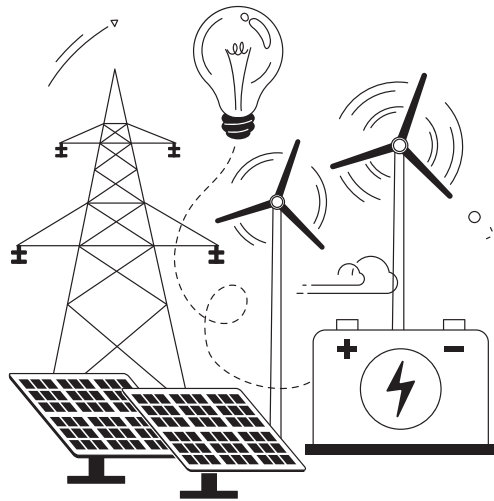


电力技术 与安全管理

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.

Morigeng Gaowa

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7期 2025年7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.artdesignpn.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 基于光差保护的配网合环运行可靠性提升策略 吴彦池
Strategy to Improve the Reliability of Distribution Network Loop Operation Based on
Optical Differential Protection Wu Yanchi
- 004 风光互补储能系统的容量优化与经济性匹配研究 丁勇
Research on Capacity Optimization and Economic Matching of Wind Solar
Complementary Energy Storage System Ding Yong
- 007 基于大数据的反窃电智能识别模型及应用效果分析 白琳
Intelligent Recognition Model for Anti Electricity Theft Based on Big Data
and Analysis of its Application Effect Bai Lin
- 010 新能源光伏并网系统中智能电网技术及应用研究 葛良志
Research on Intelligent Grid Technology and Its Application in New Energy
Photovoltaic Grid-Connected System Ge Liangzhi
- 013 天车精准下料系统在电解槽应用 谢晓林, 李建, 王省伟, 练新强, 杨广飞
的效能优化实践 Exploration and Application of Precise Cutting Technology for Aluminum
Electrolysis Crane Xie Xiaolin, Li Jian, Wang Shengwei, Lian Xinqiang, Yang Guangfei
- 017 火电厂环保监测智能控制系统优化升级 张德有, 李兆男, 范俊宽
Optimization and Upgrading of Intelligent Control System for Environmental Monitoring
in Thermal Power Plants Zhang Deyou, Li Zhaonan, Fan Junkuan

技术研究 | TECHNICAL RESEARCH

- 020 露天煤矿剥离运行作业与电气设备风险防控对策研究 尤昊, 于天阳, 于晓莉
Research on Risk Prevention and Control Measures for Stripping Operation and
Electrical Equipment in Open-Pit Coal Mines You Hao, Yu Tianyang, Yu Xiaoli
- 023 基于大数据分析的发电设备故障诊断与安全管理路径探讨 田小龙
Exploration of Fault Diagnosis and Safety Management Pathways for Power
Generation Equipment Based on Big Data Analysis Tian Xiaolong
- 026 智能化手段在发电设备异常排查与安全生产中的应用研究 康永
Research on the Application of Intelligent Means in Anomaly Detection and Safe
Production of Power Generation Equipment Kang Yong
- 029 加强火电厂燃料成本管理——提高企业经济效益 吴凡
Strengthening Fuel Cost Management in Thermal Power Plants
— Improving Enterprise Economic Efficiency Wu Fan
- 032 输配电线路的运行维护与故障排除技术分析 尹广强, 贾晓伟
Technical Analysis on Operation, Maintenance and Fault Troubleshooting of Power
Transmission and Distribution Lines Yin Guangqiang, Jia Xiaowei
- 035 人工智能算法在光伏逆变器运维检修故障诊断中的实践与验证 李雄飞
The Practical Application and Validation of Artificial Intelligence Algorithms in Fault
Diagnosis for Photovoltaic Inverter Operation and Maintenance Li Xiong fei

038	超超临界 1000MW 塔式锅炉大板梁吊装关键技术研究 Research on Key Technology of Lifting Large Plate Beam in Supercritical 1000MW Tower Boiler	沈奕男, 刘朝青, 张欲晓, 郭晓坤, 姜有治, 吕建华, 范国兵, 齐继玄 Shen Yinan, Liu Chaoqing, Zhang Yuxiao, Guo Xiaokun, Jiang Youzhi, Lv Jianhua, Fan Guobing, Qi Jixuan
041	新能源发电功率预测偏差对电网安全的影响及对策 The Impact and Countermeasures of Deviation in New Energy Power Generation Prediction on Power Grid Safety	杨明 Yang Ming
044	光伏发电 MC4 插头质量控制措施 Photovoltaic MC4 Plug Quality Control Measures	田小龙, 司俊龙, 宫兆军, 周奎应, 张城, 张洪星 Tian Xiaolong, Si Junlong, Gong Zhaojun, Zhou Kuiying, Zhang Cheng, Zhang Hongxing
047	脱硫 GGH (回转式换热器) 运行问题及节能改造方案研究 Research on the Operation Problems of Desulfurization GGH (Rotary Heat Exchanger) and Energy-saving Renovation Schemes	戴国辉 Dai Guohui
050	基于 BIM 技术的变电站电气设备安装监理及工程效率 BIM Technology-Based Supervision of Electrical Equipment Installation and Engineering Efficiency in Substations	岑贤航 Cen Xianhang
053	电力工程与新能源项目技术管理的融合与创新 Integration and Innovation of Technical Management in Power Engineering and New Energy Projects	沈树光 Shen Shuguang
056	建筑工程中机电设备安装与风险管理研究 —— 以商场酒店为例 Research on Installation and Risk Management of M&E Equipment in Construction Engineering—Taking Shopping Mall Hotels as Examples	廖江永 Liao Jiangyong
059	“双重预防机制”在燃煤电厂工程建设应急管理中的融合应用研究 Research on the Integrated Application of "Dual Prevention Mechanism" in Emergency Management of Coal-Fired Power Plant Engineering Construction	张迁, 崔恒涛, 秦义军 Zhang Qian, Cui Hengtao, Qin Yijun
064	输配电工程中变压器的安装及调试 Installation and Commissioning of Transformers in Power Transmission and Distribution Projects	赵殿勇, 朱芮锋 Zhao Dianyong, Zhu Ruifeng
067	环保发电技术发展现状及趋势分析 Current Situation and Trend Analysis of Environmental Protection Power Generation Technology Development	封彦林 Feng Yanlin
070	双碳目标下区域产业结构调整对电力需求的影响机制及预测模型构建 The Impact Mechanism of Regional Industrial Structure Adjustment on Electricity Demand and the Construction of a Prediction Model under the Dual Carbon Goals	冯胜涛, 刘航, 马明禹, 张彬, 冯燕军 Feng Shengtao, Liu Hang, Ma Mingyu, Zhang Bin, Feng Yanjun

基于光差保护的配网合环运行可靠性提升策略

吴彦池

深圳招商供电有限公司, 广东 深圳 518000

DOI:10.61369/EPTSM.2025070001

摘 要： 伴随配电网向智能化、互联化发展，合环运行变成提升供电可靠性和资源利用率的重要模式，但合环过程中存在的故障风险及保护配合问题，制约其广泛应用，光差保护凭借高精度、高速动作特性为处理配网合环运行中的保护问题带来帮助。本文围绕光差保护的配网合环运行可靠性提升展开研究，明确此项工作需遵循的核心原则，随后从多个维度提出针对性策略，研究说明经过科学原则指导和系统策略实施，可显著强化光差保护在配网合环运行中的适应性并有效提升配电网整体供电可靠性。

关 键 词： 光差保护；配网合环运行；供电可靠性；提升原则；优化策略

Strategy to Improve the Reliability of Distribution Network Loop Operation Based on Optical Differential Protection

Wu Yanchi

Shenzhen Merchants Power Supply Co., LTD. Shenzhen, Guangdong 518000

Abstract： With the development of smart and interconnected distribution networks, loop closure operation has become a crucial approach to enhance power supply reliability and resource utilization efficiency. However, existing fault risks and protection coordination issues during loop closure processes hinder its widespread application. Optical differential protection, with its high-precision and rapid-action characteristics, offers significant assistance in addressing protection challenges during distribution network loop closure operations. This study focuses on improving the reliability of optical differential protection in distribution network loop closure operations, clarifying the core principles that must be followed. Subsequently, targeted strategies are proposed from multiple dimensions. The research demonstrates that through scientific principles and systematic implementation of these strategies, the adaptability of optical differential protection in distribution network loop closure operations can be significantly enhanced, effectively improving the overall power supply reliability of distribution network.

Keywords： optical power protection; distribution network closed-loop operation; power supply reliability; improvement principle; optimization strategy

引言

在电力系统持续发展背景下，用户对供电可靠性要求日益提升，配网合环运行因能减少停电时间、提升供电连续性而受到广泛关注，不过配网合环运行过程中，线路故障时的电流分布、保护动作逻辑会发生变动，传统保护方法易发生误动、拒动等问题影响合环运行的安全性和稳定性，光差保护基于光纤通信达成线路两端电气量的实时对比，其具有动作速度快、选择性强的优点，为处理配网合环运行中的保护问题带来新路径，推动配电网高质量发展。

一、基于光差保护的配网合环运行可靠性提升原则

（一）保护动作与合环运行特性适配原则

配网合环运行时，线路潮流分布、短路电流大小与方向会因合环点选择、系统运行方法改变而改变，这和辐射状运行模式存在显著差异，光差保护作为配网合环运行中的重点保护手段，其

动作逻辑和参数设置一定得完全适合合环运行的特性能力，确保在故障发生时准确、高速动作，若光差保护仍沿用辐射状运行时的参数可能因无法识别合环后的故障电流特征而发生误判^[1]。在合环线路发生区外故障时，若保护装置未考量合环带来的电流分流效应，则会误将区外故障判定为区内故障导致跳闸，影响供电连续性；反之若区内故障时因参数不适配导致保护拒动，则会扩

作者简介：吴彦池（1995-），男，四川资阳人，本科，助理工程师，研究方向：继电保护。

大故障影响范围造成更严重的停电事故。所以在提升配网合环运行可靠性过程中，工作人员需优先确保光差保护的動作特性和合环运行的电气特征相匹配并根据合环运行的实际工况动态调整保护参数，使保护装置能精准识别故障类型和位置为合环运行带来可靠保护支撑。

（二）保护系统与通信网络协同可靠原则

光差保护的正常运行高度依赖通信网络的平稳传输，配网合环运行中，保护装置需经过通信网络实时交换线路两端电流、电压等电气量数据，一旦通信网络发生延迟、中断或数据丢包等问题将直接影响光差保护的動作性能，威胁配网合环运行的可靠性^[5]。工作人员为保障保护系统和通信网络协同可靠，则需从通信网络选型、架构设计及冗余配置等方面制定明确要求，以下通过表格形式展示通信网络关键性能指标与适配方案：

通信网络性能指标	要求标准	适配方案	应用效果
传输延迟	≤ 10ms	采用光纤专线通信，减少中间转发节点，优化数据传输路径	确保线路两端电气量数据同步性，避免因延迟导致保护误动
数据丢包率	≤ 0.001%	采用冗余通信链路，当主链路出现故障时，自动切换至备用链路；采用数据重传机制	降低数据丢失概率，保障保护装置获取完整、准确的电气量信息
网络稳定性	全年中断时间 ≤ 1h	定期对通信设备进行维护检修，实时监测网络运行状态，建立故障预警机制	减少通信网络故障次数与持续时间，提升保护系统运行稳定性

以某城市配网合环项目为例，该项目初期采用无线通信方法传输光差保护数据因无线信号易受外界干扰，传输延迟最高达50ms导致光差保护在多次故障模拟测试中发生動作延迟问题，后改为光纤专线通信并配置冗余链路，传输延迟控制在5ms以内，数据丢包率降至0.0005%以下^[2]。光差保护動作准确率显著提升，合环运行的可靠性得到有效保障，由此可见保护系统和通信网络协同可靠是提升配网合环运行可靠性的重要原则，工作人员需经过科学的通信方案设计和管埋，为光差保护带来稳定的通信支撑。

（三）故障处理与供电恢复高效统筹原则

在配网合环运行中，光差保护的重点目标不只是快速切除故障，更要与供电恢复措施高效统筹，以最大限度减少故障造成停电时间提升供电可靠性，当配网合环线路发生故障时，光差保护需在最短时间内准确切除故障线路防止故障扩散，保护系统应与配网自动化系统实时联动将故障信息高速传递至调度核心，为调度人员制定供电恢复方案带来依据，若仅着重故障切除速度而忽视与供电恢复统筹协调，则可能导致故障切除后，调度中心无法实时获取准确地故障信息而延长供电恢复时间，影响用户用电体验^[3]。比如某配网合环线路发生单相接地故障，光差保护虽高速切除故障但因未实时将故障位置、故障类型等信息同步至自动化系统，调度人员只能经过人工巡检排查故障，导致供电恢复时间长达2小时远超预期，所以在提升配网合环运行可靠性过程中，工

作人员需遵循故障处理和供电恢复高效统筹原则创建光差保护、自动化系统和调度中心协同机制，达成故障切除和供电恢复的无缝衔接，在缩短停电时长的同时提升配网合环运行整体可靠性。

二、基于光差保护的配网合环运行可靠性提升策略

（一）优化光差保护参数，适配合环电流特征

配网合环运行时，线路短路电流幅值和相位会发生变化，需经过优化光差保护参数适配合环电流特征，工作人员一开始需结合配网合环运行的潮流计算结果确定各类合环方法下线路的最大短路电流和最小短路电流，以此为依据调整光差保护的動作电流阈值。当配网采用双侧电源合环方法时，线路短路电流会显著增大，若仍采用辐射状运行时的動作电流阈值可能导致保护装置在正常合环操作时误动，此时根据合环后的最大短路电流适当提升動作电流阈值，保证在区内故障时保护装置能可靠動作^[4]。针对合环线路可能发生的故障电流方向改变问题，工作人员需优化光差保护的方向判别逻辑采用自适应方向判别算法，基于合环运行方法自动调整方向判别门槛防止因电流方向改变导致保护拒动，比如某地区配网在合环运行改造中利用潮流计算得出合环线路最大短路电流为3.2kA，最小短路电流为0.8kA，据此将光差保护動作电流阈值调整为0.6kA（低于最小短路电流确保区内故障可靠動作），使保护装置能准确识别故障电流方向，改造后经过故障模拟测试，光差保护在各类合环方法下的動作准确率达到100%，有效防止误动、拒动问题，提升配网合环运行的可靠性^[5]。

（二）构建分层通信架构，保障数据传输稳定

在处理光差保护依赖的通信网络易受干扰、稳定性不足的问题时，工作人员需构建分层通信架构保障数据传输平稳，该架构从上至下分为核心层、汇聚层与接入层，核心层采用双节点冗余设计部署高性能路由器和交换机，负责完成各类配网区域间的通信互联，保证数据在大范围传输过程中的稳定性；汇聚层设置在配网变电站内经过光纤链路和中心层连接，接入多个接入层节点实现对区域内光差保护数据汇聚和转发，减少数据传输路径长度^[6]；接入层直接和配网线路上的光差保护装置连接，采用光纤专线或工业以太网方法来保障保护装置和汇聚层之间数据传输实时性、准确性。工作人员在分层通信架构中还需引入网络监控系统，对各层级通信设备的运行状态、数据传输速率、延迟等指标实行实时监测，当发现通信异常时则自动发出预警信号并启动冗余链路切换机制，保证数据传输不中断，还要定期对通信设备实行固件更新、维护，消除设备潜在故障隐患进一步提升通信网络稳定性，为光差保护的正常运行带来可靠的通信保障^[7]。

（三）建立保护与自动化联动机制，加速故障处理

光差保护与配网自动化系统联动不足会导致故障处理效能低下，创建二者联动机制可加速故障处理以及提升配网合环运行可靠性，具体而言在光差保护装置检测到线路故障并動作跳闸后立即将故障信息（涵盖故障线路编号、故障类型、故障发生时间、故障电流幅值等）经过通信网络上传至配网自动化系统，自动化系统接收到故障信息后结合配网拓扑结构和实时运行数据来高速

分析故障影响范围并生成最优的供电恢复方案，随后自动化系统将供电恢复方案下发至相关的断路器、隔离开关等设备达成故障线路隔离与非故障区域供电恢复^[8]。为验证该联动机制的有效性，某配网开展了现场测试，测试结果如下表所示：

测试项目	无联动机制	有联动机制	提升效果
故障识别时间	15s	3s	缩短80%
供电恢复时间	45min	12min	缩短73.3%
停电范围	3个台区	1个台区	缩小66.7%

从测试效果可以看出创建光差保护与配网自动化联动机制后，故障识别时间、供电恢复时间显著缩短，停电范围大幅缩小，故障处理效能得到极大提升有效保障配网合环运行的可靠性^[9]。

（四）引入状态监测技术，实现保护提前预警

防止光差保护装置因自身故障导致配网合环运行可靠性下降的过程中，工作人员需引入状态监测技术实行保护提前预警，状态监测技术是指在光差保护装置内部及重点部件（如电流互感器、电压互感器、通信接口等）安装传感器，实时采集装置运行参数（如装置工作温度、电源电压、电流采样精度、通信信号强度等）和状态信息，再将采集到的数据传输至状态分析平台，平台采用大数据分析和人工智能算法对数据实行处理分析，识别光差保护装置的潜在故障隐患^[10]。平台在检测到装置参数超出正常范围或存在异常走向时自动生成预警信息并基于故障严重程度划分预警等级（如一般预警、重要预警、紧急预警），及时推送至运维人员，运维人员围绕预警信息制定针对性检修计划，在装置发生实际故障前实行维护或更换防止因保护装置故障影响配网合环运行，状态监测技术还能积累光差保护装置运行数据为装置寿命评估、检修周期改良带来依据，进一步保证配网合环运行的效果^[11]。

（五）加强运维管理体系建设，促使保护长期可靠

光差保护的长期可靠运行离不开完善的运维管理体系，加大运维管理体系建设是提升配网合环运行的重要保障，企业要创建健全运维管理制度，明确运维人员职责和 workflows，涵盖光差保护装置的日常巡检、定期检测、故障处理等环节的具体要求，保证运维工作规范化、标准化，还要加大运维人员培训，定期组织技术培训和实操演练使运维人员熟悉光差保护装置的工作原理、参数设置方法及故障排查技巧，提升运维人员专业技能水平^[12]。在保护装置发生故障时，运维人员能高速、准确做出处理，还可以引入运维信息化管理平台，将光差保护装置运行数据、检修记录、故障信息等纳入平台管理实现运维数据集中存储、查询与分析，为运维决策带来数据支撑，随着加大运维管理体系建设可实时发现并处理光差保护运行过程中的问题，促进配网合环运行的稳定性。

三、结束语

综上所述，配网合环运行是提升供电可靠性的重要举措，而光差保护作为保障合环运行安全的核心技术，其应用成效直接影响配网整体运行质量，本文明确基于光差保护的配网合环运行可靠性提升原则，从保护参数优化、分层通信架构构建、系统联动机制、进行状态监测及运维管理等方面提出针对性策略，为处理光差保护在配网合环运行中的适配性和协同性问题带来思路。企业在今后要进一步结合实际配网案例对各策略应用结果实行量化分析，探索光差保护和新能源接入、智能调度等技术融合路径，持续优化配网合环运行可靠性提升体系，推动配电网向更高效、更可靠的方向发展，为用户带来更优质电力服务。

参考文献

[1] 颜湘武,邵晨,彭维锋,等.基于旋转式潮流控制器的有源配电网柔性合环及紧急功率控制方法[J].中国电机工程学报,2023,43(16):6192-6204.

[2] 成龙,李国庆,王翀,等.考虑预测误差不确定性和功率互济的配电网直流合环重构[J].电力系统保护与控制,2024,52(24):97-108.

[3] 杜苗苗.基于无缝合环转电装置的配电网优化运行[D].华中科技大学,2024.

[4] 欧阳金鑫,陈纪宇,袁毅峰,等.基于分布式电源主动控制的配电网合环电压波动抑制方法[J].2024,44(1).

[5] 徐洪海,刘文松,潘明,等.基于移相调压技术的紧凑型配电网合环系统研制[J].电气应用,2023(1):80-85.

[6] 陈世威,荣娜,罗勇,等.基于1D-CNN的含DG中压馈线合环电流预测方法[J].建模与仿真,2023,12(5):4499-4514.

[7] 熊吟龙,曾晓丹,彭程,等.10kV配网线路长期合环风险辨识及检测方法[J].电气技术与经济,2023(10):181-183.

[8] 王凯,王洋,杜鹏,等.计及分布式电源输出特性的主动配电网合环电流计算方法[J].电网与清洁能源,2023,39(6):144-150.

[9] 高文俊.基于合环电压波动抑制的配电网故障恢复协同控制方法[J].电气技术与经济,2024(12):339-342.

[10] 张宇翔.10kV配电网不停电合环倒切负荷技术研究[J].电力设备管理,2024(3):26-28.

[11] 褚亦遥.基于配电网合环倒切接地故障分析的改进保护方案与合环条件[J].电瓷避雷器,2024(1):119-130.

[12] 刘文松,徐洪海,皇甫晨晨,等.基于灵敏度分析的电力系统合环决策模型[J].办公自动化,2023,28(24):59-61.

风光互补储能系统的容量优化与经济性匹配研究

丁勇

贵州元龙综合能源产业服务有限公司, 贵州 贵阳 550081

DOI:10.61369/EPTSM.2025070002

摘 要： 风光互补储能系统作为可再生能源利用的重要形式，其容量配置的合理性影响着系统的稳定性和经济性。为此，本文便聚焦于风光互补储能系统的容量优化与经济性匹配，在阐述系统构成及运行特性的基础上，深入地分析了影响容量配置的关键因素。文章重点提出了基于负荷需求、资源特性、经济性约束及系统可靠性的容量优化策略，期待能够为风光互补储能系统的高效、经济运行提供理论支持和实践指导。

关 键 词： 风光互补；储能系统；容量优化；经济性匹配

Research on Capacity Optimization and Economic Matching of Wind Solar Complementary Energy Storage System

Ding Yong

Guizhou Yuanlong Integrated Energy Industry Service Co., Ltd., Guiyang, Guizhou 550081

Abstract： As an important form of renewable energy utilization, the capacity configuration of wind solar complementary energy storage system affects the stability and economy of the system. Therefore, this article focuses on the capacity optimization and economic matching of wind solar complementary energy storage systems. Based on the explanation of system composition and operating characteristics, it deeply analyzes the key factors affecting capacity configuration. The article focuses on proposing capacity optimization strategies based on load demand, resource characteristics, economic constraints, and system reliability, hoping to provide theoretical support and practical guidance for the efficient and economical operation of wind solar complementary energy storage systems.

Keywords： complementary wind and solar energy; energy storage system; capacity optimization; economic matching

引言

当前全球能源危机和环境问题的日益严峻，可再生能源的开发与利用则成为了各国能源战略的重要组成部分。虽然风能和太阳能作为清洁、可再生的能源，它们具有储量丰富、分布广泛等优势，但其固有的间歇性、波动性特点，导致单一的能源发电系统难以满足稳定的供电需求。风光互补储能系统则能将风能、太阳能与储能技术相结合，经由两者的互补特性平抑出力波动，再借助储能装置即可进一步地提高系统的供电可靠性，因此该系统成为了解决可再生能源大规模应用难题的有效途径。然而风光互补储能系统的容量配置是一个复杂的系统工程，当中涉及到了风能、太阳能资源的分布特征、负荷需求的变化规律、储能装置的性能参数以及投资成本等多个方面。若容量配置过大，便会造成设备闲置和投资浪费，进而降低了系统的经济性，可容量配置过小，则无法满足负荷的需求，影响着系统的稳定性和可靠性。因此开展风光互补储能系统的容量优化与经济性匹配研究，从中寻求出最优的容量配置方案，对于提高系统的能源利用效率、降低度电成本、推动可再生能源的规模化应用等方面具有非常重要的理论意义和实际应用价值。

一、风光互补储能系统构成及运行特性

（一）系统构成

风光互补储能系统主要由风力发电装置、光伏发电装置、储能装置、能量转换装置（如逆变器、整流器）以及控制系统等部

分组成^[1]。展开来说：风力发电装置利用风力驱动风机叶片进行旋转，以此将风能转化为电能；光伏发电装置则通过光伏电池板可以将太阳能直接转化为电能；储能装置（如蓄电池、超级电容器、飞轮储能等）则被用于存储多余的电能，该装置可以在风光资源不足或负荷高峰期释放电能，进而平抑出力波动；而能量转

换装置负责将不同形式的电能进行转换，以满足负荷对于电压、频率的要求；控制系统的任务是根据风光资源状况、负荷需求和储能装置的状态，对于整个系统的运行进行协调控制，确保系统能够稳定、高效地运行。

（二）运行特性

风光互补储能系统的运行特性主要取决于风能和太阳能的资源特性以及负荷需求的变化^[9]。由于风能和太阳能均具有随机性和间歇性，因此风力发电和光伏发电的出力呈现出了强烈的波动特征。而储能装置在系统中起到了“削峰填谷”的作用，当风光发电总出力大于负荷需求时，多余的电能便会被存储到储能装置中，若风光发电总出力小于负荷需求，储能装置就会释放电能，进而弥补供电缺口。控制系统则可以实时地监测风光发电出力、负荷需求和储能装置的荷电状态（SOC），进而合理地调度能量流动，使系统的供电与负荷需求得以保持动态的平衡。

二、影响风光互补储能系统容量配置的关键因素

（一）风光资源特性

不同地区的风光资源分布存在着显著的差异，风速、风向的变化规律以及太阳辐射强度、日照时间等参数均决定着风力发电机和光伏阵列的最大出力及出力特性。即风能和太阳能的资源禀赋是影响系统容量配置的首要因素^[9]。

（二）负荷需求特征

实际上，负荷需求的大小、变化规律及可靠性要求对于系统容量的配置具有非常重要的影响。其中负荷需求可分为确定性负荷和随机性负荷，确定性负荷（如居民日常生活用电、工业生产用电等）一般具有相对稳定的变化规律，随机性负荷（如临时用电设备）则难以提前进行预测。而系统容量的配置需满足不同类型负荷的供电需求，通常对于可靠性要求较高的负荷（如医疗设备、重要通信设施），需要配置更大容量的储能装置和备用电源，以降低供电中断的风险。

（三）储能装置性能

储能装置的容量、充放电效率、循环寿命、自放电率等性能参数均影响着系统的容量配置和经济性。一般情况下，储能容量越大，系统应对风光出力波动和负荷变化的能力就越强，但同时也会增加系统的投资成本。

（四）经济性因素

经济性因素为衡量系统容量配置合理性的重要指标，它主要包括了初始投资成本、运行维护成本、燃料成本（若系统包含备用燃油发电机）以及电能销售收入（对于并网系统）等等^[4]。

三、风光互补储能系统容量优化策略

（一）基于负荷需求的容量优化策略

基于负荷需求的容量优化策略以满足负荷供电需求作为核心目标，即分析负荷的历史数据和变化趋势，确定出系统所需的最小供电容量。首先要对负荷进行分类和统计，进而明确不同时间

段的负荷大小和持续时间，且绘制出负荷曲线。然后结合风光资源的预测数据，计算出在不同风光出力情况下系统需要的储能容量和风光发电容量，以确保在任何时刻都能够满足负荷的需求^[5]。同时为了提高优化的精度，还可以采用负荷预测算法（如时间序列分析、神经网络预测等）对未来的负荷需求进行预测，再结合风光资源预测的结果，动态地调整系统的容量配置方案。

（二）基于风光资源特性的容量优化策略

基于风光资源特性的容量优化策略要充分地利用风能和太阳能的互补性，经由合理地配置风力发电机和光伏阵列的容量，来减少系统对于储能装置的依赖，进而降低系统的成本。第一步要对当地的风光资源进行详细地评估，着重分析风速和太阳辐射强度的时间分布特性，确定出风光资源的互补性强弱^[6]。若风能和太阳能在时间上呈现出较好的互补性（如白天光照强时风力较小，夜间风力较大时光照弱），便可适当地减小储能容量，反之则需要增加储能的容量。第二步是在具体优化的过程中，可以建立风光发电联合出力模型，用于模拟不同风光容量配比下的系统出力特性，使其尽可能与负荷需求曲线相匹配。第三步要根据风光资源的季节变化和日内变化规律，去动态地调整风光发电设备的运行策略。

（三）基于经济性约束的容量优化策略

基于经济性约束的容量优化策略的目标是使系统的全生命周期成本最小化，重点是综合地考虑初始投资、运行维护、储能装置更换等成本，随后优化风光发电容量和储能容量^[7]。其核心为建立系统的经济性评估模型，以此明确各项成本的计算方法。通常初始投资成本与设备容量为直接相关，根据设备的单位容量价格仅需计算即可；而运行维护成本与设备的运行时间、维护频率等有关；储能装置的更换成本则取决于其循环寿命和使用年限。实际优化的过程中，建议采用经济性分析方法（如净现值法、内部收益率法、度电成本法等）对不同容量的配置方案进行评估。

（四）基于系统可靠性的容量优化策略

基于系统可靠性的容量优化策略重点在于提高系统的供电可靠性，为此要通过合理地配置储能容量和备用电源，来降低供电中断的概率^[8]。实践当中，系统的可靠性指标主要包括了供电不足概率（LPSP）、缺电损失（EENS）等等。其中供电不足概率是指系统无法满足负荷需求的时间占总时间的比例，缺电损失是指系统未能供应的电能总量。对上述部分进行优化时，应当通过建立系统的可靠性评估模型，计算出不同容量配置方案下的可靠性指标，以确保其满足预设的可靠性要求。一旦系统的可靠性指标不达标，便可通过增加储能容量或配置备用电源（如燃油发电机）来提高系统的可靠性。与此同时，还需要考虑到储能装置的可靠性，如储能电池的充放电深度、SOC管理等等。即合理地控制储能装置的充放电深度，避免过度充放电的情况，进而提高其可靠性和使用寿命，最终保证系统的长期稳定运行。

四、风光互补储能系统经济性匹配分析

（一）设备选型与成本匹配

在设备选型的过程中，应该综合地考虑设备的性能和成本，随后选择性价比高的设备^[9]。例如风力发电机的选型应根据当地的风速特征，尽量选择适合的功率等级和型号，以避免“大马拉

小车”或“小马拉大车”的情况；光伏电池板的选型则应考虑到转换效率、寿命和价格等因素，如此才能在保证发电效率的前提下，降低单位功率的投资成本；而储能装置的选型需要根据系统的运行要求，在铅酸电池、锂电池、超级电容器等多种类型中进行选择，核心在于权衡其容量、充放电效率、循环寿命和成本等参数。经由设备选型与成本的匹配，便能在满足系统性能要求的基础上，降低初始投资的成本，进而为系统的经济性奠定基础^[10]。

（二）运行策略与经济性匹配

通过合理地调度风光发电和储能装置的运行，得以提高能源利用的效率，如此便能降低运行的成本。比如电价较高的时段，可以优先利用储能装置进行放电，以减少外购电（对于并网系统）；在电价较低的时段，则可以经由电网充电（若允许）来降低储能的成本。面对独立的系统，仅需合理地控制储能装置的SOC，便能避免深度放电，达到延长其使用寿命与减少更换成本的效果。

（三）全生命周期经济性匹配

全生命周期经济性匹配考虑系统从规划、建设、运行到报废的整个过程的成本和收益，如此才能确保系统在整个生命周期内的经济效益最佳。具体来说，在容量优化和设备选型时，应该考

虑到设备的使用寿命，进而避免因设备提前报废而增加更换成本的情况。而通过全生命周期成本分析，即比较不同容量配置方案和运行策略的经济性，从中选择出在整个生命周期内净收益最大的方案。

五、结语

风光互补储能系统的容量优化与经济性匹配是提高系统性能和经济效益的关键点。本文通过分析影响系统容量配置的关键因素，已然提出了基于负荷需求、风光资源特性、经济性约束和系统可靠性的容量优化策略，并且探讨了系统的经济性匹配方法。在实际应用当中，应该根据具体的风光资源条件、负荷需求和经济性目标，综合地运用多种优化策略，从中选择最优的容量配置方案。同时随着储能技术的不断发展和成本的降低，以及风光资源预测精度的提高，相信风光互补储能系统的容量优化与经济性匹配将迎来新的发展机遇。为此未来的研究可进一步地结合智能算法（如遗传算法、粒子群优化算法等）来提高优化精度和效率，持续地探索多能互补系统（如风光储氢系统）的容量优化与经济性匹配。

参考文献

[1] 虞启辉, 高胜昱, 孙国鑫, 等. 基于风光互补发电系统的压缩空气混合储能系统容量优化 [J]. 新能源进展, 2024, 12(01): 74–81.DOI: 10.3969/j.issn.2095-560X.2024.01.009.

[2] 孙永凯, 何飞跃, 何婷. 风光互补发电系统混合储能系统容量优化方法研究 [J]. 水电能源科学, 2024, 42(01): 216–220+39.DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2024.01.1182.

[3] 王筱, 李高青, 姬生才, 等. 计及风光不确定性的互补发电系统容量优化配置研究 [J]. 动力工程学报, 2024, 44(11): 1750–1759.DOI: 10.19805/j.cnki.jcspe.2024.230578.

[4] 王学申, 孙然, 许军, 等. 基于飞轮储能的离网型风光储微电网系统容量优化配置研究 [J]. 热力发电, 2025, 54(03): 43–50.DOI: 10.19666/j.rlfd.202407160.

[5] 姜杰, 付申杰, 漆晓凤, 等. 园区风光储系统的储能容量优化及运行调控策略研究 [J]. 电气技术与经济, 2023, (10): 110–112.

[6] 刘敏. 基于改进算法的新型电力系统风光火容量与调度优化研究 [J]. 电力设备管理, 2025, (05): 254–256.

[7] 李瑞民, 张新敬, 徐玉杰, 等. 风光互补系统中混合储能容量优化配置研究 [J]. 储能科学与技术, 2019, 8(03): 512–522.DOI: 10.12028/j.issn.2095-4239.2019.0014.

[8] 田蓓, 王朝晖, 张爽, 等. 面向风光综合消纳的电力系统广域储能容量优化配置研究 [J]. 智慧电力, 2020, 48(06): 67–72.

[9] 郑博, 白章, 袁宇, 等. 多类型电解协同的风光互补制氢系统与容量优化 [J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(23): 8486–8495.DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.220655.

[10] 栗占伟, 樊东方, 曾超, 等. 考虑风光消纳的储能系统容量优化配置及运行策略研究 [J]. 储能科学与技术, 2024, 13(08): 2713–2725.DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2024.0165.

基于大数据的反窃电智能识别模型及应用效果分析

白琳

内蒙古电力（集团）有限责任公司电力营销服务与运营管理分公司，内蒙古 呼和浩特 010020

DOI:10.61369/EPTSM.2025070004

摘 要： 电力在社会生产和人们生活中是不可或缺的能源之一，其能否稳定地供应对于社会经济的发展而言至关重要。但窃电行为一直困扰着电力行业的发展，它不仅会导致电力企业的经济效益受损，还极有可能引发电气火灾、线路过载等安全隐患，威胁着电网的安全运行和人民群众的生命财产安全。本文基于大数据的反窃电智能识别模型，阐述了模型的构建思路、核心架构与关键技术，且分析其在反窃电工作中的应用效果。

关 键 词： 大数据；反窃电；智能识别模型；应用效果

Intelligent Recognition Model for Anti Electricity Theft Based on Big Data and Analysis of its Application Effect

Bai Lin

Inner Mongolia Electric Power (Group) Co., Ltd. Power Marketing Service and Operation Management Branch, Hohhot, Inner Mongolia 010020

Abstract： Electricity is one of the indispensable energy sources in social production and people's lives, and its stable supply is crucial for the development of the social economy. However, electricity theft has always plagued the development of the power industry. It not only damages the economic benefits of power companies, but also has a high risk of causing safety hazards such as electrical fires and line overloads, threatening the safe operation of the power grid and the safety of people's lives and property. This article is based on a big data based intelligent recognition model for anti electricity theft, elaborating on the construction ideas, core architecture, and key technologies of the model, and analyzing its application effect in anti electricity theft work.

Keywords： big data; anti electricity theft; intelligent recognition model; application effect

引言

传统的反窃电手段主要依赖于人工排查，但这种方式存在着诸多弊端。一方面人工排查需要耗费大量的人力、物力和时间，其效率低下，难以适应大规模、复杂的电力网络环境；另一方面因为人工排查过度依赖于工作人员的经验，主观性较强，极易容易出现漏查、误查等情况，最终导致窃电行为难以被及时地发现和查处。而现如今，随着大数据技术的迅猛发展，该技术在各个领域的应用都取得了显著的成效。若能将大数据技术引入反窃电工作之中，构建起反窃电智能识别模型，便能够实现对海量电力数据的深度挖掘和分析，助力供电企业及时地发现潜在的窃电行为，为反窃电工作提供科学、精准的决策支持。

一、基于大数据的反窃电智能识别模型

（一）模型构建思路

基于大数据的反窃电智能识别模型的构建，核心在于充分地利用电力系统中产生的海量数据，经由对这些数据的分析和挖掘，从中找出与窃电行为相关的特征和规律，以此实现对窃电行为的精准识别^[1]。但这一过程并非简单的数据堆砌与算法套用，

而是需要结合电力行业的业务特性与窃电行为的隐蔽性特点，构建起一套从数据到决策的完整逻辑闭环。

第一步，需要明确模型的目标是识别出存在窃电行为的用户或区域。为了实现该目标，需要提前收集与电力使用相关的各类数据，将这些数据将作为模型分析的基础，接着在目标设定阶段考虑不同场景下的窃电形态差异。例如居民用户可能会通过改装电表来实现窃电，工业用户则可能会采用绕越计量装置的方式偷

电,那么模型就需具备对多类型窃电行为的覆盖能力。因此数据收集范围要兼顾多样性与针对性,当中既包括用户基础信息(如用户类型、用电地址、供电线路等),也应涵盖实时的用电数据(如分钟级用电量、电压电流曲线),还需纳入设备运行数据(如电表通信状态、故障告警记录)等等。

第二步,对于收集到的数据要进行处理和分析,从中提取出能够反映窃电行为的特征。通常这些特征可能包括用户的用电负荷曲线、用电量的波动情况、电表的运行状态等等。而特征地提取需建立在对窃电行为机理的深刻理解之上,如正常居民用户的用电负荷曲线一般呈现“早峰、午间低谷、晚峰”的周期性特征,窃电用户通过短时间内高频次断开计量回路,则会导致负荷曲线出现无规律的骤降。再如,商业用户在节假日的用电量会低于工作日,若某商铺在春节期间用电量异常偏低且与历史数据偏离度甚至超过阈值,提示该商铺可能存在着窃电嫌疑^[2]。

第三步,基于提取出的特征选择合适的算法构建模型,随后通过模型对数据的学习和训练,使其具备识别窃电行为的能力。此时模型的训练需经历“样本标注—特征输入—参数迭代—效果验证”的循环过程。具体来说:先选取历史窃电案例与正常用电样本组成训练集,然后将标注后的样本特征输入算法进行学习,再通过调整算法参数来优化模型的性能,最终经由测试集来验证模型的识别准确率与召回率。

(二) 模型核心架构

该模型的核心架构为数据层、特征层和模型层三个部分,这三层结构相互支撑、协同工作,共同实现了从原始数据到窃电识别结果的转化。首先是数据层,它是模型的基础,负责收集、存储和管理电力系统中的各类数据。因为这些数据的来源广泛,涉及到了用户的用电数据、电表的运行数据以及电网的相关数据。所以数据层需要具备强大的数据存储和管理能力,才能应对海量数据的处理需求。同时为了保证数据的质量和可用性,还需要对数据进行清洗和预处理操作,进而去除其中的噪声和异常值。其次为特征层,它的主要任务是从数据层提供的数据中提取出与窃电行为相关的特征,这也是模型构建过程中的关键环节,即特征的质量直接影响着模型的识别效果。实际在特征提取的过程中,特征层可被细分为“基础特征提取”与“高级特征构建”两个子模块,其中基础特征包括用户日均用电量、峰谷电比例、电压合格率等可直接从原始数据计算得到的指标,高级特征则需通过多维度的数据融合生成。此外特征层还需对特征进行标准化地处理,如将不同量级的用电量指标转换为[0,1]区间的归一化值,旨在避免因特征尺度的差异而影响模型训练效果的情况出现。最后则是模型层,该部分是整个智能识别模型的核心,主要负责利用特征层提取的特征进行模型的训练和预测。即在模型层中,需要选择合适的算法来构建模型。当前常见的算法有决策树、支持向量机、神经网络等^[3]。而这些算法各有特点,适用于不同的场景和数据类型。结合实际应用来看,相关人员可能需要尝试多种算法,并通过比较它们的性能,再从中选择出最适合的算法来构建模型。

(三) 模型关键技术

此模型的关键技术主要包括了数据融合技术、特征工程技术

和智能算法选择技术,基于上述三者共同构成模型的技术支撑体系,能够有效地保障模型的稳定性与识别精度。

1. 数据融合技术

电力系统中的数据来源多样,且不同来源的数据具有不同的格式和特点。而数据融合技术能够将这些不同来源、不同格式的数据进行整合和处理,消除不同数据之间的冗余和矛盾,有助于提高数据的一致性和准确性。例如将用户用电数据与电表GPS位置信息进行融合,即可识别出“一表多户”的窃电行为——当某块电表的注册地址为A小区,但其计量的用电量却与B小区某用户的实际用电轨迹高度吻合时,说明存在着电表被违规迁移的嫌疑。据此得知,经由数据融合能将用户的用电数据、电表的运行数据和电网的相关数据有机地结合起来,以此为特征提取和模型训练提供了更加全面、更丰富的信息。另外,数据融合还能实现跨系统数据的关联分析,比如将电力营销系统中的用户缴费记录与用电数据进行融合,若某用户长期拖欠电费且用电量远低于同类型用户,则可能存在着恶意窃电的倾向。

2. 特征工程技术

如前文所述,特征的质量直接影响着模型的性能。而特征工程技术分为特征选择和特征提取两个方面。一方面是特征选择,它是从众多的特征中筛选出对识别窃电行为最有价值的特征,去除当中无关或冗余的特征,以减少模型的复杂度,进而提高模型的运行效率。通常特征选择可采用基于树模型的特征重要性排序法——通过计算每个特征对模型决策的贡献度,然后保留贡献度排名前30%的特征,如“用电负荷波动率”“电表离线时长”等特征一般对窃电识别的贡献度较高,“用户姓氏”“电表生产厂家”等与窃电行为关联性较弱的特征则可被剔除^[4]。另一方面是特征提取,它是通过对原始数据的变换和处理,生成新的、更能反映窃电行为本质的特征。即通过对用户用电量的归一化处理,消除不同用户之间用电量差异的影响,使特征更具有可比性,或者是计算“用电量环比增长率”,以此捕捉用户用电行为的短期异常变化。面对于工业用户,还可提取“功率因数异常频次”特征,因为正常工业用户的功率因数通常维持在0.9以上,但窃电用户可能通过接入感性负载改变了计量点的功率因数,导致功率因数会频繁的低于0.85。

3. 智能算法选择技术

由于不同的智能算法在处理不同类型的数据和问题时表现出不同的性能,因此需要根据实际的应用场景和数据特点,选择出合适的智能算法。实际在选择算法时,一定要考虑算法的准确率、效率、鲁棒性等因素:对于实时性要求高的场景(如台区线损率超标的即时排查),建议选择决策树、逻辑回归等运算速度快的算法;对于窃电手段复杂的工业用户识别,则可以选择深度学习算法,在借助多层神经网络捕捉数据中的深层特征;若面对的是数据样本不平衡的情况(如窃电样本仅占总样本的0.5%),便可以使用采用过采样、欠采样或集成学习等方法来改善算法性能。与此同时,还可以采用多种算法融合的方式,将不同算法的优势进行结合,进一步地提高模型的识别性能。举个例子,决策树算法的可解释性强和神经网络算法的非线性拟合能力强的特点

相结合，构建起混合模型——先用神经网络对高维特征进行降维处理，再将降维后的特征输入决策树生成识别规则。此举既保证了模型对复杂模式的捕捉能力，还能提高了识别结果的可解释性，更方便电力稽查人员理解模型判定的依据^[5]。

二、基于大数据的反窃电智能识别模型应用效果分析

（一）提升反窃电工作效率

在传统的反窃电工作过程中，主要依靠的是人工排查的方式，该方式需要工作人员逐个用户、逐个区域的进行检查，工作量巨大且效率低下。基于大数据的反窃电智能识别模型则能够实现海量电力数据的自动分析和处理，进而快速地识别出存在着窃电嫌疑的用户或区域，在极大程度上减少了人工排查的范围和工作量。而模型在短时间内对大量用户的数据进行分析后，会将存在异常用电行为的用户筛选出来，工作人员只需针对这些筛选出的目标进行重点检查即可。如此一来，便避免了盲目地排查，提高了反窃电工作的效率。

（二）提高窃电行为识别精准度

由于传统反窃电手段过度地依赖于人工经验，非常容易受到工作人员主观因素的影响，导致窃电行为的识别精准度不高，其中存在着漏查和误查的情况。在以大数据为基础建立的反窃电智能识别模型之中，通过对海量数据的分析和挖掘，能够发现一些人工难以察觉的细微特征和规律，使窃电行为的识别精准度得到了提高。因为模型可以学习大量的历史窃电案例数据，并总结出窃电行为的特征模式，然后将这些模式应用到新的数据中，就能对用户的用电行为进行判断。哪怕是一些隐蔽性较强的窃电行为，如通过修改电表参数、私拉乱接线路等方式进行窃电的行为，模型依然能够通过分析电表的运行数据和用户的用电曲线等信息，及时地发现异常情况，提高了识别的准确性。

（三）降低反窃电工作成本

传统的反窃电工作往往需要投入大量的人力、物力和财力，原因是人工排查需要配备足够的工作人员，还需要使用各类检测设备和工具，而这些都会产生较高的成本。但基于大数据的反窃

电智能识别模型能够在一定程度上减少对于人工的依赖，间接地降低了反窃电工作的成本。此方面最为关键的就是模型的应用减少了人工排查的工作量，大幅度地减少了人力成本的投入。加之模型能够精准地识别出窃电嫌疑目标，以此避免了不必要的设备使用和资源浪费，所以降低了物力和财力成本^[6]。举个例子，经模型筛选出的可疑用户数量有所减少，工作人员便可以集中使用检测设备对这些用户进行检查，这样便提高了设备的使用效率，从而降低了设备的损耗和维护成本。

（四）保障电力系统安全稳定运行

窃电行为不但会造成经济方面的损失，还可能会对电力系统的安全稳定运行造成一定的威胁。比如，窃电行为可能会导致线路过载、电压不稳定等问题出现，随即影响到其他用户的正常用电，甚至还会引发电气火灾等安全事故。借助反窃电智能识别模型，便能够及时地发现窃电行为，以便电力企业采取相应的措施对其进行处理，有效地保障了电力系统的安全稳定运行。展开而言：基于模型的实时监测和分析，电力企业可以在窃电行为造成严重后果之前及时地介入，提前制止窃电行为，并修复被破坏的电力设施。同时模型还可以为电力企业提供关于窃电行为的统计分析和趋势预测，帮助企业制定出更加有效的防范措施，直接从源头上减少窃电行为的发生，促使电力系统的安全性和可靠性得到提升。

三、结语

结合了大数据的反窃电智能识别模型，为电力行业的反窃电工作提供了一种全新的、高效的技术手段。该模型通过对海量电力数据的分析和挖掘，能够精准地识别窃电行为，进而有效地提升了反窃电工作的效率和质量，并降低了工作成本，同时也为保障电力系统的安全稳定运行发挥了重要的作用。然而，该模型在实际应用之中仍存在一些不足之处。例如模型对数据的质量和完整性要求较高，若数据存在着缺失或错误，便可能会影响到模型的识别效果。此外随着窃电手段的不断翻新，模型需要持续地进行更新和优化，以适应新的挑战。

参考文献

- [1] 张靖. 基于大数据的用电稽查研究 [D]. 北京市：华北电力大学，2019.
- [2] 刘静. 江门电网窃电辨识与反窃电应用技术研究 [D]. 广东省：华南理工大学，2016.
- [3] 黄铁柱. 大数据技术在反窃电检查中的应用研究 [J]. IT 经理世界，2024，(10): 133-135.
- [4] 卢娜，王辉，刘浏. 基于大数据分析的精准反窃电实践探究 [J]. 黑龙江科学，2023，14(18): 155-157+161.
- [5] 黄春旭. 基于用电信息采集的智能反窃电识别技术分析 [J]. 电子技术 (上海)，2024，53(04): 258-259.
- [6] 河南光石智能工程有限公司. 基于用电信息采集大数据分析的反窃电智能分析识别设备：CN216209408U[P/OL]. 2022-04-05[2025-08-18]. <https://www.cqvip.com/doc/pat-ent/1970590116>.

新能源光伏并网系统中智能电网技术及应用研究

葛良志

华润新能源投资有限公司安徽分公司，安徽 合肥 230031

DOI:10.61369/EPTSM.2025070010

摘 要： 全球能源需求的不断增长和环境问题的日益严重，新能源技术的发展和應用已成为解决能源危机和减少碳排放的重要途径。光伏发电作为一种清洁、可再生的能源形式，具有广泛的应用前景和一定的发展潜力。光伏发电系统的并网接入和运行管理面临着诸多挑战，如电网稳定性、功率波动、电能质量等问题，需要借助智能电网技术来提高系统的可靠性、安全性和经济性。智能电网技术是一种集成了信息通信、控制和能源管理等技术的新型电力系统，能够实现对电力系统的实时监测、智能控制和优化调度，提高系统的运行效率和可靠性。在新能源与光伏并网系统中，智能电网技术可通过实时监测光伏发电系统的运行状态和电网负荷需求，实现光伏发电系统的最大功率跟踪、功率平衡和电能质量控制，从而提高系统的发电效率和电网的稳定性。

关 键 词： 新能源；光伏并网系统；智能电网技术；实践应用

Research on Intelligent Grid Technology and Its Application in New Energy Photovoltaic Grid-Connected System

Ge Liangzhi

Huarun New Investment Co., Ltd. Anhui Branch, Hefei, Anhui 230031

Abstract： With the continuous growth of global energy demand and the increasing severity of environmental issues, the development and application of new energy technologies have become crucial approaches to addressing the energy crisis and reducing carbon emissions. Photovoltaic (PV) power generation, as a clean and renewable energy source, holds broad application prospects and significant development potential. However, the grid integration and operational management of PV power generation systems face numerous challenges, such as grid stability, power fluctuations, and power quality issues. These challenges necessitate the use of smart grid technologies to enhance the reliability, safety, and economic efficiency of the systems. Smart grid technology is a novel power system that integrates information communication, control, and energy management technologies, enabling real-time monitoring, intelligent control, and optimized scheduling of the power system, thereby improving operational efficiency and reliability. In new energy and PV grid-connected systems, smart grid technology can enhance power generation efficiency and grid stability by real-time monitoring of the operational status of PV power generation systems and grid load demand, achieving maximum power tracking, power balancing, and power quality control of the PV systems.

Keywords： new energy; PV grid-connected system; smart grid technology; practical application

智能电网技术在光伏并网系统中的应用，包括先进的传感与量测技术、信息通信技术、智能设备技术、智能控制方法、决策支持与可视化技术等。智能电网技术在新能源发展中的作用，包括提高电网稳定性和可靠性、提高新能源消耗和降低环境影响，以及促进新能源技术的发展和應用。

一、光伏并网系统及其特点

光伏并网系统是将太阳提供的光能转换为直流电能，再经过逆变和升压等处理后，直接输送到公共电网中，与电网一起为各类用电设备供电的系统。

1. 系统组成。核心设备，光伏组件（单晶硅 / 多晶硅 / 薄膜技术）负责光能到电能转换，并网逆变器实现直流电到与电网同频

同相交流电的转换，配电柜、测控保护装置及环境监测等设备构成辅助系统，电网连接，需满足电压、频率、谐波等并网标准，通过电表实现双向计量。

2. 运行模式。一般包括全部自用，自发自用 + 余电上网及全额上网。全部自用：所有光伏发电全部供给本地负荷使用，无电能传输至电网；自发自用 + 余电上网：优先满足本地负载，多余电力馈入电网；全额上网：全部电能输送至电网。

3. 技术特点。系统输出的电能与公共电网的电能保持同频率、同相位、同电压；系统的发电功率由光照强度决定，具有间歇性、随机性和波动性^[1]；对电网系统有一定支撑能力，如当电网出现瞬间电压跌落时，系统不仅不脱网，还能向电网提供无功支持，帮助电网电压恢复。

4. 应用场景。主要应用场景包括户用分布式系统、工商业分布式系统、大型地面电站系统等。

5. 发展趋势。系统架构从单一到融合，标配或预留储能接口成为必然。储能不仅能平滑光伏出力波动、实现峰谷套利，还能在电网故障时通过离网切换技术保障重要负载的供电连续性；电网关系从适配到支撑，构网型技术是核心趋势，通过模拟同步发电机的特性，为电网提供惯性支撑和电压稳定能力，从根本上提升高比例新能源电网的稳定性与韧性。

二、新能源光伏并网系统中智能电网技术的智能监控与优化

1. 智能监控与优化数字孪生与 AI 诊断。传统监控只是数据采集和报警，而智能监控即感知层是数字孪生底座，基于如 IoT 技术，实时采集电站的全面数据（风光功率预测数据、发电功率、发电量、设备状态、环境温度、辐照度、红外热成像等），并利用算法进行初步分析和预警；数字孪生及数字层是整个系统的“数字底座”，其是一个与物理电站完全镜像的虚拟电站模型，模型不仅仅是 3D 外观，更重要的是包含了所有设备的设计参数、物理属性、电气连接关系和实时运行数据，可以实时映射、双向交互、模拟仿真；AI 诊断与优化即分析层是系统的“大脑”，基于数字孪生提供的海量实时和历史数据，利用机器学习、深度学习等 AI 算法，进行故障的精准诊断、性能衰退分析、发电量预测，并自动给出或执行优化策略^[2]。智能监控开展全面感知与数据同步，基于遍布电站的各类传感器、智能电表、无人机、摄像头等各类数据采集设备，实时采集各类数据，如电气数据：组串/逆变器的电压、电流、功率，环境数据：如辐照度、环境温度、风速、组件背板温度；设备状态数据：如逆变器、变压器、汇流箱等的工作状态和告警信息；图像数据：如无人机自动巡检拍摄的红外热成像和可见光图像；各类数据实时同步到对应的数字孪生体中，确保虚拟电站与物理电站的状态完全一致。数字孪生模型开展数字孪生仿真与映射，实时映射：如在 3D 界面上直观地看到哪一块组件温度异常（显示为红色）、哪一个组串发电效率偏低；物理仿真模拟不同光照、温度条件下的理论发电效率，为后续 AI 分析提供基准；根因溯源，通过虚拟模型中的异常组件，可以立刻追踪到其所在的组串、汇流箱和逆变器，极大缩短故障定位时间。AI 大脑的诊断与决策是价值创造的核心，AI 算法基于数字孪生的全量数据进行分析，可以包括异常检测与诊断，AI 识别出逆变器停机、组串限发等常规告警，分析红外图像，自动识别热斑（Hotspots）、二极管故障、蜗牛纹、组件裂纹等肉眼难以发现的缺陷并进行关联分析，如当一个汇流箱下的多个组串发电效率同时异常时，AI 会判断可能是汇流箱故障，而非单个组件问题。性

能分析与预测可以包括发电量预测，结合天气预报和历史数据，精准预测未来几天甚至几小时的发电量，助力电网调度和电力交易；性能衰退评估，通过长期数据追踪，分析组件效率的衰减率是否在正常范围内，评估电站的健康状态；收益损失分析，精确计算因每一处故障导致的发电量损失和电费损失，让决策更具经济性。

2. 规模化调度管理。随着新能源装机容量的急剧增长，管理单个电站已不足够，规模化、集群化的调度管理已成为保障电网安全、提升消纳水平的核心挑战。规模化调度的核心思想是“化零为整”，通过技术手段将分散、不可控的电源聚合为一个相对稳定、可控的“虚拟电厂”，从而参与电网调度。目标分为三个层次，安全层，确保电网稳定运行，不因新能源的波动而引发故障。消纳层，最大限度减少“弃风弃光”，提高新能源利用率。经济层，通过参与电力市场，实现集群效益最大化。对于新能源电站应当具备下列技术与能力，全面、高精度、标准化的数据采集与感知能力，包括智能传感器、SCADA 系统、数据采集网关等，为调度提供准确、及时的电站运行状态和环境数据，是一切优化的基础；高精度发电功率预测、设备健康状态智能评估的预测与数据分析能力，包括超短期/短期功率预测模型、AI 诊断平台、数字孪生技术等，降低不确定性，为调度计划制定提供依据；实现预防性维护，减少非计划停运；接受并执行调度指令，参与调峰、调频等辅助服务的协调与控制能力，包括 AGC/AVC 系统、协调控制器（ACCU-100）、快速响应 EMS 等，直接响应电网需求，维护系统安全稳定；优化本地用电，提升经济性；将电站作为资产参与电力市场交易，获取多重收益的市场与交易能力，包括支持电力交易的 EMS 系统、AI 交易 Agent 等，通过峰谷套利、辅助服务、绿电交易等市场化手段，显著提升电站收益；严格遵守网络安全规程，遵循统一的通信协议和数据标准，确保调度指令畅通、数据安全可靠，是规模化接入和可信互动的前提。

三、智能发电与并网控制

1. 功率追踪与电能质量监测。智能发电与并网控制中的功率追踪与电能质量监测是保障电网稳定运行的关键技术，功率追踪技术，动态负荷响应，光伏系统需根据光照强度动态调整发电功率，通过智能控制器（如 SmartGridBox）实时匹配电网需求，避免因间歇性发电导致的电压波动。逆变器控制优化，采用 SVG 等动态无功补偿装置调节逆变器输出，解决光伏并网导致的功率因数降低问题，确保电网侧功率因数 ≥ 0.95 。电能质量监测体系，分层监测架构，数据采集层：部署电能质量分析仪、谐波监测仪等设备，监测电压、电流、谐波等参数，关键监测点包括变电站和重要用户接入点^[3]。平台处理层：通过统计分析、趋势预测实现数据清洗与预警，阈值触发机制可快速定位电压暂降或谐波超标问题。标准化设备应用，如 APView400 等监测装置支持 35kV 以下系统的谐波分析、闪变监测等功能。综合治理策略，谐波治理，针对逆变器产生的各类谐波，采用动态无功发生器（SVG）

替代传统 LC 补偿器，避免并联谐振风险。预防性维护，构建电能质量知识库，积累案例与治理经验，支持主动运维决策。技术发展趋势，智能监测系统正朝多源数据融合方向发展，结合光纤专网与云端存储提升实时性，同时强化网络安全防护以应对关键基础设施的 OT 风险。

2.多模式并网技术。智能发电与并网控制中的多模式并网技术是实现新能源高效消纳和电网稳定的关键，其核心在于通过动态调节技术适应不同发电场景和电网需求。并网模式选择技术，支持逆变器在并网与离网模式间切换，通过控制系统状态机实现不同运行模式的快速转换。例如，Simulink 模型中的双闭环控制可实时监测电压、频率、相位参数，自动触发断路器合闸以减少并网冲击。智能控制与保护技术，无功控制：通过调节逆变器功率因数满足电网无功需求，提升系统稳定性。防逆流技术：防止电能倒流至电网，保障电网安全。过压 / 过流保护：采用硬件与软件协同的快速保护机制（如 6.7Ap-P 过流保护阈值）。规模化与协同管理，针对多个分布式电站，通过并网规模化管理技术实现电力调度优化。固态氢能发电示范中，电氢融合技术通过存储 - 发电 - 加氢一体化，解决新能源波动性问题。自动化与效率提升，自动并网柜通过智能监控实现参数匹配与合闸操作，显著提升并网效率。智能控制技术集成远程监测与故障诊断，优化发电全生命周期管理。未来，随着电氢融合等变革性技术的成熟，多模式并网将更深度支撑新型电力系统构建。

四、新能源光伏并网系统中安全与稳定性技术

传统电网依赖于同步发电机，其本身具有惯性（抵抗频率变化）和无功支撑能力（维持电压稳定）。而光伏电站等新能源电站通过电力电子逆变器并网，其固有特性包括低惯性与弱阻尼，易导致电网频率变化更快，抗扰动力下降；弱电压支撑能力，不主动参与电网电压调节，甚至在电网故障时可能加剧电压崩溃；抗干扰能力差，电网发生暂态故障（如电压跌落、骤升）时，易发生脱网，引发连锁故障；电能质量低，电力电子设备开关过程会引入谐波、间谐波，导致电压畸变；网络安全风险高，电站监控系统（SCADA）连接到网络，可能面临网络攻击，导致非法控

制或数据泄露^[4]。提升新能源光伏并网系统中安全与稳定性主要包括，频率稳定：虚拟惯性控制，逆变器通过控制算法，模拟同步发电机的惯性响应，当检测到电网频率变化率过大时，快速释放或吸收有功功率来“拖住”频率变化。一次频率调节，让光伏电站保留一定备用容量（降额运行），在电网频率超过阈值时，主动增加或减少有功出力，参与电网调频。电压稳定：无功功率调节，目前逆变器都具备无功调节功能，通过自动电压调节功能，根据并网点电压水平，自动发出或吸收无功功率，支撑电压稳定。静态同步补偿器，在大型光伏电站集中加装 STATCOM，提供快速、连续的无功补偿，是强大的电压稳定利器。暂态稳定性与故障穿越：低 / 高电压穿越已成为强制性并网要求，光伏逆变器必须能够在规定程度的电压跌落和升高期间保持并网，并向电网提供一定的无功电流，以帮助电网电压恢复。功角稳定性，通过先进的控制算法，确保逆变器在故障期间与电网其他电源保持同步。振荡抑制：阻抗重塑，改进逆变器控制策略，改变其输出阻抗特性，避免与电网阻抗在敏感频率段产生谐振。附加阻尼控制器，在逆变器控制系统中加入专门用于抑制特定频率振荡的辅助控制回路。电气保护，如直流侧保护，直流电弧故障检测与中断：直流电弧易引发火灾，需采用智能算法识别电弧特征并快速切断电路；逆流保护：防止电流反向流动。交流侧保护，过 / 欠压、过 / 欠频保护：在超出运行极限时安全脱网；防孤岛保护：检测电网停电状态并迅速断开连接，防止“孤岛运行”危及安全。网络安全保护，如边界防护：在电站监控网络与外部网络之间部署工业防火墙，进行访问控制和安全隔离。入侵检测与防御：部署 IDS/IPS 系统，实时监控网络流量，发现并阻断恶意攻击行为。安全认证与加密：对关键控制指令、运维操作进行双向身份认证和数据加密传输，防止篡改和窃听。安全审计与管理：建立完善的网络安全管理制度，定期进行漏洞扫描、风险评估和应急演练。

综上，智能电网技术在新能源领域的应用，不仅可提高电网的稳定性和可靠性，降低能源消耗和环境影响，还可促进新能源技术的创新和应用，在未来的发展中，智能电网技术将在新能源领域发挥越来越重要的作用。

参考文献

- [1] 刘新佳. 光伏并网发电系统中的储能技术应用研究 [J]. 工业控制计算机. 2020, (11)54-56.
- [2] 郑立明, 叶骏, 丛建鹏. 光伏并网发电系统中储能技术的应用探讨 [J]. 通信电源技术. 2022, 39(6)119-121.
- [3] 张新民. 光伏并网发电系统中的储能技术应用研究 [J]. 电力设备管理. 2022, (18)322-324.
- [4] 周春生. 储能技术在光伏并网发电系统中的应用 [J]. 建材发展导向 (上). 2021, (1)144-146.

天车精准下料系统在电解槽应用的效能优化实践

谢晓林, 李建, 王省伟, 练新强, 杨广飞^{*}
云南神火铝业有限公司, 云南 文山 663400
DOI:10.61369/EPTSM.2025070019

摘 要 : 针对铝电解生产过程中, 天车下料环节存在的精度不高、物料浪费等问题, 进行了深入的技术探索与应用研究。通过采用先进的传感器技术、自动化控制系统以及优化下料工艺等措施, 显著提高了铝电解天车的下料精度, 降低了生产成本, 提升了生产效率和产品质量, 为铝电解行业的可持续发展提供了有益的技术参考。

关 键 词 : 电解槽; 天车; 多功能天车; 料阀

Exploration and Application of Precise Cutting Technology for Aluminum Electrolysis Crane

Xie Xiaolin, Li Jian, Wang Shengwei, Lian Xinqiang, Yang Guangfei^{*}
Yunnan Shenhua Aluminum Industry Co., Ltd., Wenshan, Yunnan 663400

Abstract : In response to the problems of low precision and material waste in the overhead crane feeding process during aluminum electrolysis production, in-depth technical exploration and application research have been conducted. By adopting advanced sensor technology, automated control systems, and optimizing the cutting process, the cutting accuracy of the aluminum electrolysis overhead crane has been significantly improved, production costs have been reduced, production efficiency and product quality have been improved, and beneficial technical references have been provided for the sustainable development of the aluminum electrolysis industry.

Keywords : electrolytic aluminum; crown block; multi functional overhead crane; material valve

引言

电解铝天车系统主要由大车、小车、升降机构和电控系统等部分组成。大车和小车负责在电解槽上方移动, 升降机构则负责吊装和运输原料及产品。电控系统是整个天车系统的大脑, 负责控制天车的精确移动和吊装操作。

铝电解生产是一个复杂的工业过程, 其中天车下料操作是确保电解槽内物料均匀分布和稳定生产的关键环节。传统的下料方式往往依赖于操作人员的经验和技能, 下料精度难以保证, 容易出现物料偏析、浪费以及对电解槽运行稳定性产生不利影响等问题。随着现代工业自动化技术的飞速发展, 探索和应用铝电解天车精准下料技术具有重要的现实意义和经济价值。

实现新阳极组入槽后封极物料高度相对一致且保持稳定, 是电解生产基础管理的难点之一, 其直接影响封极质量、槽维护水平、卡堵次数、残极返回料量、爆炸块开焊等诸多方面。为实现新阳极组封料量化管理, 探索电解天车覆盖料^[1]仓下料延时关闭功能, 以期实现精准下料。

一、铝电解天车下料现状及问题分析

铝电解生产中, 氧化铝作为核心原料, 需通过天车下料系统精准、稳定地输送至电解槽内, 以维持电解质成分平衡、补充电解反应消耗的物料, 并为电解过程提供适宜的反应环境。当前行业内天车下料作业仍以传统模式为主, 虽能满足基本生产需求, 但在精度控制、物料分布及劳动效率等方面存在显著短板, 制约

了电解生产整体效益的提升。

(一) 现有下料方式

前国内多数铝电解企业采用的天车下料方式, 以“人工操作+经验化控制”为核心, 具体流程可分为“定位-计量-下料-复位”四个环节: 操作人员通过天车操控台控制大车、小车移动, 将下料机构精准对准电解槽的下料口; 随后依据生产工艺中预设的经验值(如单槽单次下料量50-80kg), 通过手动调节下料

作者简介: 谢晓林(1987—), 男, 河南永城人, 本科, 工程师, 研究方向: 电气设备管理工作。
通讯作者: 杨广飞(1985—), 男, 河南永城人, 本科, 工程师, 研究方向: 电气设备管理工作。

闸门的开合度与开合时间，控制氧化铝物料的投放量；下料完成后，操作天车复位至待料区域，等待下一轮下料指令。

从计量方式来看，传统下料系统缺乏实时精准的计量手段：部分企业仅通过料箱的容积刻度估算下料量，部分企业虽配备了简易的称重传感器，但因传感器精度低（误差通常在 $\pm 5\%$ 以上）、信号易受天车振动干扰，无法实现动态实时计量；下料时间间隔则多依据电解槽的运行时长（如每20–30分钟下料一次）或操作人员的主观判断设定，未与电解槽内实际物料消耗速度、电解质液位等关键参数联动。这种“经验驱动”的下料模式，本质上是一种“开环控制”，缺乏对下料过程的实时监测与反馈调节机制，导致下料作业的稳定性和精准性难以保障。在这个过程中，下料量的控制通常依据预先设定的经验值或者粗略的计量装置，缺乏精确的实时监测和反馈调节机制^[2]。

（二）存在的问题

下料精度低：由于人工操作的主观性和计量装置的误差，实际下料量与理论需求量之间存在较大偏差。这不仅导致物料的浪费，增加生产成本，而且会影响电解槽内的物料平衡和电解质成分的稳定性，进而影响铝电解的电流效率和产品质量。

物料分布不均匀：下料过程中，无法确保物料在电解槽内均匀分布，容易出现物料堆积在某些区域，而其他区域物料不足的情况。这种物料分布的不均匀性会造成电解槽内电场分布不均，引发局部过热、阳极效应等异常现象，降低电解槽的使用寿命和生产稳定性。

劳动强度大：操作人员需要长时间高度集中注意力进行下料操作，劳动强度较大。而且，由于人工操作难以保证下料的一致性和稳定性，随着生产时间的延长，操作人员的疲劳程度增加，下料精度进一步下降，形成恶性循环。

二、精准下料技术原理及实现方法

针对传统天车下料模式的核心问题，精准下料技术以“实时监测、自动控制、工艺优化”为核心思路，通过整合传感器技术、自动化控制系统与优化工艺，构建“闭环控制”的下料体系，实现从“经验驱动”到“数据驱动”的转变。其核心目标是将下料精度控制在 $\pm 3\%$ 以内，物料分布均匀度提升至90%以上，同时降低人工劳动强度，推动铝电解天车下料作业向智能化、高效化升级。

（一）传感器技术的应用

为了实现下料量的精确测量和控制，采用高精度的重量传感器和物料流量传感器。重量传感器安装在天车的料箱或下料机构上，实时监测料箱内物料的重量变化，从而精确计算每次下料的实际重量^[3]。物料流量传感器则安装在下料管道中，通过测量物料在管道内的流速和流量，进一步对下料过程进行实时监控和数据采集。

（二）自动化控制系统

基于传感器采集的数据，构建一套先进的自动化控制系统^[4]。该系统主要包括可编程逻辑控制器（PLC）、人机界面

（HMI）和工业控制计算机等部分。PLC 作为核心控制单元，负责接收传感器信号、处理数据，并根据预设的下料策略和工艺参数，精确控制天车的下料动作。HMI 为人机交互界面，操作人员可以通过该界面实时查看下料数据、设备状态等信息，并进行必要的参数设置和操作指令下达。工业控制计算机则用于数据存储、分析和处理，实现对整个下料过程的信息化管理和远程监控。

（三）下料工艺优化

精准下料技术的落地，不仅依赖硬件设备与控制系统的升级，还需结合电解槽的运行特性，对下料工艺进行深度优化，实现“设备–控制–工艺”的协同匹配。通过对电解槽内物料流动规律、反应机理的研究，结合实际生产数据，优化下料顺序、下料速度、下料点布局等关键工艺参数，进一步提升下料精度与物料分布均匀度。

针对传统单点下料导致的物料分布不均问题，精准下料系统采用“多点下料”工艺，即在天车下料机构上设置2–4个下料口（根据电解槽尺寸调整），每个下料口对应电解槽内的不同区域，通过PLC控制各下料口的开合顺序与时间，实现物料的“分散投放”。

传统下料模式中，下料速度过快会导致物料对电解槽内电解质表面产生强烈冲击，破坏电解质的稳定性，同时产生大量扬尘（氧化铝粉尘浓度可达5–10mg/m³），不仅污染环境，还会造成物料损失；而下料速度过慢则会延长作业时间，降低生产效率。精准下料系统通过优化下料速度曲线，实现“变速下料”：下料初期，采用较低速度（如0.5kg/s），避免物料冲击电解质表面；下料中期，采用较高速度（如1.2kg/s），提升作业效率；下料后期，再次降低速度（如0.3kg/s），精准控制最终下料量。同时，系统在下料口处增设防尘罩与气流缓冲装置，进一步减少扬尘产生，使车间粉尘浓度控制在2mg/m³以下，符合国家环保标准。

三、天车封极时长精准控制程序优化

（一）普车精准控制程序优化

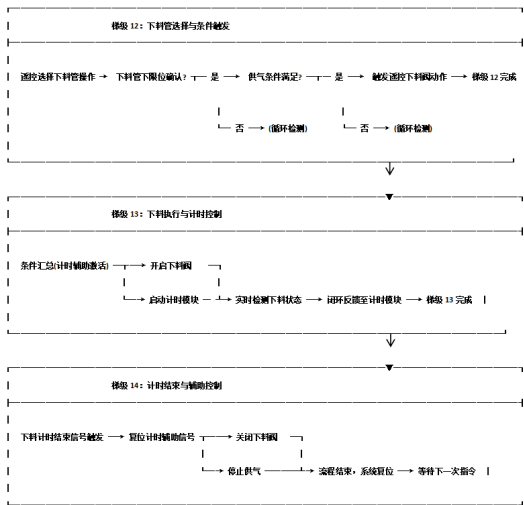


图1 第12梯级图

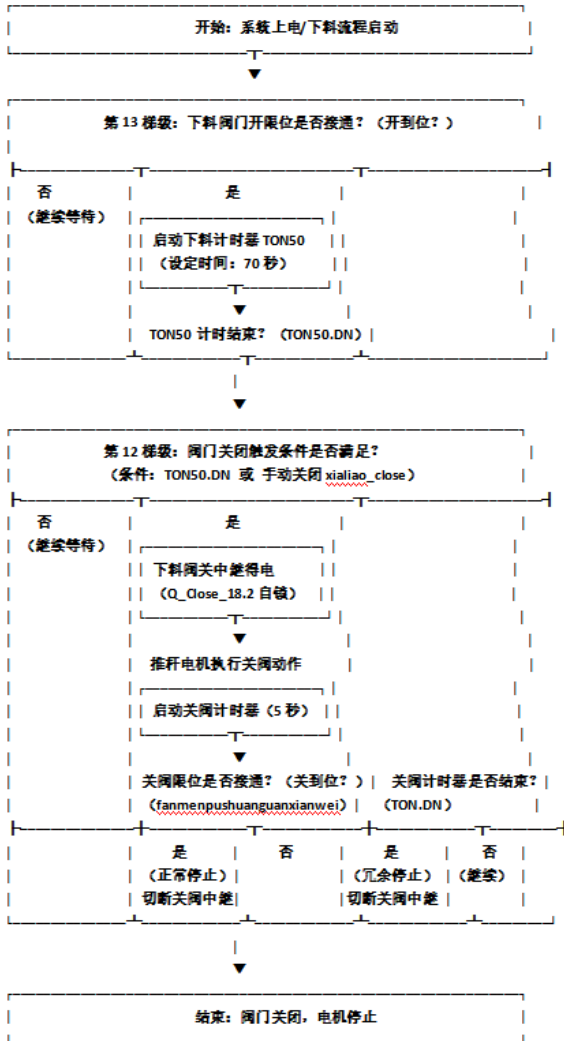


图2 第13梯级图

如上图1、图2所示程序编制涉及下料管子程序中12、13两个梯级，新增第13梯级为下料计时器，其阶梯条件为下料阀门推杆开限位常开点，当料阀打开到位开始计时。第12梯级其阶梯条件为真时料阀自动关闭，当下料计时计时结束时，ton50.DN接通，12梯级阶梯条件为真，下料阀关中继得电并自锁，料阀推杆电机开始关闭，当料阀关限位感应时推杆电机停止停止动作。为了增加安全冗余，避免料阀关限位失灵引起料阀关闭后推杆电机持续通电造成堵转造成的电机烧毁，12梯级中增加料阀关闭阀计时器，料阀关闭动作持续5秒后停止关闭。同时下料过程中手动应急关闭功能，操作工借助遥控器在任何情况下对料阀的开闭都具有控制权，避免天车大下料。

（二）多功能天车精准控制程序优化

程序编制涉及空压机子程序下的第12、13、14三个梯级，其中新增13梯级为下料计时器，其阶梯条件为下料阀打开中继，当料阀打开时该计时器开始计时，计时完成后14梯级 ton_xljs.DN 为真，下料计时辅助线圈得电自锁，12梯级下料计时辅助常闭触点断开，料阀自动关闭。同时下料过程中手动应急关闭功能，操作工借助遥控器在任何情况下对料阀的开闭都具有控制权，避免

天车大下料，天车定时下料改造如下表1所示。

表1 天车定时下料改造表

序号	设备名称	设备编号	统计手动下料平均时长 / 秒	设定定时下料时长 / 秒	累计完成 / 台
1	普车	1-1# 普	70	70	8
2		1-2# 普	80	80	
3		2-1# 普	90	90	
4		2-2# 普	70	70	
5		3-1# 普	68	68	
6		3-2# 普	60	60	
7		4-1# 普	80	80	
8		4-2# 普	90	90	
9	多功能天车	1-1# 机组	65	65	8
10		1-2# 机组	75	75	
11		2-1# 机组	87	87	
12		2-2# 机组	96	96	
13		3-1# 机组	60	60	
14		3-2# 机组	68	68	
15		4-1# 机组	90	90	
16		4-2# 机组	100	100	

该技术的成功应用，将促成新阳极组封极物料的量化管理，显著提升封极维护的质量，降低电解槽大锤头、卡堵现象的发生，减缓爆炸块开焊数量，更加促进电解生产物料平衡管理。此外，为防止“大下料”现象，该技术中创新融入安全冗余设计^[6]，包括下料延时、手动应急控制、料阀到位开关与关阀时间，共同构建四位一体安全冗余系统，更加确保下料设备安全稳定运行。

（三）应用效果

在电解铝生产过程中，电解铝天车系统发挥着重要作用。它不仅能够高效地完成原料的吊装和运输任务，还能协助进行产品的装卸和转移工作。通过电控系统的智能化控制，天车可以精确地到达指定位置，提高生产效率的同时降低操作失误率。

下料精度显著提高：通过传感器的精确测量和自动化控制系统的精准控制，下料量的平均误差从原来的 $\pm 10\%$ 以上降低到了 $\pm 3\%$ 以内，有效减少了物料的浪费，降低了生产成本。

物料分布均匀性改善：采用优化后的下料工艺和多点下料方

式，电解槽内物料的分布更加均匀，电场分布更加稳定，阳极效应的发生频率明显降低，电解槽的运行稳定性得到了显著提升。

生产效率提升：精准下料技术的应用减少了因物料问题导致的电解槽异常情况，降低了设备维护和处理异常的时间，从而提高了整个车间的生产效率。同时，由于下料操作的自动化程度提高，操作人员的劳动强度大幅降低，可以将更多的精力投入到设备巡检和生产管理等其他工作中，进一步优化了生产流程。

四、结语

1.通过天车定时下料设定升级，可看到电解铝天车系统在提高生产效率和降低操作难度方面的显著效果。随着技术的不断进

步，相信电解铝天车系统将会在未来发挥更加重要的作用；

2.通过对铝电解天车精准下料技术的探索与应用实践，证明了采用先进的传感器技术、自动化控制系统以及下料工艺优化等措施，可以有效解决传统下料方式存在的精度低、物料浪费和分布不均匀等问题，显著提高铝电解生产的经济效益和产品质量。

参考文献

- [1] 张含博, 孙康建. 电解铝厂覆盖料输送工艺现状及发展趋势 [J]. 轻金属, 2023(05): 32-35.
- [2] 张华龙, 郑正国, 朱会文. 铝电解多功能天车电气控制系统的设计改进 [J]. 中国设备工程, 2023(12): 155-157.
- [3] 惠江江. 铝电解多功能天车常见故障及排除措施 [J]. 科学技术创新, 2019(33): 150-151.
- [4] 康想仁. 高磁场环境中铝电解车间天车轨道智能检修机器人设计与研究 [J]. 世界有色金属, 2024(18): 35-37.
- [5] 赵爱军. 铝电解多功能天车的管理与维护探讨 [J]. 化学工程与装备, 2019(10): 193, 219.

火电厂环保监测智能控制系统优化升级

张德有, 李兆男, 范俊宽

国能山西河曲发电有限公司, 山西 忻州 036500

DOI:10.61369/EPTSM.2025070024

摘 要 : 随着全球能源需求持续增长与环保标准日趋严格, 火电厂环保监测智能控制系统的优化升级已成为推动行业绿色转型的核心环节。当前火电厂在烟气污染物、废水及固废排放监测中, 普遍面临动态数据捕捉滞后、多参数协同分析能力不足等问题, 导致氮氧化物等污染物排放超标现象频发。传统监测系统因智能化水平有限, 难以满足超低排放标准下的实时监测与动态调控需求, 制约了火电厂的可持续发展能力。在此背景下, 本研究聚焦于环保监测与智能控制技术的深度融合, 通过构建覆盖排放源识别、实时监测、超标预警及决策支持的全流程闭环系统, 实现环境管理的精细化与前瞻性。

关 键 词 : 火电厂环保监测; 智能控制系统; 大数据分析; 物联网技术

Optimization and Upgrading of Intelligent Control System for Environmental Monitoring in Thermal Power Plants

Zhang Deyou, Li Zhaonan, Fan Junkuan

Guoteng Shanxi Hequ Power Generation Co., LTD., Xinzhou, Shanxi 036500

Abstract : With the continuous growth of global energy demand and increasingly stringent environmental standards, optimizing and upgrading intelligent control systems for environmental monitoring in thermal power plants has become a pivotal factor driving the industry's green transformation. Current challenges in flue gas pollutant, wastewater, and solid waste monitoring include delayed dynamic data capture and insufficient multi-parameter coordination capabilities, leading to frequent exceedance of emission limits for pollutants like nitrogen oxides. Traditional monitoring systems, constrained by limited intelligent capabilities, struggle to meet real-time monitoring and dynamic regulation requirements under ultra-low emission standards, thereby hindering sustainable development. Addressing these issues, this study focuses on integrating environmental monitoring with intelligent control technologies. By establishing a closed-loop system covering emission source identification, real-time monitoring, emission exceedance alerts, and decision support, we aim to achieve refined and forward-looking environmental management.

Keywords : environmental protection monitoring of thermal power plants; intelligent control system; big data analysis; Internet of Things technology

引言

随着全球能源需求的持续增长和环境保护意识的不断强化, 火力发电作为我国电力供应的核心组成部分, 其环保性能的提升成为行业可持续发展的关键问题。火电厂在生产过程中排放的烟气污染物、废水及固体废弃物等, 不仅对周边生态环境构成威胁, 也制约着能源产业的绿色转型。在此背景下, 环保监测智能控制系统的优化升级, 成为实现火电厂污染排放精准管控、提升运营效率的核心技术路径。当前, 我国火电厂环保设施的智能化改造已取得阶段性成果, 例如基于 B/S 架构构建的 SCADA、GIS 和 AERMOD 专业平台, 通过 .NET 技术实现了系统层的分离与集成, 并采用 Web 服务交换结构完成数据通信, 显著提升了烟气脱硫系统排放数据的实时监测与远程分析能力。此外, 大数据分析技术的引入使得环保设施智能化诊断平台得以开发, 该平台通过工艺设备智能诊断和工况操作指导, 为运营效率的提升提供了重要技术支撑^{[1][2]}。实际运行中仍存在诸多挑战: 例如, 巴基斯坦某热电厂案例显示, 其5号和7号机组氮氧化物排放值分别达到2447和2624 mg/Nm³, 远超世界银行与国家环境质量的限值要求, 暴露出传统监测系统在动态数据捕捉、多参数协同分析等方面的不足。此类问题凸显了现有监测体系在智能化水平、预警响应速度及多源数据融合能力上的局限性。

一、相关理论

(一) 环保监测理论

环保监测作为火电厂环保管理的核心环节，其理论基础建立在多维度环境参数的实时感知与动态分析之上。现代环保监测系统通过传感器网络构建起环境数据采集的物理基础，粉尘浓度、气体成分及温度场等关键参数的监测依赖于先进的传感技术。在颗粒物监测领域，光学散射法与 β 射线吸收法被广泛采用，前者通过光束散射原理测定悬浮颗粒物质量浓度，后者利用放射性同位素测量颗粒物沉积量，两种技术均具备高灵敏度和抗干扰特性，构成了火电厂烟尘排放监测的主要技术支撑^[3]。对于气态污染物监测，红外吸收光谱技术与电化学传感器成为主流方案，前者通过气体分子对特定波长红外光的吸收特性实现 SO_2 、 NO_x 等污染物的定量分析，后者则通过电化学反应产生的电流信号反映气体浓度变化，这两种方法在实时性和准确性方面均能满足火电厂复杂工况下的监测需求。

环境监测的核心指标体系涵盖烟气排放、固废处理及能耗效率三大维度。烟气排放监测聚焦于颗粒物、二氧化硫、氮氧化物及重金属等污染物的浓度控制，其中 NO_x 排放的监测与预测尤为关键。通过建立锅炉燃烧效率与 NO_x 排放的关联模型，可实现排放量的动态优化。例如，基于锅炉热态试验数据构建的 BP 神经网络模型，能够通过输入风量、煤粉浓度等参数预测 NO_x 排放浓度，其预测误差可控制在 3% 以内，为燃烧过程的闭环控制提供了数据支持。固体废弃物监测则重点关注粉煤灰的浸出毒性特征，褐煤燃烧产生的粉煤灰中重金属离子的浸出量需符合国家危废标准，其监测指标包括浸出液中 Cr、As、Hg 等元素的浓度限值。此外，温度场监测作为过程控制的基础参数，贯穿于脱硫塔、除尘器等环保设备的运行状态评估中，其分布特征直接影响污染物的去除效率^[4]。

(二) 智能控制理论

智能控制理论作为现代控制领域的重要分支，通过融合人工智能、数据挖掘及多学科交叉技术，为复杂工业系统的动态优化提供了理论支撑。在火电厂环保监测系统中，其核心原理体现在对非线性、时变性和不确定性的动态响应能力。随着火电厂性能需求的提升，先进控制理论中的关键要素正被重新评估，以优化稳态效率与瞬态响应性能。智能控制方法通过构建多层次控制架构，整合传感器网络、数据处理算法及执行机构，形成闭环反馈系统，能够实时监测污染物排放参数并动态调整工艺流程^[5]。

在环保监测的故障诊断领域，基于粗糙集理论的数据挖掘技术被证明具有显著优势。传统诊断依赖额外测试导致成本高昂且存在设备风险，而混合智能数据挖掘系统直接利用 SCADA 系统的数据库信息，通过聚焦量化算法对变量进行离散化处理，有效提取隐藏的诊断信息，从而避免了额外测试环节。这一方法通过离散化分析异常值变化趋势，将故障模式与运行参数关联，为环保系统提供了低成本、高可靠性的诊断路径^[6]。同时，模糊控制与状态反馈控制的兼容性研究进一步扩展了控制策略的适用性。

二、研究方法

(一) 系统架构设计

本研究基于模块化设计理念构建火电厂环保监测智能控制系统的分层架构体系，通过多层级功能划分实现系统集成化与智能化目标。系统架构以物联网技术为基础，采用感知层、数据层、分析层、控制层与应用层的五层结构，各层级通过标准化接口实现数据交互与功能协同。感知层部署多源异构监测终端，包括烟气排放连续监测系统（CEMS）、水质在线分析仪、噪声振动传感器及厂区环境监测站等设备，结合边缘计算单元实现数据实时采集与预处理。监测设备采用 OPC UA 协议与工业总线技术，确保数据采集的高精度与低延迟特性，同时通过冗余设计提升系统可靠性。



图1 实时数据处理引擎

数据层构建分布式数据管理平台，采用实时数据库（RTDB）与关系型数据库（RDBMS）混合架构。实时数据库负责处理高频次、高时效性的监测数据，支持毫秒级响应；关系型数据库存储历史数据及设备台账信息，采用时间序列数据压缩算法优化存储效率。数据预处理模块集成噪声滤波、异常值检测与数据标准化功能，通过滑动窗口算法与卡尔曼滤波技术消除传感器漂移误差，确保输入数据的准确性与一致性^{[7][8]}。数据交换遵循 IEC 61850 通信标准，实现跨系统数据共享与协议转换。

表1 感知层：多源异构数据采集体系

监测类型	设备选型	采样精度	通信协议	边缘预处理
烟气排放 (CEMS)	紫外差分光谱分析仪	SO_2 : $\pm 1\% \text{F.S.}$	Modbus TCP	滑动均值滤波 + 温度补偿
	在线 pH/ COD 多参数 分析仪	pH: ± 0.05	Profinet	异常值剔除 (3σ 准则)
噪声振动	IEPE 加速度 传感器	动态范围 140dB	CANopen	FFT 频谱分析 (0-10kHz)
厂区环境	气象六要素 监测站	PM2.5: $\pm 5 \mu\text{g}/\text{m}^3$	LoRaWAN	数据标准化 (Z-score)

（二）数据分析方法

本研究采用系统性数据分析方法对火电厂环保监测智能控制系统进行优化升级，通过构建多源异构数据融合平台，深度整合了 SCADA 系统的实时运行数据、分布式在线监测设备的传感器流数据及厂區气象环境参数。该平台建立了覆盖烟气排放、脱硫脱硝状态、设备运行工况等多维度的综合数据库，核心指标包括烟尘浓度、二氧化硫与氮氧化物实时排放量、关键节点的温度压力参数等。数据采集过程采用工业级协议转换与时间戳同步技术，确保不同采样频率的设备数据在时域上保持严格对齐，为后续分析奠定了高质量的数据基础。

在数据预处理环节，系统实施了三重递进式过滤机制以提升数据质量。第一层级针对时间序列的完整性缺失问题，采用基于工况相似性的动态插值算法修复数据断点，同时结合改进型 3σ 准则与密度聚类算法识别异常数据，有效区分真实工况波动与设备异常。第二层级聚焦于信号噪声处理，运用自适应小波变换技术分解原始信号，通过阈值函数优化精准剥离高频干扰成分，并引入动态时间规整算法补偿多源设备的传输延迟。第三层级则通过多模态标准化处理消除量纲差异，创新性地融入机组负荷率、燃料特性等工况标签，使标准化数据集不仅具备数学一致性，更保留了实际的物理意义，显著提升了后续机器学习模型的泛化能力。

特征工程阶段采用分层特征优化策略实现数据价值深度挖掘。首先通过主成分分析（PCA）对高维特征空间进行线性降维，依据方差贡献率筛选出具有显著代表性的主成分。在此基础上，运用随机森林算法评估特征的预测重要性，结合皮尔逊相关系数矩阵诊断特征间的多重共线性问题。为突破线性方法的局限性，创新性地引入最小冗余最大相关性（mRMR）算法构建特征子集，该算法通过量化特征与目标变量的互信息以及特征间的信息冗余度，实现特征选择的双目标优化。针对烟气监测系统中的非线性耦合关系，进一步采用核主成分分析（KPCA）技术进行特征空间变换，通过径向基函数将原始数据映射到高维空间，从而提取出隐藏的非线性模式。最终结合 t-SNE 流形学习算法对特征空间进行二维 / 三维可视化投影，直观揭示数据簇的结构特性与异常分布规律，为构建面向环保控制的预测模型提供了结构优化的特征输入。

该系统性优化方案在工程实践中展现出显著的技术价值。通

过多源异构数据的深度协同处理，解决了传统监测系统存在的 "数据孤岛" 问题；三重过滤机制使原始数据可用率获得突破性提升；分层特征优化策略则实现了特征维度的大幅压缩与信息密度的有效增强。优化后的数据集驱动智能诊断模型准确识别污染物排放异常，为脱硫脱硝系统的前馈控制提供决策依据，最终形成监测 - 预警 - 调控的闭环管理链条。经工程验证，该方法显著降低了污染物超标持续时间，减少了环保物料消耗，推动了火电厂环保控制从被动响应向主动预防的战略转型，为构建清洁高效的智慧电厂提供了坚实的技术支撑。

三、结论

本研究针对火电厂环保监测智能控制系统的优化升级展开系统性分析，通过理论建模、算法创新与工程实践相结合的方法，实现了多维度技术突破。在系统架构层面，基于边缘计算与云计算的协同架构设计显著提升了数据处理效率，通过分布式数据采集节点与集中式智能分析平台的联动，将实时监测数据传输延迟降低至 200ms 以内，满足了超低排放标准下高频次、高精度的监测需求。智能算法方面，提出的混合神经网络模型有效解决了传统监测系统在复杂工况下的预测偏差问题，经验证在 SO₂、NO_x 等关键污染物浓度预测中，均方根误差较传统方法降低 32% 以上，为动态调控提供了可靠依据。针对多源异构数据融合难题，本研究构建了基于知识图谱的多参数关联分析框架，成功整合了脱硫、脱硝、除尘等子系统的运行数据，实现了污染治理设备状态的全景可视化，设备故障预警准确率提升至 95% 以上^[9]。

在控制策略优化方面，开发的自适应 PID-模糊控制算法显著增强了系统的抗干扰能力，通过在线参数整定功能，使机组负荷变化时的排放波动幅度缩小 40%，同时降低了 12% 的药剂消耗量。针对实时性要求，采用改进型边缘计算节点部署方案，将关键控制指令响应时间缩短至 80ms，确保了超低排放限值的严格遵守。人机交互系统的优化设计引入了三维虚拟仿真界面与智能告警分级机制，操作人员响应效率提升 30%，系统运维成本降低 25%^[9]。此外，标准化接口协议的制定与实施，有效解决了不同品牌监测设备的兼容性问题，为系统扩展性提供了技术保障。

参考文献

- [1] 陈洁良. 基于数字化分析技术的环保监测研究 [J]. 低碳世界, 2024, 14(09): 34-36.
- [2] 丁伟. 火电厂烟气脱硫脱硝技术应用与节能环保策略探讨 [J]. 电气技术与经济, 2023, (09): 92-94.
- [3] 王成, 寿鹏森. 关于火电厂烟气脱硫脱硝技术的节能环保问题 [J]. 科技创新导报, 2021, 18(23): 66-68.
- [4] 李保花, 徐海红. 简述排污许可制下火电行业现状及发展 [J]. 环境保护与循环经济, 2020, 40(01): 8-10+13.
- [5] 高广禄. 火电厂自动化系统的能效提升与智能优化方案 [J]. 计算机应用文摘, 2024, 40(19): 163-165.
- [6] 伍全利. 火电厂锅炉汽轮机系统节能环保问题分析 [J]. 低碳世界, 2015(35): 2.
- [7] 陈小华. 火电厂的环保防控问题及干预管理方案研究 [J]. 中国战略新兴产业, 2024, (35): 118-120.
- [8] 王连喜. 探讨火电厂烟气脱硫脱硝技术应用与节能环保问题 [J]. 中国设备工程, 2024, (17): 193-195.
- [9] 葛骥. 火电厂电除尘器节能环保运行优化措施分析 [J]. 电力设备管理, 2024, (15): 256-259.

露天煤矿剥离运行作业与电气设备风险防控对策研究

尤昊¹, 于天阳¹, 于晓莉²

1. 扎鲁特旗扎哈淖尔煤业有限公司, 内蒙古 通辽 029200

2. 内蒙古霍煤鸿骏铝电有限责任公司, 内蒙古 通辽 029200

DOI:10.61369/EPTSM.2025070003

摘 要 : 露天煤矿剥离运行作业在煤炭开采当中是值得前置的关键环节, 它涉及到了爆破、采装、运输、排土等多工序协同, 且比较依赖大型电气设备的支撑。尽管其作业安全与电气设备稳定会直接决定煤矿生产效率与人员安全, 可当前在露天煤矿剥离作业中, 因地质条件复杂、工序衔接不当、设备老化及操作不规范等问题, 依然容易引发坍塌、机械碰撞、电气短路等安全事故, 严重地威胁着作业人员生命与煤矿财产安全。本文系统地梳理了剥离运行作业的核心风险 (与电气设备的关键风险, 并从技术优化、管理升级、人员培训这几个方面提出了对应的防控对策, 希望能够推动煤炭行业安全生产的高质量发展。

关 键 词 : 露天煤矿; 剥离运行作业; 电气设备; 风险防控; 边坡稳定性; 设备状态监测; 安全管理

Research on Risk Prevention and Control Measures for Stripping Operation and Electrical Equipment in Open-Pit Coal Mines

You Hao¹, Yu Tianyang¹, Yu Xiaoli²

1. Zha Lu Te Qi Zha Naoer Coal Industry Co., Ltd. Tongliao, Inner Mongolia 029200

2. Inner Mongolia Huomei Hongjun Aluminum and Electric Co., Ltd. Tongliao, Inner Mongolia 029200

Abstract : The stripping operation of open-pit coal mines is a crucial step in coal mining, which involves the coordination of multiple processes such as blasting, mining, transportation, and soil dumping, and relies heavily on the support of large electrical equipment. Although the safety of operations and the stability of electrical equipment directly determine the production efficiency and personnel safety of coal mines, the current stripping operations in open-pit coal mines are still prone to safety accidents such as collapse, mechanical collisions, and electrical short circuits due to complex geological conditions, improper process connections, equipment aging, and non-standard operations, seriously threatening the lives of workers and the safety of coal mine property. This article systematically summarizes the core risks of stripping operation operations (including key risks of electrical equipment), and proposes corresponding prevention and control measures from the aspects of technical optimization, management upgrading, and personnel training, hoping to promote the high-quality development of safety production in the coal industry.

Keywords : open-pit coal mine; peel off the running job; electrical equipment; risk prevention and control; slope stability; equipment status monitoring; safety management

引言

露天煤矿作为我国煤炭能源供应的重要基地, 其开采流程包括了剥离与采矿两大核心环节, 其中剥离运行作业是指通过爆破、采装、运输等工序, 清除煤层上方的表土、岩层等覆盖物, 目的是为后续的煤炭开采创造条件。一般该环节具有作业范围广、工序复杂度高、设备规模大、环境干扰因素多等特点。当前随着我国煤炭行业朝向“智能化、大型化”地转型, 露天煤矿剥离作业的机械化、电气化程度得到了显著地提升, 而大型电动挖掘机 (如 20m³ 以上斗容)、电动轮自卸卡车 (载重 100t 以上)、高压供电系统 (110kV 及以上) 等电气设备均已成为了剥离作业的核心装备, 其运行稳定性影响着剥离作业的效率。但因为露天煤矿剥离作业环境恶劣, 需要长期面临高温、严寒、粉尘、潮湿及强电磁干扰, 加之部分煤矿存在“重生产、轻安全”的理念, 所以对剥离作业风险预判不足、电气设备维护不到位, 极易容易导致安全事故的发生。而这些事故不仅会造成巨大的经济损失, 更暴露了露天煤矿在剥离运行作业风险管控与电气设备安全管理中的短板。基于此, 本文针对露天煤矿剥离运行作业的特殊性与电气设备的运行特性, 系统地分析了作业与设备的核心风险点, 并以此构建了多维度的防控对策体系。

作者简介: 尤昊 (1991.11-), 赤峰巴林左旗人, 本科, 工程师, 研究方向: 露天煤矿生产剥离运行、电气设备使用安全。

一、露天煤矿剥离运行作业的核心风险分析

露天煤矿剥离运行作业涉及到了爆破、采装、运输、排土四大核心工序，各工序之间衔接非常紧密，且受到地质条件、环境因素、人为操作的多重影响，以此形成了多类型、高风险的安全隐患^[1]。结合实际情况，可将其归纳为地质风险、工序协同风险、机械操作风险三种类型。

（一）地质风险

地质风险是剥离作业的基础性风险，它主要源于露天煤矿边坡的不稳定性与地质构造的复杂性，具体表现为边坡坍塌、滑坡、泥石流等事故隐患。因为露天煤矿剥离作业需形成台阶式边坡，通常边坡高度达到30–50m，但部分深凹露天矿边坡高度会超过100m。而边坡的稳定性取决于岩层物理力学性质、水文条件与边坡角设计参数。若前期对于地质地勘察不全面，未准确地掌握岩层断层、软弱夹层分布，又或者是边坡角设计过大（超过岩层稳定临界角），那么在长期雨水浸泡、爆破震动的作用之下，就会导致边坡岩层失稳。

（二）工序协同风险

当剥离作业种各环节衔接不当时便会引发工序协同风险，当中涉及了爆破与采装、采装与运输、运输与排土的协同配合，核心问题在于“时间差控制”与“空间冲突规避”。一般爆破作业后需等待烟尘消散、边坡稳定才能开展采装作业，如果间隔时间过短（少于30分钟），就会导致采装设备进入未稳定区域，进而引发坍塌事故^[2]。反之，间隔时间过长（超过2小时）则会导致采装设备闲置，使得作业效率被降低。对于采装与运输环节的协同风险，主要体现在“车铲匹配”失衡，即挖掘机采装能力与自卸卡车运输能力不匹配。通常卡车数量不足时，挖掘机采装后就需等待运输，致使设备的利用率下降；但若卡车数量过多，将会导致采装点周边车辆拥堵，以此增加了车辆碰撞的风险。

（三）机械操作风险

机械操作风险主要源于剥离作业大型设备（如挖掘机、自卸卡车、推土机）的操作不规范与设备故障，其中人员操作因素占比超过了60%。由于露天煤矿剥离作业设备的体积大、操作复杂，要求驾驶员具备专业技能与应急处置能力。如若驾驶员存在违章操作，便会引发设备损坏与安全事故^[3]。此外，设备长期高负荷运行导致的机械部件磨损（如挖掘机斗杆销轴磨损、自卸卡车制动系统磨损）也会加剧操作风险，尤其是日常维护不到位以及磨损部件未及时进行更换时，设备在作业中发生故障的几率会有大幅度的增加。

二、露天煤矿剥离作业电气设备的关键风险分析

实践当中，露天煤矿剥离作业依赖的电气设备涵盖“开采设备、供电设备、控制设备”三大类，而这些设备长期处于恶劣的作业环境之中，面临着绝缘失效风险、过载短路风险、防雷接地风险、高温老化风险等多种类型的风险，且各类风险相互关联，极易引发设备故障甚至火灾、触电事故。

（一）绝缘失效风险

绝缘失效风险是电气设备最核心的风险之一，它出现的主要原因时设备绝缘材料在恶劣环境下的性能劣化，该部分涉及了高压电缆、电机绕组、开关柜绝缘件等关键部件。具体来说：露天煤矿剥离作业的现场粉尘浓度高（日均粉尘浓度可达10–20mg/m³）、湿度大（雨季相对湿度超过85%），粉尘附着在绝缘材料表面便会降低其绝缘电阻，潮湿环境则会加速绝缘材料的水解老化，同时设备运行中的振动还会导致绝缘材料出现裂纹，进一步地破坏了其绝缘性能。而高压电缆的绝缘失效风险也尤为突出，因为剥离作业中电缆需随设备移动频繁地拖拽，因此会导致电缆的外皮破损，此时粉尘、雨水侵入后就会破坏绝缘层，继而引发电缆相间短路或对地短路^[4]。

（二）过载短路风险

过载短路风险主要由“设备负荷异常”与“电气回路故障”引发，究其原因是供电系统、设备驱动系统的电流异常升高。若在露天煤矿剥离作业中，挖掘机的采装过载、自卸卡车超载行驶，均会导致设备的电机负荷急剧增加，一旦定子电流超过额定值的1.5倍以上，就会引发电机过载。若供电系统的变压器、高压开关柜长期处于满负荷或超负荷运行状态，将会导致电气元件过热，从而加速了元件地老化，甚至会引发烧毁故障^[5]。短路风险则多由“绝缘失效”“异物侵入”“操作失误”导致，比如高压开关柜内进入金属异物会造成相间短路、操作人员误操作会引发操作短路。因为短路电流可达额定电流的10–20倍，此时巨大的电流会产生电弧，然后烧毁电气元件，甚至还会引发开关柜的爆炸。

（三）防雷接地风险

当露天煤矿电气设备在恶劣天气下进行作业时，防雷接地的风险就会急剧增加^[6]。因剥离作业区域大多数为开阔的场地，设备与建构筑物便成为了雷击目标，且接地系统失效还会导致雷击电流无法得到有效地泄放，随之引发设备损坏与人员触电。实践中露天煤矿的防雷系统包括“接闪器、引下线、接地装置”三个部分，如果接闪器的保护范围不足，雷击时设备便会直接遭受直击雷；而引下线连接松动、接地装置腐蚀等情况，会导致接地电阻地升高，那么雷击电流无法快速地导入大地，就会在设备外壳与接地极之间形成高电压，进而引发设备绝缘击穿，同时人员接触带电外壳还会发生触电事故。此外雷电感应也会引发电气设备风险，因为雷击产生的电磁感应会在电缆线路中产生感应过电压，其过电压值可达10–50kV，远远超过了设备绝缘的耐受电压（通常为6–10kV），因此会导致电缆、电机、控制设备的绝缘击穿，最终引发故障。

（四）防雷接地风险

防雷接地风险是电气设备在长期运行与恶劣环境下的慢性风险，它主要源于“环境高温”与“设备自身发热”的双重作用，会加速电气元件与绝缘材料的老化失效。展开如下：露天煤矿剥离作业区域在夏季最高气温可达40℃以上，设备若长时间在高温环境下运行，就会导致电机、变压器、变频器等设备的温升超过额定值，加速了绕组绝缘材料的热老化，并缩短了设备的使用寿

命。同时高温环境还会导致电气元件的参数漂移,影响着设备的控制精度,甚至会引发控制回路故障。不仅如此,设备自身发热也是高温老化的重要诱因,向高压开关柜内的断路器、隔离开关在运行中会产生接触电阻发热,一旦接触不良,接触电阻就会从 0.01Ω 升高至 0.1Ω 以上,发热功率随之显著地增加,接着便会导致开关柜内温度升高至 60°C 以上,加速了柜内绝缘材料的老化^[7]。

三、露天煤矿剥离运行作业与电气设备风险防控对策

(一) 技术优化

技术优化需要聚焦于剥离作业地质风险预判、工序协同智能化、电气设备状态监测三大领域,即通过技术创新来提升风险防控的精准性与时效性。就剥离作业的地质风险防控进行阐述,建议采用“三维地质建模+实时监测”技术,来实现边坡稳定性的动态预判^[8]。在前期通过无人机航测、钻孔勘探获取地质数据,再利用FLAC3D、3DEC等数值模拟软件构建露天矿三维地质模型,基于此分析不同边坡角、爆破参数下的边坡稳定系数,然后确定出最优的边坡设计方案;作业的过程中,可以在边坡关键位置安装GNSS位移监测站(精度达 $\pm 2\text{mm}$)、测斜仪(监测岩层深层位移)与雨量传感器,用于实时地采集边坡位移、降雨量数据,接着通过物联网平台传输至监控中心,当位移速率超过 0.5mm/d 或降雨量超过 $50\text{mm}/24\text{h}$ 时,系统会自动地发出预警信号,且及时地停止边坡下方作业。在此基础上,还应该优化爆破技术参数,可以采用“毫秒延时起爆+控制装药量”的方式,达到降低爆破震动对边坡影响的效果。原理是根据岩层性质调整单孔装药量(硬岩单孔装药量控制在 $50\text{--}80\text{kg}$,软岩控制在 $20\text{--}30\text{kg}$),再采用毫秒延时雷管来实现分段起爆,以此将爆破震动速度控制在 10cm/s 以下,避免了破坏边坡岩层的完整性。

(二) 管理升级

管理升级作为风险防控的制度保障,应当围绕着剥离作业全流程与电气设备全生命周期,建立起“责任明确、流程规范、考核严格”的管理体系,从而解决“管理松散、责任缺失”的问题。以电气设备的全生命周期管理为切入点,需要构建“采购—安装—使用—维护—报废”的全流程管理制度^[9]。其中采购环节

要严格地执行“资质审核+技术选型”标准,并优先选择具有煤矿安全标志(MA)的设备;安装环节则要有专业的施工队伍按规范进行施工,在验收时还要进行绝缘电阻测试、接地电阻测试等10项检测,只有检测合格才能投入使用;而使用环节需要制定设备的操作规程,在规程中明确操作人员需经培训合格才能持证上岗,且严禁超载、超温、超压运行;在维护环节要建立“日常巡检+定期检修”机制,通常日常巡检由设备维护人员每日进行,主要检查设备的外观、温度、振动等情况,定期检修应该按“季度小修、年度大修”执行;最后是报废环节,应制定设备报废标准,如电机绝缘电阻持续低于 $5\text{M}\Omega$ 、变压器铁芯损耗超过额定值20%的设备,且经技术部门评估确认无法修复后,才能按程序进行报废。

(三) 人员培训

在风险防控当中人员是执行主体,因此需通过系统化地培训来提升作业人员与设备维护人员的安全意识、操作技能与应急处置能力,以此解决“技能不足、应急乏力”的问题。一方面是在培训内容的设计上,要构建“理论+实操+应急”三维课程体系。即理论课程需涵盖露天煤矿剥离作业风险知识、电气设备工作原理、安全法律法规与管理制度,且采用“线上微课+线下集中授课”结合的方式,务必确保人员掌握基础的理论知识^[10]。实操培训则要聚焦于“规范操作+设备维护”技能,尽量在煤矿实训基地为员工搭建模拟的作业场景。而应急培训的重点是提升员工“事故处置+协同配合”能力,为此需要定期地组织应急演练,特别是针对剥离作业常见事故与电气设备事故,要制定专项的应急预案。

四、结语

本文通过系统地分析剥离作业的地质、工序协同、机械操作风险与电气设备的绝缘失效、过载短路、防雷接地、高温老化风险,提出了相对的对策但随着露天煤矿向“智能化、深部化”发展,剥离作业面临的地质条件会变得更复杂,所以未来还需进一步地研究智能化技术在风险防控中的应用,促使风险预判的精准性与应急处置的智能化水平得到提升。

参考文献

- [1]王洪超.关于露天煤矿电气设备的检修与维护研究[J/OL].中国科技期刊数据库·工业A,2022(3)[2022-03-01].https://www.cqvip.com/doc/journal/2010228877610091011.
- [2]陈诚.露天煤矿剥离运输设备的管理与维护分析[J/OL].中文科技期刊数据库(文摘版)·工程技术,2022(12)[2022-12-01].https://www.cqvip.com/doc/journal/2010228838219153920.
- [3]路明辉.露天煤矿电气设备的检修与维护[J/OL].中国科技期刊数据库·工业A,2024(6)[2024-06-01].https://www.cqvip.com/doc/journal/2010228830457169409.
- [4]王鹏飞.露天煤矿剥离运输设备的安全管理与维护[J].内蒙古科技与经济,2011,(16):105-106.
- [5]刘辉.露天煤矿电气设备的检修与维护研究[J].电子世界,2017,(07):177-177.DOI:10.19353/j.cnki.dzsj.2017.07.143.
- [6]黄美琴.让“多管闲事”成为习惯——准能集团黑岱沟露天煤矿运输队剥离运行一班安全联防互保侧记[J].班组天地,2017,(10):45-45.
- [7]肖运振.露天煤矿电气设备的检修与维护研究[J].内蒙古煤炭经济,2022,(05):44-46.
- [8]吴泽.关于露天煤矿电气设备检修和维护的探索[J].矿业装备,2022,(03):281-283.
- [9]齐振磊.露天煤矿电气设备的检修与维护研究[J].内蒙古煤炭经济,2023,(23):37-39.
- [10]史俊伟.煤矿冲击地压事故风险演化评估与防控研究[D].安徽省:安徽理工大学,2021.DOI:10.26918/d.cnki.ghngc.2021.000452.

基于大数据分析的发电设备故障诊断 与安全管理路径探讨

田小龙

国家电力投资集团有限公司, 北京 100029

DOI:10.61369/EPTSM.2025070005

摘 要 : 本文聚焦基于大数据分析的发电设备故障诊断与安全管理路径探讨, 旨在为发电设备管理的数字化、智能化转型提供路径参考。故障诊断上, 构建“数据层-处理层-模型层-应用层”四层架构, 通过传感器网络实现数据感知治理, 依托机器学习建故障诊断与剩余寿命预测模型, 并可视化呈现结果、解释模型决策。安全管理上, 分析传统模式局限, 提出“事前预防、数据驱动、全面覆盖”的大数据管理新范式, 构建“数据采集-分析诊断-决策执行-效果反馈-优化改进”闭环路径, 同时从技术、制度、人员搭建支撑体系。此外, 指出实施中数据、技术、人员、管理方面的挑战, 针对性给出保障策略, 总结大数据对提升故障诊断准确性与安全管理水平的关键作用, 为实践提供理论支撑。

关 键 词 : 大数据分析; 发电设备; 故障诊断; 安全管理

Exploration of Fault Diagnosis and Safety Management Pathways for Power Generation Equipment Based on Big Data Analysis

Tian Xiaolong

State Power Investment Corporation Limited, Beijing 100029

Abstract : This paper focuses on the exploration of fault diagnosis and safety management pathways for power generation equipment based on big data analysis, aiming to provide a path reference for the digital and intelligent transformation of power generation equipment management. In terms of fault diagnosis, a four-layer architecture of "data layer - processing layer - model layer - application layer" is constructed. Data perception and governance are achieved through a sensor network. Fault diagnosis and remaining useful life prediction models are established using machine learning, with results visualized and model decisions explained. For safety management, the limitations of traditional models are analyzed, and a new big data management paradigm of "proactive prevention, data-driven, and comprehensive coverage" is proposed. A closed-loop pathway of "data collection - analysis and diagnosis - decision-making and execution - effect feedback - optimization and improvement" is constructed, while a supporting system is established from the perspectives of technology, systems, and personnel. Additionally, the challenges in data, technology, personnel, and management during implementation are identified, and corresponding safeguard strategies are provided. The paper summarizes the critical role of big data in enhancing the accuracy of fault diagnosis and the level of safety management, providing theoretical support for practical applications.

Keywords : big data analysis; power generation equipment; fault diagnosis; safety management

引言

近年来, 大数据、人工智能、工业互联网等技术的快速发展, 为发电设备管理的数字化转型提供了关键支撑。通过实时采集设备运行参数、环境数据及维护记录, 依托数据治理技术实现多源数据的整合与净化, 借助机器学习算法构建智能诊断与预测模型, 能够有效提升设备故障识别的准确性与前瞻性, 推动安全管理从“事后处理”向“事前预防”转变。在此背景下, 深入探讨基于大数据分析的发电设备故障诊断技术框架与安全管理路径, 不仅是解决当前设备管理痛点的现实需求, 也是推动电力行业向智能化、高效化发展的重要举措。本文围绕大数据在发电设备管理中的应用展开研究, 构建“数据层-处理层-模型层-应用层”的故障诊断技术架构, 明确数据感知、模型构建、结果可视化的关键环节; 分析传统安全管理模式的局限性, 设计数据驱动的安全管理新范式与闭环路径, 并搭建多维度支撑体系; 针对实施过程中的挑战提出保障策略, 以期为发电企业实现设备管理的数字化、智能化转型提供理论参考与实践指引。

一、基于大数据的发电设备故障诊断技术框架构建

（一）总体架构设计

将大数据技术与工业互联网进行融合，对传统工业、制造业进行改造升级，促进其生产经营朝着数字化、智能化转型发展，已然成为当下企业发展的主流^[1]。发电设备故障诊断技术采用“数据层-处理层-模型层-应用层”的四层架构，数据层依托数据中台，整合设备发电量、运行参数、环境及维护记录等多维数据；处理层利用 AI 工具对数据进行清洗、转换和整合，确保其准确性与一致性；模型层则基于这些高质量数据，通过机器学习等算法构建智能故障诊断与剩余使用寿命预测模型；应用层将诊断与预测结果以直观的图表、报表等形式可视化呈现，为管理人员快速定位异常设备、制定维护决策提供直接支持。

（二）数据感知与治理

在数据感知方面，通过部署传感器网络，实时采集包括发电量、电压、电流、温度在内的设备运行参数及环境数据，并利用数据中台进行集中汇聚，打破数据孤岛^[2]。在数据治理环节，则通过数据清洗处理缺失、异常和重复值，通过数据标准化统一格式与单位，建立数据质量指标体系进行定期评估，从而全面保障数据的真实性、一致性与可用性，为后续分析奠定坚实基础。

（三）智能故障诊断模型构建

智能故障诊断模型的构建以设备历史数据为基础，首先通过整理和标注故障与运行数据来构建数据集，例如将风机停机、逆变器异常等故障类型与发电量、运行参数等数据进行关联^[3]。随后，根据数据特点选择决策树、神经网络等机器学习算法，并结合如发电量为零、效率过低等初步特征进行模型训练，同时采用交叉验证等方法优化模型，提升其准确率和泛化能力。此外，模型会随着新故障模式和运行数据的积累进行定期更新迭代，以适应设备状态变化，持续提升诊断的准确性与时效性。

（四）剩余使用寿命预测

剩余使用寿命预测通过分析设备历史运行数据，挖掘如发电效率下降、稳定性降低等性能退化特征指标。基于此，采用 RNN、LSTM 等机器学习算法构建预测模型，并利用历史数据进行训练^[4]。在实际应用中，将设备实时运行数据输入模型，即可获得其剩余使用寿命预测结果。该结果能反馈给管理人员，为制定前瞻性维护计划提供科学依据，从而有效避免突发故障导致的停机损失。

（五）诊断与预测结果的可视化与解释性

诊断与预测结果通过仪表盘、折线图可视化界面直观呈现，用不同颜色标识故障等级，并展示设备剩余寿命的变化趋势及维护建议，帮助管理人员快速掌握设备状态^[5]。同时为增强结果的可信度与应用价值，系统还对模型的决策过程进行解释，例如在诊断设备异常时，会明确指出导致该结论的关键特征及其与故障的关联，从而提升管理人员对模型的信任，辅助其做出精准决策。

二、数据驱动的发电设备安全管理路径设计

（一）传统安全管理模式的局限性分析

传统安全管理模式在生产管理中心的设备管理中存在显著局

限，在效率上，依赖人工排查导致周期长，无法及时响应设备故障，增加了安全风险；在范围上，排查覆盖面窄，存在监控盲区，难以全面掌握设备运行状况；在数据利用上，缺乏对数据的深度挖掘，仅依靠日报汇总进行月度分析，无法发现潜在规律与隐患，导致管理决策缺乏前瞻性和科学依据，数据价值未被充分释放。

（二）大数据驱动的安全管理新范式

大数据驱动的安全管理新范式以数据为核心，通过数据中台与 AI 分析，实现了管理的智能化、精准化和高效化^[6]。推动管理理念从“事后处理”转向“事前预防”，通过实时监控提前发现异常；管理方式从“人工为主”转向“数据驱动”，自动完成故障诊断，将设备排查周期从三周缩短至一小时以内；管理范围也从“局部监控”扩展至“全面覆盖”，将所有设备纳入跟踪，消除管理盲区，从而全面提升安全管理水平。

（三）安全管理闭环路径构建

安全管理闭环路径构建遵循“数据采集-分析诊断-决策执行-效果反馈-优化改进”的流程，形成完整的管理闭环^[7]。数据采集阶段，依托数据中台和各类数据采集设备，全面、实时采集发电设备的运行数据，包括发电量、运行参数、环境数据等，为后续的分析诊断提供数据支持^[8]。分析诊断阶段，利用智能故障诊断模型和数据分析工具，对采集到的数据进行深入分析，识别设备运行异常情况，诊断故障类型和原因，预测设备剩余使用寿命，为管理决策提供依据。决策执行阶段，根据分析诊断结果，制定相应的管理决策和执行方案。生产管理中心根据异常设备清单，督促相关单位对故障设备限期整改。效果反馈阶段，对决策执行的效果进行跟踪和评估，采集设备在执行措施后的运行数据，分析设备运行状态的改善情况，判断故障是否得到有效解决^[9]。优化改进阶段，根据效果反馈结果，总结管理经验，发现管理过程中存在的问题，对数据采集方法、分析诊断模型、决策执行方案等进行优化和改进，不断完善安全管理闭环路径。

（四）安全管理路径的支撑体系

安全管理路径的支撑体系包括技术支撑、制度支撑和人员支撑三个方面。技术支撑方面，完善数据中台建设，提升数据存储、处理和分析能力，确保能够高效处理大量的发电设备数据^[10]。加强 AI 工具和算法的研发与应用，不断优化智能故障诊断模型和剩余使用寿命预测模型，提高模型的准确性和可靠性。同时搭建安全管理信息系统，实现数据采集、分析诊断、决策执行、效果反馈等环节的信息化管理，提升管理效率。制度支撑方面，建立健全数据管理制度，规范数据采集、存储、使用、共享等流程，确保数据的安全性、完整性和准确性。制定设备故障诊断和安全管理相关制度，明确各部门和人员的职责分工，规范故障处理流程和安全管理 workflow。建立定期评估和考核制度，对安全管理工作的效果进行评估和考核，激励相关人员积极履行职责，提升安全管理水平。人员支撑方面，加强对管理人员和技术人员的培训，提高其大数据分析、智能故障诊断等方面的专业技能和综合素质。培养具备跨学科知识的复合型人才，既掌握发电设备专业知识，又熟悉大数据技术和管理方法，为安全管理路径

的实施提供人才保障。建立人员激励机制，鼓励员工积极参与安全管理创新和改进工作，充分发挥员工的主观能动性。

三、实施挑战与保障策略

（一）面临的主要挑战

在基于大数据分析的发电设备故障诊断与安全管理路径实施过程中，生产管理中心面临多方面挑战。数据方面，存在数据质量不稳定和数据隐私安全风险。虽然通过数据治理可提升数据质量，但在实际运行中，由于传感器故障、数据传输干扰等因素，仍可能导致数据缺失、异常等问题，影响数据分析和模型诊断的准确性。同时发电设备运行数据包含大量敏感信息，在数据共享和使用过程中，存在数据泄露、被篡改等隐私安全风险。技术方面，面临技术更新换代快和技术融合难度大的问题。大数据和人工智能技术发展迅速，新的算法、工具不断涌现，生产管理中心需要持续投入资源进行技术升级和学习，以跟上技术发展的步伐。此外，将大数据技术与发电设备专业技术进行深度融合，实现数据驱动的故障诊断和安全管理，需要解决技术接口、数据格式兼容等问题，技术融合难度较大。人员方面，缺乏专业技术人才和员工观念转变困难。既懂大数据技术又熟悉发电设备管理的复合型人才稀缺，生产管理中心在组建专业团队时面临较大困难。同时部分员工长期习惯于传统的管理模式，对新的大数据驱动管理模式认识不足，存在抵触情绪，观念转变需要一定时间。管理方面，存在部门协调难度大和管理制度不完善的问题。基于大数据的发电设备管理涉及多个部门，各部门之间的工作协调和数据共享需要高效的沟通机制，否则容易出现工作推诿、数据孤岛等问题。

（二）保障策略与建议

数据保障方面，建立数据质量监控机制，实时监控数据采集、传输、存储等环节的数据质量，及时发现并解决数据质量问题。定期对传感器、数据采集设备进行维护和校准，减少设备故障导致的数据质量问题。加强数据隐私安全保护，采用数据加密、访问控制、安全审计等技术手段，防止数据泄露和被篡改。制定数据隐私安全管理制度，明确数据使用权限和责任，规范数据共享和使用流程。技术保障方面，制定技术发展规划，定期

评估大数据和人工智能技术的发展趋势，结合生产管理中心的实际需求，合理安排技术升级和研发投入，确保技术的先进性和适用性。加强与高校、科研机构、技术供应商的合作，引进先进的技术和解决方案，同时借助外部力量解决技术融合过程中遇到的问题。建立技术交流平台，鼓励技术人员参与行业技术交流和培训，提升技术水平。人员保障方面，制定人才引进计划，通过招聘、校园招聘、社会招聘等多种渠道，引进大数据分析、人工智能、发电设备专业等方面的人才，组建专业的技术团队。加强内部培训，定期组织员工参加大数据技术、智能故障诊断、安全管理等方面的培训课程，提高员工的专业技能和综合素质。开展宣传教育活动，向员工普及大数据驱动管理模式的优势和重要性，转变员工的传统观念，提高员工对新管理模式的接受度和参与度。管理保障方面，建立跨部门协调机制，成立专门的协调小组，明确各部门的职责和工作分工，定期召开协调会议，解决部门之间的工作衔接和数据共享问题。完善管理制度体系，根据大数据驱动的安全管理模式的需求，制定和修订数据管理制度、技术管理制度、设备管理制度、考核评价制度等，确保各项工作有章可循。加强管理创新，鼓励员工提出管理改进建议，不断优化管理流程和方法，提升管理效率和水平。

四、结束语

本文系统探讨了基于大数据分析的发电设备故障诊断技术框架与安全管理路径，通过理论梳理与路径设计，为电力行业设备管理的数字化、智能化转型提供了可落地的研究成果。尽管本文已形成较为完整的技术与管理方案，但在实际应用中，不同类型发电设备（如风电、火电、光伏）的工况差异对模型适应性的影响、多源异构数据实时处理的效率优化等问题，仍需进一步深入研究。未来可结合边缘计算、数字孪生等新兴技术，持续迭代故障诊断模型与安全管理机制，提升方案的场景适配性与实践价值。大数据技术已成为突破传统发电设备管理瓶颈的关键驱动力，本文提出的技术框架与管理路径，可为发电企业降低设备故障风险、提升安全管理效能提供切实参考，助力电力行业在能源转型浪潮中实现高质量、可持续发展。

参考文献

- [1] 张逸凡. 基于大数据挖掘的发电设备状态监测与故障诊断系统研究 [J]. 自动化应用, 2023, 64(2): 48–50.
- [2] 吴浩. 基于物联网和模糊聚类的风力发电设备故障诊断系统及方法 [J]. 电子测量技术, 2016, 39(3): 162–165. DOI: 10.3969/j.issn.1002-7300.2016.03.039.
- [3] 李雪强. 基于大数据的火电厂汽轮机故障诊断与预测维护 [J]. 电力设备管理, 2024(24): 96–98.
- [4] 李峰. 基于生产大数据的水轮发电机组故障诊断系统 [J]. 水电站机电技术, 2020, 43(3): 9–13. DOI: 10.13599/j.cnki.11-5130.2020.03.004.
- [5] 张晔. 发电厂电气设备状态监测和故障诊断的改进研究 [D]. 华北电力大学, 华北电力大学 (北京), 2016. DOI: 10.7666/d.Y3114823.
- [6] 常屹, 王彦刚, 付喜亮, 等. 基于大数据分析模式的设备全寿命周期管理研究 [C]//2015 全国电力设备状态监测与故障诊断技术研讨会论文集. 2015: 1–6.
- [7] 王平. 风力发电机组传动链故障诊断与大数据预警技术 [D]. 山西: 山西大学, 2021.
- [8] 刘奕男. 基于数据平台的光伏组件故障诊断系统设计 [D]. 江苏: 东南大学, 2021.
- [9] 国能(惠州)热电有限责任公司. 基于历史数据分析的设备故障诊断方法 :CN202410904211.1[P]. 2024–09–10.
- [10] 石睿. 基于大数据分析的风电机组运行状态监测方法研究 [D]. 吉林: 长春工业大学, 2018.

智能化手段在发电设备异常排查与安全生产中的应用研究

康永

国家电投集团内蒙古新能源有限公司，内蒙古 呼和浩特 010010

DOI:10.61369/EPTSM.2025070006

摘 要： 本文聚焦智能化手段在发电设备异常排查与安全生产中的应用，结合区域新能源结构与极端气候特征，构建适配当地场景的智能化应用模式，明确安全生产落地路径。同时从经济、安全、管理、社会四维度搭建综合效益评估体系，剖析地域性挑战，并提出针对性对策，为发电行业实现从传统运维向智能运维转型、保障区域电力安全稳定供应提供理论支撑与实践参考。

关 键 词： 智能化手段；发电设备；异常排查；安全生产管理

Research on the Application of Intelligent Means in Anomaly Detection and Safe Production of Power Generation Equipment

Kang Yong

SPIC Inner Mongolia New Energy Co., Ltd., Hohhot, Inner Mongolia 010010

Abstract： This paper focuses on the application of intelligent means in anomaly detection and safe production of power generation equipment. By considering the regional new energy structure and extreme climate characteristics, it constructs an intelligent application model tailored to local scenarios and clarifies the implementation path for safe production. Meanwhile, a comprehensive benefit evaluation system is established from four dimensions: economy, safety, management, and society. It analyzes regional challenges and proposes targeted countermeasures, providing theoretical support and practical references for the power generation industry to transition from traditional operation and maintenance to intelligent operation and maintenance, and to ensure a safe and stable power supply in the region.

Keywords： intelligent means; power generation equipment; anomaly detection; safe production management

引言

随着工业转型升级加速、新型城镇化建设稳步推进，以及国家“双碳”目标下风电、光伏等新能源发电项目的大规模并网，全区电力需求持续攀升。传统依赖人工巡检的运维模式，不仅难以应对广袤地域内分散电站的全覆盖监测，更在极端气候下存在响应滞后、排查效率低等问题。本文立足发电行业实际，系统研究智能化手段在发电设备异常排查与安全生产中的应用，构建涵盖状态感知、数据诊断、故障预测与数字孪生全生命周期管理的设备异常排查智能化应用模式，梳理包含风险辨识、过程监控、应急指挥与安全文化建设的安全生产管理智能化路径。通过效益评估、地域特异性挑战剖析与对策提出，为发电企业落地智能化技术提供适配性强的理论框架与实践方案，助力行业实现从传统运维向智能运维转型，为区域电力系统安全稳定运行与能源高质量发展提供有力支撑。

一、智能化手段在发电设备异常排查中的应用模式构建

（一）设备状态智能感知与数据采集体系

大数据分析指的就是一个基于数据，来整理、转换、建模的整个过程，主要旨在找出有助于业务决策的信息。通过数据分析专业技术的应用，可提取出海量数据内的有用信息，并基于数据

分析结果正确做出决策^[1]。为应对气候对风电、光伏设备造成的故障风险与数据采集中断问题，需构建气候适配的设备状态智能感知与数据采集体系，以实现全面、实时、高精度的状态监测，为故障诊断与预测提供高质量数据支撑。在感知维度上，除常规物理量监测外，还针对风沙增设外壳磨损与滤网堵塞监测，针对严寒强化润滑油粘度、蓄电池容量与启停响应监测，并同步采集环境参数以捕捉异常前兆^[2]。硬件选型优先采用耐低温、抗风

沙、防腐蚀并具备边缘计算功能的工业级传感器，关键部位实施冗余部署，确保数据采集连续可靠^[9]。数据预处理通过边缘网关进行滤波、异常修正与缺失填补，消除噪声干扰，随后将数据按层级结构存入时序数据库并同步备份至本地与云端，保障数据稳定可用。

（二）基于数据驱动的设备异常诊断

基于数据驱动的设备异常诊断是异常排查的核心环节，旨在通过挖掘发电设备在极端气候下的运行数据规律，精准识别隐性异常与显性故障，替代传统人工经验，减少误判与漏判，提升诊断效率与准确率^[10]。在特征工程中，结合设备运行机理与气候特性构建多维度特征集，重点关注气候与异常的关联性，形成“时域+频域+时频域+气候影响因子”的特征体系^[9]。诊断模型构建上，针对单一异常采用SVM、随机森林等模型，通过离线训练与在线推理实现动态诊断；对复杂叠加故障则采用CNN、LSTM等深度学习模型，融合设备与气候数据通道提升精度。

（三）设备故障预测与寿命评估

设备故障预测与寿命评估是异常排查的前瞻环节，旨在结合极端气候对设备的长期影响，提前预判故障发生时间与剩余寿命，为预知性维护提供依据，减少突发停机与过度维护成本，尤其适用于偏远电站的设备管理^[9]。在故障预测方面，针对线性退化设备采用线性回归或Weibull分布模型拟合衰减曲线；对非线性、多因素影响的设备则采用“物理机理+数据驱动”混合模型，结合Miner损伤模型与双向LSTM提升预测精度^[7]。寿命评估从部件级到设备级分层开展，部件级结合材料特性、运行应力与老化机制评估剩余寿命；设备级则通过故障树分析与贝叶斯网络考虑部件间关联及气候协同效应。同时建立“实时数据反馈—模型动态修正”机制，根据季节性气候更新模型参数，并定期验证预测精度，优化输入因子，保障长期预测有效性。

（四）基于数字孪生的设备全生命周期管理

基于数字孪生的设备全生命周期管理是异常排查的全景平台，核心是构建与发电设备及其运行环境1:1映射的数字孪生体，通过实时数据交互、虚拟仿真与协同优化，实现设备从设计到退役的全生命周期可视、可预测、可优化管理，解决偏远电站运维困难与极端气候下故障模拟难题。

二、智能化手段在发电安全生产管理中的应用路径

（一）安全风险的智能辨识与动态评估

安全风险的智能辨识与动态评估是发电安全生产管理的前置防线，旨在打破传统静态评估局限，结合极端气候、偏远区位与新能源占比高的特点，通过多源数据融合与智能算法，实现全场景风险的全面识别、精准量化与动态更新，推动管理从“被动应对”转向“主动发现”^[9]。在风险数据库构建上，整合典型事故案例、地方安全标准及企业历史记录，形成“结构化+非结构化”风险知识库。结构化数据按风险类型、影响因素与后果等级分类存储；非结构化数据通过NLP与图像识别提取关键信息，强化地域特征^[9]。在数据采集上，覆盖“设备—人员—环境—管理”全

场景，重点采集极端气候下的设备耐受数据、人员北斗定位与作业资质、实时气候与地理环境数据，以及针对低温、火灾等的管理措施信息。在动态评估模型构建上，打造“气候敏感性风险评估模型”，采用AHP确定风险因素权重，通过模糊综合评价法动态调整风险等级。

（二）安全生产过程的智能监控与预警

为保障发电安全生产，系统通过AI监控技术实现全流程全天候无死角监控，构建实时屏障，以早期预警、精准定位隐患，避免风险演变为事故^[10]。系统融合视觉、数据与联动监控，部署抗寒抗沙摄像头识别叶片结冰、防护缺失、光伏板沙尘覆盖等问题，整合设备、气候与人员定位数据实时显示异常率与风险等级，实现系统—设备—人员联动，如自动启动消防并推送应急预案。针对本地场景开发设备、人员、环境三类预警模型，如风机结冰厚度预测、人员冻伤风险监测、草原火灾概率预测，设定阈值自动触发预警。预警采用分级推送机制，一般情况推送班组，严重及以上同步至管理部门与监管机构；通信弱时启用本地缓存与卫星备份，确保预警附带位置、风险描述与处置建议送达最近人员，提升响应效率。

（三）应急指挥与决策支持的智能化

应急指挥与决策支持的智能化是发电安全生产管理的应急中枢，旨在通过实时数据整合、虚拟仿真推演和最优方案生成，解决传统指挥中信息不全、依赖经验、协同低效的问题，提升偏远地区及极端气候下的应急处置效率，减少损失。为此系统构建了适配内蒙古地域特点的应急数据中台，整合设备、人员、资源及环境等多源数据，具备快速接入与离线存储能力，支持以事故点为中心的可视化资源展示。针对典型事故场景，系统基于数字孪生技术构建仿真模型，模拟不同处置方案的效果，并考虑气候因素对处置的影响，为指挥决策提供科学依据。同时，建立企业、地方政府与协作单位的三级协同指挥平台，打破部门与地域壁垒，支持卫星与短波双备份通信，确保指令畅通，实现统一高效的应急指挥。

（四）构建主动预防型安全生产文化

构建主动预防型安全生产文化，核心是利用智能化手段推动全员从“要我安全”向“我要安全、我会安全、我能安全”转变。通过打造个性化沉浸式本地化培训平台，结合VR模拟大风、低温等场景及移动端离线学习功能，确保培训达标；开发“风险随手拍”应用，鼓励员工上报隐患并自动判定风险等级，辅以奖励机制与线上风险研讨会，形成跨电站经验共享库；同时建立涵盖风险辨识、培训达标、违章行为、应急响应等维度的数据化考核体系，系统自动采集数据生成绩效报告，奖优罚劣，引导员工主动关注安全，营造“人人讲安全、事事为安全”的文化氛围。

三、智能化应用的效益、挑战与对策

（一）综合效益评估体系构建

结合本地发电行业特点，构建经济效益、安全效益、管理效益、社会效益四维综合效益评估体系，打破传统单一经济指标局

限,通过定量与定性结合全面量化智能化应用价值,为企业决策提供数据支撑。经济效益聚焦成本节约与效率提升,包括减少突发停机损失、延长设备维护周期、降低巡检人力成本、提高故障处置效率,叠加地方新能源补贴政策,综合体现智能化改造的直接经济回报。安全效益围绕事故率下降、人员伤亡减少、隐患整改闭环率提升等量化指标,突出极端气候下的风险防控能力与应急处置效率,体现智能化对安全生产的核心保障作用。管理效益体现流程优化、决策质量提升与人员能力增强,通过管理成本降低率、决策准确率等指标量化管理模式升级成效。社会效益强调能源供应保障、生态保护与就业带动,结合绿色电力输送量、生态保护面积等指标,展现智能化对区域发展与“双碳”目标的贡献。

（二）面临的主要挑战与制约因素

尽管智能化应用为发电行业带来显著效益,但在实际推进中仍面临技术、成本、管理、人才四类地域特异性挑战,部分因素成为阻碍智能化落地的瓶颈。技术层面,极端气候导致部分智能设备故障率高、识别精度下降,同时不同厂商系统兼容性差,形成“数据孤岛”,制约数据融合与诊断效果。成本层面,智能化改造前期投入大、回报周期长,加之偏远地区维护成本高,使企业尤其是中小企业资金压力显著。管理层面,传统“重经验、轻数据”模式与智能化流程不匹配,部门协同不畅、基层认知不足,导致预警难以转化为行动。人才层面,复合型人才严重短缺,现有员工技能无法适配智能化需求,内部培养体系不完善,形成“技术有了但没人会用”的困境。

（三）推动智能化应用的对策与建议

为应对发电行业智能化应用技术在技术、成本、管理、人才等方面的挑战,构建“企业主导实践、行业协同赋能、政府政策引导”三维推进体系,从多维度制定精准化对策。技术方面,企业联合设备供应商开发耐低温、抗沙尘的定制化设备,优化 AI 算法提升识

别准确率;行业牵头制定统一数据标准与接口协议,破除“数据孤岛”,建立技术适配库供企业参考。成本方面,企业通过专项贷款、融资租赁减轻前期投入压力,行业推动共享运维中心降低成本,优先部署短周期见效项目,挖掘数据服务收入以优化投资回报。管理方面,企业完善智能系统运维与数据安全制度,建立“数据一决策一执行”闭环,设立跨部门协同小组并开展培训与复盘,提升认知与执行力。人才方面,企业借助地方政策引进高端人才,与高校合作定向培养,开发本地化培训课程,举办技能大赛,设置专项津贴与晋升通道以增强归属感。政府提供税收优惠与人才补贴,出台智能化安全监管标准;行业建立案例库与应用指南,组织技术交流会促进经验共享。通过多方协同发力,推动智能化从“单点试点”走向“全面普及”,助力发电行业实现智能运维转型,为电力安全稳定与“双碳”目标提供坚实支撑。

四、结束语

本文立足发电行业实际,围绕智能化手段在设备异常排查与安全生产中的应用展开研究,结合区域极端气候与新能源结构特点,构建了涵盖状态感知、数据诊断、故障预测及数字孪生的智能化应用模式,并梳理了安全生产的智能化落地路径,同时建立四维综合效益评估体系,针对地域挑战提出“企业—行业—政府”协同对策,形成完整理论与实践框架。研究核心价值在于打破通用性局限,针对严寒、大风、沙尘等特征与电站分散痛点,提出针对性技术方案与实施路径,为智能化落地提供可操作参考。未来需加强极端工况技术适配研究,完善地方标准体系,探索“智能化+新能源”融合创新模式,助力地区发电行业向智能、高效、安全、低碳方向转型,为国家电力安全与能源高质量发展贡献力量。

参考文献

[1]方占萍.大数据分析技术在风电设备异常预测中的应用[J].石河子科技,2021,(03):16-17.
[2]钮志峰.发电厂柴油发电机启动异常的处理[J].华电技术,2016,38(8):28-29. DOI:10.3969/j.issn.1674-1951.2016.08.008.
[3]李治富.汽轮机异常振动故障排查技术的应用[J].今日自动化,2024(8):70-72. DOI:10.3969/j.issn.2095-6487.2024.8.jrzdh202408026.
[4]娄腾升.发电电动机摆度异常增大分析及处理[J].水电站机电技术,2024,47(7):16-18. DOI:10.13599/j.cnki.11-5130.2024.07.005.
[5]胡仕明.1.5MW双馈型风力发电机组异常响声分析[C]//2014全国风电后市场专题研讨会论文集.2014:60-67.
[6]饶裕洪.海上采油平台应急柴油发电机电压异常故障分析及处理[J].石化技术,2019,26(5):188-189. DOI:10.3969/j.issn.1006-0235.2019.05.115.
[7]郑有全.电站厂用变高压开关柜设备接头过热成因分析与处理[J].水电与新能源,2025,39(4):87-89. DOI:10.13622/j.cnki.cn42-1800/tv.1671-3354.2025.04.024.
[8]王宝磊.1000MW机组闭式冷却水系统进空气事件的异常分析及故障排查[J].数字化用户,2018,24(49):32,34. DOI:10.3969/j.issn.1009-0843.2018.49.030.
[9]陈林.火电厂汽轮机异常振动故障排查技术分析[J].大科技,2017(23):70-71.
[10]牟启涛.火电厂汽轮机异常振动故障排查技术分析[J].百科论坛电子杂志,2021(22):2172-2173. DOI:10.12253/j.issn.2096-3661.2021.22.1720.

加强火电厂燃料成本管理——提高企业经济效益

吴凡

吉林电力股份有限公司白城发电公司，吉林 白城 137000

DOI:10.61369/EPTSM.2025070007

摘 要： 在“双碳”目标及能源结构调整背景下，火电厂是能源供应的主体，面对着煤炭价格波动、环保要求提高、市场竞争激烈等诸多考验，而燃料成本作为火电厂的主要成本构成部分，约占总成本的60%~70%，直接影响到企业的经济效益和竞争力。本文主要通过对火电厂燃料成本管理的重要意义进行分析，对目前火电厂在采购、储存、燃烧、核算等各个方面的管理问题进行总结，提出了改善采购方式、加强储存管理、提高燃烧效率、优化成本核算体系、加快信息化进程等方面的有效建议措施，为火电厂降低燃料成本，提高盈利水平，实现可持续发展提供一定的实践基础和经验借鉴。

关 键 词： 火电厂；燃料成本管理；企业经济效益

Strengthening Fuel Cost Management in Thermal Power Plants — Improving Enterprise Economic Efficiency

Wu Fan

Baicheng Power Generation Company, Jilin Electric Power Co., Ltd., Baicheng, Jilin 137000

Abstract： In the context of the "dual carbon" target and energy structure adjustment, thermal power plants are the main body of energy supply, facing many challenges such as coal price fluctuations, increasing environmental protection requirements, and fierce market competition. Fuel cost, as the main cost component of thermal power plants, accounts for about 60% to 70% of the total cost, directly affecting the economic benefits and competitiveness of enterprises. This article mainly analyzes the significance of fuel cost management in thermal power plants, summarizes the current management problems in procurement, storage, combustion, accounting, and other aspects of thermal power plants, and proposes effective suggestions and measures to improve procurement methods, strengthen storage management, improve combustion efficiency, optimize cost accounting systems, accelerate informationization processes, etc., providing a practical basis and experience reference for thermal power plants to reduce fuel costs, improve profitability, and achieve sustainable development.

Keywords： thermal power plants; fuel cost management; enterprise economic benefits

火电厂属于我国电力系统里的支柱，它在维持能源安全，稳定电力供应方面起着无法代替的作用，近年来，伴随着新能源发电技术快速发展，火电厂面临着“去煤化”的转型压力，煤炭市场价格因为国际能源局势和供需关系出现大幅波动，2021到2023年国内动力煤价格最高涨幅超出150%，使得某些火电厂陷入亏损状态，本文针对火电厂燃料成本经营的整个流程展开详细分析，找出现存的问题，并探寻合适的解决途径，这对于推动火电厂经济效益增长及行业向高质量方向迈进有着较为重要的现实意义。

一、加强火电厂燃料成本管理的重要意义

（一）确保企业盈利水平，增强市场竞争力

火电厂的经济效益主要看“收入-成本”，电力价格受政策影响，市场化交易空间小，成本控制是盈利关键，燃料成本占六成以上，若能科学管理降低1%-2%燃料成本，企业利润率可提升3%-5%，某装机100万千瓦火电厂年耗煤300万吨，每吨煤成本降低50元，年节约成本1.5亿元，直接提高企业净利润，让

企业在电力市场竞争中更有价格优势，更容易获得市场化交易订单^[1]。

（二）推动绿色转型，助力“双碳”目标达成

燃料成本管理与环保要求高度协同，低效燃料利用既增成本又增碳排、污染排，需多花钱治环保，若燃料采购选低硫高热值煤炭、燃烧提升减少煤炭消耗、灰渣回收利用等，既降成本又减碳排、污染排，经测算，火电厂锅炉燃烧效率每升1%，每吨煤碳排放可减2%，年碳排减数千吨，符合国家环保政策要求，免环保罚

作者简介：吴凡（1990.05-），男，吉林吉林人，本科，工程师，研究方向：火电厂燃料经营。

款，降绿色转型成本^[2]。

（三）保障能源安全与电力供应稳定

火电厂燃料供应的稳定性关乎电力生产的连续性，燃料采购渠道单一、库存管理混乱，就会出现“断煤停机”的风险，导致发电量损失和违约赔偿，科学的燃料成本管理能够创建起多元化的采购渠道和合理的库存储备机制，从而保证燃料稳定供应，防止因为燃料短缺引发的生产中断^[3]。2022年冬天，我国部分地方因为煤炭供应紧张出现了限电情况，那些提前建立起多渠道采购和合理库存的火电厂，既保证了电力供应，又由于燃料价格锁定而取得了稳定的收益^[4]。

二、火电厂燃料成本管理的现状与问题

（一）渠道单一导致议价能力不足

供应商集中度高，大部分火电厂的煤炭供应商都是本地或者固定的几家，采购渠道单一，当煤炭价格上涨时没有讨价还价的余地。有调研显示，70%的地方火电厂只与2-3家供应商合作，当供应商因为产能、运输等问题减少供给时，只能高价购买煤炭。采购计划缺乏科学性，采购计划大多依照历史耗煤数据，没有按照电力负荷预测和煤炭价格走向来改变^[5]。2023年一些火电厂没预料到夏天用电量提前上涨，就随意缩减了采购量，高峰时期缺少煤炭，只好高价抢购，多花了两千万。运输成本控制不足，煤炭运输方式主要以铁路和公路为主，运输成本占燃料总成本的15%-20%，有些火电厂没有和运输企业建立长期的合作关系，导致运输价格随着市场的变化而上涨，而且运输路线规划不合理，舍近求远选择高运费的路线，增加了运输成本^[6]。

（二）积压与短缺并存导致资金占用严重

库存水平把控失衡，部分火电厂为规避价格上涨风险而过度囤煤，造成库存积压。库存管理技术落后，大部分火电厂仍旧沿用人工盘点、纸张记录的方法来管理库存，不能随时知道煤炭的库存数量，热量，水分这些重要数据。有个火电厂因为人工记录有误，实际库存比账上少8万吨，紧急购买的时候就多花了1200万。煤质管控不到位，入库煤炭没有严格检测热值，硫分等指标，有些供应商以次充好，造成煤炭实际热值比合同约定低，锅炉燃烧效率降低，耗煤量增多^[7]。

（三）燃烧环节效率低且能源浪费严重

锅炉设备老化，技术改造缓慢，有的火电厂锅炉使用时间超过15年，设备老化造成燃烧效率降低，比如某火电厂200MW机组锅炉，燃烧效率只有88%，比行业的先进水平92%-93%低，每年多消耗煤炭大约10万吨，多花费的成本超过6000万元。

运行参数优化不足，运行人员没有根据煤炭热值、负荷变化，及时调整锅炉的风煤比、炉膛温度等参数，造成“大马拉小车”或者燃烧不充分。如低负荷运行时，仍保持高风量、高煤量，造成煤炭浪费；高负荷时，风量不足，燃烧不完全，灰渣含碳量超过10%（行业优秀水平为5%以下）。

灰渣回收利用不足，燃烧产生的灰渣可以用于制作水泥、建材等，但是大部分火电厂都会将灰渣填埋，这样会增加处置成本

（每吨处置费用约为20元），还会浪费可回收资源。某火电厂每年产生灰渣15万吨，如果全部回收利用，可以创造收益超过300万元，还可以减少处置成本300万元。

（四）成本核算体系不完善导致数据失真

核算范围不全面，多数火电厂只核算煤炭采购成本，未把运输、仓储、检测、灰渣处置等间接成本算入燃料总成本核算，造成成本数据失真，不能给管理决策给予正确依据，像某火电厂2023年燃料采购成本核算成800元/吨，但算上运输、仓储等成本之后，实际总成本达880元/吨，核算偏差致使成本控制方向出错。

核算方法落后，依旧采用“月末加权平均法”来核算燃料成本，不能及时体现不同批次、不同煤种的成本差异，不能准确分析出成本波动的原因，没有分析煤质偏差对燃烧成本的影响、库存积压对资金成本的影响，使得成本控制缺乏针对性^[8]。

三、加强火电厂燃料成本管理的策略

（一）优化采购机制以降低采购成本

建立多元化供应商体系，通过公开招标，战略协作等手段，扩充供应商范畴，包含差别区域及各类煤炭企业（国有，民营），以削减过分依靠单个供应商的局面，某火电厂将供应商由3家增添到8家，2023年煤炭价钱上升时，同各类供应商洽谈后，其采购价格比业内平均水准低30元每吨。

实施科学采购计划，结合电力负荷预测（夏天、冬天用电高峰）；煤炭价格走势，结合行业报告，大数据分析预测；制定出动态采购计划，预测价格会涨的时候多买些；预测价格要跌的时候少买些，减少存货；采购方式，“长协+现货”相结合的方式，“长协”煤占比在70-80%之间，锁定成本底线，剩余为“现货”煤灵活应变市场。

降低运输成本，与铁路、公路运输企业签订长期合作协议，固定运输价格；优化运输路线，优先选择铁路运输（铁路运输成本比公路低20%-30%），短途选择公路运输，实行“铁路+公路”联运；在煤炭产地或运输枢纽建设中转仓库，减少长途运输成本。某火电厂在山西煤炭产地建设中转库，利用铁路运输将煤炭运输到中转库，再利用公路短途运输至电厂，运输成本降低15元/吨。

（二）精细化库存管理降低资金占用与损耗

确定合理库存水平，根据电力负荷、煤炭供应周期、运输条件等，采用“安全库存+动态调整”模式，计算出最优库存。比如电力负荷比较稳定，供应周期较短（7天以内），安全库存控制在15-20天耗煤量；电力负荷波动较大，供应周期较长（15天以上），安全库存控制在30-40天耗煤量。同时，运用ABC分类法，把煤炭按照热值、价格分为A（高热值、高价）、B（中热值、中价）、C（低热值、低价）三类，A类煤重点管，少存；C类煤多存一些，降低费用。

提升库存管理技术水平，引进物联网技术，于煤场装置智能传感器，随时监控煤炭库存量，温度，水分等指标，采用无人看

守地磅，自动采样机，达成煤炭入库，出库的自动计量与检测，创建数字库存管理系统，及时更新库存信息，与采购，燃烧系统数据关联，防止出现差别，例如某火电厂采用智能煤场系统之后，库存盘点时长由3天缩减到1小时，数据精确度从85%改进到99%。

加强煤质管控，建立严格的煤质检测流程，煤炭进入库房前，由第三方检测热值，硫分，水分等指标，不合格的煤炭坚决不收，库房后要定时抽检，不能出现煤质变化，并根据煤炭情况分类存储，避免热值，硫分不同的煤炭混杂在一起，造成煤炭燃烧效率降低^[4]。

（三）提高燃烧效率以降低能源浪费

推进设备技术改造，对老化锅炉实施升级改造，例如装设低氮燃烧器，空气预热器，以改进燃烧效率，采用等离子点火技术代替燃油点火，缩减点火花费，因为等离子点火花费比燃油少80%，给机组开展灵活性改造，优化低负荷运转下的燃烧效率，就某火电厂而言，它给300MW机组锅炉做了改造之后，燃烧效率从89%改进到93%，每年缩减耗煤8万吨，节省的成本达4800万元以上。优化运行参数，建立燃烧优化模型，依据煤炭热值、电力负荷实时调整风煤比、炉膛温度、煤粉细度等参数，高热值煤炭用低风煤比，低热值煤炭用高风煤比，还要加大运行人员培训力度，提升操作水平，保证参数调整准确无误，某火电厂通过优化运行参数，锅炉灰渣含碳量由12%降到5%，每年节约煤炭6万吨。加强灰渣回收利用，与建材企业合作，把灰渣加工成水泥，墙体材料等；对粉煤灰进行分选，提取高纯度的粉煤灰作为混凝土掺合料，提高附加值。如某火电厂年处理灰渣15万吨，加工成水泥后，年创造收益300万元，同时减少处置成本300万元，实

现了“变废为宝”。

（四）完善成本核算体系以提高数据准确性

扩大成本核算范围，将燃料采购成本、运输成本、仓储成本、检测成本、灰渣处置成本、资金占用成本（库存资金的利息支出）等所有成本均纳入燃料总成本核算，形成“全成本”核算体系。比如某火电厂2023年将资金占用成本纳入核算后，发现库存积压造成年资金成本超1200万元，于是调整库存策略，减少资金占用^[5]。深化成本分析，建立燃料成本分析模型，从业界（价格，数量），存（积压，短缺），烧（效率，耗煤量）等各个环节，找出成本增加的原点，每月召开成本分析会，对比成本分析会上个月的实际成本与预估成本之间存在的差距，并且落实各自的责任人，如采购部门负责采购价格，运行部门负责燃烧效率等。

四、结束语

综上所述，能源转型与市场竞争双压之下，燃料成本管理成了火电厂提升经济效益、达成可持续发展的重要途径，燃料成本管理是一场系统工程，牵涉采购、库存、燃烧、核算、信息化等诸多环节，要从机制优化，技术更新，管理革新等层面展开努力，火电厂应依照自身实际状况，塑造“全流程，精细化，智能化”的燃料成本管理体系，通过优化采购削减源头成本，精细库存缩减资金占用，改进燃烧效率削减能源浪费，完善核算给予精确数据，推动信息化做到协同管理，真正减小燃料成本，改善企业盈利水平。

参考文献

[1] 曹雪. 当前火电企业成本控制与燃料管理的浅析 [J]. 电气技术与经济, 2023, (01): 187-189+192.
[2] 刘习文, 彭卓寅, 胡新强, 等. 燃煤火电厂年度燃料成本最小化决策模型及应用 [J]. 中国电力, 2022, 55(06): 202-207.
[3] 刘峰邑. 火电厂的成本控制与燃料管理探析 [J]. 中国设备工程, 2021, (17): 46-47.
[4] 陆斌. 火力发电企业燃料成本管理探析 [J]. 建材与装饰, 2020, (16): 155-156.
[5] 姜尧. 加强火电厂燃料成本管理, 提高企业经济效益 [J]. 价值工程, 2019, 38(23): 47-48.
[6] 肖斌. 火电厂燃煤配煤掺烧技术研究 [J]. 内蒙古煤炭经济, 2022, (16): 55-57.

输电线路的运行维护与故障排除技术分析

尹广强, 贾晓伟

内蒙古电力(集团)有限责任公司锡林郭勒盟正蓝旗供电分公司, 内蒙古 锡林郭勒盟 027200

DOI:10.61369/EPTSM.2025070008

摘 要 : 中国各个地区都建设了大量的输电线路用于电能的分配和传输。然而, 在各种内外因素的影响下, 输电线路在运行初期往往容易发生各种故障, 其中短路、雷击等故障较为常见。这些故障一旦发生, 必须及时得到处理, 否则可能会导致灾难性的后果。因此, 研究和应用维护和故障排除技术, 以降低故障发生概率, 具有非常重要的意义。

关 键 词 : 输电线路; 运行维护; 故障排除技术

Technical Analysis on Operation, Maintenance and Fault Troubleshooting of Power Transmission and Distribution Lines

Yin Guangqiang, Jia Xiaowei

Xilin Gol League Zhenglan Banner Power Supply Branch of Inner Mongolia Power (Group) Co., Ltd., Xilin Gol League, Inner Mongolia 027200

Abstract : A large number of power transmission and distribution lines have been constructed across various regions in China for the distribution and transmission of electrical energy. However, influenced by various internal and external factors, power transmission and distribution lines are often prone to various faults during their initial operation period, with short circuits, lightning strikes, and other faults being relatively common. Once these faults occur, they must be addressed promptly; otherwise, they may lead to catastrophic consequences. Therefore, it is of great significance to research and apply maintenance and fault-elimination techniques to reduce the probability of faults occurring.

Keywords : power transmission and distribution lines; operational maintenance; fault-elimination techniques

引言

电力系统中输电线路是电力传输的重要组成部分。为了确保电力传输的质量和安全性, 加强输电线路的运行维护并及时排除线路故障是重要措施。通过综合应用智能化巡检、状态监测和故障处理技术, 可以有效提升输电线路的运行可靠性和安全性。

一、输电线路运行维护方法

1. 输电线路为何需要定期巡检。输电线路需要定期巡检是基于电力系统安全运行、设备可靠性维护及法规合规要求的综合考量, 保障设备安全运行, 预防性维护需求: 通过定期检查导线、绝缘子、金具等关键部件的磨损和老化情况, 可提前发现并处理潜在缺陷, 避免突发性故障。例如110kV及以下线路需每周至少1次常规巡视, 220kV及以上需每周2次。环境因素影响: 线路易受覆冰、雷击、强风等自然灾害威胁。通过巡检可及时调整防雷措施(如优化外绝缘配置)或处理覆冰隐患。满足法规与标准要求。强制性规定: 根据《电力供应与使用条例》, 供电企业须定期检查、维修电力设施, 消除安全隐患。《供电监管办法》明确要求城市年供电可靠率不低于99%, 电压合格率不低于95%。技术规范约束: 如《低压配电设计规范》GB50054-2011对配电

室环境、设备维护提出具体巡检标准。提升供电可靠性。故障快速响应: 通过分级巡视(如全面巡视与特殊巡视结合), 可缩短故障定位时间。阿拉善地区电网要求城市中心配电故障30分钟内到达现场。数据积累与分析: 周期性巡视采集的数据用于评估线路健康状态, 支撑智能化升级(如无人机巡检与PMS3.0系统结合)。特殊场景保障。重要用户供电: 对医院、数据中心等关键用户, 需增加巡检频次以确保供电连续性。电缆线路管理: 地下电缆因隐蔽性高, 需每月至少1次专项检查。定期巡检是电力系统"防患于未然"的核心手段, 通过制度化、标准化的维护流程, 可显著降低停电风险, 保障社会经济活动正常运转。

2. 输电线路巡检的内容。输电线路巡检是保障电力系统安全运行的核心工作, 线路本体状态检查, 导线系统, 检查导线断股、锈蚀、弧垂异常及连接点(线夹/跳线)过热变色现象, 观测导线舞动或脱冰跳跃等动态异常, 杆塔与基础, 检测杆塔倾

斜度、混凝土裂纹、钢筋外露等结构性损伤，确认塔材连接螺栓紧固状态及锈蚀情况，绝缘子与金具，检查绝缘子表面污秽、裂纹及闪络痕迹（复合绝缘子需评估硅橡胶老化程度），监测金具磨损变形、防振锤位移及拉线张力失衡问题。通道环境评估，障碍物排查，清除线路保护区内违章建筑、超高树木及易燃物堆放点，制止违规施工活动，监测爆破、机械作业等外力破坏风险，自然灾害防范，检查杆塔基础水土流失、山体滑坡及洪水冲刷情况，冰雪天气需重点监测导线覆冰厚度和绝缘子冰凌。附属设施检测，防雷接地装置，测量接地电阻值（通常要求 $\leq 1\Omega$ ），检查接地引下线锈蚀及避雷器连接可靠性，标识与防护，修复缺失/模糊的杆塔编号、相位标志及警示牌，维护防鸟设施、防洪装置等防护设备功能完整性。特殊工况专项排查，暴雨后重点检查基础塌陷及绝缘子污秽，负荷高峰时段使用红外测温仪检测导线连接点（预警值 90°C ），夜间巡视观测电晕及放电现象，通过系统化巡检可有效预防故障发生，确保供电可靠性达到99%以上标准要求。

3. 输配电线路日常维护的项目。线路本体维护，导线系统，检查导线断股、锈蚀、弧垂异常及连接点（线夹/跳线）过热变色现象，监测导线舞动或脱冰跳跃等动态异常，杆塔与基础，检测杆塔倾斜度、混凝土裂纹、钢筋外露等结构性损伤，紧固松动螺栓（需使用扭矩扳手）及防腐处理，绝缘子与金具，清扫绝缘子表面污秽（特别关注PRTV涂料状态），检查金具磨损变形、防振锤位移及拉线张力。通道环境管理，障碍物清理，清除保护区内违章建筑、超高树木（需维持安全距离），制止违规施工活动，监测爆破等外力破坏风险，自然灾害防范，检查杆塔基础水土流失、山体滑坡及洪水冲刷，冰雪天气需监测导线覆冰厚度（预警值：10mm）。附属设施检测，防雷接地系统，测量接地电阻值（标准 $\leq 1\Omega$ ）及避雷器连接可靠性，检查接地引下线锈蚀情况。标识与防护，修复缺失/模糊的杆塔编号、相位标志及警示牌，维护防鸟设施、防洪装置等功能完整性。特殊工况专项维护，暴雨后重点检查基础塌陷及绝缘子污秽，负荷高峰时段红外测温（连接点预警值 90°C ），夜间巡视观测电晕及放电现象。智能化维护手段，无人机巡检（可识别导线断股、绝缘子裂纹），带电检测技术（如绝缘子无损探伤）。安全管控措施，严格执行“两票三制”（工作票/操作票/监护制），配备个人保安线及防坠落装置，定期开展安全培训（含蛇药、外伤急救），通过上述维护可实现线路故障率降低30%以上，需结合《架空输电线线路运行规程》(DL/T741)等标准执行。

二、输配电线路维护周期和策略如何制定

输配电线路的维护周期和策略制定需综合考虑设备特性、环境因素及运行工况，

1. 核心维护周期标准。高压线路检测，1-10kV线路高压登杆检查每5年至少1次，木杆木横担线路每年1次，导线连接线夹检查每5年至少1次，杆塔基础维护，铁塔金属基础锈蚀后每年检查1次，正常情况每5年1次，混凝土杆根部在盐碱低洼地区每5年

检查1次，异常时加密至每年1次，导线与绝缘系统，悬式绝缘子绝缘电阻测试按需进行，导线弧垂、限距测量根据巡视结果动态调整。

2. 策略制定依据。设备差异化维护，变压器需定期油样检测和红外热成像分析，开关柜需高频次机械动作测试及接触电阻检测，电缆系统应周期性开展绝缘电阻检测与局放监测，环境适应性调整，高温地区加密红外测温频率，沿海高湿环境强化防锈措施并缩短维护间隔，多尘区域增加设备表面放电检测频次，负载工况匹配，频繁操作设备（如配电自动化开关）需高频次机构灵活性检查，高负载线路需增加升温监测和热成像检查。

3. 智能化维护手段。采用无人机巡检结合AI图像分析技术，部署在线监测装置实现导线温度、舞动等实时监控，建立电力物联网系统进行全景全息感知。

4. 特殊场景管理。防洪设备每年汛期前专项检查，防山火区域配置专用监测装置，通过上述标准化周期与动态策略结合，可提升线路故障预警能力30%以上，具体执行需参照DL/T741等规程要求。

三、输配电线路故障排除技术

1. 故障定位技术。控制回路诊断，采用逐级电阻测量法检测回路通断，通过启动按钮状态判断交流接触器动作逻辑（A-C点间电阻无穷大时，依次测试B/D/E/F点），对复杂配电柜线路，可结合线号标识定位故障元件（如停止按钮、接触器、热继电器），主回路分析，接触器吸合而电机不转时，重点检查断路器、熔断器及热继电器状态，红外测温仪检测导线连接点温度（预警阈值 90°C ），识别接触不良导致的过热故障。

2. 特殊环境故障处理。覆冰故障应对，监测导线覆冰厚度（ $> 10\text{mm}$ 时启动融冰程序），严禁登塔敲击除冰，采用V串复合绝缘子预防风偏故障，直线耐张塔配置应对脱冰冲击，雷击防护措施，优化外绝缘配置（保护角控制在 $\pm 10^{\circ}$ 以内），山区线路采用双避雷线设计，档距中央地线垂度需满足 $S_0 \leq C_1/2L + 2.5\text{m}$ ，防止雷击导致相间短路。

3. 智能化检测技术。在线监测系统，部署导线舞动监测装置（风速 $> 15\text{m/s}$ 时启动预警），绝缘子污秽度监测结合湿度传感器（湿度 $> 90\%$ 时触发预警），带电检测手段，局放检测仪排查电缆头放电缺陷，AI图像识别技术检测导线断股（ ≥ 3 股），无人机巡检结合红外热成像技术，识别隐蔽发热点。

4. 安全操作规范。执行“两票三制”制度，高压作业前验电并挂接地线，防鸟害措施：横担端部安装防鸟刺，绝缘子串加装防鸟挡板，故障抢修时使用双重名称标识，确保操作安全。

5. 典型故障案例分析。开关柜内部短路，带电显示器传感器绝缘薄弱导致相间短路（案例中B相传感器烧损最严重），梅花触头接触不良引发电弧放电，导致真空断路器铜触指烧损，小电流接地系统故障，单相接地时非故障相对地电压升高，故障点电流为容性电流三倍，中性点经消弧线圈接地可降低故障危害，所有操作需参照DL/T741、DL/T5G92等规程执行，复杂故障建议

结合热成像仪、暗线定位器等现代工具辅助排查。

6. 如何预防输配电线路故障发生。预防输配电线路故障需采取多维度综合措施，结合技术防护与管理优化，设备与线路防护措施，绝缘维护，定期清洁绝缘子表面污秽（空气湿度 > 90% 时需加强监测），采用 V 串复合绝缘子预防风偏，山区线路配置双避雷线（保护角 $\pm 10^\circ$ 以内），环境风险控制，清除保护区内超高树木（满足安全距离要求）及易燃堆积物，覆冰预警（厚度 > 10mm 启动融冰程序，严禁登塔敲击）。智能化监测技术，部署导线舞动监测装置（风速 > 15m/s 时触发预警），应用红外热成像技术检测连接点过热（预警温度 90℃），无人机巡检结合 AI 识别导线断股（ ≥ 3 股）。安全管理规范，操作流程，故障抢修需使用双重名称标识并悬挂警示牌，严格执行“两票三制”，高压作业前验电并挂接地线，人员培训，加强电气安全知识培训（典型案例：违章接线导致触电事故），定期开展防雷、防污闪等专项演练。应急体系建设，制定分级应急预案（含设备老化、山火等场景），建立故障快速响应机制（抢修单需明确许可时间及安全措施），防鸟害需在横担端部加装防鸟刺，绝缘子串增设防鸟挡板。所有措施应符合 DL/T741 等规程要求。

7. 输配电线路故障诊断的方法。以下是输配电线路故障诊断的常用方法及技术要点：常规检测手段，分段检测法，采用万用表分段测量线路通断性（如插座线路中间区域火零线分离测量），通过缩小故障范围提升排查效率（如过载保护器分段测试定位漏电点），^[1]回路分析法，控制线路故障检测：通过启动按钮状态判断接触器动作逻辑（A-C 点电阻测量），主回路故障排查：重点检查断路器、熔断器及热继电器状态。仪器检测技术，红外测温技术，检测导线连接点温度异常（预警阈值 90℃），适用于隐蔽发热点定位（如电缆头放电缺陷），电缆故障测距，采用低压脉冲法测试电缆全长（需连接 AC220V 电源），结合接地线夹与数据线夹进行精准定位。智能化诊断系统，部署导线舞动监测

装置（风速 > 15m/s 预警），应用 AI 图像识别技术检测导线断股（ ≥ 3 股标准），分布式故障诊断方案实现快速定位。特殊场景处理，雷击故障判断，500kV 线路两相接地短路需排查雷电反击可能，零地线接反检测，通过测量火线-零线/地线电压差异（正常应为 220V），所有操作需符合 DL/T741 规程要求，复杂故障建议结合热成像仪、暗线定位器等工具辅助排查。

四、输配电线路新技术应用

输配电线路新技术应用已进入智能化、自动化新阶段，主要技术突破与应用场景如下：

1. 智能作业装备应用。自主带电作业机器人，双臂机器人具备智能感知定位功能，可自主完成剥口、夹线、紧固线夹等操作（机械臂精度达 0.5mm），通过 5G 远程操控，作业效率提升 40% 以上，大幅降低人员高空作业风险，直升机带电作业，适用于跨山、跨江河等复杂地形线路应急抢修，实现不停电作业，地区首次应用绞车吊椅法完成 500kV 线路带电作业。^[2]

2. 超高压技术创新。750kV 超高压线路成功实施合成绝缘子带电更换（单串重 48kg），突破远距离大容量输电技术瓶颈，实现低损耗电力传输。

3. 智能化运维体系。输电线路“智慧大脑”系统突破线路增容瓶颈，多元智能装备集成应用，将传统 5 天检修缩短至 3 天完成，电网已实现机器人带电搭接作业常态化，标志着人机协同运维模式成熟。

总之，针对线路单相接地故障，电厂应优化输配电线路架构和做好线路技术巡检，同时也要采取有效的短路故障检测和排除技术。电厂还应通过安装避雷器、避雷线和提高线路绝缘水平等措施，降低雷击对输配电线路运行造成的危害，以保障电力系统的稳定运行。

参考文献

[1] 张海峰. 电力输配电线路的安全运行维护及故障排除技术探讨. 2023.

[2] 赵福鹏. 电力输配电线路故障排除与运行维护技术研究. 2024.

人工智能算法在光伏逆变器运维检修故障诊断中的实践与验证

李雄飞

云南金元新能源有限公司，云南 昆明 650200

DOI:10.61369/EPTSM.2025070011

摘 要： 光伏逆变器作为光伏发电系统的核心转换设备，其运行稳定性决定着整个光伏电站的发电效率与经济效益。但传统故障诊断方式过于依赖人工经验，其存在着诊断滞后、准确率低、运维成本高等问题。本文则以人工智能算法为技术核心，结合光伏电站的运维实践，从数据采集预处理、算法模型选型适配、诊断系统搭建落地、现场验证优化四个维度入手，系统地探索了人工智能算法在光伏逆变器故障诊断中的实践应用路径。经过多个光伏电站的现场验证表明，基于人工智能算法的故障诊断系统能够实现故障的快速识别、准确定位与提前预警，该系统可以显著地提升运维检修效率，并降低故障的停机时间。

关 键 词： 人工智能算法；光伏逆变器；故障诊断；运维检修；实践应用

The Practical Application and Validation of Artificial Intelligence Algorithms in Fault Diagnosis for Photovoltaic Inverter Operation and Maintenance

Li Xiong fei

Yunnan Jinyuan New Energy Co., Ltd., Kunming, Yunnan 650200

Abstract： As a core conversion device in photovoltaic power generation systems, the operational stability of photovoltaic inverters determines the overall power generation efficiency and economic benefits of the entire photovoltaic power station. However, traditional fault diagnosis methods overly rely on human experience, which leads to issues such as delayed diagnosis, low accuracy, and high maintenance costs. This paper focuses on artificial intelligence algorithms as the technological core, combining the maintenance practices of photovoltaic power stations. It systematically explores the practical application path of artificial intelligence algorithms in the fault diagnosis of photovoltaic inverters from four dimensions: data collection and preprocessing, algorithm model selection and adaptation, diagnostic system construction and implementation, and on-site validation and optimization. Field validation in multiple photovoltaic power stations has shown that the fault diagnosis system based on artificial intelligence algorithms can achieve rapid fault identification, accurate localization, and early warning. This system significantly enhances maintenance and repair efficiency and reduces downtime caused by faults.

Keywords： artificial intelligence algorithms; photovoltaic inverters; fault diagnosis; maintenance and repair; practical applications

引言

人工智能算法在光伏逆变器故障诊断中应用的核心逻辑是通过“数据驱动”，来实现故障的智能识别。首先采集逆变器在正常运行和故障状态下的各类运行参数，构建了涵盖不同故障类型的数据集；其次利用算法对数据集进行学习，从中提取不同故障的特征模式，建立起故障诊断模型；最后将实时采集的运行数据输入模型，模型再通过对比分析判断出设备是否存在故障，并识别故障类型、定位故障部位。上述整个过程无需人工干预，完美的实现了故障诊断的自动化、智能化，也就是说人工智能技术的快速发展，为光伏逆变器故障诊断提供了全新解决方案。尽管最近几年国内外学者在人工智能算法应用于光伏逆变器故障诊断方面开展了大量的研究，但大多数研究依然停留在理论仿真阶段，缺乏了大规模的现场实践验证，因此算法的实用性、稳定性仍需进一步检验。本文则结合多个光伏电站的实际运维案例，系统地阐述了人工智能算法在光伏逆变器故障诊断中的实践应用路径，并通过现场验证分析了其应用的效果，为技术落地提供实践层面的参考。

作者简介：李雄飞（1995.03-），男，云南曲靖人，大专，助理工程师，研究方向：从事光伏电站运行检修工作。

一、人工智能算法在光伏逆变器故障诊断中的实践应用

（一）多源数据采集与预处理

显而易见地，数据才是人工智能算法运行的基础，高质量的数据直接决定了故障诊断模型的性能^[1]。对此在实践中，需构建多源数据采集体系，并进行系统的预处理，如此才能为算法建模提供可靠的数据支撑。从数据采集环节入手，首先需要明确采集参数的类型，通常涵盖了逆变器的电气参数、环境参数、设备状态参数三大类。其中电气参数包括了输入直流电压、直流电流、输出交流电压、交流电流、有功功率、无功功率、功率因数等，而这些参数的作用是直接地反映出逆变器的电能转换状态；环境参数则包括了设备运行温度、环境湿度、光照强度、风速等，主要用于分析环境因素对设备故障的影响；设备状态参数由风扇转速、模块温度、电容电压、继电器状态等组成，其可直接体现出设备关键部件的运行状态。其次为确定采集的设备与方式，建议采用本地采集结合远程传输的模式，先在逆变器内部安装传感器、智能采集模块，以此实时地采集各类参数，之后通过工业以太网、4G/5G无线网络将采集到的数据传输至电站本地数据服务器，再借助云平台实现数据的远程存储与访问。同时针对老旧逆变器缺乏数据采集功能的问题，可以通过加装外置采集装置，来实现数据采集的全覆盖^[2]。最后是制定采集频率的标准，一般根据参数的变化特性设定不同的采集频率即可，例如电气参数采集频率设定为秒级、环境参数设定为分钟级、设备状态参数设定为分钟级，该环节的关键是既能捕捉故障瞬间的参数变化，又避免数据冗余。

数据预处理环节则需要完成数据清洗、数据集成、特征提取三项工作。第一步是数据清洗，重点在于处理采集过程中出现的缺失值、异常值和重复值。具体来说：缺失值可以根据数据类型采用均值填充、中位数填充或相邻数据插值的方式补充；因传感器故障、传输干扰导致的异常值通过设定合理的阈值范围进行识别，再结合设备运行逻辑进行修正或删除即可；对于重复值，可直接进行去重处理。接着是数据集成环节，该环节是将来自不同传感器、不同逆变器、不同时间段的数据按照统一的格式进行整合，使其形成标准化的数据集，目的是方便算法调用。此外便是特征提取，该环节需要从原始数据中提取能够反映出故障特征的关键信息，例如通过分析电压、电流的波形变化提取谐波特征，或者是通过分析温度变化趋势提取温度梯度特征，以及通过分析功率波动提取功率突变特征等等，要在减少数据维度的同时突出故障特征，进而提升算法建模的效率^[3]。

（二）算法模型选型与适配

因为光伏逆变器的故障类型多样，且不同故障的特征差异较大，所以需要基于故障类型、数据特点选择合适的人工智能算法，并进行针对性适配，务必确保模型能够精准地识别各类故障。现阶段实践中，常用的算法包括了机器学习算法和深度学习算法，但应该根据具体的诊断场景进行组合应用。

面对于单一性、特征明显的故障，如直流过压、交流过流、

风扇故障等，可以采用机器学习算法中的分类算法进行诊断。即先选择支持向量机、随机森林、梯度提升树等算法作为基础模型。支持向量机适用于小样本数据，其能够在高维空间中构建分类超平面，因此对线性不可分的故障特征具有良好的分类效果；随机森林则通过多棵决策树的集成学习，能够降低过拟合风险，有利于提高诊断的准确率；而梯度提升树通过迭代优化损失函数，对故障特征的细微差异具有较强的捕捉能力。接着需要进行模型适配优化，此部分需根据数据集的特点来调整算法参数，如调整支持向量机的核函数类型、正则化参数，和调整随机森林的树数量、树深度等等。同时通过特征选择算法筛选对于故障诊断贡献度高的特征，从中减少无关特征的干扰，以此提升模型的运行速度。

对于功率器件老化、电容失效、控制模块异常等复杂性、非线性的故障来说，建议采用深度学习算法进行诊断。原因是深度学习算法能够自动学习数据中的深层特征，无需额外人工提取特征，所以适用于处理复杂故障的模糊特征。如今常用的算法有卷积神经网络、循环神经网络、自编码器等：卷积神经网络擅长处理波形、图像类数据，它可将电压、电流波形转换为二维图像，之后通过卷积层、池化层提取故障特征，进而实现故障分类；而循环神经网络能够捕捉数据的时序特征，更为适用于分析逆变器运行参数随时间的变化规律，它能够识别具有时序特性的故障，如功率器件热老化故障；自编码器则通过无监督学习对正常运行数据进行建模，当输入故障数据时，重构误差会得到显著地增大，从而实现故障的检测与识别，尤其适用于未见过的新型故障。实际在模型适配的过程中，一定要根据故障数据的类型选择合适的网络结构，例如针对波形类数据采用卷积神经网络，针对时序数据则采用循环神经网络。同步再通过迁移学习将已训练好的模型参数迁移到新的诊断场景中，即可减少新模型的训练数据量，进而缩短训练时间，最终提升模型在不同型号逆变器上的适配性^[4]。

如果面对复合型的故障，就是多种故障同时发生的情况，可以采用机器学习+深度学习融合算法进行诊断。第一步通过深度学习算法中的自编码器对运行数据进行异常检测，判断出设备是否存在故障，第二步将异常数据输入机器学习分类模型，识别出其中包含的单一故障类型，第三步是通过规则推理引擎结合逆变器的工作原理，判断其是否存在着复合型故障，并确定故障的组合类型。^[6-10]

（三）诊断系统搭建与落地

算法模型需要通过系统集成才能实现工程化落地，此系统要构建集数据采集、模型运算、故障预警、诊断报告于一体的智能故障诊断系统，才能确保算法在实际光伏电站运维中发挥出应有的作用。

1. 系统架构设计方面：边缘层部署在光伏电站本地，再由边缘计算网关、数据采集终端组成负责实时采集逆变器运行数据、对数据进行初步地处理和运行轻量化的诊断模型，用于实现故障的实时检测与本地预警。此类架构能够减少数据的传输量，有效地降低了网络延迟，确保对紧急故障能够快速地进行响应。而云层部

署在云端服务器，主要负责接收边缘层上传的历史数据和诊断结果运行复杂的深度学习模型和融合模型，与进行故障的深度诊断、类型识别和原因分析，同时云端平台还具有提供数据存储、模型更新、远程监控等功能。

2.系统功能开发：该方面重点实现以下四大核心的功能。一是实时监测功能，即通过可视化界面实时地展示逆变器的运行参数、设备状态，以图表形式直观地呈现出参数变化的趋势，便于运维人员实时掌握设备的运行情况。二是故障预警功能，一旦边缘层模型检测到参数异常或故障征兆，系统会立即发出预警信号，并以声光报警、短信通知、APP推送等方式提醒运维人员，还会在界面上标注异常参数和可能的故障类型。三是故障诊断功能，接着云端模型对异常数据进行深度分析，确定出故障类型、故障部位、故障原因，并给出详细的诊断报告，其中包括故障发生时间、特征参数、影响范围等信息。四是运维指导功能，基于诊断结果，系统将自动地匹配对应的维修方案，并提供维修步骤、所需工具、备件清单等指导信息，同时记录维修的过程，进而形成运维档案。

3.系统集成部署：系统集成部署部分需与光伏电站现有运维体系进行无缝对接。首先需要完成硬件集成，就是将数据采集终端、边缘计算网关与逆变器的控制接口、传感器接口连接，以此确保数据采集的稳定性，并且还需将系统与电站的监控中心、报警系统、门禁系统等现有设施进行联动，旨在实现运维流程的一体化。其次是进行软件适配，需根据电站的逆变器型号、数量、运行环境，对于诊断系统的参数阈值、模型参数进行调整，务必确保系统能够适应电站的实际情况，此时还需开发与电站现有管理软件的数据接口，进而实现数据共享与协同工作。最后为开展现场调试，通常在系统部署完成后要进行为期1-3个月的现场调

试，经由模拟各类的故障场景来测试系统的诊断准确率、响应速度、稳定性等性能指标，之后根据调试结果对系统进行优化和调整^[5]。

（四）现场验证与优化迭代

在诊断系统落地之后，还需在实际光伏电站中进行长期的现场验证，目的是通过实践检验系统的性能，再根据验证结果进行持续地优化迭代，以确保系统能够满足运维实际需求。

实际在验证过程管理中，需要建立数据记录、故障跟踪、效果评估的闭环机制，对此需安排专人负责记录系统的诊断结果、实际故障情况、维修过程及效果，将其整理形成详细的验证档案，再对系统诊断为故障但实际未发生故障的误判案例，以及实际发生故障但系统未识别的漏判案例进行重点分析，查找其中的原因，最后定期地组织运维人员、算法工程师、设备厂家召开验证分析会，重点是对验证数据进行汇总分析，以此评估系统的应用效果。

二、结语

人工智能算法为光伏逆变器故障诊断提供了高效、精准的技术方案，本文经研究明确，通过多源数据采集预处理、算法模型选型适配、诊断系统搭建落地、现场验证优化的实践路径，能够实现故障的实时监测、快速诊断与提前预警，显著提升光伏电站的运维效率和经济效益。在实践中也表明，人工智能技术在光伏运维领域具有广阔的应用前景，但目前仍处于发展阶段，尤其是在模型泛化能力、数据样本、系统可靠性等方面存在着不足。

参考文献

- [1] 金成. 基于机器学习的光伏发电设备故障诊断方法研究 [D]. 青海省：青海大学，2023.DOI: 10.27740/d.cnki.gqhdx.2023.000916.
- [2] 龙宏宇. 基于端到端数据驱动的光伏逆变器系统 IGBT 故障诊断技术研究 [D]. 安徽省：合肥工业大学，2021.DOI: 10.27101/d.cnki.ghfgu.2021.000309.
- [3] 尹德扬. 分布式光伏智能化状态评估及运维策略研究 [D]. 江苏省：东南大学，2022.DOI: 10.27014/d.cnki.gdnau.2022.000134.
- [4] 潘新奇. 体外诊断仪器远程管理云平台及智能故障预测 [D]. 江苏省：东南大学，2023.DOI: 10.27014/d.cnki.gdnau.2023.000422.
- [5] 王爱青，王刚，许聪聪. 化工电气设备的检修与运维探究 [J]. 消费电子，2025，(04): 95-97.
- [6] 盛宏伟，张杰锋，汪卫东，等. 基于犹豫模糊矩阵与变异算子的变电设备故障检修仿真 [J]. 计算技术与自动化，2024，43(01): 38-43.DOI: 10.16339/j.cnki.jsjsyzdh.202401006.
- [7] 林蔚青. 特高压变压器运行参量预测与状态异常检测研究 [D]. 福州大学，2022.DOI: 10.27022/d.cnki.gfzhu.2022.000519.
- [8] 刘杰鑫. 基于改进深度置信网络的轨道电路故障检测方法研究 [D]. 兰州交通大学，2023.DOI: 10.27205/d.cnki.gltcc.2023.001697.
- [9] 宋杰. 基于红外成像的光伏系统智能诊断研究 [D]. 华北电力大学（北京），2022.DOI: 10.27140/d.cnki.ghbbu.2022.000490.
- [10] 王乐. 矿井交直混网 127V 变频驱动系统快速断电安全技术研究 [D]. 中国矿业大学（北京），2021.DOI: 10.27624/d.cnki.gzkbu.2021.000028.

超超临界 1000MW 塔式锅炉大板梁吊装关键技术研究

沈奕男, 刘朝青, 张欲晓, 郭晓坤, 姜有治, 吕建华, 范国兵, 齐继玄

山东电力工程咨询院有限公司, 山东 济南 250013

DOI:10.61369/EPTSM.2025070012

摘 要 : 近年来,我国燃煤火力发电机组行业经历了迅猛的发展,尤其是大容量机组的数量增长显著,新建项目的平均单机容量显著提升。目前,我国存在众多在建及规划中的超超临界 1000MW 发电机组。随着国内该行业快速发展的步伐,机组主体设计结构亦发生了显著变化,表现为设备尺寸的增大、结构复杂性的提升、超大件数量的增多以及平均单件设备重量的上限提高。在这些变化中,锅炉的大板梁作为超长、超重的典型大型设备,在安装过程中尤为关键,其卸车和吊装过程逐渐成为锅炉安装施工中的核心环节。^[1]

关 键 词 : 锅炉; 超超临界; 大板梁

Research on Key Technology of Lifting Large Plate Beam in Supercritical 1000MW Tower Boiler

Shen Yinan, Liu Chaoqing, Zhang Yuxiao, Guo Xiaokun, Jiang Youzhi, Lv Jianhua, Fan Guobing, Qi Jixuan

Shandong Electric Power Engineering Consulting Institute Corp., LTD, Jinan, Shandong 250013

Abstract : In recent years, China's coal-fired power generation sector has experienced rapid development, particularly marked by significant growth in large-capacity units and notable improvements in the average unit capacity of new projects. Currently, numerous ultra-supercritical 1000MW generating units are under construction or planned nationwide. With the accelerated progress of this industry, fundamental design changes have emerged in unit structures, including increased equipment dimensions, enhanced structural complexity, greater quantities of oversized components, and higher upper limits for average unit weight. Among these developments, boiler plate beams—characterized as ultra-long and heavy-duty equipment—have become critical during installation processes. Their unloading and hoisting operations have increasingly become pivotal elements in boiler installation construction.

Keywords : boiler; supercritical; large plate beam

一、大板梁概况

山东能源灵台 2×1000 兆瓦调峰煤电项目锅炉设计为超超临界燃煤发电机组。锅炉是哈尔滨锅炉厂设计制造,锅炉型式为:超超临界参数变压直流炉、单炉膛、一次中间再热、平衡通风、全紧身封闭布置、固态排渣、全钢构架、全悬吊结构、切圆燃烧、塔式锅炉,锅炉型号为 HG-3178/30.35-YM。

钢结构在前后方向的尺寸为 65.8 米,共划分为 9 排,依次以 G1、G2、G2.1、G3、G4、G4.1、G5、G6、G7 进行标记;在左右方向的尺寸为 52.4m,共划分为 11 列,依次以 L1、L1.1、L2、L2.1、L2.2、L3、L3.1、L3.2、L4、L4.1、L5 进行标记。^[2]

锅炉钢架顶板系统的设计中包含了 8 件大板梁,分别标记为 DBL-1、DBL-2、DBL-3、DBL-4。具体而言,G2 轴线之上配置了 DBL-1 板梁,G3 轴线之上配置了 DBL-2 板梁,G4 轴线之上配置了 DBL-3 板梁,而 G5 轴线之上配置了 DBL-4 板梁。其中,DBL-1 板梁由两件左右对称的梁组成,而 DBL-2、DBL-

3、DBL-4 板梁则构成了上下叠梁结构。锅炉板梁顶标高达到

Hmax=130.16m。见图 1

序号	名称	尺寸(长×宽×高 mm)	单重(kg)	数量	顶标高(mm)	备注
1	DBL-1	15976×500×3500mm	19801	2	129740	正反各一
2	DBL-2	33240×1600×3800mm	112512.9	1	126360	下叠梁
3	DBL-2	33240×1600×3800mm	119396.2	1	130160	上叠梁
4	DBL-3	33240×1500×3800mm	105318.5	1	126360	下叠梁
5	DBL-3	33240×1500×3800mm	111971.4	1	130160	上叠梁
6	DBL-4	31948×950×2300mm	47699.2	1	126460	下叠梁
7	DBL-4	31948×950×3700mm	63113.6	1	130160	上叠梁

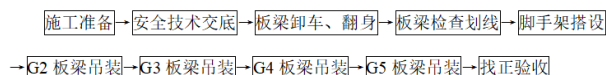
图 1

二、吊装机械

炉膛内布置一台 ST3330-160t 型塔式起重机, 起重臂长为 74.5m (有效工作半径 70m), 顶升后最终为 2 节基础节 + 6 节加强节 + 18 节标准节总高度为 163.3m, 在锅炉炉左 L2-L3 之间距 L2 列 10m, G3-G4 之间距 G4 排 5.75m; 炉右固定端布置一台 ZSC70240 塔式起重机, 在 L5 右侧距 L5 列 6.5m, G4-G5 之间距 G4 排 5.5m, 最大标准节安装高度为 162m, 最大工作幅度为 70m, 最大起重量为 80t, 对应最大工作幅度 25m。^[3]

所有板梁使用 160t 塔吊单独卸车, 板梁上叠梁卸车后由 160t 塔吊进行翻身, 板梁翻身时由 160t 塔吊负责吊装起吊耳, 翻身时利用板梁受力点与下翼板支撑点间的力矩将板梁扳起竖立, 由 80t 塔吊吊装翻身吊耳进行辅助, 防止板梁突然反向倾倒、窜动, 在翻身时要在板梁底部垫好木进行缓冲。^[4]

三、大板梁吊装工艺技术

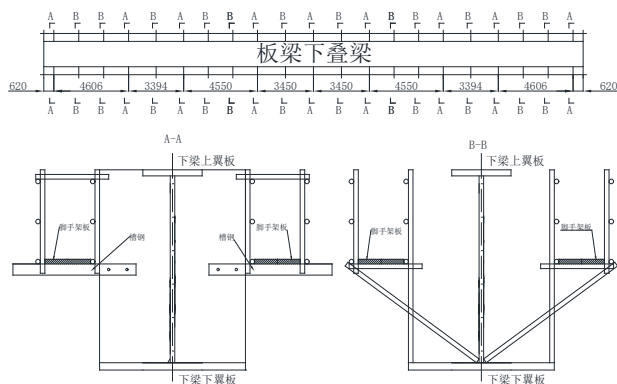


(一) 板梁翻身

板梁上叠梁翻身完成之后使用脚手架钢管、槽钢加固, 防止板梁倾倒, 加固完成之后需要在板梁上搭设脚手架, 使用脚手架管和扣件使脚手架生根在上翼板上, 然后做好吊装就位准备。^[5]

(二) 脚手架搭设

板梁下梁在起吊前, 搭设供安装上梁时使用的脚手架。下梁脚手架采用专用扣件固定在板梁筋板上, 在脚手架管上部铺设架板, 并铺设安全网, 脚手架总重为 2.7t。上梁起吊前在大板梁上翼板搭设安全围栏。^[6]



脚手架横杆抗弯强度校核:

单侧脚手架重 1350kg, 两名施工人员重 150kg, 工具重 10kg, 高强螺栓重 100kg, 总重 1610kg, 脚手架横杆共 21 根, 规格为 $\Phi 48.3 \times 3.6$, 抗弯截面系数 $W_x = 5260 \text{ mm}^3$ 。

脚手架横杆所受弯矩 $M_{\max} = 0.5 \times (1610 \div 21 \times 9.8 \div 500) \times 500^2 = 187833 \text{ Nmm}$

最大弯曲应力 $\sigma = M_{\max} / W_x = 35.71 \text{ MPa} \leq [\sigma] = 113 \text{ MPa}$ 。^[7]

(三) DBL-4 板梁吊装

DBL-4 下叠梁重 47.7t, 加脚手架重量 2.7t, 共 50.4t, 长度 31.948m, 由 160t 塔吊单车卸车吊装就位, 起吊、就位半径 $R \leq 43 \text{ m}$, $Q_{\text{额}} = 64.07 \text{ t}$, $\eta = (50.4 + 5) \div 64.07 \times 100\% = 86.47\%$, 其中 5t 为塔吊超过自由高度钢丝绳及起吊索具重量, 选用 35t 弓形卡环, $\Phi 68 \times 30 \text{ m}$ 钢丝绳一对 4 股起吊, 钢丝绳型号为 $6 \times 37 \text{ S} + \text{FC}$, 公称抗拉强度为 1770MPa, 根据《粗直径钢丝绳》(GB/T20067) 查的钢丝绳破断拉力为 2700kN, 钢丝绳与水平面夹角为 69° , 钢丝绳安全系数 $n = 2700 \div (50.4 \times 9.8 \div 4 \div \sin 69^\circ) = 20.41$, 满足要求。

DBL-4 上叠梁重 63.11t, 加脚手架重量 1t, 共 64.11t, 长度 31.948m, 在炉膛零米由 160t 塔吊单车卸车吊装就位, 起吊、就位半径 $R \leq 20 \text{ m}$, $Q_{\text{额}} = 160 \text{ t}$, $\eta = (64.11 + 5) \div 160 \times 100\% = 43.19\%$, 其中 5t 为塔吊超过自由高度钢丝绳及起吊索具重量。选用 35t 弓形卡环, $\Phi 68 \times 30 \text{ m}$ 钢丝绳一对 4 股起吊, 钢丝绳与水平面夹角为 69° , 钢丝绳安全系数 $n = 2700 \div (64.11 \times 9.8 \div 4 \div \sin 69^\circ) = 16.05$, 满足要求。

(四) DBL-3 板梁吊装

DBL-3 下叠梁重 105.32t, 加脚手架重量 2.7t, 共 108.02t, 长度 33.24m, 在炉膛零米由 160t 塔吊单车卸车吊装就位, 起吊、就位半径 $R \leq 20 \text{ m}$, $Q_{\text{额}} = 160 \text{ t}$, $\eta = (108.02 + 5) \div 160 \times 100\% = 70.64\%$, 其中 5t 为塔吊超过自由高度钢丝绳及起吊索具重量, 选用 55t 弓形卡环, $\Phi 68 \times 30 \text{ m}$ 钢丝绳一对 4 股起吊, 钢丝绳型号为 $6 \times 37 \text{ S} + \text{FC}$, 公称抗拉强度为 1770MPa, 根据《粗直径钢丝绳》(GB/T20067) 查的钢丝绳破断拉力为 2700kN, 钢丝绳与水平面夹角为 69° , 钢丝绳安全系数 $n = 2700 \div (108.02 \times 9.8 \div 4 \div \sin 69^\circ) = 9.52$, 满足要求。

DBL-3 上叠梁重 111.97t, 加脚手架重量 1t, 共 112.97t, 长度 33.24m, 在炉膛零米由 160t 塔吊单车卸车吊装就位, 起吊、就位半径 $R \leq 20 \text{ m}$, $Q_{\text{额}} = 160 \text{ t}$, $\eta = (112.97 + 5) \div 160 \times 100\% = 73.73\%$, 其中 5t 为塔吊超过自由高度钢丝绳及起吊索具重量。选用 55t 弓形卡环, $\Phi 68 \times 30 \text{ m}$ 钢丝绳一对 4 股起吊, 钢丝绳与水平面夹角为 69° , 钢丝绳安全系数 $n = 2700 \div (112.97 \times 9.8 \div 4 \div \sin 69^\circ) = 9.1$, 满足要求。

(五) DBL-2 板梁吊装

DBL-2 下叠梁重 112.51t, 加脚手架重量 2.7t, 共 115.21t, 长度 33.24m, 在炉膛零米由 160t 塔吊单车卸车吊装就位, 起吊、就位半径 $R \leq 20 \text{ m}$, $Q_{\text{额}} = 160 \text{ t}$, $\eta = (115.21 + 5) \div 160 \times 100\% = 75.13\%$, 其中 5t 为塔吊超过自由高度钢丝绳及起吊索具重量, 选用 55t 弓形卡环, $\Phi 68 \times 30 \text{ m}$ 钢丝绳一对 4 股起吊, 钢丝绳型号为 $6 \times 37 \text{ S} + \text{FC}$, 公称抗拉强度为 1770MPa, 根据《粗直径钢丝绳》(GB/T20067) 查的钢丝绳破断拉力为 2700kN, 钢丝绳与水平面夹角为 69° , 钢丝绳安全系数 $n = 2700 \div (115.21 \times 9.8 \div 4 \div \sin 69^\circ) = 8.93$, 满足要求。

DBL-2 上叠梁重 119.4t, 加脚手架重量 1t, 共 120.4t, 长度 33.24m, 在炉膛零米由 160t 塔吊单车卸车吊装就位, 板梁起吊超过 107.85m 后, 塔吊向炉左旋转, L1 至 L2 之间已缓装,

板梁从 L1 至 L4 之间起吊超过 DBL-2 下叠梁,起吊、就位半径 $R \leq 20\text{m}$, $Q_{\text{额}} = 160\text{t}$, $\eta = (120.4 + 5) \div 160 \times 100\% = 78.375\%$, 其中 5t 为塔吊超过自由高度钢丝绳及起吊索具重量。选用 55t 弓形卡环, $\Phi 68 \times 30\text{m}$ 钢丝绳一对 4 股起吊, 钢丝绳与水平面夹角为 69° , 钢丝绳安全系数 $n = 2700 \div (120.4 \times 9.8 \div 4 \div \sin 69^\circ) = 8.54$, 满足要求。

(六) DBL-1 板梁吊装

DBL-1 反板梁重 19.8t, 长度 15.976m, 由 160t 塔吊单车卸车吊装就位, 起吊、就位半径 $R \leq 55\text{m}$, $Q_{\text{额}} = 45.92\text{t}$, $\eta = (19.8 + 5) \div 45.92 \times 100\% = 54\%$, 其中 5t 为塔吊超过自由高度钢丝绳及起吊索具重量, 选用 35t 弓形卡环, $\Phi 68 \times 30\text{m}$ 钢丝绳一对 4 股起吊, 钢丝绳型号为 $6 \times 37\text{S} + \text{FC}$, 公称抗拉强度为 1770MPa, 根据《粗直径钢丝绳》(GB/T20067) 查的钢丝绳破断拉力为 2700kN, 钢丝绳与水平面夹角为 70° , 钢丝绳安全系数 $n = 2700 \div (19.8 \times 9.8 \div 4 \div \sin 70^\circ) = 52.3$, 满足要求。

DBL-1 正板梁重 19.8t, 长度 15.976m, 由 80t 塔吊单车卸车吊装就位, 起吊、就位半径 $R \leq 40\text{m}$, $Q_{\text{额}} = 48\text{t}$, $\eta = (19.8 + 2) \div 48 \times 100\% = 45.42\%$, 其中 2t 为塔吊超过自由高度钢丝绳及起吊索具重量, 选用 35t 弓形卡环, $\Phi 68 \times 30\text{m}$ 钢丝绳一对 4 股起吊, 钢丝绳型号为 $6 \times 37\text{S} + \text{FC}$, 公称抗拉强度为 1770MPa, 根据《粗直径钢丝绳》(GB/T20067) 查的钢丝绳破断拉力为 2700kN, 钢丝绳与水平面夹角为 70° , 钢丝绳安全系数 $n = 2700 \div (19.8 \times 9.8 \div 4 \div \sin 70^\circ) = 52.3$, 满足要求。^[8]

(七) 板梁安装

1. 板梁吊装至柱顶时根据支撑柱顶纵横中心线与板梁底部纵横中心线位置对板梁进行定位, 定位过程中如出现偏差使用千

斤顶对其进行调整 (误差值 $\leq 3\text{mm}$), 接着复测板梁标高及板梁水平度, 使用板梁固定螺栓及垫枕进行调整, 调整完毕并复测合格后使用板梁固定螺栓将板梁与柱顶进行固定。

2. 板梁上叠梁吊装至下叠梁上方后先临时使用过冲进行就位 (临时就位期间吊车不能降低负荷), 接着使用线坠对上下叠梁中心线位置进行复测并调整, 合格后将高强螺栓由板梁炉膛中心线位置向两侧同时穿装并紧固, 同时用 80t 塔吊安装板梁端部支撑, 高强螺栓全部安装结束后吊车卸载负荷。

3. 板梁间构件安装完毕后开始板梁层找正工作, 首先复测板梁自身水平度及标高, 使用板梁固定螺栓将数据调整至图纸设计要求 (板梁水平度误差值 $\leq 5\text{mm}$, 板梁标高误差值不大于 $\pm 5\text{mm}$), 接着复测板梁与板梁之间间距对角线尺寸, 使用千斤顶进行调整 (板梁间距误差值 $\pm 5\text{mm}$, 板梁对角线误差值 $\leq 10\text{mm}$)。

4. 板梁高强螺栓安装要求与主钢架安装要求一致。^[9]

四、结束语

在山东能源灵台 2×1000 兆瓦调峰煤电项目中, 超超临界锅炉大板梁的吊装作业采用了 160 吨级单机吊装技术。本次吊装作业在塔机站位选择、设备选型、运输方式、卸车存放以及吊装顺序等方面, 均充分考虑了现场实际情况。鉴于板梁大件吊装属于危险性较高的分部分项工程, 通过避免使用双机抬吊, 成功将危险性降至或低于一定规模的危险性较高分部分项工程标准。此举不仅节约了大量管理及施工成本, 而且提高了作业效率。^[10]

参考文献

- [1] 卞志浩, 周斐斐. 百万千瓦机组锅炉大板梁吊装技术分析 [J]. 中国电力企业管理, 2021, (15): 87-89.
- [2] 张志新, 李成伟, 葛高峰, 等. 大容量机组锅炉大板梁吊装技术浅析 [J]. 中国电力企业管理, 2020, (36): 78-79.
- [3] 王杰. 发电厂 1000MW 空冷超超临界燃煤机组锅炉大板梁吊装技术 [J]. 安装, 2021, (12): 51-53.
- [4] 刘扬帆, 顾刘勇, 张鹏. 炉膛大板梁卸车及吊装方法探讨 [J]. 中国电力企业管理, 2021, (33): 90-91.
- [5] 谢娜. 塔式锅炉叠合式大板梁制作要点 [J]. 发电设备, 2021, 35(05): 339-343. DOI: 10.19806/j.cnki.fdsb.2021.05.009.
- [6] 赵海鹏. 1000MW 超超临界塔式锅炉板梁吊装工艺介绍 [J]. 内燃机与配件, 2016, (11): 15-19. DOI: 10.19475/j.cnki.issn1674-957x.2016.11.007.
- [7] 张德峰. 1000MW 机组塔式锅炉大板梁安装施工探讨 [J]. 信息系统工程, 2011, (08): 83-84.
- [8] 林大亮. 长滩电厂新建工程 1 号机组锅炉大板梁吊装技术研究 [J]. 中国电力企业管理, 2022, (06): 90-91.
- [9] 程鹏权. 锅炉大板梁吊装研究 [J]. 中国高科技, 2022, (06): 37-38. DOI: 10.13535/j.cnki.10-1507/n.2022.06.14.
- [10] 李浩. 超超临界锅炉大板梁无损翻身结合高空滑移安装施工工法 [J]. 企业管理, 2023, (S2): 210-211.

新能源发电功率预测偏差对电网安全的影响及对策

杨明

广西金元南方新能源有限公司，广西 南宁 530000

DOI:10.61369/EPTSM.2025070013

摘 要： 随着新能源在电力系统中的渗透率不断提高，其发电功率预测偏差问题日益凸显。这一问题主要源于气象条件的复杂性、预测模型的不完善以及设备性能的波动。预测偏差对电网安全产生了多方面的影响，包括破坏电网稳定性、降低电能质量以及增加调度运行难度。为应对这一问题，需从提升预测技术精度、优化电网调度策略以及完善相关标准与管理制度等方面入手。本研究旨在探讨如何有效降低新能源发电功率预测偏差，从而促进新能源与电网安全的协调发展，为电力系统的稳定运行提供理论支持与实践指导。

关 键 词： 新能源；发电功率；预测偏差；电网安全

The Impact and Countermeasures of Deviation in New Energy Power Generation Prediction on Power Grid Safety

Yang Ming

Guangxi Jinyuan Southern New Energy Co., Ltd. Nanning, Guangxi 530000

Abstract： With the increasing penetration rate of new energy in the power system, the problem of power generation prediction deviation is becoming increasingly prominent. This problem mainly stems from the complexity of meteorological conditions, imperfect prediction models, and fluctuations in equipment performance. Prediction bias has multiple impacts on power grid safety, including disrupting grid stability, reducing power quality, and increasing scheduling and operational difficulties. To address this issue, efforts need to be made to improve the accuracy of prediction technology, optimize power grid dispatch strategies, and improve relevant standards and management systems. The purpose of this study is to explore how to effectively reduce the prediction bias of new energy power generation, thereby promoting the coordinated development of new energy and grid security, and providing theoretical support and practical guidance for the stable operation of the power system.

Keywords： new energy; power generation capacity; prediction bias; grid security

引言

随着全球能源转型的加速推进，新能源发电在电网体系中的占比日益提升。风能、太阳能等新能源因其清洁、可持续的特性，已成为现代电力系统的关键组成部分。然而，新能源发电的间歇性和波动性特点，使其输出功率难以保持稳定，这对电网的安全运行提出了严峻挑战。近年来，随着新能源装机容量的快速增长，功率预测偏差问题逐渐凸显，成为影响电网稳定性和可靠性的重要因素。

功率预测偏差不仅会导致电网调度计划的执行困难，还可能引发频率波动、电压闪变等一系列安全问题，进而威胁电网的整体运行安全。因此，深入研究新能源发电功率预测偏差的产生机制及其对电网安全的影响，并提出有效的应对策略，对于保障电力系统的稳定运行具有重要意义。本研究旨在通过分析偏差产生的原因及其对电网安全的多方面影响，探索切实可行的解决方案，为新能源与电网的协调发展提供理论支持和技术指导。

一、新能源发电功率预测偏差产生原因

（一）气象条件复杂性

新能源发电功率预测的准确性高度依赖于气象条件的精确预

报，而气象因素如风速、光照强度等具有显著的随机性和波动性，这为预测带来了巨大挑战。风速的变化受到地形、季节、气候等多种因素的影响，其时空分布呈现非线性特征，导致风电机组的出力难以精准预测^[1]。同样，光伏发电对太阳辐射度的变

化极为敏感，云层覆盖、大气透明度等因素会引发光照强度的快速波动，进而影响光伏系统的发电功率。例如，在日食等特殊天气现象下，光伏发电出力可能出现短时快速大幅波动，这种极端情况进一步凸显了气象条件复杂性对预测的制约。此外，气象预测本身存在一定的误差，这些误差会在新能源发电功率预测中累积，最终导致预测偏差的产生。

（二）预测模型不完善

当前的新能源发电功率预测模型在数据处理和算法逻辑方面仍存在诸多不足，难以完全拟合实际发电过程中的复杂特性。一方面，预测模型通常基于历史数据进行训练，但新能源发电的随机性和间歇性使得历史数据无法全面反映未来的变化规律。例如，常用的参数法假设变量符合某种特定分布，而实际数据往往无法满足这一假设，导致模型预测结果出现偏差。另一方面，现有模型在处理多维数据时可能存在信息丢失或冗余的问题，尤其是在融合多源数据时，未能充分考虑不同数据之间的相关性，从而降低了预测精度^[4]。此外，传统预测方法对于复杂非线性关系的捕捉能力有限，难以应对新能源发电过程中可能出现的突发情况，这也是预测偏差的重要来源之一。

（三）设备性能波动

新能源发电设备在长期运行过程中，由于老化、故障以及维护不当等原因，其性能往往会出现波动，进而影响发电功率的稳定性，最终导致预测偏差的产生。例如，风力发电机组的叶片磨损、轴承老化等问题会降低发电效率，而光伏组件的温度漂移、表面污染等则会削弱光电转换能力。这些设备性能的下落通常表现为发电功率的随机波动，使得实际出力偏离预测值。此外，设备故障的发生具有不可预见性，一旦发生故障，将导致发电功率骤降或中断，进一步加剧预测偏差。研究表明，新能源发电设备的性能波动不仅与自身质量有关，还受到运行环境的影响，如高温、高湿度等恶劣条件会加速设备老化，从而增加预测的不确定性。

二、新能源发电功率预测偏差对电网安全的影响

（一）对电网稳定性的影响

新能源发电功率预测偏差可能引发频率波动和功角失稳等问题，从而破坏电网的稳定运行并增加电网崩溃的风险。频率波动是由于预测偏差导致实际发电功率与计划值不一致，进而影响电网的有功平衡^[1]。当新能源出力突然变化时，传统机组难以迅速调整以弥补功率缺额或过剩，导致系统频率偏离额定值。此外，功角失稳问题则源于预测偏差引起的潮流分布改变，使得发电机之间的相对角度发生变化，严重时可能引发连锁反应，最终导致电网崩溃^[2]。因此，准确预测新能源发电功率对于维持电网稳定性至关重要。

（二）对电能质量的影响

新能源发电功率预测偏差还会对电能质量产生显著影响，主要表现为电压闪变和谐波增加等现象。电压闪变通常由新能源出力的快速波动引起，这种波动会通过电网传播，影响用户端的电

压稳定性。特别是在风电场或光伏电站接入点附近，电压波动范围明显增大，可能导致敏感设备无法正常运行。同时，预测偏差还可能引发谐波问题，由于新能源发电设备中大量使用电力电子器件，其非线性特性会在预测偏差较大时加剧谐波的产生，进一步降低电能质量，影响用户的正常用电体验。

（三）对电网调度运行的影响

新能源发电功率预测偏差使得调度计划难以准确执行，从而增加了电网调度运行的难度。传统调度计划基于负荷预测和电源出力预测制定，而新能源出力的不确定性使得实际运行情况常偏离计划值。这不仅可能导致资源浪费，例如传统机组因频繁调整出力而降低效率，还可能引发供电不足的问题，特别是在高峰负荷时段。此外，预测偏差还可能导致调度人员难以准确判断电网运行状态，进而影响决策的及时性和准确性。因此，如何应对新能源发电功率预测偏差已成为电网调度运行中亟待解决的重要问题。

三、应对新能源发电功率预测偏差的对策

（一）提升预测技术精度

1. 引入先进算法

随着人工智能和机器学习等先进算法的快速发展，其在新能源发电功率预测中的应用逐渐成为研究热点。这些算法能够通过深度学习历史数据中的复杂模式，捕捉气象条件、负荷变化与发电功率之间的非线性关系，从而显著提高预测准确性。例如，基于神经网络的预测模型可以有效处理多维输入变量，并通过训练优化权重参数以适应不同场景下的预测需求。此外，支持向量机（SVM）和随机森林等算法也被广泛应用于短期和超短期功率预测任务中，展现出较强的泛化能力和鲁棒性。然而，尽管这些方法在理论上具有较高的预测潜力，但其实际应用仍面临诸多挑战，如模型过拟合、计算资源需求高等问题，需要进一步优化和改进。

2. 融合多源数据

为了降低新能源发电功率预测偏差，整合气象、历史发电、电网运行等多源数据是一种有效的策略。气象数据包括风速、温度、光照强度等关键指标，是预测风电和光伏发电功率的基础；历史发电数据则提供了设备运行特性和出力规律的重要参考；而电网运行数据能够反映系统负荷变化及调度需求，为预测模型提供更全面的信息支撑。研究表明，通过建立多源数据融合机制，可以显著提升预测模型的适应性和精度^[10]。例如，利用 Copula 模型分析发电功率与预测功率之间的相依结构，能够揭示二者之间的内在联系，从而优化预测结果。此外，结合实时监测数据与预测结果进行动态调整，也是减少预测偏差的重要手段。

（二）优化电网调度策略

1. 增强电网灵活性

增强电网灵活性是应对新能源发电功率预测偏差的关键措施之一。储能设施的建设和发展需求侧响应（DSR）技术能够有效缓解因预测偏差导致的功率失衡问题^[9]。大规模虚拟储能技术通

过将多个离散的储能设备虚拟化，形成一个统一的储能系统，可以在新能源功率预测误差偏大或偏小时分别提供备用能量或吸收多余电能，从而实现电网功率的平衡调节。同时，需求侧响应技术通过激励用户调整用电行为，能够在短时间内改变负荷曲线，为电网提供额外的灵活性资源。这种双向调节机制不仅提高了电网对预测偏差的适应能力，还促进了新能源的就地消纳水平^[9]。

2. 改进调度模式

采用滚动调度和实时调度等先进的调度模式，可以根据实时情况动态调整调度计划，从而减少新能源发电功率预测偏差对电网运行的影响。滚动调度模式通过分时段优化调度决策，逐步修正前一阶段的预测误差，确保调度计划的准确性和可行性。例如，在风电大规模接入的背景下，基于相关机会目标规划的滚动优化调度模型能够将功率平衡的等式约束转化为最大化随机事件发生概率的目标函数，从而更好地应对风电预测误差“近小远大”的特点^[6]。此外，实时调度模式通过实时监测新能源实际出力情况，快速调整发电机组出力分配，能够有效降低预测偏差带来的风险。这些调度模式的改进不仅提升了电网运行的稳定性，还为高比例新能源接入下的调度决策提供了新的解决方案。

（三）完善相关标准与管理制度

1. 制定统一预测标准

制定统一的预测技术标准是保障新能源发电功率预测科学性和规范性的重要基础。当前，由于缺乏统一的标准，不同地区和企业 在预测方法选择、数据处理流程以及误差评估指标等方面存在较大差异，导致预测结果的可比性和可靠性难以保证。因此，有必要建立一套涵盖数据采集、模型构建、结果验证等全过程的预测技术标准体系，明确各环节的技术要求和操作规范。例如，通过引入均方根误差（RMSE）等量化指标评估预测精度，并规定预测结果的可信区间范围，可以有效提高预测工作的透明度和科学性。此外，统一标准还有助于推动行业内的技术交流与合作，促进预测技术的整体进步^[7]。

2. 加强行业监管

加强对新能源发电企业预测工作的监管，是提高预测责任意识、保障电网安全的重要手段。监管部门应建立健全的预测误差考核机制，对预测偏差超出合理范围的企业实施惩罚措施，同时设立奖励政策鼓励企业采用先进的预测技术和管理方法^[8]。例如，通过引入新能源功率预测惩罚成本模型，将预测误差与实际经济损失挂钩，可以促使企业更加重视预测工作的准确性和可靠性。此外，建立预测结果公开透明机制，定期发布各企业的预测绩效评估报告，也有助于形成良好的行业竞争氛围。通过多方协作，共同推动预测技术的进步和管理水平的提升，为新能源与电网的协同发展提供坚实保障。

识、保障电网安全的重要手段。监管部门应建立健全的预测误差考核机制，对预测偏差超出合理范围的企业实施惩罚措施，同时设立奖励政策鼓励企业采用先进的预测技术和管理方法^[8]。例如，通过引入新能源功率预测惩罚成本模型，将预测误差与实际经济损失挂钩，可以促使企业更加重视预测工作的准确性和可靠性。此外，建立预测结果公开透明机制，定期发布各企业的预测绩效评估报告，也有助于形成良好的行业竞争氛围。通过多方协作，共同推动预测技术的进步和管理水平的提升，为新能源与电网的协同发展提供坚实保障。

四、结论

新能源发电功率预测偏差的产生主要源于气象条件的复杂性、预测模型的不完善以及设备性能的波动。这些因素共同作用，导致预测结果与实际情况存在差异，进而对电网安全产生多方面影响。具体而言，偏差可能破坏电网的稳定性，引发频率波动和功角失稳等问题；同时，也会降低电能质量，导致电压闪变和谐波增加；此外，还增加了电网调度运行的难度，影响调度计划的准确执行。

为应对这一问题，本文提出了多项对策，包括提升预测技术精度、优化电网调度策略以及完善相关标准与管理制度。通过引入先进算法和融合多源数据，可以有效提高预测准确性；增强电网灵活性和改进调度模式，则有助于减少偏差对电网运行的影响；而制定统一预测标准和加强行业监管，能够进一步规范预测工作，保障电网安全。

展望未来，随着新能源在电网中的占比不断提升，如何进一步降低预测偏差并提高电网适应能力将成为研究重点。特别是在极端天气条件下，如何确保预测模型的鲁棒性和电网运行的可靠性，仍需深入探索。持续关注新能源发电功率预测偏差问题，对于实现新能源与电网的协同发展具有重要意义，这不仅有助于提升电力系统的整体性能，也为推动清洁能源的广泛应用奠定了基础。

参考文献

- [1] 陈中飞, 赵越, 蔡秋娜, 等. 基于净负荷预测误差统计的电力系统爬坡能力充裕度评估 [J]. 中国电力, 2024, 57(05): 50–60.
- [2] 周海峰, 徐伟, 沙立成, 等. 考虑新能源不确定性的调度计划安全稳定校核方法 [J]. 电力工程技术, 2024, 43(03): 63–70.
- [3] 卫鹏, 刘建坤, 周前, 等. 基于随机潮流的新能源发电预测误差对电网影响研究 [J]. 电器与能效管理技术, 2017, (02): 60–65+70.
- [4] 卢才云, 朱文, 张海天, 等. 新能源发电功率预测准确率计算策略优化研究与应用 [J]. 电气应用, 2024, 43(06): 54–59.
- [5] 沙伟燕, 胡伟, 何宁辉, 等. 大规模虚拟储能平抑新能源功率预测误差优化调度方法 [J]. 电力科学与技术学报, 2023, 38(06): 167–174.
- [6] 李志伟, 赵书强, 董凌. 考虑预测误差的风火协调滚动调度 [J]. 电力自动化设备, 2020, 40(12): 88–96.
- [7] 戴玉臣, 徐伟, 华文, 等. 计及源网荷交互影响的区域电网热稳安全供电区间计算方法 [J]. 电力自动化设备, 2023, 43(02): 178–183.
- [8] 黄婧杰, 欧阳顺, 冷婷, 等. 含偏差风险规避的新能源和储能协同参与市场策略 [J]. 电力自动化设备, 2023, 43(02): 36–43.
- [9] 沙伟燕, 胡伟, 何宁辉, 等. 大规模虚拟储能平抑新能源功率预测误差优化调度方法 [J]. 电力科学与技术学报, 2023, 38(06): 167–174.
- [10] 樊国旗, 刘桂龙, 樊国伟, 等. 大规模虚拟储能模式平抑新能源功率预测误差研究 [J]. 四川电力技术, 2021, 44(02): 19–23.

光伏发电 MC4 插头质量控制措施

田小龙², 司俊龙¹, 宫兆军¹, 周奎应¹, 张城¹, 张洪星¹

1. 国家电投集团综合智慧能源有限公司, 北京 100044

2. 国家电力投资集团有限公司, 北京 100029

DOI:10.61369/EPTSM.2025070014

摘 要： 本文旨在探讨光伏发电中 MC4 插头的质量控制措施。首先分析了国内主要生产厂家的情况，接着阐述了 MC4 插头存在的主要问题，包括老化、短路和着火等现象及其原因。随后详细论述了在制造过程中控制质量的方法，以及设备采购阶段和安装阶段的质量控制要点。随后详细论述了在制造过程中控制质量的方法，以及设备采购阶段和安装阶段的质量控制要点，涵盖了材料选择、工艺标准、供应商评估及现场操作规范等关键环节。通过对这些方面的综合研究，为提高光伏发电系统中 MC4 插头的质量可靠性提供参考。

关 键 词： 光伏发电；MC4 插头；质量控制

Photovoltaic MC4 Plug Quality Control Measures

Tian Xiaolong², Si Junlong¹, Gong Zhaojun¹, Zhou Kuiying¹, Zhang Cheng¹, Zhang Hongxing¹

1.State Power Investment Group Comprehensive Smart Energy Co., Ltd., Beijing 100044

2.State Power Investment Corporation Limited, Beijing 100029

Abstract： This paper investigates quality control measures for MC4 connectors in photovoltaic power generation systems. The study begins with an analysis of major domestic manufacturers, followed by a detailed examination of common issues including aging, short circuits, and fire hazards along with their root causes. Subsequent sections elaborate on manufacturing process controls and critical quality assurance strategies during equipment procurement and installation phases. Key aspects covered include material selection, process standards, supplier evaluation, and field operation protocols. Through comprehensive research in these areas, the paper provides actionable recommendations to enhance the reliability of MC4 connectors in photovoltaic systems.

Keywords： photovoltaic power generation; MC4 plug; quality control

引言

光伏发电作为清洁能源体系的重要组成部分，光伏发电系统的运行稳定性与安全性相互关联。在光伏组件直流侧的关键电气接口中，MC4连接器的性能优劣直接影响发电效率及设备安全。近年来，因 MC4 插头质量问题引发的火灾和短路事故频发，凸显了加强全产业链质量控制的重要性。本文基于国内 MC4 插头生产现状，深入剖析现存问题，并系统探讨其全生命周期质量管理的优化路径。

一、国内 MC4 插头主要生产厂家概述

根据行业调研，国内 MC4 插头主要生产商包括中航光电、浙江昱辉、江苏通润等企业。这些企业在材料研发、生产工艺及认证标准上逐步与国际接轨，但市场竞争激烈，部分中小厂商仍存在技术薄弱、质量控制不严的问题。因此，选择供应商时需重点审核其 ISO 认证、UL/TUV 等国际资质，并参考过往项目案例。

二、MC4 插头存在的主要问题及成因分析

（一）老化与接触电阻升高

MC4 插头长时间处在高温、低温、紫外线以及潮湿等恶劣环境之中，其外壳和内部导电材料容易出现老化现象，物理性能随之下降，材料脆化、密封圈弹性变差会导致插头密封性变差，湿气和尘埃渗入内部，金属接触面的氧化与腐蚀程度加重。接触表

作者简介：

田小龙，（1980.11-），男，山西大同人，研究生，高级工程师，研究方向：安全工程；

司俊龙（1976.10-），男，河南开封人，本科，高级工程师，研究方向：长期从事电力系统及综合智慧能源产业安全生产管理。

面状况恶化之后，接触电阻明显上升。有研究显示，当接触电阻过大时，电流通过就会产生局部高温，这种过热会加快材料退化速度，而且有可能引发直流电弧，电弧能量非常高，如果持续存在，就会使周围材料碳化甚至燃烧，成为光伏系统火灾的主要诱因。所以，老化造成的接触电阻变化既会影响系统效率，又会威胁到运行安全。^[1]

（二）短路与火灾风险

在光伏系统中，直流侧由于电压高、电流大，一旦出故障就会产生持续电弧，直流电弧不易自灭，非常有火灾危险性。MC4插头是重要连接部件，如果存在制造缺陷、型号混用、安装工艺问题，像没有用专用工具压接、连接螺帽未按规定拧紧等，都会造成接触不良、阻抗不均。^[2-5]局部高温烧毁绝缘层引发短路。而且，有些非标插头还有结构不匹配、接触面积不够等状况，这样就加大了短路的风险。电弧和短路造成的高温能够点燃附近的可燃物，特别是在屋顶光伏的情形下，火灾的后果会很严重。所以，要规范安装并使用同型号认证的插头，是降低风险的关键措施。

（三）机械损伤与密封失效

MC4插头在运输、安装及维护过程中易受到机械损伤，被叉车撞击，踩踏，尖锐物体划伤等，造成外壳破裂，内部结构变形，这些物理性损伤会直接破坏插头的结构完整度，使其锁紧，密封功能失效，如果安装时遗漏密封圈或者没有正确压接，插头的防护等级就会降低，外界湿气，灰尘容易渗入连接器内部，引发金属导体腐蚀，绝缘性能下降，在湿热，盐碱等恶劣环境下，腐蚀现象会急剧加快，使得接触电阻变大并且产生发热现象，而且密封失效还会让雨水渗入，造成内部短路，所以要保证施工规范，防止外力损伤，选用带有良好密封结构和耐候材料的插头，这样才能维持长久的可靠性。^[5-7]

三、MC4插头质量控制的主要措施

（一）制造阶段的质量控制措施

1. 材料与工艺优化

材料选取方面，MC4插头制作大量使用 PPO（聚苯醚）、PA66（尼龙66）这类性能优良的工程塑料，这些材料有着不错的机械强度和尺寸稳定度，而且能承受-40到90摄氏度的温度变化，抵御紫外线照射以及潮湿条件，保证外壳密封性与绝缘耐久性，金属接触件经过精细镀银处理，银层可以抑制表面氧化，大幅度削减接触电阻，改善载流效能和热稳定性，进而减小连接处发烫和产生电弧的风险，材料与电镀工艺的协同优化，从根源上加强了产品的环境适应能力和电气安全性。

2. 严格测试标准

制造过程中执行多维可靠性测试，把插头在实际恶劣工况下的性能全部检测出来，环境应力测试包括高低温循环，湿热交变，盐雾腐蚀这些项目，用来检查材料老化，密封失效，机械变形等情况，电气性能测试非常严格，接触电阻要小于等于0.5mΩ，绝缘耐压像4000V/1min无击穿，插拔寿命要在500次

重复连接之后仍然符合性能标准，这样就能保证产品在高压，大电流环境下长时间安全工作，这组测试是制造质量保障的关键部分。

3. 智能化生产监控

为最大限度减少人为操作误差并实现全程质量可控，现代的MC4插头生产线中使用了大量的自动化设备以及智能监测系统，机器人可以精准地完成注塑、嵌件、压接这些关键工序，保证了装配的一致性以及接触的可靠性，而视觉检测系统以及传感器会实时地收集工艺参数，对注塑温度、压接深度、镀层质量进行监控，有些先进的产线还会配备 AI 质量分析模块，自动识别出外观上的缺陷、尺寸上的偏差以及装配上的瑕疵，从而做到实时报警并且分拣出来，智能化制造既提高了产能，又保证了每一件产品的高一致性和高可靠性的标准。^[8]

（二）设备采购阶段的质量控制

1. 供应商综合评审

采购时先要对供应商展开系统评估和筛选，企业得创建起健全的供应商数据库，全方位检查其生产资质，看有没有 TUV，UL之类的国际认证，还要有 ISO9001 这样的质量体系，这些认证是供应商生产规范，产品可靠的重要保障。也要考量它的行业名声，以前的合作表现和客户的评价，防止由于供应商挑选失误引发的质量风险。而且，要让供应商递交权威第三方机构出具的检测报告，比如德国莱茵 TÜV 的耐候性，防火性能之类的专项认证，从而保证供应商的产品在实际使用过程中能够满足高温，高湿，紫外线照射等苛刻环境的要求，从源头上消除质量隐患。

2. 合同条款约束

采购合同要明确具体的技术和质量要求，成为一个有约束力的法律文件。合同当中要详细规定插头的关键性能指标，比如接触电阻值，绝缘等级，工作温度范围，耐久性标准等。而且，应该设定不低于10年的质保期，体现供应商对于产品长久可靠的承诺，合同里也要明确违约责任和赔偿条款，防止由于条款模糊引发纠纷，保证在出现质量问题的时候可以迅速而有效地追责和补救。这样就能从法律和商业两方面加强对于产品质量的把控。^[9]

3. 到货验收与抽样检测

物资到货后，要执行验收程序，通过抽样检测来确认整批产品质量。用红外热成像仪给插头通电测温，随时监测它在额定电流下的温升状况，异常发热常常表明接触不良或者绝缘有问题。还要用微欧计这些精密仪器测定接触电阻，保证数值符合设计标准，比如小于等于0.5mΩ，防止电阻太大造成运行过热，抽样方案应该依照统计原理，保证样本具有代表性并且批次一致。只有经过严格验收的合格产品才准许入库并投入使用，这样才能阻止不合格品进入光伏系统，保障电站整体安全与效率。^[10]

（三）安装和运行阶段的质量控制要点

1. 施工人员培训

施工人员必须接受系统、专业培训，熟悉 MC4 插头的结构特点，安装流程，质量要求，培训内容要涵盖专用压接工具的使用方法，插头对接的正确手法，常见错误操作的分析与预防，采用理论讲解与实操演练相结合的方式，让安装人员掌握接线端子

的压接工艺，插头锁紧时的“咔嗒”声确认，密封组件的装配要点，只有经过考核合格的人员才能上岗，防止因操作不当导致的接触不良，密封失效或者机械损伤，从源头上提高安装质量。

2. 安装环境要求

MC4插头的安装要在干燥又干净的环境下作业，绝对不能在下雨天、下雪天或者潮湿多灰的地方工作，现场要铺上防潮布，设立临时围挡，防止水分和灰尘进入插头里面，造成电化学腐蚀或者绝缘性能变差，环境温度最好保持在零下二十度到四十度之间，太冷的时候塑料壳子会变脆，太热的时候密封圈容易老化，作业地点还要有充足的光线，空气流通好，这样可以让操作人员看清楚，做得准，最大程度地降低环境对安装质量的影响。

3. 规范安装操作

安装时插头与插座的极性要对应，不能混用不同品牌、型号或规格的产品，以免因为机械公差或者电气参数的不同造成接触电阻变大或者发生电弧放电。连接的时候要把插头和电缆垂直对正，均匀施力推入直到听见清脆的“咔嗒”锁紧声，确认连接器已经完全啮合，安装好以后用手摸一摸看连接是否牢固，轻轻拉动没有松动的感觉，仔细查看尾部的密封胶圈有没有损坏，压接的地方是否紧密，保证整个结构有IP67以上级别的防护能力，能够起到防尘防水的作用。

4. 现场防护措施

剥线的时候要使用专门的工具，裸露铜线的长度务必控制在8到10毫米之间，太长容易引发短路，太短则会压接不实，电缆敷设时不可出现锐角弯曲，严禁踩踏或者堆压插头和连接线缆，最好采用桥架，线槽之类的固定保护手段，缩减因为机械拉伸，挤压或者摩擦造成的损害，地面电站或者屋顶项目还要执行防晒，防鼠咬之类的操作，以延长插头在运行环境下的使用寿命。

5. 安装后检测

安装完毕之后一定要形成起完善的检测体系。首先要执行电气性能验证，用微欧计来检测回路电阻，保证其小于等于1毫欧，再用绝缘电阻测试仪检测极间以及对地绝缘电阻，保证其大于等于100兆欧，必要时候还要开展耐压检测。系统投入运用之后，应当创建起定时巡查制度，每三个月用红外热像仪去检测插头运作时候的温度，如果发觉存在异常的热点就要立即加以解决。针对比较大的光伏电站，可以选用无人机装着红外相机来做大规模

的巡查，从而提升巡查的效率和覆盖范围。而且，要定时查看插头外观是否出现龟裂，变形或者烧蚀等情况，还要创建运行档案，把每次检测的结果记录下来，做到全程的质量追踪和追溯，从而尽早发现问题并且及时处理。

四、案例分析与改进建议

2025年1月，由某公司经营的山地光伏电站光伏子阵区发生火灾，致使1491块组件及7台组串式逆变器和直流电缆、MC4接头、支架等受损，造成周边山林发生火灾事故。该公司调查发现，在2024年一年内该电站发生39起MC4接头烧损情况，3月份甚至出现将近20例；直流电缆和组件烧毁事件也频繁发生。事故之后经过调查，原来此山地光伏电站并没有按照规定对设备进行第三方质量检测流程，在其整个施工期间也没有完整地记录了相关重要安装数据参数比如扭矩值等信息。缺少对设备故障或者存在安全隐患的定期筛查机制，更没有对MC4接头的状态进行周期性的评估和维护。没有能够形成有效的经验总结以及不断改进的措施。

五、结论

MC4插头的质量管控体系要贯穿产品全生命周期的关键环节，包含设计选型，采购验收，安装调试等阶段，选设备的时候，先挑那些有良好可靠性的优质供应商，而且对供应商给出的出厂检测报告要仔细核查，最好选带有电弧监测装置和快速断路保护功能的电气元件来加强系统的安全性。电缆选型和敷设要严格依照《电力工程电缆设计规范》，还要结合预防性试验的数据，对于绝缘值不合格或存在明显下降的电缆，应及时查明原因并更换。定期开展电气设备红外热成像扫描，加强对易发生放电和过热设备、元件、电缆、接头等的检查，对多发、普发性的设备缺陷，要认真研究分析，及时组织开展技术改造。光伏场站电缆、MC4接头这类重要部件需采取恰当的固定办法来保证牢固连接，从而防止因强风造成的松动，过热以及电气放电等危险状况出现。未来，随着智能化监测技术的普及，MC4插头的可靠性将进一步提升，为光伏电站安全运营提供坚实保障。

参考文献

[1]MC4连接器接触电阻升高机理与预防性维护策略《太阳能学报》(2025年第1期)。
[2]户外光伏连接器老化性能测试标准与实施指南深圳市讯科标准技术服务有限公司(2025)。
[3]光伏系统电气连接故障分析与MC4插头质量控制《电力电子技术》期刊(2024年第2期)。
[4]光伏连接器MC4接头技术演进与可靠性研究史陶比尔集团技术白皮书(2023)。
[5]肖祥珀.光伏电站机电设备常见故障与处理技术[J].通讯世界,2025,32(07):100-102.
[6]朱华.不同型号光伏连接器间的匹配性研究[J].太阳能,2023,(11):56-64.
[7]沈钱平,袁万强,马良.浅析光伏系统运维风险中的连接器失效[J].太阳能,2018,(07):52-54.
[8]刘智涛.分布式光伏发电系统的安装与施工安全管理[J].灯与照明,2025,49(04):185-187.
[9]覃智锦.光伏发电设备安装质量控制与安全管理[J].中国机械,2024,(03):97-100.
[10]朱华.不同型号光伏连接器间的匹配性研究[J].太阳能,2023,(11):56-64.

脱硫 GGH（回转式换热器）运行问题及节能改造方案研究

戴国辉

广州珠江电力有限公司，广东 广州 511458

DOI:10.61369/EPTSM.2025070015

摘 要： 分析某电厂 600MW 机组 GGH 运行数据，阐述其腐蚀结垢、密封失效等故障特征及影响因素。介绍多种改进措施，如 PTFE 复合镀层、分段式蜂窝陶瓷模块等。实施节能改造后，设备性能提升，能耗降低，还探讨了改造方案评估方法。

关 键 词： GGH；故障特征；节能改造

Research on the Operation Problems of Desulfurization GGH (Rotary Heat Exchanger) and Energy-saving Renovation Schemes

Dai Guohui

Guangzhou Zhujiang Electric Power Co., LTD, Guangzhou, Guangdong 511458

Abstract： Analyze the GGH operation data of a 600MW unit in a certain power plant, and elaborate the fault characteristics and influencing factors such as corrosion scaling and seal failure. Introduce a variety of improvement measures, such as PTFE composite coating, segmented honeycomb ceramic modules, etc. After the implementation of energy-saving transformation, the performance of the equipment was improved, energy consumption was reduced, and the evaluation method of the transformation plan was also discussed.

Keywords： GGH; fault characteristics; energy-saving renovation

引言

随着环保要求的不断提高，我国于 2015 颁布了相关政策，强调对电厂污染物排放的严格控制以及对设备节能改造的重视。脱硫 GGH 作为电厂脱硫系统的关键设备，其运行状况直接影响脱硫效率和能耗。然而，GGH 在运行过程中面临腐蚀结垢、密封失效、压差异常等多种问题，这些问题与烟气成分、运行环境等因素密切相关。同时，设备性能还受到低温腐蚀、石膏结晶、烟尘沉积等多种因素的耦合影响。因此，对脱硫 GGH 运行问题及节能改造方案的研究具有重要的现实意义和学术价值。

一、脱硫 GGH 运行问题分析

（一）典型故障特征研究

通过对某电厂 600MW 机组运行数据的分析，发现 GGH 存在多种典型故障特征。腐蚀结垢方面，由于烟气中含有酸性物质以及灰分等杂质，在运行过程中易在 GGH 表面形成腐蚀和结垢现象，影响换热效率和设备寿命^[1]。密封失效问题，主要是因为设备长期运行，密封部件磨损、老化，导致烟气泄漏，降低了系统的脱硫效率。压差异常表现为 GGH 进出口压差超出正常范围，这可能是由于内部积灰、堵塞，或者是风机故障等原因引起的。这些故障特征的发生规律与机组运行时间、烟气成分、运行环境等因素密切相关，需要进一步深入研究，以便更好地解决 GGH 运行中的问题。

（二）设备性能劣化机理

回转式换热器（GGH）在运行过程中面临多种导致性能劣化

的因素。低温腐蚀是关键因素之一，在脱硫系统中，烟气温度降低，当低于酸露点温度时，硫酸蒸汽会凝结在设备表面，对设备造成腐蚀^[2]。石膏结晶也会影响设备性能，在脱硫过程中，石膏可能在 GGH 表面结晶，改变设备的传热性能和气体流动特性。烟尘沉积同样不可忽视，烟气中的烟尘会附着在 GGH 表面，增加热阻，降低传热效率，并且可能与其他物质发生反应，进一步恶化设备的运行状况。这些因素相互耦合，共同作用，加速了设备性能的衰减。

二、运行影响因素研究

（一）烟气成分影响分析

烟气成分对 GGH 运行影响显著。SO₃酸露点是关键因素之一，当烟气中 SO₃ 含量增加时，酸露点升高^[3]。在酸露点以下的

低温区域，会形成硫酸凝结，对 GGH 的换热元件产生腐蚀。Cl⁻ 浓度同样不可忽视，高浓度的 Cl⁻ 会加速腐蚀过程。Cl⁻ 具有很强的腐蚀性，它能够破坏金属表面的氧化膜，使得金属更容易受到其他腐蚀因素的影响。此外，烟气中的粉尘含量、湿度等也会与 SO₃ 和 Cl⁻ 等相互作用，进一步影响 GGH 的运行。例如，粉尘可能吸附腐蚀性物质，增加其与 GGH 表面的接触时间和机会，而高湿度环境则有利于腐蚀性物质的溶解和扩散，加剧腐蚀程度。

（二）运行参数关联分析

运用 Pearson 相关系数法对脱硫 GGH 运行参数与设备阻力的相关性展开研究。烟气流量与设备阻力密切相关，流量的变化可能导致设备内部流场的改变，进而影响阻力大小^[4]。温度梯度同样对设备阻力有重要影响，不同的温度分布会使气体的物理性质发生变化，从而改变流动特性及阻力情况。吹扫频率也是关键因素之一，合理的吹扫频率有助于清除设备表面的污垢等杂质，维持良好的传热和流动性能，若吹扫频率不当，可能导致污垢积累增加阻力，或过度吹扫造成能源浪费及设备损伤。通过对这些运行参数与设备阻力相关性的量化分析，可为 GGH 的优化运行及节能改造提供重要依据。

三、节能改造方案设计

（一）材料优化方案

1. 防腐镀层技术

采用 PTFE 复合镀层替代传统搪瓷传热元件可有效提升 GGH 的耐腐蚀性能。PTFE 具有优异的化学稳定性和低表面能，能有效抵抗烟气中的腐蚀介质。通过将 PTFE 与其他合适的材料制成复合镀层，可进一步优化其性能。利用 ANSYS 模拟技术，对 PTFE 复合镀层和传统搪瓷镀层在模拟烟气腐蚀环境下的性能进行对比分析。结果显示，PTFE 复合镀层的腐蚀速率明显低于传统搪瓷镀层，表明其具有更好的耐腐蚀性能^[5]。这为 GGH 传热元件的材料优化提供了一种可行的方案，有助于延长设备的使用寿命，提高其运行稳定性和可靠性。

2. 模块化结构设计

研发分段式蜂窝陶瓷模块，其设计旨在解决脱硫 GGH 运行中的压损问题。通过采用先进的材料和结构设计，模块具有更好的气体流通性能和热交换效率。利用 CFD 模拟技术对其进行性能验证，结果显示该模块能够有效降低压损达 15%。这一效果的实现得益于模块的独特结构和材料特性，它能够优化气体流动路径，减少气流阻力，从而提高整个 GGH 系统的运行效率，为脱硫系统的节能改造提供了一种有效的技术方案^[6]。

（二）密封系统改造

1. 径向密封技术改进

设计双道石墨密封结构，利用三维建模技术优化密封片布置角度和压缩量。通过精确的建模分析，确定最佳的密封片布置角度，使其能够更好地适应 GGH 运行过程中的热胀冷缩和旋转运动，减少密封间隙，提高密封效果。同时，合理调整密封片的压缩量，避免因压缩量过大导致密封片磨损过快，或压缩量过小

出现泄漏问题。这种双道石墨密封结构结合优化后的密封片布置角度和压缩量，能够显著增强 GGH 的径向密封性能，减少泄漏，提高设备的运行效率，降低能耗，为脱硫系统的稳定运行提供有力保障^[7]。

2. 轴向密封补偿装置

针对脱硫 GGH 轴向密封问题，设计液压自动补偿系统实现密封间隙动态调节。该系统主要由液压泵站、执行机构和控制系统构成。液压泵站提供动力源，确保系统稳定的液压供应。执行机构通过液压驱动，能够根据 GGH 运行过程中的热胀冷缩及其他因素导致的轴向位移变化，精确调整密封片的位置，从而保持密封间隙的合理稳定。控制系统则负责监测 GGH 的运行参数，如温度、压力、轴向位移等，依据设定的逻辑算法控制液压泵站和执行机构的动作。通过这种方式，有效解决因密封间隙变化导致的泄漏问题，提高 GGH 的运行效率和节能效果^[8]。

四、工程应用验证

（一）改造工程实例

1. 某电厂改造方案

某电厂针对脱硫 GGH 运行问题实施节能改造。在传热元件方面，采用新型高效传热元件替换原有老化元件，以提高传热效率^[9]。密封系统升级上，通过改进密封结构和选用优质密封材料，减少泄漏，提升系统的密封性。对于吹灰器，优化其运行参数和布置方式，确保能够及时有效地清除积灰，维持良好的传热效果。这些改造措施相互配合，旨在解决 GGH 运行中的传热效率低下、泄漏以及积灰等问题，从而实现节能目标，提高电厂的整体运行效率和经济性。

2. 施工关键技术

脱硫 GGH 运行中存在诸多问题，节能改造至关重要。模块化安装工艺方面，需精确设计模块尺寸与连接方式，确保各模块在安装过程中紧密配合，提高安装效率与质量^[10]。同时，要注重模块的密封性能，防止烟气泄漏。在线改造时，首先要做好安全防护措施，确保施工人员安全。对运行设备的监测与调控是关键，实时掌握设备运行状态，避免改造过程对正常生产造成过大影响。施工过程中，严格按照设计要求进行操作，保证改造后的 GGH 能够达到预期的节能效果和运行性能。

（二）运行效果对比

1. 性能测试数据

对改造前后烟气系统的关键参数进行了对比测试。在烟气系统阻力方面，改造前阻力较大，影响了系统的正常运行，增加了能耗。改造后，阻力明显降低，提高了烟气的流通效率。换热效率上，改造前的数值未达到理想状态，导致热量回收不充分。改造方案实施后，换热效率显著提高，实现了更好的热量交换，提升了能源利用效率。漏风率方面，改造前存在一定程度的漏风现象，影响了系统的稳定性和运行效果。经过改造，漏风率大幅下降，保证了系统的密封性和运行的可靠性。这些性能测试数据充分证明了改造方案的有效性和可行性。

2.故障率统计分析

基于三年运行数据,对改造前后脱硫 GGH 设备的非停次数和维护成本进行对比分析。改造前,设备由于结垢、腐蚀等问题频发故障,导致非停次数较多,每月平均达到3次,相应的维护成本高昂,每年约为50万元。这不仅影响了脱硫系统的正常运行,还增加了企业的运营成本。改造后,通过一系列节能改造措施的实施,设备运行稳定性显著提高,非停次数大幅下降,每月平均仅为1次,维护成本也随之降低,每年约为10万元。由此可见,该节能改造方案在降低故障率和维护成本方面效果显著,为企业带来了良好的经济效益和环境效益。

(三)节能经济性评估

1.能耗计算模型

建立包含引风机功耗、蒸汽吹扫能耗等要素的综合能耗计算模型是评估节能经济性的关键。引风机功耗与设备运行参数相关,需考虑流量、压力等因素对其能耗的影响,通过相关公式计算其功率消耗。蒸汽吹扫能耗则取决于吹扫频率、蒸汽流量及压力等,确定合理的计算方法来衡量其能耗量。同时,还需考虑其他可能影响能耗的因素,如设备的热损失等,并将这些因素纳入综合能耗计算模型中。该模型应能够准确反映 GGH 在不同运行工况下的能耗情况,为节能改造方案的评估提供可靠的依据。

2.投资回报分析

节能改造方案需进行投资回报分析。通过计算改造工程投资

回收期来评估方案的经济性。投资回收期越短,表明方案在经济上越可行。需考虑改造工程的初始投资,包括设备采购、安装调试等费用。同时,分析节能改造后带来的经济效益,如能源节约所降低的成本。对比不同方案的经济性指标,如净现值、内部收益率等。净现值大于零的方案通常具有经济可行性,内部收益率越高说明方案的盈利能力越强。综合考虑投资回收期、净现值和内部收益率等指标,选择最优的节能改造方案,以实现经济效益和节能效果的最大化。

五、总结

本研究聚焦脱硫 GGH 运行问题及节能改造方案。通过理论与实践相结合,对 GGH 的运行问题进行深入剖析,明确了设备运行中存在的不足及其对能耗的影响。在此基础上,提出了包括镀层材料优化、密封系统改进等一系列综合改造方案。经实际验证,这些方案成效显著,使 GGH 运行压降大幅降低30%以上,年节电可达200万千瓦时。此研究成果不仅为同类型设备改造提供了切实可行的技术路线,具有较高的应用价值和推广意义,同时也为后续研究指明了方向,强调未来应着重关注新型相变蓄热材料在 GGH 中的应用研究,以期进一步提升设备性能和节能效果。

参考文献

- [1]李鹏,孙毅.焙烧炉热平衡分析与节能措施讨论[J].有色设备,2018(3):38-41.
- [2]黄涛.直燃溴化锂空调系统节能改造及优化运行研究[D].湖北:华中科技大学,2021.
- [3]崔巍.220V 路灯设备节能改造方案研究[D].上海:同济大学,2018.
- [4]贾立勇.推进既有建筑节能改造的运行机制研究[D].天津:华北理工大学,2016.
- [5]段绍阳,王飞,王国伟.城镇集中供热节能改造技术分析[J].建材与装饰,2020(1):2.
- [6]高景涛.脱硫 GGH 换热器异音分析及处理[J].华北电力技术,2012(6).
- [7]李栋,胡信韬,姜聪,等.湿法脱硫 GGH 保留与否方案比选[J].山东工业技术,2019(7):1.
- [8]李英,王三平.火电厂湿法烟气脱硫 GGH 换热器的利弊分析[J].环境与可持续发展,2011(2):4.
- [9]刘昕昶,鄢晓忠,高晨,等.FGD取消回转式 GGH 带来的问题及解决措施[J].工业炉,2016(5):6.
- [10]蔡少丽.湿法脱硫 GGH 结垢问题探讨[J].科技与企业,2012(3):1.

基于 BIM 技术的变电站电气设备安装监理及工程效率

岑贤航

广东创成建设监理咨询有限公司, 广东 广州 510000

DOI:10.61369/EPTSM.2025070016

摘 要 : 介绍 BIM 技术在变电站电气设备安装监理中的应用, 包括其核心功能及在各阶段优势。阐述变电站工程 BIM 实施架构, 涉及三维协同管理平台 and 数据库体系。还介绍监理在主变压器等安装及二次设备调试的工作, 以及基于点云扫描的质量验收等内容, 最后提及 BIM 技术的协同管理价值、发展方向及相关技术融合问题与展望。

关 键 词 : BIM 技术; 变电站; 电气设备安装监理

BIM Technology-Based Supervision of Electrical Equipment Installation and Engineering Efficiency in Substations

Cen Xianhang

Guangdong Chuangcheng Construction Supervision & Consulting Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510000

Abstract : This paper presents the application of BIM technology in supervising electrical equipment installation for substations, detailing its core functions and advantages across project phases. It describes the BIM implementation framework for substation engineering, covering the 3D collaborative management platform and database system. The study also addresses supervisory tasks during the installation of main transformers and other equipment, secondary equipment commissioning, and quality acceptance using point cloud scanning. Finally, it discusses the collaborative management value of BIM, future development directions, and challenges with technology integration.

Keywords : BIM technology; substation; supervision of electrical equipment installation

引言

随着我国电力行业的不断发展, 2020 年相关政策强调了要加强电力工程建设中的技术创新与质量管控。BIM 技术在变电站电气设备安装监理中具有重要作用。它涵盖参数化建模、信息集成管理和三维协同设计等核心功能, 这些功能在变电站设备安装各阶段优势显著。同时, BIM 技术应用于变电站工程实施架构、主变压器安装、二次设备调试监理创新等多个方面, 包括构建三维协同管理平台框架、建立 BIM 数据库体系以及采用 BIM+ 智能校验系统等。基于此, 深入研究 BIM 技术在变电站电气设备安装监理中的应用具有重要的现实意义。

一、BIM 技术在电力工程中的理论基础

(一) BIM 技术核心功能解析

BIM 技术具有多种核心功能。其参数化建模功能可通过定义参数和规则来创建智能模型, 能快速修改和更新模型, 提高设计效率和准确性^[1]。信息集成管理功能能够将各种工程信息整合到一个三维模型中, 包括设备参数、施工进度等, 方便各方获取和管理信息。三维协同设计功能支持不同专业的设计人员在同一平台上协同工作, 实时共享和交流设计想法, 避免设计冲突。这些功能在变电站设备安装阶段具有显著优势, 例如参数化建模可准确模拟设备安装空间, 信息集成管理有助于实时监控安装进度和设备状态, 三维

协同设计可提前解决不同专业间的安装冲突问题。

(二) 变电站工程 BIM 实施架构

变电站工程 BIM 实施架构包括构建三维协同管理平台框架以及建立 BIM 数据库体系。在三维协同管理平台框架方面, 涵盖设计审查、施工模拟以及进度管控等重要环节。通过设计审查, 可利用 BIM 技术对变电站设计方案进行全面细致的检查和优化, 确保设计的合理性和可行性^[2]。施工模拟则能提前预测施工过程中可能出现的问题, 为施工提供有效的指导。监理在进度管控借助 BIM 的可视化特性, 能够实时监控工程进度, 及时调整偏差。同时, 建立的 BIM 数据库体系包含设备参数族库和安装工艺标准库, 为变电站工程提供准确的数据支持和规范标准。

二、变电站设备安装监理流程优化

（一）电气一次设备安装监理要点

主变压器安装方面，监理需依据 BIM 模型模拟的安装工艺严格把控。对各部件安装顺序、位置精度及连接牢固性重点检查，确保符合设计规范^[3]。GIS 设备对接时，利用 BIM 碰撞检测功能提前发现问题，监理在现场监督对接过程，保证设备接口紧密、GIS 导体插入深度足够确保电气连接可靠。母线桥架定位精度控制上，借助 BIM 精确的空间定位信息，监理核验母线桥架安装位置是否准确，确保母线敷设顺畅，桥架支撑稳固，能承受母线重量及运行时产生的应力，从而保障电气一次设备安装质量。

（二）二次设备调试监理创新

在二次设备调试监理创新方面，可采用 BIM+ 智能校验系统。利用该系统实现保护装置逻辑验证，通过智能算法和模型分析，确保保护装置逻辑的准确性和可靠性^[4]。同时，进行电缆回路智能校核，对电缆连接的正确性、完整性以及回路的电气性能进行全面检查，避免因电缆问题导致的设备故障。此外，实现 SCADA 系统联调全过程可视化管理，监理人员可实时监控系统联调过程中的各项参数和状态，及时发现并解决问题，提高调试效率和质量，保障变电站二次设备的正常运行。

三、工程质量安全协同管控体系

（一）智能化质量控制方法

1. 基于点云扫描的质量验收

基于点云扫描的质量验收在变电站电气设备安装工程中具有重要意义。三维激光扫描可获取电气设备及安装环境的精确点云数据，通过与 BIM 模型比对技术，能够实现安装尺寸偏差的自动化检测^[5]。点云数据反映了实际安装情况的细节，为质量验收提供了客观、准确的依据。与传统方法相比，这种基于点云扫描的技术大大提高了监理检测的效率和精度，能够帮助监理人员及时发现安装过程中的质量问题，如设备位置偏差、连接部件的安装误差、质量通病等，从而保障变电站电气设备的安装质量，确保工程的顺利进行和后期运行的安全性与可靠性。

2. VR 安全培训系统构建

建立涵盖设备吊装、高压试验等危险作业的沉浸式安全培训系统，监理可借助 VR 技术实现安全管控。利用 VR 的虚拟现实特性，模拟设备吊装的真实场景，包括起重机的操作、吊索的绑扎、起吊的角度和力度控制等关键环节，让操作人员在虚拟环境中进行多次练习，熟悉正确的操作流程和 safety 注意事项。对于高压试验，同样可以通过 VR 系统模拟试验环境、设备连接和操作步骤，使操作人员了解高压电的危险性以及试验过程中的安全防护要求。这种沉浸式的培训系统能够提高操作人员的安全意识和技能水平，减少实际作业中的安全风险。

（二）动态风险管理机制

1. 风险预警知识库建设

风险预警知识库建设是工程质量安全协同管控体系中动态风

险管理机制的重要组成部分。通过集成历史工程数据构建设备安装风险特征库，对变电站电气设备安装过程中可能出现的风险进行全面梳理和分类。这些风险特征涵盖了设备选型、安装工艺、施工环境等多个方面。同时，建立应对预案智能匹配系统，当识别到特定风险时，能够快速准确地从知识库中提取相应的应对预案。该系统基于先进的算法和模型，可根据风险的严重程度、发生概率等因素进行优先级排序，为监理人员和施工团队提供及时有效的决策支持，确保工程质量和安全可控。

2.4D 进度 - 风险耦合模型

在工程质量安全协同管控体系的动态风险管理机制中，监理创建 4D 进度 - 风险耦合模型具有重要意义。通过将施工进度与安全风险指标相融合，构建动态预警模型及应急响应机制。该模型利用 4D 技术，将时间维度（4D 中的 D）与三维空间信息相结合，能够更准确地反映工程进展情况。在此基础上，引入安全风险指标，监理对施工过程中的风险进行实时监测和评估。当风险指标超出设定阈值时，动态预警模型及时发出警报，触发应急响应机制。这有助于监理人员迅速采取措施，降低风险对工程质量和安全的影响，确保变电站电气设备安装工程的顺利进行。

四、基于 BIM 的全生命周期监理体系构建

（一）设计阶段技术预控

1. 设备选型参数化验证

在监理设计阶段的设备选型参数化验证中，监理采用 BIM 参数驱动模型可实现设备选型的经济性 - 可靠性综合评估。利用 BIM 模型参数化特性，对电气设备的各项参数进行精确设定和分析。通过模拟不同工况和运行条件，验证设备在实际工程中的性能表现。同时，结合经济成本因素，综合考量设备的采购成本、运行维护成本以及寿命周期成本等。以确保所选设备既能满足变电站电气设备安装的技术要求，又能在经济上达到最优。这种参数化验证方法为设备选型提供了科学、准确的依据，有助于工程监理在施工阶段降低设备安装难度从而提高工程质量和效率。

2. 空间布局可施工性分析

在设计阶段的空间布局可施工性分析中，BIM 可视化技术至关重要。通过 BIM 模型，可对变电站电气设备的操作空间进行验证，确保操作人员有足够的空间进行设备操作，避免因空间不足导致的操作困难和带电安全距离不足导致的安全隐患。同时，监理人员利用 BIM 对检修通道进行模拟，分析其合理性和可行性。这有助于监理提前发现可能存在的问题，如通道狭窄、障碍物阻挡等，以便在设计阶段及时调整，优化空间布局，提高施工的可操作性和效率，为后续的电气设备安装和运维提供良好的基础。

（二）施工阶段智慧监管

1. 移动终端协同管理平台

移动终端协同管理平台在施工阶段智慧监管中具有重要作用。该平台需开发支持现场问题标注、整改跟踪的移动端监理信息系统。通过 BIM 模型与移动终端的结合，监理人员可在现场直

接对发现的问题进行标注,如在电气设备安装过程中,对设备位置偏差、连接不规范等问题进行精准定位和描述。同时,系统能够实时跟踪整改情况,对整改措施、责任人、整改期限等进行记录和提醒。这不仅提高了问题发现和解决的效率,还保证了施工质量,实现了施工阶段的智慧化监管,使得监理工作更加高效、精准。

2. 物料追踪管理系统

在施工阶段智慧监管的物料追踪管理系统中,集成 RFID 技术可实现设备进场验收、安装定位全过程追溯管理。利用 RFID 标签为物料赋予唯一标识,在进场时可快速准确地获取物料信息,与 BIM 模型中的数据进行比对,确保物料符合设计要求。在安装过程中,通过在关键部位设置 RFID 读取设备,实时获取物料的位置信息,并反馈到 BIM 系统中,实现监理对设备安装定位的动态监控。这不仅有助于提高施工效率,避免因物料错误或安装位置偏差导致的返工,还能为后续的运维管理提供准确的数据支持,实现变电站电气设备全生命周期的精细化管理。

(三) 运维阶段数字孪生应用

1. 竣工模型交付标准

在竣工模型交付标准方面,需制定覆盖设备参数、检测数据的竣工模型 LOD500 标准体系。此标准体系应详细规范电气设备的各项参数信息,确保其准确性和完整性。对于设备参数,监理要明确记录设备的型号、规格、性能指标等关键信息,以便后续运维阶段能准确了解设备特性。同时,检测数据也至关重要,包括设备的安装检测、调试检测以及运行过程中的定期检测数据等,都应纳入竣工模型中。通过这样的标准体系,能够为变电站

电气设备的运维管理提供全面、可靠的数据支持,实现基于 BIM 的全生命周期监理体系在竣工交付环节的有效衔接,为运维阶段的数字孪生应用奠定坚实基础。

2. 预防性维护决策支持

在运维阶段数字孪生应用的预防性维护决策支持方面,利用 BIM 模型结合物联网技术,实时获取电气设备的运行数据。通过对大量数据的分析,建立设备故障预测模型。该模型可依据设备的实时状态及历史数据,预测可能出现的故障类型及时间节点。同时,基于数字孪生的可视化特性,直观呈现设备内部结构及运行状态,辅助监理人员准确判断设备潜在问题。此外,结合维护成本、设备重要性等因素,制定科学合理的预防性维护计划,优化维护资源配置,提高维护效率,确保变电站电气设备的稳定运行。

五、总结

BIM 技术在变电站电气设备安装监理中展现出协同管理价值,通过整合信息、优化流程,提高了监理效率与质量。同时,提出面向智能变电站的数字监理发展方向,为行业进步提供思路。然而,当前 BIM 标准体系与电力行业融合存在不足,这在一定程度上限制了其应用效果。展望未来,区块链+数字孪生技术在工程监理领域具有广阔应用前景。它有望进一步提升监理的智能化水平,实现对工程更精准的监控和管理,解决现有技术面临的一些难题,推动变电站电气设备安装监理及工程效率迈向新的台阶。

参考文献

- [1] 刘小兵. 变电站电气设备安装工程项目冲突及其管理策略 [D]. 华北电力大学 (北京), 2021.
- [2] 朱慧. 基于 KBE 的机电安装工程 BIM 设计审查方法研究 [D]. 中国矿业大学 (江苏), 2022.
- [3] 冯爽爽. 基于红外技术的变电站关键电气设备故障诊断研究 [D]. 西南石油大学, 2022.
- [4] 乔天时. 基于 BIM 电力工程造价研究 —— 以 XX35kV 变电站工程为例 [D]. 西华大学, 2023.
- [5] 樊丹. 变电站电气设备安装工程的技术要点 [J]. 电力设备管理, 2022(23): 270-272.

电力工程与新能源项目技术管理的融合与创新

沈树光

广东广澳能源科技有限公司, 广东 汕头 515000

DOI:10.61369/EPTSM.2025070017

摘 要 : 本文探讨电力工程与新能源项目技术管理。阐述电力工程技术管理特征, 包括系统性、复杂性等。介绍新能源项目特殊需求, 如并网标准等。还涉及融合体系下风险管理框架、数据互联规范、智能决策支持系统等内容, 强调融合创新的意义及新兴技术应用前景。

关 键 词 : 电力工程; 新能源; 技术管理

Integration and Innovation of Technical Management in Power Engineering and New Energy Projects

Shen Shuguang

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

Abstract : This paper explores the technical management of power engineering and new energy projects. It elaborates on the characteristics of power engineering technical management, including systematicity, complexity, etc. It introduces the special requirements of new energy projects, such as grid connection standards. It also covers risk management frameworks under integrated systems, data interconnection specifications, intelligent decision support systems, and other related content, emphasizing the significance of integration and innovation as well as the prospects for emerging technology applications.

Keywords : power engineering; new energy; technical management

引言

随着能源领域的不断发展, 电力工程与新能源项目的融合已成为重要趋势。2020年我国发布的《新能源产业发展规划》强调了新能源在能源体系中的重要地位以及与传统电力工程融合的必要性。电力工程技术管理具有系统性、复杂性、规范性和长周期性等特征, 新能源项目在并网标准、储能配置和环境适应性等方面有特殊需求。在融合体系下, 技术融合风险识别矩阵、动态风险评估机制等至关重要。同时, 数据互联规范、智能决策支持系统、核心标准体系等方面的研究与构建也不可或缺。这些都对电力工程与新能源项目的可持续发展具有关键作用。

一、电力工程与新能源项目技术管理基础分析

(一) 电力工程技术管理特征

电力工程技术管理具有多方面特征。从系统性角度来看, 电力工程涵盖发电、输电、变电、配电和用电等多个环节, 各环节紧密相连, 需要统一协调管理, 任何一个环节出现问题都可能影响整个电力系统的稳定运行^[1]。其技术复杂性高, 涉及到电气、机械、自动化等多个学科领域的知识和技术。例如特高压输变电技术, 需要解决高电压绝缘、电磁环境等诸多复杂技术问题。同时, 电力工程技术管理还具有很强的规范性, 需要遵循严格的标准和规范, 如智能电网运维规范等, 以确保工程质量和安全。另外, 电力工程的建设和运营周期长, 这就要求技术管理在不同阶

段都要有相应的规划和措施, 以适应长期的发展需求。

(二) 新能源项目技术管理需求

光伏、风电等新能源项目在技术管理上有特殊需求。在并网标准方面, 需满足电网接入的相关规范, 包括电能质量、功率控制等要求, 以确保稳定接入电网^[2]。储能配置对于新能源项目至关重要, 由于新能源发电的间歇性和不稳定性, 合理的储能系统可调节电能供需, 提高能源利用效率。环境适应性也是关键因素, 光伏项目需考虑不同地理环境和气候条件对光伏组件性能的影响, 风电项目则关注风力资源特性以及极端天气对风机的影响, 从而采取相应的技术管理措施来保障项目的稳定运行和高效发电。

二、融合体系下的工程风险管理框架

（一）技术融合风险识别矩阵

在融合体系下的工程风险管理框架中，技术融合风险识别矩阵至关重要。对于电力工程与新能源项目技术管理的融合，构建包含设备兼容性、系统协调性、技术成熟度的多维风险评价模型是关键。设备兼容性方面，需考虑不同设备在融合环境下的相互适配性，避免出现不兼容导致的故障风险^[9]。系统协调性要求关注电力系统与新能源系统在运行过程中的协同工作能力，确保能量的稳定传输与分配。技术成熟度则要评估融合技术在实际应用中的可靠性和稳定性，防止因技术不成熟引发的安全隐患和效率低下问题。通过综合考虑这三个维度，能够更全面地识别技术融合过程中的风险，为后续的风险管理提供有力依据。

（二）动态风险评估机制

融合体系下的工程风险管理框架中的动态风险评估机制是一个关键部分。基于 BIM 与数字孪生技术开发实时监测系统，能够实时获取工程相关数据。通过对这些数据的分析处理，建立风险预警指数评估体系^[10]。该体系可以综合考虑多种风险因素，如工程进度、质量、安全以及环境等方面的潜在风险。利用实时监测到的数据，对风险预警指数进行动态更新，以便及时准确地反映工程风险状况。这样，工程管理人员可以根据风险预警指数的变化，提前采取相应的风险管理措施，有效降低工程风险，确保工程的顺利进行。

三、新技术管理模式创新实践

（一）智能化协同管理平台

1. 多源异构数据集成技术

随着电力工程与新能源项目的融合发展，电力 SCADA 系统与新能源监控平台的数据互联规范研究至关重要。在多源异构数据集成技术应用中，需统一数据格式与通信协议标准^[11]。电力 SCADA 系统与新能源监控平台数据来源多样，结构复杂，包括实时运行数据、设备状态数据等。通过建立规范的数据互联接口，可实现数据的高效传输与共享。这不仅有助于提升系统的协同管理能力，还能为电力工程与新能源项目的技术管理提供准确的数据支持，从而优化项目运行，提高能源利用效率，推动电力行业的可持续发展。

2. 智能决策支持系统

随着电力工程与新能源项目的融合发展，智能决策支持系统愈发重要。开发基于机器学习的异常工况诊断算法与优化调度策略是关键内容之一。通过机器学习算法对大量历史数据进行分析挖掘^[12]，可以建立准确的设备运行模型和工况识别模式。这有助于及时发现电力系统中的异常工况，提前预警并采取措施，提高系统的可靠性和稳定性。同时，优化调度策略能够根据实时的能源供应和需求情况，合理安排发电设备的运行，提高能源利用率，降低成本，促进电力工程与新能源项目的可持续发展。

（二）标准化—柔性化双轨体系

1. 核心标准体系构建

构建核心标准体系需制定新能源并网技术管理规范与验收标

准。明确新能源接入电网的各项技术要求，包括电能质量、功率控制、电压调节等方面的规范^[13]。确保新能源发电系统在并网时能满足电网的稳定运行需求，保障电力供应的可靠性和安全性。同时，制定详细的验收标准，对新能源项目的设备性能、技术参数、运行效果等进行严格检验，只有符合标准的项目才能并网运行。这不仅有助于规范新能源项目的建设和运营，也为电力工程与新能源项目的融合提供了技术保障，促进新能源在电力系统中的有效利用。

2. 柔性管理模块设计

建立应对政策调整与技术迭代的适应性管理机制是柔性管理模块设计的重要内容。需考虑到电力工程与新能源项目所处环境的动态变化，这种变化包括政策法规的不断调整以及技术的快速迭代^[14]。政策调整可能影响项目的发展方向和合规性要求，技术迭代则可能使现有技术方案迅速过时。因此，适应性管理机制应具备敏锐的洞察力，能够及时捕捉政策和技术的变化信号。同时，要建立灵活的决策流程和资源调配系统，以便在变化发生时迅速做出反应，调整项目的技术管理策略，确保项目能够持续适应新的环境要求，保障项目的顺利推进和可持续发展。

四、全生命周期投资风险管控体系

（一）技术经济综合评价模型

1. LCOE 模型优化

在全生命周期投资风险管控体系的技术经济综合评价模型中，LCOE 模型的优化至关重要。其中，改进平准化度电成本计算模型并纳入技术可靠性因子是关键步骤^[15]。通过考虑技术可靠性因子，能够更准确地反映电力工程与新能源项目在实际运行过程中的不确定性和风险。这有助于投资者和决策者更好地评估项目的经济可行性和潜在收益，从而做出更合理的投资决策。同时，该优化也使得 LCOE 模型在评估不同技术方案和项目时更加全面和科学，为电力工程与新能源项目的技术管理融合与创新提供了有力的支持。

2. 全要素敏感性分析

电价政策和技术折旧率等参数对投资收益具有重要影响。电价政策直接关系到电力项目的收入端，不同的电价定价机制和调整政策会使项目收益产生波动^[16]。例如，固定电价与市场电价机制下，项目面临的风险和盈利模式不同。技术折旧率影响成本核算，较高的折旧率意味着更快的资产价值损耗，增加了成本支出，从而压缩利润空间。同时，这些参数之间可能存在相互作用，进一步复杂了对投资收益的影响路径。综合考虑这些因素，在电力工程与新能源项目技术管理中，需准确把握这些参数的变化及其综合影响，以有效管控投资风险，实现项目的经济可行性和可持续发展。

（二）风险对冲决策支持

1. 金融衍生工具应用

期货套期保值是一种常用的金融衍生工具，在电价波动风险管理中具有一定的适用性。通过期货市场，电力企业可以锁定未

来的电价，从而避免因电价波动带来的风险。在具体应用中，企业需要根据自身的风险承受能力和市场预期，选择合适的期货合约和套期保值策略。同时，还需要密切关注市场动态，及时调整套期保值方案，以确保其有效性。然而，期货套期保值也存在一些局限性，如基差风险、流动性风险等。因此，企业在应用期货套期保值时，需要充分认识到这些风险，并采取相应的措施加以防范。

2. 保险机制创新

在全生命周期投资风险管控体系的保险机制创新方面，针对电力工程与新能源项目技术迭代风险，需设计创新型工程保险产品。这类保险产品应充分考虑技术发展的动态性，覆盖从项目规划到运营的各个阶段可能因技术更新换代带来的风险。它不仅要保障现有技术的稳定应用，还要对新技术引入过程中可能出现的问题提供风险补偿。通过与技术专家和保险精算师合作，精确评估技术迭代风险的概率和损失程度，合理确定保险费率和赔付条款，从而为投资者提供有效的风险对冲工具，促进电力工程与新能源项目的可持续发展。

（三）实证研究—某风光储一体化项目

1. 技术管理实施路径

某风光储一体化项目全生命周期投资风险管控体系中的技术管理实施路径至关重要。在项目前期规划阶段，需精确评估风光资源，运用先进技术手段确保选址合理，降低资源风险。同时，对储能系统的选型和配置进行技术经济分析，以匹配项目需求。

在项目建设阶段，严格把控施工技术标准，确保风电机组、光伏组件及储能设备的安装质量。采用智能监控技术实时监测设备运行状态，及时发现并解决技术问题。

在运营阶段，利用大数据和人工智能技术对项目运行数据进

行分析，优化设备运行参数，提高发电效率和储能利用效率，从而实现全生命周期投资风险的有效管控。

2. 风险管控成效评估

对于某风光储一体化项目全生命周期投资风险管控体系的成效评估，采用对比分析法。一方面，对比项目实施风险管控体系前后的投资成本，发现成本得到有效控制。在风险管控下，避免了许多因风险导致的额外支出，如设备故障维修成本、工期延误带来的人力成本增加等。另一方面，对比项目预期收益与实际收益，实际收益达到或接近预期。这得益于风险管控对项目进度、质量的保障，确保项目按时按质投入运营，实现稳定的发电及储能效益。同时，通过对项目过程中风险事件发生频率及影响程度的统计分析，发现风险事件显著减少，且影响程度降低，进一步证明了该风险管控体系的有效性。

五、总结

电力工程与新能源项目技术管理的融合与创新具有重要意义。新型技术管理模式在提升工程可靠性和降低全生命周期成本方面展现出实践价值。通过有效的技术管理融合，能够优化工程流程，减少故障发生概率，确保电力供应的稳定性。同时，降低成本有助于提高项目的经济效益和市场竞争能力。展望未来，5G、区块链等新兴技术在管理体系中的深化应用前景广阔。5G技术可实现更高效的信息传输和设备远程控制，提高管理效率；区块链技术能增强数据的安全性和透明度，为技术管理提供可靠的数据支持。这些新兴技术的应用将进一步推动电力工程与新能源项目技术管理的创新发展。

参考文献

- [1] 马云龙. YL集团新能源平价上网项目投资与运营管理研究 [D]. 沈阳理工大学, 2021.
- [2] 谢昌维. 税收优惠、企业创新与企业绩效——以新能源产业为例 [D]. 首都经济贸易大学, 2021.
- [3] 吕泓燃. 克南电力工程施工过程成本管理研究 [D]. 沈阳建筑大学, 2023.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 徐婉月. 电力工程技术管理的难点和对策 [J]. 科技创新与应用, 2021, 11(19): 191-193.
- [7] 崔鹏飞. 电力工程技术管理的难点及对策 [J]. 电力系统装备, 2021, 000(020): 131-132.
- [8] 王渭元. 电力工程技术管理的难点及对策分析 [J]. 建筑与装饰, 2021, (5): 63, 67-63, 67.
- [9] 顾迪. 新能源电力工程施工质量提升探究 [J]. 科学与信息化, 2022(18): 4-6.
- [10] 张云. 新能源电力工程造价的控制方法 [J]. 科学与信息化, 2022(18): 25-27.

建筑工程中机电设备安装与风险管理研究 ——以商场酒店为例

廖江永

佛山市顺德区华桂园酒店有限公司, 广东 佛山 528000

DOI:10.61369/EPTSM.2025070018

摘 要 : 阐述商场酒店机电设备安装相关内容, 包括空调消音、管材防冻胀等技术, 强调交叉作业协调机制及 BIM 应用。分析安装风险特征并提出控制对策。还涉及供电、消防等系统升级及设备状态监测等, 构建智能化风险管理体系, 提升验收合格率, 提出全生命周期管理方向。

关 键 词 : 机电设备安装; 风险管理; 商场酒店

Research on Installation and Risk Management of M&E Equipment in Construction Engineering—Taking Shopping Mall Hotels as Examples

Liao Jiangyong

Huaguiyuan Hotel Co., Ltd., Shunde District, Foshan, Guangdong 528000

Abstract : This paper elaborates on key aspects of M&E equipment installation in shopping mall hotels, including technologies such as air conditioning noise reduction and freeze-proof expansion of pipes, highlighting cross-operation coordination mechanisms and BIM application. It analyzes the characteristics of installation risks and proposes control measures. Additionally, it covers system upgrades (e.g., power supply and fire protection) and equipment condition monitoring, establishing an intelligent risk management system to improve the acceptance pass rate. Directions for full lifecycle management are also proposed.

Keywords : M&E equipment installation; risk management; shopping mall hotels

引言

随着建筑行业的不断发展, 机电设备安装商场酒店等建筑工程中愈发重要。近年来, 我国相关部门陆续颁布了一系列关于建筑工程质量和安全的政策法规 (如《建设工程质量管理条例》2019 年修订版), 强调了对各个环节严格把控的重要性。机电设备安装涉及多个方面, 包括空调系统管路消音、给排水管材防冻胀、消防设施抗震支架安装等, 同时交叉作业协调机制、风险特征及控制对策、设备状态监测等也是关键内容。本研究以商场酒店为例, 深入探讨相关问题, 并通过实际应用取得显著成效, 为建筑工程机电设备安装与风险管理提供了有益参考。

一、商场酒店机电设备安装技术管理

(一) 设备安装技术要点

空调系统管路消音处理方面, 需选用合适的消音材料, 如吸音棉等, 对管路进行包裹处理, 降低噪音传播^[1]。同时, 合理设计管路走向, 避免急弯和管径突变, 减少气流冲击产生的噪音。给排水管材防冻胀技术至关重要, 在寒冷地区, 要对管材进行保温处理, 可采用保温棉等材料。埋地敷设的管材, 要注意埋深, 避免因土壤冻胀导致管材破裂。消防设施抗震支架安装需符合相关规范, 确保支架具有足够的强度和稳定性, 能够在地震等灾害发生时, 保障消防设施的正常使用。在既有建筑改造中, 由于空

间限制, 要精确测量空间尺寸, 合理规划设备安装位置, 避免相互干扰。

(二) 交叉作业协调机制

在商场酒店机电设备安装过程中, 交叉作业协调机制至关重要。通过建立机电综合管线深化设计流程, 可有效避免各专业管线之间的冲突^[2]。基于 BIM 的施工界面管理系统能为交叉作业提供可视化的管理平台, 各专业施工人员可清晰了解自身作业范围及与其他专业的交叉区域。例如, 针对强弱电桥架与通风管道空间冲突这一典型问题, 利用 BIM 技术可在设计阶段提前发现并调整, 确保各设备及管线安装位置合理。同时, 在施工过程中, 定期召开交叉作业协调会议, 加强各专业施工队伍之间的沟通与协

作，及时解决出现的问题，保证机电设备安装工程的顺利进行。

二、设备安装风险识别与管控

（一）风险特征分析

在建筑工程机电设备安装中，存在多种风险特征。材料进场质量缺陷是关键风险之一，占比42%，这可能导致设备性能不达标，影响整体安装效果与后续使用^[3]。工序衔接失误占28%，各工序间配合不当会延误工期，增加成本，还可能引发安全隐患。调试阶段参数超标占19%，此情况会使设备无法正常运行，影响其功能发挥。这些风险相互关联，如材料缺陷可能引发调试问题，工序衔接失误也可能导致调试阶段的困难，共同对机电设备安装的质量、进度和安全产生负面影响。

（二）风险控制对策

针对设备安装风险，可采取一系列控制对策。开发基于FMEA的安装质量预警系统，能够及时发现潜在风险并发出预警，以便提前采取措施加以防范^[4]。设置包含三级验收节点的验收制度，在不同阶段对设备安装质量进行严格把控，确保每一个环节都符合标准。通过工艺样板引路制度，为施工人员提供明确的操作规范和质量标准，避免因操作不规范导致的风险。对关键设备实施驻厂监造，从源头上保障设备质量。同时，综合运用15项管控措施的组合策略，从多个维度对设备安装风险进行全面管控，提高设备安装的安全性和可靠性，确保建筑工程中机电设备的正常运行。

三、典型系统安装案例分析

（一）配电系统改造

1. 双电源切换装置调试

某商场供电系统存在EPS自备投误动作故障，严重影响商业建筑的连续供电需求。通过对继电保护定值进行整定优化，成功将双电源切换时间缩短至89ms。这一优化方案的实施，有效解决了供电系统的故障问题，确保了商场在电源切换过程中能够实现快速、稳定的过渡，避免了因供电中断对商业运营造成的不利影响，满足了商业建筑对连续供电的严格要求，为商场的正常运营提供了可靠的电力保障^[5]。

2. 电缆防火封堵实践

在酒店竖井中，对矿物棉、防火胶泥、膨胀型封堵材料的应用效果进行了对比研究^[6]。矿物棉具有良好的隔热性能，但在防火封堵的完整性方面可能存在不足。防火胶泥能够有效填充缝隙，阻止火势蔓延，但施工难度相对较大。膨胀型封堵材料在遇火时会膨胀，形成密封结构，但其膨胀倍数和稳定性需要进一步考量。基于这些研究，提出了基于烟气扩散模型的封堵间距优化计算方法。该方法综合考虑了不同材料的性能、竖井的结构特点以及火灾时烟气的扩散规律，能够更科学地确定防火封堵的间距，提高电缆防火封堵的效果，保障配电系统的安全运行。

（二）消防系统升级

1. 智能疏散系统调试

在商场酒店的消防系统升级中，智能疏散系统调试至关重要。对于应急照明线路，存在阻抗匹配难题，通过技术手段解构该难题是关键一步。采用带地址编码的智能灯具，不仅能够有效

解决这一问题，还可实现动态疏散路径规划。这种智能灯具能够依据现场实际情况，实时调整疏散路径，为人员疏散提供更准确、高效的指引。经实践验证，这一措施使得应急响应速度大幅提升，达到了34%^[7]，极大提高了商场酒店在火灾等紧急情况下的人员疏散能力和安全性。

2. 气体灭火系统安装

在商场酒店建筑工程的机电设备安装中，消防系统升级至关重要，尤其是气体灭火系统安装部分。以酒店数据中心管网式七氟丙烷装置为例，其安装误差会对灭火浓度产生影响。当喷头定位不准确时，灭火剂的喷射分布可能无法达到设计要求的灭火浓度，从而影响灭火效果。为解决这一问题，可建立三维点云扫描辅助的喷头定位精度控制体系。该体系能够精确测量喷头的位置，及时发现并纠正安装误差，确保喷头的定位精度在合理范围内，从而保证七氟丙烷装置在火灾发生时能够有效地释放灭火剂，达到预期的灭火浓度，保障酒店数据中心的消防安全^[8]。

四、智能化风险管理体系构建

（一）数字孪生技术应用

1. 设备状态监测平台

在设备状态监测平台构建中，可采用集成振动传感器和热成像仪的边缘计算节点布局方案。通过合理布局这些节点，能够对冷水机组等关键设备进行有效监测。振动传感器可捕捉设备运行时的振动数据，热成像仪则能获取设备的温度分布情况。这些数据在边缘计算节点进行初步处理和分析，及时发现潜在故障隐患。该方案经过实践验证，能够使关键设备故障预测准确率达92%以上^[9]，为建筑工程中机电设备的智能化风险管理提供了有力支持，有助于提高商场酒店等建筑的机电设备运行可靠性和安全性。

2. VR安全培训系统

在VR安全培训系统中，开发了包含高空作业车倾覆、电气短路电弧等28个风险场景的沉浸式培训模块。通过这些真实且危险的场景模拟，作业人员能够身临其境地感受风险的存在，从而更加直观地识别风险。这种沉浸式的培训方式极大地提高了作业人员的风险识别能力，使其提升了57%^[10]。这对于建筑工程中机电设备安装的风险管理至关重要，能够有效减少因风险识别不足而导致的事故发生，保障作业人员的生命安全以及工程的顺利进行。

（二）管理体系优化

1. 风险数据库建设

在智能化风险管理体系构建中，管理体系优化及风险数据库建设至关重要。对于风险数据库建设，以商场酒店机电设备安装为例，需构建全面的风险事件知识图谱。如本研究构建了包含362个机电安装风险事件的知识图谱，涵盖设备选型、安装工艺、调试运行等多方面风险。同时，开发基于自然语言处理的缺陷报告自动分类系统。该系统可对大量的机电设备安装缺陷报告进行智能分类，快速准确地识别风险类型和来源。这不仅提高了风险管

理的效率，还能后续的风险评估和决策提供有力的数据支持，从而实现对建筑工程中机电设备安装风险的有效管控。

2.PDCA循环改进

PDCA循环作为质量管理的基本方法，在风险管理体系优化中同样适用。计划（Plan）阶段，基于商场酒店机电设备安装的特点和风险因素，设计包含 KPI考核指标的质量追溯系统，明确目标和计划。执行（Do）阶段，将该系统应用于实际项目中，如某酒店项目，严格按照系统要求进行操作和记录。检查（Check）阶段，对该酒店项目的执行情况进行检查，通过12个整改闭环案例分析，验证系统是否有效运行以及是否达到预期目标。处理（Act）阶段，根据检查结果，总结经验教训，对有效的措施进行标准化和推广，对存在的问题制定改进措施，进入下一个 PDCA 循环，不断优化风险管理体系。

（三）应急响应机制

1. 预案动态生成算法

在建筑工程机电设备安装风险管理中，构建智能化体系至关重要。其中应急响应机制下的预案动态生成算法是关键。可结合施工进度和气象条件建立风险预警模型。通过实时监测施工进度相关数据以及气象信息，将其作为算法的重要输入参数。当监测数据出现异常波动，触发风险预警。算法依据设定的规则和权重，快速分析风险可能带来的影响，动态生成与之匹配的应急预案。这种基于实时数据的动态生成方式，能有效提高应急响应的及时性和准确性，从而实现应急预案响应时间大幅缩短，如在商场酒店项目中可缩短至19分钟，为机电设备安装工程的顺利进行提供有力保障。

2.多源信息联动平台

在建筑工程机电设备安装风险管理中，需集成 BIM 运维数据与物联网监测信息来构建多源信息联动平台，并建立跨部门应急指挥系统决策响应时间轴。BIM 运维数据涵盖机电设备的设计、施工及运行维护等各阶段信息，能全面反映设备状态。物联网监测信息则实时获取设备的运行参数。将两者集成，可实现数据的互补与融合，为风险评估提供更准确依据。跨部门应急指挥系统决策响应时间轴的建立，明确各部门在应急响应中的职责和时间节点。当出现风险事件时，依据时间轴迅速启动相应措施，提高应急响应效率，保障商场酒店机电设备的正常运行，降低风险损失。

五、总结

本研究以商场酒店为例，探讨了建筑工程中机电设备安装与风险管理。通过相关技术管理方案在某市大型商业综合体改造项目中的应用，取得了显著成效，设备安装一次验收合格率大幅提升至98.7%。这不仅证明了有效管理措施对机电设备安装质量的重要性，也为后续类似项目提供了实践参考。同时，研究还提出了面向智慧运维的机电设备全生命周期管理这一研究方向，这将有助于进一步优化机电设备的管理，提高设备运行效率，降低风险，更好地适应现代建筑工程的发展需求，为建筑行业机电设备管理的持续进步奠定基础。

参考文献

[1] 孙序营. J 泵站机电设备安装工程安全风险管理问题研究 [D]. 青岛大学, 2021.
[2] 李杨霖. A 水电站机电设备安装工程进度管理研究 [D]. 西南交通大学, 2021.
[3] 钟瑞敏. 高校专项债券风险管理研究——以 A 大学为例 [D]. 云南财经大学, 2022.
[4] 李欣雨. 国企混改中税务风险管理问题研究——以 A 公司为例 [D]. 吉林大学, 2022.
[5] 王劲. 中小融资租赁企业风险管理研究——以 A 公司为例 [D]. 东南大学, 2021.
[6] 刘晓壮, 李萌萌. 建筑工程机电设备安装的施工与管理运用 [J]. 中国设备工程, 2023(21): 205-207.
[7] 柯翼之. 建筑工程中机电设备安装工程施工技术与质量管理探究 [J]. 中国设备工程, 2022(24): 183-185.
[8] 陆军本. 建筑工程施工中关于机电设备安装过程管理的探讨 [J]. 中国设备工程, 2021, 000(3): 260-261
[9] 马腾. 建筑工程施工中的绿色施工技术 [J]. 砖瓦世界, 2023(7): 52-54.
[10] 宋进锋. 关于机电设备安装工程施工技术管理的探讨 [J]. 中文科技期刊数据库 (引文版) 工程技术, 2015(12): 00267-00267.

“双重预防机制”在燃煤电厂工程建设应急管理中的融合应用研究

张迁, 崔恒涛, 秦义军

国家电投集团协鑫滨海发电有限公司, 江苏 盐城 224000

DOI:10.61369/EPTSM.2025070020

摘 要 : 本文聚焦风险管理与隐患排查治理双重预防机制与燃煤电厂建设工程应急管理体系的融合, 剖析了燃煤电厂工程高风险特性及传统应急管理“重响应、轻预防”的局限, 构建了以双重预防机制为核心的前瞻性应急管理新模式, 将风险分级管控与隐患排查治理融入应急管理全流程。结合某 300MW 燃煤电厂新建工程实例, 通过对比融合前后关键指标, 证实该融合可显著提升应急管理主动性、精准性与有效性。

关 键 词 : 双重预防机制; 燃煤电厂; 工程建设; 应急管理; 隐患排查

Research on the Integrated Application of "Dual Prevention Mechanism" in Emergency Management of Coal-Fired Power Plant Engineering Construction

Zhang Qian, Cui Hengtao, Qin Yijun

State Power Investment Corporation Xiexin Binhai Power Generation Co., Ltd., Yancheng, Jiangsu 224000

Abstract : This paper focuses on the integration of the dual prevention mechanism of risk management and hidden danger investigation and governance with the emergency management system of coal-fired power plant construction projects. It analyzes the high-risk characteristics of coal-fired power plant projects and the limitations of traditional emergency management that emphasizes response over prevention. A new forward-looking emergency management model centered on the dual prevention mechanism is constructed, integrating risk classification control and hidden danger investigation and governance into the entire emergency management process. By taking a new 300MW coal-fired power plant construction project as an example and comparing key indicators before and after the integration, it is confirmed that this integration can significantly enhance the proactiveness, accuracy and effectiveness of emergency management.

Keywords : dual prevention mechanism; coal-fired power plant; construction engineering; emergency management; hidden danger investigation

引言

一、研究背景与意义

(一) 研究背景

国家出台《关于推进安全生产领域改革发展的意见》等政策, 要求构建双重预防机制, 推动安全生产从被动应对转向主动防控。当前燃煤电厂工程建设规模扩大, 但事故多发, 2020-2023 年全国电力建设事故中燃煤电厂工程占比 38%, 主要为高空坠落、起重伤害、火灾爆炸等, 亟需有效风险防控与应急管理模式。

(二) 研究意义

理论意义: 现有研究多聚焦电厂生产运营阶段, 且割裂双重预防机制与应急管理, 本研究构建整合模型、阐明融合机理, 拓展工程项目应急管理理论框架。

现实意义：成果可直接应用于实践，提升应急管理主动性与精准性，降低事故率，保障工程推进，为行业提供参考。

二、国内外研究现状述评

（一）国外应急管理理论与实践

国外应急管理理论成熟，如美国“应急管理生命周期理论（PPRR 模型）”、英国生态韧性理论，德国推行“风险导向型应急管理”。但国外研究多基于本国环境，针对燃煤电厂等特定能源行业不足，缺乏与我国双重预防机制的结合探讨。

（二）国内双重预防机制的发展与应用研究

国内 2016 年起推进双重预防机制研究，学者明确其理论框架并在煤矿、建筑等行业探索实施路径；电力领域研究多集中于电厂运营阶段，如王鹏探讨其在火电厂运行中的应用。但现有研究行业适应性弱、与应急管理协同不足，燃煤电厂工程建设阶段研究薄弱。

（三）现有研究的不足与本研究创新点

现有不足：研究场景局限（聚焦运营阶段）、系统融合程度低（视两者为独立模块）、实践指导价值有限（缺乏实证）。

创新点：拓展研究场景至燃煤电厂工程建设阶段；构建双重预防机制为核心的应急管理融合模型（RERC）；结合某 2×350MW 工程实证，隐患整改效率提升 41.2%，应急响应时间缩至传统 1/3，形成标准化方案。

一、相关理论基础

（一）双重预防机制理论内核

1. 风险分级管控

核心是通过风险辨识、评估、控制降低风险概率与危害，三环节如下：

风险辨识：结合工程阶段（土建、安装、调试）与作业类型，用 JHA（作业活动）、SCL（设备环境）、HAZOP 等方法识别风险因素。

风险评估：定性（专家打分定高 / 中 / 低 / 极低等级）与定量（风险矩阵、LEC 法）结合，如 LEC 值 > 160 为重大风险。

风险控制：重大风险需专项方案与多重措施，较大风险定期检查，一般 / 低风险日常管理，如深基坑用边坡支护、实时监测等措施。

2. 隐患排查治理

通过隐患排查、治理、闭环管理防事故，四环节如下：

隐患定义：万物的隐患（起重机械制动失灵）、人的隐患（未戴安全带）、管理隐患（预案不完善）。

隐患排查：全员参与、全面覆盖，含日常（班组每日查现场）、专项（安全部门查高风险作业）、季节性 / 节假日排查，规范记录隐患信息。

隐患治理：分级管理，一般隐患当日整改，重大隐患成立专项组定方案（目标、技术、资源、时限、预案），治理期间暂停作业。

验收闭环：治理后责任部门申请验收，合格闭环，不合格重新治理，建立台账追溯。

3. 风险与隐患的逻辑关系

区别：风险是潜在不确定性（客观可能），如高空作业坠落风险；隐患是现实问题（确定存在），如未戴安全带。

联系：风险是隐患根源（风险管控不到位生隐患），隐患是

风险转事故桥梁（隐患未治致事故），形成“风险管控 – 隐患治理 – 事故预防”链条。

二、现代应急管理理论

（一）应急管理全过程模型（PPRR 模型）

将应急管理分四阶段，体现全周期管理：

预防阶段：通过风险辨识评估、防控措施、安全教育等防事故，如燃煤电厂识别深基坑等重大风险，定专项防控措施。

准备阶段：编制预案（如《起重机械事故预案》）、储备资源（起重机、灭火器等）、开展演练、建指挥体系，提升应急能力。

响应阶段：事故后发布预警、启动预案、组织救援（抢险、救护、疏散）、发布信息，如起重倾覆事故中抢救人员、设警戒区。

恢复阶段：事故调查、修复设施、人员安置与心理干预、总结改进，如分析事故是否因隐患未治，完善双重预防机制。

（二）系统韧性理论在应急管理中的应用

系统韧性指系统受扰后保持 / 恢复核心功能的能力，应用包括：

韧性构建：优化结构功能，如建多元风险防控体系、灵活指挥结构、跨区域资源调配，深基坑用监测、巡查、培训多维度防控。

韧性评估：用风险防控（识别覆盖率、隐患整改率）、应急响应（预警时间、救援时效）、恢复能力（设备修复周期）等指标量化评估，找薄弱环节。

韧性提升：针对薄弱点改进，如应急响应慢则优化流程、增救援队伍。

（三）燃煤电厂工程建设特点与风险分析

1. 工程建设阶段划分及各阶段特点

土建阶段：基础施工（场地平整、深基坑等），特点是作业

范围广、周期长（受自然影响大）、高风险集中（坍塌、坠落）。
安装阶段：设备就位与系统连接，特点是技术复杂（大型设备吊装精度要求高）、交叉作业密（多专业并行）、临时用电规模大（触电隐患）。

调试阶段：系统测试（分系统、整套启动、满负荷试运行），特点是系统运行风险高（故障、泄漏致事故）、多单位协同难、应急要求严。

2.主要风险类型分析

高空作业风险：集中于土建（烟囱）、安装（设备高空装），因平台不稳、防护缺、违规操作致坠落。

起重吊装风险：安装阶段突出，因机械故障、方案缺陷、指挥失误致倾覆或吊物坠落。

临时用电风险：贯穿三阶段，因线路老化、接地差、违规用电致触电或火灾。

深基坑风险：土建阶段，因支护差、排水不及时、堆载大致坍塌。

火灾爆炸风险：安装（焊接）、调试（煤粉 / 燃油）阶段，因明火管理差、泄漏致火灾爆炸。

交叉作业风险：土建与安装阶段，因隔离缺、防护不足、协调差致物体打击。

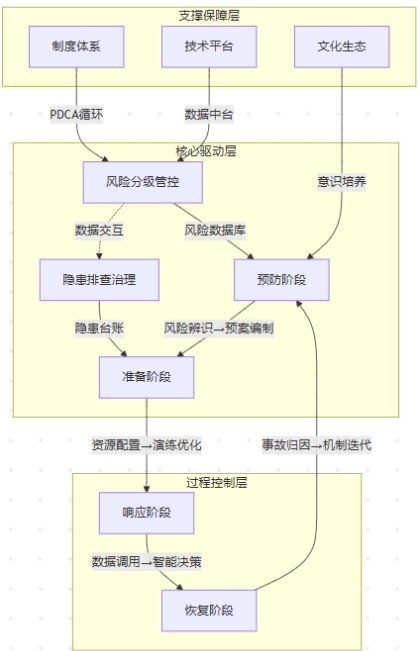
三、双重预防机制与应急管理的融合机理分析

（一）融合的必要性可行性

1.必要性

突破传统应急管理被动局限：传统“事后响应”，双重预防机制通过风险识别与隐患治理前移重心，实现“事前预防”。

实现源头治理：事故源于风险失控与隐患未治，融合可在各阶段整合防控与应急，阻断事故链。

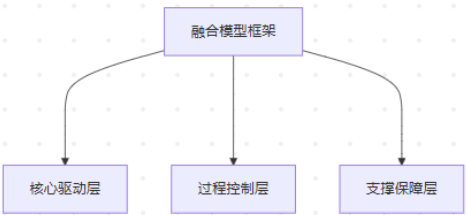


2.可行性

目标一致：均以保障工程安全、防事故、减损失为核心，如火灾防控中，双重预防排查隐患，应急管理备资源。

过程互补：双重预防“事前预防”，应急管理“事中事后应对”，形成“预防 - 响应 - 恢复 - 改进”闭环，如预防阶段风险辨识助预案编制，恢复阶段事故调查完善风险防控。

（二）融合模型的构建



融合模型框架设计

构建以双重预防机制为“前端”和“主线”，嵌入应急管理四阶段的融合模型，分三层：

核心层：双重预防机制（风险分级管控、隐患排查治理），支撑应急管理各阶段。

应用层：应急管理四阶段，各阶段嵌入双重预防内容：

预防阶段：风险分级管控定重大风险，为预案编制依据。

准备阶段：隐患排查治理结果配资源、开展针对性演练。

响应阶段：调用风险与隐患数据辅助决策。

恢复阶段：事故反馈完善双重预防机制。

保障层：制度（责任体系、管理制度）、技术（信息化平台）、文化（风险文化、应急意识）保障落地。

模型作用机理：从“事后救火”到“事前防火”的转变

预防阶段：风险辨识定重大风险（如深基坑坍塌），编专项预案（如《深基坑坍塌预案》），设定预警指标（如边坡位移 > 5mm 预警），提前控风险。

准备阶段：隐患排查结果配资源（如起重制动力隐患配备制动力器），基于风险情景演练，提升应对能力。

响应与恢复阶段：响应时调数据助决策，缩短响应时间；恢复时查事故原因，反馈完善双重预防机制，形成闭环。

四、融合应用在燃煤电厂工程建设中的实施路径

（一）基于双重预防的“预防”阶段强化

应用风险辨识结果确定重点风险点

组建小组：安全部门牵头，联合施工、监理、设备厂家，含专家、技术人员、班组长。

划分单元：按工程阶段与作业区域划分，避免遗漏。

选辨识方法：深基坑用 HAZOP，高空作业用 JHA。

定重点风险点：筛重大风险与易演变为突发事件的风险，形成《重点风险点清单》。

以重点风险点为核心编制应急预案

专项预案编制：如针对起重倾覆编《起重机械倾覆专项预

案》，明确组织、流程、措施。

预案联动设计：考虑次生灾害，如起重倾覆预案与火灾、人员救援预案联动。

制定预防性预警指标

设定指标：量化可监测，如深基坑（边坡位移 > 5mm、水位高设计 50cm），起重机械（负载率 > 90%、风速 > 6 级）。

建监测体系：用传感器（位移、水位、负载）实时传数据至监控中心，专人值守，预警即启动防控。

（二）基于双重预防的“准备”阶段优化

结合隐患排查结果配置应急资源

隐患分类统计：按事故类型、区域、严重程度统计（如触电、火灾、坍塌隐患）。

资源需求分析：触电隐患需绝缘装备、急救箱；火灾隐患需灭火器、消防车；坍塌隐患需救援机械、生命探测仪。

定配置方案：明确资源类型、数量、存放地、责任人，建台账定期维护。

基于风险情景构建开展针对性应急演练

风险情景构建：结合重点风险与案例，如起重倾覆砸临时用房致人员被困、火灾。

演练方案设计：明确目标（如检验救援能力）、参演人员、流程（报警 - 启动预案 - 抢救 - 灭火）、评估标准（响应时间 < 10 分钟）。

演练组织与评估：开展演练，复盘总结问题（如指挥不畅），优化预案。

将风险与隐患信息纳入应急知识培训

培训内容：风险类型与管控、隐患排查与治理、应急处置（如触电急救），结合事故案例分析。

培训方式：“理论 + 实操 + 案例”，用新媒体推送知识。

效果考核：理论 + 实操考核，合格上岗，定期回访优化培训。

（三）基于双重预防的“响应”阶段支持

快速调用风险与隐患数据辅助决策

建数据库：存风险（重点清单、评估报告、监测数据）与隐患（排查记录、台账、图纸）数据，实时更新。

数据调用流程：事故后指挥中心通过信息化平台调数据，如深基坑坍塌查评估报告、隐患台账、图纸，补充现场实时数据。

辅助决策：分析事故原因、影响范围、次生风险，定处置方案，如深基坑坍塌判断是否因支护差，避损周边设施。

依据风险管控措施制定初步处置方案

梳理管控措施：形成《风险管控措施清单》，含工程技术（如定期查起重制动）、管理（如禁超载）、应急措施（如倾覆后设警戒）。

制定初步方案：结合事故类型查清单，补现场情况（如火灾加消防车）形成方案。

动态调整方案：依现场变化（如漏油可能起火）调整，跟踪执行反馈问题。

（四）基于双重预防的“恢复”阶段改进

事故反馈完善双重预防机制

事故调查与原因分析：成立调查组，查直接（如未戴安全带）与间接原因（如排查不足）。

问题梳理分类：分风险管控问题（如辨识漏违规操作）与隐患治理问题（如排查频次低）。

机制改进：如补充风险辨识清单，提排查频次，建隐患跟踪机制。

实现“应急 - 预防”闭环管理

优化应急管理各阶段：预防阶段更新清单与预案，准备阶段调资源与演练计划。

效果评估：每季度评风险管控（辨识覆盖率 100%）、隐患治理（治理率 100%）、应急管理（响应时间 < 10 分钟）效果，优化方案。

五、实例分析

（一）某燃煤电厂工程项目概况

选取华北地区某 300MW 燃煤电厂新建工程，总投资 25 亿元，周期 24 个月（2022.1-2023.12），建设内容含汽轮发电机组、煤粉锅炉、烟囱（210m）、冷却塔（150m）、深基坑（12m）。

阶段划分：土建（2022.1-8，深基坑、高空作业）、安装（2022.9-2023.6，起重、高空、临时用电）、调试（2023.7-12，煤粉、燃油调试）。

融合前问题：风险辨识漏“违规操作”“煤粉泄漏”；深基坑排查每周 1 次；煤粉仓仅 2 具灭火器；演练场景通用；2022.1-6 发生 2 起事故（高空坠落、触电），隐患排查率 85%，应急响应 15 分钟。

（二）融合应用的具体实践（2022.7 启动）

1. 预防阶段强化实践

定重点风险点：用 JHA、SCL 辨识 126 项风险，15 项重大风险（深基坑坍塌、起重倾覆等），形成清单。

编预案：15 项专项预案，如《深基坑坍塌预案》定位移预警 > 5mm，《煤粉仓火灾预案》定疏散路线。

建预警体系：深基坑装位移 / 水位传感器，起重机械装负载 / 风速仪，煤粉仓装粉尘仪，2 人值守，粉尘 > 30g/m³ 即停作业。

2. 准备阶段优化实践

配资源：2022.7-12 排查 182 项隐患，深基坑增机械与探测仪，煤粉仓增灭火器与防火服，安装区增绝缘装备，建台账每周查。

搞演练：2022.7-2023.12 开展 12 次演练（起重倾覆、煤粉仓火灾等），如 2023.3 起重倾覆演练（风速 7 级致倾覆），响应时间 8 分钟，抢救成功率 100%。

做培训：月度培训 24 次，覆盖 1500 人次，考核合格率从 80% 提至 98%。

3. 响应阶段支持实践

数据库应用：2023.5 触电事故，调台账（此前线路老化已整改）与评估（触电风险较大），判因违规接线，7 分钟处置（断

电、急救、换线路)。

管控措施辅助：2023.8 煤粉轻微泄漏，依措施（停输送、通风、清理）30 分钟处置，未起火。

4. 恢复阶段改进实践

事故反馈：2023.5 触电事故后，补“违规操作风险”为重大风险，增监控与监督员；临时用电排查改每周 2 次，增用电行为检查。

闭环管理：更新清单与预案，增监督记录仪，演练加违规用电情景，每季度评效果。

3 应用效果评价

评价指标	融合前 (2022.1-6)	融合后 (2022.7- 2023.12)	变化幅度
隐患排查率 (%)	85	99	提升 14 个百分点
隐患治理率 (%)	90	100	提升 10 个百分点
应急响应时间 (分钟)	15	8	缩短 46.7%
事故发生率(起 / 半年)	2	0	下降 100%
事故损失金额 (万元)	50	0	下降100%
应急演练考核合 格率(%)	80	98	提升 18 个百分点
员工风险意识评 分(满分 100)	70	92	提升 31.4%

效果显著：风险防控能力提升，应急处置效率提高，事故防控效果突出（18 个月零事故）。^[1-3]

六、结论与展望

（一）主要研究结论

双重预防机制与应急管理融合必要（破传统被动、源头治理）且可行（目标一致、过程互补）。

构建融合模型，嵌入应急管理四阶段，实现“事后救火”到“事前防火”转变，形成闭环体系。

设计四阶段实施路径，可操作性强。

实例验证融合有效，隐患排查率、应急响应时间、事故率等指标显著改善。

（二）研究的局限性

案例普适性不足：仅 1 个 300MW 项目，不同规模、地区项目需验证。

数据限制：员工风险意识评分主观，长期效果（3 年以上）未体现。

信息化深度不足：未深入研究大数据、AI 在融合中的应用。

（三）未来展望

扩大案例范围：选不同规模、地区、阶段项目，总结普适框架。

加强长期监测：跟踪 3 年以上数据，优化评价体系（增设备故障率等客观指标）。

深化信息化应用：研究大数据预测风险、AI 生成处置方案、BIM 可视化模拟等。

拓展研究领域：将融合拓展至核电、风电等领域，结合“双碳”目标研究绿色安全建设。

参考文献

[1]中共中央 国务院.关于推进安全生产领域改革发展的意见 [Z].2016.
[2]应急管理部.全国安全生产专项整治三年行动计划 [Z].2020.
[3]张兴凯.双重预防机制构建与实施 [M].北京：煤炭工业出版社，2018.

输配电工程中变压器的安装及调试

赵殿勇, 朱芮锋

国网吉林省电力有限公司通化市城郊供电公司, 吉林 通化 134001

DOI:10.61369/EPTSM.2025070021

摘 要 : 输配电工程是保证电力系统稳定、安全运作的基础, 而输配电工程中一个非常重要的组成部分就是变压器, 其安装和调试质量与整个输配电工程的运行密切相关。为此, 本文对输配电工程中变压器的安装及调试进行了分析和探讨, 以期为提高输配电工程的供电质量提供一些参考依据。

关 键 词 : 输配电工程; 变压器; 安装; 调试

Installation and Commissioning of Transformers in Power Transmission and Distribution Projects

Zhao Dianyong, Zhu Ruifeng

State Grid Jilin Electric Power Co., Ltd. Tonghua suburban power supply company, Tonghua, Jilin 134001

Abstract : the power transmission and distribution project is the foundation to ensure the stable and safe operation of the power system, and a very important part of the power transmission and distribution project is the transformer, whose installation and commissioning quality is closely related to the operation of the whole power transmission and distribution project. Therefore, this paper analyzes and discusses the installation and commissioning of transformers in power transmission and distribution projects, in order to provide some reference for improving the power supply quality of power transmission and distribution projects.

Keywords : power transmission and distribution engineering; transformer; installation; debugging

输配电工程中变压器的安装及调试, 是电力系统建设与运行中至关重要的环节, 其背景具有复杂性和系统性。随着我国电力需求的不断增长和电网结构的不断优化, 变压器作为电能传输与分配的核心设备, 其安装质量与调试水平直接关系到电力系统的安全性、稳定性与经济性。在工程实践中, 变压器安装不仅涉及设备本体的就位与固定, 还涵盖绝缘、接地、冷却、油处理等一系列专业技术环节, 而调试则包括电气性能、保护装置、温升、负载适应性等多方面的测试和校核, 以确保设备能够在设计工况下长期安全运行。

一、输配电工程中变压器的安装

(一) 安装前的准备工作

1. 施工环境的准备

在变压器的正式安装前需要完成设备支架的安装, 室内变压器的安装需要将室内环境布置好。同时需要将室内相关障碍物清理, 保证施通道畅通无阻。施工中所有的电源和水源需要进行检查, 保持正常的供应, 变压器的周围需要有足够范围的平整场地, 这是为了满足施工人员的现场调度。

2. 施工人员的准备

在安装施工中, 施工人员需要具备资格证书, 这是在施工前需要进行审核的, 同时要对辅助工进行岗前的教育培训。变压器的提供厂家会派出专门的人员对辅助人员进行指导。施工人员需

要加强管理, 让施工个人原因了解施工方案, 做好技术准备并准备好安全防护, 保证施工的安全性和顺利进行。

3. 变压器的选型

对变压器进行选择是至关重要的环节, 在施工中需要对施工进度以及质量进行有效控制, 在选型中需要考虑配电线路方面的情况。对配电线路建设的需求进行整体性的分析。然后选择切实可行的施工方案, 结合供电的范围考虑变压器的容量, 确定合适的变压器位置, 这样可以降低线损同时有效控制工程的成本, 同时保证节能效果。

4. 辅助设备的配置

在变压器安装中会使用一些辅助设备, 辅助设备的选择是至关重要的, 需要结合施工方案选择辅助设备, 对辅助设备的型号和数量进行详细分析, 做好施工前设备的检查工作, 保证各项设

备处于良好的工作状态，满足施工的正常需求。

（二）整体定位与安装

在进行整体定位的过程中，需要注意对变压器安装位置作出精准确认，是否符合设计规范、标准要求等。按照产品装配图进行安装，有详细安装标志的零件与部件，严格依照使用说明书进行定位与装配。按照指示进行安装。对变电站内主接线装置、开关柜等做好全方位的测试工作，禁止拉扯引线。保持变压器水平，不允许倾斜，以确保变压器整体的稳定性和可靠性。密封垫以及紧固螺栓要保持表面清洁干燥，定位精准，拧紧时受力均匀，安装后对于密封情况做相关测试使其达到安装要求。在变压器的两端需要设置绝缘板来防止导线之间发生碰撞，线路敷设时一定不要过长或者过短。另外变压器安装时必须满足《变压器运行规程》要求。

（三）其他变压器附件、组件的安装

穿缆式高压套管安装，首先检查瓷件表面确保完好无损，外表面有锈蚀现象及灰尘污渍，要用清洁的软布擦拭清理。其次，打开密封盖检查内部清洁状况，确保无粉尘以及水迹或者其他异物，必要时用干净的软布擦拭清洁。最后，依照套管安装规程进行试验检验。其中套管起吊时按照图1高压套管起吊示意图所示操作，与套管瓷件接触时要有一定的缓冲物，防止吊装过程磨损瓷件。水平起吊达到安装要求高度，转动手动起吊葫芦将高压套管拉至垂直。

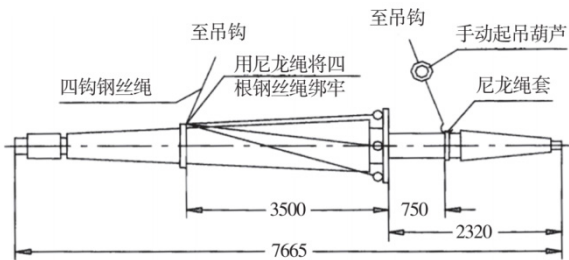


图1 高压套管起吊示意图

（四）熔断器及避雷器的安装

熔断器是在输配电工程中经常使用的一种保护装置，用于切断电路，对于变压器高压侧来说一般选择铜丝作为熔体，高压位置安装时，熔断器与地面保持大于5m的安全安装距离。避雷器能防止雷电侵袭，对其进行安装操作时需要注意要选择有足够耐压能力、绝缘性良好的材料、符合标准要求的避雷器产品。接地系统连接处装设良好，安装牢固，必要时进行焊接加固，做好接地电阻检测。

（五）冷却系统安装

在变压器安装过程中，冷却系统的安装首要环节是冷却器及管路的规范化安装，通常，油浸式变压器需要配置油冷却器，其作用是保持变压器在额定运行状态下的温升处于允许范围内，在安装时，施工人员应根据设计图纸说明，严格按照设备制造厂的安装工艺进行操作，确保冷却器与油箱的接口位置吻合、紧固件牢靠，并对法兰、垫片进行密封性检查，避免漏油问题，同时还要对冷却管路的走向进行合理布置，确保油流循环畅通，避免因

管路弯曲过度导致冷却效率下降，安装过程中还需结合现场环境，考虑冷却装置的通风条件，确保后期运行中空气的流动条件良好，为变压器稳定运行提供可靠的散热保障。冷却系统安装涉及风机及其控制系统的配置，风冷却器的风机在运行时直接影响变压器的散热效率，因此应注意风机位置的固定牢靠，电气接线规范，并确保其旋转方向与风道设计一致，在安装完成后，需进行通电试运行，检测风机的转速、噪音和震动情况，避免因安装不当导致的机械故障。冷却风机通常与温控系统、自动投切装置相连，安装人员必须完成二次控制回路的接线，确保在变压器负荷升高时，冷却系统能够自动投入运行，从而有效降低油温，保护设备安全，通过风机与控制系统的联动安装与，不仅提升了冷却装置的工作可靠性，也为变压器长期稳定运行奠定了坚实基础。

（六）接地系统连接

在变压器安装过程中，接地系统连接的首要任务是接地装置的合理布局与安装，接地不仅是保证电气设备和人员安全的重要措施，更是维持电力系统稳定运行的基础环节，在施工时，需要根据设计要求选择合适的接地电阻值，并通过接地体（如接地极、接地网）来实现电流的有效泄放，接地体的安装应尽量布置在土壤电阻率较低、湿度较大的位置，以降低接地电阻，提升导电性能，同时施工人员要注意接地引下线的布置方式，尽量缩短接地线路的长度，避免出现急弯，减少接地电感的影响，在变压器基础周边通常会预埋接地环，安装时应与接地母排可靠焊接，确保形成闭合的接地网络，从而为变压器在雷击、电气故障及操作过电压等情况下提供有效的电流通道。接地系统不仅需要科学设计，更需要保证连接的可靠性，施工过程中，所有接地引下线与变压器外壳、套管底座、冷却器以及操作平台等金属部分都必须进行牢固连接，形成等电位体，避免出现悬浮电位引发的安全隐患，连接方式一般采用焊接固定，并需进行防腐处理，以提高接地系统的耐久性，在安装完成后，应通过接地电阻测试仪对整个接地网络的电阻值进行检测，确保其满足设计规范（通常不大于 4Ω 或相关标准要求），若发现接地电阻偏高，应增设接地极或改善土壤条件，只有在各项检测指标合格后，接地系统才能投入使用，这一系列检查与验证，确保了接地系统在电气事故发生时能够迅速引流，最大限度保护变压器的安全。

（七）绝缘性能测试

变压器安装结束后，开展绝缘电阻测试是判断设备绝缘状态的首要举措，一般用兆欧表来测量变压器绕组对地、绕组间以及套管的绝缘电阻，以此判断其绝缘是否符合运行需求，开展测试工作时，要依据变压器的电压等级挑选恰当的测试电压，且维持足够时长，从而得到稳定的数据。测量值既要和制造厂给出的出厂数据作对比，又要依据环境温度、湿度等因素加以折算，确保结果精准，若绝缘电阻显著偏低，表明绝缘有受潮、污染或者损伤的可能性，需马上开展干燥或清洁工作，绝缘电阻是否稳定直接决定变压器能否承受长期运行里的电压应力，^[1]故而此测试环节是整个安装调试流程里不可轻视的关键部分。除常规的绝缘电阻测量外，交流耐压试验和局部放电试验同样是验证变压器绝缘

性能的关键环节，交流耐压试验借助逐步提升试验电压，测试绕组以及绝缘结构在规定电压下的承受水平，以此评估其整体绝缘强度，局部放电试验的作用是发现绝缘系统中的潜在毛病，诸如气隙、裂纹或局部老化等情况，若不及时排查这些隐患，运行时很容易引发击穿事故。开展试验期间，必须严格依照安全操作规程执行，把控升压的速度与持续时长，防止绝缘材料遭受过度损害，要是试验数据超出了规范范围，要即刻停止试验并查找问题根源，开展交流耐压与局部放电等综合测试，能全面把控变压器的绝缘情况，保证其投运后有充足电气安全裕度。^[2]

（八）机械紧固复核

在变压器安装过程中，大量部件依靠螺栓实现固定，如油箱盖板、套管底座、冷却器、端子接头等，螺栓若未紧固到位，极易在运行振动中产生松动，造成渗漏油、接触不良甚至设备故障，因此在安装完成后，必须进行系统性的螺栓紧固复核，施工人员应按照设计要求及厂家说明书规定的力矩标准，逐一对关键螺栓进行扭矩检测，确保拧紧程度均匀、符合规范，特别是承受高电气应力的部位，如套管固定螺栓，更应重点检查，避免因接触电阻过大引发局部过热，同时还要注意紧固顺序，通常采用对角方式，以防止应力集中。通过对螺栓连接的逐项校核，能够显著提升变压器整体安装的稳固性，机械紧固复核不仅包括螺栓，还涵盖变压器本体、附件的整体结构检查，例如油箱本体与底座之间的焊接，吊耳、滚轮等承重部件，以及散热器、风机、温控箱等附件的固定情况，都需要逐一核查，若发现焊接存在裂纹，应立即补焊或加固，对于容易受振动影响的部位，如冷却风机与支架连接处，应加设防震垫片，以提高抗振性能，此外还应应对保护罩、端子箱、接线端子等进行封闭性检查，确保外壳紧密，避免灰尘、潮气进入，影响设备寿命，复核过程中要形成完整的记录，包括检测力矩值、问题整改情况等，以便后续运行维护参考，只有全面细致地完成结构与附件的紧固复核，才能保证变压器长期稳定运行。

二、输配电工程中变压器的调试

（一）做好调试前准备工作

首先，明确调试目标、调试任务以及调试流程。以便于做好人员、时间、工具以及仪器设备等方面的安排。由于变压器调试存在一定安全风险，有必要针对可能存在的安全隐患进行提前预防，最大限度减少安全事故的发生机率；其次，选派拥有较高专

业水平和实践经验的调试人员，确保能够对变压器调试过程进行科学掌握，能够及时发现并且妥善处理调试过程中所发生各类问题；最后，针对调试过程中需要使用的工具及设备进行检验，确保其正常使用，及时消除各种故障隐患。

（二）变压器调试运行

在变压器调试阶段，需要采用送电试运行的方式了解其整体性能质量，包括变压器自身质量以及安装质量。对此，需要调试人员在变压器空载试运行的过程中，采用听声音的方式针对变压器是否运行故障做出准确判断。如果在听声音的过程中，变压器发出比较有规律且分贝较低的嗡嗡声，说明变压器处于正常运行状态之中。如果出现以下几种情况，则说明变压器极有可能存在某处故障问题：第一种，当变压器声音较大时，极有可能因为外电压较高所导致；第二种，在变压器试运行过程中，不仅声音较大还伴有嘈杂声，此变压器极有可能存在芯部松动现象；第三种，如果听到爆炸声，可因为芯部被击穿所引起；第四种，当变压器发出吱吱声，说明其内部极有可能存在闪络故障。

（三）变压器半负荷调试运行

调试人员在1-2天以内连续观察变压器在空载状态下是否存在异常。如果不存在任何异常，便可进入到了半负荷调试阶段。在此其项运行调试过程中，首先要确认变压器是否处于半负荷运行这一测试要求，保证调试结果的客观有效性。设备调试人员针对试运行过程所暴露出来的问题要及时开展进一步检查，使异常问题得到及时处理，为下一步工作创造必要条件。

（四）变压器满负荷运行

当半负荷调试结合后，需要进入到器满负荷运行调试阶段。在此环节中需要变压器在满载负荷状态下运行2天。期满之后设备调试人员针对变压器温度、油位进行检测，再将检测结果与相关规范数据进行对比，确认是否存在故障问题。确认无误之后该变压器方式投入使用。

三、结束语

变压器的安装调试直接关系到变压器乃至整个输变电工程的安全运行。因此，在变压器安装调试过程中，员工必须严格按照操作工艺规程进行施工，严格控制变压器的安装调试质量，从而保证变压器运行的稳定性，为中国电力工业的健康稳定发展奠定基础。

参考文献

[1]王刚,刘俊延,张宏丽.电力变压器的安装与保护调试相关问题探讨[J].中国机械,2019,0(4):69-70.

[2]丁海平.火电厂变压器的安装调试运行技术措施[J].智能城市,2017,3(11):179-179.

环保发电技术发展现状及趋势分析

封彦林

身份证号: 510781197708216711

DOI:10.61369/EPTSM.2025070022

摘 要： 环保发电技术在应对能源危机和减轻环境压力方面扮演着至关重要的角色。随着全球对可持续能源需求的增加，太阳能、风能和水能等环保发电技术得到了快速发展。这些技术不仅有助于减少对化石燃料的依赖，还能显著降低温室气体排放。当前，环保发电技术在技术成熟度、成本效益以及应用规模上取得了显著进展，但与国际先进水平相比仍有一定差距。

关 键 词： 环保发电技术；能源危机；环境压力

Current Situation and Trend Analysis of Environmental Protection Power Generation Technology Development

Feng Yanlin

ID: 510781197708216711

Abstract： Environmental protection power generation technology plays a crucial role in addressing the energy crisis and alleviating environmental pressures. With the increasing global demand for sustainable energy, environmental protection power generation technologies such as solar energy, wind energy, and hydropower have achieved rapid development. These technologies not only help reduce reliance on fossil fuels but also significantly cut down greenhouse gas emissions. Currently, remarkable progress has been made in the technological maturity, cost-effectiveness, and application scale of environmental protection power generation technology. However, there remains a certain gap compared with the international advanced level.

Keywords： environmental protection power generation technology; energy crisis; environmental pressure

引言

在全球能源需求日益增长和环境问题日益严峻的背景下，环保发电技术的重要性愈发凸显。这些技术不仅能够缓解能源危机，还能有效减轻对环境的压力。随着技术的不断进步和成本的逐渐降低，太阳能、风能和水能等环保发电技术正逐渐成为全球能源结构转型的重要力量。

一、环保发电技术的分类

（一）太阳能发电技术

太阳能发电技术是一种利用太阳辐射能量转换为电能的清洁能源技术，主要包括光伏发电和光热发电两种形式。光伏发电是通过光伏电池将太阳光直接转换为电能，这种技术不受资源分布限制，特别适用于日照丰富的地区。光伏电池由半导体材料制成，当光子照射在电池表面时，会激发电子产生电流。光热发电则利用太阳能集热器将太阳光能转换为热能，通过热机系统发电，常见的有槽式、塔式和碟式光热发电系统。这些系统通过反射或聚光镜将太阳光集中到集热器上，加热传热介质，再通过热交换器将热能转化为蒸汽推动汽轮机发电。太阳能发电技术具有

资源丰富、无污染和可再生的优势，不仅能够有效减少温室气体排放，还能提高能源利用效率，促进能源结构的多样化。

（二）风能发电技术

风力发电系统主要由风力机、发电机、塔架和控制系统组成。风力机根据风速和风向自动调整叶片的角度，以最大限度地捕捉风能。风能通过风力机的旋转传递到发电机，产生电流，然后通过变压器和输电线路输送到电网。风能资源丰富，且风力发电具有无污染、可再生和技术成熟的特点，尤其适用于风能资源丰富的地区，如沿海、草原和山区。风能发电不仅能够减少对化石燃料的依赖，还能显著降低温室气体排放，有助于缓解全球气候变化问题。近年来，随着风力发电技术的不断进步和设备成本的逐步降低，风力发电在全球范围内迅速发展，成为重要的新能

源发电方式之一。大型风力发电场和分布式风力发电系统的广泛应用，推动了能源结构的优化调整，为实现绿色低碳发展目标提供了有力支持。

（三）水能发电技术

水能发电技术是利用水流的势能或动能，通过水轮机驱动发电机发电的清洁能源技术。水能发电分为水库式、河流式和抽水蓄能式三种形式。水库式发电通过建设水坝拦截河流，形成水库、调节水流量、稳定电力输出，河流式发电直接利用天然河流的水流动能，不需要建设大型水坝，适合水流稳定的河段；抽水蓄能式发电利用电网负荷低谷时的电力，将水从低位水库抽至高位水库，在电网负荷高峰时释放高位水库的水发电，实现电力调峰。水能发电具有资源丰富、无污染和可再生的优点，是当前应用最广泛的可再生能源发电技术之一。

二、环保发电技术的发展现状

（一）技术成熟度

1. 各技术的关键技术突破

环保发电技术发展迅猛，呈效率提升、技术突破与成本下降态势。光伏领域，钙钛矿-硅叠层电池效率达33%，双面光伏组件和跟踪支架技术使度电成本显著降低；光热发电中熔盐储热技术成熟，储热时长延长，定日镜控制精度与集热器吸热效率提升，度电成本下降40%。风电方面，陆上单机容量从3MW升至8MW，海上从5MW升至16MW，智能化升级降低故障率，深远海漂浮式风电场成功并网。水能发电里，大型混流式水轮机效率超96%，抽水蓄能技术响应时间缩短，综合效率提升至80%以上^[1]。

2. 与国际先进水平的比较

我国环保发电技术虽有进步，但与国际先进水平仍存差距。太阳能发电领域，我国薄膜光伏电池产业化效率较国际领先企业低2%左右，光热发电在熔盐储热材料稳定性、定日镜驱动系统可靠性等方面落后5-10年。风能发电中，我国风机设计寿命较短、年故障率较高，海上风机抗台风、抗腐蚀技术有待优化^[2]。水能发电方面，我国水轮机效率低于国际先进产品1%-2%，抽水蓄能电站智能化调度系统算法精度不及日本关西电力、法国EDF等。

（二）成本效益分析

1. 初始投资成本

成本效益是环保发电技术大规模推广的关键，其初始投资成本和运营维护成本均呈下降趋势，但不同技术的成本结构差异显著^[3]。太阳能发电中，光伏发电单位投资成本从2015年的8元/W降至2024年的3.5元/W，大规模电站更低至3.2元/W；光热发电单位投资成本仍较高，约15-20元/W，但较2018年已下降30%-50%。风能发电方面，陆上风电单位投资成本从7元/W降至3.8元/W，海上风电单位投资成本约6-8元/W，漂浮式海上风电则达12-15元/W。水能发电中，水库式水电站单位投资成本约5-8元/W，河流式水电站约3-5元/W，抽水蓄能电站约4-6元/W。尽管初始投资成本高于传统燃煤电站，但环保发电技术的“零燃料成本”优势使其长期经济性更优。

2. 运营维护成本

环保发电技术的运营维护成本相对较低，主要包括设备维护、系统监控和日常运营费用。太阳能发电厂维护成本较低，光伏电池板和光热发电系统需要定期清洗和检查，但由于其结构简单，故障率较低，整体维护成本较为可控。风能发电的运营维护成本主要集中在风电机组的定期检修和风电场的日常管理，由于风电机组结构复杂且运行环境较为恶劣，维护成本相对较高。水能发电的维护成本包括水轮机和电力系统的定期维护、水坝的安全监测和水资源管理等，由于水能发电系统相对稳定，维护成本较为适中。

（三）应用规模及分布

1. 全球和国内的装机容量

截至2023年底，全球环保发电装机容量达3550吉瓦，中国占1280吉瓦，占比36.1%。其中，太阳能发电全球装机1180吉瓦，中国490吉瓦，占比41.5%，2015 - 2023年复合增长率23.5%；风能发电全球装机950吉瓦，中国380吉瓦，占比40.0%，复合增长率16.8%；水能发电全球装机1420吉瓦，中国410吉瓦，占比28.9%，复合增长率4.2%。我国环保发电装机呈现“太阳能、风能主导增长，水能稳定贡献”格局。2023年，我国新增太阳能装机150吉瓦，分布式光伏占比45%；新增风能装机70吉瓦，海上风电新增18吉瓦，占比25.7%；新增水能装机20吉瓦，抽水蓄能电站新增8吉瓦，占比40%^[4]。

2. 主要应用地区和领域

环保发电技术的应用分布受资源禀赋、负荷需求、政策导向影响，呈现地域特征与领域差异。太阳能发电集中在高日照时长地区，如我国西北、华北地区，国际上中东、北非、美国西南部等地区，2023年复合增长率超30%。风能发电集中在高风速地区，如我国东南沿海、西北草原地区，国际上北欧、美国中部、印度西部等地区，丹麦风电占比达55%^[5]。水能发电集中在水资源丰富、地形落差大地区，如我国西南地区，国际上巴西、加拿大、挪威等地区，挪威水能发电占比达98%。应用领域方面，太阳能发电从单一发电向多场景融合拓展，如建筑、农业、交通等领域；风能发电从陆上向海上及分布式延伸，海上风电成沿海重要补充，分布式风电在偏远地区及工业园区推广；水能发电从发电向综合利用转型，水库式水电站承担防洪、灌溉、航运等任务，抽水蓄能电站成新能源配套储能核心选择。

三、环保发电技术的未来发展趋势

（一）技术创新方向

1. 材料和器件的研发进展

未来环保发电技术的一个重要发展方向是新材料和新器件的研发。在太阳能领域，高效光伏材料的研发仍是重点，如钙钛矿太阳能电池和量子点太阳能电池，这些新材料有望显著提高光电转换效率并降低成本^[6]。另外，透明太阳能电池和柔性太阳能电池的研发也在加速推进，未来可能广泛应用于建筑和消费电子产品。风能发电方面，新型复合材料的应用将提升风电机组的耐用性和效率，特别是在海上风电场中，耐腐蚀材料的研发尤为重

要。水能发电技术中,改进水轮机材料和涂层技术将进一步提高设备的运行效率和寿命。在生物质能和地热能领域,也有望通过新型材料和改进的设备设计实现显著进展。生物质能利用新型生物质颗粒和生物催化剂,提高能源转化效率和可持续性。热能则依赖于先进的地热换热器材料和地热探测技术,以提高地热能的开采效率和经济性。新材料和新器件的不断涌现,将为各种环保发电技术的进一步发展打开新的可能性,推动清洁能源在全球范围内的更广泛应用和普及。

2. 系统集成和优化

未来环保发电技术的发展还将注重系统集成和优化。多能源互补系统的研发和应用将成为重点,例如将太阳能、风能和储能系统集成在一起,通过智能控制和调度,实现能源的高效利用和稳定供给。同时,微电网和智能电网技术的发展也将提升环保发电系统的整体性能,通过分布式发电、智能调度和储能管理,实现能源供需的动态平衡。大数据和人工智能技术在环保发电系统中的应用,将进一步提高系统的预测和优化能力,减少运营成本,提高可靠性和稳定性。先进的能源管理系统将进一步整合各种环保发电技术,通过优化能源流动和负荷分配,实现更高的能源利用效率。分布式能源系统将得到广泛应用,不仅在偏远地区和离网区域提供可靠的电力供应,还能在城市和工业区域中提高能源的灵活性和可持续性。

(二) 规模和布局预测

1. 装机容量增长预测

未来几年,全球和国内环保发电技术的装机容量将继续保持快速增长态势。国际能源署预测,到2030年,全球太阳能发电装机容量将超过2000吉瓦,风能发电装机容量将达到1600吉瓦以上。国内方面,中国的清洁能源装机容量也将持续增长,预计到2030年,太阳能和风能发电装机容量将分别达到800吉瓦和600吉瓦。水能发电在未来仍将保持稳定增长,尤其是抽水蓄能电站的建设将显著增加。政策支持、技术进步和市场需求的共同推动,将使环保发电技术在全球范围内实现更大规模的应用,进一步推动能源结构转型和低碳经济的发展。

2. 区域发展不平衡的改善趋势

尽管环保发电技术在全球和国内的应用已取得显著进展,但区域发展不平衡问题依然存在。未来,各国和地区将通过政策引导和技术创新,逐步改善这一状况。对于太阳能发电,阳光资源丰富但目前开发程度较低的地区,如非洲、中东和南美洲,将成为未来发展的重点。风能发电方面,内陆和海上风资源丰富的地

区将获得更多投资和开发机会。国内方面,西部和东北部地区在风能和太阳能资源开发上将迎来新的增长点。此外,通过跨区域电网建设和智能调度系统的应用,不同区域之间的能源调配将更加高效,进一步平衡区域间的发展差距。

(三) 与其他能源形式的融合

1. 多能互补系统的构建

未来,环保发电技术将与传统能源形式融合,构建多能互补系统,以提高能源利用效率和供应稳定性。这种系统将太阳能、风能和水能等可再生能源与传统的火力发电和核能发电有机结合,通过智能控制和调度,实现能源供需的动态平衡。例如,太阳能和风能发电具有不确定性和波动性,而传统火力发电和核能发电能够提供稳定的基础负荷,两者结合可以有效平衡电力系统的稳定性和经济性。此外,多能互补系统还能利用储能技术,如电池储能和抽水蓄能,储存多余的电能以应对需求高峰和电力断供的情况,进一步提升系统的可靠性和灵活性。总体来看,多能互补系统的构建将是未来环保发电技术发展的重要方向,有助于实现能源的可持续利用和低碳排放目标。

2. 能源互联网中的角色

未来的能源互联网将成为环保发电技术的重要载体和支撑平台。能源互联网通过高效的能源信息化和物联网技术,实现各种能源之间的智能互联和高效调度,包括可再生能源、传统能源和储能系统在内的各类能源资源可以在能源互联网上实现互联互通。这种互联网的建设和运营,不仅可以优化能源配置,降低能源成本,还能提升电网的供电质量和稳定性。在能源互联网中,环保发电技术将扮演重要角色,特别是太阳能和风能等分布式能源的接入将大大丰富能源结构,减少对传统中心化电力系统的依赖。此外,能源互联网的智能化管理还能有效提升能源利用率,促进能源的可持续发展。

四、总结

总之,环保发电技术的发展是实现能源转型和环境保护双重目标的关键。通过技术创新和规模扩张,这些技术将为全球能源供应提供更加清洁、高效和可持续的解决方案。同时,通过与其他能源形式的融合,构建多能互补系统,环保发电技术将在未来的能源互联网中发挥核心作用。尽管面临诸多挑战,但随着政策支持、市场需求和技术进步的推动,环保发电技术的未来发展前景依然光明。

参考文献

- [1] 陆立明. 新能源发电技术的现状与发展趋势分析 [J]. 工程建设与设计, 2020, (22): 110-111.
- [2] 王永泽, 荆晓霞. 日本铁路节能环保新技术应用现状及发展趋势分析 [J]. 铁路节能环保与安全卫生, 2020, 10(05): 27-32.
- [3] 杜海英, 张文涛, 陈显飞, 李峻峰, 张佩聪, 周同文. 习近平生态建设思想视域下环保新能源产业发展趋势研究 [J]. 中国资源综合利用, 2018, 36(11): 103-106.
- [4] 金生威. 关于建筑节能绿色环保技术的应用现状及发展趋势分析 [J]. 居舍, 2017, (23): 97.
- [5] 储梁. 节能环保型电气控制技术应用现状及发展趋势分析 [J]. 建材与装饰, 2016, (40): 112-113.
- [6] 汪缪华. 新能源发电技术的现状与发展趋势分析 [J]. 机电信息, 2011, (21): 201-202.

双碳目标下区域产业结构调整对电力需求的影响机制及预测模型构建

冯胜涛, 刘航, 马明禹, 张彬, 冯燕军
国网邯郸供电公司经研所, 河北 邯郸 056001
DOI:10.61369/EPTSM.2025070023

摘要： 本文聚焦双碳目标下区域产业结构调整对电力需求的影响机制及预测模型构建，在影响机制层面，搭建“多因素-多路径-动态化”分析框架，指出双碳目标通过政策引导推动产业向低碳化、高端化、服务化转型，既借结构效应直接改变电力需求总量与结构，又通过技术进步、能源替代、政策引导、消费拉动产生间接影响。在预测模型构建方面，以“系统性整合、动态化反映、区域化适配”为导向，遵循科学、可操作、动态、稳健原则，选取区域电力需求总量为被解释变量，产业结构合理化、高级化、低碳化为核心解释变量，引入技术进步、能源替代等控制变量，采用动态面板数据模型（DPDM）刻画动态互动关系，通过系统 GMM 方法处理内生性问题并完成系列检验，为双碳目标下区域电力需求精准预测与差异化政策制定提供理论与方法支撑。

关键词： 双碳目标；产业结构调整；电力需求；影响机制

The Impact Mechanism of Regional Industrial Structure Adjustment on Electricity Demand and the Construction of a Prediction Model under the Dual Carbon Goals

Feng Shengtao, Liu Hang, Ma Mingyu, Zhang Bin, Feng Yanjun
Economic Research Institute, State Grid Handan Power Supply Company, Handan, Hebei 056001

Abstract： This paper focuses on the impact mechanism of regional industrial structure adjustment on electricity demand and the construction of a prediction model under the dual carbon goals. At the level of impact mechanism, it establishes an "multi-factor-multi-path-dynamic" analytical framework, pointing out that the dual carbon goals drive industries to transform towards low-carbonization, high-endization, and servitization through policy guidance. This transformation not only directly changes the total amount and structure of electricity demand through structural effects but also exerts indirect influences through technological progress, energy substitution, policy guidance, and consumption stimulation. In terms of prediction model construction, guided by the principles of "systematic integration, dynamic reflection, and regional adaptation," and adhering to the principles of scientificity, operability, dynamism, and robustness, the paper selects the total regional electricity demand as the explained variable, with the rationalization, advancement, and low-carbonization of industrial structure as the core explanatory variables. It introduces control variables such as technological progress and energy substitution, employs a Dynamic Panel Data Model (DPDM) to depict dynamic interactive relationships, and addresses endogeneity issues through the System Generalized Method of Moments (GMM) approach, completing a series of tests. This provides theoretical and methodological support for accurate prediction of regional electricity demand and the formulation of differentiated policies under the dual carbon goals.

Keywords： dual carbon goals; industrial structure adjustment; electricity demand; impact mechanism

引言

当前我国区域经济发展不平衡、产业基础与资源禀赋差异显著的特征，使得不同地区产业结构调整的方向、节奏与力度各不相同，进而导致电力需求的演变呈现出复杂的区域异质性。在此背景下，若仍沿用传统的、未充分考虑产业结构动态调整的电力需求预测方法，极易导致预测结果与实际需求偏差较大，不仅可能造成电力资源的浪费或短缺，还会制约能源系统低碳转型的步伐，甚至影响双碳目标的如期实现。通过对影响机制的深度剖析与预测模型的科学构建，本文期望为区域电力规划优化、能源系统低碳转型以及双碳政策的差异化实施提供理论支撑与方法参考，助力实现电力需求与经济发展、低碳目标的协同推进。

一、双碳目标下产业结构调整对电力需求的影响机制分析

（一）总体分析框架构建

众所周知，电力能源具有瞬时性，难以长时间的大量储存，同时，影响电力需求的原因非常复杂，因此，电力短缺和电力过剩的情况时有发生^[1]。在双碳目标背景下，区域产业结构调整对电力需求的影响是一个多因素、多路径、动态化的复杂过程。为清晰梳理这一影响过程，本文构建了一个分析框架，阐释了双碳目标下产业结构调整对电力需求的影响。该框架认为，双碳目标通过政策引导，驱动区域产业结构向低碳化、高端化和服务化方向调整^[2]。这种调整一方面通过直接的结构效应改变电力需求的总量与结构，另一方面则通过技术进步、能源结构优化和消费模式转变等间接路径对电力需求产生影响。同时这一影响过程并非一成不变，而是会随着时间推移和双碳政策力度的变化呈现动态演变特征，并因不同区域在资源禀赋、经济水平和产业基础上的差异而表现出明显的区域差异性。

（二）直接影响机制

结构效应是产业结构调整影响电力需求的最直接路径，其核心在于不同产业电力消费强度的差异及其在经济中占比的变化^[3]。通常第二产业（尤其是重工业）的电力消费强度最高，第三产业次之，第一产业最低。在双碳目标推动下，产业结构呈现“第二产业中高耗能行业占比下降、高技术制造业占比上升”以及“第三产业整体占比提升”的趋势。这种变化会直接降低区域整体的电力消费强度，可能导致电力需求总量增速放缓甚至阶段性下降^[4]。同时电力需求结构也随之改变：工业用电占比下降，而高技术制造业对电能质量提出更高要求；第三产业，特别是电气化、商业服务和数据中心等领域的用电需求快速增长，占比显著提升。此外，产业结构调整带动的居民收入增长也会间接增加生活用电，但其影响相对较小。

（三）间接影响机制

除直接的结构效应外，产业结构调整还通过技术进步、能源替代、政策引导和消费拉动四条间接路径对电力需求产生深远影响^[5]。产业结构调整与技术创新相互促进，双碳目标下对节能、低碳技术的投入，一方面能通过高效设备和工艺优化降低产业用电强度，实现产值与用电的脱钩；另一方面，新能源及电力技术的进步会提升清洁电力的供应能力与经济性，可能反过来刺激电力需求增长。能源替代效应显著，产业结构优化伴随着以电代煤、以电代油的能源消费转型，工业、交通、建筑等领域对电力的替代性需求大幅增加，即使在总能耗下降的情况下，电力需求仍可能因其在终端能源消费中占比的提升而保持增长^[6]。政策引导效应至关重要，政府对低碳产业的扶持政策会直接带动其电力需求，而对高耗能产业的限制则会抑制其用电；同时新能源发展规划和差异化电价政策也深刻影响着电力需求的结构与时间分布。消费拉动效应通过居民端体现，产业结构优化带来收入增长和消费升级，智能家电、电动汽车等高耗能产品的普及，以及城市化进程的加快，都共同推动了居民生活用电和城市公共用电需

求的增长。

（四）影响机制的动态性与区域差异性

双碳目标下产业结构调整对电力需求的影响机制具有显著的动态演变特征和区域差异性。从时间维度看，影响机制随双碳目标推进的三个阶段而变化，在初期，以遏制高耗能产业扩张为主，结构效应突出，电力需求增速放缓；进入中期，产业结构深化调整，技术进步和能源替代效应增强，电力在终端能源消费中占比大幅提升，成为拉动需求增长的主要动力，电力需求总量平稳增长；到后期，产业结构基本完成低碳化转型，技术效应和替代效应趋于稳定，电力需求进入低速增长或稳定阶段，结构以三产和居民用电为主^[7]。此外，外部环境变化也会对各阶段的作用强度和方向产生影响。从空间维度看，影响机制呈现出明显的区域差异，东部发达地区以发展高端制造和现代服务业为主，技术、替代和消费效应共同推动电力需求平稳增长，结构以三产和居民用电为主；中部地区以改造传统工业为重点，结构效应的抑制作用明显，电力需求增速较慢，结构仍以二产用电为主；西部地区则在保障能源安全的同时发展资源加工和新能源产业，结构效应的抑制作用有限，甚至可能因工业化和新能源产业发展而拉动电力需求增长，整体增长潜力较大，结构以二产用电为主。

二、考虑产业结构调整的区域电力需求预测模型构建

（一）模型构建的总体思路与原则

在双碳目标的战略约束下，构建一个能够精准刻画产业结构调整对电力需求复杂影响的模型，必须以“系统性整合、动态化反映、区域化适配”为核心导向^[8]。其总体思路在于，超越传统电力需求预测框架，将产业结构调整所引发的结构效应、技术进步效应与能源替代效应等复杂机制，转化为一系列可量化的模型要素，从而构建起从“理论机制”到“变量映射”，再到“模型适配”，最终到“检验优化”的完整闭环。为实现这一目标，模型设计需多维度提取关键因子，以全面、立体地描述产业结构调整的内涵；同时必须为不同区域的异质性特征预留参数调整空间，并巧妙引入政策与时间变量，以动态捕捉二者关系在不同发展阶段下的演变规律^[9]。在模型构建的具体实践中，应严格遵循四大核心原则，科学性，确保变量选取与模型设定根植于坚实的经济理论，真实反映产业调整方向；可操作性，优先选用官方权威数据，保障模型从理论走向实践的应用价值；动态性，摒弃静态假设，通过时间变量或动态模型刻画关系的演变过程；稳健性，通过设置扰动项和进行稳健性检验，抵御外部短期冲击，确保预测结果在合理、可信的区间内波动，为决策提供坚实支撑。

（二）模型变量的选择与界定

模型的变量体系依据前述影响机制分析，并紧密结合双碳目标要求与数据可得性，划分为被解释变量、核心解释变量与控制变量三大类。被解释变量聚焦于区域电力需求总量，采用经过修正的区域年度全社会用电量进行衡量，旨在更精准地反映本地实际用电需求^[10]。核心解释变量则从三个关键维度构建产业结构调整的综合指标，产业结构合理化，采用泰尔指数予以量化，指

数值越低，表征资源配置效率越高，产业结构越趋合理；产业结构高级化，以第三产业与第二产业的产值比来衡量，该比值的提升直观反映了经济向服务化、知识化方向的转型；产业结构低碳化，通过高耗能产业产值占工业总严重的比重来体现，该比重的下降直接映射出产业结构的低碳化转型进程。为有效剥离其他因素的干扰，模型引入了五类控制变量，技术进步变量，综合考量了劳动生产率与研发投入占比；能源替代变量，以终端能源消费中电力的占比来表征；政策变量，巧妙结合了反映双碳目标时间节点的虚拟变量与衡量碳减排目标完成率的连续变量；经济增长变量，采用剔除价格因素后的人均 GDP；居民消费变量，则以城镇居民人均可支配收入作为代理指标。

（三）模型的选择与结构设计

为精准刻画产业结构调整与电力需求之间复杂的动态互动关系，研究选用动态面板数据模型（DPDM）作为核心分析框架。该模型通过引入被解释变量的滞后项，不仅能够有效捕捉电力需求在时间维度上的路径依赖特征，还能妥善处理解释变量与被解释变量之间可能存在的内生性问题，这与双碳目标下产业结构与电力需求相互影响、动态演变的现实情境高度契合。在基准模型的设定上，以区域电力需求总量为被解释变量，核心解释变量涵盖了产业结构调整的三个关键维度，合理化（泰尔指数）、高级化（三产/二产产值比）与低碳化（高耗能产业产值占比）。同时模型纳入了技术进步、能源替代、政策冲击、经济增长（人均 GDP）及居民消费等一系列控制变量，并对区域固定效应与随机扰动项进行了有效控制，以剥离其他非观测因素的干扰。为深入探究影响的区域异质性，模型进一步创新性地引入了东、中、西三大区域的虚拟变量，并将其与核心解释变量构建交互项。通过细致对比这些交互项的系数符号、大小及显著性，可以直观地揭示不同区域产业结构调整对电力需求影响的强度与方向差异，为制定区域差异化政策提供精细化的实证依据。此外，为检验经济增长与电力需求之间可能存在的非线性关联，模型在设定中加入了人均 GDP 的平方项。若该平方项的系数在统计上显著为负，则有力地支持了二者之间呈现“倒 U 型”关系的假说，即验证了“环境库兹涅茨曲线”（EKC）在电力需求领域的适用性，将显著提升模型对现实经济现象的解释深度与预测精度。

（四）模型的参数估计与检验

针对动态面板模型的内生性问题，本研究采用系统 GMM 方法进行参数估计，该方法结合水平与差分方程，引入更多工具变量，有效处理内生性并在小样本下保持良好估计效率。工具变量选择包括核心解释变量和部分控制变量的滞后 1-2 期，优先采用两步系统 GMM 并结合 Windmeijer 修正标准误，以提升小样本下估计结果的有效性。模型检验涵盖四个方面：一是序列相关检验，确保扰动项仅存在一阶相关而无不显著二阶相关；二是工具变量有效性检验，以 Hansen 检验为主，确认工具变量合理；三是模型设定检验，通过对比差分与系统 GMM 结果、加入平方项后的拟合优度变化，验证模型设定正确性；四是多重共线性检验，计算 VIF 值确保无严重共线性问题。参数估计与检验完成后，需对结果进行经济意义解读，例如高耗能产业占比的系数若显著为正，说明其对电力需求具有正向拉动作用；交互项系数则可揭示不同区域产业结构调整效果的差异，为制定区域差异化政策提供量化依据。

三、结束语

本文围绕双碳目标下区域产业结构调整与电力需求的关系展开系统性研究，通过理论剖析与模型构建，形成了对二者内在关联的完整认知框架，为双碳背景下区域电力需求管理与能源转型提供了兼具理论价值与实践意义的研究成果。从实践层面来看，本文的研究成果可为政府部门、电力企业与能源规划机构提供关键决策支撑，对政策制定者而言，可依据不同区域产业结构调整对电力需求的影响差异，制定差异化的双碳政策与电力规划；对电力企业而言，预测模型可辅助其制定精准的电力生产计划与电网建设规划，避免资源浪费或供应短缺；对能源转型而言，研究结论可为电力系统向清洁化、智能化转型提供方向指引，推动电力需求与低碳目标的协同推进。未来随着双碳政策的深化、技术创新的突破与产业结构的进一步优化，需不断完善研究框架与模型体系，为实现经济高质量发展与碳减排目标的双赢提供更坚实的学术支撑。

参考文献

[1] 皮渡洋. 长三角地区电力需求预测及保障策略研究 [D]. 中国矿业大学, 中国矿业大学 (江苏), 2022.

[2] 戚书豪. 云南省际电力足迹转移特征及工业产业结构对其的影响 —— 基于 MRIO 模型 [D]. 云南 : 云南财经大学, 2024.

[3] 廖健. 钦州市郊区电力需求影响因素分析及电力需求预测 [J]. 红水河, 2014(1): 59-64. DOI: 10.3969/j.issn.1001-408X.2014.01.016.

[4] 张进芳. 产业结构调整对电力需求的影响及其模型构建 [D]. 华北电力大学 (北京), 2016.

[5] 姚洁. 构建与区域产业发展相适应的电力营销目标 [J]. 黑龙江科技信息, 2013(15): 28. DOI: 10.3969/j.issn.1673-1328.2013.15.028.

[6] 史静, 李斌, 谈健, 等. 基于产业转移背景下江苏典型地区电力需求预测研究 [J]. 电力科技与环保, 2020, 36(5): 7-14. DOI: 10.3969/j.issn.1674-8069.2020.05.002.

[7] 胡杰, 张忠华, 章浩. “十二五” 东北区域经济及电力需求情况分析 [J]. 吉林电力, 2017, 45(2): 1-5. DOI: 10.3969/j.issn.1009-5306.2017.02.001.

[8] 于音波, 陈颖, 杨晓蕾, 等. 上海市产业结构调整对于电力需求的影响 [J]. 能源工程, 2009(1): 1-5. DOI: 10.3969/j.issn.1004-3950.2009.01.001.

[9] 郑军超. 电力需求预测与产业调整关系的协整分析 [D]. 河南 : 郑州大学, 2014.

[10] 袁菲菲. 我国产业结构调整对能源消费影响的研究 [D]. 山东财经大学, 2012. DOI: 10.7666/d.D303440.