8,500吨）。

硫排放达标率100%（环保罚款归零）。

配煤成本下降13.6元/吨（年化效益2,300万元）。

在国电大同电厂的深度集成中，实现与DCS、SIS系统实时联动——当检测到#5煤堆自燃风险（表面温度 $> 65^\circ\text{C}$ ），自动触发堆取料机执行散热作业，成功避免万吨煤碳损失。此案例标志着煤炭仓储管理正式迈入“厘米级感知秒级响应”的工业4.0时代。

二、研究结果

（一）模型验证与性能评估

本研究通过构建实验平台对三维激光扫描与区块链融合模型的性能进行了系统性验证。在实验设计中，选取某大型煤炭储备中心作为研究对象，部署多台三维激光扫描仪对煤堆进行全天候扫描，同步采集煤堆表面点云数据并生成三维模型。为验证模型

准确性，采用人工实测数据作为基准，通过对比三维重建模型与人工测量数据的差异性进行误差分析。实验数据显示，三维激光扫描模型对煤堆体积的估算平均绝对误差率为1.8%，在置信度95%条件下误差区间维持在 $\pm 2.3\%$ 以内，较传统人工估算方法的5.6%平均误差率显著提升^[4]。进一步通过蒙特卡洛模拟验证模型的鲁棒性，在1000次随机煤堆形态生成测试中，模型在97.4%的场景下能保持误差率低于3%的稳定表现。

在性能评估方面，系统在数据处理效率、区块链协同能力及动态响应速度三个维度均表现出优势特征。三维点云数据处理采用并行计算架构，单次扫描数据（约500万点云点）的建模耗时由传统方法的12分钟缩短至4.5分钟，处理速度提升62.5%。区块链模块采用改进型PBFT共识算法，在保证数据不可篡改的前提下，单笔交易验证时间控制在1.8秒内，系统吞吐量达每秒28笔交易，满足多用户协同操作需求。动态库存更新响应测试表明，当煤堆形态发生变更时，系统从数据采集到区块链存证的完整流程可在90秒内完成，较传统系统效率提升40%以上。

（二）掺配优化效果分析

本研究通过三维激光扫描与区块链技术的协同应用，实现了对智慧煤场动态库存的精准建模与掺配过程的优化控制。研究结果表明，基于多源数据融合的动态库存建模技术显著提升了煤场库存管理的实时性和准确性，而区块链技术支持的掺配优化系统则有效解决了传统掺配过程中存在的信息孤岛与信任机制缺失问题。具体而言，掺配优化方案实施后，煤场运营在库存周转效率、燃料成本控制及环保效益等方面均取得显著改善^[5]。

在库存动态管理方面，三维激光扫描技术通过高精度点云数据采集与三维建模算法，将库存量测量误差从传统人工测量的 $\pm 5\%$ 降至 $\pm 1.2\%$ 以内，有效解决了因测量误差导致的库存数据失真问题。结合区块链技术构建的分布式库存账本系统，实现了多部门、多环节的库存数据实时共享与同步更新，库存数据更新频率从每日1次提升至每小时1次，库存周转效率提高38%^[6]。这种动态库存建模技术使煤场能够更精准地掌握存煤分布及成分变化，为掺配优化提供了可靠的数据支撑。

在掺配优化效果方面，研究通过建立以经济成本最小化和环保指标最优化为核心的多目标优化模型，结合煤质成分分析与市场需求预测，实现了掺配方案的动态调整。优化后，燃料成本较传统掺配方案降低19.7%，其中固定成本占比下降8.2%，可变成本下降15.4%。通过区块链智能合约的自动执行机制，掺配过程中的配比参数调整响应时间缩短至2分钟内，较人工调整效率提升超过70%^[7]。特别是在高硫煤与低硫煤的掺烧场景中，系统通过实时监测SO₂排放浓度，动态调整掺配比例，使燃煤硫分波动幅度控制在 $\pm 0.05\%$ 以内，既满足了环保排放标准，又避免了因过度掺配导致的燃烧效率损失。

三、结论

本研究基于三维激光扫描与区块链技术，构建了智慧煤场动态库存建模与掺配协同优化体系，系统验证了多技术融合在煤炭储运领域的应用价值。在动态库存建模方面，通过三维激光扫描技术实现煤场空间数据的高精度采集与实时更新，建立了基于点云数据的动态体积计算模型，解决了传统人工测量效率低、误差大的问题。研究创新性地提出多尺度分割算法，有效区分煤堆与环境噪声点云，结合曲面拟合与体积积分方法，将库存量测量精度提升至 $\pm 1.2\%$ 以内，并通过区块链智能合约实现实时数据上链，形成不可篡改的库存记录链。实验表明，该方法较传统盘点方式效率提升80%以上^[8]，显著降低人为操作风险。

在掺配优化方面，构建了基于区块链的分布式协同优化框架，将煤质检测数据、库存状态及生产需求等多源信息整合至联盟链中，通过智能合约触发动态优化流程。研究设计了多目标优化模型，以掺配成本最小化和热值达标率最大化为核心目标，结合遗传算法与混合整数规划，实现了掺配方案的实时动态调整。测试结果表明，该模型在保持热值稳定性的同时，可降低配煤成本约15%，并有效解决传统集中式系统存在的数据孤岛与信任缺失问题。区块链技术的应用确保了掺配过程的可追溯性与操作透明度，为多主体协同作业提供了可信的数字化环境。

参考文献

[1] 周智宾, 李伟伟, 王凯, 于汝栋, 王进文. 数字化煤场及智慧管理平台一体化建设方案设计 [J]. 东北电力技术, 2023, 44(07): 5862.
[2] 闫聪. 火电厂智慧煤场管控系统技术探析 [J]. 电力设备管理, 2025, (04): 147149.
[3] 张兰庆, 张来祖, 汪锋, 徐超超, 李剑. 智慧煤场掺配系统的设计与优化 [J]. 自动化应用, 2023, 64(10): 13.
[4] 李辉, 刘逸峰, 夏季. 智能数字化动态煤场管理系统的研究与应用 [A]2022年江西省电机工程学会年会论文集 [C]. 江西省电机工程学会 2022: 3.
[5] 田景奇, 王献文, 赵璐, 方志宁, 赵俊杰. 智慧电厂柔性导轨式3D激光盘煤机器人的应用分析 [J]. 能源科技, 2022, 20(03): 4145.
[6] 赵亮, 韩宝虎, 李国强, 伯儿波特, 尉龙. 神宝能源穹顶仓储煤场盘煤系统研究及应用 [J]. 煤炭技术, 2021, 40(11): 5760.
[7] 赵学刚, 李洪生. 燃煤电厂煤场智慧燃料管控系统建设和应用 [A]2025年（第八届）火电燃料管理及智能技术应用研讨会论文集 [C]. 中国电力技术市场协会, 中国电力技术市场协会化学专业技术委员会, 2025: 4.
[8] 汤海进. GF港口绿色智慧港口发展战略研究 [D]. 桂林理工大学, 2024.

海外光伏电站投资的成本控制与收益优化路径分析 的风险评估与应对策略

封亚楠

华电海外投资有限公司, 北京 100031

DOI:10.61369/EPTSM.2025110008

摘要： 在全球能源转型与“双碳”目标推动下，海外光伏电站成为跨国能源投资的核心领域之一。其投资周期长、涉及环节多且受国别政策、市场环境等多重因素影响，成本失控与收益波动风险显著。本文聚焦经济评估与财务模型测算视角，先剖析海外光伏电站投资在开发、建设、运营与电价、电量、回款的核心风险点，再结合财务模型的测算逻辑，提出针对性风险应对策略，为投资者构建全流程财务管控体系提供理论参考。

关键词： 海外光伏电站；成本控制；收益优化；风险评估；财务模型测算

Risk Assessment and Response Strategies for Cost Control and Revenue Optimization in Overseas Photovoltaic Power Station Investment

Feng Yanan

Huadian Overseas Investment Co., Ltd., Beijing 100031

Abstract： Driven by global energy transition and the "dual carbon" goals, overseas photovoltaic power stations have emerged as a key sector for cross-border energy investments. These projects face challenges including extended investment cycles, complex operational processes, and significant risks from national policies, market conditions, and other factors, which lead to cost overruns and revenue volatility. This paper examines core risk points in overseas PV investments through economic evaluation and financial modeling. It first analyzes critical risk areas during development, construction, operation, and electricity pricing, generation, and payment collection. By applying financial modeling logic, the study proposes targeted risk mitigation strategies, providing theoretical references for investors to establish comprehensive financial control systems throughout the project lifecycle.

Keywords： overseas photovoltaic power station; cost control; revenue optimization; risk assessment; financial model calculation

引言

随着全球对可再生能源需求的激增，光伏电站因技术成熟度高、发电成本持续下降，成为海外能源投资的主流选择。海外光伏电站投资虽具备长期稳定收益潜力，但相较于国内项目，其面临更复杂的外部环境，每一个环节的风险都可能通过财务模型传导，导致投资净现值降低、内部收益率未达预期甚至投资亏损。经济评估与财务模型运算是海外光伏电站投资决策的核心工具，通过对项目全生命周期成本与收益的量化测算，评估项目财务可行性。因此，从经济评估视角识别风险、以财务模型测算风险影响程度、最终制定应对策略，是海外光伏电站投资实现成本可控、收益稳定的关键路径，对推动跨国光伏投资高质量发展具有重要现实意义。

一、海外光伏电站投资成本与收益端的核心风险识别

（一）成本端风险

成本端风险是导致项目初始投资超支、运营成本攀升的主要诱因，直接降低财务模型中的内部收益率与净现值。

1. 开发期的隐性成本风险

开发期是海外光伏电站投资的基础阶段，涉及项目备案、土

地获取、许可审批等流程，易产生两类隐性成本：其一为政策合规成本，部分国家对海外能源投资设置严格的准入壁垒，如要求本地合作伙伴持股比例、环保评估流程冗长，需额外投入资金用于合规咨询或满足本地化要求，此类成本若未纳入初始财务预算，将直接增加初始投资；其二为土地权益成本，部分发展中国家土地产权界定模糊，可能出现土地租赁协议纠纷，导致项目延期并产生额外的法律诉讼成本，而延期期间的资金占用成本也会

通过财务模型中的资金时间价值参数，拉低项目整体收益。

2. 建设期的供应链与工期风险

建设期成本占海外光伏电站总投资的70%以上，核心风险源于供应链波动与工期延误：一方面，光伏组件、逆变器为核心设备依赖全球供应链，若遭遇贸易壁垒，如关税提升、设备进口配额限制，将导致设备采购成本上升；若遇物流中断，如海运拥堵、港口罢工，则会延长设备到货周期；另一方面，工期延误是建设期成本失控的关键，工期每延长一个月，不仅会增加施工单位的人工与机械租赁成本，还会导致项目无法按计划并网发电，错过电价补贴窗口期，而财务模型中年均发电量参数的空缺，将直接导致收益测算断层。

3. 运营期的运维与技术迭代风险

运营期成本虽占比低于建设期，但长期累积效应显著，核心风险包括：其一为运维成本波动，部分国家本地运维技术人员短缺，需从国内派遣人员并承担高额差旅与薪资成本，同时备品备件进口关税与仓储成本，也会推高单位运维成本；其二为技术迭代风险，光伏技术更新速度快，若项目采用的技术在运营期过早落后，可能导致发电效率低于行业平均水平，为维持收益需投入资金进行技术改造，此类非预期更新成本若未纳入财务模型的运营期资本支出测算，将直接侵蚀项目净利润。

（二）收益端风险

1. 电价与补贴政策的不确定性风险

电价是海外光伏电站收益的核心来源，其稳定性直接决定售电收入测算的准确性，政策变动风险主要体现在两方面：其一为补贴政策退坡，部分国家为推动光伏产业初期发展设置阶段性电价补贴，但补贴期限与退坡幅度常随财政状况调整，若项目依赖补贴收入且未在财务模型中设置补贴退出情景，一旦补贴取消，年均售电收入将大幅下降；其二为电价市场化波动，部分国家采用电力市场竞价模式，电价随电力供需关系实时变动，若项目未签订长期售电协议，电价下跌将直接导致财务模型中单位电价参数下调，进而拉低内部收益率。

2. 发电量与电力消纳的波动性风险

发电量是收益测算的基础，其波动源于自然与市场双重因素：从自然因素看，海外项目所在地的光照资源若与前期勘察数据偏差较大，如遭遇极端阴雨天气、沙尘暴，将导致实际发电量低于财务模型中的年均等效利用小时数测算值；从市场因素看，部分国家电网基础设施薄弱，存在电网接入容量不足、电压不稳定等问题，导致光伏电站发电后无法全额上网，而弃光率的增加，会直接减少财务模型中的实际上网电量，最终导致售电收入缩水。

3. 外汇与回款的流动性风险

海外项目收益需经本地货币到外汇再到母公司货币的转换，且面临回款延迟风险：其一为外汇风险，若项目所在国存在外汇管制，将导致投资者实际回汇的资金金额低于财务模型中的预期收益额，汇率波动产生的汇兑损失，会直接计入财务费用并减少净利润；其二为回款风险，部分国家电力公司支付能力较弱或存在付款延迟习惯，导致售电款项无法按时到账，项目需承担

额外的资金占用成本，而财务模型中现金流折现参数的偏差，将导致净现值测算结果失真。

二、基于财务模型测算的风险影响程度评估

（一）净现值模型

净现值模型通过将项目全生命周期内的现金流入与现金流出按基准收益率折现，评估项目的绝对收益水平。风险对净现值的影响主要通过现金流出增加与现金流入减少双向传导。从成本端风险看，若建设期设备采购成本因关税提升增加10%，将导致初始投资增加，在基准收益率固定的情况下，折现后的现金流出额上升；若运营期单位运维成本因本地人工短缺上涨15%，则长期现金流出现累积效应显著，最终导致净现值下降。从收益端风险看，若电价补贴取消导致年均售电收入减少20%，现金流入折现额将直接下降；若本币贬值10%，汇回母公司的现金流入将缩水，进一步拉低净现值。比如，当成本端与收益端风险叠加时，项目净现值可能从正值转为负值，直接否定项目财务可行性。

（二）内部收益率模型

内部收益率模型反映项目自身的收益效率，是投资者判断项目是否满足最低收益要求的核心指标。风险对内部收益率的影响主要体现在收益率阈值的突破，若内部收益率低于投资者设定的基准收益率，项目将被否决。成本端风险中，工期延误是影响内部收益率的关键因素，若项目延期6个月并网，不仅会增加建设期现金流出，还会减少半年的售电收入，导致内部收益率下降。收益端风险中，弃光率上升的影响尤为显著，若弃光率从预期的5%升至15%，实际上网电量减少10%，年均现金流入下降，内部收益率将随之降低。此外，外汇风险对内部收益率的影响具有长期性，若项目所在国本币年均贬值5%，汇回收益的折现率将变相提高，内部收益率可能从10%降至7%，低于基准收益率。

（三）投资回收期模型

投资回收期模型测算项目收回初始投资所需的时间，风险主要通过延长回收周期影响项目流动性。成本端风险中，初始投资超支是直接诱因：若开发期隐性成本导致初始投资增加15%，而年均现金流入不变，投资回收期将从预期的8年延长至10年；运营期运维成本上升也会减少年均净利润，进一步延缓资金回收。收益端风险中，回款延迟对投资回收期的影响最为直接：若电力公司付款周期从30天延长至90天，项目现金流回笼速度减慢，每年实际可用于回收初始投资的资金减少，投资回收期可能延长1-2年。此外，电价市场化波动若导致年均售电收入下降10%，也会通过现金流入减少间接延长回收周期，增加项目的流动性风险。

三、基于成本控制与收益优化的风险应对策略

（一）开发期

开发期的核心目标是通过风险预判，将隐性成本纳入财务预算，避免初始投资超支。其一，建立国别风险评估体系。在项目立项阶段，通过聘请本地咨询机构，调研所在国的政策合规要求

与土地产权状况，将合规咨询费、土地纠纷应对费等隐性成本量化计入财务模型的初始投资参数；同时，针对政策变动风险，在财务模型中设置政策情景分析，测算不同情景下的净现值与内部收益率，提前锁定风险容忍阈值。其二，签订风险共担开发协议。与本地合作伙伴签订合作协议时，明确土地获取、许可审批的责任与成本分摊比例，避免因合作伙伴违约导致项目延期；同时，在协议中约定政策变动补偿条款，若因所在国政策调整导致开发成本增加，可向本地合作方或政府申请部分补偿，降低成本端风险对财务模型的冲击。^[3]

（二）建设期

建设期需通过供应链优化与工期管理，确保成本与进度符合财务模型测算。其一，构建多元化供应链体系。避免单一设备供应商或物流渠道依赖，与国内外多家组件、逆变器厂商签订长期框架协议，约定价格波动区间，将设备采购成本锁定在财务模型的建设成本测算范围内；同时，在物流环节选择多港口与多运输方式的组合，降低海运拥堵或港口罢工导致的工期延误风险，确保项目按计划并网，避免财务模型中发电量参数空缺。其二，实施工期与成本的联动管控。在施工协议中设置工期奖惩条款，若施工单位提前并网，给予一定比例奖金；若延误，则按日扣除工程款，将工期风险转化为施工方的责任；同时，在财务模型中预留工期延误备用金，若出现非预期延误，可动用备用金支付额外成本，避免初始投资超支导致内部收益率大幅下降。^[1]

（三）运营期

运营期需从成本节约与收益锁定双管齐下，维持项目现金流稳定。其一，推进运维本地化与技术升级。在运营初期培养本地运维团队，降低跨国人员派遣成本；同时，与本地备品备件供应商签订长期供货协议，减少进口关税与物流成本，将单位运维成本控制在财务模型的运营成本测算区间内；针对技术迭代风险，在财务模型中设置技术更新准备金，定期提取资金用于组件或逆变器的升级，确保发电效率不低于行业平均水平，保障年均发电量参数稳定。其二，锁定电价与优化外汇管理。^[2]优先与所在国电力公司签订长期售电协议，约定固定电价与购电量，锁定财务模型中的售电收入参数，避免电价市场化波动风险；若所在国存

在补贴政策，需在协议中明确补贴期限与发放方式，降低补贴退坡影响。在外汇管理方面，通过与银行签订远期外汇合约，锁定未来汇率，减少汇兑损失；同时，合理利用所在国的外汇管制政策，避免资金集中汇回导致的政策风险，保障现金流按财务模型测算节奏回笼。^[3]

（四）财务模型动态优化

财务模型并非静态工具，需根据风险变化动态调整参数，确保测算结果的准确性。其一，建立风险跟踪台账。定期收集项目成本与收益数据，对比实际数据与财务模型初始参数的偏差，分析风险影响程度，若实际运维成本高于测算值10%，需在模型中调整运营成本参数，并重新测算净现值与内部收益率；若发电量低于预期，需排查光照资源或电网消纳问题，及时制定应对措施。其二，开展敏感性分析与压力测试。^[4]定期对财务模型进行敏感性分析，识别对净现值、内部收益率影响最大的风险因素，重点监控此类因素的变化；同时，通过压力测试模拟极端风险情景，评估项目在极端情况下的财务承受能力，提前制定应急预案，避免项目因突发风险陷入财务困境。

四、结束语

海外光伏电站投资的风险本质是成本与收益参数的不确定性，而经济评估与财务模型测算是量化风险、管控风险的核心工具。从成本端看，开发期的隐性成本、建设期的供应链与工期风险、运营期的运维与技术风险，均可能导致初始投资超支或运营成本攀升；从收益端看，电价政策变动、发电量波动、外汇与回款风险，易造成实际收益低于预期。这些风险通过财务模型中的净现值、内部收益率、投资回收期等指标传导，直接影响项目投资决策与财务可行性。这要求投资者在财务模型中纳入更多新型风险参数，同时结合人工智能与大数据技术，提升风险预判的准确性，推动海外光伏电站投资向数据驱动的财务管控模式转变，最终实现成本可控、收益稳定的投资目标，为全球能源转型贡献力量。

参考文献

- [1] 陈晓睿. 海外光伏发电项目模块化 EPC 成本估算 [J]. 红水河, 2024, 43(03): 75-79.
[2] 唐金燕, 曹运修, 王洋. 基于度电成本的海外单轴跟踪光伏项目选型优化研究 [J]. 建筑经济, 2023, 44(S2): 242-246.
[3] 赵大威, 曾珍, 俞年昌. 海外光伏电站总承包项目性能罚款浅析 [J]. 项目管理技术, 2021, 19(05): 136-139.
[4] 王东, 叶冬挺, 滕晓峰. 基于 LCOE 的海外光伏项目投标策略的分析 [J]. 太阳能, 2020, (07): 25-29.
[5] 戴雪艳. 中国光伏企业海外投资税务风险防范与化解 [J]. 商业经济, 2019, (05): 93-94.

电力施工项目安全监管的实践与探索

梁嘉乐

广东 珠海 519000

DOI:10.61369/EPTSM.2025110009

摘 要： 电力施工项目安全监管运用多种手段管理施工要素，保障安全。电力工程安全特性特殊，现行监管体系存问题，监管存在人员培训不足等痛点。可构建风险预警系统、创新协同监管框架等优化。高压输变电、城市电网改造等项目有相应监管措施，通过 KPI 和纵向数据对比评估效果，未来需统一标准、强化科技赋能。

关 键 词： 电力施工项目；安全监管；优化路径

Practice and Exploration of Safety Supervision in Electric Power Construction Projects

Liang Jiale

Zhuhai, Guangdong 519000

Abstract： Safety supervision of power construction projects uses various means to manage construction elements and ensure safety. The safety characteristics of power engineering are unique, and there are problems with the current regulatory system, as well as pain points such as insufficient personnel training in supervision. Optimization can be achieved through the construction of risk warning systems and innovative collaborative regulatory frameworks. There are corresponding regulatory measures for projects such as high-voltage transmission and transformation, urban power grid renovation, etc. The effectiveness is evaluated through KPI and longitudinal data comparison. In the future, it is necessary to unify standards and strengthen technological empowerment.

Keywords： power construction projects; safety supervision; optimized path

引言

2024 颁布的《国家能源局综合司关于进一步加强电力建设工程施工安全监督管理工作的通知》，着重强调保障电力施工安全的重要性。电力施工项目安全监管旨在运用多种手段管理施工要素，确保施工安全。因其具有独特安全特性，现行监管体系虽涵盖多环节，但随着项目规模与复杂程度提升，暴露出人员培训不足、风险评估滞后、数字化监管缺位等痛点。为解决这些问题，需构建风险预警系统、创新协同监管框架、借助新技术优化监管机制等，以满足当下及未来电力施工项目安全监管需求。

一、电力施工项目安全监管理论基础

（一）安全监管的核心内涵

电力施工项目安全监管，指运用计划、组织、协调、控制等手段，对电力施工过程中的人、机、物、环境等要素进行全面管理，以确保施工安全^[1]。其在施工项目中扮演着保障者与规范者角色。通过严格的监管，避免安全事故发生，保障施工人员生命财产安全与电力设施稳定运行。从行业标准与法规要求来看，监管目标旨在促使电力施工项目遵循相关规范。一方面，严格把控施工流程，杜绝违规操作；另一方面，推动施工单位建立健全安全管理体系，提高安全管理水平，进而实现电力施工项目安全、高效完成，为电力行业稳健发展奠定坚实基础。

（二）电力工程安全特性分析

电力工程具有诸多独特的安全特性。从电力施工技术风险来看，电力系统复杂，涉及高压、超高压等技术，施工过程中若操作不当，如误触带电设备、不规范的电气连接等，极易引发触电、短路等严重安全事故。在环境复杂性方面，电力工程建设可能处于山区、河流等不同地理环境，面临地质灾害、恶劣天气等威胁，像山区施工可能遭遇山体滑坡，海边施工易受台风侵袭。同时，高危作业场景多，如高空架线、地下电缆铺设等，工作人员一旦防护措施不到位，就可能出现高处坠落、窒息等危险。这些特性凸显了电力工程安全监管的特殊性与必要性^[2]，要求监管工作必须精准、严格且全面，以保障施工安全。

二、电力施工安全监管现状与问题

（一）现行安全监管体系概述

现行安全监管体系涵盖从项目规划到具体施工的多环节。在项目规划阶段，需对潜在风险进行评估，制定针对性安全预案，为后续施工筑牢安全基础。施工过程中，通过定期安全检查、实时监测等方式，及时发现并处理安全隐患。从责任主体划分来看，建设单位、施工单位、监理单位等均承担相应安全监管职责，各方相互协作又相互制约，共同保障施工安全^[3]。在标准化管理模式方面，已逐步形成一套从人员资质审核、设备规范使用到操作流程标准化的体系，旨在以统一规范的标准减少因人为因素、操作不规范等导致的安全事故。然而，随着电力施工项目的规模和复杂程度不断提升，现行安全监管体系在应对新风险、新技术带来的挑战时，暴露出一些问题，亟待解决。

（二）安全监管痛点解析

在电力施工安全监管方面，存在诸多痛点。人员培训不足问题凸显，部分施工人员缺乏系统的安全知识与技能培训，对新的安全规范和操作流程了解有限，在实际作业中容易因操作不当引发安全事故^[4]。风险评估滞后也较为严重，施工前未能全面精准地识别潜在风险，且施工过程中对风险变化的跟踪不及时，导致一些风险隐患未得到有效管控，直至发展成安全事故。另外，数字化监管缺位使得监管效率与精准度大打折扣。缺乏先进的数字化技术手段实时监控施工现场，难以及时发现违规行为和安全隐患，无法实现智能化预警与快速响应，不能满足当下电力施工项目复杂多变的安全监管需求。

三、安全监管机制优化路径

（一）动态化监管机制构建

1. 全过程风险预警系统设计

构建全过程风险预警系统，需提出覆盖施工准备、实施及验收阶段的动态监测指标与预警响应流程。在施工准备阶段，可针对场地勘察、方案设计等方面，设定诸如场地地质稳定性评估参数、方案合规性指标等监测指标，若指标异常，及时启动预警并按既定流程调整。施工实施阶段，对人员操作规范、设备运行状态等进行动态监测，比如设置人员违规操作频次、设备故障预警阈值等指标，一旦触及阈值，快速响应，采取纠正措施。验收阶段，依据质量标准等设定监测指标，如关键部位验收合格率等，未达标则预警并整改。通过这一系列动态监测指标与预警响应流程，实现对电力施工项目全过程风险的有效预警与管控^[5]。

2. 协同监管框架创新

在电力施工项目安全监管中，协同监管框架创新至关重要。应积极推动政府部门、建设单位与第三方机构建立多方联动机制。政府部门发挥主导与监督作用，从宏观层面制定政策、规范标准并监督执行；建设单位作为项目实施主体，负责将安全监管要求落实到具体施工环节；第三方机构凭借专业技术与经验，为项目提供评估、检测等服务。同时，搭建高效的信息共享平台，

通过大数据、云计算等技术，实现各方安全信息实时传递与共享，打破信息壁垒，使各方能及时掌握项目安全动态，共同分析安全风险，协同制定并实施针对性的防控措施，形成紧密协作、高效运行的协同监管格局，提升电力施工项目安全监管的整体效能^[6]。

（二）智能安全评估模型应用

1. 大数据驱动的风险评估方法

在电力施工项目安全监管中，大数据驱动的风险评估方法发挥着关键作用。借助历史事故数据与实时监测数据，构建风险量化分析模型。一方面，深入剖析历史事故数据，挖掘其中潜在的事故规律、风险因素及致因关联，如不同施工环节、天气条件、人员资质与事故发生概率的关系等，为风险评估奠定基础^[7]。另一方面，利用实时监测数据，涵盖施工设备运行参数、环境指标、人员操作行为等，实现对施工过程动态风险的精准捕捉。通过融合这两类数据，运用数据挖掘、机器学习算法，如决策树、神经网络等，量化风险等级，生成直观易懂的风险评估报告，为安全监管人员提供科学决策依据，及时采取针对性防控措施，降低电力施工项目的安全风险。

2. BIM技术在监管中的整合

在电力施工项目安全监管机制优化路径中，BIM技术在监管中的整合意义重大。BIM技术可实现可视化安全管理，它以三维模型直观呈现电力施工项目的各个细节，包括设备布局、施工流程等，让监管人员更清晰了解项目全貌，提前发现潜在安全隐患^[8]。同时，利用BIM技术进行隐患模拟推演，通过设定不同场景与参数，模拟可能出现的安全事故，分析事故成因与影响范围，帮助制定针对性的预防措施与应急预案。此外，BIM技术还可整合各类安全信息，如安全规范、人员资质等，形成统一信息平台，方便监管人员实时查询与管理，提高安全监管工作的效率与精准度，为电力施工项目安全运行提供有力保障。

四、电力工程安全监管实践案例

（一）高压输变电项目监管试点

1. 项目安全风险识别

在高压输变电项目监管试点中，项目安全风险识别是关键环节。特高压施工场景复杂，需全面细致地开展风险识别工作。一方面，关注施工现场的环境风险，如地形地貌复杂可能导致的设备运输困难与人员摔倒风险，恶劣天气（强风、暴雨等）对高空作业和设备稳定性的威胁。另一方面，重视施工过程中的操作风险，像电气设备安装时的触电风险，杆塔组立过程中的倾倒风险等。同时，人员管理方面也存在风险，如施工人员技能不足、安全意识淡薄可能引发违规操作。通过全面的风险识别，依据相关标准和过往经验^[9]，对各类风险进行准确分类，为后续实施针对性的管控措施奠定基础，有效提升高压输变电项目施工的安全性。

2. 新型监管工具部署

在高压输变电项目监管试点中，积极部署新型监管工具，成效显著。无人机巡检发挥了独特优势，其凭借灵活机动的特点，

能够快速抵达人工难以涉足的区域，如跨越山区、河流的杆塔线路处。通过搭载高清摄像头与热成像设备，可清晰捕捉线路的磨损、发热等隐患，极大提高巡检效率与覆盖范围，及时发现潜在安全风险。同时，物联网传感设备被广泛应用，在杆塔、变压器等关键部位安装各类传感器，实时采集设备运行状态数据，如温度、湿度、振动等参数，并借助物联网技术将数据传输至监控平台。一旦数据出现异常，系统立即发出预警，工作人员能迅速响应处理。这些新型监管工具相互配合，构建起全方位、实时动态的安全监管体系，有力保障了高压输电项目的安全运行^[10]。

（二）城市电网改造监管模式

1. 受限空间作业监管创新

在城市电网改造中，受限空间作业风险高，对其监管创新尤为关键。地下电缆隧道作为典型的受限空间，人员定位系统发挥着重要作用。通过引入高精度定位技术，能实时精准掌握作业人员位置，一旦发生危险可快速锁定位置，为救援争取时间。同时，对应急响应机制进行优化。制定详细且针对性强的应急预案，定期开展演练，提升各方应急协作能力。当监测到隧道内有有害气体超标等异常情况，系统立即自动报警并启动应急响应，通知相关部门及人员迅速展开救援与处置，最大程度降低事故损失，保障作业人员生命安全与电网改造的顺利推进。

2. 社区协同监督机制

在电力工程安全监管实践案例之城市电网改造监管模式中，社区协同监督机制发挥着重要作用。通过社区宣传活动，向居民普及电力设施安全知识，提升公众对电力设施保护重要性的认识，激发居民主动参与监督的热情。社区组织志愿者队伍，定期对辖区内的城市电网改造施工现场进行巡查，及时发现诸如施工材料堆放不规范、警示标识缺失等安全隐患，并反馈给相关施工单位。同时，社区搭建沟通平台，使居民能够便捷地向电力企业和监管部门反映施工过程中遇到的安全问题，形成社区、居民、企业与监管部门多方互动的协同监督模式，有效保障城市电网改造工程的安全进行。

（三）监管效能评估体系

1. 安全绩效 KPI 设计

在电力工程安全监管实践中，安全绩效 KPI 设计对于衡量监

管效能至关重要。建立包含事故率、隐患整改率等核心指标的量化评估模型是关键。事故率反映了电力施工项目安全管理的实际成效，较低的事故率表明安全监管有力。隐患整改率体现了对潜在安全问题的处理能力，高整改率意味着能及时消除安全隐患。此外，还可纳入安全培训参与率，衡量员工对安全知识的掌握程度，参与率越高，员工安全意识和技能可能越强。同时，设置安全设备完好率，保证安全设备正常运行，为施工安全提供硬件保障。通过这些 KPI 指标的综合考量，全面、客观地评估电力工程安全监管的绩效。

2. 长期监管效果追踪

长期监管效果追踪主要通过纵向数据对比实现。收集电力施工项目在监管体系改进前后不同时间段的施工质量与安全水平相关数据，如事故发生率、隐患排查数量、整改完成率等。对这些数据进行深入分析，从时间维度上观察变化趋势，以验证监管体系改进所带来的提升作用。若事故发生率在监管体系改进后呈逐年下降趋势，且隐患排查与整改的成效也显著提高，说明监管体系改进有效提升了施工质量与安全水平，反之则需反思并进一步优化监管体系。这种纵向数据对比能直观呈现长期监管效果，为电力工程安全监管实践提供有力的数据支撑，推动监管工作不断完善，保障电力施工项目长期稳定安全进行。

五、总结

电力施工项目安全监管在实践中取得了一定成果，通过优化路径，如强化人员培训、完善安全制度等，有效提升了项目的安全性与稳定性。然而，现有机制仍存在发展空间，在数字化转型方面，未能充分利用先进技术实现实时监控与智能预警；跨区域协同监管也面临信息壁垒、标准差异等难题。未来，需建立行业统一标准，规范各地区、各企业的安全监管流程与技术指标，确保监管的一致性与有效性。同时，强化监管的科技赋能，引入大数据、人工智能等技术，实现智能化风险评估与精准化管控，为电力施工项目安全监管开拓新的局面，推动行业的可持续发展。

参考文献

- [1]王保义.发电企业施工项目成本控制研究[D].华北电力大学(北京),2021.
- [2]李永明.智慧工地安全监管平台的设计与应用[D].南昌大学,2021.
- [3]庄越.大连市粮食储备安全监管问题与对策研究[D].大连理工大学,2022.
- [4]陈晓庆.特种设备安全监管中多主体协同治理优化研究——以广州市电梯安全监管实践为例[D].兰州大学,2021.
- [5]杨治林.C市港口危险货物安全监管问题与对策研究[D].西南政法大学,2022.
- [6]周祯淳.电力施工项目成本控制与工程造价管理策略[J].工程技术研究,2022,7(1):119-121.
- [7]杜新宇.电力施工项目成本控制与工程造价管理策略[J].电气技术与经济,2022(6):185-187.
- [8]杨小凤.电力施工项目成本控制与工程造价管理策略[J].科学咨询,2021(38):101-102.
- [9]韦月妙.研究电力施工项目成本控制与工程造价管理策略[J].建材与装饰,2021,17(18):115-116.
- [10]管锐华.电力工程项目安全管理分析[J].城市建设理论研究(电子版),2020,(15):7.

医院电气工程设备维护响应机制及质量提升路径探讨

卢叶强

汕头大学医学院小榄临床学院, 广东 中山 528400

DOI:10.61369/EPTSM.2025110013

摘 要 : 分析医院电气设备维护响应现状, 包括设备维护指标对比、瓶颈识别等。阐述基于 BIM+IoT 等技术的管理架构及维护策略, 如故障预警、智能派单等。还涉及供电保障、特种设备维护, 以及人才培养、KPI 考核等, 构建智能化响应机制, 成效显著, 提出未来研究方向。

关 键 词 : 医院电气设备; 维护响应; 智能化

Discussion on Maintenance Response Mechanism and Quality Improvement Path of Hospital Electrical Engineering Equipment

Lu Yeqiang

Shantou University Medicine School Xiaolan Clinical College Zhongshan, Guangdong 528400

Abstract : This study analyzes the current status of hospital electrical equipment maintenance response, including equipment maintenance indicator comparisons and bottleneck identification. It elaborates on management frameworks and maintenance strategies based on BIM+IoT technologies, such as fault prediction and intelligent dispatching. The paper also covers power supply assurance, special equipment maintenance, talent development, KPI evaluation, and other aspects. By establishing an intelligent response mechanism, significant achievements have been made, with proposed future research directions.

Keywords : hospital electrical equipment; maintenance response; intelligentization

引言

医院电气工程设备的维护对于医院的正常运转至关重要。随着《医疗设备管理条例》(2021年修订)的颁布,对医院设备维护提出了更高要求。在此背景下,分析医院电气设备维护响应现状具有重要意义。一方面对比分析设备维护指标,另一方面识别响应瓶颈。基于 BIM+IoT 等技术构建设备管理架构,针对不同设备采取特定维护策略,同时构建多源数据融合架构、开发运维 APP、制定应急响应标准等,从多方面提升维护质量,构建智能化响应机制,为医院可持续发展提供支持。

一、医院电气设备维护响应机制构建

(一) 设备维护响应现状分析

对医院电气设备维护响应现状展开分析,主要从两个方面进行。一方面,对比分析12类设备维护指标,包括配电系统双电源切换实效、医气设备末端压降响应速度等。通过对这些指标的研究,了解不同设备在维护响应方面的实际表现^[1]。另一方面,运用德尔菲法识别6大类响应瓶颈,例如手术室供电延迟、液氧系统故障报警盲区等。这些瓶颈问题严重影响了医院电气设备的正常运行和维护效率,是构建维护响应机制需要重点关注和解决的关键所在^[1]。

(二) 智能响应框架搭建

基于 BIM+IoT 构建设备全生命周期管理架构,可实现对医院电气设备的全面监测与管理^[2]。通过整合 HIS 系统工单数据,建

立故障预警模型,能提前发现潜在故障,为维护工作提供充足准备时间。智能化派单算法的设计至关重要,结合临床需求分级以及设备风险矩阵,合理分配维护任务。临床需求分级可确保关键设备的维护优先级,满足医疗工作的紧急需求。设备风险矩阵则从设备自身状况和故障可能性等多方面综合评估风险,使维护资源得到高效利用,从而提升医院电气设备维护响应的智能化水平和整体效率。

二、关键设备分类维护策略

(一) 供电保障设备维护

对于供电保障设备的维护,变压器可采用油色谱在线监测方案,能及时发现潜在故障^[3]。UPS 电池组需设计健康度动态评估模型,精准掌握其运行状态,以便提前采取维护措施。配电房运

维至关重要，应制定详细规程，其中包含应急发电车接入演练。通过这些措施，确保在突发电力故障时，应急发电车能迅速接入，保障医院电力供应的连续性和稳定性。同时，这些维护策略和规程的实施，有助于提高供电保障设备的可靠性和使用寿命，减少因设备故障导致的医疗风险，为医院的正常运转提供坚实的电力支持。

（二）特种设备维护优化

针对医院特种设备中的低压电气系统、锅炉设备、电梯及中央空调系统，需制定专项维护策略以保障其安全稳定运行。在电梯运维方面，应建立基于物联网技术的困人应急通讯保障机制，通过双回路通讯系统确保被困人员与监控中心的实时联络，同时优化应急救援响应流程，将平均救援时间控制在国家标准范围内（GB/T 24476-2017）^[4]。对于锅炉设备，需实施基于风险检验（RBI）的预防性维护方案，重点监测受压元件壁厚、安全阀校验周期及水质硬度等关键参数。中央空调系统维护则应采用露点温度自适应调节算法，通过实时监测环境温湿度参数，动态调整制冷机组运行工况，确保医疗区域温湿度维持在 YY/T 0186-94 标准规定的范围内。上述设备的维护均需建立完善的运行档案，记录日常巡检、定期保养及故障处理等关键数据，为设备全生命周期管理提供数据支持^[4]。

三、临床实时响应机制实现

（一）智能运维平台建设

1. 多源数据融合架构

整合设备传感器数据、维修历史记录以及临床科室评价，构建设备健康状态数据库是多源数据融合架构的关键。设备传感器能够实时获取设备运行的各项参数数据，为了解设备实时状态提供基础^[5]。维修历史记录包含了设备过去出现的问题以及解决方式，对预测设备可能出现的故障具有重要参考价值。临床科室评价则从使用端反映了设备的性能和问题，是对设备实际使用效果的重要反馈。通过对这些多源数据的整合，并利用特征工程处理能力，能够更全面、准确地构建设备健康状态数据库，为智能运维平台提供有力的数据支持。

2. 移动端响应系统

开发支持 AR 远程诊断的运维 APP，可实现多种功能以提升医院电气设施设备维护的响应机制和质量。通过扫码报修功能，医护人员能快速提交设备故障信息，提高报修效率^[6]。工单跟踪功能让维修人员和管理人员能实时了解维修进度，便于及时调度资源。满意度评价则有助于收集反馈，持续改进服务。针对 ICU 等重点区域，设置工单自动优先级提升功能，确保这些关键区域的设备能得到更迅速的维修处理，保障医疗工作的正常进行。

（二）应急响应机制设计

1. 分级响应预案

制定包含设备故障影响程度矩阵的 4 级应急响应标准。根据设备故障对医疗工作的影响程度进行分级，如一级响应针对严重影响患者生命安全且涉及关键设备的故障，需立即启动最高级别

应急措施^[7]。建立手术室备用电源切换 8 分钟保障机制等 12 项关键场景处置方案^[8]。对于手术室备用电源，规定在 8 分钟内完成切换，确保手术不受断电影响。其他关键场景也制定相应处置方案，明确在不同故障情况下应采取的具体措施，以保障医院电气工程设备正常运行，提高应急响应效率，为临床工作提供有力支持。

2. 跨部门协同机制

工程部、临床科室与设备维修组三方联动，构建高效协同的跨部门应急响应机制。设计包含 37 项标准操作流程的应急响应 SOP 文件体系^[9]，明确各部门职责与工作流程。临床科室负责及时反馈设备故障信息，医学工程部迅速组织人员评估并制定维修方案，同时联系设备供应商提供技术支持与所需配件。三方通过信息共享平台实时沟通设备状况、维修进度等关键信息，确保应急响应的及时性与有效性，提高医院电气工程设备维护质量，保障医疗工作的正常开展。

四、维护质量提升实施路径

（一）预防性维护体系构建

1. 设备健康度评估模型

为提升医院电气设施设备维护质量，构建预防性维护体系中的设备健康度评估模型至关重要。通过开发融合振动分析、红外热成像等技术的设备状态评估算法，可有效监测设备运行状况。同时，建立包含 216 个监测参数的综合评价指标体系^[10]，能更全面、准确地评估设备健康度。这些监测参数涵盖设备的各个关键部位和运行环节，从多个维度反映设备的性能状态。利用该评估模型，可及时发现设备潜在问题，为预防性维护提供科学依据，从而提高设备的可靠性和使用寿命，保障医院电气工程系统的稳定运行。

2. 智能维护决策系统

构建基于设备故障模式库的维护策略知识图谱，以实现智能维护决策功能。通过对设备故障模式的深入分析和整理，建立全面的故障模式库。在此基础上，利用知识图谱技术，将维护策略与故障模式相关联，形成可视化的知识网络。这一知识图谱能够为空调机组滤网更换周期动态调整等多项维护决策提供科学依据。例如，根据设备的运行数据和故障历史，知识图谱可以准确判断滤网的污染程度和更换需求，从而实现动态调整更换周期，提高维护的准确性和及时性，降低设备故障率，提升医院电气工程设备的整体维护质量。

（二）人才队伍专业化建设

1. 复合型人才培养

复合型人才培养是提升医院电气设施设备维护质量的关键。应制定覆盖电气安全、医疗知识、信息技术的三维能力矩阵，明确复合型人才所需的知识和技能结构。通过这种矩阵，确定不同维度的能力要求和权重，为人才培养提供清晰的目标。同时，开发包含设备原理 VR 实训系统的培训体系。利用 VR 技术的沉浸感和交互性，让学员更直观地了解设备原理和操作流程。在实训系

统中设置各种故障模拟场景，提高学员的故障诊断和解决能力。通过理论与实践相结合的培养方式，打造一支既懂电气技术又了解医疗知识和信息技术的复合型人才队伍，为医院电气设施设备维护提供坚实的人才保障。

2.绩效考核机制

建立基于 MTTR（平均修复时间）、设备可用率等8项核心指标的 KPI 考核体系^[11]，对医院电气设施设备维护人员的工作绩效进行全面、客观的评估。通过明确各项指标的目标值和权重，激励维护人员提高工作效率和质量，降低设备故障时间，提高设备可用率。同时，设计技能等级与薪酬挂钩的岗位晋升通道，鼓励维护人员不断提升自身的专业技能水平。根据维护人员的技能水平和工作表现，划分不同的技能等级，并给予相应的薪酬待遇和晋升机会。这样不仅可以提高维护人员的工作积极性和主动性，还可以吸引和留住优秀的专业人才，为医院电气工程设备的维护质量提升提供有力的人才保障。

（三）质量持续改进体系

1.PDCA 循环应用

医院电气设施设备维护可实施包含52个质量监控点的闭环管理机制^[12]，以实现质量的持续提升。这一机制通过对各个关键环节的监控，确保设备维护的全面性和有效性。同时，建立污水处理设备菌群检测等7项专项质量改进项目，针对特定的设备或维护环节进行深入优化。在 PDCA 循环应用方面，计划（Plan）阶段需明确这些质量监控点和专项改进项目的目标与计划；执行（Do）阶段严格按照计划实施监控和改进措施；检查（Check）阶段对实施效果进行评估，查看是否达到预期目标；处理（Act）阶

段根据检查结果，总结经验教训，对成功的措施进行标准化，对不足之处加以改进，从而不断完善维护质量提升体系。

2.智慧化质控平台

开发具有异常数据自动预警功能的质控驾驶舱系统，能有效提升医院电气设施设备维护质量。该系统可实现维护工单达标率、预防性维护执行率等12项质控指标的可视化监控。通过实时监测这些指标，工作人员能够及时发现潜在问题，如维护工单未按时完成、预防性维护工作缺失等。系统的自动预警功能会在指标异常时发出提示，使相关人员迅速采取措施进行调整和改进。这不仅提高了维护工作的效率，还能确保设备始终处于良好的运行状态，减少因设备故障而对医院正常运营造成的影响，为医院的医疗服务提供更可靠的电力保障。

五、总结

通过对医院电气设施设备维护响应机制及质量提升路径的探讨，构建了智能化响应机制。该机制取得了显著成效，重点设备故障率大幅下降，临床科室满意度也显著提升。这不仅保障了医院设备的正常运行，也提高了医疗服务质量。同时，在此基础上提出了下一步的研究方向，即探索医疗设备维护数据与医院能耗管理的智能联动策略。这将进一步优化医院的资源管理，提高能源利用效率，为医院的可持续发展提供有力支持。未来还需不断完善和优化维护响应机制，加强数据的分析和利用，以更好地提升医院电气设施设备维护质量和管理水平。

参考文献

- [1] 张梦. 低温提升金银花品质及生理响应机制研究 [D]. 浙江理工大学, 2023.
- [2] 刘媛. A 医院服务质量提升研究 [D]. 郑州大学, 2021.
- [3] 孙雅静. 江西邮政公共服务质量提升研究 [D]. 江西财经大学, 2021.
- [4] 林晨. 小学语文复述策略教学现状调查及提升路径探讨 [D]. 华中师范大学, 2022.
- [5] 聂舒阳. A 医疗美容医院服务质量提升研究 [D]. 天津大学, 2022.
- [6] 宋彬. 医院电气工程智能化及 PLC 技术在医院电气设备自动化控制中的应用 [J]. 科技风, 2022(31): 7-9.
- [7] 乐轶, 卢江华. 医院医疗设备质量控制及维护管理探讨 [J]. 生命科学仪器, 2024, 22(2): 39-41, 44.
- [8] 陈景轩. 三级综合医院手术室应急电源切换策略研究 [J]. 电子测试, 2019(7): 104-105, 87. DOI: 10.3969/j.issn.1000-8519.2019.07.047.
- [9] 赵燕玲. 医院电气设备选型与节能方案设计分析 [J]. 电力设备管理, 2024(10): 280-282.
- [9] 王赞. 机械电气工程设备的维护及管理措施探讨 [J]. 现代制造技术与装备, 2022, 58(3): 162-164.
- [10] 李远远. 基于粗糙集指标体系构建及综合评价方法研究 [D]. 湖北: 武汉理工大学, 2009. DOI: 10.7666/d.y1559713.
- [11] 华莹. 基于风险分析的医院医疗设备维护管理策略研究 [J]. 中国医疗器械信息, 2018, 24(15): 137-138. DOI: 10.3969/j.issn.1006-6586.2018.15.061.
- [12] 成国庆, 周炳海, 李玲. 多设备系统的生产批量、质量控制与预知维护联合优化 [J]. 系统工程理论与实践, 2019, 39(8): 2152-2161. DOI: 10.12011/1000-6788-2018-0104-10.

电力施工生产管理模式及其对电气专业发展的影响

区永辉

佛山市南海多宝电力电器安装有限公司，广东 佛山 528200

DOI:10.61369/EPTSM.2025110014

摘 要： 本文围绕电力施工生产管理模式转型对电气专业的影响展开，涉及管理体系、多维度协同、BIM等技术应用、智能监控、人才培养等多方面。强调转型在技术创新、人才培养、产业升级等维度为电气专业发展注入动力，需从多维策略入手实现二者协同共进。

关 键 词： 电力施工；生产管理模式；电气专业

The Management Mode of Electric Power Construction Production and Its Impact on the Development of Electrical Specialty

Ou Yonghui

Foshan Nanhai Duobao Electric Power and Appliance Installation Co., Ltd, Foshan, Guangdong 528200

Abstract： This article focuses on the impact of the transformation of power construction production management mode on the electrical profession, involving various aspects such as management system, multi-dimensional collaboration, BIM technology application, intelligent monitoring, and talent cultivation. Emphasizing that transformation injects momentum into the development of the electrical profession in terms of technological innovation, talent cultivation, and industrial upgrading, it is necessary to start from a multidimensional strategy to achieve coordinated progress between the two.

Keywords： power construction; production management mode; electrical engineering

引言

随着《国家能源局关于推进电力安全生产标准化建设工作的指导意见（2021年修订版）》的颁布，对电力施工生产管理提出了更高要求。电气电力安装管理体系在电力施工生产管理模式中至关重要，其涵盖人员、材料与施工过程管理等多方面。同时，技术、安全与进度管理的矩阵式融合，BIM技术深化应用，智能监控系统集成等共同推动管理模式发展。此外，复合型人才培养、标准化工艺体系、数字化产业链整合、绿色施工技术迭代等方面也在同步变革。这些都在新模式下相互作用，对电气专业发展意义重大，与政策导向相契合，推动电气行业高质量发展。

一、电力施工生产管理模式核心要素

（一）电气电力安装管理体系

电气电力安装管理体系在电力施工生产管理模式中占据关键地位。该体系涵盖多方面内容，从人员管理来看，要求施工人员具备专业资质与技能，通过定期培训不断提升业务水平，以确保施工操作的规范性与准确性。在材料管理上，严格把控材料采购、运输、存储与使用环节，保证材料质量符合标准，避免因材料问题引发施工隐患^[1]。施工过程管理更是重中之重，依据安装流程标准化建设要求，对每个施工步骤进行细致规划与监督，确保施工按标准有序推进。同时，积极引入新型施工技术，如智能布线技术、数字化监控技术等，优化施工流程，提高施工效率与质量，为电气专业的持续发展奠定坚实基础，推动电力施工生产

管理模式不断创新升级。

（二）多维度协同生产机制

在电力施工生产管理模式中，技术管理、安全管理和进度管理的矩阵式融合机制构成多维度协同生产机制的关键。技术管理为施工提供专业支撑，其先进理念与方法确保电力项目符合技术规范与标准。安全管理保障施工过程安全，通过完善制度与培训避免事故。进度管理规划施工流程与时间节点，确保项目按时交付。三者并非孤立，而是相互交织融合。技术方案的选择影响安全与进度，安全措施落实程度关系到技术实施与进度推进，进度安排又会对技术与安全管理产生作用。这种矩阵式融合机制下，各维度协同运作，形成高效的多维度协同生产机制，促使电力施工项目高质量完成，也为电气专业发展奠定坚实基础^[2]。

二、先进生产管理模式的技术创新路径

（一）BIM技术的深化应用

在电力施工生产管理中，BIM技术深化应用于电气管线预装配和质量控制，具有显著效益。通过BIM技术构建精准的三维模型，能对电气管线进行虚拟预装配，提前发现管线碰撞、空间布局不合理等问题，有效减少现场施工中的错误与返工，提升施工效率与质量。在质量控制方面，基于BIM模型可集成质量标准与验收流程，施工人员依据模型进行质量检查与评估，确保电气施工符合标准要求。此外，BIM技术还能实现施工进度与质量的实时跟踪，管理者通过模型直观掌握施工动态，及时调整策略。这种深化应用，以其可视化、模拟性等特点，为电气专业在电力施工生产管理中的发展提供有力支持，推动生产管理模式创新^[3]。

（二）智能监控系统集成方案

在电力施工中，智能监控系统集成方案融合物联网设备与大数据分析平台，对施工安全进行动态管控。借助物联网设备，可实现施工现场全方位实时数据采集，如在施工设备、关键区域部署传感器，实时获取设备运行参数、人员位置及环境数据等。这些大量且繁杂的数据传输至大数据分析平台后，利用先进算法进行深度挖掘与分析^[4]。通过分析能及时发现潜在安全风险，例如设备异常运行趋势、人员违规操作行为以及环境危险指标变化等，提前发出预警。同时，依据数据分析结果可优化施工流程，调整资源配置，助力电力施工生产管理模式朝着智能化、高效化方向发展，进而推动电气专业在安全管控技术领域的创新与进步。

三、生产管理模式转型对电气专业的影响机理

（一）专业技术能力重构

1. 复合型人才培养机制

生产管理模式转型下，电气专业复合型人才培养机制至关重要。传统电力施工生产管理模式，人才培养往往侧重单一电气技术能力。而新模式要求从业者兼具项目管理与电气技术双维能力。构建这种复合型人才培养机制，需革新课程体系，将项目管理知识与电气专业课程深度融合，让学生不仅掌握电路、电机学等专业知识，还熟悉项目规划、成本控制等管理技能^[5]。同时，加强实践教学环节，通过模拟真实电力施工项目，让学生在实践中锻炼综合运用双维能力解决实际问题的能力。并且，鼓励校企合作，企业为学生提供实习与项目参与机会，高校为企业提供技术支持与人才输送，共同培育适应生产管理模式转型的电气专业复合型人才。

2. 标准化工艺体系发展

在生产管理模式转型的进程中，标准化工艺体系的发展对电气专业影响深远。随着新模式的推行，电气施工工艺标准的统一与规范成为必然需求。这促使构建更完善的电气施工工艺标准数据库^[6]，涵盖从基础布线到复杂电力系统安装的各类工艺标准，为电气专业人员提供清晰、明确的操作指南。通过该数据库，施工人员能快速查阅到不同场景下的标准工艺要求，减少因工艺不

统一导致的质量问题。同时，标准化工艺体系发展也推动电气专业知识的更新，促使专业人员不断学习和掌握新的标准与工艺，以适应生产管理模式转型带来的变化，确保电力施工的高质量与高效率，提升电气专业整体技术水平。

（二）行业发展动能转变

1. 数字化产业链整合效应

随着电力施工生产管理模式向数字化转型，数字化产业链整合效应凸显。在传统模式下，电气专业各环节相对独立，信息流通不畅。而数字化产业链整合促使设计、制造、施工、运维等环节紧密协作，实现数据实时共享与交互^[7]。例如，电气设备制造企业能依据电网设计单位的精确需求数据，精准研发和生产，提高产品适配性，推动电气专业产品优化升级。同时，施工单位可借助数字化平台获取设备制造进度，合理安排施工计划，减少工期延误风险。这一整合还打破了行业壁垒，催生新的跨领域技术和业务模式，为电气专业人才提供更广阔的发展空间，激励他们掌握跨领域知识与技能，以适应产业链数字化整合带来的变革。

2. 绿色施工技术迭代趋势

随着电力施工生产管理模式转型，绿色施工技术迭代趋势显著影响着电气专业。在电力行业向绿色发展转型的大背景下，对电气安装工程的碳排放控制提出了更高要求。传统施工技术难以满足如今日益严格的环保标准，促使电气专业必须探索新的绿色施工技术，如高效节能的电气设备安装技术、智能电网建设中的低能耗布线技术等^[8]。这不仅要求电气专业人员具备更扎实的专业知识，还需不断学习并掌握新的绿色施工工艺，以适应行业发展。同时，技术迭代也推动电气专业在课程设置、人才培养方向上做出调整，更加注重绿色环保理念与技术的传授，为行业输送能够适应绿色施工技术不断发展的专业人才。

四、生产管理模式优化实证研究

（一）典型工程案例分析

1. 特高压输电工程管理创新

特高压输电工程作为电力领域的重点项目，其管理创新意义重大。在生产管理模式优化方面，特高压输电工程通过先进技术与管理理念结合，显著提升施工效率与设备可靠性。例如，采用信息化管理手段，对工程进度、质量实时监控，及时发现并解决潜在问题，有效缩短施工周期。在设备管理上，运用状态检修技术，依据设备运行状态制定检修计划，提高设备可靠性。同时，引入智能化施工设备与工艺，减少人工操作误差，提升整体施工质量。这些管理创新不仅推动特高压输电工程高效建设，更为电力施工生产管理模式优化提供宝贵经验，对电气专业发展产生积极影响，促使行业不断探索更先进、高效的管理模式^[9]。

2. 城市电网改造项目实证

以某城市电网改造项目为实证对象，该项目运用全过程管理模式。在项目实施前，对电气设备的故障率进行详细统计与分析，掌握改造前的故障状况。实施过程中，严格依照全过程管理模式，从规划设计阶段，确保电气设备选型合理、布局科学；到

施工建设阶段，加强施工质量监督，保证工艺达标；再到后期运维阶段，建立完善的巡检与维护机制。项目完成后，持续监测电气故障率。经对比发现，相较于改造前，运用全过程管理模式后，电气故障率显著降低^[10]。这充分表明，全过程管理模式在城市电网改造项目中对改善电气故障率效果显著，为电力施工生产管理模式优化提供了有力的实践依据，推动电气专业在可靠性方面的进一步发展。

（二）行业标准体系改进建议

1. 安全规范升级路径

在电力施工中，安全规范升级至关重要。应将先进技术融入安全规范，如利用智能传感器、物联网技术实时监测施工现场环境参数与设备运行状态，当数据异常时及时预警，为作业人员提供安全保障。完善安全培训规范，不仅要有理论知识讲解，还应增加模拟演练，让作业人员在逼真场景中提升应急处理能力。对安全检查流程进行细化，明确不同施工阶段、不同设备设施的检查要点与频次，确保隐患及时发现与排除。借鉴国际先进安全标准，结合我国电力施工实际情况，不断完善安全规范，推动行业整体安全水平提升，为电气专业发展营造安全稳定的环境。

2. 质量追溯机制创新

在电力施工生产管理中，质量追溯机制创新意义重大。可借助区块链技术不可篡改、可追溯的特性，为电气设备构建精准的质量追溯体系。从设备采购环节开始，将设备的规格参数、供应商信息等数据上链；在施工安装阶段，记录安装人员、安装时间及安装过程中的关键指标；运行维护阶段，实时上传设备状态监测数据、故障维修记录等。通过这样的创新机制，一旦出现质量问题，能够快速精准定位问题源头，无论是设备本身缺陷，还是施工安装不当，都能迅速查明，为后续的质量改进提供有力依据，也有助于提升整个电力施工生产管理的质量与效率，推动电气专业在质量管控方面的进一步发展。

（三）国际经验对比研究

1. 欧美 EPC 管理模式借鉴

在电力施工领域，欧美 EPC（设计采购施工）管理模式具有显著特点与优势，值得借鉴。欧美 EPC 模式下，设计阶段注重电气专业与其他专业深度融合，从项目伊始便全面考量电气系统

与整体工程的适配性，确保设计方案科学合理，有效减少后期变更。采购环节，凭借成熟的供应链体系，严格把控电气设备质量与交付时间，保障施工进度。施工过程中，强调各专业间高效协同，通过先进的信息化管理手段，实时沟通与监控，提升电气专业施工质量与效率。同时，欧美 EPC 模式下完善的质量管控与风险预警机制，为电气专业发展营造稳定环境。这些经验有助于我国电力施工企业优化生产管理模式，推动电气专业更好发展，提升整体工程效益。

2. 日本精益施工模式启示

日本精益施工模式对电力施工生产管理具有重要启示。该模式强调消除浪费、优化流程与持续改进。在电力施工中，可借鉴其对施工流程进行精细化梳理，减少诸如材料过度储备、施工等待时间等各类浪费现象。通过精确计算材料需求与使用时间，像 JIT 管理在电气材料供应链优化那样，实现材料精准供应，降低库存成本。同时，精益施工模式注重全员参与质量控制，电力施工可引入类似机制，提升施工人员质量意识，从细节处把控施工质量，减少因质量问题导致的返工，提高整体施工效率与质量，为电气专业发展营造更高效、优质的施工环境，推动电气专业技术在良好的管理模式下不断进步。

五、总结

新型电力施工生产管理模式对电气专业发展意义重大。它从技术创新、人才培养、产业升级等多个维度，为电气专业的前行注入动力。技术创新方面，新模式促使电气技术不断突破，开拓了新的应用场景；人才培养领域，为电气专业学子提供更具前瞻性和实践性的学习导向；产业升级上，推动电气产业向高端化、智能化迈进。管理模式与专业发展呈现出紧密的动态耦合关系，二者相互影响、相互促进。为更好顺应这一趋势，需从技术标准体系重构、智能装备研发方向调整、产教融合机制建设等多维策略入手，为电气专业发展营造良好生态，实现电力施工生产管理与电气专业发展的协同共进，助力电气行业在新时代实现高质量发展。

参考文献

- [1] 陈菲儿. 面向安全监控的电力施工现场目标检测方法研究 [D]. 安徽大学, 2023.
- [2] 朱立强. 基于图像增广的 YOLOv3 改进算法在电力施工场景中的应用研究 [D]. 华南理工大学, 2022.
- [3] 闫书琪. 新疆电力生产水足迹分析及低碳转型对水资源的影响 [D]. 北京工业大学, 2022.
- [4] 王璐. 清洁电力发展对经济增长与碳排放耦合协调的影响及其政策研究 [D]. 西南财经大学, 2023.
- [5] 崔蓉. 电力资源区域配置对企业生产行为的影响机制与实证研究 [D]. 中国矿业大学 (江苏), 2022.
- [6] 张敬敏. 电力工程电气专业与土建施工配合的建议措施新探 [J]. 科技创新与应用, 2021, 11(17): 115-117.
- [7] 柏禄祯. 浅析改造应急传染病医院工程电气专业施工管理 [J]. 建筑与预算, 2023(8): 77-79.
- [8] 刘旭, 王瑞波. 转型发展背景下高校电气专业应用型教学模式的探索 [J]. 现代计算机, 2021(22): 167-170.
- [9] 胡朝贞. 大数据时代电力企业经营管理模式改革 [J]. 人力资源, 2020, (22): 28-29.
- [10] 刘清源, 张增亮. 绿色医院设计中电气专业的设计思考 [J]. 数码设计 (上), 2021.

AI技术在新能源现场施工管理的实际运用

刘敏

国家电投集团贵州金元威宁能源股份有限公司，贵州 贵阳 550003

DOI:10.61369/EPTSM.2025110015

摘 要： 随着全球能源需求的不断增长以及环境问题的日益突出，新能源的开发与利用已成为应对全球气候变化、保障能源安全的有效路径，受到了各国的高度重视。太阳能、风能等新能源因其清洁、可再生被广泛应用于发电领域，技术更新迭代，其在推动能源结构转型的同时，也面临着发电不稳定、并网难度大、运维成本高等严峻挑战。在这一背景下，人工智能技术（AI）应运而生，为新能源现场施工管理提供了智能化解决方案。研究介绍了 AI 技术的概念、分类，分析了新能源施工管理的特点，探究了 AI 技术在新能源施工管理中的实践应用，以期新能源产业的智能化发展提供参考。

关 键 词： 新能源现场施工管理；AI 技术；智能化管理

Practical Application of AI Technology in On-Site Construction Management of New Energy Projects

Liu Min

State Power Investment Corporation Guizhou Jinyuan Weining Energy Co., Ltd. Guiyang, Guizhou 550003

Abstract： With the continuous growth of global energy demand and increasingly prominent environmental issues, the development and utilization of new energy have become an effective approach to addressing global climate change and ensuring energy security, receiving high attention from various countries. Solar, wind, and other renewable energy sources are widely applied in power generation due to their clean and renewable characteristics. While technological advancements drive energy structure transformation, these sources also face challenges such as unstable power generation, difficulties in grid integration, and high operation and maintenance costs. In this context, artificial intelligence (AI) technology has emerged, providing intelligent solutions for on-site construction management in new energy projects. This study introduces the concept and classification of AI technology, analyzes the characteristics of new energy construction management, and explores practical applications of AI technology in this field, aiming to provide references for the intelligent development of the new energy industry.

Keywords： on-site construction management of new energy; AI technology; intelligent management

作为能源领域的热门话题，新能源不仅能够减少环境污染，而且在促进能源利用率提升、缓解能源供需矛盾方面发挥着重要的作用^[1]。当前，我国新能源产业已进入规模扩张期，风电、光伏、储能等项目建设规模持续扩大，传统管理模式已难以满足行业升级需求。目前新能源现场施工存在地理分布偏远、多专业交叉作业、环境干扰因素多等问题，传统依赖人工巡检、经验决策的管理模式，存在数据滞后、响应缓慢、风险预判不足等局限，导致资源利用效率低、安全质量隐患突出^[2]。AI技术的出现，为新能源现场施工管理提供了技术支持，其作为强大的工具，能够通过数据挖掘、机器学习、深度学习等方法，对海量数据进行高效处理、分析。在新能源现场施工管理中，AI技术的应用可实现对施工进度、安全风险、设备状态的实时监测与智能预警。在此背景下，探索 AI 技术在新能源现场施工管理中的应用，对于推动新能源产业转型发展具有重要的实践意义。

一、AI 技术相关概述

（一）AI 技术的概念

AI即人工智能，是指通过计算机系统模拟人类智能活动的技术科学，原理是让机器具备感知、学习、推理、决策和语言理解

等能力，打破以往传统机器仅执行固定程序的局限。AI技术核心在于算法与数据的深度结合，通过不断迭代优化模型，使系统在特定任务中实现自主进化^[3]。目前，AI技术已被广泛应用于图像识别、自然语言处理、智能控制等领域，为各大行业发展提供了高效、智能化解决方案，驱动了产业数字化转型。

作者简介：刘敏（1987.05-），男，重庆合川人，大专，工程师，研究方向：新能源建设与发展。

（二）AI技术的分类

1. 机器学习技术

机器学习技术作为 AI 技术的重要分支，其核心在于利用数据训练算法模型，使系统能够从经验中自动学习并改进性能，其流程如图 1 所示。该技术主要分为监督学习、无监督学习与强化学习三大类。监督学习依赖于标注数据集，通过对输入与输出关系的学习，实现对未知数据的预测；无监督学习则无需标注数据，侧重于挖掘数据内部的结构或分布规律；强化学习通过智能体与环境的交互，基于奖励机制优化决策策略。在新能源建设管理中，机器学习技术可以用于发电量预测、设备故障诊断及能源调度优化等场景，有利于提升管理效率，降低运营成本。

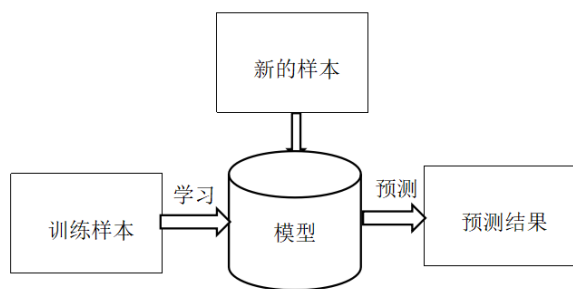


图1 机器学习流程图

2. 深度学习

深度学习作为机器学习的延伸，通过构建多层神经网络模拟人脑信息处理机制，能够自动提取数据中的抽象特征，在图像识别、语音分析与复杂模式预测方面表现突出。其优势在于对非线性、高维度数据的强大建模能力，适用于风电场气象预测、光伏组件缺陷检测等复杂场景。借助深度学习，可实现对新能源设备运行状态的精细化感知与早期故障预警，提升系统自主决策水平，为智能运维提供技术支持。

3. 自然语言处理

自然语言处理技术使计算机具备理解、生成人类语言的能力，可应用于新能源领域中的智能客服、运维日志分析与报告自动生成等场景。通过解析海量文本数据，提取关键信息，辅助管理人员快速决策，提升沟通效率与服务智能化水平^[4]。结合知识图谱技术，还可构建新能源运维知识库，实现故障案例的语义检索与推理判断，增强系统交互性与实用性。

4. 智能决策

智能决策是 AI 技术在新能源建设管理中的重要应用方向，通过整合多源数据与算法模型，能够解决复杂场景的决策问题。如公式 $D^* = \arg \max_D F(D; X, \theta)$ ，其中 D 表示决策变量， X 代表输入的数据， θ 为模型参数， $F(D; X, \theta)$ 为决策目标函数。在新能源领域，发电设备的运行状态、气象条件的变化以及电力需求的波动等因素相互交织，传统的人工决策方式往往难以应对如此复杂的动态环境。而智能决策技术能够基于实时数据和历史经验，快速生成最优策略，提升决策的准确性与及时性。

二、新能源现场施工管理的特点

（一）布局分散

新能源项目通常分布广泛，尤其在风能、太阳能等资源富集的偏远地区，地理跨度大、环境复杂，导致建设与运维管理难度

增加。分散布局使得信息采集、设备监控与故障响应依赖高效的远程通信与自动化系统，传统管理模式难以实现全面覆盖。

（二）技术密集

新能源现场施工涉及大量高新技术的集成应用，包括智能传感、大数据分析与自动化控制等，对技术协同与系统兼容性要求较高。设备更新迭代速度快，运维人员需具备跨学科知识储备与持续学习能力^[5]。不仅如此，项目建设周期长、投资规模大，技术选型直接影响长期运行效率与维护成本，需在规划阶段充分评估技术成熟度与可扩展性，保障系统稳定性与经济性。

（三）流程复杂

新能源现场施工涉及场地平整、基础施工到设备安装、调试的全流程，各环节环环相扣，且需配合项目审批、环境评估、电网接入等外部流程。施工过程中需协调多方单位，工序衔接紧密，任意环节延误均可能影响整体进度。同时，受自然条件制约明显，如风电吊装需避开大风天气，光伏铺设依赖光照周期，施工计划动态调整频繁。

（四）风险因素多

新能源现场施工面临自然环境、技术故障、政策调整等多重风险，尤其是在极端天气下可能影响施工进度与设备安全，技术兼容性问题容易导致系统效率下降，而补贴政策变动则直接影响项目经济性。此外，供应链不稳定、并网审批延迟等问题也增加了项目的不确定性。

三、AI技术在新能源现场施工管理中的实践应用

（一）AI巡检与云边协同技术的应用

机器视觉、激光 SLAM 导航与云边协同技术构建的智能巡检体系，为新能源施工现场质量与设备管控提供全流程解决方案。在光伏电站施工中，搭载机器视觉算法的多旋翼无人机按预设航线巡航，通过图像比对技术精准校验光伏支架水平度、垂直度及组件拼接间隙，单架次可高效覆盖 50 亩作业面，巡检效率较人工提升 6 倍以上。风电场风机基础施工阶段，集成激光 SLAM 导航的轮式巡检机器人自主遍历作业区域，融合红外测温、超声波检测技术实时采集钢筋绑扎密度、混凝土浇筑厚度等数据，边缘计算节点 100 毫秒内完成显性缺陷判定并推送现场管理人员，云端平台则基于海量数据挖掘混凝土裂缝发展趋势、钢筋腐蚀等隐性隐患，生成针对性施工质量风险评估报告^[6]。在输变电工程组塔架线阶段，AI 巡检体系有效识别螺栓紧固缺失、销钉安装错误等典型缺陷，缺陷识别准确率达 92.6%。云边协同架构实现三级联动，使施工质量管理响应时间缩短至分钟级，推动新能源施工现场向智能化、迈进，降低后期运维成本与安全风险。实现精细化管理。通过 AI 算法对施工全过程数据进行动态建模，

（二）深度学习进度算法与 RFID 的融合应用

光伏项目运作过程中，实施于组件与支架等核心物料的 RFID 标签植入技术发挥着关键作用。材料到场情况、仓储状态及安装进度得以实时监控，这些数据同步传输至采用深度学习算法的进度预测模型系统。由此实现了施工进度的动态推演功能，并激活

了偏差预警机制。该模型系统整合了历史工程数据集、天气因素、供应链波动等外部变量参数，通过滚动更新方式持续输出未来七日的工序完成概率，其准确度数值维持在89%以上。当预制桩基运输延迟现象达到预设阈值时，系统将自动生成调整方案，并推荐输出最优资源调配路径，辅助管理人员的决策过程，增强关键路径工期的可控性^[7]。在风电场建设场景下，塔筒构件与叶片部件等大型物件的到场情况通过RFID技术实现全程监控。吊装作业进度数据结合BIM三维模型与气象预报信息进行分析处理，施工窗口期预测功能得以实现。据此，施工序列进行动态优化调整，显著降低了窝工现象与设备闲置率。深度学习算法模型持续积累各工序实际耗时记录与资源消耗数据样本，预测精度参数呈现逐步提升态势，自适应调度能力由此形成。在极端天气条件导致施工中断事件发生时，关键路径重新计算功能立即启动，延期影响评估模块同步运行，赶工措施制定工作获得有力支撑^[8]。实例表明，该技术体系的应用不仅提升了项目进度的可视化程度，更实现了从传统经验导向型管理模式向数据驱动型智能决策体系的转变，项目抗风险指标与执行效率参数均获得改善。目前，有项目引入AI技术用于新能源功率预测，其系统结构如图2所示，该系统通过集成气象数据、设备运行数据、电网负荷数据，可实现对未来发电量的预测，帮助项目方合理安排发电计划。

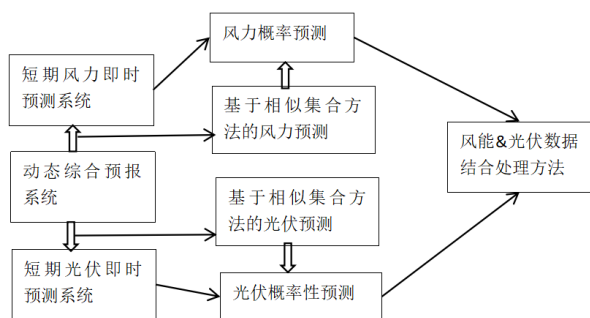


图2 新能源功率预测系统结构示意图

（三）AI视觉识别与智能预警技术的应用

在输变电工程现场，AI视觉识别系统基于高精度图像算法对

作业行为与设备状态进行全天候监测，实时识别未佩戴安全帽、跨越施工围栏等违规行为，并自动触发声光报警与记录归档。同时，系统通过红外热成像与可见光双模识别，对变压器、输电线路接头等关键部位进行温度异常检测，及时发现过热隐患并推送预警信息至运维终端，有效避免设备故障引发的停电事故^[9]。针对高空作业场景，AI视觉系统结合无人机巡检数据与姿态识别算法，实时判断作业人员安全带悬挂状态与移动路径风险，及时纠正不安全行为并生成风险热力图，辅助现场管理人员动态调整监护策略。系统持续学习各类隐患样本，识别准确率随训练数据积累提升，误报率下降。

（四）人脸识别与生物传感技术的协同应用

人员管控方面，采用人脸识别核验技术快速完成施工人员进场签到、离场登记，同时联动特种作业资质数据库，实时核验电工、焊工等人员证件有效性，无证或证件过期人员自动被禁止进入作业区域；作业人员配备集成生物传感技术的智能安全帽，实时监测心率、作业姿态数据，当检测到心率异常、长时间高空悬停等风险状态时，立即向管理人员推送疲劳作业或高空风险预警^[10]。设备管控方面，通过设备物联网技术实时采集起重机、装载机施工机械的运行参数、作业轨迹，结合智能调度算法优化设备作业路线，避免多台设备在吊装区、材料运输通道等关键区域交叉冲突；针对风机吊装等高危作业，荷载匹配算法自动比对设备荷载与吊装重物重量，若出现超载风险立即锁定设备操作权限并发出警报。

四、结束语

AI技术的发展为新能源建设管理带来了新的机遇与挑战，其深度融合推动了行业从经验驱动向数据智能驱动转变。面对复杂多变的能源场景，AI不仅提升了系统效率与决策精度，而且增强了对不确定性风险的预判与应对能力。未来，随着算法的优化提升，AI将在新能源规划、建设智能化等方面发挥更大作用，为环保能源生产、利用提供技术支持。

参考文献

- [1] 朱琼峰,李家腾,乔骥,等.人工智能技术在新能源功率预测的应用及展望[J].中国电机工程学报,2023,43(8):3027-3047,中插13.
- [2] 韩富佳,王晓辉,乔骥,等.基于人工智能技术的新型电力系统负荷预测研究综述[J].中国电机工程学报,2023,43(22):8569-8591,中插2.
- [3] 任苗苗,舒晓斌.人工智能在中国新能源领域中的应用与前景分析[J].储能科学与技术,2024,13(10):3619-3621.
- [4] 白云鹏,张志艳,许才,等.基于多头注意力机制改进图神经网络的新能源电力系统风险评估[J].电力建设,2025,46(1):147-157.
- [5] 王浩哲,丁爱飞,陆继翔,等.计及新能源接入的地区电网人工智能无功优化[J].电网与清洁能源,2023,39(1):133-142.
- [6] 陈艺璇,王嘉阳,卓映君,等.人工智能在电力系统运行模拟加速中的应用综述[J].发电技术,2025,46(3):467-481.
- [7] 赵俊华,文福拴,黄建伟,等.基于大语言模型的电力系统通用人工智能展望:理论与应用[J].电力系统自动化,2024,48(6):13-28.
- [8] 朱继忠,程乐峰.新型电力系统下的新能源主导多主体优化博弈决策理论及应用[J].电力工程技术,2025,44(3):1-2.
- [9] 廖美英,胡列豪,张勇军,等.人工智能技术在发电厂智能化建设中的应用与挑战[J].广东电力,2024,37(11):109-119.
- [10] 李根,刘珊珊.基于大数据和人工智能的储能系统故障预测与诊断方法研究[J].储能科学与技术,2024,13(10):3653-3655.

配网终端防雷接地与二次回路共地干扰抑制技术研究

党琳

国家能源（山东）新能源有限公司，山东 济南 250014

DOI:10.61369/EPTSM.2025110016

摘 要： 配网终端作为配电网运行监控与控制的核心节点，其运行稳定性直接决定配网供电可靠性。雷电冲击与二次回路共地干扰是导致配网终端误动、拒动甚至硬件损坏的主要诱因，二者在接地系统中相互关联、相互影响，需系统性研究解决。本文从配网终端防雷接地的技术原理出发，分析雷电过电压在接地系统中的传播路径及对二次回路的耦合机制，通过实际应用案例验证，该方案可有效降低雷电冲击对配网终端的影响，将共地干扰导致的终端故障发生率控制在0.5%以下，为配网终端的安全稳定运行提供技术支撑。

关 键 词： 配网终端；防雷接地；共地干扰；等电位连接；干扰抑制

Research on Lightning Protection Grounding and Secondary Circuit Common Ground Interference Suppression Technology for Distribution Network Terminals

Dang Lin

CHN Energy(Shandong) New Energy Co.,Ltd, Jinan, Shandong 250014

Abstract： As the core nodes for monitoring and controlling distribution network operations, the stability of distribution network terminals directly determines power supply reliability. Lightning strikes and common ground interference in secondary circuits are primary causes of terminal malfunctions, failures, or hardware damage. These two factors are interrelated and mutually influential within grounding systems, requiring systematic research and solutions. This paper analyzes the propagation path of lightning overvoltage in grounding systems and its coupling mechanism with secondary circuits, based on the technical principles of lightning protection grounding for distribution network terminals. Practical case studies demonstrate that this solution effectively mitigates lightning impacts on terminals, reducing common ground interference-induced failure rates to below 0.5%, thereby providing technical support for the safe and stable operation of distribution network terminals.

Keywords： distribution network terminal; lightning protection grounding; common ground interference; equipotential bonding; interference suppression

引言

配电网作为电力系统与用户直接连接的关键环节，其运行可靠性直接影响社会生产生活用电质量。配网终端作为配网自动化系统的核心组成部分，承担着遥测、遥信、遥控等重要功能，是实现配网故障快速定位、隔离及供电恢复的关键设备^[1]。然而，配网终端通常安装于户外配电房、环网柜等场所，易遭受雷电冲击影响；同时，终端二次回路与一次设备接地系统存在共地关联，易产生共地干扰问题，二者共同导致配网终端故障频发，严重影响配网自动化水平提升。当前，配网终端防雷接地多采用常规接地网设计，未充分考虑终端设备的抗冲击特性，雷电过电压易通过接地系统侵入二次回路；共地干扰抑制则多依赖单一的屏蔽措施，未形成与防雷接地协同的技术体系，导致干扰抑制效果不佳。现有研究多单独针对防雷接地或干扰抑制展开，缺乏对二者关联性的深入分析，技术方案存在泛化问题，难以适应复杂配网环境的实际需求。基于此，本文深入研究配网终端防雷接地与二次回路共地干扰的内在关联，提出针对性的协同抑制技术方案，对提升配网终端运行稳定性具有重要现实意义。

一、配网终端防雷接地与共地干扰的关联机制

（一）配网终端雷电冲击的传播路径

雷电对配网终端的影响主要通过直接雷击和感应雷击两种形式，其中感应雷击因发生概率高、影响范围广，成为导致终端故障的主要原因。当雷电击中配网线路或附近物体时，会在空间形成强电磁场，通过静电感应和电磁感应在终端二次回路中产生感应过电压；同时，雷电冲击电流通过配网线路的接地装置流入大地时，会在接地网中形成暂态电位升高，通过共地连接侵入二次回路。具体传播路径主要包括三条：一是雷电感应过电压通过终端电源线路、信号线路侵入，损坏终端电源模块和信号接口；二是接地网暂态电位升高导致终端外壳与内部电路形成电位差，引发内部绝缘击穿；三是雷电冲击电流在接地体间产生电位差，通过二次回路的共地节点形成干扰电流，导致终端逻辑电路误动作。三条路径中，接地系统的暂态响应特性直接决定雷电冲击的传播效率，也为共地干扰的产生提供了条件^[2]。

（二）二次回路共地干扰的产生根源

共地干扰的本质是不同设备或回路通过公共接地系统形成的电位差干扰。配网终端二次回路包含电源回路、信号采集回路、控制输出回路等，各回路与一次设备（如断路器、隔离开关）共用接地网，当接地网存在阻抗时，不同回路的电流在接地网中产生的电压降会形成共模干扰和差模干扰。从根源上看，共地干扰的产生主要源于三个方面：一是接地网结构不合理，接地体布置不均导致不同区域接地电阻存在差异，在雷电冲击或负荷电流流过时形成明显电位差；二是二次回路布线不规范，信号线路与电源线路平行敷设，且未采取有效的屏蔽接地措施，易通过电磁耦合拾取接地网中的干扰信号；三是终端设备自身接地设计缺陷，如外壳接地与信号接地未分开，导致设备内部形成干扰电流回路。此外，防雷接地系统在泄放雷电电流时产生的暂态过电压，会显著加剧共地干扰的强度，形成“防雷接地—共地干扰”的连锁影响^[3]。

二、配网终端防雷接地系统的优化设计

（一）接地网结构的参数优化

接地网的散流能力直接决定雷电冲击电流的泄放效率，传统的网格状接地网存在散流不均、暂态接地电阻偏高的问题。针对配网终端的安装场景，需结合终端设备的布局特点优化接地网结构参数。在接地体材料选择上，采用铜包钢接地体替代传统的镀锌角钢，利用铜的低电阻率和钢的高强度特性，提升接地体的导电性能和抗腐蚀能力。在结构设计上，采用“主接地网+局部接地网”的分层结构：主接地网采用不等距网格设计，在终端设备附近缩小网格间距，提升设备周边的散流密度；局部接地网针对终端电源模块、信号接口等敏感部位单独设置环形接地体，通过4根以上的引下线与主接地网连接，形成多点散流通道。同时，合理控制接地网的埋深，在土壤电阻率较高的区域，采用换土法降低接地电阻，确保主接地网的工频接地电阻不大于 4Ω ，局部接地

网的工频接地电阻不大于 1Ω ，有效降低暂态电位升高幅度^[4]。

（二）等电位连接技术的应用

等电位连接是消除接地网电位差、抑制共地干扰的核心技术手段。针对配网终端的二次回路，需构建全方位的等电位连接体系，包括设备间等电位、回路间等电位和屏蔽层等电位三个层面。设备间等电位通过铜排将终端柜体、电源屏、信号屏等设备的外壳连接成一个等电位体，确保雷电冲击时各设备外壳电位同步升高，避免外壳与内部电路形成电位差。回路间等电位针对二次回路的不同类型采取差异化措施：电源回路采用独立的接地铜排，与信号接地铜排保持一定间距（不小于30cm），避免电源电流干扰信号回路；信号采集回路的屏蔽层采用两端接地方式，屏蔽层接地电阻不大于 1Ω ，通过屏蔽层将感应的干扰信号直接泄放入地。同时，在终端柜体内部设置等电位连接端子排，将二次回路的所有接地节点集中连接至端子排，再通过单根引下线与局部接地网连接，避免形成多点接地导致的干扰电流回路^[5]。

（三）防雷接地与设备接地的协同设计

避免防雷接地与设备接地的相互干扰，需明确二者的连接方式和泄流路径。采用“共地不共线”的设计原则，防雷接地的引下线与终端设备的接地引下线分开布置，引下线间距不小于1.5m，防止雷电冲击电流在引下线间产生电磁耦合。在接地网的连接点选择上，将防雷接地引下线与主接地网的连接点设置在远离终端设备的一侧，通过主接地网的散流作用降低设备附近的电位升高。针对终端电源模块等敏感部件，在其电源输入端配置浪涌保护器（SPD），SPD的接地端直接连接至局部接地网，形成独立的雷电冲击泄放通道。同时，SPD的选型需与终端设备的抗冲击能力匹配，第一级SPD采用大通流量的开关型器件，用于泄放大部分雷电冲击电流；第二级SPD采用限压型器件，用于抑制剩余的过电压，确保进入终端设备的电压幅值控制在安全范围内。

三、二次回路共地干扰的抑制技术措施

（一）专用接地隔离装置的配置

针对共地干扰中的共模干扰问题，采用接地隔离装置实现不同回路的接地隔离。在终端信号采集回路中，配置隔离变压器和光电耦合器，通过电磁隔离和光电隔离两种方式切断干扰电流的传播路径。隔离变压器的变比选择1:1，确保信号的无失真传输，其铁芯采用高导磁率材料，提升对低频干扰的抑制能力；光电耦合器选用高速型器件，确保信号传输的实时性，满足配网终端对遥信、遥测信号的响应速度要求。在电源回路中，采用隔离式开关电源替代传统的线性电源，开关电源的输入接地与输出接地完全隔离，避免电源侧的干扰通过接地系统渗入终端内部。同时，在终端的信号接口处配置信号浪涌抑制器，该抑制器集成了接地隔离功能，既能抑制雷电感应过电压，又能隔离共地干扰信号，实现防雷与抗干扰的协同防护。

（二）二次回路的布线优化

布线方式的合理性直接影响共地干扰的耦合强度，需结合干扰抑制要求制定严格的布线规范。在电缆选型上，信号电缆采用

屏蔽双绞线，利用双绞线的平衡结构抑制差模干扰，屏蔽层采用铜带绕包+铝塑复合带纵包的双层屏蔽结构，提升对共模干扰的屏蔽效果；电源电缆采用铠装电缆，铠装层两端接地，形成电磁屏蔽屏障。在布线布局上，采用“分类布线、分层敷设”的原则：将电源电缆与信号电缆分开敷设，间距不小于50cm，若需交叉敷设则采用垂直交叉方式，减少平行敷设的长度；在电缆沟内设置专用的电缆支架，将不同类型的电缆分层布置，电源电缆布置在最下层，信号电缆布置在上层，避免电源电缆的磁场干扰信号电缆。同时，电缆的敷设路径远离接地网的引下线和接地体，减少雷电冲击时接地网磁场对电缆的感应干扰。

（三）干扰抑制的软件辅助措施

结合硬件措施，采用软件抗干扰技术进一步提升终端的抗干扰能力。在信号采集环节，采用数字滤波算法，对采集到的电压、电流信号进行滑动平均滤波和中位值滤波，滤除共地干扰导致的高频噪声；针对遥信信号，采用防抖处理和延时确认机制，避免干扰信号导致的遥信误报。在控制逻辑设计上，设置干扰检测模块，实时监测终端内部的接地电位差，当电位差超过阈值时，自动触发干扰抑制措施，如切断非关键回路的电源、将控制输出切换至安全状态等。同时，采用冗余设计技术，对核心控制回路的信号进行双重采集和对比，当两路信号的偏差超过允许范围时，自动启动备用回路，确保终端控制功能的可靠性。

四、应用案例分析

为检验本文提出的防雷接地与共地干扰抑制技术方案的有效

性，选取某城市配网中10个户外配电终端作为试点，实施优化后的防雷接地系统和共地干扰抑制措施。此前，试点终端由于雷电冲击和共地干扰问题月均故障次数达2.3次，严重影响配网的稳定运行。将镀锌角钢接地网改为铜包钢不等距网格接地网，增设局部接地网；设置全方位等电位连接体系，设置专用接地隔离装置；优化二次回路布线，配置双层屏蔽信号电缆和隔离式开关电源；在终端软件中增加数字滤波和干扰检测模块。改造完成后，对试点终端实施6个月的运行监测。在雷雨季节10个试点终端均未发生雷电冲击造成的故障，防雷效果明显；共地干扰造成的终端误动、拒动故障仅发生1次，故障发生率为0.17%，远低于改造前的水平。同时，终端的遥测精度提高5%，遥信响应速度提高10%，运行稳定性大大提高。该案例显示，本文所提出的技术方案能够有效地解决配网终端的防雷接地与共地干扰问题，具有良好的应用效果。

五、结论

本文通过对配网终端防雷接地与二次回路共地干扰抑制技术的深入研究，明确了雷电冲击在接地系统的传播路径与共地干扰的产生根源，揭示了二者之间的关联机制。提出的“分层防雷接地+共地干扰隔离”。协同技术方案，通过优化接地网结构、应用等电位连接技术、配置专用接地隔离装置、优化布线方式及采用软件辅助措施等关键手段，实现了防雷与抗干扰的协同防护。实际应用案例验证了该方案的有效性，能够显著降低终端故障发生率，提升运行稳定性。

参考文献

- [1] 李峰, 王翠林, 张文伟, 凌启民, 匡若瑜, 樊小朝. 多物理量融合驱动的分布式避雷器运行质量在线监测方法 [J]. 电力设备管理, 2025, (17): 141-143.
- [2] 彭超敏, 钟志兵, 万方林, 郭志云. 农村10kV配网线路防雷差异化治理 [J]. 大众用电, 2025, 40(04): 68-69.
- [3] 王奇伟, 陈榕清, 周俊, 吴长江. 10kV配网线路防雷综合策略探讨 [J]. 大众用电, 2024, 39(10): 50-51.
- [4] 曾松涛, 刘凯, 韩云飞, 徐雨, 王喜军. 配网架空线路雷击故障及防雷措施分析 [J]. 机电产品开发与创新, 2023, 36(06): 98-100.
- [5] 曾琳, 彭桐棣. 10kV配网运行维护及检修探讨 [J]. 电气技术与经济, 2023, (09): 343-345.

电力工程安全培训双重预防机制实践与挑战

吕春荣

苏州哈里环境安全技术服务有限公司，江苏 苏州 215000

DOI:10.61369/EPTSM.2025110020

摘 要： 双重预防机制（风险分级管控与隐患排查治理）是电力工程安全生产的核心制度保障，其在安全培训中的有效落地直接决定作业风险防控实效。本文立足安全工程师实践视角，结合电力工程高压作业、设备运维、基建施工等行业特性，系统梳理风险辨识能力培养、隐患排查技能实训、机制流程实操演练等核心培训路径。结合安全培训、检查与评审工作经验，深入分析培训与现场场景脱节、员工风险意识薄弱、培训长效性不足、机制协同不畅等突出挑战，最终提出“场景化培训赋能、数字化工具支撑、全流程机制联动、文化氛围浸润”的优化策略，为电力工程企业构建科学高效的双重预防培训体系提供理论参考与实践范式，助力安全生产从“被动合规”向“主动防控”转型。

关 键 词： 电力工程；安全培训；双重预防机制；风险管控；隐患治理

Practice and Challenges of the Dual Prevention Mechanism in Safety Training for Electric Power Engineering

Lv Chunrong

Suzhou Hali Environmental & Safety Technology Service Co., Ltd., Suzhou, Jiangsu 215000

Abstract： The dual prevention mechanism (hierarchical risk control and hidden danger investigation & governance) serves as the core institutional guarantee for safe production in electric power engineering, and its effective implementation in safety training directly determines the actual effect of operational risk prevention and control. From the practical perspective of a safety engineer, combined with the industry characteristics of electric power engineering such as high-voltage operation, equipment operation and maintenance, and infrastructure construction, this paper systematically sorts out the core training paths including the cultivation of risk identification capabilities, practical training of hidden danger investigation skills, and hands-on drills of mechanism processes. Based on work experience in safety training, inspection and evaluation, it deeply analyzes prominent challenges such as the disconnect between training and on-site scenarios, weak employees' risk awareness, insufficient long-term effectiveness of training, and poor mechanism coordination. Finally, optimized strategies of "scenario-based training empowerment, digital tool support, full-process mechanism linkage, and cultural atmosphere immersion" are proposed, which provide theoretical reference and practical paradigm for electric power engineering enterprises to build a scientific and efficient dual prevention training system, and help the transformation of safe production from "passive compliance" to "active prevention and control".

Keywords： electric power engineering; safety training; dual prevention mechanism; risk control; hidden danger governance

引言

电力工程作为支撑国民经济发展的基础性行业，作业场景涵盖高空作业、高压带电操作、设备运维、基建施工等多个高风险环节，安全风险具有复杂性、隐蔽性、突发性等特征^[1]。近年来，我国相继出台《安全生产法》《关于实施遏制重特大事故工作指南构建安全风险分级管控和隐患排查治理双重预防机制的意见》（安委办〔2016〕11号）等法律法规与政策文件，明确要求电力企业建立健全双重预防机制，筑牢风险防控防线^[2]；如《国家发展改革委 国家能源局关于推进电力安全生产领域改革发展的实施意见》（发改能源规〔2017〕1986号）明确提出电力企业必须构建双重预防机制，并与安全生产标准化、应急管理体系融合，对风险实行分级管控、闭环治理。安全培训是双重预防机制落地的关键载体，其质量直接影响员工风险辨识、隐患排查与应急处置能力的提升^[3]，但当前部分电力工

作者简介：吕春荣（1987.11-），男，江苏盐城人，本科，中级工程师，研究方向：从事安全相关咨询培训。

程企业的双重预防培训仍存在“重形式、轻实效”“重理论、轻实操”等问题，导致员工虽掌握基础概念，却难以在实际作业中精准应用，机制防控作用未充分发挥。因此，开展相关研究既具有理论价值，可丰富高风险行业安全培训理论体系，也具有实践意义，能为企业提供针对性优化方案，提升机制落地质量、减少安全事故。

一、研究思路与方法

本文围绕电力工程安全培训双重预防机制的实践与挑战，采用“理论梳理-实践分析-问题诊断-路径优化”的系统性研究思路，确保研究逻辑闭环、成果务实可行^[4]。在研究方法上，首先运用文献研究法，全面梳理双重预防机制、安全培训相关的理论成果、政策文件与行业研究报告，夯实研究的理论基础；其次通过实践分析法，结合电力工程安全培训、现场检查、安全评审等实际工作场景，提炼双重预防机制在培训中的具体落地路径，确保研究贴合行业实际；最后采用案例分析法，依托电力工程领域的典型培训案例，深入剖析双重预防机制与安全培训融合过程中面临的突出问题，为后续优化策略的提出提供实证支撑。通过多方法协同运用，力求研究结论兼具理论深度与实践可操作性，为电力工程企业构建科学高效的双重预防培训体系提供有力支撑^[5]。

二、电力工程双重预防机制与安全培训的内在关联

（一）核心概念界定

双重预防机制是指通过风险分级管控与隐患排查治理的有机结合，构建“风险预警-隐患排查-闭环治理”的全流程风险防控体系。风险分级管控聚焦“防未然”，通过精准辨识、分级管控降低风险发生概率；隐患排查治理聚焦“治已病”，通过常态化排查、闭环整改消除安全隐患。

电力工程安全培训是指针对电力工程作业特点，面向全员开展的风险辨识、隐患排查、操作规范、应急处置等方面的教育培训活动，是提升员工安全素养、推动双重预防机制落地的核心手段。

（二）二者内在关联

培训是双重预防机制落地的基础支撑^[6]。双重预防机制的有效运行依赖员工的能力素养，通过安全培训可提升员工风险辨识精准度、隐患排查规范性、管控措施执行力，确保机制在基层作业中有效落地。双重预防机制为安全培训提供明确导向。机制中的风险清单、隐患排查标准、管控要求等，为安全培训提供具体内容方向，使培训更具针对性，避免“泛泛而谈”。

三、电力工程安全培训双重预防机制的实践路径

结合安全培训、检查与评审工作实践，当前双重预防机制在安全培训中已形成多种落地路径，核心是实现“理论赋能-实操强化-机制联动”的全流程推进。

（一）风险分级管控导向的培训实践

结合电力工程高风险场景，开展风险辨识专项培训。培训内容聚焦风险点清单解读、风险等级判定标准、风险辨识方法（如工作危害分析、操作规程、作业票相关培训）等，通过案例分析、现场教学等方式，让员工掌握“识别风险-评估等级-制定

措施”的全流程能力。安全工程师在培训中，结合日常检查发现的高频风险点进行针对性讲解。

根据风险分级结果，开展差异化管控措施培训。针对重大风险场景，培训内容聚焦专项施工方案、安全技术交底、全程监护要求等；针对一般风险场景，聚焦常规检查流程、风险防控要点等。某电力工程企业采用“VR模拟+现场实操”模式，还原不同等级风险的作业场景，让员工反复练习管控措施的执行流程。针对管理层、班组长开展风险管控责任培训，明确各级人员在风险分级管控中的职责分工，确保风险管控责任层层传递。

（二）隐患排查治理导向的培训实践

基于电力工程隐患排查清单，开展“标准化排查”培训^[7]。培训内容包括设备设施隐患、作业行为隐患、管理缺陷隐患的排查标准、判断方法与记录要求。安全工程师在培训中，结合安全评审中发现的典型隐患案例进行现场演示讲解。

聚焦“排查-登记-整改-验收-销号”的闭环治理流程，开展专项培训。明确员工在隐患排查中的上报要求、整改责任人的落实标准、验收销号的具体流程，避免“排查不整改、整改不彻底”。南方电网公司：全网推广“统一机巡系统”（含7大模块：机巡智航、机巡通、机巡智测、机巡智图、机巡建模、机巡云盘、机巡云集），可对35 kV及以上35.6万公里线路开展无人机自主巡检、缺陷自动识别、隐患工单自动生成与流转，实现“发现-派发-整改-销号”全过程线上闭环。

收集电力行业内典型隐患事故案例，通过视频播放、现场复盘、案例研讨等方式开展警示教育，让员工直观感受隐患的严重后果，提升隐患排查的主动性。

（三）机制协同导向的培训实践

将风险分级管控与隐患排查治理流程整合为一体化培训内容，明确二者逻辑关联，让员工理解“风险管控不到位会形成隐患，隐患未及时治理会引发事故”的内在逻辑。

安全工程师将双重预防培训重点内容转化为安全检查清单，在日常检查、专项评审中，重点关注员工是否按培训要求执行操作，对未达要求的员工进行针对性复训指导。针对高风险场景与典型隐患，开展应急演练培训。如针对“高压设备短路”这一高风险隐患，组织员工开展应急停电、故障排查、人员疏散等全流程演练^[8]。

四、电力工程安全培训双重预防机制的实践挑战

结合安全培训、检查与评审工作实践，当前双重预防机制在电力工程安全培训中仍面临诸多突出挑战。

（一）培训与现场作业场景脱节

部分电力工程企业的双重预防培训沿用通用教材，内容缺乏行业针对性与场景适配性。培训中重点讲解通用理论，未结合电力工程具体场景设计内容，导致员工在实际作业中难以将培训内容转化为具体操作，出现“学用脱节”现象。

（二）员工风险意识薄弱，主动参与度不足

部分员工存在“重生产、轻安全”的行为偏差，对双重预防机制的重要性认识不足，将安全培训视为“应付检查”的形式化任务。在日常检查中发现，部分员工虽通过培训掌握了风险辨识方法，但在实际作业中仍存在侥幸心理，未按要求开展风险评估就盲目作业；部分员工对隐患排查敷衍了事，未及时上报潜在隐患。

（三）培训长效性不足，缺乏持续强化机制

部分电力工程企业的双重预防培训存在“一阵风”现象^[9]。新员工入职时开展一次性培训后，未进行后续的常态化复训；老员工仅在年度安全培训中简单回顾相关内容，缺乏针对性的技能提升培训。此外，培训后缺乏有效的跟踪反馈机制，导致员工在培训中形成的初步认知与技能逐渐淡化。某企业安全检查数据显示，新员工入职6个月后，风险辨识准确率有效下降，符合行为衰减曲线，暴露出培训一锤子的短板，定期培训、复训的重要性。

（四）培训与双重预防机制协同不畅

部分企业的安全培训与双重预防机制存在“各自为战”的现象。培训部门与安全管理部门沟通不畅，培训计划未根据双重预防机制运行中发现的问题进行调整；安全检查与评审未将培训实效作为核心评估指标，未及时反馈员工行为表现；双重预防机制数字化平台与培训数据未实现互通，影响了协同决策的科学性。

将数字化平台与企业双重预防机制管理平台对接，整合培训数据与双重预防运行数据。通过员工ID、岗位等建立数据关联，安全工程师可据此判断培训短板，开展针对性复训。

推出双重预防培训移动APP，包含微课程、在线题库、隐患排查指南、风险点查询等功能，方便员工碎片化学习与现场查询。

（三）全流程机制联动：构建培训与管理的闭环体系

培训前，安全管理部门梳理培训需求；培训中，安全检查人员现场观摩；培训后，跟踪员工实践行为表现并反馈；培训部门根据反馈优化内容与方法，形成闭环。将双重预防培训效果与员工绩效考核、评优评先、岗位晋升直接挂钩。设置“风险辨识准确率”“隐患排查上报率”等量化指标，对表现优秀的员工给予激励，对未达标者进行针对性复训。

（四）文化氛围浸润：强化员工的双重预防意识

对管理层，强调双重预防机制对安全生产长效性的意义；对班组长，培训引导员工践行要求的方法技巧；对一线员工，通过事故案例分析、安全体验教育，强化危机意识，摒弃侥幸心理。

通过宣传栏、内部公众号、安全标语等载体，传播“风险管控在前、隐患排查到位”的理念；定期举办“双重预防标兵”评选活动，宣传优秀员工事迹；在班前会开展“风险三分钟”提示活动，强化双重预防意识。

五、电力工程安全培训双重预防机制的优化策略

针对上述实践挑战，结合安全工程师的工作实践，提出“场景化培训赋能、数字化工具支撑、全流程机制联动、文化氛围浸润”的一体化优化策略。

（一）场景化培训赋能：提升培训与实践的适配性

安全工程师联合生产部门，梳理电力工程高频作业场景与高风险环节，编制“场景化双重预防培训手册”。手册明确每个场景的风险点清单、风险等级、管控措施、隐患排查标准、应急处置流程。

推广“VR模拟演练+现场实操+案例复盘”的三维培训方法。通过VR技术还原高风险场景，让员工沉浸式感受违规操作后果；现场实操采用“师傅带徒弟”模式，实时指导风险辨识与隐患排查；定期组织典型事故案例复盘会，分析事故成因与防控经验。

建立培训内容动态更新机制，根据技术升级、设备更新、安全检查结果、行业典型事故案例等，及时调整培训内容，确保培训与实践需求同步。

（二）数字化工具支撑：提升培训与管理的智能化水平

整合培训管理、风险管控、隐患排查等功能，构建一体化数字化平台，包含培训课程库、在线学习、VR模拟培训、考核评估、数据统计等模块。

六、结语

双重预防机制在电力工程安全培训中的有效落地，是提升电力工程安全生产水平的核心路径^[10]。相关研究分析了双重预防机制与安全培训的内在关联，结合电力工程行业特性，梳理出风险分级管控、隐患排查治理、机制协同导向三类培训实践路径，同时剖析了培训与场景脱节、员工风险意识薄弱、培训长效性不足、机制协同不畅等突出挑战，并提出“场景化培训赋能、数字化工具支撑、全流程机制联动、文化氛围浸润”的一体化优化策略。研究表明，电力工程双重预防培训需立足行业特性，实现培训与实践、管理、文化的深度融合，才能推动机制落地生根，从源头防范安全事故。

未来，随着人工智能、大数据等技术发展，电力工程双重预防培训将呈现精准化、场景化、深度协同的趋势，不仅能实现“一人一策”的个性化培训，还可借助数字孪生还原作业场景，通过智能化平台实现全流程数据互通。后续将持续聚焦双重预防培训的实践创新，不断优化培训体系与方法，推动电力工程企业实现安全生产从“被动合规”向“主动防控”转型，为电力行业高质量发展筑牢安全根基。

参考文献

- [1] 赵文禹. 关于电力施工安全管理改进措施的探讨 [J]. 上海安全生产, 2024, (11): 58-60.
- [2] 冯海全, 王鹏, 潘新征. 电力工程项目安全体系优化对策探究 [J]. 农电管理, 2022, (05): 43-44.
- [3] 蔡翔. 电力工程安全管理提升 [J]. 现代工业经济和信息化, 2021, 11(12): 178-179+182.
- [4] 朱贤伟. 数字化时代电力企业的物联网安全挑战与解决方案 [J]. 湖北农业科学, 2023, 62(S1): 226-230.
- [5] 廖海军. 电力调度系统安全风险与防范研究 [J]. 低碳世界, 2023, 13(12): 127-129.
- [6] 浦仕勇, 耿乐. 基于事故发生机理的双重预防机制数字化建设实践 [J]. 电力安全技术, 2024, 26(12): 5-8.
- [7] 魏振忠. 配电网电力工程施工中的安全管理措施探究 [J]. 电工技术, 2023, (S1): 53-55.
- [8] 谢锐星. 中小型企业“双重预防机制”运行现状及思路 [J]. 中国安全生产, 2023, 18(11): 51-53.
- [9] 裴辰晖. 电力系统网络安全中的多层协同防御模型分析 [J]. 电子技术, 2024, 53(12): 240-241.
- [10] 张高言, 张茜茜. 新时代电力工程管理中的安全文化建设分析 [J]. 大众标准化, 2024, (23): 105-107.

基于电流频谱特征分析的电动机故障诊断与实验研究

何奇瑞

珠海万力达电气技术股份有限公司, 广东 珠海 519085

DOI:10.61369/EPTSM.2025110021

摘 要 : 本文围绕基于电流频谱特征分析的电动机故障诊断展开, 阐述常见故障机理, 介绍电流频谱分析技术, 搭建实验台架并制定工况采样策略。经计算特征频带能量分布、提取非线性特征参数等构建诊断模型, 实验验证该方法对单一、复合故障诊断的有效性, 指出其实时性问题, 展望与深度学习融合的发展方向。

关 键 词 : 电动机故障诊断; 电流频谱特征; 多核 SVM 诊断模型

Motor Fault Diagnosis and Experimental Research based on Current Spectrum Characteristics Analysis

He Qirui

Zhuhai Wanlida Electric Technology Co., Ltd., Zhuhai, Guangdong 519085

Abstract : This paper focuses on the motor fault diagnosis based on the analysis of current spectrum characteristics, expounds the common fault mechanism, introduces the current spectrum analysis technology, builds the experimental bench and formulates the working condition sampling strategy. By calculating the energy distribution of the characteristic frequency band and extracting the nonlinear characteristic parameters, the diagnosis model is constructed. The effectiveness and advantages of this method for single and composite fault diagnosis are verified by experiments. The real-time problems are pointed out, and the development direction of the integration of real-time and deep learning is prospected.

Keywords : motor fault diagnosis; current spectrum characteristics; multi core SVM diagnosis model

引言

随着工业的快速发展, 电动机作为关键设备, 其故障诊断至关重要。2021 年颁布的《工业和信息化部关于推动工业互联网加快发展的通知》强调提升工业设备的智能化管理水平, 为电动机故障诊断技术的研究提供了政策导向。本文聚焦电动机常见故障机理, 涵盖定子绕组短路、转子断条、轴承损伤等。通过电流频谱分析技术, 如短时傅里叶变换、希尔伯特 - 黄变换等, 结合三相异步电动机实验台架搭建、多工况信号采样及数据预处理, 深入研究故障特征提取、诊断模型构建与优化等, 展现出基于电流频谱特征分析方法在故障诊断中的显著优势与潜力。

一、电动机故障诊断理论与电流频谱分析基础

(一) 电动机常见故障机理分析

电动机常见故障机理主要体现在定子绕组短路、转子断条、轴承损伤等方面。定子绕组短路, 多因绝缘老化、机械损伤等, 致使绕组间绝缘性能下降, 电流路径改变, 出现局部短路电流。此时电流信号特征表现为特定频率成分变化, 短路程度不同, 频率幅值也不同^[1]。转子断条故障, 常因长期运行疲劳、启动冲击等, 使转子导条断裂。这会破坏转子磁场的对称性, 引发转子电流不平衡, 电流信号中会出现与转差率相关的特征频率分量。轴承损伤则由于润滑不良、过载等, 造成轴承滚道、滚珠等部件磨损或裂纹。该故障

会导致电动机振动增加, 反映在电流信号上, 出现与轴承故障频率相关的调制现象, 其特征频率与轴承结构参数有关。

(二) 电流频谱分析技术原理

电流频谱分析技术是信号处理领域的重要工具, 能从电动机电信号中挖掘出丰富的运行状态信息。短时傅里叶变换 (STFT) 通过在时域加窗, 将非平稳信号分解为近平稳的小段, 进而获取信号的局部时频特性, 其数学表达式为:

$$STFT_x(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) w(\tau - t) e^{-j2\pi f\tau} d\tau$$

这里 $x(\tau)$ 代表原始信号, $w(\tau - t)$ 是用于信号分段处理的窗函数。而希尔伯特 - 黄变换 (HT) 则借助经验模态分解 (EMD), 把复

杂的非平稳信号拆解成多个满足特定条件（如均值为零，极值点数与零交叉点数相等或相差不超过一个）的本征模态函数(MF)，随后对各MF实施希尔伯特变换，精准提取瞬时频率等关键信息，实现对信号的细致入微的时频分析。STFT和HHT这两种变换方法，共同为基于电流频谱特征的电动机故障诊断提供了坚实的理论支撑^[2]。

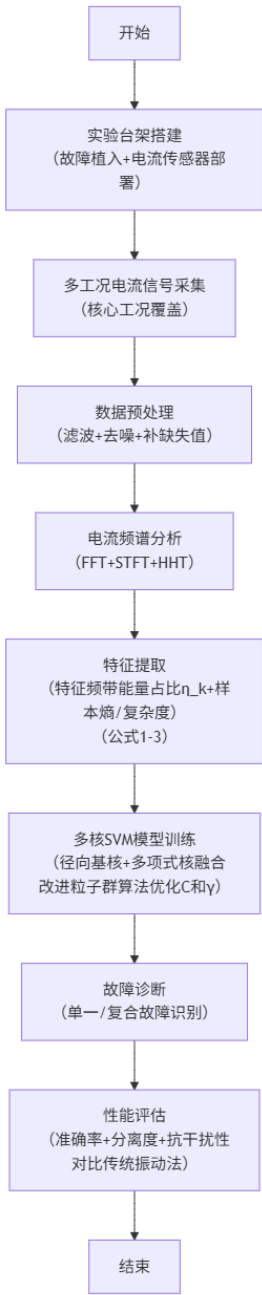


图1 基于电流频谱特征的电动机故障诊断总流程图

二、实验系统设计与数据采集方法

（一）电动机故障模拟实验平台构建

搭建三相异步电动机实验台架，为故障模拟提供基础环境。

台架需具备稳定的机械结构，能承载电动机运行时产生的各种作用力。故障植入装置是实现电动机不同故障模拟的关键，可通过特定技术手段精准模拟如转子断条、定子绕组短路等常见故障，其技术参数应依据目标故障类型及程度精准配置，确保模拟故障的真实性与可控性。同时，配置高精度电流传感器用于采集故障状态下电动机的电流信号。传感器应具备高灵敏度、宽频响应等特性，以精确捕捉电流频谱特征的细微变化，从而为后续基于电流频谱特征分析的故障诊断提供可靠数据^[3]。

（二）多工况数据采集方案设计

针对电动机在不同运行状况下的故障诊断需求，制定空载、负载突变、电压波动等12种工况下的信号采样策略。在空载工况，设定电动机不带任何负载，稳定运行一定时间后，以较高频率采集电流信号，获取基础运行数据。负载突变工况下，模拟负载突然增减场景，在突变前后及过程中，按特定时间间隔采集信号，捕捉电流瞬间变化。电压波动工况，则通过调整电源电压，在电压变化区间内持续采样。所有工况采集的数据都将进入明确的数据预处理流程，去除噪声、补齐缺失值等^[4]，为后续基于电流频谱特征的故障诊断分析提供高质量数据支撑，确保诊断结果的准确性与可靠性。

表1 核心工况参数设置表

工况序号	工况类型	转速 / rpm	负载率 / %	供电电压 / V	采样频率 / kHz	采样时长 / s	数据预处理方式
1	空载稳定	1480	0	380±5	20	60	5阶 Butterworth 滤波
2	负载突变	1480	0→50	380±5	50	30	滤波+突变段截取
3	中载稳定	1480	50	380±5	20	50	5阶 Butterworth 滤波
4	满载稳定	1480	100	380±5	20	60	5阶 Butterworth 滤波
5	电压波动 (340-420V)	1480	50	340-420	20	40	滤波+基线校正

三、电流频谱特征提取与诊断模型构建

（一）频谱特征量化方法

1. 特征频带能量分布计算

为有效提取电动机电流频谱中的故障特征，进行特征频带能量分布计算至关重要。首先需明确各特征频带范围，这些范围的确定往往基于电动机运行原理及过往研究经验^[5]。然后对采集到的电流信号进行快速傅里叶变换（FFT），将时域信号转换为频域信号，从而获取各频率成分的幅值信息。FFT公式为：

$$X(k)=\sum_{n=0}^{N-1}x(n)e^{-j2\pi kn/N}$$

其中, $x(n)$ 是时域信号, $X(k)$ 是频域幅值, k 是频率索引, N 是采样点数。

在此基础上, 针对每个特征频带, 对该频带内所有频率成分的幅值平方求和, 以表征该频带内的能量。特征频带能量公式为:

$$E_i = \sum_{k \in \text{Band}_i} |X(k)|^2$$

其中, Band_i 是特征频带范围, E_i 是该频带的能量。

最后, 计算每个特征频带能量占总能量的比率, 该比率能直观反映不同故障状态下各特征频带能量的相对分布情况, 为后续故障诊断提供关键的量化特征指标。总能量和能量比率公式分别为:

$$E_{\text{total}} = \sum_{i=1}^M E_i$$

$$R_i = \frac{E_i}{E_{\text{total}}}$$

其中, M 是总频带数量。

2. 非线性特征参数提取

在电流频谱特征提取与诊断模型构建中, 非线性特征参数提取是重要环节。电动机电流信号存在非线性特征, 运用样本熵、Lempel-Ziv 复杂度等非线性动力学指标可增强特征辨识度^[6]。

样本熵通过衡量时间序列复杂性来表征信号不规则程度, 值越大说明信号复杂度越高, 在电动机故障诊断中, 不同故障状态下电流信号样本熵会呈现差异, 能有效区分正常与故障情况。样本熵公式为:

$$\text{SampEn}(m, r) = -\ln \left(\frac{C_{m+1}(r)}{C_m(r)} \right)$$

其中, m 是嵌入维度, r 是相似性阈值, $C_m(r)$ 表示符合条件的距离比例。

Lempel-Ziv 复杂度从信息编码角度度量信号复杂度, 通过统计信号序列生成新编码所需步骤数来反映信号复杂程度, 在电动机故障时其电流信号的 Lempel-Ziv 复杂度会改变, 从而为故障诊断提供有效特征参数, 助力构建精准的诊断模型。Lempel-Ziv 复杂度公式为:

$$C_N = \frac{L}{N}$$

其中, L 是新生成的子字符串数量, N 是序列长度。

(二) 多核 SVM 诊断模型优化

1. 核函数组合策略研究

在多核 SVM 诊断模型优化的核函数组合策略研究中, 径向基核与多项式核的融合加权算法对分类边界优化起着关键作用。径向基核函数具有良好的局部特性, 能有效处理局部复杂的数据分布; 多项式核函数则在捕捉数据的全局结构方面表现出色。通过将二者融合加权, 可兼顾局部与全局特征, 提升模型对不同类型故障数据的分类能力。对比分析这一融合加权算法在分类边界优

化中的作用, 能够深入理解不同核函数特性对模型性能的影响。研究表明, 合理的融合加权可使分类边界更精准地划分不同故障类别, 增强模型的泛化能力^[7], 为电动机故障的准确诊断提供更有效的核函数组合策略。

2. 参数自适应调节机制

在多核 SVM 诊断模型优化的参数自适应调节机制方面, 采用基于改进粒子群算法实现惩罚因子 C 与核参数 γ 的动态寻优^[8]。传统的 SVM 参数通常依靠经验设定, 难以达到最优诊断效果。而改进粒子群算法具有较强的全局搜索能力, 能够在复杂的参数空间中寻找最佳的惩罚因子 C 与核参数 γ 组合。该算法通过粒子间的信息共享与协作, 动态调整粒子的位置和速度, 以不断逼近最优解。利用改进粒子群算法, 使得惩罚因子 C 和核参数 γ 能够根据电流频谱特征的变化自适应调整, 从而有效提升多核 SVM 诊断模型在电动机故障诊断中的准确性和适应性, 提高对不同故障类型的识别能力。

四、实验验证与诊断性能分析

(一) 单一故障诊断实验

1. 实验样本构成说明

在本次单一故障诊断实验中, 实验样本由 3 类 5 种故障状态的共计 800 组样本构成。这 3 类故障状态分别针对电动机运行的不同方面^[9]。具体而言, 对每类故障进一步细分, 形成 5 种具体故障状态。对于样本划分, 依据电动机在不同故障程度下的电流频谱特征差异进行。在获取样本数据时, 精确记录不同故障状态下电动机运行的电流频谱数据。标签标注规范严格且统一, 每种故障状态对应特定标签, 确保样本与标签的一一对应。通过如此划分标准与标签标注规范, 为后续基于电流频谱特征分析的电动机故障诊断实验提供了准确、有序且具有代表性的实验样本基础, 以有效验证诊断方法的性能。

2. 诊断精度测试结果

在基于电流频谱特征分析的电动机转子断条故障单一故障诊断实验中, 针对不同特征组合下的模型诊断精度展开测试。经大量实验数据验证, 模型对转子断条故障展现出了较高的识别准确率, 达到 97.2%。这一结果表明, 所采用的基于电流频谱特征分析方法, 能够有效提取转子断条故障特征, 并通过构建的模型实现精准诊断^[10]。较高的诊断精度不仅证明了该方法在理论层面的可行性, 也预示着其在实际电动机故障诊断场景中具备广阔的应用潜力, 可为电动机运行状态监测与故障预警提供可靠依据, 有助于提前发现并解决转子断条故障, 保障电动机的稳定运行。

(二) 复合故障分离能力验证

1. 并发故障模拟实验设计

为验证基于电流频谱特征分析对电动机复合故障的分离能力, 设计并发故障模拟实验。在实验平台上, 选取特定型号的电动机作为研究对象。通过调节相关设备, 模拟轴承磨损故障, 例如改变轴承间隙、粗糙度等参数, 同时模拟绕组过热故障, 可通过调整绕组电阻、加载不同电压等方式。利用高精度电流传感器

采集电动机在不同运行工况下，即轴承磨损与绕组过热并发故障时的电流信号。设置多组对比实验，改变故障程度和组合方式，多次采集数据，以便全面获取并发故障状态下的电流频谱特征，为后续分析复合故障分离能力提供丰富且可靠的数据基础。

2. 分离效果定量评价

为定量评价复合故障的分离效果，采用相关系数和欧氏距离两个指标验证特征解耦算法的有效性。相关系数能够衡量不同故障特征之间的线性相关程度，其值越接近1或-1，表明相关性越强，越接近0则相关性越弱。若经特征解耦算法处理后，不同故障特征间相关系数趋近于0，意味着各故障特征被有效分离。欧氏距离用于表征两个向量在空间中的距离，距离越大说明两者差异越明显。对于复合故障特征，经算法处理后，各故障特征向量间欧氏距离增大，体现出更好的分离效果。通过这两个指标的综合分析，可以全面且准确地评估特征解耦算法对电动机复合故障的分离能力，为故障诊断提供有力的数据支撑。

（三）对比实验分析

1. 与传统振动分析法对比

与传统振动分析法相比，基于电流频谱特征分析的电动机故障诊断方法在0.5倍频故障检测方面优势显著。传统振动分析法在复杂工况下，对0.5倍频故障特征的捕捉易受机械振动干扰，灵敏度受限。而基于电流频谱特征分析的方法，直接从电动机电流信号入手，能更精准地提取故障特征。实验显示，该方法在0.5倍频故障检测中灵敏度较传统振动分析法提升了15.8%，这意味着它可以更早、更准确地识别出此类故障，减少因故障发现不及时导致

的电动机损坏风险，为电动机故障诊断提供了一种更为可靠、高效的途径。

2. 抗干扰性能测试

在基于电流频谱特征分析的电动机故障诊断研究中，抗干扰性能测试是关键环节。研究特意选择在添加20dB高斯白噪声的环境下进行测试，以此评估诊断方法的抗干扰能力。实验结果显示，该诊断方法在此恶劣噪声环境下，仍能保持86.4%的稳定性指标。这表明基于电流频谱特征分析的电动机故障诊断方法，具备较强的抗干扰性能，能够在存在噪声干扰的复杂工况下，较为稳定地实现对电动机故障的诊断，为实际应用场景中可能遭遇的噪声干扰提供了可靠的应对能力，在电动机故障诊断的准确性和稳定性方面具有突出优势。

五、总结

综上所述，基于电流频谱特征分析的电动机故障诊断方法展现出显著优势与应用潜力。其对电动机故障诊断具备良好的适用性，能有效从电流频谱中提取关键特征，精准识别多种故障类型。然而，在工业实测数据的实际应用中，实时性问题亟待解决，这关乎该方法能否在工业现场高效落地。未来，将深度学习与电流频谱特征分析相融合是极具前景的发展方向。深度学习强大的特征提取与处理能力，有望突破当前局限，提升故障诊断的效率与准确性，实现更智能化、自动化的电动机故障诊断，为工业生产的稳定运行提供坚实保障。

参考文献

[1]王鹏飞. 基于电流特征分析的刮板输送机齿轮故障诊断方法研究 [D]. 西安科技大学, 2021.
[2]吕瑞昕. 基于定子电流特征分析的异步电机转子故障诊断技术研究 [D]. 西安科技大学, 2021.
[3]高静雅. 基于频谱分析的电机转子断条故障诊断研究 [D]. 江苏大学, 2022.
[4]许文浩. 基于地磁暴的地磁感应电流频谱特征及其驱动源研究 [D]. 山东大学, 2022.
[5]荆诗雨. 基于频谱特征的异常声音监测研究与应用 [D]. 北京石油化工学院, 2021.
[6]龚敬群, 李杰, 黄冬明, 等. 基于 CNN 电流数据形态识别的电动机故障诊断研究 [J]. 宝钢技术, 2021(3): 27-33.
[7]张红志. 基于电流电压频谱的互感器谐波故障诊断 [J]. 设备管理与维修, 2022(18): 51-53.
[8]刘龙浩, 张厚升, 蒋俊杰, 等. 基于电流特征分析的五相电机驱动系统单相故障诊断仿真实验 [J]. 实验技术与管理, 2024, 41(4): 109-117.
[9]王卫国. 电流频谱技术在电机故障诊断中的应用 [J]. 电工技术, 2021(5): 160-161, 165.
[10]吴自然, 韩燕, 陈冲. 基于全息希尔伯特频谱分析的交流串联电弧故障电流特征研究 [J]. 电器与能效管理技术, 2024(6): 8-16.

制造业电气设计在工程项目中实际问题的解决路径探讨

伍辉强

广东 佛山 528000

DOI:10.61369/EPTSM.2025110022

摘 要： 本文探讨制造业电气工程在设计、调试及管理阶段存在的诸多问题，如设计标准不统一、设备参数匹配性差、多专业协同调试矛盾突出等。提出创新解决路径，包括构建标准化设计体系、创新调试预警机制、开发智能审查系统等，以提升电气设计质量与项目运行效率。

关 键 词： 制造业电气设计；问题分析；创新路径

Discussion on The Solution Path of Practical Problems in Manufacturing Electrical Design in Engineering Projects

Wu Huiqiang

Foshan, Guangdong 528000

Abstract： This article explores the many problems that exist in the design, commissioning, and management stages of electrical engineering in the manufacturing industry, such as inconsistent design standards, poor equipment parameter matching, and prominent contradictions in multi-disciplinary collaborative commissioning. Propose innovative solutions, including building a standardized design system, innovating debugging and warning mechanisms, developing intelligent review systems, etc., to improve the quality of electrical design and project operation efficiency.

Keywords： manufacturing electrical design; problem analysis; innovation path

引言

《制造业高质量发展规划（2021 - 2025 年）》旨在推动制造业转型升级。在此背景下，制造业工程项目电气图纸设计面临诸多挑战，如设计标准不统一、设备参数匹配性差、多专业协同调试矛盾突出、现场数据采集偏差处理难、技术疏漏、施工工艺适配性不佳、项目进度协同失控、质量追溯机制缺陷等。这些问题严重影响项目质量与进度。为解决这些问题，需要构建标准化设计体系、创新调试预警机制、开发智能审查系统、应用虚拟调试平台、创新跨专业协同机制、建设知识沉淀系统等，以提升电气设计水平，保障项目顺利实施。

一、工程项目电气图纸设计的典型问题分析

（一）设计标准不统一问题

在制造业工程项目电气图纸设计中，设计标准不统一问题颇为突出。不同企业或设计团队可能采用不同的 CAD 图纸符号系统，例如在表示同一电气元件时，有的用国际通用符号，有的则采用企业自定义符号，这就容易造成施工人员理解偏差。同时，线缆标注不规范也较为常见，标注内容可能缺少线缆规格、敷设方式等关键信息，或者不同图纸之间线缆标注不一致。这种标准化的缺失，会引发一系列施工错误。比如，因符号理解错误导致元件安装错误，或因线缆标注不明，使得线缆敷设不符合要求，影响整个电气系统的性能与安全^[1]。统一设计标准，规范符号系统与线缆标注等，对于提高电气图纸设计质量、保障工程项目顺利实施至关重要。

（二）设备参数匹配性问题

在工程项目电气图纸设计中，设备参数匹配性问题不容忽视。常见如配电系统容量计算偏差，若容量计算不准确，会导致设备无法正常运行或造成资源浪费。一方面，当计算的配电系统容量小于实际所需时，设备得不到足够电能供应，影响其性能发挥，甚至引发故障。另一方面，若容量计算过大，会增加成本且造成电力资源闲置。设备负载参数冲突也是关键问题，例如电机选型与变压器配置，电机额定功率、启动电流等参数需与变压器容量、短路阻抗等参数适配^[2]。若电机启动电流过大，而变压器无法提供足够电能，将导致电机启动困难，还可能影响其他设备运行。因此，在电气图纸设计时，需精确计算各设备参数，确保彼此之间良好匹配，保障工程项目电气系统稳定可靠运行。

二、项目调试阶段的实施难点研究

（一）多专业协同调试矛盾

在项目调试阶段，多专业协同调试矛盾突出。制造业电气设计涉及自动化控制、电力拖动等多个专业领域。自动化控制系统与电力拖动系统间常出现接口故障，如接口协议不匹配，导致数据传输错误，影响设备运行。信号传输延时也是常见问题，不同专业设备对信号响应速度要求不同，电气线路过长、电磁干扰等因素易造成信号传输延时，使各专业设备运行不同步。各专业为确保自身系统稳定，在参数设置、调试流程等方面存在分歧。例如自动化控制专业追求精准控制，参数设置严格；电力拖动专业侧重设备动力输出，参数调整相对粗放，两者难以协调。这些矛盾构建起机电联调问题矩阵，给项目调试带来极大挑战，需有效策略解决^[3]。

（二）现场数据采集偏差处理

在项目调试阶段，现场数据采集偏差处理是一大关键难题。由于制造业电气环境复杂，各类设备运行产生的电磁干扰、温湿度变化等因素，都可能导致传感器等数据采集设备出现偏差。若采集的数据存在偏差，会使后续基于这些数据的控制决策出现失误，影响整个工程项目的运行效果。为解决这一问题，可采用基于数字孪生的预测性调试方法^[4]。该方法通过构建与实际物理系统相对应的虚拟数字模型，对现场数据采集过程进行模拟和分析。在虚拟环境中，能提前预测可能出现的数据采集偏差情况，并针对性地优化传感器布局、调整采集参数等，从而在实际调试过程中有效降低数据采集偏差，提高数据的准确性和可靠性，保障工程项目的顺利调试与运行。

三、制造业电气工程实际问题分类体系

（一）技术类问题表征

1. 设计阶段技术疏漏

在制造业电气工程设计阶段，技术疏漏会引发诸多实际问题。短路电流计算错误便是常见情况，短路电流计算对电气设备的选型、保护装置的配置起着关键作用^[5]。若计算不准确，可能导致设备无法承受短路电流冲击，进而引发安全事故。同时，保护装置配合失当也不容忽视，不同保护装置应在故障发生时有序动作，实现快速准确切除故障。若配合不当，可能出现越级跳闸等情况，扩大停电范围，影响生产的连续性。此外，诸如电缆选型不合理，未充分考虑载流量、环境因素等，会使电缆在运行中过热，降低使用寿命，甚至引发火灾。这些设计阶段的技术疏漏，都可能给制造业电气工程带来严重后果，需要在设计过程中严格把控，精准分析。

2. 施工工艺适配问题

在制造业电气工程中，施工工艺适配问题较为关键。例如在特殊环境下，电缆敷设方案若与实际环境不匹配，会影响系统的稳定性与安全性。当面临高温、潮湿、强电磁干扰等特殊环境时，若仍采用常规电缆敷设工艺，可能导致电缆加速老化、信号

传输受干扰等问题。防爆区域的电气安装亦是如此，若未遵循严格的防爆区域电气安装规范，执行出现偏差，一旦发生爆炸等危险情况，电气设备将无法起到有效的防护作用，严重威胁人员安全与生产设施。施工工艺适配问题还体现在不同设备、材料与工艺的适配性上，如电线与接线端子的连接工艺不当，会造成接触不良，引发过热等故障。因此，充分考虑环境、设备等因素，确保施工工艺适配，是解决制造业电气工程实际问题的重要一环^[6]。

（二）管理类问题溯源

1. 项目进度协同失控

在制造业电气工程中，项目进度协同失控是较为突出的管理类问题。设计变更流程延迟，这可能源于变更审批环节繁琐、各部门沟通不畅等，其传导效应明显。一方面，下游施工环节因等待变更指令而停滞，导致工期延误，增加额外的人工成本与设备闲置成本。另一方面，会打乱后续材料采购计划，可能造成材料积压或短缺。设备采购周期错位同样影响项目进度协同，若采购过早，设备长时间闲置易出现损坏、老化等问题，增加维护成本；若采购过晚，设备无法及时到位，工程被迫中断，打乱整体施工节奏。这种进度协同失控还会对各参与方的合作关系产生负面影响，如引发信任危机，进一步阻碍项目顺利推进，而这些问题都需要系统性地解决以保障项目顺利开展^[7]。

2. 质量追溯机制缺陷

在制造业电气工程中，质量追溯机制缺陷是管理类问题的重要方面。电气元件进场检验存在盲区，部分元件在进场时未能进行全面、精准的检验，使得一些潜在质量问题未被及时发现，流入后续生产环节，为工程质量埋下隐患^[8]。同时，调试数据归档不全也较为突出，调试过程产生的大量关键数据未能完整、规范地归档，导致当出现质量问题时，难以依据全面准确的数据进行原因追溯。这不仅增加了定位和解决问题的难度，延长问题处理周期，还可能因无法明确责任主体，使得相关改进措施难以有效落实，严重影响制造业电气工程的整体质量与可靠性。

四、系统化解决路径构建

（一）全流程优化方案设计

1. 标准化设计体系构建

标准化设计体系构建需先提出基于 BIM 技术的电气设计模块库建设方案。利用 BIM 技术强大的可视化与信息集成能力，构建涵盖各类电气设备、线路布局等的设计模块库，实现设计资源的高效整合与复用^[9]。同时，制定参数化元件选型标准。明确不同工程项目场景下，电气元件诸如额定电压、电流、功率等关键参数的取值范围与计算方法，以确保元件选型精准匹配项目需求。通过设计模块库与元件选型标准的协同构建，形成一套完整且规范的标准化设计体系，有效提升制造业电气设计在工程项目中的设计效率与质量，减少因设计不规范引发的实际问题，助力项目顺利推进。

2. 调试预警机制创新

在制造业电气设计工程项目的调试预警机制创新方面，通过

建立基于大数据分析的调试风险预测模型，全面收集过往项目调试阶段各类电气设备参数、运行状况及故障数据，利用先进算法挖掘数据背后潜在规律与风险关联。借助该模型提前预估调试过程可能出现的风险点，如特定设备过热、短路等故障倾向，让调试人员能有的放矢地开展工作。同时，开发移动端调试问题知识库，将丰富的调试经验、常见问题及解决方案整合其中。当调试过程遇到问题，工作人员可随时随地通过移动设备快速检索，获取有效解决策略，实现知识的高效共享与灵活运用，大幅提升调试效率，降低风险影响^[10]。

（二）数字化解决方案实施

1.智能审查系统开发

在智能审查系统开发环节，深入研究 AI 图纸审查算法架构是关键。一方面，精准提取电气设计图纸中的各类关键信息，如电气元件的型号、参数、布局位置，线路的走向与连接关系等。基于此，利用深度学习、机器学习等 AI 技术，对这些信息进行深度分析。另一方面，构建起符合制造业电气设计规范的规则库，将设计规范转化为计算机可识别与运算的规则。系统运行时，依据规则库对提取的图纸信息展开自动化校验，一旦发现与规范不符之处，立即触发冲突预警。通过这种方式，实现对电气设计图纸从细节到整体的全方位审查，大幅提升审查效率与准确性，助力解决制造业电气设计在工程项目中的实际问题。

2.虚拟调试平台应用

在制造业电气设计工程项目中，虚拟调试平台应用可构建基于数字孪生的三维调试环境，实现设备联调过程的可视化模拟。此平台利用数字孪生技术，将实际设备以三维模型形式在虚拟环境中呈现，精准映射其物理特性与运行逻辑。借助该平台，工程师能在虚拟空间对电气系统进行全方位调试，提前发现潜在设计缺陷与逻辑错误，如线路连接不当、控制逻辑冲突等。通过可视化模拟，可直观观察设备联调时的运行状态，包括各部件协同运作情况，从而及时优化调整。这不仅大幅减少实际调试时间与成本，降低因错误导致的设备损坏风险，还显著提升电气设计的准确性与可靠性，为工程项目的顺利推进奠定坚实基础。

（三）管理体系完善策略

1.跨专业协同机制创新

在制造业电气设计工程项目中，跨专业协同机制创新至关重

要。制造业电气设计常涉及电气、机械、自动化等多个专业领域，需打破专业壁垒。可搭建统一的数字化协同设计平台，各专业人员能实时共享设计数据、信息，确保沟通及时、准确，减少因信息不畅导致的设计冲突。同时，培养复合型人才，鼓励电气设计人员学习机械、自动化等相关专业知识，其他专业人员也了解电气设计基础，增强不同专业人员间的理解与协作。此外，建立跨专业联合评审机制，在关键设计节点，各专业共同评审，提前发现并解决潜在的跨专业问题，保障项目整体设计的合理性与可行性。

2.知识沉淀系统建设

制造业电气设计在工程项目中，知识沉淀系统建设至关重要。应搭建专业的电气设计知识库，将过往项目中的设计图纸、技术规范、解决方案等进行分类整理与存储，便于设计人员随时查阅借鉴。同时，鼓励设计团队成员分享经验心得，以案例分析的形式丰富知识库内容。此外，运用信息技术实现知识的快速检索与更新，使知识库紧跟行业发展趋势。通过知识沉淀系统，不仅能让新入职人员快速汲取前人智慧，缩短成长周期，还能为老员工提供拓展思路的素材，助力其不断优化设计。这一系统成为解决实际问题的有力支撑，在项目推进中提升电气设计的准确性与高效性，避免重复犯错，推动制造业电气设计在工程项目中的持续进步。

五、总结

制造业电气设计问题解决路径具有显著创新价值。标准化设计可有效提升设计质量与效率，减少因设计差异带来的各类隐患；数字化调试借助虚拟仿真等技术，提前发现并解决潜在问题，降低实际调试成本与风险；系统化管理则从整体层面优化资源配置，保障项目顺利推进，三者协同作用，为工程项目电气设计筑牢根基。同时，智能运维技术在预防性维护领域大有可为，未来可进一步探索其在故障预测模型优化、设备状态实时监测精准度提升等方面的研究，以实现制造业电气设备更高效、稳定运行，推动制造业电气设计在工程项目中的应用迈向新高度。

参考文献

[1]王旭莉.新媒体融入思想政治教育的途径研究[D].华东交通大学,2021.
[2]李琼琼.付费类移动音频平台的商业模式及其创新路径研究[D].湖南科技大学,2021.
[3]薛双.ALB电商企业商业模式创新路径研究[D].大连海事大学,2023.
[4]黄锴迪.城市垃圾分类回收政策演进特征与创新路径研究[D].天津理工大学,2022.
[5]张思佳.五年级学生用方程解决实际问题现状研究[D].天津师范大学,2021.
[6]孟静.安徽制造业高质量发展的创新路径[J].中国科技产业,2022,(08):54-56.
[7]李翠兰.建筑工程项目管理中存在的问题及解决措施[J].山西建筑,2017,43(36):231-232.
[8]孙秀勇.在真实情境中解决实际问题的教学——以“化学反应的调控”为例[J].中学化学教学参考,2024,(11):42-46.
[9]季飞.火灾调查工作存在的问题及解决路径[J].今日消防,2021,6(11):100-102.
[10]禹四明,杨芳,戴恩勇.新常态下制造业转型发展的创新路径探析[J].科技智囊,2021,(10):41-46.

垃圾焚烧电厂电力生产、输送与分配的实践研究

齐德志

广州环投从化环保能源有限公司，广东 广州 510000

DOI:10.61369/EPTSM.2025110024

摘 要： 垃圾焚烧电厂电力生产、输送与分配需多方面优化。从焚烧过程能量转化、蒸汽轮机与发电机协同等多环节提升效率，通过无功补偿等提升电能质量，利用智能化技术实现设备监测、故障预警等，还涉及技术经济分析、污染物监控等，需完善并网标准与产业政策配套，未来将借助新技术推动智能化发展。

关 键 词： 垃圾焚烧电厂；电力优化；智能化技术

Practical Research on Electricity Production, Transmission, and Distribution in Garbage Incineration Power Plants

Qi Dezhi

Guangzhou Huantou Conghua Environmental Protection Energy Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510000

Abstract： The power production, transmission, and distribution of waste incineration power plants need to be optimized in multiple aspects. Improving efficiency in multiple aspects such as energy conversion during incineration, collaboration between steam turbines and generators, enhancing power quality through reactive power compensation, utilizing intelligent technology to achieve equipment monitoring, fault warning, as well as technical and economic analysis, pollutant monitoring, etc. It is necessary to improve grid connection standards and industrial policy support. In the future, new technologies will be used to promote intelligent development.

Keywords： garbage incineration power plant; power optimization; intelligent technology

引言

随着环保意识的增强与能源需求的增长，垃圾焚烧发电成为重要的能源利用方式。2023 年颁布的《关于推进垃圾焚烧发电行业高质量发展的指导意见》强调提升垃圾焚烧发电效率与环保水平。垃圾焚烧过程能量转化效率优化，涉及焚烧炉温度、燃料配比及余热回收系统的精准把控，同时蒸汽轮机与发电机协同运行、厂内电力传输网络设计、并网电能质量提升等方面也至关重要。政策的支撑为垃圾焚烧电厂在电力生产、输送与分配各环节实现高效、可持续发展提供保障，推动行业不断探索优化技术路线与智能化升级。

一、垃圾焚烧电厂电力生产运行优化策略

（一）垃圾焚烧过程能量转化效率优化

垃圾焚烧过程能量转化效率优化，关键在于对焚烧炉温度、燃料配比及余热回收系统的精准把控。焚烧炉温度直接影响垃圾燃烧的充分程度，进而决定能量释放效率，需依据垃圾特性精确调控，确保在高效燃烧的温度区间运行。合理的燃料配比不可或缺，通过分析垃圾成分，科学调配助燃剂等，让垃圾燃烧更充分，释放更多可用能量。余热回收系统则是将垃圾焚烧产生的废热进行回收利用，转化为蒸汽驱动汽轮机发电。基于热力学平衡的运行参数优化方法，可综合考虑以上因素，建立数学模型，精准计算各环节最佳参数，使整个垃圾焚烧过程能量转化更高效，

从而提升电力生产效率^[1]。

（二）蒸汽轮机－发电机协同运行优化

在垃圾焚烧电厂中，蒸汽轮机与发电机的协同运行至关重要。需研究蒸汽参数调节与发电机组负荷匹配策略，通过精准调控蒸汽的压力、温度等参数，使其与发电机负荷变化相适应，以保障机组高效稳定运行。例如，当垃圾焚烧量发生波动导致蒸汽产量变化时，及时调整蒸汽参数，避免因参数与负荷不匹配造成能量损耗或设备故障。同时，构建热电联产系统能效评价模型，综合考量蒸汽轮机做功发电以及余热利用供热等环节，全面评估系统的能源利用效率^[2]。通过该模型对不同运行工况下的系统能效进行分析，挖掘优化潜力，指导蒸汽轮机－发电机协同运行的进一步优化，实现垃圾焚烧电厂电力生产的高效与节能。

二、电力输送与分配系统优化策略

（一）厂内电力传输网络优化设计

在垃圾焚烧电厂中，厂内电力传输网络的优化设计对电力的高效输送与分配至关重要。一方面，需深入探讨不同电压等级的厂用电网络架构。合理规划高压、中压和低压网络的布局与连接方式，例如依据设备分布和负荷特性，确定各电压等级线路的走向与敷设方式，确保网络结构稳定且具备良好的适应性。另一方面，要提出基于负荷预测的配电设备容量配置方案^[3]。通过精准的负荷预测，了解不同时段、不同区域的用电需求变化。依据预测结果，科学配置变压器、开关柜等配电设备的容量，避免设备容量过大造成资源浪费，或容量过小导致电力供应不足。如此，实现厂内电力传输网络在架构与设备容量配置上的优化，提升电力输送与分配的整体效能。

（二）并网电能质量提升技术

垃圾发电因垃圾特性、燃烧工况等因素存在波动特性，这对电网电能质量影响显著。为提升并网电能质量，需研究无功补偿与谐波抑制的协同控制策略^[4]。无功功率的波动会造成电压不稳定，而谐波的产生会干扰电网正常运行，降低电能质量，影响用电设备寿命与可靠性。通过协同控制策略，可有效补偿无功功率，稳定电压，同时抑制谐波，使垃圾焚烧电厂输出的电能更符合电网接入标准。具体而言，可采用静止无功补偿器（SVC）、静止同步补偿器（STATCOM）等设备进行无功补偿，运用有源电力滤波器（APF）等实现谐波抑制，并通过智能算法优化两者配合，使垃圾焚烧电厂电力在并入电网时，最大限度降低对电能质量的负面影响，确保电网稳定、高效运行。

三、智能化技术在电力系统中的应用

（一）智能监测与诊断系统

1. 设备状态实时监测平台

在垃圾焚烧电厂的电力生产、输送与分配中，设备状态实时监测平台至关重要。借助智能化技术，该平台通过构建基于物联网的焚烧 - 发电全流程数据采集系统，对关键设备的运行参数进行实时、全面收集，如温度、压力、振动频率等^[5]。这些数据经系统快速分析处理，能精准反映设备当前的运行状况。基于此，可实现对关键设备健康状态的科学评估，提前察觉潜在故障隐患。例如，若某发电设备温度异常升高，系统迅速发出预警，运维人员据此及时排查维修，预防设备故障引发的电力生产中断，确保垃圾焚烧电厂电力生产、输送与分配的稳定、高效，最大程度减少对整体生产流程的负面影响。

2. 故障预警与自愈控制

在垃圾焚烧电厂电力系统中，故障预警与自愈控制借助智能化技术实现关键保障。一方面，开发基于机器学习的设备故障预测模型，通过收集电力生产、输送与分配各环节设备的运行参数，如温度、压力、电流、电压等数据，利用机器学习算法对历史数据及实时数据进行深度分析。模型能够提前捕捉到设备潜在

的故障迹象，在故障发生前发出预警，以便运维人员及时介入，提前安排检修，降低故障对电力供应的影响。另一方面，研究电力系统自动重构技术，当局部出现故障导致供电异常时，该技术可依据实时监测数据，快速分析故障位置与影响范围，自动调整电力系统的拓扑结构，重新分配电力潮流，绕过故障区域，保障电力的持续稳定供应，实现电力系统的自愈控制，有效提升垃圾焚烧电厂电力供应的可靠性和稳定性^[6]。

（二）智能调度与优化控制

1. 多目标动态调度算法

在垃圾焚烧电厂电力生产、输送与分配中，多目标动态调度算法旨在建立经济性与环保指标协同优化的电力调度模型，并设计自适应遗传算法求解策略。该算法充分考虑垃圾焚烧电厂电力系统复杂多变的特性，将发电成本、污染物排放等多个目标纳入调度模型。通过动态调整，使电厂在不同工况下都能实现电力资源的高效分配。自适应遗传算法求解策略则根据模型特点，动态改变遗传算法的交叉、变异概率等参数，有效避免算法陷入局部最优，从而快速准确地找到满足多目标要求的最优调度方案，为垃圾焚烧电厂在保障电力供应的同时，实现经济效益与环境效益的最大化提供有力支持^[7]。

2. 虚拟电厂协同控制技术

在垃圾焚烧电厂的电力生产、输送与分配中，虚拟电厂协同控制技术发挥着关键作用。虚拟电厂并非传统意义上的实体电厂，而是通过先进的信息通信和智能化技术，将垃圾电厂与其他分布式能源、储能系统及可控负荷等整合起来，形成一个虚拟的可控集合体^[8]。通过该技术，可实现垃圾电厂与可再生能源的互补。比如，在可再生能源发电不稳定时，垃圾电厂能稳定输出电力，而可再生能源充足时，垃圾电厂可适当调整发电功率。同时，基于此构建区域能源互联网协调控制框架，能对电力生产、输送与分配进行精细化管理，提升能源利用效率，确保区域电力供应的可靠性与稳定性，达成垃圾电厂与可再生能源的协同优化运行，促进区域能源体系的高效、清洁发展。

四、综合效益评估与发展对策

（一）技术经济性分析

1. 全生命周期成本模型

在垃圾焚烧电厂的技术经济性分析中，全生命周期成本模型至关重要。该模型需全面考虑设备投资、运行维护及环境成本等要素^[9]。设备投资涵盖垃圾焚烧设备、发电设备等购置与安装费用，是电厂初始建设的主要成本。运行维护成本涉及日常燃料、人工、设备检修等费用，贯穿电厂运营全过程。环境成本则包括废气、废水、废渣处理等相关支出，反映电厂对环境的影响代价。通过构建这样的全生命周期成本模型，能精准核算垃圾焚烧电厂在电力生产、输送与分配各阶段的成本，为综合效益评估提供坚实数据支撑，助力制定科学合理的发展对策，使电厂在经济可行与环境友好之间达成平衡，实现可持续发展。

2. 边际效益敏感性分析

在垃圾焚烧电厂电力生产、输送与分配的实践中，边际效益敏感性分析至关重要。电价政策、碳交易机制等外部因素显著影响项目收益^[10]。电价的变动直接关系到垃圾焚烧电厂的销售收

入，微小的电价调整，可能导致边际效益的大幅波动。而碳交易机制为电厂带来额外收益途径，碳价的升降对边际效益影响明显。深入分析这些外部因素，有助于明确各因素变动对边际效益的作用程度，从而帮助电厂管理者精准把握项目盈利状况，制定科学的生产、输送与分配策略，提升运营效率与经济效益，增强在复杂市场环境中的适应能力与竞争力，确保垃圾焚烧电厂的可持续发展。

（二）环境影响评价

1. 污染物排放监控体系

在垃圾焚烧电厂污染物排放监控体系方面，构建二噁英、重金属等特征污染物的在线监测与排放预警系统意义重大。通过该系统，能实时精准掌握污染物排放数据，为环境影响评价提供可靠依据。这不仅有助于及时发现超标排放等潜在问题，采取针对性措施减少对周边环境的污染，还能增强公众对垃圾焚烧电厂运营的信任。从综合效益看，可有效平衡电力生产与环境保护的关系，提升电厂的社会形象和可持续发展能力。未来发展对策上，需持续优化监测系统的稳定性与准确性，加强对监测数据的分析与应用，同时与相关部门的监管系统有效对接，实现信息共享，推动垃圾焚烧行业的绿色、规范发展。

2. 碳足迹核算与减排路径

对垃圾焚烧电厂进行碳足迹核算，明确其在电力生产、输送与分配各环节的碳排放情况。通过分析垃圾处理量、发电效率、输送损耗等参数，精准量化碳排放量。核算结果显示，垃圾焚烧替代化石能源发电，在减少温室气体排放方面具有显著潜力。基于此，提出一系列减排路径。优化垃圾焚烧工艺，提高能源转化效率，降低单位发电量的碳排放。加强电力输送与分配系统的维护，减少线路损耗，间接降低碳足迹。同时，探索引入碳捕捉与封存技术，进一步提升碳减排效果，助力垃圾焚烧电厂向低碳化运行模式转型，实现经济与环境效益双赢。

（三）政策与标准化建设

1. 并网技术标准完善建议

现行垃圾发电并网规程存在一定不足，需完善并网技术标准。一方面，针对电压调节，应明确更为精准的电压控制参数范

围。例如，结合垃圾焚烧电厂的实际发电规模与电力输送距离，详细规定不同工况下并网点的电压允许波动范围，确保输出电压稳定在合理区间，减少对电网的冲击。另一方面，在电能质量方面，制定更严格的谐波、三相不平衡度等指标。垃圾焚烧发电设备运行可能产生谐波等电能质量问题，新的标准要规定谐波含量的最大允许值以及三相不平衡度的合格范围，同时给出有效的监测与治理措施建议，以此保障垃圾焚烧电厂所发电力符合电网接入要求，提升整个电力系统的稳定性与可靠性。

2. 产业政策配套机制设计

在垃圾焚烧电厂电力生产、输送与分配领域，产业政策配套机制设计至关重要。政府补贴政策应进一步优化，精准评估垃圾焚烧发电成本与收益，合理调整补贴力度，以保障项目长期稳定运营。同时，强化市场化交易机制，完善电力直接交易规则，让垃圾焚烧电厂能更顺畅地参与市场竞争，提升其经济效益。构建与垃圾焚烧电力特性相适配的绿色电力认证机制，使绿色电力价值得以体现，增强企业的积极性。还要建立动态的政策调整机制，依据行业技术进步、成本变化等因素，及时调整补贴标准和市场交易规则，确保产业政策始终贴合产业发展实际，推动垃圾焚烧电厂电力生产、输送与分配各环节高效、可持续发展。

五、总结

垃圾焚烧电厂在电力生产、输送与分配的实践中，通过系统总结全流程优化技术路线，从垃圾预处理、焚烧过程控制到发电设备运行管理等各环节，实现了电力生产效率与质量的提升。提炼出的智能化升级共性关键技术，如智能监测与故障诊断、智能调度等，为垃圾焚烧电厂向智能化迈进奠定基础。而展望未来，数字孪生与5G通信技术在电力系统的深度集成，将进一步推动垃圾焚烧电厂电力生产的智能化、高效化发展，实现更加精准的模拟与控制、更快速的数据传输与交互，助力垃圾焚烧电厂在电力领域持续创新，为城市能源供应与环境保护协同发展贡献更大力量。

参考文献

- [1] 李寅斌. 某城市生活垃圾焚烧发电厂系统设计 [D]. 浙江工业大学, 2021.
- [2] 钟吴君. 含垃圾焚烧电厂的综合能源系统优化调度研究 [D]. 长沙理工大学, 2021.
- [3] 张健炜. 垃圾焚烧电厂运行可靠性分析及评估 [D]. 广东工业大学, 2021.
- [4] 朱传强. 垃圾焚烧电厂脱硝工艺开发及工程优化 [D]. 中国科学院大学, 2022.
- [5] 郑家银. 垃圾焚烧电厂锅炉过热器钛铝涂层的高温腐蚀性能研究 [D]. 扬州大学, 2023.
- [6] 邱留良. 垃圾焚烧电厂锅炉优化设计措施 [J]. 应用能源技术, 2022(12): 27-30.
- [7] 邢家丽, 王甲, 曾武. 垃圾焚烧发电厂垃圾储坑应急除臭优化研究 [J]. 广东化工, 2022, 49(21): 190-192, 227.
- [8] 李健. 垃圾焚烧电厂锅炉吊装安全技术管理 [J]. 应用能源技术, 2022(9): 13-16.
- [9] 吴志达. 垃圾焚烧电厂电气安全问题与检修管理研究 [J]. 造纸装备及材料, 2022, 51(7): 192-194.
- [10] 刘东. 垃圾焚烧电厂汽轮机真空严密性优化 [J]. 电力系统装备, 2021(11): 112-113.

新能源发电企业参与绿电交易的模式与效益分析

陈法东

国电投（天津）电力有限公司，天津 300380

DOI:10.61369/EPTSM.2025110029

摘 要： 全球越来越重视环境保护和可持续能源发展，新能源发电产业快速发展，绿电交易市场也出现了。本文围绕新能源发电企业参与绿电交易展开研究，系统分析绿电交易市场的特点，深入阐述新能源发电企业参与绿电交易的必要性。当前新能源发电企业参与绿电交易时，存在市场机制不完善、价格形成机制不健全等问题，本文也对这些问题展开探讨。针对这些问题，本文从完善市场机制、健全价格形成机制等方面提出相应策略，目的是帮助新能源发电企业提升参与绿电交易的效益，推动新能源产业和绿电交易市场健康发展。

关 键 词： 新能源发电企业；绿电交易；交易模式；经济效益

Analysis of The Modes and Benefits of New Energy Power Generation Enterprises Participating in Green Electricity Trading

Chen Fadong

State Power Investment Corporation (Tianjin) Electric Power Co., Ltd., Tianjin 300380

Abstract： As the global emphasis on environmental protection and sustainable energy development intensifies, the new energy power generation industry is experiencing rapid growth, and the green electricity trading market has emerged. This paper focuses on the participation of new energy power generation enterprises in green electricity trading, systematically analyzes the characteristics of the green electricity trading market, and thoroughly expounds the necessity for new energy power generation enterprises to engage in green electricity trading. Currently, when new energy power generation enterprises participate in green electricity trading, issues such as imperfect market mechanisms and inadequate price formation mechanisms exist, which are also explored in this paper. To address these issues, this paper proposes corresponding strategies from aspects such as improving market mechanisms and perfecting price formation mechanisms, aiming to assist new energy power generation enterprises in enhancing the benefits of participating in green electricity trading and promoting the healthy development of the new energy industry and the green electricity trading market.

Keywords： new energy power generation enterprises; green electricity trading; trading mode; economic benefits

引言

全球都在应对气候变化，发展可再生能源成了全球共识。我国是全球最大的能源消费国之一，积极推动能源结构转型，新能源发电装机容量不断增加。绿电交易是电力市场的新领域，给新能源发电企业带来新的发展机遇。通过绿电交易，新能源发电企业能把绿色电力转化为经济效益，还能实现环境效益的市场化价值。“双碳”目标提出后，我国加快构建新型电力系统，绿电交易市场规模可能会进一步扩大。所以，深入研究新能源发电企业参与绿电交易的模式与效益，对推动新能源产业高质量发展、实现我国能源结构优化和“双碳”目标，具有重要的现实意义。

一、绿电交易市场特点

（一）绿色属性突出

绿电交易和传统电力交易最大的区别，就是它有突出的绿色

属性。绿电来自风能、太阳能、水能等可再生能源发电项目，生产过程几乎不会产生碳排放。以风能发电为例，一台 2 兆瓦的风力发电机，每年能发电约 400 万度，和传统燃煤发电相比，每年能减少约 3200 吨二氧化碳排放。这种清洁低碳的能源属性，满足

了用户对绿色能源的需求。对高耗能企业来说，使用绿电是实现节能减排目标的办法。新能源发电企业通过绿电交易，把清洁电力推向对绿色能源有需求的市場，提升了自身品牌价值，还能获得额外的环境价值收益。比如某大型光伏企业，参与绿电交易后，每年不仅减少大量碳排放，还额外获得数百万元的环境价值收入。

（二）政策导向性强

国家政策大力推动，绿电交易市场才能蓬勃发展。为了加快可再生能源发展，我国出台很多政策支持绿电交易。以《关于绿色电力交易试点工作方案复函》为例，这个政策明确了绿电交易的规则和流程，给市场主体提供清晰的指引。政策还给予新能源发电企业补贴和税收优惠。部分地区给新能源发电企业每度电 0.1 元的补贴，还减免相关税费，降低了企业参与绿电交易的成本，提升了企业市场竞争力。政策要求部分高耗能企业必须采购一定比例的绿电，扩大了绿电市场需求，给新能源发电企业提供稳定的市场保障，推动绿电交易市场持续健康发展^[1]。

（三）交易主体多元化

绿电交易市场包含多方主体。新能源发电企业是绿电供应方，可以直接参与交易，把电力销售给终端用户或售电公司。比如某太阳能发电企业和大型工业用户直接交易，实现电力高效销售。售电公司在发电企业和用户之间起桥梁作用，为用户提供多样化电力套餐和增值服务，比如节能咨询、用电监测等服务。电力用户群体广泛，包括工业企业、商业用户，也有居民用户。电网企业负责保障电力传输的稳定性和安全性，提供技术支持和服务。这种多元化的交易主体结构，促进了市场竞争，不同主体通过优化服务、降低成本等方式争夺市场份额，提高了绿电交易效率，推动绿电市场繁荣发展。

二、新能源发电企业参与绿电交易的必要性

（一）拓宽销售渠道，增加收入来源

在传统电力市场体系下，新能源发电企业销售渠道比较单一，主要靠和电网公司签订购电合同。这限制了企业自主定价权，企业在销售过程中也不能直接掌控市场。参与绿电交易后，情况有很大改善。企业可以通过绿电交易平台，直接对接终端用户，打破中间环节的限制。以河北某光伏发电企业为例，以前通过电网销售电力，每度电均价约 0.35 元。参与绿电交易后，直接面向大型数据中心等对绿色能源有需求的终端用户销售，绿电价格提升到每度 0.42 元。绿电的绿色环境价值得到市场认可，企业获得额外收益。据统计，该企业参与绿电交易后，年销售收入增长了 15%，缓解了经营压力，提升了盈利能力。

（二）提高市场竞争力，树立品牌形象

现在商业环境竞争激烈，企业品牌形象对市场份额影响很大。新能源发电企业积极参与绿电交易，向社会表明对可再生能源发展的支持，以及践行绿色发展理念的决心。这提升了企业和社会上的形象和声誉。很多大型跨国企业，比如苹果公司，为满足自身绿色供应链要求，优先选择和参与绿电交易的发电企业合作。某风力发电企业参与绿电交易后，和多家这类企业建立长期合作关系，市场份额一年内提升了 10%。这种合作带来良好的品牌示范效应，吸引更多潜在客户关注，巩固了企业在市场中的地位，让企业在激烈的市场竞争中脱颖而出^[2]。

（三）促进可再生能源消纳，推动能源转型

新能源发电受自然条件影响，有间歇性和波动性。在传统电力市场模式下，电网很难完全消纳不稳定的电力，导致弃风、弃光现象频繁发生，造成能源浪费。绿电交易通过市场机制，在新能源发电企业和绿色能源需求用户之间搭建桥梁。以甘肃某地区为例，绿电交易开展前，弃风率高达 20%。随着绿电交易推进，当地新能源发电企业和周边工业企业建立直接交易关系，弃风率降到 5% 以下。这提高了能源利用效率，减少资源浪费，推动我国能源结构向清洁化、低碳化加速转型，助力我国实现碳达峰、碳中和目标，为可持续发展打基础。

三、新能源发电企业参与绿电交易的现存问题

（一）市场机制不完善

我国绿电交易市场发展取得一定成果，但市场机制存在短板。各地为了自身管理和发展需要，制定的交易规则有细节差异。以交易流程为例，华东地区和华南地区在交易申报时间、手续材料等方面要求不同。企业进行跨区域交易时，要花额外精力适应不同规则，阻碍资源高效配置。市场准入和退出机制不健全，部分发电技术落后、环保不达标企业进入市场，浪费资源，扰乱正常市场竞争秩序。绿电认证和溯源技术应用不成熟，一些绿电产品真实来源难以追踪，影响市场信任，限制市场规模进一步扩大。

（二）价格形成机制不健全

目前，绿电交易价格主要由市场主体协商或竞价确定，但价格形成机制不成熟。绿电环境价值核算没有统一、科学的标准，不同评估机构结果可能相差很大，导致绿电价格波动频繁。比如在某些时段，因为对绿电环境价值评估有差异，绿电价格一周内波动幅度可达 20%，影响市场稳定性。发电企业和用户之间信息交流不畅，双方不能及时获取准确的市场价格信息，决策缺乏依据。部分企业利用市场信息不对称，操纵价格获取私利，压低采购价格或抬高销售价格，损害其他市场主体合法权益，阻碍绿电市场健康发展。

（三）交易成本较高

新能源发电企业参与绿电交易，要承担一系列交易成本。在前期市场调研阶段，企业要投入大量人力、物力了解市场需求和价格走势。合同签订过程涉及复杂条款和法律问题，通常要聘请专业律师审核。交易平台使用费用以及电费结算时繁琐的手续，都增加了企业运营成本。现在绿电交易市场处于发展初期，参与主体比较少，市场规模有限，交易不能高频发生。以某省为例，部分新能源发电企业每月绿电交易量不到 5 笔，单位交易成本很高。高昂的交易成本降低了企业参与绿电交易的积极性，阻碍市场繁荣。

（四）电网基础设施建设滞后

绿电交易顺利开展，需要稳定可靠的电网基础设施支持。目前我国部分地区电网建设相对滞后，输电能力不足。西部地区新能源发电资源丰富，但电网输电线路老化、容量有限，大量电能不能及时输送到电力需求大的东部地区，造成能源浪费。电网智能化水平低，不能对绿电交易进行实时、精准的监测和管理。电力负荷变化时，不能迅速调整，影响交易效率和电力供应稳定。

性。比如在用电高峰期，因为电网智能化调度不及时，部分地区出现限电现象，给企业生产和居民生活带来不便，制约绿电市场进一步发展^[3]。

（五）企业自身能力不足

部分新能源发电企业对绿电交易市场认识不深入，缺乏专业的市场分析和营销人才，不能准确把握市场动态和客户需求，难以制定合理有效的交易策略。在信息化建设方面，部分企业信息化系统陈旧，不能及时获取和分析市场信息，交易时只能被动接受价格，错过很多交易机会。一些企业发电设备老化，技术更新慢，发电效率低。以某小型风力发电企业为例，老旧设备发电效率比行业平均水平低 15%，导致发电成本增加，市场竞争力下降，在激烈的市场竞争中处于劣势。

四、新能源发电企业参与绿电交易的策略

（一）完善市场机制

政府在绿电交易市场建设中要发挥引领作用，加强顶层设计。现在各地区绿电交易规则有差异，阻碍市场高效运行。政府应该制定统一、清晰的交易规则，打破地域限制，推动跨区域交易。以广东、云南等省的跨区绿电交易试点为例，通过构建统一的交易平台，实现资源优化配置。要健全市场准入和退出机制，严格审查企业资质，不让不符合要求的企业进入市场，及时清退违规企业。利用区块链技术完善绿电认证和溯源机制，确保绿电来源真实、唯一，提升市场信任度，让绿电交易在规范、有序的环境中进行^[4]。

（二）健全价格形成机制

科学合理的绿电价格形成机制，对准确反映绿电环境价值很重要。政府应该制定绿电环境价值核算标准，为市场定价提供权威参考，引导企业合理定价。比如欧盟通过碳定价机制，有效反映了电力生产的环境成本。要加强市场信息披露，利用大数据平台，实时公布绿电生产、需求、价格等信息，减少信息不对称，提高市场透明度。建立有效的价格监管机制，严厉打击价格操纵行为。相关部门要加大对违规行为的查处力度，严肃处理操纵价格的企业，维护市场价格稳定，促进绿电市场健康发展。

（三）降低交易成本

优化交易流程是降低企业交易成本的关键。简化合同签订、电费结算等环节，利用数字化技术，实现交易线上化、自动化，

提高交易效率。鼓励市场主体开展集中交易，形成规模效应，降低单位交易成本。比如一些新能源发电企业联合参与绿电交易，有效降低了交易成本。政府可以通过补贴、税收优惠等政策，降低企业参与绿电交易的成本。给参与绿电交易的企业一定财政补贴，或减免相关税费，提高企业积极性，激发市场活力。

（四）加强电网基础设施建设

加大对电网基础设施建设的投入，能提升绿电交易效率和电力供应稳定性。一方面，加快特高压输电网络建设，实现新能源电力跨区域传输，解决新能源发电分布不均的问题。比如“西电东送”工程，把西部丰富的新能源电力输送到东部负荷中心。另一方面，推进电网智能化改造，利用物联网、人工智能等技术，实现对绿电交易的实时监测和管理。通过智能电网，能及时调整电力供应，提高交易效率，保障电力供应稳定性，为绿电市场发展提供支撑。

（五）提升企业自身能力

新能源发电企业要在绿电交易市场取得竞争优势，需要加强自身能力建设。企业要加强对绿电交易市场的研究，培养专业的市场分析和营销人才，深入了解市场动态，制定合理的交易策略。^[5]加强企业信息化建设，建立完善的市场信息收集和分析系统，及时掌握市场供求关系和价格变化。加大技术研发投入，更新发电设备，提高发电效率，降低发电成本。比如一些企业采用先进的风力发电技术，提高了发电效率，降低了发电成本，提升了市场竞争力^[6]。

五、结语

随着我国能源结构转型的加速和“双碳”目标的推进，绿电交易市场将迎来广阔的发展前景。新能源发电企业作为绿电交易市场的重要参与者，应充分认识到参与绿电交易的重要性和必要性，积极应对当前面临的问题和挑战。通过完善市场机制、健全价格形成机制、降低交易成本、加强电网基础设施建设和提升企业自身能力等策略，提高参与绿电交易的效益，实现可持续发展。同时，政府、电网企业、售电公司等各方应加强合作，共同推动绿电交易市场的健康发展，为我国能源结构优化和“双碳”目标的实现做出贡献。^[7]

参考文献

- [1] 罗兰. 新能源发电企业全面预算管理现存问题及优化对策探讨 [J]. 中国电子商情, 2025, 31(06): 43-45.
- [2] 吕肖圆, 侯旭磊, 刘峻, 等. 新能源发电环境权益与碳市场衔接路径的思考 [J]. 云南电力技术, 2025, 53(01): 18-21.
- [3] 冯巍. 浅谈新能源风力发电企业财务资金集中管理 [J]. 市场周刊, 2025, 38(05): 131-134.
- [4] 李学刚, 靳晓勇. 新质生产力在新能源发电企业安全生产监管中的应用 [J]. 电力安全技术, 2025, 27(01): 9-13.
- [5] 李玥. 新能源发电企业的税务风险及防范措施研究 [J]. 中国科技投资, 2024, (33): 85-87.
- [6] 宋宇芳, 黄彦博. 华中电网新能源发电电力 8006 万千瓦国网华中分部全力保障消纳 [N]. 国家电网报, 2025-03-21(002).
- [7] 马晨晨. 新能源发电提前全面入市“负电价”频现如何解 [N]. 第一财经日报, 2025-02-25(A06).

高速公路机电工程供配电施工技术分析

范承雨

河北高速邯港二期项目管理有限公司, 河北 沧州 061200

DOI:10.61369/EPTSM.2025110030

摘 要： 为提升高速公路配电系统运行的可靠性与高效性，强化道路通行能力。文章借助文献资料研究等方法，梳理高速公路配电施工的主要内容与基本特点，坚持技术驱动，运用系统思维，从沿线供配电、隧道供配电及设备安装调试等场景出发，创新技术应用路径，完善技术管理体系，搭建高速公路供配电施工全周期管理模式，满足现代交通的发展要求。

关 键 词： 高速公路；机电工程；供配电施工；技术工艺；应用策略

Analysis of Power Supply and Distribution Construction Technology of Highway Electromechanical Engineering

Fan Chengyu

Hebei Expressway Handang Phase II Project Management Co., Ltd., Cangzhou, Hebei 061200

Abstract： To enhance the reliability and efficiency of expressway power distribution systems and improve road traffic capacity, this paper conducts literature review to analyze the core components and distinctive features of expressway power distribution construction. By adopting a technology-driven approach and systematic thinking, it explores innovative technical solutions for power supply and distribution along highways, tunnel installations, and equipment commissioning. The study establishes a comprehensive technical management framework and implements a full-cycle management model for expressway power distribution construction, thereby meeting the evolving demands of modern transportation.

Keywords： highway; electromechanical engineering; power supply and distribution construction; technology and process; application strategy

前言

高速公路机电工程供配电施工是一项系统性工程，涵盖能源接入、设备供电等多个环节，为管控施工质量，提升施工效率，压缩施工成本，施工企业应当调整目标定位，全面分析高速公路机电工程供配电施工技术，优化施工管理流程，管控后期运维风险，为高速公路的安全、高效运营提供坚实的有力支撑。

一、高速公路机电工程供配电施工主要内容

高速公路机电工程供配电施工以“能源精准输送、设备稳定供电”为核心目标，主要内容可划分为三大关键模块，形成全链条作业体系^[1]。外部能源接入与变电设施建设，重点完成10kV高压电源从地方电网的引入施工，有序开展高压电缆敷设、终端头制作与试验等作业，沿线箱式变电站或开闭所的建设需结合路段负荷分布，科学规划站点位置与容量配置，确保供电半径控制在500米以内，避免因供电距离过长导致电压损耗超标。高低压配电线路敷设，高压线路（10kV）根据地形条件选择架空或电缆直

埋方式，平原路段优先采用JKLYJ型交联聚乙烯绝缘导线架空敷设，杆距设置为50~60米，兼顾经济性与维护便捷性。山区或生态敏感区则采用电缆直埋，需在电缆沟内铺设10cm厚黄沙垫层与警示带，穿越道路时加装Φ150mm镀锌钢管保护，防止机械损伤。低压线路统一采用YJV22型铠装电缆，沿道路护栏基础电缆槽或隧道侧壁敷设，同步做好防雷、防腐蚀处理。末端配电与设备供电保障涵盖配电箱（柜）安装、漏电保护装置调试及各机电子系统电源接入，严格遵循“三相五线制”接线标准，确保零地线独立分离，接地电阻 $\leq 4\Omega$ ，保障监控摄像头、收费终端、隧道照明灯具等设备的安全稳定运行。

作者简介：范承雨（1991.10-），男，河北阜城人，本科，研究方向：高速公路机电工程。

二、高速公路机电工程供配电施工技术应用路径

（一）沿线供配电技术的应用

沿线供电技术以“保障关键节点供电可靠性、平衡技术经济性”为导向,从电源配置、线路优化、防护强化三个维度创新应用路径。在电源选型与容量计算方面,针对沿线不同用电节点的负荷特性,像服务区餐饮负荷为感性负荷、监控设备为阻性负荷,采用“需用系数法”精准计算总负荷,例如服务区需考虑空调、冰箱等大功率设备的同时运行系数,该系数取0.7~0.8,避免容量冗余造成投资浪费或容量不足引发过载^[2]。为应对电网停电风险,在收费站、隧道入口等关键节点配置柴油发电机与UPS不间断电源,其中UPS需根据设备断电后持续运行需求来确定蓄电池容量,根据行业规范高速公路收费系统需要保障30分钟以上供电,确保应急供电无缝衔接。在线路敷设优化方面,结合地形与环境条件差异化选择敷设方式。平原路段高压线路采用架空敷设,通过优化杆塔布局减少占地面积;山区路段采用电缆直埋,在岩石地段采用机械钻孔+电缆保护管的敷设工艺,降低施工难度;穿越农田区域时,在电缆沟上方铺设水泥盖板,防止农耕作业破坏电缆。低压线路沿护栏基础电缆槽敷设时,每隔20米设置一个固定支架,避免电缆因震动移位。在防雷与接地保护方面,沿线箱式变电站、配电箱均加装氧化锌避雷器,架空线路终端杆、转角杆设置独立防雷接地装置,将设备接地、防雷接地、保护接地共用一组接地极,接地极选用 $\Phi 50\text{mm}$ 镀锌钢管,长度为2.5米,间距5米排列,通过热镀锌扁钢连接,经接地电阻测试仪检测确保接地电阻 $\leq 4\Omega$,有效抵御雷击对供电配电系统的冲击。

（二）隧道供配电技术的应用

隧道供配电技术聚焦“高负荷承载、高风险防控、高安全保障”，针对照明、通风消防、应急供电三大核心场景优化技术应用。在照明供配电领域，根据隧道入口段、过渡段、中间段、出口段的照度需求差异，入口段照度 $\geq 500\text{lux}$ 、中间段照度 $\geq 100\text{lux}$ ，工作人员采用“分区控制+智能调光”技术，如图1所示：

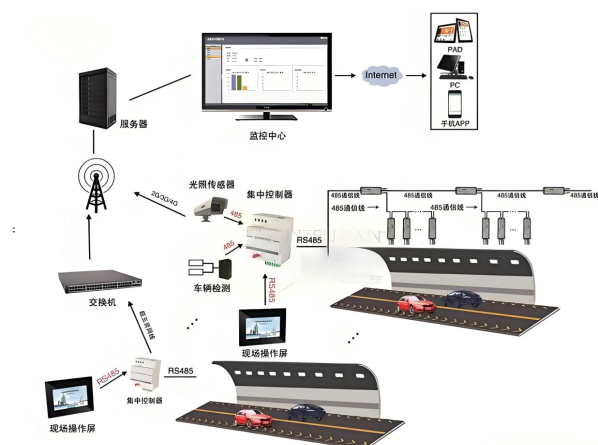


图1 “分区控制+智能调光”技术示意图

供配电线路采用三相四线制，每盏灯具独立回路设计，通过 PLC 控制器实时采集外界自然光强度，根据晴天、阴天、夜间的

自然光情况，自动调节灯具功率，例如白天将入口段灯具功率调至100%，夜间降至50%，在保障行车安全的同时降低能耗。照明配电箱安装在隧道侧壁专用设备洞内，选用IP67防水等级箱体，内部加装智能除湿装置，当湿度超过60%时该装置自动启动，防止潮湿环境导致设备短路故障。在通风与消防供配电领域，隧道通风机与消防水泵作为一级负荷，采用“双电源自动切换”技术，分别从两个独立变电站引入电源，通过ATS自动切换开关实现切换时间 ≤ 0.5 秒的无缝切换，确保停电时系统不中断运行。通风机供电线路选用YJV42型防水防腐电缆，沿隧道顶部电缆桥架敷设，电缆接头采用热缩式密封处理，抵御高温与粉尘侵蚀^[3]。在风机控制回路加装过载保护与缺相保护装置，过载保护设定过载电流为额定电流的1.2倍，避免电机烧毁。在应急供配电领域，隧道内设置应急照明与应急广播系统，由UPS提供电源，UPS容量需满足应急照明持续1小时、应急广播持续2小时的供电需求。每隔50米设置一个应急电源插座，该插座额定电压220V，额定电流10A，供救援设备使用。

（三）设备安装调试技术的应用

设备安装调试技术以“精准安装、规范调试、全面检测”为原则，通过标准化作业确保配电系统从施工向运行平稳过渡。在设备安装环节，重点把控安装精度与环境适配性，箱式变电站基础采用 C30 混凝土浇筑，基础顶面平整度误差 $\leq 5\text{mm}$ ，设备安装时用水水平仪校准，确保柜体垂直偏差 $\leq 1.5\%$ ；室内配电箱（柜）安装高度控制在 1.2–1.5 米，室外安装需加装防雨棚，防雨棚伸出柜体边缘 $\geq 30\text{cm}$ ，柜体与墙面间距 ≥ 0.8 米，便于操作维护。高压设备安装过程中，工作人员应当严格遵循厂家说明书，触头接触压力与行程需符合技术参数，比如断路器触头接触压力 $\geq 25\text{kN}$ ，避免接触不良导致发热。在调试作业环节，分为单机调试与系统联调：单机调试时，先对设备进行绝缘电阻测试，高压设备绝缘电阻 $\geq 1000\text{M}\Omega$ 、低压设备绝缘电阻 $\geq 0.5\text{M}\Omega$ ，再开展空载试运行，例如变压器空载运行 24 小时，监测温升 $\leq 60\text{K}$ 、噪音 $\leq 65\text{dB}$ ；系统联调重点测试电源切换功能、保护功能与监控功能，确保各功能模块动作准确、响应及时。在检测验收环节，工作人员采用专业仪器开展全面检测，用接地电阻测试仪检测接地系统，用钳形电流表检测线路电流平衡度，三相电流不平衡度 $\leq 10\%$ ，用电能质量分析仪检测电压偏差与谐波含量，电压偏差 $\leq \pm 5\%$ 、总谐波畸变率 $\leq 5\%$ 。模拟满载运行、电网电压波动 $\pm 10\%$ 等极端工况，测试系统稳定性，将所有检测数据记录存档，作为验收合格的核心依据，确保设备投用后长期稳定运行。

三、高速公路机电工程供配电施工技术管理策略

（一）做好前期勘察

前期勘察作为供配电施工的基础环节，通过多维度调研为施工方案制定提供数据支撑，助力施工效率提升与成本管控。在现场地形与环境勘察中，组建专业勘察团队，团队包含电气、地质、气象专业人员，对施工路段开展全面踏勘，详细记录地形地貌，比如山区坡度、河流宽度深度，气象条件，绘制1:2000比例

勘察图纸。针对特殊环境制定专项措施，雷暴高发区域，年雷暴日数超40天的区域增加防雷接地装置数量，多雨地区，年降雨量超1500mm的地区将设备基础抬高30cm并设置2%排水坡度。在负荷与电源勘察中，与地方电网公司深度对接，明确外部电源接入点、电压等级、供电容量及电网可靠性^[4]。工作人员对沿线服务区、收费站、隧道等用电节点开展实地调研，统计设备数量与功率，采用“实测+估算”方式确定各节点最大负荷与平均负荷，为变电站容量选择与线路截面设计提供依据，变电站容量按最大负荷1.2倍配置，线路截面按载流量1.1倍选择。对无法复用的设施，制定拆除与新建方案，避免与新建工程冲突。勘察完成后编制详细勘察报告，明确施工难点，比如穿越铁路需办理铁路部门许可，与风险点，为施工方案优化奠定基础。

（二）做好图纸会审

图纸会审通过多方协同审查，提前解决设计问题，保障施工顺利推进，减少返工成本。会审工作由建设单位牵头，组织施工、设计、监理、设备厂家四方参与，工作人员按照“专业审查+综合审查”流程开展。在专业审查阶段，各参与方从专业视角提出审查意见，设计单位说明设计思路与技术标准，施工单位重点审查图纸可施工性，论证线路敷设路径是否便于机械作业、隧道设备洞尺寸是否匹配设备安装，设备洞宽度需比设备宽10cm以上，供电线路与通信线路是否存在走向冲突。监理单位审查图纸完整性与规范性，如关键节点详图是否缺失、接地电阻等技术参数是否明确^[5]。设备厂家审查图纸与设备匹配性，如设备安装尺寸是否与基础设计一致、电源接口是否符合设备要求，比如电压等级、接线方式。在综合审查阶段，针对专业审查发现的问题集中讨论解决方案，如施工单位提出某路段线路穿越山体施工难度大，设计单位可调整路径为沿山脚敷设。设备厂家反馈某型号断路器已停产，设计单位可更换为同参数替代产品，出具设计变更文件，避免后期因图纸问题引发纠纷。

（三）做好接地安装

接地系统作为供配电安全的“生命线”，通过严格的技术管理确保其可靠性，降低安全风险。在接地材料选型上，根据环境特性差异化选择，普通土壤环境优先选用热镀锌钢材，其防腐性能优异，使用寿命可达20年以上。沿海高盐碱地区或隧道潮湿环境，采用铜覆钢接地材料，铜层厚度 $\geq 0.25\text{mm}$ ，或在镀锌材料表面涂刷环氧树脂防腐涂层，防止材料快速腐蚀。接地材料规格严格符合设计要求，镀锌钢管直径 $\geq 50\text{mm}$ 、壁厚 $\geq 3.5\text{mm}$ ，镀锌扁钢截面 $\geq 40\text{mm} \times 4\text{mm}$ 。在接地装置施工管控上，严格遵循设计图纸与规范，接地极埋设深度 $\geq 0.8\text{米}$ ，寒冷地区需埋设在冻土层以下，通常 $\geq 1.2\text{米}$ ，间距 $\geq 5\text{米}$ 。山区岩石土壤等电阻率较高区域，土壤电阻率 $> 100\Omega \cdot \text{m}$ 的区域，采用换土或增加接地极数量的方式降低接地电阻，换土时填入降阻剂，降阻剂用量每根接地极 $\geq 50\text{kg}$ 。接地极与接地干线连接采用放热焊接，焊接点涂刷沥青漆防腐，避免虚焊或腐蚀导致接地电阻增大。隧道内接地装置与隧道结构钢筋连接，形成“网状接地系统”，提升防雷效果。在接地电阻检测验收上，施工完成后采用ZC-8型接地电阻测试仪检测，检测选择晴朗天气，雨后需间隔3天以上，每个接地极至少检测3次，取平均值作为最终结果。如果接地电阻 $> 4\Omega$ ，工作人员需要分析原因，借助增加降阻剂用量、延长接地极长度等方式，完成整改任务。

四、结语

高速公路机电工程供配电施工技术的创新与管理的优化，是提升配电系统可靠性、保障道路高效运营的关键。文章通过梳理供配电施工主要内容与特点，从沿线、隧道、设备安装调试场景出发，创新技术应用路径，运用前期勘察、图纸会审、接地安装、系统集成等管理举措，构建起全周期技术管理体系。

参考文献

- [1]王超.高速公路机电工程供配电施工技术分析[J].工程技术研究,2023(22):89-91.
[2]刘鹏.高速公路机电工程供配电施工技术分析[J].中国设备工程,2023(7):211-213.
[3]王尧.高速公路隧道机电工程技术的分析与思考[J].人民交通,2023(4):96-98.
[4]李享.高速公路项目机电工程供配电施工技术探讨[J].交通科技与管理,2023(2):125-127.
[5]朱志勇.高速公路机电工程供配电施工技术探讨[J].城市建设理论研究(电子版),2023(34):127-129.

某海上风电场 #1 主变低压侧零序电流越限问题的分析处理

陈杰

山东国华时代投资发展有限公司, 山东 济南 250001

DOI:10.61369/EPTSM.2025110031

摘 要 : 为解决某501.5MW海上风电场 #1主变低压侧零序电流越限问题,保障风电场安全稳定运行,通过故障录波数据分析、现场勘查及理论验证相结合的方法开展专项研究,发现主变低压侧单芯电缆屏蔽层回流线安装不规范,屏蔽层绝缘层被柜体钢板磨损破损,形成两点接地并产生环流。提出问题整改方案并进行验证,同时,针对海上风电设备安装空间受限、隐蔽工程质量管控难度大等问题,提出强化过程管控与验收标准的长效措施,为同类海上风电场零序电流异常问题处理提供参考。

关 键 词 : 海上风电场; 零序电流越限; 电缆屏蔽层; 两点接地; 安装工艺

Analysis and Treatment of Zero-sequence Current Exceeding Limit on Low-voltage Side of #1 Main Transformer in Offshore Wind Farm

Chen Jie

GUOHUA ENERGY INVESTMENT CO.,LTD. Ltd., Jinan, Shandong 250001

Abstract : To address the issue of zero-sequence current exceeding limits on the low-voltage side of the #1 main transformer at a certain 501.5MW offshore wind farm and ensure the safe and stable operation of the wind farm, a special study was conducted through a combination of fault recording data analysis, on-site investigation, and theoretical verification. The study found that the installation of the return line for the single-core cable shielding layer on the low-voltage side of the main transformer was non-compliant, and the insulation layer of the shielding layer was worn and damaged by the cabinet steel plate, forming two ground points and generating circulating current. A rectification plan was proposed and verified. Additionally, in response to the challenges of limited installation space and the difficulty in quality control for concealed works in offshore wind power equipment, long-term measures were proposed to strengthen process control and acceptance standards, providing a reference for handling zero-sequence current anomalies at similar offshore wind farms.

Keywords : offshore wind farm; zero-sequence current limit; cable shielding layer; two-point grounding; installation process

引言

海上风电作为我国能源结构转型战略中的关键清洁能源形式,凭借其年平均风速高、发电小时数长、不占用宝贵土地资源且对周边环境影

响可控等显著优势,近年来实现了跨越式发展。本文研究的某501.5MW海上风电场配套建设1座220kV海上升压站,采用59台上海电气EW230-8.5型风电机组,16条35kV集电海缆将风电电能汇集至升压站后,经#1、#2主变(线变组接线)升压至220kV,再通过2回220kV海缆接入陆上集控中心并网。2023年6月全容量投运后,运维人员发现#1主变低压侧故障录波频繁触发零序电流越限告警(告警阈值0.1A),最大采样值达0.148A,为正常支路的4.35倍。若不及时排查故障原因,可能导致35kV系统接地故障时保护拒动,引发电缆绝缘损坏、相间短路等严重事故。因此,开展零序电流越限问题的分析与处理研究,具有重要的工程实践意义。

一、故障分析

（一）设备接线与保护配置

#1主变低压侧接入35kV母线1段，采用单芯电缆供电，电缆屏蔽层通过回流线实现接地。35kV母线进线柜内安装零序电流互感器（变比100:1），仅接入故障录波系统，用于监测零序电流异常；主变低压侧35kV系统接地故障总后备保护由1#接地兼站用变零序保护承担，#1主变低压侧零序保护未投入运行，该配置符合《DL/T 5155-2016 220kV-750kV变电站设计技术规程》中关于接地保护的要求^[1]。

（二）零序电流数据检测与分析

为明确故障特征，分别对故障支路与正常支路的外接零序电流、自产零序电流进行分析，数据采集为机组大负荷运行时段（有功功率450MW以上）的故障录波数据。

1. 外接零序电流分析

外接零序电流由零序电流互感器直接采集，反映互感器一次侧的零序电流分量。检测结果显示：故障支路（35kV进线302B）外接零序电流最大采样值0.148A（第3067采样点），远超0.1A的告警阈值；正常支路（35kV进线302A）外接零序电流最大采样值仅0.034A，故障支路电流约为正常支路的4.35倍。这一差异表明故障支路存在额外的零序电流分量，排除了系统正常不平衡电流的影响。

2. 自产零序电流分析

自产零序电流通过三相电流合成计算（ $I_0=(+I_b+)/3$ ），反映系统实际的零序电流状态。检测结果显示：故障支路自产零序电流为 $0.001A \angle 96.07^\circ$ ，正常支路自产零序电流为 $0.001A \angle 106.38^\circ$ （图1、图2），均处于电力系统正常运行时的不平衡电流范围。自产零序电流正常，说明35kV系统三相电流相位与幅值无接地故障特征的畸变，进一步指向零序电流互感器安装工艺或本体故障。

	实部	虚部	向量
✓ I.	-0.307A	-0.143A	$0.339A \angle 204.88^\circ$
✓ I.	-0.000A	-0.000A	$0.000A \angle 216.40^\circ$
✓ I.	-0.000A	0.001A	$0.001A \angle 96.07^\circ$

图1故障支路自产零序电流

	实部	虚部	向量
✓ I.	-0.464A	-0.252A	$0.528A \angle 208.52^\circ$
✓ I.	-0.000A	-0.000A	$0.000A \angle 260.77^\circ$
✓ I ₀	-0.000A	0.001A	$0.001A \angle 106.38^\circ$

图2正常支路零序电流

（三）零序电流越限对保护系统的影响评估

1. 对主变保护的直接影响

由于#1主变低压侧零序电流互感器仅接入故障录波系统，未接入主变保护回路，因此零序电流越限仅触发告警信号，不会改变主变保护的逻辑，不存在保护误动风险，短期内不会影响主变与风电场的安全运行。

2. 对35kV集电线路保护的潜在风险

现场勘查发现，该风电场16条35kV集电海缆接入开关柜的

安装工艺与故障支路一致，均采用“电缆屏蔽层回流线穿零序电流互感器”的方式。若回流线回穿错误或绝缘破损问题普遍存在，当35kV集电线路发生单相接地故障时，零序电流互感器将无法准确采集故障电流，导致接地变零序保护拒动。此时，故障电流持续存在，可能引发电缆屏蔽层过热、绝缘击穿，进而发展为相间短路，造成集电线路停运，影响风电场发电效益。

二、故障原因定位与现场处理

（一）故障点现场排查

在年度停电检修窗口期，运维人员对35kV母线进线柜开展检查，排查过程如下：

1. 打开进线柜后柜门，发现电缆屏蔽层回流线存在重复穿过零序电流互感器的安装缺陷。但根据电磁感应原理，若仅存在回流线回穿错误，回流线电流产生的磁场与电缆芯线电流磁场抵消，不会导致零序电流互感器误测，因此判断存在其他故障点；

2. 断开回流线接地端，采用2500V摇表遥测回流线绝缘电阻，结果显示接地电阻为 0Ω （正常应 $\geq 10M\Omega$ ），表明回流线存在接地短路；

3. 沿回流线敷设路径检查，发现回流线在回穿进线柜处（柜体钢板边缘）绝缘层被锋利的钢板割破，金属屏蔽层直接与柜体（接地）接触，形成“回流线接地端-柜体”的两点接地，产生环流。

（二）故障机理分析

单芯电缆运行时，电缆芯线电流会在屏蔽层产生感应电压，若屏蔽层不接地或接地不良，感应电压可能击穿绝缘；根据《GB50217 电力工程电缆设计标准》“35kV及以下单芯电力电缆金属套单点直接接地，且有增强护层绝缘保护需要时，可在线路未接地的终端设置护层电压限制器”^[2]。本案例中电缆屏蔽层采用“一端接地+另一端经保护器接地”，故障机理如下：

1. 回流线重复穿过零序电流互感器，导致回流线电流（与芯线电流方向相反）在互感器内产生反向磁场，干扰互感器正常测量；

2. 回流线绝缘层破损后，屏蔽层通过破损点与柜体接地，形成“回流线接地端”与“柜体破损点”的两点接地，两点间存在电位差，产生环流；

3. 环流穿过零序电流互感器，与电缆芯线电流的磁场叠加，导致互感器采集的零序电流增大，最终触发越限告警。

（三）故障整改实施

依据《GB50169-2016 电气安装工程接地装置施工及验收规范》4.10.5条款：“当电缆穿过零序电流互感器时，其金属护层和接地线应对地绝缘且不得穿过互感器接地；当金属护层接地线随电缆芯线穿过互感器时，接地线应穿回互感器后接地”^[3]，制定整改方案并实施：

1. 调整回流线敷设路径：将重复穿过零序电流互感器的回流线段移出互感器检测范围，确保回流线仅沿柜体外侧敷设，避免干扰互感器测量；

2.修复绝缘破损处：使用绝缘胶带缠绕割伤处，并采用热缩绝缘套管密封，同时在回流线与柜体钢板接触处加装3mm厚防磨橡胶垫，防止绝缘层再次磨损；

3.全面排查整改：对海上升压站16条35kV集电线路开关柜逐一检查，发现2处类似回流线回穿缺陷，同步完成整改。

整改后，机组大负荷运行时，#1主变低压侧故障支路外接零序电流最大采样值降至0.028A，符合正常运行要求，故障告警消除。

三、问题反思与长效管控措施

（一）问题根源分析

本次故障暴露出海上风电场建设与运维中的2项关键问题：

1.施工空间受限导致工艺缺陷：施工空间受限是海上风电紧凑型设备安装的突出痛点。该风电场采用的充气式35kV开关柜，宽度仅0.6m，电缆接线空间极其狭小，电缆屏蔽层回流线的敷设操作难度较大。施工人员为缩短安装时间，简化了敷设流程，未严格按照标准施工，将回流线随电缆芯线一同穿过零序电流互感器，导致安装工艺缺陷。此外，开关柜柜体的钢板边缘未进行倒角处理，存在锋利毛刺，施工人员在敷设回流线时未采取有效的防磨保护措施，进一步加剧了绝缘层的磨损风险。

2.隐蔽工程质量管控不足：电缆屏蔽层回流线的敷设和绝缘保护属于隐蔽工程，其施工质量无法通过后期的外观检查完全验证，必须依靠过程管控和专项检测。但在本项目的施工过程中，隐蔽工程的质量管控存在明显漏洞：一是施工单位未建立专项的隐蔽工程验收制度，仅将其纳入常规工序验收，验收内容不全面，未包含回流线的敷设路径核查和绝缘电阻检测；二是监理单位的现场监督不到位，监理人员仅在施工完成后进行了外观检查，未对施工过程进行全程旁站监督，未能及时发现回流线回穿互感器的错误操作；

（二）长效管控措施

为防范同类问题再次发生，结合海上风电设备运行特点，制定以下管控措施：

1.强化施工过程质量管控

（1）优化施工方案：针对紧凑型开关柜，组织设计、施工、设备厂家开展技术交底，制定“电缆敷设—回流线安装—绝缘检测”的专项施工方案，明确回流线敷设路径、绝缘保护措施及验收标准；

（2）推行全过程影像记录：对隐蔽工程关键工序（如电缆穿

互感器、回流线接地）实施“工序验收+影像留存”管理，施工人员每完成1道工序，需拍摄3张以上关键部位照片（含尺寸标注），经监理单位审核通过后方可进入下一道工序；

2.加强人员技术培训

（1）施工人员培训：针对海上风电紧凑型设备安装要求，开展“规范解读+实操培训”，重点讲解《GB50169-2016》中电缆接地相关条款，通过模拟开关柜实操考核，确保施工人员掌握正确操作方法；

（2）运维人员培训：组织运维人员学习零序电流异常故障案例，开展“故障数据分析—现场排查—整改实施”的模拟演练，提升运维人员故障处置能力。

四、结论

本文通过对某海上风电场#1主变低压侧零序电流越限问题的分析，得出以下结论：

1.故障的直接原因是35kV电缆屏蔽层回流线存在双重安装缺陷：一是回流线重复穿过零序电流互感器，导致其电流磁场与电缆芯线磁场相互干扰；二是回流线绝缘层被柜体钢板磨损破损，形成“回流线接地端—柜体”的两点接地，产生环流。该环流穿过零序电流互感器后，与芯线电流磁场叠加，导致互感器采集的零序电流增大，最终触发越限告警。故障性质为安装工艺缺陷，与系统接地故障无关，这一结论通过自产零序电流正常性验证和互感器本体试验得到了充分证实。依据规范要求调整回流线敷设路径、修复绝缘破损处后，故障支路零序电流恢复正常，验证了整改方案的有效性；

2.依据《GB50169-2016》制定的整改方案具有显著有效性。通过调整回流线敷设路径（移出零序电流互感器检测范围）、修复绝缘破损处（热缩绝缘套管密封+防磨橡胶垫保护）、全面排查同类缺陷等措施，故障支路的零序电流从整改前的0.148A降至0.028A，恢复至正常水平，且经3个月跟踪监测未出现复发情况。整改过程中采用的“外观检查—绝缘测试—负荷验证—长期跟踪”的四步验证法，为同类故障的整改提供了可借鉴的实施范式。

3.海上风电场紧凑型设备安装需强化施工过程管控与隐蔽工程验收，运维阶段需完善零序电流监测体系，才能保障设备长期安全稳定运行。

后续研究可结合海上高盐雾环境特点，开展电缆屏蔽层绝缘老化规律研究，为制定更精准的运维策略提供支撑。

参考文献

- [1]DL/T 5155-2016, 220kV-750kV变电站设计技术规程[S].北京：中国电力出版社，2016.
- [2]GB 50217-2018, 电力工程电缆设计标准[S].北京：中国计划出版社，2018.
- [3]GB 50169-2016, 电气安装工程接地装置施工及验收规范[S].北京：中国计划出版社，2016.