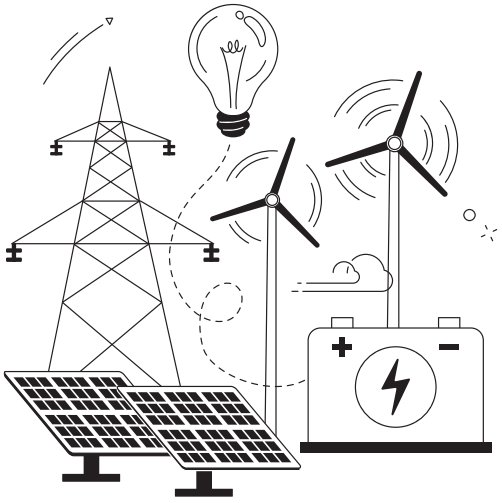
电力技术与安全管理

Electric Power Technology and Safety Management



ART AND TECHNOLOGY PRESS INC.

(517 666 0904)

263 S KENWOOD ST 560

CASPER,WY 82601

Copyright © 2026 by ART AND TECHNOLOGY PRESS INC. (United States)

Complimentary Copy

ART AND TECHNOLOGY PRESS INC
(United States)

Editorial Board Member

Bateer Hexi

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

Gaowa Morigeng

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

Juan Wang

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

Chaoshan Xie

Beijing BKC Technology Co., Ltd.

Cheng'en Tsai

Shenzhen ACE Battery Co., Ltd.

目录 CONTENTS

电力技术与安全管理

Electric Power Technology and Safety Management

第3卷 第4期　2026年4月刊

主　管　ART AND TECHNOLOGY PRESS INC.

主　办　ART AND TECHNOLOGY 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：263 S KENWOOD ST 560
CASPER,WY 82601

网　址：https://arttechpress.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：

1. 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。
2. 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。
3. 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。
4. 论文未曾以任何形式公开发表过。
5. 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 **强化营销合规管理赋能供电企业提质增效的研究** **吕卉，何嘉祥，刘慧**
Research on Enhancing Marketing Compliance Management to Improve Quality and Efficiency in Power Supply Enterprises — Lv Hui, He Jiaxiang, Liu Hui

004 **电力营销服务质量提升策略研究** **李旭东**
Research on the Strategy of Improving the Quality of Electric Power Marketing Service — Li Xudong

007 **电力企业服务乡村振兴的供电保障机制研究** **赵晓轲，姜姝彤**
Research on Power Supply Guarantee Mechanism of Electric Power Enterprises Serving Rural Revitalization — Zhao Xiaoke, Jiang Shutong

010 **基于物联网技术的变电站智能巡检系统** **刘学富，王红**
Intelligent Substation Inspection System Based on Internet of Things Technology — Liu Xuefu, Wang Hong

013 **高比例新能源并网对电力系统稳定性的影响及调控策略** **李朴哲，胡金芳**
Impact of High-Proportion New Energy Grid Connection on Power System Stability and Control Strategies — Li Puzhe, Hu Jinfang

016 **柴油发电机组电气故障辅助诊断系统设计** **王德朋**
Design of an Auxiliary Diagnostic System for Electrical Faults in Diesel Generator Sets — Wang Depeng

019 **60MW 机组 3# 送风机变频器控制电源故障分析处理及系统优化** **姚洁**
Analysis, Treatment, and System Optimization of the Control Power Supply Fault of the Frequency Converter For 3# Forced Draft Fan Of a 60mw Unit — Yao Jie

022 **百万机组大面积断煤应急处置技术研究** **曾春峰**
Research on Emergency Response Technology for Large-Scale Coal Shortage in Million-MW Units — Zeng Chunfeng

技术研究 | TECHNICAL RESEARCH

025 **基于深度学习的继电保护装置故障诊断与定位研究** **申皓天**
Research on Fault Diagnosis and Localization of Relay Protection Device Based on Deep Learning — Shen Haotian

028 **智慧建造技术在新能源项目施工管理中的应用研究** **高源**
Research on the Application of Smart Construction Technology in the Construction Management of New Energy Projects — Gao Yuan

031 **电力及电气安装工程管理中新型电气自动化技术运用分析** **刘冬，李琪**
Analysis on the Application of New Electrical Automation Technologies in the Management of Power and Electrical Installation Projects — Liu Dong, Li Qi

035 **电力技术创新与安全生产管理融合路径研究** **李仕进**
Research on the Integration Path of Power Technology Innovation and Safety Production Management — Li Shijin

038 **光伏发电中组件衰减与故障诊断方法的实验与分析** **张雷**
Experiment and Analysis of Module Degradation and Fault Diagnosis Methods in Photovoltaic Power Generation — Zhang Lei

041 极端天气下海上风电安全防控策略与实践研究 吴晓鹏
Research on Safety Prevention and Control Strategies and Practices for Offshore Wind Power under Extreme Weather Conditions Wu Xiaopeng

044 建筑节能工程质量管控与建筑节能检测 江洁莹
Quality Control and Inspection of Building Energy Efficiency Projects Jiang Jieying

047 锂电池极耳缺陷引发的失效分析及自动化检测方法研究——以 LJ 双通道检测设备为例 李立
Research on Failure Analysis and Automated Detection Methods for Defects in Lithium Battery Tabs: A Case Study of the LJ Dual-Channel Detection Equipment Li Li

050 电力工程电气设备安装施工的核心管控要点 钱文鑫
Core Management and Control Points for the Installation and Construction of Electrical Equipment in Power Engineering Qian Wenxin

053 电力工程中电气自动化技术实践应用研究 曾威
Research on the Practical Application of Electrical Automation Technology in Power Engineering Zeng Wei

056 电力工程电气专业与土建施工协同配合措施探析 彭程
Exploration on Collaborative Measures Between Electrical Engineering and Civil Construction in Power Projects Peng Cheng

059 新能源发电企业全生命周期技术监督优化研究 卢必娟
Research on Optimization of Technical Supervision throughout the Life Cycle of New Energy Power Generation Enterprises Lu Bijuan

062 基于传感器技术的风电机组在线故障诊断研究 梁振国，李洪凯，刘雄，张东东，郭翔
Research on Online Fault Diagnosis of Wind Turbine Based on Sensor Technology Liang Zhenguo, Li Hongkai, Liu Xiong, Zhang Dongdong, Guo Xiang

065 交流380V电动执行机构电源电缆选型分析 季震宇
Selection Analysis of AC 380V Power Cables for Electric Actuators Ji Zhenyu

068 山区电网输电线路抗冰防灾关键技术应用研究 卢维宽，熊志勇
Research on the Application of Key Technologies for Ice Resistance and Disaster Prevention in Transmission Lines of Mountainous Power Grids Lu Weikuan, Xiong Zhiyong

071 亚临界火电机组炉水二氧化硅超标原因分析 张凯
Analysis of the Causes of Excessive Silica in the Boiler Water of Subcritical Thermal Power Units Zhang Kai

074 分布式能源接入对配网运检的影响及应对策略研究 韩强
Research on the Impact of Distributed Energy Access on Distribution Network Operation and Maintenance and Countermeasures Han Qiang

强化营销合规管理赋能供电企业提质增效的研究

吕卉，何嘉祥，刘慧
国网湖北省电力有限公司黄冈供电公司，湖北 黄冈 438000
DOI:10.61369/EPTSM.2026040001

摘　　要： 电力行业“大监管”与市场化改革背景下，营销合规管理是供电企业风控与提效的关键。本文梳理出营销合规管理在流程执行、服务行为、监管体系、基层落实等方面的突出问题，剖析出业扩管控薄弱、服务能力不匹配、制度迭代滞后、基层机制不健全等根源。结合数字化发展趋势，从制度、能力、监管、基层四方面提出优化路径，构建全维度合规管理体系，实现合规管理与提质增效深度融合，为供电企业高质量发展提供保障。

关 键 词： 电力营销；合规管理；提质增效；风险防控；供电企业

Research on Enhancing Marketing Compliance Management to Improve Quality and Efficiency in Power Supply Enterprises

Lv Hui, He Jiaxiang, Liu Hui
State Grid Hubei Province Electric Power Co., Ltd. Huanggang Power Supply Company , Huanggang, Hubei 438000

Abstract: Under the backdrop of comprehensive regulation and market-oriented reforms in the power industry, marketing compliance management serves as a critical driver for risk control and efficiency improvement in power supply enterprises. This paper identifies prominent issues in marketing compliance management across process execution, service conduct, regulatory frameworks, and grassroots implementation, while analyzing root causes including inadequate business expansion controls, mismatched service capabilities, lagging institutional updates, and underdeveloped grassroots mechanisms. In alignment with digital transformation trends, the study proposes optimization pathways across four dimensions—institutional frameworks, capability development, regulatory oversight, and grassroots execution—to establish a comprehensive compliance management system. This approach facilitates deep integration of compliance management with quality enhancement and operational efficiency, thereby providing robust support for the high-quality development of power supply enterprises.

Keywords: power marketing; compliance management; quality and efficiency improvement; risk prevention and control; power supply enterprises

引言

（一）研究背景

随着《电力法》《电力供应与使用条例》等法律法规的修订完善，以及国家能源局“双随机、一公开”监管机制的常态化实施，我国电力行业合规经营的约束性不断增强。营销业务作为供电企业与客户交互的核心载体，涵盖业扩报装、电价执行、电费核算等全链条环节，其合规性直接关系企业经营效益、品牌形象与社会公信力[1]。同时，电力市场化改革向纵深推进，增量配电业务放开、售电市场竞争加剧，供电企业面临“存量保份额、增量抢机遇”的双重压力，营销合规管理已从单纯风险防控手段，升级为提升服务质量、优化经营效率、增强市场竞争力的核心支撑[2]。

（二）研究意义

理论意义：立足电力行业特性，系统分析营销合规管理与提质增效的内在逻辑，构建“问题－根源－对策”分析框架，丰富电力企业合规管理领域研究成果，为同类行业合规管理研究提供理论参考。

实践意义：通过调研挖掘供电企业营销合规管理现实困境，提出针对性、可操作的优化路径，助力企业完善合规管理体系，防范化解经营风险，实现合规与增效协同发展，为企业市场化竞争中稳健运营提供实践指导。

（三）研究现状

国内不少学者都对电力企业营销合规管理做过相关研究，但目前还存在不少不足。王强[2]从制度建设、人员培训等角度给出了合规

作者简介：吕卉（1977.10-），女，汉族，湖北省黄冈市人，学历本科，职称高级，研究方向电力营销。

Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

管理优化建议，却没有深入探讨合规管理和企业提质增效之间的内在联系；李娜[3]通过实际案例分析，指出基层落实不到位是电力营销合规的突出问题，但没有提出一套系统可行的解决办法；国网能源研究院[4]发布的《电力营销合规管理白皮书》，虽然梳理了营销合规的核心内容和标准流程，但在实际落地应用上缺乏针对性，指导性不够。

（四）研究内容与方法

研究内容：以供电企业营销合规管理为对象，一是分析其在作业流程、服务行为等维度的现状与突出问题；二是从源头管控、服务能力等方面深挖问题根源；三是提出优化路径，构建全方位、多层次合规管理体系。

研究方法：①文献研究法：查阅合规管理、电力营销相关学术论文、政策文件，奠定理论基础；②实地调研法：选取某省级供电公司及下属 12 家县级企业为对象，通过访谈、查阅制度文件与稽查报告收集一手资料；③数据统计法：分析业务办理时长、电价执行准确率等数据，为问题诊断提供支撑；④案例分析法：选取业扩报装、电价执行等 3 类典型合规风险案例，增强对策针对性。

一、相关概念界定与理论基础

（一）核心概念界定

供电企业严格按照国家法律法规、行业监管规定和公司内部规章制度，把营销所有业务环节都规范管起来，提前规避和化解各类合规风险。核心目的就四点：合法经营、依规办事、守住风险、提质增效[4]。

提质增效：提质就是把营销服务做好，比如加快业务办理速度、改善客户办事体验；增效就是把经营收益提上去，比如节省运营开支、避免不必要的损失浪费。而营销合规管理，就是靠规范业务流程、提前防控各类风险，既把服务质量提上来，又把经营效益做上去，实现两者同步提升、互相促进。

（二）理论基础

全面风险管理理论：把企业经营中各类风险全部找出来、做好评估、全程管控，建立全员参与、全流程覆盖、全方位把控的风险防控体系。这套理论能给电力营销合规管理提供思路和方法，要求从源头排查每个环节的合规风险点，做到实时动态管控[6]。

流程再造理论：核心是对企业原有业务流程做彻底梳理和重新优化，精简冗余环节、简化办事程序、整体提升工作效率。把这套理论用到电力营销合规管理上，就是全面梳理营销所有业务流程，改成标准化、高效率的运行模式，同时从源头降低合规风险[7]。

服务质量差距模型：指出客户感知与期望服务质量的差距是不满的主要原因，差距源于服务设计、执行等环节[8]，为营销服务合规管理提供依据，要求通过规范服务行为缩小差距，提升客户满意度。

二、供电企业营销合规管理现状与突出问题

（一）营销合规管理现状

近年来，该公司高度重视营销合规管理，制定《营销合规管理办法》等制度 20 余项，构建 “公司 – 市公司 – 县级公司 – 供电所” 四级合规管理组织体系；开展合规培训 50 余场次，培训超 五千多人次；建立营销稽查体系，全年开展合规检查 36 次，整改问题 1200 余项，合规管理水平逐步提升。2024 年，公司客户投诉率同比下降 12.3%，电价执行准确率达 98.7%，业务办理超时率控制在 3% 以内。

（二）突出问题

作业流程标准化执行存在偏差：基层落地存在“最后一公里”梗阻，流程培训缺乏标准化体系，35% 的基层员工对部分业务流程不熟悉，28% 对电价政策理解偏差；个别员工 “重速度、轻规范”。服务行为规范化水平有待提升：一线员工年龄结构老化，45 岁以上占比达 42%，对数字化系统、新电价政策掌握不扎实，客户对“服务专业性”满意度仅 82.5%。客户投诉处置机制不健全，首问负责制落实不到位，易导致简单投诉升级。

合规监管体系智能化、协同化不足：稽查数据主要依赖营销系统内部数据，未整合配电、客服等多维度数据，仅覆盖 28 项核心合规指标，30% 以上隐性风险未被及时发现；稽查以事后核查为主，事前预防占比仅 15%，风险防控主动性不足；部门间存在信息壁垒，数据共享不及时，监管合力未形成。

基层合规管理落实效能不佳：近四成基层管理者只看重业务指标，不重视合规管理。不少员工合规意识淡薄，觉得合规只是领导的事。而且问题整改流于形式，2024 年合规检查里，有 35% 都是反复出现的同类老问题。

三、营销合规管理问题的根源分析

（一）业扩源头管控薄弱，风险隐患突出

业扩报装是电力营销业务的首要环节，目前合规管控漏洞比较突出。不少员工对专业技术规范掌握不扎实，供电方案设计不够合理，潜藏安全和合规隐患。加之电价政策、收费标准更新快，员工没能及时吃透新规。同时线上流程监管不到位，系统档案和现场计量方案不一致、线上审批漏流程等问题常有发生，很容易造成电费计算错误，引发客户纠纷[9]。

（二）服务能力与业务发展不匹配，客户体验欠佳

人员结构不合理，基层一线员工年龄老化、知识结构陈旧，45 岁以上员工中仅 25% 参加过数字化营销系统专项培训，30% 对新能源电价政策不熟悉；培训体系不完善，内容以政策宣贯为主，与实际工作结合不紧密，55% 的基层员工认为培训针对性不足，48% 认为培训方式单一；激励机制不健全，服务质量、合规表现与绩效、晋升未充分挂钩，员工提升能力的积极性不足。

（三）制度体系迭代滞后，合规管理缺乏支撑

制度更新不及时，针对新能源汽车充电设施报装等新业务，未制定专项合规管理办法，现有制度部分条款与业务实际脱节；制度内容不细化，部分文件表述笼统，操作标准、责任划分不明确，基层员工实操中难以把握；制度权威性不足，考核问责机制

 Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

不健全，对违规行为处罚力度较轻，难以形成有效约束。

（四）基层管理机制不健全，长效落实缺乏保障

基层合规管理责任没有真正落实到位，供电所没有搭建清晰的合规责任体系，看似人人都有责任，实际没人真正负责。同时资源投入跟不上，人力、物力都优先放在核心业务上，合规管理投入偏少。而且合规文化氛围薄弱，没有形成守规光荣、违规可耻的风气，员工普遍把合规工作当成额外负担，合规意识普遍不强[10]。

四、强化营销合规管理赋能提质增效的优化路径

（一）制度筑基：构建动态适配的合规管理体系

全面梳理并优化现有制度和业务流程，由营销管理部门牵头制定营销合规管控清单，明确各项核心业务的合规要求、操作规范和责任人。针对新兴业务单独制定管理办法，及时修订过时脱节的条款，保证制度接地气、能落地。

建立制度动态更新机制，打造政策跟踪、需求调研、制度修订、宣贯培训、执行反馈的闭环管理模式。专门成立政策研究小组，实时跟进法规政策变动，每季度开展一次需求调研，每年对整套制度进行全面评估和修订。

加大制度执行的考核与问责力度，把制度落实情况纳入员工绩效考核，合规考核权重不低于 15%。实行日常巡查、专项督查、年度考评相结合的监督模式，对违规行为严肃通报、扣减绩效，切实维护制度的严肃性和约束力。

（二）能力赋能：打造高素质营销合规队伍

优化人员队伍配置，推行人才强企思路，引进年轻高学历的营销专业人员，实行老带新传帮带模式，同时开通多条晋升渠道，充分调动员工工作主动性和积极性。

搭建精准分层培训体系，按岗位分类制定培训计划：管理人员重点学合规管理思路和统筹方法，一线员工专攻业务流程和服务技能，新员工入职必做合规岗前培训。丰富培训形式，多开展实操练习，搭建线上学习平台，定期组织技能比武、案例复盘，并建立培训效果评估机制，随时调整优化培训内容。

完善奖惩激励机制，把员工合规表现、服务质量和绩效奖金、晋升发展直接挂钩，评选表彰合规标兵、服务明星，树立正面典型；同时划定负面行为清单，对出现服务投诉、违规操作的员工进行绩效扣分等处理，真正形成奖优罚劣、合规为荣的工作导向。

（三）监管提效：构建智能化协同化监管体系

加强三级稽查体系建设，搭建公司专项稽查、市级日常稽查、县级自查自纠三级联动模式。组建专业稽查队伍，常态化开展业务培训和案例交流，提升工作人员识别风险、核查问题的能力。

推进监管智能化改造，依托大数据、人工智能搭建营销合规智能监管平台，整合各系统数据建立风险预警模型，对营销核心业务环节实现实时监控、自动预警。开发异常数据筛查和关联分析功能，精准排查隐蔽风险，开通线上核查流程，大幅提升监管效率。

建立跨部门联合监管机制，成立营销合规协同工作小组，每月召开联席工作会议；搭建部门间数据共享平台，打通信息孤岛；健全问题移交处置流程，明确分工责任和办理时限，凝聚各部门监管合力。

（四）基层抓实：健全合规管理长效落实机制

压实基层管理责任，各供电所实行一把手负总责、分管领导具体分管、岗位员工各负其责的责任体系，把合规任务分解到每个岗位和员工，全员签订合规责任书。实行每日督导、每周通报、每月考核，把责任真正落到实处。

优化基层资源配置，给供电所配齐专职合规管理人员，加大合规工作投入，配齐办公设备和智能监管工具。合理安排工作任务，避免大家只顾忙业务、忽略合规管理。

强化合规文化建设，利用宣传栏、内部公众号等渠道，普及合规政策和典型案例，营造守规办事的氛围。常态化举办合规知识竞赛、案例交流会，增强员工合规意识。评选树立合规先进典型，发挥榜样示范作用，引导员工把合规要求变成日常自觉行为。

五、结论与展望

（一）结论

本文通过对某省级供电公司的实地调研，明确当前供电企业营销合规管理存在作业流程执行偏差、服务行为不规范、监管体系智能化协同化不足、基层落实效能不佳等突出问题，其根源在于业扩源头管控薄弱、服务能力与业务发展不匹配、制度体系迭代滞后、基层管理机制不健全。通过构建动态适配的合规管理制度体系、打造高素质合规队伍、推进智能化协同化监管、健全基层长效落实机制四大路径，可有效破解营销合规管理现实困境，推动合规管理与提质增效深度融合，为供电企业防范经营风险、提升市场竞争力提供有力支撑。

（二）展望

随着电力市场化改革与数字化转型的加速推进，供电企业营销合规管理将面临更多新机遇与新挑战。未来可进一步加强三方面研究：一是智能化合规管理工具的深度应用，探索区块链、大数据在全流程合规管控中的实践路径；二是新业务合规管理体系构建，针对新能源并网、虚拟电厂等新兴业务，完善合规管控标准与流程；三是合规管理与 ESG 体系的融合，将合规要求融入企业环境、社会、治理各环节，推动供电企业实现高质量、可持续发展。

参考文献

[1] 国家能源局 . 2024 年电力行业监管报告 [R]. 北京：国家能源局，2025.
[2] 王强 . 供电企业营销合规风险防控研究 [J]. 电力需求侧管理，2023,25 (2):78-83.
[3] 李娜 . 供电企业营销合规管理痛点及解决对策 [J]. 中国电力企业管理，2024 (5):64-66.
[4] 国网能源研究院 . 电力营销合规管理白皮书 [R]. 北京：国网能源研究院，2024.
[5] 中国电力企业联合会 . 电力营销合规管理指南 [M]. 北京：中国电力出版社，2022.
[6] 卡普兰，诺顿。全面风险管理：整合战略与风险管理 [M]. 北京：机械工业出版社，2021.
[7] 哈默，钱皮 . 企业再造：企业革命的宣言书 [M]. 上海：上海译文出版社，2020.
[8] 帕拉苏拉曼，泽丝曼尔，贝里 . 服务质量评估与管理 [M]. 北京：机械工业出版社，2019.
[9] 张莉 . 供电企业业扩报装环节合规风险管理研究 [J]. 电力工程技术，2024,43 (1):156-162.
[10] 刘军 . 基层供电企业营销合规文化建设的实践与思考 [J]. 中国电业，2023 (12):76-77.

Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

电力营销服务质量提升策略研究

李旭东
国网河南省电力公司登封市供电公司，河南 登封 452470

DOI:10.61369/EPTSM.2026040003

摘　　要： 随着电力市场化改革深入推进，电力营销服务质量已成为电网企业核心竞争力的关键要素。本文围绕电力营销服务质量提升策略展开研究，首先阐释电力营销的基本概念与特征，界定服务质量的内涵与评价要素，剖析提升服务质量的现实意义。其次，系统分析当前电力营销服务体系的构成、主要模式及质量现状。在此基础上，深入挖掘服务渠道、响应效率与个性化服务等方面存在的问题。进而从技术支撑、人员素质、管理机制三个维度解析影响服务质量的关键因素。最后，针对性地提出优化服务渠道、强化技术应用与完善管理机制等具体策略，旨在为电力企业改进营销服务提供理论参考与实践借鉴。

关 键 词： 电力营销；服务质量；影响因素；提升策略；供电服务

Research on the Strategy of Improving the Quality of Electric Power Marketing Service

Li Xudong
State Grid Henan Electric Power Company Dengfeng Power Supply Company, Dengfeng, Henan 452470

Abstract: As power market reforms advance, the quality of electricity marketing services has become a critical factor in the core competitiveness of power grid enterprises. This paper explores strategies to enhance service quality in electricity marketing. First, it clarifies the fundamental concepts and characteristics of electricity marketing, defines the connotation and evaluation criteria of service quality, and analyzes the practical significance of service improvement. Second, it systematically examines the current composition, main models, and quality status of the electricity marketing service system. Building on this, the paper identifies issues in service channels, response efficiency, and personalized services. Subsequently, it analyzes key factors affecting service quality from three dimensions: technical support, personnel competence, and management mechanisms. Finally, targeted strategies are proposed, including optimizing service channels, enhancing technological applications, and improving management mechanisms, aiming to provide theoretical references and practical guidance for power enterprises to enhance their marketing services.

Keywords: power marketing; service quality; influencing factors; improvement strategies; power supply service

引言

电力工业属于国民经济的基本产业，它的营销服务质量同用户的满意度以及社会的整体效益密切相关。处于能源变革和电力体制改革的大环境当中，传统的电力营销模式很难符合多元又独特的用户需求。怎样精准找出服务中的不足之处并系统地改进质量，这已成为电力企业迫切须要解决的重大课题。本文通过理论分析与现状梳理，探究电力营销服务存在的问题及其成因，并在此基础上构建切实可行的质量提升策略，以期为电力企业优化服务体系、增强市场竞争力提供有益启示。

一、电力营销服务质量的理论概述

（一）电力营销的基本概念与特征

根据电力营销的主要概念，能有效满足现今人们对于电力消费的实际需求。根据电力企业在市场过程中所开展的各项不同经营活动，能够切实地以消费者的真正需求加强对于电力产品和相应的服务改善，从而能有效地与相关企业所倡导的发展目标相符合。简而言之，电力营销的实质便是调整电力市场的总体发展水平与相应的需求时间，保证在整体方案改善的阶段能有效提供良好的服务质量。它有着明显的独特之处，电能属于无形商品，其

作者简介：李旭东（1978.08-），男，汉族，河南登封人，学历：大学本科，职称：工程师，研究方向：电力营销。

 Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

生产和输送与消费几乎同步产生，难以大量存储，所以营销活动非常依赖电网这个实体网络。而且，电力产品存在同质化的趋势，服务就成了区分竞争的关键因素，于是营销工作表现出突出的服务导向和技术依靠特征，这就要求供电企业不断更新服务模式以适应社会经济发展的动态需求。

（二）服务质量的内涵与评价要素

服务质量源于用户对服务期望与实际感知的对比，具备主观性，互动性及过程性这些基本特性。在电力营销范畴当中，服务质量包含供电可靠性与电能质量等硬性指标，而且关乎业务办理便捷程度，故障抢修是否及时以及咨询投诉能否得到回应等软性服务感受。评判电力营销服务质量往往覆盖诸多层面，可靠性关乎企业兑现服务承诺的能力，响应性展示的是助力用户并快速改善服务的诚意，保证性体现员工专业知识及其礼貌态度带来的信任感，移情性关注站在用户角度施以个性化关怀，有形性则牵涉服务场地，设施等物质环境。这些要素一起形成了电力用户感知服务质量的综合评价体系。

二、电力营销服务质量的现状分析

（一）电力营销服务体系的基本构成

电力营销服务体系属于多层级，多主体的有机整体，其形成要素主要包含服务主体，服务渠道，服务内容以及服务支撑系统。服务主体以供电企业为核心，包含前端营销人员，后台技术支持人员和运作协调人员等众多主体。服务渠道表现出丰富化的特性，覆盖实体营业厅，网上营业厅，手机 APP，客服热线以及自助服务终端等线上线下接触点。服务内容关乎业扩报装，电费缴纳，用电咨询，故障报修，能源委托等全方位的用能服务。

（二）当前电力营销服务的主要模式

当下，我国电力营销服务存在传统模式和改进模式共存这样一种格局。传统模式以实体营业厅为关键部分，用户需通过面对面的形式去处理用电事务，此模式有着直观又可靠的好处，不过却受到时空方面的诸多约束。伴随信息技术不断发展，线上服务模式渐渐变得越发普遍，网上营业厅以及移动 APP 开始供应诸如全天开放的业务办理，电费查询，在线客服之类的功能，极大地改善了服务的便捷程度。而且，积极服务模式慢慢兴起，供电企业借助大数据分析来预先判断用户的需要，进而开展用能诊断，能效建议之类的增值业务。

（三）电力营销服务质量的总体评价

我国电力营销服务质量一直在优化，用户满意度也逐步得到加强。供电可靠率，电压合格率这些硬性指标维持着较高的水准，“获取电力”指标在世界营商环境评定当中位次大幅上升，线上办电覆盖范围不断扩充，业务流程不断精简，办电历时大幅缩减，这些情况体现出服务效率切实得到了加强。不过，评价结果也表现出区域差别和群体差别，城乡结合部，农村地区的服务水平同中心城市相比仍然存在一定差距，老年群体这样的数字弱势群体在适应线上服务方面碰到了困难。而且，服务的规范性与灵活性仍需进一步优化，有些环节存有标准贯彻不到位，与用户交流不足之类的状况，离精准化，人性化的服务目标还相距甚远。

三、电力营销服务质量存在的问题

（一）服务渠道与便捷性方面的问题

当下，电力营销服务渠道虽已趋于多元，但各渠道之间仍然存在衔接不畅，功能重叠的情况。线上渠道无法完全整合线下业务，一些较为复杂的业务仍须要用户到实体厅去办理，这给用户增添了诸多奔波之苦。实体营业厅的布局尚需优化，部分地区网点密度小，用户办理业务所花费的时间过长。自助服务终端的功能较为单一，其操作界面缺乏足够的亲和力，因而使用率比较低。而且，农村地区以及偏远山区的服务渠道覆盖范围小，基本服务资源的分布不均衡，渠道的宣传引导也较为薄弱，用户对于新型服务渠道的了解程度有限，还是习惯于依靠电话或者现场咨询，没有充分体验到便捷的服务。因此，急需提升整体服务的可达性和便利性。

（二）服务响应与效率方面的问题

服务响应速度和处理效率会直接左右用户体验，当下在这些方面仍然大有改进之处。用电报装流程尽管已经简化，但是当涉及到跨部门协调的时候，还是有可能出现衔接不上的情况，从而引发整体历时超出预期。故障报修的响应存在时段性的波动现象，在高峰期的时候人员调配非常紧张，现场处置的效率也高低不一。咨询投诉的处理机制不够完备，首问负责制没有得到切实执行，用户反映的问题往往得经过很多环节才有可能得到有效的回复。内部业务协同效率必要优化，营销系统同调度，运检等系统的信息共享不及时，这会影响服务流转的速度。紧急情况下，应急响应机制还需进一步磨合，多部门协同作战的能力也要进一步加强。

（三）服务内容与个性化方面的问题

当下，电力营销服务内容大多还是集中在标准化业务上，个性化，差别化服务的供应短缺。针对工商业用户，居民用户等等不同群体，缺少细致入微的服务方案规划，未能充分探寻用户深层次的用能需求。增值服务范围扩展迟缓，能效守护，需求回应，用能咨询之类的新型服务产品比较少，很难迎合用户渐次丰富化的能源服务需求。在服务进程中，用户缺乏参与感，意见收集及反馈途径不畅，服务优化无法精确符合用户预期。有关分布式电源并网，电动汽车充电桩报装这些新出现的业务，其配套服务方案尚未完善，用户体验还需改善。服务内容更新慢于用户需求的改变情况，这限制了整体服务质量的加强。

四、影响电力营销服务质量的关键因素

（一）技术支撑与信息化建设因素

技术支撑体系是电力营销服务运行的根基，其完善程度会直接左右服务质量。营销业务应用系统的功能是否完备，运行是否稳定，数据是否准确，这些都会影响到业务办理的效率以及用户的体验感。而且，信息孤岛的情况还没有彻底解决，营销，生

Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

产，调度等系统之间存在着数据共享的障碍，这使得业务之间的协作变得困难起来。数据分析的能力还需进一步优化，大量的用户数据无法很好地变成成服务方面的洞察能力，这样就很难做到精准营销并给予个性化的服务。网络安全存在一定的风险，不能漠视，用户的信息保护以及业务的持续性均遭遇着考验。如今，人工智能，区块链等新兴技术在营销领域的应用正处于考察当中，怎样利用技术来优化服务的潜能还得要进一步去探寻。信息化创建的水准直接限制着服务质量得以改善的幅度。

（二）服务人员素质与意识因素

服务人员是电力营销服务的直接给予者，其综合素质和服务意识会给用户感知带来决定性影响。就专业能力而言，有些员工对电力业务知识的把握不够全面，对新型服务模式的认识不深，很难精准回答用户复杂的问题。从服务意识来讲，有个别人仍然持有传统的垄断思维，其自主服务，换位思考的自觉性需进一步优化，而且偶尔会出现工作态度粗暴的情况。员工的表达能力和情绪控制能力存在差别，应对用户投诉和纠纷的时候缺乏技巧，很容易使矛盾加剧。基层营销队伍的设置存在结构性矛盾，复合型人才缺少，既懂电力技术又精于服务的员工比较稀少。员工培训体系和实际需求相脱节，缺乏针对性与实效性，这限制了服务团队整体能力的改进。

五、提升电力营销服务质量的具体策略

（一）优化服务渠道与提升服务便捷性

要想改进服务的便捷性就要从优化渠道开始，创建起全面而立体的服务网络。推动线上线下一体化融合发展，达成实体店营业厅，网上营业厅以及移动 APP之间的数据互通，业务协作，使得用户不论选用哪个渠道，都能够得到相同高效的服务。要合理规划好实体店营业厅的布局，依照区域的人口密度和用户需求来动态调整网点的设置，采用流动服务车这种补充形式去填补空白区域。改进自助服务终端的功能，精简操作界面，并且加大人脸识别等智能技术的应用，从而改善用户的体验感。加强渠道的宣传引导作用，通过社区宣传，短信推送等形式推广新式服务渠道的操作方法，格外重视老年群体等特定人群的需求，缩小数字鸿沟，使便捷服务覆盖到每一位用户。

（二）强化技术应用与提高服务响应效率

利用现代信息技术来助力服务流程，这是加强响应效率的主要途径。深入推动营销业务系统的智能化改造，采用流程自动化技术缩减人工干预环节，从而缩短业务办理时延。形成统一的数据共享平台，破除营销，运维，调度等系统之间的障碍，达成用户需求在各部门之间高速传递并协同处理。利用大数据分析预估服务需求，优化资源安排，在故障频发的时段和区域预先调动抢修队伍。推行移动终端现场办公，促使员工随时录入信息，现场打印工单，以此减少用户的等候时间。创建智能客服系统，利用自然语言处理技术迅速回应常见咨询，把复杂问题精确转交给真人解决，进而塑造起多渠道，全天待命，高效能的服务响应机制。

（三）完善管理机制与打造专业服务团队

加强管理机制并创建人才队伍，给服务质量改善给予持续保障。完备服务质量标准体系，细致化各个岗位，各个环节的服务规范，加强标准的可操作性与可衡量性。优化成果评定方式，增大用户满意度，问题解决质量等过程性指标的权重，引导员工关注服务的实际效果。完善跨部门协作机制，明确业务流转时的职责界限，创建服务事项首问负责和限时办结制度。加强对员工的系统培训，把服务意识，表达技巧与业务知识有机融合起来，塑造复合型营销人才。畅通一线人员的授权通道，提供他们必要的现场处理权限，从而优化服务的灵活性。创建服务质量监督的闭合循环，采用明查暗访，用户回访等方式找出存在的问题，并推动不断加以改善，营造出全员重视服务的良好氛围。

六、结语

电力营销服务质量的改善属于系统工程范畴，需从大量维度协同推进。当下的研究显示，电力营销服务在渠道便捷性，响应效率以及个性化等方面尚存有优化之处，技术支撑，人员素质和管理机制均为影响服务质量的重要因素。未来，电力企业应秉持以用户为中心的理念，不断优化服务渠道，深入应用技术，完善内部管理并创建专业团队，促使营销服务朝着智能化，精准化，人性化的方向发展。凭借优良的服务来满足社会用能需求，在市场竞争当中占得先机，进而为能源的高质量发展添砖加瓦。

参考文献

[1] 成的，张深伟 . 电力总承包企业市场营销能力的信息化提升研究 [J]. 自动化应用，2023,64(S2):239-241.

[2] 王娟 . 基于智能电网背景的电力营销信息化建设研究 [J]. 电工技术，2023,(S1):16-18.

[3] 孟丽娟 . 电力市场改革下的供电企业营销管理措施 [J]. 现代企业文化，2023,(36):13-16.

[4] 吴忠军，田锦华 . 电力营销数据挖掘与利用 [J]. 企业管理，2021,(S1):150-151.

[5] 秦红 . 简析电力营销中优质服务的提升与创新 [J]. 商业文化，2021,(34):39-41.

 Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

电力企业服务乡村振兴的供电保障机制研究

赵晓轲，姜姝彤
烟台市牟平区供电公司，山东 烟台 264100
DOI:10.61369/EPTSM.2026040006

摘　　要： 乡村振兴战略持续推进，对农村能源保障水平提出更高要求。电力作为农村产业发展与民生改善的重要基础条件，供电稳定性与服务质量直接影响乡村经济活力与公共服务能力。在乡村振兴背景下，电力企业逐渐由单一供电主体向综合能源服务主体转变，供电保障机制的重要性日益凸显。围绕农村电网运行特点与乡村发展需求，从供电网络建设、运行管理、服务模式及协同保障等方面探讨电力企业在乡村振兴中的供电保障机制构建路径。通过强化电网基础支撑能力、提升供电服务水平以及完善多方协同机制，推动农村地区形成稳定、安全、持续的电力保障体系，为乡村产业发展与居民生活提供可靠能源支撑。

关 键 词： 乡村振兴；电力企业；供电保障机制；农村电网；能源服务

Research on Power Supply Guarantee Mechanism of Electric Power Enterprises Serving Rural Revitalization

Zhao Xiaoke, Jiang Shutong
Muping District Power Supply Company of Yantai, Yantai, Shandong 264100

Abstract: With the continuous advancement of the rural revitalization strategy, higher requirements have been put forward for the level of rural energy security. As an important foundation for rural industrial development and the improvement of people's livelihood, the stability and service quality of power supply directly affect the vitality of the rural economy and the capacity of public services. Against the background of rural revitalization, electric power enterprises have gradually transformed from a single power supplier to an integrated energy service provider, and the importance of the power supply guarantee mechanism has become increasingly prominent. Focusing on the operation characteristics of the rural power grid and the needs of rural development, this paper discusses the construction path of the power supply guarantee mechanism for electric power enterprises in rural revitalization from the aspects of power supply network construction, operation management, service mode and collaborative guarantee. By strengthening the basic supporting capacity of the power grid, improving the level of power supply services and perfecting the multi-stakeholder coordination mechanism, a stable, safe and sustainable power supply security system will be formed in rural areas, providing reliable energy support for rural industrial development and residents' lives.

Keywords: rural revitalization; electric power enterprises; power supply guarantee mechanism; rural power grid; energy services

引言

乡村振兴战略的实施，使农村地区基础设施建设与公共服务能力成为社会关注的重要议题。稳定可靠的电力供应不仅关系到农业生产效率，也影响乡村产业发展、居民生活质量以及农村现代化进程。随着农村经济结构不断调整，新型农业经营模式、乡村产业融合发展以及数字化应用逐渐增多，对电力供应的稳定性与服务质量提出更高要求。电力企业在保障农村能源供应方面承担着关键职责，供电体系的运行水平与服务能力直接关系到乡村发展环境的优化。如何构建适应乡村发展需求的供电保障机制，逐渐成为推动农村基础设施完善与产业持续发展的重要议题。

作者简介：赵晓轲（1992.08-），女，汉族，山东冠县人，研究生，工程师，研究方向：电力营销管理。

Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

一、乡村振兴背景下供电需求变化

乡村振兴战略的深入推进，使农村经济结构与社会发展形态发生明显变化，电力需求呈现出多层次与多领域并行增长的特征。传统农村用电主要集中在农业生产和居民生活领域，而在乡村产业融合发展的带动下，农村电力负荷结构逐渐向多元化方向延伸。规模化农业生产、农产品加工、冷链仓储、电商物流以及乡村旅游等新型产业不断发展，对供电稳定性、供电容量及电能质量提出更高要求[1]。特别是在设施农业、智能灌溉、农业机械化作业等环节，电力系统已成为支撑农业生产效率提升的重要技术条件。农村地区用电需求的持续增长，使原有供电模式面临新的适应性挑战。

农村产业结构升级进一步推动电力需求的空间扩展与时间变化特征日益明显。农业现代化进程中，大量电气化设备逐渐替代传统动力方式，电动机、自动化控制设备以及农业信息化系统在生产中的应用持续增加，电力负荷由季节性向常态化转变。农村产业链条逐渐延伸至加工、储运和销售环节，农产品深加工企业及农业产业园区对供电可靠性的依赖程度不断增强。生产环节中一旦出现电力中断，将直接影响生产连续性并造成经济损失。部分地区在特色产业发展过程中还出现集中负荷增长现象，对配电网络容量、线路稳定性以及电网运行调度能力提出更为严格的要求。

居民生活方式的变化同样带动农村生活用电水平不断提升。随着农村居民收入水平提高，电气化家用设备逐渐普及，空调、电热设备、厨房电器以及新能源汽车充电设施逐渐进入农村家庭，居民生活用电呈现出明显增长趋势。数字乡村建设不断推进，信息通信设备、网络基础设施以及智慧公共服务平台的运行均依赖稳定电力供应。乡村公共设施建设也在持续增加，农村学校、卫生服务机构、文化活动中心等公共空间对电力系统稳定运行具有较高依赖程度。电力需求从单一生活保障逐渐向生产、生活与公共服务多领域协同扩展，使农村地区对供电能力、供电可靠性以及电网智能化水平提出更加系统化的要求。

二、农村供电保障存在的主要问题

农村电力系统在长期发展过程中形成的配电网络结构，与当前乡村振兴背景下不断增长的用电需求之间逐渐出现不匹配现象。部分农村地区电网建设起步较早，配电线路及变电设备存在运行年限较长、技术标准相对滞后的情况，导致供电能力与负荷增长之间存在差距。配电变压器容量配置不均衡、低压线路供电半径过长以及线路末端电压偏低等问题，在部分区域仍然较为突出[2]。当农业生产、乡村产业项目以及居民生活负荷集中增加时，局部电网容易出现过载运行、电压波动等情况，对电能质量和供电稳定性产生一定影响。这种基础设施承载能力不足的问题，使农村电网在面对持续增长的电力需求时承受较大运行压力。

电网运行管理层面也存在一定薄弱环节，对供电保障能力形成制约。农村地区电网分布范围广、线路结构复杂，部分地区地形条件较为特殊，线路巡检、设备维护及故障处理难度相对较高。由于运维资源配置有限，部分供电线路与配电设备缺乏高频次的状态监测与精细化管理，设备老化隐患难以及时发现。极端天气、雷电活动以及外部施工等因素均可能对线路安全运行造成影响，一旦出现故障，抢修时间相对延长，对农业生产与农村生活用电产生干扰。部分农村电网自动化水平仍有提升空间，配电自动化装置覆盖率不足，故障定位与隔离能力相对有限，使电网运行效率与应急处置能力受到一定影响。

供电服务体系与乡村发展需求之间也存在适应性不足的问题。随着农村产业结构不断调整，新型农业经营主体、电商物流平台以及农产品加工企业逐渐增加，对供电服务响应速度与服务质量提出更高要求。部分农村供电服务模式仍以传统用电保障为主，在综合能源服务、用电负荷管理以及电力信息化服务方面尚未形成完善体系。产业项目在建设与扩展过程中，对配电容量申请、用电接入以及电力技术支持的需求持续增加，如果供电服务协同机制不够完善，容易影响项目建设进度与运营效率。农村地区新能源接入比例逐渐提高，分布式光伏等新型能源形式的并网管理与电网协调运行也对供电系统提出新的技术挑战。

三、电力企业供电保障机制构建

电力企业在乡村振兴进程中承担着保障农村能源稳定供给的重要职责，供电保障机制的构建需要以农村电网基础能力提升为核心，通过优化配电网络结构增强电网承载能力。针对农村地区负荷增长与产业发展需求，电力企业应持续推进配电网改造升级，对老旧线路、配电变压器及开关设备进行技术改造与容量优化，缩短低压供电半径并提高线路输电效率。结合区域用电特征，科学配置变电站布点与配电设备容量，提升电网供电可靠率与电压合格率[3]。通过加强电网规划与乡村产业发展规划之间的衔接，使电网建设与农业产业园区、农产品加工基地及农村公共设施建设形成协同发展格局，从源头上提升农村供电系统的稳定性与适应性。

在运行管理层面，供电保障机制的形成需要依托精细化运维管理体系。电力企业通过建立设备状态监测与运维管理平台，对配电线路及关键设备运行状态进行实时监控，提高电网运行透明度。结合数字化技术手段，引入配电自动化系统与智能终端设备，实现故障快速定位、隔离与恢复供电，缩短停电处理时间。针对农村地区线路分布范围广、运行环境复杂的特点，加强线路巡检制度与隐患排查机制，通过周期性检测与在线监测相结合的方式提升设备健康管理水平。同时完善应急抢修体系，合理配置抢修力量与物资储备，提升突发故障情况下的电网恢复能力，从而增强农村供电系统的运行安全性。

供电保障机制还需要依托服务体系的完善，以满足农村产业发展与居民用电需求的持续增长。电力企业在传统供电服务基础上不断拓展综合能源服务功能，通过优化用电报装流程与电力接入服务，提高农村产业项目用电接入效率。依托信息化平台建立

 Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

用电数据分析机制，对农村区域负荷变化进行动态监测，为电网调度与容量配置提供数据支撑。随着分布式能源在农村地区逐渐增加，电力企业还需要加强分布式电源并网管理，通过完善并网技术标准与调度管理机制，实现新能源发电与配电网络之间的协调运行。

四、供电保障机制运行成效分析

供电保障机制在农村电网运行中的逐步落实，使电力系统整体稳定性得到明显提升。通过配电网结构优化与设备技术改造，农村地区电网承载能力不断增强，线路负荷分配更加合理，电压稳定水平也随之提高。配电自动化技术与智能监测设备的应用，使电网运行状态能够实现实时监控与动态管理，运行调度更加精准[4]。设备健康状态管理体系的完善，使潜在故障隐患能够在运行过程中被及时识别并处理，从而降低电网运行风险。电网运行指标中供电可靠率与电压合格率逐渐提升，电网系统对负荷波动与外部环境变化的适应能力得到增强，农村电力供应稳定性得到有效保障。

供电保障机制的持续运行，对农村产业发展环境产生积极影响。农业生产过程中对电力连续性的依赖程度不断提高，稳定的供电条件为农业机械化、智能化生产方式提供了重要基础[5]。农产品加工、仓储物流以及农业产业园区在稳定电力支撑下能够保持连续生产运行，生产效率与产业附加值逐渐提升。随着电网运行能力增强，部分农村地区产业用电负荷能够得到及时满足，产业项目建设与运行过程中因供电问题产生的不确定性明显减少[6]。电力系统稳定运行不仅为农业生产提供动力支持，也为农村产业结构优化创造了良好的能源条件[7]。

居民生活用电环境也在供电保障机制运行过程中得到明显改善。随着电网供电质量不断提升，农村家庭电气化设备运行更加稳定，生活用电体验明显改善。公共服务设施在稳定电力条件下能够保持正常运转，教育、医疗以及文化服务等公共空间的运行效率得到提升[8]。数字化设备与信息通信设施对电力稳定性的依赖程度较高，供电系统稳定运行使农村信息化应用环境更加可靠。电力服务体系逐渐向精细化与信息化方向发展，用电服务响应效率不断提高，居民在日常用电过程中获得更加稳定与便捷的电力保障环境[9][10]。

五、结语

乡村振兴进程中，稳定可靠的电力供应成为支撑农村产业发展与居民生活提升的重要基础条件。围绕农村电网运行特点与用电需求变化，供电保障机制的不断完善，使电网基础设施建设、运行管理以及服务体系逐步形成协同发展格局。配电网络结构优化与数字化运维手段的应用，使农村电力系统运行更加稳定高效，同时也为农业生产、电商物流与乡村公共服务提供持续能源支撑。供电保障能力的提升，为农村经济活力增强与乡村发展环境优化奠定了坚实的能源基础。

参考文献

[1]陈锦逸 . 基于战略管理的电力企业业绩考核体系设计 [J]. 四川劳动保障 ,2025,(24):83-84.

[2]王健 , 丁扬 , 张绪霞 , 等 . 电力企业精益化信息运维体系构建与应用 [J]. 山东电力高等专科学校学报 ,2025,28(06):21-26.

[3]程浩 , 曹成玉 . 大数据时代电力企业财务管理信息化建设路径 [J]. 财富时代 ,2025,(12):50-51.

[4]赵越 . 乡村振兴战略下电网企业服务提升路径探析 [J]. 电工技术 ,2023,(S1):227-228+231.

[5]胡陈兴 , 范耘耘 , 黄伟达 , 等 . 电网企业综合服务中心数智化服务评价体系建设与应用 [J]. 现代企业文化 ,2025,(31):40-42.

[6]修莉 , 姜越达 . 智能电网为电力企业提高营销服务水平带来契机 [J]. 中国商界 ,2025,(05):208-209.

[7]郭宇剑 . 乡村振兴战略下对农村电网发展影响的研究 [J]. 内蒙古科技与经济 ,2025,(15):36-38+42.

[8]王保民 . 乡村振兴战略下能源电力面临的机遇与挑战 [J]. 中国科技信息 ,2022,(07):124-125.

[9]王凯 . 提升农村电气化水平助推乡村振兴的对策研究 [D]. 广西大学 ,2022.DOI:10.27034/d.cnki.ggxiu.2022.000461.

[10]本刊编辑部 . 乡村振兴电力先行 [J]. 农电管理 ,2024,(03):3.

Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

基于物联网技术的变电站智能巡检系统

刘学富[1]，王红[2]
1.国网山东省电力公司超高压公司，山东 济南 250000
2.国网山东省电力公司临邑县供电公司，山东 德州 251500
DOI:10.61369/EPTSM.2026040008

摘　　要： 基于物联网技术的变电站智能巡检系统把感知终端、通信网络和智能分析技术融合起来，创建起“全域感知、数据传输、智能决策”的一体化运维体系，可以对变电站设备运行状况实施全方位实时监测并作出精准判断。本文从系统核心概念、应用价值出发，根据变电站运维实际需要论述物联网技术在巡检场景中的适配性选择逻辑，分析系统层级结构和功能实现方式，探究多技术融合下巡检模式创新和实践拓展，给变电站运维智能化转型提供坚实的理论支持和技术参考。
关 键 词： 物联网；变电站；智能巡检

Intelligent Substation Inspection System Based on Internet of Things Technology

Liu Xuefu[1], Wang Hong[2]
1. UHV Company, State Grid Shandong Electric Power Company, Jinan, Shandong 250000
2. Linyi County Power Supply Company, State Grid Shandong Electric Power Company, Dezhou, Shandong 251500

Abstract: The intelligent substation inspection system based on Internet of Things (IoT) technology integrates sensing terminals, communication networks, and intelligent analysis technologies to establish an integrated operation and maintenance system featuring "omnipresent sensing, data transmission, and intelligent decision-making." This system enables comprehensive real-time monitoring and precise assessment of the operational status of substation equipment. Starting from the core concepts and application value of the system, this paper discusses the adaptive selection logic of IoT technology in inspection scenarios based on the actual operational needs of substations. It analyzes the hierarchical structure and functional implementation of the system, explores the innovation and practical expansion of inspection modes under the integration of multiple technologies, and provides solid theoretical support and technical references for the intelligent transformation of substation operation and maintenance.
Keywords: Internet of Things; substation; intelligent inspection

引言

伴随着电力系统向着智能化、数字化的转变，变电站作为电网的枢纽，运维可靠性及效率的好坏直接关系到电力供应是否稳定。传统的巡检方式已经不能满足现代变电站高密度设备、复杂运行环境下的运维需要，物联网技术的成熟给巡检模式的革新提供关键的支持。基于物联网技术的变电站智能巡检系统冲破了传统巡检的时空束缚，依靠各种智能感知设备的分布式布置并行运作，把设备的状态数据，环境参数这些信息实施实时搜集并加以智能剖析，促使巡检工作由“依靠经验”转向“依靠数据”，朝着智能化的方向迈进。本文就该系统的主要理论、架构设计和实践应用进行详细的论述，目的在于对物联网技术和变电站巡检场景深度融合的路径有全面的认识，并给相关的研发和工程应用提供一定的参考。

一、物联网赋能变电站巡检的核心内涵与价值导向

（一）系统核心概念界定

基于物联网技术的变电站智能巡检系统是以物联网的感知、传输、应用三层架构为基础，将各种类型的传感器、智能巡检终端、通信网络以及数据处理平台相结合，对变电站内的电气设备、运行环境和人员作业状态进行全方位、自动化、智能化的监测和管理的综合解决方案[1]。其主要特点就是感知的全域化、传输的实时化、分析的智能化、决策的精准化，创建起“数据采集－传输－分析－决策－执行－反馈”的闭环管理体系，从而达到巡检工作提质增效和安全升级的目的。该系统并不是简单的技术叠加，而是各个环节之间深入的协同，把分散的设备数据变成有指导意义的运维决策依据，从而实现对变电站运维全流程的智能化重塑，使巡检工作从原来的被动式、局限性的工作中解放出

 Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

来，满足现代变电站规模化、复杂化运维管理的要求。系统对变压器、断路器、隔离开关等主要设备进行状态监测，也包括了站内消防设施、安防系统的联动控制，形成了以设备为中心、环境为依托、人员为纽带的全方位巡检模式。

（二）技术应用核心意义

物联网技术在变电站巡检中深度应用之后，就重新塑造了巡检工作执行的逻辑，而且从根本上提高了变电站运维的安全保障水平和管理精细化程度。利用“机器代人”模式减少人员进入高压、强电磁、高空等高危环境的次数，从源头上降低人身安全风险，依靠智能设备的24小时连续工作能力，实现巡检范围全覆盖和巡检周期灵活调整，避免传统人工巡检由于疲劳、经验不同造成的漏检、误检问题。设备的潜在隐患在萌芽阶段就被及时发现并处理，防止其进一步扩大影响，为变电站安全稳定的运行奠定了技术基础，使电力运维从“被动抢修”转变为“主动预防”，为电网高质量发展打下了基础，推动了能源行业的绿色低碳转型。系统生成的标准化巡检数据可以形成设备全生命周期健康档案，给设备更新改造、运维策略优化提供数据支持，提高变电站运维的科学性、前瞻性。

（三）技术选型适配逻辑

变电站智能巡检系统物联网技术选择要契合变电站运行特点和巡检要求，兼顾技术先进性和场景适配性[2]。在感知层上优先选择适合高压、强电磁、高湿度等恶劣环境的高精度传感器和智能终端，例如抗干扰型温度传感器、防爆型气体探测器、高清红外热成像仪等，并且支持传感器即插即用以及模块化扩展，便于后期系统的更新换代；传输层考虑到站内设备分布分散，部分区域信号被屏蔽的情况，采用5G、工业以太网、LoRa、ZigBee等不同的通信方式建立“骨干网+接入网”的双层传输体系，保证数据传输的低延时、高可靠，5G可以满足高清视频、实时控制等高速度的要求，LoRa可以满足低功耗、远距离传感器的数据传输；应用层利用边缘计算和云计算相结合的优势，在设备端做实时的数据预处理，在云端做深度的分析和模型的训练，既满足了实时分析的需求，也兼顾了长期的优化，形成了一个与变电站运维场景相匹配、具有很强适应性的技术组合方案。

二、变电站智能巡检系统的物联网架构设计与功能实现

（一）多层级物联网架构构建

基于物联网技术的变电站智能巡检系统采用分层架构设计，各个层次之间既相互独立又互相配合，保证系统稳定可靠以及可扩展性[3]。感知层利用固定式传感器、移动巡检机器人、无人机、高清摄像设备等终端来建立“固定+移动”、“空中+地面”的立体化感知网络，对设备的温度、振动、局部放电、绝缘状况、环境温湿度、气体浓度、光照强度等各个方面进行全方位的采集，并且可以对人员的作业轨迹、安全防护装备的佩戴情况进行实时监测，移动巡检机器人具有自主导航、自动充电的功能，可以按照预定的路线进行常态化巡检，无人机对高空设备、大范围区域进行快速侦察，网络传输层是数据交互的关键纽带，采用工业交换机、无线网关等设备，结合多种通信技术搭建起覆盖全站的高速传输通道，具有数据加密、断点续传、负载均衡等功能，保证采集到的数据能够及时返回到控制中心，控制中心再将指令准确下发到各个设备上，网络传输层还与变电站现有的SCADA系统、EMS系统等数据互通。

（二）核心功能模块协同运作

系统主要的功能模块根据巡检业务的全流程来运行，形成闭环的管理体系，保证巡检高效有序地进行[4]。数据采集模块采用多终端协同的方式，根据设备种类和巡检需求制定不同的采集方案，主要对变压器油温、油位、局部放电信号、断路器分合闸情况、机械特性进行监测，实现对关键设备以及区域的全方位监测，采集图像、音频等多种类型的数据，并且对这些数据进行标准化处理，保证各个终端之间可以互相通信、互相兼容。智能分析模块装有AI算法引擎，结合多种专项算法，可以自动识别设备各种异常并同标准库进行对比，得出缺陷等级和处理意见，算法不断更新以提高精度。任务调度模块按照设备的运行状况，以往来的缺陷数据以及巡检计划自动生成并分配给任务，支持路径智能规划和自动调整，能够对突发状况执行优先级改变（设备报警时调用机器人做复核）。预警反馈模块把分析结果变成分级预警信息，经由多种途径推送给责任人，留下处置过程和成果的记载，塑造起“发现－剖析－预警－处理－复查”的闭环体系，保证问题彻底消除。

（三）关键技术融合应用

物联网技术同人工智能、数字孪生、边缘计算等技术深度整合，是系统功能达成的主要依靠，给系统智能化水平的改善赋予关键驱动力。AI算法的嵌入使系统具有自主的缺陷识别和智能诊断能力，经过大量的运维数据训练来提高算法的精度，可以从大量的数据中准确地提取出异常信息，还可以预测出设备的故障发展趋势，比如通过对设备振动数据进行分析来预测机械部件的磨损等，数字孪生技术的应用就是将变电站物理场景进行了1:1的虚拟映射，把实时巡检的数据和孪生模型动态关联起来，可以实现设备状态的可视化监测、故障模拟分析以及运维方案预演等功能，给复杂的故障处置提供直观的参考，运维人员可以通过虚拟场景对设备内部结构及运行状况进行远程观察，边缘计算技术的应用也解决了站内海量数据的实时处理问题，在巡检机器人、边缘网关等设备端部署轻量化的算法，对数据进行预处理和快速分析，大大提高了系统的响应速度，及时处理异常情况，减少云端数据传输的压力，降低网络带宽的消耗，形成“就近处理、快速响应、云端优化”的协同模式，边缘节点在网络中断的时候也能自行完成基本的巡检工作，保证系统的连续性。

三、物联网巡检系统的技术拓展与实践应用延伸

（一）多技术融合创新路径

以物联网为依托的变电站智能巡检系统向着多技术深度融合方向发展，不断扩大应用范围，提高智能化程度，使运维模式不

Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

断更新[5]。通过AR增强现实技术把设备参数、巡检指引、缺陷位置等信息叠加到真实的场景中，给运维人员提供实时的指导和远程的协同支持，在复杂的设备检修、新员工培训等场景中起到重要的作用，维修人员可以通过AR眼镜查看设备内部线路和操作步骤；采用知识图谱技术构建建设备运维知识库，将巡检数据同历史维护记录、设备台账、行业标准规范联系起来，塑造起结构化的知识体系，改进故障诊断的精确度并加强决策的科学性，可以自动匹配类似故障案例及处理办法，依靠区块链技术创建可信数据存证平台，保证巡检数据从产生、传送、保存的全部过程都能被追踪并且不能被随意改动，从而给设备整个生命周期的管理以及责任判定赋予可信的数据支撑，探寻同电力行业其它系统之间的数据互通共享，促使形成跨场景的智能化运维生态，达成变电站和调度中心、运维班组之间的协同联动。

（二）全场景巡检应用适配

系统根据不同的巡检场景灵活地布置感知终端、功能配置，达到全方位、全覆盖的目的，满足各种运维的需求。根据室内高压设备区空间狭小、设备密集的特点，采用轨道式巡检机器人加高清云台摄像头和局部放电传感器的方式做精细化检测，机器人可以灵活穿梭在设备间隙里，完成近距离观测，室外开阔区域使用无人机搭载红外热成像仪、高清相机做大范围快速巡检，在短时间内可以完成设备外观、线路连接等情况的排查，适合于输电线路、避雷器等高空设备的巡检，对于电缆沟、地下室等狭小空间和高危区域，使用小型履带式机器人代替人工完成作业，具有自主避障、爬坡越障的能力，可以适应复杂的地形环境，同时配备环境感知设备，实时监测暴雨、暴雪、高温、雷电等极端天气对设备运行的影响，自动调整巡检策略和频次，高温天气增加变压器测温频次，暴雨天气加强户外设备绝缘监测，保证巡检工作的全天候、全场景覆盖，满足不同规模、不同类型的变电站运维需求。

（三）运维管理模式优化升级

物联网巡检系统应用促使变电站运维管理方式发生根本性改变，形成起了现代化、高效化的运维管理体系。从巡检周期来说，彻底摆脱传统“定期巡检”的固定模式，转而采用以设备状态为基础的状态检修方式，依靠实时监测数据和智能分析结果，准确判断设备健康状况，合理安排维护时间及资源，避免过度检修或者检修不足，降低运维成本；从作业模式来说，由原来的“人工为主”转变为“智能为主”，智能设备承担了大部分的重复性、高强度巡检任务，大大减少了人工干预，提高了巡检效率和准确性，使运维人员把精力放在了故障处理、设备保养这些关键工作上，从而激发人力资源的价值；同时创建起全域可视化的运维管理平台，借助GIS地图、数据看板等方式，使管理人员随时掌握全站巡检进展、设备运行状况以及缺陷处置情况，能够开展多维度的数据统计和趋势分析，例如按照设备种类统计缺陷分布、按时间序列剖析故障演变规律等等，促使运维决策趋向科学化、精细化并做到透明化，助力变电站管理水准迈入新高度，给打造无人值守、少人值守变电站赋予技术支撑。

四、结束语

以物联网技术为基础的变电站智能巡检系统依靠架构改良、技术融合以及功能革新，创建起一套符合变电站运维需求的智能化巡检解决办法，较好地改善了巡检工作效能，精确度和安全性。该系统把物联网技术和电力运维场景融合起来，促使变电站运维模式朝着数字化方向转变，给电网安全稳定运行赋予了强有力的支撑。未来随着物联网技术不断更新，多技术融合不断加深，系统在自主决策能力、多场景适配性等各方面会得到进一步提高，给新型电力系统建设、电力行业高质量发展提供更强动力。

参考文献

[1]柏小乐，刘为国.一种基于物联网技术的智能变电站监控系统[J].物联网技术，2025,15(01):36-39.

[2]杨继超，张慧.物联网技术在变电站智能监控系统中的应用[J].光源与照明，2024,(12):195-197.

[3]吕松祥，陈晨.基于物联网技术的变电站智能监测系统构建[J].信息记录材料，2024,25(10):94-96.

[4]杨官霞，陈杰.基于物联网技术的变电站智能监控系统设计[J].自动化技术与应用，2024,43(05):93-97.

[5]董玉印，李凤海，高宇航，刘婷.基于物联网技术的变电站智能钥匙管理系统应用研究[J].机械与电子，2023,41(06):55-59.

 Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

高比例新能源并网对电力系统稳定性的影响及调控策略

李朴哲，胡金芳
国网雄安新区供电公司，河北 雄安 071600
DOI:10.61369/EPTSM.2026040020

摘　　要： 在“双碳”目标推动下，风电、光伏大规模并网成为新型电力系统重要特征。新能源发电具有间歇性、波动性，加之电力电子设备低惯量、弱阻尼特性，从功角、电压、频率三方面改变系统稳定机理，引发低惯量、低短路比、次同步振荡等问题。本文系统分析其对电力系统稳定性的影响机理，梳理调控技术路线，构建源网荷储协同、设备控制优化与机制创新的调控体系，为高比例新能源电力系统安全稳定运行提供支撑。

关 键 词： 高比例新能源；电力系统；稳定性；低惯量；源网荷储协同；调控策略

Impact of High-Proportion New Energy Grid Connection on Power System Stability and Control Strategies

Li Puzhe, Hu Jinfang
State Grid Xiong'an New Area Power Supply Company, Xiong'an, Hebei 071600

Abstract: Driven by the "dual carbon" goals, large-scale grid integration of wind and solar power has become a defining feature of modern power systems. New energy generation exhibits intermittent and fluctuating characteristics, compounded by the low inertia and weak damping properties of power electronic devices. These factors disrupt system stability mechanisms through power angle, voltage, and frequency variations, leading to challenges such as low inertia, low short-circuit ratios, and sub-synchronous oscillations. This study systematically analyzes the impact mechanisms on power system stability, outlines regulatory technical approaches, and establishes a coordinated control framework integrating source-grid-load-storage synergy, optimized equipment control, and innovative mechanisms. The research provides essential support for ensuring safe and stable operation of high-proportion renewable energy power systems.

Keywords: high proportion of renewable energy; power system; stability; low inertia; source-grid-load-storage coordination; regulation strategy

引言

全球能源转型持续深化，我国新能源发电已进入规模化快速发展阶段。截至2025年底，风电、光伏总装机突破12亿千瓦，发电量占比超30%，部分省级电网新能源渗透率超过50%[1]。高比例新能源并网在加速能源结构低碳转型的同时，显著改变了传统同步机组主导的电力系统动态特性。新能源经电力电子变流器并网，缺少同步发电机固有的旋转惯量与阻尼能力，造成系统等效惯量下降、调频调压能力减弱、稳定裕度降低。传统稳定控制理论与技术难以适应新系统特征，频率、电压及次同步振荡等风险日益突出，制约新能源消纳与电网安全。因此，系统分析其对稳定性的影响机理，研究针对性调控策略，对保障新型电力系统可靠运行、支撑能源转型与“双碳”目标实现具有重要现实意义。

一、高比例新能源并网的电力系统特性转变

（一）电源结构与动态特性根本性变革

传统电力系统以火电、水电同步发电机为主体，其旋转惯量、阻尼转矩与励磁系统是系统稳定运行的关键。高比例新能源并网后，电源结构呈现“双高”特点：新能源装机占比持续提升，同步机组占比下降；电力电子变流器广泛应用，系统由同步机主导转为电力电子主导。逆变型电源与同步机动态特性差异明显：一是无自然旋转惯量，系统等效惯量随新能源渗透率升高显著降低，频率波动加剧；二是多采用 MPPT 控制，与系统频率、电压解耦，基本不参与调频调压；三是阻尼能力薄弱，仅依靠控制算法提供虚拟阻尼，对系统振荡的抑制能力明显下降。

作者简介：李朴哲（1989.05-），男，汉族，河北省邯郸市人，硕士研究生，中级工程师，研究方向：电力工业工程。

Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

（二）电网运行环境与稳定边界显著恶化

我国风电、光伏等新能源多集中在三北及西南地区，需经长距离、大容量线路外送，使得整体电网运行条件明显变差。新能源场站接入的交流电网普遍较弱，线路阻抗偏大、短路容量偏低，变流器与电网之间易发生动态交互振荡，直接抬升系统稳定控制难度。受限于变流器容量，新能源场站无功调节能力有限，加之偏远地区电网无功储备不足，在出力波动与故障扰动下，电压易大幅偏离额定值且恢复缓慢。同时，新能源出力具有明显的间歇性与随机性，造成系统潮流频繁剧烈波动，输电断面运行工况多变，进一步压缩功角与电压稳定边界。分布式新能源大量接入配电网后，潮流由单向变为双向流动，配电网在电压控制、继电保护配合及孤岛防范等方面均面临新的难题，高渗透率场景下极易出现电压越限、保护误动等运行风险[2]。

二、高比例新能源并网对电力系统稳定性的多维影响

（一）对功角稳定性的影响

功角稳定性决定同步机组能否保持同步运行，其核心支撑来自系统转动惯量与阻尼转矩。在高比例新能源并网条件下，系统整体功角稳定特性明显劣化。随着同步机组占比持续降低，系统等效惯量显著下降，故障后不再有充足的转子动能缓冲，暂态稳定裕度大幅降低。以往系统故障后可提供1—2秒的调节窗口期，而在新能源高占比系统中，惯量水平往往不足传统系统的三分之一，故障后功角摆动幅度急剧增大，稳定极限明显降低。甘肃酒泉风电基地曾在阵风影响下出现出力快速波动，造成系统惯量短时大幅下降，部分火电机组功角摆幅超限，最终触发切机并引发局部停电事件。新能源出力的随机波动还会造成电网潮流频繁大幅变动，输电断面输送极限持续变化，进一步扩大功角失稳的影响范围。当新能源渗透率超过30%，系统功角稳定边界将明显收缩，小扰动也容易激发出持续的功率振荡现象[3]。与此同时，大量电力电子变流器的控制环节与弱交流电网相互作用，容易诱发次同步与超同步振荡。张家口沽源风电基地就曾因风机变流器与电网阻抗耦合产生次同步谐振，造成风机集中脱网和线路保护误动。这类振荡会在电网中快速传播，严重时可直接引发系统功角失稳乃至大面积崩溃。

（二）对电压稳定性的影响

电压稳定性主要依赖系统无功功率平衡与充足的电压支撑，高比例新能源并网会明显削弱系统电压稳定水平。新能源变流器的无功调节区间有限，且运行中多优先保证有功出力，整体无功支撑能力偏弱。在新能源集中接入区域，其出力的随机波动极易造成并网点电压大幅波动，青海某光伏基地曾因出力骤降一半导致电压严重越限；分布式光伏接入配电网后，也常出现午间高峰电压偏高、夜间低谷电压偏低的问题，影响配电网安全运行。多数新能源场站接入短路比较低的弱交流电网，电压对无功变化十分敏感，微小的无功波动就可能危及电压稳定。故障情况下，新能源变流器在低电压穿越过程中会消耗大量无功，进一步扩大系统无功缺口，造成电压深度跌落且难以快速恢复。此外，大量逆变器并联运行还会带来谐波与振荡问题。多台变流器产生的谐波电流相互叠加，会造成电网电压畸变率超标；不同设备控制参数差异带来的动态交互作用，在弱电网条件下易诱发电压振荡，既威胁电力设备安全，也降低了系统整体电能质量。

（三）对频率稳定性的影响

电力系统频率稳定的核心在于有功功率的实时平衡，以及一次调频、二次调频的快速响应能力，高比例新能源并网会从多方面显著削弱系统的频率稳定水平。传统同步发电机组依靠调速器可在200ms内快速响应频率波动，而新能源机组多采用最大功率点跟踪控制，正常运行时基本不参与系统一次调频，随着同步机占比持续降低，系统整体调频容量不断缩减[4]。当新能源渗透率超过35%，系统一次调频能力不足传统系统的四成，负荷突增或机组跳闸等扰动下，频率极易突破 ±0.2Hz 的安全范围，2023 年江苏某新能源渗透率 32% 的区域电网就因负荷短时大幅增长引发频率严重偏差，最终触发低频减载造成工业用户停电[5]。同时，系统低惯量特征使得频率变化率大幅升高，由传统系统的 0.5Hz/s 以下升至 2Hz/s 以上，频率快速波动大幅压缩控制措施的响应窗口，某省级电网在新能源占比 40% 时，单台 600MW 火电机组跳闸便在 1.5 秒内将频率拉至 49.0Hz，触及低频减载阈值[6]。此外，新能源、储能与常规机组在调频响应速度、调节范围及持续时长上差异明显，现有调度模式难以实现多类型资源协同调频，不仅会加大频率波动幅度，还会延长频率恢复时间，进一步威胁系统安全稳定运行并影响设备使用寿命。

三、高比例新能源电力系统稳定性调控技术体系

（一）新能源机组主动支撑技术

虚拟同步机（VSM）控制通过优化变流器控制逻辑，模拟同步发电机的惯量、阻尼与调压特性，可从虚拟惯量、虚拟阻尼及虚拟励磁三个维度为系统提供主动支撑，有效提升系统等效惯量并抑制频率与功率振荡。构网型控制摒弃传统跟网运行模式，采用电压 – 频率（V–f）控制方式，使新能源机组可不依赖电网同步信号自主构建电压与频率，大幅增强低惯量、弱电网环境下的系统暂态同步稳定性，同时提升故障期间的电压支撑能力。在此基础上进一步优化变流器控制策略，可使新能源具备主动参与系统调频调压的能力，通过下垂控制与虚拟惯量相结合实现快速一次调频，利用电压闭环无功调节实现就地电压支撑，缩短响应时延并提高调节精度。多项控制技术协同应用，能够有效弥补新能源并网带来的惯量不足、阻尼薄弱、调压能力有限等问题，改善系统动态响应特性，增强功角、电压与频率稳定水平，为高比例新能源电力系统安全稳定运行提供设备侧核心支撑。

（二）源网荷储协同调控技术

源网荷储协同调控技术通过多维度协同机制，整合各类调节资源以平抑新能源波动、保障系统功率平衡与稳定运行，核心涵盖多时间尺度协同调度、多资源协同调频调压及虚拟电厂聚合调控三大方向。其中，多时间尺度协同调度构建 “日前 – 日内 – 实时”分层调度体系，依托新能源预测与广域测量系统，实现不

 Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

同时间维度下传统机组、储能、可中断负荷的精准协调与功率调节；多资源协同调频调压则整合新能源、传统机组、储能及各类无功补偿设备，形成“快－慢”结合的调频体系与分层分区的调压机制，提升系统调频调压的响应速度与精度；虚拟电厂聚合调控通过分布式协同算法，将分散的分布式新能源、储能、可控负荷等资源进行聚合，转化为可统一调度、精准控制的规模化调节资源，充分挖掘分散资源的调节潜力，为高比例新能源电力系统提供全方位、多维度的协同支撑[7]。

（三）电网稳定增强与保护优化技术

电网稳定增强与保护优化技术通过设备配置升级与保护逻辑优化，强化高比例新能源系统的稳定支撑能力，主要包括动态无功支撑、新型储能协同稳定控制及适配性保护控制三个方面。动态无功支撑技术通过在新能源集中并网区域部署 STATCOM、SVG、SVC 等动态无功补偿装置，可快速提供无功支撑，有效提升系统电压稳定裕度，抑制电压波动与崩溃风险；新型储能协同稳定控制采用锂电池、超级电容与飞轮结合的混合储能架构，依据不同储能设备的响应特性，分尺度实现新能源出力波动平抑与系统快速调频，保障系统功率平衡；适配新型系统的保护控制则通过优化继电保护原理与配置，采用广域信息纵联保护、自适应距离保护等方式，解决新能源故障电流特性差异带来的保护误动、拒动问题，同时加装次同步振荡监测与抑制装置，抑制振荡传播，确保系统稳定运行[8]。

（四）政策机制与市场保障体系

政策机制与市场保障体系是高比例新能源电力系统稳定运行的重要支撑，核心通过强化涉网标准与完善辅助服务市场，规范新能源并网行为、激发各类调节资源活力。一方面，严格落实 GB/T 19963-2020、GB/T 19964-2020 等相关标准，强制要求新能源机组具备惯量支撑、一次调频、无功调压及故障穿越等主动支撑能力，同时建立健全新能源并网检测与认证体系，对不达标机组实行并网禁令，从源头保障新能源涉网性能[9]。另一方面，不断完善辅助服务市场，构建涵盖调频、调压、备用、爬坡等多品类的市场体系，通过价格信号引导新能源、储能等主体主动参与系统稳定支撑服务；明确新能源辅助服务的责任与考核规则，将主动支撑能力与并网优先级、补贴政策直接挂钩，同时健全容量电价机制，支持储能、虚拟电厂等新型调节资源参与市场，充分调动各类主体的参与积极性，为系统稳定调控提供坚实的政策与市场保障[10]。

四、结语

高比例新能源并网是新型电力系统的核心特征，其低惯量、弱阻尼、强波动特性，从功角、电压、频率三大维度深刻改变电力系统稳定机理，使传统稳定控制体系面临严峻挑战。构建适配性调控策略体系，需遵循 “设备主动支撑、源网荷储协同、电网强化升级、机制市场保障” 路径，通过虚拟同步机、构网型控制赋予新能源主动支撑能力，依托多时间尺度调度、混合储能等实现全资源协同，借助动态无功补偿等强化电网基础，以完善标准与市场机制激发调节活力。未来，需突破稳定基础理论，研发构网型控制、人工智能协同调控等关键技术，构建自适应、自趋稳的新一代稳定控制系统，为高比例新能源电力系统安全高效运行提供保障，助力“双碳”目标实现。

参考文献

[1] 国家发展改革委，国家能源局。关于促进新能源消纳和调控的指导意见 [Z].2025-10-29.

[2] 邱忠涛，格根敖其，贾跃龙，等。新型电力系统供需协同全要素理论框架 [J]. 中国电力，2025,58 (10):147-162.

[3] 王帅，刘剑。基于虚拟同步发电机的新能源并网控制策略研究 [J]. 电力系统自动化，2022,46 (8):123-130.

[4] 陈燕东，赵栋利。下垂控制与模型预测控制结合的光伏并网功率平滑策略 [J]. 电工技术学报，2021,36 (S2):567-575.

[5] 李兴源，王曦，黄媛。高比例新能源电力系统稳定控制技术综述 [J]. 电网技术，2024,48 (1):1-16.

[6] 刘纯，黄越辉，李楠。高比例新能源并网系统稳定性分析与控制 [M]. 北京：中国电力出版社，2023.

[7] 宋美琪，李洪全，肖赫，等。面向高比例新能源接入主动配电网的多层模型预测电压控制 [J]. 分布式能源，2025,10 (2):34-41.

[8] 张兴，曹仁贤。光伏并网逆变器控制技术 (第 3 版)[M]. 北京：机械工业出版社，2021.

[9] 谢小荣，贺静波，毛航银，等 . "双高 " 电力系统稳定性的新问题及分类探讨 [J]. 中国电机工程学报 , 2021, 41 (2): 461-475.

[10] 王冠淇，裴玮，熊佳旺，等。新能源场站跟网 / 构网变流器协同控制策略综述 [J]. 高电压技术 , 2025, 51 (2): 793-805.

Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

柴油发电机组电气故障辅助诊断系统设计

王德朋
中国山东省青州市范公亭南街12号高新技术研究所，山东 青州 262500
DOI:10.61369/EPTSM.2026040022

摘　　要： 针对柴油发电机组电气故障诊断效率低、主观性强、故障定位不准等问题，结合发电机组电气故障特点与工程实际需求，设计一套柴油发电机组电气故障辅助诊断系统。本文明确系统设计目标与核心需求，完成硬件选型布局、软件模块开发及诊断算法优化，通过系统测试验证其可行性与实用性。该系统可实现电气故障的实时监测、精准识别与快速定位，有效降低人工诊断难度，提升故障处置效率，为柴油发电机组电气系统安全稳定运行提供技术支撑，具有较高的工程应用价值。

关 键 词： 柴油发电机组；电气故障；辅助诊断系统；硬件设计；软件开发

Design of an Auxiliary Diagnostic System for Electrical Faults in Diesel Generator Sets

Wang Depeng
High-Tech Research Institute, No. 12 Fanggongting South Street, Qingzhou, Shandong 262500

Abstract: In response to issues such as low efficiency, strong subjectivity, and inaccurate fault localization in electrical fault diagnosis for diesel generator sets, an auxiliary diagnostic system for electrical faults in diesel generator sets is designed by integrating the characteristics of electrical faults in generator sets with practical engineering requirements. This paper clarifies the system design objectives and core requirements, completes hardware selection and layout, software module development, and diagnostic algorithm optimization, and verifies its feasibility and practicality through system testing. The system enables real-time monitoring, precise identification, and rapid localization of electrical faults, effectively reducing the difficulty of manual diagnosis, improving fault handling efficiency, and providing technical support for the safe and stable operation of the electrical system in diesel generator sets. It holds significant engineering application value.

Keywords: diesel generator set; electrical fault; auxiliary diagnostic system; hardware design; software development

引言

柴油发电机组属于备用电源和独立供电的核心设备，在电力、通信、数据中心、矿山等各个领域都有应用，其运行可靠性直接影响相关行业的正常运转。电气系统是柴油发电机组的重要组成部分，主要完成电能的产生、传输和控制，受运行环境、使用年限、操作规范等因素的影响，容易发生电池故障、绕组绝缘损坏、控制系统异常等电气故障。目前传统的电气故障诊断大多依靠人工经验，存在诊断效率低、故障定位不准、操作人员的专业水平要求高、容易漏掉隐性故障等缺点，不能满足现代化机组的运行需要。因此设计出一套高效的、准确的电气故障辅助诊断系统，对提高柴油发电机组的运维水平、保证设备的安全稳定运行有重大的工程意义和实用价值。

一、系统总体设计与核心需求

（一）系统设计目标

本系统设计以精准、高效、便捷、可靠为目标，以柴油发电机组常见电气故障辅助诊断为方向，实现三个主要目的，即实时监测发电机组电气系统三相电压、电流、绕组绝缘电阻、电池电压等参数，发现参数异常，为故障诊断提供依据，对常见电气故障进行自动识别和准确定位，包括电池故障、绕组故障、控制系统故障等，优化后的诊断准确率达到97%以上，缩短故障排查时间，具备数据存储、故障报警、历史查询等功能，支持就地操作和远程监控，减轻运维人员的工作负担，提高运维管理的规范化水平，适应不同的场景下发电机组运维的需求[1]。

（二）核心功能需求

根据柴油发电机组电气故障诊断的工程实际情况，系统主要功能需求有四个方面，即参数监测功能，可以实时采集发电机组电气系统的电压、电流、绝缘电阻、温度等主要参数，并对参数进行

 Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

阈值自定义设置，当出现异常参数时能及时发出预警；故障诊断功能，根据所采集到的参数数据，采用诊断算法判断故障种类、确定故障部位并给出相应的处置意见；数据管理功能，对故障数据、参数曲线、诊断记录等进行保存，具备历史数据查询、导出和分析的能力，为运维改进提供支撑；交互控制功能，具有本地触控操作和远程终端访问的权限，界面简洁明了，操作方便，可以实现故障报警信号远程推送，方便运维人员及时处理故障[2]。

（三）性能指标要求

为了保证系统的正常运行以及诊断的准确性，对系统的各项性能指标做出如下要求：参数采集精度，电压、电流采集误差≤ ±1%，绝缘电阻采集误差≤ ±5%，满足工程监测精度的要求；诊断响应速度从参数异常到故障识别完成的响应时间≤3s，保证故障快速反馈；系统稳定性连续运行72h无故障，抗干扰能力符合工业级标准，可以适应高温、粉尘、电磁干扰等复杂的运行环境；兼容性支持不同功率等级柴油发电机组的适配安装，可以与现有的监控系统集成对接，降低工程改造成本；操作可靠性具有故障自诊断功能，出现系统异常时可以自动报警并记录故障信息，方便后期维护[3]。

二、系统硬件设计

（一）硬件总体架构

1.架构整体设计

系统硬件采用“采集层、传输层、处理层、显示控制层”四个层次的模块化结构，整体设计以分层独立、协同联动为原则，各个层次都有明确的功能定位和独立运行的能力，而且用标准接口来实现数据交换和指令传递，从而构建起闭环管控体系，保证电气参数采集、传输、处理、管控全过程的高效、可靠、稳定。该架构既简洁又可扩展，可以根据不同的功率等级柴油发电机组应用需求，灵活地对各个层次的组件进行配置，适应工业现场各种运维场景的要求，为系统功能的全面实现打下硬件基础。

2.各层功能详解

采集层是数据采集前端的核心，主要对柴油发电机组电气系统中的关键参数进行实时采集，主要由各种工业级传感器和多通道数据采集模块组成，可以全面采集三相电压、电流、绕组绝缘电阻、电池电压等主要电气参数，为之后的故障诊断提供准确、完整的原始数据。传输层主要完成数据中转的工作，使用有线以太网和无线4G混合传输方式，既保证本地传输稳定又保证远程传输方便，保证采集到的数据可以迅速无失真地传送到处理层。处理层是硬件系统的中枢，使用高性能微控制器，主要完成采集数据的滤波、解析、运算，故障诊断逻辑运算、系统指令下发等工作，是实现故障精准识别的重要环节。显示控制层主要用于与操作人员互动的显示以及故障处理，可在本地和远程监控端口使用，可随时显示参数、故障信息并发出报警提醒，实现本地和远程双重控制，方便运维人员操作。

（二）核心硬件选型与布局

1.关键硬件选型

核心硬件选型严格遵守性能可靠、适应性强、成本合理的三大原则，主要围绕系统功能实现需求展开，重点完成各个关键部件的选择工作。数据采集模块使用高精度模拟量采集卡，可以实现多通道同步采集，可以根据系统性能指标的要求灵活地适配电压、电流、绝缘电阻等各种类型的电气参数，采集精度达到系统性能指标的要求；传感器全部采用工业级高稳定性产品，电压传感器采用霍尔式传感器，具有测量范围广、抗干扰能力强的特点，电流传感器采用罗氏线圈传感器，适配大电流测量场景，绝缘监测采用高压绝缘监测仪，测试电压可达2500VDC，保证采集数据的准确性和可靠性。微控制器采用STM32系列单片机，运算速度快、功耗低、接口多，可以完成数据处理、故障诊断和逻辑控制等工作，传输模块用以太网模块和4G模块相结合的方式，在保证本地有线传输稳定的基础上又可以实现远程无线传输的方便性，显示控制模块采用工业级触控屏，可以清楚地显示参数数据、故障信息，支持操作输入和故障报警，符合工业现场使用要求[4]。

2.硬件布局设计

硬件布局采用集中式控制柜形式，根据柴油发电机组电气系统安装空间和运维要求，将各种主要的硬件合理地布置在控制柜内，使布线合理、调试方便、后期维护方便。将微控制器、数据采集模块、传输模块等核心控制部件集中安装在控制柜内部的中层，利于信号对接、线路梳理；传感器接口、电源接口等都集中在控制柜侧面，使用标准化接口，方便传感器与外部设备的连接；工业触控屏安装在控制柜正面，高度满足运维人员操作的角度要求，可以随时查看参数和操作控制。同时控制柜内部留有适当的散热空间，设置散热风扇，防止硬件长时间工作温度过高造成性能下降；布线采用分类整理、屏蔽防护的方式，强弱电线路分开布置，减少信号干扰，保证硬件系统正常工作，布局简洁规范、实用性强。

（三）硬件接口与抗干扰设计

1.硬件接口设计

硬件接口设计既考虑通用性又考虑扩展性，根据系统各个模块的功能要求来创建标准的、可以扩展的接口体系。微控制器留有串口、以太网接口、GPIO接口等多种标准接口，可以灵活地和传感器、数据采集模块、传输模块、显示控制模块以及柴油发电机组自身的控制系统进行连接，有利于后期功能的扩展和系统的升级，降低工程改造的难度。采集模块和传感器之间用专用屏蔽线缆连接，接口处设有防反接、过压、过流保护电路，使用防水、防尘接头，可以减少信号传输过程中产生的干扰，防止由于接线错误、电压异常造成硬件损坏，提高接口连接的可靠性。同时接口使用标准化的设计，具有明显的接口标识，便于安装、调试、后期维护，保证各个硬件模块之间的信号传输畅通、稳定。

2.硬件抗干扰设计

根据工业现场高温、粉尘、电磁干扰等复杂环境的特点，从电源、信号、电磁三个方面进行硬件抗干扰设计，保证系统的正常工作。电源抗干扰上采用隔离电源模块，把电网电压和系统内部供电隔离开来，消除电网杂波干扰和电压波动，保证系统的供电稳定，在电源输入端加上滤波电容，消除电源干扰；在信号抗干扰上对采集的模拟信号做多级滤波处理，用低通滤波器去除高

Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

频干扰信号，对数字信号做光电隔离处理，改善信号纯度，防止信号失真影响故障诊断精确度，电磁抗干扰上控制柜采用金属屏蔽外壳，能有效地屏蔽外部电磁辐射干扰，内部元器件按功能分区合理布置，强弱电线路分开布置，避免电磁耦合干扰，对关键线路进行屏蔽包裹，进一步提高系统的抗干扰能力，使系统在复杂的工业环境下连续稳定工作[5]。

三、系统软件设计与诊断算法优化

（一）软件总体设计

系统软件使用模块化的设计思想，用C语言和Python语言作为主要的开发语言，分成数据采集模块、数据处理模块、故障诊断模块、数据管理模块以及人机交互模块五个主要模块。各个模块各自独立封装，可以分别独立完成自己的主要任务，同时又可以很好地协调工作的过程，从而有效地降低了系统后期的维护和功能更新所面临的问题，使得系统更加具有可扩展性以及可维护性。数据采集模块主要完成发电机组电气参数的实时采集和初步处理，保证数据的及时性和完整性；数据处理模块对采集到的原始数据进行滤波、校准、归一化等处理，剔除异常数据，得到有效的特征值，为故障诊断提供数据支持；故障诊断模块使用优化过的算法来实现故障识别和定位，并给出相应的处置建议；数据管理模块用来保存各种数据，方便查询、导出、备份，给运维优化提供依据；人机交互模块以操作方便、实用为目标，完成参数显示、操作输入、故障报警等功能，保证系统方便的运维、高效的管控。

（二）核心软件模块开发

核心软件模块开发以实用性和高效性为主，数据采集模块用中断采集的方式设置采集频率为10Hz来保证参数采集的实时性，加入数据校验机制剔除无效数据保证数据的真实性，数据处理模块使用滑动窗口滤波算法有效去除随机干扰，对采集到的参数进行准确校准提高数据精度，提取电压偏差、电流波动、绝缘电阻等主要特征参数，数据管理模块使用SQLite数据库可以保存参数数据、故障记录等，可以按照时间、故障类型等条件查询，可以导出Excel格式文件方便后期分析，人机交互模块设计简洁直观的操作界面包含参数监测、故障报警、系统设置等功能，支持本地操作和远程终端访问，故障发生时会自动弹出报警提示并推送远程信号，方便运维人员及时处理。

（三）诊断算法优化与实现

为了提高传统诊断算法的准确率以及抗干扰性，本文提出使用CNN-BiLSTM并行网络诊断算法，并且使用自适应小波包变换技术来提高故障诊断的准确性以及抗干扰性。首先同步采集柴油发电机组的三相电压、电流和绝缘电阻信号，对原始信号做数据清洗、异常值剔除、滑动窗口分割处理，得到标准化多维时间序列矩阵；其次用自适应小波包变换技术对矩阵进行多尺度分解，得到各个频带的有效特征，把各个频带重构系数和原始信号通道数据结合起来，得到高维增强特征张量；接着用CNN-BiLSTM并行网络对特征张量进行深层次挖掘，提取出信号之间的关联特征，采用自适应加权融合策略对两个网络输出的特征进行动态融合，提高故障识别的准确性；最后将融合后的特征输入多层全连接分类器中，完成故障类型的判定，可以识别出电池故障、绕组故障、控制系统故障以及它们的组合故障，并且经过实际测试，优化后的诊断准确率达到97%以上，响应速度完全满足设计要求，很好地解决了传统算法抗干扰能力差、诊断精度低的问题。

四、结语

本文根据柴油发电机组电气故障诊断工程实际需要，对电气故障辅助诊断系统进行了总体方案设计、硬件选型和布局、软件模块开发以及诊断算法优化，成功创建出一个包含参数实时监测、故障准确诊断、数据规范管理、远程协同控制等功能的智能化辅助诊断系统。该系统很好地解决了传统的人工诊断模式效率低、故障定位不准、隐性故障容易被忽略等突出问题，依靠高精度的电气参数采集技术和改进后的智能诊断算法，实现了对发电机组电气故障的快速识别、准确定位和科学处理，可以大大降低运维人员的专业门槛和工作强度，提高发电机组电气系统的运维效率和管理水平。可以继续提高诊断算法识别精度和抗干扰能力，扩大复杂工况下故障诊断种类，不断加强系统的兼容性和可扩展性，使该系统在电力、通信、矿山等众多领域的柴油发电机组上得到大规模的应用，给柴油发电机组电气系统安全、稳定、高效运行提供更加坚实的支撑。

参考文献

[1]徐凯锐，宋世哲，闫兵，黄燕，华春蓉.柴油发电机组起动过程联轴器异常碰撞故障分析[J].内燃机学报，2025,43(06):559-568.

[2]姚晓山，占伟强，刘颖，杨明擘，唐睿.柴油发电机组电气故障辅助诊断系统设计[J].移动电源与车辆，2025,56(03):13-20.

[3]薛萌，何鹏，周运来，衣奎先，胡尚波.核电厂应急柴油发电机安全级电气保护配置研究[J].高科技与产业化，2024,30(09):72-73.

[4]张飞.柴油发电机组故障维修及保养探析[J].中国机械，2024,(19):137-140.

[5]陈志勇.柴油发电机工作原理及电气典型故障分析[J].农村电工，2021,29(03):45-46.

 Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

60MW 机组 3# 送风机变频器控制电源故障分析处理及系统优化

姚洁
安阳钢铁集团有限责任公司，河南 安阳 455000
DOI:10.61369/EPTSM.2026040023

摘　　要： 针对60MW机组3#送风机变频器运行中报“控制电源故障”引发跳机的问题，通过故障现象复现、历史数据分析与模拟试验精准定位，确定原因为K2继电器辅助触点氧化接触不良。采取短接辅助触点快速恢复运行，并同步完成变频器后台远程操作改造和风机机械抱闸加装。同时优化控制电源失电延时保护逻辑，对同类设备开展专项排查治理。改造后变频器运行稳定，非计划停机次数归零，有效提升了设备可靠性，为同类型变频器控制电源故障处理提供了实用参考。

关 键 词： 变频器；控制电源；原因分析；故障处理；升级改造

Analysis, Treatment, and System Optimization of the Control Power Supply Fault of the Frequency Converter For 3# Forced Draft Fan Of a 60mw Unit

Yao Jie
Anyang Iron and Steel Group Co., Ltd. Anyang , Henan 455000

Abstract: In response to the issue of tripping caused by the "control power failure" reported during the operation of the frequency converter of 3# forced draft fan for a 60MW unit, the cause was accurately identified through fault phenomenon reproduction, historical data analysis, and simulation tests. It was determined to be due to poor contact caused by oxidation of the auxiliary contacts of the K2 relay. The auxiliary contacts were short-circuited to quickly restore operation, and the remote operation modification of the frequency converter backend and the installation of a mechanical brake for the fan were simultaneously completed. At the same time, the control power loss delay protection logic was optimized, and special investigations and treatments were carried out for similar equipment. After the modification, the frequency converter operated stably, and the number of unplanned shutdowns was reduced to zero, effectively improving equipment reliability. This provides a practical reference for handling control power failures in similar frequency converters.

Keywords: frequency converter; control power supply; cause analysis; fault handling; upgrade and retrofit

引言

随着国家经济的飞速发展，河南钢铁集团安阳基地积极响应国家发改委印发的相关政策，加大节能降碳工作力度，通过脱硫脱硝项目改造将排放的烟气进行净化处理，大大降低了污染物对大气的影响。60MW发电机组高压系统内有8台风机随3高炉脱硫脱硝项目的改造完成进行了升级，每台风机配备了一台变频器，于2022年上旬进行了完工并投入使用。变频器对于风机来说，不仅在一定程度上起到了节能的作用，而且还能让电机实现启动平稳，速度上的精确掌控，以及电机寿命的有效延长。然而对于越精密的设备集成化越高，实现的功能越多，伴随的故障率也会大大提高。2025年1月6日，3#送风机变频器在正常运行过程中，触摸屏报“控制电源故障”，紧接着电机随变频器跳机而停机，运行人员发现及时，避免了进一步的事故扩大。于是针对这一故障进行了全方面的分析与处理，并对设备的后期相关维护进行了总结以减少类似故障再次发生。

作者简介：姚洁（1990.08-），女，汉族，河南安阳人，学历：本科，职称：电气工程师，研究方向：发电机组相关设备。

Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

一、故障原因分析

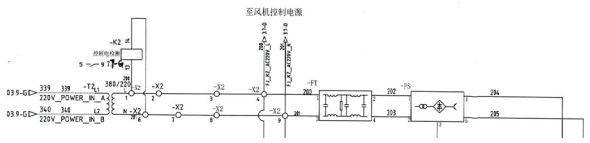


图1 220V控制回路

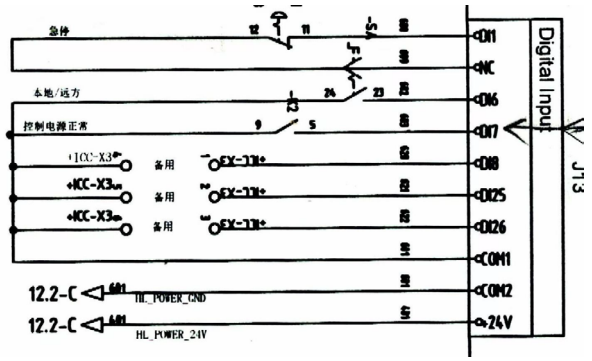


图2 I/O接口板件上控制电源相关回路

针对这一故障，供电作业区组织电工一组骨干人员对其进行原因的查找。通过变频器说明书，以及“历史故障“的查找，认为导致故障的原因有两个方面：一个是由于系统电压不稳定，波动较大引起的，另一个是控制电源回路出现异常。对于第一个原因通过对西区10KV系统电压历史变化曲线中查看，发现此前有一次系统电压波动较大，但是时间较短，而对应到变频器”历史故障“一栏中发现相同日期也有一次只报出”A46 控制电源故障”告警，未报出“F46 控制电源故障”，故设备未停机，电压波动时间短变频器能够及时恢复。对于第二个原因通过查看控制电源相关图纸发现如图1可知，在整个控制电源回路中，充当重要角色并且故障率相对较高的是K2继电器，其主要起对控制电源检测的作用，再加上如图2所示，可知K2继电器的辅助触点5号和9号端子在I/O接口板上主要用于检测控制电源是否处于正常，但是由于此时故障已经消失，故其5号和7号端子处于正常状态即闭合状态。于是对处于备机状态的2#送风机变频器进行试验，通过模拟故障状态，发现无论是将辅助触点短接，还是将继电器从底座上拔掉，都是先报出“A46 控制电源故障”告警，通过1秒延时后变频器跳机，同时报出“F46 控制电源故障”，现象都类同当时故障状态。于是，与厂家进行沟通，得知其他使用同类型汇川变频器的客户中，有同样故障的发生。综合上述分析，最终讨论结果认为K2继电器辅助触点氧化的可能性较大。

二、故障处理

故障原因确定后，针对K2继电器的处理有两种方案，一种是将辅助触点进行短接，相当于将控制电源检测这个功能去掉，但是尽管控制电源检测这个功能没有了，一旦控制电源失电，还是可以通过其他信号进行变频器告警，甚至变频器跳机。而另一种是在原继电器的基础上再并联一个相同的继电器，有任何一个继电器异常另一个继电器可以进行检测。通过对两种方案利弊的讨论，最后决定选最直接简单的方案将K2继电器辅助触点短接。

三、变频器升级改造

故障处理过程中，发现变频器在建造初期时，由于时间紧，项目工作量大，没有在脱硫脱硝项目后台做相关的变频器操作，供电作业区与电控作业区决定联手进一步将变频器操作引至后台，方便运行人员能够远方遥控操作，以便及时启机。

通过变频器随机说明书的查看以及对备机控制柜内二次接线端子进行查线，发现用户接口板的通讯接口除了已接线占用的接口，其余并没有合适的接口，经过与电控作业区进行沟通，决定通过硬接线将控制信号引至后台接收装置上来实现。于是前期两个作业区沟通好，将改造图纸进行沟通，将8台变频器对应的8根电缆通过电缆桥架接至低压配电室接收装置，然后由仪控人员将操作与指示做进脱硫脱硝控制后台内，电工一组人员将对应的电缆接至变频器旁路柜控制及指示信号端子上，最后通过调试与联跳，本次改造工作完成。

四、送风机机械抱闸改造

故障发生后，由于3#送风机停机导致锅炉内产生较大负压，导致停机状态的送风机反转，为了减小故障的扩大面，能够及时恢复3#送风机的投运，经过供电作业区与鼓风作业区之间的沟通，决定尝试在“非飞车状态“下进行紧急恢复投运，但是与变频器厂家进行沟通后，变频器厂家告知，变频器不可以在电机反转的状态下进行”非飞车状态“启动，故只能首先通过人工来将3#送风机进行停机。然而对于风机的体积来说人工紧急抱闸是十分难的，于是两个作业区决定通过对每台风机升级机械抱闸以应对突发故障。

五、变频器控制电源系统可靠性提升方案设计

（一）控制电源双路冗余供电改造

单路控制电源存在单点故障风险，采用双路冗余改造：一路为变频器输入侧高压降压整流直流电源，另一路为厂用380V交流经独立开关电源转换的直流电源。两路电源经二极管隔离模块并联输出，一路故障时另一路无缝供电，彻底避免电源波动或模块故障导致跳机。改造需核对电压适配性与隔离保护，在旁路柜加装电源状态指示灯。

（二）K2继电器选型优化与定期更换策略

原K2继电器触点易氧化，更换为 **镀金触点型继电器 **，提升抗氧化与接触稳定性。长期带电继电器线圈发热加速老化，执行 **12个月定期预防性更换 **，同步检查底座弹簧片弹性，防止接触不良。建立继电器管理档案，记录更换时间、型号与检查情况，实现闭环管控。

（三）控制电源失电延时保护逻辑优化

现有控制电源失电延时1秒跳机，延时过短无法滤除瞬时波动。联合厂家将延时调整为3秒，增加电压恢复检测，恢复正常则

 Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

自动清除告警、不跳机；优化自复位逻辑，取消电压恢复后人工复位。优化后可减少电网波动误跳机，同时保障设备安全。

六、变频器运行维护管理体系的完善

（一）变频器日常巡检项目与周期优化

结合当前故障经历，重新整理变频器的日常巡查项目。巡查内容包含控制电源电压显示值、K2继电器状态指示灯、散热风扇转动声音、功率单元温度、柜内是否存在异味、异响等。巡查周期从原先的每周一次改为每天一次，在巡查表上增添“控制电源检测继电器状态”的专门检查项。对于处于备用状态的变频器，也要列入巡查范畴，每个月做一次模拟送电检测，保证备用设备随时可用。巡查记录要以电子形式归档，方便对故障发展态势加以分析。

（二）故障应急预案与处置流程标准化

针对变频器控制电源故障以及其他常见故障类型，制定标准化的应急处理方案。该方案涵盖故障现象的快速判定、处理步骤、安全须知、汇报流程等内容。关于控制电源故障，其处理流程如下：先确认故障变频器的编号与位置，接着查看控制电源电压是否已恢复正常，依据规定开展故障复位操作。如果复位失败，则切换到备用变频器或者执行紧急停机。方案里还存在与运行人员、调度人员联系协调的机制。全体有关人员要了解这个方案的内容，并且每半年做一次演习。

七、同类设备隐患排查与推广改造

（一）其余7台送风机变频器控制电源专项排查

3#送风机出现故障之后，马上组织人员针对同批次投入运行的另外7台送风机变频器展开专门的检查工作。检查要点包含以下几个方面：第一，仔细观察每台变频器 K2继电器辅助触点是否存在氧化现象，并利用毫欧表测量其接触电阻大小；第二，查看继电器底座是否发生变色或者变形情况；第三，核实控制电源电压的实际数值和显示数值之间是否存在偏差；第四，查阅历史故障记录，看是否有“A46”告警却没有上报“F46”的情形。排查过程中找出两台变频器的 K2继电器触点电阻过大，已实施预防性更换。把排查结果编制成专项报告，给后续改造提供依据。

（二）脱硫脱硝项目所有变频器同类故障风险评估

把排查范围扩展到整个脱硫脱硝项目里的全部变频器，共有26台，包含送风机、引风机、循环泵、给料机等设备。考量按照如下几项：变频器投入运行的时间、控制电源检测方式是否利用同类型的继电器、设备所处的运行环境的温湿度、以前的故障记录等。考量结果表明，投入运行满两年的变频器当中有8台存在相似的风险，而这4台设备处于高温高湿的环境之中，其风险等级比较高。对于高风险的设备要优先安排改造，中低风险的设备则列入到日常的重点监测范畴之内，并按照风险等级逐步开展整改工作。

（三）变频器系统整体优化改造效果评估

本次优化改造完毕之后，针对整体效果展开系统评定。评定指标包含以下几个方面：变频器月均故障次数、平均故障修缮历时、非计划停机次数以及运行人员远程操作达成率等。从优化结束到第三个月的运行数据来看，变频器月均故障次数从之前的1.3次缩减到0.3次，平均故障修缮历时从120分钟减小到45分钟，且没有出现过非计划停机的情况。远程操作达成率做到了100%，机械抱闸装置在两次模拟反转场景的时候也都能可靠地执行动作。通过考量结论可知，此次改造达成了预定的目标，具备在同类机组推广应用时可供模仿的价值。

八、总结

本次针对3#送风机变频器控制电源故障展开分析处理并优化系统之后，确定故障源于 K2继电器辅助触点出现氧化现象。通过短接辅助触点迅速恢复运行，并完成后台远程操作升级以及机械抱闸改造工作，有效地加强了设备的可靠性及其应急处理能力。对于同类设备执行专门的检查并改良保护逻辑，建立起包含故障定位、快速处理以及系统预防的完整循环。实际应用表明，变频器控制电源系统的可靠性要从硬件设置、守护管理、应急预案等大量维度共同提供保障，给同类型机组通过了可供借鉴的经验。

参考文献

[1]徐峰 . 630 MW机组凝泵变频器改造后故障技术分析和处理 [J].上海大中型电机 ,2024,(03):45-49.

[2]覃露 . 通用变频器在船闸电机拖动中的应用与维护研究 [J].中国水运 ,2023,(23):111-113.

[3]郑永辉 . 变频器在自动化控制系统中的应用及其故障探析 [J].电气技术与经济 ,2023,(08):336-338.

[4]齐健 , 刘军 , 刘艳群 , 等 . 起重用变频器速度监视故障机理分析与处理 [J].起重运输机械 ,2023,(03):65-71.

[5]陈星纬 . WK系列矿用挖掘机 ACS800变频器编码器故障分析 [J].矿业工程 ,2022,20(03):64-69.

[6]史恒亮 , 赵宝亮 , 李文博 . 变频器在设备改造中的应用和研究 [J]. 纯碱工业 , 2023, (05): 29-33.

[7]童宇 , 杨光明 . 火电厂空预器变频器高低电压穿越能力的实现 [J]. 设备管理与维修 , 2021, (11): 81-82.

[8]韩峰 , 戴敏敏 . 火电厂给煤机控制系统电源隐患分析及改进措施 [J]. 山东电力技术 , 2021, 48 (04): 77-80.

[9]赵国庆 . 高压变频器在电厂节能改造工程中的应用 [J]. 中国科技投资 , 2021, (10): 81-83.

[10]彭凌云 , 严文彬 , 李娟 , 等 . 同步电动机高压变频器故障的分析与处理 [J]. 冶金设备管理与维修 , 2021, 39 (01): 16-19+25.

Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

百万机组大面积断煤应急处置技术研究

曾春峰
郑州裕中能源有限责任公司，河南 郑州 452375

DOI:10.61369/EPTSM.2026040009

摘　　要： 本文基于百万机组大面积断煤异常事件应急处置全过程，系统分析事件发生原因与演化规律，详细阐述应急处置关键操作要点，重点针对自动控制功能存在的短板提出优化改进措施，包括优化控制系统逻辑、增设极端工况自动应急处置功能、构建断煤异常提前预警体系等，并结合设备治理与人员培训形成综合防控策略。研究结果表明，通过完善自动控制功能的自适应、容错与联动补偿能力，能够显著提升百万机组应对大面积断煤极端工况的应急处置能力，减少人工干预依赖。本文研究成果可为同类型百万机组应对类似极端工况提供理论参考与工程实践借鉴，对提升火电机组安全生产水平具有重要意义。

关 键 词： 百万机组；满负荷运行；大面积断煤；应急处置

Research on Emergency Response Technology for Large-Scale Coal Shortage in Million-MW Units

Zeng Chunfeng
Zhengzhou Yuzhong Energy Co., Ltd., Zhengzhou, Henan 452375

Abstract: Based on the entire process of this abnormal incident, this paper systematically analyzes the causes and evolution patterns of the event, elaborates on the key operational points of emergency response, and proposes optimization measures targeting the shortcomings of the automatic control function. These measures include optimizing the control system logic, adding automatic emergency response functions for extreme operating conditions, and establishing an early warning system for coal supply interruption. Combined with equipment management and personnel training, a comprehensive prevention strategy is formulated. The research results demonstrate that by enhancing the adaptability, fault tolerance, and coordinated compensation capabilities of the automatic control function, the emergency response capability of the million-ton unit in dealing with large-scale coal supply interruption under extreme conditions can be significantly improved, reducing reliance on manual intervention. The findings of this study can provide theoretical references and practical insights for similar million-ton units facing analogous extreme conditions, holding significant importance for enhancing the safety production level of thermal power units.

Keywords: million-unit power generation; full-load operation; large-scale coal supply interruption; emergency response

引言

2026年01月20日，某电厂#3百万机组发生5台给煤机同时断煤的极端异常事件，事件中暴露出自动控制系统在燃料量骤变时的调节短板，经过现场运行人员的快速响应与科学处置，成功避免了机组不安全事件的发生，积累了宝贵的实践经验。本文以该事件为研究对象，系统梳理事件发生、应急处置及机组恢复的全过程，深入分析处置过程中的关键技术要点与注意事项，重点围绕自动控制功能存在的问题提出针对性优化建议，总结处置经验并形成综合防控策略，为同类型机组应对类似极端工况提供技术支撑，具有重要的工程实践价值与学术参考意义[1-3]。

一、事件概况与背景

（一）机组基本参数

#3机组为百万千瓦级超超临界直流炉机组，锅炉采用单炉膛塔式布置、四角切向燃烧、一次中间再热、平衡通风方式，配备6台双进双出磨煤机、12台给煤机（每台磨煤机对应2台给煤机），制粉系统采用正压直吹式。机组协调控制系统（CCS）采用机炉协调控制方式，具备自动发电控制（AGC）功能，各主要调节

作者简介：曾春峰（1980.03-），男，河南商水人，汉族，本科，工程师，研究方向：火电厂锅炉技术管理。

 Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

回路自动投运率保持100%。事件发生时，#3机组满负荷稳定运行，主汽压力25.2 MPa，主汽温度605 ℃，热负荷1015 MW，6台磨煤机全部投运。

（二）事件发生过程

2026年01月20日08:30，#3炉3B1、3B2、3E1、3E2、3F2共5台给煤机同时发生断煤现象，短时间内入炉燃料量急剧下降，导致锅炉燃烧出现明显扰动，主蒸汽压力开始快速下滑。监盘人员发现异常后立即启动手动干预，快速降低机组负荷，锅炉负荷由1015 MW降至874 MW时，主汽压力由25.2 MPa降至21.6 MPa，主汽压力与设定目标偏差超过2 MPa，触发机组协调控制系统（CCS）自动退出逻辑，自动发电控制系统（AGC）随之被迫退出运行。CCS系统退出后，监盘人员立即投入汽机跟随（TF）控制方式，继续降低机组负荷以匹配入炉燃料量。

二、断煤事件机理分析

一是燃料量骤减导致锅炉热负荷不足。5台给煤机同时断煤使得入炉燃料量短时间内大幅下降，锅炉燃烧释放的热量无法满足机组满负荷运行所需的热需求，导致锅炉蒸发量减少，主蒸汽压力快速下滑。主汽压的急剧波动超出了CCS系统常规调节范围，触发保护退出逻辑，导致系统失去自动调节能力。

二是燃烧扰动引发一次风压异常。燃料量骤减后，锅炉主控系统切换为跟随模式，一次风压设定值随实际燃料量同步突变下降，而一次风机自动调节回路存在调节滞后性，无法及时响应设定值的剧烈变化，导致一次风母管压力快速降低。一次风压不足将影响磨煤机煤粉输送效率，进一步加剧燃烧不稳定，形成”燃料量不足—一次风压下降—燃烧恶化”的恶性循环。

三是煤水比失调威胁汽水系统安全。燃料量骤减后，给水自动调节回路未设置燃料量骤变的超前补偿逻辑，给水流量调整滞后，导致煤水比严重失调，锅炉过热度、主汽温等参数出现剧烈波动。过热度过高可能导致受热面超温损坏，过热度过低则可能引发水击等事故，严重威胁汽水系统的安全稳定运行。

三、应急处置关键操作要点

（一）机组控制方式快速切换

一次风压快速下降对锅炉稳燃构成严重威胁，监盘人员立即投入一层大油枪，补充锅炉热负荷，防止锅炉灭火。同时，将3A、3B一次风机动调由自动切至手动控制，手动调整一次风母管压力，并调节各磨煤机负荷风门开度至60%左右，保障煤粉输送稳定。为防止煤水比失调导致主汽温、过热度波动过大，给水调整人员同步将给水流量自动控制切至手动控制，根据锅炉热负荷变化实时调整给水流量，维持煤水比平衡。

（二）锅炉稳燃核心操作

1. 规范投油稳燃操作

当运行磨煤机中有3台及以上给煤机同时持续断煤，严重影响锅炉燃烧稳定时，需立即投入微油或4支以上大油枪进行稳燃。投油过程中，需安排专人监视燃油压力，严禁多人同时投油，防止燃油压力波动过大或出现误操作。油枪退出后，必须严格检查进、回油流量是否平衡，排查油角阀内漏隐患，防止燃油持续进入炉膛，避免引发安全事故。

2.主汽压精准控制

主汽压快速下降时，需立即降低机组负荷，或解除协调控制并投入汽机跟随方式，使汽机负荷跟随锅炉热负荷变化。同时，解除燃料主控自动控制，手动调整磨煤机负荷风门，根据主汽压滑压曲线，控制主汽压稳定跟随目标值，避免主汽压波动过大超出允许范围。在手动调整过程中，应遵循”小幅、多次、渐进”的原则，防止参数大幅波动。

（三）关键参数全面监视与调整

应急处置期间，安排专人负责关键参数的监视与调整，确保各参数处于设计允许范围内，重点关注三类参数：一是风烟系统参数，重点监视炉膛负压、氧量、一次风压，及时调整引风机、送风机开度，维持炉膛负压稳定在-50~-100 Pa，氧量控制在3.5%~4.5%，确保燃烧充分且稳定；二是汽水系统参数，密切跟踪过热度、过热度变化率、各级受热面管壁温度、主汽温保护余量及水冷壁出口温度保护余量，防止受热面超温或过热度异常波动；三是环保指标参数，监视脱硝系统入口烟温及脱硫出口NOx排放浓度，根据燃烧状态及时调整脱硝喷氨量，确保环保排放达标。

（四）磨煤机来煤后的有序控制

磨煤机恢复来煤后，需遵循”缓慢调整、循序渐进”的原则，逐步开大负荷风门并增加给煤量，同时对应调整磨煤机二次风门开度，使煤粉与空气充分混合，防止燃料突增导致炉膛爆燃，或燃烧剧烈增强引发受热面超温、过热度急剧上升等问题。

若出现过热度快速升高需立即解除给水自动控制，手动增加给水流量，同时解除一次风机动调自动，手动降低一次风压，将过热度变化率控制在5 ℃/min以下；若过热度连续升高至70 ℃以上，且变化率仍≥10 ℃/min且无下降趋势，必须立即停止最上层一台磨煤机（两台给煤机全停），并全关其负荷风门，操作过程中需密切调节一次风机出口压力，避免因负荷风门快速关闭引发一次风机喘振。

四、处置经验总结与优化建议

（一）应急处置经验总结

本次百万机组满负荷大面积断煤事件能够成功处置，核心在于以下三点：一是响应迅速，监盘人员及时发现异常参数波动，第一时间启动手动干预，弥补了自动控制系统失效后的调节空白，避免了事故进一步扩大；二是操作规范，严格遵循应急处置流程，精准执行控制方式切换、投油稳燃、参数调整等操作，保障了锅炉燃烧稳定与参数合格；三是协同配合，运行、维护等各岗位人员密切协同，形成处置合力，有效提升了应急处置效率。

（二）针对性优化建议

1. 全面优化自动控制系统逻辑，提升自适应与容错能力

优化一次风压及各调节回路设定值修正逻辑，增加燃料量骤

Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

变超前补偿模块，当检测到单台及以上给煤机断煤、入炉燃料量波动超过预设阈值（如20 t/h）时，一次风压设定值不再随燃料量同步突变，而是根据燃料量变化速率进行平滑修正，并增加调节死区与延时，防止一次风压大幅波动。

完善自动控制回路退出与错误兼容保护机制，将各回路参数超限退出值由固定值改为机组工况自适应分级值，针对机组满负荷、50%负荷等不同工况设置不同的偏差允许范围；优化CCS系统退出后的自动联动切换逻辑，当CCS因参数超限退出后，系统自动判断故障类型（如燃料量骤减、主汽压骤降），并自动投入已经设定好的极端工况汽机跟随优化模式，而非常规汽机跟随模式，该模式可根据燃料量实际值自动调整机组负荷目标，同时自动限制一次风压、给水流量的调整速率，减少人工操作的难度。

2.增设极端工况自动应急处置功能，减少人工干预依赖

开发多台给煤机断煤自动识别与稳燃功能，在DCS系统中增加给煤机断煤判别逻辑，当检测到2台及以上给煤机同时断煤时，系统自动发出预警信号，当断煤数量达到3台及以上时，自动投入一定的微油枪或大油枪稳燃，投油完成后自动监视调整燃油压力与油枪运行状态，出现异常时及时报警。

增加过热度异常自动调节功能，当判断过热度达到70 ℃且变化率≥10 ℃ /min时，自动解除给水与一次风机动调自动调节功能，按照预设目标进行定量调整，将过热度变化率控制在安全范围。

3. 构建断煤异常提前预警体系，实现自动前置干预

在给煤机、原煤仓等设备加装在线监测传感装置，实时监测给煤机给煤量、原煤仓料位、煤流速度等参数，构建给煤机断煤自动预警功能，通过断煤数据分析识别断煤前兆（如煤流速度骤减），在断煤实际发生前5~10 s发出提前报警，为运行人员与自动系统争取更多处理时间。

4.加强人员培训与演练，实现自动与手动操作的高效衔接

定期开展极端工况事故演练，重点围绕多台给煤机断煤、自动控制系统部分/全部退出等模拟自动报警、自动应急处置、手动干预全流程衔接的操作，培养运行人员对自动控制系统状态的判断能力、自动功能失效后的手动处理能力，以及自动功能恢复时的无扰切换能力。

5.强化设备治理与源头防控，从根本上减少断煤事件发生

深入排查多台给煤机同时断煤的根本原因，重点分析煤质特性、原煤仓设计合理性、空气炮运行可靠性、给煤机设备状态等因素，针对性采取改进措施。优化原煤仓结构，可以采用增加防堵衬板、优化原煤仓仓斗内壁角度，防止原煤结拱、堵塞；加强煤质管控，严格控制入厂煤有关指标，避免因煤质过硬、过湿导致给煤机断煤；定期对给煤机、空气炮、煤流监测设备等进行检修维护，及时排查并消除设备缺陷及隐患。

五、结论与展望

（一）结论

本文以某电厂#3百万机组满负荷运行中发生的大面积断煤异常事件为研究对象，系统分析了事件发生的过程、变化原理，详细阐述了应急处置的关键操作要点，重点围绕自动控制功能优化总结问题并提出针对性优化建议，得出以下结论：

（1）百万机组满负荷运行中，多台给煤机同时断煤将导致入炉燃料量骤减，引发主汽压快速下降、CCS与AGC系统退出、一次风压异常等系列反应，核心威胁在于锅炉燃烧不稳定与汽水系统参数失去平衡，而自动控制功能的适应性、容错能力与联动补偿能力不足是加剧参数波动、扩大事故风险的重要因素。

（2）本次事件的成功处置，关键在于人工手动干预的快速性与规范性，同时也证明了自动控制功能并非万能，但其优化完善能够大幅降低极端工况下的处置难度与风险，应急处置的核心应是实现”自动预警、自动处置、手动兜底、高效衔接”。

（3）针对自动控制功能的优化，需从逻辑自适应、容错保护、自动应急、提前预警四个维度入手，通过增设补偿模块、完善分级机制、开发自动稳燃与调控功能、构建预警体系，能够显著提升自动控制系统在极端工况下的调节能力，减少对人工干预的依赖。

（二）展望

随着百万机组智能化水平的不断提升，未来可进一步开展以下研究工作：一是结合现场实际断煤数据，不断优化断煤预警逻辑控制功能，实现基于负荷变化的动态预警控制调整，提升预警的准确性与提前量；二是研究百万机组极端工况自动应急处置系统，结合多参数多重分析等技术，实现断煤事件的”识别—预警—处置—恢复”全流程处置，进一步减少人工干预，提升应急处置的精准度与效率。三是探索实时数据技术在断煤应急处置中的应用，构建机组数字控制模型，模拟不同断煤情况下的参数变化与处置效果，为自动控制系统优化与人员应急演练水平提升提供实操仿真平台。

参考文献

[1] 中国电力企业联合会 . 中国火电发展报告2025[R]. 北京：中国电力企业联合会，2025.

[2] 谢诞梅，李刚，王兵 . 超超临界机组协调控制系统优化设计与应用 [J]. 中国电机工程学报，2024，44(15)：4892-4901.

[3] 杨勇平，张树芳，李聪 . 百万千瓦超超临界机组运行优化关键技术研究 [J]. 动力工程学报，2023，43(8)：601-608.

 Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

基于深度学习的继电保护装置故障诊断与定位研究

申皓天

抚顺辽电运营管理有限公司，辽宁 抚顺 113105

DOI:10.61369/EPTSM.2026040002

摘　　要： 随着“双碳”目标推进，智能电网对继电保护装置可靠性要求明显提高，而传统故障诊断办法像专家系统、支持向量机这些需要人工提取特征，没法很好地解决装置故障具有非线性且涉及多源耦合的问题，故障诊断精确度不高，定位滞后。本文以深度学习为主轴，卷积神经网络（CNN）、长短期记忆网络（LSTM）这些模型的优点，给出故障诊断和定位的方案：用CNN对硬件故障静态特征执行提取，LSTM对软件以及通信故障的时序规律执行捕捉，并用知识蒸馏做到模型轻量化，在试验中，这个方案的故障诊断准确度达98.5%，定位反应时间小于等于20毫秒，这要比传统的办法好得多，可以给智能电网继电保护装置维修运营赋予技术支持。

关 键 词： 深度学习；继电保护装置；故障诊断；定位

Research on Fault Diagnosis and Localization of Relay Protection Device Based on Deep Learning

Shen Haotian

Fushun Liaodian Operation Management Co., LTD. Fushun, Liaoning 113105

Abstract: With the advancement of the "dual carbon" goals, smart grids have significantly increased reliability requirements for relay protection devices. Traditional fault diagnosis methods such as expert systems and support vector machines (SVMs)that require manual feature extraction fail to adequately address nonlinear device failures involving multi-source coupling, resulting in low diagnostic accuracy and delayed fault localization. This paper proposes a deep learning-driven solution combining convolutional neural networks (CNN) and long-short-term memory networks (LSTM). Specifically, CNNs extract static hardware fault features while LSTMs capture temporal patterns of software and communication failures. Knowledge distillation is applied to achieve model lightweighting. Experimental results demonstrate this integrated approach achieves 98.5% fault diagnosis accuracy with localization response times ≤20 milliseconds—dramatically outperforming traditional methods. This breakthrough provides critical technical support for maintenance and operational optimization of smart grid relay protection systems.

Keywords: deep learning; relay protection device; fault diagnosis; positioning

电力系统是国民经济核心基础设施，当下，智能电网发展，新能源大规模并网让电网拓扑变得更复杂，短路电流，电压波动等异常状况频发，继电保护装置扮演着“安全哨兵”的关键角色，它的故障处置效率直接影响供电连续性，据2023年统计，我国电网中继电保护装置故障引起的事故达到18.7%，一次故障就会造成1.2万户停电，传统的诊断方法之中，专家系统规则库制作时间过长，支持向量机需要人工做特征处理，面对庞大时序数据时精度偏低，少于90%，深度学习具备“端到端”的特征提取功能，给解决问题开拓出新的方向，本文对相关理论的研究情况加以梳理，并给出匹配的故障诊断和定位策略，经过实验验证有效，从而给智能化的运行维护提供一定的参照。

一、深度学习的继电保护装置故障诊断意义

（一）突破传统诊断方法局限，拓展电力领域AI应用体系

传统故障诊断方法的典型问题就是“特征依赖人工，模型泛化性差”，比如专家系统需要资深工程师积累5-10年运维经验来构建规则库，而且不能自适应电网拓扑变化；SVM等模型面对多故障耦合（CPU故障引发的数据采集异常与报文丢失同时出现）时，由于特征维度不够导致诊断准确率直线下降。深度学习借助“数据驱动”模式突破上文的瓶颈，其一，CNN、LSTM这类模型可自行抓取诸如CNN电流波形里的畸变特点或者LSTM报文串里潜藏的延时规律之类故障特征信息来免去主观的特征工程劳动，其二，Transformer能够把来自不同信息源的讯息融合起来

作者简介：申皓天（1998.01-），男，回族，辽宁省抚顺市人，学历：硕士研究生，职称：助理工程师，研究方向：电力系统负荷预测、继电保护。

Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

以达成类似“本地数据＋远方数据＋过往数据”的全方位故障诊断体系构建，在此背景下形成出全面涵盖各种复杂装置的故障智能诊治方案，本研究经由把深度学习同继电保护专业知识联系起来就能构筑成像“故障相关联的数据特征－针对这一特征所应用的深度学习模型－从而获得最终的诊断确认地点这样一种映照联系结构，而且这样的做法能够弥补起电力系统中装置出现复杂状况以后在智能诊断方面理论层面尚存在的漏洞缺陷，进而推动相关人工智能技术在未来能够在电力设备维护运行过程中真正落地运用，发挥实际效用[1]。

（二）确保电网安全运行与运维成本降低

减少停电损失，传统的诊断方法需要运维人员到现场排查故障，平均定位时间超过30分钟（2022年某220kV变电站保护装置通信故障排查耗时45分钟，造成线路停运影响5万户停电）。而本文的深度学习策略可以做到故障“毫秒级识别＋精准定位”，配合边缘部署技术，可以在故障发生后20ms发出告警并定位到具体模块（如CPU、电源接口），运维人员可以“对症下药”，将故障处置时间缩短到10分钟以内，减少停电带来的经济损失和社会影响。降低运维成本，当下继电保护装置运维主要依靠“定期巡检”，每年巡检成本占电网运维总费用的12%，而借助深度学习的诊断模型可以实现“状态检修”，即通过对装置运行数据的实时分析，提前预测出可能发生的故障[2]。

二、基于深度学习的继电保护装置故障诊断与定位现状

当下深度学习在继电保护装置故障诊断方面的理论研究，已经搭建起基本框架，但是存在一些局限，在复杂场景适配，数据处理，模型性能协同等地方，其局限性表现出来，主要体现在四个方面：

（一）单一故障诊断理论较为成熟

对于现有的理论来说，在单一类型的故障诊断建模上已经比较完善了，对于硬件方面的故障，比如CPU过热、电源模块老化，大多用CNN模型，通过卷积层提取温度信号曲线、电压波形图中的局部特征，比如波形畸变点、电压骤降区间，配合池化层降低数据维度，诊断准确率一般在95%–97%，对于软件方面的故障，比如程序死循环、采样逻辑错误，LSTM模型使用得比较多，通过捕捉状态量采样频率、数据校验结果的时序变化规律，识别率可达94%–96%，通信故障，比如报文丢失、延时，理论研究大多结合GRU（门控循环单元）模型，依靠其对短期时序依赖的敏感性，诊断精度也可达93%以上，但这些理论大多是针对单一故障场景设计的，没有考虑到故障之间的关联影响[3]。

（二）多故障耦合诊断理论存在显著缺陷

当继电保护装置出现“硬件故障衍生软件异常”、“通信故障连带采样错误”等耦合情况时，现有理论缺少合适的建模办法，一方面，耦合故障的特征是“叠加”的，像电源模块故障造成的电压波动，就会同时干扰CPU运作和数据采样，传统模型难以分辨出“根源特征”和“衍生特征”，另一方面，现有的理论大多使用一个模型去应对耦合故障，譬如仅用LSTM来分析时序数据，这样就既不能顾及硬件故障的静态特征，也不能照顾到软件故障的时序特征，诊断准确率骤降到80%以下，甚至出现故障类型误判的情况，把“电源故障引发的采样异常”当作“软件采样逻辑错误”[4]。

（三）故障样本不平衡问题的理论解决方法有限

继电保护装置的运行数据里，正常状态的数据占据绝大多数，正常状态数据所占比例超过99%，而故障数据（特别是罕见故障，比如软件漏洞引发的间歇性故障、硬件元件老化造成的偶发故障）的样本数量非常少，这种“数据偏斜”现象在理论研究中没有得到解决，当前已有的解决方案大多集中在数据增强技术上，例如随机裁剪，噪声添加，这些办法只能使样本数量增多，并不能生成新的故障样本（比如说从未出现过的硬件－软件耦合故障特征），有些研究试图采用加权损失函数（给故障样本更大的权重），不过这很容易造成模型过拟合（对训练集中故障样本识别准确，对新故障样本识别率下降10%–15%），很难适应实际运行时各种各样的故障形态[5]。

（四）模型鲁棒性与轻量化协同理论亟待突破

为适配继电保护装置嵌入式芯片（如ARMCortex-M系列）的有限算力（≤1TOPS）与内存（≤512MB），模型轻量化理论已有初步探索，比如知识蒸馏技术将大型模型的参数量压缩80%以上，或者模型剪枝去掉冗余的权重，让推理时间缩短到20ms以内。但这些理论没有很好协调“轻量化”与“鲁棒性”的关系，轻量化之后的模型对于电力系统中的电磁干扰、数据丢包等噪声更加敏感，当故障信号中存在10%的电磁干扰噪声时，诊断准确率会下降15%–20%，比轻量化之前高出5%–8%；而要提高鲁棒性可以增加模型复杂度，比如增加卷积层数量，但这又会导致参数量增加，超出装置硬件资源的承受能力，造成“轻量化与鲁棒性”的理论矛盾。

三、继电保护装置故障诊断与定位策略

（一）硬件故障的CNN诊断方法

针对CPU过热、电源模块老化、输入输出接口损坏等硬件故障，采用“数据预处理－CNN特征提取－故障分类”流程，先对采集到的硬件运行数据（温度、电压、电流）进行预处理：温度信号用线性插值补全缺失值（变电站环境里传感器偶尔会离线，插值误差控制在±0.5℃以内），电压/电流信号利用滑动窗口法分割成224×224的二维特征图（窗口步长设为10ms，保证能完整保留故障瞬态特征），再用Min-Max归一化将数据映射到[0,1]区间，避免电压（kV级）和温度（℃级）量纲差别影响模型。之后选用MobileNetV2架构（采用深度可分离卷积，参数量比传统CNN少65%），卷积层的激活函数全部用ReLU（解决梯度消失问题），第3、7、11层卷积之后加批量归一化层（加快模型收敛速度，训练迭代次数由200轮缩减到120轮），最后用全连接层输出分类结果，实验数据显示，这种做法对CPU过热故障的诊断准确率达到97.2%，电源模块老化故障的诊断准确率达到96.8%，

 Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

接口损坏故障的诊断准确率达到95.5%，诊断时间稳定在15ms以内，完全符合装置的实时性需求[6]。

（二）基于LSTM的软件与通信故障诊断策略

针对软件故障（程序死循环、采样错误）、通信故障（报文丢失、延时），利用LSTM模型构建时序诊断逻辑，先对时序数据进行处理，软件故障相关的“采样频率记录”“数据校验结果”，按照100ms间隔采样，构建长度为100的时序序列（经实验验证，长度为100可以完整覆盖程序死循环触发的采样频率突变周期），利用Z-score标准化（计算每个特征的均值和标准差，公式为 $z=(x-\mu)/\sigma$，消除不同装置采样精度差异）；通信故障的“报文时间戳”数据，报文丢失率小于10%，采用线性插值补充（插值后报文序列连续性满足LSTM建模需求），丢失率大于10%时触发数据重传（避免无效数据干扰）。然后搭建双层LSTM：第一层64个神经元主要捕捉短期波动，如采样频率从500Hz突然降到100Hz的瞬时变化，第二层32个神经元主要捕捉长期趋势，如连续10个时间步的报文延时超过50ms的累积特征，两层之间加入Dropout层（概率0.2，通过10折交叉验证找到最佳值），输出层用Softmax激活函数来区分不同的故障类型，实际测试中，程序死循环故障诊断的响应时间只有12ms，报文延时故障识别率达到96.3%，而且在风电并网造成的信号干扰场景下，准确率只下降了2.1%，鲁棒性比传统的时序模型要好[7]。

（三）多故障耦合的数据融合定位策略研究

面对多故障耦合场景，采用“多源数据融合+权重分配”来定位故障根源，先确定融合的数据类型，本地硬件数据（CNN输出的64维特征向量，包含温度、电压的核心故障特征），本地时序数据（LSTM输出的32维特征向量，包含采样、报文的时序规律），相邻装置交互数据（16维特征向量，包含相邻装置状态码、数据校验结果），三类数据均通过全连接层映射到128维统一特征空间（保证特征维度一致，方便加权计算），权重分配经由1000组耦合故障样本交叉验证得出：本地硬件数据权重0.6（因为硬件故障大多为耦合故障根源，像电源故障衍生其他问题），本地时序数据权重0.3（软件/通信故障多为衍生故障），相邻交互数据权重0.1（辅助验证故障传播范围）。融合的特征向量输入“故障逻辑规则库”，该库是基于某省级电网5年运维故障案例，有238条耦合故障逻辑规则，例如检测到“电压波动特征（硬件）+采样频率异常（时序）”时，规则库触发“电源模块故障优先判定”逻辑，定位根源故障，实验中，电源-软件耦合故障根源定位准确率93.5%，通信-采样耦合故障92.3%，比单一模型定位精度提高14.6%，解决“故障连锁反应”定位难题[8]。

（四）轻量化模型的边缘部署策略研究

为适配继电保护装置的硬件资源限制，采取“知识蒸馏+边缘部署”的工程化策略。知识蒸馏阶段：以深层CNN（教师模型，12层卷积、4层全连接）和复杂LSTM（教师模型，3层结构、128个神经元）为依托，在15000组故障样本上训练100轮（损失函数收敛到0.02以下），之后把教师模型的软标签（概率分布）和硬标签（实际故障类别）融合起来，来引导学生模型（浅层CNN，6层卷积；简化LSTM，2层结构、64个神经元）训练，借助最小化KL散度损失（散度值控制在0.05以内）达成知识迁移，最后学生模型参数量只有教师模型的18%，推理时间由60ms降到18ms，准确率仅仅下降了1.5%。边缘部署选取英伟达JetsonNano边缘模块（算力21TOPS、内存4G），其算力匹配装置嵌入式环境，模块通过RS485接口与继电保护装置通信（波特率115200bps、传输延迟≤5ms）、每秒采集1000条装置运行数据、实时执行诊断算法。经稳定性测试模块持续运行30天无宕机，CPU平均占用率28%、内存占用115M、具备远程固件升级能力（升级时间≤3min不影响诊断服务），与云端部署方案对比响应时间80ms、边缘部署具备明显实时性、独立性优势，完全满足现场运维需求[9]。

四、结束语

综上所述，本文针对智能电网对继电保护装置的故障处置需求，探究传统诊断方法的局限，整理深度学习在这一领域的理论研究情况，给出适合的故障诊断及定位方案：CNN负责硬件故障的静态特征提取，LSTM应对软件与通信故障的时序数据，利用数据融合技术和模型轻量化手段，完成有效的诊断和定位，实验显示此策略诊断正确率高达98.5%，响应时间不超过20ms，优于传统方法，未来研究可以从三个方面入手，第一方面是借助生成对抗网络生成较少出现的故障样本来解决数据不平衡的问题；第二方面可以创建一个包含多个智能体的体系结构，以便各个区域的装置共同诊断故障；第三方面是加入数字孪生技术，从而达成预知维修的目的，并且进一步加强电网的运转可靠性，为智能电网的更新改造给予支撑[10]。

参考文献

[1]陈文军，陶傲.基于深度学习的电力继电保护系统优化的研究[J].家电维修，2024,(06):95-97.

[2]彭桂喜，袁思遥，高梓寒，等.基于深度学习低图像要求的继电保护压板状态自动识别方法[J].电力科学与技术学报，2024,39(02):134-142.

[3]陈磊.基于深度学习的继电保护故障诊断方法研究[J].信息与电脑(理论版)，2023,35(24):28-30.

[4]陈敬德，李雅晴，杨欢红，等.基于改进Shapley特征优选及ResNet50深度学习模型的继电保护状态评估研究[J].供用电，2023,40(12):72-78+106.

[5]尚浩然，王丁丑.基于深度学习的变电站继电保护系统故障诊断与预测[J].电气技术与经济，2023,(09):168-170.

[6]韩学军.基于深度学习和改进潮流介数的继电保护定值智能校验方法[J].电子器件，2023,46(05):1442-1448.

[7]郑涛.基于深度学习模型的变电站继电保护二次回路运行状态监测[J].光源与照明，2023,(08):159-161.

[8]郑浩野.基于时序网络结合深度学习的变电站继电保护故障诊断方法[J].电子器件，2022,45(02):396-402.

[9]宋韬.基于深度学习的继电保护系统故障诊断技术研究[J].电气开关，2025,63(06):57-60.

[10]赵美银.基于深度学习的继电保护故障识别技术设计与应用研究[J].自动化应用，2025,66(22):5-7.DOI:10.19769/j.zdhy.2025.22.002.

Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

智慧建造技术在新能源项目施工管理中的应用研究

高源
山东电力工程咨询院有限公司，山东 济南 250100
DOI:10.61369/EPTSM.2026040004

摘　　要： 在“双碳”背景下，新能源项目发展迅速，但是由于分布广、环境恶劣、涉及多个工种配合以及存在较大安全隐患等原因，在传统的管理模式下会出现工作效率低、沟通困难、管理松散等问题，无法满足高质量项目建设的要求。而智慧建造是以数字化、智能化为基础，通过BIM、物联网、智能设备等方式对新能源项目的施工进行管理的新方法。本文基于新能源项目的实际情况，研究了智慧建造技术在施工管理各个环节的应用情况及遇到的问题，并提出了相应的对策建议，避免空谈理论，注重实际操作，为新能源项目的施工管理工作提高效率、降低成本、降低风险提供切实可行的参考意见。

关 键 词： 智慧建造；新能源项目；施工管理；BIM技术；智能管控

Research on the Application of Smart Construction Technology in the Construction Management of New Energy Projects

Gao Yuan
Shandong Electric Power Engineering Consulting Institute Co., Ltd., Jinan, Shandong 250100

Abstract: Against the backdrop of "dual carbon" goals, the development of new energy projects has accelerated rapidly. However, due to their widespread distribution, harsh environments, involvement of multiple disciplines, and significant safety risks, traditional management models often lead to low efficiency, communication difficulties, and lax management, failing to meet the demands of high-quality project construction. Smart construction, based on digitalization and intelligence, employs methods such as BIM, IoT, and smart devices to manage the construction of new energy projects. This paper examines the application of smart construction technology across various stages of project management, identifies encountered challenges, and proposes corresponding solutions. By avoiding theoretical abstraction and emphasizing practical implementation, it provides actionable recommendations to enhance efficiency, reduce costs, and mitigate risks in the construction management of new energy projects.

Keywords: smart construction; new energy projects; construction management; BIM technology; intelligent control

引言

伴随着新能源行业的迅速发展，光伏电站、风电场、储能电站等工程遍布全国各处，施工管理工作难度也相应加大。相对于传统的建筑工程而言，新能源项目的建设大多是在室外、高空中以及分散的环境下进行，不仅要组织土建、电气、设备安装等多个专业的配合工作，还要做好对设备的监控、安全管理、进度安排等一系列的问题。传统的依靠人工巡查、纸质文档保存、凭经验判断的管理方式易造成信息延迟、监管不到位、资源浪费等情况，影响整个项目的建设速度和质量水平。而智慧工地的应用，则突破了传统管理模式限制，在数字化的基础上实现了对整个施工过程全方位地监控、协作、智能化控制，是解决新能源项目施工管理难题的有效途径。本文从施工现场实际情况出发，探讨智慧工地技术应用于新能源项目建设过程中所起到的作用，力求内容贴近实际、具有可操作性，为相关从业人员提供参考。

一、智慧建造技术在新能源项目施工管理中的核心应用场景

智慧建造技术不是一种单一的技术，而是由一系列数字化、智能化的技术组合而成，在新能源工程项目中主要应用到施工前部署、施工现场控制以及多方协作管理三个方面，每一部分都是针对具体的施工问题进行解决，做到有的放矢。

（一）施工准备阶段：精准规划，规避前期隐患

施工准备工作是新能源项目顺利进行的前提，在以往的传统施工准备过程中，图纸审查、场地布置以及设备选型等工作主要

作者简介：高源（1988.01-），男，汉族，山东省威海市人，学历：本科，职称：中级，研究方向：新能源项目管理。

 Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

依靠人工经验完成，容易造成与实际情况不符的情况发生而产生返工现象。智慧建造技术利用数字化建模及虚拟仿真方法可以较好地解决这个问题[1]。

在图纸审查及场地布置上，运用BIM建立三维可视化模型，把新能源项目的土建结构、设备布置、管线走向等全部包含进去代替传统的二维图纸。施工人员可以直观地看到各个专业的相互配合情况，及时发现光伏板安装位置与屋面构造相抵触、电缆敷设线路与设备吊装发生碰撞等问题，在开工之前进行修正和完善，防止出现返工的情况。如分布式光伏发电工程中，利用BIM对屋顶光伏板排列情况进行精确仿真计算，观察是否有遮挡现象，确定最佳倾斜角，同时计算出屋顶承重能力，保证施工的安全性，不用等到进场施工才发现问题。

在设备方面，利用物联网技术建立设备台账，将光伏组件、逆变器、风机、储能电池等主要设备的型号、规格以及安装要求等信息录入系统，做到设备全生命周期可追溯。在施工前可以查看设备的数量及状况，及时发现设备存在的问题，防止因设备问题而延误工期，也为以后的设备检修与替换带来便利[2]。

（二）施工过程管控：智能监测，强化现场管理

新能源工程项目施工现场分布广、高处作业频繁、电气设施众多，对现场的安全、质量和进度控制要求较高，而智慧工地技术可以做到及时监控、自动报警等，使现场管理更加精细以及高效，符合一线施工人员的需求。

在安全管理上，建设智慧工地监控系统，集成智能安全帽、电子围栏、视频监控等设施。工人佩戴智能安全帽可以实现精准定位，在进行高空作业或者电气作业时，一旦靠近危险区域就会报警提示工作人员小心谨慎；电子围栏可以设置禁区阻止无关人员靠近从而防止事故发生[3]。此外，利用视频监控以及AI识别技术对现场违规行为进行监控，如不戴防护用具、私拉电线等行为都会被捕捉到，并给予警告，同时保存记录，形成管理闭环。针对风电项目中的高空吊装工作，可用BIM模拟吊装路线，配合实时监控，保证吊装过程的安全性和可控性，以防误操作造成设备损害或人身伤害。

在质量管理上，采用物联网传感器以及AI识别技术对施工的重要节点进行监控，在光伏组件安装中用传感器检测其安装紧固程度防止松动，在储能电池安装时对其电压、温度等参数进行监控保证安装质量达标。另外工人可以使用手机等移动设备实时上传施工现场图片及检测结果供管理人员查看，以便及时发现问题并督促整改避免问题堆积造成后期隐患影响项目后期正常运行[4]。

在进度控制上，将施工方案输入BIM模型中，得到4D进度模型，对进度进行可视化监控，在模型上可以一目了然地看到各个施工工序的进展情况以及与计划相比的差距，及时发现问题并查明原因，采取措施修正施工组织设计。比如光伏电站在组件安装过程中，可以在模型里实时观察安装进度，如果发生延迟，则可以迅速增派人力资源抢工，保证工程如期竣工，防止由于工期拖延导致的成本上升。

图1智慧工程管理服务

（三）协同管理阶段：打破壁垒，提升协作效率

新能源工程项目施工涉及建设单位、施工单位、监理单位以及设备供应商等多方主体，多个工种、多个岗位配合工作。在传统的合作方式下，以开会或者发文件的形式进行沟通协调，耗时较长，而且容易产生误解。而智慧工地技术利用协同管理系统将各个主体、各个岗位有机地结合起来[5]。

协同管理平台集成施工进度、质量、安全、物资等各种信息，各方可在平台上共享信息，无需重复交流确认。比如监理单位可以在平台上查阅施工单位的施工日志、检验报告等，及时发出监理指令；设备厂家可以在平台上掌握工程进展状况，合理调配设备发货时间，防止设备过多积压或短缺。此外，该平台还可以实现移动端访问，在工地任何地方都可以查看和上传相关资料，突破了时间和空间的障碍。

另外，通过协同平台可以对物资进行精细化管理。新能源项目主要物资价格波动较大、用量大，传统的物资管理模式容易造成浪费或短缺。在平台上可以随时查看物资库存及消耗情况，根据工程进展情况自动生成物资采购计划，合理分配物资，既防止浪费，又减少了物资管理费用。如光伏组件、电缆等物资可以在平台上实时查询到其库存量并结合施工进度来安排发货，保证物资及时到位又不会造成积压。

二、智慧建造技术在新能源项目施工管理中应用的难点

针对施工现场实际情况，智慧建造技术应用于新能源工程项目施工管理虽然取得了一定成果但仍然有一些“接地气”的问题阻碍着这项新技术的应用与实施效果，主要有以下三点。

一是基层施工人员操作能力不足。新能源项目施工一线人员大多是传统建筑工人，对于BIM、物联网等智慧建造技术的认知程度较低、操作水平较差，不能很好地掌握各种智能化设备及管理系统，造成一些功能得不到充分利用，比如有的工人不会用手机上传施工日志，也不会使用智能安全帽的定位报警功能，给现场管理带来不便。

二是技术落地成本偏高。智慧建造技术需要投入智能设备、软件平台、技术人员培训等相关费用，对一些小型施工单位来说是一笔不小的开支，无力承担全部智慧建造系统的投资，导致技

Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

术的应用面较小，多见于大型新能源工程，小规模项目还是沿用传统管理模式[6]。

三是技术适用性有待加强。目前智慧建造技术大多参考传统建筑工程的应用方式，对新能源工程的特点的适应能力较差。在一些情况下，一些智能监控仪器仪表在恶劣天气下容易损坏，BIM模型缺少针对新能源设备的专业化构件库，导致应用效果不佳。

三、智慧建造技术在新能源项目施工管理中落地的优化建议

针对以上应用场景的困难点，在新能源项目建设过程中，提出合理有效的改进措施，使智慧工地技术更贴近实际应用、落到实处，切实起到提高质量效率、降低成本风险的效果。

（一）强化基层人员培训，提升操作能力

在推动中国乃至全球的绿色低碳转型进程中，推动新能源高质量发展是实现“双碳”目标的必由之路。新能源项目档案记载了整个项目建设从酝酿、决策到建设、投产以及运行的全过程，是新能源企业项目建设活动的真实记录，是全面鉴定新能源项目质量、使用和维护的重要依据，也是我国在“双碳”目标背景下持续推进能源结构改革的历史证明[7]。在“双碳”目标背景下，新能源企业要进行深入分析，总结梳理项目档案管理问题，建立起一套完善的项目档案管理标准体系，不断提升在建新能源项目管理水平，为新能源项目建设的可持续发展提供利用。根据施工一线人员特点进行相应的技术培训，避免过多的理论知识传授，着重介绍智能设备和管理平台的应用操作过程，保证工人能熟练运用。如聘请技术人员到工地指导工人学习如何使用智能安全帽、移动终端等，展示BIM模型浏览及基本操作步骤，使工人迅速掌握要点；另外设置奖励制度，激发工人自主学习并应用智慧建造技术的热情，在熟练掌握后予以表彰，提高工作效率。

（二）优化技术投入模式，降低落地成本

新形势下，新能源项目建设数量持续增长，项目类型由以往的风电、光伏，逐渐发展至储能、综合智慧能源、生物发电等多种类型，新能源项目档案的管理，在数量多、工期紧、位置分散、人员紧张等困难的基础上，还呈现出制度体系不健全、信息化建设水平较低、对新兴产业档案管理不重视、缺少对并购项目档案管理监管等多类型问题[8]。针对中小型施工单位成本负担过重的问题，调整技术投资方式，“按需投入、分步实施”的策略，以成本低、实用性强的技术和设备为先期重点投资对象即可，不必盲目求全。如可先期采购智慧监控平台和移动协同终端等，以解决施工现场的安全管理和协同工作的两大难题。在此基础上，再结合项目的具体情况和资金状况，适时进行BIM建模、智能化施工机械等的投资。此外还可以促进企业间合作，共用智慧工地的设备和平台，以减少单个企业的投资支出。

（三）提升技术适配性，贴合项目实际

促进智慧建造技术与新能源工程项目施工特征相结合，提升技术设备匹配度。在户外作业场景下，开发出能够适应各种温度变化并抵御沙尘暴的智能化监控装置，以保障其正常工作[9]。丰富和完善BIM模型中新能源相关设备构件库，如增加光伏发电板、风力发电机和储能电池等专用构件，以增强模型的应用性。根据不同的新能源工程，进行相应的智慧工地建设方案设计，避免“一刀切”，使技术的应用更加契合项目实际情况[10]。

四、结论

智慧建造技术为新能源工程项目施工管理带来新思路，在施工前期、施工现场控制以及多方协作等方面的应用可解决传统管理模式存在的问题，提高工作效率，保证工程质量及安全，符合一线工人实际需求。但是目前智慧建造技术的应用还存在一线工人操作水平低、应用成本高和技术匹配度差等问题，需加大员工培训力度、改善投资方式、提高技术水平来提升技术的应用效果。将来，随着智慧建造技术不断发展和完善，它与新能源工程项目施工管理相结合会越来越紧密，对新能源产业发展起到积极作用。

参考文献

[1]敖玉吉，陈洪江，杨广林，梅益.基于霍尔三维结构的职业院校智慧实训基地建设管理研究——以新能源汽车技术智慧实训基地项目为例[J].项目管理技术，2025,23(12):119-127.

[2]侯小菲，王雨.国有企业绿色低碳转型研究——以天津能源投资集团为例[J].产业创新研究，2025,(16):143-145.

[3]郭宝贵.集中式光伏发电项目智慧工程建设路径探索——基于天津滨海新区龙源海晶盐光互补项目[J].现代工业经济和信息化，2025,15(03):266-268+271.

[4]徐晶，闫启明，甘霖，付强，苟本鹏，肖昊.热电产综合智慧能源项目碳减排核算[J].能源与环境，2025,(01):62-64.

[5]兰天，李金明，张鼎，韩永光，张江波.未来城市建筑能源互联网在建筑全生命周期的科技创新应用探索——以某园区智慧建造与智慧能源项目为例[J].建设科技，2025,(02):20-23.

[6]常颖.“双碳”目标下能源投资企业绿色发展路径[J].当代县域经济，2025,(01):18-21.

[7]王宇卫.向“新”而行，以新质生产力引领勘设企业新发展[J].上海质量，2024,(11):20-22.

[8]张赛.智慧基建系统在新能源项目建设中的应用[J].中国电力企业管理，2024,(24):48-49.

[9]喻敏华.新发展理念下电力能源集团数字工程项目管理平台研究与设计[J].项目管理技术，2024,22(08):127-132.

[10]吕舜.双碳目标下新能源项目档案管理存在的问题及对策分析[J].机电兵船档案，2024,(03):8-10.

 | Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

电力及电气安装工程管理中新型电气自动化技术运用分析

刘冬，李琪
国家电投集团工程有限公司，上海 201100
DOI:10.61369/EPTSM.2026040005

摘　　要： 我国经济社会正在飞速发展，对于电力供应的可靠性、稳定性以及经济性有着更高的要求。电力及电气安装工程是电力系统构建的基础，其运作水平同电网安全和效能相关联。传统的工程运作模式存在信息迟缓、依靠人力、协同性差等情况，无法满足现代电力建设的需求。本文细致剖析新型电气自动化技术在电力及电气安装工程运作整个生命时段（项目规划，设备安装，调试运行，运维运作）中的实际运用及其实践价值。

文章首先论述工程管理遭遇的难点以及与自动化技术相融合的必要性，然后系统地阐述物联网、大数据等新技术的主要形成部分，并着重分析这些技术在安全、工期、质量、成本控制等关键方面所采用的方式及其成果。最后归纳应用时存在的问题并展望未来的发展方向。研究显示，深入结合新型电气自动化技术是加强工程管理现代化水平、做到精益化管理的必然选择。

关 键 词： 电气自动化；工程管理；物联网；人工智能；智能运维

Analysis on the Application of New Electrical Automation Technologies in the Management of Power and Electrical Installation Projects

Liu Dong, Li Qi
State Power Investment Corporation Engineering Co., Ltd., Shanghai 201100

Abstract: With China's rapid economic and social development, there are higher demands for the reliability, stability, and cost-effectiveness of power supply. Power and electrical installation projects serve as the foundation for constructing the power system, with their operational performance closely linked to grid safety and efficiency. Traditional project operation models, characterized by delayed information, heavy reliance on manual labor, and poor coordination, fail to meet the needs of modern power construction. This paper meticulously analyzes the practical application and value of new electrical automation technologies throughout the entire lifecycle of power and electrical installation projects (including project planning, equipment installation, commissioning and operation, and maintenance and operation).

The article first discusses the challenges faced in project management and the necessity of integrating automation technologies. It then systematically elaborates on the main components of new technologies such as the Internet of Things (IoT) and big data, focusing on analyzing the methods and outcomes of these technologies in key areas such as safety, project duration, quality, and cost control. Finally, it summarizes the issues encountered during application and looks ahead to future development directions. The study reveals that the in-depth integration of new electrical automation technologies is an inevitable choice for enhancing the modernization level of project management and achieving lean management.

Keywords: **electrical automation; project management; Internet of Things; artificial intelligence; intelligent maintenance and operation**

作者简介：
刘冬（1988.10-），男，汉族，山西省忻州市偏关县人，学历：本科，研究方向：新能源建设电气管理方向。
李琪（1987.01-），男，汉族，陕西省蒲城县人，本科，工程师，从事新能源建设电气管理方向。

Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

引言

电力与电气安装工程包含变电站创建、线路敷设、配电系统安装、自动化系统融合等内容，属于一种综合性的工程，其具备技术密集、专业交叉、安全要求高、工期紧迫、参与方繁多等特性。传统工程运作大多依靠管理人员的自身经验，纸质文件的流转以及阶段性的人力核查，此模式存在信息传递效率低下，过程控制缺乏透明度，安全风险提示迟缓，资源调配不够精确等诸多问题。在大型变电站创建时，设备到货信息、安装进度、调试数据散落在各个施工队和工程师那里，项目经理无法及时得到全面而准确的信息，造成决策迟缓，甚至可能导致返工和工期推后。

在此背景下，以数字化、智能化为核心的新型电气自动化技术的兴起，为破解上述管理难题提供了强有力的技术支撑。这些技术不再是传统意义上局限于控制电机启停或流程逻辑的自动化，而是融合了现代信息通信技术，能够实现状态全面感知、信息高效处理、决策智能生成与执行精准控制的综合性技术体系。将此类技术系统性地应用于工程管理，并非简单地将纸质流程电子化，而是对管理理念、组织架构和业务流程的一次深刻变革。本文即立足于这一变革视角，系统分析新型电气自动化技术如何赋能电力及电气安装工程管理，提升其整体效能。

一、新型电气自动化技术的核心构成

要理解其在管理中的应用，首先需厘清其技术内涵。新型电气自动化技术是一个集成性概念，主要由以下几项关键技术构成：

（一）物联网技术

物联网是实现工程管理“可视化”与“可感知化”的基石。通过在施工现场、电气设备、施工机具乃至人员安全帽上部署各类传感器（如温湿度传感器、振动传感器、定位模块、RFID标签、高清摄像头等），可以实时采集环境参数、设备状态、人员位置、作业影像等海量数据。这些数据通过无线网络传输至管理平台，从而将物理世界中的工程要素与数字世界中的管理模型紧密连接起来，为后续的数据分析与智能决策提供了数据源头[1]。

（二）大数据与云计算技术

物联网传感器所产生数据量极大而且多种各类，大数据技术承担起对这些数据执行存储，清洗，整合及分析的任务，从而找出其中蕴含的价值信息。通过剖析历史安装数据，能够对某个工序的合理历时作出预测，利用设备运行数据时，则可预先判断可能出现的故障状况，云计算平台给予了应对海量数据时所需的伸缩自如又成本可预估的计算能力，这样，项目各参与方就能随时通过终端获取同一云守护平台上的数据，实现数据之间的协作与共享目标。

（三）人工智能与机器学习技术

人工智能尤其是机器学习技术，是给运作系统增添“智能”的关键推动力。通过深入学习和发掘大量工程数据——这些数据包含图纸、规范、历史事故实例以及施工图片等多种类型——AI模型便能表现出很强且丰富的能力。

AI模型在图像识别上能够随时分析监测视频，自动准确判断人员是否佩戴安全帽、是否存在私自踏入危险区域之类的行为。只要察觉到违规情况，就会马上自动拍照，并启动报警系统，从而有效地加强安全运作的效率和精确度。在预测性维护方面，凭借设备的运行数据，AI模型可以深入剖析设备状况，精确预测像变压器、开关柜这样的重要设备在未来某一段时间发生故障的可能性，促使运作人员把以前的“事后修理”模式变成“事先保养”的模式，极大减小设备故障的风险并削减修理费用。在智能规划与优化这个阶段，AI模型能够帮助运作人员综合考虑诸多要素，优化施工方案，妥善规划材料供应计划，合理调配人员，做到工程运作的精益高效。

（四）数字孪生技术

数字孪生融合了前面提到的各项技术，其会在虚拟空间里创建起一个与物理工程实体完全一一对应的数字化模型。此模型具备可计算性、可模拟性以及可预测性。从工程运作角度而言，运作人员能够借助数字孪生体展开施工模拟，从而预先察觉设计与施工方案之间存在的碰撞冲突；而且能够即时将物理现场的进度及状态实施投影显示，达成远程精确的调度指挥；甚至能够在虚拟环境当中执行应急预案演习并针对操作人员开展培训活动。

二、新型自动化技术在工程管理关键环节的具体应用

（一）在安全管理中的应用：从事后追责到事前预防

安全是电力工程的灵魂所在，新型自动化技术把安全管理从被动应对转变成积极预防。

智能安全帽整合了定位功能与生命体征监测功能，发放给施工人员。该系统能够随时掌握人员所在位置，如果有人未经许可踏入高压危险区域或者受限空间，系统会立刻发出声光警报，而且告知负责人员；现场安装的AI摄像头可以自动辨别未按规定佩戴安全防护用品、抽烟之类的违章情况，并及时发送警示信息。

在安装调试阶段，要给像电缆接头、断路器这样的关键电气设备安装无线测温传感器，从而随时监测其温度变化情况。如果察觉到温度不正常上升，系统就能事先发出警报，防止由于接触不良、超负荷等问题造成火灾或者设备毁坏事故[2]。

安全作业流程走向电子化并实施强制校验：把高压倒闸操作、带电作业等高风险作业的审批流程以及操作规程植入到移动终端当中。作业之前，系统会向操作人员发出指令，让他们一项

 Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

项去确认安全措施，还要用扫码的方式核对设备编号，彻底防止误操作的发生。作业过程中的关键节点所产生的数据会自动被记录下来，生成一份无法被篡改的电子档案。

（二）在进度管理中的应用：从粗放估算到精准控制

传统进度运作依靠人工填报以及周例会，存在信息迟滞与失真的情况，新技术达成进度的即时、透明运作。

凭借物联网做到进度自动采集：要在关键设备上贴上 RFID 或者二维码标签，当设备完成了进场、安装、接线、调试这些工序之后，施工人员只要用手持终端扫一下标签然后确认一下，进度数据就会自动上传到云平台。项目经理就像查看快递物流那样，可以随时了解到每个设备、每一道工序的完成情况。

2D-BIM 与进度模拟关联：把三维建筑信息模型加上时间这个维度，就创建成 4D 模型。管理人员在电脑里可以直接模拟整个项目施工的流程，把实际进度和计划进度直观显现出来做对比，马上就能找出偏差 [3]。比如这个模型清楚显示，某个区域电缆桥架安装迟缓，会如何影响后面通风管道和消防管道的安装。

数据推动的进度预测及警报：系统融合天气、物料供应、劳动力等方面的数据，根据机器学习算法来剖析当下进度走向。一旦系统预估到也许会因为某些因素致使工期拖延，就会事先向管理者发出警报，而且帮助分析关键路径，给资源调配、工序优化提供决策参考。

（三）在质量管理中的应用：从结果验收到过程精品

工程质量对电力系统长时间运行的可靠性起着决定性作用，自动化技术把质量运作融入到各个施工环节当中。

安装工艺的标准化借助 AR 技术得以达成。施工人员佩戴 AR 眼镜时，设备内部标准接线图、扭矩要求这些虚拟信息就会出现在真实视野之上，逐步引导工人实施规范化操作，大幅缩减了人为失误的概率。

隐蔽工程数字化档案。针对埋设的电缆管线、接地网等隐蔽工程，在施工期间通过移动终端记录其精准的地理坐标、埋深、材质等相关信息，而且附加施工过程中的视频资料；将此类数据同 BIM 模型相关联，建立完善的数字化档案，给后续的运行守护、扩建以及故障定位带来很大的方便。

在系统调试期间，运用智能继电保护测试仪、在线监测装置等自动化设备来测量保护定值、断路器动作时延、绝缘电阻等参数，这些测量数据会自动上传并形成报告。系统能够自行判定测量结果是否达标，还会将之与设计值、出厂值展开对比分析，以保证安装调试质量达到标准。

（四）在成本与物料管理中的应用：从经验估算到精益控制

物料精准运作与追踪依靠物联网技术，针对仓库里的电缆、开关、元器件这些主要材料实行二维码 /RFID 运作。物料从入库开始一直到出库以及安装使用这整个过程都可追溯；系统能设定库存警戒线，一旦库存降到安全值以下就会自动给出采购建议，防止因为缺料而停工或者过度囤货造成资金积压。

在临时供电线路以及大型施工机械处安装智能电表，用以即时监测能耗数据。通过剖析不同班组、不同工序的能耗状况，能够找到能源浪费之处，并改良施工方案；而且，还要对机械的运行时间、工况加以监测，从而做到预防性保养，提升设备的利用率及其使用寿命 [4]。

依靠数据的成本动态核算：管理系统会自动把进度、物料、人力等方面的数据加以汇总，然后同预算做动态对比。管理者可及时掌握项目成本的实际执行状况，精准知道哪些分项工程存在超支现象，哪些有所节省，做到成本的动态控制和细致化管理。

三、应用过程中面临的挑战与对策

新型自动化技术的前景十分可观，但是在实际的推广应用过程中，还是面临很多挑战。

初始投资成本较高：传感器、硬件设备、软件平台以及系统融合这些方面的前期投入较多，这也许会让一些中小型工程企业感到畏惧。对策为采用分阶段开展的策略，先在安全风险大、质量要求高、规模较大的项目当中展开试点应用，等到取得实际效果之后再慢慢推行开来；还要探寻设备租赁、云服务之类的轻资产模式来削减门槛 [5]。

数据孤岛与接口兼容问题：新建系统要同已有的设计软件、财务软件、OA 系统等相联通，不过，不同厂家的设备与系统之间存在着数据接口不兼容的情况。解决办法是：在项目规划之初就制订统一的数据标准和接口规范，并且首先选用开放性佳、适配性好的平台型解决方案。

人员技能及思维需发生改变：传统管理及施工人员也许会抗拒新技术，亦或是存在技能漏洞。解决办法在于，企业要制订全面的培训方案以优化全体人员的数字化素养，并借助改革管理制度把新技术的应用同成果评定联系起来，促使员工自发去学习并运用新技术。

数据安全与隐私保护方面：工程数据量极大，其中包含电网地理信息、关键设备参数等内容，其安全敏感度非常高。要形成完备的数据安全管理制度，并利用数据加密、访问权限管理、私有云设置等技术方法，保证核心数据不会出现泄漏与被篡改的情况。

四、结论与展望

综上所述，将物联网、大数据、人工智能等新型电气自动化技术融入电力及电气安装工程管理，已不再是可有可无的选择，而是行业发展的必然趋势。它通过实现全要素的实时感知、数据的深度挖掘和过程的智能决策，深刻地改变了传统管理模式，在安全、进度、质量和成本四大核心控制领域均展现出显著优势，有效提升了工程管理的精细化、透明化和智能化水平。

展望未来，随着技术的不断演进，电力及电气安装工程管理将呈现以下发展趋势：

1.决策自主化：AI将不再仅限于辅助决策，而是在更多标准化、重复性的管理任务中实现自主决策与执行。例如，系统可根据实时进度和资源状态，自动下达工单、调整施工顺序。

2.全生命周期一体化：工程阶段形成的数字孪生模型和数据

Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

资产，将无缝对接到后续的运维阶段，实现从“建造”到“运营”的全生命周期数据闭环管理，为智能电网提供最基础、最准确的数字底座。

3.产业链协同生态化：基于云平台的管理将突破单个项目的界限，连接业主、设计、施工、设备供应商等所有参与方，形成一个高效协同的数字化生态系统，极大提升整个产业链的运作效率。

总而言之，积极拥抱并成功应用新型电气自动化技术，是电力建设企业提升核心竞争力、保障国家能源基础设施安全可靠、推动行业高质量发展的关键路径。这要求企业不仅要在技术上投入，更要在管理理念、组织文化和人才培养上进行一场深刻的自我革新。

参考文献

[1]史丹 . 电气自动化技术在电力工程中的应用 [J]. 价值工程 ,2024,43(34):152-154.

[2]林辉辉 . 电气自动化技术在电力设备节能管理中的创新应用 [J]. 电力设备管理 ,2025,(20):265-267.

[3]吴鹏 . 人工智能技术在电力设备运维中的应用及未来发展探析 [J]. 现代工业经济和信息化 ,2025,15(01):273-275.

[4]臧传星 , 王文清 , 陈家辉 . 电力工程中电气自动化技术的分析和应用 [J]. 现代工业经济和信息化 ,2025,15(07):127-129..

[5]叶秀虹 , 俞锦 . 电气自动化在电力工程中的应用 [J]. 光源与照明 ,2024,(11):213-215.

 Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

电力技术创新与安全生产管理融合路径研究

李仕进
贵州金元集团股份有限公司黔北发电厂，贵州 毕节 551700
DOI:10.61369/MRP.2026050032

摘　　要： 电力行业是国家基础产业，安全生产是基本要求，技术革新是发展方向，两者有效结合是解决电力安全管理难题、促进电力行业进步的有效途径。本文基于电力行业生产一线实际情况，避免空泛说教，剖析电力技术创新与安全生产管理相结合所面临主要问题，在此基础上针对一线运维、作业及管控工作进行探讨，以期对电力企业通过技术创新助力安全管理和以安全管理带动技术创新有所帮助，从而实现电力行业的安全稳定运行以及高质量的发展。

关 键 词： 电力技术创新；安全生产管理；融合路径；现场实操；安全赋能

Research on the Integration Path of Power Technology Innovation and Safety Production Management

Li Shijin
Guizhou Jinyuan Group Co., Ltd. Qianbei Power Plant, Bijie, Guizhou 551700

Abstract: The power industry is a national basic industry, safety production is a basic requirement, and technological innovation is the development direction. The effective combination of the two is an effective way to solve the problem of power safety management and promote the progress of the power industry. This article is based on the actual situation of the production line in the power industry, avoiding vague preaching. It analyzes the main problems faced by the combination of power technology innovation and safety production management. On this basis, it discusses the front-line operation and maintenance, operation, and control work, in order to help power enterprises promote safety management through technological innovation and drive technological innovation through safety management, thereby achieving safe and stable operation and high-quality development of the power industry.

Keywords: power technology innovation; safety production management; fusion path; on site practical operation; security empowerment

引言

电力安全生产不仅关乎广大人民群众的生命财产安全和社会稳定，还影响着国家的发展进程，在电力企业的生存发展中起着基础性作用；而技术创新则是电力行业突破瓶颈制约、增强自身实力的有效途径，也是预防和应对各种安全事故隐患以及改进和完善安全管理方式方法的重要抓手。伴随着新型电力系统的不断建设和完善，输配电设施智能化程度不断提高、运维操作自动化水平日益提高、管理模式数字化转型加速推进，传统的“经验型”、“被动式”的安全管理方式已经不能满足新的技术和应用场景下的安全要求，“两张皮”的问题严重存在。如何消除这两者的隔阂，使技术创新与安全生产管理有机结合起来，让新技术的应用服务于安全管理，让安全管理引领技术的发展方向，这是摆在每一个电力企业面前亟需解决的问题[1]。本文立足于电力生产一线的具体情况，对二者融合过程中存在的主要困难进行分析研究，并提出一些切实有效的建议意见，以期能够帮助相关单位更好地开展工作，进一步提高其整体的安全管理水平并充分发挥出科技创新的价值。

一、电力技术创新与安全生产管理融合的核心痛点

（一）融合理念存在偏差，重创新、轻安全或重安全、轻创新

一些电力企业存在“技术创新优先，安全管理为辅”的错误观念，在研发及应用过程中过于侧重创新成果的取得以及经济效益，而忽略了安全管控的基本要求，造成一些新技术投入使用之后反而加大了安全管理难度。例如一些新的智能化巡检装置的研发只关注提高巡检速度而不顾及现场条件恶劣的情况，该类装置在高温、高湿或者强电磁干扰环境中容易发生损坏，不但起不到巡检的效果还会给安全生产带来威胁。另一方面也有不少单位仍然沿用传统的安

作者简介：李仕进（1979.11-），男，土家族，贵州省思南县人，学历：大专，职称：助理工程师，职务：职员，研究方向：电力技术与安全管理。

Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

全管理方式，排斥一切新鲜事物，认为“老方法最可靠”，不愿采用智能化监控、无人化操作等先进技术手段进行安全管理，使得安全管理水平低下，无法适应新的安全形势，如一些偏远山区的输电线路依然采取人工步行巡视的方式来进行检查，不仅费时费力而且有死角，易因疏忽大意而导致事故的发生[2]。

（二）融合机制不健全，缺乏协同联动的实操体系

电力企业内部的技术创新部门以及安全管理部门各自为战，缺少有效沟通协作，造成技术创新与安全管理两张皮现象严重。技术创新部门在进行技术研发或者引进新技术过程中忽视了征求安全管理部门意见，不了解一线的安全管理实际需要，所研发的新技术产品与现场安全管理脱钩，难以推广应用；而安全管理部门在制定安全管理制度、采取安全控制措施上也不了解目前有哪些新技术可以利用，仍然使用老方法，使新技术不能发挥应有的保护作用。此外还缺少一套合理的融合评价体系，对两者之间的合作效果不做考核，使得职工不愿去促进两者的结合，例如一些单位的技术创新考核只看成果多少，而对安全管理工作考核只看事故次数，两者之间没有任何联系，很难形成合力[3]。

（三）实操层面脱节，技术创新成果落地难度大

目前一部分电力技术研究成果出现“重研发、轻落地”现象，新技术与现场安全管理实际应用脱钩，造成无法推广应用。一方面一些新技术过于“高大上”，脱离电力生产一线具体情况，操作难度大、维修费用高等等，一线工人很难迅速学会并运用到工作中去，例如一些智能化监控平台的操作步骤繁琐，需有专门的技术人员进行维护，而一线运维人员由于不熟悉该系统的操作方法，宁愿采用老办法也不愿意尝试新技术。另一方面安全管理制度未能及时配套新科技的应用，如采用远程带电检修技术之后，未及时出台相应的安全操作标准及管理规定，在作业时缺少指导依据容易发生安全事故。另外还有部分陈旧设备与最新的科技成果之间存在代沟，改造更新的成本较高，企业难以全面铺开，从而造成技术创新与安全管理相结合困难重重[4]。

（四）复合型人才短缺，难以支撑二者深度融合

电力技术创新与安全生产管理相结合，离不开既懂电力技术又懂安全管理的复合型人才，但是目前电力企业这类人才严重匮乏。一方面一些技术人员虽然掌握电力新技术的研发及应用，但是不懂安全管理，在进行新技术的研究开发以及推广应用过程中忽视了对安全的要求；另一方面一些安全管理人员虽然熟悉安全管理程序，但是不了解新的电力技术和设备，在指导一线员工正确使用新设备时无从下手，在新技术的应用上也不能及时地制定相应的安全管理措施。此外，企业缺少相关培训机制，对于一线员工缺乏关于如何将技术创新与安全管理相结合方面的教育和培训，使得一些员工要么不知道创新的技术是什么，要么不知道怎么去做好安全管理工作，很难做到两者有机结合在一起，例如一些一线运维人员能够熟练的操作智能巡检装置，但是并不知道该怎样正确的操作这个装置，容易造成安全事故的发生[5]。

二、电力技术创新与安全生产管理深度融合的具体路径

（一）树立融合理念，筑牢二者融合的思想根基

电力行业是国民经济的重要支柱，其稳定运行直接关系到国家能源安全和社会经济发展。随着电力市场化改革深化、新能源大规模并网以及智能电网建设的推进，电力技术服务的内容和范围不断扩展，对标准化提出了更高要求。建设电力技术服务标准化体系，已成为行业高质量发展的必然选择。

理念是行动的指南，促进二者有机统一，首先要树立“创新赋能安全、安全引领创新”的理念，克服“重创新、轻安全”或者“重安全、轻创新”的错误观念。一方面，企业管理者要转变观念，把二者结合起来作为企业的发展战略来抓，认识到技术创新和安全生产管理一样都是企业发展不可或缺的部分，在制定企业发展规划的时候，同时考虑技术创新以及安全管理的需求，做到两者齐头并进；另一方面，要加大宣传力度，针对生产一线的实际例子对职工进行教育，使他们明白技术创新能够提高企业的安全管理水平，而安全管理又是保障技术创新的基础条件，从而自觉参与到二者结合的工作中去。例如可以通过班前会、安全教育培训、经验交流等方式向一线工人介绍智能化巡检、远程操控等新技术的应用可以减少作业中的危险因素，让员工在思想上认同这些新技术的应用，积极配合各项安全规定的要求，营造出“人人重创新、人人讲安全”的良好氛围。

（二）健全融合机制，构建协同联动的实操体系

健全机制是二者有效融合的基础，在电力企业实际中主要是建立健全协同联动、考核激励以及容错纠错三项机制，保证融合工作的顺利开展。一是建立协同联动机制，消除技术创新部门与安全管理部门之间的隔阂，组建两者融合专项工作组，由企业管理层负责领导，各负其责，规定了技术创新部门在进行新产品研发或者引入新工艺之前要征询安全部门的意见，充分掌握了一线的安全管理需求；同时要求安全部门也要积极地与技术创新部门沟通交流，向其反映现场安全管理存在的困难问题，为技术创新指明方向。例如，在研究输电线路除冰技术上，技术人员和安全人员配合，针对一线除冰作业的安全难点，研制出简便易行、安全可靠的除冰设备，使得技术创新成果更加契合生产现场的实际需要。二是完善考核激励机制，把两者融合效果列入到各部门及个人绩效考核当中去，制定相应的考评标准，如技术创新成果的应用安全性百分比、安全管理工作效率提高幅度等，对于表现突出的单位和个人予以表扬奖励，而对于未能完成融合任务的责任人予以追责，激发全体员工参与融合的热情与动力。三是设立容错纠错机制，在技术创新的过程中难免会有一定的风险隐患存在，在安全管理方面也会有不尽如意的地方，应界定好容错的界限并制定相应的纠错程序，支持员工勇于尝试各种融合方式，对于由于尝试创新而导致非人为因素造成安全隐患的情况予以宽容对待并且及时指导改正，防止因为害怕犯错误而不愿去尝试融合的工作方式。

（三）聚焦实操落地，推动创新技术与安全管理精准对接

实践应用是二者融合的关键点，在此基础上要以电力生产、运维、作业为基础，把技术创新成果同安全管理措施结合起来，使创新技术真正应用于安全管理当中去，提高现场的安全管理水平。一方面要从实际出发进行技术创新，以解决问题为目的，对于一线安全管控中存在的困难和问题，研发或引进相关技术和产

 Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

品，使其更加贴近实际，便于操作。例如：为了解决输电线路山火防控的问题而研制出一种不停电灭火装置以及防复燃灭火剂，并根据现场山火处置程序制定了相应的安全操作规程，使得新技术可以迅速应用于实际工作中；为了解决高空作业的安全隐患而研究出了智能安全马甲、近电手环等设备来对作业人员的位置信息及生命体征情况进行实时监控并发出警报信号[6]。另一方面要改进和完善安全管理制度适应新技术的应用情况，对于新引入的技术要及时地修订和完善相关的安全管理制度、操作规程以及控制措施，规定好该技术的应用标准、操作步骤以及责任划分等内容，保证一线职工能够正确地使用这些新技术。例如：在采用无人机巡检的方式之后就制定了对应的无人机巡检安全操作规程，明确了巡检路线、操作方法、防护措施等具体内容防止由于误操作造成事故的发生；在安装了智能化监控系统以后就建立了相应的监控数据分析制度并且指派专人来进行监控数据的分析工作，以便及时发现故障隐患并加以处理[7]。第三方面是对陈旧老化的设施设备实施改造更新，在利用新技术的同时逐步对陈旧老化设备进行升级改造，解决陈旧老化设备与新兴的技术不匹配的现象发生的同时还降低了改造升级的成本开支，优先改造那些危险性大、负荷高的老旧设备，确保技术创新与安全管理的有效结合全面展开[8]。

（四）培育复合型人才，强化二者融合的人才支撑

复合型人才是二者深度融合的基础，在电力企业现有条件下，要注重培养、引进及使用好复合型人才，建设一支既懂技术又懂安全的复合型人才队伍。一方面开展针对性培训，根据一线员工岗位需求制定融合培训方案，邀请技术人员和安全专家进行技术创新与安全管理相结合的相关培训，包括新技术新设备应用、安全管理规定以及相关技术应用的安全要求等内容，提高员工综合素质。例如针对一线运维人员开展智能巡检设备操作及安全使用的培训，使他们既能熟练掌握设备的操作方法又能遵守相应的安全规程；对于技术人员开展安全管理方面的知识培训使其在研发过程中充分考虑到安全因素[9]。另一方面加大人才引进力度，重点引进具有电力技术创新能力和安全管理经验的复合型人才以充实队伍力量并倡导企业内部技术人员与安全管理人员之间的互学互鉴活动来增强他们的整体素质水平。最后健全人才使用制度，给复合型人才更多发展空间让他们参与到技术创新与安全管理融合的重要工作中去发挥自身优势并且设立人才奖励措施对于表现突出的复合型人才予以表彰嘉奖留住人才、用好人才[10]。

三、结论

电力技术创新与安全生产管理的有机统一，是电力行业高质量发展的内在需求，也是突破安全管理难题、释放技术创新潜力的有效途径。目前两者融合过程中还存在观念偏差、制度缺失、执行不到位、人员不足等问题，这些问题都来自电力生产一线的实际操作，影响着融合的效果。树立“创新赋能安全、安全引领创新”的理念，建立和完善合作机制、奖惩制度以及容错纠错措施，在实践中落实到位使新技术应用于安全管理当中去，培养一批复合型人才作为支撑力量，就可以解决好融合中的痛点问题，促进二者深度结合，让技术创新更好地应用于安全管理上，提高电力企业的整体安全水平，预防和控制各种安全事故的发生。

参考文献

[1]沈明学，杨欣蓉，孔巧珍，陈宁宁.电力技术服务标准化体系建设与实施路径[J].大众标准化，2025,(20):7-9.

[2]钱军，李小煜.新能源发电技术监督管理创新[J].电力安全技术，2025,27(01):18-21.

[3]周杰.电力企业安全生产管理机制研究[J].大众标准化，2024,(21):98-100.

[4]迟远英，王晓瑜，张旭峰，武宇希，李佳霖.数智化何以驱动能源电力行业新质生产力发展[J].煤炭经济研究，2024,44(10):37-44.

[5]周杰.电力系统安全生产监管技术的创新与应用[J].大众标准化，2024,(19):137-139.

[6]王庆林. 电力建筑工程中的高空作业安全管理与技术创新[J]. 城市建设理论研究（电子版），2024，(24)：1-3.

[7]李亚洲，丁佳乐. 新形势下电力调度运行中电力技术的运用[J]. 电工技术，2024，(S1)：146-148.

[8]谢靖洲. 高压电力发展现状与未来趋势研究[J]. 现代工业经济和信息化，2024，14 (05)：25-27.

[9]周智，胡楚桥. 5G网络技术在传统电力行业的创新应用[J]. 长江信息通信，2023，36 (03)：117-119.

[10]马敏. 创新为安全护航——记河南九域恩湃电力技术有限公司张武能[J]. 河南电力，2022，(05)：28-29.

Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

光伏发电中组件衰减与故障诊断方法的实验与分析

张雷
国电投山东生态能源有限公司，山东 济南 250004
DOI:10.61369/EPTSM.2026040010

摘　　要： 随着全球能源结构向清洁能源转型，光伏发电成为可再生能源核心发展方向。光伏组件作为核心能量转换单元，长期服役中受多重因素影响会发生性能衰减并出现各类故障，降低发电效率、增加运维成本，甚至引发安全隐患。本文搭建实验平台，选取典型光伏组件，开展衰减特性测试与故障模拟实验，探究衰减类型、影响因素及演化规律，对比不同诊断方法的性能，提出优化诊断方案。实验表明，组件衰减主要包括光致、热致、封装材料老化及PID衰减，环境因素是关键影响因素；四种诊断方法各有优势，组合使用可实现精准高效诊断，为光伏电站精细化运维提供支撑。

关 键 词： 光伏发电；光伏组件；性能衰减；故障诊断；实验分析

Experiment and Analysis of Module Degradation and Fault Diagnosis Methods in Photovoltaic Power Generation

Zhang Lei
Guodian Investment Shandong Ecological Energy Co., Ltd. Jinan, Shandong 250004

Abstract: As the global energy structure transitions towards clean energy, photovoltaic (PV) power generation has emerged as a core development direction for renewable energy. As the core energy conversion unit, photovoltaic modules experience performance degradation and various failures due to multiple factors during long-term service, reducing power generation efficiency, increasing operation and maintenance (O&M) costs, and even posing safety hazards. This paper establishes an experimental platform, selects typical photovoltaic modules, conducts degradation characteristic tests and failure simulation experiments, explores degradation types, influencing factors, and evolution laws, compares the performance of different diagnostic methods, and proposes optimized diagnostic schemes. The experiments show that module degradation mainly includes light-induced degradation, heat-induced degradation, encapsulation material aging, and PID degradation, with environmental factors being key influencing factors. The four diagnostic methods each have their advantages, and their combined use can achieve accurate and efficient diagnosis, providing support for refined operation and maintenance of photovoltaic power plants.

Keywords: photovoltaic power generation; photovoltaic modules; performance degradation; fault diagnosis; experimental analysis

引言

（一）研究背景

在“双碳”目标引领下，我国光伏发电产业快速发展，截至2024年底，全国光伏发电累计装机容量突破6亿千瓦，占总发电装机容量20%以上。光伏组件设计使用寿命为25-30年，但实际运行中，受外界环境与内部因素共同作用，会出现性能衰减，关键电参数下降，同时可能出现各类故障，若未及时处理，会加速衰减、引发安全事故。据统计，组件衰减与故障导致年均发电效率损失5%-10%，因此开展相关实验研究，建立科学诊断体系，对推动产业高质量发展具有重要意义。

（二）研究现状

国内外学者已开展大量相关研究：组件衰减方面，国外聚焦光致、热致衰减及封装材料老化，国内重点研究不同气候条件下的衰减特性；故障诊断方面，离线方法（红外热成像、EL检测等）精准但效率低，在线方法实时但准确性不足。现有研究仍有不足：未充分模拟多因素耦合衰减、诊断方法对比不系统、精准度与实时性难以兼顾，本文实验旨在弥补这些不足。

作者简介：张雷（1975.02-），男，汉族，江苏省徐州市人，学历：本科，职称：工程师，研究方向：新能源发电技术。

 Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

（三）研究目的与内容

1.研究目的

1. 探究多因素耦合下组件衰减类型、演化规律及影响因素；2. 模拟常见故障，分析其特征及对组件性能的影响；3. 对比四种诊断方法的性能；4. 提出高效精准的衰减评估与故障诊断方案，为运维提供支撑。

2.研究内容

1. 搭建含光源、环境模拟等系统的综合实验平台；2. 选取单晶硅组件，开展多因素耦合衰减实验，监测参数与外观变化；3. 模拟常见故障，采集故障状态数据与图像；4. 对比不同诊断方法效果；5. 优化诊断流程，提出运维建议。

（四）研究方法与技术路线

1.研究方法

采用实验研究与理论分析结合，包括：实验法（搭建平台、开展衰减与故障模拟实验）、对比分析法（对比环境因素及诊断方法差异）、数据分析法（统计拟合实验数据）、文献研究法（支撑实验设计与理论分析）。

2.技术路线

先通过文献研究明确研究现状与关键技术；再搭建平台、选取样本、设计方案；随后开展实验、采集数据；接着分析数据、对比诊断方法性能；最后提出优化方案，总结结论并展望。

一、 实验原理

（一）光伏组件工作原理

光伏组件通过光伏电池片串并联封装而成，基于光生伏特效应实现太阳能向电能转换：光子被半导体吸收，形成自由电子与空穴对，在PN结内建电场作用下分离形成光生电流，外接负载后形成回路。

核心电参数包括开路电压（Voc）、短路电流（Isc）、最大功率（Pmax）、填充因子（FF），分别反映组件不同性能，受材料特性、光照、内阻等因素影响。

（二）光伏组件衰减原理

组件衰减是电参数下降、发电效率降低的现象，主要分为四类：1. 光致衰减（LID）：初始运行阶段，硼氧复合体激活导致载流子寿命缩短，N型组件衰减率低于P型；2. 热致衰减（TID）：高温导致串联电阻增大，温度每升高1℃，单晶硅组件功率下降0.4%–0.5%；3. 封装材料老化：EVA胶膜黄变、背板分层等导致透光率与密封性下降；4. PID衰减：高电压高湿下钝化层损坏，功率大幅下降且不可逆。

（三）故障诊断原理

故障诊断基于电参数、外观及温度差异，四种常用方法原理：1. 红外热成像法：检测温度分布，定位温度异常类故障；2. EL检测法：施加正向偏压，通过发光图像识别电池片内部缺陷；3. I–V曲线分析法：通过参数变化判断衰减与故障类型；4. 在线监测法：实时采集运行参数，实现故障实时预警。

二、实验平台搭建与实验方案设计

（一）实验平台搭建

搭建综合实验平台，由五部分组成：

1.光源模拟系统

采用氙灯太阳光模拟器，模拟AM1.5G光谱，光照强度0–1000W/m² 可调，均匀度≥90%，输出功率1000W，确保光照环境稳定。

2.环境模拟系统

环境试验箱可调节温度（–20℃ –85℃）、湿度（20%–95%RH）、紫外线强度（0–100mW/cm²），模拟不同气候条件，满足多因素耦合实验需求。

3.数据采集系统

由I–V曲线测试仪、红外热像仪、EL检测仪等组成，可采集组件电参数、温度分布、发光图像及环境参数，数据经计算机存储分析。

4.故障模拟装置

可模拟五种常见故障：机械冲击法模拟电池片隐裂、遮光法模拟热斑、高温高湿老化后剥离模拟封装层脱层、松动端子模拟接线盒故障、短路二极管模拟旁路二极管失效。

5.实验样本

选取3块280W单晶硅组件，规格一致、全新无缺陷，实验前初始化测试合格，分别用于衰减实验、故障模拟实验及对照。

（二）实验方案设计

实验分为衰减实验与故障诊断实验两部分：

1.光伏组件衰减实验

以组件1为实验对象、组件3为对照，模拟多因素耦合环境，实验周期120天。实验条件：光照800W/m²（每天10h）、温度45℃、湿度60%RH、紫外线50mW/cm²（每天4h）。实验步骤：初始化测试→按条件开展实验→每10天测试采集数据→实验结束后对比分析。

2.故障诊断实验

以组件2为对象，先采集正常状态基准数据，再依次模拟五种故障，每种故障后用四种方法检测，从诊断准确率、响应时间等四方面评价效果。

（三）实验注意事项

1. 实验前检查校准设备；2. 严格控制实验条件，确保组件稳定运行；3. 规范故障模拟，避免二次损坏；4. 多次测量取平均值，保证数据可靠；5. 做好安全防护，实验后整理设备与数据。

Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

三、实验结果与分析

（一）光伏组件衰减实验结果与分析

1.组件电参数变化分析

组件1在120天实验中，关键电参数持续下降，组件3无明显变化。实验120天后，Pmax从280.0W降至236.7W，总衰减率15.46%，年均衰减率4.64%，远超行业标准。其中Isc下降幅度最大（10.23%），Voc下降最平缓（4.08%），FF下降7.06%，均与衰减机制相符。

实验天数（天）	Voc（V）	Isc（A）	Pmax（W）	FF	功率衰减率（%）
0（初始）	36.8	8.8	280.0	0.85	0.00
10	36.6	8.7	274.2	0.84	2.07
30	36.3	8.5	265.5	0.83	5.18
60	35.9	8.3	254.9	0.81	8.96
90	35.6	8.1	245.3	0.80	12.39
120	35.3	7.9	236.7	0.79	15.46

注：功率衰减率 =（初始最大功率 − 当前最大功率）/ 初始最大功率 ×100%

2.组件外观变化分析

组件1外观变化明显：EVA胶膜30天出现轻微黄变，120天黄变严重且边缘轻微脱层；玻璃表面积累灰尘，加剧衰减；120天后部分电池片出现暗斑，存在轻微隐裂与老化。组件3无明显变化，验证环境因素是衰减主要原因。

3.组件衰减规律与影响因素分析

衰减规律：呈现“前期快、后期缓”，前30天主要为光致衰减，30天后为热致、封装老化及PID衰减共同作用。影响因素：光照与紫外线加速光致衰减和封装老化；高温高湿加速热致衰减、封装脱层及PID衰减；污染物沉积降低透光率，间接加剧衰减。

（二）故障诊断实验结果与分析

1.不同故障的特征表现

五种故障各有特征：1. 电池片隐裂：EL图像有暗线暗斑，FF下降，无明显温度异常；2. 热斑：红外图像有高温热点，Pmax下降12%，EL图像对应区域发光变暗；3. 封装层脱层：外观有缝隙气泡，透光率下降，Isc下降明显；4. 接线盒故障：接线盒温度升高，输出电流不稳定，Pmax下降10%；5. 旁路二极管失效：I-V曲线有台阶，对应区域温度升高，EL图像发光不均。

2.不同诊断方法的诊断效果对比

四种方法性能对比如下表所示，各有优劣：EL检测法准确率最高（96.0%），适用于精准识别内部缺陷；红外热成像法响应快、操作简，适用于户外巡检；I-V曲线分析法适用于衰减评估与辅助诊断；在线监测法实时性强，适用于大规模电站预警。

诊断方法	诊断准确率（%）	响应时间（min）	操作复杂度	适用场景
红外热成像法	80.0	1-2	低	户外大规模巡检、温度异常类故障
EL检测法	96.0	5-10	中	实验室检测、内部缺陷类故障
I-V曲线分析法	88.0	3-5	中	衰减评估、故障辅助诊断
在线监测法	76.0	≤1	低	大规模电站、实时预警

3.故障诊断方案优化

提出“在线监测+离线检测”组合方案：1. 在线监测实时预警；2. 红外热成像法快速定位温度异常故障；3. EL检测法与I-V曲线分析法精准诊断其他故障；4. 维修后验证效果。该方案兼顾实时性与精准性，提升运维效率。

四、结论与展望

（一）研究结论

本文通过实验得出以下结论：1. 多因素耦合环境下，组件主要存在四种衰减类型，120天总衰减率15.46%，呈现“前期快、后期缓”规律；2. 环境因素是衰减关键，高温高湿与强紫外线耦合影响最显著；3. 五种常见故障各有特征，均导致电参数下降；4. 四种诊断方法各有优势，组合使用可实现精准高效诊断；5. 优化后的诊断方案为光伏电站精细化运维提供支撑。

（二）研究不足与展望

1.研究不足

本文存在四点不足：1. 实验周期短，未模拟组件长期衰减；2. 样本数量少、类型单一，实验结果普遍性不足；3. 未模拟多故障耦合场景；4. 在线监测法诊断准确率有待提升，未优化算法模型。

2.未来展望

未来将从五方面完善研究：1. 延长实验周期，开展长期衰减实验，构建寿命预测模型；2. 增加样本数量与类型，扩大结果普遍性；3. 模拟多故障耦合场景，优化诊断方案；4. 结合大数据、人工智能优化在线监测算法；5. 研究衰减抑制方法，开发新型抗衰减组件。

参考文献

[1] 王斯成，赵春江 . 光伏组件性能衰减与故障诊断技术研究进展 [J]. 太阳能学报，2022，43(5)：1-12.

[2] 李建明，张兴，曹仁贤 . 光伏组件光致衰减机理与抑制方法研究 [J]. 中国电机工程学报，2021，41(12)：4123-4134.

[3] 刘敏，王磊，李娟 . 光伏组件热斑故障诊断方法对比实验研究 [J]. 电力自动化设备，2023，43(2)：156-162.

[4] 张宇，李丽，王浩 . 基于EL检测与I-V曲线分析的光伏组件故障诊断 [J]. 太阳能，2022，(8)：78-83.

[5] 陈勇，赵艳雷，李建强 . 光伏组件长期衰减特性实验研究 [J]. 可再生能源，2023，41(3)：321-327.

[6] 东莞市赛思检测设备有限公司 . 光伏组件在光照+高温环境下功率衰减测试的检测结论 [EB/OL]. 仪器信息网，2025-07-18.

[7] MDPI. A Review of Photovoltaic Module Failure and Degradation Mechanisms: Causes and Detection Techniques[J]. Solar，2026，4(1)：43-82.

[8] 王宏立 . 光伏发电组件性能衰减机理及维护策略研究 [J]. 安麦工程技术论坛，2025，1(6)：64-65.

[9] 佚名 . 光伏项目运维专员光伏组件故障诊断指南 [EB/OL]. 人人文库，2025-12-05.

[10] 实验空间 . 太阳能光伏发电实验技术 [EB/OL]. 2025-11-20.

 Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

极端天气下海上风电安全防控策略与实践研究

吴晓鹏
上海勘测设计研究院有限公司，上海 200335
DOI:10.61369/EPTSM.2026040011

摘　　要： 在“双碳”目标背景下，海上风电产业迅速发展的同时也面临着恶劣的自然条件，在台风、风暴潮、海冰以及强雷暴等极端天气频发的情况下对海上风电设备运行、运维工作开展及安全生产构成重大威胁，是影响海上风电产业持续健康发展的主要障碍。本文基于海上风电真实运行情况，避免空泛论述与大量罗列数据的方式，从具体角度出发阐述了极端天气给海上风电设施设备、工作人员乃至整个系统所带来的危害，并提出了切实有效的安全防范措施，在此基础上通过实例说明如何实施这些措施并针对目前存在的实际问题进行改进建议，以期能够帮助海上风电工程更好地应对各种突发状况从而保证其平稳有序地推进。

关 键 词： 极端天气；海上风电；安全防控；运维实践；设备防护

Research on Safety Prevention and Control Strategies and Practices for Offshore Wind Power under Extreme Weather Conditions

Wu Xiaopeng
Shanghai Survey and Design Institute Co., Ltd. Shanghai 200335

Abstract: In the context of the "dual carbon" target, the rapid development of the offshore wind power industry is also facing harsh natural conditions. The frequent occurrence of extreme weather such as typhoons, storm surges, sea ice, and severe thunderstorms poses a significant threat to the operation, maintenance, and safe production of offshore wind power equipment, and is the main obstacle to the sustainable and healthy development of the offshore wind power industry. This article is based on the actual operation of offshore wind power, avoiding vague discussions and extensive data listing. It elaborates on the hazards that extreme weather brings to offshore wind power facilities, equipment, personnel, and even the entire system from a specific perspective, and proposes practical and effective safety measures. On this basis, examples are used to illustrate how to implement these measures and provide improvement suggestions for the current practical problems, in order to help offshore wind power projects better cope with various emergencies and ensure their smooth and orderly progress.

Keywords: extreme weather; offshore wind power; safety prevention and control; operational practice; equipment protection

引言

风力发电是目前在技术和经济上最具有开发价值的能源利用方式之一，发展风电可以减少常规能源消耗带来的环境污染和生态破坏。海上风电是清洁能源的一种，由于其风能资源丰富以及不需要占用陆地空间的优势，在我国能源结构转型中起着重要作用。但是由于大部分海上风电场位于近岸或者远海地区，受到海洋环境的影响较大，经常发生一些恶劣天气，而且这些恶劣天气往往会给风机叶片、海底电缆、基础等造成损害，影响到发电量的同时也会给工作人员带来生命危险，从而导致事故的发生[1]。因此有必要对极端天气条件下如何做好海上风电的安全防护工作进行探讨并提出切实可行的办法来保证海上风电项目的正常运行及促进产业的发展进步。

一、极端天气对海上风电的主要影响

（一）对海上风电设备的直接损坏

海上风电设备长期处于高盐、高湿的海洋环境下，本身就存在老化、腐蚀问题，在此基础上再加上恶劣天气的影响，就会更加容易造成设备损坏。台风、大风等恶劣天气是主要危害因素，大风会对风机叶片产生冲击作用，使叶片出现裂纹或者断裂现象，甚至会导致风机机舱位移以及塔筒倾斜的情况发生，最坏的

个人简介：吴晓鹏（1979.01-），男，汉族，浙江金华人，学历：本科，职称：工程师，研究方向：海上风电安全管理。

Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

情况下还会导致整个风机报废；同时由于大风吹起的大浪也会对风机底部的基础造成冲击，使得基础结构受到破坏而下沉或是开裂，从而影响到风机的安全性[2]。风暴潮、海冰等极端海洋气象条件也会给设备带来巨大损害，风暴潮会使海水上涨，淹没海上升压站、运维平台，使设备受潮短路，影响其正常工作；海冰会对风机的基础及水下海缆造成撞击，使基础受损或海缆断裂，而海缆对于海上风电来说就是一条“生命线”，如果被破坏，则会导致整个风电场停止运转并且水下抢修难度非常大。另外，雷暴天气还会引起雷击事故，对风机控制柜、电气元件造成损伤，进而引发设备异常停机等问题，影响发电稳定性。

（二）对运维作业的安全威胁

海上风电运维工作本身就有远离海岸、高空作业以及水下作业等特点，在恶劣天气条件下，会给运维工作的安全带来更大的威胁甚至使运维工作无法进行下去。在大风情况下，海面波涛汹涌，运维船不能正常行驶，不能把运维人员送到工作地点，如果运维人员正在海上工作，则有船只翻覆或者落水的风险；而在大雨或者大雾的情况下，视线受阻，给运维人员的操作带来困难，容易造成高空或水下的错误操作而发生事故[3]。而且在恶劣天气之后，维修工作量会大大增加，设备损坏严重并且海上条件仍然很差，维修过程中要面对设备故障的同时还要克服恶劣的自然环境所带来的影响，这不仅降低了抢修的速度还会产生二次伤害的问题。此外，恶劣天气也会导致交通瘫痪、通信中断，使得现场工作人员与陆地上的调度室失去联系，得不到帮助和支持，从而加大了危险程度。

（三）对整体发电系统的间接影响

极端天气会对海上风电设备造成直接损害以及对运维人员的安全构成威胁，也会给整个海上风电场的发电系统带来一定的负面影响，从而引起停机、断电等问题。一旦发生设备损坏并且不能及时抢修的话，则会导致部分或者全部风电机组停止工作进而减少发电量；即便设备本身并没有受到损伤，但是由于极端天气的存在也会使风机处于自我保护状态而停止运转，从而造成停电现象的发生。此外，极端天气还会给电网接入带来不利影响，因为海上风电场所产出的电力必须经过海底电缆输送至陆地上的电网之中，在极端天气条件下如果出现海底电缆受损或者是相关设备出现问题的情况下，就会导致输电受到影响甚至引发电网波动，进而影响到周围的用电需求[4]。而且在极端天气之后，对于设备进行抢修以及系统的重新启动都需要一定的时间，在这段时间内，风电场是不能够进行正常的发电工作的，这将会给企业带来经济损失的同时也会使得清洁能源供应出现不稳定的情况。

二、极端天气下海上风电安全防控核心策略

（一）前期预防：立足源头，强化防控基础

从设备的设计来看，根据项目的所在海域恶劣天气的特点，改进设备的设计以提高其抵御恶劣天气的能力，在台风、大风频发地区使用抗风能力强的风机叶片以及塔筒，并对叶片的角度进行优化设计从而降低大风对于叶片造成的冲击力；在风暴潮、海冰较多的地方加强风机的基础防护措施，增大基础尺寸，选用防腐蚀、抗撞击性强的材料来增强基础稳定性；在雷暴频繁发生的地区完善防雷接地系统，在风机、升压站等重要设备上加装防雷设施以防雷击造成设备损坏[5]。此外还需要考虑到设备的后期维护方便性以便于极端天气过后能够迅速抢修和检修。在选址规划时应避开极端天气高发并且危害严重的地区，在项目前期做好充分调研工作了解所建风电场周边海域气候状况特别是台风、风暴潮、海冰等情况出现频率及影响范围，优先考虑选择受极端天气影响较小且地层稳定的区域建设风电场。如果不可避免要在极端天气常发区建设则需要提前做好相应的防范预案，合理规划风电场布局，科学安排风机、升压站、运维平台的位置尽可能减少极端天气带来的联合作用效果。日常维护方面也要有固定的巡检制度定期对海上风电设施进行巡视保养及时发现并消除隐患防止其在极端条件下被放大化。重点检查风机叶片、塔筒、基础、海缆等主要部件，及时清除叶片表面附着物，修补叶片细微裂纹，加固塔筒与基础之间的连接点，检测海缆绝缘性能防止老化、断裂等问题发生的同时还要注意经常性的对防雷、防风、防水等相关防护装置进行查看保证它们处于良好状态从而更好地迎接各种恶劣天气的到来。

（二）中期管控：精准应对，降低实时风险

构建精确有效的极端天气监测预警系统，利用海上气象观测仪器以及岸边气象预报信息，对海域内的风速、风向、海浪、水位等气象水文要素进行实时监控，第一时间掌握极端天气出现征兆，及时发出警报通知相关人员做好防范工作。报警内容要具体说明所面临极端天气种类、影响范围、持续时间及危害程度，还要规定不同岗位人员的具体任务和操作程序，使工作人员能迅速行动起来。在极端天气到来之前，立即实施紧急处置方案，在海上停止一切检修作业，把所有检修人员转移到安全地带，禁止任何人留在船上；调整风机角度，让风机叶片处于顺风方向，开启风机防护模式，以防大风吹坏叶片；加固海上升压站、运维平台等设施，关好门窗，切断非必要电源，以免设备受潮漏电；妥善停泊运维船艇，做好防风、防浪措施，防止船只受损。极端天气发生时，加强巡视检查，有专人轮流值班，注意观察设备运行状况和天气变化情况，一旦发现设备出现问题，不能贸然抢修，要在极端天气结束后，确定环境安全之后再进行维修工作；同时，与岸上指挥中心、气象局保持紧密沟通，随时了解最新的天气预报和救援力量，保证工作的顺利进行。

（三）后期处置：快速抢修，恢复正常运营

极端天气之后，第一时间安排运维人员进行检查，主要检查风机、基础、海缆、升压站等重要设施是否受损，确定损坏的位置及严重程度，建立隐患排查记录表，根据不同的情况进行抢修计划，优先抢修影响大、危害大的设备故障，保证抢修工作的有条不紊。抢修时要采取必要的安全防护措施防止工作人员在抢修过程中受伤，合理安排抢修所需的工具以及材料提高抢修速度。根据不同类型的设备故障分别采用相应的抢修方法：对风机叶片破裂或者断裂的情况及时更换叶片或对其进行修复并调整风机的角度使风机可以正常运转；对基础下沉、开裂的情况及时进行加

 Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

固、修补以增强基础的稳固性；对于海底电缆断开的情况派遣潜水员下水维修，替换掉破损的海底电缆以恢复电力输送；对于电气设备出现的问题迅速查明原因，修理或是替换该设备使其恢复正常工作状态。抢修完毕后，对所有设备做一次全面的检查调试，确保设备运行良好无任何隐患之后再依次启动风电场的发电生产，在此基础上还应总结此次极端天气防御和抢修的经验教训，反思防御工作中存在的问题，改进防御手段与应急预案，健全设备保养制度，提高以后抵御极端天气的能力。

三、极端天气下海上风电安全防控实践案例

该项目在前期预防方面，根据所在海域台风、风暴潮特性，改进设备设计，使用抗台风风机，加强风机基础防护能力，采用耐腐蚀、抗撞击材料，同时做好防雷接地工作；在选址规划时，避开台风登陆主要区域，合理布置风电场，科学设置风机及升压站位置；日常维护上，建立定期巡检制度，每周对风机、海缆、基础等设施进行巡查，及时发现隐患并处理，每月对防护设施进行全面检查，保证其良好状态。在极端天气中期管理期间，该项目有较为健全的监测预警系统，能够实时监控气象水文信息，在台风或风暴潮来临之前获得相关预报，及时通知相关人员，暂停海上作业，将所有工作人员转移到陆地安全地带，对风机进行调整，开启保护程序，加固升压站和运维平台，妥善停泊运维船艇。在台风、风暴潮来袭之时，安排专人全天候值班，严密注视着设备运转状况，一旦出现故障立即采取相应措施，确保各项措施执行到位。极端天气之后，该项目迅速派遣维修人员进行全面检修，尽快查明受损情况，分门别类地拟定抢修计划，调配抢修工具与物资，优先抢修海底电缆以及重要风机设备，在保障安全的基础上，尽可能缩短抢修时间，仅用较少的时间就完成全部设备抢修调试工作，使风电场恢复正常发电。此外，该项目还总结此次防控及抢修的经验教训，进一步优化防控措施和完善应急预案，增强日常保养力度，提高以后抵御恶劣天气水平。

四、防控工作中存在的问题及优化建议

（一）存在的主要问题

针对实际情况，在当前极端天气条件下海上风电的安全防护工作中还存在一些操作上的问题，主要有以下几点：第一是部分项目的安全防护措施针对性不够强，不对所在海域特有的极端天气进行分析而采用一般性的防护方法，生搬硬套通用模板，造成防护效果差；第二是运维人员的安全防护技能以及应急处理能力有待加强，一部分运维人员缺少对极端天气的实际操作经验，在发生突发事件时不能迅速准确地作出反应；第三是安全防护物资短缺，一部分项目没有考虑到极端天气带来的影响大小，采购相应的抢修工具及物资储备不足，在极端天气过后抢修工作难以开展，延误恢复时间。

（二）优化建议

为了解决以上问题，在满足海上风电运行实际的基础上，提出如下接地气、可操作性的改进措施：第一，制定个性化防控预案，各个海上风电场站根据各自所在海域特有的恶劣气候特征，确定恶劣天气种类及影响范围等，有针对性地制定相应的防范对策以及应急预案，不能照抄通用模板，要做到有的放矢；第二，强化运维人员培训力度，对运维班组开展定期的恶劣天气防护和应急处理培训，通过典型案例进行现场模拟演练等方式提高运维人员防护能力和应急能力，做到有备无患；第三，做好物资储备工作，依据各项目所在地所受恶劣天气的影响程度来配备充足的抢修工具、防护用品和应急物资，并对其进行周期性检验与更换，保证恶劣天气之后能迅速展开抢修作业，尽快使设备恢复正常运转。

五、结论

极端天气是影响海上风电安全运行的重要因素之一，在一定程度上会对设备运行、运维作业以及发电稳定性造成不利影响，进而阻碍海上风电行业的发展。在发生极端天气的情况下，对于海上风电的安全防护要以“以防为主、防患未然、切实有效”为指导思想，在事前防范、事中控制、事后处理三个方面着手，根据项目的海域特点有针对性地提出具体可行的措施来做好设备保护、及时准确监测预报和迅速妥善处置等工作的同时不断积累经验教训完善改进相关工作方法提高工作效率。本文通过对极端天气给海上风电带来的主要危害进行阐述并提出相应的对策建议，并通过实例证明了这些措施的有效性和实用性，针对目前防控工作中存在的不足之处提出了改进建议，旨在帮助海上风电项目更好地应对极端天气，确保其平稳有序地开展生产经营活动。

参考文献

[1]王玉玉，吕超，王鹏，曾杰，孙琪.海上风电项目安全风险防控[J].船舶工程，2025,47(S1):144-147.

[2]张惠强.海上风电安全管理要点及风险防控措施探讨[J].水上安全，2025,(09):28-30.

[3]周云鹏，蔡昊然.基于智能化技术的漂浮式海上风电机组安全风险防控研究[J].珠江水运，2025,(01):151-153.

[4]郎作友.海南海上风电场建设的安全风险与防控[J].中国海事，2024,(10):42-45.

[5]林超峰.海上风电工程建设风险分析与防控[J].福建水力发电，2022,(02):85-88.

Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

建筑节能工程质量管控与建筑节能检测

江洁莹
广东建安检测有限公司，广东 广州 510000
DOI:10.61369/EPTSM.2026040012

摘　　要： 文章旨在系统阐述建筑节能工程的核心环节——质量检测与管控体系。研究核心包括明确节能检测的目的在于验证工程是否符合节能标准，辨析型式检测与抽样检测等主要方法的区别与应用；论述建筑节能对缓解我国人均资源紧张与高能耗压力的战略意义；从管理意识、方案设计、人员能力、监管机制四个方面，提出提升节能工程质量的具体策略；并以外墙保温系统为例，详细说明关键性能指标的检测内容与方法。

关 键 词： 建筑节能工程；质量管控；建筑节能检测

Quality Control and Inspection of Building Energy Efficiency Projects

Jiang Jieying
Guangdong Jian'an Testing Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510000

Abstract: This article aims to systematically elaborate on the core aspects of building energy efficiency projects—quality inspection and control systems. The research focuses on clarifying the purpose of energy efficiency inspections, which is to verify whether projects comply with energy efficiency standards, distinguishing between and discussing the application of major methods such as type testing and sampling testing. It also discusses the strategic significance of building energy efficiency in alleviating the pressure of per capita resource scarcity and high energy consumption in China. Furthermore, specific strategies for improving the quality of energy efficiency projects are proposed from four aspects: management awareness, project design, personnel capabilities, and regulatory mechanisms. Taking external wall insulation systems as an example, the article details the inspection content and methods for key performance indicators.

Keywords: building energy efficiency projects; quality control; building energy efficiency inspection

引言

在推进生态文明建设与“双碳”目标的背景下，建筑节能已成为关乎可持续发展的重要议题。我国建筑业能耗占比高，而节能工程的实际效果高度依赖施工质量与精准检测。当前实践中，质量管控意识不足、检测体系不完善等问题，影响了节能目标的实现。因此，系统研究建筑节能工程的检测方法与质量管控策略，对于保障节能措施有效落地、提升建筑能效、促进行业绿色转型具有紧迫的现实意义。本文将从概述、重要性、管控策略及检测方法等维度展开论述。

一、建筑节能工程节能检测的概述及重要性

（一）建筑节能工程节能概述

从实践角度看，建筑节能检测的核心目标，是评估工程项目是否满足国家或地方规定的节能设计标准与要求。这项检测不仅关注建筑整体能耗表现，还需对构成节能效果的各专项环节展开细致核查，例如围护结构材料的热工性能、外墙保温系统的施工质量等，确保节能措施在实际中得到有效落实。而型式检验与抽样检测的差异则体现在对象与方法上，型式检验通常针对某一类产品或结构构件进行全面的性能测试，以验证其是否符合标准规定；抽样检测则是在批量材料或施工段落中随机抽取样本进行复查，通过部分代表性数据来推断整体质量，从而在提高效率的同时，保障检测结论的准确性与可靠性。通过这些系统化、多层次的检测手段，能够全面监督建筑节能工程从材料选用到施工落地的全过程，为提升建筑能效、实现绿色建造提供科学依据。

（二）建筑节能工程重要性

尽管我国地域辽阔、资源储备总量充沛，然而人口规模庞大的现实，使得人均资源拥有量在全球范围内处于相对偏低的水平。与此同时，建筑业在建造与运营过程中所消耗的能源，已超过社会总能耗的一半，这一现实凸显了推进建筑节能工作的紧迫性与战略意义。通过采取科学、合理且有效的节能技术与管理措施，降低建筑领域的能耗，不仅能够直接减少对化石能源的依

 Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

赖，缓解能源供应压力，还能显著减轻因能源开采与消耗带来的环境污染，促进生态环境的修复与保护。此外，节能建筑通过提升围护结构保温隔热性能、优化能源系统效率，可大幅改善室内热舒适度，减少居民在采暖、制冷等方面的能源开支，实现提升居住品质与降低生活成本的双重收益[1]。

二、建筑节能工程质量管控策略

（一）提高节能质量管理意识

在建筑工程实施过程中，项目管理人员必须具备长远发展的战略眼光，不能仅将关注点局限于建设成本的管控，更应严格依据设计文件与节能标准组织施工。鉴于建筑节能效果的实现，在很大程度上取决于所选用材料和设备的性能，因此必须将材料和设备的品质管控置于核心位置，确保其各项参数完全满足节能设计的具体要求。与此同时，管理人员还需依据相关技术规范与施工规程，对节能工程的全过程进行精细化管控。这意味着要对每一道施工工序——例如保温层的铺设、密封节点的处理、节能门窗的安装等——实施严格的质量监督与验收，确保施工工艺符合标准，避免因操作不当而导致热工性能下降。唯有通过这种对材料和施工环节的双重严格把控，才能从根本上保障建筑节能工程的整体质量，使其设计节能目标在实际使用中得到充分实现，从而提升建筑的长期能效表现与环境效益。

（二）提升节能方案的科学性与针对性

在制定建筑工程的节能方案时，应充分融入先进的可持续设计理念，优先选用高性能、低环境影响的绿色建材，确保其各项指标均能满足国家生态环保与节能规范的要求。同时，在施工过程中，应积极推广可再生资源与清洁能源的利用，在有效提升建筑物室内环境舒适度的前提下，实现资源的最大化利用，从而提高能源整体使用效率，减少不必要的能耗损失。为实现上述目标，工程技术人员必须结合项目的具体条件，如气候特征、功能需求与场地环境等，设计出科学、合理的专项节能方案。在施工正式开始前，相关管理部门还有必要组织针对性的培训，重点围绕节能材料性能、设备操作规范以及施工工艺要点等内容展开，确保一线作业人员能够充分理解节能设计意图，并清晰掌握施工中的关键技术与注意事项[2]。

由此可见，要真正提升节能方案的科学性与针对性，必须从项目源头着手，根据不同建筑类型、功能需求及地域特点，定制差异化的节能设计策略与施工计划。同时，应通过系统的技术交底和技能培训，使施工人员系统掌握各类节能材料的施工技术要点，熟练运用设备操作规范完成节能工程作业，从根本上避免因操作不当或认识不足而引发的施工质量问题，确保节能措施能够精准落地、发挥预期效果。

（三）提升从业人员水平，为建筑检测行业发展提供动力

施工单位应积极转变发展观念，将提升节能检测能力视为推动行业进步、树立企业专业形象的核心任务。为此，需系统性地组织专家讲座、专题研修、技术交流等多种形式的培训活动，不仅帮助检测人员及时掌握建筑节能领域的前沿技术、标准规范，更要使其深刻认识到当前行业在节能降耗方面所面临的紧迫要求与严峻挑战。通过持续学习与实践锻炼，加快培养一批技术过硬、履职尽责的专业人才与服务团队，为检测工作的高质量开展奠定人力基础。与此同时，应着力构建科学的人才使用与激励机制，将业务能力、职业素养与个人发展相结合，持续完善覆盖检测全流程的综合服务体系。通过设立技术攻关项目、成果奖励等措施，充分调动专业技术人才进行自主创新的积极性与主动性。还要努力营造鼓励探索、宽容失败的氛围，在资源保障、职业发展等方面提供支持，切实为优秀人才开展检测技术研发与方法创新解除后顾之忧，从而为建筑检测行业的可持续发展注入源源不断的专业动力。

（四）健全相关管理机构

为切实提升建筑节能工程的建设质量，政府相关职能部门应进一步提高重视程度，考虑设立专门的建筑节能监管机构，以确保各类工程项目在节能方面能够接受规范、持续的有效监督，严格依照经审查的节能设计方案执行。该管理机构需对节能工程实施全过程、精细化的监督，从材料进场、施工工艺到分项验收，均依据技术标准和施工方案进行严格把关，并最终组织严谨的竣工节能专项验收，确保工程每个阶段都经过严格审核，避免因细节疏忽而影响整体节能效果。同时，相关政府部门还应在工程建设全周期内开展系统而全面的监督管理，运用信息化、标准化等科学管理手段，对施工过程进行动态跟踪。一旦发现任何环节存在质量问题或偏离设计要求，管理机构须承担起相应的监督与协调责任，推动问题及时整改到位，形成管理闭环。只有通过这样权责清晰、运行有效的监管机制，才能持续推动建筑工程节能实施水平的提升，从而在根本上保障公共建筑的能效质量，履行好政府在节能降耗领域的公共服务职能[3]。

三、建筑节能工程节能检测方法

（一）节能检测内容

为保障建筑工程达成预设节能目标，相关企业需将节能检测的规范性管控置于核心位置，严格遵循标准流程开展全流程检测，确保各节能环节及关键细节均符合现行技术标准与规范要求。由于我国幅员辽阔，各地气候条件、资源状况与经济发展水平存在差异，因此不同地区的建筑节能要求也有所区别。各地在执行检测时，应遵循因地制宜的原则，选取适合本地实际的检测方法与评价体系，对工程各环节展开全面、细致的节能检测。检测范围通常涵盖建筑围护结构构件（如外墙、屋面、门窗等）、各类节能材料（如保温材料、节能玻璃等）以及用能设备系统（如暖通空调、照明等），以确保所采用的节能技术合理且有效。举例来说，受地区气候与季节特征影响，北方地区需重点检测采暖系统的能效，而南方地区则可能更关注空调制冷与遮阳性能。建设单位应根据项目具体需求选用适宜的设备，并针对不同系统与工况制定差异化的检测标准与评价方法，从而确保暖通空调等关键设备在能效检测方面的严格性与科学性，真正实现节能设计的落地。

Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

（二）型式检测与抽样检测

根据检测对象的选取方式与目的差异，建筑节能检测主要可分为型式检测和抽样检测两种模式。型式检测，亦可称为典型性或标准性检测，其核心是对建筑物围护结构所涉及的各种组成部件及其配套的保温隔热系统进行全面的性能测定。这包括对外墙保温材料、屋面保温层、节能门窗、幕墙等构件的导热系数、气密性、耐火性等关键指标进行系统化测试。该检测通常在实验室或指定场地内进行，是确保相关节能材料、构件及系统性能符合国家标准与设计要求的重要前提，也是其获准进入建筑施工现场并投入使用的必备条件。抽样检测则主要应用于施工过程或竣工验收阶段，侧重于对现场实际采用的节能材料或已施工完成的工程部位进行随机抽查与复核。其目的是通过对部分代表性样本的检测结果，来推断整体工程的质量状况，实现对施工过程与最终成果的动态监控与质量把关。抽样检测能够及时发现现场材料与设计规格是否相符、施工工艺是否规范等问题，是对型式检测的有效补充，二者结合共同构成了建筑节能质量管控的双重保障体系[4]。

（三）外墙外保温系统节能检测

建筑外墙直接暴露于自然环境中，长期经受日晒、雨淋、温差变化及外力影响，是建筑围护结构中能量交换最为活跃的部位，也是实现节能目标的核心环节。因此，对外墙外保温系统的检测应全面覆盖其各项关键性能。检测需首先评估系统的耐候性，即其在四季气候循环、温湿度剧烈波动及长期紫外线照射等复杂环境条件下的耐久能力，确保保温系统能长期保持结构完整与性能稳定，避免因材料老化或构造失效导致节能效果下降。抗冲击性能检测同样重要，作为建筑的外层保护，外墙可能承受偶然撞击或机械损伤，足够的抗冲击能力是维持保温层连续性和完整性的基础，防止因局部破损引发热桥效应或安全问题。此外，吸水量检测用于评价系统在雨雪等潮湿环境中的防水性能，过高的吸水量会导致保温材料导热系数上升、性能衰减，甚至引起内部结露与结构损坏。热阻性能检测则直接反映外墙对热量传递的阻隔能力，特别是在夏季，足够的热阻能有效减少室外热量向室内的传递，从而降低空调制冷负荷，实现节能目标。同时，水蒸气渗透性能检测也不可或缺，它关系到墙体内部的湿气扩散与排出能力。合理的水蒸气渗透性有助于避免墙体内部冷凝，保障室内空气质量与结构安全，但渗透性过强也可能导致不必要的能量散失。

（四）保温系统完工后检测

保温系统施工完毕后，仍需开展系统的节能效果检测，以验证其是否达到设计要求与实际节能目的。检测的重点之一，是测定系统中各类复合构件及单一构件的传热阻值。在保温系统中，复合构件主要承担着阻断热量传递的关键作用；如果其传热能力过强，将加剧室内外之间的热量交换，难以维持稳定的室内热环境，节能目标也就无法实现。因此，施工结束后需对保温系统的整体热工性能进行全面复测，确保其综合传热系数或热阻值符合相关节能标准的规定范围。此外，还需在自然环境条件下，对保温结构的外表面与内表面温度进行现场实测。这项检测旨在直观反映系统在实际使用中的隔热效果，评估其抵御外界气候影响的能力。需要特别强调的是，检测过程应尽可能保持环境自然，避免临时遮挡、异常热源或特殊气象条件对检测数据造成影响，从而确保所测得的温度结果真实有效，能够作为判断保温系统内外表面热工性能是否满足节能要求的重要依据[5]。

四、结束语

综上所述，为实现有效管控，需多措并举，提升项目管理的长远质量意识；制定科学且具针对性的节能方案；加强从业人员培训与激励；并健全政府层面的专业化监管。检测技术则需综合运用型式与抽样方法，并对保温系统等关键部位进行严格的热工性能验证。未来，研究应朝着检测技术智能化、标准体系精细化方向发展，以持续推动建筑节能实践的质量提升与效能优化。

参考文献

[1] 邹贤娣 . 建筑节能工程质量控制与建筑节能检测研究 [J]. 智能建筑与智慧城市 ,2024(8):130-132.

[2] 栾爱俊 , 许立阳 . 建筑节能工程质量控制与建筑节能检测研究探讨 [J]. 建筑与装饰 ,2025(1):73-75.

[3] 牛娜 . 建筑节能工程质量控制与建筑节能检测分析 [J]. 建筑与装饰 ,2020(35):64.

[4] 柳晔 , 叶俊 . 建筑节能工程质量控制与建筑节能检测 [J]. 城市建筑与发展 ,2025,6(18).

[5] 王琪 . 探究建筑节能工程质量控制与建筑节能检测 [J]. 安徽建筑 ,2019,26(8):151-152.

 Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

锂电池极耳缺陷引发的失效分析及自动化检测方法研究——以 LJ 双通道检测设备为例

李立
安脉盛智能技术（广东）有限公司，广东 佛山 518000
DOI:10.61369/EPTSM.2026040013

摘　　要： 锂电池作为新能源产业的核心储能部件，其安全性与可靠性直接决定终端产品性能。极耳作为锂电池内外能量传输的关键接口，其缺陷易引发电池起火、鼓包等失效问题。基于该设备的检测原理，优化自动化检测流程中的图像采集、特征提取及缺陷识别算法。实验表明，优化后的检测方法对极耳缺陷识别准确率达98.7%，检测效率较传统方法提升40%，为锂电池极耳质量管控提供高效技术支撑，对推动锂电池制造行业质量升级具有重要意义。

关 键 词： 锂电池极耳缺陷；失效；自动化检测

Research on Failure Analysis and Automated Detection Methods for Defects in Lithium Battery Tabs: A Case Study of the LJ Dual-Channel Detection Equipment

Li Li
Anmaisheng Intelligent Technology (Guangdong) Co., Ltd., Foshan, Guangdong 518000

Abstract: As the core energy storage component in the new energy industry, the safety and reliability of lithium batteries directly determine the performance of end products. The tabs, serving as the crucial interface for energy transfer both inside and outside the lithium battery, are prone to defects that can lead to battery failures such as fires and bulging. Based on the detection principles of this equipment, the image acquisition, feature extraction, and defect recognition algorithms in the automated detection process have been optimized. Experiments demonstrate that the optimized detection method achieves a defect recognition accuracy rate of 98.7% for lithium battery tabs, with a 40% improvement in detection efficiency compared to traditional methods. This provides efficient technical support for quality control of lithium battery tabs and holds significant importance for promoting quality upgrades in the lithium battery manufacturing industry.

Keywords: lithium battery tab defects; failure; automated detection

引言

全球能源转型背景下，锂电池凭借高能量密度、长循环寿命等优势，广泛应用于新能源汽车、储能电站等领域。然而，锂电池安全事故频发，据统计，35%以上的事故与极耳缺陷直接相关。极耳连接电池内部电芯与外部电路，其制造过程中的微小缺陷的缺陷，在充放电循环中会不断恶化，最终导致电池失效。传统人工检测极耳缺陷存在效率低、漏检率高的问题，难以满足大规模生产需求。LJ双通道检测设备作为新型自动化检测装备，具备双工位并行检测能力，但现有检测方案对复杂缺陷的识别精度有待提升。

一、工程概况

本研究依托某新能源科技有限公司的锂电池生产线升级项目，该项目核心目标为通过引入自动化检测技术，将极耳缺陷导致的电池不良率从2.3%降至0.5%以下。项目涉及的锂电池为方形三元锂电池，容量200Ah，极耳采用1060铝合金材质，厚度0.2mm，宽度8mm，生产节拍为300只/小时。为匹配生产效率，项目引入3台LJ双通道检测设备，构建“多设备并行+数据联网”的检测体系。LJ设备集成高清工业相机、激光轮廓传感器及AI识别模块，可同时实现极耳外观与尺寸的双重检测。工程现场需解决检测设备与生产线的无缝对接、检测参数与极耳工艺的匹配等问题，通过现场调试与参数优化，设备已实现与生产线的协同运行，为后续失效分析及检测方法优化提供了真实的工程数据支撑。

Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

二、锂电池极耳缺陷引发的失效分析

（一）极耳裂纹缺陷的失效机理及影响

极耳裂纹缺陷虽初期尺寸微小，但在锂电池充放电循环过程中，会因应力集中效应不断扩展，最终引发电池失效，其失效机理可分为机械应力恶化与电化学腐蚀加速两个阶段。在机械应力恶化阶段，锂电池充放电时电芯会发生膨胀与收缩，极耳作为连接部件需承受反复的拉伸与压缩应力，裂纹处的截面面积减小，应力集中系数显著升高，导致裂纹以0.005-0.01mm/循环的速度扩展。当裂纹扩展至极耳宽度的1/3以上时，极耳的导电截面积大幅降低，电阻急剧增大，充放电过程中产生大量焦耳热，形成局部高温区。进入电化学腐蚀加速阶段，局部高温会破坏极耳表面的氧化膜，电解液中的氟化物等腐蚀性成分与极耳金属发生化学反应，生成可溶性的金属化合物，进一步扩大裂纹尺寸。当裂纹贯穿极耳时，会导致电池内部断路，出现充放电中断现象；若裂纹未完全贯穿，高温可能引发电解液分解，产生气体，导致电池鼓包，严重时引发起火爆炸事故。

（二）极耳虚焊缺陷的失效路径及危害

极耳虚焊缺陷是指极耳与电芯极片之间的连接强度不足，存在微小间隙，其失效路径主要通过接触电阻增大、局部过热及连接失效三个环节逐步推进。虚焊处的接触电阻通常为正常焊接的5-10倍，在电池充放电过程中，根据焦耳定律 $Q=I^2Rt$，接触电阻的增大导致局部发热量急剧增加，使虚焊区域温度快速升至120-150℃。高温环境会加速极耳与极片接触界面的氧化反应，生成高电阻的氧化层，进一步增大接触电阻，形成“电阻增大-发热加剧”的恶性循环。随着循环次数的增加，虚焊处的连接强度不断下降，当受到电芯膨胀产生的机械力作用时，极易发生连接断裂，导致电池内部开路。

（三）极耳变形缺陷的失效影响及机制

极耳变形缺陷主要表现为折弯角度异常、表面凸起或扭曲，其对锂电池的失效影响主要体现在装配密封性下降与电流分布不均两个方面，具体失效机制与变形程度密切相关。当极耳折弯角度偏差超过 ±3° 时，在电池封装过程中，极耳无法与盖板的极柱精准对接，导致封装间隙增大，电池的密封性下降，电解液易从间隙中渗漏。电解液渗漏不仅会导致电池容量衰减，还会腐蚀电池外壳及周边部件，引发接触不良等问题。若极耳出现表面凸起或扭曲变形，其与极柱的接触面积会减小，导致电流在极耳表面的分布不均，形成局部电流密度过高区域。过高的电流密度会加速极耳的电化学腐蚀，使极耳表面生成氧化膜，增大导电电阻，充放电过程中产生的热量集中在该区域，导致局部温度升高。当温度超过电解液的分解温度（通常为180-200℃）时，电解液会剧烈分解，产生大量气体，导致电池鼓包，若鼓包过程中极耳与极柱的连接被破坏，会进一步引发电池开路失效。

（四）极耳焊穿缺陷的失效模式及后果

极耳焊穿缺陷是指焊接过程中因功率过高导致极耳出现穿孔，其失效模式主要为电解液泄漏与内部短路，失效后果具有突发性与严重性。极耳焊穿后形成的穿孔直径通常在0.1-0.3mm，虽初期可能被焊渣或极片材料部分封堵，但在锂电池充放电循环过程中，电芯的膨胀与收缩会使穿孔处的封堵物脱落，形成贯通极耳的通道。电解液会通过该通道缓慢渗漏，一方面导致电池内部电解液量减少，离子传导能力下降，电池容量大幅衰减，循环寿命缩短至设计寿命的50%以下；另一方面，渗漏的电解液会腐蚀极耳周边的绝缘部件，如隔膜，当隔膜被腐蚀破损后，正极与负极的活性物质直接接触，引发电池内部短路。内部短路瞬间会产生巨大的电流，使电池温度在数毫秒内升至300℃以上，引发热失控反应，导致电池起火、爆炸。

（五）多缺陷耦合下的失效叠加效应

在实际生产过程中，极耳可能同时存在多种缺陷，如裂纹与虚焊、变形与焊穿等，多缺陷耦合会产生失效叠加效应，使电池的失效风险远高于单一缺陷。变形与焊穿耦合时，变形导致的电流分布不均会使焊穿处的局部电流密度进一步升高，加速电解液的渗漏与隔膜的腐蚀，使电池发生内部短路的时间从单一焊穿缺陷的200次循环缩短至80-100次循环。多缺陷耦合还会导致失效模式的复杂化，如某电池同时存在裂纹、虚焊与变形缺陷，其失效过程表现为：虚焊引发局部高温→加速裂纹扩展→变形导致电流分布不均→裂纹贯穿极耳引发开路→开路前的高温腐蚀隔膜→最终出现开路与短路并存的复合失效模式。这种复合失效模式增加了失效分析的难度，也使电池的安全风险大幅提升。

三、锂电池极耳缺陷的自动化检测方法优化

（一）基于LJ设备的图像采集系统优化

图像采集系统是LJ双通道检测设备实现极耳外观缺陷识别的基础，针对原有系统存在的光照不均、图像模糊等问题，从光源配置、相机参数及采集流程三个方面进行优化。在光源配置上，将原有单一环形光源改为“环形光源+同轴光源”的组合光源系统，环形光源提供均匀的漫射光，消除极耳表面的反光干扰，同轴光源增强极耳表面纹理与缺陷的对比度，使裂纹、污渍等缺陷更清晰可见。相机参数优化方面，通过现场实验确定最佳参数组合：分辨率设置为1200万像素，帧率调整为30fps，曝光时间控制在10-15μs，同时引入自动对焦功能，确保极耳在不同位置时均能获得清晰图像。采集流程优化上，采用“多角度同步采集”模式，在每个检测工位设置3台高清相机，分别从正面、侧面及45°角采集极耳图像，避免因拍摄角度单一导致的缺陷漏检。优化后的图像采集系统，极耳缺陷图像的信噪比从原来的25dB提升至42dB，裂纹缺陷的清晰度提升3倍，为后续的缺陷识别提供了高质量的图像数据支撑。经测试，图像采集的稳定性达到99.5%，满足生产线的连续运行需求。

（二）极耳缺陷特征提取算法改进

针对传统特征提取算法对微小缺陷与复杂缺陷识别能力不足的问题，结合LJ设备的图像数据特点，提出基于改进Canny算子与Hu矩的特征提取算法。首先，对采集到的图像进行预处理，采用高斯滤波算法去除图像噪声，滤波核大小设置为5×5，标准差取0.8，有效降低噪声干扰的同时保留缺陷细节；再通过自适应

 Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

阈值分割算法，根据极耳不同区域的灰度值特点自动调整分割阈值，实现极耳区域与背景的精准分离。在缺陷边缘提取阶段，改进 Canny 算子通过引入梯度方向加权因子，解决传统算子对弱边缘响应不足的问题，将边缘检测的准确率从82%提升至95%，可有效提取宽度仅0.01mm的微小裂纹边缘。在特征参数提取上，除传统的面积、周长等几何特征外，引入 Hu 矩特征与纹理特征参数，Hu 矩特征可描述缺陷的形状特性，不受平移、旋转及缩放的影响，纹理特征参数通过灰度共生矩阵计算获得，可有效区分污渍与正常表面。改进后的特征提取算法可提取12维特征参数，全面表征极耳缺陷的特性，为后续的缺陷识别提供充足的特征信息。

（三）基于 AI 的缺陷识别模型构建

依托 LJ 设备的数据处理系统，构建基于改进 YOLOv5 的极耳缺陷识别模型，提升对多种缺陷的快速识别能力。模型构建分为数据集建立、网络结构改进及模型训练三个步骤。数据集建立方面，收集生产线中的极耳缺陷图像10万张，涵盖裂纹、虚焊、变形等7类常见缺陷，对图像进行数据增强处理，包括旋转、缩放、翻转及添加噪声等，将数据集规模扩充至30万张，按7:2:1的比例分为训练集、验证集与测试集。网络结构改进上，在 YOLOv5 的主干网络中加入注意力机制模块，增强模型对缺陷区域的关注，同时减小网络的下采样率，保留更多的图像细节信息，提高对微小缺陷的识别能力。模型训练过程中，采用自适应学习率策略，初始学习率设置为0.001，随着训练轮次的增加逐步衰减，训练批次大小设为32，共训练100个轮次。训练完成后的模型，在测试集上的识别准确率达98.7%，较传统 YOLOv5 模型提升4.2%，对裂纹、焊穿等微小缺陷的识别准确率提升尤为明显，达97.3%。模型的识别速度为30帧 / 秒，可满足 LJ 设备双工位并行检测的实时性要求。

（四）LJ 设备检测参数的优化匹配

LJ 双通道检测设备的检测参数直接影响检测精度与效率，结合极耳的制造工艺特点与缺陷类型，通过正交实验法对检测参数进行优化匹配。选取激光轮廓传感器的扫描速度、测量精度、相机曝光时间及检测阈值作为正交实验的因素，每个因素设置3个水平，以缺陷识别准确率、漏检率及检测效率作为评价指标。正交实验结果显示，激光轮廓传感器的扫描速度与检测阈值对检测效果的影响最为显著。优化后的检测参数使 LJ 设备的缺陷漏检率从原来的3.8%降至0.8%，误检率降至0.5%以下，检测效率提升40%，达到420只 / 小时，超过生产线的生产节拍。

（五）自动化检测系统的集成与应用验证

将优化后的图像采集系统、特征提取算法及缺陷识别模型与 LJ 双通道检测设备进行集成，构建完整的极耳缺陷自动化检测系统，并通过现场应用验证系统的实用性与可靠性。系统集成过程中，重点解决设备间的通信协议匹配与数据同步问题，采用 Profinet 通信协议实现 LJ 设备与生产线 PLC 的实时通信，数据传输延迟控制在50ms以内；通过时间戳同步技术，实现图像采集、特征提取与缺陷识别的数据同步，确保检测结果的准确性。应用验证在某锂电池生产线上进行，选取10000只极耳作为验证样本，其中包含各类已知缺陷的极耳1000只。验证结果显示，自动化检测系统的总体缺陷识别准确率达98.5%，与人工检测结果的一致性达99.2%，对虚焊、变形等复杂缺陷的识别准确率达97.8%。系统连续运行72小时，设备故障率为0.3%，检测数据的上传成功率达100%，实现了极耳缺陷的实时检测、数据追溯与统计分析。应用该系统后，生产线的极耳缺陷导致的电池不良率从2.3%降至0.45%，年减少经济损失约800万元，验证了该自动化检测方法的工程应用价值。

四、结束语

文章围绕锂电池极耳缺陷引发的失效问题及自动化检测方法展开研究，以 LJ 双通道检测设备为核心载体，优化了自动化检测方法。基于 LJ 设备优化的自动化检测系统，通过图像采集优化、特征提取算法改进及 AI 识别模型构建，实现了极耳缺陷的高效精准检测，识别准确率达98.5%，检测效率提升40%。该研究解决了传统检测方法的瓶颈问题，为锂电池极耳质量管控提供了可靠技术方案，对提升锂电池安全性与可靠性具有重要意义，也为同类自动化检测设备的应用与优化提供了参考。

参考文献

[1] 张海峰，芦新春，李升，等 . 基于改进 YOLOv7 的锂电池极耳缺陷检测研究 [J]. 今日制造与升级，2024(7):34-39.

[2] 李泰民，黄平，岳笑含，等 . 基于神经网络的锂电池极耳焊缝微缺陷判别系统设计 [J]. 无损探伤，2023,47(6):5-8.

[3] 王伟，黄平，周家宁，等 . 航空锂电池极耳焊缝微缺陷检测系统研究 [J]. 无损探伤，2023,47(2):1-4.

[4] 徐俊飞，简运琪，吴勇华，等 . 锂电池极耳激光摆动焊接工艺研究 [J]. 机械制造，2024,62(4):56-61.

[5] 李浩，夏广，姜伟，等 . 超声扫描成像检测锂电池电解液退浸润及成因分析 [J]. 分析测试学报，2025,44(2):238-245.

Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

电力工程电气设备安装施工的核心管控要点

钱文鑫
广州泰捷建设有限公司，广东 广州 510000
DOI:10.61369/EPTSM.2026040014

摘　　要： 文章讨论电力工程中设备安装与调试的关键问题，分析常见问题的成因，并给出优化办法。具体来看，盘柜接线、高压配电装置安装、变压器就位等环节容易出现典型问题。针对这些情况，提出工艺改进和管理方面的措施。从施工准备到调试验收，形成一套完整的质量保障流程。这有助于提高电力工程建设的标准化水平，也为现场施工提供参考，最终确保设备长期安全稳定运行。

关 键 词： 电力工程；电气设备；安装施工；要点

Core Management and Control Points for the Installation and Construction of Electrical Equipment in Power Engineering

Qian Wenxin
Guangzhou Taijie Construction Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510000

Abstract: This article discusses the key issues in equipment installation and commissioning in power engineering, analyzes the causes of common problems, and proposes optimization methods. Specifically, typical issues tend to arise in aspects such as panel and cabinet wiring, installation of high-voltage power distribution equipment, and transformer positioning. In response to these situations, measures for process improvement and management are proposed. A complete quality assurance process is established from construction preparation to commissioning and acceptance. This helps to enhance the standardization level of power engineering construction, provides references for on-site construction, and ultimately ensures the long-term safe and stable operation of the equipment.

Keywords: power engineering; electrical equipment; installation and construction; key points

引言

电力系统规模不断扩大，技术也越来越复杂。电气设备安装质量对电网安全运行的影响越来越大。安装过程若出现疏忽，就可能埋下运行风险，甚至导致非计划停运或安全事故。当前电力工程建设中，盘柜二次接线、高压配电装置安装、变压器就位等关键环节，仍存在不少技术问题和管理难点，比如接线不规范、安装精度不足等，需要进一步规范和完善。

一、电力工程中的安装问题

（一）盘柜二次接线与缆线敷设

电力工程施工中，每个环节都应力求精确，设备主接线工作尤为关键。变压器、开关装置、电容器等电气设备的安装质量和连接可靠性，直接影响电力系统的稳定与效能。施工操作必须严谨规范，任何疏忽都可能留下隐患。因此，施工人员应在作业前充分熟悉图纸和工艺要求。

弱电控制及信号传输所用的缆线，若与动力电缆或其他干扰源敷设在同一通道且未做隔离，容易受到电磁干扰，进而导致信号失真或误动作。这种干扰会严重削弱弱电控制系统的精确性和可靠性。为有效解决这一问题，施工设计阶段就应制定明确的敷设方案和隔离措施。例如，严格分开强弱电的敷设路径，选用屏蔽线缆，或在通道内加装物理隔板。采取上述措施后，各个系统才能独立、稳定地运行，避免相互影响。现场监理也应对隔离措施的落实情况进行专项检查，确保执行到位。

（二）高压配电装置的安装问题

保障电气系统长期安全稳定运行，是电力工程建设的核心目标。在高压配电装置的施工阶段，首要原则是严格依据设计图纸进行作业，任何与图纸存在实质性偏差的现场情况都应及时发现并反馈修正。高压配电装置本身结构精密、部件繁多。在安装前的运输、存储及开箱检查环节中，若工作人员责任心不足或操作粗疏，极易造成精密零件遗失或绝缘部件损坏等问题，直接导致后续盘柜无法完整装配或存在先天缺陷，影响其投运后的可靠性。此外，开关设备与其配套的机械传动装置在安装后需进行精细调整。若缺乏标准化的调试规程与安全作业制度，不仅调整精度难以保证，在调试过程中一旦发生意外动作，现场人员将缺乏有效的程序性防护，面临安全风险。在整个盘柜的安装、调试及

 Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

验收过程中，若施工团队缺乏针对性的专用测试设备，或人员未接受严格、规范的专业技能培训，将直接导致各项电气试验的数据失真、判断失误，使安装过程中的缺陷无法被有效识别和排除，从而诱发诸多非预期的设备故障，严重影响工程质量和后期投运[1]。

（三）变压器的安装问题

变压器是电力系统的核心设备，其安装质量直接影响电网的稳定和效率。安装实践中，前期准备工作不充分常常引发后续问题。现场勘查、技术交底、资源调配等环节若有疏漏，就会造成安装流程受阻，甚至需要返工。具体到操作层面，彻底清洁变压器本体及其附件是一项基础但重要的工序。实际工作中，由于清洁标准执行不严或方法不当，常留下灰尘、油污等杂质。这些污渍不仅可能降低绝缘性能，设备带电运行后还可能引起局部放电，形成长期安全隐患。此外，安装过程中若未能精准就位或连接好滤油、注油设备，绝缘油处理环节就无法有效进行。绝缘油品质不达标会损害变压器内部绝缘，影响整体安装效果。除了技术环节，人员责任心和制度保障的缺失也不能忽视。部分工作人员在抽检、试验环节中存在敷衍心态，未能严格执行标准，导致一些潜在缺陷在验收阶段未被发现。同时，变压器安装各阶段如果缺乏针对性的作业指导书和风险预控措施，操作就容易带有盲目性。

二、电气设备具体安装策略

（一）加强前期准备工作

电气工程动工前，前期准备必须全面细致。这是项目成败的关键。首先，参与设计的技术人员既要理论扎实，也要有丰富的现场经验。只有这样，设计方案才能既符合规范又切合实际，有效指导施工。针对电气设备的配置与布局，设计人员应结合历史项目经验和当前现场条件，进行合理规划。通过分析各类设备的技术特性和功能需求，设计出可行的施工图纸，让每台设备在系统中发挥应有的作用。提升电力工程的整体建设效率是一个重要目标。施工单位在项目推进过程中，应建立多层级、动态的监督与管理机制。在此基础上制定详细的施工组织方案和进度计划，并持续进行过程检查和节点验收。

在技术核查层面，前期准备要深入到土建细节。尤其要对设备安装涉及的建筑结构，如屋面承重、梁柱位置及预埋件等，进行联合审查和实地复核。必须确保土建条件满足电气设备的安装要求，从物理基础上消除安装障碍[2]。

（二）加强接地网的规划与敷设

电力工程中，科学规划与敷设接地网是设备安全稳定运行的基础。接地网用于泄放故障电流，保障人身和设备安全。施工时应依据现场土壤条件、系统参数和安全标准，合理选择接地导体的材质、截面积及网格结构。随着材料科学和连接技术的进步，应积极采用更可靠的工艺。比如使用放热焊接技术完成接地体间的永久性连接，再通过规范施工与主接地网可靠互联，最终形成低电阻、高稳定性的接地系统。现代电网保护和自动化系统越来越精密，测量装置也普遍数字化、高灵敏度，对接地网性能要求更高。在敷设设计中，应充分考虑并尽力减小电位差，通过优化网格密度和敷设深度来均衡地表电位分布。这样不仅能抑制干扰，也为未来系统扩容预留空间。

在具体实施中，要积极应用基于电磁兼容理念的新技术。例如在控制柜内部，将接地铜排与金属柜体通过绝缘子隔离安装，形成独立的等电位接地参考点。这种设计能有效阻隔柜体引入的干扰，提升系统抗干扰能力和运行安全性。不同设备对接地要求不同，为提高安装效率和质量，施工人员应加强对接地理论的理解，依据相关规范和设备特性进行差异化布置，实现功能性、安全性与经济性的统一[3]。

（三）优化外壳防护与基础接地系统布置

电力工程施工前期，应对设备外壳的可靠接地和基础接地网的连接进行专项设计，并规范布置。这样才能保证后续安装调试和长期运行顺利开展。所有相关技术人员都应掌握设备外壳保护性接地的原理和标准，用扎实的理论指导实际操作。敷设接地路径时，要综合比较不同导体材料和连接方式。采用铜排作为接地干线和分支线是常见且效果较好的方案。相关人员应结合现场条件、载流需求和防腐要求，制定详细的操作规程和技术标准，选出最优方案。此外，要重视基于现代网络技术的二次系统集成与运行。应积极引入先进的工业网络设备和通信协议，将信息技术与电力工程技术结合起来，构建高速、可靠的数据通信网络。

电气设备整体安装流程中，二次接线的质量和效率非常关键，需要进行周密的指导和系统规划。施工前要仔细核查现场环境条件和物料情况。安装过程中，遇到与图纸不符的地方或工艺上的疑问，必须及时记录并汇报。为保证二次接线的可靠性，每个环节都要精细管理。应制定明确、可操作的工艺目标，采用标准化的作业方法。推行这样的管控方式，能够有效提升接线工作的整体质量和一致性，为电力设备稳定运行打下坚实基础。

三、电气设备调试要点

（一）调试前的准备工作

电气设备调试技术要求高，流程也比较复杂，是一项系统性工作。调试能否顺利进行，很大程度上取决于前期准备是否充分、细致。准备充分，不仅能让调试过程更安全有序，也能保证设备投运后的性能达到设计要求。准备工作首先要对设备安装质量做系统复查。具体来说，应依据施工图纸和验收规范，逐项核对设备就位情况、固定强度、连接可靠性以及现场环境条件。确保所有安装环节准确无误，这样才能消除因安装问题带来的调试障碍，为后续工作打好基础[4]。

调试开始前，参与的技术人员要完成深入的技术交底和培训。他们需要熟悉待调试设备的核心参数、标准操作程序、联锁逻辑以及各项安全注意事项，做到心中有数。进入具体调试环节后，要按照预先制定的试验大纲或方案，一步步验证设备的功能和性能指标。这包括电气特性测试、机械动作是否正常、保护定值是否准确、自动化功能是否联动等多项内容。每一步都要仔细

Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

检查，确保没有遗漏。调试人员只有准备充分，才能保证工作顺利推进。

（二）调试过程中的问题诊断与处理

电气设备进入调试阶段后，系统或设备可能出现各种异常情况。调试人员要快速、准确定位故障，不能只靠理论知识，现场经验同样不可或缺。

故障诊断通常需要按步骤有序展开。第一步是检查电气回路，观察有无接线松动、绝缘破损引起的短路或断线。这类基础性连接问题在实际调试中较为常见。接下来使用专业仪器测量关键电气参数，逐一核对是否与设计图纸和技术规范相符。有时测量结果接近临界值，也需要仔细分析原因。此外，还应对设备的运行状态和历史数据做综合判断，查看各子系统之间的联动逻辑与时序是否匹配，软件控制是否存在漏洞。

对于检查中发现的问题，调试人员要立即制定整改方案并安排落实。整改完成后，必须对相关功能重新测试，验证问题是否彻底解决，设备性能是否恢复到预期水平。在实际工作中，有些故障需要反复排查多次才能找到根源，这要求调试人员保持耐心和细致。一个系统的诊断和处理流程，是保障调试质量、提升设备可靠性的关键。每一次检查和测试都应做好记录，便于后续分析和追溯。

（三）调试后的验收与运行

调试任务结束后，就进入验收环节。验收是对设备安装和调试质量的最终检验，也是设备能否长期安全、合规运行的关键一步。

验收时，要依据设计规范、技术协议和调试大纲等文件，逐项复核设备的关键参数和性能指标。具体来说，应按照技术文件核对电气性能参数和机械特性，看是否达到设计要求。验收范围要覆盖设备的主要方面，包括主回路和二次回路的电气性能、安全保护功能是否有效，以及自动化控制系统的逻辑和联动功能是否准确。

除了静态参数核查，还要做动态的现场功能性测试。比如模拟实际运行工况，验证设备在不同负荷和不同运行状态下的实际表现，看响应是否稳定、符合预期。测试过程中，如果发现某个参数偏离设计值，应及时记录并分析原因。所有测试数据都要整理归档，作为后续运维的参考依据。只有验收合格，设备才能正式投入运行[5]。

整个验收过程必须形成完整、可追溯的书面记录。验收人员需详细、客观地记载每一项测试的条件、过程与结果数据，并基于这些客观证据，综合判断设备整体是否已达到设计功能与安全标准，具备正式投入运行的条件。若在验收中发现任何缺陷、偏差或性能不达标项，必须立即标识并暂停后续流程，待相关责任方完成彻底整改并复验合格后，方可继续推进。只有在全部验收项目合格，并完成所有技术文档与记录的签署归档后，设备才被允许正式投入运行。需要强调的是，设备投运并非终点。为确保其在整个生命周期内持续稳定、高效运行，必须依据规程制定并执行定期的预防性维护计划与状态检查，通过持续的监测、保养与评估，使设备始终维持在最优运行状态，实现长周期安全经济运行的目标。

四、结束语

电力工程安装与调试质量直接关系到整个电力系统的长期安全稳定运行。通过对安装环节的系统分析可见，人员专业素养、工艺执行标准、管理制度完善程度是影响工程质量的关键因素。实施精细化的前期准备、规范化的接地系统布置、标准化的二次接线工艺，以及系统化的调试验收程序，构成保障工程质量的完整链条。未来需探索智能化技术在安装质量控制中的应用，推动电力工程建设向更智能、更高效的方向发展，为构建安全可靠的现代化电网提供坚实支撑。

参考文献

[1] 陈健欣，孔庆能 . 电力工程安装施工中的技术要点与细节问题 [J]. 建筑与施工 ,2023,2(18):150-152.

[2] 杨小宁 . 电力电气工程中线路安装与施工技术研究 [J]. 电力设备管理 ,2025(10):234-236.

[3] 金红，周群 . 电力工程建设中电气设备安装分析 [J]. 黑龙江科学 ,2021,12(6):114-115.

[4] 赵毅，周雷 . 浅析建筑工程电气设备安装施工技术的要点 [J]. 价值工程 ,2022,41(5):125-127.

[5] 初云祥，陈永君，周晓通 . 土建施工和电力工程安装配合施工技术研究 [J]. 中国设备工程 ,2024(14):209-211.

 Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

电力工程中电气自动化技术实践应用研究

曾威
广州致新电力工程技术有限公司，广东 广州 510000
DOI:10.61369/EPTSM.2026040015

摘　　要： 文章从技术特性出发，梳理了当前电力工程发展面临的几个主要问题。行业起步偏晚，技术积累相对薄弱。整体环境比较复杂，实施难度有所增加。管理体制还不够完善。这些因素共同制约了自动化技术的深入推广。文章随后重点讨论了自动化技术在变电站监控、电网调控、发电厂控制以及调度管理等关键环节的具体应用方案。相关讨论可为后续技术研发和工程实践提供一定参考。

关 键 词： 电力工程；电气自动化技术；应用

Research on the Practical Application of Electrical Automation Technology in Power Engineering

Zeng Wei
Guangzhou Zhixin Power Engineering Technology Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510000

Abstract: Starting from the technical characteristics, this paper outlines several major challenges confronting the current development of power engineering. The industry started relatively late, and technological accumulation remains relatively weak. The overall environment is complex, increasing the difficulty of implementation. Additionally, the management system is not yet perfect. These factors collectively constrain the in-depth promotion of automation technology. Subsequently, the paper focuses on discussing specific application schemes of automation technology in key areas such as substation monitoring, power grid regulation, power plant control, and dispatch management. The relevant discussions can provide certain references for subsequent technological research and development and engineering practices.

Keywords: power engineering; electrical automation technology; application

引言

用电负荷持续增长，新能源并网规模不断扩大，传统电力运行模式面临新的挑战。系统响应速度和调控能力有待进一步提升。在此形势下，电气自动化技术逐步应用于发电、输电、变电、配电及调度等各个环节。该技术可控性较好，数据处理能力较强，系统集成也较为灵活，成为电力工程智能化转型的重要推动力量。但受限于行业发展起步较晚以及管理体制存在一定惯性，我国电力自动化技术在实际应用中仍面临较多困难，技术优势尚未得到充分发挥。

一、电力系统运行中运用电气自动化技术的优点

（一）高可控性

多重挑战之下，电气自动化技术因其良好的可控性能，成为保障现代电网安全高效运行的重要支撑。实际工程中，该技术的优势较为突出。分散的二次设备和控制系统被整合起来，形成统一的管理体系。调度人员可远程操作变电站内的断路器、隔离开关以及无功补偿装置，实现精准投切。现场人员的工作负担因此减轻，设备动作的准确性和及时性也得到提高。

自动化系统能够结合负荷预测与电网潮流分布，适时调整运行模式，保障电能质量符合相关标准。在日常运维过程中，系统自动记录设备操作频次与运行状态变化，为后期工况分析和设备维护留存基础资料。电气自动化技术有效提升了电网调度的整体管控水平，既能帮助电力系统应对复杂运行工况与突发故障，也能持续促进供电服务质量的改善与提高。

（二）维护方便

电气自动化技术在设备运维工作中优势突出。电网系统出现运行异常时，自动化设备可依托自身诊断机制，快速识别故障特征并发出预警信号，同时精准定位故障点位。该模式大幅缩短故障排查耗时，便于运维人员及时到场处置，有效遏制事故进一步蔓延，降低停电范围与停电时长带来的不良影响。

自动化系统具备较强的数据处理性能，可为设备运维工作提供便利。依托计算机运行平台，系统能够不间断采集并保存设备运行状态、动作时序及环境参数等各类信息。运维人员通过梳理

Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

分析相关数据，可提前排查绝缘老化、机械卡涩等各类隐性隐患。传统被动抢修模式由此转变为事前主动防护模式。通过比对设备历史操作频次与动作时长，能够判断机械机构是否出现磨损倾向。依托数据支撑开展检修工作，不仅提升了检修工作的针对性与整体效率，也为设备全生命周期管理提供参考，进一步夯实了电力系统安全稳定运行的基础[1]。

（三）提高运转效率

电气自动化技术对发电、输电、配电等环节进行精准调控，有助于提升电力供应的稳定性和供电质量，减少电压波动或频率偏移带来的损耗。自动化系统根据实时负荷变化动态调整设备工作状态，使电力资源在需求和供给之间实现较好匹配。运行管理更加精细之后，线路和设备的无功损耗与空载损耗都会下降，不必要的能源浪费也相应减少。整个电力传输的能效水平由此得到改善。

从企业运营角度看，运转效率的提升还体现在管理流程优化和劳动生产率提高上。自动化技术替代了大量人工巡检和现场操作，把运维人员从繁重重复的劳动中解放出来，让他们可以专注于更有技术含量的分析决策工作。

二、电力工程中所存在的问题

（一）电力工程起步相对较晚

当前我国很多产业发展势头较快，但与部分发达国家相比，整体经济实力和核心技术储备仍有差距。电力工程中的电气自动化分支，这种差距更加明显。我国工业化进程启动较晚，电力系统自动化建设周期也相应滞后，技术积累和工程经验不及那些电力发展历史悠久的工业国家。起步晚导致基础薄弱，关键设备和控制软件仍依赖进口，这直接限制了电力自动化技术的自主创新能力。从当前用电需求看，现有电气自动化技术在应对复杂工况时逐渐显得力不从心，难以满足行业发展的多样化需求。同时，市场经济体制还在完善中，相关配套机制尚未完全理顺，这也增加了技术推广的难度。

（二）整体环境相对复杂

当前市场竞争激烈，电力工程及自动化领域面临更高要求。相关技术既要为经营主体创造经济收益，也要体现公共服务属性，在保障能源普惠和社会稳定运行方面发挥作用。

但理想与现实之间存在差距。行业内部的一些规范标准更新滞后，跟不上技术迭代的速度。执行环节也存在模糊地带和规则漏洞。监管约束未能全面覆盖所有业务节点。

这些问题导致电力工程在推进中常出现标准化程度不足、建设质量参差不齐等情况。一个清晰且有约束力的行业指标体系尚未真正形成。各环节缺乏统一的参照依据，从而增加了工程实施的复杂性和不确定性。电力企业在实际建设中往往需要自行摸索，进一步放大了技术推广的难度[2]。

（三）管理体制不完善

电力工程是近年来快速发展的一个领域，但配套的管理知识体系没有同步更新。实际运作中仍大量沿用传统思路，缺乏对先进管理理念和成功经验的有效吸纳。这导致行业内部管理人才素质参差不齐，一线管理岗位上存在专业功底薄弱、学历背景不足的人员。这部分从业者难以驾驭复杂的技术问题，在统筹协调、流程管控等方面也显得力不从心，不适应现代电力工程精细化运作的要求。

与此相对，每年虽有具备理论知识的年轻毕业生加入管理队伍，但他们刚入职场时普遍经验不足，对现场情况的判断多依赖书本知识，短时间内难以将所学转化为有效的管理能力。这种新老交替中的知识与经验断层，在全国多数地区的电力工程发展中已成为常见问题。一些企业尝试通过师徒结对和轮岗培训来缓解这一矛盾，但效果仍不理想，管理体制的完善还需要较长时间

三、电力自动化技术在电力工程中的运用

（一）电力自动化技术在变电组织中的应用

在机械变电站的整体运行架构中，依托发电厂的基础发电模式，能够将各类一次能源集中转换为标准化的电能输出。鉴于变电站本身具备结构复杂、节点众多的特点，其另一项核心职能是对输送而来的电力进行科学分配，确保电流沿预设路径准确送达各条馈线。构成变电站的基础设备种类繁多，主要包括实现电压等级转换的变压器、执行电路通断的断路器、承载电流汇流的母线、改善功率因数的电容器以及完成信号转换的互感器等诸多单元。针对变电站控制难度大、操作风险高的现实情况，自动化技术的引入带来了显著改观。变电站内部充斥着高压强电流环境，即便配置了常规接触式防护手段，人员在现场作业时依然面临潜在威胁。同时，人工操控模式下难免出现动作偏差或精度不足的问题，极易诱发设备误动或安全事故。通过部署在服务器端的数据比对功能，自动化平台可将实时采集的电压、电流、温度等数值与预设阈值进行综合研判，从而在监控端即可完成对设备状态的精准掌控。这种依托自动化技术的管控模式，有效减轻了运维人员的现场负担，推动变电运行向智能化方向稳步迈进[3]。

（二）电力自动化技术在电网中的应用

规模化的电网电力系统需集中一些自动化监管去进一步实现大数据高精度的传输，在一些精细化的监控过程中去解除一些实际的故障。在机械化的属性传输中，针对一系列监测的需求，在技术高精度比对过程中实现技术的重要性作用。一些电力自动化技术可在整体性的电网中减少时间与空间的配置，在远程数据的控制端实现问题的有效解决。一些系统内部的多元控制端口技术在电网技术运行领域主要有三方面的集中体现。

在一些电力自动化技术的预测控制端口必须实现状况重现，在一些电网的基本情况中去进一步降低故障发生率，在多元化端口采用先进方式进一步实现故障预判及协约化处理；其次，一些电动多元的自动化分析技术必须保证技术机制过载需要，在多元智能分析领域进一步控制峰值运行，可以通过技术电流的统一控制实现持续多样的保护。在需要统一充电的过程中必须防止一些设备电流过大造成的损坏，降低电力工程的维修维护相关性质的频率，进一步的提升家庭的用电质量，可满足家庭多阶段的配置电需求，在多元的

 Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

阶段实现经济效益的提升；最后，在电网系统的发展过程中，一些技术阶段的要求可在故障发生时提供帮助[4]。

（三）电力自动化技术在基础发电厂的应用

发电厂是电力能源的生产源头，一旦停机中断，会对区域经济造成较大冲击。

在发电环节，自动化管理主要依赖各类传感技术。传感器实时感知炉膛温度、燃料存量、设备振动等关键指标。系统据此判断燃料补给时机和维护保养节点，确保燃烧过程处于最优状态。

自动化系统替代了人工巡检和重复操作。现场人员的劳动强度因此降低，参数调整的精确度也有所提高。发电厂获得更长周期、更安全稳定的运行保障。

发电机组并网时，多个电站之间需要协调配合。自动化技术通过网络化连接和智能控制，记录并网瞬间的相位、频率及电压数据。这有助于多个电源点实现平滑接入和功率平衡。不同电站的并网条件存在差异，自动化系统可根据预设逻辑做出调整，从而减少人工干预。

多电站协同运行时，自动化平台可集中调控跨区域的电流分布。该平台利用技术精度优势，替代人工完成复杂且风险较高的操作指令。整个发电体系因此实现更高水平的智能化运行，稳定性与可靠性得到增强。现场人员主要负责监控系统状态，无需频繁进入高风险区域作业。作业安全性随之提升，劳动条件也有所改善。此外，自动化平台还能根据实时电流变化自动调整调节策略，进一步降低人为操作失误的可能。

（四）电力自动化技术在调度管理中的应用

力调度维持电网平衡运行，负责协调发电、输电、配电各部分的工作。传统调度模式中，值班人员依靠电话沟通和经验判断来分配负荷、下达指令。这种模式响应速度较慢，遇到复杂情况容易出现信息滞后或决策失误。

电力自动化技术引入后，调度管理出现显著变化。调度中心利用能量管理系统和数据采集与监控平台，实时获取全网各节点的运行参数，包括发电出力、线路负载、母线电压及频率波动等。自动化系统对上述数据进行整理和可视化展示，帮助调度人员快速掌握电网的整体运行状态。相比传统方式，信息获取更及时，调度响应也更准确。

系统在实际运行中持续监测各线路的电流和电压。当某条线路接近载流极限，或某个区域出现电压越限，内置预警机制会立即发出告警信号。同时，系统推送相应的调整建议，为调度决策提供数据支持。调度人员不必时刻紧盯大量仪表，可以更专注于判断和处理异常情况。

负荷预测和发电计划编制方面，自动化技术也有应用。系统分析历史负荷数据、气象条件和特殊事件。高温天气或节假日期间，用电需求会出现明显波动。系统据此预判未来时段的用电需求，并优化机组的启停时间和出力曲线。根据预判结果提前调整发电安排，可以减少能源浪费，提高电网运行的经济性。

这种基于数据的调度方式，提高了发电资源的利用效率。它能够减少因供需失衡导致的弃风弃光或拉闸限电现象。以风电为例，当预测到夜间风力较大时，系统可以提前安排火电机组降负荷，为风电让出空间。这样一来，清洁能源得到更充分利用。

自动化调度模式能够有效降低调度人员的工作负担。工作人员无需频繁电话沟通与手动登记各类数据，只需依托监控屏幕实时掌握系统运行情况，可将更多精力投入工况分析与调度决策。电力自动化技术的应用，使电网调度管理更加精细高效，同时也具备了更强的预判能力[5]。

四、结束语

电力行业存在发展起步较晚、作业环境复杂、管理模式相对滞后等现实短板，针对上述现存问题，可从多维度完善优化方案。技术维度可搭建智能监控与数据校核体系，动态监测电力设备运行情况，及时排查潜在故障风险。运行环节依托自动化技术完善负荷预估与发电排布方案，维系电力供给与用电需求的动态适配。管理环节整合信息化资源强化调度统筹能力，弱化人工主观判断造成的决策误差。

参考文献

[1] 孙新鑫，王金峰，刘海青．智能电网电力工程中电气自动化安装技术的应用与创新[J]．消费电子，2026(2)：26-28.

[2] 朱宗晖，魏育才．电气工程及自动化技术在电力系统中的应用分析[J]．消费电子，2025(7)：149-151.

[3] 李政浩，乔旭东，刘杰．电力电子技术在电气工程自动化中的创新应用[J]．全面腐蚀控制，2025，39(8)：57-59.

[4] 臧传星，王文清，陈家辉．电力工程中电气自动化技术的分析和应用[J]．现代工业经济和信息化，2025，15(7)：127-129.

[5] 运广超．电气自动化技术在电力工程中的应用探究[C]//新技术与新方法学术研讨会论文集．2024：1-4.

Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

电力工程电气专业与土建施工协同配合措施探析

彭程
韶关市关山工程建设集团有限公司，广东 韶关 512000
DOI:10.61369/EPTSM.2026040016

摘　　要： 本文系统论述了电力工程中电气专业与土建施工配合的重要性与关键环节。通过深入分析从精细化放线定位、结构体预埋、砌体施工到设备安装、竣工检测的全过程配合策略，文章旨在构建一套涵盖设计、施工与验收各阶段的多层次、精细化协同管理体系，以有效规避施工冲突、减少返工、提升工程整体品质，最终为电力工程建设事业的可持续发展提供坚实保障。

关 键 词： 电力工程；电气专业；土建施工；建议措施

Exploration on Collaborative Measures Between Electrical Engineering and Civil Construction in Power Projects

Peng Cheng
Shaoguan Guanshan Engineering Construction Group Co., Ltd., Shaoguan, Guangdong 512000

Abstract: This paper systematically discusses the importance and key aspects of collaboration between electrical engineering and civil construction in power projects. Through an in-depth analysis of collaborative strategies throughout the entire process, from precise setting-out and positioning, structural embedment, masonry construction to equipment installation and completion inspection, the article aims to establish a multi-level, refined collaborative management system covering all stages of design, construction, and acceptance. This system is designed to effectively avoid construction conflicts, reduce rework, enhance the overall quality of the project, and ultimately provide solid support for the sustainable development of power engineering construction.

Keywords: power engineering; electrical engineering; civil construction; suggested measures

引言

电力工程作为一项复杂的系统工程，其成功实施高度依赖于电气专业与土建施工两大板块的无缝衔接与深度配合。在现代电力设施趋向大型化、复杂化与智能化的背景下，任何“各自为政”的施工模式都极易引发预留预埋偏差、空间冲突、结构破坏等一系列问题，不仅造成工期延误与成本超支，更可能埋下深远的安全隐患。因此，打破专业壁垒，构建一套从前期规划到竣工交付的全流程协同作业机制，已成为提升电力工程建设管理水平、确保项目成功交付的必然要求。

一、电力工程电气专业与土建施工配合的重要性

（一）降低施工问题发生率，保障工程进度与质量

在电力工程实践中，电气专业与土建施工的紧密配合是预防和减少现场问题的关键环节。电力工程是一个复杂的系统工程，其中包含大量的预埋管件、接地装置、设备基础以及电缆通道等，这些都必须在土建施工阶段精准预留、预埋。如果电气与土建专业沟通不畅，极易出现预留孔洞位置偏差、预埋件遗漏或尺寸不符等问题，导致在电气安装阶段需要进行大规模的凿墙、打洞甚至结构加固。因此，通过建立有效的协同工作机制，如图纸会审、技术交底和联合巡检，能够将潜在冲突解决在施工之前，确保土建施工为后续电气安装提供准确、完善的工作面，从而从根本上保障工程得以顺畅、高效地推进，并达成预定的质量目标。

（二）增强设备应用效果，优化工程结构性能

电气设备能否发挥其最佳性能，很大程度上取决于其安装基础与运行环境，而这正是土建施工所提供的基础。以主变压器、高压开关柜等大型重要设备为例，它们对基础的水平度、牢固度以及抗震能力有着极高的要求。通过与土建专业的深度配合，可以确保设备基础严格按照电气专业的荷载、尺寸和振动要求进行设计和施工，为设备提供稳定、可靠的支撑。同时，控制室、配电室等场所的土建结构设计，还需综合考虑通风、散热、防潮、防水以及电磁屏蔽等因素，为精密电气设备创造一个适宜的运行环境，这对于延长设备寿命、保障系统稳定运行至关重要[1]。

（三）提升工程建设水平，促进行业持续发展

电气专业与土建施工的配合，其意义远超单个工程的范畴，它代表着现代电力工程建设管理的先进理念和技术集成水平。这

 Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

就要求电气设计与土建施工必须从项目策划阶段就深度融合，运用建筑信息模型（BIM）等数字化技术进行协同设计和碰撞检测，提前发现并解决管线与结构、设备与空间之间的冲突。这种精细化的配合模式，不仅实现了对性能优越的电气设备的高效利用，也确保了土建结构能够完美承载并适应电气系统的需求，保持了其长久的耐用性和安全性。从行业层面看，这种系统化、前瞻性的配合实践，推动了技术标准和管理规范的不断完善，为整个电力工程建设事业注入了创新的技术内涵，引领行业向更高质量、更高效率的方向持续发展，为国家能源基础设施的现代化建设提供了坚实保障。

二、电力项目安装和土建施工配合的关键环节

（一）落实精细化放线定位，夯实电土协同基础

在项目启动的初期规划环节，依据电气设计蓝图对各类管线的敷设路径与设备的具体安装点进行精确布局是至关重要的第一步。现场操作人员应借助高精度电子测量仪器，将图纸中的每条线路走向在现场进行严格标定与复核，此举既能保障后续电气设施安装流程的顺畅无阻，也能从源头上杜绝因定位错误引发的施工返工，从而实现工期与成本的有效控制。在主体放线工序完成后，技术团队还需进一步依据规划方案，对所有预埋的电缆保护管、接地装置及各类穿墙套管等进行精确的空间定位，并在土建浇筑与回填作业中对其采取加盖防护盖板或加装坚固护套等预防性措施，以确保这些隐蔽工程构件在复杂的交叉施工环境中始终保持完好状态。最后，在土建结构封模或砌筑前，必须进行一次全面的图纸复核与现场查验，系统性地核对所有预留孔洞与预埋件的位置、规格是否与设备安装要求完全匹配，任何发现的偏差都需立即进行调整与修正，从而在根本上确保所有预留条件的100%准确[2]。

（二）科学规划线路路径，确保施工精准高效

在电力设施与建筑结构协同作业的过程中，路径规划环节需要综合考量设计方案的指导原则与建筑结构预留的管道空间。实际操作中，工程团队不仅要统计供电回路的总体数量，更要精确定位每条线路与终端电器元件的对应关系，通过建立三维空间坐标模型实现线路布局的精准映射。这种立体化布局方法能有效预防因路径冲突导致的二次改造，同时为建筑结构的钢筋绑扎与模板支设预留充足操作空间。为实现毫米级的定位精度，建议采用智能放样机器人配合BIM模型进行现场放样，其发射的激光基准线可直接在施工面上形成投影标记。作业期间，电气技术人员应与混凝土浇筑班组保持实时沟通，通过设立专用通道、采用可拆卸定位支架等措施，形成交叉作业保护机制。路径设计阶段还需引入全生命周期管理理念，重点规避狭窄夹层、潮湿空间等不易检修的区域，所有电缆桥架与保护管的敷设高程必须严格遵循防水防潮规范，重要回路应设置双重防护层，从而构建安全可靠的电气布线系统。

（三）结构体预埋阶段的协同作业与质量控制

在土建结构施工过程中，电气管线的敷设必须严格遵循设计图纸的路径规划与埋深要求，确保所有电气通道与建筑结构形成有机整体。施工团队在完成定位放线后，需采用分段式作业法进行管线铺设，既要保证套管间距符合散热要求，又要避开结构受力主筋位置。当进行排水管道与电气导管交叉施工时，机电安装班组应与土建模板工、钢筋工建立动态协调机制，通过联合验收确保所有预埋件与钢筋网可靠固定，防止混凝土浇筑时发生位移。针对焊接工艺质量控制，建议采用超声波探伤与红外热成像等无损检测手段，对接地扁铁搭接处、防雷引下线的连接点进行全数检查，确保其机械强度与电气连续性完全达标。在大型基础底板混凝土连续浇筑期间，应安排电气技术人员全程旁站，使用金属定位仪对已敷设管线进行周期性扫描监测，一旦发现保护层破损或管线移位立即启动应急预案，从而在复杂施工环境下始终保持预埋管线的完整性与安全性[3]。

（四）砌体施工阶段的精细化协同管理

在建筑主体结构砌筑过程中，电气安装团队需对土建预留的管线通道实施系统性核查，重点检测孔洞定位精度与截面尺寸是否符合设计标准。这项核查工作具有关键意义，任何尺寸偏差都将直接影响机电管线的敷设质量——当预留孔洞截面不足时会导致管线无法贯通，而尺寸过大则需采取额外加固方案，这些情况都会增加工程复杂性与建设成本。在砌体作业推进期间，必须实施严格的现场环境管理，及时清除施工产生的碎料杂物，严防其掉入管道内部造成堵塞隐患。同时要特别注意防水工程的衔接配合，建议将电缆桥架穿越墙体等作业安排在防水层施工前完成，避免后期开凿破坏防水体系的完整性。对于电缆敷设工序，应采取连续作业方式确保线路铺设一次成型，最大限度减少重复施工。

三、电力工程安装与土建施工的配合策略

（一）砌体施工阶段的多层次预埋管控体系

在建筑主体工程施工阶段，由于大部分电力设备需待土建主体完工后进行安装，因此前期精准的预埋预留工作显得尤为重要。这项系统性的预埋作业可划分为三个关键阶段实施：第一阶段是在模板支护过程中，根据电气定位基准完成各类预留孔洞的模具安装，包括配电箱预留洞、线管穿墙套管等，必须确保其平面坐标与标高完全符合设计要求。第二阶段结合钢筋绑扎工序，同步进行电气管线的敷设与固定，所有暗敷管道需采用专用卡具与钢筋骨架可靠连接，并在线路转折处增设过渡盒体。在此阶段还需完成大型设备基础螺栓的预埋定位，以及防雷接地装置的跨接焊接，为后续机电系统安装创造有利条件。第三阶段作为质量把关环节，需组织电气与土建技术人员对已完成的预埋件进行联合验收，运用管道探测仪等设备核查隐蔽工程的完整性，对发现的保护层破损、管线堵塞等缺陷及时整改，最终形成完整的工序交接文件，为后续作业面移交提供可靠依据。

（二）设备安装阶段的协同作业与技术优化

在工程建设初期，必须对所有进场建筑材料进行严格的质量检验，确保其各项性能指标符合设计规范，从源头上保障工程质

Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

量。进行室外电气设备线路连接时，各参建单位的技术人员需要建立常态化的沟通机制，通过定期协调会议及时解决线路敷设过程中出现的接口匹配、路径优化等问题。为了便于后续的检测维护，接地系统施工时应设置永久性标识点，并采用数字式接地电阻测试仪进行多点检测，确保所有接地装置的电气连接性能满足安全要求。监理单位在此过程中需对接地网的埋设深度、焊接质量进行全程监督，并留存影像资料。在杆塔基础施工阶段，电气与土建专业应采用联合测量定位技术，共享测绘数据，运用 BIM 技术进行碰撞检测，有效避免杆坑与地下管线的空间冲突。针对现场出现的特殊工况，如电杆实际尺寸与设计存在偏差时，应遵循动态调整原则，通过优化杆位布置、调整电缆保护管埋设角度等技术创新，既保证工程安全性又减少不必要的工程量，同时为后续设备吊装作业预留合理的操作空间 [4]。

（三）竣工阶段的精细化协同与信息化检测

在电气安装工程的收尾阶段，各专业团队需要通过系统性的联合检查来确保工程品质，特别要关注电缆出口的防水密封处理、金属盖板的防腐安装等细微环节，确保电力线路在全生命周期内免受环境侵蚀。当进行主控室机柜定位和照明系统安装时，安装人员必须与土建装饰班组保持动态协调，基于共享的基准线反复核对嵌入式灯具的安装位置与埋管路径，形成完整的工序交接记录。电气技术人员还应参照室内弹出的最终标高线进行开关面板的精准定位，待所有预埋管线经隐蔽验收合格后方可允许墙面抹灰作业，从而保证所有终端设备安装的横平竖直。在设备最终就位过程中，必须采取有效的成品保护措施，如在精密设备与墙体接触部位加装橡胶垫片，当出现安装孔位偏差时，应立即启动土建与机电的联合修复方案。此外，建议引入基于云平台的协同管理系统，通过移动终端实时上传现场数据，有效消除因沟通不畅导致的质量缺陷，构建全程可视化的项目协同机制。

（四）配电箱安装的精准配合与质量控制

在电力工程建设中，配电箱的规范安装是整个供电系统可靠运行的重要保障。施工初期需严格依据设计图纸的技术参数，预先完成基础型钢的加工制作，这是承载配电设备的关键结构。在型钢安装过程中，作业人员必须确保焊接质量达到规范标准，焊缝均匀饱满并做好防锈处理，同时使用高精度水平仪对安装位置进行多点检测，通过测量型钢自然状态下的最高点作为基准参照，将安装误差控制在允许范围之内。当进行箱体与线管对接时，要特别注意连接部位的工艺处理：与钢管连接处的开孔必须采用液压开孔器作业，确保孔洞直径与线管外径形成最佳配合；与桥架连接处则需核对连接板的安装间距，使用专用过渡件消除尺寸偏差。每个连接环节都应经过三次复核——初次安装后复核定位尺寸，连接完成后复核机械强度，最终整体复核接地连续性。这种精细化的安装流程不仅能显著提升配电系统的运行稳定性，更能有效预防因连接松动导致的接触电阻增大等安全隐患，为整个电力系统的长期稳定运行奠定坚实基础 [5]。

结束语：综上所述，电力工程中电气与土建的协同作业绝非简单的工序衔接，而是一项贯穿项目全生命周期的系统性工程。从前期精准的放线预埋，到中期对砌体、设备安装的精细化管控，再到后期依托信息化手段的联合检测，每一个环节的紧密配合都是构筑优质工程不可或缺的基石。实践证明，通过建立常态化的沟通机制、应用 BIM 等先进的协同技术、并贯彻全员参与的协同理念，才能推动电力工程建设行业向更高水平的标准化、精细化与智能化方向持续发展。

参考文献

[1] 张敬敏 . 电力工程电气专业与土建施工配合的建议措施新探 [J]. 科技创新与应用 ,2021,11(17):115-117.

[2] 赵鹏 . 电力工程电气专业与土建施工配合的建议措施新探 [J]. 城镇建设 ,2021(20):324-325.

[3] 梁力 . 电力工程电气专业与土建施工配合的建议及措施 [J]. 建筑工程技术与设计 ,2024,12(36):67-69.

[4] 白晓丁 . 浅析电力工程电气专业与土建施工配合的建议及措施 [J]. 电脑采购 ,2024(21):116-118.

[5] 余红亭 . 浅谈变电站工程土建施工与电气安装的配合 [J]. 百科论坛电子杂志 ,2021(24):3812-3813.

 Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

新能源发电企业全生命周期技术监督优化研究

卢必娟
广州发展新能源集团股份有限公司，广东 广州 510623
DOI:10.61369/EPTSM.2026040017

摘　　要： “双碳”目标驱动下，传统技术监督模式已难以适应风电、光伏设备数量庞大与分布分散的行业特点。以设备全生命周期管理理论为框架，构建覆盖规划设计、建设调试、运行维护与退役评估四个阶段的技术监督优化路径，引入 I–V 扫描、无人机红外巡检与风机振动监测等技术手段加以验证。实验结果显示，设备隐蔽缺陷识别率显著提升，非计划停运时长明显压缩，数智化平台的集成应用有效推动技术监督从事后响应向主动预控转型。

关 键 词： 全生命周期；技术监督；新能源发电；风险预控；数智化平台

Research on Optimization of Technical Supervision throughout the Life Cycle of New Energy Power Generation Enterprises

Lu Bijuan
Guangzhou Development New Energy Group Co., Ltd., Guangzhou , Guangdong 510623

Abstract: Driven by the “dual carbon” goal, traditional technical supervision models can no longer meet the industry’s needs, given the large number and dispersed locations of wind and solar power equipment. Based on the theory of equipment life-cycle management, this paper proposes an optimized technical supervision approach covering four phases: planning and design, construction and commissioning, operation and maintenance, and decommissioning evaluation. Technical methods such as I–V curve analysis, infrared inspections using drones, and wind turbine vibration monitoring are utilized to validate this approach. Experimental results show that the ability to detect hidden defects in equipment has significantly improved, unplanned downtime has been reduced, and the integrated use of digital platforms has effectively transformed technical supervision from a reactive approach to proactive prevention.

Keywords: full life cycle; technical supervision; new energy power generation; risk prevention and control; digital intelligence platform

引言

风电、光伏装机规模的快速扩张以及新能源装机在电网中角色的深刻转变，对技术监督管理提出了更高的要求[1]。现行新能源发电企业的技术监督体系大多沿用传统火电或水电的框架，在监督标准、覆盖范围与技术手段上与新能源发电行业特点存在明显错位，监督重点不突出、主动预控能力薄弱等问题制约着企业安全运营水平[2]。将全生命周期管理理论引入新能源发电的技术监督领域，结合数智化技术手段系统构建覆盖设备全周期的新能源技术监督体系，对提升设备可靠性与运营效益具有重要实践价值。

一、新能源发电企业技术监督的体系构成与现存挑战

（一）风电与光伏发电技术监督的专业领域划分

新能源发电企业的技术监督体系在传统火电九大专业框架基础上，结合风电与光伏发电的行业特点加以重构[3]。风电技术监督涵盖风力机监督、绝缘监督与继电保护及安全自动装置监督、金属监督、电能质量监督、能效监督、化学监督、监控自动化与网络安全监督八大专业领域，其中风力机监督为风电特有专业，重点针对叶片、齿轮箱、主轴、塔筒与变桨偏航系统等风力发电机组核心机械部件开展状态跟踪与缺陷管控。光伏技术监督则着重于逆变器与汇流设备的绝缘状态、组件效能衰减与支架金属结构完整性及并网电能质量等方面[4]。风力发电场和光伏发电站这两类电站均高度依赖电力电子设备，如变流器、逆变器的运行状态，直接影响并网性能，构成技术监督的核心对象。

（二）当前技术监督模式的主要瓶颈与成因

当前新能源技术监督模式存在四方面系统性瓶颈：一是监督标准体系不健全，储能电池、光伏组件与风电机组等关键设备的监督依据分散于行标、团标甚至厂家技术文件，标准权威性与统一性不

作者简介：卢必娟（1992.09–），女，汉族，湖北省当阳市人，职称：中级，工作领域：新能源发电企业技术监督管理。

Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

足，导致设备质量管控缺乏统一基准，关键设备质量参差不齐的问题较为突出[5]。二是监督范围适配性不足，对配储系统、充电桩等新业务的设备的监督标准和监督方法尚不完善，难以覆盖新能源电站点多面广的实际场景。三是技术手段数智化程度偏低，人工巡检面对数万块光伏组件或数十台风机存在明显覆盖盲区，金属部件内部裂纹、热斑等隐蔽缺陷难以在日常巡检中被发现，易被忽视，存在安全生产盲区[6]。四是各业务系统数据相互孤立，SCADA、视频监控与 AGC/AVC 等系统缺乏有效联通，监督工作停留于事后统计和分析，风险主动预控能力严重不足。

二、全生命周期管理框架下的技术监督优化路径

（一）规划设计阶段：设备选型与系统设计的前置审查机制

电站（场）的规划设计阶段是电站和设备全生命周期技术监督的源头关口，前置审查机制的建立对后续各阶段设备可靠性具有决定性影响。技术监督介入设备选型环节，重点审查光伏组件功率参数的真实性与衰减曲线合理性、风电机组关键部件的材料等级与疲劳寿命指标、变流器及逆变器的并网性能参数是否符合最新电网接入标准等。系统设计审查聚焦于集电线路截面选取的合理性、汇流箱与逆变器容量匹配关系、储能系统接入方案的安全边界设定。依据《电力技术监督导则》DL/T1051-2019及相关国家标准、行业标准的要求，建立设备准入技术规范清单，将标准符合性审查前置至采购招标阶段，从源头规避因设备质量缺陷或设计方案不合理引发的设备全生命周期运维隐患，降低后期改造和维护成本。

（二）建设调试阶段：安装质量管控与并网性能验收

建设调试阶段的技术监督重点在于确保设备安装质量与系统并网性能双重达标。安装质量管控方面，针对光伏支架焊接质量、组件串并联接线规范性、MC4连接器压接工艺、电缆头制作工艺、电缆敷设绝缘完好性等实施过程见证与抽检；风电机组安装监督重点覆盖塔筒法兰螺栓力矩、叶片安装角度偏差与机舱吊装对中精度及接地系统连续性。调试阶段依据并网技术规范，对逆变器及变流器的低电压穿越能力、电能质量指标（谐波、功率因数、电压偏差）与继电保护定值及整组传动试验进行系统性验证。储能系统调试重点是核验充放电控制逻辑、保护动作边界值及与主站 AGC/AVC 系统的通信协议一致性等内容，所有调试数据应纳入设备台账基础档案，作为运行阶段状态基准值的参考依据。

（三）运行维护阶段：现代化技术手段的集成应用与状态监测

1.光伏系统 I-V 扫描与无人机红外巡检的精细化监督

光伏系统的 I-V 扫描技术主要是通过采集光伏组串电流－电压特性曲线，与标准工况理论曲线对比，精准识别组件隐裂、热斑与旁路二极管失效等功率损失成因，监督粒度细化至单块组件层级。定期扫描数据可量化评估灰尘遮挡损失、指导光伏组件清洗计划的制定，并长期追踪组件功率衰减趋势，为寿命评估提供依据。无人机搭载可见光与红外热成像相机，按预规划航线自动执行全站巡检工作，可见光镜头识别光伏组件玻璃破裂、背板烧蚀等外观缺陷，红外镜头精准定位光伏组件热斑及连接故障，巡检图像经人工智能算法自动分析，缺陷位置标注至具体阵列与组件坐标，生成标准化巡检报告，两项技术的协同应用流程如图1所示。

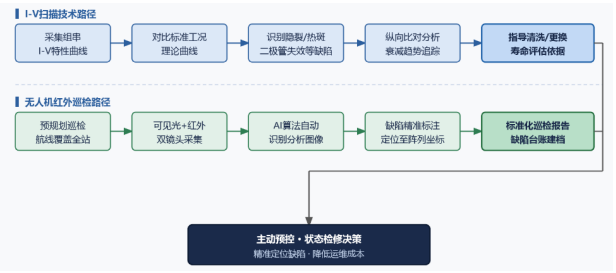


图1 I-V扫描技术和无人机红外巡检技术协同应用流程图

2.风机振动监测与净空监测的预防性管控

风机振动监测系统主要是在轴承座、齿轮箱与主轴等关键部位布置加速度传感器，持续采集振动信号并进行频谱分析，可在轴承点蚀、齿轮磨损与转子不对中等早期缺陷发展为灾难性故障前发出预警，有效预防齿轮箱失效或主轴断裂等重大事故。通过振动趋势数据与历史健康基线的持续比对，为状态检修计划的动态调整提供直接依据，减少非必要停机造成的发电量损失，净空监测系统通过激光测距或毫米波雷达技术，实时监测叶尖与塔筒间的最小间隙，在碰撞风险临近时触发预警。净空数据的长期趋势分析可间接反映塔筒垂直度偏差与基础沉降及叶片形变等结构性问题，将安全距离要求转化为可量化、可追溯的连续监督指标。

3.电缆故障快速定位技术的效能提升

新能源电站集电线路距离长、延伸范围广，部分大型光伏发电站和风力发电场内电缆总长度可达几十公里甚至数百公里，传统的电缆故障查找主要依赖人工沿线排查，耗时可能长达数天，严重影响电站的发电量和恢复效率。电缆故障快速定位技术综合应用时域反射法与行波测距法及阻抗法，可将故障点定位精度控制在数米范围内，故障排查时间从数天压缩至数小时，显著缩短非计划停运时长。针对接地、短路与断线等不同故障类型，采用差异化的测试方法与参数配置，提升复杂地形与长距离电缆场景下的定位准确率。定期开展电缆绝缘状态检测，结合历史故障数据建立集电线路健康档案，对绝缘劣化趋势进行预判，实现由故障后抢修向故障前预控的监督模式转变，直接减少因线路故障引发的电量损失。

（四）退役评估阶段：设备寿命诊断与资产全周期管理

退役评估阶段的技术监督核心在于科学判定设备剩余寿命，避免过早退役造成资产浪费或超龄运行引发安全风险，光伏发电站的光伏组件寿命诊断依托长期 I-V 扫描数据，结合外观检查与电致发光（EL）检测及功率衰减曲线，综合评估组件继续服役的经济性与安全性边界。风力发电场的风电机组退役评估重点针对塔筒焊缝疲劳损伤与主轴及轮毂金属疲劳状态、叶片结构完整性开展无损检测，结合累计等效载荷数据评估关键部件的剩余疲劳寿命。变压器、电缆等电气设备的退役决策依据绝缘老化程度与油色谱分析结果，以及历次预防性试验的数据变化趋势综合

 Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

判定，退役评估结论直接反馈至资产管理系统，指导备品备件储备策略与技改投资计划，实现设备全生命周期资产价值的最优化管理。

三、数智化平台驱动的闭环监督体系构建与实验验证

（一）技术监督数智化平台的总体架构与功能模块设计

技术监督数智化平台以工业互联网为基础，综合运用边缘计算、大数据分析、人工智能与云计算技术，构建“感知层—传输层—平台层—应用层”四层架构。感知层汇聚 SCADA、振动监测、净空监测、I-V扫描、无人机巡检与电缆检测等多源异构数据，打通各业务系统数据孤岛；传输层依托工业以太网与4G/5G通信网络，保障海量实时数据的可靠传输；平台层构建设备数字档案库与健康状态模型，支撑全生命周期数据的存储、清洗与关联分析；应用层部署设备台账管理、智能告警、故障预测、状态检修决策与绩效分析等功能模块。平台通过对多维监测数据的深度融合分析，将原本分散独立的监督手段整合为统一的闭环管控体系，实现技术监督从人工驱动向数据驱动的根本转变，为全生命周期精准管理奠定平台基础。

（二）多场景实验验证：缺陷识别率与非计划停运改善效果

为验证数智化平台与现代化技术手段协同应用的实际效果，我司选取了典型光伏电站与风电场作为实验对象，分别模拟传统监督模式与优化后监督体系的运行场景，对关键监督指标进行系统性对比采集。在龙川龙母光伏电站部署I-V扫描与无人机红外巡检系统，针对组件隐裂、热斑与接线虚接等典型缺陷类型统计识别率变化；在应城东岗风电场接入振动监测与净空监测系统，记录早期缺陷预警响应时效及非计划停运事件频次。两类场景的实验数据均经平台大数据模块统一清洗与处理，以缺陷识别率、平均故障响应时间与非计划停运时长及发电量损失率为核心评价指标，量化评估优化体系的实施效果，实验周期覆盖完整运行年度以确保数据代表性。

表1 优化前后技术监督关键指标对比

评价指标	传统监督模式	优化后监督体系	提升幅度
组件缺陷识别率	62%	91%	+29%
早期缺陷预警响应时间	72 h	8 h	缩短89%
年非计划停运时长（h/台）	186 h	54 h	缩短71%
发电量损失率	4.8%	1.3%	降低3.5%
电缆故障定位耗时	48 h	4 h	缩短92%
人工巡检覆盖率	73%	98%	+25%

优化后监督体系在缺陷识别、故障响应与停运管控等核心指标上均取得显著改善。组件缺陷识别率由62%提升至91%，源于I-V扫描与无人机红外巡检将监督粒度细化至单体设备层级；早期缺陷预警响应时间压缩89%，得益于振动监测数据与平台智能告警模块的实时联动；年非计划停运时长缩短71%，印证了预测性维护策略对计划外停机的有效抑制。从推广适用性角度评价，数智化平台架构具备良好的横向扩展能力，可按电站类型、规模与地理分布灵活配置接入方案，适用于集中式与分布式新能源电站场景，现代化监测技术与平台的模块化集成设计，支持企业根据自身监督体系建设阶段分步实施，降低整体部署门槛，具备在新能源行业范围内推广应用的现实基础。

四、结语

新能源发电企业技术监督工作全生命周期视角的引入，从根本上改变了新能源发电企业技术监督碎片化、被动化的管理局面。将监督工作贯穿到设备的规划设计、建设调试、运行维护到退役评估的全生命周期中，各阶段数据相互支撑、动态反馈，形成持续迭代的闭环管控机制。随着人工智能与边缘计算技术与技术监督体系的深度融合，缺陷识别的预测精度与故障响应效率将进一步增强，设备全生命周期的数字档案将成为资产决策与状态检修的核心依据，推动新能源发电企业在降本增效与安全管理两个维度上实现协同跃升。

参考文献

[1]李晶 . 新能源发电项目全生命周期档案管理的数字化转型路径研究 [J].办公室业务 ,2025,(20):94-96.

[2]党相琪 . 新能源发电项目全生命周期成本管理优化路径研究 [J].商讯 ,2025,(18):126-128.

[3]李学刚 , 靳晓勇 . 新质生产力在新能源发电企业安全生产监管中的应用 [J].电力安全技术 ,2025,27(01):9-13.

[4]马瑞东 , 瞿丽莉 , 叶智 . 新型电力系统背景下新能源发电企业技术监督管理体系创新 [J].电器工业 ,2024,(11):79-83.

[5]纪方旭 , 何尧玺 , 李雪松 , 等 . 基于全生命周期的新能源数字化系统及功能应用规划研究 [J].长江技术经济 ,2024,8(02):82-86+96.

[6]宋静怡 , 林朋飞 , 张珍珍 , 等 . 新能源发电全生命周期评价及环境协同发展——以甘肃省新能源发电为例 [J].中国资源综合利用 ,2020,38(03):170-175.

Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

基于传感器技术的风电机组在线故障诊断研究

梁振国[1]，李洪凯[1]，刘雄[1]，张东东[1]，郭翔[2]
1.中广核（甘肃）新能源有限公司，甘肃 兰州 730070
2.甘肃轩岳生态科技有限公司，甘肃 兰州 730070
DOI:10.61369/EPTSM.2026040018

摘　　要： 针对风电机组复杂运行环境下故障诊断准确性与实时性不足的问题，围绕传感器技术与多源数据融合方法展开研究。构建了涵盖振动、温度与应变的多源传感器数据采集系统，提出基于信号预处理与特征提取的融合分析策略。通过建立机器学习故障识别模型，结合动态阈值更新机制，优化了在线诊断的实时性与准确性。设计了完整的硬件架构与软件平台，实现诊断系统的闭环验证。研究表明，该方法可有效提升故障特征辨识度，增强系统鲁棒性，为风电机组智能运维提供理论支撑。

关 键 词： 风电机组；传感器技术；多源数据融合；在线故障诊断；机器学习

Research on Online Fault Diagnosis of Wind Turbine Based on Sensor Technology

Liang Zhenguo[1], Li Hongkai[1], Liu Xiong[1], Zhang Dongdong[1], Guo Xiang[2]
1.CGN Gansu New Energy Co., Ltd.Lanzhou, Gansu 730070
2.Gansu Xuan Yue Ecological Technology Co., Ltd.Lanzhou, Gansu 730070

Abstract: To address the challenges of insufficient fault diagnosis accuracy and real-time performance in complex operating environments for wind turbines, this study focuses on sensor technology and multi-source data fusion methods. A comprehensive multi-source sensor data acquisition system covering vibration, temperature, and strain measurements was established, complemented by a fusion analysis strategy based on signal preprocessing and feature extraction. By developing a machine learning-based fault identification model integrated with dynamic threshold update mechanisms, the real-time performance and diagnostic accuracy of online monitoring systems were optimized. A complete hardware architecture and software platform were designed to enable closed-loop validation of the diagnostic system. Research findings demonstrate that this approach significantly enhances fault feature recognition capabilities and improves system robustness, providing theoretical foundations for intelligent operation and maintenance of wind turbines.

Keywords: wind turbine; sensor technology; multi-source data fusion; online fault diagnosis; machine learning

引言

风电机组长时间处于变载荷、强干扰的不良环境当中，关键部件频繁出现故障，这给电网安全以及运维成本带来了严峻考验。传统的定时检修模式很难解决突然失效的情况，非常必要开发出在线且精准的故障判断技术。传感器技术是实现状态感知的关键方法，所选用的传感器以及数据融合的质量会直接左右判断的效果。当前研究大多侧重于单个信号的分析，对于多物理量共同判断以及动态阈值适应方面关注较少。本文依据传感器选择的原理，全面论述了从数据收集到信号处理，再到特征融合、判断建模直至系统框架的整套技术路线，力求形成起一套具备较高可靠性和即时性的在线故障判断方法体系。

一、风电机组故障诊断与传感器技术概述

（一）风电机组常见故障类型与机理

风电机组故障大多集中在叶片、齿轮箱、发电机以及变桨系统这些关键部件上，其失效机理表现出多物理场耦合的特性。叶片故障主要体现为裂纹、覆冰和气动不平衡，这源于交变载荷和材料疲劳。齿轮箱故障主要是齿面磨损、断齿以及轴承受损，其振动响应具备非线性调制的特点。发电机故障涉及绕组短路、转子偏心和轴承电蚀，电磁故障与机械故障相互交织。变桨系统故障常常由液压泄漏或者电机失控引起，造成桨角调节迟缓[1]。各

作者简介：梁振国（1996.03-），男，汉族，甘肃武威人，学历：大学本科，研究方向：风力发电。

 Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

种故障在时域、频域以及统计特征方面都有特有的表现形式，要依据全面的传感信息来做到精确识别。

（二）传感器技术原理与选型依据

传感器属于机组状态感知的基本元件，其选型要综合考量测量参量、环境适应性、安装方式以及信号特性。振动传感器大多以压电式加速度计为关键部件，其频响范围较广，灵敏度较高，适合用于检测齿轮箱和轴承故障。温度传感器常采用热电偶或者铂电阻，用以监测发电机绕组和齿轮箱的油温，以此来体现热载荷是否出现异常。应变片通过测量结构形变来判断叶片和塔筒是否存在疲劳损伤，具备局部应力敏感的特点。在选型的时候，重点在于关注灵敏度、动态范围、抗干扰能力以及与检测系统的接口适配情况，保证数据采集既准确又连续。

二、传感器数据采集与信号处理方法

（一）多源传感器数据采集系统设计

多源传感器数据采集系统要达成多种物理量信号的同步采样，并持有统一的时间基准，防止由于时延不同而造成特征被误读。系统前端设有模块化的采集单元，此单元分别接上振动、温度、应变等传感器的信号，通过高精度的模数转换以及抗混叠滤波来优化信噪比。采集控制层依靠工业即时以太网协议做到分布式节点的同步触发，确保数据对齐的精准度。数据汇聚层利用边缘计算节点执行初步校验和打包操作，以此减轻上位机的输送压力。在系统设计的时候重视通道的多余性、抗冲击性能以及防护等级，才能适应机舱内部高电磁干扰、温差大的工作环境。

（二）信号预处理与特征提取方法

原始传感信号存在环境噪声、安装谐振以及工频干扰，要借助预处理加强特征纯度。利用带通滤波去掉低频趋向项和高频电磁干扰，依据小波阈值去噪保存故障冲击部分。关于振动信号，在时域获取峰值、峭度、脉冲因子等统计特征，在频域通过傅里叶变换找出转频和啮合频率边带。温度与应变信号经过滑动平均滤波之后，把变化率和累积偏差当作特征量[2]。对于非平稳工况，则采用短时傅里叶变换和经验模态分解，得到时频域局部化的特征，给后续融合诊断提供高区分度的输入。

三、基于多传感器融合的故障特征分析

（一）振动信号特征分析与故障关联

振动信号对齿轮啮合异常、轴承损伤以及转子不平衡十分敏感。在平稳工况下，通过包络谱分析能够获取到轴承故障特征频率及其倍频，以此来判断内圈、外圈以及滚动体是否受损。在变速工况下，利用阶次追踪技术把时域信号变换到角度域，去除转速波动带来的影响。振动特征和故障类型之间有着确切的对应关系，如齿轮断齿会使得啮合频率的边带能量变强，而轴不对中则会引起二倍频分量大幅增多。建立起振动特征图谱库之后，给故障模式识别赋予定量标准，进而支持后续融合诊断模型的形成。

（二）温度与应变信号的融合诊断

温度和应变信号可体现机组热载荷及结构应力分布情况，二者与振动特征存在互补关系。发电机绕组温度不断上升，伴有振动加重现象，这表明可能存在匝间短路或者冷却系统故障。齿轮箱油温出现异常波动，且振动高频分量一同显现，这种情况有利于判断润滑不良或者齿面磨损状况。应变信号能直观表现出叶片和塔筒弯矩的改变情形，如果应变幅值超出限定范围，并且与某特定风向下的振动相位相互作用，就可以判定是叶片不平衡或者塔筒发生共振。把温度和应变特性当作振动分析的辅助证据链条，可以有效地减小单一振动信号产生的误报概率，优化诊断结论的可信度。

（三）多源数据特征层融合策略

多源数据特征层融合期望把振动、温度、应变等不同物理量的特征结合起来表示，建立一个统一的故障特征空间。先对各个特征执行归一化操作，去掉量纲上的差别。用主成分分析法对高维特征实施降维处理，选取贡献度大的主要成分，减少多余的信息。凭借互信息法来分析各个特征同故障状态之间的关联程度，挑选出灵敏的特征子集[3]。在融合的时候利用加权投票制度，按照各个传感器在不同工作情况下的可信度自动分配权重。特征层融合能够很好地保存住各个物理量原本的资料，提升故障特征的完整性及其彼此间的区别能力，给分类模型提供优质的输入数据。

（四）多物理量时空关联特征提取

在机组运行时，振动、温度和应变信号存在本质的物理耦合关系，单独分别加以分析很难表现出故障的全部情况。时空关联特征获取就是要找出不同物理量在时间上共同变化的规律以及其空间分布特点。通过计算振动能量和温度梯度之间的动态时间规整距离，可以量化热－力耦合效应的时序一致性。此外，根据应变信号的空间分布差别，并结合振动传递途径来分析，就能够找到结构损伤的区域特征。采用图神经网络创建模型以体现传感器节点之间的拓扑联系，把物理衔接和信号相关性结合起来，获取表现故障流传途径的高阶特征，给后续的判断模型提供更具物理可解释性的输入。

四、在线故障诊断模型与算法构建

（一）基于机器学习的故障识别模型

选择支持向量机和随机森林作基本分类器，形成多层融合故障识别模型。用从历史故障样本获取的融合特征集来执行训练，通过网格搜索改良核函数参数和树深。支持向量机在小样本情况下，对于边界敏感的故障有着不错的分类效果。随机森林依靠整合学习加强泛化能力，还能给出特征的重要程度排序。按照不同的故障种类规划很多个二分类子模型，再依据投票机制得出最终的判断结论。在模型训练的时候运用交叉验证来防止过拟合，采用增量学习法，借助新收集的数据不断改善模型参数，顺应机组之间的差别以及运行环境的改变。

Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

（二）故障阈值设定与动态更新机制

固定阈值无法适配风电机组工况的波动及部件性能的衰减情况，因此要构建动态阈值更新机制。按照正常运行时各特征量的长期趋势，利用高斯混合模型来拟合特征分布，并把置信区间当作初始阈值。运用自适应滑动窗口，随时计算窗口内部特征均值的漂移量，再结合统计过程控制理论来识别异常变化。如果特征一直偏离并超出警戒线，就会自动启动阈值更新流程，防止由于老化或者季节性波动造成误报现象发生[4]。动态阈值机制既保障了诊断灵敏度的稳定性，又能够在机组整个使用寿命期间维持报警阈值的恰当性和自适应能力。

（三）诊断系统实时性与准确性优化

在线判断对即时性要求很高，要兼顾算法复杂度和识别精度。在边缘侧设置轻量化特征获取及预判断模型，只传送异常片段的数据，减轻传送和云端计算的压力。利用模型剪枝和量化技术缩小分类器规模，把单次判断延迟维持在毫秒级。从精准性优化来看，运用置信度考量模块，如果多个模型输出不一致就启动二次判别，并结合历史故障案例库执行相似度比对。形成判断结果的反馈循环，把现场确认结果当作监督信号，定时修正模型参数和阈值，做到系统精准性不断改善。

五、诊断系统架构设计与验证

（一）在线监测系统硬件架构设计

硬件架构采取分层分布式设计，其中，底层是传感器与采集终端层，中间层为边缘计算和协议转换层，最上层则是数据服务器和监测平台。传感器终端通过航空插头同采集模块相接，采集模块具备信号调理以及模数转换的功能，其可应对 IEPE、热电偶、应变桥等各类输入信号。边缘计算节点依托工业级的嵌入式平台，并运行即时操作系统，达成数据汇集、特征识别及初步判断的目的。数据服务器设置在风场集控中心，依靠光纤环网来与各个机组实施通讯，做到对全场域状态的集中监测。硬件设计时充分考虑到多余供电、电磁屏蔽以及防雷接地等因素，以确保系统长时间稳定运行。

（二）故障诊断软件平台与数据流设计

软件平台采取模块化架构，被划分成数据接入层、数据处理层、判断服务层以及应用显示层。数据接入层依靠 OPCUA 协议来对接硬件采集系统，达成多机组数据的标准化接入。数据处理层把信号预处理、特征获取以及融合算法加以封装，并提供统一的算法调用接口。判断服务层安排机器学习模型和动态阈值引擎，给出故障类型与置信度。应用显示层凭借 Web 组态技术做到状态仪表盘、历史趋势查询以及报警推送。数据流执行发布 – 订阅模式，确保判断结果及时发送到运维终端，利于远程分析与决策。

（三）系统性能评估与鲁棒性分析

系统性能评定包含三个主要方面，即诊断准确率、即时性以及鲁棒性。其中，准确率需借助对比现场实际故障记录和系统输出结果来执行统计，并全面考量漏报率与误报率。即时性要通过考察从信号采集直至报警输出的整个过程所耗时延并加以量化，保证符合在线检测的需求[5]。而鲁棒性分析着重关注在传感器失灵、通信中断以及电源波动等非正常工作状态下系统的反应情况，利用模拟传感器通道断开和网络丢包的情形，考察系统能否执行降级运行并自动复原。评定结果显示，此系统即便存在诸多故障并发且受到强大干扰的情况下，其诊断性能仍然较为稳定，具有一定的工程应用意义。

六、结语

围绕风电机组在线故障判断的需求，创建起包含传感器选型、数据采集、信号处理、融合判断以及系统达成的技术体系。多源传感器协同采集保障了状态信息的完备性，特征层融合策略优化了故障识别能力，机器学习和动态阈值机制做到了判断的精准化和自适应化。硬件与软件一体化设计保证了系统在复杂工况下具备即时性和稳定性。之后还要进一步探究多机组数据协同建模以及数字孪生融合判断，推动风电机组智能运维朝着预测性、积极性的方向发展。

参考文献

[1] 李俊卿，马亚鹏，胡晓东，等 . 基于 CBAM-InceptionV2- 双流 CNN 的风电机组轴承故障诊断 [J]. 智慧电力，2023,51(06):28-33.

[2] 桂斌斌，李泽兰，刘泳志，等 . 基于小波包和 PSO-BP 的风机滚动轴承故障诊断 [J]. 中国新技术新产品，2023,(11):5-9.

[3] 丁傲 . 基于自适应啁啾模态分解的风电机组轴承故障诊断研究 [D]. 华北电力大学 (北京),2023.

[4] 史宗辉，陈长征，田淼，等 . 基于 S-CBiGRU 的风电机组滚动轴承故障诊断方法 [J]. 机电工程，2023,40(02):232-238.

[5] 毛成，沈春和，崔悦，等 . 自适应频移变尺度振动共振轴承故障诊断 [J]. 南通大学学报 (自然科学版),2020,19(02):70-75.

 Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

交流380V电动执行机构电源电缆选型分析

季震宇
震旦企业管理服务（山东）有限责任公司，山东 济南 250000
DOI:10.61369/EPTSM.2026040019

摘　　要： 交流380V电动执行机构电源电缆的选型，应以安全运行与经济性为双重导向。选型应遵循国家标准，以载流量、电压损失、热稳定性和机械强度为核心依据，综合考虑额定电流、启动特性、敷设环境修正系数等因素进行计算。针对长距离、频繁启停等不同工况，需合理调整截面并选用适宜导体、绝缘及铠装结构。完整选型流程涵盖信息收集、初步选择及逐项校验，最终在满足技术约束的前提下兼顾投资与运行成本，实现可靠性与经济性的平衡。

关 键 词： 载流基准；压降约束；工况适配；流程校验

Selection Analysis of AC 380V Power Cables for Electric Actuators

Ji Zhenyu
Zhenchan Enterprise Management Services (Shandong) Co., Ltd. Jinan, Shandong 250000

Abstract: The selection of AC 380V power cables for electric actuators should be guided by both safe operation and economy. The selection should follow national standards, with the load capacity, voltage loss, thermal stability, and mechanical strength as the core basis. Consider factors such as rated current, starting characteristics, and environmental correction coefficients for comprehensive calculation. For different working conditions such as long distances and frequent start-stop, the cross-sectional area needs to be reasonably adjusted and suitable conductors, insulation, and armor structures selected. The complete selection process includes information collection, initial selection, and item-by-item verification. Ultimately, it should balance reliability and economy while meeting technical constraints, taking into account investment and operation costs.

Keywords: current carrying standard; voltage drop constraint; working condition adaptation; process verification

引言

电动执行机构电源电缆选型直接影响设备安全运行与系统经济性。不当选型易引发电缆过热、电压骤降甚至停机，而合理选型则需兼顾投资与运行损耗。实际工程中，仅按额定电流选型、忽视启动压降及敷设环境校正等误区尤应注意。正确选择低压电线电缆的载流量是电气工程设计中的一项基本且至关重要的任务。它直接关系到低压电器设备的选择以及短路、过负荷保护的整定值计算，对于预防电气火灾和其他潜在事故具有重要意义。例如，在工业环境中，如果电线电缆的载流量选择不当，可能会导致电流过大，进而引起电缆发热甚至引发火灾。

一、电缆选型的核心依据与原则

（一）遵循的规范与标准

《电力工程电缆设计标准》（GB50217）是开展交流380V电动执行机构电源电缆选型的基础性技术规范，该标准针对电缆导体的材质、绝缘类型、载流量校正系数以及敷设方式等技术要素作出了明确规定。在选型的过程当中，应该把国家标准所确立的各项强制性要求当作不可跨越的技术底线，任何有关电缆截面、电压降控制以及热稳定校验的判定，都需要在这个标准的框架范围之内完成。除了GB50217之外，还需要结合《低压配电设计规范》（GB50054）等配套标准里面关于配电线路保护、开关设备配合的相关条款，从而形成完整的规范依据体系。严格依照上述规范，能够确保电缆选型在安全性以及合规性方面具备充分的技术支撑[1]。

（二）选型的基本原则

电动执行机构电源电缆进行选型需要遵循三项基本的原则。第一，载流量应不低于负载长期工作电流，同时需涵盖短时过载工况，确保电缆在正常及短时过载运行条件下，不会因发热过度

作者简介：季震宇，男，满族，辽宁省东港市人，本科，电气工程及其自动化。

Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

而加速绝缘老化。第二，电压损失必须控制在允许的范围之内，重点校验执行机构启动瞬间的端子电压水平，避免因为压降过大而造成启动转矩不足或者接触器释放，从而影响设备正常投运。第三，热稳定以及机械强度应该满足短路故障以及敷设安装的实际要求，也就是在系统发生短路的时候，电缆导体能够承受短路电流所产生的热效应而不会损坏，同时其结构强度足够应对敷设过程当中的拉伸、弯曲以及运行当中可能遭受的外力作用[2]。上述三项原则相互关联，共同构成选型工作的技术基准。

二、关键参数分析与计算

（一）电流参数的确定

电动执行机构电流参数的确定包含两个层面的考量。第一，额定电流的确定需要依据执行机构的工作制进行区分。对于连续工作制（S1）的设备，电缆载流量应该以额定电流作为基准，考虑长期持续运行时的发热积累；而对于短时工作制（S3）的设备，则需要根据负载持续率折算等效电流，避免按照额定电流简单选型导致截面选取偏大或者偏小。第二，启动电流特性是选型当中的关键影响因素。交流380V电动执行机构大多采用异步电机驱动，其启动电流通常是额定电流的6至8倍，持续时间虽然短，但是如果电缆截面选取不足，启动瞬间的线路压降将直接影响执行机构的启动转矩和接触器保持性能[3]。准确获取上述电流参数，是后续开展载流量校核与电压损失计算的基础。

（二）电缆载流量的修正

环境温度是首要修正因素，标准载流量以环境温度40℃为基准，实际温度偏离时按修正系数折算，高温下载流量降幅明显。多回路并列敷设时，各回路热量叠加导致散热条件恶化，需根据回路数量与间距引入降容系数，避免密集敷设引发的热积累。敷设方式对散热性能影响显著：穿管敷设时散热受限，载流量降幅最大；桥架敷设若有盖结构，散热效果弱于无盖明敷；直埋敷设则需考虑土壤热阻系数。上述修正系数相互关联，共同决定电缆在实际工况下的允许载流量，忽略任一因素均可能导致选型偏差[4]。

（三）电压损失的计算

电压损失是电缆选型的关键校验环节。稳态运行时，电源电缆的电压降一般控制在额定电压的5%以内，以保证供电质量及执行机构出力与效率。启动瞬间的电压降校验更为严格，交流380V电动执行机构启动电流为额定电流的6至8倍，允许压降一般为10%至15%，超出可能引致接触器线圈释放或启动转矩不足，导致启动失败[5]。对于长距离回路，应采用力矩法或负荷矩法计算不同截面下的电压损失，反向校核所需最小截面，使电压降始终处于允许范围内。

三、不同工况下的选型策略

（一）常规工况下的截面选择

常规工况之下的截面选择通常是遵循两步校验法。第一步，根据执行机构的额定电流以及工作制，再结合环境温度、敷设方式等多种修正系数，计算出电缆实际所需要的最小载流量，然后依据这个从载流量表当中初步选定电缆截面。第二步，以初步选定的截面作为基础，进行电压损失复核，重点校验稳态运行时的电压降是否控制在5%以内，同时核算启动瞬间的压降是否满足10%至15%的允许范围。对于供电距离较短、敷设条件单一的常规回路，载流量往往是决定性的因素，电压损失一般不会构成制约；但是当供电距离超过一定范围的时候，电压损失有可能成为控制条件，需要适当放大截面来满足启动要求。通过上述载流量与电压损失的双重校验，最终确定的截面就是该工况之下的经济截面，能够在保障可靠运行的同时避免截面选取过大所造成的投资浪费[6]。

（二）长距离供电时的特殊处理

在长距离供电时，电压损失往往会成为制约电缆选型的主要因素，常规电缆截面通常难以满足启动瞬间的压降要求。最为直接的应对办法是把电缆截面增大，通过让单位长度的阻抗降低来让线路压降减小，不过需要注意在截面增大以后，电缆的成本、敷设的空间以及施工的难度都会相应地增加，存在经济性的边界情况。当供电的距离过长、只是单纯地放大截面所起到的效果有限或者成本过高的时候，可以对增设就地无功补偿装置的可行情况进行评估，通过把功率因数提高来降低线路电流，从而让电压损失减小；对于极端长距离或者重要的负荷情况，也可以考虑采用升压变压器的方案，把电源电压提升到660V或者更高的等级来进行传输，在执行机构的前端把电压降低到380V来进行供电。上面所说的方案各自有适用的边界，需要结合供电的距离、负荷的容量、投资的预算以及现场的条件进行技术经济方面的比较之后来确定。

（三）频繁启停或重载工况的考量

在频繁启停或者重载的工况之下，电缆的热积累效应成为选型过程当中需要重点考量的因素。执行机构频繁启停时，电机反复承受启动电流的冲击，该电流虽持续时间较短，但多次累积产生的热量若未能及时散失，将导致电缆绝缘层长期处于较高温度区间，加速绝缘老化[7]。在重载工况之下，电缆运行的电流长时间接近或者达到载流量的上限，发热量和散热条件处于临界的平衡状态，一旦出现短时过载或者环境温度波动的情况，很容易突破安全裕度。针对上面所说的工况，可以采取两种应对的策略：一种是适当地放大电缆截面，通过增加导体的截面积来降低单位长度的电阻，减少发热量，同时增大热容量来提升抗热冲击的能力；另一种是选用交联聚乙烯（XLPE）绝缘电缆，它允许工作的温度以及短路耐受的温度都明显高于普通聚氯乙烯（PVC）绝缘电缆，在同等载流量的情况下具备更强的热耐受裕度[8]。两种措施可以根据工况的严酷程度单独或者组合采用。

四、电缆结构与选型的关联

（一）导体材质与截面

导体材质的选择直接对电缆的载流量、电压损失以及长期运行的可靠情况产生影响。铜芯电缆导电率大约是铝芯电缆的1.6倍，在同等截面的情况下载流量更大、线路压降更小，并且抗拉

 Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

强度和抗弯折性能都比铝芯要好，特别适合用于需要经历安装敷设拉伸以及运行振动的电动执行机构供电的场景。铝芯电缆虽然具有成本方面的优势，但是它的抗氧化性能比较弱，接头的地方容易因为蠕变或者氧化导致接触电阻增大，在长期运行的过程当中存在过热的隐患。从工程实践来看，交流380V电动执行机构电源电缆普遍选用铜芯导体，主要原因在于执行机构功率等级相对较小、供电距离通常较远，铜芯在满足电压降要求时可选用较小截面，综合敷设成本与运行维护成本后仍具有经济性。除此之外，对于户外或者腐蚀性的环境，铜芯导体在抗氧化和耐腐蚀方面的优势进一步显现出来。所以，导体材质的选择需要在满足电气性能的前提之下，结合使用的环境和全寿命周期的成本进行综合的权衡[9]。

（二）绝缘与护套层选择

绝缘和护套层方面的选择需要根据敷设环境的条件来确定。聚氯乙烯（PVC）这种绝缘的电缆适合用在干燥、不存在腐蚀性介质的室内常规环境当中，经济方面的性能比较好。交联聚乙烯（XLPE）这种绝缘的电缆耐热的等级比较高、电气方面的性能非常好，适合用在高温、潮湿并且存在轻微腐蚀情况的场所。橡胶护套的电缆柔韧的性能比较好、抵抗机械损伤的能力比较强，适合用在移动设备或者需要频繁进行弯曲的场合。

（三）铠装层的应用

铠装层的设置目的是为了增强电缆抵抗外部机械损伤的能力。在直埋敷设的时候，钢带或者钢丝的铠装能够有效承受土壤的压力以及地面施工所带来的冲击荷载。在电缆路径经过车辆通行区域或者存在频繁地面开挖情况的场所，铠装层能够防止外力穿刺对绝缘造成破坏。对于白蚁活动比较频繁的地区，金属铠装层能够起到物理防护的作用，避免白蚁蛀蚀护套从而引发短路故障。钢丝铠装比钢带铠装具备更强的抗拉性能，适合用在垂直敷设或者需要承受较大拉力的场合。在进行选型的时候应该根据敷设路径实际的外部条件，来确定是否需要铠装层以及铠装结构具体的形式[10]。

五、选型流程与校验步骤

电动执行机构电源电缆的选型流程应该遵循系统化的校验步骤。首先进行信息收集，明确执行机构的功率、额定电流、启动电流倍数、供电距离及敷设路径的环境条件，这些基础数据是后续选型的依据。在这个基础之上，依据修正之后的载流量表初步选定电缆的规格，完成初步的选型。随后进入逐项校验的阶段：校验电压降是否同时满足稳态运行和启动瞬间的允许范围，校验短路热稳定是否满足系统短路容量的要求，校验机械强度是否适应敷设安装以及运行过程中可能承受的外力作用。最终，综合上述校验的结果确定电缆的型号和规格，并且考虑适当的余量来应对未来负荷的变化或者运行工况的调整，确保选型的结果同时具备技术合理性和工程适应性。

结论：综上所述，交流380V电动执行机构电源电缆的选型，本质上是以载流量作为基础、以电压降作为关键约束、以环境修正作为必要补充的系统性技术工作。载流量决定了电缆发热的安全边界，电压降直接关系到执行机构的启动性能和运行稳定性，而环境温度、敷设方式以及并列回路等修正因素则决定了电缆在实际工况下可用的载流量。这三者相互关联，缺一不可。需要指出的是，选型并非单纯进行数据计算，在工程实践中应结合供电距离、敷设条件、投资成本及运行可靠性进行综合权衡，避免因片面追求经济性而牺牲安全裕度，也防止过度选型造成资源浪费。只有在技术可行性和经济合理性之间找到平衡点，才能够实现安全、可靠、经济的选型目标。

参考文献

[1]吕申龙，高振耀，凌云志.算力中心不间断电源系统蓄电池直流电缆选型研究[J].电气应用，2022，41(3)：1-5.

[2]贾力鸣，魏东辉，周跃佳.电缆故障行波特性影响因素与脉冲电源适配性研究[J].电气技术与经济，2023，42(5)：22-26.

[3]郝庆福，高敏，刘焱，王贝，宋欢.交流380V电动执行机构电源电缆选型研究[J].自动化仪表，2024，45(2)：30-34.

[4]朱黎明.厂站交流电源系统绝缘下降机理及对电缆防火安全的影响[J].办公自动化，2022，27(4)：12-16.

[5]罗海平.电缆防火视角下厂站交流电源系统绝缘诊断技术集成与应用[J].办公自动化，2023，28(6)：18-22.

[6]李传勇.交流电源系统绝缘劣化与电缆火灾关联性分析与仿真研究[J].办公自动化，2024，29(1)：25-29.

[7]王云浩，李新星，耿嘉胜，等.便携式快速放电电缆电源箱[J].农村电工，2022，30(8)：40-43.

[8]刘运洋，李博，张雷，等.自动化设备常用电缆的分析[J].中国设备工程，2023，41(2)：55-58.

[9]MAHMOUDJMALMASRI.海底高压电缆试验用变频串联谐振电源的设计[J].大连理工大学，2024，52(3)：78-82.

[10]许闻文，王瑞东，徐义.电容性耦合的干扰案例分析[J].中国仪器仪表，2022，39(1)：33-36.

Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

山区电网输电线路抗冰防灾关键技术应用研究

卢维宽，熊志勇
贵州电网有限责任公司铜仁供电局，贵州 铜仁 554300
DOI:10.61369/EPTSM.2026040021

摘　　要： 山区地势崎岖、气候恶劣，冬季雨雪冰冻天气频繁发生，容易造成输电线路覆冰，引起导线断股、杆塔倒塌、绝缘子闪络等问题，对山区电网的安全稳定运行以及人民群众的生活生产用电带来严重影响。本文以山区电网输电线路的实际运行为基础，针对抗冰防灾的应用需求进行论述，探讨山区输电线路覆冰的特点及其危害，重点研究抗冰防灾的关键技术应用要点，如覆冰预防、覆冰清除、应急处理以及后期维护等核心内容，并根据山区的具体情况提出切实可行的技术改进意见，避免泛泛而谈，注重实用性和接地气的操作指导，为山区电网输电线路的抗冰防灾工作提供有益的经验借鉴，确保山区电网的安全可靠供电。

关 键 词： 山区电网；输电线路；抗冰防灾；关键技术；实际应用

Research on the Application of Key Technologies for Ice Resistance and Disaster Prevention in Transmission Lines of Mountainous Power Grids

Lu Weikuan, Xiong Zhiyong
Tongren Power Supply Bureau of Guizhou Power Grid Co., LTD., Tongren, Guizhou 554300

Abstract: Mountainous areas have rugged terrain and harsh climate. Frequent rain, snow and freezing weather in winter can easily cause ice accumulation on transmission lines, leading to problems such as broken strands of conductors, collapse of poles and towers, and flashover of insulators. This has a significant impact on the safe and stable operation of mountainous power grids and the electricity supply for People's Daily life and production. Based on the actual operation of transmission lines in mountainous power grids, this article discusses the application requirements of ice resistance and disaster prevention, explores the characteristics and hazards of ice accumulation on transmission lines in mountainous areas, and focuses on the key application points of key technologies for ice resistance and disaster prevention, such as ice accumulation prevention, ice accumulation removal, emergency handling, and later maintenance. Based on the specific conditions of mountainous areas, practical and feasible technical improvement suggestions should be put forward, avoiding general discussions. Emphasis should be placed on practical and down-to-earth operation guidance to provide useful experience references for the anti-ice and disaster prevention work of transmission lines in mountainous power grids, ensuring the safe and reliable power supply of mountainous power grids.

Keywords: power grid in mountainous areas; transmission lines; anti-ice and disaster prevention; key technologies; practical application

引言

山区是我国电网输电线路主要经过区域，大部分输电线路经过高山大岭、峡谷沟壑等地形复杂地区，在冬季气温较低以及昼夜温差较大情况下，加之空气湿度较高，容易造成线路结冰。而结冰对输电设施会造成损害甚至会导致长时间停电问题发生，严重影响到山区居民日常生活、农业生产以及基础设施建设等。本文以山区输电线路运维工作为基础，围绕抗冰防灾核心技术展开论述，结合具体应用情况进行分析介绍相关技术和优化措施等内容力求贴近实际、便于实施。

作者简介：
卢维宽（1989.02-），男，汉族，贵州省铜仁市人，本科，助理工程师，研究方向：电力。
熊志勇（1998.01-），男，土家族，贵州省铜仁市人，本科，助理工程师，研究方向：电力。

 Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

一、山区电网输电线路覆冰特点及核心危害

（一）覆冰形成特点

山区输电线路覆冰的产生，受山区特有的地理环境及气象条件的影响较大，在平原地区较为少见，更符合山区实际情况。一是覆冰种类繁杂，由于山地昼夜温差大，空气湿度较高，在近地面温度低于0℃而高空温度高于0℃的情况下，云中冰晶降落过程中变为过冷水滴，接触到导线表面立即冻结，从而形成雾凇、雨凇或混合淞等多种形式的覆冰，其中以雨凇覆冰最为常见，其密度大、附着力强，对线路威胁最大[1]。二是覆冰分布不均，山地地势高低起伏明显，沟谷、背风面、山梁等地带风力强劲、水汽充沛，因此这些地方覆冰较重，同时一条线路不同区段之间以及同一基杆塔上不同位置处的覆冰也存在较大差异，给抗冰除冰工作带来一定困难。三是覆冰发展迅速，山地寒潮来临突然且时间较长，一旦遭遇冻雨或者降雪天气，导线上很快就会积聚大量覆冰并且很难自行消融，极易造成严重后果。四是预报难度高，山区微地形和微气候特点突出，局部地区的温度、风速、湿度等变化难以准确掌握，使得覆冰发生的时间和程度无法及时预测，增加了抗冰救灾工作的难度[2]。

（二）覆冰核心危害

针对山区输电线路运行特点，覆冰对设备及供电安全造成的影响主要体现在设备损坏以及停电上，都会给山区居民生活带来不便。第一是机械损伤，覆冰会使导线、地线重量加大，使导线承受张力增大，在长期过载情况下易发生导线断股或断裂；同时，覆冰重量也会使杆塔承受更大的垂直负荷与横向风压，在山区杆塔大多位于山脊、山坡等地形复杂地带，其基础稳固程度受到很大限制，易出现杆塔歪斜、倒伏或者杆塔横担、支架受损等情况[3]。第二是电气故障，覆冰会附着在绝缘子表面，减少泄漏距离并削弱绝缘强度，容易引起绝缘子闪络、跳闸现象，在融冰时，由于冰层表面存在一层水膜而溶解了绝缘子表面积聚的污垢物质，从而使得绝缘水平下降，加剧事故的发生概率；另外，非均匀性覆冰在微风条件下会引起导线舞动，导致金具破损、相间短路，进而引起线路跳闸。第三是检修困难，山区道路崎岖难行，在覆冰灾害发生之后，抢修人员和工器具难以及时到达现场进行抢修工作并且高空作业受恶劣天气条件制约较大，存在较大安全隐患且工作效率低下，延误抢修时间，进一步扩大停电范围所造成的影响。

二、山区电网输电线路抗冰防灾关键技术应用

（一）覆冰预防技术应用

防冰预警是山区输电线路抗冰防灾的第一道防线，在于利用各种措施尽可能地阻止或推迟覆冰的发生和发展，降低覆冰灾害出现的可能性，根据山区的具体情况选择合适的应用方式，防止不必要的技术投入。

一是线路优化设计技术，针对山区地势及气候特点，在输电线路规划与设计过程中尽可能绕开迎风坡、峡谷、山脊等地质条件恶劣易发生覆冰地段；对难以绕避地区合理选取导线型号以及杆塔形式，使用抗冰能力更强的导线，加大导线截面面积，提升导线抗拉强度，同时改进杆塔结构设计使其具备更大承载力满足山区覆冰荷载要求。另外适当缩短杆塔间隔距离并降低高度以减小导线悬挂张力从而防止由于覆冰造成过大的应力使导线断裂或者倒杆事故的发生，符合山区实际施工情况，避免繁琐作业[4]。

二是防覆冰材料应用技术，在导线、绝缘子表面喷涂防覆冰涂料，减少冰雪对导线、绝缘子的粘附性，使冰雪难以积聚，即使形成薄冰也能够在风力影响下自行脱落，该方法简便易行、造价低廉，适用于大面积山区线路使用；还可以在导线上分段安装涡流自热环，通过电流流经导线时产生的磁场让自热环发热从而达到导线带电情况下自动除冰融冰的效果而不需要另外接通电源，适合没有外部电源接入条件的山区环境并且便于安装不需要复杂的工具即可完成，非常适合山区实际作业情况。

三是覆冰监测预警技术，针对山区微气候特征，在易发覆冰区段布设监测装置对输电线路导线上的覆冰厚度、温度、风速以及湿度进行24小时不间断监控并利用无线通讯方式将信息回传至调度室以便及时掌握线路运行状态。同时参考该地区历年来的覆冰情况总结出了一套简便有效的预报方法，在发现覆冰厚度接近临界值的时候就会提前发送报警信号通知工作人员做好相应的防范措施以应对山区覆冰难以预测的问题从而为抢修人员赢得宝贵的时间。

（二）覆冰清除技术应用

当输电线路出现覆冰情况时，应及时进行合理有效的清除工作以防止覆冰不断堆积造成设备损坏，在山区施工困难的情况下应选择简单易行、快速便捷、适合山区地势的除冰方式而不用大型复杂的技术手段。

一是直流融冰技术，是山区输电线路除冰的主要手段之一，适用于大部分山区线路情况。即对输电线路施加直流电压，使线路发热而融化覆冰，分为固定式与移动式两种方式，在山区骨干输电线上可以安装固定的直流融冰设备进行及时有效的除冰；在偏远山区或者交通不便的地方可使用便携式的直流融冰设备便于携带和操作，不需要繁琐的现场布置就可以迅速到达除冰地点实施融冰工作，解决了由于山区道路难行造成的不能及时除冰的问题[5]。同时可以在带电情况下进行融冰作业，不会造成停电现象的发生，保证了山区居民的基本生活用电需求。

二是机械除冰技术，适用于山区线路局部覆冰清除，操作简单、成本低，不需要复杂的工具就可以满足在山区进行现场作业的要求。常用的机械除冰方法主要有两种：人工敲击除冰和机械工具除冰，人工敲击除冰需要专业的运维人员佩戴好绝缘防护用品，在保证自身安全的基础上使用专用工具对导线及绝缘子表面的积冰进行轻柔地敲打以达到去除的目的，不能大力敲打以免造成设备损伤；而机械工具除冰可以采取除冰器或者刮冰刀之类的简单器械让工作人员沿着线路顺序将积冰去掉即可，对于积冰不是很厚并且面积不大地方比较适用。但是由于山地高空作业危险性大，在进行除冰工作时一定要注意做好相应的保护措施以防发生高空坠落或者触电等情况[6]。

三是自然脱冰辅助技术，在山区有风的情况下，调节导线张力或借助风力使覆冰自然脱落。可以由运维人员在杆塔上进行人工干预，适当降低导线悬挂张力，让导线发生微小摆动从而导致覆冰脱落；也可以利用山区本身的自然风力，在风力较强的时候改变线路运行方式加大导线摆幅加快覆冰脱落速度，这种方法不需要增加设备投资适用于山地多风地区，操作简便易行。

Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

（三）应急处置技术应用

山区输电线路覆冰灾害具有突发性、破坏性强的特点，一旦发生故障，要迅速进行抢修工作，尽可能地缩短停电时间，降低灾害造成的经济损失，在此基础上针对山区具体情况完善抢修方案，提高抢修速度。

在覆冰灾害发生之后，因为山区地势崎岖、线路分布广泛，传统的手工检查速度慢、危险大。可以使用无人机巡检方式，通过无人机安装高清摄像机对输电线路进行全面巡视，及时发现导线断裂、杆塔倒塌、绝缘子放电等问题点，不需要检修人员登杆，减少高空作业的风险，而且加快了巡检的速度，特别适用于山区道路难行、人迹罕至的地方[7]。巡检的同时还可以把视频画面同步到监控室供值班员分析判断故障性质以及严重程度并作出相应的处理措施。

在山区故障情况下，组织专门的应急抢修小组，携带便携式的抢修器材、工具等，保证一旦出现故障可以第一时间到达现场进行抢修。对于导线断股、断线故障，使用快速接线、接续工艺，加快抢修进度；对于杆塔倾斜、倒伏故障，采取临时支撑或更换杆塔措施，迅速使线路恢复正常供电；对绝缘子闪络故障，则立即清除绝缘子上的积冰以及灰尘杂质，并替换破损绝缘子，使线路绝缘强度得到恢复。此外还应有多个部门协作配合，如调度、变电站、输电等部门联合行动，共同完成抢修任务，提高抢修速度。

（四）后期运维技术应用

覆冰灾害之后，做好后期维护工作，可以尽早发现线路存在的问题，提高线路抗冰防灾水平，防止覆冰灾害再次发生，在此基础上针对山区线路维护困难的问题，改进维护方法，保证维护工作的落实到位。

在发生覆冰灾害之后，对输电线路、杆塔、绝缘子、金具等进行一次全面检查维修，清除设备上的覆冰、积雪以及污垢等杂质，查看导线有无断股、磨损现象，杆塔是否有歪斜、开裂情况，绝缘子是否出现破损或者闪络痕迹，金具是否松动或损坏等问题，对于发现的问题立即处理解决，使设备恢复到良好工作状态。另外还需要对融冰装置、监测仪器等防冰设施做一次彻底的检修保养使其处于良好的工作状态以备以后防冰救灾之需[8]。针对山区线路分布及交通状况特点，采用“分片管理、定期巡检、重点防范”的运维方式，在山区线路中划分多个运维片区，每个片区安排专职运维人员进行日常巡视检查，对易发生覆冰地段以及设备薄弱环节加强监控；运用信息化手段建立山区输电线路运维台账，保存线路设备参数、过往覆冰情况、维修记录等相关资料，方便运维人员及时了解掌握线路运行状况并采取相应措施加以维护，提高工作效率。在山区进行输电线路抗冰防灾工作具有较大困难及较高危险性，要对运维人员加强培训，使其具备相应技术水平以及应急处理能力。培训主要针对覆冰监测、融冰操作、机械除冰、应急抢修等内容进行实操技能培训，并结合山区实际工况开展一对一指导，使运维人员熟练掌握各种抗冰防灾方法以及时有效地处置覆冰事故，还要做好安全教育工作，增强运维人员的安全观念，防止发生安全事故。

三、山区电网输电线路抗冰防灾技术应用优化建议

在总结山区电网输电线路运行特点以及抗冰防灾技术应用情况的基础上，对技术应用中遇到的问题进行分析并提出改进建议，使技术的应用更加符合山区实际情况，更具有实用性、可操作性。

结合山区特点选择合适的技术方案，在山区地势崎岖、道路狭窄的情况下，应尽量采用简单易行、经济实惠以及不需要大型器械的防冰措施，而不要盲目追求过于繁杂或者需要大型器械的措施来增加技术实施难度及成本开支。如对偏远山区线路可大力推广使用防覆冰涂层、涡流自热环、移动式融冰装置等技术手段，无需繁琐施工过程和大型器械即可完成现场操作与检修工作[9]。强化技术集成应用，把覆冰监测预警技术和融冰技术、应急抢修技术结合起来，构建起“监测—预警—融冰—抢修—运维”一体化抗冰防灾模式，提高抗冰防灾工作整体性和有效性。比如，在覆冰监测仪报警之后立即进行融冰处理，在出现异常情况下迅速派出无人机查找故障位置并安排抢修人员抢修，灾后及时做好设备检查维护工作等形成闭环管理[10]。

四、结论

山区电网输电线路抗冰防灾工作是为了保证山区电网的安全稳定运行以及人民群众的生产和生活的正常用电而采取的一项重要措施，在受到山区特殊的地理环境以及气象条件的影响下，抗冰防灾工作面临着一系列的问题。实践证明合理运用抗冰防灾的关键技术和改进其应用方法可以显著提高山区输电线路的抗冰防灾水平，降低由于覆冰造成的设备损害和停电事故的发生率。今后要根据山区电网的发展情况不断地完善和发展抗冰防灾的技术手段，促进不同技术之间的相互结合与融合并开展相应的技能培训以进一步增强山区电网输电线路的抗冰防灾能力，从而更好地服务于山区电网的安全稳定供电。

参考文献

[1]龚芳馨，李小云，李雯乐.输配电线路抗冰防灾技术经济效益分析与应用[J].大众用电，2024,39(11):60-62.
[2]电力动态[J].大众用电，2024,39(02):80.
[3]袁柏秋，柏晓路，覃华，陈媛，王艳君.广西电网抗冰防灾设计提升研究[J].自动化应用，2024,65(02):56-58.
[4]王怡，刘泊静.国家能源局：我国电力安全风险管控和应急保障能力持续提升[J].中国电业，2021,(03):10-11.
[5]湖北电力公司提升输电线路抗冰防灾能力[J].农村电气化，2019,(12):39.
[6]宋平. 500kV输电线路抗冰融冰技术应用实践探析[J]. 中国新技术新产品，2013,(20): 39-40.
[7]王学啸. 输电线路运行故障的分析与防治[J]. 科技传播，2013, 5 (20): 174-175.
[8]彭向阳，周华敏. 电网冰冻灾害分析及防御对策[J]. 电力科学与工程，2009, 25 (07): 16-19.
[9]本刊编辑部. 南方电网抗冰融冰专项研究取得重大突破[J]. 南方电网技术，2008,(03): 72.
[10]卢志学. 赣州电网冰害情况及防冰措施的探讨与分析[J]. 江西电力，2008,(S1): 39-41.

 Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

亚临界火电机组炉水二氧化硅超标原因分析

张凯

国家电投大连发电有限公司，辽宁 大连 116035

DOI:10.61369/EPTSM.2026040024

摘　　要： 作为我国发电主力的亚临界火电机组（12.7 ~ 15.6MPa，535 ~ 540℃）其炉水水质好坏直接关系到机组的安全稳定经济运行。其中二氧化硅作为炉水的主要监控指标之一，若超标不仅容易在锅炉受热面结难溶性硅垢，还会造成汽轮机通流部分积硅使热效率下降，更为严重会造成炉管爆管、汽轮机振动等各种恶性的事故。本文结合某330MW机组的实测数据，从给水的预处理、热力系统泄漏点的影响以及设备运行方式、设备运行维护等方面深入研究了炉水二氧化硅偏高的主要因素，通过实际检测的数据介绍了二氧化硅高所带来的危害以及查找二氧化硅超标的思路，并提出了具体的应对和防范措施，为同类机组炉水二氧化硅的防控提供了一线的具体的实践操作经。

关 键 词： 亚临界火电机组；炉水；二氧化硅超标；成因分析；防控措施

Analysis of the Causes of Excessive Silica in the Boiler Water of Subcritical Thermal Power Units

Zhang Kai

Dalian Power Generation Co., Ltd., State Power Investment Corporation ,Dalian, Liaoning 116035

Abstract: As the main power generation force in China, subcritical thermal power units (12.7~15.6 MPa, 535~540°C) directly affect the safe, stable, and economical operation of the units. Among these, silicon dioxide, as one of the primary monitoring indicators for boiler water quality, not only tends to form insoluble silicon scale on boiler heating surfaces when exceeding standards but also causes silicon accumulation in the steam turbine flow path, reducing thermal efficiency. More critically, it can lead to severe accidents such as tube bursts and turbine vibrations. Based on measured data from a 330MW unit, this study thoroughly investigates the main factors contributing to elevated silicon dioxide levels in boiler water, including feedwater pretreatment, thermal system leakage points, equipment operation modes, and maintenance practices. Using actual test data, it explains the hazards of high silicon dioxide levels and the approach to identifying exceedances, while proposing specific countermeasures and preventive measures. The findings provide practical operational insights for controlling silicon dioxide levels in similar units.

Keywords: subcritical thermal power units; boiler water; excessive silica; cause analysis; prevention and control measures

引言

亚临界火电机组在技术成熟和出力稳定方面具有自身优势，在我国火力发电市场占有一定的地位，保证炉水品质达标对实现机组长期安全经济地运行有着基础意义[1]。按照GB/T12145-2016《火力发电机组及蒸汽动力设备水汽质量》的要求，亚临界汽包炉（12.7MPa-15.6MPa）炉水SiO2值要求为不大于0.45mg/L（宜低于此标准），但在实际生产运行过程中，由于原水水质波动，设备磨损、老化，运行操作不当等多方面原因常常导致超标现象出现。亚临界火电机组结构相对超临界火电机组更为复杂，且其锅炉结构形式为汽包锅炉，具有特殊的水循环方式与规律，二氧化硅在此类机组中的迁移以及沉积特性存在较大的特殊性，仅仅通过纯理论分析的方式难以解决现实现场的问题。针对此类问题，本文结合某发电厂330MW等级的亚临界机组在生产运行过程中出现了二氧化硅指标超标的具体事件进行深入地剖析研究，运用检测过程获取的原始数据来详细分析二氧化硅超标的具体因素并提出行之有效的应对方法，并给予一线的工作人员具体的操作指导。

作者简介：张凯（1986.05-），男，满族，辽宁锦州人，学历：本科，职称：工程师，研究方向：发电厂水处理。

Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

一、亚临界火电机组炉水二氧化硅超标现状及危害

炉水二氧化硅的超标情况可以分为持续性及瞬间性的超标情况。前者多数是由于设备缺陷以及工艺设计不合理，后者大多数与锅炉操作的波动以及突发事故导致泄漏相关[2]。根据某330MW亚临界抽凝式供热机组（锅炉类型为亚临界、一次中间再热控制循环汽包炉）在2024年3月—2024年4月运行期间检测到多次炉水二氧化硅超过规定的值的检测数据如表格1所示。

表1具体检测数据

检测日期	机组负荷(MW)	炉水二氧化硅含量(mg/L)	标准值(mg/L)	超标倍数	同期除盐水二氧化硅(μg/L)	热网疏水二氧化硅(μg/L)
2024-03-05	280	0.82	≤0.45	0.82	18	520
2024-03-12	300	0.95	≤0.45	1.11	16	610
2024-03-20	250	0.51	≤0.45	0.13	17	380
2024-04-02	310	1.02	≤0.45	1.27	19	680
2024-04-10	290	0.42	≤0.45	达标	15	120

由上表可以看出机组炉水的二氧化硅超标集中在运行在高负荷时发生且同热网疏水二氧化硅成正比关系，最高达到标准值1.02mg/L，超标了1.27倍。锅炉炉水中二氧化硅超标其危害是潜在和滞后，首先使锅炉受热面产生积垢：锅炉二氧化硅在高压高温作用下与钙、镁离子形成不溶性难除的二氧化硅的结垢物质其导热系数=1W/（m·K），当二氧化硅厚1mm将使管子壁温上升80℃，锅炉效率降低，燃煤量加大，长此以往会造成炉管过热、蠕变乃至爆管，其二是引起汽轮机中积硅：随着锅炉蒸发而产生的蒸汽携带一定的二氧化硅，在汽轮机通流部位急剧压力变化析出玻璃状沉积物，这会减少叶片通道进气量、使机力下降，严重会造成汽轮机振动造成严重影响机组的安全稳定经济地运行[3]。

二、亚临界火电机组炉水二氧化硅超标原因解析

（一）给水预处理系统失效带入杂质

给水作为主要炉水来源，亚临界机组普遍采用“原水—澄清池—多介质过滤器—超滤－反渗透—阴阳床—混床”处理流程，若其中任一预处理系统故障都会造成含硅杂质渗入锅炉从而造成炉水二氧化硅超标，这在各电厂较为常见。首先反渗透（RO）系统运行不正常是最主要的原因之一，反渗透膜是去除原水中二氧化硅的关键所在，胶体硅、溶解硅去除率可达98%以上，但在实际运行中出现的RO膜损坏或结垢以及被污染等现象均会使其降低很多。实际生产中一些电厂为了保证制水量往往减少反渗透膜清洗次数造成膜面结有大量有机物和微生物垢，增大了膜孔径甚至产生0.2μm以上的针孔使胶态硅直接穿透到反渗透以后系统之中。例如330MW机组某厂曾发生由于反渗透连续运行达三个月没有进行清洗导致反渗透严重污染除盐水硅含量由正常15~20μg/L上升为80μg/L而引起炉水二氧化硅超标，另外RO进水水质变化如原水浊度变大、pH值偏移均影响着RO正常工作造成去除二氧化硅不足。

另一方面，由于混床的再生不彻底或失效使除盐水水质下降。混床是给水处理的最后设备，树脂对SiO2的吸附能力决定了除盐水的品质，混床再生过程中因树脂再生效果不佳、再生成剂剂量少或树脂老化、破损等致使树脂的工作交换容量不足，对水中SiO2的去除能力降低而造成除盐水SiO2超标，从而带入炉内导致炉水SiO2升高[4]。现场观察到运行人员缩短了10分钟的再生时间以加快再生速度，使得混床出口的SiO2从5μg/L上升至80μg/L，在8小时内炉水SiO2含量增加了2倍多，明显超标。

（二）热力系统泄漏，外界含硅介质渗入

由于凝汽器的泄漏引起炉水二氧化硅超标。凝汽器多使用钛管，如发生腐蚀、磨损、破裂造成大量循环冷却水中的二氧化硅进入凝结水系统。而循环冷却水中的二氧化硅一般在40mg/L左右，远高于除盐水的值，当凝汽器发生有0.1mm以上的裂缝时，每小时将有200t的冷却水被倒吸入，即为每小时向凝汽器中带入8kg的二氧化硅，这样很短的时间即可使凝结水、给水以及炉水二氧化硅超标。通常情况下，当凝结水电导率与钠均合格时，基本上可以排除凝汽器泄漏的问题，如果凝结水氢电导与钠升高同时出现炉水二氧化硅超标情况，应主要考虑凝汽器钛管是否发生泄漏问题。热网加热器泄漏（对供热机组尤为明显）。对于亚临界供热机组，其热网疏水一般是回用至除氧器，若其热网加热器泄漏，那么热网循环水所携带的含硅杂质将会混入疏水中并带到除氧器中最终进入锅炉从而引发炉水二氧化硅超标问题[5]。比如某一个330MW的供热机组在其供热期间出现了严重的热网加热器泄漏现象，使得该供热机组的热网疏水中二氧化硅由正常的120μg/L增长到680μg/L，并且炉水中二氧化硅也由正常的0.42mg/L上升到1.02mg/L，并发生了超标的严重状况。除此之外还存在着热网疏水回用管路设计缺陷的问题没有考虑设置疏水回用到凝汽器旁路，在热网疏水品质不合格的时候，不能够及时切换，进而造成含硅杂质的侵入，影响到整个锅炉系统。

（三）操作不当，炉水含硅浓缩超标

运行方式与炉水二氧化硅关系很大，现场操作人员操作不规范造成炉水含硅高现象严重，具体表现在三个部分：1.排污；2.调整负荷。3.启机，都属于现场细节性的问题[6]。

最直接、最主要的原因是排污不够，亚临界炉的炉水排污分为连续和定期排污两种形式，其主要目的在于排出炉水中所含杂质，防止炉水浓度过高。当连续排污的开度不足、排污水量偏低或定期排污次数少，排污时间短都会造成炉水中二氧化硅的不断浓缩而高于标准值，某机组连续排污调节门仅开了5%左右，排污流量2t/h远不能排出炉水中的杂质，造成炉水二氧化硅一直升高，当连续排污调节门调至30%时，排污量为10t/h，才慢慢使炉水二氧化硅下降，在同时排查泄漏问题的前提下才能达到标准要求；另外有的机组由于连续排污扩容器逆止门内漏使部分炉水经汽平衡管返回除氧器，这样会使给水中的硅增加，从而造成炉水二氧化硅升高。

 Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

负荷调整不当也是二氧化硅的瞬时超标的原因。亚临界机组在高负荷的情况下突然降低30%时，汽包压力瞬间下降了1MPa。沉积在下降管中的硅酸盐在此瞬间发生“沸腾”被扬起，使炉水中二氧化硅升高50%，时间在15分钟内。运行中由于负荷调节过大或过于频繁，破坏炉水循环系统稳定、导致硅垢脱落溶解并引起炉水二氧化硅的起伏波动和瞬时超标现象的发生。

启机方式不当会造成启机过程超标。启机前未按标准要求的冷态、热态水冲洗或抢修期间抽真空不规范，均可能使硅质杂物进入热力系统。某机组在抢修运行后，在启动过程中出现炉水二氧化硅含量严重超标现象，经分析判断由于抢修过程中抽真空不慎，将一些硅物质带入了汽轮机高中压缸，并随高加疏水带入除氧器而使给水和炉水中含 Si升高，充分冲洗后，恢复正常值。

（四）设备维护不到位，硅垢的沉积和脱落

亚临界锅炉由于在受热面、汽包内部未能得到很好地清洗，使硅垢的沉积物存留，在机组的运行过程中由于运行方式的变化，造成二氧化硅的脱落与溶解，造成炉水二氧化硅的瞬时超标问题，这是运行中经常出现的问题。

锅炉受热面沉积的硅垢是因为炉水水质在运行过程中一直处在临界状态，炉水 SiO2长期徘徊在边缘值，在这种高温、高压的情况下，SiO2和 Ca、Mg相结合生成了 SiO2 ·Ca、SiO2 ·Mg。沉淀于水冷壁，过热器等处，此硅垢质硬不易排污带出，严重影响了受热面的传热效果，且随着负荷、压力变化，容易剥落造成汽包内炉水瞬间上升，还因对汽包内的洗汽设施维护不够周到，致使饱蒸汽带水量增大，把汽包中水的 SiO2也带给汽轮机，使锅水浓度升高而超标。

仪表在线校准不到位将出现漏判和误判现象。在线硅表作为测量炉水二氧化硅的主要手段，在线硅表若未定期地进行校验、标定，造成零点漂移和测量误差过大，最大测量误差可达到 ±15% FS，远大于国标规定的精度 ±5%；这就导致运行人员不能及时发现炉水中的二氧化硅超标问题，从而错过了处理问题的最佳时机，使该问题持续恶化发展下去；

（五）不当药剂添加，引入含 Si杂质

炉水的处理方法大多采用低磷酸盐处理。如果药剂的质量不过关，或加药不正确，造成加入杂质含硅物质引起炉水中二氧化硅升高。这个原因是容易被忽视且又直接影响因素之一。药剂的质量是最大的隐患。如磷酸盐中混入含硅的物质，使用硅为200mg/L的工业用磷酸以10ppm的加药量就将每小时向200t炉水带进40g二氧化硅。短时间之内就会造成炉水中二氧化硅超标。实际当中有些电厂出于成本考虑，而使用质量很差的药品，不抽检药剂的质量。导致带有硅的物质从药剂中进入锅炉。造成超标。另外，错误的加药也会引起超标。由于过量的磷酸盐使炉水 pH升高而二氧化硅溶解度下降，生成硅垢沉积于管壁和锅筒表面，当这些硅垢脱落时又会造成炉水二氧化硅含量超标。不均匀的加药造成局部浓度偏高形成硅浓缩，造成局部超标。

三、结论

亚临界火电机组的炉水 SiO2超标是由给水预处理系统、热力系统泄漏、运行调整及设备管理与药剂控制等诸多方面共同作用造成的，RO膜污染和热网加热器泄漏以及排污操作不彻底等是现场较普遍的几种原因。基于某330MW亚临界机组的实际运行情况分析表明：炉水 si0z含量的超标大多发生在机组高负荷时段，并且其大小与热网疏水含硅量和排污值有着千丝万缕的联系，预防和控制炉水 SiO2值，要从现场实际情况出发，抓住问题的关键所在，强化给水预处理系统的管理，做好热力系统泄漏排查工作，优化调整运行工况，做好设备管理和药剂管理工作方能把炉水 SIOZ稳定在合格范围之内。本文提出的措施具有较强的可操作性和适用性，为防止同类型亚临界火力发电机组的炉水二氧化硅超标提供了一定的工作指导经验，有效避免了由二氧化硅超标引起的事故，对保持机组安全、稳定和经济运行有重要意义。

参考文献

[1]朱宝峰 . 超临界火电机组炉水循环监测系统研究与应用 [J]. 中国新技术新产品 , 2021, (23): 80-82.

[2]翁建明 , 虞儒新 , 刘宏芳 , 鲍丽娟 , 戴超超 , 沈忠明 , 刘刚 , 宋满 . 亚临界火电机组炉水循环泵国产化研究及应用 [J]. 上海电力大学学报 , 2021, 37 (02): 138-142.

[3]马晓珑 , 王军 . 超 (超)临界火电机组取消炉水循环泵的可行性研究 [J]. 东方电气评论 , 2010, 24 (02): 17-20+23.

[4]王亚军 , 王鑫 , 白雪 , 彭民 . 有效降低300MW亚临界参数火电机组厂用电率方法浅析 [J]. 沈阳工程学院学报 (自然科学版), 2007, (03): 226-228.

[5]周公文 . 超临界火电机组锅炉循环水泵叶轮断裂失效原因分析 [J]. 中国特种设备安全 , 2026, 42 (03): 78-83.

[6]祁艳超 , 洪文鹏 . 集成熔盐储能的亚临界火电机组热力性能及经济性研究 [J]. 工程热物理学报 , 2026, 47 (02): 412-425.

[7]张文彬 , 赵瑜淅 , 李骏 , 等 . 火电机组耦合熔盐储热集成系统调峰特性研究 [J]. 仪器仪表用户 , 2026, 33(01): 90-93+97.

[8]吴泽东 , 韩笑 , 孙荣岳 . 燃煤机组耦合高温熔盐储能系统的建模与优化 [J]. 煤化工 , 2025, 53(04): 95-100.DOI: 10.19889/j.cnki.10059598.2025.04.023.

[9]尹秋钰 , 李德波 , 方立军 , 等 . 燃煤电厂耦合熔盐储热调峰特性模拟研究 [J]. 电力科技与环保 , 2025, 41(02): 240-251.DOI: 10.19944/j.eptep.1674-8069.2025.02.007.

[10]王锡辉 , 陈厚涛 , 盛杰 , 等 . 基于耦合对象控制需求解析及仿人修正的协调控制方法应用 [J]. 科学技术与工程 , 2022, 22(36): 16047-16054.

Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

分布式能源接入对配网运检的影响及应对策略研究

韩强
国网甘肃省电力公司临泽县供电公司，甘肃 张掖 734200
DOI:10.61369/EPTSM.2026040025

摘　　要： 在“双碳”目标指引下，分布式能源（如分布式光伏、风电等）由于其清洁性、灵活性以及靠近负荷中心等特点，在配电网中所占比重越来越大，使配电网由传统的无源单向辐射型网络转变为有源双向互动型网络。但是分布式能源自身存在间歇性和波动性的问题并且接入点广泛、涉及多方主体，给配电运维检修工作带来一系列新问题，也颠覆了原有的配电运维检修方式及管理模式。本文基于配电运维检修工作实际情况，对分布式能源接入带来的配电运行、设备维修、安全管理等方面的影响进行详细阐述，而不是泛泛而谈，针对一线运维检修人员遇到的实际困难，给出切实可行的解决办法，以期提高分布式能源接入条件下配电运维检修工作效率，保证配电的安全可靠供电。

关 键 词： 分布式能源；配网运维检查；运行影响；检修优化；应对措施

Research on the Impact of Distributed Energy Access on Distribution Network Operation and Maintenance and Countermeasures

Han Qiang
Linze County Power Supply Company of Gansu Electric Power Company of State Grid, Zhangye, Gansu 734200

Abstract: Under the guidance of the "dual carbon" goal, distributed energy (such as distributed photovoltaic, wind power, etc.) due to its clean nature, flexibility, and proximity to load centers, has a growing proportion in the distribution network, transforming the traditional passive one-way radiation network into an active two-way interactive network. However, distributed energy itself has intermittent and fluctuating problems and its access points are widespread, involving multiple parties, which brings a series of new problems to distribution operation and maintenance work, and also overturns the original distribution operation and maintenance methods and management models. Based on the actual situation of distribution operation and maintenance work, this paper elaborates in detail on the impacts of distributed energy access on distribution operation, equipment maintenance, and safety management, rather than generalizing. For the actual difficulties encountered by frontline operation and maintenance personnel, practical solutions are provided to improve the efficiency of distribution operation and maintenance under the condition of distributed energy access and ensure the safe and reliable power supply of the distribution network.

Keywords: distributed energy; distribution network operation and maintenance; operational impact; maintenance optimization; countermeasures

引言

随着能源结构调整不断深入，分布式能源作为清洁能源应用的主要载体，在工业厂房、居民小区、农村台区等多种场合得到广泛应用并成为配电网不可或缺的一部分。而分布式能源接入不仅能够缓解电力短缺问题、降低碳排放量，还可以提高配电系统的灵活性，但也给配电系统带来了新的挑战既改变了原有配电网络中的功率流动方向以及运行方式。传统的配电运维检修工作主要是为无源网络设计的，更注重单一方向供电设备的巡视检查与抢修工作，在遇到由分布式能源接入所带来的反向电流、设备状态的变化及故障查找困难等问题时，原有的运维检修方式已经不能满足需求。所以有必要对分布式能源接入给配电运维带来的具体影响进行分析研究，寻找适合一线运维人员操作的方法来解决运维过程中遇到的实际问题，这对确保配电系统的安全可靠稳定运行有着十分重要的作用并且是当前配电运维工作中亟待解决的问题之一。

 Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

一、分布式能源接入对配网运检的核心影响

（一）对配网运行监控的影响

传统配电网为单向供电方式，电能由变电站向用户侧单向传输，在运行监视方面主要是对线路负荷、电压进行监视以保证供电质量良好。但是当接入分布式电源之后，配电网就变成了有源网络，电力流动方向也变成了双向流动，给运行监视带来显著且明显的问题[1]。一是由于分布式电源输出功率受环境因素影响较大，具有很强的随机性和波动性，例如光伏输出功率受光照强度影响，风电输出功率受风速影响等，这些都会造成配电网电压波动、频率偏差甚至出现过电压等问题，而传统的监控系统主要是为单向潮流设计，对于此类变化无法及时感知，容易造成监控信息延迟或者报警不及时的现象发生，不利于运维人员准确了解配电网的实际状况；二是由于分布式电源接入点较多而且分布广泛，特别是在农村以及居民区中的小型屋顶光伏等都是小容量、分散式的接入方式，缺少集中式的监控措施，运维人员很难掌握各个接入点的具体情况及其并网状态，如果某个接入点出现问题也不能第一时间发现，可能会导致一系列连锁反应的发生从而危及局部区域内的配电网络的安全稳定运行；三是由于分布式电源与配电网之间的配合操作复杂化，一些连接设备并没有做到与配电网监控系统的互联互动，因此运维人员不能够远程控制这些分布式电源装置，只能通过人工巡视检查来完成相关工作内容，大大加重了日常维护检修的任务量及难度系数。

（二）对配网设备检修的影响

分布式能源接入之后，配电网设备的工作条件发生了较大的改变，在检修周期、检修项目以及检修方法上都要进行相应的调整，传统的检修方式已经不能满足实际的需求。第一是设备损耗加剧，寿命降低。传统配电设备的设计是单向传输电力，而分布式能源接入所带来的反向电流会使线路、变压器等设备承受更大的负荷波动，在某些时间段内会出现过载运行的现象，长时间下去会造成设备绝缘老化加速、元件老化加快，从而造成设备故障次数增多，维修工作量加大[2]。例如农村台区的配电变压器，以前主要是负责单向供电的任务，在接入分布式光伏之后，在中午光伏发电高峰期时会有大量电能逆流至电网中去，使得变压器负载瞬间升高很多，如果长期处于这样的状态下工作，那么变压器发热以及绝缘受损的概率就会大大增加，就需要更加频繁地对其进行检查保养。第二是检修难度增大，安全隐患增多。由于分布式能源接入点较多而且分布较为广泛，一些接入点位于偏僻的地方或者是居民楼顶上，给检修人员现场作业带来一定困难；同时，分布式能源具有“即发即送”的特性，在配网线路停电检修期间，如果未能及时切断并网连接，则有可能出现从分布式能源侧向线路返送电的情况，“孤岛效应”就可能发生，危及检修人员的人身安全，这就需要在检修之前做好对所有分布式能源接入点的排查、停电闭锁等工作，增加了检修步骤和安全管理难度。第三是检修技术水平要求提高，原有检修人员的技术水平跟不上。对于分布式能源设备（如光伏逆变器、风电控制器）的检修要具备一定的电子技术和控制技术知识，但是传统的配电网检修人员更熟悉的是线路、变压器等传统设备的检修，对于分布式能源设备的构造、原理以及排故技巧都不了解，因此有些与分布式能源相关的设备发生问题后无法迅速有效地解决，影响整个配电网的安全稳定运行。

（三）对配网安全管理的影响

配网运检的主要目的是保证配网的安全运行，在接入分布式能源之后，配网面临的安全隐患增加，安全管理和运维工作的难度和复杂程度都大大提高。一方面，并网安全管理存在疏漏。一些分布式能源用户为了节省开支，所使用的并网设备不符合配网并网要求并未经严格并网检验即接入电网，容易造成设备损坏、功率波动过大等问题从而危及配网安全；另外一部分用户缺少必要的维护技能，对于其拥有的分布式能源设备进行定期检查不到位，使设备长时间处于非良好状态下工作，易引起短路、漏电等情况发生。另一方面，故障抢修难度增大[3]。以往配网发生的事故大多是在单向供电过程中出现线路短路或者设备损坏的情况，事故范围较小，查找起来也比较容易，但是在接入了分布式能源以后，由于有反向电流的存在使得事故点难以确定，给抢修带来一定困难，例如当一条支路出现故障时，分布式能源的逆流就会阻碍保护装置的动作，导致检修人员不能及时找到故障位置，延误抢修时间，降低供电质量。最后，安全管理制度缺失。传统的配网安全管理制度主要是针对传统设备以及单向供电方式制定的，忽略了对分布式能源接入所带来的影响，缺少关于分布式能源并网、运维、检修等方面的具体规定，造成检修人员在操作中无章可循，极易产生误操作现象。

二、分布式能源接入背景下配网运检的应对策略

（一）优化配网运行监控体系，实现精准管控

为了解决分布式能源接入带来的监控滞后、数据缺失、管控不便等问题，基于一线运检实际情况，在提高监控设备水平、扩大监控范围以及加强联合调控的基础上建设适用于有源配网的运行监控体系。第一是提升监控装置，补足监控短板，在分布式能源大量接入地区特别是光伏、风电密集接入台区及线路安装智能化监控终端，对电压、频率、功率潮流等运行参数进行实时采集与动态监视保证了监控信息准确及时，克服以往监控系统延时问题；对于分散式接入的分布式能源设备加装简易监控装置，对其接入点并网情况、发电量进行实时监测便于运维检修人员了解设备运行状况。第二是扩大监控范围，做到全面监控。整合配电网已有监控系统和分布式能源监控数据，搭建统一平台把所有分布式能源接入点、配电网线路、配电设施都纳入其中，“一网打尽”，运维检修人员只需在平台上就可以了解到整个配电网的整体运行状况以及分布式能源接入的情况，杜绝死角。第三是改善联合调控方式以增强系统的可靠性。实现分布式能源设备同配电网监控系统之间的相互连接，可以远程控制分布式能源发出电量大小，在配电网发生低电压或者高电压故障时可以通过降低或增大分布式能源发出电量来减轻配电网负担；另外还应制定出一套完善的分布式能源与配电网联合调度方案，在不同情况下根据配电网运

Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

行状态及分布式能源输出功率的变化灵活改变运行模式防止出现设备过载或者电压越限等情况发生从而降低运维检修人员的工作强度。

（二）升级配网检修模式，提升检修效率和质量

基于分布式能源接入后设备检修存在的问题，以一线运检工作为基础，在检修周期调整、检修方式改进以及检修人员技能提高上进行配网检修方式升级，降低检修难度，提高检修工作效率。一是优化检修周期，实行差异化检修。摒弃以往统一固定检修周期的方式，在充分考虑了分布式能源接入之后设备运行状况及损耗情况的基础上，采取差别化的检修策略：对于受到较大影响且负荷变化较大的设备，适当减少其检修间隔时间并增加相应的检查次数；而对于受影响较小的设备，则保持原有检修周期不变，防止不必要的重复性检修造成资源浪费与人力消耗[4]。二是创新检修方式，简化检修过程并降低安全风险。为了解决由于分布式能源接入点分布广泛而导致难以及时到达的问题，“网格化检修”模式被提出并实施，即将整个配电网络划分为多个小范围的检修区域，每个区域内都配有专职的检修人员负责该区域内所有配电设施以及连接在上面的分布式能源装置的日常维护和应急抢修等工作，从而加快对故障处理的速度；同时制定严格的检修程序，在每次检修之前都要有计划地对涉及的分布式能源接入点进行停电闭锁操作，在确保所有的接入点都已经脱离电网并且线路处于无电压状态的情况下再开始作业，以免出现因“孤岛效应”而产生的安全事故。三是提升检修人员技术水平，满足检修要求。组织专门的技术培训活动，请来相关厂商的技术人员或者专业技术人士向运维检修人员讲解有关分布式能源设备结构原理、常见故障诊断方法等内容，并着重培养他们对于此类新型电力设备的维修能力；另外还实行“老带新”的制度，让那些有着丰富实践经验的老员工指导新手完成一些实际的操作任务，在此过程中积累宝贵的实践经验，最终培养出一批既熟悉传统配电网检修又懂得如何修理分布式能源设备的专业人才。

（三）完善配网安全管理制度，强化安全管控

针对分布式能源接入带来的安全隐患问题，在一线安全管理的基础上，从并网管理、日常运维以及安全教育培训三个方面健全完善相关安全管理制度，把好配电网运行检修的安全关卡。第一是做好并网安全管理，严控入口关卡。出台分布式能源并网验收准则，规定接入设备的技术指标及安全标准，在任何一台分布式能源接入之前都要经过严格的并网检查，达不到要求的设备坚决不允许接入；同时实行分布式能源接入报备制，让用户事先申报接入计划、设备参数等内容，运检人员预先做好接入安排，防止无序接入给配电网带来不利影响。第二是健全和完善日常运维制度，落实运维职责。出台分布式能源接入设备日常运维管理办法，划分用户和运检单位双方的运维责任，由用户承担其自有分布式能源设备的日常保养与维修以及故障处理工作，由运检单位负责配电线路、公共设施等部分的维护并指导、督促用户的运维工作；另外还应有隐患排查整治办法，运检人员要定时定点对分布式能源接入点、配电网设施进行巡检，一旦发现问题立即整改并记录在案形成闭环管理模式[5]。第三是搞好安全教育和宣传，增强安全意识。定期开展对运检人员的安全操作技能培训，主要是向他们介绍有关分布式能源接入之后的安全操作规程、事故处理程序以及预防措施等内容来增强他们的安全观念和应急能力；另一方面也要面向广大分布式能源用户开展宣传教育活动，使他们掌握一些关于如何正确使用自己的设备以及怎样做到科学合理地用电的知识，从而促使他们能够按照正确的步骤去操作并且按时保养好自己的设备以降低由于误操作所导致的各种事故的发生率。

三、结论

分布式能源接入是电力系统发展必然方向，在促进配电网绿色化、智能化过程中也给配电运维带来运行监视、设备巡视、安全管理等方面问题，这些问题都反映在一线运维操作上，降低配电运维工作效率及影响配电安全可靠供电。本文以配电运维工作实际情况出发，对分布式能源接入造成的影响进行具体阐述而非泛泛而谈，提出改进运行监视方式、提高检修方法以及健全安全管理措施等一系列切实可行解决方案来应对上述难题。在日常工作中，配电运维班组要根据本单位电网结构特点以及接入分布式能源情况进行灵活应用各种对策，持续改进运维方式、提升运维水平，逐渐习惯有源配网运行规律，保证分布式能源与配网良好配合、稳定运行，助力电力系统转型升级和配网优质高效发展。

参考文献

[1]李洪成，李文旗，杨昀 . 环网柜在分布式能源接入低压配网中的适应性研究 [J]. 电气技术与经济，2025，(09)：28-30.

[2]柴伦浩，贾博源 . 配网调控中的分布式能源接入与协调控制技术研究 [J]. 技术与市场，2025，32 (08)：48-52.

[3]徐浩，巫菁菁 . 考虑分布式能源接入的配网环网图自动生成方法 [J]. 电气技术与经济，2025，(05)：283-285.

[4]王鹤，刘子悦，边竞，潘禹含 . 面向高比例分布式能源接入的输配网两阶段风险调度研究 [J]. 电网与清洁能源，2024，40 (01)：119-129.

[5]李永刚，韩冰，刘天皓 . 分布式能源接入直流配网的潮流优化 [J]. 华北电力大学学报 (自然科学版)，2016，43 (02)：17-22+29.

 Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.