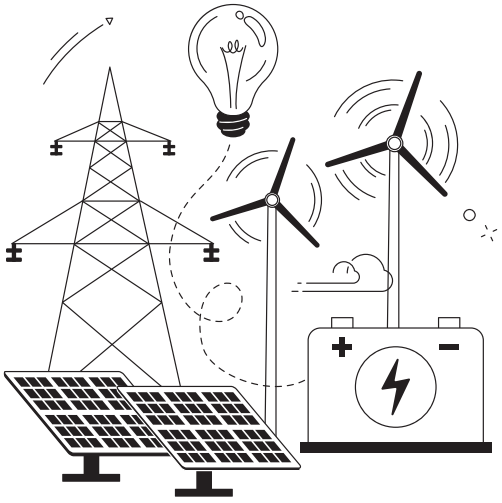
电力技术与安全管理

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.

电力技术与安全管理

Electric Power Technology and Safety Management

第3卷 第2期　2026年2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。

目录 CONTENTS

电力系统 | POWER SYSTEM

001　农村配电网升级改造中供电可靠性提升的实践路径　李刚
Practical Path for Improving Power Supply Reliability in Rural Distribution Network Upgrading and Renovation　Li Gang

004　基于 SPWM的无刷直流电机系统设计　胡美臣，慕秀笛，陈宇峰
Design of SPWM Control System for Brushless DC Motors　Hu Meichen, Mu Xiudi, Chen Yufeng

007　基于用户全生命周期管理的电营销精细化服务策略探讨　夏文杰
Discussion on Refined Service Strategies for Power Marketing Based on Customer Lifecycle Management　Xia Wenjie

010　风电机组数据采集与监控系统异常数据识别方法研究　李忠义，赵长江，相童巍，王乐，默婧
Research on Abnormal Data Identification Methods for Wind Turbine Data Acquisition and Monitoring Systems　Li Zhongyi, Zhao Changjiang, Xiang Tongwei, Wang Le, Mo Jing

013　火电厂厂用电系统能效提升与节能优化技术研究　温凯强
Research on Energy Efficiency Improvement and Energy Saving Optimization Technology of Power Plant Plant Power Supply System　Wen Kaiqiang

016　井下高压配电装置继电保护整定研究　雷广
Research on Relay Protection Setting of Underground High Voltage Distribution Device　Lei Guang

019　基于压力变送器的锅炉给水系统前馈——反馈复合控制优化　叶虎
Optimization of Feedforward — Feedback Composite Control of Boiler Feedwater System Based on Pressure Transmitter　Ye Hu

022　火电厂仪表控制系统抗干扰优化路径研究　程刚
Research on Anti-interference Optimization Path of Instrument Control System in Thermal Power Plant　Cheng Gang

025　高比例新能源接入条件下电力系统稳定性分析　何琼
Analysis of Power System Stability Under High-Penetration Renewable Energy Integration　He Qiong

028　计及定值配合的发电机与励磁系统保护协同策略研究　吴广生
Research on the Protection Coordination Strategy of Generator and Excitation System Considering the Value Setting　Wu Guangsheng

技术研究 | TECHNICAL RESEARCH

032　锅炉燃烧优化与节能技术研究　张玉江，王鑫，张义
Research on Boiler Combustion Optimization and Energy-Saving Technologies　Zhang Yujiang, Wang Xin, Zhang Yi

035　电力工程中新能源并网技术的优化与应用　李健，李妍
Optimization and Application of New Energy Grid Connection Technology in Power Engineering　Li Jian, Li Yan

038　基层电力企业安全管理体系构建与风险防控策略研究　徐利芹
Research on the Construction of Safety Management System and Risk Prevention and Control Strategies in Grassroots Power Enterprises　Xu Liqin

041 电力能源企业数字化转型与管理模式创新研究 陈文锋
Research on Digital Transformation and Management Model Innovation of Electric Power Enterprises Chen Wenfeng

044 无人机在电网设备隐患排查中的应用 唐彬
Application of UAV in Hidden Hazard Inspection of Power Grid Equipment Tang Bin

047 典型石油勘探仪器的电路化实现与地质勘探应用研究 蓝永宗，谢培，诸梦青
Research on the Circuitization of Typical Petroleum Exploration Instruments and Its Applications in Geological Exploration Lan Yongzong, Xie Pei, Zhu Mengqing

050 铁路供电安全管理体系构建与实践探讨 冯雪
Discussion on the Construction and Practice of Railway Power Supply Safety Management System Feng Xue

053 汽轮机转速变送器故障下的容错控制策略设计与验证 高峰
Design and Verification of Fault-tolerant Control Strategy for Turbine Speed Transmitter Gao Feng

056 火电厂氧量变送器测量滞后补偿与先进过程控制研究 赵子毫
Research on Measurement Lag Compensation and Advanced Process Control of Oxygen Transmitter in Thermal Power Plant Zhao Zihao

059 基于改进 PID 算法的火电厂汽包水位变送器控制策略研究 朱勇
Research on Control Strategy of Steam Drum Water Level Transmitter in Thermal Power Plant Based on Improved PID Algorithm Zhu Yong

062 智能化技术在煤矿机电管理中的应用 刘旭东
Application of Intelligent Technology in Coal Mine Electromechanical Management Liu Xudong

065 现货市场下燃煤机组深度调峰稳燃优化与应用 马杨洋
Optimization and Application of Deep Peak Shaving and Stable Combustion for Coal-fired Units in Spot Market Ma Yangyang

068 光伏并网逆变器低电压穿越能力增强技术与故障诊断方法 杜鹏
Enhanced Low Voltage Ride-Through Capability and Fault Diagnosis Method for Photovoltaic Grid-Connected Inverter Du Peng

071 电厂化学监控与环境保护策略分析 彭珊
Analysis of Chemical Monitoring and Environmental Protection Strategy in Power Plant Peng Shan

074 电厂化学水处理技术的研究与应用 郭晓争
Research and Application of Chemical Water Treatment Technology in Power Plant Guo Xiaozheng

077 光储电一体化参与电力市场竞价的动态博弈策略分析 侯春苗
Analysis of Dynamic Game Strategies for Integrated Photovoltaic-Power Storage Participation in Power Market Bidding Hou Chunmiao

080 核能领域数字化建设及数据治理的理论建构与实践路径 唐蓉
Theoretical Construction and Practical Path of Digital Construction and Data Governance in the Field of Nuclear Energy Tang Rong

083 汽轮机叶片损伤的检修与预防方法研究 王哲
Research on Maintenance and Prevention Methods of Turbine Blade Damage Wang Zhe

086 电气二次回路常见故障排查方法研究 张杨泽旭
Research on Troubleshooting Methods of Common Faults in Electrical Secondary Circuit Zhang Yangzexu

089 热工检修维护全流程管理体系的构建与实践 杨远
Construction and Practice of the Whole Process Management System for Thermal Maintenance and Repair Yang Yuan

092 智能电表数据驱动的用户用电异常检测方法 夏宇伟
A Data-Driven Method for Detecting Abnormal Electricity Consumption by Users with Smart Meters Xia Yuwei

095 ZPW–2000A 无绝缘轨道电路维护与故障处理策略研究 张赞赞
Research on Maintenance and Fault Handling Strategies for ZPW-2000A Non-insulated Track Circuit Zhang Zanzan

农村配电网升级改造中供电可靠性提升的实践路径

李刚
广水市供电公司，湖北 广水 432700
DOI:10.61369/EPTSM.2026020002

摘　　要： 农村配电网是农村能源供应的主要基础设施，供电可靠度直接影响到乡村振兴战略推进、农业生产效率提高。我国农村配电网还存在着设备老化、网架结构不合理、运维管理滞后等问题，导致供电中断事件时有发生，影响农村经济社会的发展。本文以农村配电网升级改造为背景，结合多地实践经验，从农村配电网供电可靠性现状入手，阐述农村配电网升级改造过程中提高供电可靠性的重要意义，为农村配电网高质量发展提供可以借鉴的思路和方案。

关 键 词： 农村配电网；升级改造；供电可靠性；实践路径

Practical Path for Improving Power Supply Reliability in Rural Distribution Network Upgrading and Renovation

Li Gang
Guangshui Supply Company, Guangshui, Hubei 432700

Abstract: The rural distribution network is the main infrastructure for rural energy supply, and reliability of power supply directly affects the promotion of rural revitalization strategy and the improvement of agricultural production efficiency. There are still problems such as equipment aging, unreasonable network structure, and lag operation and maintenance management in China's rural distribution network, which lead to frequent power outage incidents and affect the development of rural economy and society. This paper takes the upgrading and of rural distribution network as the background, combined with the practical experience of many places, starts with the current situation of power supply reliability of rural distribution network, expounds the great significance improving power supply reliability in the process of upgrading and renovation of rural distribution network, and provides ideas and schemes for the high-quality development of rural distribution network that can be referred to.

Keywords: rural distribution network; upgrading and renovation; power supply reliability; practical path

在乡村振兴战略持续推进的过程中，农村产业结构逐渐提升、特色农业、乡村旅游、农产品加工等产业快速兴起，并且农民的生活电气化水平不断加强，从而提高了对农村配电网供电可靠性方面的要求。长期以来我国农村配电网建设投资不足，网架薄弱、供电半径过大、设备陈旧等问题较为突出，极端天气、用电高峰时段容易发生停电，影响农民正常生活，制约了农村产业升级的速度。提高农村配电网供电可靠性，是解决农村能源供给难题的有效途径。因此本文以农村配电网升级改造为背景，对供电可靠性提升的实践路径进行了探究，为农村配电网转型升级、服务农村经济社会发展高质量发展提供理论和实践支持。

一、农村配电网供电可靠性现状概述

（一）配电网网架结构现状

我国农村配电网网架结构由于受历史建设条件的限制存在明显的短板。部分偏远农村采用单辐射网架，缺少备用电源回路，主干线路出现故障就会造成大面积停电，供电恢复时间较长。同时供电半径过大问题也比较突出，部分台区的供电半径超过500米，远超规范标准，造成末端电压低、线损率高，既影响用电设备正常工作，又增加线路故障风险。再加上农村配电网联络率低，大部分乡镇配电网没有互联互供机制，故障的时候不能转移负荷，供电可靠性就进一步下降了。

（二）配电设备运行现状

农村配电网设备老化、技术水平低的情况比较普遍。部分农村还使用着老旧的油浸式变压器，效率低、损耗大，漏油、绝缘老化等安全隐患较多，容易造成设备故障。高压开关柜、断路器等开关设备存在同样的质量问题，很多设备已经接近于使用寿命期限了，操作机构老化、灭弧性能下降，在负荷起伏或者恶劣天气下极易出现跳闸。农村配电网缺少无功补偿设备，不能随着用

作者简介：李刚（1985.12-），男，汉族，湖北省随州市随县人，学历：本科，职称：工程师，研究方向：电气自动化。

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

电负荷的变化调节无功功率，致使电网的功率因数低、电压波动大、供电稳定性受到影响[1]。

（三）运维管理模式现状

农村配电网运维管理模式落后于现在提高供电可靠性的要求。就人员配备而言，农村配电网运维人员数量不足且专业素质参差不齐，部分运维人员缺乏系统的专业培训，对新型配电设备的操作、故障诊断能力不强，从而造成故障不能得到及时处理。从管理方式上来讲，大部分农村配电网仍旧采取人工巡检的模式，巡检效率低、覆盖面小，不能及时发现线路、设备隐患，一般等到故障发生以后才被动处理。运维管理信息化程度低，缺少完善的配电自动化系统，不能对电网运行状态实施实时监测和远程控制[2]。

（四）外部环境影响现状

由于农村配电网受外部环境影响较大，供电可靠性也随之降低。农村的线路在通过山区、林区等地形复杂的地带时，在恶劣天气下就会发生树木倒压线、绝缘子闪络和导线覆冰等情况。人为因素主要是农村地区电力设施保护意识薄弱，私拉乱接、违章建房、线下焚烧秸秆等行为时有发生，容易引起线路短路、设备损坏。另外农村地区基础设施建设不断推进，道路施工、农田水利建设等工程频繁发生，施工过程中误碰、挖断配电线路的情况时有发生，造成供电中断[3]。

二、农村配电网升级改造中提升供电可靠性的意义

（一）助力乡村振兴战略实施

提高农村配电网的供电可靠性，是乡村振兴战略实施的有力保障。乡村振兴缺不了产业支撑，特色农业、乡村工业、乡村旅游等产业的发展都需要电。温室大棚种植、水产养殖等现代化的农业生产要依靠恒温控制、水泵灌溉等电气化设备，如果供电不稳定，就会造成农作物减产、水产品死亡，造成重大经济损失。乡村旅游景区的住宿、餐饮、娱乐等设施也需要持续可靠的电力保障，供电中断会影响游客体验，制约乡村旅游产业的发展。经过升级改造来改善供电可靠性，可以给农村产业升级赋予稳定的能源供应，从而促使农村经济实现高质量发展[4]。

（二）改善农民生产生活质量

可靠的农村供电是提高农民生产、生活质量的基本条件。随着农民生活水平的提高，空调、冰箱、洗衣机等家用电器普及率大大提高，农民对电力的依赖程度也越来越大。供电中断会造成家用电器的使用受阻，食品不能得到冷藏保存而变质，供暖系统停止运行造成寒冷天气下的生活不便，农民生活的幸福感也随之降低。农业生产上，传统农业生产方式慢慢向机械化、电气化转变，拖拉机、收割机、脱粒机等农机设备的电气化程度越来越高，稳定的供电可以给农业生产提供动力，提高生产效率，降低农民的劳动强度。提高供电可靠性可以共享电力发展的成果，提高农民的获得感、幸福感。

（三）提升电网整体运营效益

提高农村配电网供电可靠性，可以降低电网运行成本，增大电网运营的总体效益。供电中断会使得电网企业产生大量的抢修费用，包含人员出勤费、设备维修费、物资运输费等等，另外由于停电造成的售电量损失。对网架结构实施升级改造，替换掉老化的设备，就能够缩减故障发生的概率，削减抢修的成本以及电量的损耗。另一方面农村配电网供电可靠性提高之后，电网线损率会明显下降。老旧设备、不合理的网架结构是造成线损率偏高的主要原因，更换高效节能设备、优化供电半径可以提高电网能源利用效率，减少能源浪费，提高电网企业经济效益。

（四）强化能源安全保障能力

农村配电网属于国家电网的关键部分，它的供电可靠程度直接影响到国家能源安全。由于能源结构调整迅速，农村地区的分布式光伏、风电等新能源项目发展迅速，农村配电网不再仅仅是能源消费端，而成为了能源生产和消纳的主要载体。提高供电可靠性可以提高农村配电网接纳新能源的能力，实现新能源稳定并网，促进能源结构绿色转型。在极端天气、自然灾害等突发情况之下，可靠的农村配电网可以保证基本民用电、应急供电的需求，也可以为抢险救灾提供能源保障，从而更好地完善国家的能源安全保障体系[5]。

三、农村配电网升级改造中提升供电可靠性的实践路径

（一）优化网架结构，构建坚强供电网络

优化网架结构是提高农村配电网供电可靠性的重要手段。推进网架网格化建设，根据农村地区用电负荷分散、季节性变化大的特点，科学划分供电网格，每个网格构建“手拉手”环网结构，配套建设智能联络开关、故障检测装置，实现同一负荷区域多回路冗余供电。当某一条回路发生故障的时候，系统能自动判断出故障点，并用联络开关将负荷转移到其它电网中，使停电范围限定在一个网格里，从而大大缩短故障处理时间和用户的停电时间[6]。第二，缩短供电半径，对于超过规范标准的长距离供电台变进行拆分改造，根据负荷密度新增配电变压器布点，优先选用小型化、智能化设备，将供电半径控制在500米以内，有效降低线路损耗，保证末端用户电压质量达标，提高供电稳定性和抗干扰能力。提高配电网联络率，在乡镇中心区、产业园区等负荷密集区加强网架互联，形成多源互供、网架健全的供电网络。另外根据农村新能源发展规划预留新能源并网接口，优化网架接线方式，提高分布式新能源的接纳能力[7]。

（二）升级配电设备，提升设备运行可靠性

配电设备为保证供电可靠性所必需的，更新改造老旧设备。一是更换老旧变压器，采用S11及以上节能型干式变压器，节能型干式变压器损耗低、绝缘性能好、运行稳定，能减少设备故障的发生率。按照负荷增长情况，合理选择变压器容量，防止过载跳闸。二是更新开关设备，把老式的高压开关柜、断路器换成SF6全封闭开关柜、真空断路器等新型设备，提高开关设备的灭弧能力、操作可靠性，延长设备的使用寿命。并且装设智能型开关设备，以实现故障快速分闸、合闸，为故障精准定位与处理

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

提供支持。三是完善无功补偿和调压设备，在配变台架上配置自动无功补偿装置，根据负荷变化调节无功功率，提高电网功率因数；安装有载调压变压器，实现电压的实时调节，保证电压质量稳定。

（三）强化运维管理，构建高效管控体系

高效的运维管理是提高供电可靠性的保障，需要从运维管理模式、运维管理技术、运维人员素质等各个方面加强。在管理模式上实行“台长制”，明确每一个供电台区的运维责任人，负责该台区设备巡检、故障处理、客户服务等一切运维管理工作，实现运维管理责任到人。建立故障快速响应机制，组建农村配电网应急抢修队伍，配备应急抢修车辆和物资，保证故障发生后快速出动、高效处置。从技术手段来说，加快推进配电自动化建设，在乡镇中心区域、重要用户周边安装馈线自动化终端、故障指示器等设备，实现对电网运行状态的实时监测、故障精准定位、远程控制，把故障处理时间由小时级缩短到分钟级。推广无人机巡检、红外测温等先进的巡检技术，提高巡检效率和隐患排查能力，实现从被动抢修到主动运维的转变。就人员素质而言，加强运维人员的专业培训，定期开展设备操作、故障诊断、应急处置等各方面的培训与演练工作，提高运维人员的专业技能和应急处理能力；建立绩效考核机制，将供电可靠性指标同运维人员的绩效联系起来，激发其工作的积极性[8]。

（四）赋能数字技术，推动智能电网建设

数字技术是提高农村配电网供电可靠性的技术支撑，要加快数字技术与配电网的深度融合。一是创建配电网数字化监控平台，将配电自动化、用电信息采集、无人机巡检等各方面数据整合到一起，完成对电网运行状态、设备健康状况、用电负荷变动等各方面信息的全方位感知及集中控制，为电网调度、运维决策提供数据支撑[9]。二是利用大数据分析技术对电网运行数据、故障数据、负荷数据等进行分析，预测负荷增长趋势，发现潜在故障隐患，实现故障提前预警、精准运维。根据变压器运行温度、负荷曲线等数据，提前对变压器是否过载、绝缘老化做出判断，及时采取维护措施。三是推广智能用电技术，为农村用户安装智能电表，实现用电信息实时采集、远程抄表；推广分布式能源智能调控技术，实现分布式光伏、风电等新能源的智能调度和优化运行，提高能源利用率。另外研究5G、物联网等技术在农村配电网中的应用，实现设备之间高速通信、协同控制，提高配电网智能化水平[10]。

四、结束语

综上所述，农村配电网升级改造提升供电可靠性属于系统工程，与乡村振兴全局、农民切身利益、能源安全保障密切相关。目前农村配电网仍然存在网架薄弱、设备老化、运维滞后等问题，提高供电可靠性要综合考虑、精确实施。本文提出的网架优化、设备升级、运维强化、技术赋能四大实践路径，相互联系、相辅相成，给农村配电网升级改造提供了一个可行的方案。伴随着数字技术不断发展和农村用电需求的持续增加，在农村配电网升级改造时更加强调规划的指导作用、加大投入力度、深化技术创新、完善管理机制、推动农村配电网向智能化、坚强化、高效化转型。只有这样，才能建立起安全稳定的农村供电系统，给农村经济社会高质量发展提供源源不断的能源动力，助力乡村振兴战略落地生根。

参考文献

[1]孙明浩，苏迪，杜道强，等．基于价值共创理念的农村配电网集约化管理实践[J].河南电力，2024,(11):64-65.

[2]张舜博，马子康．新型农村配电网数字化、智能化改造分析[J].科技创新与应用，2024,14(30):128-131.

[3]蒋明．测量技术在广西农村配电网设计中的应用现状与发展趋势[J].沿海企业与科技，2024,29(04):120-126.

[4]潘凯峰．农村配电网低电压成因分析及解决措施[J].大众用电，2023,38(12):57-58.

[5]刘昌．分布式光伏发电接入农村配电网的思考[J].农村电工，2022,30(04):31.

[6]曾昭洁．农村配电台区低电压治理技术方案探讨[J].电气技术与经济，2021,(05):58-61.

[7]陈兵兵，纪文玉，赵伟，等．基于发展裕度和发展适应性的农村配电网规划研究[J].农村电气化，2021,(09):9-10+20.

[8]谢鹏，钟士元，蒙天骐．江西配电网规划精细化管理研究[J].江西电力，2021,45(04):25-30+44.

[9]黄海．加快推进农村配电网建设促进乡村振兴[J].农电管理，2021,(01):30-32.

[10]李成林．农村配电网综合治理措施探讨与思考[J].农村电工，2020,28(11):10.

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

基于 SPWM 的无刷直流电机系统设计

胡美臣，慕秀笛，陈宇峰
成都工业学院机器人学院，四川 成都 611730

DOI:10.61369/EPTSM.2026020005

摘　　要： 传统无刷直流电机用六步换相方式驱动时，总容易出现转速忽快忽慢，不能稳定转动的情况，电能因此浪费不少。为了解决此问题，我们设计了一套全新的控制系统，引入了正弦脉宽调制（SPWM）技术和 PID 闭环控制算法，该系统以 STM32F103C8T6 为核心，搭配模块化硬件设计及多重保护机制，经过仿真测试和实际真机运行验证，电机运转的噪音变小，转矩的波动幅度压到了 3.2% 以内，电能利用率提高到 92% 以上，转速的稳定误差也控制在 ± 1.5% 以内，解决了传统六步换相驱动的转速不稳、转矩脉动大、电能浪费等问题。系统性能较为可靠，适合用于精密机械、医疗器械等对运动控制要求较高的地方。

关 键 词： 无刷直流电机；SPWM；PID 控制

Design of SPWM Control System for Brushless DC Motors

Hu Meichen, Mu Xiudi, Chen Yufeng
Robotics Institute, Chengdu Institute of Technology, Chengdu, Sichuan 611730

Abstract: When a traditional brushless DC motor is driven by the six-step commutation method, its speed always tends to fluctuate and fail to rotate stably, resulting in considerable waste of electrical energy. To solve this problem, we have designed a brand-new control system that incorporates the Sinusoidal Pulse Width Modulation (SPWM) technology and the PID closed-loop control algorithm. With the STM32F103C8T6 as its core, the system is equipped with a modular hardware design and multiple protection mechanisms. Verified through simulation tests and actual physical operation, the motor now operates with lower noise, the torque fluctuation range is suppressed to within 3.2%, the electrical energy utilization rate is increased to over 92%, and the stable speed error is controlled within ± 1.5%. This solves the problems of unstable speed, large torque ripple and electrical energy waste associated with the traditional six-step commutation drive. The system features reliable performance and is suitable for applications with high motion control requirements such as precision machinery and medical devices.

Keywords: brushless DC motor; SPWM; PID control

引言

近些年来，无刷电机在各行业大放光彩，如医疗器械、新能源汽车、家用电器等[1]。国外有高精度控制技术和高性能系统，多用于高端领域，但算法复杂、成本高，难推广。我国借鉴国外技术自主创新，做出了基于 STM32 的低成本国产控制系统。不过传统电机驱动还有缺点：常用的六步换相驱动会让电机转速不稳、转动力度波动大，影响设备工作；部分控制系统抗干扰能力弱、电能利用不充分，在无传感器适配、启动和响应速度上也需改进。

为解决这些问题，我们设计了以 STM32F103C8T6 芯片为核心的新型控制系统，融合 SPWM 控制和 PID 算法，SPWM 能生成渐变的电脉冲，PID 可及时修正电机的转速偏差。这套系统的硬件包含供电、驱动等关键部分，不仅可靠性强，适配性也高；我们还优化了电路和配套软件，让系统的抗干扰能力和电能利用效率都得到了提升。本文会介绍这套系统的相关原理、硬件和软件的设计思路，再通过仿真和实际实验来验证它的性能，为实现无刷直流电机的高精度、高效率控制提供新的方法。

一、理论分析

（一）SPWM 控制技术

针对传统六步换相驱动的转速波动、转矩脉动与低能效问题，SPWM 技术以其平稳驱动、高效控制的天然优势，成为优选解决方案。我们通过让不同波形相互交叉来生成渐变的脉冲信号，能有效减小电机转动力度的波动，让电机运转得更平稳。为了减少系统实时计算的工作量，提高反应速度，我们采用对称采

作者简介：胡美臣（1993.03-），女，汉族，重庆人，学历：硕士研究生，专业：控制科学与工程，职称：助教，研究方向：网络化预测控制，自动控制，传感器。

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

样方法，以及提前存好的数据表，通过调整脉冲的占空比，就能精准改变电机的电枢电压，再配上 PID 闭环反馈的调节方式，实时修正转速的偏差，保证电机在不同的负载情况下都能维持稳定的转速 [2]，同时还提高了电能的利用效率。

（二）PID 闭环控制算法原理

PID 控制算法由比例、积分、微分三部分构成，公式为：

$$uk = K_P e(k) + K_I \sum_{i=0} e(i) + K_D \left[e(k) - e(k-1) \right]$$

核心是通过这三部分算出控制信号，调节电机运转。比例部分按转速差距快速反应，积分部分消除转速固定偏差、提升精准度，微分部分预判转速差距变化并提前调整，避免转速忽快忽慢，让运转更平稳。在本系统中，PID 算法实时收集对比电机实际与设定转速，计算后输出调节信号，动态调整参数，让电机转速精准稳定。

二、系统总体设计

系统总体设计如图 1 所示，包括五大核心模块。

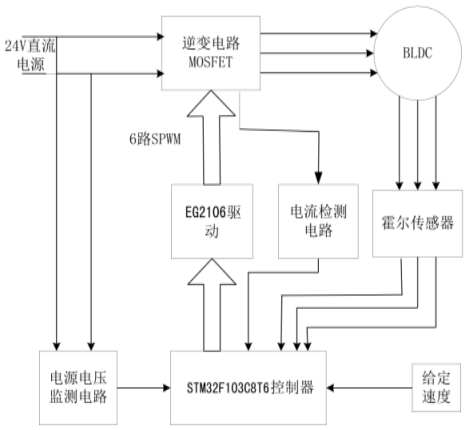


图 1 系统总体框架图

（一）硬件设计

硬件选型遵循“性能适配、成本可控、兼容性强”原则，硬件采用模块化的设计，其核心元器件兼顾了性能与成本。电源选用 XL4001 降压芯片与 ME6118A 系列稳压器，搭配滤波、去耦电容降低噪声。驱动为 EG2106 驱动芯片与 NCE6075K MOS 管构成了三相全桥电路，设置 5μs 死区时间。检测方面使用数字式霍尔传感器与 LM358 运算放大器，来提升检测精度。保护模块结合硬件的阈值判断与软件中断响应，用来实现多重保护 [3]。

（二）系统软件设计

我们用 KEIL5 把控制电机的程序分成五类功能模块：1. 初始化：给芯片做基础设置；2.SPWM 模块：生成控制电机的脉冲信号；3.PID 模块：计算调整转速；4. 霍尔信号模块：识别转子位置和转速；5. 应急响应模块：处理突发情况。程序启动后循环工作：采集电机信号计算转速，用 PID 调整脉冲参数稳定转速；两个定时器分工（100 微秒生成 SPWM 信号、1 毫秒采集数据算 PID），急停按键可立刻使电机停止驱动；三路 SPWM 信号错开 120°，保障电机平稳运转。

三、仿真与实验测试

为全面验证系统设计的合理性、稳定性及性能指标，本研究采用“仿真建模预验证 + 实物实测落地验证”的双重测试方案，围绕核心性能指标开展同步测试，确保理论设计与实际运行效果一致。

（一）设计框架

本系统以 STM32F103C8T6 为核心，整合电源、驱动、检测及保护模块，搭配 SPWM 调制与 PID 闭环控制算法 [4]，实现无刷直流电机平稳运行与高精度调速，为了验证转速稳定性、转矩脉动抑制、电源利用率及抗干扰能力。仿真平台采用 MATLAB/Simulink（参数匹配 24V、3000r/min、0.5N·m 电机）。实物平台使用 24V/20A 电源、STM32F103C8T6 核心板、EG2106+NCE6075K 驱动电路、霍尔传感器、扭矩传感器、示波器、负载电阻箱及干扰源，模型如图 2 所示。

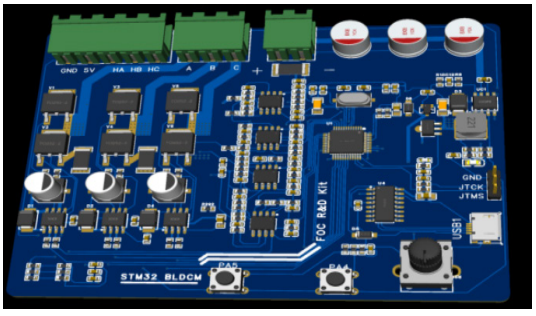


图 2 PCB 3D 模型图（正面）

（二）仿真双重测验

1. 电流与换相逻辑验证

仿真结果：三相电流波形对称（图 3），任意时刻矢量和趋近于零，印证中性点构造正确；转子位置信号为标准方波（图 4），相位差为 120°，无抖动，换相时序精准。实物测试结果显示：示波器捕捉的三相电流波形与仿真一致，无明显畸变；霍尔位置信号高电平稳定，相位差在保持 120°，无毛刺，换相无异常。对比分析：结果基本完全匹配，说明逆变电路拓扑设计及换相逻辑（Stateflow 状态机）无偏差，硬件布线与软件算法协同有效。

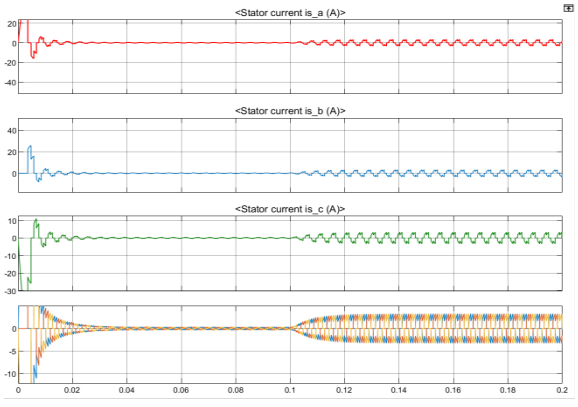


图 3 三相电流波形图

以时间为横轴、电流为纵轴，呈现定子三相电流的动态变化，三者相位互补、幅值协调，矢量和趋近于零，印证中性点构造正确。

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

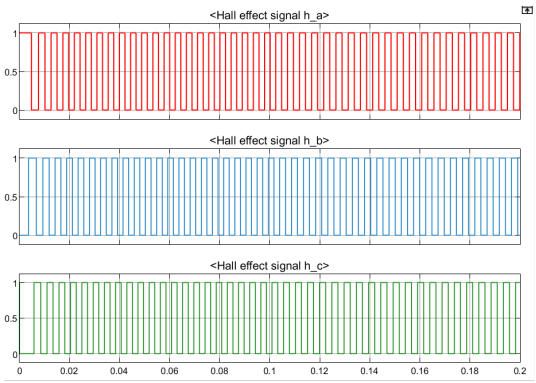


图4 转子位置信号波形图

记录霍尔效应信号的输出状态，呈标准高低电平切换，相位差严格120° 且无抖动，表明换相时序精准。

2.转速与动态响应测试

仿真结果：电机启动时间0.08s，空载转速稳定在3400r/min，加载0.5N·m 负载后转速快速调整至3050r/min，波动≤50r/min（图5），转速稳定误差 ±1.2%。实物测试结果：启动时间75ms，空载转速稳定在3380r/min，加载后转速维持 3040r/min，波动≤30r/min（图 6），转速稳定误差 在1.3%左右，满足设计要求。对比分析：实物测试启动时间略短于仿真，转速波动更小，原因是仿真中未完全考虑硬件死区时间优化效果；两者均验证 PID 闭环调速算法的动态调节能力，实物表现更贴近实际应用场景。

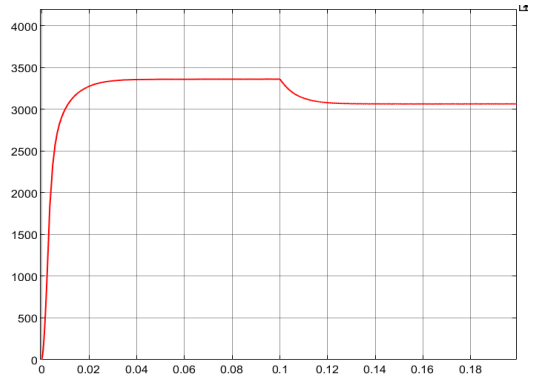


图5 电机转速响应图

时间为横轴、转速为纵轴，清晰呈现了电机从启动到空载稳定运行，再到加载后转速调整的完整动态过程，直观反映出系统对转速变化的快速响应特性。

3.转矩脉动与噪声抑制测试

仿真结果：电磁转矩脉动3.3%，相较于传统六步换相驱动降幅60%，运行噪声模拟值≤58dB。实物测试结果：转矩脉动3.1%（≤3.2% 设计要求），实际运行噪声53dB（≤55dB），电机运行平顺无明显振动。对比分析：实物转矩脉动和噪声略优于仿真，得益于硬件中滤波电容的噪声抑制作用；SPWM 技术的渐变脉冲优势在仿真与实物中均充分体现，有效解决了传统六步换相的转矩脉动问题。

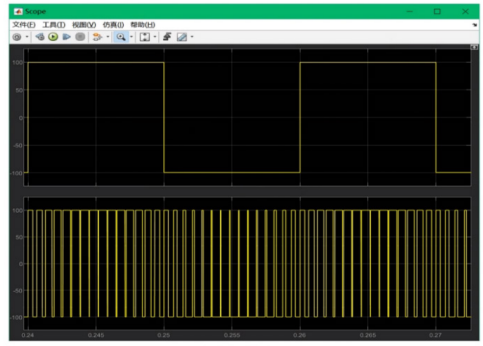


图6 测试转速图

4.电源利用率与抗干扰测试

仿真结果：电源利用率93.5%，添加电磁干扰源后转速波动≤40r/min。实物测试结果：电源利用率92.8%，模拟工业电磁环境（变频器、继电器近距离干扰）下，转速波动 25r/min，电流采样误差≤1.8%；±8kV 接触放电、±15kV空气放电测试中，系统无复位或功能异常，各模块运行正常。

对比分析：实物电源利用率略低于仿真，因硬件存在轻微功率损耗；抗干扰性能优于仿真，得益于 PCB 布线中的接地优化和去耦电容设计，验证系统在复杂环境下的可靠性。

四、结语

基于 SPWM 控制技术的无刷直流电机系统，通过搭建电机数学模型、优化硬件选型和软件运算方式，实现电机高效精准的控制。仿真和实验的结果表明，系统的优势十分明显：SPWM 技术大大的减少了运行时转矩抖动和噪音，其中转矩抖动幅度≤3.2%，运行噪音≤55分贝，电机运转更加稳定；使用 PID 闭环控制，转速稳定误差控制在1.5%左右，启动时间不到80ms，不仅反应迅速且稳定运行精度更高；硬件电路设计合理，电能利用率≥92%，核心零件不仅兼顾性能与成本，而且兼容性佳，适合批量生产；集成过流、过压、反接等操作来完善保护功能，系统可靠性强，可以适应复杂工作环境。

未来我们将会进一步优化算法，探索无传感器控制方案，让这个技术更高效、可靠、经济。

参考文献

[1]郑鹏飞；侯哲生；白又丹；车文硕 .一种直流无刷电机驱动器设计与仿真 [J].电子制作 ,2023,31(17):16-18+15.

[2]胡春龙 .改进型 SPWM 调制下的整流器参数设计与仿真研究 [J].测试技术学报 ,2023,37(04):310-315+322.

[3]钟海峰；吴宇 .无刷直流电机无位置传感器的优化控制方法 [J].电子制作 ,2023,31(05):68-70+57.

[4]夏超英 .现代控制理论 [M].2012.

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

基于用户全生命周期管理的电营销精细化服务策略探讨

夏文杰
国网江陵县供电公司，湖北 荆州 434100
DOI:10.61369/EPTSM.2026020008

摘　　要： 本文以用户全生命周期管理为主线，围绕引入、成长、成熟与衰退/流失四阶段，分析电营销场景下用户特征与常见痛点，构建“分阶段目标—分层运营—分渠道触达—闭环优化”的精细化服务策略框架。并从获客、转化、留存、价值与口碑等维度提出评估指标与迭代机制，以期提升营销效率、优化服务体验并促进用户终身价值增长。

关 键 词： 用户全生命周期管理；电营销；精细化服务；用户分层；客户终身价值

Discussion on Refined Service Strategies for Power Marketing Based on Customer Lifecycle Management

Xia Wenjie
State Grid Jiangling County Power Supply Company, Jingzhou, Hubei 434100

Abstract: This paper adopts user lifecycle management as the guiding approach and examines user characteristics and key pain points across four stages—acquisition, growth, maturity, and decline/churn—in digital marketing contexts. It proposes a refined service strategy framework featuring stage-based objectives, value/risk-based segmentation, multi-channel engagement, and closed-loop optimization. An evaluation and iteration system is further developed to improve marketing efficiency, service experience, and customer lifetime value.

Keywords: user lifecycle management; digital marketing; refined services; customer segmentation; customer lifetime value

前言

随着数字化渠道普及与用户触点碎片化加剧，电营销已从“广覆盖、强曝光”的粗放模式转向“以用户为中心、以数据为驱动”的精细化运营。现实中，企业普遍面临获客成本上升、转化效率下降、用户留存波动以及服务体验不一致等问题，其根源在于对用户需求的阶段性变化识别不足，营销与服务割裂，难以实现持续价值挖掘。因此，基于用户全生命周期管理构建电营销精细化服务策略，成为提升经营质量与竞争力的重要路径。

本研究的意义主要体现在三方面：其一，从生命周期视角对用户分层与需求演化进行系统梳理，为差异化服务提供依据；其二，通过匹配“阶段目标—服务动作—触达渠道”，提升营销转化与服务效率，降低流失风险；其三，为企业建立可落地的闭环运营体系（数据标签、触达规则、评估指标）提供参考，推动电营销由“活动驱动”向“用户价值驱动”转型。

研究方法上，本文以文献分析明确概念与理论基础，以归纳法提炼各阶段关键痛点，并结合实践场景提出策略框架与评估思路。全文结构依次为：理论与概念界定、生命周期特征与痛点分析、精细化服务策略设计、效果评估与结论展望。

一、理论基础与概念界定

用户全生命周期管理（User Lifecycle Management）强调以“用户关系持续经营”为主线，将用户从初次接触到持续使用、价值提升直至流失的全过程进行分阶段识别与管理。相较于一次性交易导向的营销方式，全生命周期管理更关注用户在不同阶段的需求差异、行为变化与价值贡献，并通过持续触达与服务优化实现用户价值最大化。一般可将生命周期划分为引入期、成长期、成熟期与衰退/流失期：引入期侧重建立认知与信任、完成首次转化；成长期侧重提升活跃与复购，降低使用门槛；成熟期侧重深度经营与增值服务，提升黏性与贡献；衰退/流失期侧重风险预警与挽回修复，减少价值损失。

电营销是以互联网渠道为载体的营销与服务活动集合，涵盖线上获客、转化促成、客户服务、关系维护等环节，其核心特征

作者简介：夏文杰（1983.02-），男，汉族，湖北江陵人，学历：大学本科，职称：助理工程师，研究方向：电力营销、配电自动化。

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

是触点多、数据可追踪、响应速度快。精细化服务则是在电营销场景下，以数据和规则为基础，对不同用户群体实施差异化、个性化、可衡量的服务与触达策略，强调“在合适的时间、通过合适的渠道、向合适的用户提供合适的内容与服务”。其关键不在于触达频次的增加，而在于对用户真实需求、服务成本与预期收益的平衡，实现效率与体验的统一。

为支撑上述管理逻辑，本文引入三类相关理论作为分析框架。第一，客户关系管理（CRM）理论强调以客户为中心整合营销、销售与服务流程，通过统一信息与协同机制提升满意度与关系质量，为跨部门协同、标准化服务流程（如 SOP）提供依据。第二，客户终身价值（CLV）理论从长期视角衡量用户未来可贡献的利润总和，能够指导资源投入与服务分层：对高潜力或高价值用户配置更强的服务与权益，对低价值用户采用低成本自动化触达，从而提升整体投入产出比。第三，用户分群与行为分析理论（如 RFM、漏斗模型、标签体系等）用于刻画用户差异并实现可执行的运营策略落地。通过构建标签体系（属性、行为、偏好、价值、风险等），企业可将生命周期阶段判断与服务动作绑定，形成“识别—触达—转化 / 留存—评估”的闭环机制。

综上，用户全生命周期管理提供了分阶段的经营视角，电营销提供了多触点与数据基础，精细化服务强调差异化与可衡量执行；三者结合能够为企业构建以用户价值为导向的电营销服务策略框架。

二、基于生命周期的用户特征分析与关键痛点

在全生命周期框架下，用户并非静态个体，而是在不同阶段呈现出差异化的行为模式与服务期待。因此，电营销精细化服务的前提是完成用户分层与画像构建，并据此识别各阶段关键痛点，避免“同一套话术、同一种服务”覆盖所有人群。

（一）用户分层与画像构建

用户画像建议从四类信息综合刻画：1）基础属性：地区、年龄、职业、设备类型、账户状态等，用于判断可触达性与基础偏好；2）行为特征：访问 / 使用频次、停留时长、关键功能使用、咨询 / 投诉记录、活动参与度等，用于判断活跃度与需求强度；3）价值贡献：客单价、购买频次、毛利贡献、套餐结构、付款习惯等，用于识别高价值与高潜力用户；4）渠道偏好：偏好 APP/ 短信 / 公众号 / 电话、偏好接收时段、对优惠或内容的敏感度等，用于优化触达方式与频控策略。在此基础上，可进一步形成“生命周期阶段 × 价值层级（高 / 中 / 低）× 风险等级（正常 / 预警 / 高危）”的三维分层，为后续策略提供可执行的对象边界。

（二）各生命周期阶段的典型需求与痛点

1.引入期：用户处于“了解—比较—尝试”阶段，关注点集中在可信度、成本与可见收益。痛点主要表现为信息过载、规则不清、首次使用门槛高（注册复杂、流程繁琐）、对服务响应不确定，导致首转化率低、首用后快速沉默。

2.成长期：用户完成初次转化但粘性尚未形成，需求从“能用”转向“好用、方便”。痛点集中在功能理解不足、使用路径不顺、问题解决不及时，以及运营触达与实际需求错配（频繁推促销却缺少使用指导），容易出现“低频使用—体验下降—复购延后”。

3.成熟期：用户使用稳定、贡献较高，更关注差异化权益、服务质量与持续获得感。痛点在于服务同质化（高价值用户与普通用户体验差异不明显）、权益缺乏层级与成长机制、增值推荐缺乏场景依据，导致用户对品牌的情感联结不足，出现“稳定但不增长”“易被竞品替代”等问题。

4.衰退 / 流失期：用户活跃度下降或出现明显负向行为（取消订阅、长期沉默、投诉增加）。此阶段痛点往往是问题累积后的集中爆发：价格敏感上升、服务失误未修复、触达干扰（频繁打扰）、竞品替代更具吸引力等。若企业无法及时识别流失信号并进行原因归因，挽回动作就会变成低效的“无差别优惠轰炸”。

（三）现有电营销服务的共性问题

综合实践来看，电营销服务中常见短板主要包括：

· 触达粗放：以活动为中心而非以用户为中心，缺少阶段识别与频控，导致转化不高且打扰感强。

· 指标单一：过度关注短期点击、转化等“前端指标”，忽视留存、满意度、复购与 CLV 等长期指标，造成策略短视。

· 数据与服务割裂：数据分散在不同系统，标签不统一，营销、客服、产品缺少协同，难以形成闭环优化。

· 内容与场景不匹配：推荐缺乏基于行为的触发条件，无法在关键节点提供真正有用的服务（如首用指导、故障预警、权益解释）。

综上，第三部分的核心结论是：只有在明确“用户是谁、处于哪个阶段、有什么需求与风险”的基础上，电营销精细化服务策略才能从经验驱动转向数据驱动，并在效率与体验之间取得平衡。

三、基于全生命周期管理的电营销精细化服务策略设计

基于前述生命周期特征与痛点，电营销精细化服务策略应以“用户阶段识别”为起点，以“分层资源配置”为原则，以“多渠道协同触达”为手段，并通过指标评估实现持续迭代，形成可落地的闭环体系。

（一）总体策略框架

总体上可构建“分阶段目标—分层运营—分渠道触达—闭环优化”四层框架：

· 分阶段目标：不同生命周期对应不同核心 KPI（如引入期看首转化、成长期看活跃与复购、成熟期看增购与留存、流失期看挽回率）。

· 分层运营：结合价值（CLV）与风险（流失倾向）分层，对高价值 / 高风险用户采用更强干预与专属服务，对低价值用户以自动化触达为主，控制服务成本。

· 分渠道触达：根据用户偏好与场景选择触达渠道，建立频控与触达优先级，避免重复打扰。

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

・闭环优化：以数据回流驱动策略迭代，形成规则更新、模型校准与 SOP 优化机制。

（二）分阶段精细化服务策略

1.引入期：精准获客与首用促成

・人群策略：以相似人群、意向标签、内容兴趣等识别高潜用户，避免只依赖广撒网投放。

・服务动作：简化注册 / 下单路径，设置“新手任务 / 首用指引”，用清晰权益解释与信任背书降低决策成本。

・触达要点：首触达强调价值点与低门槛试用，避免信息堆叠；对未完成首转化用户，采用短周期、低频次的提醒与答疑触达。

・目标指标：首转化率、首用完成率、7日留存、咨询转化率等。

2.成长期：教育陪伴与活跃提升

・人群策略：按使用深度（浅层 / 中层 / 深层）、关键行为完成度（是否绑定、是否完成核心操作）分群。

・服务动作：围绕关键路径设置“节点触发”服务（如首次下单后教程、异常操作提示、常见问题一键解决），并通过内容教育提升理解与使用效率。

・营销策略：以“场景化推荐”替代泛促销，例如根据浏览 / 收藏 / 咨询行为推送对应产品方案与服务保障。

・目标指标：活跃度、复购率、功能渗透率、服务响应时效、满意度等。

3.成熟期：差异化权益与价值深耕

・人群策略：结合 CLV、贡献结构与偏好，识别核心用户、增长型用户与价格敏感用户。

・服务动作：建立会员分级与成长体系（积分、等级、专属权益），对核心用户提供更快响应、更高优先级与定制化方案；对增长型用户设计交叉 / 增购路径与组合权益包。

・触达要点：减少无关促销，以“权益提醒 + 个性化推荐 + 关键时点关怀”为主，强化获得感与品牌黏性。

・目标指标：留存率、增购率、客单价提升、NPS/ 好评率、投诉率下降等。

4.衰退 / 流失期：风险预警与挽回修复

・预警机制：基于行为信号（活跃下降、取消订阅、投诉增加、长时间未访问）设定流失评分或规则触发。

・挽回策略：先“诊断原因”再“差异化干预”。对服务问题导致的流失优先修复与补偿；对价格敏感用户提供阶梯优惠或灵活套餐；对需求转移用户提供替代方案或降频维护。

・触达要点：控制打扰，强调解决问题与价值回归；对多次挽回无效用户进入冷却期或低成本维护池。

・目标指标：挽回率、流失率、修复时长、二次复购率等。

（三）关键保障机制

・数据体系：建立统一用户 ID 与标签体系（属性、行为、偏好、价值、风险），完善埋点与事件口径，确保跨渠道数据可用、可比。

・触达体系：构建“渠道矩阵 + 频控规则 + 触达优先级”，实现短信 /APP/ 公众号 / 电话等协同，避免同一用户被多线重复触达。

・组织与流程：推动营销、客服、产品协同，形成可复制的 SOP（人群定义—内容配置—投放 / 触发—效果回收—复盘迭代），并通过权限与责任边界保证执行落地。

通过上述策略设计，电营销服务能够从短期活动驱动转向长期关系经营，在控制成本的同时提升体验与用户终身价值。

四、结语

为验证基于用户全生命周期管理的电营销精细化服务策略有效性，应建立覆盖“获客—转化—留存—价值—口碑”的评估体系，并配套可持续迭代机制，避免只用短期转化指标衡量运营成效。策略运行应形成闭环：一是通过 A/B 测试或分组对照验证不同触达内容、时机与渠道组合的效果；二是建立周期复盘机制，将指标异常与用户反馈回流到标签与规则，更新分群、频控与推荐逻辑；三是将关键流程标准化为 SOP 并持续优化，确保跨部门协同可复制、可考核。本文认为，全生命周期管理为电营销精细化服务提供了“分阶段目标”和“差异化运营”的结构化路径，有助于提升转化效率、降低流失并提高 CLV。未来研究可进一步在三方面深化：其一，提升数据质量与跨渠道一致性，减少口径差异；其二，加强隐私合规与用户授权管理，平衡个性化与安全边界；其三，引入更精细的预测模型与自动化编排能力，实现更实时、更低成本的个性化服务。

参考文献

[1] 彭红 . 基于客户生命周期的客户价值分析 [J]. 经济管理 , 2005(8): 70-75.

[2] 陈明亮 . 客户生命周期模式研究 [J]. 浙江大学学报 (人文社会科学版), 2002, 32(6): 66-72.

[3] 谭跃雄 , 周娜 . 基于动态客户保持的企业客户生命周期价值模型研究 [J]. 管理科学 , 2004, 17(6): 46-50.

[4] 李为康 , 杨小兵 . 一种改进的 RFM 模型在网店客户细分中的应用 [J]. 中国计量大学学报 , 2020(1): 85-91, 134.

[5] 余力 , 吴丽花 . 客户关系管理 [M]. 北京 : 中国人民大学出版社 , 2009.

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

风电机组数据采集与监控系统异常数据识别方法研究

李忠义[1]，赵长江[1]，相童巍[1]，王乐[1]，默婧[2]
1.华能新能源股份有限公司河北分公司，河北 石家庄 050011
2.石家庄机动车排污管理中心，河北 石家庄 050000
DOI:10.61369/EPTSM.2026020010

摘　　要： 随着风电规模化发展，风电机组数据采集与监控系统采集的海量运行数据中混杂的异常数据，严重影响设备状态评估与故障预警的准确性。本文基于华能新能源股份有限公司生产实践，系统分析了风电场 SCADA 系统中异常数据的典型类型及其产生机理，重点研究了基于统计阈值、规则逻辑与机器学习的三类异常识别方法，并提出了一种分层融合的工程化应用框架。实际应用表明，该框架能够有效识别传感器故障、通信异常及设备早期劣化等多种异常模式，为提升风电场智能化运维水平提供了技术支撑。

关 键 词： 风电机组；数据采集与监控系统；异常数据识别；智能运维

Research on Abnormal Data Identification Methods for Wind Turbine Data Acquisition and Monitoring Systems

Li Zhongyi[1], Zhao Changjiang[1], Xiang Tongwei[1], Wang Le[1], Mo Jing [2]
1.Huadian New Energy Co., Ltd. Hebei Branch, Shijiazhuang, Hebei 050011
2.Shijiazhuang Motor Vehicle Emission Management Center, Shijiazhuang, Hebei 050000

Abstract: With the large-scale development of wind power, abnormal data mixed within the massive operational data collected by wind turbine data acquisition and monitoring systems severely impacts the accuracy of equipment condition assessment and fault early warning. Based on the production practices of Huaneng New Energy Co., Ltd., this paper systematically analyzes the typical types and generation mechanisms of abnormal data in wind farm SCADA systems. It focuses on three anomaly identification methods—statistical threshold-based, rule logic-based, and machine learning-based—and proposes a hierarchical fusion engineering application framework. Practical applications demonstrate that this framework can effectively identify various anomaly patterns such as sensor failures, communication anomalies, and early-stage equipment degradation, providing technical support for enhancing the intelligent operation and maintenance of wind farms.

Keywords: wind turbine; data acquisition and monitoring system; anomaly detection; intelligent operations

引言

风电机组数据采集与监控系统（SCADA）是风电场运行的“神经中枢”，持续采集机组运行状态、环境参数及发电性能等数百个测点数据。然而，在复杂运行环境及设备自身因素影响下，采集数据中不可避免地包含各类异常值。这些异常数据不仅干扰运行人员对机组状态的正常监视，更会严重影响基于数据驱动的性能分析、功率预测及故障诊断等高级应用的可靠性。如何从海量、高维、强噪声的SCADA数据流中，准确、高效地识别并剔除异常数据，已成为风电行业数字化、智能化转型过程中待解决的基础性关键问题。

本文立足于华能新能源股份有限公司多个风电场的实际运维需求与数据基础，针对工程实践中常见的异常数据类型，对当前主要的识别方法进行系统性梳理与技术经济性比较，并结合具体案例，探讨适用于规模化风电场群的、具备工程可行性的异常数据识别技术路线，以期为行业同类问题的解决提供参考。

作者简介：
李忠义，职称：助理工程师，研究方向：新能源发电集控运行；
赵长江，职称：助理工程师，研究方向：新能源发电集控运行；
相童巍，职称：助理工程师，研究方向：电力人工智能；
王乐，职称：助理级工程师，研究方向：新能源发电运行；
默婧，职称：中级工程师，研究方向：机动车污染防治。

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

一、SCADA系统异常数据类型及产生机理分析

风电机组SCADA数据异常表现形式多样，其背后关联着不同的产生机理与潜在风险。从工程实践角度，可主要归纳为以下四类：

（一）点异常

表现为单个或连续少量数据点严重偏离参数合理物理范围或历史正常波动区间。其典型产生原因包括：传感器瞬时故障或受到强电磁干扰；数据传输过程中因信号衰减或协议错误导致的突变；控制系统指令异常引发的状态骤变。例如，风速仪瞬时输出超大风速值，或发电机转矩在毫秒级时间内跳变为零。这类异常易于通过阈值判断发现，但需注意阈值设定的合理性，避免对正常启停、穿越等工况的误判。

（二）上下文异常

指数据值本身在全局统计上看未超限，但在特定运行工况下违背物理规律或控制逻辑。

功率与风速失配： 在风速持续高于额定风速（如>12m/s）的工况下，变桨系统应调节桨距角以限制功率，此时风机功率应稳定在额定功率附近。若此时功率反而随风速增加而波动或下降，可能暗示变桨系统响应迟缓、存在卡涩或传感器反馈偏差。

热力学异常： 在环境温度较低（如-10℃）且机组处于待机状态时，齿轮箱油温应与环境温度接近。若此时油温异常偏高（如>40℃），可能预示着冷却系统未关闭、内部摩擦增大或加热器粘连。

此类异常往往是设备性能下降的早期征兆，单纯依靠单点阈值无法识别，必须结合工况上下文进行分析。

（三）集体异常（模式异常）

这类异常最为隐蔽，也是智能运维的重点难点。其特征是单个参数序列可能无明显异常，但在时间维度上或多个相关参数组合所呈现的联合分布模式，偏离了历史正常机组或同类机组的标准模式。例如：

传动链早期磨损： 主轴承振动频谱中特定频率分量（如故障特征频率）的能量并未超过报警线，但呈现出缓慢上升的趋势；同时伴随着齿轮箱油温波动特征的细微改变（如温升速率加快）。这种多参数协同演化的异常模式，往往是传动链部件出现早期磨损、不对中或微点蚀的征兆。

偏航系统迟滞： 风向变化时，机舱角度的跟随存在系统性延迟，且这种延迟随时间推移逐渐增大。

集体异常通常预示着设备的早期劣化，是实现“治未病”式运维的关键切入点。

（四）系统性与通信异常

主要由数据采集硬件、网络传输链路故障引起，而非设备本体故障。其表现形式包括：

数据长时间缺失： 采集卡通道损坏或光纤链路中断，导致某一测点长时间无数据更新。

常数输出： 通信链路卡死或传感器死区，导致某一测点持续输出固定不变的值（如一直显示25.5℃），缺乏正常的波动。

大规模乱码： 网络风暴或协议转换器故障，导致大规模测点数据同时出现跳变或无效值。

这类异常直接影响SCADA系统的可用性，通常需要通过系统健康自诊断与通讯质量监测来发现，是保障数据完整性的第一道防线。

二、异常数据识别的主要方法

针对上述不同类型的异常，目前已发展出多种识别方法。在工程实践中，没有一种万能的方法，通常需要根据异常类型、实时性要求及计算资源进行综合选择。

（一）基于统计与阈值的方法

这是工程应用中最基础、最广泛的方法。其核心是根据历史正常运行数据，计算各参数在不同工况分区（如按风速、环境温度分区）内的统计特征（如均值、标准差、分位数），并结合设备制造商提供的技术允许范围，设定静态或动态报警阈值。动态阈值可根据滑动窗口内的统计量自适应调整，对工况变化具有一定的鲁棒性。该方法计算简单、实时性强，适用于快速检测明显的点异常和部分上下文异常。但其主要依赖历史经验，对未知类型的异常和复杂的模式异常识别能力有限，且阈值设置过严易导致误报，过松则导致漏报。

（二）基于规则与逻辑的方法

该方法将风机运行的物理原理、控制策略及专家经验编码为一系列判别规则。例如，“若风速大于切入风速且持续超过T1时间，发电机转速仍为零，则判定为启动失败”；“若发电机有功功率>0，而三相电流中有任一相为零或严重不平衡，则怀疑电流测量回路故障”。这类规则通常以“IF-THEN”的形式集成在SCADA系统或专家系统中。其优势在于可解释性强，运维人员易于理解和接受，能有效识别违反基本物理定律的异常。不足之处在于规则库的构建和维护高度依赖领域专业知识，难以穷举所有可能的故障模式，且对新机型、新问题的适应性较差。

（三）基于机器学习的方法

近年来，该方法成为研究热点，尤其适用于发现复杂、隐蔽的模式异常。主要包括：

无监督学习：如采用聚类算法对正常运行工况进行聚类，落在稀疏聚类簇或不属于任何簇的数据点可视为异常。主成分分析等降维方法可通过重构误差来发现偏离主体分布的数据。

有监督学习：在有大量标注好的正常与异常样本前提下，可训练分类器（如支持向量机、随机森林）进行判别。但在实际中，获取全面且准确的异常样本标签成本高昂。

时间序列预测模型：这是目前最具前景的方向之一。利用长短时记忆网络（LSTM）、门控循环单元等模型，学习关键参数历史序列的动态规律，预测其下一时刻的取值范围。当实际观测值持续偏离预测区间时，则判定为异常。此类方法能够捕捉参数间复杂的非线性时序依赖关系，对渐变性故障的早期预警表现出良好潜力。然而，其模型性能严重依赖训练数据质量与数量，且具有“黑箱”特性，预测结果的可解释性有待提升。

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

三、工程应用实践：分层融合识别框架

基于华能新能源的实践，我们认识到单一方法难以应对所有异常类型。因此，我们提出并实践了一套“三层漏斗式”分层融合识别框架，旨在兼顾实时性、准确性与工程可行性。

（一）第一层：实时阈值与逻辑校验

在SCADA数据接入流处理层即进行快速过滤。首先，应用基于设备物理极限的“硬阈值”和基于历史统计的“软阈值”，滤除明显不可能的值（如负的功率、超速转速）。同时，运行一组核心的、高置信度的物理逻辑规则（如功率－风速曲线合理性检查），快速拦截低层异常。该层目标是高效处理大部分简单的点异常和系统性异常，减轻后端处理压力。

（二）第二层：工况划分与关联规则挖掘

对通过第一层的数据，按风速、温度、机组状态等进行精细化工况划分。在每个工况箱内，利用关联规则挖掘、相关性分析等方法，建立关键参数间的常态关联模型。例如，研究特定风速段下，发电机转速与轮毂转速的固定传动比关系，叶片角度与功率的关系等。当实时数据显著偏离这些关联模型时，则发出预警。该层专注于发现上下文异常和部分集体异常。

（三）第三层：智能模型深度分析

针对核心部件（如主轴承、齿轮箱、发电机）的健康状态监测，构建基于机器学习的深度分析模型。利用LSTM等时序模型，对各部件关键温度、振动、电流等多维参数序列进行联合建模，学习其正常模式。该模型以前两层清洗后的数据作为输入，运行周期可为小时或天级别，用于捕捉那些发展缓慢、在多参数中综合体现的早期模式异常。模型的输出是部件的或异常概率健康指数。

（四）闭环反馈与优化

建立异常案例库，将现场运维人员最终确认的故障原因、处理措施与对应的原始数据关联存储。定期利用这些经过验证的案例，对阈值、规则库以及机器学习模型进行反馈优化与迭代更新，形成“数据驱动识别－现场验证－模型优化”的持续改进闭环。

四、应用案例与效果分析

在华能新能源某装机容量200MW的沿海风电场，我们部署了上述融合框架进行试点应用。

案例一：风向标结冰异常识别。 在冬季低温潮湿时段，第二层关联规则模块发现多台机组“风速－功率”曲线正常，但“风向－功率”曲线呈现异常：在风速足以发电的情况下，对风角度持续存在小而稳定的偏差。规则库结合气象数据（温度、湿度）判断为风向标潜在结冰，自动触发除冰装置激活指令并报警。事后登机检查证实了风向标轻微覆冰。该方法避免了因对风不准导致的发电量损失，平均单台机组在易结冰期挽回电量损失约1.5%。

案例二：发电机冷却风扇共性缺陷预警。 第三层LSTM模型在分析一批同型号机组的发电机数据时发现，在夏季高温时段（环境温度>30℃），发电机绕组温度预测值与实际值的残差系统性增大，且与冷却风扇电流的特定波动模式强相关。进一步对比分析该型号所有机组，确认了此共性模式。经与制造商联合排查，确认为该批次冷却风扇的散热设计余量在极端高温高湿环境下不足。基于此预警，推动了所有相关机组的预防性技改计划，将潜在的批量性发电机过热故障消除在萌芽状态。实践表明，该融合框架相比单一阈值方法，在误报率相当的情况下，对早期、复杂异常的检出率提升了约40%，有效支撑了状态检修工作的开展。

五、结论

本文结合风电场实际运维需求，探讨了风电机组SCADA系统异常数据识别的方法与实践。研究认为，异常数据具有多模态特性，需根据其产生机理与表现形式，综合运用统计阈值、规则逻辑与机器学习等多种技术。提出的“三层漏斗式”融合识别框架，体现了从快速过滤到深度分析、从单一判据到多源融合、从静态规则到动态学习的工程化设计思路，在华能新能源的实践中取得了良好效果。

参考文献

[1]华能新能源股份有限公司技术标准 . 风能发电系统智能风力发电场数据采集技术规范 (GB/T 44360-2024)

[2]李宝 . 人工智能技术在风电机组智能巡检中的应用研究 [J].应用能源技术 .2025 (09)：115-117

[3]高鹏 . 基于多线程并行的风电机组偏航滑移智能预警模型研究 [J].电力设备管理 . 2025 (20)：153-155

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

火电厂厂用电系统能效提升与节能优化技术研究

温凯强
华电忻州广宇煤电有限公司，山西 忻州 034000
DOI:10.61369/EPTSM.2026020012

摘　　要： 火电厂厂用电系统是电厂安全稳定运行的核心支撑，其能效水平直接关联能源利用效率与发电效益。为响应国家“双碳”目标、推动能源绿色转型，同时降低发电成本、提升企业效益、保障供电可靠性，开展厂用电系统能效提升与节能优化研究至关重要。研究围绕核心设备升级、运行调控优化、能源管理完善三大维度，提出高效设备改造、智能精准调控、节能监管强化等关键策略，通过技术升级与管理优化双轮驱动，有效提升系统能效，助力火电厂实现节能降耗与绿色低碳转型，为行业高质量发展提供可行路径。

关 键 词： 火电厂；厂用电系统能效提升；节能优化

Research on Energy Efficiency Improvement and Energy Saving Optimization Technology of Power Plant Plant Power Supply System

Wen Kaiqiang
Huadian Xinzhou Guangyu Coal Power Co., Ltd., Xinzhou, Shanxi 034000

Abstract: The power plant plant power supply system is the core support for the safe and stable operation of the power plant, and its energy efficiency level is directly related to the energy utilization efficiency and power generation benefits. In response to the national "dual carbon" goals and to promote the green transformation of energy, while reducing power generation costs, enhancing enterprise benefits, and ensuring power supply reliability, conducting research on energy efficiency improvement and energy saving optimization of the plant power supply system is of vital importance. The research focuses on three major dimensions: core equipment upgrading, operation control optimization, and energy management improvement. It proposes key strategies such as efficient equipment renovation, intelligent and precise control, and strengthened energy-saving supervision. Through the dual drive of technological upgrading and management optimization, the system's energy efficiency is effectively improved, helping power plants achieve energy saving and consumption reduction and green and low-carbon transformation, providing a feasible path for the high-quality development of the industry.

Keywords: power plant; energy efficiency improvement of plant power supply system; energy saving optimization

厂用电系统是火电厂安全稳定运行的关键支撑，其能效高低直接影响电厂节能降耗成效与经济效益。在“双碳”目标引领与能源绿色转型背景下，火电厂面临降本增效、低碳发展的迫切要求，开展厂用电系统能效提升与节能优化研究尤为必要。当前系统尚存设备能效不足、调控精度不够等问题，亟需通过设备升级、智能调控、管理强化等技术与管理手段，实现能效提升，为火电厂高质量低碳发展筑牢基础。

一、火电厂厂用电系统能效提升与节能优化的重要性

（一）响应国家“双碳”目标，推动能源绿色转型

随着全球气候变化问题日益严峻，我国提出“2030年前碳达峰、2060年前碳中和”的战略目标，能源行业作为碳排放的主要来源，成为低碳转型的关键领域。火电厂以煤炭等化石能源为主要燃料，是能源消耗和碳排放的重点单位，而厂用电系统的能耗在火电厂总能耗中占据相当比例。通过提升厂用电系统能效、优化节能技术，可有效降低火电厂的能源消耗和碳排放强度，推动火电厂向绿色低碳方向转型，为国家“双碳”目标的实现提供有力支撑。

（二）降低发电成本，提升企业经济效益

在电力市场竞争日益激烈的背景下，火电厂的盈利空间受到电价、燃料成本等多重因素的挤压，降低生产成本成为提升企业竞争力的关键。厂用电消耗直接影响火电厂的供电煤耗和发电成

作者简介：温凯强（1990.12-），男，汉族，山西省忻州市人，大学本科，运行部副主任。

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

本，厂用电率每降低1个百分点，可显著降低单位发电量的燃料消耗和费用支出。通过能效提升与节能优化，火电厂可有效减少厂用电消耗，降低发电成本，提升企业的经济效益和市场竞争力。

（三）保障系统稳定运行，提升供电可靠性

厂用电系统是火电厂正常运行的“生命线”，为锅炉、汽轮机、发电机等核心设备的辅助系统提供电力支持，其运行稳定性直接关系到火电厂的安全生产和供电可靠性。能效提升与节能优化过程中，通过对厂用电系统的设备升级、控制优化等措施，可改善系统运行工况，减少设备故障发生率，提升系统运行的稳定性和可靠性，保障火电厂持续稳定供电，避免因厂用电系统故障导致的停电事故，减少经济损失。

二、火电厂厂用电系统能效提升与节能优化策略

（一）升级改造高效设备，提升核心设备能效

针对锅炉控制系统设备能效偏低、老化严重这一核心问题，加大设备升级改造力度、全面推广高效节能设备是提升系统能效的基础举措，也是从源头破解能源浪费难题的关键路径。锅炉控制系统中的给水泵、引风机、送风机等设备作为主要能耗终端，其运行效率直接决定了系统整体能耗水平，而传统低效率定速设备长期存在的运行短板，已成为制约能效提升的重要瓶颈，因此这类设备的升级改造需优先推进。在具体改造过程中，应摒弃传统的低效率定速泵、风机，全面替换为符合国家一级能效标准的高效节能型设备，同时配套加装变频调速技术（VFD）形成“设备升级+智能调控”的组合方案。变频调速技术可通过实时感知锅炉负荷变化，动态调节电机转速，实现泵、风机流量和压力的精准匹配，从根本上解决低负荷工况下“大马拉小车”的能源浪费现象。以锅炉核心辅助设备给水泵、引风机为例，这类设备传统运行模式下，无论锅炉负荷高低均维持额定转速运行，通过挡板、阀门节流调节流量，能量损耗高达30%–40%；采用变频调速改造后，可根据锅炉实时负荷、炉膛压力等关键参数自动调整转速，在低负荷工况下能显著降低电机功率消耗，经实际工程验证，此类设备改造后的节能率可达20%–30%，单台大型水泵或风机每年可节约电量数十万千瓦时，节能效益十分显著[1]。

在锅炉控制系统配套变压器升级改造方面，需重点针对运行年限较长、损耗较大的老旧变压器实施替换更新。传统老旧变压器的空载损耗和负载损耗普遍较高，部分服役超20年的变压器，其损耗值较现行能效标准高出50%以上，不仅造成大量电能浪费，还存在绝缘老化、局部过热等安全隐患，严重威胁锅炉控制系统稳定运行。因此，应优先选用S11及以上系列的高效节能变压器，这类变压器采用新型铁芯材料和优化绕组结构设计，空载损耗可降低30%以上，负载损耗降低20%左右，能在全负荷区间保持高效运行状态。同时，对于新建锅炉机组或新增负荷对应的变压器选型，需严格遵循“能效优先、适度超前”的原则，坚决杜绝选用低能效设备，从源头把控设备能效水平。

（二）优化运行控制策略，实现智能精准调控

在锅炉控制系统设备升级改造的基础上，优化运行控制策略、实现智能精准调控是进一步挖掘节能潜力、提升系统整体能效的关键环节。传统锅炉控制系统手动控制或简单自动控制模式，存在响应滞后、调节粗糙、协同性差等固有缺陷，难以适配锅炉负荷频繁波动的运行工况，导致设备长期偏离最佳能效区间运行，能源浪费问题突出。随着工业自动化与信息技术的深度融合，依托先进技术手段重构运行控制体系，推动控制模式从“被动调节”向“主动预判、精准调控”转型，已成为火电厂锅炉控制系统节能优化的必然趋势。

构建全维度锅炉控制系统智能监控平台是实现精准调控的基础支撑。该平台需打破锅炉各子系统的数据壁垒，整合给水泵、引风机、送风机、燃烧器、配套变压器等核心设备的运行参数，以及锅炉负荷、炉膛压力、烟气含氧量、燃料供给量、环境温度等关联数据，通过工业互联网协议实现数据的实时采集、传输与存储。在此基础上，引入大数据分析、人工智能算法等技术，对海量运行数据进行深度挖掘与智能诊断，不仅能实时监测设备运行状态、精准识别能效异常点，还能结合历史数据与负荷预测模型，提前预判工况变化趋势，为控制策略优化提供科学依据[2]。例如，通过对引风机、送风机电流、出口压力与锅炉负荷的关联性分析，可精准定位挡板节流调节导致的能耗冗余问题，为后续调控优化提供数据支撑。实施锅炉各子系统协同控制与动态优化是提升调控效能的核心举措。锅炉控制系统各子系统并非孤立运行，而是相互关联、相互影响，单一设备的局部优化难以实现系统整体能效最优。因此，需采用先进的模型预测控制、模糊控制等智能算法，构建多变量协同控制体系，实现各子系统的联动调节。以锅炉核心燃烧系统为例，将引风机、送风机的运行参数与炉膛压力、烟气含氧量、燃料供给量、燃烧器工况等参数进行耦合联动，根据燃烧工况动态调整风机风量和燃料供给配比，既能保证炉膛压力稳定、提升燃烧充分性，又能避免风量过大或过小、燃料供给失衡导致的能耗增加，较传统挡板节流调节方式可降低风机能耗15%–25%。针对锅炉给水系统与冷却系统，结合锅炉负荷、蒸汽参数、炉膛温度、冷却水温度等参数构建优化模型，动态调整给水泵转速、冷却风机运行状态及冷却水流量，实现给水保障、冷却效果与能耗消耗的最佳平衡。同时，全面推广应用集散控制系统（DCS）、可编程逻辑控制器（PLC）等先进控制设备，替代传统控制装置，提升锅炉控制系统的响应速度与调节精度[3]。DCS系统可实现对锅炉全系统的集中监控与分散控制，确保控制指令的快速下达与稳定执行；PLC则凭借高可靠性与灵活编程特性，适配各子系统的个性化控制需求，实现对单个设备或局部系统的精准调节。通过“智能监控平台+协同控制算法+先进控制设备”的三位一体架构，可彻底改变传统控制模式的弊端，确保锅炉控制系统在不同负荷工况下均能保持各设备、各系统的协同高效运行，始终处于最佳能效区间，进一步放大节能改造效益。

（三）完善能源管理体系，强化节能监管力度

完善能源管理体系、强化节能监管力度是火电厂锅炉控制系统能效提升与节能优化工作长效推进的制度保障，更是将技术改造与控制优化成果转化为持续节能效益的关键支撑。若缺乏科学完善的

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

管理体系与严格有效的监管机制，即便完成了锅炉控制系统设备升级与控制策略优化，也可能因运行管理不当、责任落实不到位等问题导致节能效果大打折扣，甚至出现能源浪费反弹现象。因此，必须从制度设计、流程规范、责任落实等多维度构建全链条能源管理体系，形成“监测－分析－优化－考核－提升”的闭环管理模式，为锅炉控制系统节能优化工作提供全方位保障[5]。

构建全流程锅炉能耗监测网络是完善能源管理体系的基础前提。针对当前部分火电厂锅炉能耗监测覆盖不全、数据精度不足的问题，需全面升级改造锅炉能耗监测系统，实现对锅炉控制系统各环节能耗数据的精准、实时掌控。在锅炉配套变压器、给水泵、引风机、送风机等核心能耗设备的进出口，以及锅炉配电线路关键节点，统一安装符合国家计量标准的高精度能耗监测仪表，同时配备数据采集终端与传输模块，通过工业以太网与能源管理平台实现数据互联互通。在此基础上，建立能耗数据标准化处理流程，对采集的电压、电流、功率、能耗等数据进行实时校验、筛选与整合，生成多维度能耗分析报表，不仅能为能源管理团队提供全面、准确的锅炉能耗基础数据，还能实现对能耗异常的实时预警，为及时排查锅炉控制系统节能问题、精准制定优化方案提供数据支撑。组建专业能源管理团队是提升锅炉能源管理水平的核心支撑。锅炉能源管理工作兼具专业性与系统性，需配备具备锅炉系统运行、能源计量分析、节能技术应用等多领域知识的专业人才。团队核心职责包括深入分析锅炉能耗监测数据，精准挖掘锅炉控制系统各环节节能潜力，结合电厂实际运行工况制定个性化、可落地的节能优化方案；同时负责锅炉节能改造项目的实施监管、效果评估与持续优化，跟踪节能措施的落实情况，及时发现并解决实施过程中出现的问题。此外，团队还需承担能源管理体系的日常维护与更新工作，根据国家节能政策导向、行业技术发展趋势以及电厂锅炉生产运行变化，动态优化管理流程与技术标准，确保能源管理体系始终保持科学性与适用性。健全节能考核与激励机制是激发全员节能积极性的关键举措。将锅炉控制系统节能指标细化分解至各生产部门、班组乃至个人，纳入绩效考核体系，形成“层层有目标、人人有责任”的节能责任体系。考核指标应兼顾定量与定性，不仅包括锅炉辅机电耗率、单位蒸汽能耗等核心量化指标，还涵盖节能措施落实质量、能耗异常处理及时性等定性指标。同时，建立差异化奖惩机制，对超额完成节能目标、提出有效锅炉节能建议的部门与个人给予物质奖励与荣誉表彰；对未完成节能目标、存在能源浪费行为的予以考核问责，通过正向激励与反向约束相结合，彻底扭转员工节能意识淡薄的现状[4]。

三、结语

火电厂厂用电系统能效提升与节能优化是响应“双碳”目标、推动能源绿色转型的必然要求，既是降低发电成本、提升企业效益的关键路径，也是保障系统稳定、提高供电可靠性的重要举措。立足设备升级、运行调控、管理完善三大核心策略，通过高效设备改造、智能精准调控与全流程节能监管的协同落地，可切实提升系统能效。未来需持续深化技术融合与管理创新，为火电厂节能降耗、低碳高质量发展提供长效支撑，助力能源行业绿色转型。

参考文献

[1]陶章伟 .燃气电厂智能控制系统的能效分析与提升 [J].电子元器件与信息技术 ,2025,9(01):62-64.

[2]唐永强 .水泥余热发电的综合能效提升技术 [J].科学技术创新 ,2020,(12):49-50.

[3]持续提升发电设备安全可靠性实现设备综合管理水平再上新台阶 [J].电力设备管理 ,2019,(03):57-60.

[4]张娜 .创新技术推广体系建设优化节能环保产业供给 [J].中国经贸导刊 ,2018,(18):22-24.

[5]贾雄 .PLC在火电厂输煤翻车机电控系统改造中的应用 [J].能源与节能 ,2021,(10):205-206.

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

井下高压配电装置继电保护整定研究

雷广
江西铜业股份有限公司武山铜矿，江西 九江 332000
DOI:10.61369/EPTSM.2026020013

摘　　要： 矿山井下高湿、高尘、空间狭小的特殊环境，造成高压配电装置容易受到故障冲击，继电保护整定值不合理容易造成越级跳闸、设备损坏等安全事故。本文基于《煤矿安全规程》以及电力保护设计规范，结合井下供电系统结构特点，对继电保护整定的基本原则和技术措施进行研究。明确分级整定逻辑、优化参数适配机制，解决传统整定灵敏性差、动作不协调的问题，建立差异化的整定体系，准确切除故障、保护非故障区供电的稳定，为井下高压配电系统安全、可靠运行提供技术支持。

关 键 词： 井下；高压配电装置；继电保护整定

Research on Relay Protection Setting of Underground High Voltage Distribution Device

Lei Guang
Jiangxi Copper Co., Ltd. Wushan Copper Mine, Jiujiang, Jiangxi 332000

Abstract: The unique underground mining environment—characterized by high humidity, dust, and confined spaces—exposes high-voltage distribution equipment to frequent faults. Improper relay protection settings may trigger over-level tripping and equipment damage. This study investigates fundamental principles and technical measures for relay protection configuration, based on the Coal Mine Safety Regulations and power protection design standards, while considering the structural features of underground power systems. By clarifying hierarchical setting logic and optimizing parameter adaptation mechanisms, it addresses the limitations of traditional settings (e.g., poor sensitivity and uncoordinated actions). A differentiated setting system is established to ensure accurate fault isolation and stable power supply to non-fault zones, thereby providing technical support for the safe and reliable operation of underground high-voltage distribution systems.

Keywords: underground; high-voltage distribution device; relay protection setting

引言

井下高压配电装置是矿山供电系统的中枢神经，其担负着采掘、通风、排水等重要设备的电力输送和分配工作，继电保护整定则是保证装置发生故障时能够正确响应的技术。矿山井下高压供电系统的保护措施包括过流、漏电、接地和高压欠压保护。过流保护通过配置过载与短路保护装置，迅速切断异常电流；漏电保护监测绝缘子状态，预防高温导致绝缘性能下降；接地保护通过连接接地系统，防止设备外壳损坏；高压欠压保护实时监测电压变化，异常时启用保护装置。合理的整定方案能够防止故障扩大，整定偏差容易造成保护误动、拒动，危及生产安全。只有根据井下工况特点来优化整定逻辑，才能筑起供电安全防线，为矿山高效生产提供基础保障。

一、井下高压配电装置继电保护整定原则

（一）合规性与标准适配原则

继电保护整定应以现行的行业规范和技术标准为根本遵循，保证整定方案的合法性和科学性。核心依据涵盖《煤矿安全规程》2025版第四百八十七条、第四百八十八条规定，井下高压控制设备应具有短路、过负荷、接地、欠压释放保护功能，需要使用最大三相短路电流校验设备的分断能力，利用最小两相短路电流校验保护动作的可靠性，同时还要符合《电力装置的继电保护和自动装置设计规范》中关于灵敏系数、动作时限的规定[1]。整定过程需要严格对标规范的阈值，例如高压电网单相接地电容电流的控制、保护装置动作时限的级差等参数，防止由于偏离标准

作者简介：雷广（1998-），男，湖南常宁人，汉族，职称：电气助理工程师，学历：学士，研究方向：电气工程及其自动化。

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

而造成保护失效。

（二）层级协同与选择性原则

选择性原则的核心是实现上下级保护装置动作的协调，准确确定保护范围，防止越级跳闸造成大面积停电[2]。整定要确定各级装置的动作范围，上级保护和下级保护的动作范围无重叠冗余，故障发生时只切断故障元件所在的回路，保证非故障区域能正常供电。对高压馈电线、移动变电站、电动机等不同的设备要按回路分层划分保护任务，经由改变动作电流和时限参数来形成梯度配合。主干线保护和分支线保护要设定合理的时限差，分支线故障时下级装置先动作，上级装置只起后备保障作用，使故障影响范围最小化，提高供电系统稳定性[3]。

（三）工况适配与动态平衡原则

井下供电系统的工作环境千变万化，负荷变化、设备开关、电网结构调整等因素都会对保护效果造成影响，整定时保证参数与工况动态对应。最大运行方式下要校验设备的分断能力和速断保护参数，最小运行方式下主要保证保护装置的灵敏系数，使设备在不同的运行工况下均能可靠动作。还要平衡速度和可靠性，在发生短路故障的时候要迅速切断电源减少设备损坏，而在正常工作的时候要避免误动[4]。对风机、水泵等重要设备，应根据其启动电流特性及过载耐受能力来调节整定参数满足设备运行要求，保证保护的有效性，实现工况适配与保护性能的动态平衡。

二、井下高压配电装置继电保护整定措施

（一）过流保护分级整定措施

过流保护是井下高压配电装置的重要保护方式，基于故障严重程度分等级整定，构成主备配合的保护系统。一级瞬时速断保护主要针对严重短路故障，其整定核心就是快速响应故障并切断电源，动作电流需要根据最大运行方式下的保护安装处三相短路电流来确定，通过可靠系数修正来避免误动，可靠系数根据线路类型来定，电缆线路取1.2~1.3，对应6kV电缆线路常见的最大三相短路电流可达12kA ~ 15kA；二级限时速断保护是用来补充一级保护的盲区，覆盖一级保护不到的短路故障，其动作电流要考虑被保护设备启动电流与其他设备额定电流之和，如单台400kW高压电动机启动电流可达3kA ~ 4kA，动作时限按照下级一级保护时限加0.3 ~ 0.5s级差来定，保证选择性动作[5]；三级定时限过流保护是对过载和轻微短路故障的保护，整定时需要考虑自启动系数和返回系数，根据负荷特性确定动作电流和时限，一般按设备额定电流的1.1倍~ 1.2倍来设定基准值，可以保证对轻微故障的正确识别和切除，又不会造成设备正常启动时的误动。

（二）漏电保护精准整定措施

井下高温高湿的恶劣环境容易使绝缘子老化受潮，造成绝缘性能下降而产生漏电故障，精准漏电保护整定是防范这种风险的主要办法[6]。相比其他保护类型，漏电保护不仅要考虑绝缘状态的预判，还要考虑故障的快速响应，整定逻辑要符合高压电网电容电流特性及绝缘劣化规律。按照行业安全标准，人体触电电流与作用时间的乘积安全阈值为30mA ·s，以此为依据设定动作电流和动作时限，摒弃统一的阈值设定方式，根据6kV及以上高压电网运行要求，将生产矿井和新建矿井的单相接地电容电流分类管控，分别控制在20A和10A以内，对应660V供电系统总的绝缘电阻危险值定为11000欧，以此为基准标定漏电动作电流临界值，实现漏电隐患的早期触发与处置[7]。为了适应不同的供电回路电容电流差异化的分布，可通过改进零序电流互感器的测量精度来弥补由于线路长度、负荷分布不同所造成的测量误差，消除保护盲区。同时将漏电闭锁功能和整定参数融合起来，创建起“预警→切断”双重防护体系，在精准校验各个位置漏电故障灵敏性的基础上，有效遏制漏电引发的火灾、触电事故，保证供电系统绝缘安全。

（三）接地保护协同整定措施

接地保护的核心价值在于依靠系统协同防控，杜绝由于设备外壳带电而引发的安全事故，接地保护的整定工作不能孤立地设定参数，必须和接地系统可靠性构建形成联动闭环。接地保护作为保护体系的重要兜底环节，需要以接地系统合规性校验为前置条件，保证井下高压设备外壳通过专用接地干线可靠连接，接地电阻符合行业规范，其中高压设备接地电阻小于2欧，移动变电站接地电阻小于4欧，为后续参数整定提供基础保障。针对移动变电站、电动机等不同的供电对象，采用分类整定的方法，对向其供电的高压馈电线重点配置选择性单相接地跳闸保护，精确确定保护范围，实现接地故障时只切断故障回路，保证整体供电的稳定性。整定时考虑接地电流幅值对动作时限的影响，单相接地故障电流大于5A时缩短动作时限，通过时序参数优化实现与过流保护、漏电保护的配合，防止多重保护动作冲突[8]。考虑多台设备并联运行时接地电流叠加效应的影响，对参数进行修正以防止误动，围绕移动变电站流动性特点，对保护参数进行优化，保证设备在移动过程中保护性能的稳定，实现接地故障的全场景精准防控。

（四）欠压保护自适应整定措施

电压波动是井下高压配电系统运行中经常出现的问题，瞬时跌落、持续欠压都会造成设备损坏、生产中断，欠压保护的自适应整定就是解决这一问题的关键技术手段。自适应整定和固定参数整定模式不同之处在于前者利用电压实时监测数据，根据电网运行状态和设备工作需求变化而变化，达到保护精度与运行稳定性的平衡。动作电压阈值的设定不能只用单一的比例来衡量，应该根据井下设备额定电压的耐受范围来确定，6kV系统设备正常工作电压波动范围为5.7kV到6.3kV，低于5.4kV时要触发保护动作，考虑不同设备的电压适应性不同，有针对性地调整阈值参数，不会因为电网瞬时波动而造成误动作，能够及时切断电源，防止设备烧毁。对通风、排水等主要的生产设备要打破常规时限设定逻辑，采用短延时动作方式，延时设置为0.2s ~ 0.3s，在避免不必要停机的同时，严格防止由于长期欠压造成设备不可逆的损伤[9]。根据电网负荷变化所造成电压的变化，动态调整保护参数，建立电压和电流异常综合防护体系，消除欠压保护和过流保护之间的矛盾，保证设备在复杂的电压环境之下可以正常工作。

（五）整定值校验与优化措施

继电保护整定的科学性、有效性，最终需要依靠全流程校验

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

和动态优化来实现，这是对整定方案的检验，也是适应工况变化、提高保护性能的关键手段。不同于单故障校验机制的是，全周期校验机制应该覆盖到整定前准备、整定中测试、整定后运维这三个重要时期，从而形成一个闭环式管理。整定前期要进行准确的短路电流计算，确定最大和最小运行方式下的电流参数，6kV电网最小两相短路电流一般不低于3kA，还要进行设备动热稳定性校验，保证整定参数与设备性能精确匹配，为方案设计提供数据支持[10]。整定过程中根据不同故障类型做多场景的模拟试验，主要针对最小运行方式下末端故障的响应能力，严格控制1.3到1.5的灵敏系数规范要求，使用CDEGS仿真软件和8000S测试系统联动校验，全面校验保护装置的准确性、灵敏性、选择性。整定完毕之后，还要围绕井下实际运行数据实施持续优化，经由剖析保护装置动作记录来判定参数同工况的契合程度，对频繁出现误动、拒动情况下的参数展开针对性调整。建立定期校验制度，每月复核一次动作值、每季度对整定范围内的动作时间做全量程测试，及时纠正参数漂移，根据电网结构调整、设备更新等变化情况，对整定方案做动态迭代整定，使继电保护系统始终保持最佳的运行状态。

三、结论

社会的飞速发展对煤炭的需求量越来越大，因此保证井下煤炭开采连续性，确保矿山井下高压供电系统的安全性、可靠性非常关键。井下高压配电装置继电保护整定要依据工况特点和行业规范，合理设置整定原则，优化差异化的整定措施来达到对各种故障进行精确控制的目的。合理整定方案可以提高保护系统的选择性、灵敏性、可靠性，防止越级跳闸、设备损坏等风险。以合规性、协同性、适配性为依据建立的整定体系，为井下高压配电装置的安全运行提供核心支撑，保障矿山生产的连续性、安全性。

参考文献

[1]李志乾 .煤矿井下低压供电系统漏电保护研究 [J].能源与节能 ,2025,(02):33-35+39.
[2]王传会 .煤矿井下成套智能高压真空配电装置研究与应用 [J].矿山现代化 ,2024,33(04):96-100.
[3]姜明学 .煤矿井下供电系统漏电保护配置问题及对策 [J].能源科技 ,2024,22(03):32-35.
[4]姚智翔 , 尚春民 , 俞嘉栋 , 等 .应用于井下安全阀试验的高压气源控制系统设计 [J].液压气动与密封 ,2024,44(04):93-100.
[5]王二强 .井下开采中高压供电控制中心的应用 [J].矿业装备 ,2023,(11):80-81.
[6]李蔷薇 .煤矿井下低压供电系统漏电保护探讨 [J].矿业装备 ,2023,(10):102-104.
[7]辛磊 .云岗矿井下高压供电网络绝缘监测研究 [J].山东煤炭科技 ,2023,41(09):169-172.
[8]张敏 .煤矿井下高压电缆故障监测与预防 [J].矿业装备 ,2023,(09):105-107.
[9]闫秀军 .煤矿井下高压供电保护整定分析及应用 [J].当代化工研究 ,2022,(21):177-179.
[10]庞伟 .煤矿井下高压供电系统故障安全作业流程分析 [J].能源与节能 ,2022,(04):185-187.

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

基于压力变送器的锅炉给水系统前馈——反馈复合控制优化

叶虎

国家电力投资集团贵州金元股份有限公司纳雍发电总厂，贵州 纳雍 553303

DOI:10.61369/EPTSM.2026020015

摘　　要： 锅炉给水系统是工业锅炉运行的辅助系统，控制精度的好坏直接影响锅炉运行效率、安全性和经济性。目前传统的反馈控制方式对于给水压力波动、负荷突变等扰动的响应存在滞后性，造成水位控制精度不够。本文提出基于压力变送器的前馈、反馈复合控制方案，用压力变送器实时采集给水管道压力、汽包压力等关键参数，建立前馈控制通道提前补偿扰动影响，采用反馈控制修正控制偏差。希望进一步提高控制响应速度，给锅炉稳定高效运行提供可靠的保证。

关 键 词： 压力变送器；锅炉给水系统；前馈－反馈复合；控制优化策略

Optimization of Feedforward — Feedback Composite Control of Boiler Feedwater System Based on Pressure Transmitter

Ye Hu

Guizhou Jinyuan Co., Ltd. Nayong Power Plant, Nayong , Guizhou 553303

Abstract: The boiler feedwater system serves as a critical auxiliary system for industrial boilers, where control precision directly impacts operational efficiency, safety, and economic performance. Conventional feedback control methods exhibit inherent delays in responding to disturbances such as feedwater pressure fluctuations and load variations, resulting in suboptimal water level control accuracy. This study proposes a hybrid feedforward–feedback control scheme utilizing pressure transmitters. By real–time monitoring of key parameters including feedwater pipeline pressure and steam drum pressure, the system establishes a feedforward control channel to preemptively compensate for disturbances, while employing feedback control to correct deviations. This approach aims to enhance control responsiveness, thereby ensuring stable and efficient boiler operation.

Keywords: pressure transmitter; boiler feedwater system; feedforward–feedback composite; control optimization strategy

工业锅炉被广泛地应用在电力、化工、冶金等国民经济的重要领域，工业锅炉运行是否稳定，直接影响到生产过程能否连续、安全地进行。给水系统是锅炉的“血液输送系统”，负责给锅炉提供符合要求的水质、水量，控制质量好坏直接影响锅炉汽包水位的稳定。传统的锅炉给水控制大多采用单回路反馈控制，该种方式虽然结构简单、容易实现，但是由于受到给水压力波动、蒸汽负荷突变、燃料量变化等多种扰动因素的影响，存在明显的控制滞后，容易造成汽包水位大幅波动，严重时还会引发满水、缺水等安全事故。压力变送器属于精准采集压力参数的关键传感设备，可以随时获取给水系统扰动信号。因此本文提出了前馈和反馈复合控制方法，用压力变送器来实时采集数据来建立前馈补偿环节，利用反馈控制的偏差修正功能，实现对锅炉给水系统的精确控制，对提高锅炉运行的安全性和经济性有很重要的现实意义。

一、锅炉给水系统及控制技术概述

（一）锅炉给水系统的组成与工作原理

锅炉给水系统是保证锅炉正常工作的辅助系统，主要由给水泵、给水管道、阀门、汽包、省煤器、各种检测和控制装置等组成。其核心工作原理就是将经过处理的软化水，经给水泵提高压力后，送至汽包通过省煤器预热，然后送入锅炉进行燃烧反应，同时保证汽包水位在设定的范围内。给水系统在运行过程中要根据锅炉蒸汽负荷的变化来调节给水量，保证汽包水位稳定，防止水位过高造成蒸汽品质下降，或者水位过低造成锅炉受热面干烧损坏。其中给水泵是给水系统动力中心，提供足够的给水压力；阀门用来调节给水量和水流方向；省煤器利用锅炉尾部烟气余热

作者简介：叶虎（1996.04-），男，彝族，贵州省水城县人，本科，助理工程师，研究方向：热控自动装置。

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

预热给水，提高能源利用率；检测设备实时采集水位、压力、流量等参数，给控制决策提供数据支撑[1]。

（二）传统锅炉给水控制技术的类型与特点

传统的锅炉给水控制技术主要有单回路反馈控制、双冲量控制、三冲量控制这三种。单回路反馈控制只以汽包水位为唯一控制变量，依靠检测水位偏差来调节给水泵转速或者给水阀门开度，结构简单、成本低廉、调试方便，但是控制精度低，对于负荷变化、压力波动等扰动的适应性差，只适合于小型低参数锅炉。双冲量控制是在单回路控制的基础上，增加了蒸汽流量作为辅助控制变量，利用蒸汽流量的变化来预测给水量的需求，一定程度上补偿了负荷扰动的影响，控制性能比单回路控制有所提高，但是没有考虑给水压力波动对控制效果的影响。三冲量控制则同时引入汽包水位、蒸汽流量和给水流量三个控制变量，通过综合分析三个变量的偏差来实现控制调节，进一步提高控制精度和抗扰动能力，但该方式仍然属于反馈控制，对扰动的响应存在滞后，并且控制算法相对复杂，参数整定难度较大[2]。

（三）前馈－反馈复合控制的基本原理

前馈和反馈复合控制就是将前馈控制和反馈控制结合起来的控制策略，既具有前馈控制提前补偿扰动的特点，又具有反馈控制修正误差的能力。基本原理就是前馈环节实时检测影响控制对象的主要扰动因素，根据扰动信号和控制对象的数学模型，提前计算出补偿控制量，作用于执行机构，提前抑制扰动，反馈环节检测控制对象的输出参数（汽包水位），计算输出参数与设定值的偏差，利用反馈控制算法对偏差进行修正，提高控制效果[3]。与单一的前馈控制或者反馈控制相比，复合控制可以有效地解决前馈控制对数学模型的依赖性大、不能完全补偿所有扰动的问题，也可以弥补反馈控制对扰动响应滞后的缺陷。在锅炉给水系统中加入压力变送器采集给水压力、汽包压力等扰动信号作为前馈输入，结合汽包水位的反馈偏差进行复合控制，可以明显提高系统的抗扰动能力和控制精度。

二、基于压力变送器的前馈－反馈复合控制优化意义

（一）提升锅炉给水控制精度，保障汽包水位稳定

汽包水位是锅炉运行中最重要的一个控制参数，其控制精度决定着锅炉的运行是否稳定，蒸汽品质的好坏。传统的反馈控制由于对扰动响应滞后，在给水压力波动、负荷突变的时候，容易造成汽包水位出现超调或者振荡，不能快速恢复到设定值。基于压力变送器的前馈、反馈复合控制可以实现实时检测给水压力的变化等扰动信号，在之前做出前馈补偿，依靠反馈环节纠正水位偏差，大大提高了控制精度。该优化方案可以保证汽包水位始终在设定的范围内，避免由于水位波动造成的蒸汽带水、受热面干烧等问题，保证锅炉输出蒸汽的质量满足生产的要求，为后续生产流程的稳定运行打下基础。

（二）增强系统抗扰动能力，适应复杂运行工况

工业锅炉运行工况复杂多变，受蒸汽负荷变化、燃料量调整、给水压力波动、管网压力变化等多种扰动因素的影响，传统的控制方式很难快速适应工况的变化，容易造成控制系统失稳。压力变送器具有快速响应的特点，可以实时采集各种扰动有关压力参数，给前馈控制提供及时、准确的扰动信号。根据这些信号构建的前馈补偿环节，可以在扰动对汽包水位产生影响之前，提前调整给水量来抑制扰动的传播；反馈环节可以对没有被前馈补偿的残余扰动引起的水位偏差进行修正。系统依靠前馈和反馈的作用提高了它对于扰动的适应性，在复杂的工况中可以稳定运行，降低由于工况变化所造成的控制失效的风险[4]。

（三）降低能源消耗，提升锅炉运行经济性

锅炉给水系统运行能耗在锅炉总能耗中所占比例较大，传统控制方式由于控制精度不够，容易造成给水泵过度运行或者运行不足。给水量过大时，会增加给水泵的电耗，多余的给水通过排污管道排出，造成水资源和热能的浪费；给水量不足时，会使锅炉燃烧效率降低，增加燃料消耗。根据压力变送器的前馈、反馈复合控制可以实现给水量的精准调节，按照锅炉实际负荷和扰动情况来实时调节给水泵转速或者阀门开度，使给水量与蒸汽产出量精确匹配。不仅可以降低给水泵的电耗，减少水资源和热能的浪费，还可以提高锅炉燃烧效率，减少燃料消耗，大幅度提高锅炉运行的经济性，为企业降低生产成本。

（四）保障锅炉运行安全，降低故障发生概率

锅炉属于承压类特种设备，其运行安全非常重要。汽包水位的大幅波动是造成锅炉安全事故的主要原因之一，水位过高时会造成蒸汽带水，使蒸汽管道发生水击，损坏阀门和管道；水位过低会使锅炉受热面失去水的冷却，导致管壁过热、鼓包甚至爆管，造成严重的安全事故。根据压力变送器的前馈－反馈复合控制可以有效抑制汽包水位受各种干扰的影响，保证水位在安全范围之内。同时压力变送器可以对给水压力、汽包压力等进行实时监测，当出现异常时及时反馈给控制系统，触发报警或者紧急停机，防止事故扩大。可以减少给水系统中阀门、泵等设备频繁开关、过度调节，减少设备磨损和故障率，延长设备使用寿命，保证锅炉系统安全、稳定运行。

三、基于压力变送器的前馈－反馈复合控制优化策略

（一）复合控制结构设计与压力变送器选型配置

复合控制结构设计是实现优化控制的前提，要根据锅炉给水系统的特性来搭建合理的控制框架。本文所设计的前馈与反馈复合控制结构包括前馈控制模块、反馈控制模块、控制决策模块以及执行机构这四个部分。前馈控制模块用压力变送器采集的给水压力、汽包压力信号为输入，建立扰动与给水量的数学模型，得到前馈补偿量；反馈控制模块用汽包水位为输入，通过PID算法得到反馈控制量；控制决策模块对前馈补偿量和反馈控制量进行加权融合，得到最终控制指令；执行机构通过调节给水泵转速或者给水阀门开度来实现给水量的控制。压力变送器选型要满足系统测量精度和环境适应性要求，给水压力测量选用0-10MPa量程、精度等级0.1级的扩散硅压力变送器，汽包压力测量选用0-25MPa量程、精度等级0.1级的耐高温压力变送器。安装位置

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

上，给水压力变送器安装在给水泵出口管道上，汽包压力变送器安装在汽包顶部，保证采集信号的真实性、及时性。

（二）前馈控制通道的构建与参数整定

前馈控制通道的核心就是建立扰动信号与前馈补偿量之间的映射关系，需要机理分析和实验建模相结合的方式来确定数学模型。首先，分析给水压力波动、汽包压力变化对给水量和汽包水位的影响机理，初步建立线性化数学模型；然后，通过现场实验，采集不同的扰动工况下压力信号和对应的最优给水量调整数据，用最小二乘法对模型参数进行辨识和优化，得到准确的前馈模型。参数整定，前馈控制的重要参数有比例系数和滞后时间，采用试凑法进行整定，先固定滞后时间为压力变送器的响应时间，调节比例系数，使扰动发生时汽包水位的波动幅度最小，再微调滞后时间，进一步改善前馈补偿效果。参数整定保证前馈控制模块对扰动信号做出快速准确的响应，提前补偿扰动的影响。

（三）反馈控制算法的改进与优化

反馈控制模块使用改进的 PID 算法来解决传统 PID 算法在非线性、大滞后系统中控制精度低、容易超调的问题。本文使用模糊 PID 算法，利用模糊控制器根据汽包水位偏差和偏差变化率来实时调节 PID 控制器的比例系数、积分系数、微分系数。模糊控制器设计包括模糊化、模糊推理和清晰化三个过程，水位偏差 e 和偏差变化率 ec 被划分成负大、负中、负小、零、正小、正中、正大这七个模糊等级，建立模糊规则库，根据工程经验确定不同的 e 和 ec 组合下 PID 参数的调整策略，采用重心法将模糊推理结果清晰化，得到实时调整后的 PID 参数。利用模糊 PID 算法改进反馈控制模块，使反馈控制模块根据系统运行状态来调节控制参数，提高水位偏差修正的准确性，提高系统的鲁棒性 [5]。

（四）复合控制的协同协调机制与稳定性验证

复合控制的协同协调机制，即怎样才能保证前馈和反馈控制的有效配合，必须建立合理的控制量融合策略以及切换机制。控制量融合采用加权系数法，扰动信号强度和水位偏差大小来调节前馈补偿量和反馈控制量的权重，扰动信号较强（压力变化幅度超过设定阈值）时增大前馈补偿量的权重，突出前馈控制的扰动抑制作用，水位偏差较大时增大反馈控制量的权重，突出反馈控制的偏差修正作用。切换方式为平滑切换，不会因为权重突然变化造成控制量剧烈波动，保证系统稳定运行。稳定性验证采用仿真和现场试验两种方式，用 MATLAB/Simulink 建立锅炉给水系统仿真模型，对不同的扰动工况下系统运行状态进行仿真，验证复合控制策略的稳定性，在工业锅炉现场进行一个月的试运行，采集运行数据，分析汽包水位波动幅度、控制响应时间等指标，验证系统在实际运行中是否稳定可靠 [6]。

四、结束语

综上所述，本文以基于压力变送器的锅炉给水系统前馈－反馈复合控制优化为研究对象，从锅炉给水系统及控制技术的概述入手，指出了传统控制方式的不足；结合压力变送器的特点，论述了复合控制优化的重要意义；提出了包含结构设计、参数整定、算法改进、协同机制的完整优化策略。经过研究得知，本优化方案用压力变送器实时检测的优点来创建前馈环节，使用改进后的反馈控制算法，可以明显提升锅炉给水系统抗扰动能力、控制精度，保证汽包水位稳定，减少能源消耗，提高运行安全性与经济性。也可以研究人工智能算法在复合控制中的运用，提高控制模型的自适应性；也可以用工业互联网技术来实施锅炉给水系统远程监控和智能运维，推进锅炉控制系统的智能化升级。

参考文献

[1] 张华，王涛 . 火电厂锅炉给水系统金属材料腐蚀缺陷自动检测 [J]. 自动化应用，2024，65(19)：150-153.

[2] 张文祥，孙志军，陶丁，等 . 基于 ML-PCA 的锅炉给水系统模态划分 [J]. 能源研究与利用，2024，(03)：40-46.

[3] 雷斐，赵有为 . 超超临界锅炉省煤器给水旁路复合热水再循环提高 SCR 入口烟温的应用研究 [J]. 中国设备工程，2024，(01)：131-134.

[4] 陈雷，高小春，张建杰，等 . 锅炉给水自动加氨系统改造与应用研究 [J]. 中国设备工程，2023，(22)：109-111.

[5] 刘佳，李扬，尤建华 . 基于 TIA 博途软件的小型直流锅炉给水控制系统的设计 [J]. 热能动力工程，2023，38(10)：176-180.

[6] 高新虎，陈治坤，王民君，等 . 水泥余热发电系统节能降耗的技术改造 [J]. 水泥，2023，(08)：45-46.

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

火电厂仪表控制系统抗干扰优化路径研究

程刚
国家电力投资集团贵州金元股份有限公司纳雍发电总厂，贵州 纳雍 553303
DOI:10.61369/EPTSM.2026020021

摘　　要： 火电厂的仪表控制系统属于保障机组安全且稳定运行的最为关键部分，其运行时候的状态能够直接决定发电的效率以及生产的安全。不过电厂现场存在着强电磁、机械振动、信号耦合等多种干扰情况，容易造成仪表信号出现失真现象、系统发生错误动作，甚至还会引发机组出现非计划停机的状况。本文结合火电厂生产的实际情况，首先对仪表控制系统的主要干扰源以及传播途径进行分析，然后从硬件配置、软件优化、施工运维这三个方面，提出针对性比较强、能够落地实施的抗干扰优化途径，为火电厂提升仪表控制系统的稳定性提供实际的参考依据。

关 键 词： 火电厂；仪表控制系统；干扰源；抗干扰技术；优化途径

Research on Anti-interference Optimization Path of Instrument Control System in Thermal Power Plant

Cheng Gang
Guizhou Jinyuan Co.,Ltd. Nayong Power Plant, Nayong , Guizhou 553303

Abstract: The instrumentation and control (I&C) system in thermal power plants constitutes the most critical component for ensuring safe and stable unit operation, as its operational status directly determines power generation efficiency and production safety. However, field environments often encounter various interference sources such as strong electromagnetic fields, mechanical vibrations, and signal coupling, which may cause instrument signal distortion, system malfunctions, or even unplanned unit shutdowns. Based on practical production conditions in thermal power plants, this paper first analyzes the primary interference sources and propagation pathways of I&C systems. It then proposes targeted and implementable anti-interference optimization measures from three aspects: hardware configuration, software optimization, and construction-operation maintenance. These recommendations provide practical references for enhancing the stability of I&C systems in thermal power plants.

Keywords: thermal power plant; instrumentation control system; interference source; anti-interference technology; optimization approach

引言

随着火电厂机组容量不断扩大以及自动化水平不断提高，仪表控制系统已经实现了对热力过程参数的实时收集、精确控制以及安全保护，是机组稳定运行的关键所在。火电厂现场的环境比较复杂，高压电气设备、大功率变频器、大型机组振动等都会产生干扰，这些干扰通过传导、辐射等方式进入控制系统，导致测点信号出现波动、控制逻辑出现错误判断，轻的话会影响运行参数调节的精准度，重的话会触发保护联锁动作从而引发停机事故[1]。当前部分电厂的抗干扰措施存在针对性不够、执行不到位等问题，很难适应复杂工况的需求。基于这样的情况，深入分析干扰产生的原因，探索科学有效的抗干扰优化途径，对于提升火电厂仪表控制系统的可靠性、保障生产的连续性有着重要的现实意义。

一、火电厂仪表控制系统主要干扰源及传播途径

（一）主要干扰源类型

火力发电厂简称火电厂，是利用可燃物（例如煤）作为燃料生产电能的工厂。它的基本生产过程是：燃料在燃烧时加热水生成蒸汽，将燃料的化学能转变成热能，蒸汽压力推动汽轮机旋转，热能转换成机械能，然后汽轮机带动发电机旋转，将机械能转变成电能。原动机通常是蒸汽机或燃气轮机，在一些较小的电站，也有可能会使用内燃机。它们都是通过利用高温、高压蒸汽或燃气通过透平变为低压空气或冷凝水这一过程中的压降来发电的。

作者简介：程刚（1996.10-），男，汉族，贵州省纳雍县人，本科，助理工程师，研究方向：热控自动装置。

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

外部干扰是现场最为常见的干扰类型，主要是从高压电气设备、大功率用电设备以及环境因素那里来的。高压输电线、变压器等设备在运行的时候会产生强电磁场，形成高频谐波干扰；变频器、软启动装置在工作的时候产生的瞬态脉冲，能量集中并且上升沿速度快，容易进入信号回路；锅炉、汽轮机等大型机组在运行时的机械振动，会造成传感器安装出现松动、线路出现疲劳损伤。内部干扰则是来自系统自身，包含线路布局不合理造成的信号串扰、多点接地引发的电位差、元器件老化产生的噪声等情况，其中接地系统设计存在缺陷引发的共模干扰，是造成信号失真的主要内部因素[2]。

（二）核心传播途径

火力发电是现代社会电力发展的主力军，在提出建设和谐社会、发展循环经济的大背景下，我们在提高火电技术的方向上要着重考虑电力对环境的影响，对不可再生能源的影响。虽然在中国已有部分核电机组，但火电仍占领电力的大部分市场。近几年电力发展滞后经济发展，全国上了许多火电厂，但火电技术必须不断提高发展，才能适应和谐社会的要求。传导耦合是干扰传播的主要方式，干扰信号通过电源线路、信号电缆、接地线等导体进行传播，例如动力电缆与信号电缆并行铺设的时候，通过分布电容、电感耦合产生串扰，强电进入弱电回路导致设备损坏。电磁方面的辐射是干扰的源头以电磁波的这种形式朝着空间去扩散，然后被在附近存在的信号电缆或者控制方面的设备给接收，特别是在变频器、高频发生的装置的附近，辐射带来的干扰会特别严重地影响模拟量信号采集的准确程度。机械传导主要是经过设备的基座、电缆桥架这样的载体，把大型机组的振动传递到传感器、执行机构那里，造成信号出现波动、部件产生磨损，从而间接引发系统的干扰和故障[3]。

二、火电厂仪表控制系统抗干扰优化路径

（一）硬件层面：优化配置，强化源头抗干扰能力

硬件属于抗干扰的头一道防线，需要通过进行科学的选型、对结构做优化处理、实行隔离方面的防护等办法，从源头开始降低干扰产生的影响，来提升系统的抗干扰的冗余情况。在元器件进行选型的事情上，优先去选择抗干扰性能非常好的设备还有材料[4]。模拟量信号进行传输的时候选择隔离的变送器，保证共模抑制比达到现场的需求程度，重要一点的I/O通道配置信号隔离器，提高强电窜入的防护能力；电缆选择阻燃且耐高温的屏蔽类电缆，像是ZR-DJYVP型的电缆，端子运用镀金材质的，减少因为氧化而导致的接触的噪音；控制柜里面加装磁环滤波器，有针对性地去抑制变频器谐波这类高频干扰。传感器进行选型要和现场的工况相适配，振动环境下选择带有减震结构的测点，高温区域采用耐温类型的仪表，从源头开始减少环境干扰对设备造成的影响。

在结构实施优化的方面，重点是完善屏蔽还有接地系统。用双层屏蔽电缆来传输关键的信号，外层屏蔽阻挡外界的强电磁干扰，内层屏蔽防止信号之间串扰，屏蔽层采用单端接地的办法，避免两端接地形成环流。优化接地系统的设计，让强电和弱电分开接地，控制系统、电气系统、防雷系统单独设置接地网，合理降低接地电阻，保证干扰电流能够有效疏导。控制柜内部采用分区的布局方式，强电模块和弱电模块保持安全的距离，避免内部电磁耦合产生干扰。在隔离防护的方面，对关键的回路实施电气隔离的操作。利用光电耦合器来实现信号传输的电气隔离，切断干扰传导的路径；电源回路配置隔离变压器，过滤掉电源杂波，保证控制系统供电的稳定；开关量信号经过继电器隔离之后接入DCS，阻断强电窜入带来的风险，保护核心控制模块。

（二）软件层面：算法优化，提升系统容错与抗干扰能力

优化数字滤波的算法，有针对性地抑制不一样类型的干扰。对模拟量信号采用移动平均滤波或者中值滤波算法，移动平均滤波可以让随机干扰变平滑，中值滤波能够有效地消除瞬时尖峰干扰，和汽包水位、蒸汽温度这些关键参数的信号处理相适配；对变化速度比较快的信号，增加速率限制器，当信号变化速度超出阈值的时候，自动屏蔽故障测点并且报警，防止热电阻断线这一类故障让保护错误触发。结合工况特点去调整滤波参数，在机组启停这类干扰经常出现的阶段，适当增强滤波的强度，平衡信号响应速度和稳定性。对控制逻辑进行重新构建，对冗余容错设计进行强化。关键的保护信号采用三个冗余的测点，去执行“三取二”的表决规则，在单点出现故障的时候自动把异常信号剔除掉，防止出现误动而导致跳机；对辅机控制系统配置故障诊断以及自动旁路的功能，在设备出现异常的时候没有缝隙地切换到备用回路，让过程参数保持稳定。对联锁保护回路增加状态自我检查的模块，实时去验证传感器以及执行器的健康状态，在出现异常的时候自动降低控制模式的等级，同时动态地对保护定值的延时进行调整，结合负荷区间来设定合理的延时范围，躲开大型设备启动和停止所引起的瞬间干扰。

对数据校验以及异常处理的机制进行完善。对输入的信号开展合法性的校验，设定合理的信号阈值以及变化趋势的范围，识别并且剔除干扰信号；对关键的数据进行备份和存储，当数据受到干扰而出现错误的时候，快速地调用备份数据让系统恢复运行；开发干扰报警的程序，当信号受到干扰超过允许的范围时，及时发出报警的提示，同时记录干扰发生的时间、工况条件等信息，给后续的排查提供依据。

（三）施工运维层面：规范流程，构建全周期防控体系

施工的质量以及运维的管理是抗干扰措施落实的关键，需要建立从基建施工到日常运维的全周期管控机制，避免因为人为的因素引发干扰的隐患。把施工安装的流程规范起来，从源头避免干扰的隐患。电缆的敷设严格依照“分层分槽、分类隔离”的原则，动力电缆和信号电缆分层进行铺设，不同类型的信号电缆分槽进行布置并且保持安全的间距，不允许共同使用电缆槽盒，防止平行架设太长的距离。传感器的安装避开管道的焊缝、振动厉害的区域，采用减震的底座以及柔性连接的方式，减少机械振动的影响；取源部件的焊接符合施工的标准，安装之后测试绝缘电阻以及屏蔽层的连续性，保证连接可靠。控制室的选址避开大型的电气设备、振动源以及热源，优化室内的通风以及温湿度的控制，给控制系统提供稳定运行的环境。建立常态化的运维监测机

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

制。利用电子台账记录干扰的事件，有针对性地分析高频的故障点，重点排查接头氧化、屏蔽层破损、接地不好等问题；定期核对接地电阻以及屏蔽接地的有效性，每年开展一次全系统的接地检测，及时处理接地回路的故障；定期更换老化的线缆以及元器件，重点检查变频器滤波电容、信号隔离器等容易损耗的部件，防止性能下降引发干扰。结合机组的检修，对电缆的布局、屏蔽层的连接等进行全面的排查，整改不规范的敷设、接地错误等问题。对人员的能力建设以及应急处置进行强化。开展专项的培训，提高运维人员对干扰信号的识别能力以及排查的技能，熟悉不同干扰类型的处理流程；制定干扰故障的应急方案，针对信号失真、系统误动作等突然发生的情况，明确处理的步骤以及责任的分工，缩短故障处理的时间。在大型设备启动和停止、变频器调试等干扰高发的作业时，安排专门的人员监护控制系统的运行状态，及时发现并且处理异常。

三、优化实施优先级与效果保障

（一）实施优先级排序

抗干扰做优化这件事需要结合电厂的实际运行工况情况，按照“先对关键回路开展处理、再对普通回路进行处理，先做源头去做治理对待、然后再做末端进行防护操作”这般的顺序来推进实施。要优先对单点保护的回路以及电缆交叉比较密集的区域进行改造处理，因为这些区域存在的干扰风险是比较高的、产生影响的范围是比较广泛的，对这些区域进行整改之后就能够快速地降低出现停机的风险可能性；接着要做的是对接地系统和屏蔽配置进行优化完善，以此来解决带有共性特点的干扰问题；最后要把软件算法和运维机制加以完善，从而实现长时间稳定的防控效果。与此同时要推行智能诊断系统，对干扰源进行实时的监测，以便为优化措施的调整提供数据方面的支撑依据。

（二）效果保障这类措施

要建立起优化效果的评估相关机制，通过对比优化之前和优化之后信号的波动范围大小情况、干扰故障的发生概率情况、保护误动作的次数情况等这些指标方面内容，来验证优化措施是否具有有效性；要利用仿真平台去测试在极端工况之下系统的响应情况，以此来验证保护定值和滤波参数是不是具有合理性。要把抗干扰的相关要求纳入到施工和运维的标准当中去，明确设计、施工、运维这些不同环节各自的责任内容以及技术规范要求，确保相关措施能够落地并且得到执行。要定期开展技术的复盘工作，对干扰防控方面的经验进行总结，结合机组改造、技术升级等这些工作情况，一直持续地优化抗干扰方案，进而适应工况变化方面的需求[5]。

四、结论

火电厂仪表的控制系统存在的干扰问题在成因方面比较复杂、所造成的影响比较深远，需要结合现场实际的情况去构建一个“硬件做防护＋软件做优化＋运维做管控”这样的三维抗干扰体系。在硬件这一层面要通过选型做优化、屏蔽隔离来强化源头的抗干扰能力；在软件这一层面要借助滤波算法、逻辑冗余来提升系统的容错性能；在施工运维这一层面要通过规范流程、常态化监测来实现整个周期的防控。优化工作需要注重具有针对性和具有可操作性，要优先去解决关键回路和高发隐患方面的问题，与此同时要建立起长效的机制，持续不断地迭代优化方案内容。通过科学并且有效的抗干扰措施，能够明显地提升仪表控制系统运行的稳定性能，减少因为干扰而引发的故障所造成的损失，从而为火电厂安全并且高效的生产提供有力的保障。在未来可以结合人工智能、物联网等这些技术，去开发智能的干扰识别以及自适应防控系统，从而进一步提升抗干扰技术的水平。

参考文献

[1]郭玮 . 热控设备常见故障及处理研究 [J]. 造纸装备及材料 , 2024, 53 (01): 30-32.

[2]闫鹏 . 火电厂自动化仪表应用现状及发展前景探讨 [J]. 机械管理开发 , 2022, 37 (03): 309-310+315.

[3]上艳粉 . 火力发电厂热控专业施工工艺探析 [J]. 价值工程 , 2016, 35 (35): 124-127.

[4]林琳 , 韦家鑫 . 火电厂热工仪表取样管电伴热系统的设计及实现 [J]. 电子技术与软件工程 , 2015, (10): 125-126.

[5]韦家鑫 , 林琳 . 火电厂在线化学仪表测量误差的控制措施 [J]. 电子技术与软件工程 , 2015, (10): 131-132.

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

高比例新能源接入条件下电力系统稳定性分析

何琼

国网荆州供电公司城区供电中心，湖北 荆州 434000

DOI:10.61369/EPTSM.2026020022

摘　　要： 随着风电、光伏等新能源高比例接入，电力系统惯量与短路强度下降、功率波动与控制耦合增强，频率、电压与振荡稳定性面临新的挑战。本文围绕高比例新能源接入条件下的系统特性变化，建立包含同步机、并网逆变器与典型负荷的动态模型，采用时域仿真、静态电压稳定分析及小扰动模态分析等方法，对不同渗透率与电网强度场景开展对比评估。结果表明：频率稳定受惯量与快速有功支撑能力制约，电压稳定受无功裕度与动态支撑速度影响，弱电网下易出现控制—网络耦合振荡。进一步提出源网荷储协同的提升策略，包括新能源频率支撑与构网控制、动态无功配置与网架补强、以及储能与需求响应参与辅助服务，为高渗透率新能源系统安全稳定运行提供参考。

关 键 词： 高比例新能源；电力系统稳定性；频率稳定；电压稳定；小扰动稳定；构网型控制

Analysis of Power System Stability Under High-Penetration Renewable Energy Integration

He Qiong

Urban Power Supply Center, State Grid Jingzhou Power Supply Company, Jingzhou, Hubei 434000

Abstract: With the large-scale integration of renewable energy (wind and photovoltaic), power systems experience reduced inertia and short-circuit strength, increased power variability, and stronger control-grid interactions, posing new challenges to frequency, voltage, and oscillatory stability. This paper investigates the changing system characteristics under high renewable penetration, develops dynamic models including synchronous generators, grid-connected inverters, and representative loads, and conducts comparative assessments across different penetration levels and grid-strength conditions using time-domain simulations, static voltage-stability analysis, and small-signal modal analysis. The results indicate that frequency stability is mainly constrained by system inertia and fast active-power support, voltage stability depends on reactive-power margin and dynamic voltage support, and weak grids are prone to control-network coupled oscillations. Coordinated source-grid-load-storage measures are proposed, including renewable frequency support and grid-forming control, dynamic reactive compensation and grid reinforcement, and ancillary services from energy storage and demand response.

Keywords: high renewable penetration; power system stability; frequency stability; voltage stability; small-signal stability; grid-forming control

前言

随着“双碳”目标推进与可再生能源技术快速发展，风电、光伏等新能源装机规模持续增长，电力系统正由“同步机主导”向“高比例电力电子并网”加速演进。新能源出力具有波动性、间歇性和不确定性，且逆变器并网使系统惯量与阻尼水平下降、短路容量减弱，导致频率支撑能力不足、电压稳定裕度降低以及低频/次同步振荡风险上升。在高渗透率条件下，传统基于同步发电机的稳定性分析方法与运行控制策略面临适用性挑战，因此有必要系统研究高比例新能源接入对电力系统稳定性的影响机理与评估方法，为安全运行和规划提供依据。

国内外研究围绕新能源并网建模、频率稳定评估、暂态稳定与电压稳定分析、以及构网型控制与储能支撑等方面取得一定进展，但在多类型稳定性耦合、强弱电网下逆变器控制与电网相互作用、以及评价指标与工程化判据统一等方面仍存在不足。基于此，本文聚焦高比例新能源接入条件下的频率稳定、电压稳定与小扰动稳定问题，建立包含同步机与新能源并网控制的动态模型，采用特征值分析与时域仿真相结合的方法开展评估，并在典型场景下识别关键影响因素，进一步提出源网荷储协同的稳定性提升措施。本文研究可为新能源消纳能力提升、系统安全校核与运行控制优化提供参考。

作者简介：何琼（1984.08-），女，汉族，湖北荆州人，学历：大学本科，职称：助理工程师，研究方向：电力工程，生产运行-电力系统及其自动化。

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

一、高比例新能源接入的系统特性与稳定性挑战

高比例新能源接入使电力系统的物理属性与控制形态发生显著变化，其核心特征可概括为“资源侧不确定性增强、并网接口电力电子化、系统惯量与短路强度下降、控制耦合更复杂”。这些变化共同作用，改变了系统对扰动的响应规律，增加了稳定性风险的多样性与耦合性。

首先，从电源侧看，风电与光伏受气象条件影响，出力呈现明显的波动性、间歇性与随机性，导致常规机组承担更频繁的爬坡与深度调节任务，系统备用需求增加。当预测误差或突发天气导致功率快速变化时，易引发频率偏差扩大与联络线功率波动。在低负荷、强新能源出力时段，常规机组开机数量减少，进一步降低系统惯量与一次调频资源，频率安全裕度被压缩。

其次，从并网形式看，高比例新能源通常通过逆变器接入。逆变器属于快速控制设备，其输出电压、电流受控制环节与限幅逻辑约束，故障期间的电流贡献与同步机存在本质差异：同步机可提供较大的电磁暂态支撑，而逆变器在过流保护下往往限流运行，使短路电流与无功支撑能力受限。随着电网“电力电子化”程度提高，系统惯量、阻尼以及故障电流来源由电磁物理过程逐渐转向控制器算法，稳定性从“机器－网络”耦合转变为“控制－网络”耦合，稳定问题更依赖控制参数与并网强度。此外，新能源集中并网还会重塑潮流分布，改变断面约束与无功分布，使传统“就地无功平衡、分区电压控制”的运行经验面临调整。在稳定性挑战方面，可从以下几类典型风险进行归纳：1）频率稳定风险：惯量下降使频率变化率（RoCoF）增大，故障或大功率波动时频率跌落更快；一次调频资源减少可能导致频率最低点（Nadir）越限，严重时触发低频减载或新能源保护脱网，形成连锁反应。2）电压稳定风险：新能源出力变化与无功支撑受限叠加，易造成局部电压偏移与电压崩溃风险；故障后电压恢复过程中，若无功补偿不足或控制策略不当，可能出现延迟电压恢复（FIDVR）现象。3）小扰动/振荡稳定风险：逆变器控制、线路补偿、并联无功装置等引入多时间尺度动态，可能诱发低频振荡、次/超同步振荡或控制交互振荡；在弱电网下，振荡阻尼对参数高度敏感，稳定边界更窄。4）暂态稳定与故障穿越挑战：新能源在故障期间受限流与保护策略影响，系统暂态支撑能力弱化；若低电压穿越（LVRT）性能不足或并网控制协调不佳，故障后新能源批量脱网会进一步加剧频率与电压问题。

总体而言，高比例新能源接入下的稳定性不再是单一指标或单一扰动可描述的问题，而呈现“多类型稳定性耦合、源网荷储协同影响、控制策略主导”的特征。后续研究需在准确建模、指标体系与工程化判据、以及面向弱电网的控制协调等方面进一步完善，以支撑高渗透率新能源条件下电力系统安全稳定运行。

二、稳定性分析模型与评估方法

在高比例新能源接入条件下，电力系统呈现“同步机—电力电子—电网”混合特征，稳定性研究需建立能够反映关键动态过程的统一建模与评估框架。本文从模型构建、分析方法与评价指标三方面展开。

1.系统建模框架：1）同步发电机及常规电源模型，为保持对传统电网动态特性的刻画，采用含励磁系统与调速系统的同步发电机模型：电气部分使用经典二轴（或四阶）模型描述转子电磁暂态，机械部分采用摆动方程反映转速与功角动态；励磁与AVR用于电压调节，调速器与汽/水轮机模型用于一次调频与功率响应。必要时引入PSS以表征阻尼增强措施。2）新能源与并网逆变器模型，风电、光伏通常通过变流器并网。为兼顾精度与可计算性，本文在不同研究目的下采用两类模型：电磁暂态层面（EMT简化）：用电流控制型逆变器的电压外环/电流内环、锁相环（PLL）、限流与保护逻辑描述故障期间与弱电网交互特性。机电暂态层面（RMS/小扰动）：将逆变器等效为受控电流源或受控电压源（构网型），以有功—频率（P－f）、无功—电压（Q－V）控制及其限幅特性刻画一次响应与电压支撑能力。对风电可选用双馈或全功率机组等效模型，对光伏采用直流侧功率约束与MPPT/限功率逻辑。3）负荷与电网元件模型，负荷采用ZIP静态模型与感应电动机动态模型相结合，以覆盖电压跌落后电机再加速导致的电压恢复问题；输电线路与变压器采用 π 型等值，FACTS/无功补偿装置（SVC/STATCOM、电容电抗器）采用典型控制模型。对于弱电网场景，重点保留等效电网阻抗与短路比（SCR）参数，以体现电网强度对控制稳定性的影响。

2.稳定性分析方法：1）频率稳定评估（时域为主，指标驱动），以典型扰动（机组跳闸、直流闭锁、新能源突降、负荷阶跃等）进行机电暂态仿真，评估频率最低点、稳态频差、频率变化率（RoCoF）及一次调频贡献。对新能源侧，重点考察虚拟惯量、下垂控制、限功率预留等策略对频率响应的改善效果，并分析保护动作与脱网对系统频率的二次冲击。2）电压稳定分析（静态+动态结合），静态电压稳定采用PV曲线、QV曲线与灵敏度指标（如V-Q灵敏度、无功裕度）评估不同运行方式与无功配置下的稳定裕度；动态电压稳定通过故障－切除－恢复过程的时域仿真，观察电压恢复时间、低电压持续时长与无功支撑响应，识别FIDVR风险及其与负荷电机占比、无功补偿速度之间的关系。3）小扰动稳定/振荡分析（线性化与模态分析），围绕运行点对系统微分代数方程线性化，建立状态空间模型，利用特征值分析获得振荡模式的频率与阻尼比；通过参与因子定位关键状态（如PLL、直流电压控制、同步机励磁/调速环节等），识别引发低阻尼振荡的主要设备与通道。对于弱电网下的逆变器控制交互，可进一步在频域采用阻抗建模与Nyquist判据分析控制—网络耦合稳定性边界。4）暂态稳定分析（关键故障与安全边界），针对三相短路、线路跳闸、重要断面故障等情形进行时域仿真，评估同步机功角稳定（临界切除时间CCT、最大功角摆幅）以及新能源低电压穿越过程中的限流、无功优先与恢复策略对系统稳定的影响。必要时引入分区等值与在线安全校核思路，以提升大规模场

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

景的计算效率。

三、典型场景与算例分析

为验证前述模型与评估方法的有效性，并揭示高比例新能源接入对系统稳定性的关键影响机制，本文构建典型电网算例并设置多类运行场景开展对比分析。算例系统包含同步机电源、新能源场站（风电/光伏）、主干输电网架及典型负荷中心；新能源通过升压站并网，部分场站位于电网末端以体现弱电网特征，同时配置一定比例的无功补偿装置与储能（可选场景），以评估不同调控手段的效果。

1.场景设置与扰动工况：1）渗透率分档场景，设置新能源出力占比为低（如20%）、中（如40%）和高（如60%及以上）三档，并通过减少常规机组开机数量或降低出力的方式保持系统功率平衡，从而体现惯量下降与短路容量变化对稳定性的影响。2）电网强度与并网条件场景，通过改变并网点等效短路比（SCR）或线路阻抗，构造强电网与弱电网两类典型条件；同时对比电流型并网控制与构网型控制（或引入虚拟惯量/下垂控制）在弱电网下的稳定性差异。3）典型扰动与故障集合，包括：常规机组跳闸、新能源突降/突升、负荷阶跃、关键线路N-1切除、并网点三相短路与单相接地故障等。对故障类扰动进一步设置不同切除时间以评估安全边界。

2.频率响应对比分析：在机组跳闸或新能源突降场景下，随着新能源渗透率提升，系统等效惯量降低导致RoCoF明显增大，频率最低点降低且出现更快的初始跌落。若新能源采用MPPT满发且缺乏功率预留，频率支撑主要依赖同步机一次调频，易出现频率恢复缓慢甚至二次跌落。引入储能快速功率支撑或新能源限功率预留后，频率最低点可明显抬升，频率恢复时间缩短，表明“快速有功支撑+一次调频资源”对高渗透率场景尤为关键。

3.电压稳定与故障后恢复特性：在潮流重分布与无功不足的组合工况下，高渗透率场景的PV/QV曲线显示无功裕度下降，负荷中心或弱网末端母线电压对功率波动更敏感。并网点发生短路并切除后，若逆变器限流导致无功支撑不足，故障后电压恢复出现延迟，且在高电机负荷占比时更易触发FIDVR。配置动态无功装置（STATCOM）或采用无功优先的并网控制策略可显著缩短电压恢复时间，并降低电压越限持续时长，说明动态无功支撑速度与容量是电压稳定的决定性因素之一。

4.小扰动稳定与弱电网控制交互：在弱电网（低SCR）条件下，小扰动特征值分析表明部分低频模态阻尼比降低，且模态参与因子显示逆变器PLL、外环电压控制与电网阻抗耦合增强，存在控制振荡风险；当多座新能源场站并联运行时，控制参数一致性差或带宽设置不当可能引发场站间的交互振荡。通过优化PLL带宽、引入阻尼控制/虚拟阻抗或采用构网型控制，可提升关键模态阻尼并扩大稳定运行范围，体现“参数整定与控制形态选择”对弱电网稳定性的敏感性。

四、总结

面向高比例新能源接入条件下的频率、电压与振荡等稳定性风险，应从“源—网—荷—储”协同出发，构建兼顾规划与运行的综合提升策略。在源侧，应提升新能源场站对系统的支撑能力，在网侧，需提升电网强度与电压支撑能力，在荷侧与储能侧，储能可作为高效调节资源参与一次调频与电压支撑，缓解新能源波动带来的功率不平衡；需求响应与可控负荷可在紧急情况下提供快速削峰与频率支撑，降低系统对常规机组的调节压力。综合来看，应形成“规划阶段确定容量与配置边界、运行阶段在线评估与自适应控制”的闭环体系，以提高高渗透率新能源条件下电力系统的安全稳定运行水平。

参考文献

[1]卓振宇，张宁，谢小荣，等.高比例可再生能源电力系统关键技术及发展挑战[J].电力系统自动化，2021，45(9)：171-191.

[2]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.

[3]孙华东，徐式蕴，许涛，等.新能源多场站短路比定义及指标[J].中国电机工程学报，2021，41(2)：497-505.

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

计及定值配合的发电机与励磁系统保护协同策略研究

吴广生
国家电投集团贵州金元股份有限公司纳雍发电总厂，贵州 毕节 553303
DOI:10.61369/EPTSM.2026020026

摘　　要： 本文针对现代大容量、高参数复杂互联电力系统中发电机发变组保护与励磁系统限制功能存在保护重叠、定值配合失当问题，开展计及定值配合的二者保护协同策略研究。首先，界定励磁系统限制“主动预防、维持运行”与发变组保护“被动隔离、兜底防护”的功能本质，确立“分层防御、限制优先、保护后备”协同原则；接着，围绕转子过热、定子过热、过激磁、失磁预防四大关键保护面，从启动值、发热常数、动作时间等维度构建定值配合数学模型与整定方法，设置合理定值级差保障“限制先动、保护后动”；最后，建立整定计算标准化流程，提出反时限特性曲线对比、P–Q平面叠加分析两种可视化验证方法，并给出工程常见问题及对策。该协同策略可为相关保护定值整定提供理论与工程指导，对提升发电机运行安全性和电网暂态支撑能力有重要价值。

关 键 词： 发电机保护；励磁系统；定值配合；协同策略；反时限特性；限制与保护

Research on the Protection Coordination Strategy of Generator and Excitation System Considering the Value Setting

Wu Guangsheng
Guizhou Jinyuan Co., LTD. Nayong Power Plant, State Power Investment Group， Bijie , Guizhou 553303

Abstract: This study investigates protection coordination strategies for generator–transformer units (GTUs) in modern large–capacity, high–parameter interconnected power systems, addressing issues of protection overlap and improper setting coordination in excitation system restrictions. First, it clarifies the functional essence of excitation system restrictions ("active prevention and operational maintenance") versus GTU protections ("passive isolation and last–resort protection"), establishing the principle of "tiered defense, restriction priority, and protection backup." Next, it constructs mathematical models and setting methods for four critical protection aspects—rotor overheating, stator overheating, over–excitation, and loss of excitation—by defining activation thresholds, heating constants, and action durations, with reasonable setting differentials ensuring "restriction activates first, protection follows." Finally, it establishes standardized setting calculation procedures, proposes two visual validation methods (inverse time characteristic curve comparison and P–Q plane superposition analysis), and addresses common engineering challenges with countermeasures. This coordinated strategy provides theoretical and practical guidance for protection setting optimization, significantly enhancing generator operational safety and grid transient support capabilities.

Keywords: generator protection; excitation system; setting coordination; collaborative strategy; inverse time characteristic; limitation and protection

引言

现代电力系统向大容量、高参数、复杂互联发展，大型同步发电机安全稳定运行是电网电压与频率稳定的核心保障[1]。发电机短时过载能力是维持系统暂态稳定的重要资源，需控制在设备热承受极限内[2]。发变组保护与励磁系统保护限制功能是保障发电机安全的两大核心技术体系，分别承担故障隔离“最后防线”与预防性调节作用，但在转子过负荷等保护方面存在功能重叠，定值配合失当会引发严重问题，且现有研究缺乏系统层面协同策略体系构建[3]。为此，本文旨在建立计及定值配合的发电机与励磁系统保护协同策略，为工程实践提供指导。

作者简介：吴广生（1998.12–），男，侗族，贵州省铜仁市人，学历：本科，职称：助理工程师，研究方向：电气工程及其自动化，邮箱：870067863@QQ.com。

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

一、发电机与励磁系统保护的功能界定与协同原则

（一）功能本质界定

励磁系统限制与发变组保护虽都旨在保障发电机安全，但技术属性、动作目标及后果差异显著[4]。前者是发电机自动控制闭环一部分，集成于数字式励磁调节器，实时采集电气量经算法判断，在运行点触及或预判触及预警边界时主动干预AVR、调整励磁电流，以调节输出、告警为主，不直接解列发电机，核心是预防性维持机组连续运行；后者属电力系统二次保护，由独立装置实现，监测发变组电气量与非电量，检测量超出跳闸边界且满足时间条件时判定故障，发出跳闸指令、隔离故障设备，核心是作为终极后备防止设备损坏扩大[5]。

表1：励磁系统限制与发变组保护功能对比

对比维度	励磁系统限制功能	发变组保护功能
技术属性	自动控制系统的一部分	继电保护系统的一部分
动作目标	预防异常，维持运行	切除故障，隔离设备
动作后果	调节励磁、发信	发信、减出力、跳闸
动作速度	相对较快，旨在快速抑制	按整定时限，可能较快或带延时
整定依据	设备过负荷能力，留有一定裕度	设备安全极限，考虑损坏边界
功能关系	第一道防线，先行动作	最后一道防线，后备动作

二、关键保护面的定值配合协同策略

（一）转子过热保护协同

1.原理与标准要求

系统电压跌落时，发电机强励维持电压稳定，致转子电流短时远超额定值，转子绕组发热加剧。《GB/T7064-2008》规定了汽轮发电机转子绕组反时限过电流耐受特性，本质是绕组发热量$(I^2\cdot t)$积累与散热过程。标准以发热常数C=33.75为基准，可用统一公式描述。

$$\left(I_f^2-1\right)\cdot t=C \tag{1}$$

式中：I_f为以额定转子电流为基准的标幺值；t为允许持续运行时间（秒）；C为转子绕组发热常数。

励磁系统强励反时限限制（过励磁电流反时限限制）功能模拟并执行该特性，转子电流超标时启动积分，累计发热量达设定值（C值）减磁。发变组保护的转子过负荷保护依此反时限特性，作为转子过热后备保护。《GB14285-2006继电保护技术规程》要求，300MW及以上发电机应配置由定时限（告警）和反时限（跳闸）组成的励磁绕组过负荷保护。

2.定值配合策略与数学模型

（1）启动值（Threshold）配合

励磁限制启动值$I_{f.L_s et}$：考虑额定工况励磁电流波动（105%~110%）及采样误差，以及采样误差，整定为1.05~1.10p.u.。

保护启动值$I_{f.P_s et}$：为预留限制功能先行动作区间，取值大于励磁限制启动值，工程经验取其1.05~1.1倍。即：

$$I_{f.P_s et}=\left(1.05\sim1.10\right)\times I_{f.L_s et} \tag{2}$$

例如，若$I_{f.P_s et}$=1.05，则$I_{f.L_s et}$宜设在1.10~1.15之间。

（2）发热常数（C值）配合

发热常数C决定反时限曲线形状，为使保护曲线位于限制曲线之上（相同电流下允许时间更长），保护C值不小于标准值且大于等于限制C值。

励磁限制C值C_L：为保障限制先动，取值略小于标准值33.75，如30~33。相同过流工况下限制允许时间t_L更短。

保护C值C_P：取值等于或略大于标准值33.75，如33.75~35。配合关系为：

$$C_P\geq C_{std}\geq C_L \tag{3}$$

其中，C_{std}=33.75

（3）级差计算与验证

“级差为同一过流倍数下，保护动作时间与限制动作时间的差值，是配合有效性的量化指标。

由公式(3.1)，同一电流倍数I_f，动作时间分别为：

$$t_L=\frac{C_L}{I_f^2-1},\quad t_P=\frac{C_p}{I_F^2-1} \tag{4}$$

则级差Δt为：

$$\Delta t=t_P-t_L=\frac{C_P-C_L}{I_f^2-1}\left(I_f>1\right) \tag{5}$$

级差需为正，且顶值强励电流（1.8~2.0倍额定值）工况下，时间裕度应不小于0.5秒。

（二）定子过热保护协同

1.原理与标准要求

定子绕组过热主因是对称过电流，《GB/T7064-2008》规定其短时过电流耐受特性，发热常数C=37.5。容量≤1200MVA的发电机需耐受1.5倍额定电流至少30秒。反时限特性满足

$$\left(I_s^2-1\right)\cdot t=C \tag{6}$$

式中：I_s为以额定定子电流为基准的标幺值。

励磁系统定子电流限制功能，通过调节励磁（减磁降低无功与机端电压，间接减小定子电流）预防过热，发变组定子过负荷（过电流）保护作为后备。

2.定值配合策略

定子侧定值配合策略与转子侧相似，核心是启动值和发热常数（C值）的阶梯化整定。定子电流限制启动值要躲过正常波动，通常设为1.0-1.05p.u.，而定子过电流保护的定时限告警段或反时限启动值略高，为1.05-1.10p.u.。在C值配合上，定子标准C值为37.5，为使励磁限制先动作，其C值可取33.75-37.5（如33.5），且一般不小于转子限制C值，防止定子限制过早减磁影响系统电压恢复，保护侧采用标准C值37.5。此外，由于励磁系统实现有差异，并非所有型号都标配定子电流限制功能，部分装置需升级程序，参数可能通过临时变量设置，整定配合前要先确认

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

该功能是否存在[7]。

（三）过激磁保护协同

1.原理与配合目的

发电机与主变压器铁芯当中的磁通密度B跟机端电压U成正比，和频率f成反比，也就是B∝U/f，过激磁讲的是U/f比值过高，使铁芯饱和，致使涡流损耗以及异常温升都急剧增加，对设备有危害，伏赫兹限制乃励磁系统所拥有的功能，运用检测U/f比值，当超出限制时自动把电压给定降低，以此防止过激磁。过激磁保护属于发变组保护的功能，在所运用V/Hz限制失效或者过激磁太过严重的时候进行动作跳闸[8]。

2.定值配合策略

（1）动作值配合

动作值配合方面：借助多道防线的方式来进行动作值的配置，使其能逐级得到提升，第一道防线是V/Hz限制动作值NL，其整定值处于1.05到1.10p.u.这个范围，比如宝庆电厂#1机就选用了1.06p.u.作为该值，低于设备长期所允许的过激磁能力，以此能实现对设备状况的及早干预。第二道防线是过激磁保护告警值$N_{P_{alarm}}$，此值的整定值大约是1.10p.u.，会带着长延时发信。第三道防线为过激磁保护跳闸值，它分成定时限与反时限这两类，其中定时限跳闸值$N_{P_{tripl}}$选取1.25p.u.左右，依靠延时跳闸的方式来应对严重的过压情况。反时限跳闸下限值$N_{P_{trip2_{min}}}$取得1.08p.u.，该下限值与上限值共同构成反时限曲线，以应对持续的中等过激磁状况，保证设备能在不同的过激磁程度下可有相应合适的保护动作。配合关系为：

$$N_L < N_{P_{alarm}} \le N_{P_{trip2_{min}}} < N_{P_{tripl}} \tag{7}$$

（2）动作时间配合

V/Hz限制动作的时间tL得快速响应，用来迅速抑制过激磁，过激磁保护告警段延迟时间比较长，反时限曲线会依据过激磁倍数去调整时间，1.08倍的时候允许的时间特别长，到了1.25倍时允许的时间非常短。

（3）低频特殊策略

当频率低于整定阈值（如45Hz）时，U/f比值易越限且危害加剧，V/Hz限制策略需切换：空载工况下直接启动逆变灭磁，负载工况下则与保护配合，经短延时跳闸。

（四）失磁预防协同

1.原理与配合挑战

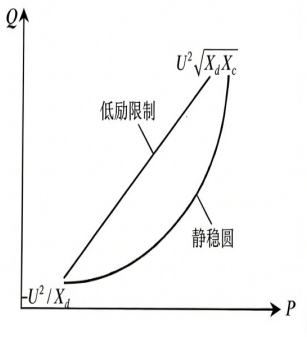
发电机欠励运行，也就是吸收系统无功，要是进相过深，会触发失步以及定子端部过热的问题，欠励限制功能借助实时有功P跟无功Q在P-Q平面设定动作边界，运行点触及边界之际，就会增加励磁电流来阻止深度进相，而失磁保护则按照机端阻抗轨迹进入“静稳边界圆”或者“异步边界圆”来判定故障并且跳闸。核心配合挑战是二者选用了不一样的描述坐标系，限制功能采用P-Q平面，保护功能运用了阻抗平面，很难直接开展整定配合工作[9]。

2.定值配合策略与数学模型

（1）欠励限制边界整定

欠励限制边界依据发电机制造厂进相试验数据确定，计入静稳储备系数与误差后，形成P-Q平面第二象限内的曲线或折线，直线型方程为：

$$Q = kP + \left(aU^2 + b\right)Q_0 \tag{8}$$



式中k，a，b，Q_0为常数，U为机端电压标幺值。该边界应随电压U^2变化，以覆盖不同电压下的安全区域。

（2）保护边界映射与配合

为解决坐标系不统一状况，应当把失磁保护的阻抗圆映射到P-Q平面。

静稳极限阻抗圆映射：设定系统阻抗是Xs，发电机同步电抗为Xd，经过推导可得出P-Q平面动作圆方程：

$$P^2 + \left[Q - \frac{U^2}{2}\left(\frac{1}{X_s} - \frac{1}{X_d}\right)\right]^2 > \left[\frac{U^2}{2}\left(\frac{1}{X_s} + \frac{1}{X_d}\right)\right]^2 \tag{9}$$

圆外为动作区。

异步边界阻抗圆映射：圆心在$-X_d$/2，半径为X_d/2，映射后方程为：

$$P^2 + \left[Q + \frac{U^2}{2}\left(\frac{1}{0.5X_d^{'}} + \frac{1}{X_d}\right)\right]^2 < \left[\frac{U^2}{2}\left(\frac{1}{0.5X_d^{'}} - \frac{1}{X_d}\right)\right]^2 \tag{10}$$

圆内为动作区。其中$X_d^{'}$为发电机暂态电抗。

（3）配合原则与可视化验证

在P-Q平面当中，当发电机运行点从第一象限正常区朝着第二象限进相区进行移动的时候，需要依次去穿越四层安全边界，其核心原则是欠励限制曲线要全部处于静稳极限圆与异步圆的外面，并且要预留出足够的裕量。

三、协同策略的工程实施与验证

（一）整定计算标准化流程

基于协同策略，新建及改造机组整定计算标准化流程为：收集核心技术数据，明确“限制先动，保护后动”原则及目标级差；分项完成转子、定子、V/Hz、欠励/失磁的定值整定；汇总校验定值协调性后，形成正式定值单。

（二）可视化验证方法

可视化验证是校验定值配合策略有效性的关键，可将抽象模型与参数转化为几何图形，直观呈现励磁限制与发变组保护的动作逻辑、时序关系及安全裕度，核心方法为两种：一是反时限特

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

性曲线对比法，用于热累积模型配合校验，通过同一坐标系曲线对比明确动作级差与运行区；二是P-Q平面叠加分析法，解决欠励限制与失磁保护配合问题，转化判据并叠加曲线形成层次化图形[10]。工程中可借助MATLAB、Python等工具实现，为“限制先动、保护后动”策略提供直接验证依据。

（三）常见问题与对策

工程实践中实施协同策略面临三类典型挑战及对应对策：一是旧励磁装置缺乏完整限制功能，优先升级控制软件，无法升级则采用保守定值并强化运行监视；二是不同厂商励磁调节器限制算法与标准特性存在差异，需钻研技术手册、寻求厂家支持，推动算法契合标准模型；三是定值变更管理不严谨易破坏配合关系，需建立严格管理制度，确保定值修改经全面评估与联合校验，为协同策略可靠实施奠定基础。

四、结论与展望

本文围绕计及定值配合的发电机与励磁系统保护协同策略展开研究，明确二者“主动调节预防”与“被动故障切除”的功能本质及“限制先动、保护后动”原则，提出核心定值配合实施路径，建立四大关键保护面的数学模型、整定方法，结合多维度验证证实策略有效性，总结标准化工程流程以指导实践。展望未来，依托智能电网与高比例新能源接入趋势，协同策略将向自适应保护等方向发展，通过完善行业导则、开发集成化工具，提升防护精准性与效率，为电力系统提供技术支撑。

参考文献

[1]牛伟，康志林，齐家伟，等.可控两相零式电抗分流发电机励磁系统仿真研究[J].电器工业，2025(6):29-35.

[2]尹昕.船舶同步发电机励磁系统设计与动态响应特性分析[J].消费电子，2025(22):95-97.

[3]刘超.发电机励磁系统改造及调试研究[J].电气技术与经济，2025(11):178-181.

[4]李生虎，朱争高，齐楠，等.计及调速/励磁系统的同步发电机等效惯量辨识[J].电力系统及其自动化学报，2023,35(10):18-25.

[5]陆青卓.基于云计算的发电机励磁系统故障检测系统设计[J].电气技术与经济，2025(6):304-306,311.

[6]汤雪飞.发电机励磁系统的智能化发展路径探究[J].张江科技评论，2025(9):38-40.

[7]彭志才.水轮发电机效率提升关键技术分析[C]//新质生产力驱动第二产业发展与招标采购创新论坛论文集（一）.2025.

[8]黄铀旻.船舶全电推进系统和轴带发电机的智能能效管理及协同优化研究[J].消费电子，2025(12):73-75.

[9]江博游，徐华廷，郭创新，等.计及决策依赖不确定性和禁止转速区间的频率约束风火协同备用优化模型[J].中国电机工程学报，2024，44(23):9213-9224.

[10]汪宇航，李琰，应飞祥，等.计及可靠性成本的风光储微电网储能容量协同优化[J].电测与仪表，2023，60(5):59-65.

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

锅炉燃烧优化与节能技术研究

张玉江，王鑫，张义
国家电投集团内蒙古能源有限公司，内蒙古 通辽 028000

DOI:10.61369/EPTSM.2026020001

摘　　要： 本文系统阐述了锅炉燃烧优化与节能技术的核心内容、面临挑战及未来趋势。在燃烧优化技术方面，从先进控制策略、燃烧器结构改进、燃烧过程监测与调整三个维度展开；在节能技术方面，重点分析余热回收利用、保温材料优化、设备运行优化的技术路径与实践效果。同时，指出技术应用中存在的技术成本高、设备兼容性差、运行维护难等挑战，并提出政府补贴、企业合作、逐步改造、人员培训等应对策略。

关 键 词： 锅炉燃烧；燃烧优化；节能技术；污染物排放；能源效率

Research on Boiler Combustion Optimization and Energy-Saving Technologies

Zhang Yujiang, Wang Xin, Zhang Yi
State Power Investment Corporation Inner Mongolia Energy Co., Ltd., Tongliao, Inner Mongolia 028000

Abstract: This paper systematically expounds on the core content, challenges, and future trends of boiler combustion optimization and energy-saving technologies. In terms of combustion optimization technologies, it explores three dimensions: advanced control strategies, improvements in burner structures, and monitoring and adjustment of the combustion process. Regarding energy-saving technologies, it focuses on analyzing the technical pathways and practical effects of waste heat recovery and utilization, optimization of insulation materials, and optimization of equipment operation. Simultaneously, it points out challenges in technology application, such as high technological costs, poor equipment compatibility, and difficulties in operation and maintenance, and proposes countermeasures including government subsidies, corporate collaboration, gradual transformation, and personnel training.

Keywords: boiler combustion; combustion optimization; energy-saving technologies; pollutant emissions; energy efficiency

引言

锅炉作为工业生产与电力供应中的核心能源转换设备，其运行效率、污染物排放水平直接关系到能源利用效益与生态环境质量。当前，随着能源短缺问题加剧与环保要求趋严，传统锅炉普遍存在的燃烧效率低、能耗高、NO_x等污染物排放超标的问题日益突出，亟须通过技术革新实现优化升级。在此背景下，锅炉燃烧优化与节能技术成为解决上述问题的关键路径——前者通过精准控制燃烧过程、改进燃烧器结构、实时监测调整参数，平衡效率与排放的矛盾；后者通过余热回收、保温升级、设备优化，最大限度减少能量损耗。

一、锅炉燃烧优化技术

（一）先进控制策略

智能控制算法在锅炉燃烧优化中的应用已成为提升燃烧效率与降低污染物排放的重要手段。神经网络作为一种强大的非线性建模工具，能够通过训练学习锅炉燃烧过程中的复杂映射关系，从而实现对燃烧参数的精准预测与控制。例如，徐文韬、黄亚继等[1]人提出了一种基于BP神经网络的燃烧优化模型，该模型通过建立NO_x排放质量浓度和锅炉热效率的预测模型，显著提高了燃烧过程的多目标优化能力。此外，遗传算法作为一种全局优化方法，能够在多变量、多约束条件下搜索最优解，为锅炉燃烧系统的参数调整提供了新的解决方案。杨力瑞[2]指出，通过结合神经网络与遗传算法，可以构建动态闭环控制系统，进一步优化锅炉燃烧过程。这些智能控制算法的应用不仅提高了燃烧控制的精度，还为复杂工况下的实时优化提供了技术支持。

多目标优化控制方法在锅炉燃烧优化中具有重要意义，其核心在于平衡燃烧效率与污染物排放之间的矛盾。一种基于改进非支配排序遗传算法（INSGA-Ⅱ）的多目标优化模型，可以以降低NO_x排放质量浓度和提高锅炉热效率为目标，实现了对燃烧系统的全局优化。该方法通过引入精英保留策略和自适应交叉变异

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

机制，显著提升了算法的收敛速度与解的质量。实验结果表明，基于 BP-INSGA-Ⅱ算法的优化模型可使 NO_x 排放质量浓度平均降低15.42%，同时锅炉热效率平均提高0.1058%。这一成果验证了多目标优化控制在锅炉燃烧优化中的有效性[1]。此外，多目标优化方法还能够综合考虑经济性、环保性和安全性等多个维度，为锅炉燃烧系统的整体性能提升提供了理论支持。

（二）燃烧器结构改进

新型燃烧器的设计是提升锅炉燃烧效率的关键技术之一，其核心在于促进燃料与空气的充分混合，从而实现高效燃烧。通过重新分配点火来实现火焰几何形状和位置控制的方法，这种方法不仅能够确保火焰焦点远离锅炉壁，还能减少燃烧副产物的生成量。此外，新型燃烧器通常采用高效燃烧器和先进的控制系统，以增强燃料与空气的混合效果。通过优化燃料与空气的混合比例以及应用低氮燃烧技术，可以显著降低 CO_2 排放量并提高燃烧效率。

燃烧器在锅炉内的布局优化对燃烧稳定性和均匀性具有重要影响。合理的燃烧器布局能够改善炉膛内的流场分布，从而提高燃烧效率并减少污染物排放。通过控制燃烧温度和氧量分布，可以实现燃烧过程的优化调整。例如，在某600MW临界主机机组锅炉的优化调整中，通过对燃烧器布局的改进，成功解决了燃烧器易损坏的问题，并显著降低了排烟温度。

（三）燃烧过程监测与调整

在线监测技术在锅炉燃烧过程中的应用为实时调整燃烧参数提供了重要依据。通过基于尾部 CO/O_2 双参量在线监测技术的燃烧优化系统，该系统通过建立 CO 体积分数与锅炉效率及 NO_x 质量浓度的关联模型，实现了对燃烧过程的精准控制。实验结果表明，通过调节尾部 CO 体积分数至优化值，锅炉在各个典型运行负荷下均实现了效率的提高和 NO_x 质量浓度的降低[3]。此外，在线监测技术在燃烧优化中的作用，通过实时监测 CO 和 O_2 等关键参数，可以有效指导燃烧调整，从而提升锅炉的整体性能。基于在线监测数据的实时调整策略是锅炉燃烧优化的重要环节，其核心在于根据监测结果动态调整燃烧参数，从而实现燃烧过程的最优控制。实验结果表明，调整后的控制系统不仅降低了机组的发电能耗，还显著减少了脱硝系统的喷氨量。此外，通过构建 CO/O_2 双参量在线监测的燃烧优化系统，可以为锅炉运行提供实时调整建议，从而满足低氮排放与高效燃烧的双重需求。

二、锅炉节能技术

（一）余热回收利用

烟气余热回收是锅炉节能的核心环节，核心是通过余热锅炉、换热器等高效热交换设备，将高温烟气热量转化为可再利用能源，减少热能浪费。在火力发电厂中，这类设备能有效降低排烟温度、提升能源利用率，比如余热锅炉吸收烟气热量产生蒸汽或热水，可用于供暖、发电等；换热器则通过优化设计强化烟气与其他介质的热量传递，减少损失。同时，还可通过调整燃烧空燃比降低烟气含氧量，结合先进监测技术实时采集烟气温度、流量等参数，动态调整系统运行，进一步提升回收效率[4]。除烟气外，炉渣和冷凝水余热也具有回收价值。炉渣是燃煤锅炉产物，温度高，直接排放会浪费热量，引入炉渣冷却装置可将其热量传递至水等介质，用于供暖或余热锅炉给水，减少燃料消耗；高温冷凝水含大量热能，设置回收系统将其重新引入锅炉给水，既能节水，又能显著降低燃料消耗。

（二）保温材料优化

新型保温材料是锅炉节能的关键技术支撑，相比传统材料，它具备导热系数低、耐高温、耐腐蚀的核心优势。例如，纳米孔保温材料依托独特微观结构可有效抑制热传导，大幅减少热量损失；部分复合材料通过添加陶瓷纤维或气凝胶，既能提升隔热性能，又能增强机械强度与耐久性。经济性与环保性上，新型材料的低导热系数意味着相同保温效果下，所需材料厚度更小，可减少用量并降低施工成本；其良好耐腐蚀性能延长使用寿命，减少因频繁更换保温层产生的废弃物，符合绿色发展需求。

合理的保温结构设计是发挥材料效能的核心。设计需结合锅炉各部位温度分布与运行环境：高温区域采用多层复合保温结构，借不同材料协同强化隔热；低温区域选用单层结构以控制成本[5]。同时，施工质量与密封性至关重要，需严格控制材料拼接缝隙，并用专用密封材料处理，防止热量泄漏。此外，设计还需兼顾维护便利，如在易损部位设置可拆卸式保温层，既方便日常维护，也能减少设备检修对保温层的破坏。

（三）设备运行优化

辅机设备节能是锅炉系统整体优化的关键，其中风机、水泵作为主要耗电设备，其效率直接影响能耗。引入变频调速技术可动态调整二者转速，避免固定转速的能量浪费：低负荷时，降低风机转速能减少送、引风量以降电耗；水泵则可依实际流量调节电机功率，减少无用损耗。辅机节能还需结合智能控制系统，通过实时监测、分析运行参数，自动调整设备状态至最佳工况。例如，基于神经网络算法的控制策略，能根据锅炉负荷变化预测辅机需求，提前调整参数实现高效节能。

锅炉系统各设备的整体协调，是节能的重要保障。锅炉本体、辅机及附属系统的匹配度，直接影响运行效率，若负荷变化时辅机未及时调整，易导致能源浪费或设备损坏[6]。具体策略包括：优化燃烧与蒸汽系统耦合，平衡燃料供应与蒸汽需求；借助先进传感器和通信技术，实现设备参数实时共享，为优化提供数据支持；定期全面评估系统，识别节能改进点并通过技术或管理改造落实。

四、燃烧优化与节能技术面临的挑战与应对策略

（一）技术成本问题

燃烧优化与节能技术的研发、设备购置以及安装调试等环节均涉及较高的初始投入，这成为其在工业领域广泛应用的主要障碍之一。研发过程需要大量的资金支持，尤其是在智能控制算法和多目标优化技术的开发中，高昂的研发成本限制了技术的普及。新型燃烧器和余热回收设备的购置费用较高，例如高效换热器和先进监测系统的引入往往需要企业承担较大的经济压力。为降低技术成本，政府补贴和企业合作是两种有效的解决方案。政

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

府可以通过提供税收优惠、专项补贴和技术扶持政策，鼓励企业采用先进的燃烧优化与节能技术[7]。同时，企业间的合作也能够有效分摊技术研发和应用的成本。通过联合研发或共享技术成果，企业可以在技术推广过程中实现资源共享和优势互补，从而减轻单个企业的经济压力。

（二）设备兼容性问题

新燃烧优化与节能技术与现有锅炉设备之间的兼容性问题是一个亟待解决的技术难题。一方面，接口不匹配的问题尤为突出，特别是在老旧锅炉系统中，新型燃烧器或检测设备的安装往往需要重新设计接口结构，这不仅增加了改造成本，还可能影响系统的整体稳定性。另一方面，控制系统的差异也构成了技术应用的障碍。为解决设备兼容性问题，企业可以采取逐步改造和定制化设计的策略。首先，在引入新技术时，应优先选择能够与现有设备部分兼容的解决方案，例如通过增加适配器或中间转换装置来实现新旧设备的协同工作。其次，针对控制系统差异问题，可以通过升级现有控制系统的硬件和软件模块，使其具备支持先进控制算法的能力。

（三）运行维护难题

燃烧优化与节能技术的应用虽然能够显著提升锅炉的运行效率，但也带来了运行维护方面的诸多挑战。新技术的引入通常伴随着设备故障率的增加，特别是在智能检测系统和高效燃烧器的使用过程中，复杂的电子元件和精密机械部件容易出现故障，从而影响系统的正常运行。维护技术要求的提高也是一个突出问题[8]。

为应对运行维护难题，企业需要从人员培训和维护体系建设两方面入手。加强技术人员的专业培训是提高维护能力的关键措施。通过组织定期的技术培训和实操演练，可以提升维护人员对新技术的学习能力和操作熟练度，从而更好地应对设备故障。建立完善的维护体系也是不可或缺的一环。企业应制定详细的维护计划和应急预案，明确各环节的负责人和工作流程，确保在设备出现故障时能够迅速响应并解决问题。

五、未来发展趋势展望

（一）智能化燃烧控制

随着工业自动化和信息技术的快速发展，智能化技术在锅炉燃烧控制中的应用前景愈发广阔。大数据分析和人工智能决策作为智能化技术的核心手段，为实现更精准、高效的燃烧控制提供了新的可能性。通过大数据分析，可以全面采集和处理锅炉运行过程中的多维数据，包括燃烧温度、氧气浓度、污染物排放等关键参数，从而揭示燃烧过程的潜在规律，并为优化控制策略提供科学依据。此外，人工智能决策系统能够基于深度学习算法对复杂工况进行实时建模与预测，进而实现对燃烧过程的动态调整。

（二）新型节能材料研发应用

新型节能材料的研发与应用是推动锅炉节能技术进步的重要方向之一。高性能保温材料和高效换热材料的研究正受到广泛关注，这些材料在提升锅炉热效率、减少能量损失方面展现出巨大潜力[9]。例如，采用低导热系数的纳米复合材料作为保温层，可以显著降低锅炉表面热损失，同时具备耐高温和耐腐蚀的特性，从而延长设备使用寿命。此外，高效换热材料的开发也为烟气余热回收提供了新的解决方案[10]。通过引入具有高传热系数和抗结垢性能的新型换热器，可以进一步提高余热回收系统的效率，从而减少燃料消耗和碳排放。

（三）多技术融合发展

燃烧优化与节能技术的发展正逐步呈现出与其他相关技术深度融合的趋势，这种多技术融合为提升锅炉整体性能带来了新的机遇与挑战。一方面，新能源技术与锅炉燃烧技术的结合为降低化石能源依赖提供了可行路径。另一方面，污染物处理技术的进步也为锅炉燃烧优化提供了有力支持。因此，未来的研究应着重探索多技术融合的优化方案，建立统一的技术标准和评价体系，以促进各技术领域的协同发展，最终实现锅炉燃烧系统的高效、清洁运行。

六、结束语

综上，尽管当前技术推广仍面临成本高、兼容性差、维护难等挑战，但通过政府政策扶持、企业协同合作、技术逐步迭代等方式，这些障碍正逐步被突破。未来，随着智能化技术与锅炉控制的深度融合、新型节能材料的产业化应用，以及新能源与污染物处理技术的跨界融合，锅炉系统将朝着更高效、更清洁、更智能的方向发展，为推动能源结构转型与“双碳”目标实现注入关键动力。

参考文献

[1]徐文韬；黄亚继；曹歌瀚；陈波；金保昇.基于BP-改进NSGA-Ⅱ锅炉燃烧多目标优化[J].东南大学学报（自然科学版），2022,52(5):943-952.

[2]杨力瑞.大型火电主机设备节能技术的分析[J].清洗世界，2020,0(1):9-10.

[3]史义明；姚友工；蔡正春；常寿兵；江紫薇；吴运凯；任强强；苏胜；向军.基于CO/O2在线监测的锅炉燃烧优化系统开发与试验研究[J].广东电力，2020,33(11):135-142.

[4]尹逊昊.火力发电厂燃煤锅炉燃烧优化及节能技术探究[J].电力设备管理，2024,(10):265-267.

[5]李晓艳.浅析燃煤锅炉的节能环保改造技术[J].能源与节能，2024,(4):79-82.

[6]张正樵.火力发电厂锅炉节能降耗的对策与措施探究[J].中国高新科技，2024,(3):104-106.

[7]金伟.电厂锅炉燃烧系统的优化[J].电气传动自动化，2024,46(2):76-80.

[8]陈明明.锅炉领域煤炭燃烧节能优化研究[J].内蒙古煤炭经济，2023,(1):46-48.

[9]郭占春.探讨火电厂锅炉汽轮机系统的节能环保问题[J].应用能源技术，2023,(7):34-37.

[10]徐侠；牛志岗.1000 MW超超临界锅炉燃烧与脱硝过程优化[J].电力科技与环保，2024,40(2):152-159.

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

电力工程中新能源并网技术的优化与应用

李健[1]，李妍[2]
1.国网湖北省电力有限公司监利市供电公司，湖北 荆州 433300
2.监利市沛然供水有限公司，湖北 荆州 433300
DOI:10.61369/EPTSM.2026020003

摘　　要： 当下新能源并网遭遇波动性、偶然性带来的电网调频调压困境，以及并网装置兼容性欠缺、调度机制迟缓等现实状况。本文结合电力工程现场操作经验，从并网核心技艺优化、装置匹配升级、调度机制健全三个层面，深入探究新能源并网技艺的优化途径，结合风电、光伏并网的现实应用场景，剖析优化技艺在处理现场困境里的现实效能，为电力工程中新能源并网技艺的落地运用提供接地的参照，助力清洁电力高效融入现存电力体系。

关 键 词： 电力工程；新能源并网；技艺优化；风电并网；光伏并网；电网匹配

Optimization and Application of New Energy Grid Connection Technology in Power Engineering

Li Jian[1], Li Yan[2]
1.State Grid Hubei Electric Power Co., Ltd. Jianli Power Supply Company, Jingzhou, Hubei 433300
2.Peiran Water Supply Co., LTD. Jingzhou, Hubei 433300

Abstract: At present, new energy grid connection encounters the dilemma of and voltage regulation of the power grid due to volatility and contingency, as well as the lack of compatibility of grid connection devices and the slow dispatch mechanism. This paper, based on experience of on-site operation of power engineering, explores the optimization path of new energy grid connection technology from three levels: optimization of core technology, upgrading of device matching and improvement dispatch mechanism. In combination with the actual application scenarios of wind power and photovoltaic grid connection, the actual efficiency of optimized technology in dealing with on-site dilemmas analyzed, and practical references are provided for the implementation of new energy grid connection technology in power engineering, which helps clean power to efficiently integrate into the existing power system.

Keywords: power engineering; new energy grid connection; technology optimization; wind power grid connection; photovoltaic grid connection; power grid matching

引言

在“双碳”目标引导下，新能源发电项目在各地域加速落实，风电、光伏电站从集中式向分布式与集中式一同推进的样式转变，给传统电力体系并网环节带来了新的挑战。新能源发电受自然状况作用明显，出力具备强烈的波动性和偶然性，直接并网容易造成电网电压、频率波动，甚至引发电网平稳性问题，这也是电力工程现场运维中最凸显的症结[1]。传统并网技艺多依据常规火电设计，难以匹配新能源的发电属性，且现存并网装置、调度系统与新能源发电的协同性不足，限制了清洁电力的消纳效率。鉴于此，针对新能源并网技艺的优化升级，并非单纯的技艺更新，更要贴合电力工程现场的现实需求，处理并网过程中的操作难题，达成新能源发电与电网的高效协同，这既是推动能源结构转变的要害，也是电力工程行业高质量发展的必然要求。

一、新能源并网技术应用中的核心问题

（一）新能源出力特性与电网适配性不足

风电、光伏等新能源的发电流程高度依靠自然环境，光伏出力受光照程度、昼夜更替、天气改变作用，风电出力则与风速、风向紧密相连，这种波动性和偶然性致使新能源发电功率难以精确推测。在电力工程现场，这种属性直接引发并网后的电网运行状况：一方面，功率突变会造成电网电压偏差超过标准，特别是分布式光伏并网到配电网时，部分台区会出现电压越过上限、三相电压不均衡等情形，加大现场运维难度；另一方面，新能源发电的间歇性会致使电网调频压力加大，传统火电调频响应速度难以契合新能源出力的快速改变，倘若调频储备不足，容易引发电

作者简介：李健（1992.07-），男，汉族，湖北省荆州市监利市人，学历：硕士研究生，职称：电力工程工程师，研究方向：电力工程。

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

网频率波动，影响供电平稳性。此外，部分线路承载能力处于有限状态的老旧电网，在集中式新能源电站实施并网行为之后，线路潮流分布产生改变情形，线路出现过载现象、电压产生过大损耗等问题存在可能性，并网适配性被进一步造成降低结果[2]。

（二）并网设备兼容性与运行稳定性欠缺

并网设备作为新能源发电接入电网的核心承载物体，在当前电力工程范畴之内，大量传统并网设备和新能源发电特性呈现不兼容情况依然存在。从现场应用层面观察，首先，传统逆变器的调节能力处于不足程度，部分老旧状态的逆变器缺失快速无功调节功能，新能源出力波动带来的无功损耗无法得到及时补偿，电网电压稳定性产生下降趋势，逆变器脱网现象甚至出现，整个并网系统的运行安全受到影响[3]。其次，新能源电站的并网开关设备、测控装置大多对常规火电标准进行沿用，针对新能源出力的快速变化情况，响应未达到及时程度，新能源发电数据的精准采集、分析工作无法完成，并网调度以及故障排查工作面临困难。另外，部分并网设备的抗干扰能力处于较弱水平，在新能源出力产生较大波动情况或者电网出现暂态扰动状况时，设备发生误动作现象具备易发性，不仅对新能源电站的正常并网进程形成影响，周边电网设备的运行状态也可能被牵连，现场故障处理成本得以增加。

（三）并网调度机制与消纳能力不匹配

新能源并网之后的高效消纳目标，科学的调度机制支撑成为必要条件。当前电力工程领域当中，在新能源并网调度环节，诸多痛点问题仍然存在：一是调度模式处于滞后状态，多数地区依旧对传统“计划发电”调度思路进行采用，针对新能源出力的随机性、波动性特征，考虑未达到充分程度，调度指令难以对新能源发电变化进行实时适配，部分时段之内，新能源发电“弃风弃光”现象出现，清洁能源利用率受到降低影响。二是调度信息共享未达到充分状态，新能源电站、电网调度中心、储能设备相互之间，信息互通呈现不畅情况，调度中心对于新能源发电实时数据、储能设备运行状态无法进行全面掌握，新能源发电同储能、负荷的协同调度工作难以实现[4]。三是分布式新能源并网调度工作面临较大难度，分布式光伏、风电大多对配电网进行接入，分布范围呈现广泛态势、单体容量处于较小程度，传统集中调度模式难以实现覆盖目标，部分分布式新能源实施并网之后，电网调度工作的有效参与难以达成，消纳能力受到进一步制约[5]。

二、电力工程中新能源并网技术的优化路径

（一）基于出力特性的并网控制技术优化

针对新能源出力产生波动问题，并网控制技术的优化操作成为提升电网适配性的核心内容，现场实操需求需加以结合，从功率预测环节、无功调节环节、调频优化环节三个方面展开入手操作。功率预测优化路径里，丢弃传统单一型气象数据预测范式，联合电力工程场地的历史发电资料、设备运转形态，运用“气象数据与现场实测数据”交融的预测办法，借助优化算法订正预测误差，提高短期阶段、超短期时段功率预测精准程度。譬如说，光伏电站并网进程当中，能够借助加装现场光照感应装置、温度感应器件，实时收集环境参量，联合本地气象部门的精确预报内容，调整功率预测成果，给并网调度工作提供可靠参照依据[6]。

（二）并网设备的适配升级与改造

并网设备的优化升级任务需立足于电力工程现场的设备现实状况和运行需求情况，把目光聚焦于逆变器装置、开关设备本体、测控装置主体三大核心设备对象，提升设备的兼容性能、稳定性能和智能化水准高度[7]。在逆变器升级工作方面，除开强化无功调节功能作用，还需要优化逆变器的低电压穿越能力水平，让其在电网产生低电压扰动现象之时，能够维持并网运行状态，防止逆变器脱离电网引发电网故障问题。针对分布式新能源并网的特征特点，研发小型化结构、模块化构造的并网逆变器设备，提升逆变器在复杂配电网环境条件中的适配能力程度，同时简化安装调试操作流程，满足现场分散式并网的实际需求状况。

（三）并网调度机制的完善与创新

调度机制的优化工作需贴合电力工程现场的调度实际情形，冲破传统调度模式的局限范围，构建“协同调度运作、信息共享流通、精准调控操作”的新型并网调度体系架构。首先来讲，建立新能源发电系统与储能装置、负荷体系、常规电源结构的协同调度机制模式，将储能设备当作新能源并网调度的重要支撑力量，通过储能设备的充放电调节手段，平抑新能源出力波动现象，提升新能源发电的可调度性能水平[8]。例如在集中式风电电站并网过程中，配套建设储能电站设施，调度中心依据风电出力预测数据资料、电网负荷变化情况，制定储能电站的充放电计划方案，达成风电与储能的协同运行状态，提升风电消纳效率指标。其次一点，搭建一体化结构的调度信息共享平台系统，整合新能源电站实体、电网调度中心机构、储能设备本体、用电负荷体系的实时运行数据内容，实现数据互通互联局面、实时共享状态。通过平台系统对各类数据进行汇总分析处理，给调度指令的制定工作提供全面依据支撑，避免由于信息不对称情况导致的调度偏差问题。针对分布式新能源并网调度难度较大的状况，采用“集中调度管理与分布式调控操作”相结合的模式形态，在配电网层面设置区域调度节点单元，负责区域范围之内分布式新能源的并网调度工作，与上级调度中心机构协同配合行动，实现全网新能源并网的精准调控目标。最后一项，优化新能源并网调度策略规划，丢弃传统“计划优先”的调度思维理念，采用“市场化运作与技术化支撑”的调度模式体系，联合新能源发电特性属性和电网运行状态情形，动态调整调度指令内容。例如，当新能源释放充足并且电网负载处于低位状况时，优先对新能源发电进行调度操作，引导储能装置开展充电行为、可调节负荷实施错峰用电活动；当新能源释放不足之际，对火电、储能装置进行协调以补充电能，保障电网供电维持稳定状态。同时，构建新能源并网调度的容错机制体系，针对新能源释放预测产生偏差所带来的调度风险情况，预留一定量的调度储备容量数值，提升调度系统的灵活程度和可靠性能[9]。

三、新能源并网优化技术的实际应用场景

（一）集中式风电电站并网应用

A北方区域的集中式风电电站项目，总体装机容量达到500MW规模，在前期并网运行过程当中存在释放波动幅度较大、

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

电网电压稳定性能较差、弃风比率较高等方面的问题。依据前文所述的优化路径内容，对该电站的并网技术实施升级改造工作：在控制技术领域层面，对风机变桨距控制算法进行优化处理，使风机释放趋于平滑状态，同时对并网逆变器进行升级操作，加装动态无功补偿装置设备，构建联合无功调节体系结构，提升电网电压的稳定性能；在设备改造领域层面，更换具备低电压穿越能力的并网开关设备装置，升级测控装置设备，实现并网数据的实时监控功能与故障预警功能；在调度机制领域层面，配套建设100MW规模的储能电站项目，接入区域电网调度信息共享平台系统，实现风电能源与储能资源的协同调度模式。改造工作完成之后，该风电电站的功率预测精准程度提升至85%以上水平，释放波动幅度降低30%比例，电网电压偏差控制在允许范围之内区域，低电压穿越能力获得显著提升效果，未再出现逆变器脱网现象问题。同时，通过储能资源的协同调度方式，弃风比率从改造工作实施之前的12%降至5%以下范围，清洁能源消纳效率实现大幅提升态势，不仅对电站的稳定运行状态提供了保障支持，还为区域电网的安全高效运行局面提供了支撑作用，充分验证了优化技术在集中式风电并网场景中的实际效能表现[10]。

（二）分布式光伏并网应用情形

A城市工业园区的分布式光伏项目工程，总体装机容量为50MW规模，采用“自发自用、余电上网”模式实施并网操作，前期并网之后出现部分台区电压超越上限数值、三相电压呈现不平衡状态、调度响应出现滞后情况等方面的问题。针对这些现场存在的痛点内容，实施并网技术优化工作：在控制技术领域层面，采用“光照实测数据+气象预测信息”的融合预测方法方式，提升光伏释放预测的精准程度，同时为每台逆变器加装快速无功调节模块装置，实时调整无功输出状态，解决电压越限问题情况；在设备适配领域层面，选用小型化、模块化结构的并网逆变器设备，优化逆变器的安装布局方案，配合使用三相平衡装置设备，改善三相电压不平衡现象状态；在调度机制领域层面，搭建园区级别调度信息平台系统，整合光伏发电数据信息、园区用电负荷数据信息、储能装置运行数据信息，实现分布式光伏能源与园区负荷、储能资源的协同调度模式。优化落实后，园区光伏并网台区的电压越限率实现归零，三相电压不平衡度实时控制在2%范围之内，调度指令响应时长缩短到达秒级阶段，余电上网效能获取显著提升。同步，经由协同调度模式，园区光伏自发自用比率提升至70%数值以上，有力降低了园区用电成本支出，给分布式光伏在工业园区范畴的并网应用供给了可复制的实操经验内容，展现出优化技术的接地属性和实用特征。

四、结论

新能源并网技术的优化举措与应用实践，属于解决电力工程领域内新能源并网痛点问题、推动清洁能源高效形态融入电网体系的关键实施举措。当前时期新能源并网工作面临出力特性状况与电网适配性能不足情况、设备兼容性能欠缺情形、调度机制运行滞后状态等核心存在问题，此类问题一概来源于现场实际运行状况需求与技术条件、设备设施、运行机制的不相匹配现象。通过依托出力特性基础的并网控制技术优化手段，可有效实现平抑新能源出力波动效果，提升电网适配能力水平；借助并网设备的适配升级操作与改造工作，能够增强设备运行稳定性和兼容性能，降低现场故障发生风险概率；通过并网调度机制的完善过程与创新活动，可提升新能源消纳效率程度，达成多能源协同运行模式。从集中式风电项目、分布式光伏项目的实际应用场景视角观察，优化处理后的并网技术可以精准实现解决现场运行难题目标，提升新能源并网的稳定性能和高效性能，兼顾技术可行属性与现场实操属性，为电力工程领域内新能源并网项目的落地实施提供可靠支撑力量。由此可见，新能源并网技术的优化工作不可脱离现场实际状况，唯有立足电力工程的实操需求内容，针对性解决适配问题、设备问题、调度问题等核心存在问题，方可真正发挥清洁能源的优势特点，推动能源结构转型进程。

参考文献

[1]孙文锋 . 电力工程中电气设备状态监测与故障诊断 [J]. 灯与照明 ,2025,49(06):170-172.

[2]敖呈如 . 浅析电气自动化技术在电力工程中的运用 [J]. 中国设备工程 ,2025,(21):236-238.

[3]唐炳天 . 材料防伪与质量监督在电力工程中的应用探索 [J]. 中国品牌与防伪 ,2025,(14):160-162.

[4]张晓芳 . 电力工程中的智能配电网与照明控制系统的融合研究 [J]. 中国照明电器 ,2025,(10):151-153.

[5]朱建宁 , 张烨晔 . 电力工程中微电网并网关键技术研究及其对电网影响的分析 [J]. 建设科技 ,2025,(S1):79-81.

[6]稔健效 , 董吉勇 . 智能化电力工程中发电侧变压器监测与评估研究 [J]. 灯与照明 ,2025,49(05):148-150.

[7]孙超 . 电力工程中的施工管理与质量控制研究 [J]. 价值工程 ,2025,44(28):28-31.

[8]黎佳慧 , 陈李丰 , 王振 , 郑昌吉 , 郑理文 . 电力工程中的智能化计量方式分析 [J]. 电子技术 ,2025,54(09):200-201.

[9]项灵军 , 马钢成 , 程雄 , 傅骏峰 . 电力工程中输电线路智能化施工技术的应用研究 [J]. 仪器仪表用户 ,2025,32(09):79-80+83.

[10]董汝月 , 衣明利 . 新能源在城市电力工程施工中的应用研究 [J]. 城市建设 ,2025,(19):36-38.

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

基层电力企业安全管理体系构建与风险防控策略研究

徐利芹
国网团风县供电公司，湖北 黄冈 438000
DOI:10.61369/EPTSM.2026020004

摘　　要： 基层电力企业身为电力系统的“神经末梢”，径直负担着电力输送、设备运维、客户服务等基础事宜，其安全管理水准径直关联到区域电力供应的稳固性、员工人身安全以及社会公共利益。当下，基层电力企业受作业环境繁杂、人员能力高低不一、设备老化更新迟缓等要素作用，安全管理依旧存在体系不完善、防控举措落地困难等状况。本文结合基层电力企业工作实况，从组织架构、制度流程、人员管理、设备运维四个层面，探究安全管理体系的搭建途径，同时针对作业现场、设备运行、应急处置等核心风险点，提出针对性防控策略。

关 键 词： 基层电力企业；安全管理体系；风险防控；运维管理

Research on the Construction of Safety Management System and Risk Prevention and Control Strategies in Grassroots Power Enterprises

Xu Liqin
State Grid Tuanfeng County Power Supply Company, Huanggang, Hubei 438000

Abstract: As the "nerve endings of the power system, grassroots power enterprises directly bear the basic tasks of power transmission, equipment operation and maintenance, and customer service. The level of safety management is directly related to the of regional power supply, the personal safety of employees, and the public interest of society. At present, due to the complex working environment, uneven personnel capabilities, and slow equipment and renewal, there are still problems such as imperfect safety management system and difficulty in implementing prevention and control measures in grassroots power enterprises. This article, based on the actual situation of grassroots enterprises, explores the construction path of safety management system from four levels: organizational structure, system process, personnel management, and equipment operation and maintenance. At the same time, targeted prevention control strategies are put forward for key risk points such as operation site, equipment operation, and emergency disposal.

Keywords: grassroots power enterprises; safety management system; risk prevention and; operation and maintenance management

引言

电力行业作为国民经济的支柱产业，安全生产是底线亦是红线。基层电力企业直面一线作业情景，包含农网改造、线路巡检、故障抢修、台区运维等多项事务，作业点众多、线路漫长、覆盖面广泛，且受自然环境、人为操作、设备状态等多重要素干扰，安全风险隐患点众多且隐蔽性较强。近些年，随着农村电网升级改造、新能源并网等工作推进，基层电力作业的繁杂性和不确定性进一步增强，传统粗放形式的安全管理模式已难以契合新形势需求。搭建科学完善、贴合基层实际的安全管理体系，强化风险精准防控，成为基层电力企业破解安全管理难题、保障电力供应安全稳定的关键[1]。本文基于基层电力企业工作痛点，深入剖析安全管理体系搭建的核心要素，探寻切实可行的风险防控策略，助力基层电力企业达成安全管理规范化、精细化、长效化的目标。

一、基层电力企业安全管理体系搭建的核心途径

（一）健全权责清晰的组织管理架构

基层电力企业安全管理的核心在于责任落实，需要搭建“纵向至底、横向至边”的组织架构，规避责任虚化、推诿扯皮。一方面，成立以企业负责人为组长的安全生产领导小组，将安全管理责任纳入各部门、各岗位绩效考核核心指标，明确管理层、运维部、营销部、班组等不同层级的安全职责，形成“一把手”负

作者简介：徐利芹（1993.01-），女，汉族，湖北省武汉市人，学历：大学本科，职称：中级职称，研究方向：电力安全管理。

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

总责、分管领导具体落实、班组负责人直接管理、岗位人员守底线的责任链条。另一方面，结合基层班组作业实际，设立专职安全员，明确其现场监督、隐患排查、培训指导的核心职能，确保每一项作业、每一台设备均有专人负责。同时，建立跨部门协同机制，针对线路改造、联合抢修等工作，统筹运维、营销、调度等部门力量，规避各自为政，形成安全管理合力[2]。

（二）构造适配实践的制度流程架构

制度作为安全管控的基石，基层电力单位需舍弃照抄上级文书、脱离实况的制度创设范式，联结一线作业场景改进健全制度流程。于制度维度，聚焦基层高处作业类别，制订具有针对性的安全管理制度，像线路巡查安全规范、台区运维操作程序、故障修理安全细则等，明晰不同作业的风险节点、操作流程、安全防护规定，使员工“有典可查、有矩可守”。同时，精简制度表述，规避艰深难懂的专业语汇，运用图文融合、条款细化的手段，便捷基层人员迅速领会。在流程方面，优化作业审批、隐患处理、应急上报等关键流程，削减非必要的审批环节，匹配基层作业“急遽、快速、繁杂”的特性[3]。譬如，针对紧急故障修理，构建简化审批流程，保证抢修人员在落实安全防护的基础上迅速施行作业；针对隐患处理，明确排查、登记、整改、复核的闭环流程，防止隐患“挂账”“漏改”。另外，创设制度动态更新机制，结合作业实际变动、设备更新换代、上级政策调整等情形，定期修订健全制度流程，保障制度的适配性和时效性。

（三）强化精准赋力的人员管理架构

基层电力单位安全管控的关键在于人员，需针对基层人员能力良莠不齐、年龄结构老化、安全意识薄弱等难题，搭建精准赋力的人员管理体系。其一为增强安全意识培育，摒弃“重生产、轻安全”的错误认知，借助班前会安全提示、典型事故案例解析、现场安全警示教育等形式，使人员直观感知安全风险的危害性，将安全意识渗入日常作业的每一处环节[4]。针对基层老员工经验丰沛但易存侥幸心理的状况，着重强调规范操作的重要意义；针对新入职人员，开展岗前安全集中培训，确保掌握基础安全知识和操作技能后始得上岗。其二为提升技能实操水准，聚焦基层核心作业技能，开展常态化实操培训，如线路接线、设备巡查、故障排查、安全工器具运用等，邀请经验丰富的老员工担任导师，采用“手把手”教学、现场模拟操作的途径，提升人员实操能力。同时，定期组织技能竞赛、应急演练，以竞赛促进学习、以演练促进实干，使人员在实战化场景中熟练掌握安全技能和应急处置办法。其三为完善人员激励约束机制，将安全表现与绩效薪酬、评优评先、岗位晋升直接关联，对严格遵守安全制度、及时排查重大隐患的人员给予表彰奖励；对违规操作、造成安全隐患或事故的人员，严肃追究责任，形成“奖优罚劣”的明确导向。

（四）构造全程存在周期的设备运维架构

设备作为电力生产的核心承载物体，基层电力企业设备具备数量较多、分布范围较广、部分设备呈现老化程度较深的特征，构造全程周期的设备运维架构成为保障安全的紧要环节。其一为加强设备准入环节的管理工作，于设备采购以及验收的环节之中，严格施行质量关卡的把控举措，优先选用与基层作业环境相适配、具备较高可靠性、维护操作较为便捷的设备，坚决制止不合格设备投入使用流程。进行验收操作时，组织技术人员与运维人员实施联合检查活动，保证设备参数达到标准要求、配件处于齐全状态、性能维持良好水平。其二为落实日常运维保养任务，制定具备针对性的设备运维规划方案，结合设备类型、运行时间年限、作业环境等方面的因素内容，明确巡检时间周期、巡检具体内容、保养实施方法，例如针对变压器、断路器等关键类别的设备开展每月至少一次的巡检作业，针对线路绝缘子、杆塔等设施定期实施清洁以及加固的工作内容。在巡检进程当中，采用“望、闻、问、切”手段与简单仪器检测方式相结合的模式，及时发现设备发出异响、产生发热现象、出现渗漏问题等方面的隐患情况，做好巡检记录文档的制作工作，构建设备运维档案体系。其三为推动老旧设备更新改造进程，针对运行时间年限较长、性能出现下降趋势、故障发生频率较高的老旧设备，制定分阶段的更新改造规划方案，优先对影响供电安全的关键设备以及线路实施改造作业。在改造进程期间，严格依照安全规程开展施工操作，做好现场安全监护工作事项，保证改造工作质量以及作业过程安全。与此同时，加强设备退役环节的管理工作，针对达到使用时间年限、无法进行修复操作的设备，及时开展报废处置工作，避免因违规继续使用而带来安全风险问题[5]。

二、基层电力企业安全风险防控的关键策略

（一）加大作业现场风险防控力度

作业现场属于安全风险的高发区域，需要严格落实执行现场安全管控相关措施，规范作业操作流程。其一为做好作业前期的准备工作内容，开展作业现场勘查活动，排查周边环境状况、设备运行状态、天气条件因素等方面的风险要素，制定专项安全方案以及应急处置预案内容，明确作业人员分工情况、安全防护措施要求以及注意事项细则。与此同时，办理相关作业许可审批手续，配备齐全安全工器具、防护用品以及应急物资装备，对安全工器具实施提前检查操作，保证其性能处于良好状态。其二为严格执行现场安全监护管理制度，在作业过程期间，专职安全员实施全程在场监护工作，重点监督作业人员是否进行规范操作、安全防护措施是否落实到位、作业操作流程是否符合标准要求，及时制止违规操作行为现象。针对高空作业、带电作业等高危作业类型，增加监护人员配置数量，设置安全警示区域范围，严格禁止无关人员进入作业现场区域。其三为做好作业后期的复盘总结工作，在作业完成之后，组织作业人员对现场进行清理操作，检查设备运行状态情况、线路连接质量状况等内容，保证无安全隐患问题遗留。与此同时，召开复盘总结会议，梳理作业过程当中存在的问题情况，分析问题产生原因，优化作业操作流程以及安全措施内容，避免同类问题重复发生的现象。

（二）强化特殊场景风险管控

基层电力作业受自然环境作用较强，雷雨、台风、暴雨、高温、严寒等特殊气象及偏远山区、农田周边等特殊地域，安全风

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

险明显抬升，需加强针对性防范。于特殊天气层面，构建天气预警联动机制，及时留意气象部门发布的预警讯息，预先终止高空、户外作业，将作业人员、设备迁移至安全地带。雨后、雪后及时实施线路、设备巡查，排查线路覆冰、杆塔倾斜、设备进水等隐患，确认安全之后方可恢复作业。在高温、严寒天气，落实人员防暑、防寒举措，调整作业时序，避开高温时段和严寒时段，同时加强设备温度监测，防范设备因高温过载、低温凝露产生故障。在特殊区域方面，针对偏远山区线路巡查，预先规划巡查路径，配备通讯设备、急救物资，杜绝单人巡查；针对农田周边、施工区域线路，强化安全警示宣传，设置防护围栏，定期排查线路被农作物缠绕、施工机械碰撞等隐患，及时与农户、施工单位沟通协商，做好安全防护。

（三）健全应急处置风险防控

基层电力企业突发安全事件多发，健全应急处置体系是降低事故损害、防控次生风险的核心。其一，完善应急预案体系，结合基层常见安全事故类型，如线路故障、设备损坏、人身触电、火灾等，制定针对性的应急处置方案，明确应急组织机构、处置流程、责任分工、物资保障等内容，方案要简洁实用、具备可操作性，避免形式化倾向。其二，强化应急物资保障，结合应急处置需求，储备充足的应急物资，如急救药品、抢修工具、备用设备、照明器材、通讯设备等，定期对物资进行检查、维护、更新，确保应急时刻能够快速调配。同时，合理布置应急物资存放点，便于一线作业人员取用。其三，提升应急处置能力，定期组织应急演练，模拟各类突发安全事件，使员工熟练掌握应急响应、现场处置、人员救援、设备抢修等流程，提升协同作战能力。演练之后及时复盘，查找方案漏洞和处置短板，优化完善方案和处置流程。此外，建立与当地应急、消防、医疗等部门的联动机制，遭遇重大安全事件时，及时请求支援，形成应急处置合力。

（四）构建全员融入风险防控架构

安全风险防控非单一机构、少量人员之事务，需搭建全员参与、全流程管控的风险防控框架。某方位，强化安全宣导引导，借助企业公告栏、班组网络群组、班前会议等通道，传播安全知识、风险辨别办法、应急处理技能等内容，提升全体人员风险防范意识与能力，激励职工主动排查身旁的安全隐患，造就“人人论安全、事事论安全、时时论安全”的良好架构。某层面，设立隐患排查激励机制，创设隐患排查奖励资金，对职工主动呈报的安全隐患，经核查后给予对应奖励，充分激发职工参与隐患排查的积极性与主动性。同时，疏通隐患上报路径，开启线上线下呈报途径，确保职工察觉隐患后能够及时呈报、迅速处置。又节点，定期举办安全管理座谈会议，邀请基层职工围绕安全风险防控、制度流程优化、设备运维改进等方面贡献计策，充分吸收职工的合理建议，使安全管理更贴合基层实况，提升全员参与的主动性与自觉性。后续应注重隐患排查的闭环管理，对上报隐患建立分级响应与跟踪督办机制，确保整改措施落实到位。同时将风险防控成效纳入团队及个人绩效评估，形成长效约束与激励，推动全员从“要我安全”到“我要安全”的深层转变，筑牢企业安全生产的群众根基。

三、结论

基层电力企业安全管理体系搭建与风险防控属于系统性、长期性工程，需立足于基层作业实际状况，舍弃形式主义与理论化架构，聚焦组织、制度、人员、设备四大核心层面，构建科学完备、可落地的安全管理体系，同时针对作业现场、特殊情景、应急处置等核心风险点，施行精准防控策略，筑牢安全生产屏障。基层电力企业应始终秉持“安全为首、预防为主、综合整治”的方针，以责任落实为核心、以制度流程为支撑、以人员赋能为关键、以设备运维为根基，持续优化安全管理模式，强化风险精准防控，不断提升安全管理质效，为区域电力供应安全稳定与企业高质量发展提供坚实保障。

参考文献

[1] 刘金洪，蔡鑫贵 . 基层电力生产企业安全治理体系建设的思考与实践 [J]. 广西电业，2024，(10)：52-55.

[2] 荆俊婷 . 电力企业加强安全管理文化建设的路径探讨 [J]. 企业改革与管理，2023，(13)：160-161.

[3] 张鑫，王玥，赵文静 . 基层电力企业安全文化宣传新策略探讨 [J]. 电力安全技术，2023，25 (01)：48-52.

[4] 胡润生 . 浅谈电力企业基层安全生产管理 [J]. 农电管理，2021，(12)：49-50.

[5] 陈伟 . 电力企业基层安全生产管理浅谈 [J]. 农电管理，2020，(10)：54.

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

电力能源企业数字化转型与管理模式创新研究

陈文锋
国家电投集团数字科技有限公司，北京 102209
DOI:10.61369/EPTSM.2026020006

摘　　要： 在能源革命与数字经济深度融合的大背景下，电力能源企业正面临多重挑战，数字化转型已成为其实现高质量发展的必由之路。管理模式创新作为数字化转型的重要支撑，对于企业适配新型电力系统具有至关重要的意义。文章聚焦电力能源企业数字化转型进程中的管理模式革新，从优化资源配置效率、构建敏捷决策体系这两个核心维度，深入剖析了管理模式创新的关键价值。围绕构建数据驱动的动态决策中枢、打造智能协同的柔性组织架构、实施全生命周期数字化资产管理，以及构建用户导向的数字化服务生态这四大关键方向，提出了一系列创新策略。这些策略旨在帮助企业实现从传统经验驱动向数据驱动的转型跨越，为能源行业的绿色低碳发展和可持续运营增添新动力。

关 键 词： 电力能源企业；数字化转型；管理模式

Research on Digital Transformation and Management Model Innovation of Electric Power Enterprises

Chen Wenfeng
State Power Investment Corporation Digital Technology Co., LTD., Beijing 102209

Abstract: Against the backdrop of the deep integration between energy revolution and digital economy, power enterprises are confronting multiple challenges, with digital transformation emerging as the essential pathway to high-quality development. Management model innovation, serving as a critical pillar of digital transformation, holds vital significance for enterprises adapting to the new power system. This article focuses on management model innovation during the digital transformation process of power enterprises, conducting an in-depth analysis of its key value from two core dimensions: optimizing resource allocation efficiency and establishing agile decision-making systems. Centered around four pivotal directions—building a data-driven dynamic decision-making hub, creating intelligent collaborative flexible organizational structures, implementing full lifecycle digital asset management, and constructing user-oriented digital service ecosystems—the paper proposes a series of innovative strategies. These strategies aim to help enterprises achieve the transition from traditional experience-driven to data-driven approaches, injecting new momentum into the green and low-carbon development and sustainable operations of the energy industry.

Keywords: power energy enterprises; digital transformation; management model

电力能源企业是国民经济体系的核心支柱力量，长期以来，它们依托规模化生产布局与集中式管控体系，在保障能源供给稳定性、支撑国民经济持续发展等方面承担着重要职责。然而，随着能源消费结构不断调整优化，可再生能源在能源体系中的渗透程度逐步加深，用户对能源服务的需求也朝着多元化、个性化方向持续升级，传统发展模式固有的效率低下、市场响应滞后等问题愈发凸显，已难以适应新时代能源行业的发展态势。值得一提的是，大数据、人工智能、物联网、区块链等数字技术正以迅猛之势重构各行业发展生态，这为电力能源企业突破现有发展瓶颈、实现转型升级提供了全新的技术支撑与实践路径。数字化转型不仅能帮助企业梳理并优化生产运营全流程，提高能源资源利用效率，降低运营成本，还能通过构建数据驱动的决策机制，增强企业对市场变化的感知能力，激发企业创新活力，进而打造适配未来能源市场竞争格局的新型管理体系。因此，开展电力能源企业数字化转型与管理模式创新的研究，对于推动整个电力能源行业向高质量发展转型具有迫切的现实意义和实践价值。

作者简介：陈文锋（1982.05-），男，汉族，江西乐平人，学历：本科，职称：工程师，研究方向：能源企业管理、电力能源行业。

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

一、电力能源企业基于数字化转型的管理模式创新意义

（一）优化资源配置效率

在传统管理模式下，电力能源企业的能源生产、输送及消费等各环节存在明显的信息割裂问题，这使得资源调配工作不仅存在滞后性，还伴随着资源冗余浪费现象。数字化转型的核心在于搭建覆盖企业全产业链的数字化管理平台，依托该平台，企业能实现对设备运行状态的实时监测、能源流转全过程的清晰呈现，以及对市场能源需求的精准研判，进而形成各环节协同联动的运行机制。这一变革有效打通了各部门间的数据壁垒，借助算法模型的迭代优化，科学调整发电计划与电网调度方案，促使能源供给与市场需求在时间和空间维度上达成动态平衡。与此同时，数字化管理工具的应用推动运维工作模式发生了根本性转变，从以往的被动故障响应升级为主动预防管控。通过设备健康状态预判及故障提前预警系统的运行，企业能最大限度降低非计划停机发生率，充分释放被低效环节占用的资源效能。这种全要素生产率的提升，将数据纳入新型生产要素范畴，通过数字化管理模式创新，推动传统电力能源企业向数据驱动型组织转型[1]。

（二）构建敏捷决策体系

电力能源企业传统的层级式决策流程，受限于信息传递过程中的损耗以及过长的决策链条，难以有效应对新能源占比持续提升所带来的能源系统波动性挑战。数字化管理通过搭建“数据中台+业务中台”的双中台架构，将市场价格信号、政策调整动态、气候环境变化等外部影响因素实时转化为可量化的决策参数，支撑企业在分钟级时限内完成负荷测算、电价调控、储能资源配置等关键决策事项[2]。这种决策敏捷性，不仅体现在对常规市场波动的快速适配，更体现在对极端天气、设备突发故障等紧急情况的快速预案启动能力。依托数字孪生技术构建的虚拟电厂仿真模型，管理者可提前模拟不同运行场景下的系统状态，制定多套应急处置方案，将突发风险的影响范围控制在最小单元。更关键的是，数字化管理提升了决策全过程的透明度，帮助企业精准把握政策导向与市场发展趋势，在能源结构转型进程中抢占战略主动。这种从经验主导决策向数据支撑决策的转变，本质上就是构建起适配新型电力系统的现代化风险管理体系[3]。

二、电力能源企业基于数字化转型的管理模式创新策略

（一）构建数据驱动的动态决策中枢

电力能源企业推进数字化转型，应彻底摒弃传统依赖经验判断的决策模式，以数据资产为核心重构决策体系，实现管理决策的科学化与精准化。为达成这一目标，企业需率先搭建全域数据采集网络[4]，全面覆盖发电环节的设备运行参数、输电环节的线路损耗数据、配电环节的负载波动信息以及用电环节的用户消费数据。通过数据整合技术，形成涵盖能源全产业链的多维度数据资源池，为决策分析提供坚实的数据支撑。在积累数据资源的基础上，企业可引入机器学习算法构建动态预测模型，针对电力负荷变化、关键设备运行状态、电力市场价格波动等核心变量开展实时仿真推演，精准捕捉数据背后的运行规律和市场趋势，为决策层呈现全景式数据视图，助力其快速识别潜在的运营风险和市场机遇[5]。

要注意的是，构建动态决策中枢，不仅对企业技术层面的核心能力提出了要求，需要强化数据治理体系建设，规范数据采集、存储、处理的全流程标准，更要同步优化组织架构。企业可通过设立跨部门数据治理委员会，统筹协调各业务部门的数据管理工作，打破部门间的信息壁垒和数据孤岛。在严格遵循数据安全管理规范的前提下，实现数据资源在企业内部的高效流转与共享。同时，企业需着力培养复合型决策人才团队，重点吸纳既精通电力能源核心业务、熟悉行业运营规则，又具备数据分析和模型构建能力的专业人才，推动数据洞察高效转化为可落地的战略举措和管理动作。最终实现企业管理从被动应对各类突发情况，向主动预判、提前布局的现代化管理范式转变，为数字化转型筑牢决策根基[6]。

（二）打造智能协同的柔性组织架构

在电力能源企业数字化转型进程中，企业需要突破传统层级式刚性结构的局限，向网状互联的柔性组织形态转型。这种转型并非简单地打破部门边界，而是要依托数字化平台，对内部工作流程和知识流转路径进行系统性重塑，以提升组织对市场动态和技术变革的快速响应能力。在具体实施过程中，企业应构建以项目制为核心的敏捷工作小组，明确前端执行团队的权责范围，赋予其适度的自主决策权限，减少层级审批对工作效率的束缚[7]。同时要借助数字化协作工具搭建跨部门资源调度体系，实现人力、技术、资金等核心资源的动态配置与高效整合。以新能源项目开发为例，市场调研、技术研发、财务核算等不同职能部门的工作人员，可依托统一的数字化数据平台，实现项目全流程信息的实时共享与同步协作，共同推进方案的论证与优化。这取代了传统模式下逐级上报、分段推进的工作方式，大幅缩短了项目落地周期。

此外，企业还需同步建立完善的内部知识共享机制，通过数字化手段梳理、沉淀员工积累的隐性工作经验和技术诀窍，将其转化为可复用、可传播的数字知识资产。借助智能检索与推荐系统，将这些知识资产精准推送至一线工作场景，为员工开展业务、制定决策提供实时支撑，提升整体工作质量和专业能力。这一变革的关键在于精准平衡集权与分权的关系，在保持企业整体战略方向一致、核心管控有效的前提下，充分释放基层团队的创新积极性和执行主动性，逐步构建自下而上、上下联动的良性创新生态，为数字化转型的深入推进提供组织保障[8]。

（三）实施全生命周期的数字化资产管理

电力能源企业普遍具有资产密集的显著特征，这一特性决定了其数字化转型工作需优先以资产全生命周期管理作为核心突破口，通过全链条数字化管控来破解传统资产管理的痛点。在资产规划设计环节，企业可依托数字孪生技术搭建与实体资产精准对应的虚拟模型。通过模拟多种运行工况下的设备性能参数与运行状态，对初始配置方案进行多维度优化调整，从源头上提升资产配置的科学性与合理性。进入资产建设实施阶段，企业可全面部

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

署物联网传感器，实现施工全过程数据的实时采集与传输。结合建筑信息模型（BIM）技术构建三维可视化管理平台，将施工进度、工程质量、安全管控等核心要素纳入统一管控体系，实现施工各环节的精准化、透明化管理，有效规避施工偏差与安全风险。

在资产运营维护阶段，企业可应用边缘计算设备，实现对关键生产设备的实时健康状态监测。搭配预测性维护算法对设备运行数据进行深度分析，提前识别潜在故障隐患并制定针对性处置方案，大幅降低非计划停机频次，使非计划停机时长控制在行业平均水平的三成以内。当资产进入退役处置阶段，企业可借助区块链技术对资产处置的全流程信息进行记录与存证，确保资产报废、拆解、回收等各环节均符合行业规范与监管要求，实现处置流程的可追溯、可核查。这种覆盖资产全生命周期的数字化管理模式，不仅能有效延长资产使用寿命、提升资产运营效率，还能通过持续的数据沉淀构建完善的资产知识库，为后续资产投资、更新改造等决策提供精准量化支撑。这有助于推动企业资产管理模式从传统经验驱动向数据驱动转型，实现资产管理质效的全方位提升[9]。

（四）构建用户导向的数字化服务生态

在能源消费结构深度调整与产业变革的大背景下，电力能源企业的功能定位正发生根本性转变，逐步突破传统单一电力供应商的局限，向综合能源服务提供商转型过渡。这一转型趋势决定了企业管理模式的创新必须以用户需求为导向，将用户诉求贯穿于管理优化与服务升级的全流程。为此，企业需优先搭建一体化能源互联网平台，有效整合分布式能源项目、储能系统、电动汽车充电网络等多元市场主体，打破传统能源供应的集中化模式，构建去中心化的能源交易与服务体系。

依托平台，企业可运用大数据技术对用户用能数据进行深度挖掘与分析，精准描绘用户用能特征与行为模式，精准识别用户潜在的节能改造、用能优化等需求，进而提供针对性的个性化能源解决方案。具体而言，针对工业用户，企业可开展专业化能效诊断服务，结合生产工艺特点提出流程优化建议，助力其降低单位产值能耗和用能成本；针对居民用户，可推出差异化智能用电套餐，依托峰谷电价机制引导用户合理调整用电时段，实现错峰用电与节能降耗。在此基础上，企业需建立健全用户反馈闭环管理机制，全面收集服务过程中的用户意见和数据信息，并将其系统转化为产品迭代、服务优化的核心依据，形成“需求精准洞察－服务精准设计－价值高效实现－数据反哺优化”的良性循环。这种以用户为核心的数字化服务生态，不仅能有效提升用户满意度和忠诚度，还能借助数据增值服务拓展盈利空间，推动企业发展模式从传统规模扩张型向质量效益型、价值创造型转变[10]。

三、结语

当前，新型电力系统建设正稳步持续推进，数字技术与能源产业的融合也日益加深，电力能源企业仍需在实践中不断探索优化。未来，企业需进一步增强数据治理能力，加强人才队伍建设，平衡好技术创新与风险管控之间的关系，持续推动管理模式与数字化技术的深度适配融合。唯有如此，企业才能不断提升核心竞争力，在能源革命与数字革命的浪潮中抢占战略先机，为保障能源安全、推动能源行业高质量发展以及助力“双碳”目标实现贡献更大力量。

参考文献

[1]胡海洋 . 电力企业数字化物资管理实践研究 [J]. 销售与管理 , 2025, (02): 21-23.

[2]许逸飞 . 基于负荷管理模式的电力企业数字化营销体系建设研究 [J]. 电气技术与经济 , 2025, (01): 257-259.

[3]吴超宇 . 基于数字化转型的资金集约管理模式创新实践研究——以电力企业为例 [J]. 企业改革与管理 , 2023, (22): 120-122.

[4]电力行业的数字化转型之路 [J]. 网络安全和信息化 , 2020, (02): 37-40.

[5]万伟 , 张磊 , 刘冰 . 电力企业管理创新工作要点探讨 [J]. 中国新通信 , 2020, 22(16): 143.

[6]邓灿辉 . 数字化转型背景下电力工程设计企业设计管理升级创新研究 [J]. 工程建设与设计 , 2024(17): 251-253.

[7]饶刚刚 . 能源电力行业数字化转型对企业价值创造的影响研究——以南方电网为例 [D]. 江西 : 江西财经大学 , 2022.

[8]罗鹏 , 赵卿宇 , 李佳乐 , 等 . 大数据背景下国有能源企业管理创新路径研究 [J]. 中国高新科技 , 2024(18): 145-147.

[9] 高培生 , 刘洋 , 凌嘉研 , 等 . 适应新型电力系统发展的电网企业经营管理模式研究 [J]. 电气技术与经济 , 2024(6): 274-276.

[10]杜锐 . 电网企业智能财务中台化管理体系构建研究 -- 以 S 电力公司为例 [D]. 山东财经大学 , 2023.

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

无人机在电网设备隐患排查中的应用

唐彬
国网荆州市荆州区供电公司，湖北 荆州 434100

DOI:10.61369/EPTSM.2026020007

摘　　要： 无人机凭借机动灵活、部署快速和多传感器搭载能力，在电网设备隐患排查中可实现对输电线路与变电站设备的高效巡检与影像留存。本文围绕无人机巡检平台与载荷配置、典型应用场景及隐患识别要点展开概述，并从效率、安全、质量与管理闭环等方面总结应用成效。针对气象影响、续航受限、合规管控与数据处理压力等问题，提出标准化作业、安全风险控制、数据质量规范、智能识别与协同巡检等优化策略，为电网运维数字化与智能化提供参考。

关 键 词： 无人机；电网巡检；隐患排查；红外热成像；智能识别；闭环管理

Application of UAV in Hidden Hazard Inspection of Power Grid Equipment

Tang Bin
State Grid Jingzhou Jingzhou District Power Supply Company, Jingzhou, Hubei 434100

Abstract: With high mobility, rapid deployment, and multi-sensor payloads, drones enable efficient inspection and evidence collection for power grid equipment, including transmission lines and substations. This paper outlines drone platforms and payload selection, typical application scenarios, and key points for defect identification. It also summarizes practical benefits in terms of efficiency, safety, inspection quality, and closed-loop management. To address challenges such as weather constraints, limited endurance, compliance and safety control, and heavy data processing workloads, optimization strategies are proposed, including standardized operations, risk management, data quality control, AI-assisted detection, and collaborative inspection workflows, supporting digital and intelligent grid O&M.

Keywords: UAV; power grid inspection; defect detection; infrared thermography; AI-assisted recognition; closed-loop management

引言

随着电网规模持续扩大和设备服役年限增长，输电线路与变电站设备面临的老化、松动、腐蚀、发热及外力破坏等隐患日益增多。隐患若不能被及时发现并处置，可能引发设备故障、停电事故甚至安全生产风险。因此，构建高效率、高覆盖率、可追溯的隐患排查体系，是提升电网可靠性与运维管理水平的重要基础。

目前电网巡检仍以人工步巡、车巡等方式为主。该类方式在复杂地形、跨越区段和高空部位存在可达性差、作业风险高的问题；同时受人员经验、视距条件与巡检周期限制，易出现漏检与复检成本高等情况。对突发缺陷的快速响应也较为不足，难以满足精益化运维和状态检修的管理需求。

无人机凭借机动灵活、视角多样、部署快速等特点，可搭载高清可见光与红外热成像等载荷，对高处、远距离及危险区域设备开展近距离、非接触式巡检，实现对缺陷的快速发现与图像留存。其应用有助于提升巡检效率、降低人员风险，并为后续数据分析与闭环治理提供依据。因此，研究无人机在电网设备隐患排查中的应用模式与效果评价，对推动电网运维数字化与智能化具有现实意义。

一、无人机巡检技术概述

无人机巡检是指利用具备自主或半自主飞行能力的平台，搭载多种传感器对电网设备进行近距离观测与数据采集，并通过回传或离线处理形成隐患判别依据的作业方式。与传统人工巡检相比，无人机能够在不接触带电体的前提下进入高空、跨越区段或人员难以到达的区域，具有机动性强、部署速度快、观测角度灵活等特点，逐渐成为电网精益化巡检的重要补充手段。

从平台类型看，电力巡检常用无人机主要包括多旋翼与固定翼两类。多旋翼无人机具备悬停能力，易于在杆塔、金具、绝缘子串等部位进行定点拍摄与细节取证，适合精细化巡检和缺陷复核；其不足在于航时相对较短、抗风能力受机型影响较大。固定

作者简介：唐彬（1989.05-），男，汉族，湖北荆州人，学历：本科，职称：助理工程师，研究方向：无人机、配电自动化应用。

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

翼或复合翼无人机航程远、效率高，适用于通道巡检、长距离线路快速巡视和大范围灾后排查，但因悬停与近距离机动能力较弱，通常更侧重宏观巡查与疑似缺陷定位。实际应用中往往根据地形条件、任务半径、缺陷精细度要求以及安全管控等级选择机型，并与人工登塔或地面检测形成分工协同。

在载荷配置方面，无人机巡检以可见光成像为基础，常配备高清相机、变焦云台以实现远距离取景与局部放大，满足对导线、绝缘子、金具螺栓、线夹、间隔棒及杆塔构件等外观缺陷的识别需求。红外热成像载荷用于发现连接点发热、接触不良、负荷不均等热缺陷，可在早期预警阶段提供重要线索；在光照复杂或对比度不足的场景中，还可通过多角度拍摄与图像增强提高判读可靠性。部分任务会配置激光测距、照明补光等辅助模块，以提升定位精度与夜间 / 阴影区采集质量。总体而言，载荷选择应围绕“缺陷类型—可观测特征—可用传感器”进行匹配，避免盲目堆叠导致续航下降与数据冗余。

无人机巡检作业流程通常包括任务规划、现场执行、数据处理与结果输出四个环节。任务规划阶段需完成巡检对象梳理、航线与起降点选择、禁飞区与电磁环境评估、气象窗口判定以及安全措施布置；现场执行阶段按预设航线飞行采集，并对关键部位进行多角度、不同焦段取证，同时记录杆塔编号、相位信息与拍摄时间等元数据，确保后续可追溯；数据处理阶段可采用人工判读、半自动标注或算法辅助识别，对疑似缺陷进行分类分级，并与历史台账或既往缺陷进行对比；结果输出阶段形成巡检报告或工单，明确缺陷位置、类型、严重程度、建议处置措施与复核方式，推动闭环整改。

需要强调的是，无人机巡检并非简单“拍照替代人工”，其效果取决于标准化作业、数据质量控制与管理流程衔接。一方面要通过统一的拍摄规范（角度、距离、分辨率、命名规则等）提高图像可用性；另一方面要建立缺陷样本库与判别规则，减少误报漏报，并与运维检修计划、应急抢修机制实现联动，从而真正发挥无人机在电网设备隐患排查中的效率与价值。

二、无人机在隐患排查中的具体应用场景

无人机在电网设备隐患排查中的价值，主要体现在“看得更近、覆盖更广、到达更快、留痕更完整”。结合电网运维实际，无人机应用场景可归纳为输电线路巡检、变电站设备巡检以及典型隐患识别与复核三类，并可与人工、车巡等方式形成互补。

1.输电线路隐患排查：输电线路点多、线长、分布广，且常跨越山地、河流、林区与居民区。无人机可沿通道快速巡视，对以下部位进行重点排查：导线与地线：导线断股、磨损、弧垂异常、异物挂线、阻尼线夹 / 间隔棒缺失或移位等。通过高清变焦拍摄可实现细节取证，便于后续复核与检修安排。绝缘子与金具：绝缘子破损、污闪痕迹、瓷件裂纹、复合绝缘子伞裙缺陷，及金具锈蚀、销钉脱落、螺栓松动等。无人机可利用多角度拍摄减少遮挡，提高缺陷可判读性。杆塔本体与基础：塔材变形、构件缺失、螺栓松动、塔身倾斜、基础开裂、边坡塌方等。对地形复杂或灾后场景（强风、冰雪、山火、洪涝）尤其适用，可快速定位受损区段并指导抢修。通道环境：树障超高、违章建筑、施工机械侵入、漂浮物 / 风筝线、鸟巢与动物活动等。无人机能够在不进入危险区域的情况下完成通道巡检，并对隐患点进行坐标化记录。

2.变电站设备巡检：在变电站场景，无人机更多承担“外观异常发现 + 热缺陷初筛”的角色，适用于站内巡视效率提升和特殊时段加密巡检。典型对象包括：一次设备外观检查：套管表面裂纹与污染、隔离开关机构异常、母线与引线连接部位松动、设备瓷件破损及异物搭挂等。红外热成像排查：对刀闸触头、母线搭接点、线夹、端子排等易发热部位进行热异常筛查，识别“接触不良、负荷不均、连接电阻增大”等早期风险。辅助设施与安全区域：围墙、消防通道、站内高空构架、避雷器外观、站内杂物与漂浮物风险等，适合用无人机进行快速巡视与影像留存。需要注意的是，变电站电磁环境复杂、空间相对受限，应在明确飞行边界与安全距离的前提下开展作业，必要时与站内作业许可、监护制度相衔接，确保安全可控。

3.典型隐患识别要点：无人机发现隐患通常依赖两类“可观测特征”：可见光特征：裂纹、破损、锈蚀、缺失、移位、松动、放电烧蚀痕迹、异物搭挂与通道侵入等；重点在于图像清晰度、拍摄角度与对关键部位的覆盖完整性。热特征：连接点温升异常、热斑分布不均、同相对比差异明显等；重点在于同工况对比、环境温度与风速影响控制，以及对“可疑热缺陷”的复测验证。

4.与传统方式的对比与协同：相较人工步巡 / 登塔：无人机效率更高、安全风险更低，且影像可留存便于追溯；但对极细微缺陷、隐蔽部位和触诊 / 力矩检查仍需人工补充。相较车巡：无人机不受道路条件限制，适合通道内、跨越区段和灾后快速排查；车巡更适合常态化沿线巡视与基础信息核查。相较直升机巡检：无人机成本更低、部署更灵活，更适合日常与加密巡检；直升机适合超长距离快速巡查与特定区域任务，但受成本和审批影响较大。

综合来看，无人机更适合作为电网隐患排查的“高效发现与定位工具”，在疑似缺陷识别、灾后快速摸排、危险区域取证等方面优势明显；同时通过与人工检修、地面检测手段的协同，可形成“空中发现—地面确认—闭环处置”的高效流程。

三、应用成效、问题与优化策略

无人机参与电网设备隐患排查后，整体运维模式从“周期性人工巡查”逐步向“快速发现、数据驱动、闭环处置”转变。其应用成效可从效率、安全、质量与管理四个维度进行评价，同时也暴露出气象适应性、续航能力、合规与数据处理等方面的限制，需要通过技术与管理协同优化。

1.应用成效与评估指标：效率提升：无人机可在短时间覆盖多个杆塔与通道区段，适用于加密巡检和灾后快速摸排。评估时可采用“单日覆盖里程 / 杆塔数、单缺陷发现耗时、应急响应到场时间”等指标。安全改善：减少人员攀登杆塔、进入滑坡 / 水

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

域 / 施工风险区的频次，降低高空坠落、触电与交通风险。可通过“高风险作业替代率、现场人员暴露时长”等指标衡量。缺陷发现质量提升：多角度高清取证与红外筛查，有助于发现肉眼难以稳定识别的缺陷并形成可追溯证据。可采用“缺陷发现率、漏检率、误报率、复核一致性”等指标。管理可追溯性增强：巡检影像、航迹与时间戳使得过程可审计，便于形成台账与整改闭环。可采用“工单闭环周期、缺陷复发率、资料完备率”等指标综合评估。

2.主要问题与风险：气象与环境影响显著：强风、降雨、低温、雾霾及强光逆光会影响飞行安全与成像质量；山区乱流、林区遮挡也会降低稳定性与定位精度。续航与载荷矛盾：高倍率变焦、红外、补光等载荷增加功耗与重量，导致航时缩短；长距离线路巡检需要频繁换电与转场，影响连续作业效率。合规与安全管控要求高：涉及空域管理、禁飞区、站内飞行许可及人员安全隔离；同时电网场景存在电磁环境复杂、近电作业风险、鸟群干扰等不确定因素。数据量大、处理压力高：高分辨率视频与图片带来存储与传输成本；缺陷判读依赖经验，标准不统一易导致误报漏报。成果难以闭环：若巡检结果无法与设备台账、缺陷等级与检修计划联动，容易出现“发现了但没推动处置”的断点，削弱应用价值。

3.优化策略建议：标准化作业与安全管控：建立统一的巡检SOP，包括航线规划模板、起降点选择、最小安全距离、风险分级与应急预案；在变电站等高风险区域落实监护与许可制度。对气象条件设置明确阈值，并配置必要的失联返航、避障与禁飞区校验机制，确保“可飞、能飞、飞得安全”。提升数据质量与可用性：制定拍摄规范，强化“编号—位置—相位—时间”元数据记录，保证缺陷可定位、可复核、可追溯；对红外应用建立同工况对比规则，形成温升判别基线，减少环境因素造成的误判。数据智能化处理与缺陷库建设：将巡检影像与历史缺陷样本沉淀为标准化缺陷库，推动自动 / 半自动识别模型应用，实现疑似缺陷初筛、相似缺陷检索与趋势对比，降低纯人工判读压力；同时引入抽检复核机制，持续校正算法与人员判读一致性。协同作业模式优化：构建“无人机普查—疑点复拍—地面确认—检修处置”的分层流程：无人机负责高频覆盖与快速定位，人工负责关键缺陷复核与处理决策；对长线路可采用固定翼通道巡查 + 多旋翼精细取证的组合，提高整体效率。

总体而言，无人机巡检的关键不在于“是否使用无人机”，而在于能否形成标准化、可量化、可闭环的运维体系。

四、结语

综合以上分析，无人机在电网设备隐患排查中能够有效弥补传统人工巡检在高空、远距离与复杂地形场景下的不足，通过高清可见光与红外等手段实现快速覆盖、近距离取证与风险点定位，显著提升巡检效率与作业安全性。同时，影像与航迹数据的留存增强了巡检过程的可追溯性，为缺陷分级、检修决策与闭环管理提供了数据基础。总体来看，无人机已从“辅助工具”逐步发展为电网精益化运维的重要组成部分。

参考文献

[1]缪希仁，刘志颖，鄢齐晨 . 无人机输电线路智能巡检技术综述 [J]. 福州大学学报 (自然科学版)，2020，48(2)：198-209. DOI:10.7631/issn.1000-2243.19629.

[2]王万国，田兵，刘越，刘伟，李建祥 . 基于 RCNN 的无人机巡检图像电力小部件识别研究 [J]. 地球信息科学学报，2017，19(2)：256-263. DOI:10.3724/SP.J.1047.2017.00256.

[3]刘智勇，赵晓丹，祁宏昌，李艳飞 . 新时代无人机电力巡检技术展望 [J]. 南方能源建设，2019，6(4)：1-5. DOI:10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.04.001.

[4]光明，鄂爱东，钱凤阳，苏力德，王佳琦 . 基于三维激光扫描技术的输电线路无人机巡检方法分析 [J]. 内蒙古电力技术，2019，37(1)：21-24.

[5]国家电网公司 . Q/GDW 11384—2015 架空输电线路固定翼无人机巡检系统 [S]. 北京：国家电网公司，2015.

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

典型石油勘探仪器的电路化实现与地质勘探应用研究

蓝永宗，谢培，诸梦青
杭州丰禾石油科技有限公司，浙江 杭州 310000
DOI:10.61369/EPTSM.2026020009

摘　　要： 石油作为影响国计民生的战略能源，其勘探的效率与准确度不仅影响能源开发的经济效益，还与国家能源战略安全紧密相连。对于典型石油勘探仪器而言，电路化集成是提升勘探技术主要路径之一，通过将传感采集、信号调理、数据传输等功能整合进电路系统，能在一定程度上提升仪器的稳定性、传感灵敏度以及智能调控水平。基于此，本文以典型石油勘探仪器为研究对象，阐述概念并介绍主流勘探仪器类型，分析各类仪器对应的电路化架构特点，随后对于电路化实现过程中的技术难点与重点内容进行深入分析；最后探讨在实际地质勘探场景中的具体应用路径，以期为实施复杂地质条件下的石油勘探瓶颈提供有益参考。

关 键 词： 典型石油勘探仪器；电路化；地质勘探；技术

Research on the Circuitization of Typical Petroleum Exploration Instruments and Its Applications in Geological Exploration

Lan Yongzong, Xie Pei, Zhu Mengqing
Hangzhou Fenghe Petroleum Technology Co., Ltd. Hangzhou, Zhejiang 310000

Abstract: As a strategic energy resource that affects national economy and daily life, the efficiency and accuracy of oil exploration not only impact the economic benefits of energy development but are also closely linked to national energy strategic security. For typical oil exploration instruments, circuit-based integration is one of the primary paths to enhance exploration technology. By integrating sensing acquisition, signal conditioning, data transmission, and other functions into a circuit system, this approach can improve the instrument's stability, sensing sensitivity, and intelligent control capabilities to some extent. Based on this, this paper takes typical oil exploration instruments as the research subject, elaborating on the concepts and introducing the main types of exploration instruments, analyzing the characteristics of the circuit-based architectures associated with each type of instrument. Subsequently, it provides an in-depth analysis of the technical challenges and key aspects of the circuit-based implementation process. Finally, it explores the specific application pathways in actual geological exploration scenarios, aiming to offer valuable insights for addressing the bottlenecks in oil exploration under complex geological conditions.

Keywords: typical petroleum exploration instruments; circuitry; geological exploration; technology

引言

随着全球能源需求趋势的持续增长，石油勘探也加快了向深层地层以及复杂构造区域勘探的步伐，由于传统的勘探仪器大多存在精度不够、响应慢、操作复杂等问题，无法适应目前勘探工作需求。而电路化技术的快速发展为勘探设备的升级更新提供了有利条件，利用电子电路的集成化和模块化设计，能够有效实时观察勘探信号，在进行准确分析后可以高效回传数据，有效打破了传统技术的限制。推进典型石油勘探仪器的电路化改造，是促使仪器走向智能化的关键路径，还能有效提升地质勘探数据的可靠性，优化勘探的经济效益。目前国内外相关研究大多集中在优化单一仪器的性能上，对于电路化实现的相关研究以及在不同应用场景下的相关探索都需要积极完善。本研究重点探究典型石油勘探仪器电路化的实现原理，结合实际的勘探需求提出几点具体的实施路径。

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

一、核心概念界定

石油勘探仪器的电路化实现，简单来说就是依靠电子电路技术将石油勘探过程中需要的信号采集、转换、处理、存储还有传输等功能，通过硬件电路集成搭配软件算法适配的方式进行整合，最终让仪器实现功能模块化、性能稳定化、操作智能化的技术过程。其中的核心思路就是将电路系统当成基础支撑，改变传统的机械或者模拟信号处理方式，通过数字电路和模拟电路的搭配设计，能够让仪器更好地捕捉地质异常信号，也能在一定程度上提高数据处理的效率。而地质勘探应用主要是把经过电路化改造的石油勘探仪器，用于油气储层探测、地质构造分析、资源储量评估等实际勘探场景中，根据仪器输出反馈的精准数据来支撑勘探的策略[1]。这两者之间的存在着明确的关联：电路化实现是提升仪器性能的基础保障，地质勘探应用则是检验电路化效果的主要场景，通过两者间的配合能够推动石油勘探技术进行更新升级。要搭建这样的技术体系需要整合电子信息工程、地质勘探工程、控制工程等相关学科的理论知识，需要不同领域技术进行交叉融合。

二、典型石油勘探仪器及电路化架构

（一）地震勘探仪电路化架构

地震勘探仪主要是用来采集地震波信号，进而分析地下地质构造的主要仪器，其电路化实现的核心就是做好信号采集和同步处理这两项任务。电路系统主要包括传感器接口电路、前置放大电路、滤波电路、A/D转换电路和数据传输电路这几个部分。其中传感器接口电路主要采用差分输入的设计思路，能够让地震检波器输出的信号及时稳定的接入，还能在一定程度上减少环境噪声产生的干扰；前置放大电路使用的是低噪声运算放大器，能够将微弱的地震信号适当放大到合适的幅度，其放大的倍数还能通过可编程电阻来进行动态调节；滤波电路使用的是二阶巴特沃斯低通滤波结构设计，能够过滤高频干扰信号，只留下有效的地震波频段；A/D转换电路使用的是16位的高速转换器，能够保证信号转换的准确以及实效性；数据传输电路则使用的是以太网接口技术，能够实现采集数据的远距离传输。

（二）测井仪电路化架构

测井仪是井下地质参数测量的关键设备之一，它的电路化改造首先要能够适应井下高温、高压、强辐射等恶劣的环境。整个电路系统采用模块化的设计思路，主要包含井下探测电路、信号调理电路、数据存储电路和遥传电路等这几个主要部分。其中井下探测电路整合了电阻率、声波、伽马等多种传感器模块，通过专用的驱动电路，能够有效实现多个参数进行同步采集；信号调理电路使用了屏蔽式设计，通过搭配自适应滤波技术能有效压制井下的电磁干扰和温度漂移的问题，能够保证采集信号的稳定性；数据存储电路使用的是抗辐射闪存芯片，不仅能保存下大量的测井数据，还支持数据快速读写；遥传电路则使用的电缆载波通信技术，能够实现井下数据和地面控制系统之间进行双向传输，其传输速率能达到1Mbps。

（三）电磁勘探仪电路化架构

电磁勘探仪通过测量地下介质的电磁响应特征，判断油气储层分布，其电路化实现重点解决微弱电磁信号的检测问题。电磁勘探仪的电路系统主要分成发射电路和接收电路两部分，其中发射电路主要包括信号发生器、功率放大电路以及发射线圈驱动电路；信号发生器能够产生多种频率的正弦波信号，功率放大电路使用乙类互补对称功率放大结构，能够用来提升信号的输出功率，这样能有效满足不同探测深度的需求。接收电路则主要包含接收线圈接口电路、前置小信号放大电路、锁相放大电路以及数据处理电路；接收线圈接口电路使用高阻抗设计，能够有效增强对微弱电磁感应信号的捕获能力；前置小信号放大电路使用的是低噪声且高输入阻抗的运算放大器；锁相放大电路还能够有效压制背景噪声，将和发射信号同频率的有用信号进行提取，以此提高信号的信噪比。

（四）声波测井仪电路化架构

声波测井仪通过分析声波在地下岩石中的传播速度与衰减特性，判断岩石孔隙度、渗透率等参数，其电路化实现以声波信号的精准收发为核心。电路系统包括声波发射电路、声波接收电路、信号处理电路及时序控制电路。其中声波发射电路主要使用的是高压脉冲驱动电路，通过控制压电换器能够产生特定频率的声波信号，发射功率还能够根据探测的需求进行调节；声波接收电路则结合使用了了差分放大和滤波的设计，能够有效压制声波在传播过程中所产生的干扰信号，进而提升接收信号的精确度；信号处理电路通过使用峰值检测、时间测量等模块准确算出声波的传播时间；时序控制电路使用用 FPGA 芯片来实现发射和接收的同步控制，能够有效保证测量的精度。

三、典型石油勘探仪器电路化实现的关键技术

（一）低噪声信号采集技术

低噪声信号采集技术，是石油勘探仪器电路化改造里的主要技术之一，仪器能否检测到微弱的地质信号，在很大程度上就靠它。在进行电路设计的过程中，会有限选择使用低噪声的元器件，比如低噪声运算放大器、高精度电阻电容等，能够有效减少元器件本身带来的噪声干扰；还能使用差分输入的电路结构，有效进行压制共模干扰，进而让信号采集更加稳定；另外还会采用屏蔽技术，给电路模块进行电磁屏蔽设计，以此降低外部电磁环境对信号采集产生的影响。与此同时，还能够优化软件的算法，运用自适应滤波、小波去噪等相关方法，能够对采集到的信号进行后期降噪处理，能够进一步提升信号的质量。

（二）高可靠性电路集成技术

石油勘探仪器主要工作在高温、高压、强振动、强辐射的恶劣环境中，要保障仪器能够稳定运行，运用高可靠性的电路集成技术是非常重要的[2]。在进行电路集成设计的过程中，主要采用模块化的设计思路，将信号采集、处理、传输等功能整理为独立的模块，能够让后续排查故障、维护工作更加方便；元器件的选择上优先考虑工业级或者军工级的，能够让电路系统更好的适应恶劣环境；还会做冗余设计，为关键的电路模块进行备份，后续

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

就算某个单一的模块出故障，仪器也能够进行正常的工作；同时对电路的布局和布线进行优化，减少模块之间产生的信号干扰，有效提升电路的电磁兼容性。除此之外，还可以通过高低温循环、振动冲击、电磁辐射等环境进行试验，对电路系统做可靠性的验证，及时发现并及时解决电路设计过程中的薄弱环节，以此确保经过电路化改造的仪器能够在复杂的勘探环境中进行长期稳定的运行。

（三）数据同步传输技术

数据同步传输技术对于勘探仪器电路化实现也很重要，是实现多通道、多参数勘探数据精准采集和整合的关键支撑。在进行电路化改造的过程中，会使用到时钟同步技术，比如GPS同步、北斗同步，或者是高精度的晶振同步，这样能够有效保证多个探测模块的采集时钟保持相同，避免在进行数据采集时出现时间偏差；还会使用高速的数据传输接口，比如以太网、USB3.0、光纤等，能够有效提升数据传输的速度，以此满足海量勘探数据实时传输的需求；同时使用数据校验和纠错技术，比如CRC校验、汉明码纠错等技术，能够保证数据在传输的过程中完整，有效减少数据丢失或者数据出错的情况。除此之外还会设计合理的传输协议，优化数据传输的时序控制，有效实现采集数据和地面控制系统之间进行高效、准确的交互，为后续的实时数据处理以及勘探决策提供及时的数据支持。

四、典型石油勘探仪器电路化的地质勘探应用路径

（一）深层油气储层探测应用路径

由于深层油气储层埋藏深、地质构造复杂，而且岩石致密性较高，这对勘探仪器的精度和探测深度都有着更高的要求。将经过电路化改造的石油勘探仪器应用在深层油气储层探测上，可以按照已下这几个思路来进行推进：首先，优先挑选使用经过电路化升级的地震勘探仪以及电磁勘探仪，组建多源联合的探测系统。其中，地震勘探仪凭借优化后的电路化架构，能够有效提升地震波信号的采集精度、穿透深度，还能有效捕捉到深层地质构造的反射信号；电磁勘探仪主要是依靠低噪声电路设计，进而增强对深层介质电磁响应信号的检测能力，能够辅助判断储层里有没有油气存在。其次，可以利用电路化仪器的同步传输功能，实现地震信号与电磁信号进行同步采集与整合，再通过数据融合的算法分析这两种信号之间的关联，进而提高对深层地质构造解释的准确性。最后，可以结合测井仪的电路化检测模块，对钻井过程中的井下地质参数进行实时监测，将测井数据和地面探测数据进行对比验证，能够准确的判断出深层油气储层的位置和边界。

（二）复杂断块油气藏勘探应用路径

复杂断块油气藏的储层分布比较零散，而且岩性变化较大，这为勘探工作带来了一定的挑战。将电路化石油勘探仪器应用在这类油气藏的勘探上，可以根据以下思路进行：一是用电路化的声波测井仪以及电阻率测井仪进行井下探测。其中，声波测井仪主要依靠电路化实现的高精度时间测量功能，能够准确的识别出断块界面的声波反射特征；电阻率测井仪则依靠高灵敏度的电路设计，准确的检测出不同断块岩层间的电阻率差异，能够为判断断块边界以及储层分布提供有效的数据支持[3]。二是利用电路化地震勘探仪的多通道采集功能，对于勘探区域进行高密度的地震勘探，依靠电路系统能够快速处理信号的能力，进而生成高精度的地震剖面，对复杂断块的空间分布形态进行清晰的呈现。三是搭建基于电路化仪器的实时数据监测平台，将勘探过程中所产生的各类数据，实时传输到后台的处理中心，再通过大数据分析以及人工智能算法，针对复杂断块油气藏的储量和及开采可行性进行综合评估，以此为勘探部署和开采方案的制定提供科学合理的依据。

（三）海上石油勘探应用路径

海上石油勘探要长期面对海洋环境复杂、勘探设备安装维护繁琐以及信号干扰严重等问题，应用电路化石油勘探仪器能够有效提高海上勘探的效率、精度。具体为以下几点思路：首先要针对海上环境的主要特点，对电路化勘探仪器进行防水、防腐蚀、抗盐雾等优化设计，要选用能够耐受海洋环境的元器件以及封装材料，这样能够确保仪器在海上恶劣的环境中进行稳定的运行。其次可以用经过电路化改造的海洋地震勘探仪以及海洋电磁勘探仪，通过海底电缆或者海底节点的方式布置相关的探测设备，依靠电路系统的远距离同步传输技术，实现对海上油气储层进行大范围、高精度的探测。同时可以利用电路化仪器的低功耗设计，延长设备的续航时间，减少海上设备维护的次数以及成本。最后，可以通过搭建海上勘探数据一体化处理平台，将电路化仪器采集到的地震、电磁、测井等数据进行整合处理，再结合海洋地质的背景资料，精准判断出海上油气储层的位置和规模。

五、结束语

典型石油勘探仪器的电路化实现是石油勘探技术发展的主要方向，依靠电子电路技术与勘探技术的有效结合，在很大程度上提高了仪器的精度、稳定性以及智能化程度，为地质勘探工作提供了有力的技术支撑。随着电子信息技术的不断发展，石油勘探仪器的电路化实现还会向微型化、集成化、智能化的方向进行发展，后续的相关研究可以重点关注新型电路材料以及算法的融合应用方面，能够进一步优化电路系统的性能，还能扩大其在更复杂勘探场景中的应用范围，进而为石油勘探的高质量发展提供更有力的技术支撑。

参考文献

[1]陈广成 . 石油地质勘探技术的创新与发展 [J]. 中国石油和化工标准与质量 , 2023, 43(20):135-136.

[2]胡亮 , 周阿明 , 王康 . 关于石油地质勘探的技术发展研究 [J]. 科学大众 , 2021, 000(004):P.138-139.

[3]耿战峰 , 张化庆 , 刘金平 , 等 . 石油测试仪器的电流检测系统 [J]. 福建化工 , 2021(5):213-214.

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

铁路供电安全管理体系构建与实践探讨

冯雪
中国铁路沈阳局集团有限公司沈阳供电段，辽宁 沈阳 110000
DOI:10.61369/EPTSM.2026020011

摘　　要： 铁路运输离不开供电系统的稳定运行，供电安全管理体系建设决定铁路运输高效性与安全性。当前，高铁网络迅速发展，铁路供电系统承受负荷也随之增加，供电设备种类复杂，以往安全管理模式可能与现实管理需求不符，基于此，急需打造新型管理体系，为铁路供电安全工作的开展提供支持。下文对于安全管理体系构建核心要素简要探讨，详细论述管理体系的构建和实践应用路径，以供参考。

关 键 词： 铁路；供电安全；管理体系；构建

Discussion on the Construction and Practice of Railway Power Supply Safety Management System

Feng Xue
Shenyang Power Supply Section, Shenyang Bureau of China Railway, Shenyang, Liaoning 110000

Abstract: Railway transportation can not be separated from the stable operation of the power supply system, power supply safety management system determines the efficiency and safety of railway transportation. At present, with the rapid development of high-speed railway network, the load of railway power supply system increases, and the types of power supply equipment are complicated. This paper briefly discusses the core elements of safety management system construction, discusses the construction of management system and practical application path in detail for reference.

Keywords: railway; power supply safety; management system; construction

引言

铁路供电系统组成部分包括应急发电、变电所、接触网等设施，能为铁路交通信号、列车牵引提供电力[1]。当前，铁路运输具有密集化、高效化等特点，对供电系统安全性要求更高。供电安全问题发生，轻则导致列车晚点、停运，重则导致设备受损、人员受伤。传统安全管理模式具有经验化特点，面对高标准化的管理要求，急需构建系统的管理体系，与供电安全相关要素全面融合，促进供电安全管理工作顺利进行。

一、铁路供电安全管理体系构建的核心要素

（一）制度

供电安全管理以制度为核心保障，制度也是管理工作开展的重要依据。在管理制度制定方面，要实现全方位覆盖，明确管理人员层级、责任，保证管理制度能层层落实。同时，制定标准化管理流程、作业流程以及安全规程，重点对设备检修、高空作业以及带电作业管理设置明确标准，建立分级别隐患排查、风险管理机制，设定考核机制，强化制度执行，为供电安全管理工作标准化推进奠定基础[2]。

（二）人员

铁路供电安全管理，人员是执行主体，管理人员的意识、能力等与供电安全管理效果息息相关。供电作业可能涉及夜间操作、高空作业以及带电检修等内容，对运维人员综合素质要求更高。操作人员要熟练掌握安全风险排查、接触网检修以及配电设备的操作等专业知识，拥有高度的安全责任感，能够按照安全规程和管理要求参与安全管理[3]。

（三）设备

供电安全管理期间，设备属于重要物质基础，设备有效性和供电系统运行效能息息相关。铁路的供电设备点多面广，加上所处运行环境复杂，具有连续工作特点。在设备安全管理方面，要落实全生命周期管理要求，在采购阶段落实供电设备质量管理，对设备安装、调试等环节全面监督，重点做好设备使用阶段状态监测，通过台账记录管理信息，定期对设备进行维护检修，及时

作者简介：冯雪（1980.12-），女，汉族，辽宁省沈阳市人，职称：工程师，学历：大学本科，主要研究方向：供电安全管理。

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

发现安全隐患[4]。

（四）环境

铁路供电系统所处环境包括自然环境、运营环境，如果遇到高温、暴雨、雷电、冰雪等极端天气，可能对供电设备绝缘性造成影响，导致接触网上覆盖冰霜，电力线路出现倒伏问题，供电设施受损。从运营环境角度分析，铁路沿线如果正在施工，可能导致供电设备受到外力破坏[5]。因此，在管理过程中，要针对常见环境影响因素提前制定监测机制，控制环境对供电安全造成影响。

二、铁路供电安全管理体系构建

（一）建设目标

铁路供电安全管理体系建立的核心目标是确保供电系统运行安全性与稳定性，降低一般事故或者一般故障的出现概率，坚决杜绝重大安全事故发生，以高质量的供电为铁路运输持续发展提供支持，以上述目标作为管理体系构建的纲领和宗旨。

（二）管理维度

基于管理体系的核心要素确认管理维度，建立系统的管理体系。从管理制度维度出发，打造融合安全责任、管理流程、过程监督、人员考核为一体的管理制度，将各级人员安全责任有效明确，制定标准化的安全规程、作业流程，所有安全管理工作必须遵循制度要求。打造常态化的检查、监督等机制，通过现场检查和视频监控等方式获取供电安全数据信息，全方位监督安全管理工作的落实情况。将具体安全指标和人员绩效考核相融合，打造奖罚分明管理氛围，促进制度高效落实。从人员管理角度分析，围绕人员责任、能力等提升目标，打造分层培训机制，匹配不同岗位管理人员需求，展开能力培训，如技能竞赛、技术交流以及实践演练等，针对培训建立考核机制，根据考核结果调整人员岗位、薪酬，通过正向激励激发人员参与安全管理[6]。从设备维度分析，应建立融合设备采购、安装、运维、检修、更新全流程管理体系，对供应商资质进行全方位评价，选择质量可靠、技术先进的设备，在设备调试环节全程监督，注意日常运维数据的采集，利用大数据手段对安全事故进行提前预判，根据设备状态选择检修方式，同步更新设备报废标准，以全过程管理，让设备能够运行可靠。从环境维度分析，需建立环境监测、安全预警和快速处置的管理流程，在重点监测区域安装监测设备，及时获取地质灾害或者极端天气动态，强化铁路沿线环境排查，将违章建筑、周边树木这类环境隐患排除，预防供电系统受到外力破坏。总结常见环境风险，制定专项预案，在处置流程当中明确人员的具体责任和分工，保证安全风险来临时响应及时、处置高效，控制环境风险的影响[7]。

（三）支撑体系

支撑体系主要包括技术支撑、应急支撑，技术支撑是通过智能化升级，利用新技术对供电设备状态进行监测，对安全风险实时预警，打造智能化管理平台，让安全管理各环节数据互通，提高管理精度、运维效率；应急支撑则是建立集应急预案、应急演练、应急处置和复盘管理闭环，基于常见供电安全事故，制定针对性处置预案，利用应急演练提高人员处置能力，安全故障处置之后及时复盘，总结管理经验，持续优化提高供电安全的应急管理水平[8]。

三、铁路供电安全管理体系的实践路径

（一）建立应急管理机制

铁路供电安全管理体系实施阶段，为提高管理部门的应急处置能力，要建立应急管理机制，保证管理组织架构全面覆盖，将各级管理者的职责明确，形成统一指挥、逐级响应以及协同处理的工作格局。围绕铁路接触网、变电设备等常见故障，结合各类极端天气等管理场景建立专项预案，将不同安全事故的管理责任、处置流程以及物资保障等方面的要求明确，组织各级管理者参与应急演练，通过模拟安全事故情境，提升管理人员的应急处置能力。与此同时，管理部门还要搭建信息化平台，对安全问题及时上报，将处置指令快速传达，明确处置措施以后，立即调配各项资源，通过一体化管理模式，提升安全事件的应急处理效率。为确保应急物资的持续供应，可在供电车间或者沿线车站等位置设置库房，专门存储应急处置物资，包括应急发电机、检修工具等，针对应急物资建立动态化管理机制，确保物资的可用性，一旦供电安全出现问题，物资能够快速调配。例如：某铁路供电区域在暴雨之后出现电路倒伏问题，管理部门利用指挥平台迅速通知抢修人员，调度物资设备，根据安全管理应急预案，落实电力抢修工作，在短短几小时就完成故障处置工作，将供电恢复，高效率的应急处置为铁路运输工作顺利进行提供坚实保障。

（二）强化人员队伍建设

铁路供电安全管理体系实施阶段，人才队伍建设能夯实管理基础。相关部门要针对管理人才建立培训体系，重点培训管理人才安全风险评判、安全问题统筹协调以及安全事件应急决策等方面能力；对于运维人才，主要为其提供新装备操作、新技术应用、安全规程操作等专业技能，使其迅速掌握安全管理岗位技能，同时，组织此类人才参与技术交流、技能竞赛以及应急演练等方面活动，提升培训质量。在人才培训的同时，制定评价考核管理机制，考核结果决定着人才的岗位薪酬，激发其参与学习热情。铁路供电管理部门还可定期组织多种类型的安全教育活动，利用活动契机宣传安全知识，通过供电安全事故案例讲解，强化人才岗位安全意识，使其履行“安全第一”职责，针对人员岗位的违章行为，建立查处机制。比如：维修人员在高空作业时未按照要求系安全带，运维人员在带电作业时没有按照安全规程操作，上述行为一旦出现要通报批评并严肃查处，严格执行安全管理制度。通过人才培养和教育宣传，打造兼具责任意识和专业能力的管理队伍，为安全管理体系有效落地提供人才保障[9]。

（三）优化设备运维模式

供电设备运维管理决定供电安全，在管理期间可围绕供电设备建立生命周期运维体系，展开运维实践。在设备采购阶段，对供应商的能力和资质采取全方位评估，引入质量有保障、技术先

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

进的供电设备，保证设备到场以后质检、安装和调试全程监督，按照验收标准执行，确保设备质量达标以后才能投用。在供电设备的日常维护管理方面，利用在线监测系统，搭配巡检机器人，对供电设备的运行数据实时获取。在大数据技术应用之下，评价供电设备是否处于安全运行状态，根据设备运行情况制定运维计划，替代传统按计划检修的管理模式，既能将供电设备运行的可靠性提升，又能控制运维管理成本。针对每一台供电设备，建立健康档案，结合供电设备运行状态，同步更改设备故障、检修相关信息，为供电设备运维工作提供支持。对于部分老旧设备，在运维管理方面，可制定专项计划，定期更新改造，将性能老化、技术落后的设备淘汰，引入自动化或者智能化设备，将供电系统运行效率提升。例如：某铁路供电安全管理部门针对原有配电所当中的老旧设备采取智能化改造，引入自动合闸、智能监控等设备，让供电设备不但具备安全故障的自动处置能力，而且还拥有远程监控功能，经改造以后配变电系统运行安全性、稳定性有所提升，降低了故障处置所需时间，也减少了人员的操作风险。

（四）加强安全风险管控

为筑牢供电安全防线，铁路管理部门可以管理体系的构建思路作为蓝本，对安全风险实施分级管控，根据电力系统的运行情况，建立融合安全风险识别、风险评估、等级划分、风险管控为一体的管理流程，由专业技术员、运维人员共同参与风险识别过程，特别是对供电设备处于外力破坏、违章操作、自然老化以及极端天气等特殊环境当中存在的风险，建立动态化管理清单，利用定量、定性分析融合方式，对风险等级加以划分，可分为低、中、高、重大四个等级，针对低级和中级风险，可通过日常动态监测和管理措施优化；针对高级风险采取分级管控措施，加上定期排查；针对重大风险设置专项管控预案，由专门责任主体负责，以定期督查的方式，对重大风险精准管控[10]。

例如：某铁路公司针对供电设备安全风险搭建信息化管理平台，在系统平台中录入供电风险管理清单，对不同风险的管理措施以及供电设备的排查记录，让风险管理全程实现信息化。依托此平台，管理人员能够实时获取供电安全风险管理进度，对安全隐患的整改情况进行督查，利用闭环式的管理流程，将供电安全隐患消除。冬季，铁路接触网容易受到覆冰风险，在霜冻来临之前，管理部门针对此类风险展开专项评估，在供电安全重点监测区安装监测装置，配备除冰设备、配备安全员，制定覆冰清除管理预案，提前防范接触网由覆冰引发的故障，守住了供电安全防线，为系统的安全运行提供坚实保障。

四、结束语

综上所述，铁路供电安全管理体系建设的核心要素包括制度、人员、设备、环境，管理体系构建要以预防为先原则，对管理体系展开系统化设计，运用先进技术作为支持，明确安全管理体系建设目标，多维度落实管理体系构建。在管理体系应用阶段，要建立应急管理机制，强化安全管理队伍建设，优化供电设备运维管理方式，落实安全风险管控，发挥管理体系的应用价值，为铁路安全运行提供支持。

参考文献

[1] 王冠英 . 高速铁路接触网供电安全问题分析与策略研究 [J]. 模型世界 ,2024(8):46-48.

[2] 单鑫升 . 基于事故致因理论的广州局供电调度安全管理研究 [D]. 北京 : 中国铁道科学研究院 ,2023.

[3] 秦浩源 . 浅析铁路既有线供电线改造施工安全质量管理 [J]. 工程施工与管理 ,2024,2(6). DOI:10.37155/2972-435X-0206-5.

[4] 国家铁路局规划与标准研究院技术标准所 ,Che Zhenying. 铁路电力、电力牵引供电工程施工安全技术规程简介 [J]. 铁道技术标准（中英文）,2023,5(8):74-111.

[5] 韩凯光 . 基于风险控制理论与风险评估的电力安全管理 [J]. 水利电力技术与应用 ,2025,7(1). DOI:10.37155/2717-5251-0701-9.

[6] 张卓 . 铁路 10 kV 配电线路故障跳闸的成因及安全管理优化策略 [J]. 高铁速递 ,2025(20):33-35.

[7] 刘治稳 , 刘旭东 , 刘燕东 . 基于线路施工安全管理的研究 [J]. 数字化用户 ,2023(47):229-230.

[8] 关海龙 . 浅谈铁路供电系统接触网作业车的运用安全管理 [J]. 湖北应急管理 ,2025(22):31-33.

[9] 刘俊 . T 供电段高铁接触网安全性评价研究 [D]. 山西 : 太原理工大学 ,2023.

[10] 李凤欢 . 寒冷地区冻害对电气化铁路接触网支柱的影响及整治 [J]. 电气化铁道 ,2023,34(z1):186-189.

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

汽轮机转速变送器故障下的容错控制策略设计与验证

高峰

国家电力投资集团贵州金元股份有限公司纳雍发电总厂，贵州 纳雍 553303

DOI:10.61369/EPTSM.2026020014

摘　　要： 汽轮机身为电力生产以及工业驱动范畴内的核心动力装置，转速属于保障其安全平稳运转的关键参量，转速变送器则是转速信号采集和传送的核心组件。本文实施汽轮机转速变送器故障状况下的容错控制策略探究。首先整理转速变送器的典型故障类别及特征，搭建基于信号特征剖析的故障诊断机制；在此根基之上，设计融合冗余配置与自适应补偿的复合容错控制策略，借助“三取二”冗余表决排除单点故障干扰，联合自适应观测器达成故障状态下的转速估算与控制补偿；最终通过半物理仿真和现场工况模拟验证策略的有效性。研究成果显示，所设计的容错控制策略可迅速辨别变送器故障类别，在故障工况之中能维持机组转速稳定，规避系统失控，为汽轮机的安全可靠运转提供技术支持。

关 键 词： 汽轮机；转速变送器；故障诊断；容错控制；冗余配置

Design and Verification of Fault-tolerant Control Strategy for Turbine Speed Transmitter

Gao Feng

Guizhou Jinyuan Co., Ltd. Nayong Power Plant, Nayong , Guizhou 553303

Abstract: As a core power plant in electricity generation and industrial drive systems, steam turbine speed serves as a critical parameter for ensuring safe and stable operation. The speed transmitter acts as the central component for collecting and transmitting speed signals. This study investigates fault-tolerant control strategies for steam turbine speed transmitters under fault conditions. First, it categorizes typical transmitter faults and their characteristics, establishing a fault diagnosis mechanism based on signal feature analysis. Building upon this foundation, a composite fault-tolerant control strategy integrating redundancy configuration and adaptive compensation is designed. Utilizing a "three-out-of-two" redundancy voting mechanism to eliminate single-point failures, combined with adaptive observers, the strategy achieves speed estimation and control compensation during fault states. The effectiveness of the strategy is validated through semi-physical simulation and field condition modeling. Research findings demonstrate that the proposed fault-tolerant control strategy can rapidly identify transmitter fault categories, maintain stable turbine speed under fault conditions, prevent system instability, and provide technical support for the safe and reliable operation of steam turbines.

Keywords: steam turbine; speed transmitter; fault diagnosis; fault-tolerant control; redundant configuration

引言

汽轮机作为能量转换的核心装置，广泛应用于火力发电、核能发电以及大型工业生产领域，其运转稳定性直接关联到整个生产系统的安全和效益。转速作为汽轮机运行状态的核心表征参量，不仅决定着机组的发电效率，更是保障机组不出现超速飞车等恶性事故的关键监控指标。转速变送器承担着将汽轮机转子的机械转速转化为电信号并传送至控制系统的任务，是转速闭环控制与安全保护系统的“感知器官”[1]。然而，汽轮机运行环境严苛，长期处于高温、高压、强电磁干扰和持续振动的工况之下，转速变送器极易出现各类故障，造成转速信号异常。倘若控制系统无法有效应对这类故障，可能引发调速阀误调节、保护系统拒动或误动等状况，严重时会造成机组停机、设备损坏甚至人员伤亡。目前，常规的故障处理方式多依靠停机检修，不仅对生产连续性产生影响，而且难以应对突发性故障。因此，设计一套能够实时识别转速变送器故障并自动实现容错控制的策略，对提升汽轮机运行的可靠性和安全性具有重要现实意义。

作者简介：高峰（1996.09-），男，彝族，贵州省纳雍县人，本科，助理工程师，研究方向：热控自动装置。

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

一、汽轮机转速变送器典型故障分析

（一）信号传输异常故障

信号传输异常是现场最为常见的故障类别，主要源自变送器与控制系统之间的连接线路问题。由于汽轮机运行过程中存在持续振动，接线端子容易出现松动、氧化等接触不良现象，致使转速信号间歇性中断或波动；若线路长期处于高温环境之中，绝缘层容易老化破损，引发线路短路或断路，使转速信号完全丢失或出现严重失真。这类故障的典型表现为：控制系统接收的转速信号频繁跳动，或突然固定为某一恒定数值，与机组实际运行状态不相符；当振动加剧或环境温度变化时，故障现象会更为显著[2]。

（二）传感器本体失效故障状况

传感器本体出现失效情形，主要是因内部元件产生老化现象、发生损坏问题或者出现安装偏差状况所造成。对于磁电式转速变送器而言，其内部线圈在经历长期工作之后，存在出现断路情况或者短路问题的可能性，这会使得装置无法对转子的转速变化进行感应操作，进而让输出信号的幅值趋向于零数值；光电式变送器的发光二极管元件或者光敏三极管元件一旦发生损坏情况，便会造成转速信号产生无输出的现象；除此之外，在对传感器进行安装操作时，若与转子之间的间隙调整未达恰当状态，或者安装位置出现偏差情况，将会致使感应信号出现减弱现象，进而产生转速测量偏差过大的问题。此类故障所呈现出的特征较为稳定，大多表现为信号处于持续异常的状态，且不受外界工况波动情况的影响，仅仅依靠线路检查工作无法将故障排除[3]。

（三）环境干扰类故障情形

汽轮机所处的周围环境存在强电磁状况，像发电机、电动机等设备在运行过程中所产生的电磁辐射，会对转速变送器的信号传输工作造成干扰影响。此类故障并非由于变送器或者线路出现物理损坏问题所导致，而是电磁干扰作用叠加在正常转速信号之上，使得输出信号中出现杂波成分，进而导致控制系统所接收的转速数值产生波动现象。与其他类型的故障相比较，环境干扰类故障的表现具有随机性特点，当干扰源停止工作运行或者机组负荷进行调整操作时，信号波动情况有可能会暂时得到缓解，这就给故障诊断工作带来了一定程度的难度[4]。

二、容错控制策略的设计内容

（一）故障诊断机制的构建工作

故障诊断环节是容错控制工作的前提条件，需要实现对故障的实时识别操作以及准确定位工作。本文采用基于信号特征分析工作与冗余校验工作相结合的诊断方法，具体的实现方式如下所示：其一为信号特征提取工作，通过控制系统对转速变送器输出信号的幅值参数、频率参数以及稳定性参数进行实时采集操作，设定正常信号的特征阈值范围，当信号参数超出阈值范围时，触发故障预警机制；其二为冗余信号校验工作，借助“三取二”冗余配置的转速变送器对三路转速信号进行采集工作，通过对三路信号的一致性进行对比分析来实现故障判断工作。若其中某一路信号与另外两路信号之间的偏差过大，并且这种偏差状态持续的时间超过设定阈值，则判定该路变送器存在故障问题；若三路信号均出现异常波动情况，但波动趋势呈现出一致性，则优先判定为环境干扰类故障问题。通过这种双重诊断机制，能够有效区分不同类型的故障，为后续的容错控制工作提供准确的依据支撑[5]。

（二）冗余容错及信号重构举措

针对信号传送异常状况、传感器本身失效这类确定性故障情形，运用冗余布置和信号重构相融合的容错手段。于硬件配置层面，采用三套独立的转速变送器对同一转子的转速信号实施采集操作，三套变送器的安装地点相互独立分开，防止由于局部振动现象或者温度异常情况而造成多套同时失效后果。在信号处理方面，依据“三取二”的表决逻辑原理对三套信号开展筛选工作：当三套信号均处于正常状态时，选取三套信号的平均数作为控制输入信号，以此提升测量精准程度；当判断某一套信号出现故障问题时，自动去除故障信号，采用另外两套正常信号的平均数作为输入内容；若两套信号发生故障情况，则启动预先设置的备用信号重构策略规划，借助机组其他相关参数数据（像蒸汽流量数值、进汽压力数值、机组振动数值）和转速之间的关联联系，初步估算转速数值，保证控制信号不会中断停止。

（三）自适应补偿控制算法构思

针对环境干扰类故障问题以及冗余信号不足情况下的转速估计偏差状况，设计自适应补偿控制算法内容。该算法以汽轮机的运行机理模型为基础依据，通过实时收集进汽阀开度大小、蒸汽压力数值、机组负荷情况等可观测参数信息，构建转速自适应观测装置。当转速变送器信号出现轻微波动现象或者重构信号存在偏差问题时，观测装置根据当前机组运行状态情形，实时修改转速估计数值；同时，按照故障诊断结果情况调整控制参数的权重比例，增强控制系统对信号波动的抗干扰能力水平。比如，当检测到环境电磁干扰现象时，自动加大转速反馈信号的滤波系数数值，减弱杂波产生的影响效果；当采用重构信号进行控制操作时，适当提高控制算法的鲁棒性参数数值，避免因为估计偏差问题而导致调速阀过度调节情况。通过这种自适应调整方式，确保在故障工况条件下，转速控制的稳定性和准确性程度。

（四）容错控制逻辑整合工作

将故障诊断环节、冗余表决过程、信号重构操作与自适应补偿功能整合到汽轮机控制系统当中，构建完整的容错控制逻辑体系。控制逻辑的运行流程如下所示：首先，实时收集三套转速信号以及机组相关运行参数信息；其次，通过故障诊断机制判断转速变送器工作状态情况；若未检测到故障问题，则采用正常信号开展常规控制操作；若检测到故障问题，则根据故障类型启动对应的容错策略方案，完成故障信号去除、有效信号筛选或者信号重构工作；最后，通过自适应补偿算法修改控制信号，驱动调速执行机构产生动作，实现转速的稳定控制目标。同时，在控制逻辑当中设置故障报警功能模块，当检测到故障情况时，及时向操作人员发出报警提示信息，并记录故障发生时间节点、故障类型等相关信息内容，为后续检修工作提供依据支持。

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

三、容错控制策略验证

（一）验证平台搭建

半物理仿真平台由汽轮机仿真模型构建的参数载体、转速变送器模拟模块形成的信号发生体、故障注入模块组成的故障施加体及实际控制系统构成的逻辑承载体组合而成。其中，汽轮机仿真模型以现场机组的运行参数作为基础框架，能够对不同负荷条件下的转速变化特征进行动态复现；转速变送器模拟模块可针对磁电式能量转换装置、光电式信号传输设备等不同原理的变送器输出形态实施信号仿真；故障注入模块通过软件指令编程与硬件开关组件的协同控制，能够对信号传输路径中的断路现象、接触节点的不良状态、电磁环境的干扰效应等典型故障类型开展场景构建；实际控制系统选用现场普遍应用的分散控制系统（DCS）作为逻辑载体，将预先设计的容错控制策略嵌入系统内核，以此保障验证结论与工程实践的一致性关联。

（二）故障模拟与验证过程

基于现场设备运行中的常见故障类型，规划设计三组验证性试验项目，分别针对信号传输链路的断路故障、连接节点的接触不良故障以及电磁环境的干扰故障开展模拟验证。第一组试验以单路转速变送器的信号断路故障作为模拟对象。在机组保持额定转速的稳定运行工况下，通过故障注入模块对某一路变送器的输出信号实施切断操作。在此工况下，容错控制逻辑应当对该路信号的异常状态进行快速捕捉，自动执行故障信号的剔除程序，并切换至另外两路正常信号实施控制策略。验证工作的重点在于监测故障诊断环节的响应时长、转速参数的波动范围以及控制系统的调节过程，确保在故障发生后，转速指标不出现显著偏移，维持在额定范围的合理区间。第二组试验针对接触不良故障开展模拟验证，通过故障注入模块对接线端子的通断频率进行控制调节，构建信号传输的间歇性中断场景。在验证过程中，需要观察容错控制逻辑对间歇性故障的识别精准度，排查是否存在误报警现象或正常信号的误剔除情况；同时，对转速信号的波动幅度以及调速阀的动作特性进行检测分析，确保控制系统能够通过信号滤波算法与冗余校验机制，实现转速参数的稳定维持。第三组试验以电磁干扰故障作为模拟目标，通过故障注入模块向转速信号中叠加随机杂波成分，复现现场电磁环境的干扰效应。验证工作的核心在于观察自适应补偿算法的实际作用效果，判断在滤波系数调整后，信号波动是否得到有效抑制，转速控制的精度指标是否满足工程应用的规范要求。

（三）验证结果剖析

试验成果显示，所构思的容错控制策略能够精确辨别各类转速变送器故障，故障诊断回应及时，无显著误判或漏判状况。于单路信号断路故障情形中，系统可迅速剔除故障信号，借助冗余信号达成稳定控制，转速波动微弱，未形成调速阀过度调节的局面；在接触不良故障状况下，通过信号稳定性判别与冗余校验，有效防范了间歇性信号对控制系统的作用，转速保持稳定；在电磁干扰故障状况下，自适应补偿算法经由调整滤波系数，大幅削弱了杂波干扰，保障了转速控制精度。除此之外，策略的集成逻辑简明清晰，与现有控制系统兼容性优良，无需对机组原有控制架构实施大幅改造，具备较强的工程实用特性。

四、结论

本文针对汽轮机转速变送器在恶劣运行环境中的常见故障，设计了一套融合故障诊断、冗余容错与自适应补偿的复合容错控制策略。通过梳理转速变送器的三类典型故障特征，搭建了信号特征分析与冗余校验相联合的故障诊断机制，实现了对故障的精确辨别与定位；基于“三取二”冗余配置设计了信号重构规划，保障故障状态下控制信号的持续性；通过自适应补偿算法的构思，增强了系统对干扰与估计偏差的抗干扰能力。半物理仿真与工况模拟验证成果表明，该策略能够有效应对各类转速变送器故障，维系机组转速稳定，且具备良好的工程兼容特性。未来的研究方向可围绕两个方面铺展：一是进一步优化故障诊断算法，结合人工智能技术提升对复杂多故障叠加场景的诊断能力；二是拓展容错控制的适用范畴，将转速变送器容错控制与机组其他关键参数的容错控制相联合，搭建全参数覆盖的容错控制体系，进一步提升汽轮机运行的可靠程度与安全程度。

参考文献

[1] 冯佩 . 火电厂 DEH 控制系统汽轮机转速精准调节技术改进 [J]. 仪器仪表用户 , 2025, 32 (12): 33-35.

[2] 杜沫 . 基于模糊 PID 的核电厂汽轮机转速抗扰动控制方法 [J]. 自动化应用 , 2025, 66 (21): 235-237+241.

[3] 邹毅 , 肖丽 . 汽轮机转速测量误差分析 [J]. 冶金设备 , 2025, (03): 111-114.

[4] 杨鹏燕 , 张庆 , 赵林涛 , 田渭蓉 , 洪杨 . 基于西门子高速计数模块 FM350-1 的汽轮机转速测量方法的研究 [J]. 工业仪表与自动化装置 , 2023, (06): 121-124.

[5] 张荣彬 , 郭永飞 . 船用汽轮机转速线性自抗扰控制研究 [J]. 仪器仪表用户 , 2023, 30 (11): 45-49.

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

火电厂氧量变送器测量滞后补偿与先进过程控制研究

赵子毫
国家电力投资集团贵州金元股份有限公司纳雍发电总厂，贵州 纳雍 553303

DOI:10.61369/EPTSM.2026020016

摘　　要： 烟气含氧量是火电厂锅炉燃烧效率和污染物排放控制的重要参数，氧量变送器测量滞后会造成燃烧控制策略滞后，造成能源浪费和环保风险。本文针对这一关键技术瓶颈，对氧量变送器测量滞后产生机理及影响因素进行系统研究，整理滞后补偿和先进过程控制研究现状，提出多算法融合的滞后补偿方案和协同控制策略。经过理论分析以及工程应用检验，所提出的方法可以有效地减小测量滞后误差，提高燃烧控制的精度，希望达到锅炉效率提高和 NOx 排放减少的双重目的。

关 键 词： 火电厂氧量；变送器测量滞后补偿；先进过程控制

Research on Measurement Lag Compensation and Advanced Process Control of Oxygen Transmitter in Thermal Power Plant

Zhao Zihao
Guizhou Jinyuan Co., Ltd. Nayong Power Plant, Nayong , Guizhou 553303

Abstract: Flue gas oxygen content serves as a critical parameter for both combustion efficiency and pollutant emission control in thermal power plant boilers. Measurement lag in oxygen transmitters may lead to delayed combustion control strategies, resulting in energy waste and environmental risks. This paper systematically investigates the mechanisms and influencing factors of measurement lag in oxygen transmitters, reviews current research on lag compensation and advanced process control, and proposes a multi-algorithm fusion-based lag compensation scheme with collaborative control strategies. Through theoretical analysis and engineering validation, the proposed method effectively reduces measurement lag errors and enhances combustion control precision, aiming to achieve dual objectives of improved boiler efficiency and reduced NOx emissions.

Keywords: oxygen content in thermal power plants; transmitter measurement lag compensation; advanced process control

在双碳目标之下，火电厂要同时承受提高效率和环保减排的两重压力。锅炉燃烧过程的优化控制是达到该目的的主要途径，而烟气含氧量作为反映燃烧工况的重要指标，测量精度直接关系到控制策略的效果。火电厂广泛使用的氧化锆氧量变送器由于烟气传输延迟、传感器响应特性以及工况波动等因素影响，普遍存在测量滞后的问题，造成风煤配比调节滞后，造成不完全燃烧或者过量空气热损失，同时会加剧 NOx 等污染物的产生。因此开展氧量变送器测量滞后补偿技术研究，用先进的过程控制方法改进燃烧调节逻辑，成为火电厂提高运行经济性和环保性的迫切需要。本文主要解决测量滞后问题，建立高效的补偿和控制体系，给火电机组绿色高效运行提供解决办法。

一、火电厂氧量测量系统概述

（一）氧量测量的核心作用与技术意义

火电厂锅炉燃烧过程中，烟气含氧量直接反映过量空气系数的合理性，其数值变化与机组运行经济性、安全性及环保性密切相关。具体而言，含氧量过高会导致高温烟气携带大量显热从烟囱排出，显著增加排烟热损失，降低锅炉热效率；含氧量过低则会造成燃料不完全燃烧，不仅降低锅炉效率，还会增加飞灰含碳量，加剧受热面积灰结渣风险。同时，含氧量是热力型 NOx 生成的关键影响因素，在高温燃烧环境下，过量氧气会与燃料中的氮元素发生反应生成大量 NOx，精准控制含氧量可有效抑制热力型 NOx 产生，助力环保指标达标。因此，氧量测量数据是火电厂分散控制系统（DCS）实现风煤配比动态调节、燃烧工况实时优化及环保指标闭环控制的核心依据，其测量精度与实时性对机组的经济性、安全性与环保性具有决定性影响，是保障机组稳定高效运行的重要基础。

（二）氧量变送器的工作原理与主流类型

火电厂氧量变送器主流技术基于氧化锆固体电解质的离子导电特性，其核心工作原理是：氧化锆陶瓷元件在700-1400℃的

作者简介：赵子毫（1998.01-），男，汉族，贵州省六盘水市人，本科，助理工程师，研究方向：热控自动装置。

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

高温工作环境下，会形成稳定的氧离子导电通道，依据能斯特方程，元件两侧的参比气（通常为空气）与被测烟气之间的氧分压差会产生相应的电动势，通过信号调理电路将该电动势转换为标准电信号，进而计算得到烟气含氧量数据。除应用最广泛的氧化锆式氧量变送器外，工业上还存在基于氧分子顺磁性差异的顺磁法变送器、基于电化学氧化还原反应的电化学法变送器及基于激光吸收光谱技术的激光式变送器等多种类型。不同类型的氧量变送器在响应速度、测量精度、环境适应性、维护成本及适用工况范围上存在显著差异，其中氧化锆式氧量变送器因具备耐高温、结构简单可靠、性价比高、测量范围宽等突出优势，成为燃煤机组烟气含氧量测量的主流选择，但同时也存在易受烟气温度波动影响、长期运行中电极易积灰中毒导致性能漂移、响应速度受加热元件稳定时间制约等固有特性。

（三）氧量测量系统的组成与运行特性

完整的火电厂氧量测量系统是一个集信号采集、处理、传输与集成于一体的复杂系统，主要由变送器探头、信号传输模块、温度补偿模块及 DCS 集成单元四大核心部分组成。其中，变送器探头是直接与烟气接触的关键部件，其内部内置电加热器与热电偶，加热器负责将氧化锆元件加热至最佳工作温度并维持稳定，热电偶则实时监测锆管温度并反馈给温度补偿模块；信号传输模块承担着信号转换与传输的功能，负责将氧化锆元件产生的微弱电动势信号转换为工业标准的 4–20mA 电流信号，再通过屏蔽电缆传输至 DCS 系统，减少传输过程中的信号衰减与干扰；温度补偿模块通过实时采集热电偶监测的锆管温度，依据能斯特方程的温度修正系数，对测量结果进行动态修正，降低温度波动对测量精度的影响。该系统的运行特性受多种工况参数的显著影响，其中炉膛压力波动会改变烟气流速，飞灰浓度过高会导致探头积灰堵塞，燃料品质变化会改变烟气成分，这些因素都会影响测量系统的稳定性与响应速度，进一步加剧测量滞后问题，给燃烧控制带来不利影响 [1]。

（四）测量滞后对燃烧控制的影响机制

测量滞后是氧量测量系统的固有缺陷，主要表现为变送器输出信号与烟道内实际烟气含氧量变化不同步，其影响贯穿燃烧控制的全流程，对机组运行状态产生多方面的不利作用。当机组负荷升高需要增加燃料供应时，滞后的氧量信号无法及时反映炉膛内缺氧状态，导致送风调节延迟，出现短期缺氧燃烧，不仅增加不完全燃烧损失，还可能引发炉膛结渣、受热面腐蚀等安全隐患；当机组负荷降低时，过量空气状态无法被及时检测并调整，造成排烟热损失持续增加，显著降低锅炉热效率。同时，滞后的氧量信号会使 DCS 系统的控制逻辑陷入“误判”，难以精准捕捉燃烧工况的动态变化规律，导致控制策略频繁出现超调与震荡现象，不仅降低了燃烧控制系统的稳定性，还会因局部区域高温或过量氧气的存在，导致 NOx 排放浓度异常升高，加剧环保治理压力，增加环保设施的运行成本，严重时还可能导致环保指标超标 [2]。

二、火电厂氧量测量滞后补偿与控制技术现状

（一）测量滞后的主要来源与影响因素

氧量测量滞后是由多种因素共同造成的，分为三类，一是传输滞后，烟气从炉膛流到探头监测点要经过一定的距离，造成物理传输延迟，在大型锅炉烟道结构复杂时更加明显；二是传感器响应滞后，氧化锆元件的电化学反应、加热器温度稳定过程和信号转换都会产生时间延迟，典型响应时间为 3 到 5 秒；三是工况干扰滞后，燃料品质变化、负荷变化、炉膛压力变化都会改变烟气流动特性及传感器工作环境，从而延长响应时间 [3]。另外探头积灰、电极中毒老化等设备问题也会使滞后现象加重，从而造成测量精度下降。

（二）现有滞后补偿技术研究进展

国内外对氧量测量滞后补偿已经做了大量的研究，形成了三种主流的技术路径，一是硬件优化方案，优化探头安装位置、采用直插式结构缩短传输距离、选择激光吸收光谱等新型传感器来降低响应滞后，805MW 机组采用激光传感器实现了毫秒级响应测量；二是传统的信号处理方法，采用移动平均、加权滤波等算法来平滑信号的波动，提高信号的稳定性，但是对动态滞后补偿的效果不大；三是模型预测补偿技术，采用卡尔曼滤波、神经网络等算法建立滞后预测模型，利用历史数据和实时参数推断实际含氧量，模糊支持向量机等算法在复杂工况下泛化能力较好 [4]。

（三）先进过程控制技术在燃烧控制中的应用现状

随着控制技术的发展，先进过程控制已经逐步代替传统的 PID 控制被应用到火电厂的燃烧系统上。目前主流技术有，一是协同控制技术，即通过 CO、O2 浓度的协同监测来达到风煤配比优化的目的，某 660MW 机组应用该技术后锅炉效率提高 0.8%；二是智能控制算法，模糊控制、神经网络、专家系统等被用来处理燃烧过程中的非线性、不确定性问题，实现自适应调节；三是多变量预测控制，将负荷、煤质、氧量等多参数耦合关系考虑进去，建立全局优化控制模型。但是现有的技术大多缺少对测量滞后适应性的考虑，还没有建立起与滞后补偿深度融合的控制体系 [5]。

（四）现有技术存在的不足与发展需求

虽然现有的技术取得了一定的进步，但是还存在明显的不足，第一，滞后补偿方法缺乏针对性，大部分算法没有考虑到工况变化对滞后特性动态的影响，泛化能力较差；第二，硬件与软件协同优化不够，新型传感器与先进算法的集成应用不够，不能充分发挥技术优势；第三，控制策略与滞后补偿脱节，先进的过程控制没有考虑到测量滞后特性，从而影响控制精度；第四，工程应用验证不够充分，大部分研究都在实验室里进行，缺少大规模机组长期运行的验证。因此开发自适应能力强的滞后补偿模型，建立补偿和控制协同的一体化系统就成为目前技术发展的主要需求 [6]。

三、火电厂氧量测量滞后补偿与先进过程控制策略

（一）基于多算法融合的滞后补偿模型构建

针对单一算法在复杂工况下补偿效果有限、泛化能力不足的问题，本文提出融合卡尔曼滤波与 BP 神经网络的双层滞后补偿模型，实现对测量滞后的精准动态补偿。该模型采用“滤波降噪 – 预测补偿”的分层设计思路，第一层采用卡尔曼滤波算法，基于氧量信号的统计特性构建状态方程与观测方程，通过实时估计信号的最优值，有效过滤工业现场的电磁干扰、电源波动等随机噪声，提升原始信号的稳定性，为后续补偿计算提供高质量的数据

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

基础。第二层构建自适应 BP 神经网络预测模型，选取机组负荷、燃料量、炉膛出口温度及滤波后的氧量信号作为输入特征参数，以通过精准测试获得的实际烟气含氧量作为输出标签，利用大量历史运行数据对神经网络进行训练，使其能够精准学习不同工况下测量滞后的变化规律，进而预测测量滞后值并对滤波后的信号进行动态补偿。为提升模型的变工况适应性，特别引入自适应学习机制，通过实时监测煤质变化、负荷波动等工况参数，动态调整神经网络的权重与阈值，确保在复杂变工况下仍能保持较高的补偿精度，经仿真测试与小型试验验证，该模型可将测量滞后误差降低60%以上，显著提升氧量信号的实时性与准确性。

（二）基于补偿信号的风煤协同控制策略

以滞后补偿过的精确氧量信号为主，构建风煤协同优化的控制策略。建立过量空气系数优化模型，根据不同的负荷和煤质条件确定最优的含氧量设定值；用模糊 PID 控制算法调节送风量，把补偿后的氧量信号和设定值的偏差作为输入，动态调整 PID 参数，提高送风调节响应速度；结合煤质在线监测数据，建立燃料量前馈调节模型，提前预测燃料变化对含氧量的影响，实现风煤配比的前馈与反馈协同控制。此种办法有效地克服了传统控制中送风与燃料调节不同步的弊病，从而保证了燃烧过程一直处在最优的状态之下。

（三）多参数融合的燃烧优化控制体系

建立氧量、温度、压力以及污染物质排放等各个参数相互影响的控制电路。通过 DCS 系统实时采集炉膛各区域温度、烟气压力、NOx 排放浓度等参数，与补偿后的氧量信号进行数据融合；用模糊支持向量机构建燃烧效率和 NOx 排放预测模型，以最小煤耗和最低排放为双目标函数，利用粒子群优化算法求得最优控制参数；把优化结果输出到执行机构，实现风煤配比、喷燃器角度等参数的协同调节。该体系冲破单一参数控制的局限，达成燃烧效率同环保指标的综合改善。

（四）控制策略的工程实现与验证方案

制定控制策略的工程化实现方案，分为硬件改造和软件集成两个部分：硬件方面优化氧量变送器安装位置、增加煤质在线监测装置和炉膛温度多点监测探头，保证数据采集的全面性和实时性；软件方面在 DCS 系统中完成滞后补偿模型和控制算法的逻辑组态、开发人机交互界面、实现参数设置、状态监测和故障报警等功能。选择一台660MW 的超超临界锅炉作为工程试验对象，用实施前后锅炉效率、煤炭消耗和 NOx 排放的数据来对比检测该控制策略的有效性、稳定性。

四、结束语

综上所述，本文对火电厂氧量变送器测量滞后这一重要技术问题，对产生滞后的多个原因做了系统的分析，整理了相关补偿和控制技术的研究现状，提出了卡尔曼滤波与神经网络相结合的双层滞后补偿模型，构建了多参数融合的先进燃烧控制系统。从研究结果可知，所提出的技术方案可以减小测量滞后误差，提高燃烧控制精度，达到锅炉效率提高和 NOx 排放降低的双重效果。未来研究可以继续加深人工智能算法的应用深度，并融合大数据、物联网技术创建出智慧燃烧控制平台，从而达到对工作状态的准确预测与自适应调节。

参考文献

[1] 赵国龙 , 田亮 . 基于卡尔曼滤波器的锅炉氧量信号融合优化方法 [J]. 广东电力 ,2025,38(08):12-18.

[2] 钱飞强 . 基于 PIC 单片机和 PID 算法的火电厂锅炉全面腐蚀控制方法研究 [J]. 全面腐蚀控制 ,2025,39(03):265-268.

[3] 余岩竹 . 超临界与超超临界火电厂锅炉的热力性能优化研究 [J]. 技术与市场 ,2025,32(03):63-66.

[4] 梅洋 , 马运保 , 吴尔夫 , 等 . 火电厂智慧燃烧系统燃烧优化调整分析 [J]. 电力设备管理 ,2025,(05):109-111.

[5] 孙耀 . 火电厂全厂用水优化改造及实施效果 [J]. 电力设备管理 ,2024,(22):258-260.

[6] 朱江涛 , 闫卫东 , 张卫彬 . 锅炉湿基氧量与干基氧量关系计算模型研究 [J]. 锅炉技术 ,2024,55(06):75-79.

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

基于改进 PID 算法的火电厂汽包水位变送器控制策略研究

朱勇

国家电力投资集团贵州金元股份有限公司纳雍发电总厂，贵州 纳雍 553303

DOI:10.61369/EPTSM.2026020017

摘　　要： 汽包水位为火电厂锅炉安全稳固运转的核心参量，其控制精准程度径直决断机组运行的安全状况与经济成效。针对传统 PID 算法于汽包水位控制当中难以契合非线性、时变性以及“虚假水位”干扰的状况，本文提出一种交融模糊逻辑和动态参数整定的改进 PID 控制算法，并结合汽包水位变送器的测量特性搭建控制策略。首先剖析汽包水位的动态特质和传统控制方案的欠缺之处；其次详尽设计改进 PID 算法的核心架构，包含模糊参数调节模块与抗干扰补偿环节；最后阐释基于该算法的控制策略实现流程，涵盖信号预先处理、算法布置及闭环调节机制。研究显示，改进 PID 算法能够有效提升汽包水位控制的响应速率与稳定程度，降低干扰因素对控制精准度的影响，为火电厂汽包水位控制提供更为可靠的技术解决办法。

关 键 词： 改进 PID 算法；火电厂；汽包水位；变送器；控制策略

Research on Control Strategy of Steam Drum Water Level Transmitter in Thermal Power Plant Based on Improved PID Algorithm

Zhu Yong

Guizhou Jinyuan Co., Ltd. Nayong Power Plant, Nayong , Guizhou 553303

Abstract: The drum water level serves as a critical parameter for ensuring the safe and stable operation of thermal power plant boilers, with its control precision directly determining the operational safety and economic efficiency of power units. To address the limitations of traditional PID algorithms in handling nonlinear, time-varying, and "false water level" disturbances in drum water level control, this paper proposes an improved PID control algorithm integrating fuzzy logic and dynamic parameter tuning. The control strategy is developed based on the measurement characteristics of drum water level transmitters. The study first analyzes the dynamic characteristics of drum water levels and the shortcomings of conventional control methods. It then details the core architecture of the improved PID algorithm, including a fuzzy parameter adjustment module and anti-interference compensation components. Finally, the implementation process of the control strategy is explained, covering signal preprocessing, algorithm configuration, and closed-loop regulation mechanisms. Research demonstrates that the improved PID algorithm significantly enhances response speed and stability in drum water level control, reduces the impact of disturbances on control accuracy, and provides a more reliable technical solution for drum water level management in thermal power plants.

Keywords: improvement of PID algorithm; thermal power plant; drum water level; transmitter; control strategy

引言

在火电厂生产流程之内，锅炉汽包作为汽水分离和热量交换的关键装置，其水位稳定状态直接关联到机组运行安全。水位过高容易造成蒸汽携带水分，引发过热器结垢和汽轮机水冲击；水位过低则可能诱发水冷壁干烧甚至锅炉爆炸情形，同时还会对蒸汽品质和发电效率产生影响。汽包水位变送器作为水位信号收集的核心部件，其测量精准度和控制策略的匹配程度直接决定控制效果。传统 PID 控制由于结构简洁、易于实施，在汽包水位控制中应用普遍，但汽包水位控制过程存在显著的非线性、时滞性，并且受负荷波动、给水压力变化等干扰影响较大，尤其在负荷突发变化时容易出现“虚假水位”现象，传统 PID 固定参数难以适应繁杂工况改变，致使控制精准度降低、调节滞后等问题产生。所以，结合汽包水位变送器的测量特性，研究改进 PID 算法及相应控制策略，提升复杂工况之下的水位控制稳定程度，对于保障火电厂安全高效运行具备重要的工程实际应用价值 [1]。

作者简介：朱勇（1994.05-），男，汉族，贵州省赫章县人，本科，助理工程师，研究方向：热控自动装置。

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

一、火电厂汽包水位控制特性及传统 PID 局限

（一）汽包水位控制的核心特性

火电厂汽包水位的动态改变受多重因素相互耦合影响，呈现出繁杂的控制特性。从工况改变层面而言，机组负荷调整会直接改变蒸汽蒸发数量，致使汽包内部压力波动，进而引发“虚假水位”现象——当负荷突然增多时，蒸汽流量急剧增加导致汽包内部压力下降，水的饱和温度降低，汽包内部水的汽化数量突然增多，形成大量气泡占据空间，使水位短暂上升，随后随着水量消耗又会迅速下降，这种虚假信号容易导致控制错误动作。从系统自身具备的特性层面观察，汽包水位的控制事宜呈现出显著的时滞属性，给水流量产生的变动情况，需经历一段时长之后，才能够在水位方面获得体现，并且给水压力出现的波动现象、燃料所具备的品质产生的变化状况等外部形成的干扰因素，会对水位的波动情形起到进一步的加剧作用。除此之外，汽包水位变送器实施的测量信号，容易受到现场环境温度、压力产生的变化情况以及电磁形成的干扰影响，最终造成测量结果出现偏差问题，当控制策略没有对信号所具备的特性加以考量时，则会对控制的精度产生进一步的降低作用 [2]。

（二）传统 PID 控制在实际应用过程中的局限性表现

传统 PID 控制借助比例、积分、微分三个环节产生的协同运作效果，来达成控制的目标，该控制方式的核心内容，依赖于固定不变的参数设置情况。在汽包水位控制工作的开展进程中，传统 PID 控制存在的局限性，主要在三个层面得以体现：其一为参数所具备的适应能力较差，传统 PID 参数大多借助离线整定的方式来加以确定，无法依照负荷产生的变化情况、干扰形成的影响程度等工况出现的波动状况，进行实时性的调整操作，当“虚假水位”现象或者外部干扰因素出现时，固定不变的参数难以实现快速的响应动作，容易造成超调量过大、调节所需时间过长等问题的产生；其二为抗干扰能力存在不足，针对给水压力出现的波动现象、测量信号存在的噪声问题等干扰因素，传统 PID 控制缺乏行之有效的补偿机制，容易受到干扰信号的影响而产生错误的调节动作；其三为对时滞性的适应程度不足，汽包水位控制工作具备的时滞特性，会造成 PID 调节出现滞后情况，进而对水位的波动现象起到进一步的加剧效果。上述这些局限性，使得传统 PID 控制难以满足复杂工况条件下，汽包水位高精度控制工作的实际需求 [3]。

二、改进 PID 算法设计

（一）算法核心部分的设计思路阐述

改进 PID 算法以传统 PID 控制作为基础条件，针对汽包水位控制工作存在的非线性特征、时滞性特点以及干扰特性，引入模糊逻辑参数调节机制与干扰补偿机制，其核心设计思路具体表现为：其一，通过模糊逻辑推理的方式，实现 PID 参数的在线动态整定操作，依据水位产生的偏差情况以及偏差变化率，对比例系数、积分系数和微分系数进行实时性的调整，以此提升算法针对工况变化情况的适应能力；其二，增加干扰补偿环节，结合汽包水位变送器具备的测量特性，对测量信号实施预处理操作，同时针对“虚假水位”等典型性干扰因素，设计预判补偿策略，从而降低干扰因素对控制效果产生的影响；其三，对微分环节进行优化处理，通过引入微分显型结构的方式，减少测量噪声对微分环节产生的影响，进而提升算法的稳定性能 [4]。

（二）模糊 PID 参数调节模块构造

模糊 PID 参数调节模块拿汽包水位偏差 e 以及偏差变化率 ec 当作输入变量，凭借模糊推理规则实时给出 PID 参数的修正量 ΔKp、ΔKi、ΔKd，达成参数动态整定。首先明确输入输出变量的模糊集和论域，依照火电厂汽包水位控制的现实工况，把偏差 e 和偏差变化率 ec 的模糊集都划分成“负大（NB）、负中（NM）、负小（NS）、零（ZO）、正小（PS）、正中（PM）、正大（PB）”七个层级，论域都设定成 [–6,6]；输出变量 ΔKp、ΔKi、ΔKd 的模糊集同样划分成七个层级，论域依据参数调整范围设定。其次搭建模糊推理规则，结合现场运行经验，当水位偏差较大之际，应提高比例系数来加快响应速度，降低积分系数以避免超调；当偏差变化率较大之时，应增大微分系数来抑制波动，比如规则为“若 e 为 NB、ec 为 NB，那么 ΔKp 为 PB、ΔKi 为 NB、ΔKd 为 PS”。最后通过清晰化处理将模糊输出量转变为精确的参数修正量，运用重心法完成清晰化计算，保证参数调节的平滑性和连续性 [5]。

（三）抗干扰与信号预处理谋划

面对汽包水位变送器测量信号的干扰难题，在改进 PID 算法里增添信号预处理环节。首先运用一阶低通滤波对变送器采集的水位信号实施滤波操作，过滤现场电磁干扰产生的高频噪声，同时留存水位变化的有效信号，滤波系数根据现场干扰强度动态调控，保障信号平滑性和响应速度的均衡。其次针对“虚假水位”干扰，设计基于负荷变化率的预判补偿机制：通过采集蒸汽流量信号计算负荷变化率，当负荷变化率超出设定阈值，判定可能出现“虚假水位”，此时通过模糊推理给出补偿量，对 PID 调节输出进行修正，防止因虚假信号造成的误调节。另外，针对给水压力波动干扰，引入给水压力信号作为前馈补偿量，依照给水压力与给水流量的对应关联，提前调整控制输出，减少压力波动对水位的作用。

三、基于改进 PID 的汽包水位控制策略实现

（一）控制策略整体框架

基于改进 PID 算法的汽包水位控制策略以“信号采集 – 预处理 – 算法调节 – 执行输出 – 反馈校正”为核心流程，整体框架包含信号采集模块、预处理模块、改进 PID 调节模块、执行机构及反馈模块。其中信号采集模块借助汽包水位变送器开展实时水位信号采集事项，同时实施蒸汽流量、给水流量、给水压力等辅助信号收集作业；预处理模块针对所采集的信号施行滤波操作、干扰判别以及补偿处理；改进 PID 调节模块依据预处理之后的信号完成参数整定和控制量计算任务；执行机构按照控制量对给水调节阀开度进行调整，达成给水流量调节目标；反馈模块把调整

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

之后的水位信号再次传送至采集模块，构建闭环控制形态。该架构全面融合改进 PID 算法的动态调节优势以及多信号协同补偿特征，提升控制策略的适应能力和可靠程度。

（二）关键实现环节

在信号预处理环节，首先对水位变送器所采集的信号开展零点校正和温度补偿工作，依照汽包现场温度变化情况对测量信号实施修正处理，降低温度给变送器测量精度带来的影响。接着借助一阶低通滤波方式处理噪声信号，再依据蒸汽流量变化速率判断是否存在“虚假水位”状况，若存在该状况则启动干扰补偿机制。在改进 PID 调节环节，将预处理之后的水位偏差以及偏差变化速率传送至模糊参数调节模块，通过模糊推理获取 PID 参数修正量，实时更新 Kp、Ki、Kd 参数，再结合给水压力前馈补偿量计算最终控制量。在执行输出环节，控制量通过 DCS 系统转化为电流信号，驱动给水调节阀产生动作，调节给水流量；同时实时采集给水流量信号，对控制量进行二次校正操作，确保给水流量与控制需求相契合。另外，设置工况判断机制，当机组处于启停阶段、负荷大幅调整等特殊工况时，自动切换 PID 参数调节范围，提升特殊工况下的控制稳定性能。

（三）与变送器的匹配优化

控制策略的实施需要充分考量汽包水位变送器的测量特性，实现算法和变送器的匹配优化目标。一方面，依据变送器的测量量程和精度等级，设定水位偏差的阈值范围，确保模糊推理规则与变送器的测量精度相契合，避免因测量误差引发调节误动作现象；另一方面，针对变送器的响应速度，调整算法的采样周期，使采样周期与变送器的响应时间相协调，既保障信号采集的实时特性，又避免因采样频率过高造成算法运算负荷过大问题。同时，在控制策略中增设变送器故障诊断环节，通过监测测量信号的波动范围和变化趋势，判断变送器是否存在故障情况，若出现故障则及时发出报警信号，并切换至备用控制模式，保障控制系统的连续特性。

四、改进 PID 控制策略的工程应用优势

和传统 PID 控制策略相对比，借助改进 PID 算法所形成的汽包水位控制策略，于工程应用场景当中展现出突出优势。其一，在对复杂工况的适应能力层面更具强度，凭借模糊动态参数的整定操作，能够以较快速度去契合机组负荷出现波动、给水压力产生变化等复杂工况情形，对“虚假水位”所引发的不利作用进行有效抑制，将水位稳定状态维持于设定范围之内；其二，控制精度水准更高，通过信号的预处理流程以及干扰补偿机制，让变送器测量方面的误差问题和外部干扰因素对控制成效造成的影响得以降低，使水位控制的精准程度获得提升，让水位波动的幅度实现减少；其三，运行状态的稳定性更佳，改进 PID 算法运用微分先行手段与参数平滑调节方式，使系统超调量数值和调节所需时间得到降低，对控制进程中的振荡现象加以避免；其四，工程实现的难度系数较低，改进 PID 算法是在传统 PID 框架基础上开展优化工作，不需要对现有的控制硬件设施实施大规模改造举措，能够在既有的 DCS 系统当中直接进行部署操作，使工程改造所需成本与实施周期长度得以降低。

五、结论

本文围绕火电厂汽包水位控制工作中传统 PID 算法所存在的适应性欠佳、抗干扰能力不够等问题，结合汽包水位变送器的测量特性状况，提出一种将模糊逻辑参数调节功能与干扰补偿功能相融合的改进 PID 算法，并搭建起对应的控制策略体系。通过对汽包水位控制特性展开分析，明确传统 PID 在应用过程中的局限性所在；对改进 PID 算法的模糊参数调节模块以及抗干扰环节进行详细设计；对控制策略的整体架构情况和关键实现环节加以阐述。研究结果显示，改进 PID 算法通过动态的参数整定工作与干扰补偿措施，切实提升了复杂工况条件下汽包水位控制的稳定性水平与精度等级，具备较强的工程实用价值属性。在未来展望范畴内，可进一步将大数据技术与人工智能技术相结合，通过对历史运行数据进行分析来优化模糊推理规则内容，提升算法的自学习能力程度；同时对改进 PID 算法与模型预测控制的融合方案展开探索，进一步增强控制策略对复杂非线性特性的适应能力水平；除此之外，可加强与智能变送器之间的协同设计工作，实现测量环节与控制环节的深度融合态势，提升整个控制系统的智能化水平高度。

参考文献

[1] 柏海峥 . 火力发电厂锅炉汽包水位测量偏差原因分析 [J]. 电力设备管理 ,2025,(16):103-105.

[2] 潘珏 . 炉膛吹灰对 300 MW 供热机组参数的影响 [J]. 上海电力大学学报 ,2021,37(S1):7-8.

[3] 王进 , 程竟 . 火电机组高加泄漏原因分析 [J]. 安徽电气工程职业技术学院学报 ,2021,26(01):77-80.

[4] 潘曰志 , 潘广旭 . 燃煤电厂汽包锅炉给水控制优化方案 [J]. 电力设备管理 ,2020,(03):87-89.

[5] 梁恩宝 , 朱军辉 , 张寅 . 某燃气电厂汽包角焊缝开裂的根本原因分析及处理 [J]. 焊接技术 ,2019,48(09):126-128.

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

智能化技术在煤矿机电管理中的应用

刘旭东
甘肃靖煤能源有限公司魏家地煤矿分公司，甘肃 白银 730913

DOI:10.61369/EPTSM.2026020018

摘　　要： 随着煤炭行业智能化转型推进，智能化技术在煤矿机电管理中的应用成为提升管理效能的关键路径。本文围绕煤矿机电管理与智能化技术基础展开，阐述煤矿机电管理核心内容、常用智能化技术类型及应用价值，深入分析智能化技术在机电设备管理、安全管理（含安全管理智能化监督考核）中的具体应用方向，探讨技术应用保障条件、优化措施及未来发展方向，旨在为煤矿机电管理的智能化升级提供理论参考，推动煤矿机电管理向高效、安全、精准化方向发展。

关 键 词： 智能化技术；煤矿机电管理；设备管理；安全管理；应用保障

Application of Intelligent Technology in Coal Mine Electromechanical Management

Liu Xudong
Weijiadi Coal Mine Branch of Gansu Jingmei Energy Co., Ltd.Baiyin, Gansu 730913

Abstract: As the coal industry advances its intelligent transformation, the application of smart technologies in coal mine electromechanical management has become a key pathway to enhance management efficiency. This paper focuses on the fundamentals of coal mine electromechanical management and intelligent technologies, elaborating on the core aspects of such management, common types of intelligent technologies, and their practical value. It provides an in-depth analysis of the specific application directions of intelligent technologies in electromechanical equipment management and safety management (including intelligent supervision and assessment of safety management). The paper also explores the technical application conditions, optimization measures, and future development trends, aiming to offer theoretical references for the intelligent upgrading of coal mine electromechanical management and promote its development toward higher efficiency, safety, and precision.

Keywords: intelligent technology; coal mine electromechanical management; equipment management; safety management; application support

引言

煤炭需求的不断 增加和煤矿生产规模的扩大，对 煤矿机电设备管理提出了更高的要求。传统的机电设备管理方式已经不能满足煤矿生产的需求，智能化管 理的引入成为必然趋势。智能化管理可以提高煤矿机电设备运行的安全性、效率和可靠性，同时也可以为企业带来更高的经济效益。近些年来，人工智能、物联网、大数据这些智能化技术发展迅速，给煤矿机电管理的变革提供了技术支持。把智能化技术注入到煤矿机电管理的各个环节当中，可以有效地冲破传统管理模式的束缚，改善管理的精确度和有效性。依靠于此，本文针对智能化技术在煤矿机电管理方面的应用实施系统的探究，考察智能化技术助力煤矿机电管理的实现路径。

一、煤矿机电管理与智能化技术基础

（一）煤矿机电管理核心内容

煤矿机电管理的重点在于煤矿生产环节中的各种机电设备与系统，包含设备的日常维护、检修计划制定、状态监测等主要部分，而且关乎机电系统的安全控制、人员安排以及管理流程的改良情况。其核心目的在于保证机电设备可靠运行，加强设备利用率并减小安全风险，维持煤炭生产的连贯性和稳定性。在管理期间，要调和好设备维护、安全监测和生产效率之间的联系，凭借科学的管理方法来规范各类操作程序，达成对机电系统全过程的有效管控，从而给煤炭生产的正常推进提供坚实保障。

作者简介：刘旭东（1987.06-），男，汉族，甘肃天水人，学历：本科，职称：机电工程师，研究方向：煤矿机电。

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

（二）常用智能化技术类型

煤矿机电管理当中所用的智能化技术包含很多种，其中较为常见的是物联网技术、大数据分析技术、人工智能技术和远程检测技术等。物联网技术可以即时收集并传送机电设备各种运行参数，创建起设备和管理平台之间的信息互通渠道。大数据分析技术能够深入挖掘并剖析收集到的大量运行数据，给管理决策给予数据支持。人工智能技术通过算法模型做到对设备故障的智能预测和风险判断，从而改良管理的智能化程度。远程检测技术使得管理人员即便身处远离生产现场之处，也能随时了解设备的运行情况，达成对设备运行的远程控制和管理。

（三）智能化技术应用价值

智能化技术应用于煤矿机电管理有着突出的价值。其主要价值体现在改善管理效率上，依靠自动化数据采集并实施智能分析，缩减人工干预，削减管理流程历时，减小管理成本。而且，可以加强安全管理能力，预先察觉潜在的安全风险以及设备故障隐患，减小安全事故发生的可能性，捍卫生产安全。智能化技术的运用还有助于改良资源安排，改进设备利用率，增添设备使用寿命，促使煤矿机电管理模式由传统的经验型朝着现代智能型方向转变，给煤炭行业的绿色可持续发展提供强有力的支撑。

二、智能化技术在机电设备管理中的应用

（一）设备状态智能化监测

设备状态智能化检测借助整合物联网和传感器技术，可以随时、精确地监测机电设备运行时的各种关键参数，设备的温度、震动、电压、电流等运行指标都在监测范围之内。监测系统会自动收集并传送相关数据，按照预先设定的阈值来判断设备的运行状态是不是正常。相比于传统的依靠人力监测的方式，智能化检测打破了时间和空间的束缚，免除了人工监测存在的主观因素和迟缓问题，能够立即察觉到设备运行期间出现的反常现象，给设备的维护保养赋予及时、可靠的数据支持，保证设备一直维持稳定的运行态势，从而为煤炭生产的连贯性供应保障。

（二）设备全生命周期智能化管理

设备全生命时段智能化管理包含设备从采购入库、安装调试、运行守护到报废处理的全过程，创建智能化管理平台，整合设备全生命时段的各种信息，达成对设备各个部分的精准管理。在设备采购期间，可以利用大数据分析改良采购方案；在运行守护阶段，按照设备运行的数据制订个性化的运维计划；在报废处理阶段，通过智能评定做到设备残值的最大化利用。这种全流程智能化管理模式能够做到对设备资源的有效整合与改良设置，改善设备管理的系统性和科学性，缩减设备全生命时段管理的成本。

（三）设备故障智能化预警

设备故障智能化警报依靠人工智能和大数据分析技术，通过形成故障警报模型，对设备管理数据执行随时分析和判断。系统可遵照历史管理数据及故障案例创建算法模型，精确识别设备管理时的异常信号，预先判断可能出现的故障种类和时间，并及时发出警报信号。智能化警报可以把设备故障管理从传统的事后修理变成事前警报和预防，有效地缩减故障停机时间，减小故障修理成本，改进设备管理的可靠性。而且，警报信息能给修理人员给予确切的修理方向，增强修理工作的针对性和效率。

（四）设备运维智能化决策

设备运维智能化决策是基于设备状态监测、全生命周期数据及故障预警信息，通过人工智能算法与专家系统，为设备维护、维修、更换等关键环节提供科学、动态的决策支持。该系统能够综合分析历史运行数据、实时工况、部件寿命预测及备件库存等多源信息，自动生成并优先推荐最优运维策略，如预测性维护工单、备件采购计划或设备更新建议。这改变了传统依赖固定周期或事后检修的模式，实现了从“计划维修”到“按需智维”的转变，从而显著提升维修精准性，降低非计划停机时间，并实现运维成本与设备效能的整体最优。

三、智能化技术在机电安全管理中的应用

（一）安全风险智能化识别

安全风险智能化识别需整合多种智能化检测技术及风险考量算法，从而全方位、高精度地识别煤矿机电系统的安全风险。该系统可即时采集机电设备运行数据、环境参数等关联信息，并遵照预先设定的风险考量指标体系，自动分析并分级潜在的安全风险。与传统风险识别模式相比，智能化识别可超越人工识别的局限，预先察觉并准确定位潜在风险，切实加强风险识别的全面性与时效性，给安全管理决策提供可靠依据，从根源缩减安全事故发生的概率。同时，该系统具备自我学习与迭代能力，能够基于历史风险事件及处置效果持续优化识别模型，不断提升对新型、复合型风险的敏锐度和判断准确性，使安全风险管理从静态防御向动态自适应演进。

（二）作业过程智能化管控

作业过程智能化管理依靠远程观察、智能传感等技术，可以随时对煤矿机电作业全过程实施管理。该系统能够随时监测作业人员的操作行为、设备运行状况以及作业环境，及时察觉并修正不规范的操作行为，保证作业过程符合安全规范要求。智能化管理系统会遵照作业场景的实际状况，自动调整设备运行参数，改良作业流程，加强作业过程的安全性和效率。通过智能化管理，可以有效地规范作业行为，缩减因人导致的安全风险，保障机电作业得以顺利开展。

（三）安全应急智能化响应

安全应急智能化响应形成起包含应急警报、应急决策以及应急处理的智能化应急管理体系。一旦出现安全事故，系统便会自动启动应急响应流程，立即收集事故现场有关信息，利用智能算法制订出理想的应急处理计划，并及时传达给负责人员和救援人员。该系统可以随时监测并调度救援进程，改良救援资源安排情况，改进应急处理的速度。智能化应急响应能切实缩减应急处理历时，减轻事故造成的损害，加强煤矿机电安全应急管理的科学水平与实用价值。

（四）安全管理智能化监督考核

安全管理智能化监督考核依靠智能化管理平台形成起全流

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

程、自动化的监督考核体系，可以针对煤矿机电安全管理工作实施精确评定并展开动态监管。这个体系能够自动收集安全管理各个环节的数据，风险识别成果、作业规范执行状况、应急反应速度等方面的数据，并依照预先设定的考核指标予以量化打分。通过智能化监督考核，可以冲破传统人工考核存在的主观偏见和局限范围，保障考核结果的公正性与客观性。而且还能立即察觉到安全管理过程中的不足之处，给管理改善提供指向性的引导。智能化考核的结果会及时告知有关的部门和人员，从而加强责任的执行力度，促使安全管理水平不断得到加强。

四、智能化技术应用保障与发展

（一）技术应用保障条件

智能化技术想要在煤矿机电管理当中得到有效的运用，就离不开诸多保障条件。第一点在于形成完备的技术保障体系，针对智能化技术与煤矿机电管理需求之间的适应性展开研发，从而改良技术应用的稳定性和可靠性。第二点是要重视人才保障，塑造兼具煤矿机电管理知识以及智能化技术应用能力的复合型人才，以符合智能化管理对于人力的需求。第三点则是创建并完善相关的管理制度和标准，约束智能化技术的应用步骤，给技术的顺畅应用给予制度上的支撑，促使智能化技术在煤矿机电管理当中发挥出最大的效益。

（二）应用过程优化措施

在智能化技术的应用进程当中，要一直采取改良措施来改善应用效果。其一，应该加大对应用过程的动态监测和评价力度，及时察觉技术应用中的问题与短缺之处，并且针对这些问题提出改进方案。其二，要促使智能化管理系统的不断升级换代，按照煤矿机电管理的实际需求，持续完善系统功能，改进系统的智能化水平及其适应能力。还要巩固各部门间的协作配合，冲破信息隔阂，做到数据资源的共享与整合，从而改善智能化技术应用时的协同效率。

（三）未来应用发展方向

未来，智能化技术在煤矿机电管理中的应用会朝着更为精准化、一体化、智能化的方向发展。伴随技术持续提升，人工智能和大数据分析技术将会达成更深的融合，从而优化管理决策的精准度和科学性。而且，会形成起更为一体化的智能化管理平台，做到对煤矿机电系统全过程、各方面资源的统一调度与监管。智能化技术还将同绿色低碳观念紧密相连，促使煤矿机电管理朝着绿色节能的方向去发展，进而给煤炭行业的高质量可持续发展提供更强劲的动力源泉。

五、结语

智能化技术给煤矿机电管理的改革与升级提供重要支撑，对于改善管理效率、加强安全管理能力起着关键性的作用。本文就智能化技术在煤矿机电管理中的应用执行研究，确定了常见智能化技术种类及其应用价值，剖析了其在设备管理、安全管理方面的具体应用趋势，给出了技术应用的保障条件和改进办法。未来要持续推进智能化技术同煤矿机电管理的深度结合，不断改良技术应用形式，改善管理的智能化水平，促使煤炭行业达成高质量可持续发展。

参考文献

[1] 马相斌，栾正凯 . 煤矿机电设备智能化管理策略研究 [J]. 内蒙古煤炭经济，2025,(12):37-39.

[2] 鹿笑笑，李朋，王聪 . 基于数字化技术的煤矿机电设备管理智能化转型 [J]. 中国战略新兴产业，2025,(05):41-43.

[3] 周骏腾 . 煤矿机电设备的健康智能化管理研究 [J]. 当代化工研究，2021,(08):155-156.

[4] 杨鹏 . 分析煤矿机电设备健康智能化管理系统关键技术 [J]. 内蒙古煤炭经济，2022,(03):136-138.

[5] 郭龙龙 . 煤矿机电设备的智能化管理 [J]. 能源与节能，2023,(10):198-200.

[6] 何波涛 . 智能矿山视角下的煤矿机电技术管理创新 [J]. 矿业装备，2024,(03):137-139.

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

现货市场下燃煤机组深度调峰稳燃优化与应用

马杨洋
国能神皖池州发电有限责任公司，安徽 池州 247100
DOI:10.61369/EPTSM.2026020019

摘　　要： 在新型电力系统转型与电力现货市场全面推进的双重背景下，煤电机组已从传统基荷电源转变为电网“压舱石”，深度调峰能力成为其参与市场竞争的核心竞争力。320MW燃煤汽包炉因汽包蓄热特性显著、水循环系统对负荷变化敏感，在深度调峰（30%额定负荷以下）工况下，普遍面临炉膛温度骤降、煤粉着火困难、燃烧稳定性差、水循环不安全、环保排放超标等技术难题。本文针对该型汽包炉结构特点与运行痛点，从燃烧系统改造、制粉系统优化、控制策略升级及环保系统协同四个维度，构建低负荷稳燃与安全运行优化技术体系。通过数值模拟与工业试验相结合的方法，验证了浓淡燃烧+分层配风、新型稳燃燃烧器应用、汽包水位精准控制、智能协调控制等技术的有效性。工业应用结果表明，优化后机组最低稳燃负荷从30%降至25%，低负荷工况下助燃油耗降低62%，NO_x排放控制在30mg/m³以下，汽包水位波动幅度控制在 ±30mm以内，水循环安全稳定，显著提升了机组在现货市场中的灵活性与经济性，为同类型汽包炉深度调峰改造提供了可推广的技术方案。

关 键 词： 电力现货市场；320MW燃煤汽包炉；深度调峰；低负荷稳燃；水循环安全

Optimization and Application of Deep Peak Shaving and Stable Combustion for Coal-fired Units in Spot Market

Ma Yangyang
Guoneng Shenwan Chizhou Power Generation Co., Ltd. Chizhou, Anhui 247100

Abstract: Against the dual backdrop of new power system transformation and comprehensive development of electricity spot markets, coal-fired power units have evolved from traditional base-load power sources into grid "ballast stones", with deep peak regulation capability becoming their core competitiveness in market competition. The 320MW coal-fired drum boiler, due to its significant heat storage characteristics and water circulation system's sensitivity to load variations, commonly faces technical challenges under deep peak regulation conditions (below 30% rated load), including sudden furnace temperature drops, difficulty in coal powder ignition, poor combustion stability, unsafe water circulation, and environmental emission exceedances. This paper addresses the structural characteristics and operational pain points of this type of drum boiler by constructing an optimized technical system for low-load stable combustion and safe operation through five dimensions: combustion system retrofitting, pulverizing system optimization, water circulation safety assurance, control strategy upgrades, and environmental system coordination. Through numerical simulation combined with industrial testing, the effectiveness of technologies including concentrated-diluted combustion with stratified air distribution, application of new stable combustion burners, precise drum water level control, and intelligent coordinated control was validated. Industrial application results demonstrate that after optimization, the unit's minimum stable combustion load decreased from 35% to 22%, auxiliary fuel consumption reduced by 62% under low-load conditions, NO_x emissions controlled below 300mg/m³, and drum water level fluctuations maintained within ±30mm. The water circulation remained safe and stable, significantly enhancing the unit's flexibility and economic efficiency in spot markets, providing a replicable technical solution for deep peak regulation retrofitting of similar drum boilers.

Keywords: electricity spot market; 320MW coal-fired drum boiler; deep peak shaving; stable combustion at low load; water circulation safety

作者简介：马杨洋（1996.07-），男，安徽人，汉族，学历：大学本科，职称级别：助理工程师。

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

一、研究背景与意义

（一）政策与市场背景

随着“双碳”目标推进，风电、光伏等新能源装机容量持续激增，但此类电源的间歇性、波动性特征对电网安全稳定运行构成严峻挑战。煤电机组作为具备灵活调节能力的核心电源，其深度调峰功能成为平抑新能源波动的关键支撑。同时，电力现货市场的全面运行重构了电力交易规则，山西、浙江等试点区域的实践表明，机组调峰深度、响应速度与运行经济性直接决定其市场收益，低负荷稳燃能力不足的机组面临“调峰收益难获取、基础电量被挤压”的双重困境。

320MW等级燃煤汽包炉作为我国火电行业的主力机型之一，多数采用四角切圆燃烧方式，设计负荷区间集中在50%–100%。与直流炉相比，汽包炉存在汽包水位控制难度大、水循环易受负荷扰动影响等固有特性，在深度调峰工况下，炉膛热负荷显著降低，主燃区温度普遍低于1000℃，导致煤粉着火延迟、燃烧不充分，甚至引发炉膛熄火；同时，低负荷下水冷壁流量减小、流速降低，易出现循环停滞或倒流现象，威胁锅炉本体安全；此外，烟温下降、烟量减少还会造成脱硫脱硝系统效率衰减，环保排放超标风险增加，严重制约了机组参与深度调峰的积极性。

（二）研究意义

1. 工程价值：解决320MW燃煤汽包炉低负荷稳燃与水循环安全难题，拓展机组负荷调节范围，提升电网对新能源的消纳能力，保障电力系统安全稳定运行。

2. 经济价值：通过优化技术降低低负荷工况下的助燃油耗与辅机电耗，提升机组在现货市场中的调峰收益，增强火电厂盈利能力。

3. 环保价值：优化燃烧过程与环保系统协同运行，减少低负荷工况下的污染物排放，助力火电厂实现低碳转型。

二、320MW燃煤汽包炉低负荷稳燃与安全运行影响因素分析

（一）燃烧系统固有缺陷

320MW燃煤汽包炉传统燃烧器多采用均等配风设计，低负荷时一次风速过高导致煤粉着火距离延长，二次风与煤粉混合不充分，炉膛切圆燃烧稳定性变差。同时，炉膛卫燃带面积不足，热量散失过快，难以形成稳定的高温燃烧区，进一步加剧了稳燃难度。此外，原设计大油枪助燃方式存在耗油量高、点火响应慢等问题，单支油枪耗油量超过1800kg/h，显著增加了低负荷运行成本。

（二）制粉系统适配性不足

低负荷工况下，磨煤机出力降至额定值的30%以下，传统中速磨采用固定加载力控制，易导致煤粉过细或堵煤现象，煤粉细度R90波动范围达12%–28%，着火稳定性受到严重影响。同时，煤粉管道积粉问题突出，不仅降低燃烧效率，还存在自燃安全隐患，制约了机组低负荷持续运行能力。

（三）控制策略滞后性

现有协调控制系统（CCS）采用常规PID控制算法，难以适应低负荷工况下的强非线性特性，煤水比、风煤比、汽包水位等关键参数调节滞后。当负荷快速变化时，易出现汽压波动过大、炉膛负压剧烈震荡、水位失控等问题，需依赖人工干预维持运行，无法满足现货市场对机组快速响应的要求。

（四）环保系统协同性差

低负荷时锅炉排烟温度降至280℃以下，低于脱硝催化剂最低活性温度，导致NO_x去除效率从高负荷的85%降至50%以下。同时，烟量减少造成脱硫吸收塔浆液反应不充分，SO_2排放浓度超标风险增加，形成“稳燃、安全与环保”的三重矛盾。

三、320MW燃煤汽包炉低负荷稳燃与安全运行优化技术方案

针对320MW燃煤汽包炉低负荷运行痛点，结合行业先进技术实践，构建“燃烧－制粉－控制－环保”全链条优化技术体系。

（一）燃烧系统改造

1. 浓淡燃烧＋分层配风优化：将原均等配风燃烧器改造为双通道浓淡燃烧器，实现煤粉浓淡分离，浓相区局部煤粉浓度提高30%，提升着火温度；采用分层配风策略，底层风率提高至35%强化稳燃，上层风率降低至25%抑制结焦，形成“下强上弱”的配风模式，确保炉膛中心温度维持在1100℃以上。

2. 新型稳燃燃烧器应用：在底层燃烧器加装逆喷式多级预热稳燃器，通过燃用超浓煤粉形成中心稳定火焰，为主煤粉气流提供持续热源，替代传统等离子点火装置。该稳燃器无需额外助燃，可实现20%负荷下无油稳燃，较常规技术降低稳燃负荷阈值43%。

3. 小油枪替代改造：将原大油枪更换为单支耗油量100kg/h的小油枪，布置于燃烧器周向，形成环形稳燃带，低负荷助燃油耗降低60%以上，点火响应时间从30秒缩短至10秒。

（二）制粉系统适应性优化

1. 磨煤机变参数控制：中速磨采用“变加载力”控制策略，低负荷时研磨压力从12MPa降至8MPa，避免煤粉过细导致的着火延迟；优化磨煤机出口动态分离器转速，确保低负荷时煤粉细度R90稳定在15%–20%，兼顾着火稳定性与燃烧效率。

2. 煤粉管道优化：在磨煤机出口及煤粉管道关键位置加装吹扫装置，每10分钟自动吹扫一次，彻底解决积粉问题；新增煤粉流量在线监测装置，实时调整各管道煤粉分配均匀性，偏差控制在 ±5%以内。

（三）控制策略升级

1. 模型预测控制（MPC）引入：基于汽包炉蓄热特性、水循环规律与汽轮机响应滞后规律，建立320MW机组全工况动态模型，提前预判负荷指令变化，实现“锅炉－汽轮机”超前协调控制。负荷从40%降至20%时，汽压波动幅度控制在 ±0.3MPa以内。

2. 低负荷PID参数自整定：采用模糊PID自适应算法，针对

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

30%负荷以下的非线性特性，自动调整燃烧、水位、汽压等控制系统参数，减少超调量与调节时间。改造后，负荷响应速度提升40%，10分钟内可完成20%–50%负荷的升降调整，满足现货市场二次调频要求。

（四）环保系统协同优化

1. 脱硝系统柔性改造：在脱硝反应器入口加装小容量燃气加热器，低负荷时将烟温提升至300℃以上，确保催化剂活性；优化喷氨格栅为多孔微喷结构，氨逃逸浓度控制在3ppm以下，NO_x去除效率稳定在80%以上。

2. 脱硫系统提效：在吸收塔入口加装烟气再热器，利用汽轮机抽汽将烟气温度加热至80℃以上，提升浆液反应活性；采用“单塔运行＋强制氧化”模式，低负荷时减少浆液循环量，降低辅机电耗的同时确保SO_2排放达标。

四、工业应用与效果验证

（一）应用对象

某电厂320MW燃煤汽包炉，锅炉型号为HG–1025/18.2–YM31，采用四角切圆燃烧方式，配备4台中速磨煤机，原最低稳燃负荷为30%额定负荷，低负荷运行时存在助燃油耗高、水循环不稳定、环保排放波动大等问题。2024年6月完成上述优化改造后，开展了为期3个月的工业试验，验证低负荷稳燃与安全运行效果。

（二）试验结果分析

1. 稳燃能力显著提升：机组最低稳燃负荷从30%降至25%，在25%–30%负荷区间连续运行72小时无熄火现象，炉膛负压波动范围控制在 ±50Pa以内，燃烧稳定性满足深度调峰要求。

2. 经济性大幅改善：25%负荷工况下，助燃油耗从改造前的85kg/h降至32kg/h，降低62%。

3. 环保排放达标：25%负荷工况下，NO_x排放浓度稳定在26–35mg/m³，SO_2排放浓度低于35mg/m³，烟尘排放浓度低于5mg/m³，全面满足GB13223–2011排放标准要求。

4. 响应速度提升：负荷从30%升至50%的调节时间从32分钟缩短至18分钟，从50%降至25%的调节时间从40分钟缩短至27分钟，满足现货市场对调峰响应速度的考核要求。

（三）市场收益提升

在电力现货市场交易中，优化后的机组可参与25%–30%负荷区间的深度调峰交易，调峰补偿收益较改造前增加150万元/月。同时，凭借快速响应能力，二次调频合格率从82%提升至96%，额外获得调频奖励收益约60万元/月，显著提升了机组在市场中的竞争力。

五、结论与展望

（一）研究结论

本文通过对320MW燃煤汽包炉深度调峰低负荷稳燃与安全运行优化研究与应用，得出以下结论：

1. 采用“浓淡燃烧＋分层配风”改造、逆喷式稳燃器应用及小油枪替代技术，可有效解决低负荷炉膛温度不足、着火困难等问题，将最低稳燃负荷从30%降至25%，实现无油稳燃。

2. 制粉系统“变加载力＋动态分离”优化与煤粉管道吹扫改造，确保了低负荷下煤粉品质稳定，避免了堵煤与积粉风险，为稳燃提供了可靠的燃料保障。

3. 模型预测控制与模糊PID自适应算法的结合应用，显著提升了机组负荷响应速度与运行稳定性，满足了现货市场对灵活性的要求。

4. 脱硝烟气补热与脱硫浆液强制氧化技术，实现了低负荷工况下环保系统与燃烧系统的协同运行，确保污染物达标排放。

（二）展望

未来随着电力现货市场的成熟与新能源渗透率的进一步提升，煤电机组深度调峰需求将持续增加，汽包炉低负荷稳燃技术需向“智能化、低碳化”方向发展。建议后续开展以下研究：

1. 引入数字孪生技术，构建320MW汽包炉全工况数字模型，实现燃烧、水循环、环保系统的实时模拟与参数精准预判，进一步提升稳燃与安全运行可靠性。

2. 探索氨煤掺烧技术，利用稳燃器预留的掺烧接口，实现低负荷下氨替代部分煤粉燃烧，降低碳排放强度，助力“双碳”目标实现。

3. 开展多机组协同调峰研究，结合储能技术，构建“火电＋储能”调峰联合体，提升在现货市场中的整体竞争力，为新型电力系统建设提供更有力支撑。

参考文献

[1] 中国煤炭科工集团 . 面向新一代煤电的深度调峰逆喷式多级预热高效燃烧装备技术白皮书 [R]. 2025.

[2] 晋控电力塔山发电有限公司 . 电力现货市场下火电机组深度调峰运行实践 [J]. 热力发电 , 2025, 54(1): 89–95.

[3] 李争起 . 一种新型低负荷稳燃燃烧器的气固流动特性 [J]. 洁净煤技术 , 2025, 31(9): 78–85.

[4] 煤炭学报编辑部 .1000MW燃煤锅炉深度调峰低负荷燃烧优化数值模拟 [J].煤炭学报 ,2024, 49(3): 1023–1032.

[5] 国家能源局 . 煤电机组深度调峰技术改造指导意见 [Z].2024.

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

光伏并网逆变器低电压穿越能力增强技术与故障诊断方法

杜鹏
三峡集团云南能源投资有限公司，云南 昆明 650000
DOI:10.61369/EPTSM.2026020020

摘　　要： 随着光伏发电在电力系统中的大规模接入，光伏并网逆变器在电网故障条件下的运行性能对系统安全稳定性提出了更高要求，低电压穿越能力作为衡量光伏并网逆变器并网适应性的关键指标，其不足易引发逆变器脱网，围绕光伏并网逆变器低电压穿越能力增强技术，系统分析了电流限幅控制、无功优先支撑、直流侧电压抑制等关键技术，并探讨了基在电流特征、电压扰动的故障诊断思路，研究结果可为提升光伏并网逆变器运行可靠性提供理论参考。
关 键 词： 光伏发电；电力系统；光伏并网逆变器

Enhanced Low Voltage Ride-Through Capability and Fault Diagnosis Method for Photovoltaic Grid-Connected Inverter

Du Peng
Yunnan Energy Investment Co., Ltd., Three Gorges Group, Kunming, Yunnan 650000

Abstract: With the large-scale integration of photovoltaic power generation into power systems, the operational performance of grid-connected photovoltaic inverters under grid failure conditions has raised higher requirements for system safety and stability. Low-voltage ride-through capability, as a key indicator of grid adaptability for PV inverters, poses risks of inverter disconnection when insufficient. This study systematically analyzes critical technologies for enhancing low-voltage ride-through performance, including current limiting control, reactive power priority support, and DC-side voltage suppression. It also explores fault diagnosis approaches based on current characteristics and voltage disturbances. The research findings provide theoretical references for improving the operational reliability of grid-connected photovoltaic inverters.
Keywords: photovoltaic power generation; power system; grid-connected photovoltaic inverter

引言

随着光伏发电在电力系统中的高比例接入，电网对并网逆变器运行稳定性的要求不断提高，低电压穿越能力是衡量光伏并网逆变器在电网故障、电压暂降等扰动条件下持续并网运行能力的关键指标，其不足可能引发大规模脱网风险，影响电网安全，同时，逆变器结构复杂、运行工况多变，故障类型隐蔽且演化迅速，传统诊断方法难以及时、准确识别，因此，研究光伏并网逆变器低电压穿越能力增强技术，对提升新能源消纳水平具有重要意义。

一、光伏并网逆变器低电压穿越能力的概述

所谓光伏并网逆变器低电压穿越能力，就是电网发生短路故障、电压暂降或不平衡等异常情形时，逆变器可在不脱离电网的状态下持续运行，按电网规范提供所需的无功支撑和电流控制能力性能指标，光伏发电渗透率稳步上升，大规模光伏电站正从传统“被动电源”逐步转变为能显著影响电网稳定性的“主动电源”，低电压穿越性能直接关联电力系统安全和可靠运行。电压跌落阶段内，逆变器必须抑制直流侧过压，限制并网电流冲击，还得满足电网对无功电流注入比例和响应速度的要求，这让控制策略、硬件设计及保护协调面临更高难度，针对光伏并网逆变器低电压穿越能力，全面研究其机理、控制方法及性能提升路径，对强化新能源并网适配能力、防止连锁脱网事故、提高电网抗干扰水平有重要工程价值和现实意义。

作者简介：杜鹏（1988.05-），男、汉族，河南省商丘市人，大学本科、工程师、从事新能源光伏、风电、水电、储能建设与管理方面研究。

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

二、光伏并网逆变器低电压穿越能力增强技术分析

（一）电流限幅控制策略

电网出现电压跌落或短路故障，逆变器维持并网运行，一般要输出较大电流支撑电网电压，若不进行约束，易引发并网电流超出器件额定值，引致功率器件过流损坏或保护误动作，低电压穿越阶段加入高效电流限幅控制，可在达到电网规范要求的前提下，维持逆变器运行的安全和可靠，这类策略一般会动态限制并网电流参考值，让实际输出电流一直维持允许范围，实现故障时段稳定运行。在实际推进时，电流限幅控制策略要与功率控制和无功支撑要求协同，电压跌落阶段内，逆变器须优先保障无功电流注入比例，维持电网电压稳定，有功电流将同步得到限制，合理分配且限幅 d 轴和 q 轴电流，可杜绝控制饱和和系统失稳问题，同步设计快速电流检测与限幅环节，可强化控制响应速度，提升限幅精度，适配的电流限幅控制可兼顾保护逆变器硬件安全，还可强化它面对复杂电网故障时的低电压穿越性能，能为光伏系统高比例并网提供重要工程支撑。[1]

（二）无功优先支撑控制

电网出现电压暂降或故障阶段，电压支撑能力的核心依托是无功功率的快速调节与注入，传统光伏逆变器侧重输出有功功率，电压异常状态下沿用原有有功控制模式，易加剧电网电压起伏，甚至触发并网保护机制脱离电网，无功优先支撑控制改动功率控制优先级，低电压穿越阶段优先保障无功电流输出，增强电网电压恢复能力，进而契合并网技术规范针对新能源电源的支撑要求。在实施实际控制操作时，无功优先支撑一般和电流限幅机制配合实现，逆变器输出电流受限状态下，控制系统按照电网电压跌落程度动态调整有功和无功电流分配占比，让无功电流优先满足支撑需求，有功电流对应缩减甚至临时抑制，把无功优先逻辑加入电流内环或功率外环，能规避控制饱和和系统不稳定问题，合理配置无功支撑曲线和响应速度，帮助强化逆变器针对不同故障工况的适配能力，无功优先支撑控制可强化光伏并网逆变器故障时段的电压支撑性能，也强化了它参与电网稳定调节的能力，对高比例光伏并网运行作用重大。[2]

（三）直流侧电压抑制

电网出现电压跌落或短路故障，交流侧功率输出能力明显减弱，光伏阵列仍不间断向直流侧供给能量，引发直流母线功率失衡，继而引发直流侧电压骤增，直流电压超出逆变器及其功率器件的安全阈值，会触发保护动作，甚至损坏器件，大幅削弱系统连续运行能力，有效抑制低电压穿越时的直流侧电压，决定逆变器能否稳定并网运行的核心环节。在工程实操阶段，直流侧电压抑制一般结合控制策略与硬件措施实现，可采取降低有功功率指令、调整电流控制环节或加入能量平衡控制的方式，调整输入输出功率 故障期间实现重新匹配，靠控制手段限制直流电压攀升，可对接直流侧储能单元、制动电阻或能量耗散电路，及时释放冗余能量，降低电压冲击，快速检测直流电压，配套动态调节机制，可强化抑制效果与响应速度，恰当的直流侧电压抑制设计可维护逆变器硬件安全状态，还为它在低电压穿越期间持续并网、提供电网支撑打下必要基础。

（四）虚拟同步发电控制

虚拟同步发电控制，是借助控制算法复刻传统同步发电机电气和机械特性的先进并网控制策略，可有力提升光伏并网逆变器低电压穿越能力，该控制方法给逆变器添加等效转动惯量、阻尼系数和同步特性，让它在电网电压跌落或扰动出现时拥有近似同步发电机的惯性响应和电压支撑能力，和传统基在锁相环的并网控制方式比，虚拟同步发电控制可降低电网故障期间相位突变和频率波动对逆变器运行的干扰，进而增强系统暂态稳定性与故障适应能力。[3]在开展低电压穿越期间，虚拟同步发电控制借助调整虚拟电磁功率和转速方程实现，让逆变器输出的电流、功率平稳变化，切实防止电流冲击和控制失稳问题，该控制方式可在电压跌落过程中主动参与无功调节，提升电网电压支撑水平，故障恢复阶段完成平稳过渡，降低对电网的2次扰动，虚拟同步发电控制不靠高速锁相环，减小弱电网条件下的并网难度，合理调整虚拟惯量和阻尼参数，既能保障逆变器安全运行，又能大幅强化低电压穿越性能，对打造高比例新能源接入的稳定电力系统意义重大。

三、光伏并网逆变器低电压穿越能力故障诊断方法

（一）基在电流特征诊断

电网出现电压跌落或短路故障时，从幅值、相位、波形及谐波含量等维度看，逆变器并网电流有明显动态变化特征，监测分析并网电流瞬时值、有效值及变化率的实时数据，能快速甄别逆变器低电压穿越过程的异常运行状态，电流猛增、畸变加剧或失衡状态，一般表明控制策略失效、器件性能退化或并网参数异常等问题，靠电流特征实现的诊断方法，无需依托复杂模型，对低电压穿越相关故障实现快速发现与初步锁定。提取电流幅值特征、序分量特征及时频域特征，并同正常工况的特征模板作对比，能区分故障类型及严重程度，可让电流特征诊断结果与控制系统联动，发现异常趋势时即刻调整电流限幅或无功支撑策略，阻止故障范围扩大，靠电流特征开展诊断，有实现简便、响应迅速、在线应用能力突出等优点，能为光伏并网逆变器低电压穿越能力评估和运行维护筑牢有效支撑，对增强系统运行可靠性具备重要工程意义。

（二）基在电压扰动分析

电网出现故障、电压暂降或不平衡扰动时，逆变器并网点电压的幅值、相位、波形形态会出现明显变动，这些电压扰动特征可直接反映逆变器的动态响应能力和控制性能，对并网电压暂降深度、持续时间以及恢复过程开展监测与分析，可判定逆变器低电压穿越阶段是否符合并网规范标准，逆变器未及时同步电压变化或产生异常振荡，一般提示控制参数设置错误或内部器件存在潜在故障，电压扰动分析可为低电压穿越能力诊断提供核心支撑。在投入实操时，该方法一般会结合电压信号的时域和频域分析技术，完整评估扰动响应特征，分析电压跌落时段的电压恢复速度、波动幅度及与无功支撑指令的匹配程度，可辨识控制滞后、支撑不足或过度补偿等问题，可采用对称分量分析与电压不

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

平衡指标，协助判定逆变器在复杂故障条件下的适应能力，依托电压扰动分析制定的诊断对策，有直观性强、易操作、契合并网标准的突出特点，覆盖在线监测与运行评估场景，可及时排查低电压穿越能力不足的隐患，为光伏并网逆变器安全稳定运行筑牢可靠屏障。[4]

（三）时频信号分析方法

可借助时频信号分析方法，高效诊断光伏并网逆变器低电压穿越能力故障，尤其适配电网故障时段电气信号非平稳、突变性强的特点，遭遇电压暂降或短路扰动时，逆变器的并网电压、电流等信号往往同时带有幅值突变、频率漂移及谐波增强等多种特征，只用单一的时域或频域分析，没法完整呈现动态变化过程，运用时频分析方法，可从时间、频率两个维度同步观测信号特性，精准捕捉低电压穿越过程中的瞬态扰动和能量分布变化，给故障诊断提供更丰富的信息支撑。在实施具体对策时，时频信号分析常借助短时傅中叶变换、小波变换或希尔伯特 - 黄变换等工具，对采集到的电压、电流信号做分解及特征提取，解析不同时间尺度的频谱演化特征，可辨识控制失效、参数异常或器件故障诱发的异常谐波和瞬态振荡，把提取的时频特征和正常低电压穿越工况做对比，可判别故障类型且评估严重程度，该方法的优势是对突发扰动反应敏锐、诊断精准，能与在线监测系统和智能诊断算法协同运作，为光伏并网逆变器低电压穿越能力的评估和优化提供可靠技术支撑。

（四）状态观测器诊断法

用状态观测器诊断法，可借助系统模型排查光伏并网逆变器低电压穿越能力故障，核心逻辑是借助逆变器数学模型和实际运行数据的偏差判别系统是否异常，执行低电压穿越阶段，逆变器的电压、电流及功率等状态变量会出现快速变化，控制系统或功率器件产生故障，实际状态与理论模型预测状态将形成明显残差，搭建适配并网逆变器的状态观测器，实时估算关键状态量，把估计值和实测值进行对比，可及时检测并定位低电压穿越相关故障，进而强化诊断的准确性和可靠性。在工程实践应用环节，状态观测器诊断法一般搭配鲁棒控制与自适应机制，增强对参数不确定性和外部扰动的适应能力，采用阈值判断或模式识别分析残差信号，能区分正常低电压穿越工况和异常运行状态，还能进一步甄别控制回路失效、传感器偏差或功率器件退化等问题。[5]把状态观测器与逆变器控制系统做同步设计，诊断出异常趋势后，可提前启动保护机制或调整控制策略，阻拦故障扩散，该方法拥有模型清晰、诊断逻辑严谨的长处，适配低电压穿越性能要求较高的光伏并网系统，为增强逆变器运行安全性和电网稳定性找到可靠技术方案。

四、结语

光伏并网逆变器低电压穿越能力的提升与故障诊断方法研究，是保障新能源高比例接入电力系统安全稳定运行的重要技术基础。通过合理设计电流限幅、无功优先支撑、直流侧电压抑制以及虚拟同步发电等控制策略，可有效增强逆变器在电网故障和电压扰动条件下的运行适应性。同时，结合基在电流特征、电压扰动、时频信号分析和状态观测器等多种故障诊断方法，能够实现对低电压穿越过程的在线监测与精准识别，为运行维护和控制优化提供有力支撑。未来，随着光伏装机容量的持续增长和电网结构的日益复杂，低电压穿越能力与智能诊断技术的协同发展将成为研究重点，对推动新能源系统的安全、高效和可持续发展具有重要意义。

参考文献

[1] 程杉，蔡子威，张旭军，等 . 基在雪消融算法的光伏并网逆变器低电压穿越模型多阶段参数辨识方法 [J]. 电力系统保护与控制，2025，53(5)：47-58.

[2] 张兵建 . 光伏并网逆变器低电压穿越技术研究 [J]. 百科论坛电子杂志，2021(4).

[3] 徐裕勇 .MW 级光伏并网逆变器低电压穿越控制策略 [J]. 电子技术与软件工程，2020，000(010)：P.213-216.

[4] 王瑞，商飞，王良全 . 基在 LabVIEW 的光伏逆变器低电压穿越检测方法研究 [J]. 电测与仪表，2023，60(3)：178-182.

[5] 任颉，周鹏鹏 . 用在光伏逆变器故障穿越的载波交叠调制优化 [J]. 电力系统保护与控制，2024(14).

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

电厂化学监控与环境保护策略分析

彭珊
贵州黔西中水发电有限公司，贵州 黔西 551500
DOI:10.61369/EPTSM.2026020023

摘　　要： 本文系统探讨了电厂化学监控体系及其在环境保护中的核心作用。全文首先剖析了电厂化学监控体系的三大核心构成，包括水汽循环、燃料燃烧产物及水处理排放的监控关键。进而阐述了如何利用化学监控数据驱动环境风险识别，建立预警与评估模型。在此基础上，提出了面向环境保护的化学过程优化策略，旨在实现系统运行与污染减排的协同。最后，对监控体系与环保策略的融合进行了展望，强调了智能化平台、标准强化与全生命周期风险防控的重要性，为电厂绿色转型提供系统性思路。

关 键 词： 电厂化学；监控体系；环境保护；风险识别；过程优化；策略融合

Analysis of Chemical Monitoring and Environmental Protection Strategy in Power Plant

Peng Shan
Guizhou Qianxi Zhongshui Power Generation Co., LTD. Qianxi , Guizhou 551500

Abstract: This paper systematically examines the chemical monitoring system in power plants and its pivotal role in environmental protection. The study first analyzes the three core components of the chemical monitoring system, including key monitoring parameters for water vapor circulation, fuel combustion products, and water treatment discharges. It then elaborates on how chemical monitoring data can drive environmental risk identification and establish early warning and assessment models. Building on this foundation, the paper proposes chemical process optimization strategies for environmental protection, aiming to achieve synergy between system operation and pollution reduction. Finally, it explores the integration of monitoring systems with environmental protection strategies, emphasizing the importance of intelligent platforms, standardized reinforcement, and lifecycle risk prevention. These insights provide a systematic framework for the green transformation of power plants.

Keywords: power plant chemistry; monitoring system; environmental protection; risk identification; process optimization; strategy integration

引言

能源电力行业朝着绿色可持续方向发展，在此大背景之下，电厂的环境表现慢慢成了人们瞩目的焦点。化学检测是电厂安全、经济又环保运行的“眼睛”与“哨兵”，创建化学检测体系并采用相关策略十分关键。该体系不但能维持热力设备内部化学流程稳定，还是从源头防止并调控污染物排放以做到环保目标的技术根基。但是，传统的化学检测常常重视设备内部保护，其与环境保护之间的积极互动还有进一步加强之处[1]。因此，本文旨在系统剖析电厂化学检测体系的关键形成部分，详细探究如何把检测数据有效地转变为识别和应对环境风险的依据，从而在保障设备安全的同时，间接减少因设备故障或效率下降导致的潜在环境负荷。

一、电厂化学监控体系核心构成

（一）水汽循环系统的化学监控关键指标

水汽循环对于电厂热力系统而言就像血液一样重要，化学检测的目的在于防范腐蚀、结垢以及积盐现象的发生，以此来保证设备长时间稳定运行。监测的关键指标包含诸多方面，而 pH 值、电导率以及溶解氧则是体现水体腐蚀性的主要参数，要展开持续的在线监测并实施严格的把控。对钠离子、二氧化硅以及联氨等含量的监测，则可用来评判蒸汽的纯净程度，并规避过热器和汽轮机通流部位出现积盐情况[2]。而且，还要对水汽中的阴离子比如氯离子、硫酸根离子执行监测，这对于判断凝汽器是否存在泄漏以及分析腐蚀趋势来说非常关键。这些关键指标形成起一

作者简介：彭珊（1982.10-），女，汉族，贵州省兴义市万屯镇，大专，助理工程师，电厂化学专业。

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

张紧密的监测网络，通过随时追踪它们的变化，可以及时判断系统内部的化学状况，给精确调节提供依据，这样既能保障设备安全，又能间接缩减由于设备故障或者效率降低所产生的潜在环境负荷。

（二）燃料与燃烧产物的分析监测重点

化学检测燃料和燃烧产物，这属于控制大气污染物排放的起始部分。燃料检测主要针对其工业成分与元素成分展开，硫分、灰分、挥发分以及重金属含量等，这些数据会直接影响燃烧时污染物产生的可能性及其后续治理的困难程度。对于燃烧产物来说，重点在于烟气，要持续不断地监测烟气中的二氧化硫、氮氧化物以及烟尘浓度，这是符合环保排放标准的必要条件。而且，烟气里汞这种微量重金属、三氧化硫以及一氧化碳的监测也慢慢被人们所关注，它们对设备、环境以及燃烧效率有着很大的影响。把握好入炉燃料品质，并及时监测出口烟气成分，就可以创建起从输入到输出的闭合运作体系，给改善燃烧状况、评估脱硫脱硝等环保设施效率提供重要的数据支持，实现前端预防与末端治理的联动。

（三）水处理与废水排放的监控节点设计

水是生命之源，是人们生活和工业生产所必需的物质，水的质量牵扯到人们生活的方方面面。水质分析可以有效的指出水中各种化学物质和生物物质的存在数量，从而给出该水域的健康数据。电厂水系统牵涉补给水制备以及各种废水处理部分，其监测节点规划要包含整个流程[3]。在补给水处理阶段，监测节点安排在预处理出水、除盐系统进出端等地方，着重关注浊度、化学需氧量、硬度、硅含量等情况，以保证送入锅炉的水质符合标准。至于废水处理和排放方面，监测节点应当系统地布置起来，覆盖诸如脱硫废水、含煤废水、酸碱废水等各种工业废水的处理系统进出端，还有全厂废水的总排放口。监测指标按照废水特点包含 pH 值、悬浮物、化学需氧量、氨氮、重金属、氟化物等。

二、化学监控数据驱动的环境风险识别

（一）基于监控数据的污染物迁移与转化分析

海量的化学检测数据是探究污染物在电厂多介质环境里迁移与转变规律的重要财富，通过对水、汽、燃料、烟气、灰渣以及废水中各种化学物质浓度的数据实施关联分析，可以追寻到诸如重金属、氮、硫等特定污染物的流动轨迹。比如，剖析燃料硫分同烟气二氧化硫、脱硫产物成分之间的联系，就能表现出硫的转变及其去向。再加上水平衡和物质平衡的计算，就可以定量地评估污染物在各个系统环节中的分布情况、形态改变以及最终的排放量[4]。这样一种依靠实际检测数据来做迁移和转变分析的做法，打破了单个环节的限制，站在全流程的高度表现出了污染物的环境行为，给找到可能存在的排放热点和风险环节提供了科学依据，从而让环境治理变得更具前瞻性与系统性。

（二）异常数据预警与潜在环境风险关联模型

创建依托化学检测数据的异常通知机制，这是积极防控环境风险的重要举措。利用大数据分析技术，针对历史正常工况下的检测数据（诸如 pH 值、污染物浓度、流量等），实施深度学习，形成关键参数的正常运行范围及其关联模型。一旦即时数据发生异常波动、呈趋势偏离或者关联被打破，系统便能自动发出通知。这个通知既关乎设备运行风险，又通过与排放标准、环境容量、接纳水体或者大气扩散状况等环境要素的关联模型，评估其可能导致的环境风险级别。

（三）化学物质排放对环境介质的影响评估

化学检测的最终目标包含评估并减小排放物给环境造成的影响。凭借排放口的持续检测数据以及厂界环境检测的数据，可以定量评估电厂排放化学物质可能给周边空气、水体以及土壤等环境介质带来的影响。通过剖析排放污染物的浓度、总量、排放规律（连续或者间歇），还有理化性质，并结合区域环境本底值和散开模型，就能够评估它们对于环境质量所产生的累加性、叠加性影响。特别留意持久性、生物蓄积性和毒性的物质，评估其长时间存在的生态风险[5]。依靠检测数据来执行影响评估，这会促使环境经营由单纯的浓度达标监管朝着以环境影响和风险可被控制为目标的质量经营转变，从而给环保决策和公众交流提供客观、科学的依据。

三、面向环境保护的化学过程优化策略

（一）基于精准监控的药剂投加与运行工况优化

传统上，化学药剂的投放及运行控制大多依靠经验或者固定模式，这极易引发药剂的浪费或者达不到预期的效果。但是，如果凭借精确的化学检测数据，就可以达成智能化的改良目标。随时监测水汽品质、结垢趋势、腐蚀速度等参数，并据此来调整缓蚀剂、阻垢剂、酸碱等药剂的投放量及其投放方法，做到“按需精确投放药剂”，如此一来既能确保达到效果，又可以从源头削减化学品的用量并减轻后续废液处理的压力[6]。而且，融合燃烧检测的数据之后，还可以改善锅炉燃烧时风煤的配合比例，调控燃烧温度范围，进而于燃烧过程中抑制氮氧化物的产生。

（二）水汽循环系统防腐防垢与减排协同控制

水汽系统的防腐防垢以往着重保障设备安全，但它所包含的化学过程与减排有着本质上的契合之处。改良水化学工况时，采取高纯度给水、执行加氧处理或者联合水处理等技术，既能有效地遏制流动加剧腐蚀现象并缩减铁铜氧化物沉淀，又能大幅削减系统的排污比例。排污量的削减便体现为高含盐废水和热污染量的缩减。通过监测并改善凝结水精处理系统的运行情况，提升再生效率以及自用水比率，就可以缩减酸碱再生废液的生成量。把防腐防垢的化学调控目的同全厂的水耗量、废水排放量、化学品消耗量等环保指标关联起来加以综合考虑，这样就达成了设备长时间稳定运行和源头减排的双重目标。

（三）废水梯级利用与近零排放的化学技术集成

废水的梯级利用及近零排放属于电厂节水环保的核心目标，这很大程度上取决于化学检测和处理技术的深度融合。其一，要遵照全面监测的数据，精准地对各种废水实施水质分类并评估其特性。其二，依此规划梯级利用的途径，把高质量的排水重新用

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

作循环水的补充水源；把经过适当处理的废水供给到脱硫、输煤等对水质要求不太高的地方去使用；而对于那些最后无法再次利用的高盐脱硫废水之类的情况，就要采用包含预处理、膜浓缩、蒸发结晶等化学与物理技术的合成工艺[7]。这个流程当中，得要凭借对硬度、硅含量、重金属种类、氯离子浓度等重要指标细致的观测，从而改善各个单元工艺的运行状况，免除结垢和污染现象的发生，维持系统的稳定，达成废水最大程度的资源化以及溶解性固体的结晶析出，逐步做到零液体排放的目标。

四、监控体系与环境保护的策略融合与展望

（一）智能化化学监控平台在环境管理中的嵌入

未来，形成综合化的智能化化学监测平台是发展的必然趋势。这个平台会整合全厂各个化学监测点的数据，依靠物联网、云计算和人工智能技术，做到数据的自动采集、无线传送、集中储存以及智能分析。平台既显示即时数据和历史趋势，又能凭借内置的专家系统和算法模型，自动判断化学异常、警报环境风险、改良控制参数，而且生成环境守护所需的报表和报告[8]。它把化学监测系统和环境管理信息系统紧密结合起来，让环境管理人员可以直观、及时地了解全厂化学物质的流动和排放情况，从而达成从被动监测向积极智能守护转变，极大地改进环境管理的效率和精准程度。

（二）以排放控制为导向的化学监控标准强化

当下的电厂化学检测标准大多着眼于设备安全及运行经济性，以后要更多地体现环境保护导向。按照既有的标准体系，增添并完善针对环境风险防控的检测指标及其限度，比如加大脱硫废水、湿式电除尘废水里有机物和特征污染物的检测要求；细致规定灰场淋溶水、煤场排水这些非连续排放源的检测办法；促使对逃逸氨、可凝结颗粒物等新出现的关注污染物予以监测。还要改进检测的连续性和即时性要求，把检测数据同环境质量、排污许可的联合运作归入到标准架构当中。凭借标准的加强，促使电厂化学检测体系更为全面、更为紧密地朝着环境保护的总体目标迈进。

（三）全生命周期化学风险防控体系构建思路

要想从根本上控制电厂化学相关的环境风险，就要形成起牵涉“输入－转化－排放”整个生命时段的防控体系。在输入方面，加强对入厂燃料、化学药剂品质环境友好性的评估与筛选。在转化阶段，深入展开厂内物质流分析，依靠全面监测来找出化学物质在各个流程中的迁移转化规则和风险点，执行过程改良并采用多级屏障控制。在排放之处，则要巩固末端治理，监督合规排放，而且还要扩展到灰渣等副产物的资源化利用环境安全评价[9]。整个体系须要打破专业障碍，把化学监测、设备维护、环保保护、燃料采购等环节当作一体去思考，创建跨部门协作机制和信息共享平台，从而做到化学物质从“起源”到“终点”的全过程、循环式的风险管理。

五、结语

电厂化学检测对于机组安全经济运行有着技术层面的基础性意义，还是推进源头减排和过程控制的重要依靠。通过完善检测体系并深入挖掘数据价值，可以准确找出环境风险，并促使化学流程得到改良，进而达成设备维护和环保措施的协同提升效果[10]。未来应着重促使检测体系同智能化、标准化以及全生命时段运作管理紧密结合在一起，形成具有前瞻性和系统性的化学环境风险防范计划，给电厂向绿色低碳方向转变以及可持续发展提供坚实支撑。

参考文献

[1] 沈大旺，张慧 . 计算机视觉技术在化学实验安全监控中的应用 [J]. 应用化学，2024，41(11)：1677-1678.

[2] 石芷伊 . 基于产教融合的化学实验教学监控管理模式改革研究 [J]. 现代盐化工，2024，51(04)：131-132+148.

[3] 马宏芳，郭晓芳，费鹏 . 高校有机化学实验教学质量评价及监控体系建设 [J]. 山西大同大学学报 (自然科学版)，2023，39(06)：1-4.

[4] 董秋静，罗春华，李瑞乾，等 . 基于专业评估的材料化学专业质量监控和保障体系的构建 [J]. 广东化工，2021，48(21)：226-227.

[5] 刘刚 . 基础化学实验教学质量评价与监控体系的构建 [J]. 化纤与纺织技术，2021，50(01)：145-146.

[6] 曹旭 . 水质化学分析质量监控对策研究 [J]. 石化技术，2017，24(07)：177.

[7] 吴振兴 . 热电厂化学水处理控制系统设计与实现 [D]. 西安建筑科技大学，2017.

[8] 冯苑佩斯 . 化学水处理监控系统开发及应用研究 [D]. 华北电力大学 (北京)，2016.

[9] 汪檩 . 全膜分离技术在电厂化学水处理中的应用 [J]. 当代化工研究，2025，(22)：99-101.

[10] 赖晓玲 . 大型火电厂化学水处理技术进展与应用 [J]. 化工管理，2021，(36)：58-59.

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

电厂化学水处理技术的研究与应用

郭晓争
贵州黔西中水发电有限公司，贵州 黔西 551500

DOI:10.61369/EPTSM.2026020024

摘　　要： 电厂化学水处理是保障火力发电安全、经济和环保运行的关键技术。本文系统阐述了电厂水处理的化学基础，包括水中杂质危害、水质标准及化学原理的应用；深入分析了锅炉补给水的预处理、除盐与深度处理技术；探讨了热力系统水汽工况的化学调节与控制方法，以及停备用保护措施；研究了循环冷却水系统的结垢、腐蚀与微生物控制策略，并介绍了废水回用与近零排放技术。通过对上述技术的综合论述，旨在为电厂水处理系统的优化设计、运行维护与节水减排提供理论依据和技术参考。

关 键 词： 电厂化学；水处理；锅炉补给水；热力系统；循环冷却水；废水回用

Research and Application of Chemical Water Treatment Technology in Power Plant

Guo Xiaozheng
Guizhou Qianxi Zhongshui Power Generation Co., LTD. Qianxi, Guizhou 551500

Abstract: Chemical water treatment in power plants is a key technology for ensuring the safe, economical, and environmentally friendly operation of thermal power generation. This paper systematically elaborates on the chemical foundations of water treatment in power plants, including the hazards of impurities in water, water quality standards, and the application of chemical principles. It provides an in-depth analysis of pretreatment, desalination, and advanced treatment technologies for boiler makeup water. It explores chemical regulation and control methods for water and steam conditions in thermal systems, as well as protective measures during shutdown and standby periods. It also investigates strategies for controlling scaling, corrosion, and microbial growth in circulating cooling water systems, and introduces wastewater reuse and near-zero discharge technologies. Through a comprehensive discussion of these technologies, the paper aims to provide theoretical foundations and technical references for the optimal design, operation, maintenance, water conservation, and emission reduction of water treatment systems in power plants.

Keywords: power plant chemistry; water treatment; boiler makeup water; thermal system; circulating cooling water; wastewater reuse

引言

电厂化学水处理技术是指利用化学方法对电厂的进水和循环水进行处理，以达到保护设备安全运行、提高发电效率和保护环境的目的。电厂水处理的关键之处在于清除水里各种有害杂质，避免设备结垢、腐蚀，保障蒸汽质量，达成水资源高效利用并缩减废水排放量[1]。本文力求全面整理电厂化学水处理包含的诸多关键技术环节，覆盖化学原理到工艺操作，由补水制作直至系统水工况调控，经过循环水处理到废水回收利用等过程，形成起较为完备的技术阐述体系，从而给电厂水处理的科学管理、技术创新及其可持续发展提供系统的知识支撑。

一、电厂水处理的化学基础

（一）电厂用水的主要杂质及其危害

天然水中存在多种杂质，按照它们的分散形式可划分成悬浮物、胶体以及溶解物三类。悬浮物和胶体致使水质浑浊度增大，会在预处理装置和管道内凝聚，从而影响到后续处理工序的效果。溶解性杂质主要涵盖溶解性盐类、气体以及有机物质。钙离子和镁离子属于生成水垢的关键元素，如果在受热表面聚集起

作者简介：郭晓争（1983.03-），女，汉族，河南南阳人，大专，助理工程师，研究方向：电厂化学。

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

来，将会极大削减传热效率，甚至有可能引发局部过热而造成爆管事件发生。溶解氧以及二氧化碳会造成系统遭受氧化腐蚀和酸蚀现象，这对于金属材料的使用年限来说是一种严重的危害[2]。而且，二氧化硅在高压锅炉当中会发生挥发，随后随着蒸汽一起被溶解下来，在汽轮机叶片上面产生难以清除的硅酸盐沉淀，进而对汽轮机的输出功率和效率产生不良影响。

（二）水质指标与电厂运行标准

水质指标用以考量水质优劣，并作为引导水处理工艺运行的量化依据，大致可分物理指标、化学指标以及生物指标。物理指标包含浊度、色度、电导率等。这些指标可直观显示水中悬浮物以及总溶解固体的情况。化学指标更为重要，其中涉及硬度、碱度、pH值、硅含量、钠离子浓度以及各种离子（诸如氯离子、硫酸根离子）的含量等[3]。它们同设备结垢、腐蚀的可能性存在直接联系。对于不同压力和类型的锅炉，国家和行业制订了严格的标准来约束给水、锅炉水以及蒸汽的质量，比如对溶解氧、二氧化硅、铁、铜等元素含量设定了上限。这些标准就是电厂化学监测的准则，可以保障水汽品质达到机组安全经济运行的需求，免除由于水质变差而产生的事故。

二、锅炉补给水处理技术

（一）预处理技术（混凝、澄清、过滤）

预处理属于锅炉补给水处理的第一道工序，其目的是要去除原水里的悬浮物、胶体以及部分有机物，从而给后续的深度除盐供应符合标准的进水。混凝阶段就是往水中投入混凝剂，这样就能中和胶体颗粒表面的电荷，促使它们发生脱稳并聚集起来。而澄清则需在沉淀池或者澄清池当中来完成，依靠重力使得经过絮凝作用而形成的较大颗粒絮体同水分离出来。过滤作为预处理阶段的最后一道关口[4]。水流过石英砂、无烟煤或者纤维束之类的滤料层之后，再一次拦截剩余的小型悬浮颗粒，进而减小出水的浑浊程度。预处理的效果会直接影响到后面除盐设备的工作负担、再生历时及其使用年限，更是整个水处理系统能否稳定运行的前提所在。

（二）除盐技术（离子交换、反渗透）

除盐技术重点在于去除水里溶解的盐分离子，从而得到高纯度的除盐水。离子交换法依靠离子交换树脂的选择性交换性质，经过阳床、阴床、混床等一系列工艺流程，逐个去除水里的阳离子和阴离子。这种方法产出的水质纯净度较高，技术比较成熟，不过会耗费酸碱物质来执行再生操作，而且会产生含有酸碱成分的废水。反渗透技术属于膜分离技术的一种，它靠施加压力促使水分子透过半透膜，把大部的溶解盐分、胶体物质、微生物等拦截下来。反渗透具备高效、节能、环保等优势，现在已经成为现代电厂补给水处理当中主要的预除盐工艺。、

（三）系统集成与深度除盐工艺

现代大型电厂对补给水的水质有着很高的要求，常常会用到多工艺融合而成的处理系统，这种流程一般是这样的：“预处理－反渗透（或者电渗析）－离子交换（混床）”。反渗透装置能够有效地去除绝大多数的离子和有机物，极大地减轻了后面离子交换装置的压力，也就能让它运行得更久一些。离子交换混床属于精处理单元，可以保证出水电阻达到兆欧级的标准，从而符合超高压、超临界机组的需求。要是遇到像极低硅含量或者总有机碳这样特别的情况，那么就在系统里增加强氧化、活性炭吸附或者膜脱气之类的深度处理单元[5]。系统整合的重点在于合理设置各个工艺单元，改良运行参数并改进自动化控制水平，这样才能保证系统始终处于高效、稳定又经济的运行状态，源源不断地产生高质量的锅炉补给水。

三、热力系统水汽工况调节与控制

（一）锅炉水化学调节（磷酸盐处理、挥发性处理）

锅炉水化学调节重点在于避免炉内结垢与腐蚀，其主要手段包含磷酸盐处理和挥发性处理。磷酸盐处理需向锅水中投入磷酸盐，此磷酸盐会与钙镁离子结合形成疏松的水渣，再经排污移除，还要保留锅水一定的碱度及pH值以防止腐蚀。此工艺存在协调磷酸盐处理和低磷酸盐处理两种形式，用以适应不同压力级别的锅炉。挥发性处理无需添加磷酸盐，而是往给水中投入氨和联氨之类的挥发性药剂，依靠调节pH值并除去溶解氧来抑制腐蚀，适合高纯度给水的直流锅炉[6]。这两种调节方式都要严密监测水质，按照化验成果准确掌控药剂投放量，从而维持炉水化学均衡，保证锅炉受热面干净，提升其使用寿命。

（二）蒸汽品质控制与给水处理

蒸汽品质重点在于蒸汽当中钠盐以及二氧化硅这些杂质的含量情况，这个含量的高低会直接左右汽轮机通流部分出现积盐的风险大小。要想做好蒸汽品质的控制，关键之处就在于要先控制好锅炉内的锅水水质，而且还要改良汽水分离装置以缩减机械携带的现象发生。对于给水品质也有着很严格的要求，因为给水就是生成蒸汽的源头所在，所以其中的杂质含量务必非常之低才行。给水处理一般包含除氧处理和全挥发性处理两个方面，除氧可以通过热力除氧器配合化学除氧（比如添加联氨或者别的除氧剂）的方式来达成，从而完全去掉溶解氧。至于全挥发性处理，则需利用加氨的方法把给水的pH值调到微碱性区间，以此形成钝化保护膜，全方位阻止给水系统因流动而产生的加速腐蚀状况。做到给水的细致处理乃是得到高品质蒸汽并保护整个热力系统的根基所在。

（三）停备用保护与化学清洗技术

机组处于停备用状态时，若缺少防护，潮湿空气中含有的氧气和水分会造成系统金属发生严重氧腐蚀现象，此类腐蚀产生的物质在机组启动之后会渗入到水汽系统当中引发二次污染。停备用保护措施涵盖干法保护和湿法保护两种形式，其中热炉放水利用余热执行烘干操作属于干法保护范畴；充氮法以及采用成膜胺、气相缓蚀剂等化学手段均归类于湿法保护类别之中。而化学清洗专门应对那些在运行过程中已经出现结垢或者遭受腐蚀的系统，其利用化学药剂来清除沉积物以及腐蚀残留物的技术行为。清洗之前要先做诊断，选出恰当的清洗介质（比如酸、络合剂、

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

缓蚀剂等等），制订出科学的清洗工艺[7]。清洗完毕之后还要执行钝化处理，在金属表面生成保护膜。按照规范来做停备用保护和化学清洗，这是恢复设备性能、确保长期安全运行所必需的举措。

四、循环冷却水处理与废水回用

（一）循环冷却水系统结垢、腐蚀与微生物控制

循环冷却水运行时会蒸发浓缩，水中的盐分浓度变大，这样就容易在换热表面生成碳酸钙之类的硬垢，影响传热效果。溶解氧、氯离子等会造成金属管道和设备发生腐蚀现象，而温暖的水体会很容易滋生细菌、藻类，从而产生生物粘泥。要想控制好这三方面，就得采用综合性的水处理方案。预防结垢主要是通过加入酸液调整 pH 值、投入阻垢分散剂来达成；防止腐蚀依靠投放缓蚀剂，在金属表面形成保护层；至于微生物的抑制，则是投入氧化性（比如氯）或者非氧化性杀菌灭藻剂，并且定期更换使用，以此来阻止微生物产生抗药性[8]。经过水质稳定化处理并维持恰当的浓缩倍率之后，就可以做到既节水又有效地控制住结垢、腐蚀以及微生物繁殖。

（二）循环水系统旁流与零排放处理技术

提升循环水浓缩倍率对于节水十分关键。不过浓缩倍数过大时，结垢及腐蚀的风险就会增大。旁流处理技术从循环水系统中抽出部分水量执行专门处理，去除一些悬浮物、硬度或者盐分之后再送回系统，这样就能让主要系统以更高的浓缩倍率稳定运行。这种处理技术包含旁流过滤、旁流软化或者旁流膜处理等形式。零排放属于更为严格的目标，即电厂不能向外排放废水，一般需把循环水排污水和其他废水深入净化并加以利用，最后把溶解性固体浓缩成固态盐分或者掺入灰渣处理当中。这项技术融合了膜浓缩、蒸发结晶、烟道喷雾蒸发等许多高能耗或者高投入的工艺流程，属于做到电厂与自然环境和谐共处的领先途径。

（三）电厂废水分类与梯级回用集成技术

电厂废水有诸多来源，其水质存在差异，其中包含锅炉补给水处理废水、循环水排污水、脱硫废水、含煤废水、含油废水以及生活污水等。若想达成废水回用，则要依照“分类收集，分级处理，梯级利用”的准则。像反渗透浓水这样的水质较好的废水，通过恰当处理之后，可以回用于循环水系统或者脱硫工艺用水当中[9]。而脱硫废水这种水质较为复杂的废水，则必要通过中和、沉淀、软化、膜分离等一系列深入处理之后，才能回用或者用于诸如干灰调湿、冲洗之类对水质要求不高的用途上。梯级回用融合技术的重点就在于针对全厂的水系统展开全面分析并加以改良，创建起水资源网络，把每一股废水当作资源来对待，并遵照“高质水源用于高品质需求处，低质水源用于低品质需求处”的理念去开展统一安排和回收利用工作。这样才能够最大幅度地缩减新水的开采量以及废水向外排放的总量。

五、结语

随着社会对环境保护的要求越来越高，电厂化学水处理技术也面临着更高的环保要求。因此，电厂化学水处理技术的发展必须与环保要求相适应。电厂化学水处理技术属于多学科交叉领域，它把理论同应用紧密结合，从基本化学原理一直到先进的零排放工艺，该技术的核心目的始终聚焦于保障发电设备安全、改进运行经济性并做到环境友好。如今，环保标准变得越发苛刻，水资源短缺问题也愈加严峻。未来电厂水处理技术将会朝着高效、节能、减药以及高自动化、智能化的方向去发展[10]。持续深入地开展基础研究，改良工艺步骤，巩固系统整合并推进智能化管理，电厂化学水处理技术必定会在电力工业迈向绿色、低碳、可持续发展进程中起到更为重要且不可或缺的作用。

参考文献

[1]蔡晨阳 . 电厂化学水处理设备腐蚀问题及处理措施 [J]. 大众标准化 ,2025,(22):46-48.
[2]王昕 . 电厂化学水处理制水设备问题的分析与处置 [J]. 中国设备工程 ,2025,(20):106-108.
[3]罗雪明 . 电厂化学水处理存在的问题及应对措施 [J]. 科技与创新 ,2025,(10):160-163.
[4]王意恒 . 电厂化学水处理设备设施腐蚀问题对策分析 [J]. 中关村 ,2024,(03):110-111.
[5]李宏峰 . 电厂化学水处理技术的应用及发展探讨 [J]. 山东化工 ,2023,52(22):250-251+255.
[6]王世忠 . 电厂化学水处理技术探讨 [J]. 造纸装备及材料 ,2023,52(06):179-181.
[7]张龙娜 . 电厂化学水处理制水设备问题的分析与处置 [J]. 化工管理 ,2023,(05):41-43+47.
[8]李前 , 张冬花 . 电厂化学水处理技术探析 [J]. 科技资讯 ,2022,20(13):29-31.
[9]王吉茂 , 李建明 . 火电厂化学水处理设备腐蚀问题处理方法研讨 [J]. 中国金属通报 ,2021,(10):74-75.
[10]张春燕 . 电厂化学水处理设备的防腐工艺 [J]. 云南化工 ,2020,47(08):146-147+150.

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

光储电一体化参与电力市场竞价的动态博弈策略分析

侯春苗
华电忻州广宇煤电有限公司，山西 忻州 034000
DOI:10.61369/EPTSM.2026020025

摘　　要： 当前，国家深入推进能源结构转型、构建新型电力系统。在此政策导向下，作为清洁高效的能源协同形态，光储电一体化逐步深度参与电力市场竞价。其以多环节协同优势为依托，通过动态博弈适配市场波动与政策调整。文章首先阐述光储电一体化核心内涵，接着分析光储电一体化参与电力市场竞价的价值意蕴与动态博弈关键变量，最后深入探索动态博弈优化策略，期望有效提升能源资源配置效率，实现电力市场高质量发展。

关 键 词： 光储电一体化；电力市场竞价；动态博弈

Analysis of Dynamic Game Strategies for Integrated Photovoltaic-Power Storage Participation in Power Market Bidding

Hou Chunmiao
Huadian Xinzhou Guangyu Coal Power Co., Ltd., Xinzhou , Shanxi 034000

Abstract: Currently, the country is vigorously promoting the transformation of the energy structure and building a new type of power system. Under this policy orientation, as a clean and efficient energy synergy form, integrated photovoltaic-power storage gradually deeply participates in power market bidding. It relies on the multi-link collaborative advantages and adapts to market fluctuations and policy adjustments through dynamic game. This article first elaborates on the core connotation of integrated photovoltaic-power storage, then analyzes the value implications and key variables of dynamic game for integrated photovoltaic-power storage participating in power market bidding, and finally deeply explores the optimization strategies of dynamic game, hoping to effectively improve the efficiency of energy resource allocation and achieve high-quality development of the power market.

Keywords: integrated photovoltaic-power storage; power market bidding; dynamic game

引言

能源领域正经历深度变革，驱动清洁低碳、安全高效能源体系构建成为核心方向，加速推进新型电力系统建设。光储电一体化具备源储协同的独特优势，堪称融入电力市场的新型能源主体，其参与竞价过程中的动态博弈行为，对市场参与成效与能源生态优化产生直接影响。

一、光储电一体化概述

光储电一体化是深度耦合光伏发电、储能系统与电力转换传输环节的有机协同形态，以能源技术创新与产业融合的内在逻辑为依托，整合核心要素，如光伏能源捕获、储能能量存释、电力调配传输等，构建起一体化架构，覆盖能源生产、存储、输送全链条。其旨在突破单一能源环节的独立运行边界，通过多环节技术协同与资源统筹，形成具备源网荷协同响应潜力的能源综合体，呈现出清洁化能源生产、柔性化能量调节、协同化系统运行，与新型电力系统构建的内在需求相契合。

二、光储电一体化参与电力市场竞价的价值意蕴

（一）政策协同赋能市场参与

深度协同政策引导与市场机制，为光储电一体化参与竞价奠定基础。宏观政策聚焦能源结构转型与可持续发展，明确了一体化主体的合法参与地位，扫清交易参与的制度障碍。电力市场规则持续完善，在交易流程、结算机制等方面与新型能源主体需求适配，形成呼应政策导向的制度设计。这种良性互动下，在清晰框架内一体化主体能够有序参与竞价，政策红利与市场机遇充分激发其参与热情，为新型能源力量融入市场生态提供助力，为市

作者简介：侯春苗（1990.02-），女，汉族，山西省晋中市人，工程师，研究方向：发电厂安全生产。

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

场注入可持续发展动力。

（二）技术适配释放综合效能

光储电一体化的技术架构精准适配市场运行需求，彰显独特综合价值。其融合可再生能源生产与储能调节的核心特性，面对市场对能源供给稳定性与灵活性的要求，能够做到灵活响应。通过储能模块充放电调节，一体化系统有利于平滑可再生能源出力波动，确保供给同步市场需求。这种技术调节能力使系统在竞价中具备更强竞争力，与市场多元需求契合，同时弥补灵活性与清洁性层面传统能源的不足，推动电力市场整体运行效率的有效提升。

（三）信息整合提升决策质量

一体化主体参与竞价的核心价值是信息整合与高效运用。一体化系统覆盖能源“生产—存储—交易”等多环节，能将自身设备运行、能源数据及市场供需、电价波动、电网调度等外部信息汇聚到一处。通过梳理与分析这些信息，一体化主体可实现对市场变化规律的精准把握，助力预判价格走势与需求波动，从而支撑竞价决策。这种能力既能提升自身决策的科学性与精准度，同时也向市场传递有效交易信号，助力优化价格形成机制，使交易环境更加规范。

三、光储电一体化参与电力市场竞价的动态博弈关键变量

（一）市场电价波动态势

动态博弈的核心变量是市场电价波动，对各参与主体的决策方向产生直接影响。市场供需关系、能源结构布局、时段用电差异及电网调度需求等多重因素共同作用下，电价变化阶段性起伏与随机性波动的特征凸显。时段不同，电价差异会引导光储电一体化主体调整竞价报价的高低，长期电价趋势则影响主体参与市场的整体规划。该变量的动态变化下，博弈双方必须持续跟踪电价信号，以波动规律为依据调整策略，成为贯穿博弈全过程的核心考量依据。

（二）风光出力稳定程度

博弈的基础变量是风光出力稳定程度，决定光储电一体化主体的竞价底气。光储电一体化的能源供给依赖捕获风光资源，而受自然属性影响，风光出力存在固有波动，储能系统的调节能力与技术水平会对这种稳定性的强弱产生影响。稳定出力时，一体化主体可制定更明确的报价策略；较大波动时，则需预留灵活调整空间。这种变量的差异下，博弈决策倾向出现不同，是影响竞价成功率的关键基础因素。

（三）政策导向调整方向

政策导向调整是博弈的重要外部变量，对博弈的规则环境与参与逻辑进行重塑。在市场准入门槛、交易机制设计、收益保障方式及监管要求等方面，政策调整会改变光储电一体化主体的参与成本与收益预期。政策的稳定性与调整趋势，直接影响主体参与博弈的长期规划，促使其寻求短期收益与长期发展之间的平衡。通过影响博弈的外部约束条件，该变量间接引导各主体的策略选择，在动态博弈中不容忽视。

（四）主体竞争互动格局

主体竞争互动格局是动态博弈的场景变量，构成博弈的核心互动场景。市场中各类发电主体、储能服务商、售电企业及其他参与者差异显著，其数量规模、实力差距与决策偏好较为独特，形成了复杂的竞争生态。针对竞争对手的报价策略、市场布局与调整动向，光储电一体化主体需实时感知，以互动反馈为依据灵活调整自身决策。这种互动关系相互影响、相互制衡，贯穿博弈全过程，能够直接决定竞价结果的走向。

四、光储电一体化参与电力市场竞价的动态博弈优化策略

（一）动态报价适配市场波动

动态报价策略以市场电价信号的实时捕捉为核心，通过对供需变化、时段特征、天气影响、电网负荷预警及区域供需差异等关键因素的持续跟踪，构建灵活、精准的报价调整机制，确保报价与实际交易场景贴合。以电价波动的阶段性规律与即时变化为基点，合理设定报价区间与调整阈值，在避免因报价过高错失成交机会的同时，也避免因报价过低压缩收益空间。该策略强调快速响应市场信号，通过动态调整突破固定报价的局限，使报价始终同步市场变化，提升成交概率与收益质量。不同时段的报价与储能协同操作可通过以下方式精准适配市场波动：

表1 不同时段动态报价与储能协同操作表

时段类型	电价区间	储能操作	报价策略
低谷时段	0.2–0.4元/千瓦时	全力充电存储电能	报价偏低，保障基础成交率
平段时段	0.4–0.6元/千瓦时	维持存量平衡，灵活调整	报价中等，平衡成交与收益
高峰时段	0.6–1.0元/千瓦时	适度放电补充供给	报价适中偏上，最大化当期收益

与光储电一体化自身的能源供给能力、存储调节潜力结合，实现短期成交与长期收益关系的动态平衡。处于高位区间电价时，结合市场需求弹性和储能释放速率合理释放储能资源补充供给，这样既能提高报价竞争力，也可实现最大化当期收益；在低位电价时段，适度存储多余电能，减少低价成交比例，将能源资源转移至高价时段，双重提升收益与成交率。借助这种跨时段的精细化资源调配与报价调整，能够均衡优化不同时段收益，与市场波动的动态博弈特征精准适配。

（二）全周期风控筑牢博弈根基

构建覆盖竞价全流程的风险管控体系，有利于持续支撑光储电一体化稳固博弈优势，通过对多元潜在风险的系统性识别、评估与缓释，能够为竞价决策划定安全边界。该策略超越单一技术调节限制，聚焦三大核心风险维度市场、技术、政策，搭建多维度识别机制与动态风险数据库，对各类风险的发生概率、影响程度及传导路径进行量化分析，形成动态风险图谱，实现对电价波动超预期、设备故障、政策调整等隐患的精准捕捉，助力制定科学的防控措施，关联动态报价策略，达成博弈成效的协同提升。

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

面对不同类型风险，必须构建分层差异化缓释机制，以此来应对博弈不确定性。市场风险维度，借助中长期交易合约锁定基础收益，搭配弹性报价空间，为应对短期电价波动与竞争对手策略调整奠定基础；技术风险维度，要求建立设备全生命周期管理体系，优化出力预测模型并对系统冗余设计进行强化，使设备更具稳定性与预测精度；政策风险维度，与监管部门联手，共同预判政策导向，主动调整参与模式与资源布局。同时，还必须建立动态监测与应急响应机制实现风险状态的实时跟踪，一旦发生突发状况，可快速处置，使竞价策略始终保持连续性与稳定性，筑牢博弈根基。

（三）政策适配精准响应导向

政策适配策略注重对政策调整方向与市场规则变化的精准把握，通过建立政策动态数据库、对接行业主管部门信息渠道与行业动态研判机制，及时捕捉不同方面，如市场准入、交易流程、结算机制等的政策动态。有机融合政策要求与市场参与逻辑，确保策略实施与制度框架、导向要求相符，及时调整参与方式与操作规范，避免因适配不当的政策影响竞价参与的合法性与有效性，使参与行为始终合规、适配。

与政策支持重点、激励方向、区域导向、激励政策细则结合，对资源配置与竞价布局进行优化。针对政策鼓励可再生能源消纳的领域或时段，在合规前提下加大能源供给力度，不仅契合政策导向，同时也有利于拓展成交空间；在政策支持储能参与辅助服务的场景，通过资源的合理分配参与相关交易，充分利用政策红利提升综合收益。通过与政策变化、政策要求的主动适配，使动态博弈策略在符合外部制度约束的基础上，也能借助政策导向优化参与效果，最终有机统一政策红利与市场收益。

（四）多元协同优化竞争格局

多元协同策略立足各类参与主体在市场中的互动关系，通过对竞争对手报价习惯、供给能力、资源储备、历史成交记录、策略调整周期与市场反应速度等维度的系统分析，制定差异化的竞价方案。不仅如此，还深入研判不同类型主体的竞争优势与短板，避免同质化竞争导致收益挤压，以自身源储协同的独特优势为基础，打造差异化竞争亮点，以便在博弈中占据有利位置。

与其他市场主体积极构建良性互动机制，既保持合理竞争，也寻求协同空间。围绕不同参与者，如传统发电主体、其他新能源主体等的供给特点与需求偏好，对自身报价与供给策略进行精准调整。针对互补性较强的主体，可通过间接协同形成资源互济机制，使供需实现互补与共赢，避免恶性竞争；面对竞争关系明显的主体，则借助精准差异化报价与服务优化提升自身竞争力。这种动态策略调整依托主体互动，不仅适应市场竞争生态的动态变化，同时也通过优化竞争格局间接提升自身竞价收益，在市场中始终保持核心竞争地位。

五、结语

综上所述，光储电一体化参与电力市场竞价的动态博弈是一项系统性工程。通过动态报价、全周期风控、政策适配、多元协同等多元策略，可有效提升其市场竞争力与资源调配效能。未来，还需深入探索实践策略，为电力市场供需平衡与能源结构升级注入持久动力。

参考文献

[1]李华取，王帮灿，周娜.多源同台竞价：云南电力市场的探索与实践[J].中国电力企业管理，2025,(22):88-89.

[2]杨祯园.电力市场环境下电力市场交易模式研究[J].电力设备管理，2025,(13):260-262.

[3]李维聪，李贺延，杨若冰.基于智能电厂的电力交易市场竞价系统架构研究[J].内蒙古电力技术，2024,42(05):38-43.

[4]李健华，陈雪，付浩，等.碳电市场环境下火电厂市场竞价策略及交易技术[J].四川电力技术，2023,46(03):46-52+89.

[5]叶泽.电力市场的“中国特色”[J].中国电力企业管理，2021,(01):35-40.

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

核能领域数字化建设及数据治理的理论建构与实践路径

唐蓉
国核信息科技有限公司，山东 济南 250000
DOI:10.61369/EPTSM.2026020027

摘　　要： 在全球能源转型与数字技术革命深度耦合的背景下，数字化转型已成为核能产业突破安全管控瓶颈、提升全生命周期运营效能的核心路径。本文基于核能产业"安全优先、全链协同、自主可控"的特殊属性，系统构建了"五层三维"数字化建设总体架构，深入剖析了数据治理的核心机制与实施逻辑，并结合国内外典型实践案例，探讨了数字孪生、人工智能、区块链等关键技术的融合应用模式。研究聚焦核能领域数字化建设中的安全保障、标准统一、技术适配三大核心难题，提出了"制度－技术－人才"三位一体的协同解决方案，为我国核能产业数字化转型从"场景级应用"向"体系化赋能"跨越提供理论支撑与实践指引。

关 键 词： 核能产业；数字化建设；数据治理；安全保障；技术融合

Theoretical Construction and Practical Path of Digital Construction and Data Governance in the Field of Nuclear Energy

Tang Rong
State Nuclear Power Information Technology Company Ltd.Jinan, Shandong 250000

Abstract: Against the backdrop of the deep integration between global energy transition and digital technology revolution, digital transformation has become the core pathway for the nuclear energy industry to break through safety control bottlenecks and enhance operational efficiency throughout its lifecycle. Based on the unique characteristics of the nuclear energy sector— "safety first, full-chain coordination, and self-reliance" —this paper systematically constructs a "five-layer, three-dimensional" digital infrastructure framework. It provides an in-depth analysis of the core mechanisms and implementation logic of data governance, while exploring integrated application models of key technologies such as digital twins, artificial intelligence, and blockchain through domestic and international case studies. The research focuses on three core challenges in nuclear digitalization: safety assurance, standard unification, and technical compatibility. A tripartite collaborative solution integrating institutional frameworks, technological capabilities, and talent development is proposed, offering theoretical support and practical guidance for China's nuclear energy industry to transition from "scenario-level applications" to "system-wide empowerment" in its digital transformation journey.

Keywords: **nuclear energy industry; digital transformation; data governance; security assurance; technology convergence**

引言

全球“双碳”目标下，核能作为低碳稳定的基荷能源，其战略地位持续凸显。数字技术与能源产业的深度融合已成不可逆趋势，人工智能、大数据、数字孪生等技术为核能产业突破传统发展瓶颈提供了新范式。国内研究近年来呈现快速发展态势，主要集中在应用场景创新与数据标准建设。现有研究已形成一定的理论基础与实践积 累，但仍存在三方面不足：一是数字化建设架构多聚焦单一环节或技术应用，缺乏覆盖全生命周期的系统性建构；二是数据治理研究偏重于标准制定，对安全与效率的平衡机制、跨主体协同治理模式探讨不足；三是对核心技术的核电场景适配性研究不够深入，尤其是自主可控技术的应用路径尚不清晰。基于此，本文立足核能产业特殊属性，构建数字化建设与数据治理的一体化理论框架，为解决行业实际问题提供新视角。

作者简介：唐蓉（1989.08-），女，汉族，山东省荷泽市人，本科；工程师；研究方向：核电产业数字化建设方向。

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

一、核能领域数字化建设的理论框架与核心架构

（一）数字化建设的核心约束与原则

核能领域数字化建设面临三大特殊约束：一是安全约束，核安全与数据安全并重，任何技术应用都必须满足严格的安全验证要求；二是全生命周期约束，核电项目从设计、建设到运维、退役跨度长达60年以上，需保障数据的长期有效性与系统兼容性；三是多主体协同约束，涉及核电企业、监管机构、上下游产业链等多个主体，需实现数据互通与利益协同[1]。

基于上述约束，数字化建设应遵循四大核心原则：安全优先，将核安全与数据安全贯穿建设全过程，建立多层级安全保障体系；数据驱动，以数据资产化为核心，推动业务流程优化与智能决策；统筹规划，强化顶层设计，避免重复建设与数据孤岛；自主可控，关键技术与核心系统优先采用自主创新成果，降低安全风险。

（二）“五层三维”总体架构设计

结合核能产业特征与数字化技术发展趋势，本文构建"五层三维"数字化建设总体架构。"五层"为技术实现层面，包括感知层、网络层、平台层、应用层与安全层；"三维"为保障维度，包括标准规范维、组织管理维与人才支撑维，各层级与维度相互协同，形成有机整体[2]。

感知层是数据采集的基础，实现物理世界与数字世界的精准映射。通过部署抗辐射智能传感器、巡检机器人等设备，实时采集设备运行参数、环境辐射水平、工程建设进度等多维度数据，数据采样频率针对关键安全参数不低于1kHz，确保数据的实时性与准确性。该层采用"自动捕获+人工补录"相结合的模式，核心安全数据优先通过系统自动采集，确保数据真实性。

网络层承担数据传输功能，采用"工业以太网+现场总线"混合组网模式，遵循IEC 61588标准实现μs级时间同步。构建"物理隔离+逻辑隔离"的双重防护体系，生产控制网与管理信息网严格物理隔离，关键数据传输采用加密协议，防止数据泄露与网络攻击。同时部署边缘计算节点，在数据源头完成实时处理与分析，满足核电系统低时延要求[3]。

平台层是数字化建设的核心引擎，包括三大核心平台：工业互联网平台实现设备、系统与业务的互联互通；数字孪生平台构建物理实体的虚拟镜像，支持仿真模拟与优化决策；AI算法平台提供故障诊断、异常预警等智能分析能力。

应用层是价值实现的载体，覆盖核电全生命周期核心业务。在设计阶段，基于BIM技术实现协同设计与数字化移交；在建设阶段，通过智慧工地系统实现进度、质量、安全的一体化管控；在运维阶段，开展智能巡检、设备健康管理与运行优化；在退役阶段，通过仿真模拟优化退役方案。各应用场景数据互联互通，形成全链条数字化管理闭环[4]。

安全层是建设保障的关键，构建"网络安全+数据安全+功能安全"三位一体的防护体系。网络安全采用等级保护与分级保护相结合的方式，部署防火墙、入侵检测等设备；数据安全实现全生命周期管控，包括加密存储、访问控制、脱敏处理等；功能安全通过故障树分析、失效模式验证等方法，确保数字化系统符合核安全要求[5]。

"三维保障体系"为架构落地提供支撑：标准规范维包括数据标准、技术标准、管理标准等；组织管理维建立跨部门协同机制，明确各主体职责；人才支撑维构建复合型人才培养体系，满足技术融合需求。

（三）核心应用场景的数字化转型路径

核电运维数字化：以数字孪生与AI技术为核心，构建设备全生命周期管理体系。通过数字孪生模型整合设计、制造、运行数据，实现设备健康状态的实时监测与故障预测；利用AI算法对运行数据进行深度分析，优化维护策略，降低非计划停堆风险。中国广核集团的"智驭平台"通过实时数据监测与智能预警，使设备故障响应时间缩短40%以上[6]。

工程建设数字化：基于BIM技术构建三维数字模型，实现设计、施工、监理的协同作业。通过数字化移交系统，将工程建设过程中的各类数据无缝传递至运维阶段，保障数据的连续性。国家能源局首批示范项目中的"智慧工地"场景，通过物联网技术实现人员、设备、材料的实时管控，使工程建设效率提升20%，成本降低15%。

核安全监管数字化：构建核安全大数据监测平台，整合核电企业、监管机构与第三方检测数据，实现安全状态的实时感知与智能预警。开发应急响应数字化系统，通过仿真模拟技术优化应急处置方案，提升核事故应对能力。监管数字化不仅提高了监管效率，也为政策制定提供了数据支撑[7]。

核燃料循环数字化：利用区块链技术构建核燃料全生命周期溯源系统，实现从生产、运输、使用到储存的全程可追溯。基于大数据分析优化核燃料装载方案，提高燃料利用率，降低乏燃料产生量。区块链技术的不可篡改特性，为核燃料管理提供了可信的数据支撑。

二、关键技术融合应用与案例分析

（一）核心技术适配与创新应用

数字孪生技术：通过构建物理实体的虚拟镜像，实现核电系统的全生命周期数字化管理。国内"国和一号"数字孪生核电站通过全厂三维模型与实时数据融合，实现了智能监测、数智维修等场景的全方位应用，计划2025年完成全厂完整数字孪生构建[8]。

人工智能技术：在核安全预警、设备故障诊断等场景发挥核心作用。中国广核集团的"智驭平台"采用机器学习算法，每秒可分析200万个数据波动，及时发现潜在安全隐患；中核八所与上海人工智能实验室联合研发的"龙吟·万界"核领域大模型，接入先进大模型后，在复杂信息处理与逻辑推理能力上显著提升，为生产运维提供智能支持。AI技术的应用不仅提高了工作效率，更降低了人为操作风险。

区块链技术：为核燃料循环与放射性废物管理提供可信追溯方案。通过构建去中心化的溯源系统，记录核燃料生产、运输、使用等全流程数据，确保数据不可篡改。该技术在核燃料管理中的应用，提升了供应链透明度与监管效率，降低了核扩散风险[9]。

工业物联网技术：实现设备状态的实时感知与数据采集。通过部署抗辐射、高可靠性的传感器网络，获取核反应堆温度、压力、辐射水平等关键参数，为数字化管控提供数据支撑。物联网技术与边缘计算结合，实现了数据的本地实时处理，满足了核电

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

系统低时延要求。

（二）典型案例分析

案例一："国和一号"数字孪生核电站。该项目是我国核电数字化转型的标杆工程，依托工业互联网平台与自主可控三维引擎，构建了覆盖设计、建设、运维全流程的数字孪生系统。通过整合全厂三维模型与实时运行数据，实现了设备健康管理、运行优化、应急响应等场景的智能化应用。投用后，设备维护成本降低20%，运行效率提升15%，为核电数字化转型提供了可复制的经验。

案例二：中国广核"智驭平台"。该平台是核电智能运维的典型代表，集成了大数据分析、人工智能等技术，实现了机组运行状态的实时监测与智能预警。平台每秒可处理海量数据，及时识别设备异常与安全隐患，为运维人员提供辅助决策支持。应用后，机组非计划停堆率降低30%，运维响应时间缩短40%，显著提升了核电运行的安全性与经济性。

三、实施路径与优化对策

（一）分阶段实施路径

核能领域数字化建设与数据治理是长期系统工程，应遵循"试点先行、分步推广、持续深化"的实施路径，分三个阶段推进：

试点阶段（1-2年）：选择典型核电机组或业务场景，如智能运维、数字孪生试点等，开展技术验证与模式创新。重点突破数据采集、核心算法等关键技术，建立初步的数据治理制度与标准。通过试点积累经验，形成可复制的解决方案。

推广阶段（3-5年）：将试点成熟的技术与模式推广至核心业务领域，实现设计、建设、运维等环节的数字化覆盖。完善数据治理体系，建立统一的数据标准与共享机制，打破数据孤岛。加强跨部门协同，提升数字化系统的集成应用水平。

深化阶段（5-10年）：实现全产业链数字化协同与数据价值最大化。构建产业级数字孪生体系与数据治理平台，推动核能产业与上下游产业的数字化对接。核心技术实现全面自主可控，形成完善的数字化标准体系与安全保障机制[10]。

（二）协同优化对策

构建安全高效的技术验证体系：建立"模拟仿真+小规模试点+规模化推广"的三级验证机制，利用数字孪生技术构建虚拟验证环境，缩短技术验证周期。制定数字化技术安全评估标准，确保技术应用符合核安全要求。

加快统一标准体系建设：由行业协会牵头，联合核电企业、科研机构与监管部门，加快制定覆盖全生命周期的数据标准、接口标准与安全标准。参考《数字化转型管理参考架构》（GB/T 45341-2025），构建适应核能产业需求的标准簇，计划2030年形成完善的数字化标准体系。

强化核心技术自主创新：加大对自主可控技术的研发投入，重点突破高端传感器、数字孪生引擎、核领域专用AI算法等核心技术。建立产学研协同创新机制，支持企业与高校、科研机构联合攻关，提升技术转化效率。

构建复合型人才培养体系：高校增设核工业数字化相关专业，培养后备人才；企业加强内部培训，提升现有员工的数字化技能；制定优惠政策，引进国内外高端复合型人才。建立人才评价与激励机制，激发人才创新活力。

完善跨主体协同治理机制：建立核电企业、监管机构、产业链上下游企业的协同治理平台，明确各方在数据治理中的职责与权利。推动数据共享与利益协同，实现产业整体效益最大化。

四、研究结论

本文系统构建了核能领域数字化建设与数据治理的理论框架，得出以下核心结论：一是核能数字化建设应遵循"安全优先、数据驱动、统筹规划、自主可控"原则，采用"五层三维"总体架构，实现全生命周期数字化管控；二是数据治理需建立"决策-管理-执行"三级组织架构，构建涵盖分类分级、标准体系、全生命周期流程的治理机制，平衡数据价值与安全风险；三是数字孪生、人工智能、区块链等关键技术的适配应用，能显著提升核电运行的安全性与经济性，但需解决技术验证、标准统一等现实问题；四是分阶段实施与"制度-技术-人才"三位一体的协同对策，是推动数字化转型落地的有效路径。核能领域的数字化建设与数据治理是实现产业高质量发展的必由之路，需要政府、企业、科研机构协同发力，通过技术创新、制度完善与人才培养，推动我国从核电大国向核电强国跨越，为全球能源转型与"双碳"目标实现贡献核能力量。

参考文献

[1] 中国核能行业协会 . 中国核能发展报告（2025）[R]. 北京：中国核能行业协会，2025.

[2] 国家能源局 . 关于推进核电数字化转型发展的指导意见 [Z]. 2023.

[3] 上海核工程研究设计院股份有限公司 . 核电数字化转型技术白皮书 [R]. 2024.

[4] Nuclear Energy Agency. Digital transformation: Opportunities and challenges for the nuclear sector[R]. Paris: OECD Publishing, 2025.

[5] Hu R, et al. Graph neural network-based digital twins for advanced nuclear reactors[J]. Nuclear Technology, 2025, 210(3): 456-468.

[6] 中国核电发展中心 . 核电数字化标准体系建设规划（2025-2030）[Z]. 2025.

[7] 国家市场监督管理总局 . NB/T 20418-2017 核电电子文件元数据 [S]. 2017.

[8] 美国阿贡国家实验室 . Virtual models paving the way for advanced nuclear reactors[EB/OL]. https://www.anl.gov/article/virtual-models-paving-the-way-for-advanced-nuclear-reactors, 2025-05-28.

[9] 王炳华 . 核能行业数字化转型的广度与深度 [J]. 中国核电，2025, 18(2): 156-162.

[10] 苟峰 . 核电数字化标准体系建设现状与展望 [J]. 核标准计量与质量，2025, (1): 34-39.

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

汽轮机叶片损伤的检修与预防方法研究

王哲
大唐七台河发电有限责任公司，黑龙江 七台河 154622
DOI:10.61369/EPTSM.2026020028

摘　　要： 本研究旨在系统阐述汽轮机叶片损伤检修与预防的三大目的（保障安全、提升经济性、建立标准体系），并提出针对性技术方案。核心方法在于构建“无损检测－分类修复－质量验证”的检修闭环，以及融合“运行优化－设计强化－智能预警”的预防体系。应用结果表明，该方法能显著提升机组可靠性，使叶片损伤率降幅超过60%，有效延长服役周期。最终结论指出，坚持“检防结合、预防为主”，建立一体化叶片全生命周期健康管理体系，是实现汽轮机安全、经济、长周期运行的必由之路。

关 键 词： 汽轮机叶片；损伤检修；预防策略；无损检测；状态监测

Research on Maintenance and Prevention Methods of Turbine Blade Damage

Wang Zhe
Datang Qitaihe Power Generation Co., Ltd., Qitaihe , Heilongjiang 154622

Abstract: This study systematically elucidates the three objectives of turbine blade damage maintenance and prevention (ensuring safety, enhancing economic efficiency, and establishing a standard system), while proposing targeted technical solutions. The core methodology involves constructing a maintenance closed-loop system of "non-destructive testing-classified repair-quality verification" and integrating a preventive framework combining "operational optimization-design reinforcement-intelligent early warning". Application results demonstrate that this approach significantly improves unit reliability, reduces blade damage rates by over 60%, and effectively extends service life. The final conclusion emphasizes that adhering to the principle of "combining inspection with prevention, prioritizing prevention" and establishing an integrated blade lifecycle health management system is the essential path to achieving safe, economical, and long-term turbine operation.

Keywords: turbine blade; damage repair; preventive strategy; non-destructive testing; condition monitoring

引言

汽轮机叶片属于核心高速部件，长时间承受复杂应力及介质冲蚀，存在损坏情况时会危及机组的安全稳定运行，还会带来大幅经济损失。鉴于此关键问题，系统探究其检修及预防方法具备重要的工程实用价值[1]。本文期望通过明晰检修预防目标，全面整理无损检测、分类修缮等技术手段，详细剖析运行优化、状态监测等预防措施，并对应用成果加以分析，从而形成包含叶片全生命时段的系统性解决方案，为提升汽轮机运行可靠性与经济性提供理论依据与实践指导。

一、汽轮机叶片损伤的检修与预防目的阐述

（一）评估确保汽轮机安全稳定运行的核心目的

汽轮机叶片的失效并非孤立事件，其引起的一系列连锁反应，这些反应会危及整个发电系统的安全稳定运行。当叶片损伤发展到断裂程度时，高速旋转下的动平衡会被严重破坏，这会造成机组剧烈震动，动静部件发生碰撞，从而必定引发非计划停机；如果损伤碎片穿透汽缸，就有可能变成灾难性事故，致使设备严重受损，甚至危及人员安全[2]。因此，系统性的检修和预防工作重点在于积极识别并解决叶片潜在的损伤，从源头上规避可能导致重大安全事故的风险，进而为电力供应的连续性和机组的本质安全形成坚实基础。

（二）评估延长叶片服役寿命与降低维护成本的经济目的

汽轮机叶片更换属于一项成本很高的系统工程，其经济压力

作者简介：王哲（1993.11-），男，满族，黑龙江省佳木斯市人，学历：本科，职称：助理工程师，研究方向：火力发电厂汽轮机本体检修。

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

远远超出叶片自身价值。单支或者整级叶片的备件采购费用常常达到几十万到数百万元，而且还要加上完成更换所需长达数周的停机时间、设备拆解与重新组装的人工成本，还有由于发电中断而造成的直接收入损失。单纯等到损坏后再去更换，在经济上非常不合理。应该执行科学的积极检查和预防措施，通过精确的状态评定，及时开展局部修复并改善寿命管理，最大幅度地延长已有叶片的有效使用期限，把昂贵的被迫更换成本变成成可以计划、可以掌控的预防性维护投入，达成全生命时段维护成本大幅缩减，电厂经济效益的实质性提升。

（三）评估形成标准化检修预防体系的管理目的

在传统维护模式当中，汽轮机叶片的检修决策以及操作质量很大程度上依靠技术人员自身经验和判断，造成标准不统一、流程不规范、难以评判效果，管理方面存在很大的不确定因素和风险。创建标准化检修预防体系的主要管理目标就是要促使从“经验引领”的随机性维修朝着“体系引领”的科学化管理过渡，把成熟的检测技术、修缮工艺以及预防策略固定成清晰的技术标准、作业程序和管理规范，形成包含叶片全生命时段健康管理的标准化工作体系[3]。这样就能保证每次维护活动的质量和效果是可以预见、可以追溯的，而且能够做到从被动回应式的维护向积极预测性的维护发生根本性的转变，给电厂创建现代、精准、可持续的设备资产管理模式提供坚实的支撑。

二、汽轮机叶片损伤的主要检修方法

（一）评估损伤叶片的无损检测与状态评估技术

要想精准评定叶片损伤情况，就务必综合利用大量无损检测技术。超声检测可用于查找叶片内部裂纹、夹杂之类的瑕疵，不过对于表面及近表面的瑕疵不太灵敏。渗透检测能把表面开口性瑕疵直观显现出来，其操作较为简单，但对工件表面有着较高要求。涡流检测针对导电材料而言，对表面及近表面裂纹反应很灵敏，可是并不适合非导电材料。而内窥镜检测合适于狭小空间执行直接目视观察，可以察觉到一些宏观瑕疵却不能实施量化处理[4]。技术的选择要按照损伤部位是否易于到达、叶片材质特点以及预期存在的瑕疵种类来综合评估，一般会用两种或者更多的方法互相验证，从而保证评价结果既全面又准确。

（二）评估基于损伤类型的在机与离机修复工艺

若汽轮机在潮湿环境下工作，则周围充满着大量的水蒸气，水蒸气中所含的氧气会与构成叶片的活跃金属发生得失电子的化学反应，即人们通常所说的氧化还原反应，对叶片造成一定程度的腐蚀，使其强度下降，引发断裂。针对不同损伤类型需采用相应修复工艺：浅表腐蚀坑要通过精细打磨抛光来去除应力集中现象；微裂纹应采用钨极惰性气体保护焊这种精密焊接工艺，并严格控制热输入以防产生二次损伤；水蚀区域一般用等离子堆焊或者激光熔覆工艺来做尺寸的重新获取和加强；如果出现断裂失效情况就要更换叶片。修复材料应当选用与原材相适应或者性能更好的专用合金，而且在修复过程中要严格把控层间温度、热影响区范围等参数，保证修复部位的力学性能及其服役寿命符合要求。

（三）评估检修后的性能验证与质量控制标准

检修之后的质量验证对于保证修复效果十分关键。动平衡检测会以高速对修复完毕的转子部件执行平衡校验，使得振动指标控制在允许范围内；尺寸复核必要采用三坐标测量这种高精度方法来核实修复区域的几何精度，格外是气动型线是否被准确复原；探伤复查还要对修复区域以及热影响区开展全面的无损检测，杜绝出现新的瑕疵[5]。各个验证阶段都应该按照行业标准制定清晰的质量评定标准，并创建完整的质量文档，做到检修流程的可追溯性。唯有经过所有质量验证的叶片才具备投入使用的资格。

三、汽轮机叶片损伤的关键预防方法

（一）评估优化运行工况与启停操作预防应力损伤

运行优化属于预防叶片损伤的关键举措。在实际运作时，要形成起完备的运行参数控制体系，把主蒸汽的压力和温度限制在设计范围内，免除因超参数运行而使叶片承受更多的离心力与热应力；还要找出机组的低负荷共振区域，并规避之，免除叶片在某些工况下产生共振疲劳[6]。在机组启停期间，应该按照经过精确计算得出的温升温降曲线来执行，一般而言，温升率被控制在1.5评估－评估2.0℃/分钟，温降率则处于1.0评估－评估1.5℃/分钟这个合理区间之内，从而减轻热冲击引发的疲劳损害；也要重视汽水品质的管理，保证给水质量达标，阻止腐蚀性介质以及固体颗粒给叶片表面带来冲蚀破坏。通过这些细致的运行控制手段，可以从根本上大幅缩减叶片所承受的各种应力程度，有效地推迟损伤的出现及其进程。

（二）评估改进叶片设计与表面强化工艺预防固有缺陷

要想达成主动预防的目的，就务必要从设计制造这个层面去优化叶片的性能。利用先进的三维气动设计技术来优化叶片的型线，从而改善流场的分布状况，并减小气动激振力；在挑选材料的时候，可以选用钛合金TC4、镍基超合金IN718这种高强度又耐腐蚀的材料，其屈服强度能够达到900MPa之上，这样就能明显加强叶片的抗疲劳性能。至于表面强化工艺，激光熔覆技术会用高能激光束把特别的合金粉末熔覆到叶片表面，生成结合强度很高而且厚度可以控制的优化层；渗硼处理是在高温条件下让硼元素渗进金属表面，进而形成硬度达到1500评估－评估2000HV的硼化物层；等离子喷涂技术能够给叶片表面创建起耐磨耐蚀的陶瓷涂层。这些优化技术可以使叶片关键部位表面的硬度增大2-3倍，其耐磨寿命增长3-5倍，进而突出增强叶片抵御复杂工况损害的能力。

（三）评估建立状态监测与预警系统实现早期干预

创建智能化的状态监测及警报系统，是做到预测性维护的关键所在。在线振动监测系统需在机组关键部位设置加速度传感器，以随时监测振动速度的有效值，一般而言，报警阈值被设定为基线值的1.5倍，而停机阈值则为基线值的2.5倍；声发射监测系统通过收集叶片损伤时产生的高频应力波信号，可以察觉到微

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

米级别的裂纹产生情况；定时开展的性能评定涵盖效率评定、红外热成像检测等内容，这些能够找出性能下降的趋势[7]。系统应该运用先进的数据分析算法，把时域分析、频域分析和趋势分析融合起来的办法，如果振动幅值连续3个小时超出报警阈值，或者声发射事件率在24小时内上升超过30%，就会自动启动预防性维护的工作单。依靠这种多层次、智能化的监测警报体系，可以在损伤初期发出警报，给计划性检修留出足够的时间，从而有效地防止非计划停机事故的出现。

四、方法应用的结果分析与整体结论

（一）评估检修方法实施后的可靠性提升结果

系统化检修方法的执行使得汽轮机机组的运行可靠性得到很大加强。某电厂350MW机组采用精密无损检测和激光焊接修补以后，关键监测点的振动值从原来的56μm缩减到25μm，缩减比例约为55%，这完全符合安全运行的标准；该机组的连续安全运行时间也从原先的平均6000小时增长到8500小时，增幅达到41.7%。另一个案例显示，利用等离子堆焊修复水蚀叶片的机组，在检修完毕后的3000小时运行阶段，并没有出现过因为叶片问题而产生的异常振动或者非计划减负荷情况[8]。这些量化数据很好地表明了科学检修方法对于改善设备状况、提升运行稳定性方面的有效性。

（二）评估预防措施执行下的损伤率下降结果

全面执行预防措施之后，叶片损伤的发生率以及相关非计划停运次数明显缩减。统计资料表明，某发电集团推行运行优化和状态监测系统后，其旗下6台同类型机组的叶片损伤年发生率由之前的0.48次/台缩减到0.15次/台，降幅达60%以上；由于叶片问题引发的非计划停运次数从每年2.5次减到0.8次，同样超过60%的幅度；特别是装有表面加强涂层的末级叶片上，水蚀穿孔故障的间隔时间从原先的18000小时扩大到45000小时之上。为更直观地展示上述综合预防措施的实施成效，现将关键指标的对比如下（见表1）。 这些数据有力地验证了预防措施在降低故障率、减少非计划停运方面的实际效果。

表1评估预防措施实施前后关键指标对比

评估指标	实施前	实施后	效果变化
叶片损伤年发生率（次/台）	0.48	0.15	下降评估＞评估60%
非计划停运次数（次/年）	2.5	0.8	下降评估＞评估60%
水蚀穿孔故障间隔时间（小时）	18,000	＞评估45,000	延长评估＞评估150%

表1数据清晰表明，预防体系在降低故障频率与提升部件耐久性两方面均取得了显著效果。这种多指标的同步优化，从量化角度强有力地证实了构建系统性预防策略的工程价值与实践必要性。

（三）评估综合提升机组经济性与安全性的总体结论

本研究通过系统分析显示，要想有效地管理汽轮机叶片损伤，就务必采取检修与预防关联的综合策略。精准的无损检测和修缮技术可及时复原设备功能，而且，运行优化、设计改进以及智能监测之类的预防手段可以从源头把控风险。应用数据显示，这种一体化管理方案能突出增强机组的可靠性，减低维护成本，保证运行安全[9]。创建包含叶片整个生命时段的标准化健康维护体系，是达成汽轮机长期、经济又安全运行的最佳路径，对于改善电厂的整体维护水平有着非常关键的工程实践意义。

五、结语

本研究表明，汽轮机叶片损伤的成因具备确切的多因素耦合特性，其检修与预防原理有着全面的工程指导意义。研究成果表现出从损伤检测到积极预防的全过程运作规律，表明创建“运行优化－设计强化－智能监测”三位一体的预防体系可有效减小叶片故障率，降幅超过60%，此规律适合同类型旋转机械的维护管理。相比传统研究侧重于单一技术领域，本文创新性地塑造起牵涉全生命时段的系统性解决方案，具备突出的理论集成价值[10]。然而，该研究针对极端工况下材料性能下降的微观机理还需进一步深入探究。未来建议融合数字孪生技术来形成更为精确的叶片寿命预测模型，这将为智能电站的建设提供关键技术支撑。

参考文献

[1]罗烽.垃圾焚烧发电厂汽轮机转子叶片损伤研究分析[J].电力设备管理,2024,(23):294-296.

[2]艾郑,孙力.电厂汽轮机检修及维护技术要点研究[J].电工技术,2025,(03):225-227+230.

[3]章志龙.火电厂汽轮机运行故障处理技术探究[J].中国设备工程,2025,(02):205-207.

[4]李传海,葛云双,翟观文.火力发电厂汽轮机设备安装检修技术分析[J].清洗世界,2024,40(10):181-183.

[5]石钰.汽轮机调节级叶片优化及应用分析[J].家电维修,2024,(09):104-106.

[6]沈琦.状态检修在汽轮机检修中的应用研究[J].设备管理与维修,2023,(14):82-83.评估评估评估[7]许恒,赵洪岗,杜伟.状态检修在汽轮机检修中的应用研究[J].中国设备工程,2021,(23):78-80.

[8]张岩,袁明玉.热电厂汽轮机的检修及安全运行分析[J].电站系统工程,2021,37(03):53-54.

[9]李功甲.火电厂机组汽轮机本体检修分析[J].科技资讯,2020,18(06):68-69.评估评估评估评估

[10]任飞.论状态检修在汽轮机检修中的应用[J].内燃机与配件,2019,(24):161-162.

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

电气二次回路常见故障排查方法研究

张杨泽旭
大唐七台河发电有限责任公司 , 黑龙江 七台河 154622
DOI:10.61369/EPTSM.2026020029

摘　　要： 电力系统二次回路是保障电网安全稳定运行的“中枢神经”，其故障的快速、准确定位是运维工作的关键挑战。本文针对传统排查方法依赖经验、效率不均的问题，系统研究了电气二次回路常见故障的排查方法体系。研究通过构建涵盖传统经验判断法、仪器量化检测法及智能诊断技术的多层次方法体系，并对比分析各类方法在典型场景下的应用效能与适用边界。核心结论表明，高效排查依赖于人员技能、先进工具与标准化流程的有机结合，而智能技术与传统方法的融合是未来主要发展方向。本研究为提升现场运维的系统性与智能化水平提供了理论框架与实践参考。

关 键 词： 电气二次回路；故障排查；继电保护；智能诊断；状态监测

Research on Troubleshooting Methods of Common Faults in Electrical Secondary Circuit

Zhang Yangzexu
Datang Qitaihe Power Generation Co.,Ltd. Qitaihe, Heilongjiang 154622

Abstract: As the "central nervous system" ensuring grid safety and stability, the secondary circuits in power systems face critical challenges in operation and maintenance due to the need for rapid and accurate fault localization. This study systematically investigates troubleshooting methodologies for electrical secondary circuit faults, addressing the limitations of traditional approaches that rely on empirical experience and uneven efficiency. By establishing a multi-tiered framework integrating conventional judgment methods, instrument-based quantitative detection, and intelligent diagnostic technologies, the research compares their performance and applicability in typical scenarios. Key findings demonstrate that effective fault diagnosis requires the synergy of human expertise, advanced tools, and standardized procedures, with the integration of intelligent technologies and traditional methods emerging as the primary future direction. This study provides a theoretical framework and practical reference for enhancing the systematic and intelligent capabilities of on-site operation and maintenance.

Keywords: electrical secondary circuit; fault diagnosis; relay protection; intelligent diagnosis; condition monitoring

引言

二次回路是居民用电和工业生产用电的有力保障，整个线路的稳定运行少不了二次回路的监测和调节。而二次回路的故障往往会对线路的正常运行产生威胁，常见的问题是导致电路错误跳闸，计费线路工作失常等问题，而这将导致的后果是一次线路原件的损毁甚至整个供电线路的瘫痪，带来巨大的经济损失[1]。当下，国内外的故障排查技术正在由依靠人工经验朝着仪器检测与智能判断融合的方向转变，可是当前的方法在效率，准确性和标准化上仍然存在不够之处。因此，本文意在系统地形成并对比各类多层次的故障排查方法体系，探究这些方法的实际应用效果，从而给改善故障排查的效率和准确性提供理论和技术支撑。全文依次从故障基础分析、方法体系构建、效能对比及优化展望四个方面展开论述。

一、研究目的与故障基础分析

（一）电气二次回路故障排查的核心目的与工程意义

电气二次回路故障排查的核心目的在于保障电力系统整体安全稳定运行，快速识别并消除保护，控制回路隐患，防止局部故障发展成系统性事故。高效排查可明显缩减故障设备停电时延，这对连续生产企业和关键负荷区域来说，就是大幅削减经济损失。而且，系统化的排查方法与流程能优化检修工作效能与准确性，规避盲目拆卸和反复检测，进而有效减小长期的运维成本，做到技术经济效益的最大化。

作者简介：张杨泽旭（1996.10-），男，汉族，吉林省大安市人，学历：本科，职称：助理工程师，研究方向火力发电厂电气二次检修。

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

（二）故障排查工作的基本原则与通用流程

故障排查工作必须始终坚持“安全第一”的根本原则，所有操作均需在严格遵守安全规程、确保人员与设备安全的前提下进行。在技术策略上，应遵循“从简到繁、由外到内”的逻辑顺序，即优先进行直观的外部检查与简单测试，再逐步深入复杂的内部电路分析[2]。一套典型的通用流程包含四个关键步骤：首先细致搜集并记录故障现象，依据图纸及逻辑，科学划定可能存在的故障范围；按照故障类型与范围，选用最合适的检查方法（测量，分段，替换等），然后执行检测验证，准确找到故障点；修复完毕之后开展功能性的复查，形成完整闭环。

（三）常见故障类型的特征、影响与预判分析

二次回路常见故障包含开路，短路，接地以及虚接（即接触不良）等种类。开路故障会造成信号或者控制指令被切断，使得功能彻底失效。短路故障有可能致使保护误动作，设备被烧毁，还可能导致火灾，其危害性非常大。接地故障在特定系统中会引起误报警或过电压；虚接故障则表现为设备工作间歇性异常，隐蔽性强。通过对运行参数（诸如电流电压值，指示灯状态，保护装置事件记录以及绝缘监测数据）实施即时观测，并且展开历史趋势分析，就可以对故障类型作出初步判断[3]。

二、系统化故障排查方法体系构建

（一）基于逻辑推理与经验判断的传统排查法

传统排查法高度依赖技术人员的专业经验与逻辑推理能力，是现场最基础且不可或缺的手段。其核心在于对故障现象的系统性分析，包括观察信号灯状态、读取指示仪表数据、解读保护装置与监控系统的报警信息，以此作为推理的起点。在具体操作中，分段排除法是关键工具：通过电压法测量关键节点电位来判断通断情况，用电阻法检查线路的连续性以及接触电阻，必要时小心采用短接法暂时绕过部分线路以验证功能。长期操作过程中所积攒下来的经验判断法则依靠典型故障模式库，把常见的故障现象，可能的原因和应对措施联系起来，做到快速对应。这种方法有如下优点：比较灵活，很直观，成本较低，特别适合那些现象明显，架构熟悉的常见故障[4]。不过其不足之处也很突出，即效率和准确性很大程度上取决于个人的能力高低，无法做到标准化；对于复杂，隐匿或者新出现的故障，其应对能力较为薄弱；而且属于一种事后补救的形式，并不具备预防性功能。

（二）依托专用仪器仪表的量化检测法

量化检测法依靠专用仪器来获取客观数据，把排查工作由定性转为精确定量。常见的仪器有万用表（用来做电压，电流，电阻的基本测量），绝缘电阻检测仪（测量线路和设备的绝缘状况，预先察觉绝缘变差的情况），继电保护检测仪（可以模仿各种故障电气量，用以校验保护装置的动作逻辑以及整组回路是否正确），还有更为先进的示波器或者录波仪（用以捕捉并分析波形）。关键的检测技术包含绝缘电阻检测（用来判定绝缘是否完好），回路电阻测量（考量接头质量和接触电阻），以及电流电压波形分析（判断谐波，畸变等动态方面的问题）。采用这种方法的时候，按照规程或者厂家标准来确定参数的正常范围和故障界限。

（三）融合智能诊断与在线监测的先进技术应用

先进技术的应用目标在于促使故障排查朝着智能化，预防性的方向去发展。智能判断技术结合了专家系统（把专家的经验规则化），神经网络（依靠历史数据训练来做到故障模式识别）以及模糊逻辑（应对不确定性和不准确的信息）这些手段，可以起到辅助甚至自动执行故障初步判断并推断原因的作用。在线检测系统不断收集二次回路上重要电气量（比如线圈电流，接点状态）以及机械量（譬如震动，温度）的数据，从而达成即时评定状态，分析走向并发出早期警报，把“故障发生后再去修理”转变为“预先知晓设备状况以实施保养”。数字孪生技术创建起与实际物理回路近乎同步的虚拟模型，这样就能在虚拟环境中展开故障模拟，推演过程，并预先评估应对策略，这明显加深了复杂故障分析的层次，也使得决策变得更为科学[5]。未来的技术融合方向在于打破监测数据，智能判断模型和数字孪生平台之间的隔阂，形成“数据激发，模型剖析，虚实互动”的智能运维循环，该方向的目标是达成更为精准的预测性维护，更高效率的远程协作判断以及更具适应性的系统健康保障。

三、方法应用效能对比与结果分析

（一）不同排查方法在典型故障场景下的应用实例

案例1：继电保护误动作。故障现象为线路无故障时保护装置突然跳闸。传统方法靠经验判断，会去检查定值和外观，也许要花费数个小时，才会想到可能是交流回路串入了直流造成的误动。而量化检测法利用录波仪来分析跳闸前后电压波形，找出异常干扰，并且配合万用表测量，短短几小时就能找到电缆屏蔽层接地不良的地方[6]。要是安装了在线监测，其具备趋势分析功能，也许会比故障发生之前就察觉到这个回路绝缘存在异常波动情况并发出警报，从而做到零延迟定位。此案例凸显智能监测的预防性优势。

案例2：控制回路断线。 表现为断路器无法电动分合闸。传统方法通过信号灯，电压法来分段检查，针对简单的单点故障，经验丰富的人员大约需1.5小时就能搞定。量化方法依靠回路电阻检测仪准确找到接触电阻升高的具体接点，其精准度非常高，所花费的时间与传统方法差不多或者更短一些。智能化判断如果依托状态监测，可以在功能彻底失效之前，凭借回路电流的微小变动提示“接点接触电阻增大”，从而把故障扼杀在初始阶段。

案例3：信号回路异常。 如远方信号频繁误发或丢失。采用传统方法时，需执行外观查看，端子紧固以及替换元件等步骤来查找问题所在，对于间歇性故障而言，这种方法效率比较低，有可能会再次发生。而利用量化法，可以凭借示波器获取到信号传递过程中波形发生畸变或者电压下降时的波形图，这样就能察觉到线路干扰，电源不稳定之类的深层次原因。智能化在线检测系统能够不断记录信号的状态及其相关的参数信息，从而确定异常产生的确切时间以及相关的环境因素，给后续的判断供应关键的数据支撑。

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

三个案例共同表明，方法选择需根据故障性质：简单明显故障传统法高效；复杂、隐性故障仪器法更优；智能监测则代表前瞻性的解决方案。

（二）各类方法在效率、准确性、适用性方面的对比数据

为科学评估不同排查方法在各类故障场景下的适用性，本研究构建了以“故障类型”为维度的对比评价体系，核心指标包括排查时间、定位准确率及综合成本。基于实际运维数据的统计分析表明：“控制回路断线”这种常见的故障，传统法和量化法所花费的时间差不多，都是1到2个小时左右，不过传统法的成本比较低。至于“信号回路异常”这样的间歇性故障，量化检测法则依靠仪器来捕捉瞬间的异常情况，其准确率（>90%）远超传统法（<60%），而且平均耗时也要短一些。对于“继电保护误动”这种复杂的隐性故障，量化法是有效判断的基础，智能在线监测能够把排查时间从数小时缩减为预先发出警报，这在效率上实现了质的飞跃，但是其成本也是最高的[7]。从结果分析和探讨来看，并没有一种万能的最佳方法，关键在于依据故障的复杂程度和隐蔽特性，选取最适合的技术路线，从而创建起“简单故障快速应对，疑难故障精确测量，关键设备智能报警”的协同机制。

（三）当前主流排查体系的效果评估与局限性分析

对当前主流“混合反应式”排查体系的综合效果评估表明，其能有效应对多数常见故障，保障了系统运行的基本安全底线。然而，该体系存在显著的技术局限性：其本质属于事后被动应对的情况，缺少针对状态恶化情况预先察觉并发出警报的能力；对于复杂且隐蔽的故障其判断深度不够；就人员技能而言，体系的效果过于依靠个人经验和现场决策，造成检查质量起伏不定，人员培训历时漫长；从经济角度来讲，这种模式最初的投资较小，但是由于检查存在延误或者误判的可能性，使得故障规模增大，进而引发更大的潜在停电损失以及更多的修理费用[8]。

四、研究结论与排查体系优化展望

（一）研究核心结论：高效排查方法的关键要素总结

高效排查方法的关键要素展开，其一，人员素质与经验属于根基部分，资深工程师具备现场判断能力十分必要；其二，仪器设备若得到妥善设置，则会给予精确诊断的量化依照，达成从主观经验向客观数据转变的目标；其三，创建标准流程并严格执行相关操作步骤，保障排查工作具备可重复性与可靠性；其四，应当促使传统方法同先进技术深入结合，一方面保留人工经验在快速定位时的灵活优势，另一方面利用智能工具的警报及精确分析功能，进而塑造协同提升的循环系统。

（二）针对现有排查难点与短板的改进建议

为克服当前短板，应重点推进以下四方面工作：加强人员培训体系创建，形成依托仿真平台和实际案例的高级培训及认证机制；推进检测仪器智能化升级，开发具备多参数测量，数据自动分析以及远程交互功能的便携式诊断设备；完善故障数据库和知识库，系统汇集并结构化各类故障的特征数据与应对经验；优化排查流程的标准化程度，针对常见故障类型制订详细的标准作业程序，缩减对个人经验的盲目依赖，从而提升整体作业效率和一致性。

（三）故障排查技术标准化与智能化发展趋势展望

未来技术发展将聚焦于两大主线：一是行业标准需完善，重点在于形成智能判断算法验证，监测数据格式统一以及状态评定规范等方面系统性的标准。二是人工智能要深入融合，利用机器学习做到故障精确预测并追溯其根源，促使运维模式由“事后处理”朝着预测性维护方向发生实质性改变[9]。最终，依托远程诊断与协作平台的云边端协同架构，达成技术资源的共享以及专家智慧的远程助力，从而引导二次回路运维迈进智能化，网络化的崭新阶段。

五、结语

本研究通过创建并对比分析传统经验，仪器检测以及智能判断这三种方法，系统地表现了电气二次回路故障排查效能同故障性质，技术路径之间的本质关联。结论表明，高效的排查体系实质上就是按照故障特征（简单，复杂或者隐性）来选取最适合的方法，这就为塑造分层协同的标准运维流程提供了理论支撑[10]。相较于现有研究侧重于单一方法，本文则重视技术融合和场景适应的意义。在实践层面，研究提出来的框架与方法可以直接用来指导现场运维策略的优化。未来研究可聚焦于构建覆盖更广故障类型的智能诊断算法库，并探索基于数字孪生的全生命周期状态预测技术。

参考文献

[1]赵子文 . 探讨电气二次回路的故障分析措施 [J]. 电子制作 ,2017,(15):84+81
[2]徐东梅 . 继电保护设备电气二次回路隐患排查 [J]. 光源与照明 ,2025,(06):102-104.
[3]胡骁 . 电力系统中电气二次回路常见故障及防范分析 [J]. 办公自动化 ,2024,29(17):84-86.
[4]孙可 , 刘正昕 . 继电保护设备电气二次回路隐患排查方法 [J]. 光源与照明 ,2024,(06):180-182.
[5]汤娅美 . 继电保护设备电气二次回路隐患排查研究 [J]. 电气技术与经济 ,2024,(04):126-128.
[6]李冬 . 火电厂继电保护二次回路常见故障及排除 [J]. 仪器仪表用户 ,2023,30(08):88-90.
[7]周翔 . 电力系统电气二次回路的常见故障及防范 [J]. 数字通信世界 ,2020,(03):104.
[8]李元凯 . 试析电气二次回路的故障及相应的解决对策 [J]. 科学技术创新 ,2020,(19):159-160.
[9]王玉姬 . 配网二次回路故障的排查分析 [J]. 电子制作 ,2019,(20):99-100+33.
[10]黄松 . 电力系统电气二次回路的常见故障及防范 [J]. 通信电源技术 ,2019,36(08):104-105.

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

热工检修维护全流程管理体系的构建与实践

杨远

国家电投集团贵州金元股份有限公司纳雍发电总厂，贵州 纳雍 553303

DOI:10.61369/EPTSM.2026020030

摘　　要： 热工设备是电力、化工、冶金等工业领域中不可缺少的核心组成部件，热工设备的稳定运行同生产效率、安全水平、经济效益息息相关，创建热工检修维护全流程管理体系有重大的现实意义。本文根据热工检修维护工作实际，结合行业发展需求，从构建该管理体系的意义、行业内热工检修维护管理现状及突出问题、体系构建及实践策略三方面进行系统阐述，通过规范检修流程、加强过程控制、提高人员素质、完善保障措施，达到热工检修维护工作的标准化、精细化、常态化。经实践表明，该体系可以解决目前管理中存在的碎片化、粗放化问题，降低设备故障率，提高检修效率和质量，给工业生产安全、稳定、高效运行打下坚实的基础。希望为各类工业企业热工检修维护管理工作的优化升级提供参考与借鉴。

关 键 词： 热工检修维护；全流程管理体系；构建策略

Construction and Practice of the Whole Process Management System for Thermal Maintenance and Repair

Yang Yuan

Guizhou Jinyuan Co., Ltd. Nayong Power Plant, Nayong , Guizhou 553303

Abstract: Thermal equipment serves as indispensable core components in industrial sectors including power generation, chemical processing, and metallurgy. The stable operation of thermal equipment is closely linked to production efficiency, safety standards, and economic benefits, making the establishment of a comprehensive maintenance management system of paramount practical significance. Based on practical experiences in thermal equipment maintenance and industry development needs, this paper systematically elaborates on three key aspects: the significance of establishing such a management system, the current status and prominent issues in thermal equipment maintenance management within the industry, and practical strategies for system construction. By standardizing maintenance procedures, enhancing process control, improving personnel competence, and refining safeguard measures, the system aims to achieve standardized, refined, and routine maintenance practices. Practical implementation has demonstrated that this framework effectively addresses fragmented and inefficient management issues, reduces equipment failure rates, improves maintenance efficiency and quality, and lays a solid foundation for safe, stable, and efficient industrial production. It is hoped that this study will provide valuable references for optimizing and upgrading thermal equipment maintenance management in various industrial enterprises.

Keywords: thermal maintenance; full-process management system; construction strategy

工业生产智能化、规模化的发展过程中，热工系统包含温度、压力、流量等各种检测仪表、控制装置和执行机构，是联系生产工艺、保证设备协同运转的“神经中枢”。热工设备运行状态的好坏直接影响生产流程的连续性、产品质量的稳定性，也关系到生产安全和运营效益。目前部分企业热工检修维护工作还存在着流程不规范、责任不明、管控不到位、技术较落后等问题，致使设备故障频繁出现、检修成本偏高、应急处置能力不足，不能满足现代化工业生产高质量发展的要求。因此，创建科学完善、可实施的热工检修维护全流程管理体系，规范检修维护各个环节的操作，加强全过程控制，解决目前存在的管理瓶颈，成为工业企业提质增效、安全生产的迫切需要。本文联系实际经验，就该体系的建立与应用展开深入研究，给行业内相关工作给予操作指导。

作者简介：杨远（1980.09-），男，汉族，贵州纳雍人，本科，工程师，研究方向：火力发电厂热工检修维护质量与安全管理。

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

一、构建热工检修维护全流程管理体系的核心意义

（一）保障工业生产安全，降低安全事故风险

热工设备安全稳定运行是工业生产的基础，热工仪表失灵、控制装置故障很容易造成生产中断、安全事故，严重时还会造成人员伤亡、财产损失。热工检修维护全流程管理体系通过对设备巡检、定期校验、故障排查、应急处置等各个环节的规范，可以及时发现设备运行中出现的隐患，提前进行维护检修，从根本上避免由于设备故障引发的安全事故。同时体系中也明确了各岗位人员的安全责任，规范了检修作业过程中的安全操作程序，加强了安全培训与监管，提高了工作人员的安全意识和应急处置能力[1]。

（二）提升设备运行效能，延长设备使用寿命

热工设备运行效率的好坏直接关系到工业生产的效率和产品质量，长期粗放式的检修维护会使得设备性能下降、能耗增加、使用寿命变短。热工检修维护全流程管理体系以设备全生命周期为出发点，从设备采购验收、安装调试、日常巡检、定期维护、故障检修到报废处置，实现全流程精细化管理。按照科学的维护检修计划，对设备定期进行校准、调试和保养，及时修复设备的微小故障，可以保证设备处在最佳运行状态，提高设备的精度、稳定性，减少设备的能耗。同时全流程管控可以避免设备过度检修或者检修不到位的问题，减少设备的损耗，延长设备的使用寿命，降低设备的更换成本，达到设备资源高效利用的目的[2]。

（三）规范管理流程，降低检修维护成本

目前部分企业的热工检修维护工作存在着流程混乱、责任不清、计划不合理等状况，造成检修效率低、重复检修、资源浪费，大大增加了检修维护成本。热工检修维护全流程管理体系对检修维护各环节的工作内容进行梳理，确定各个工作环节的工作标准、责任人、时间节点、衔接要求，形成标准化、规范化的管理流程，有效地避免了流程脱节、责任推卸、重复劳动等问题。体系依靠精准排查设备隐患、科学制订检修计划，合理调配人力、物力、财力资源，缩减无效检修作业，削减检修材料耗费和人力成本[3]。

（四）推动行业提质增效，助力高质量发展

热工检修维护工作是工业生产高质量发展的关键支撑，热工检修维护工作管理水平的好坏，直接体现出企业的生产管理水平和发展水平。热工检修维护全流程管理体系的建立与实施，可以促使企业打破以往粗放式管理模式，树立起精细化、标准化、科学化的管理理念，提高企业热工检修维护的管理水平与核心竞争力。同时体系的推广使用也会促使行业热工检修维护技术、管理模式的优化升级，提高行业整体检修维护水平，减少能源消耗和污染物排放，达到节能降耗、绿色发展。保证热工设备的稳定高效运转，能够提高工业生产效率和产品质量，推进工业行业向智能化、高质量方向发展，对我国工业经济高质量发展起到有力支撑。

二、热工检修维护全流程管理的现状分析

（一）管理理念滞后，重视程度不足

目前部分工业企业对热工检修维护工作重视不够，仍沿用“重生产、轻维护”“重抢修、轻预防”的传统管理观念，把工作重心放在生产任务的完成上，对热工设备的日常维护、定期校验、隐患排查重视不够。部分企业管理者把热工检修维护工作看作是“辅助性工作”，不重视人力、物力、财力的投入，造成热工检修维护资源配置不足、工作人员积极性不高。部分企业没有形成精细化管理理念，对热工检修维护各个环节的控制不严格，工作标准不明确，造成检修维护工作形式化，不能发挥应有的作用，不能满足现代化工业生产对热工设备管理的高质量要求。

（二）管理流程不规范，衔接机制不完善

目前大部分企业热工检修维护工作缺少规范的全流程管理流程，各个环节的工作缺乏标准和衔接要求，有流程碎片化、脱节化的问题。设备巡检环节没有统一的巡检标准和记录规范，巡检结果不能及时反馈和处理，检修计划制定缺乏科学依据，多依靠工作人员的经验，造成计划不合理、针对性不强，故障检修环节缺少规范的处置流程，应急响应不及时，检修质量无法保证，检修完成后缺少完善的验收和复盘机制，不能及时总结经验、改进工作。除此之外，各部门之间衔接不畅，生产部门、检修部门、技术部门之间缺少沟通，造成检修维护工作协同性差，整体工作推进缓慢。

（三）人员素养参差不齐，专业能力不足

热工检修维护工作专业性很强、技术要求高，要求工作人员有扎实的专业知识、熟练的操作技能和较强的应急处置能力。但是目前行业内热工检修维护人员的素养良莠不齐，存在专业能力欠缺、技能水平不高现象。一方面，部分工作人员年龄较大，缺少系统专业的培训，对于新型热工设备、智能化检测技术掌握不够，不能满足智能化热工系统的检修维护要求，另一方面，部分年轻工作人员缺少实践经验，理论知识和实际操作相脱离，遇到复杂的设备故障时不能快速准确地处理。企业缺少健全的培训、考核机制，对于工作人员的专业培训流于形式，考核评价不严格，无法促进工作人员专业能力的提高。

（四）技术水平滞后，保障机制不健全

伴随着工业智能化的迅速发展，新型热工设备、智能化控制技术不断出现，但是部分企业热工检修维护技术水平落后，不能满足新型设备的检修维护需求。一些企业仍然采用传统的检修技术、工具，缺少智能化检测设备，故障诊断系统配置不全，使得对设备潜在的隐患不能及时准确地被发现并解决，不能够及时发现并处理设备运行中存在的一些问题[4]。同时，热工检修维护保障机制不健全，缺少完善的管理制度、考核机制和激励机制。管理制度不健全造成各个环节的工作无章可循；考核机制不严格造成工作人员工作积极性不高、责任感不强；缺少激励机制造成工作人员缺乏主动学习和创新的动力，无法促进检修维护技术和管理水平的提高。

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

三、热工检修维护全流程管理体系的构建与实践策略

（一）更新管理理念，强化重视程度

理念更新是创建热工检修维护全流程管理体系的前提，企业要冲破传统管理观念的束缚，树立起“预防为主、全员参与、精细化管理”的核心观念，加大对于热工检修维护工作的重视程度。一方面，企业管理层需要提高思想认识，充分认识到热工检修维护工作对于生产安全、效率提升、成本控制的重要意义，把热工检修维护工作纳入到企业整体发展战略当中，加大人力、物力、财力的投入，完善检修维护资源配置，为企业体系的构建提供有力保障。另一方面就是加强全员宣传教育，采用培训、会议、宣传手册等多样的方式，对全体工作人员进行热工检修维护重要性、精细化管理理念的教育，提高工作人员的责任感和参与积极性，营造人人重视维护、人人参与维护的良好工作氛围。

（二）规范管理流程，完善衔接机制

规范的管理流程、完善的衔接机制是热工检修维护全流程管理体系有效运转的关键所在，需要梳理检修维护全过程的工作内容，创建起标准化、规范化的全流程管理体系。一是确定全流程管理环节，包含设备采购验收、安装调试、日常巡检、定期维护、故障检修、验收复盘、报废处置等各个环节，确定各环节工作内容、工作标准、责任主体、时间节点。二是规范各个环节的操作流程，制定统一的巡检标准、维护规程、检修规范、验收标准，保证各个环节工作有章可循、有据可依。日常巡检要确定巡检路线、巡检频次、巡检内容和记录要求，故障检修要规范故障上报、诊断、处置、验收等流程。第三、健全衔接机制，制订生产部门、检修部门、技术部门之间正常沟通方式，并明确各个部分职责分工和衔接要求，达到信息共享、协调配合的目的，防止工作脱节以及责任推卸的现象产生，进而提高工作的协同效率。

（三）培育专业队伍，提升人员素养

专业的检修维护队伍是体系构建和实践的关键支撑，必须依靠完善的培训、考核、激励机制来培养一支素养高、专业强、能力硬的热工检修维护队伍。一是制定系统化的培训计划，按照企业热工设备的实际情况和行业发展动态，实施分层分类培训，针对老员工重点开展新型设备、智能化技术的培训，针对年轻员工重点开展实践操作、故障处理的培训，定期组织技能考核与交流学习，促进工作人员理论知识和实际操作能力的提高。二是健全考核评价体系，以工作质量、工作效率、隐患排查能力、应急处置能力为考核指标，实行常态化考核、动态管理，考核结果同绩效工资、评优评先挂钩，强化工作人员的责任意识、竞争意识。三是建立完善的激励机制，设立专项奖励基金，对检修维护工作表现突出、及时发现重大隐患、成功处置复杂故障的人员予以表彰和奖励，调动工作人员工作积极性、创造性，有利于优秀专业人才的引进和留用[5]。

（四）强化技术赋能，完善保障机制

技术创新和完善的保障机制，是保证热工检修维护全流程管理体系高效运转的重要支撑，要加大技术投入，完善各项保障机制，提高体系运行效能。一是加强技术赋能，引进智能化检修维护技术设备，智能检测仪表、故障诊断系统、大数据分析平台等，对设备运行状态进行实时监测，隐患精准排查，故障快速诊断，提高检修维护效率和质量。加强技术创新、研发，按照企业实际需求改善检修维护技术及方法，促使检修维护工作朝向智能化、精准化转变。二是完善管理制度，制定完善的热工检修维护管理制度、安全管理制度、设备管理制度等，明确各个环节工作的管理要求和责任追究机制，保证体系的有效落地执行。三是健全资源保障机制，合理调配人力、物力、财力资源，完善检修维护设备、材料的采购、储备与管理，保证检修维护工作的顺利进行。另外，要建立应急预案体系，针对各种热工设备突发故障的情况制定详细的应急处理方案，定期组织应急演练，提高应急处理能力，减少由于突发故障造成的损失。

四、结束语

综上所述，热工检修维护全流程管理体系的建立，是工业企业保证安全、提高效率、走绿色发展道路的有效手段，对推动行业的可持续发展也十分重要。本文通过对热工检修维护全流程管理体系的意义、现状的分析，提出更新管理理念、规范管理流程、培养专业队伍、强化技术赋能的实践策略，为工业企业构建完善的热工检修维护全流程管理体系提供实践指导。实践证明，科学完善的热工检修维护全流程管理体系，可以很好地解决目前管理中存在的主要问题，降低设备故障的发生率，提高检修维护的效率和质量，降低检修维护的成本，为工业生产的安全稳定高效运行提供有力保障。

参考文献

[1]韩新建，韩新春 . 火电厂热工保护控制系统可靠性技术提升探讨 [J]. 能源科技，2022,20(05):54-58.

[2]张力 . 基于 RCM 模式的电厂热工台账优化 [J]. 设备管理与维修，2022,(16):7-9.

[3]王林 . 电力系统中热工仪表自动化安装及运行微探 [J]. 电力设备管理，2021,(03):202-205.

[4]邹毅 . 电力热工自动化仪表检修及调试探讨 [J]. 通讯世界，2020,27(01):223-224.

[5]毛林燕 . 热工仪表的检修及其校验分析 [J]. 中国新技术新产品，2019,(16):58-59.

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

智能电表数据驱动的用户用电异常检测方法

夏宇伟
国网湖北省电力有限公司武汉供电公司，湖北 武汉 430000
DOI:10.61369/EPTSM.2026020031

摘　　要： 本文基于实际应用的场景情况，分析智能电表依靠数据来进行检测的核心逻辑，剖析异常用电主要的类型以及形成的原因，从数据采集还有预处理、多维度检测模型搭建、结果检验和运维落实这三个方面，深入探究能够实用的异常检测办法，避免传统检测手段的盲目状况和滞后情形，为电力企业精准识别偷电行为、设备出现故障以及用电存在异常提供能够落实的技术途径，兼顾检测精准程度与运维工作效率，助力电网精细化管理。

关 键 词： 智能电表；数据驱动；用电异常检测；运维落地

A Data-Driven Method for Detecting Abnormal Electricity Consumption by Users with Smart Meters

Xia Yuwei
Whan Power Supply Company, State Grid Hubei Electric Power Co., Ltd. Wuhan, Hubei 430000

Abstract: This analyzes the core logic of intelligent meter inspection based on real-world scenarios, dissects the main types and causes of abnormal electricity consumption, and explores in-depth practical methods abnormal detection from three aspects: data collection and preprocessing, multi-dimensional detection model establishment, and result verification and operation and maintenance implementation. It avoids the blindness and lag of detection methods and provides a feasible technical path for power enterprises to accurately identify electricity theft, equipment failure, and abnormal electricity consumption. It balances the accuracy of detection with the efficiency of and maintenance, and helps the power grid to achieve refined management.

Keywords: smart meter; data-driven; abnormal electricity consumption detection; operation and maintenance implementation

引言

在智能电网建设不断深入推进的背景状况下，智能电表已经达成全场景覆盖，替代传统电表成为用电计量、数据收集以及信息传输的核心承载物体。和传统电表相比较，智能电表能够实时收集电压、电流、电量、功率等多个维度的数据，并且能够记录设备运行的状态、事件触发等方面的信息，给用电异常检测提供了丰富的数据支持[1]。本文结合实际运维的场景情况，深入分析依靠数据驱动检测的关键环节和实用方法，解决检测过程当中误报比例高、针对性不够、落实性差等方面的问题，为电力企业高效开展异常检测工作提供参考依据。

一、用电异常类型及成因分析

（一）人为违规异常

这类异常以非法偷电为核心要点，目的是通过更改计量环节来减少电费支出，行为具备隐蔽特性和故意性质，常见的手段包含接线出现异常、物理进行篡改以及技术实施干扰这三类。接线出现异常表现为短接电流回路、绕过电表接线、反向进行接线等，通过改变电流传输的路径让电表少计电量；物理进行篡改大多是破坏电表封印、打开表盖改动内部电路或者采样器件，甚至替换计量芯片，直接造成计量失效；技术实施干扰则通过强磁设备干扰电表采样的精准程度、更改电表时钟或者计量程序，间接影响数据的准确情况。这类异常的核心特点是用电数据和实际用电行为不相符，并且常常伴随着电表开盖记录、时钟有偏差、功率异常波动等相关联的事件[2]。

（二）设备运行异常

设备运行异常包括智能电表自身出现故障和用户端用电设备

作者简介：夏宇伟（1980.01-），男，汉族，湖北省武汉市人，学历：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.

有异常情况，都会使得用电数据偏离正常的规律。电表自身出现故障包括计量芯片产生漂移、时钟出现故障、采样部件遭到损坏等，表现为电表停止走动、反向走动、电量突然增多或者突然减少等现象，例如采样电阻老化会使得电流收集精准程度降低，时钟出现故障会破坏电能守恒分析的前提条件，引发计量方面的偏差；用户端设备有异常情况则包括电气设备老化、短路、过载、漏电等，例如空调、热水器等大功率设备出现故障会使得瞬时功率突然升高，线路老化漏电会造成零线电流有异常，这类异常常伴随着功率因数波动、谐波含量超过标准等特征[3]。

（三）数据传输异常

数据传输出现异常这种状况，虽然不会直接对用户用电的行为造成异常影响，但是会使得采集到的数据出现失真的情况，进而对检测结果的准确程度产生影响。其形成的原因主要来自通信链路以及设备状态方面存在的问题。智能电表借助本地通信网络朝着计量主站进行数据的传输操作，要是网络信号受到干扰、基站进行切换时出现延迟或者光纤受到损坏，就会出现数据包丢失、重复、延迟等方面的问题；电表的通信模块发生故障、电源处于不稳定的状态也会导致数据传输出现中断或者错误的情况，表现出来的特征有数据缺失、异常跳动变化和历史数据没有衔接性等[4]。这类异常情况需要和真实的用电异常情况进行区分，从而避免错误地触发运维指令。

二、智能电表数据驱动检测的核心流程与关键环节

（一）数据采集与预处理

数据采集这个工作是检测工作的基础内容，需要覆盖实时数据以及历史数据，要确保数据的维度是完整的、采集是及时的。智能电表能够采集到的核心数据包含三类：第一类是电参数相关的数据，例如实时电压、电流、有功功率、无功功率、电量、功率因数、谐波含量等。第二类是设备状态相关的数据，例如电表运行的状态、时钟数据、开盖记录、故障事件日志等；第三类是辅助相关的数据，例如用户用电的类型、用电习惯的基线、区域用电的特性等。在采集的过程当中需要采用高频采样和定时上报相互结合的方式，电参数数据按照分钟级进行采样操作，设备状态数据一旦触发就进行上报操作，历史数据按照日进行汇总并且存储起来，为趋势分析提供支撑[5]。

数据预处理这个工作是剔除干扰因素、提升数据质量的关键所在，需要解决数据缺失、异常值、冗余等方面的问题，避免对检测模型的准确程度产生影响。针对数据缺失的情况，采用插值的方法进行补充，短期的缺失使用相邻时刻的数据进行线性插值，长期的缺失结合用户历史用电的模式以及同类型用户的数据进行填补[6]。针对异常值的情况，通过阈值的方法以及趋势分析的方法进行筛选，例如电压超出了国标规定的范围（220V±10%）、电流突然变成零并且持续的时间过长等明显不合理的数据，直接标记成待核实的异常数据并且进行剔除。针对冗余数据的情况，提取核心特征的参数，删除重复的记录以及没有关联的数据，例如相同时间段的重复电量上报的数据和用电状态没有关系的设备自检日志等，降低数据处理的压力。同时，需要对数据进行标准化的处理，统一单位以及格式，建立结构化的数据集，为后续特征提取以及模型构建奠定基础。

（二）特征提取

时序方面的特征主要关注用电数据在时间维度上所呈现出的变化规律情况，能够反映出用户在用电习惯方面所具有的稳定性状况，其核心的指标包含有电量的日变化率情况、功率的波动幅度情况、峰谷用电的比例情况等等内容。正常状态下的用户在用电时序特征方面具有一定的规律性特点，就好像居民用户在用电高峰时期集中于早上和晚上的时段，工业用户在用电方面相对比较平稳，要是出现了夜间低谷时段功率突然升高、电量连续好多天没有变化但是电流处于正常状态、峰谷比例出现倒置等这些情况的时候，就可以初步判断为属于异常状况。事件关联方面的特征是基于电表所记录下来的事件日志，其核心的指标包括开盖的次数情况、时钟偏差的时长情况、故障事件触发的频率情况等等状况，例如在没有运维工单的情况之下出现多次的开盖记录、时钟偏差超过了1分钟并且还持续存在、频繁触发电流不平衡的告警等情况，全部都属于异常关联特征类型[7]。多参数联动方面的特征是通过对电参数相互之间的逻辑关系进行分析，从而避免单一参数出现误判的情况，其核心的指标包含电压与电流之间的相位差情况、相线与零线电流的差值情况、有功功率与电量的匹配度情况等等内容，比如相线与零线电流的差值超过了5%并且持续了10分钟以上的时间，有可能是属于分流窃电的情况；有功功率并不是零但是电量却没有增长，有可能是属于电表停走的故障情况。

（三）检测模型构建

针对设备在运行过程当中出现的异常情况，设定电参数的阈值和状态逻辑内容，例如电流不是零但是电量持续保持不变、电量小于历史同期的数据并且反向电量出现增长、功率与电量的差值超过额定功率12小时的用电总量；针对人为违规所出现的异常情况，设定事件关联的规则内容，比如开盖记录之后伴随着电量突然下降、时钟偏差出现之后功率因数出现异常的波动；针对数据传输出现的异常情况，设定数据质量的规则内容，像连续3个采集周期的数据处于缺失状态、数据包的重复率超过了5%。规则引擎所具有的优势是响应速度比较快、逻辑比较清晰、运维人员比较容易理解，能够快速地筛选出明显的异常情况，从而减少后续模型处理所面临的压力。机器学习模型是针对隐性的异常情况，通过对用户历史用电模式进行学习，来识别偏离基线的行为，适合应用于特征不明确、行为比较隐蔽的异常类型[8]。选择采用孤立森林与LSTM混合的模型，孤立森林通过构建决策树去分离异常的数据点，适合用来识别电量出现突变、功率出现异常等孤立的异常情况；LSTM模型擅长捕捉时序数据之间的依赖关系，能够基于用户的历史用电数据构建个性化的用电基线，对后续的用电趋势进行预测，要是实际的数据与预测值的偏差超过了预设的范围，就判定为属于异常情况。在模型训练的过程当中，采用标注之后的历史异常数据和正常数据当作训练集，结合用户用电的类型进行分类训练，例如针对工业用户重点去优化功率波动异

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

常的识别，针对居民用户强化夜间用电异常的捕捉，以此来提升模型的适配性。同时，引入动态阈值调整的机制，基于季节的变化、节假日的因素去修正基线，避免因为用电习惯出现季节性的波动而导致的误判。

（四）结果验证与运维落地

首先针对模型所输出的异常结果开展分级操作，按照严重程度划分成紧急异常、一般异常、疑似异常。紧急异常涵盖了短路、过载、大规模窃电等有可能引发安全事故的状况，需要马上派出工单到现场去进行核查；一般异常包含电表时钟偏差、轻微电量波动等情况，按照优先级来安排运维工作；疑似异常属于数据特征不明确的情形，先通过远程的方式对数据进行复核，然后再决定是否到现场去排查。远程复核是通过调取异常时段的多维度数据、设备事件日志、同区域用户用电数据来进行对比，以此验证异常的真实性。例如针对疑似窃电的开盖记录，对开盖时段前后的功率、电流变化进行复核，结合是否有运维工单来支撑，把误报排除掉；针对数据传输异常，远程测试通信模块的状态，排查网络链路方面的问题，不需要到现场核查就能够处理。到现场核查需要携带专用的检测设备，针对不同的异常类型制定核查的流程。比如接线异常需要检测线路连接的状态，电表故障需要校验计量的精度，窃电行为需要固定证据并且依法进行处理。同时，建立起闭环反馈的机制，把核查结果反馈到检测模型那里，对模型参数以及规则阈值进行修正，让模型性能得到优化，形成“检测、核查、优化”的良性循环[9]。

三、实际应用中的优化策略

（一）优化数据处理机制

引入边缘计算的技术，在智能电表本地完成部分数据的处理以及初步的检测工作，仅仅把异常结果和关键数据上报给主站，而不是传输全部的原始数据，降低网络传输的负载以及主站存储的压力，提高实时响应的速度。本地处理主要聚焦在简单显性的异常，像阈值超标、事件触发等，将复杂异常的数据上传到主站进行深度分析，实现“本地快速筛选＋主站精准识别”的协同模式[10]。同时，建立起数据质量评估的体系，定期对电表采集的精度进行校验，对于采集误差比较大的电表及时进行运维更换，从源头保障数据的可靠性。

（二）分用户类型适配检测规则

不同类型用户的用电特征存在显著差异，统一的检测规则容易造成误报，需要按照用户类型定制化调整规则和模型参数。居民用户用电波动大、峰谷特征明显，重点对时序异常识别进行优化，放宽短期功率波动的阈值，加强对长期异常趋势的捕捉；工业用户用电负荷大、稳定性强，重点监测功率因数、谐波含量、三相电流平衡度，严格设定波动的阈值；商业用户用电时段集中、负荷变化有规律，重点识别非营业时间的用电异常以及电量的突变。

（三）建立多源数据融合补充机制

只是单一地去依赖智能电表所产出的数据，则很容易出现错误判断的情况，需要开展融合气象产生的数据、用户实际档案当中的数据、区域实际负荷数值等辅助性的信息实时，进而完善异常察觉维度。就像夏季高温的时间段居民用电的数量普遍出现增长，可开展结合气温方面的数据来修正用电基本线，防止把正常的负荷增长判定成异常状况；针对新增加的用户，开展结合同区域同类型用户用电的具体数据来构建临时基本线之事，解决因为历史数据不够充足而导致的模型失去效用的问题；通过用户档案里面的数据来确认用电设备的具体类型，区分设备新增加与非法用电所导致的负荷改变情况。

四、结论

智能电表数据起到驱动作用的用户用电异常检测办法，通过开展整合多方面维度的用电数据以及设备实际状态信息之事，构建“规则引擎＋机器学习”这样的混合模型，并且结合分级运维相关机制，有效地解决了传统检测手段盲目性强烈、响应比较滞后、花费成本非常高昂的问题，实现了异常行为的精准识别、快速做出响应以及高效处理，既为电力企业挽回经济方面的损失、避免安全方面的隐患，又提升了电网精细化运维的实际水平以及用户用电的公平性质。在实际进行应用的时候，需要注重数据质量的管控、分场景进行适配优化以及运维闭环反馈，不断提升检测办法的实用性以及适配性。

参考文献

[1]蔡秧秧，何雪梅，袁遵航，吴滨，汪漪云．云边智能协同和随机森林的用电异常识别策略研究[J].自动化仪表，2025,46(12):73-77.

[2]吴玉洁．基于知识图谱和用户画像的电力用户用电信息异常识别[J].电气技术与经济，2025,(11):259-261.

[3]刘晶．负荷预测技术下的电网用电检查管理系统设计研究[J].电气技术与经济，2025,(11):277-279.

[4]谢耀霆，周文晴，苏盛，李彬，项胜．基于因果推断双特征融合的非高损线路窃电识别[J].电工技术学报，1-16.

[5]于力，盖玉庆，梁宏杰，扬爽，邢凯．基于密度聚类和Hausdorff距离判别分析的高价低接用户识别[J].沈阳工程学院学报(自然科学版)，2025,21(04):61-67+74.

[6]潘慧，杨婵，韦曦，陈冬良，梁翠玲，姚明芳．基于DTW算法的用户用电行为异常检测研究[J].电器工业，2025,(10):116-120.

[7]樊霄翔．基于自适应差分进化算法的电力营销用电异常检测[J].信息记录材料，2025,26(10):199-201.

[8]魏倩，王晨星，李珂明．基于大数据分析的用电异常检测与防范机制[J].家电维修，2025,(09):137-139.

[9]吕伟嘉，李晓辉，滕永兴，陈娟，门英君，杜天硕．知识引导和无监督学习混合驱动的电力用户用电异常辨析方法[J].湖南电力，2025,45(04):74-82.

[10]伍慧君，鲁云鹏，匡佩，蓝金凤．用电量大数据挖掘的用户用电行为异常监测方法[J].国外电子测量技术，2025,44(08):259-265.

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

ZPW-2000A无绝缘轨道电路维护与故障处理策略研究

张赞赞
中国铁路青藏集团有限公司，青海 西宁 810007
DOI:10.61369/EPTSM.2026020032

摘　　要： ZPW-2000A无绝缘轨道电路作为我国铁路信号系统的核心基础设备，其性能的稳定性直接关系到列车运行安全和运输效率。本文深入剖析了ZPW-2000A轨道电路的工作原理、系统构成及其关键技术特性。结合现场维护实践，系统性地总结了其常见故障类型，并创新性地提出了以“监测数据为导向、系统分析为核心、分层排查为方法”的故障处理体系。论文重点阐述了基于全程电压、电流等电气参数的故障诊断流程与定位方法，并结合典型故障案例进行了实证分析。最后，对智能化、数字化维护技术的发展趋势进行了展望，旨在为现场维护人员提供一套科学、高效的维护与故障处理指导方案，提升设备整体运用质量。

关 键 词： ZPW-2000A；无绝缘轨道电路；故障诊断；参数分析；预防性维护；铁路信号

Research on Maintenance and Fault Handling Strategies for ZPW-2000A Non-insulated Track Circuit

Zhang Zanzan
China Railway Qinghai-Tibet Group Co., Ltd.,Xining, Qinghai 810007

Abstract: The ZPW-2000A insulated-free track circuit, as the core infrastructure equipment of China's railway signaling system, the stability of its performance directly affects the safety of train operation and transportation efficiency. This paper deeply analyzes the working principle, system composition, and key technical characteristics of the ZPW-2000A track circuit. Based on on-site maintenance practice, it systematically summarizes the common fault types and innovatively proposes a fault handling system based on "monitoring data as the orientation, system analysis as the core, and hierarchical troubleshooting as the method". The paper focuses on the fault diagnosis process and location method based on the entire voltage and current electrical parameters, and conducts empirical analysis based on typical fault cases. Finally, it looks forward to the development trend of intelligent and digital maintenance technologies, aiming to provide a scientific and efficient maintenance and fault handling guidance plan for on-site maintenance personnel, and improve the overall application quality of the equipment.

Keywords: ZPW-2000A; insulated-free track circuit; fault diagnosis; parameter analysis; preventive maintenance; railway signal

一、绪论

（一）研究背景与意义

随着中国铁路向着高速、重载、高密度的方向持续发展，对信号系统的可靠性、安全性和实时性提出了前所未有的要求。轨道电路作为实现列车占用检测、传输行车控制信息的关键地面设备，其技术性能至关重要。ZPW-2000A型无绝缘移频轨道电路，是在借鉴国外先进技术基础上，结合我国国情自主研发的具有完全自主知识产权的重要成果。它以其优良的传输特性、可靠的分路性能和完善的故障-安全设计，已全面替代传统有绝缘轨道电路，成为我国普速铁路、高速铁路及城市轨道交通的绝对主流制式。

然而，ZPW-2000A系统设备构成复杂，涉及发送、接收、电缆、调谐匹配、补偿电容等多个环节，且长期暴露于室外恶劣环境，导致其故障类型多样、原因复杂。一旦发生故障，若不能快速定位与处置，将直接影响行车安全和运输秩序。因此，深入研究其故障机理，建立一套科学、系统、高效的维护与故障处理方法，对于降低设备故障率、压缩故障延时、保障铁路运输安全畅通具有重大的理论与现实意义。

（二）系统概述与工作原理

ZPW-2000A轨道电路采用电气隔离方式构成无绝缘轨道电路区段。其核心工作原理是利用钢轨作为传输信道，发送端产生特定中心频率（1700Hz、2000Hz、2300Hz、2600Hz）的低频调制（Fc）移频信号，经钢轨传输至接收端。接收端对信号进行解

作者简介：张赞赞（1988.10-），男，汉族，甘肃静宁人，本科，工程师，工程师，研究方向：铁道信号。

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

码、鉴别，以此来控制轨道继电器的状态，从而判断轨道区段的空闲与占用。系统主要由室内设备和室外设备两大部分构成（见图1）：

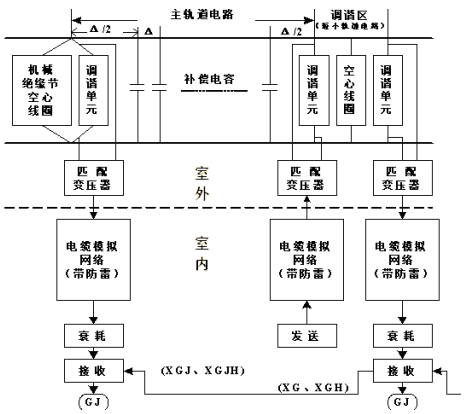


图1：ZPW-2000A轨道电路系统结构示意图

室内设备：包括发送器、接收器、衰耗冗余控制器、电缆模拟网络等，完成信号的生成、发送、接收和初步处理。

室外设备：包括调谐匹配单元（BA）、空芯线圈（SVA）、补偿电容（C）、传输电缆及钢轨引接线等，负责实现电气隔离、阻抗匹配和信号能量的有效传输。

二、常见故障类型与原因分析

根据故障现象及影响范围，ZPW-2000A轨道电路的故障可分为以下几大类：

（一）“红光带”故障（轨道继电器失磁）

这是最常见的故障现象，表明系统判断该区段为“占用”状态。其根源在于接收器接收到的有效信号电平低于其可靠工作门限。具体原因可细分为：

发送通道故障：发送器无输出、发送通道电缆断线或混线、模拟网络故障、发送端调谐匹配单元（BA）损坏等，导致信号源中断。

接收通道故障：接收器故障、接收通道电缆及配线问题、接收端BA损坏、衰耗器故障等，导致信号无法有效送达接收器。

传输通道故障：这是室外部分的常见故障源。

钢轨参数异常：道床电阻（Rd）严重下降（如雨季渗水、污染），导致信号过度衰耗。

补偿电容（C）失效：电容断线、失效或塞钉接触不良，破坏了信号的连续性传输，导致“电压波动”或“电压衰耗”。

调谐区元件故障：调谐单元（BA）或空芯线圈（SVA）损坏、引接线断股或接触电阻过大。

外界干扰：大电流冲击、不平衡牵引电流干扰、金属线搭接等。

（二）轨道电路电压波动或异常

区段未出现稳定“红光带”，但接收电压在工作值与报警值之间波动，或明显偏离正常范围。此类故障通常是隐性故障的先兆。

主要原因：补偿电容性能渐变劣化、塞钉松动、道床电阻季节性变化或轻微不良、各种连接端子接触电阻不稳定等。

（三）接收器“N+1”冗余系统倒换故障

冗余系统未能按设计在主机故障时自动无感切换至备机，或频繁发生非必要切换。

主要原因：主机与备机输出参数差异过大、倒换继电器或切换电路故障、两系电源不一致等。

三、系统性维护策略

为确保ZPW-2000A轨道电路长期稳定运行，必须坚持“预防为主，防治结合”的方针，建立多层次的立体化维护体系。

（一）日常巡视与实时监测

微机监测系统调阅：这是现代维护的核心手段。每日必须调阅分析各轨道区段的主轨接收电压、小轨接收电压、发送功出电压/电流、电缆模拟网络侧电压等关键参数的日曲线、月曲线。（见图2）。

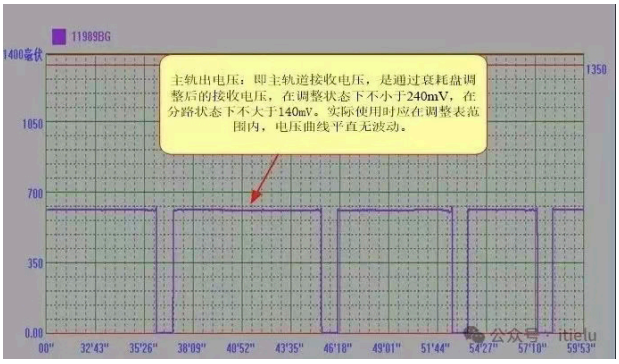


图2：主轨出电压正常监测曲线

室外设备外观检查：定期巡视补偿电容、调谐匹配单元、引接线等是否完好，有无被盗、破损，塞钉是否紧固，防护设施是否有效。

（二）定期检修与测试

严格按照检修规程执行月、季、年检。

电气特性测试：使用标准仪表（如CD96-3Z移频测试表）全面测试并记录每一区段的发送功出电压/电流、轨入电压、主轨出电压、小轨出电压等，与历史数据和标准范围比对。

补偿电容专项检查：利用电容测试仪或在线测试方法，定期检测补偿电容的容值及连接状态。

连接部件紧固与防腐：对所有的电缆接头、塞钉、端子进行紧固和防锈处理。

（三）数据分析与预防性维护

建立设备健康档案：为每个区段建立包含历史测试数据、故障记录、环境因素的电子档案。

趋势预警：利用监测数据，对电压缓慢下降、电容容值渐变等趋势进行分析，在设备性能劣化至故障前提前预警并干预。

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

四、故障诊断与处理流程

当发生故障时，应遵循“先室内后室外、先电源后设备、先分析后动手”的原则，采用分层、分段的方法进行快速定位。

（一）信息收集与初步判断

确认故障现象：是稳定红光带还是闪动？是整个区段还是部分？是否伴随其他区段异常？

调阅监测数据：立即查看故障时及故障前的各项电压、电流数据，这是判断故障方向最直接的依据。

询问与环境判断：了解故障发生时段是否有施工、暴雨、大风等特殊情况。

（二）室内设备排查

检查冗余状态：确认发送器、接收器的主备机工作状态，尝试手动切换，判断是否单机故障。

测试关键点电压：

在衰耗冗余控制器面板测试“发送电源”、“接收电源”、“发送功出”“轨入”“轨出”等电压。

若“发送功出”电压正常而“轨入”电压为零或极低，则故障点可能在发送通道电缆或模拟网络。可通过在分线盘测量电缆侧电压进一步判断。

若“轨入”电压正常而“轨出”电压低，则故障可能在衰耗器或接收器本身。

（三）室外设备故障定位（以发送端至接收端路径为线索）

若判断故障在室外，是处理难点。推荐采用“电压比较法”和“分段测试法”。

第一步：分线盘测试。区分是室内发送 / 接收通道故障，还是室外电缆及后续设备故障。

第二步：箱盒测试。在室外电缆盒或调谐匹配单元箱测试，比较电缆侧电压与钢轨侧电压。

若电缆侧电压正常，钢轨侧电压异常，则故障在调谐匹配单元（BA）或引接线。

若钢轨侧电压也正常，则故障在钢轨传输通道。

第三步：钢轨传输通道排查。这是最复杂的环节。

电压逐点测量法：从发送端开始，沿钢轨走向，使用选频电压表测量轨面电压，电压发生陡降的点即为故障点附近。常见于补偿电容连接线断线或电容失效处（见图3）。

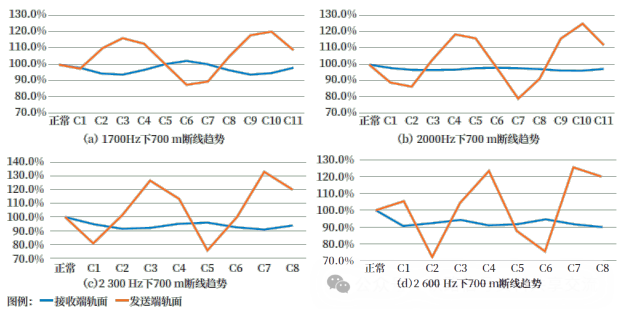


图3：补偿电容失效导致的轨面电压变化示意图

阻抗测量法：使用轨道电路故障诊断仪测量特定频率下的钢轨输入阻抗，与正常值比对，可辅助判断调谐区故障或道床电阻严重恶化。

五、典型故障案例与处理

案例一：主轨接收电压周期性缓慢下降至红光带

现象：某区段在雨季，微机监测显示主轨电压每日呈“勺”型波动（夜间回升，白天下降），最终在某日下午降至红光带。

分析与处理：此现象高度指向道床电阻（Rd）下降。白天升温，地表水分蒸发，道床表层电阻率下降。处理重点不在轨道电路设备本身，而是工务部门整治道床排水。电务部门可临时采取适当提高发送电平（在规程允许范围内）作为应急措施，但根本在于工电结合部整治。

案例二：区段电压无规律波动，偶发闪红光带

现象：调阅曲线发现轨出电压存在无规律的毛刺状波动。

分析与处理：此多为接触不良所致。重点排查：

补偿电容塞钉是否松动氧化。

各种引接线（钢轨引接线、箱盒引接线）的塞钉或螺栓连接处是否接触不良。

室内外接线端子是否松动。通过紧固、打磨接触面、更换不良部件处理。

案例三：主轨出电压为零，小轨出电压正常

现象：衰耗器面板“主轨出”电压为零，“小轨出”电压正常，“轨入”电压正常。

分析与处理：“轨入”正常说明室外发送通道及钢轨传输基本正常，信号已到达接收端。“小轨出”正常说明接收器对小轨信号的处理通道正常。故障高度集中在接收器的主轨信号处理通道或衰耗器的主轨输出部分。更换接收器或检查衰耗器内部相关电路即可解决。

六、维护技术发展与展望

未来，ZPW-2000A 轨道电路的维护将向着 “智能化、数字化、可视化” 方向深度发展：

智能诊断专家系统：基于大数据和人工智能算法，融合监测数据、环境数据、历史维护数据，构建故障诊断模型，实现故障的自动预警、智能分析和定位建议。

在线测试与状态感知：开发集成化传感器，实现对补偿电容容值、引接线电阻、道床电阻等关键参数的在线实时监测。

数字孪生与仿真演练：构建轨道电路系统的数字孪生模型，用于模拟故障、培训人员、优化维护方案。

移动互联维护终端：通过专用 APP，实现监测数据移动查看、检修作业电子化流程、故障处理远程指导。

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

七、 结论

ZPW-2000A无绝缘轨道电路的维护与故障处理是一项系统工程，要求维护人员不仅熟悉设备原理和电路，更要善于运用微机监测数据进行分析，掌握科学的故障排查逻辑。本文提出的以数据驱动为核心的分层维护与诊断策略，强调了从“故障修”向“预防修”、“状态修”的转变。通过严格执行日常监测、定期检修，并熟练运用分段电压测试等方法，能够有效提升故障处理效率，保障轨道电路的稳定可靠运行。面对未来挑战，积极拥抱智能化维护技术，将是提升电务维护现代化水平的必由之路。

参考文献

[1] 中国铁路总公司 . Q/CR 483-2016 ZPW-2000A无绝缘轨道电路设备 [S]. 北京：中国铁道出版社，2016.

[2] 林瑜筠， 刘湘国 . 铁路信号基础 [M]. 北京：中国铁道出版社， 2020.

[3] 张铁增 . ZPW-2000A轨道电路原理、维护与故障处理 [M]. 北京：中国铁道出版社， 2015.

[4] 王瑞峰， 蒋大明 . 基于大数据分析的轨道电路故障预测方法研究 [J]. 铁道学报， 2019, 41(8): 70-76.

[5] 李国宁 . ZPW-2000A轨道电路典型故障案例分析与处理 [J]. 铁路通信信号工程技术， 2021, 18(3): 45-49.

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