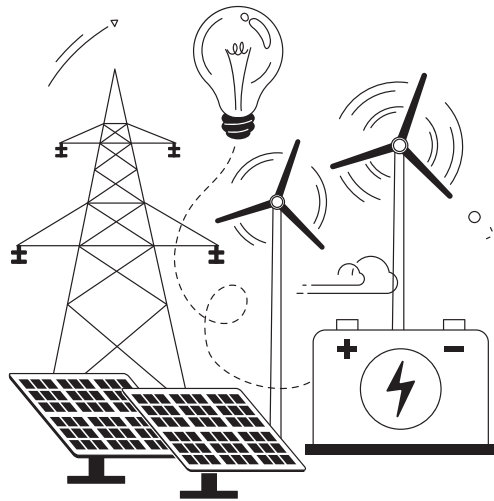


电力技术 与安全管理

Electric Power Technology and Safety Management



ART AND DESIGN PRESS INC.

(626 810 4480)

119 S Atlantic Blvd, Suite 300D

Monterey Park, CA 91754

Copyright © 2025 by ART AND DESIGN PRESS INC.

Complimentary Copy



Editorial Board Member

Bateer Hexi

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

Gaowa Morigeng

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

Juan Wang

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

Chaoshan Xie

Beijing BKC Technology Co., Ltd.

电力技术与安全管理

Electric Power Technology and Safety Management

第2卷 第6期 2025年6月刊

主管 ART AND DESIGN PRESS INC.

主办 ART AND DESIGN PRESS INC.

编辑 《电力技术与安全管理》编辑部

ISSN(O): 2997-3503

ISSN(P): 2997-3473

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

网址: <https://www.artdesignp.com>

本刊说明:

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

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



电力系统 | POWER SYSTEM

- | | | |
|-----|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| 001 | 海上采油平台消防安全控制系统完善设计
Perfect Design of Fire Safety Control System for Offshore Oil
Production Platform | 刘志昌
Liu Zhichang |
| 004 | 电力工程技术在微电网中的储能系统设计与优化
Energy Storage System Design and Optimization of Power Engineering
Technology in Microgrid | 李翔宇
Li Xiangyu |
| 007 | 储能预制舱喷淋系统温控匹配研究
Study on Temperature Control Matching of Spray System in Energy Storage
Prefabricated Cabin | 王誉霖
Wang Yulin |
| 010 | 火电厂汽轮机润滑油系统常见故障及油质提升改造措施
Common Faults of Steam Turbine Lubrication System in Thermal Power Plant and
Improvement Measures of Oil Quality | 安海阳, 阳欧, 李昶亮
An Haiyang, Yang Ou, Li Changliang |
| 014 | 光伏直流入电解铝供电系统的优化与节能策略
Optimization and Energy-Saving Strategies for Photovoltaic DC Connection to
Electrolytic Aluminum Power Supply Systems | 路晓宁
Lu Xiaoning |
| 017 | 数字孪生驱动的智能变电站自动化系统设计
Design of Intelligent Substation Automation System Driven by
Digital Twin Technology | 王伟庆, 娄云, 李军
Wang Weiqing, Lou Yun, Li Jun |
| 020 | 论如何提升风电场35kV系统运行可靠性
On How to Improve the Operational Reliability of 35kV
Systems in Wind Farms | 胡文超, 薛青园
Hu Wenchao, Xue Qingyuan |
| 024 | 电力市场化交易电费风险防控体系建设与应用
Construction and Application of Electricity Fee Risk Prevention and Control
System in Market-Oriented Electricity Trading | 罗东江, 罗粤辉, 李锋
Luo Dongjiang, Luo Yuehui, Li Feng |
| 027 | 电厂电力系统自动化可靠性提升路径
Reliability Improvement Path of Power Plant Power System Automation | 于正
Yu Zheng |

技术研究 | TECHNICAL RESEARCH

- | | | |
|-----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|
| 030 | 基于增材制造的 $\pm 800\text{kV}$ 直流换流站金具拓扑优化
设计与力学性能研究
Research on Topology Optimization Design and Mechanical Performance of $\pm 800\text{kV}$ DC
Converter Station Hardware Based on Additive Manufacturing | 陈勇
Chen Yong |
| 033 | 核电站反应堆厂房构件池应急救援方法
Emergency Rescue Method for Nuclear Power Plant Reactor Building
Component Pool | 许乐
Xu Le |
| 036 | 大数据驱动下的电力工程故障诊断研究
Research on Power Engineering Fault Diagnosis Driven by Big Data | 李京雷
Li Jinglei |
| 039 | 基于有限元分析的高功率电子模块热管理与机械强度协同设计
Collaborative Design of Thermal Management and Mechanical Strength for High-Power
Electronic Modules Based on Finite Element Analysis | 丁晓阳
Ding Xiaoyang |

043	火力发电厂低碳电力生产高效率的自动控制方法研讨 Discussion on High-Efficiency Automatic Control Methods for Low-Carbon Electricity Production in Thermal Power Plants	万奎 Wan Kui
046	超临界对冲燃烧锅炉金属壁温超限分析与治理 Analysis and Treatment of Metal Wall Temperature Overrun of 660Mw Supercritical Opposed Firing Boiler	梁云旺 Liang Yunwang
050	火电厂安全生产双重预防机制的数字化构建与实践 Digital Construction and Practice of Dual Prevention Mechanism for Safety in Thermal Power Plant	黎潇云 Li Xiaoyun
053	智能配电网中自适应继电保护算法的设计与实现 Design and Implementation of Adaptive Relay Protection Algorithm in Smart Distribution Network	李福祥 Li Fuxiang
056	基于用户用电行为聚类与经济指标关联的工业 sector 中长期电力需求预测方法 A Medium-to-long-term Electricity Demand Forecasting Method for the Industrial Sector Based on the Correlation between User Electricity Consumption Behavior Clustering and Economic Indicators	冯胜涛, 马宏图, 杨娜, 董宇, 王少敏 Feng Shengtao, Ma Hongtu, Yang Na, Dong Yu, Wang Shaomin
059	关于新能源风力发电设备的预防性维护策略探析 Analysis of Preventive Maintenance Strategies for New Energy Wind Power Generation Equipment	温钊, 王彬 Wen Chai, Wang Bin

海上采油平台消防安全控制系统完善设计

刘志昌

华润守正招标有限公司，广东 深圳 518000

DOI:10.61369/EPTSM.2025060003

摘 要： 海上采油平台因其特殊作业环境与复杂工艺流程，火灾风险居高不下。本论文深入剖析海上采油平台消防安全现状与问题，如消防设施老化、系统欠完善、人员意识薄弱等。针对这些问题，从消防系统自动化优化、智能报警与控制系统升级、人员培训与管理强化等层面提出完善设计方案，旨在提升海上采油平台消防安全控制系统的可靠性与有效性，降低火灾事故发生率，保障平台安全运营及人员生命财产安全。

关 键 词： 海上采油平台；消防安全；控制系统；完善设计；自动化控制

Perfect Design of Fire Safety Control System for Offshore Oil Production Platform

Liu Zhichang

Huarun Shouzheng Bidding Co., LTD. Shenzhen, Guangdong 518000

Abstract： Offshore oil platforms face persistent fire risks due to their unique operational environments and complex processes. This study provides an in-depth analysis of current fire safety challenges, including aging firefighting equipment, inadequate system configurations, and insufficient staff awareness. To address these issues, the paper proposes comprehensive solutions encompassing automated optimization of fire protection systems, intelligent alarm and control system upgrades, and enhanced personnel training and management protocols. These measures aim to improve the reliability and effectiveness of fire safety control systems, reduce fire accident rates, and ensure safe platform operations while protecting both personnel and property.

Keywords： offshore oil production platform; fire safety; control system; perfect design; automatic control

引言

全球能源需求的持续攀升，使得海上石油开采在能源格局中的地位愈发关键。海上采油平台作为海上石油开采核心设施，生产作业涉及大量原油、天然气等易燃易爆物质，且平台空间局促、设备高度密集。一旦发生火灾，火势蔓延迅猛，扑救极为困难，极易造成严重的人员伤亡、巨额财产损失，甚至对海洋生态环境带来毁灭性影响。故而，完善海上采油平台消防安全控制系统，对保障平台安全生产、维护人员生命安全以及守护海洋生态环境意义重大。随着中国海上油气装备智能化程度的不断提升，消防安全控制系统的自动化、智能化升级已成为必然趋势^[1]。近年来，国际海事组织（IMO）发布的《海上平台消防安全国际标准》对消防系统的可靠性和响应速度提出了更高要求，为我国海上采油平台消防安全控制系统的升级提供了重要参考^[2]。

一、海上采油平台消防安全现状分析

（一）消防设施现状

当下，多数海上采油平台配备了灭火器、消防栓、水喷淋系统、泡沫灭火系统等基础消防设施。然而，部分平台的消防设施老化、损坏问题突出，设备性能难以契合实际消防需求。诸如灭火器压力不足、水喷淋系统喷头堵塞、泡沫灭火系统泡沫液过期等情况屡见不鲜。同时，消防设施布局亦存在不合理之处，部分

区域消防设施覆盖不足，致使火灾发生时无法及时、高效开展灭火作业。根据《石油天然气工程设计防火规范》要求，消防设施的配置应满足火灾初期控制和扑救的需要，但实际执行中仍存在较大差距^[3]。

（二）火灾报警与控制系统现状

海上采油平台普遍安装有感烟探测器、感温探测器、火焰探测器等火灾报警系统。但实际运行中，部分报警系统误报率高、响应迟缓。由于长期处于恶劣海洋环境，探测器受腐蚀、灰尘等

因素干扰，灵敏度下降，难以精准、及时捕捉火灾信号。此外，火灾报警系统与消防控制系统联动不畅，报警后消防控制系统无法迅速启动灭火设备，延误灭火最佳时机。中国船级社《海上移动平台入级规范》(2020)对火灾报警与控制系统的性能提出了明确要求，但部分平台的系统配置和运行状态未能达标^[4]。相关研究表明，采用智能算法优化的报警系统可使火灾响应时间缩短40%以上^[5]。

(三) 人员消防安全意识与管理现状

平台工作人员消防安全意识良莠不齐，部分人员消防安全知识匮乏，火灾预防与应急处理能力欠缺。日常工作中，易燃易爆区域吸烟、违规动火作业等违规操作时有发生，增大了火灾风险。再者，平台消防安全管理存在漏洞，制度与应急预案不完善，消防设施维护保养及人员培训演练工作落实不力。《海洋石油安全管理细则》中明确规定了平台消防安全管理的责任和要求，但在实际执行中存在打折扣的现象^[6]。

二、海上采油平台消防安全控制系统完善设计方案

(一) 消防系统自动化优化设计

1. 灭火系统自动化升级

在自动化优化方面，通过构建全流程智能控制体系实现灭火效能跃升。

水消防系统：搭建以 PLC 为核心的闭环控制网络，将压力传感器（精度 $\pm 0.5\%$ FS）、电磁流量计（测量误差 $\leq 1\%$ ）采集的管网数据实时传输至控制模块，形成“监测—分析—调节”的自动化链路。当管网压力低于 0.8MPa 时，系统自动启动备用泵组并调节变频电机输出频率（调节响应时间 < 2 秒）；当检测到流量异常波动（超过设定值 15%）时，立即触发分区阀门自动关闭并报警。针对寒冷区域，采用温度传感器（ $-40^{\circ}\text{C} \sim 125^{\circ}\text{C}$ 量程）与电伴热装置的联动控制，当环境温度低于 5°C 时自动启动伴热，高于 10°C 时关停，节能效率提升 30% 以上。

泡沫灭火系统：引入在线泡沫液浓度监测仪（测量范围 0.1%~10%），通过密度法实时检测混合液质量，当浓度偏离设定值 $\pm 0.5\%$ 时，自动调节比例混合器开度。利用液位变送器（精度 $\pm 0.2\%$ FS）实现储罐液位的连续监测，设置三级预警阈值（80%/50%/20%），低至 20% 时自动开启备用罐切换阀门（切换时间 < 5 秒）。借助 CFD 模拟数据优化管网阻力平衡，通过电动调节阀组实现各支管流量的动态分配，保证泡沫覆盖均匀性（偏差 $\leq 5\%$ ）。

气体灭火系统：采用双波段红外火焰探测器与气体浓度传感器的双重验证逻辑，当两者同时满足火灾判据时，延迟 30 秒后自动启动灭火装置（可手动干预）。系统内置压力传感器实时监测气瓶压力，低于设计值 90% 时发出维护预警，通过电磁阀组实现多保护区的精准喷射控制，药剂用量误差 $\leq 3\%$ 。

2. 消防设施自动化布局优化

基于 BIM 模型构建消防设施数字化布局平台，集成火灾风险评估算法实现动态优化。

探测设备：运用机器学习算法分析历史火灾数据，在高风险区域（如泵舱、分离器区）自动加密探测器布置，确保探测覆盖半径 ≤ 3 米，响应时间 ≤ 10 秒。通过 RFID 定位技术实现探测器安装位置的数字化校验，偏差超过 50mm 时自动报警。

灭火装置：根据设备热负荷计算结果，在加热炉等高温设备周围自动布置水喷雾喷头，确保冷却强度 $\geq 0.2\text{L}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$ 。利用液压计算软件优化消防栓布置，保证任意点到最近消防栓的行走距离 ≤ 30 米，水枪充实水柱 ≥ 10 米。

疏散设施：结合人员密度模拟数据，在通道转弯处、楼梯口等关键位置自动设置应急照明和疏散指示标志，照度 $\geq 5\text{lux}$ ，标志间距 ≤ 10 米。系统可根据实时人员定位数据（误差 ≤ 3 米）动态调整疏散引导方向。

(二) 火灾报警与自动化控制系统升级改造

1. 火灾探测器智能化选型与升级改造

针对现行探测器存在的误报率高、适应性差问题，实施以下升级措施：

硬件替换：将传统离子感烟探测器更换为激光散射式感烟探测器，灵敏度提升至 0.05~2.0dB/m 可调，抗灰尘干扰能力增强 50%。在潮湿区域（如甲板）采用隔爆型感温探测器（防护等级 IP66），温度响应阈值可通过软件设定（ $57^{\circ}\text{C}/68^{\circ}\text{C}/79^{\circ}\text{C}$ 三档）。

智能算法植入：为探测器加装边缘计算模块，运行自适应滤波算法剔除海浪振动、油气干扰等虚假信号，误报率降低至 < 1 次/年·台。通过神经网络模型识别火灾特征曲线，实现阴燃火与明火的精准区分，识别准确率 $\geq 98\%$ 。

通信升级：将原有 4~20mA 模拟信号传输改为 LoRa 无线通信（传输距离 $\geq 1\text{km}$ ），采用 Mesh 网络拓扑实现自组网功能，单点故障不影响整体通信，数据传输时延 $\leq 500\text{ms}$ 。

2. 报警系统智能化升级改造

对现行报警系统的架构和功能进行重构：

系统架构改造：将集中式报警主机升级为分布式控制系统，采用工业以太网（环网冗余）替代传统 RS485 总线，数据传输速率提升至 100Mbps，系统容量扩展至支持 5000 点报警信号接入。

报警处理优化：引入模糊逻辑推理机制，对多探测器信号进行融合判断，当同一区域 3 个及以上探测器在 60 秒内相继报警时，自动提升报警级别。开发移动端报警 APP，实现报警信息（含定位坐标）15 秒内推送至相关责任人，支持语音播报和电子签收功能。

维护功能强化：系统自动记录探测器的运行参数（如灵敏度漂移、响应时间），通过趋势分析预测故障风险，提前 30 天发出维护提醒。内置标准校验流程，支持通过手持终端对探测器进行远程标定，校验时间缩短至 5 分钟/台。

3. 消防自动化控制系统联动升级改造

针对现有系统联动滞后、协同性差的问题，进行以下改造：

联动逻辑重构：编制模块化联动控制程序，将火灾响应划分为探测确认（0~30 秒）、预警启动（30~60 秒）、全面处置（60 秒后）三个阶段。例如：探测确认阶段自动关闭通风机（响

应时间 < 5 秒)，预警启动阶段降下防火卷帘（关闭时间 < 15 秒），全面处置阶段启动主消防泵并打开分区阀门（动作时间 < 20 秒）。

跨系统集成：通过 OPC UA 协议实现消防系统与工艺控制系统（DCS）的实时数据交互，火灾时自动关闭相关区域的油气输送泵（停机时间 < 30 秒），开启应急切断阀（动作时间 < 5 秒）。与视频监控系统联动，报警时自动调取事发区域监控画面（切换时间 < 3 秒）。

冗余设计：采用 PLC 双机热备架构（切换时间 < 100ms），关键 IO 模块冗余配置，确保单点故障不影响系统运行。消防泵、风机等关键设备采用“一用一备”自动切换模式，切换时间 < 15 秒，保障灭火动力持续供应。

（三）人员培训与管理强化措施

1. 消防安全培训体系建设

建立分层分类的消防安全培训体系，针对操作人员、管理人员等不同岗位，聚焦火灾预防、自动化消防设施操作、应急处理等核心内容设计培训模块。采用 VR/AR 模拟、现场实操结合线上考核的方式，确保员工熟练掌握关键技能，考核结果与绩效直接挂钩，每年至少开展 2 次全覆盖培训。这一做法符合《海洋石油有人值守平台安全包保责任制办法（试行）》中关于人员培训的要求^[7]。

2. 消防安全管理制度完善

构建“智能监管 + 责任追溯”的管理制度体系：通过专用 APP 实现动火作业等高危操作的自动化审批，作业过程中实时监测环境参数并自动预警；利用智能巡检系统落实消防设施定期检

查，形成电子台账并自动推送整改提醒，违规行为直接关联责任人绩效。

3. 应急预案制定与演练

基于平台三维模型制定模块化应急预案，明确火灾报警、人员疏散、设备联动等关键环节的自动化操作流程。每季度组织 1 次实战演练，采用智能设备记录疏散时间、设备响应速度等数据，演练后通过系统自动生成评估报告，针对性优化预案流程。应急预案的制定和演练参考了船舶应急安全性分析及其应对技术的相关研究成果^[8]，同时结合了海洋平台典型火灾情况下烟气蔓延及控制措施有效性分析的结论^[9]。

三、结论

海上采油平台消防安全控制系统完善设计是一项复杂系统工程，涉及消防设施自动化升级改造、火灾报警与自动化控制系统优化以及人员培训与管理强化等多方面。通过深入分析海上采油平台消防安全现状，找出问题与不足，针对性提出完善设计方案，可有效提升平台消防安全控制系统可靠性与有效性，降低火灾事故风险。在方案实施过程中，需平台各方密切协作，严格遵循相关标准与规范进行施工、调试与验收，确保各项措施落地见效。同时，持续强化消防安全工作管理与监督，定期对消防设施进行自动化维护保养，对人员进行培训演练，不断提升平台消防安全水平，为海上石油开采作业安全稳定开展提供坚实保障。实现管理精细的绿色油田目标，消防安全是不可或缺的重要环节^[10]。

参考文献

- [1] 中国海上油气装备智能化程度再上新高——国家能源局 [EB/OL]. http://www.nea.gov.cn/2024-04/19/c_1212354281.htm, 2024-04-19.
- [2] International Maritime Organization. International Code for Fire Safety Systems on Offshore Platforms[S]. London: IMO Publishing, 2022.
- [3] 石油天然气工程设计防火规范 [EB/OL]. http://m.toutiao.com/group/3483701735/?upstream_biz=doubao, 2014-08-23.
- [4] 升级换代！中国船级社推出《海上移动平台入级规范》(2020)[EB/OL]. http://m.toutiao.com/group/6815176252631024141/?upstream_biz=doubao, 2020-04-13.
- [5] Zhang L, Wang H, Li J. Research on intelligent optimization algorithm for fire alarm system of offshore oil platform[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2023, 19(5): 89-96.
- [6] 国家安全生产监督管理总局令（第 25 号）《海洋石油安全管理细则》——中华人民共和国应急管理部 [EB/OL]. https://www.mem.gov.cn/gk/gwgg/agwzfl/zjl_01/201505/t20150526_233765.shtml, 2015-05-26.
- [7] 《海洋石油有人值守平台安全包保责任制办法（试行）》解读——中华人民共和国应急管理部 [EB/OL]. https://www.mem.gov.cn/gk/zcjd/202304/t20230428_449318.shtml, 2023-04-28.
- [8] 船舶应急安全性分析及其应对技术 [EB/OL]. <https://cczx.wuhu.gov.cn/jszy/kjcg/8376649.html>, 2022-09-21.
- [9] 海洋平台典型火灾情况下烟气蔓延及控措施有效性分析 [EB/OL]. <https://cczx.wuhu.gov.cn/jszy/kjcg/8379048.html>, 2022-10-10.
- [10] 管理精细的绿色油田（人民网山东）[EB/OL]. <http://sd.people.com.cn/n2/2024/1029/c386785-41023790.html>, 2024-10-29.

电力工程技术在微电网中的储能系统设计与优化

李翔宇

内蒙古电投新能源生态建设有限责任公司，内蒙古 通辽 028000

DOI:10.61369/EPTSM.2025060004

摘 要： 本文聚焦于电力工程技术在微电网储能系统的设计以及优化工作展开深入研究，全面细致地阐述了微电网储能系统的核心技术框架，对微电网的结构构成、储能技术的分类以及储能系统的关键作用进行概述，清晰地明确储能于功率调节、能源缓冲以及备用供电方面所有的核心价值。从架构搭建、设备选型以及容量配置这三个方面来解析设计要点，着重强调安全性、经济性以及技术适配性之间的平衡，重点深入探讨电力电子、智能控制以及通信技术的具体应用情况，详细分析变流器技术、能量管理算法以及数据传输网络所起到的支撑作用。最后提出多维度的优化策略，涉及目标设定、充放电策略优化以及多目标算法应用等内容，为提高微电网储能系统的稳定性、能效水平以及经济性提供技术方面的参考，帮助新能源消纳以及能源结构转型。

关 键 词： 电力工程技术；微电网；储能系统；设计优化

Energy Storage System Design and Optimization of Power Engineering Technology in Microgrid

Li Xiangyu

INNER MONGOLIA DIAN TOU NEW ENERGY ECOLOGICAL CONSTRUCTION CO, LTD.,
Tongliao, Inner Mongolia 028000

Abstract： This paper conducts an in-depth study on power engineering technology applied to the design and optimization of microgrid energy storage systems. It comprehensively elaborates on the core technical framework of microgrid energy storage systems, outlining their structural composition, classifications of energy storage technologies, and critical roles in power regulation, energy buffering, and backup power supply. The design considerations are analyzed from three aspects: architecture construction, equipment selection, and capacity configuration, with particular emphasis on balancing safety, cost-effectiveness, and technical compatibility. The paper delves into practical applications of power electronics, intelligent control, and communication technologies, while providing detailed analyses of converter technology, energy management algorithms, and data transmission networks. Finally, multi-dimensional optimization strategies are proposed, including objective setting, charge/discharge strategy optimization, and application of multi-objective algorithms. These insights offer technical references for enhancing the stability, energy efficiency, and cost-effectiveness of microgrid energy storage systems, thereby facilitating renewable energy integration and energy structure transformation.

Keywords： power engineering technology; microgrid; energy storage system; design optimization

引言

随着全球能源需求的不断增长和能源结构的转型，微电网作为现代电力系统的重要组成部分，其建设与发展受到广泛关注。电力工程技术作为智能电网建设的关键支撑，对于提升电网的智能化水平、实现能源的高效利用具有至关重要的作用。随着石油、煤、天然气等不可再生矿物燃料储量的不断减少，社会的发展和人们的生活受到了空前冲击。因此，如何高效开发和利用可再生能源及利用现有资源，已成为亟待解决的问题。智能微电网是应对能源紧张、推动可持续发展的重要途径，其应用价值与潜力正在逐步显现。

一、微电网储能系统概述

（一）微电网的定义与结构

微电网作为一种小型发电系统，主要由分布式电源、储能装置、能量转换装置、负荷以及监控和保护装置等共同构成（如图1所示）。它有两种运行模式，可与大电网联网运行，也可以在离网模式下实现独立供电。微电网的结构一般包含四个核心部分，分别是发电层、储能层、负荷层和控制层，发电层主要以光伏、风电等可再生能源作为电源，储能层承担着电能的存储以及释放工作，负荷层包含了工业、商业以及居民等各类用电设备，控制层借助智能管理系统实现功率平衡并进行优化调度，形成一个有灵活调节能力的局部能源网络^[1]。

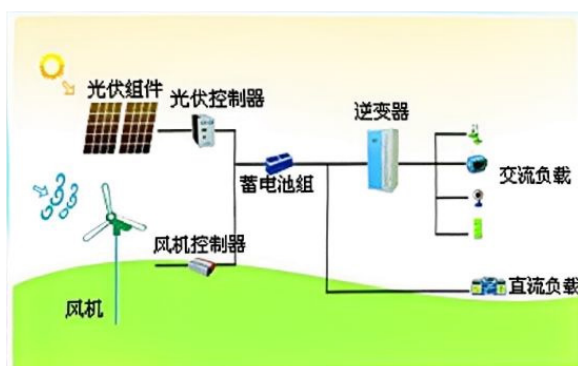


图1 微电网

（二）储能技术的分类与特点

智能微电网的出现，旨在缓解高渗透电力系统对传统电力系统的影响，提高电力系统的能效。它储能技术依据能量存储形式可被划分成电化学储能、机械储能、电磁储能以及热储能等多种类型。电化学储能以锂电池、铅酸电池为代表，具有响应速度较快、能量密度较高的特性，不过存在寿命周期方面的限制；机械储能覆盖抽水蓄能、飞轮储能等，其中抽水蓄能技术成熟并且容量较大，然而受到地理条件的约束，电磁储能像超级电容器，功率密度较高而且充放电速度较快，适宜进行短时高频调节；热储能借助储热材料实现能量保存，在区域供暖领域有着广泛应用，各类技术都有各自的优势以及适用场景。

（三）储能微电网中的作用与优势

储能微电网之中肩负着功率调节、能量缓冲以及备用电源等多重职责。就功率调节而言，它可对光伏、风电这类可再生能源的出力波动给予平抑，维持电网频率以及电压的稳定状态，能量缓冲功能可实现峰谷电价套利的目的，以此降低用电成本。作为备用电源，在大电网出现故障之际可保障关键负荷持续供电^[2]。其核心优势在于提高能源利用率、提高微电网运行稳定性、推动可再生能源消纳，减少对传统电网的依赖，为能源转型提供灵活且可靠的技术支持。

二、微电网储能系统设计要点

（一）储能系统架构搭建

微电网储能系统架构搭建要遵循安全性、灵活性以及经济性这三大核心原则，首先需要明确系统的拓扑结构，依据微电网与

大电网是否互联可分为并网型和离网型架构，并网型架构要设计双向变流器来实现与主网的功率交互，还要配置能量管理系统也就是EMS来协调分布式电源、负荷以及储能设备的运行，离网型架构则要强化储能系统的孤网支撑能力，增设黑启动装置以及冗余供电模块。架构设计时要重点考虑能量流路径优化，借助分层控制结构实现底层设备响应、中层协调控制以及上层调度决策的高效衔接，另外还得预留扩展接口，以契合后期储能容量增加或者新型设备接入的需求，保证架构有长期技术适应性。

（二）储能设备选型依据

储能设备选型要全面综合评估技术特性、应用场景以及全生命周期成本。在技术层面，要着重考察能量密度、功率密度、充放电效率以及循环寿命等核心参数，像锂电池虽然能量密度比较高，但需要温控措施，而铅酸电池成本相对较低，但其循环寿命较短，应用场景对设备类型起着决定作用，在调频辅助服务方面，优先选择超级电容器等功率型设备，削峰填谷则更侧重于锂电池等能量型设备^[3]。环境适应性也是非常关键的，在高温地区需要选择宽温域电池，在高湿度环境下则要强化设备密封性，经济性分析要考虑购置成本、运维费用以及残值回收，借助全生命周期成本也就是LCC计算来筛选出最优方案，同时还需要验证设备的安全性认证，比如过充保护、短路防护等性能，保证符合微电网运行规范。

（三）系统容量配置方法

系统容量配置要依据负荷特性以及电源波动性来展开科学计算，借助历史数据采集去分析微电网的负荷曲线，确定峰谷差、最大负荷持续时间等关键参数，将这些参数当作储能功率以及能量容量的基础依据，对于包含新能源的微电网而言，要结合光伏或者风电的出力预测数据，计算出平抑功率波动所需要的储能容量，一般运用均方根误差法或者滑动平均法来确定调节需求。容量配置还得考虑冗余设计，一般会预留10%至20%的容量来应对突发负荷或者设备衰减。最后凭借仿真验证不同工况下的容量匹配度，保证系统在极端天气、负荷突变等场景中依然可稳定运行。

三、电力工程技术在微电网储能系统中的应用

（一）电力电子技术的应用

电力电子技术在微电网储能系统里，是能量转换以及传输的关键支撑要素，它的核心应用主要体现在变流器技术的创新方面，借助双向DC/DC变换器实现储能电池与直流母线之间功率的双向流动，精确控制充放电电流和电压，以此保证电池可处于最佳效率区间进行工作。在并网型系统当中，并网逆变器运用PWM技术实现交流侧与电网的同步运行，拥有快速无功调节以及低电压穿越的能力，保障在电网出现扰动的时候可实现稳定过渡。电力电子器件的选型对系统性能有着直接的影响，比如选用SiC器件可降低开关损耗，把变流器效率提升到96%以上，电力电子技术还实现了储能系统的模块化设计，依靠多模块并联运行来提高系统冗余度，方便进行容量扩展以及故障隔离，为微电网的灵活运行奠定硬件基础。

（二）智能控制技术的应用

智能控制技术借助数字化方式实现储能系统的精确调度以及

优化运行，其关键之处在于能量管理系统中智能算法的运用，依据模型预测控制算法针对负荷需求和新能源出力展开短期预测，动态地制定储能充放电策略，实现平抑波动、削峰填谷等多个目标，分布式控制技术保障多储能单元可协同运行，借助对等通信实现功率的自主分配，防止单点故障对整体系统造成影响^[4]。智能控制在状态监测与健康管理方面也有所体现，结合机器学习算法对电池内阻、容量衰减等参数加以分析，提前对故障风险发出预警，优化充放电策略以此延长设备使用寿命，提高系统运行的经济性与可靠性。

（三）通信技术的应用

通信技术给微电网储能系统打造了高效的数据传输以及信息交互网络，借助工业以太网的有线通信方案，实现能量管理系统跟储能变流器、监控设备之间的实时数据交互，保证控制指令能精准下达，运行状态也能实时反馈，传输时延可控制在毫秒级。在分布式储能场景里，无线通信技术解决了设备分散部署时的通信难题，支持海量终端接入，并且能低功耗运行。通信技术还对微电网与上级调度系统的信息交互起到支撑作用，实现并网调度、需求响应等功能，凭借构建冗余通信网络以及数据加密传输机制，保证通信链路可靠，数据安全，为储能系统的稳定运行给予保障。^[5]

四、电力工程技术在微电网中的储能系统优化策略

（一）优化目标设定

微电网储能系统优化目标要构建多维度指标体系，以此实现技术性能和经济性的共同提升，其核心目标有运行稳定性、能效水平以及成本控制这三大维度。在运行稳定性方面，要保证储能系统在新能源出力出现波动、负荷发生突变等工况时，电压与频率可保持稳定，把电压偏差控制在正负 5% 以内，将频率波动限制在正负 0.2Hz 的范围。能效优化目标着重于提升能量转换效率，借助减少充放电循环损耗，让系统综合能效达到 85% 以上，同时降低储能设备的闲置率，经济性目标要包含全生命周期成本，有初始投资回收周期、运维费用控制以及峰谷套利收益最大化，一般要求投资回收期不超过 8 年。^[6]此外，要兼顾环境效益目标，依靠优化调度减少弃风弃光现象，把清洁能源消纳率提升至 95% 以上。目标设定需要依据微电网类型进行动态调整，离网型系统注重供电可靠性，并网型系统则要强化与主网的协同经济性。^[7]

（二）充放电策略优化

优化充放电策略是提高储能系统运行效益的关键举措，需要

依据负荷特性以及能源供给的情况进行动态调整，基础策略运用预测—反馈闭环控制模式，依据短期负荷预测数据以及新能源出力预测数据来制定日前充放电计划，明确各个时段的充放电功率阈值，日内实时优化借助滚动修正机制，每隔 15 至 30 分钟更新一次策略，以此应对预测偏差所带来的波动^[8]。针对不同的场景要设计差异化策略：在平抑新能源波动时运用滤波算法，可快速响应功率偏差，在削峰填谷时遵循“低谷充电、高峰放电”的原则，可精准捕捉电价峰谷差窗口，电池健康保护策略要限制充放电深度，一般保持在 20% – 80% SOC 区间，并且控制充放电倍率在 0.5C – 1C 范围内，防止过充过放造成的寿命衰减。借助自适应学习算法，策略可随着电池老化程度进行动态调整，实现效能与寿命的平衡。^[9]

（三）多目标优化算法应用

多目标优化算法能为储能系统复杂决策给出量化解决办法，借由数学建模来平衡存在冲突的目标，常见算法有改进遗传算法、粒子群优化算法以及多目标灰狼优化算法等，算法应用的时候要构建含有目标函数、约束条件以及决策变量的数学模型，目标函数包含经济性指标、技术指标以及可靠性指标，约束条件有储能容量限制、功率输出约束以及充放电效率约束。^[10]在分布式储能场景里，多目标算法可实现各储能单元的功率最优分配，借助协同控制降低系统网损，算法运行运用分层优化架构，上层开展全局优化决策，下层执行设备级控制指令，实际应用中要凭借仿真平台验证算法有效性，保证在极端工况下依旧可输出最优解，提高储能系统的综合运行效益。^[10]

五、结语

微电网储能系统的科学设计以及优化是推动能源转型的关键支撑，其重点在于借助多技术融合达成效能的最大化。本文梳理架构设计要点，明确了安全性、灵活性以及经济性之间的平衡原则，剖析电力电子、智能控制和通信技术的应用途径，指出技术协同对系统性能的提升功效，提出的多维度优化策略，为解决新能源波动、成本控制等问题给出了可行办法。未来，技术的迭代，需要强化多目标优化算法的工程适配性，探索新型储能技术与微电网的融合方式，借助持续的技术创新以及实践优化，微电网储能系统将在提升能源利用率、保障供电安全、推动碳中和进程方面发挥更为关键的作用。

参考文献

[1]王永亮,高延庆,苗效瑞.智能微电网在建筑电气工程中的应用[J].光源与照明,2024,(12):228-230.
[2]何启成.新形势下电力工程设计中的电力系统规划设计研究[J].光源与照明,2024,(12):207-209.
[3]伍捷怡.智能电网建设中电力工程技术的应用分析[J].电工技术,2024,(S2):406-408+411.
[4]李泽.农村电网电气工程的技术问题与改善分析[J].电力设备管理,2024,(16):241-243.
[5]王红敏.电力工程技术在智能电网建设中的有效应用[C]//中国电力设备管理协会.全国绿色数智电力设备技术创新成果展示会论文集(三).国网河北省电力有限公司唐山供电分公司,2024:145-147.
[6]李刚.电力工程技术在智能电网中的运用分析[J].中国新技术新产品,2020,(18):64-65.
[7]李祯,翁旭初.多目标优化在电网工程中的应用研究[J].城市建设理论研究(电子版),2023,(28):72-74.
[8]姚梦.新型电力系统下考虑储能调节策略与能量功率比的可靠性评估[D].华南理工大学,2024.
[9]吕勤,杨靖萍,李峰.基于分解集成策略和多目标优化算法的混合预测模型在电力负荷预测中的应用[J].河北电力技术,2020,39(06):24-27+39.
[10]李利明.基于多目标优化的微电网能量管理研究[D].东华大学,2018.

储能预制舱喷淋系统温控匹配研究

王誉霖

浙江运达能源建设有限公司, 江苏 南京 210000

DOI:10.61369/EPTSM.2025060005

摘 要： 储能电站预制舱作为能源存储关键设施，运行安全同温度控制联系紧密，喷淋系统系预制舱温度调控重要方式，环境温度起伏直接作用于系统运行成效。本文围绕储能电站预制舱喷淋系统与环境温度的适应性匹配课题，解析喷淋系统构成及运作机制，探究环境温度对系统参数、喷淋介质及设备特性的作用，给出适应性匹配优化途径及效果检验方式，相关探索显示，科学的匹配设计与调控，能够保障喷淋系统在多样环境温度条件下平稳高效运转，为储能电站预制舱安全稳定运行筑牢基础。

关 键 词： 储能电站；预制舱；喷淋系统；环境温度；适应性匹配

Study on Temperature Control Matching of Spray System in Energy Storage Prefabricated Cabin

Wang Yulin

Zhejiang Windey Energy Technology Group Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu 210000

Abstract： As critical energy storage infrastructure, prefabricated cabins in energy storage power stations maintain operational safety through temperature control. The spray system, a key component for cabin temperature regulation, directly responds to environmental temperature fluctuations that critically impact system performance. This study investigates the adaptive matching between spray systems and ambient temperatures in energy storage cabins. Through analyzing the spray system's structure and operational mechanisms, we explore how environmental conditions influence system parameters, spray media, and equipment characteristics. The research proposes optimization strategies and validation methods for adaptive matching. Findings demonstrate that scientifically designed matching configurations enable stable and efficient operation of spray systems across diverse temperature ranges, thereby establishing a robust foundation for safe and reliable cabin operations in energy storage facilities.

Keywords： energy storage power station; prefabricated cabin; spray system; ambient temperature; adaptive matching

引言

储能电站于能源转型进程中意义关键，预制舱身为核心构成单元，舱内整合众多电池模组与电气设备，运行阶段常出现热量堆积现象，作为储能电池的重要储存场所，储能预制舱具有模块化、高效化等优点，在储能电站中已得到广泛应用，然而由于储能电池本身具有一定的危险性，在异常工况下容易存在热失控的风险，一旦有电池发生热失控，极易在舱内快速传播，对储能预制舱甚至储能电站造成严重威胁。温度调控失当，热失控之类的安全隐患便可能浮现，喷淋系统因具备高效降温效能，已然成为预制舱温度调节的核心设施。

一、储能电站预制舱喷淋系统组成及工作原理

（一）喷淋系统的核心组成部分

储能电站预制舱喷淋系统包含若干关键组件，这些组件相互配合完成舱内温度的精准调节，供水装置作为系统动力来源，涵

盖储水箱、水泵及管路系统，承担着将喷淋介质输送至喷淋终端的职责，储水箱需有一定容量保障喷淋时持续供水，水泵则依据所需压力和流量参数选型，确保介质在管路中稳定流动。喷淋终端是发挥降温作用的执行部件，主要有喷淋头和管道网络，喷淋头的布置方式与数量要结合预制舱空间结构及发热设备分布来

定,确保喷淋范围覆盖所有关键区域,管道网络的管径设计和走向规划需符合介质输送效率要求,防止局部压力损失过大^[1]。

(二) 喷淋系统的温度调控原理

喷淋系统的温度调节依托热交换原理,喷淋介质与预制舱内空气及设备表面的热量交换达成降温^[1]。预制舱内温度升高到设定阈值,控制单元便启动喷淋系统,水泵把储水箱中的喷淋介质加压后经管道送到喷淋头,喷淋头将介质雾化后均匀洒在舱内空间及设备表面,雾化后的喷淋介质接触高温空气,借由蒸发吸热降低空气温度,细水雾对舱室内环境温度的降低具有较为显著的效果,喷淋80s左右即可使环境温度降低至正常室温;降低细水雾液滴粒径对细水雾灭火效果的提升幅度较小;初始水雾速度对细水雾灭火效果的影响很小,且过高的水雾速度会降低其灭火效果;喷淋强度对细水雾灭火效果的影响较为显著,喷淋强度越高,灭火效果越好,当喷淋强度达到0.15kg/s时,细水雾喷淋能较为有效地抑制电池热失控传播,这样的动态调节方式下,喷淋系统可将预制舱内温度稳定在适宜运行区间,防止温度过高造成设备故障或安全事故。

二、环境温度对喷淋系统适应性的影响因素

(一) 对喷淋系统参数的影响

环境温度波动直接关联喷淋系统关键运行参数,改变其降温成效,高温环境里,外界空气温度偏高,与预制舱内的温差缩小,喷淋介质蒸发速率随之下降,要实现预期降温效果,系统需增加喷淋介质供应量或提升喷淋压力,让更多雾化介质参与热交换,这会加大水泵能耗,对管路耐压性能也有了更高标准;低温环境则作用于喷淋系统启动性能,环境温度过低时,喷淋介质可能黏度上升,增大水泵启动阻力,拖长系统响应时间,温度若低于介质冰点,还可能造成管路或喷淋头结冰堵塞,使系统无法正常启动,低温环境下空气相对湿度较低,喷淋介质蒸发速度加快,可能让舱内湿度迅速上升,湿度调节失当,便会对电气设备绝缘性能带来不利作用。

(二) 对喷淋介质性能的影响

环境温度的起伏牵动着喷淋介质的物理化学属性,这又进一步关联到喷淋系统的适应表现,水作为常用的喷淋介质,其属性会随温度差异呈现出显著不同,处于高温环境时,水的蒸发进程加快,能在短时间内吸纳大量热量,对快速降低舱内温度有助益,但与此同时也会让耗水量上升,这就需要储水箱具备更大容积或是更频繁地进行补水作业。低温环境中,水的冰点特性成为不容忽视的问题,当环境温度趋近甚至低于0℃,水便容易凝结成冰,结冰后水的体积膨胀可能导致管路出现裂痕、喷淋头遭受损坏,最终造成系统无法正常运转,为解决这一难题,部分系统会选择在水中加入防冻剂,而防冻剂的添加比例必须根据环境温度做出精确调配,比例过高可能会降低水的蒸发吸热效能,比例过低则无法起到应有的防冻作用^[2]。

(三) 对设备运行状态的影响

环境温度的起伏对喷淋系统设备运行状态存在多方面作用,干扰系统稳定表现。水泵作为系统核心动力装置,运行效率同环

境温度联系紧密,高温环境里,水泵电机散热条件变差,电机温度上扬,可能造成绝缘性能下滑,加大电机烧毁几率。喷淋头工作状态同样受环境温度牵连,高温环境中,喷淋头金属部件可能因热胀冷缩出现形变,改变雾化角度与流量稳定性,长期处于高温环境,喷淋头密封件易老化失效,引发介质渗漏;低温环境下,喷淋头内部若有残留水分结冰,可能致使阀芯卡涩,无法正常启闭,延缓系统响应速率。

(四) 对系统能耗与寿命的影响

环境温度的起伏变化,会从运行负荷的调整到设备损耗速率的改变等多个层面,给喷淋系统的能耗状况与使用寿命带来不容忽视的影响,处于极端高温的环境条件下,要让预制舱内始终保持适宜运行的温度区间,喷淋系统不得不维持长时间、高频率的运转状态,水泵、控制单元这类核心设备的能耗因此出现明显攀升,整个系统的运行成本也随之水涨船高,即便是极端低温环境,系统运行的频率有所下降,低温对设备造成的损伤却同样值得重点关注,因低温导致喷淋介质结冰,很可能对管路和相关设备造成物理性的损坏,而每一次的解冻操作与后续维修工作,都会在一定程度上给系统带来额外损耗,使得维护成本不断增加^[2]。低温环境中,设备的金属部件还容易出现冷脆现象,其机械强度会因此受到削弱,当设备处于温度频繁波动的环境时,系统设备会反复经历热胀冷缩的过程,这会进一步加剧各个部件之间的松动程度与磨损情况,导致设备的密封性和运行稳定性大打折扣,控制单元在温度持续波动的情况下,需要不断对运行参数进行调整,这无疑会加大电子元件所承受的工作压力,严重时可能造成这些电子元件提前失效,进而让整个系统的使用寿命受到进一步的影响而缩短。

三、喷淋系统与环境温度适应性匹配优化策略

(一) 系统参数动态调整机制

构建系统参数动态调节机制,是让喷淋系统与环境温度达成适应性匹配的核心办法,在控制单元中嵌入智能算法,实时收集环境温度、舱内温度及系统运行参数,依据环境温度的变动自动调节喷淋压力、流量和频率,环境温度上升时,算法自行提高喷淋压力与流量,增加雾化介质的供给量,同时缩短喷淋间隔,保障降温成效;环境温度下降时,算法降低喷淋压力与流量,延长喷淋间隔,减少不必要的能耗与介质消耗,针对昼夜温差较大的环境,可运用分段式参数调节策略,白天高温时段采用高强度喷淋参数,夜间低温时段切换为低强度参数,防止系统在低温时段频繁启停,设置温度变化速率阈值,环境温度变化速率超出阈值时,系统提前调节参数,实现预判性调控,提升系统的响应速度与稳定性^[3]。参数调节过程中,需结合预制舱内设备的发热特性,对关键设备区域的喷淋参数进行差异化设置,依据环境温度与设备发热强度的耦合关系,优化不同区域的喷淋头布置密度和参数,确保设备在各种环境温度下都能得到有效降温。

(二) 喷淋介质选型与改性优化

依据不同环境温度特点选用合适的喷淋介质,配合必要的改

性优化，是增强系统适应能力的重要手段，高温干燥环境里，优先挑选蒸发潜热高的介质如水，添加表面活性剂能改善其雾化效果，扩大与空气的接触面积，增进吸热效率，储水箱中设置水质净化装置，可防止高温条件下水垢生成堵塞喷淋头^[3]。低温环境中，需选用具备防冻性能的喷淋介质，以水为基础的介质需精确计算环境最低温度，添加适量防冻剂如乙二醇，降低介质冰点，同时保证其蒸发吸热性能不会受到明显影响，特殊低温环境可考虑采用低冰点专用合成介质，进行兼容性测试是必要的，确保其对管路和设备无腐蚀作用。温度波动较大的环境中，选择稳定性高的喷淋介质意义重大，对介质的黏度、沸点等参数实施改性处理，能让其在较大温度范围内保持稳定的物理化学性能，添加增稠剂调整介质黏度，可使其低温下不至于黏稠，高温下不过度稀释，保障雾化效果的一致性。

（三）设备防护与适应性改造

对喷淋系统设备实施针对性防护与适应性改造，能有效增强其在不同环境温度下的运行可靠性。高温环境中，给水泵电机加装高效散热装置，像散热片或强制风冷系统，可降低电机工作温度；管路和喷淋头的密封件选用耐高温材料制作，能提高其抗老化性能；储水箱外部增加隔热保温层，可减轻环境高温对箱内介质温度的影响；低温环境里，对管路系统做保温处理，采用保温棉或电伴热装置防止介质结冰；喷淋头和水泵等关键设备外部设置防冻保护罩，避免设备直接暴露在低温环境中；系统中安装温度监测传感器，管路温度接近冰点时，自动启动防冻保护程序，开启循环泵让介质保持流动，防止结冰堵塞，温度波动环境中，设备连接部位采用柔性连接方式，减少热胀冷缩引发的部件应力；水泵轴承、喷淋头阀芯等易损部件选用耐疲劳性能强的材料制作，提高设备抗磨损能力；控制单元进行恒温防护设计，安装

在隔热箱内，避免环境温度剧烈波动影响电子元件性能^[4]。

（四）智能监控与预警系统构建

构建智能监控与预警系统，是保障喷淋系统与环境温度实现适应性匹配的重要支撑，在预制舱内外及系统关键部位布设多类型传感器，实时监测环境温度、舱内温度、喷淋介质温度、管路压力、流量等参数，将数据传输至中央控制平台^[4]。平台运用数据融合算法对多源数据展开分析处理，构建系统运行状态评估模型，实时判断系统与环境温度的匹配程度，依据评估模型设置多级预警阈值，环境温度变化可能导致系统参数偏离正常范围或设备性能下降时，系统自动发出预警信号，推送相应的处理建议，环境温度骤降接近介质冰点，系统发出防冻预警，提示运维人员检查保温措施或启动防冻程序；高温环境下系统能耗异常升高，发出能效预警，提示优化喷淋参数或检查设备状态。结合历史运行数据和环境温度变化规律，建立系统适应性预测模型，提前预判不同季节或气候变化下系统的运行状态，为运维计划制定和系统优化升级提供数据支持，智能监控与预警系统持续运行，实现喷淋系统与环境温度的动态适配，提升系统的安全性和经济性。

四、结语

储能电站预制舱喷淋系统与环境温度之间的适应性匹配，对于系统安全高效运转有着关键意义，环境温度会作用于系统参数、介电性能、设备状态以及能耗与寿命，进而限制喷淋系统的效能发挥，建立参数动态调整机制、优化介质选型与改性、实施设备防护改造以及构建智能监控预警系统等策略，能够促成两者之间的精准匹配。

参考文献

- [1] 胡炜，海建康，张亚鹏，等. 预制舱式电化学储能电站电池舱冷却系统方案设计 [J]. 环境技术，2025.
- [2] 向嘉强，何琦，郭振兴，等. 基于电化学储能电站的消防系统设计研究 [J]. 科学技术创新，2025.
- [3] 嵇兴康，杨冠杰. 电化学储能电站布置方式经济性分析和安全防范 [J]. 能源工程，2024.
- [4] 彭卫青. 储能锂电池预制舱火灾特性及细水雾灭火效能数值仿真研究 [D]. 南京理工大学，2024.

火电厂汽轮机润滑油系统常见故障及油质提升改造措施

安海阳, 阳欧, 李昶亮

东方电气集团东方汽轮机有限公司, 四川 德阳 618000

DOI:10.61369/EPTSM.2025060006

摘 要： 汽轮机润滑油系统对于火电厂的稳定运行起着至关重要的作用，其故障和油质问题直接影响汽轮机的性能与寿命。本文详细分析了火电厂汽轮机润滑油系统常见的故障类型，如油压异常、油温异常、油位异常、油质劣化等，并深入探讨了这些故障产生的原因。同时，针对油质提升改造，提出了一系列有效的措施，包括优化过滤系统、控制水分侵入、防止氧化污染等。通过实际案例展示了相关措施的实施效果，为火电厂汽轮机润滑油系统的稳定运行和油质改善提供了重要参考。

关 键 词： 火电厂；汽轮机；润滑油系统；故障分析；油质提升

Common Faults of Steam Turbine Lubrication System in Thermal Power Plant and Improvement Measures of Oil Quality

An Haiyang, Yang Ou, Li Changliang

Dongfang Electric Group Dongfang Steam Turbine Co., LTD. Deyang, Sichuan 618000

Abstract： The steam turbine lubrication system plays a vital role in the stable operation of thermal power plants, where both equipment failures and oil quality issues directly impact turbine performance and service life. This paper provides a comprehensive analysis of common operational failures in thermal power plant steam turbine lubrication systems, including abnormal oil pressure, temperature fluctuations, level irregularities, and oil degradation, while thoroughly examining their root causes. Furthermore, it proposes effective measures for oil quality enhancement, such as optimizing filtration systems, controlling moisture intrusion, and preventing oxidative contamination. Through practical case studies demonstrating implementation effectiveness, this research offers critical references for ensuring stable operation and improving oil quality in steam turbine lubrication systems at thermal power plants.

Keywords： thermal power plant; steam turbine; lubricating oil system; fault analysis; oil quality improvement

引言

在火电厂的发电设备体系中，汽轮机作为核心设备之一，其运行的稳定性和可靠性直接关系到整个电厂的发电效率和经济效益。汽轮机润滑油系统在汽轮机运行过程中扮演着不可或缺的角色，它承担着润滑、冷却、减振以及密封等重要功能。润滑油能够在汽轮机的轴承、轴颈等摩擦部件之间形成油膜，有效降低摩擦阻力，减少部件磨损，同时带走因摩擦产生的热量，确保部件工作温度在正常范围内。此外，润滑油还对汽轮机的调节系统和保安系统起到液压传动和控制作用。因此，深入研究汽轮机润滑油系统常见故障及油质提升改造方法具有重要的现实意义。

一、汽轮机润滑油系统常见故障分析

（一）油压异常

1. 油压降低

油压降低是汽轮机润滑油系统较为常见的故障之一。造成油

压降低的原因主要有以下几个方面：油泵故障是导致油压降低的重要因素，例如油泵内部零部件磨损、损坏，使油泵的输油能力下降，无法提供足够的油压。某火电厂曾出现由于油泵齿轮磨损严重，导致润滑油压从正常的0.25MPa降至0.15MPa，接近报警值。油管道泄漏也是常见原因，管道的焊缝开裂、法兰密封不

作者简介：

安海阳（1981.12-），男，河北人，硕士，东方汽轮机服务事业部高级工程师，研究方向：本体轴系结构；

阳欧（1980.01-），男，重庆人，本科，东方汽轮机服务事业部高级工程师，研究方向：辅机系统；

李昶亮（1995.05-），男，山西人，硕士，东方汽轮机服务事业部工程师，研究方向：通流提效优化。

严重情况，会使润滑油泄漏，系统内油量减少，进而油压降低。滤网堵塞同样不容忽视，当润滑油中的杂质、颗粒等在滤网处大量积聚，会阻碍润滑油的流通，造成油泵吸油困难，导致油压下降。此外，压力调节阀失灵，无法根据系统需求准确调节油压，也可能引发油压降低故障。

2. 油压波动

油压波动会使汽轮机的润滑和液压控制系统工作不稳定，影响机组的正常运行。油泵吸入空气是导致油压波动的常见原因之一，当油泵吸入管路密封不严或油箱油位过低时，空气容易混入油液中，随着油液的流动，导致油压产生波动。油系统中有水也会引发油压波动，水分会影响油液的黏度和流动性，破坏油膜的稳定性，进而造成油压不稳定。另外，油泵本身工作不稳定，如油泵电机转速波动、油泵内部部件配合不良等，也会导致油压出现波动现象。

（二）油温异常

1. 油温过高

油温过高会使润滑油的黏度降低，油膜承载能力下降，增加部件磨损的风险。冷油器故障是油温过高的常见原因，例如冷油器内部铜管结垢，降低了热交换效率，无法有效带走润滑油中的热量；冷油器冷却水量不足，也会导致冷却效果不佳，油温升高。润滑油循环不畅同样会引起油温过高，如管道堵塞、阀门开度不足等，使润滑油在系统中循环受阻，热量无法及时散发。此外，汽轮机负荷过高，产生的热量过多，若润滑油系统无法及时将热量带走，也会导致油温持续上升。

2. 油温过低

油温过低会使润滑油黏度增大，流动性变差，影响油膜的形成和建立，增加启动时的阻力。环境温度过低是导致油温过低的一个因素，在寒冷的季节，若润滑油系统的保温措施不到位，油温容易受环境影响而降低。加热装置故障也是油温过低的原因之一，当加热装置无法正常工作，无法对润滑油进行加热，导致油温难以维持在合适的范围。

（三）油位异常

1. 油位下降

油位下降通常表明润滑油系统存在泄漏问题。设备泄漏是油位下降的常见原因，如油管破裂、法兰密封不好等，会使润滑油直接泄漏到系统外部。冷油器泄漏也是导致油位下降的重要因素，当冷油器的铜管破裂时，润滑油会泄漏到冷却水中，造成油位降低。此外，油箱放油门没关严等情况，也会使润滑油流失，导致油位下降。

2. 油位上升

油位上升可能是由于轴封汽进入轴承座，使油中进水，导致油位上升。轴封系统运行不正常，如轴封汽压力过高，蒸汽会通过轴封间隙进入轴承座，与润滑油混合，使油液体积膨胀，油位上升。另外，冷油器泄漏时，如果冷却水压力高于润滑油压力，冷却水会进入润滑油系统，也会造成油位上升。

（四）油质劣化

1. 水分污染

水分侵入润滑油系统会对油质产生严重影响。冷油器泄漏是水分进入润滑油的主要途径之一，当冷油器的铜管出现裂缝或腐蚀穿孔时，冷却水会渗入润滑油中。轴封蒸汽泄漏也可能导致水分进入，若轴封汽压力调节不当，蒸汽会进入轴承箱，遇冷后凝结成水，混入润滑油中。此外，空气湿度较大时，若润滑油系统的呼吸器不能有效过滤水分，水分也可能通过呼吸器进入油箱，污染润滑油。

2. 颗粒污染

颗粒污染物主要来源于系统内部和外部。内部来源包括汽轮机运行过程中部件的磨损产生的金属颗粒，如轴承、轴颈等部位的磨损；以及润滑油氧化产生的油泥等杂质。外部来源主要是在设备检修、维护过程中，未做好防护措施，使灰尘、杂质等进入润滑油系统。另外，新油在储存和运输过程中，如果受到污染，也会将颗粒污染物带入系统。

二、汽轮机润滑油系统常见故障案例分析

（一）案例一：某电厂油压降低故障

某火电厂一台300MW汽轮机在运行过程中，润滑油压突然下降。运行人员立即对系统进行检查，发现油泵出口压力正常，但滤网前后压差增大。经进一步检查，确定是滤网被大量杂质堵塞，导致油泵吸油不畅，油压降低。由于及时发现并清理了滤网，油压恢复正常，避免了因油压过低引发的设备损坏事故。

（二）案例二：油温过高导致机组振动加剧

某火电厂一台600MW汽轮机在夏季高温时段运行时，出现油温过高的情况。随着油温升高，机组振动逐渐加剧。经检查，发现冷油器冷却水管结垢严重，热交换效率大幅降低。通过对冷油器进行清洗，并增加冷却水量，油温逐渐降低至正常范围，机组振动也随之减小，恢复了正常运行。

（三）案例三：油质劣化引发的设备故障

某电厂在定期油质检测中，发现汽轮机润滑油的颗粒度和水分含量严重超标，油质劣化明显。随后在机组运行过程中，出现轴承温度升高、设备异常磨损等问题。经分析，是由于冷油器泄漏和轴封蒸汽泄漏，导致水分和颗粒污染物进入润滑油系统，使油质恶化。通过对冷油器进行修复，调整轴封汽压力，并采用高效滤油设备对润滑油进行净化处理，油质逐渐恢复正常，设备运行也恢复稳定。

三、汽轮机润滑油油质提升改造措施

（一）优化过滤系统

1. 选用高精度滤芯

传统的润滑油过滤系统滤芯精度往往较低，难以有效去除微小颗粒污染物。因此，应选用过滤精度更高的滤芯，如 $\beta \geq 200$ ，过滤精度 $\leq 3\mu\text{m}$ 的滤芯，能够显著提高对油中微小颗

粒的过滤效果。某火电厂将原有的过滤精度为 $10\mu\text{m}$ 的滤芯更换为 $3\mu\text{m}$ 的高精度滤芯后，润滑油中的颗粒污染物含量明显降低，油质得到显著改善。

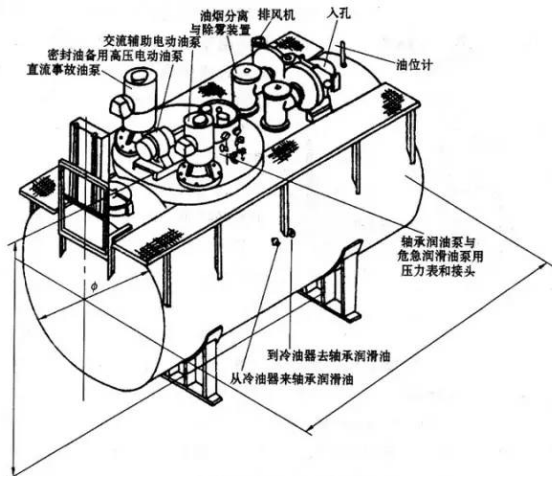


图1 组合油箱

2. 增设旁路循环过滤装置

在润滑油系统中增设旁路循环过滤装置，可实现对油液的持续净化。旁路循环过滤装置能够独立于主系统运行，对部分油液进行过滤，将过滤后的清洁油液再送回主系统。这样可以在不影响汽轮机正常运行的情况下，不断降低油液中的污染物含量。例如，某电厂安装旁路循环过滤装置后，经过一段时间的运行，润滑油的颗粒度从原来的 NAS8 级降低至 NAS6 级。

（二）控制水分侵入

1. 加强冷油器维护管理

定期对冷油器进行检查和维护，及时发现并修复泄漏问题。采用先进的检测技术，如无损探伤技术，对冷油器铜管进行检测，确保其无裂缝、腐蚀等缺陷。同时，要合理控制冷油器的运行参数，避免因温差过大或压力波动导致铜管损坏。某电厂通过加强冷油器维护管理，将润滑油中的水分含量从原来的 200ppm 降低至 50ppm 以下。

2. 优化轴封系统运行

调整轴封汽压力至合理范围，确保轴封蒸汽既能起到良好的密封作用，又不会泄漏进入润滑油系统。安装轴封蒸汽压力自动调节装置，根据机组运行工况实时调整轴封汽压力，提高轴封系统的稳定性。此外，要加强对轴封系统的日常巡检，及时发现并处理轴封泄漏问题。

（三）防止氧化污染

1. 控制油温

保持油温在合适的范围内，可有效减缓润滑油的氧化速度。优化润滑油冷却系统，确保冷却效果稳定可靠。安装油温自动调节装置，根据油温变化自动调整冷却水量，使油温始终维持在 $45\sim 55^{\circ}\text{C}$ 之间。例如，某电厂通过优化油温控制，润滑油的氧化速度明显降低，酸值增长缓慢，延长了润滑油的使用寿命。

2. 添加抗氧化剂

在润滑油中添加适量的抗氧化剂，能够抑制润滑油的氧化反应。选择质量可靠、性能稳定的抗氧化剂，并严格按照规定的比例添加。定期对添加抗氧化剂后的润滑油进行检测，确保其抗氧化性能满足要求。添加抗氧化剂后，润滑油的氧化诱导期显著延长，有效提高了油质的稳定性。

（四）加强日常维护管理

1. 建立严格的油质监测制度

定期对润滑油进行全面检测，包括颗粒度、水分、酸值、黏度等指标。采用先进的检测设备和技術，提高检测的准确性和及时性。根据油质检测结果，及时调整维护措施，确保油质始终处于良好状态。例如，某电厂建立了每周一次的油质常规检测和每月一次的全面检测制度，通过及时发现并处理油质问题，保障了汽轮机的稳定运行。

2. 规范设备检修操作

在汽轮机设备检修过程中，要严格遵守操作规程，做好防护措施，防止杂质、水分等污染物进入润滑油系统。检修后，对润滑油系统进行彻底清洗和检查，确保系统内无残留杂质。同时，对新更换的设备部件进行严格的清洁和检验，避免将污染物带入系统。

四、汽轮机润滑油油质提升改造效果评估

（一）油质指标对比

通过实施上述油质提升改造措施，某火电厂汽轮机润滑油的各项指标得到了显著改善。改造前，润滑油的颗粒度为 NAS8 级，水分含量为 150ppm，酸值为 0.2mgKOH/g ；改造后，颗粒度降低至 NAS6 级，水分含量降至 50ppm 以下，酸值稳定在 0.1mgKOH/g 左右。具体数据对比如表 1 所示：

表 1 某火电厂汽轮机润滑油的各项指标改造前后对比表

油质指标	改造前	改造后
颗粒度（NAS 级）	8	6
水分含量（ppm）	150	< 50
酸值（mgKOH/g）	0.2	0.1

（二）设备运行稳定性提升

随着油质的改善，汽轮机设备的运行稳定性得到了明显提升。设备的振动值明显降低，轴承温度保持在正常范围内，设备的磨损情况也得到了有效控制。例如，改造前汽轮机的振动幅值在 $50\mu\text{m}$ 左右，改造后降低至 $30\mu\text{m}$ 以下；轴承温度由原来的最高 70°C 降低至 60°C 左右。设备故障率大幅下降，检修周期延长，为火电厂的稳定发电提供了有力保障。

五、结论

汽轮机润滑油系统的稳定运行和良好的油质是火电厂汽轮机安全、高效运行的重要保障。通过对汽轮机润滑油系统常见故障的深入分析，如油压异常、油温异常、油位异常和油质劣化等，结合实际案例，明确了故障产生的原因和危害。针对这些问题，采取了一系列有效的油质提升改造措施，包括优化过滤系统、控

制水分侵入、防止氧化污染以及加强日常维护管理等。经过实际应用和效果评估，这些措施显著改善了汽轮机润滑油的油质，提升了设备运行的稳定性和可靠性，降低了设备故障率，延长了设备使用寿命，为火电厂带来了显著的经济效益和社会效益。在未来的火电厂运行管理中，应持续关注汽轮机润滑油系统的运行状况，不断优化和完善油质提升改造措施，确保汽轮机的稳定运行。

参考文献

-
- [1] 杨智. 油液监测技术下电厂汽轮机润滑油系统故障诊断方法 [J]. 电力设备管理, 2025, (09): 167–169.
 - [2] 王晓斌. 基于油液监测技术的电厂汽轮机润滑油系统故障诊断方法 [J]. 电力设备管理, 2025, (09): 113–115.
 - [3] 姚东跃. 浅谈电厂汽轮机润滑油系统的油质劣化原因及改善措施 [J]. 电工技术, 2024, (S2): 44–46.
 - [4] 滕鲁. 火电厂汽轮机润滑油系统常见故障及油质提升改造 [J]. 设备管理与维修, 2024, (18): 115–117.

光伏直流接入电解铝供电系统的优化与节能策略

路晓宁

国家电投集团铝电投资有限公司青铜峡铝业分公司, 宁夏 吴忠 751600

DOI:10.61369/EPTSM.2025060007

摘 要 : 电解铝工业是我国经济发展的基础工业, 其生产流程严重依靠电能, 其多次整流和逆变导致的电能转化损失较大, 再加上高比例的燃煤发电, 从而使工业的“绿色化”面临着巨大的压力。伴随着国内光伏产业的大规模发展, 消除部分转换环节, 降低能源的消耗, 是实现“双碳”目标的有效途径。然而, 由于光伏直流的波动特性与电解铝生产对供电的稳定需求之间出现冲突, 需要从系统的角度和节能的角度来破解, 这不仅是工业降低成本的实际需要, 也是高能耗工业和新能源协调发展的重要探索。

关 键 词 : 光伏电流; 电解铝供电系统; 节能策略

Optimization and Energy-Saving Strategies for Photovoltaic DC Connection to Electrolytic Aluminum Power Supply Systems

Lu Xiaoning

Qingtongxia Aluminum Industry Branch, State Power Investment Corporation Aluminum and Electricity Investment Co., LTD., Wuzhong, Ningxia 751600

Abstract : The electrolytic aluminum industry is a fundamental industry for China's economic development. Its production process relies heavily on electricity, resulting in significant energy conversion losses due to multiple rectifications and inverters. Coupled with a high proportion of coal-fired power generation, this has placed tremendous pressure on the "greening" of the industry. With the large-scale development of the domestic photovoltaic industry, eliminating some conversion links and reducing energy consumption are effective ways to achieve the "dual carbon" goals. However, due to the conflict between the fluctuating characteristics of photovoltaic direct current and the stable power supply demand of electrolytic aluminum production, it is necessary to solve the problem from both the system perspective and the energy conservation perspective. This is not only an actual need for the industry to reduce costs, but also an important exploration for the coordinated development of high-energy-consuming industries and new energy.

Keywords : photovoltaic current; power supply system for aluminum electrolysis; energy-saving strategies

引言

电解铝加工是高能耗产业, 其常规电源具有多个连接损耗, 而直接引入太阳能电池可降低逆变和整流损耗, 提高发电效率。其核心是光储的一体化协调, 利用双向-直流-直流变换器, 使光电和存储之间能量互补, 抑制光照变化。同时结合“电压-电流”双闭环的方法通过稳定直流母线, 让电流波动使其处于一个合理的范围内, 保证了电解槽道过程的平稳运行。

一、光伏直流接入电解铝供电系统的重要性

将光伏直流引入电解铝槽中, 具有多方面的经济价值: 能够减少电能消耗。在常规方式下, 需要将光伏发电通过逆变器接入电网后进行整流, 而采用直流直供的方式可以减少两极变换损失, 从而达到节约电能的目的。以中电建为例, 一年可节约1.95

亿多的电力费用。此外, 还能避免碳税的风险。在国家范围内的电力交易规模不断扩大的同时, 电解铝企业也将面对碳排放费用^[1]。推广“绿色电力”后, 每吨铝碳排放由原来的10~14吨减少1.5~2吨, 大大减少了碳排放。与此同时, 绿色电力的铝会因价格上涨而受益。在此基础上, 通过“光伏+储能”的协调调控, 可实现提高发电效率, 减少对电网的依赖。该模式既契合了

我国的能源保障政策，又可通过数字监测平台对电网进行在线动态调整，使母线损耗大大降低，从而达到节能减排和节能减排的目的。

二、光伏直流接入电解铝供电系统的技术细节

系统架构以一条直流母线为中心，光伏阵列产生的直流电汇集智能汇流箱中，直接通过直流母线接入。在汇流箱内设置了一个电流监控模块，可以对每一条电池线的运行情况进行实时监控，一旦有一条线发生了故障，就可以通过内部断路器迅速隔离，避免对系统的输出造成不利的影响。针对光伏输出的工作电压与电解槽工作电压之间的存在的差异，需要利用 DC-DC 变换器来进行电压匹配，即利用移相全桥技术，通过调整开关管导通时序，使电池端的电压达到母线水平，并在蓄能释放过程中降低，从而实现功率在两个方向上的有效转化。

在储能系统装置中由一个双向 DC—DC 变换器连接到直流母线上，其核心作用是抑制光伏的电压波动。在光伏出力功率大于电解负荷的情况时，变换器切换为可充电状态，将多余电能存储在储能单元；在光伏出力功率不足的情况下，变换器将会自动进入到放电状态，通过将存储的电能释放出来填补系统的空缺。为了防止储能的过度充电和放电，系统内设计了一个荷电状况监控模块（SOC），当 SOC 逼近极限时，启动电量限制的充电逻辑。在此范围内，应以保证槽底负载为第一位，并对不必要的放电进行控制。利用高频率的变压器进行电力隔离，保证了系统的安全性，降低了系统的能耗^[2]。

稳定电流是保证电解过程安全的重要机制。电解槽对电流的稳定性有很高的要求，任何细微的变化都会造成铝液的纯净度降低。该系统采取了“电压－电流”双闭环的控制方法，外环对直流母线进行监测，在光伏出力波动引起电压偏差时，利用 PI 调节器产生一个电流信号；内环通过对槽内的电流进行实时采集，并与指令值结果进行比较，从而调节 DC-DC 变换器的输出功率，保证了电流的波动在技术许可的限度之内。

以上这些技术细节的整合，在保持光伏直流供电效率的基础上，以精确调控和防护机理适应了电解铝生产的苛刻需求，为实现系统平稳、节能减排奠定了坚实技术基础。

三、光伏直流接入电解铝供电系统的优化与节能策略

（一）光储协同调度，负荷预测与响应

在光伏直流接入电解铝供电系统中，其光储能协调运行和负载预估响应是其能量效率最优的关键步骤。其技术机制以光伏发电功率波动规律、储能动态调控性能和电解铝负载特点展开，以多维协调控制为手段，实现系统稳定性与经济性的平衡。光储能装置协调运行的关键在于体系结构和调控方法的深层次耦合。光伏直流母线与电解池相连，消除了传统交流转化过程，而储能系统通过双向 DC-DC 变换器与直流母线相连。在光伏出力大于电解铝负荷的情况下，多余电能通过 MPPT 控制器优化后存入储

能；反过来，储存的电能又会补充电力的不足。其中，基于双向 DC-DC 双变换器的自适应换相技术，通过其同步整流电路，在充放电两种状态下，实现能量的有效转化，并结合闭环 PI 控制，保证能量存储的精确和稳定。

负荷预测和响应技术是利用数据驱动的建模方法，准确地将电解铝负荷特性和光伏出力进行准确匹配。利用 LSTM 神经网络建立了负荷预测的模型，通过对历史电流数据、电解槽温度和过程参数的录入，实现了 15 分钟到 1h 内的负荷曲线，预测精确度大于 95%。在此基础上，构建基于辐射、温度等天气信息的光伏出力预测模型，提前调整储能充放电计划。

其中，稳态流动的协调控制是动态响应机制的核心。在光伏出力波动引起的直流母线电压偏差的情况下，SCADA 系统可以对电解槽的电压和电流进行实时采集，并由分布式控制单元对其进行调节。比如在母线电压降低到 98% 时，通过对电解池中的高度进行调节，使电解槽中的电流波动保持到 $\pm 0.5\%$ 。采用“电压—电流”双闭环的方式，不仅保证了电解槽运行的平稳，而且减少了母线的损失。数字监测平台是光储系统协调和负荷响应的核心。在此基础上，将 SCADA 系统和能量管理系统（EMS）相结合，对光伏阵列效率、储能健康状况和电解槽运行参数进行监测，生成动态优化指令。通过构建能量效率评价方法，对电网的整体能量消耗进行动态分析，在节点失效率高于 3% 的情况下，实现故障的快速准确定位和维修，见表 1。

表 1 故障的快速准确定位和维修的技术环节		
技术环节	核心机制	典型应用场景
稳流协调控制技术	用“电压—电流”双闭环控制，调 DC-DC 参数	母线电压下降至设定值 98% 时，增加储能放电功率，微调电解槽阳极高度，将电流波动控制在 $\pm 0.5\%$ 以内
	SCADA/EMS 系统相结合，实时监测与指令生成	光伏组串效率下降 15% 时触发清洗机机器人并调整储能策略；母线损耗率超 3% 时启动设备诊断修复接触电阻异常

（二）高效设备选型，电解槽参数匹配

高效设备选型要把重点放在转化环节的重点上。光伏侧采用防尘部件，其涂层可以降低因车间粉尘而引起的效率下降，且工作区域应涵盖整个电解房内的高温工作，防止因过热而降低效果。该系统需要整合智能化的分流器和快熔器，不仅可以实时监控各组的串联电流差值来查找效率较低的组件，还可以在短时间内实现对故障线路的微秒级断开，降低相关损失。其中，核心的 DC-DC 变换器需要使用低损失的器件，采用软开关方法降低开关的导通损失，使其具有较大的可调压范围，同时兼顾电池输出的变化幅度和槽内工作电压的要求，以保证在两个方向均能保持较高的转化效率。在储能方面，需要选择具有较大使用周期的磷酸铁锂电池，其充电速率要与其在光电转换过程中的频率变化相适应，以防止因反复充电而引起的容量快速衰退。

电解参数中，电源特征与电解过程的协调是关键。为了防止在全负荷状态下由于过流而引发的能量限制，电池的容量必须与电池的最大容量相适应。其中，最重要的是对其进行动态自适应：电解槽内的槽道电压与其运行时的电流强度呈非线性变化，太小会造成电解不完全，太大会造成不必要的能量消耗。该方法

需要与电解液温度、氧化铝浓度等相关技术因素相融合，比如随着温度的提高，电解质电导率增大，需要对其进行相应的电压调整，以保证其在相应的工作状态下的稳态，从而减少过压带来的能量消耗。

（三）集成 SCADA 系统，明确母线的损害扣除算法

SCADA 系统利用分布式传感网实时获取直流母线的电压、电流和温升数据，并结合光伏阵列输出、储能充放电状态、电解槽实时负荷等数据。通过采集的数据，经工业以太网传输至中央监控平台，形成动态可视化界面。运维人员可以直观掌握的母线电流、温度变化等监测信息，并在此基础上设置了一个门限判别模型，对母线局部温度突然升高等异常情况进行预警，以便及时采取措施。

母线损害扣除算法的关键在于精确地对母线上的电力损失进行精确地定量，其运算逻辑采用焦耳定律和动态电阻修正模型。该算法以现场实测的母线电流和材质参考电阻为基础，对实测的电阻值进行动态修正，从而实现对实测阻值的在线校正。然后，利用该方法对每一时段内节点的电能损耗进行累加，将该损失从整个电池系统的输出功率中剔除，从而获得真正投入电解池的可用功率。

该算法的独到之处是将“正常损耗”和“异常损害”区别开来：在某段母线由于接触不良而引起的局域电阻突然剧增，将这些超标的损失分别标注为“异常损害”，并引发 SCADA 系统的故障诊断命令——通过对比历史数据和拓扑结构，找出触点氧化、螺栓松动等故障的原因，以便于运维人员进行有针对性的维修。这种闭环机制不仅保证了能量效率评价的精度，而且能够及时检测出隐患，降低母线过热引起的停机风险，为电网的安全、高效运行起到了双保证作用，见表 2。

表 2 SCADA 系统以及母线损害扣除算法

模块	核心功能	关键机制 / 数据
SCADA 系统	采集参数、动态监控、异常告警	分布式传感器网络（每 s 采样 1 次）；工业以太网传输；温度突升超 5℃ 等异常自动告警
母线损害扣除算法	量化母线损耗、区分损害类型	基于焦耳定律 + 动态电阻修正；损耗评估误差较小；8℃ 即异常损害单独标记

（四）优化用电时段，抵消排放成本

优化用电时段是实现光伏接入电解铝系统抵消排放成本的关键所在，其核心机制是利用时段匹配光伏出力特征和电网的碳排放强度进行分时调控。系统基于能源管理模块，根据天气预测对光伏发电量高峰期和低谷期进行分类，并将分时电价和电源结构等参数进行匹配。

在光伏出力高峰期间，通过提高电解槽的负载，使之消纳更多的光伏直流电，降低对电网的电力需求；在光伏出力不足的情况下，利用储能释放对电能负荷的储能，从而有效地防止了在碳排放期大规模购买电力的现象。

四、结束语

光伏直流接入电解铝供电系统的优化策略，通过技术整合和精确调控，实现高效节能减排。其贴合实际的方法，为高耗能能源密集型工业的绿色发展提供技术支持，实现节能与低碳双赢。

参考文献

[1] 朱盛和. 电解铝整流供电系统中的无功补偿及高次谐波的抑制 [J]. 中国金属通报, 2023, (07): 13–15.
[2] 张驰, 王金龙, 邢沛. 电解铝整流供电系统中的无功补偿及高次谐波研究 [J]. 信息技术与信息化, 2024, (12): 53–56.
[3] 叶鹏, 郭喜鹏. 电解铝企业供电系统能耗分析及节能措施研究 [J]. 现代工业经济和信息化, 2023, 13(11): 122–125.

数字孪生驱动的智能变电站自动化系统设计

王伟庆, 娄云, 李军

国网河南省电力公司原阳县供电公司, 河南 原阳 453500

DOI:10.61369/EPTSM.2025060008

摘 要 : 数字孪生技术为智能变电站自动化系统带来了新的设计范式, 突破了传统监控与控制系统的局限。以物理实体与虚拟模型的高精度映射为核心, 该系统实现了对变电设备的全生命周期动态感知、预测控制与智能协同。通过引入实时数据交互机制与多源异构信息融合, 系统具备更高的可靠性、可视化水平与自适应能力, 为变电站的智能化运行提供了强有力支撑。该设计在提升系统响应速度、故障预警准确率与远程调度效率等方面展现出显著优势。

关 键 词 : 数字孪生; 智能变电站; 自动化系统; 虚实融合; 智能控制

Design of Intelligent Substation Automation System Driven by Digital Twin Technology

Wang Weiqing, Lou Yun, Li Jun

Yuanyang Power Supply Company, State Grid Henan Electric Power Company, Yuanyang, Henan 453500

Abstract : Digital twin technology introduces a new design paradigm for intelligent substation automation systems, overcoming the limitations of traditional monitoring and control systems. By leveraging high-precision mapping between physical entities and virtual models, this system achieves dynamic perception, predictive control, and intelligent collaboration throughout the entire lifecycle of substation equipment. Through real-time data interaction mechanisms and multi-source heterogeneous information fusion, the system demonstrates enhanced reliability, visualization capabilities, and adaptive performance, providing robust support for smart substation operations. The design demonstrates significant advantages in improving system response speed, fault prediction accuracy, and remote dispatch efficiency.

Keywords : digital twin; intelligent substation; automation system; virtual-real integration; intelligent control

引言

智能变电站作为智能电网的重要组成部分, 正逐步朝着自动化、数字化、智能化方向演进。在此过程中, 传统的自动化系统面临诸多挑战, 如感知粒度低、系统响应滞后、状态预测能力有限等。数字孪生技术的兴起, 为解决上述问题提供了切实可行的新路径。通过构建与现实设备同步映射的数字镜像, 结合高频采集数据的动态融合, 能够实现设备状态的全景监控与智能控制。在电网运行日益复杂、对安全性与效率要求不断提高的背景下, 构建以数字孪生为核心驱动的智能变电站自动化系统, 正成为推动电力系统革新的关键方向。

一、智能变电站当前自动化系统存在的关键性技术瓶颈

(一) 传统感知与控制系统功能孤岛效应突出

当前多数智能变电站自动化系统采用各子系统独立运行的模式, 信息共享机制薄弱, 系统之间缺乏标准化的数据接口。由于设备厂商不同, 通信协议与数据格式不一致, 导致控制、监测、保护等功能模块难以形成协同联动。这种“功能孤岛”现象限制了

了系统整体感知能力与应变效率, 不利于实现全局优化调度。在设备联动、应急控制和状态判断等关键环节上, 信息壁垒造成响应滞后与操作冲突, 影响系统稳定性^[1]。

(二) 设备状态评估与预测分析能力不足

传统变电站多采用定时巡检与简易在线监测方式, 难以全面掌握设备实时状态。由于缺乏高频动态数据支撑, 系统对设备运行趋势与健康状况难以做出准确评估与预测判断, 容易出现“带病运行”或过度维修的现象。故障模式识别手段较为粗放, 难以

及时预警潜在风险。面对复杂电网环境与多变负载条件，现有分析能力难以支撑对关键设备状态的精准研判，严重制约了系统运行的智能化水平^[2]。

（三）系统集成复杂度高导致运行稳定性欠佳

智能变电站涉及多种软硬件系统融合，集成过程中需解决协议转换、接口对接与时序协调等技术难题。一旦系统发生升级或部件更换，整体结构往往需重新适配，增加调试工作量。系统集成不当易引发控制信号冲突、数据冗余甚至通信中断，影响控制逻辑的有效执行。尤其在复杂负载变化或突发事件下，系统易因联动失效而产生运行不稳的问题，难以保障自动化功能的持续性与可靠性。

二、数字孪生技术在智能变电站系统中的功能优势解析

（一）虚实同步机制增强系统的状态可视化能力

数字孪生以实时数据驱动的虚拟模型为基础，通过物理设备与数字模型间的持续同步，实现对设备运行状态、系统拓扑结构及环境参数的高精度动态呈现。该机制使得变电站运维人员能够在数字平台上直观观察到各类设备的实时工况、历史运行轨迹及状态变化趋势，突破了传统二维数据展示的局限。3D建模技术的引入^[3]，使得操作界面更具交互性与沉浸感，便于复杂系统的全局理解与局部精细化分析。借助虚实同步，系统能够快速捕捉微小异常信号并反馈至运维层，从而有效提升故障预判的时间窗口。状态可视化功能也为设备运行参数的趋势分析、能效评估与运行优化提供了重要支撑，有助于实现对整个变电站状态的全面感知。^[4]

（二）多源数据融合提升运行状态的预测精度

在智能变电站运行过程中，涉及结构参数、环境因素、历史运行数据、负荷波动等多个数据维度。数字孪生系统依托边缘计算与云端智能分析技术，能够整合来自不同源头的的数据，包括现场传感器、SCADA系统、历史数据库与外部气象信息。通过深度学习与建模仿真算法，对各类数据进行归一化处理与特征提取，构建精细化的运行模型，实现对设备性能劣化趋势的预测。数据融合不仅提升了系统对异常状态的识别准确率，也增强了对于潜在故障点的定位能力。在电网运行环境高度动态化的背景下，融合技术可提升系统对复杂变化的感知能力，为智能控制策略提供决策依据，确保变电站运行更加高效与稳定^[5]。

（三）实时反馈闭环优化系统自适应调控机制

基于数字孪生架构构建的闭环控制系统，通过感知—分析—决策—执行四个核心环节，实现了从信息获取到控制指令下发的全流程闭环联动。在设备状态出现偏离时，系统能够第一时间完成诊断并自主生成控制策略，快速调整相关设备参数，完成运行状态的自修复。该机制融合人工智能算法，可持续学习与优化控制模型，使系统具备自适应能力，适应电网运行中的频繁波动与多变工况。系统的响应速度显著提升，减少人为干预与中间延迟，提高运行效率与安全等级。实时反馈机制还支持多策略并行

仿真，预评估调整方案的影响，确保执行结果稳定可靠，是实现智能变电站高可靠性运行的重要保障手段。

三、面向数字孪生的智能变电站自动化系统架构设计方案

（一）构建虚拟孪生模型的关键参数与实现路径

虚拟孪生模型的构建需基于精确的设备几何结构、物理属性、运行逻辑与数据接口规范。关键参数包括变电站中各类设备（如断路器、互感器、隔离开关等）的工作状态、响应时间、功率流向与历史运行曲线。模型应具备实时性与可扩展性，并与现场设备通过高速通信链路保持同步更新。实现路径通常分为模型初始化、参数标定、数据驱动优化三个阶段。初始化阶段通过BIM、CAD与GIS技术构建三维模型；参数标定阶段结合设备手册与历史工况数据校正模型行为；数据驱动阶段引入实时数据流进行动态调整与智能仿真。虚拟孪生模型不仅是可视化的基础，更是实现预测控制与优化运行的核心载体^[6]。

（二）通信网络与信息集成平台的高效协同设计

为了实现数字孪生系统的高效运行，通信架构需具备低延迟、高带宽与高安全性特性。以IEC61850标准为基础，设计面向全站的智能电子设备（IED）通信架构，构建涵盖站控层、间隔层与过程层的分层通信体系。信息集成平台则采用分布式架构，通过边缘计算节点进行初步数据处理与筛选，缓解主服务器压力。数据交换使用OPCUA、MQTT等工业协议，保障各系统模块间的互联互通。平台应具备数据融合、存储、调用与可视化能力，并支持AI模型部署接口，提升智能控制决策效率。通信网络与平台设计协同运行，确保数据从采集到应用的闭环流动，构建起信息驱动的智能调度体系。^[7]

（三）智能控制单元的动态决策与执行机制

在数字孪生系统中，控制逻辑由静态规则逐步向基于模型的动态策略演化。智能控制单元通过持续接收虚拟模型与实际运行数据输入，实时评估电气设备运行状况与电网负载状态，结合深度神经网络或模糊控制算法实现最优控制路径选择。控制决策下达过程需考虑负荷分布、能量流动路径、故障定位与负载重构等多重因素。控制单元内嵌故障自愈机制与学习机制，可在系统变化后快速调整控制策略。执行机制则以高可靠性的执行器为基础，完成命令的精确实施，保证控制闭环完整。通过将控制决策与孪生模型动态匹配，实现了控制目标的最优性与执行动作的及时性。^[8]

四、数字孪生系统在智能变电站典型业务场景中的应用分析

（一）设备故障诊断与提前预警系统优化设计

设备故障诊断系统通过集成多类型传感器与实时监测数据，结合孪生模型的仿真结果，构建高维度特征库，应用聚类算法与贝叶斯网络识别异常演化路径。不同于传统的报警阈值触发机

制，该系统能识别出早期隐性故障征兆，实现从“事后处理”向“事前干预”转变。在故障形成初期，系统基于历史相似事件数据库进行模式匹配，预测潜在风险位置与发展趋势，并自动启动相应保护与隔离策略。通过可视化界面展示故障演变过程^[9]，辅助决策层判断应急方案优先级。优化后的预警系统响应时间更短、误报率更低，有效提升了变电站对复杂故障的处理效率。

（二）远程运维调度与状态自恢复机制实例解析

远程运维调度体系基于数字孪生模型构建精细化的设备运行图谱，使得运维控制指令可以依托虚拟环境进行预演与优化。系统通过动态数据监控与任务调度算法分配作业优先级，提升检修效率与响应速度。在实际应用中，当系统检测到运行状态异常，可自动分析故障类型与影响范围，生成最佳处置方案，并启动自恢复流程，实现故障隔离与负载重构。运维人员可远程操控虚拟模型验证控制效果，确保执行操作安全可靠。该机制降低了现场作业频率与安全风险，提升了系统稳定性与维护效率。

（三）典型电网突发状态下的应急联动控制应用

在突发负荷冲击或自然灾害等紧急情形下，数字孪生系统依托实时仿真能力，可快速评估电网扰动影响，并联动各关键设备完成动态调整。系统将突发状态下的应急预案与当前设备状态进行匹配，自动生成调控方案并进行多方案仿真对比，择优执行。通过联动控制模块，系统可自动完成断电、切换、保护装置启用等关键操作，实现快速应变。联动机制还可协同调度上级主网与下级配网资源，形成区域协同响应网络，保障局部系统的稳定运行与恢复能力，减少故障影响范围^[10]。

五、数字孪生驱动系统在智能变电站运行效果中的性能评价机制

（一）系统响应速度与预测准确率的对比分析

数字孪生驱动下的系统架构显著提升了对状态变化的感知速度与决策效率。依托实时数据流的快速处理与反馈机制，系统能够在异常初现阶段即做出响应，缩短从识别到处置的时间周期。预测模块则通过融合多源信息，提升状态变化趋势的预判能力，

增强运行安全冗余。与传统系统相比，预测结果更加精准、适应性更强，能够及时发现潜在故障隐患。响应速度与预测精度的同步提升，直接支撑了整个变电站运行的高可靠性和高效率，为后续功能模块提供坚实基础。

（二）运行能效指标与运维成本的量化评估

在系统运行过程中，数字孪生架构通过动态调控设备状态与负荷分配策略，有效降低了资源浪费与能量损耗。设备在最佳状态下运行，不仅延长使用寿命，也减少了频繁检修需求。系统对维护时机进行精准预测，提升了资源配置效率，缩减不必要的人工投入。平台的集中监控能力整合了多个运维环节，降低了运维成本构成的复杂度。长期来看，能效提升与维护优化将逐步显现效益，不仅体现在运行开销上，也体现于系统管理水平与稳定性的提升上。

（三）实际部署环境下的稳定性与扩展性检验

在实际部署中，系统需面对复杂电网环境、多设备协同与不确定工况。数字孪生平台通过模块化设计与自适应学习机制，增强了对多样场景的适配能力。在运行中即便遇到环境波动或硬件替换，系统仍能保持功能连续性与数据一致性。其开放式架构支持后续功能扩展与系统升级，便于引入新型设备与管理模块，满足未来电网技术发展需求。稳定运行能力保障了电网核心功能的持续性，而良好的扩展性也为智能变电站后续深化建设奠定基础。

六、结语

数字孪生技术为智能变电站的自动化系统设计提供了全新的发展路径，通过构建虚实融合的动态平台，实现了设备运行状态的精准感知、智能预测与自主控制，显著提升了系统的安全性与运行效率。面对传统系统存在的功能孤岛、信息滞后与集成难题，数字孪生以其高度的可视化、实时性与协同能力，构建了更具前瞻性、适应性的智能运维体系。未来，随着技术的不断深化与应用场景的拓展，数字孪生驱动的智能变电站将在电力系统智能化转型中发挥更加核心的作用。

参考文献

[1]杨庆,孔纲强,孔宪京,等.生成式人工智能驱动高等工程教育新生态的构建[J].高等建筑教育,2025,34(1).
[2]同珺,韩如成.智能变电站综合自动化系统设计与实现[J].电工技术,2016,(07):36-38.
[3]王新雷,唐磊,杨旭,等.数字孪生南水北调东线一期工程建设思路[J/OL].南水北调与水利科技(中英文),2025.
[4]陈泽旭.智能化技术在变电运维中的应用[J].电子技术,2025,54(05):336-337.
[5]孔鸿雁.基于数字化电力工程容量及线路布局设计方法研究[J].电力设备管理,2025,(05):251-253.
[6]李传明.数字孪生技术在输变电线路智能巡检中的应用研究[J].张江科技评论,2024,(08):72-74.
[7]王闯,任大伟,李彦澎,等.基于数字孪生的冷冻冷藏装备智能调控系统开发[J].制冷与空调,2023,23(12):85-90+96.
[8]张军六,刘珊,李瑞.数字孪生技术下输变电设备运行状态智能感知[J].计算机仿真,2023,40(12):123-127+144.
[9]蒋建华,田月伟,罗显跃,等.基于数字孪生模型的输变电设备多源异构数据边缘侧智能采筛方法[J].电工技术,2022,(24):95-98.
[10]李岚松,于森.电力运检智能化开启供电保障“数字时代”[N].盘锦日报,2022-07-22(005).

论如何提升风电场35kV系统运行可靠性

胡文超, 薛青园*

华润电力蒙东新能源公司, 内蒙古 锡林郭勒盟 026000

DOI:10.61369/EPTSM.2025060011

摘 要 : 随着我国风电装机规模的不断扩大, 风电场运行可靠性对电网的影响日益显著。35kV系统作为风电场内部的关键环节, 其运行稳定性直接关系到整个风电场的可靠性。本文结合多个实际故障案例, 从技术手段、管理方法和优化措施等方面, 系统分析了提升35kV系统运行可靠性的具体方法, 为风电场的运维管理提供了实践参考。

关 键 词 : 风电场; 集电线路; 可靠性; 技术监督

On How to Improve the Operational Reliability of 35kV Systems in Wind Farms

Hu Wenchao, Xue Qingyuan*

China Resources Power Mengdong New Energy Company, Xilingol League, Inner Mongolia 026000

Abstract : With the continuous expansion of wind power installed capacity in China, the impact of wind farm operational reliability on the power grid has become increasingly significant. As a key link within wind farms, the operational stability of the 35kV system is directly related to the reliability of the entire wind farm. Based on multiple actual fault cases, this paper systematically analyzes specific methods to improve the operational reliability of the 35kV system from aspects such as technical means, management methods, and optimization measures, providing practical references for the operation and maintenance management of wind farms.

Keywords : wind farm; collector line; reliability; technical supervision

前言

近年来, 我国风力发电行业保持快速发展, 已成为全球风电装机规模最大的国家之一。在政策支持、技术进步和市场机制的共同推动下, 风电行业正朝着规模化、深远海和智能化方向迈进。然而, 随着风电装机占比的提升, 风电场运行可靠性对电网的影响日益凸显。35kV系统作为风电场内部的核心组成部分, 设备种类繁多、结构复杂, 同时也是故障高发区域。因此, 提升35kV系统的运行稳定性与可靠性, 是保障风电场整体运行可靠性的关键。

本文结合近年来风力发电场35kV系统的典型故障案例, 从母线系统、集电线路系统、无功补偿装置以及保护与自动化装置等方面, 探讨提升系统运行可靠性的技术手段和管理方法, 为风电场的运维工作提供借鉴。

一、35kV母线系统

(一) 案例分析

某风电场投运初期, 连续多次发生35kV母线PT高压熔断器熔断故障, 导致35kV母线电压无法正常监测, 多次被迫停运35kV母线检查更换PT, 造成了大量的电量损失。

故障现象: 升压站两段35kV母线PT一次保险频繁熔断, 共计发生6次故障(两套母线PT一次保险各熔断3次)。根据故障现象及数据分析, 每套PT一次保险两次熔断间隔时间约两周左

右, 每次熔断的相别不固定, 过程均为慢熔(从电压开始跌落到彻底熔断时间从2小时到6小时不等), 且熔断器熔断前大多有倒闸操作^[1]。

原因分析: 经排查, 可能原因包括: ①系统PT二次回路存在多点接地; ②二次回路短路导致保险熔断; ③35kV母线一次消谐装置质量不达标, 影响PT一次回路运行; ④升压站地网接地电阻过大, 干扰PT二次回路负荷分配; ⑤操作过电压引发35kV系统谐振, 产生暂态过电流; ⑥二次负载过大, 导致熔断器额定电流选型不匹配;

作者简介: 胡文超(1986-), 男, 大学本科, 工程师, 研究方向: 主要从事新能源场站运行与维护工作。

通讯作者: 薛青园(1995-), 男, 大学本科, 助理工程师, 研究方向: 主要从事新能源场站运行与维护工作。

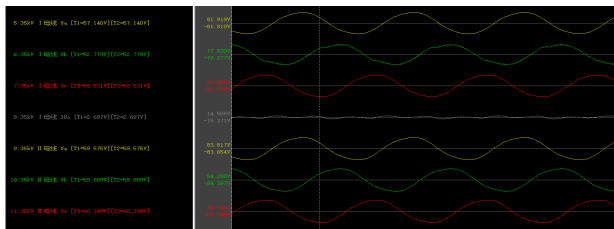


图1 PT保险运行异常初期的故障波形

故障录波显示，从B相波形开始畸变（12:04）到B相无电压（15:48），历时3.5小时，期间波形畸变逐渐加剧。3月10日更换熔断器后，3月12日、4月2日、4月18日仍发生电压突变量启动，但突变波形均在3个周波内恢复正常^[2]。

处理措施：①PT二次回路接地在电压转接屏一点接地，将开关柜原有内部接线多余的接地线拆除；②开关柜厂家到场检查PT柜消谐电阻器是否被击穿或有其他失效形式；③通过电能质量监测装置查看结合谐波测试仪确定系统电能质量无异常^[3]；④对母线PT测试伏安特性确定PT性能良好；⑤将两条母线PT一次保险由额定电流0.5A的保险更换为额定电流为1A的保险；

结论：T高压保险的额定电流选型不匹配。0.5A熔断器抗电压冲击能力不足，在经过几次冲击后，性能下降劣化，直至熔断。1A熔断器抗电压冲击能力强，在经过几次冲击后，性能未下降。更换了额定电流为1A的保险后，该风电场再未发生35kV母线PT一次保险再次熔断的情况。经长期盘查观察，35kV母线电压稳定正常，未出现零序电压的较大波动情况^[4]。

此外，封闭式共箱母线受潮易引发局放过热或局部发热，需做好两项防护：①强化封闭母线箱顶部的防雨、防尘措施；②优化底部排水孔洞设计，确保水汽及时排出。

二、集电线路系统

风电场35kV集电线路多采用架空线路设计（受投资成本约束），仅在升压站终端、风机终端、钻越外部线路或道路桥梁处采用电缆连接。由于线路多分布在高山大岭、易受雨雪冰冻、大风、鸟害等自然因素影响，成为35kV系统中故障最高发的部分。历史故障记录显示，集电线路跳闸的主要原因包括雷击、风摆、异物、鸟害、覆冰、避雷器故障、绝缘子及跌落开关失效、引线松脱等^[5]。以下结合案例介绍具体治理方法：

（一）雷击故障治理

某风电场35kV集电线路位于高山大岭之间，所处区域为多雷区，雷击频繁导致线路跳闸，损坏避雷器、瓷绝缘子等设备。



图2 雷击放电

治理措施：①主动防雷：在海拔较高或易遭雷击的区域，参考国网线路杆塔防雷标准，增设适当数量的避雷针接闪器，保护绝缘子免受直击雷侵害；在关键位置安装通流容量较大的避雷器，加速雷电流泄放，同时防范感应雷、绕击雷；

②改善接地：改善集电线路杆塔接地性能，对超过 30Ω 的杆塔，采用外延法、深井法等改造接地装置，辅以接地模块、垂直接地极、降阻剂等材料降低接地电阻。重点改造29基增设接闪器的杆塔，通过增加接地降阻模块、延长接地网敷设长度、更换回填土等方式优化接地性能。^[6]

（二）鸟害治理

某风电场地处内蒙古草原深处，线路区域树木稀少，鸟类常以杆塔为栖息点。大型鸟类落于引下线、跌落开关等部位易造成短路接地；春季鸟类筑巢时，金属丝掉落至风机终端塔引下线、避雷器引线等处，也会引发接地短路跳闸。

治理措施：①差异化处理鸟巢：对不影响运行的鸟巢（如不在导线正上方、非终端塔且架构简单）不予拆除，避免刺激鸟类频繁筑巢；②强化绝缘防护：在易受鸟害的线路部件（如引下线、跌落开关平台）加装绝缘护套，防止鸟类活动引发短路。^[7]

（三）避雷器故障治理

某风电场在雷雨天气中，一集电线路遭雷击导致避雷器损坏击穿，引发单相接地短路，零序一段保护动作跳闸。

治理措施：①严把设备质量关，选用出厂检验合格的避雷器，确保各项参数符合铭牌及说明书要求；②按《DL/T 596-2021 电力设备预防性试验规程》定期开展检测，及时发现潜在缺陷；③若现有避雷器无法满足运行需求，更换为标称放电电流更大、方波通流容量更强的产品；有条件时加装避雷器脱离器，提升线路运行可靠性。

（四）其他常见问题治理

引线脱落：①避雷器导引线采用带开口销的螺栓固定，防止松动；②避雷器接地引线检修时确保螺栓紧固到位，缩短引线长度并在中间用尼龙扎带固定，避免松脱后与导线接触放电；

绝缘子损坏：①外观存在裂纹、缺失的瓷绝缘子立即更换；②年度技术监督中开展零值测试，对绝缘下降的绝缘子及时更换；

风摆及异物：①档距较大的导线处安装相间间隔棒，防止风摆短路；②转角塔跳引线处采用悬垂绝缘子带重锤设计，减少风摆幅度；

覆冰：①导线覆冰采用机器人除冰；②终端塔绝缘子、引下线等结构复杂部位，人工使用除冰器及时除冰，避免覆冰引发闪络。^[8]

三、无功补偿装置

（一）SVG雷击损坏故障

2024年6月27日，某风电场35kV系统遭雷击导致集电线路跳闸，雷电反击至SVG控制柜，造成多器件损坏。

分析过程：①#2 SVG功率控制柜中，24V开关电源模块、

PLC控制器、SVG主控板、3块分相通讯控制板明显损坏；②排查发现，柜内24V开关电源模块接地端子、#2SVG主控板、公共端接地引线均未接地；③柜内220VDC控制电源无防雷浪涌保护器等防雷设计。^[9]

结论：雷击浪涌通过主接地网反击侵入二次供电电源，经开关电源串入控制系统及PLC；浪涌通过二次电源线释放时，导致各供电部件不同程度损坏，具体串扰路径示意图如下所示。

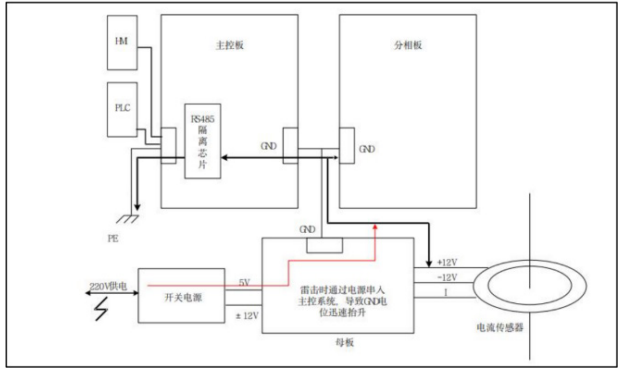


图3 串扰路径

处理措施：更换SVG控制柜内损坏的元器件；利用停电机会在直流电源进线处加装防雷模块，强化二次供电电源的雷击浪涌防护。^[10]

（二）SVG过压跳闸故障

2025年6月12日，某风电场#6风机线316开关因零序过流Ⅰ段动作跳闸，5秒后35kV #1 SVG 031开关跳闸。

分析过程：①SVG本体无元件损坏，链节通讯故障因母排失压触发，合闸后恢复正常；②水冷系统及功率模块测试无异常；③巡视发现#6风机线E19铁塔A相避雷器因雷击击穿接地；

结论：①雷雨天气中，雷击导致A相避雷器损坏接地，35kV I母A相电压降低，B、C相电压升高并叠加雷电波峰；②B、C相高电压瞬时涌入#1SVG，导致两相直流总电压平均值过压；③因SVG链节IGBT直流侧电容无法短时间释放过电压，6秒后触发“单相直流总电压平均值超限跳闸”，导致#1SVG本体跳闸并联跳031开关。

处理措施：①立即更换损坏的避雷器，并检查附近杆塔避雷器状态；②每年雷雨季节前，委托专业单位检测线路杆塔防雷设施，处理接地电阻不合格及隐患设施；③年度预防性试验中，按《DL/T 593电气设备预防性试验规程》对35kV线路避雷器开展检测，及时更换泄流值不合格产品。

（三）SVG故障原因总结

SVG常见故障原因包括冷却系统失电、高温、灰尘堆积、雷击、功率模块故障、连接变压器故障等。日常运维需重点关注：①冷却系统电源（取自站用电400V母线）稳定性，避免倒闸或失电导致跳闸；②SVG室（舱）内温度控制，确保空调正常运行，防止模块高温告警；③年度检修中检测功率模块、连接变压器状态，清理舱内灰尘。

四、保护及自动化装置

（一）保护拒动与越级跳闸故障

2025年6月12日，某风电场遭雷击，35kV #2母线所带开关全部跳闸。

事件经过：①05时09分32秒，#6风电线路321间隔保护整组启动，6毫秒后零序过流Ⅰ段保护动作，跳开321开关；②10毫秒后，#2接地变832间隔保护整组启动，607毫秒后零流Ⅰ段1时限保护动作，跳开832开关，并联动跳35kV #2母线上所有开关（322、323等）；③现场巡视及集电线路绝缘遥测均未发现明显异常；④排查发现，#9风电线路电流异常，保护装置定值区号设置错误（定值单为1区，实际为2区）；⑤发现#9风电线路SJ-013杆塔A相避雷器伞裙击穿、破损。

原因分析：

1）#6风电线路跳闸：雷暴天气中，感应雷电导致#6风电线路A相电流突变，三相不平衡产生零序电流（最大0.747A），触发零序过流Ⅰ段保护动作。故障时35kV #2母线上电压瞬时值异常升高（A相183.013V、B相234.167V、C相150.79V），印证了雷电干扰的影响。

2）#2接地变跳闸：①保护装置动作正确（动作值0.517A）；②保护电流端子排（11D1-11D4）被短封，导致保护装置及故障录波无保护电流；③接地变零序电流取自高压侧，不符合《DL/T 1631-2016并网风电场继电保护配置及整定技术规范》第5.8.7条“应取自接地变中性点零序电流互感器”的要求。

3）#9风电线路异常：①故障前三相电流平衡（A相0.104kA、B相0.105kA、C相0.105kA），故障后A相降至0.048kA，三相不平衡电流0.056kA，与接地变零序电流（0.055kA）基本一致，判定为A相接地；②#9风电线路保护装置定值区在2区（零序过流1段定值4A，控制字未投入），故障电流未达定值，导致保护拒动；③故障电流长时间存在，引发#2接地变保护越级动作。

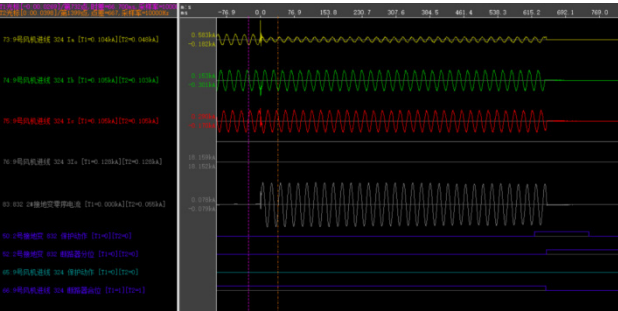


图4 故障录波波形

结论：①#9风电线路A相避雷器故障接地，因保护装置定值区设置错误（2区），保护拒动；②#2接地变保护正确动作，联跳逻辑正常；③存在故障录波通道损坏（#9风电线路零序电流未录波）、保护CT短封、定值区设置错误等问题。

处理措施：①开展全站定值核查，确保与定值单一致，同步检查二次接线、保护压板缺陷；②组织运维人员学习继电保护装置操作，结合备用装置及说明书开展实操培训；③规范继电保护

设备操作：非专业人员禁止操作，专业人员工作时需1人操作1人监护，密码操作需向厂家确认，并将要求纳入管理制度；④校验#2母线所带间隔保护装置，年度预防性试验按规程开展继电保护校验；⑤年度试验中检测35kV线路避雷器，更换不合格产品；⑥排查故障录波通道与配置，年度试验中开展录波校验。

五、结论

风力发电场35kV系统是一个较为复杂的系统，若想提升系统

的运行可靠性，首先对照电气设备预防性试验规程、风电场运行规程、检修规程、以及各类技术标准，结合以往的经验教训对系统内母线系统、集电线路系统、无功补偿或接地变系统、保护及自动化装置等所有设备进行系统科学的维护保养，例行开展充分的技术监督工作。其次，要不断培养运维人员的技术能力水平，开展各类培训和技术比武，使人员不断增进对所维护设备的熟悉程度。

参考文献

-
- [1] 郑晶晶, 杨勇, 邢延东, 梁福波. 风电场35kV系统优化设计及稳定运行技术探讨 [J]. 电网与清洁能源, 2013, 29 (5): 21-25.
 - [2] 国家能源局. 电力设备预防性试验规程: DL/T 596-2021[S]. 北京: 中国电力出版社, 2021.
 - [3] 国家能源局. 并网风电场继电保护配置及整定技术规范: DL/T 1631-2016[S]. 北京: 中国电力出版社, 2016.
 - [4] 国家能源局. 风力风电场运行规程: DL/T 666-2012[S]. 北京: 中国电力出版社, 2012.
 - [5] 文玉玲, 晁勤, 吐尔逊·依布拉克. 风电场对电网继电保护的影响 [J]. 电网技术, 2008, (14): 15-18.
 - [6] 席晶, 李海燕, 孔庆东. 风电场投切对地区电网电压的影响 [J]. 电网技术, 2008, (10): 58-62.
 - [7] 戴慧珠, 王伟胜, 迟永宁. 风电场接入电力系统研究的新进展 (英文)[J]. 电网技术, 2007, (20): 16-23.
 - [8] 周丽霞, 尹忠东, 郑立. 配网PT铁磁谐振机理与抑制的试验研究 [J]. 电工技术学报, 2007, (05): 153-158.
 - [9] 李渝, 范高峰, 李庆, 等. 达坂城风电接入系统对新疆电网电能质量的影响 [J]. 电网技术, 2007, (06): 88-92.
 - [10] 雷亚洲, 王伟胜, 印永华, 等. 风电对电力系统运行的价值分析 [J]. 电网技术, 2002, (05): 10-14.

电力市场化交易电费风险防控体系建设与应用

罗东江, 罗粤辉, 李锋

国网江西省电力有限公司新余供电分公司, 江西 新余 338025

DOI:10.61369/EPTSM.2025060016

摘 要 : 随着电力市场化改革的深入推进, 电力市场交易的复杂性和不确定性日益增加, 电费风险成为电力市场参与者面临的重要挑战。探讨电力市场化交易电费风险防控体系的建设与应用, 通过分析电力市场化交易中的电费风险类型, 如价格波动风险、电量偏差风险、信用风险等, 构建全面的风险防控体系, 包括风险识别、评估、预警和应对策略等环节。同时, 结合实际案例, 阐述风险防控体系在降低电费风险、保障市场参与者利益方面的应用效果, 为电力市场的稳定运行和可持续发展提供理论支持和实践参考。

关 键 词 : 电力市场化交易; 电费风险; 风险防控体系; 价格波动; 信用风险

Construction and Application of Electricity Fee Risk Prevention and Control System in Market-Oriented Electricity Trading

Luo Dongjiang, Luo Yuehui, Li Feng

State Grid Jiangxi Electric Power Co., Ltd. Xinyu Power Supply Branch, Xinyu, Jiangxi 338025

Abstract : With the deepening of power market reforms, the complexity and uncertainty of electricity market transactions have increased significantly, making electricity cost risks a critical challenge for market participants. This study explores the development and application of risk prevention systems in electricity market transactions. By analyzing various risk types such as price fluctuation risks, quantity deviation risks, and credit risks, we establish a comprehensive risk management framework encompassing risk identification, assessment, early warning, and response strategies. Through practical case studies, this research demonstrates how these risk prevention mechanisms effectively mitigate electricity costs and protect market participants' interests, providing theoretical support and practical references for ensuring stable operation and sustainable development of the power market.

Keywords : electricity market transactions; electricity cost risks; risk prevention system; price fluctuations; credit risks

引言

电力作为现代社会的重要能源, 其市场化交易的发展对于提高能源资源配置效率、促进电力行业可持续发展具有重要意义。然而, 电力市场化交易过程中, 由于市场供需关系、价格机制、政策法规等因素的影响, 电费风险不断涌现, 给发电企业、售电公司、电力用户等市场参与者带来了诸多不确定性。为了有效应对电费风险, 保障市场参与者的合法权益, 建立健全电力市场化交易电费风险防控体系显得尤为迫切。通过构建科学合理的风险防控体系, 能够及时识别、评估和预警电费风险, 并采取有效的应对措施, 降低风险损失, 促进电力市场的平稳运行。

一、电力市场化交易电费风险类型

(一) 价格波动风险

1. 市场供需变化

电力市场的供需关系是影响电价的关键因素。当电力供应大于需求时, 电价往往会下降; 反之, 当电力需求大于供应时, 电

价则会上涨。例如, 在夏季高温或冬季严寒时期, 居民和企业的用电需求大幅增加, 若发电能力无法及时满足需求, 就会导致电价上升。而在一些新能源大发的时段, 如风电、光伏等可再生能源发电充足时, 电力供应可能会超过需求, 使得电价出现下跌。^[1]

2. 燃料价格变动

对于传统的火电企业来说, 燃料成本在发电成本中占据较大

比重。以煤炭为例，煤炭价格的波动会直接影响火电企业的发电成本，进而影响上网电价。如果煤炭价格上涨，火电企业为了保证一定的利润空间，会提高上网电价；反之，煤炭价格下降，上网电价也可能随之降低。这种因燃料价格变动引起的电价波动，给电力市场交易中的电费结算带来了不确定性。

3. 政策调整影响

政府的电力政策对电价有着重要的调控作用。政府出台的新能源补贴政策、煤电价格联动政策、输配电价改革政策等，都会对电力市场价格产生影响。当新能源补贴政策发生变化时，新能源发电企业的收益和上网电价会相应改变；输配电价改革政策的实施，会调整电网企业的输配电费用，从而间接影响终端用户的电价^[2]。

（二）电量偏差风险

1. 预测误差

电力市场参与者在进行交易时，需要对未来的用电量或发电量进行预测。然而，由于电力需求受到多种因素的影响，如经济发展、气候条件、产业结构调整等，使得电量预测存在一定的难度和误差。如果发电企业对发电量预测过高，而实际发电能力不足，就会出现电量偏差，导致无法按照合同约定供应电力，需要支付相应的偏差考核费用；反之，若对发电量预测过低，可能会造成发电设备闲置，影响企业收益。

2. 负荷变化

用户的用电负荷并非一成不变，而是随时会发生变化。特别是一些工业用户，其生产过程中的用电负荷可能会因为生产计划调整、设备运行状况等因素而波动。如果售电公司未能准确把握用户的负荷变化情况，在与发电企业签订购电合同时，就可能出现电量偏差，影响电费的结算和企业的经济效益。^[3]

（三）信用风险

1. 交易对手违约

在电力市场化交易中，交易双方可能会因为各种原因无法履行合同义务，导致违约情况的发生。比如，发电企业可能由于设备故障、燃料供应不足等原因，无法按时按量供应电力；售电公司可能因为资金周转困难，无法按时支付购电费用。这种交易对手的违约行为，会给另一方带来经济损失，增加电费回收的风险^[4]。

2. 市场主体信用评级下降

信用评级是衡量市场主体信用状况的重要指标。如果某个市场主体的信用评级下降，说明其信用风险增加，可能会影响到与其他市场主体的交易。例如，一家售电公司的信用评级被下调，发电企业可能会对其产生信任危机，在交易时要求提高预付款比例或采取其他更为严格的交易条件，这会增加售电公司的运营成本 and 资金压力，同时也可能影响到其与用户的合作关系，导致电费风险的上升。

二、电力市场化交易电费风险防控体系建设

（一）风险识别

1. 构建风险识别指标体系

建立一套全面、科学的风险识别指标体系是准确识别电费风

险的基础。该指标体系应涵盖市场价格、电量、信用等多个方面。在市场价格方面，可以包括实时电价、中长期电价、电价波动率等指标；电量方面，可设置发电量预测偏差率、用电量偏差率、负荷波动率等指标；信用方面，涵盖交易对手的信用评级、违约记录、财务状况指标等^[5]。通过对这些指标的实时监测和分析，能够及时发现潜在的电费风险因素。

2. 运用大数据与人工智能技术

随着信息技术的飞速发展，大数据和人工智能技术在风险识别中发挥着越来越重要的作用。利用大数据技术，可以收集和整合电力市场交易中的海量数据，包括历史电价数据、电量数据、用户信息、市场主体信用数据等。然后，通过人工智能算法，如机器学习、深度学习等，对这些数据进行挖掘和分析，识别出数据中的潜在规律和异常模式，从而发现可能存在的电费风险。例如，通过机器学习算法对历史电价数据进行训练，建立电价预测模型，当预测结果与实际电价出现较大偏差时，及时发出风险预警。^[6]

3. 专家经验判断与实地调研

除了依靠技术手段，专家经验判断和实地调研也是风险识别的重要方法。邀请电力市场领域的专家，根据他们的专业知识和丰富经验，对市场交易中的各种情况进行分析和判断，识别潜在的风险。同时，开展实地调研，深入了解发电企业、售电公司、电力用户等市场参与者的实际运营情况，包括设备运行状况、生产计划安排、财务状况等，从实际层面发现可能影响电费的风险因素。将专家经验判断和实地调研结果与技术分析相结合，能够更全面、准确地识别电费风险^[7]。

（二）风险评估

1. 确定风险评估方法

选择合适的风险评估方法是准确评估电费风险程度的关键。常见的风险评估方法有层次分析法、模糊综合评价法、蒙特卡洛模拟法等。层次分析法可以将复杂的风险问题分解为多个层次，通过两两比较确定各风险因素的相对重要性，从而计算出风险的综合评价结果；模糊综合评价法适用于处理具有模糊性的风险评估问题，将定性评价和定量评价相结合，对风险进行全面评估；蒙特卡洛模拟法则通过随机模拟的方式，考虑多种风险因素的不确定性，对风险进行量化评估。在实际应用中，可根据电力市场化交易的特点和数据可用性，选择一种或多种方法相结合进行风险评估^[8]。

2. 量化风险评估指标

对风险识别阶段确定的各项指标进行量化处理，以便准确评估风险程度。例如，对于价格波动风险，可以通过计算电价的标准差或变异系数来衡量价格的波动程度；对于电量偏差风险，将发电量或用电量的预测偏差率进行量化计算；信用风险方面，根据信用评级的等级设定相应的量化分值，违约记录可通过违约次数、违约金额等指标进行量化。通过量化风险评估指标，能够使风险评估结果更加客观、准确，为后续的风险应对提供科学依据^[9]。

3. 风险等级划分

根据风险评估结果，将电费风险划分为不同的等级，如低风险、中风险、高风险等。制定明确的风险等级划分标准，例如，

当风险评估分值在某个范围内时,判定为低风险,表明风险对电费的影响较小,可采取常规的风险管理措施;若分值处于另一个范围,则判定为中风险,需要引起一定的重视,采取针对性的风险应对策略;当分值超过某个阈值时,判定为高风险,此时风险对电费的影响较大,需立即启动应急预案,采取紧急措施降低风险损失。通过风险等级划分,能够使市场参与者更直观地了解风险状况,便于采取相应的管理措施。

(三) 风险预警

1. 设定风险预警阈值

根据风险评估结果和风险等级划分标准,为各项风险指标设定合理的预警阈值。预警阈值是风险预警的触发点,当风险指标达到或超过预警阈值时,系统会自动发出预警信号。例如,对于电价波动风险,可设定当电价波动率超过一定百分比时,发出预警;电量偏差风险方面,当发电量或用电量偏差率达到某个数值时,启动预警机制。预警阈值的设定要既能够及时发现潜在风险,又不能过于敏感,导致频繁发出不必要的预警信息^[10]。

2. 多渠道预警信息发布

建立多渠道的预警信息发布机制,确保预警信息能够及时、准确地传达给相关市场参与者。预警信息可通过短信、邮件、电力市场交易平台公告、专门的风险管理软件等多种方式发布。对于高风险预警信息,要采取紧急通知的方式,如电话通知等,确保相关人员能够第一时间收到并采取应对措施。同时,建立预警信息反馈机制,及时了解市场参与者对预警信息的接收和处理情况,以便对预警工作进行优化和改进。

(四) 风险应对策略

1. 价格风险应对

对于价格波动风险,市场参与者可以采取多种应对策略。一是签订长期合同,发电企业与售电公司或电力用户签订中长期购电合同,约定固定的电价或价格调整机制,以锁定未来一段时间的电费价格,降低价格波动风险。二是运用金融衍生工具,如电力期货、期权、差价合约等进行套期保值。通过在金融市场上进行与现货市场相反的操作,当现货市场价格波动导致电费成本增加时,金融市场的收益可以弥补损失,反之亦然。三是优化发电结构,增加可再生能源发电比例,减少对传统化石能源的依赖,降低因燃料价格波动对电价的影响。

2. 电量风险应对

为应对电量偏差风险,首先要提高电量预测的准确性。采用先进的预测技术和方法,结合大数据分析,充分考虑各种影响电量的因素,如天气、经济形势、用户用电习惯等,提高预测精度。其次,建立灵活的发电和用电调节机制。发电企业加强设备维护和管理,提高发电设备的可靠性和灵活性,能够根据市场需求及时调整发电量;电力用户优化用电方式,实施需求侧管理,如采用智能电表、合理安排生产时间等,降低用电负荷的不确定性。此外,还可以通过与其他市场参与者签订电量互济协议,当出现电量偏差时,相互支援,减少偏差考核费用。

3. 信用风险应对

防范信用风险,一是建立完善的信用评级体系,对市场参与者的信用状况进行全面、客观的评估,根据信用评级结果选择交易对手,并采取不同的交易策略。二是加强合同管理,在合同中明确双方的权利和义务,特别是违约责任条款,一旦出现违约情况,能够依据合同进行索赔,降低损失。三是建立信用风险预警机制,实时监控交易对手的信用状况,当发现信用风险上升时,及时采取措施,如提前终止合同、要求增加担保等。

三、未来发展趋势

随着电力市场化改革的不断深入和新型电力系统的建设,电力市场交易将更加复杂多样,电费风险也将呈现出新的特点和变化趋势。未来,需要进一步加强对电费风险的研究和分析,不断完善风险防控体系。通过不断努力,构建更加完善、高效的电力市场化交易电费风险防控体系,为电力行业的可持续发展提供有力保障。

四、结论

价格波动风险、电量偏差风险和信用风险是电力市场化交易中主要的电费风险类型,通过科学合理的风险防控体系建设,可以及时发现和评估这些风险,采取有效的应对措施,降低风险损失,保障市场参与者的利益。风险防控体系的建设需要综合运用多种技术和方法,结合市场实际情况,不断优化和完善。

参考文献

- [1] 邓子文. 电费回收风险防控之我见 [J]. 中国电力企业管理, 2023(04).
- [2] 刘萍, 陈涛, 钟甜甜, 经菁. 电力市场化交易电费风险防控体系建设与应用 [J]. 电工技术, 2023(14).
- [3] 樊芮, 卿曦. 基于电力大数据的企业信用评价及电费回收风险防控 [J]. 大众用电, 2021(05).
- [4] 汤璟瑛, 杨英. 电费风险防控及新型交费方式 [J]. 大众用电, 2024(04).
- [5] 张格, 杨迎旗, 张志辉. 新形势下电费风险防控策略研究——建立“一户一策”电费风险防控体系 [J]. 企业改革与管理, 2016(04).
- [6] 严秀梅. 关于电力营销过程中电费回收风险防控手段探究 [J]. 电子测试, 2017(02).
- [7] 刘守斌, 白帆. 新形势下电费回收风险防控 [J]. 中国电力企业管理, 2018(17).
- [8] 胡志军. 电费安全风险防控的新举措 [J]. 中国电力企业管理, 2013(04).
- [9] 许子芸, 闫博, 文科. 电费回收“一三五”管理法 [J]. 中国电力企业管理, 2014(05).
- [10] 江元, 杨波, 王麒, 赵东来, 武悦. 基于用户特征的电费回收分析及策略——电力知识化转型工程实践 [J]. 知识管理论坛, 2020(03).

电厂电力系统自动化可靠性提升路径

于正

大唐南京发电厂，江苏 南京 210059

DOI:10.61369/EPTSM.2025060017

摘 要： 伴随电力行业向智能化、数字化转型，电厂电力系统自动化已成为保障电力平稳供应的基础条件。但受复杂运行环境、设备老化及技术迭代等因素的影响，导致自动化系统可靠性面对诸多挑战，一旦问题没有得到有效解决和处理，将直接影响电厂安全高效能运行与电力系统整体稳定性。基于此，本文从电厂电力系统自动化可靠性提升的必要性出发，提出优化设备选型与运维、完善监控预警体系、健全管理机制及加强人员技术培训等四条具体提升路径，希望为电厂提升电力系统自动化可靠性提供参考。

关 键 词： 电厂电力系统；自动化；可靠性；提升路径

Reliability Improvement Path of Power Plant Power System Automation

Yu Zheng

Datang Nanjing Power Plant, Nanjing, Jiangsu 210059

Abstract： As the power industry undergoes intelligent and digital transformation, power plant automation has become a fundamental requirement for ensuring stable electricity supply. However, challenges such as complex operational environments, aging equipment, and technological iterations have led to reliability issues in automation systems. If not properly addressed, these problems could directly impact the safe and efficient operation of power plants and the overall stability of the power system. To address this, this paper proposes four concrete improvement pathways—optimizing equipment selection and maintenance, enhancing monitoring and early warning systems, refining management mechanisms, and strengthening technical training—for enhancing the reliability of power plant automation. These measures aim to provide actionable references for improving automation reliability in power plants.

Keywords： power plant power system; automation; reliability; improvement path

引言

在社会经济高速发展背景下，各行各业对电力依赖水平持续加深，从而对电力供应的稳定性、连续性提出更高要求。电厂作为电力生产的重要场所，其电力系统自动化水平将直接决定电力生产效能和供电质量。近些年伴随自动化技术在电厂中的广泛应用，系统结构日益复杂涉及的设备、软件及通信链路增多，可靠性问题逐渐凸显，一旦自动化系统发生故障，不但会导致电厂生产中断，造成巨大经济损失，而且还会诱发区域性停电等问题，影响社会正常秩序。所以深入分析电厂电力系统自动化可靠性提升的必要性，探索科学有效的提升路径，成为当前电厂运营管理与电力行业发展的重要课题，对保障电力系统安全平稳运行具有一定的现实意义。

一、电厂电力系统自动化可靠性提升必要性分析

（一）保障电厂安全稳定运行的核心需求

电厂电力系统自动化涵盖发电、输电、配电等多个环节，其可靠性直接关系到电厂的安全运行。对于电厂电力自动化系统而言，对锅炉、汽轮机等重点设备实施自动控制，以及电网负荷自动调节，每一个环节的平稳运行都依赖于自动化系统的正常工

作。换言之若自动化系统发生可靠性问题如控制信号传输中断、设备自动调节失效，则会导致设备超温、超压运行引发设备损坏甚至爆炸、火灾等安全事故。例如某火电厂曾因自动化控制系统中的 PLC 模块故障导致锅炉水位无法自动调节，最后引发锅炉缺水停机不仅仅造成设备维修成本提升，还导致电厂停产 12 小时影响区域电力供应。由此可见提升自动化系统可靠性是防止安全事故、保障电厂持续平稳运行的基础前提，只有确保自动化系统各

环节平稳可靠能力为电厂安全生产筑牢防线。

（二）降低经济损失与提升运营效益的关键手段

基于实际情况分析，电厂电力系统自动化故障会直接导致生产中断带来显著的经济损失，继而扩大运维成本降低运营效益。从直接经济损失分析，根据行业统计数据，大型火电厂每停机一小时因发电量减少造成的直接经济损失可达50万-100万元。比如某水电厂因自动化系统故障导致机组停机，每小时经济损失约20万-30万元。从间接成本来看，故障后设备维修、备件更换以及因供电中断对下游企业赔偿费用，继而进一步加剧经济压力^[1]。以下为某地区不同类型电厂自动化系统故障导致的经济损失统计（如表1所示），从数据可清晰地看出，自动化系统可靠性不足将会对电厂经济效益负面影响。经过优化和完善自动化系统运维策略，能够进一步提升自动化系统可靠性，能够减少故障发生频率，缩短故障修复时间降低停机损失和运维成本。例如某电厂将自动化系统年均故障次数从15次降至5次，年均停机时间从80小时缩短至25小时每年减少经济损失约4000万元显著提升电厂运营效益，所以提升自动化可靠性是电厂控制成本、提升经济效益核心手段。

表1：某地区不同类型电厂自动化系统故障经济损失统计

电厂类型	年均故障次数（次）	年均停机时间（小时）	年均直接经济损失（万元）	年均间接经济损失（万元）
火电厂	12-18	60-90	3000-6000	800-1500
水电厂	8-12	40-60	800-1800	300-800
风电厂	15-20	50-70	500-1200	200-500

（三）满足社会用电需求与维护公共利益的重要保障

电力是基础能源，与居民生活、工业生产、公共服务等各领域都息息相关，电厂电力系统自动化可靠性将会直接影响电力供应的连续性和稳定性，关系社会公共利益^[2]。随着城市化发展，居民生活用电日趋增多，夏季空调负荷、冬季供暖负荷高峰阶段如果电厂自动化系统发生故障引发断电、影响居民生活甚至导致电梯停运、供水供电中断、给广大居民生活造成不便。同时在工业方面，精密制造、数据中心等对电力供应连续性有着非常高的要求，电压波动或者断电会导致生产设备损坏、数据丢失给企业造成巨大的损失，比如2023年某数据中心上游电厂自动化发生故障引起断电2小时直接造成数据丢失、业务中断、损失超2000万元、大量互联网用户无法正常服务。再者医院、交通枢纽等公共服务场所因电厂自动化发生故障导致断电、将严重影响医疗救援、交通调度等公共服务领域、影响群众生命和财产安全。因此提升电厂电力系统自动化可靠性、保障社会用电需求、维护公共利益将会对保障社会正常秩序起到非常重要的作用。

二、电厂电力系统自动化可靠性提升路径

（一）优化设备选型，强化运维管理

设备是电厂电力系统自动化得以实现的基础构成内容，科学设备选型和规范运维管理是提升系统可靠性的首要路径。在设备选型阶段，电厂需结合自身实际运行环境跟负荷需求，优先选择技术成熟、性能平稳、具有良好行业口碑设备品牌和型号^[3]。比

如在选择自动化控制系统中的DCS（集散控制系统）时，电厂应对比各类厂商产品的平均无故障工作时间（MTBF），优先选择MTBF大于10万小时产品考量设备的抗干扰能力、兼容性及后期升级潜力。某火电厂在2022年自动化系统改造中经过对比A、B、C三家厂商的DCS产品（如表2所示）最终选择MTBF更高、抗干扰能力更强的A厂商产品，改造后系统故障发生率较改造前降低60%。而在运维管理方面则需奠定全生命周期运维体系，制定具体的设备巡检计划，定期对自动化设备做好性能检测与维护工作；对传感器、执行器等关键部件，每月实行一次精度校准和状态检查；对服务器、通信设备每季度实行一次硬件检测与软件升级。与此同时可利用物联网技术，创建设备状态监测系统，实时采集设备运行数据经过数据分析提前预判设备故障风险，在这种情况下则可实现从“事后维修”向“预防性维护”的转变^[4]。

表2某火电厂DCS设备选型对比

厂商	MTBF（小时）	抗干扰能力（kV）	兼容性	升级潜力
A厂商	120000	6	支持多品牌设备接入	可无缝升级至智能控制系统
B厂商	80000	4	仅支持自有品牌设备	升级需更换核心模块
C厂商	95000	5	部分支持第三方设备	升级成本较高

（二）完善监控预警，构建应急体系

构建全面监控预警体系和高效的应急响应机制是及时发现自动化系统故障、减少故障影响的关键路径。为此电厂应在监控预警方面则需扩大监控覆盖范围，达成对自动化系统硬件、软件、通信链路等全环节的实时监控，经过部署监控软件实时采集系统运行参数，如CPU使用率、内存占用率、数据传输速率等设定合理阈值范围^[5]。这样一来，当参数超出阈值时自动发出报警信号，那么相关技术人员则可选用故障诊断技术，对系统异常数据展开深入分析，并精准定位故障位置与原因，为故障处理工作的高效开展提供依据。比如针对自动化系统中的通信故障，经过监控各类节点间的通信延迟与数据丢包率可高速判断是通信线路故障还是设备接口故障，缩短故障排查时间^[6]。此外在应急体系构建方面则需制定具体的应急预案，明确不同类型故障处理流程、责任分工与时间要求，针对常见故障，如PLC模块故障、软件崩溃等编制标准化的应急处置手册，确保运维人员在故障发生时能高速响应，定期组织应急演练，模拟不同故障场景提升运维人员应急处置能力。与此同时还应创建应急备件库，储备关键设备和部件，如PLC模块、传感器、通信模块等保证故障发生时能及时更换，缩短故障修复时间。经过完善监控预警与应急体系可将自动化系统故障发现时间从平均2小时缩短至15分钟，故障修复时间从平均8小时缩短至2小时大幅降低故障对电厂运行的影响。

（三）健全管理机制，规范运行流程

健全的管理机制和规范运行流程是保障电厂电力系统自动化可靠运行的制度路径。电厂需从制度层面明确自动化系统管理要求制定涵盖系统设计、建设、运维、升级等全流程管理制度，在

系统设计阶段编制设计评审机制，组织技术专家对自动化系统设计方案实行审核，核心审查方案可靠性、兼容性与安全性防止因设计缺陷导致后期运行问题^[7]。在系统建设阶段制定施工质量管理体系，明确施工标准和验收流程加大对施工过程的监督力度，保证设备安装、线路敷设等符合规范要求减少因施工质量问题诱发的系统故障，在系统运维阶段落实运维工作责任制，将自动化系统各环节运维责任落实到具体人员明确运维工作的考核指标，如故障处理及时率、设备完好率等，保证运维工作规范有序开展。与此同时还要制定变更管理机制，对自动化系统软件升级、参数调整、设备更换等变更操作，实行严格的审批流程明确变更的必要性、风险评估与实施方案，防止因无序变更导致系统不平稳，另外奠定技术档案管理制度，具体记录自动化系统设计资料、设备参数、运维记录、故障处理情况等为系统的长期运行与升级供给依据。经过健全管理机制和规范运行流程可使自动化系统因管理不当导致的故障发生率降低50%确保系统运行的规范性和稳定性^[8]。

（四）加强人员培训，提升专业素养

运维人员专业素养直接影响电厂电力系统自动化的运行管理质量，为此加大人员培训是提升系统可靠性的基础路径。电厂应构建完善的人员培训体系，实践中根据运维人员岗位需求与技术水平，制定分层分类培训计划，针对新入职人员开展岗前培训，内容涵盖自动化系统基本原理、设备结构、操作流程和安全规范，确保其具备基础运维能力^[9]。针对在岗人员定期开展技能提升培训，核心学习新技术、新设备的应用知识如数字化监控系统操作、人工智能故障诊断技术应用。此外还要进一步提升相关人

员应对复杂问题的能力。在此期间，选用的培训方法应多样化，比如采用理论授课、现场实操、案例分析、外部交流等多种形式，强化培训效果。经过现场实操培训，让运维人员直接参与自动化设备的拆装、调试与故障处理提升其动手能力。经过案例分析共享其他电厂自动化系统故障处理经验，拓宽运维人员思路。通过落实人员考核机制，还可以将培训结果和绩效考核挂钩经过理论考试、实操考核等方法检验培训成果，激励运维人员主动学习，引导运维人员参与行业技术交流和认证，如考取自动化系统工程师、注册电气工程师等证书提升其专业水平^[10]。经过加强人员培训可使运维人员对自动化系统故障排查准确率从75%提升至90%，对新技术应用熟练度从60%提升至85%为自动化系统可靠性提供人员保障。

三、结语

综上所述，上文围绕电厂电力系统自动化可靠性提升展开研究，首先从保障电厂安全运行、降低经济损失、满足社会需求三个方面，分析了可靠性提升的必要性，明确了提升工作的重要意义。在此基础上，提出了优化设备选型与运维管理、完善监控预警与应急体系、健全管理机制与规范流程、加强人员培训与素养提升这四条具体提升路径，主要是为了在提高电厂电力系统运行稳定性以及连续性的基础上，降低电厂电力系统自动化故障的发生率，减少故障处理时间，这样便可为电厂安全高效运行与电力系统整体稳定提供有力保障。

参考文献

[1] 杨光，高康康，吴家蔚. 电力系统中关于电气自动化设备可靠性的探讨 [J]. 电工材料, 2025, (03): 99–102.
[2] 曾淑英. 电力系统配电网自动化应用原则及可靠性研究 [J]. 光源与照明, 2024, (11): 177–179.
[3] 庞岑茂，夏统照，詹子民. 电力系统继电保护及其自动化装置可靠性研究 [J]. 光源与照明, 2023, (10): 231–233.
[4] 范军勇. 电力系统继电保护及其自动化装置可靠性分析 [J]. 应用能源技术, 2023, (01): 5–9.
[5] 施剑. 电力系统继电保护自动化装置可靠性研究 [J]. 技术与市场, 2021, 28(10): 128–129.
[6] 张壮壮. 发电厂电力系统自动化技术应用分析 [J]. 奥秘, 2024(16): 43–45.
[7] 谭峻云. 基于自动化技术的水电厂电力监控系统可靠性分析 [J]. 模型世界, 2024(17): 121–123.
[8] 姜峰. 电力系统自动化中的大数据分析 with 决策支持技术研究 [J]. 数字通信世界, 2024(11): 107–109.
[9] 焦亚峰. 垃圾发电厂电气自动化系统监控技术探析 [J]. 电力设备管理, 2024(24): 168–170.
[10] 赵溢丰. 电厂热控自动化系统稳定性研究 [J]. 电力设备管理, 2024(1): 78–80.

基于增材制造的 $\pm 800\text{kV}$ 直流换流站金具拓扑优化设计与力学性能研究

陈勇

中国电建集团四平线路器材有限公司, 吉林 四平 136001

DOI:10.61369/EPTSM.2025060001

摘 要 : 随着能源结构的转变及电力工业的迅猛发展, 超高压直流因其具有容量大、损耗低、距离远等明显优点, 已成为国家能源互联网的重要支持力量。本文以增材制造技术为基础, 开展 $\pm 800\text{kV}$ 直流输电线路金具的拓扑优化及力学特性研究, 对特高压直流输电技术的发展方向和 800kV 直流换流站的核心位置进行说明, 探讨其在该系统中的应用。

关 键 词 : $\pm 800\text{kV}$ 直流换流站; 金具; 拓扑优化; 增材制造; 力学性能

Research on Topology Optimization Design and Mechanical Performance of $\pm 800\text{kV}$ DC Converter Station Hardware Based on Additive Manufacturing

Chen Yong

PowerChina Siping Line Equipment Co., Ltd., Siping, Jilin 136001

Abstract : With the transformation of structure and the rapid development of the power industry, ultra-high voltage direct current has become an important support force for the national energy Internet because of its obvious advantages such as large capacity low loss and long distance. Based on additive manufacturing technology, this paper carries out topology optimization and mechanical characteristics research of DC transmission line hardware, explains the development direction of ultra-high DC transmission technology and the core position of 800kV DC converter station, and discusses its application in this system.

Keywords : $\pm 800\text{kV}$ converter station; hardware; topology optimization; additive manufacturing; mechanical performance

一、绪论

传统的金具设计方法是以经验类推的方法进行的, 存在着结构冗余和材料利用率不高的缺点, 而铸造、锻造等传统加工方法对复杂构件的成形有一定的限制, 很难实现金具的轻量化与高性能化。增材制造是一种新型的金属件成形方法, 它可以在短时间内完成复杂构件的成形, 为金属件的创新设计创造条件。拓扑优化是指在有限的空间中, 依据所受的荷载与约束, 寻求最佳的材料配置方式, 从而达到轻量化与性能最优的目的。本文以 $\pm 800\text{kV}$ 直流换流站金具为研究对象, 采用了拓扑优化和增材制造技术相结合的方法, 对于提升金具的力学性能、降低成本、提高换流站运行可靠性具有重要的理论意义和工程应用价值。

二、 $\pm 800\text{kV}$ 直流换流站金具结构与工况分析

(一) 金具类型与结构特点

在 $\pm 800\text{kV}$ 直流换流站中, 各种金具按各自的作用可以分为联接金具、保护金具和固定金具。球头挂环、碗头挂环等连接金属件是用来连接各种电器、电线的, 为了确保连接的可靠与稳

定, 一般都设有连接界面。其中防振锤、均压环等防护金属件起着重要的作用, 防振锤可以减小风致振动对金属丝的疲劳破坏, 均压环可以改善金属表面的电场分布, 减小电晕放电。固定金具是指用于将导线、绝缘子等固定在支撑或铁塔上的设备, 如悬挂线夹、耐张线夹等, 要求有较高的强度、刚度, 以抵抗导线的张力等荷载。

另外, 换流站的设备布置和电气参数的选择与其选型有着密切的关系, 如均压环的结构尺寸及外形要与绝缘子的布局及电压水平相适应, 才能保证系统内的场强分布。耐张线夹的构造要求与其规格、断面相匹配, 以确保其牢固地固定, 并能顺畅地输送电流。

(二) 工作环境与载荷工况

$\pm 800\text{kV}$ 直流换流站运行工况复杂多变, 金具需经受多工况工况的影响, 从电角度看, 金具工作在高压大电流环境下, 将受到电场力和电场力的影响。当电流通过金具时形成的磁场交互作用, 在发生短路故障时, 其电磁力会迅速增加, 这对金具的结构强度有极高的要求^[1]。

从力学角度看, 金具要经受住导线的拉力、自重、风荷载和地震等荷载, 导线的张力是导线所能承受的最大荷载, 其值与导

线型号、跨距、张力等因素密切相关。风载将引起金具的振动与弯曲,在长时间的使用下会造成金具的疲劳损伤。而地震荷载又是一种突然而又确定的荷载,它将对金具的连接可靠度及结构的稳定产生重要影响。

另外,由于换流站内温度和湿度的剧烈波动,使金具的材质发生膨胀和收缩,从而导致设备的温度应力。同时大气中的污染物也会对金具产生侵蚀,从而降低其使用寿命,在不同的工作条件下,这些负载将以多种形式同时作用于金具,如在正常情况下,其承受的荷载主要为导线拉力、自重以及较低的风荷载,但在极端情况下,如断流、地震等极端情况下,负荷将大幅增加。

（三）现有金具性能问题

采用常规加工方法生产的金具,在使用过程中,存在着许多问题,从机械特性上看,金具受设计方法限制,常会出现应力集中,在荷载作用下易发生断裂,从而缩短其疲劳寿命。在金具的连接部位和角部等部位,存在着较大的应力集中现象,在长时间的运行中,易发生断裂等失效现象。

从电气特性上看,由于其结构设计不当,会造成金具内部的电场不均匀,引起金具的电晕放电。因此电晕放电除了造成电能损失外,还可能释放出大量的电磁干扰、臭氧等有害物质,对金具及周边设备造成腐蚀,对换流站的安全、稳定运行构成严重威胁;在金具的尖角处,存在着高电场,易产生电晕放电等现象。

这些性能问题严重影响了换流站的安全、稳定运行,而金具损伤会引起导线脱落、设备失效等重大事故,导致大范围停电,对社会和经济造成重大损失。为此,需要优化 $\pm 800\text{kV}$ 直流换流站金具,提高其综合性能。

三、金具拓扑优化设计理论与方法

（一）拓扑优化基本原理

拓扑优化是一种在给定设计空间、载荷条件和约束条件下,寻找材料最优分布的优化方法,其核心思想是通过数学模型和优化算法,在设计域内确定材料的存在与否,以实现特定的优化目标,如最小化结构重量、最大化刚度等。常见的拓扑优化方法包括变密度法、水平集法等,其中变密度法将设计区域离散为有限个单元,每个单元赋予一个密度变量,通过优化密度变量的取值(在0到1之间)来表示单元材料的有无,密度为1表示单元存在,密度为0表示单元不存在。在此基础上,该方法采用一种新的层次集合函数并对其进行改进。

在进行拓扑优化时,必须综合考虑应力约束和位移约束等多种约束,才能保证所设计的结构能够满足服役要求。采用拓扑优化方法,可在不影响结构性能的同时,有效地利用材料,减轻其质量并且改善其力学性能^[9]。

（二）金具拓扑优化数学模型建立

金具拓扑优化问题的数学模型可表述为:在满足多种约束的情况下,对设计变量进行优化,使得目标函数最大。考虑到 $\pm 800\text{kV}$ 直流换流站金具的特性,对其进行拓扑优化建模,确定设计变量、目标函数及约束条件,在此基础上,以元件密度为变量对其进行优化。

在满足金具轻量化要求的前提下,以最大限度地减重为目标,对其进行优化设计,在约束条件上,要综合考虑电性能、机

械性能、加工工艺等约束。而电性能限制主要是对金具的电场强度进行限制,以保证金具表面的场强不超出容许范围,防止电晕放电。其机械性能限制分为应力限制和变形限制两种,当其承载荷载时,其应力不得超出材料的允许应力,位移在允许范围内。制造工艺约束则需要考虑增材制造工艺的特点,如最小特征尺寸、表面粗糙度等,确保优化后的结构能够通过增材制造工艺顺利成型。

（三）优化算法选择与求解策略

遗传算法是一种以自然选择为基础的随机优化方法,它能够很好地解决复杂的非线性问题,但是它的求解效率比较低。在此基础上,提出一种确定的求解方法,该方法在一定程度上满足工程实际中的要求,具有较高的计算效率,但易陷入局部极值。由此针对 $\pm 800\text{kV}$ 直流换流站金具拓扑优化问题,针对金具结构复杂、约束多等特点,采用遗传算法进行优化,并将其应用于实际工程,通过引入自适应杂交、突变等方法,对遗传算法进行改进,以提高寻优效率^[9]。

在求解策略上,对群体规模、交叉概率和变异概率等参数进行合理的选择,在迭代过程中,通过对群体的持续更新,对各个体的目标函数及约束条件进行求解,剔除不符合限制或目标函数值低的个体,只保留最优个体用于遗传运算。即在给定的条件下,目标函数的变动量比一定的门限小,或者迭代的次数接近预定值,采用合适的参数设定与迭代策略,保证优化的精度与效率。

四、基于增材制造的金具拓扑优化设计实现

（一）金具初始模型构建

采用 SolidWorks、UG 等三维造型软件,针对某一 $\pm 800\text{kV}$ 直流输电线路金具的具体尺寸及结构特征,建立其初始几何模型。为确保模型的真实、准确,在建立金具的连接界面、关键尺寸等方面,必须精确地反映出金具的特性。在此基础上,结合增材制造支撑结构的特点,对其进行预处理,在印刷时,为了避免在印刷时出现变形和塌陷,必须增加支撑结构,支撑结构的设计要在保证金具特性不受影响的前提下,使其易于拆卸^[9]。由此利用 3D 造型软件建立的初步模型,为后续的拓扑优化工作提供精确的初始构形,从而保证拓扑优化的顺利开展。

（二）拓扑优化过程与结果分析

将建立的金具拓扑优化数学模型导入优化软件(如 OptiStruct、ANSYS 等),将选择的遗传算法应用于结构优化的计算中,对设计变量、目标函数和约束条件进行实时监控。工作人员需要根据实际情况,对设计变量(网格密度)进行调节,使其趋向于最优分布,基于有限元方法的非线性优化设计方法,通过优化设计,使其具有更高的效率和更高的效率^[9]。

计算得到金属件的材质分布曲线图,并对其进行优化设计,物料分配云图清楚地显示物料在设计区域的分布状况,其中稠密的区域代表物料必须被保存,稀疏的区域则代表物料可被移除。对优化结果进行分析,发现优化后的金具结构能够在满足一定限制的情况下,进行材料的合理分配,剔除多余的材料,达到轻量化的目的。由此通过对其进行优化设计,使其具有更好的受力特性和更好的受力状态,从而减少金具的应力集中,改善金具的机

械性能^[6]。

（三）优化后金具模型修正与完善

根据拓扑优化结果以及增材制造技术的需求，修改和完善金具模型，在增材制造过程中，由于增材制造技术的局限性，在优化设计过程中，某些精细结构或尖锐部分可能不能精确成形，需对其进行相应的简化与修改，使其达到最小特征尺寸。

同时通过对模型的平滑处理，消除模型表面的毛刺、棱角，改善金具的平滑程度，降低金属构件的应力集中，对需增设支承结构的部分进一步的优化，以保证支承结构既能有效地支承金具，又能方便地拆除^[7]。

在此基础上，进一步改进和改进现有的金属结构模型，使得该结构能够同时满足结构设计和制造过程的需求，为后续增材制造打下坚实的基础。

五、增材制造工艺对金具力学性能影响

（一）金具增材制造工艺选择与参数确定

激光选区熔化和电子束熔凝是目前最常见的一种增材制造方法，它们都有各自的优势和不足，激光选区熔融成形技术的成形精度高，表面质量好，但是成形速度比较慢，不适用于结构复杂的高精度金属件的制造。而电子束焊接技术的打印速度快，能量密度高，适用于大尺寸厚壁金具的制造，但成形精度不高。

针对 ±800kV 直流换流站金具材质（铝合金、钢材等）及结构复杂性，选用适当的增材制备技术；对于结构复杂和精度要求较高的金属件，宜采用激光选区熔融法；对于大型厚壁金具，采用电子束熔接方法是可行的。而铺粉的厚度对成形的效果及表面质量有很大的影响，采用试验与数值仿真相结合的方法，研究合理的工艺参数。比如在激光选区熔融过程中，较高的激光功率会引起材料的过热和孔洞等缺陷；如果功率太小，就会造成熔接问题^[8]。但是如果扫速太快，则无法及时融化，从而影响成形质量；太慢的话，印刷的效率就会下降。

（二）增材制造过程数值模拟

采用 ABAQUS、MSCMarc 等有限元分析软件，可以对金

具的增材制作仿真研究，温度场的仿真主要是对激光、电子束辐照后的熔池温度分布、熔池尺寸及形态进行研究。在此基础上，建立基于有限元模型的三维有限元模型，通过应力场仿真，研究增材制造过程中因温度梯度而导致的热应力、组织变形及残余应力^[9]。其中残余应力对金具的强度和疲劳寿命等机械性能有很大的影响，通过应力场仿真，可以对可能产生的裂纹、变形等缺陷进行预测，并采取相应的措施减少缺陷的产生，如优化扫描路径、调整工艺参数等。

（三）增材制造金具力学性能实验测试

根据有关规范，研制出增材制造金属材料样品，并对其进行拉伸、压缩、弯曲、疲劳等力学性能测试，通过拉伸测试，获得金具的抗拉强度、屈服强度和延伸率；压缩测试是对材料压缩特性的评价；弯曲实验能检测出材料的抗弯、抗折强度；采用疲劳实验方法，对金具进行疲劳寿命的研究^[10]。

通过与试验测量结果的比较，检验数值计算的精度，分析增材制造过程中金具机械性能的差别。主要包括增材加工时产生的孔洞、裂纹等缺陷，使金具的机械性能下降；而快速凝固形成的细小晶粒则可能提高金具的强度和硬度。通过实验测试和分析，为优化增材制造工艺参数、提高金具力学性能提供依据。

六、结语

本项目以特高压直流换流站为研究对象，以“增材制造+800kV”金具为研究对象，通过分析金具的结构和工作状态，构建其拓扑优化数学模型，选取适当的优化算法求解，实现金具的增材制造，并探索其对其机械性能的影响规律。在此基础上，提出基于增材制造技术的拓扑优化设计方法，提高金具的力学性能，以满足换流站的安全、稳定运行需求。本项目的研究成果将为特高压直流换流站金具结构的轻量化提供新的思路，并对其机械、电学性能进行提升。但是该方法也有一定的局限性，因此通过本项目的研究，将为多场耦合作用下金具结构的优化设计提供理论依据，并为增材制造技术的优化提供理论依据，对金具的长周期工作特性进行深入研究，为其在工程上的应用奠定基础。

参考文献

[1]李良浩.用于集成车载电源的高性能 SiC DC-DC 的多域建模与优化设计研究 [D].浙江省：浙江大学，2022.DOI:10.27461/d.cnki.gzjdx.2022.002233.
[2]张炜，杨国华，李勇杰，等.高海拔地区特高压换流站典型电极起晕特性与均压屏蔽电极设计 [J].高压电器，2022,58(04):124-130.
[3]牛海军，司徒钧，周立宪，等.特高压输电线路悬垂串金具优化研究 [J].中国电力，2019,52(03):95-101.
[4]李金洋.基于多端 MMC 直流配电系统的协调控制策略研究 [D].辽宁省：沈阳工业大学，2024.
[5]顾佳.并联 DC-DC 变换器的 S 型函数建模及动力学行为研究 [D].广西壮族自治区：广西大学，2024.
[6]陆佩佩.钛合金选区激光熔化工艺调控及多孔结构性能优化研究 [D].江苏省：江南大学，2023.
[7]张杰.直流降压变换器分数阶复合控制的设计与实现 [D].江苏省：扬州大学，2023.
[8]朱新宇.快速直流脱扣器的电磁—机械特性仿真及优化研究 [D].福建省：厦门理工学院，2023.
[9]李旭.液压驱动轮腿机器人设计与跳跃控制研究 [D].黑龙江省：哈尔滨工业大学，2022.
[10]王玉婷.多环境约束下铝液精炼作业机械臂设计、规划与控制研究 [D].黑龙江省：哈尔滨工业大学，2022.

核电站反应堆厂房构件池应急救援方法

许乐

中广核核电运营有限公司, 广东 深圳 518000

DOI:10.61369/EPTSM.2025060002

摘 要 : 在核电站与常规电站的设计差异中, 反应堆厂房作为核裂变反应的核心区域, 其结构复杂性与安全要求远超常规电站的锅炉厂房。构件池作为反应堆厂房内的关键设施, 不仅承担上部构件、三角吊具的存放功能, 更是燃料厂房传输管道的重要接口区域, 其作业环境的特殊性决定了风险防控的极端重要性。

从作业风险来看, 构件池区域存在多重潜在威胁: 一是辐射安全风险, 该区域长期处于放射性环境中, 设备检修、构件吊装等作业可能导致人员受照剂量超标; 二是机械伤害及坠落风险, 大型吊具的启停、构件的转运、换料机夹爪拆装, 若操作不当或信号失误, 易引发碰撞、挤压、坠落等事故; 三是意外照射风险, 传输管道区域可能存在高放射性热点, 对周边区域造成高剂量照射。

针对上述风险引发的应急安全事件, 理论救援方案需构建多层次响应体系: 首先, 应立即通知主控运行人员及辐射防护工程师, 划定警戒区域, 确保未受影响人员的安全; 其次, 针对机械伤害、人员坠落事故, 需依托厂房内预置的应急救援通道, 通知消防队实施救援, 并同步监测环境辐射水平。

该方案的核心在于以辐射防护为前提, 结合机械应急与污染控制技术, 实现事故后果的最小化, 为核电站构件池区域的安全作业提供理论支撑。

关 键 词 : 核电站; 反应堆; 构件池; 应急救援

Emergency Rescue Method for Nuclear Power Plant Reactor Building Component Pool

Xu Le

CGN Nuclear Power Operation Co., LTD, Shenzhen, Guangdong 518000

Abstract : In the design differences between nuclear power plants and conventional power stations, the reactor building, as the core area of nuclear fission reactions, has structural complexity and safety requirements far exceeding those of boiler buildings in conventional plants. The component pool, a critical facility within the reactor building, not only stores upper components and lifting equipment but also serves as a key interface area for fuel transfer pipelines. The unique working environment here makes risk prevention and control particularly crucial.

From an operational risk perspective, the component pool area faces multiple potential threats: First, radiation safety risks—long-term exposure to radioactive environments may lead to excessive radiation doses during equipment maintenance and component hoisting. Second, mechanical injury and fall risks—improper operation or signal errors during large equipment startup/shutdown, component transportation, or refueling machine gripper disassembly may cause collisions, compression, or falls. Third, accidental exposure risks—high-level radioactive hotspots in pipeline areas could expose surrounding areas to high-dose radiation.

To address these emergency scenarios, theoretical rescue plans require establishing a multi-level response system: First, immediately notify main control operators and radiation protection engineers to demarcate alert zones and ensure the safety of unaffected personnel; Second, for mechanical injuries and falls, utilize pre-installed emergency rescue channels to coordinate fire brigade rescue operations while monitoring environmental radiation levels. The core of this plan lies in radiation protection as the foundation, integrating mechanical emergency response and contamination control technologies to minimize accident consequences, thereby providing theoretical support for safe operations in nuclear power plant component pool areas.

Keywords : nuclear power plant; reactor; component pool; emergency rescue

引言

本文聚焦核电站构件池特殊环境下，人员突发晕倒或机械伤害导致无法自救时的救援机制，综合环境放射性、空间限制、设备适配性及响应时效等关键因素，构建系统性救援方案。

构件池作为辐射环境与机械操作的交叉区域，救援需兼顾多重约束：环境层面，需实时监测辐射剂量分布和污染情况，避免救援人员受照超标和人员体表/体内沾污；空间层面，受限区域对救援设备尺寸、移动路径提出特殊要求；时效层面，人员失能后的黄金救援窗口与辐射累积风险形成尖锐矛盾。

一、救援方式与工具

（一）换料机辅助吊钩救援

换料机作为核反应堆及构件池区域的专用轨道行车设备，其核心功能是实现核燃料组件的精准装载与卸出，同时承担换料夹爪等专用工具的吊运任务。在核设施运行的特殊环境中，构件池作为高风险作业区域，一旦发生人员意外被困且无法自主脱困的情况，换料机配置的辅助吊钩（图1）可转化为应急救援的关键设备，形成一套具有特定适用范围的救援方案。

从救援流程来看，当构件池内出现人员受困事故时，操作人员可通过远程操控将救生担架（图2）挂载于换料机辅助吊钩，利用轨道行车的定位精度将担架精准投放至池底事故点。待救援人员抵达现场后，可快速将受困人员转移至担架固定，再通过吊钩系统完成从池底到安全平台的垂直转运。这一过程的核心优势在于响应的即时性：相较于传统救援设备的部署流程，换料机作为常驻现场的行车，可省略设备调度与场地适配环节，在事故确认后短时间内即可启动吊运操作，显著缩短救援启动时间，为受困人员争取早期脱困机会^[1-3]。

然而，该救援方式的技术局限性需从设备特性与环境风险两方面综合考量。在设备性能层面，辅助吊钩的运行速度受设计规范限制，速度较为缓慢。在救援场景中可能导致转运耗时过长若受困人员遭遇心肌梗死、脑卒中等需紧急医疗干预的急症，极可能因超出“黄金4分钟”抢救窗口而危及生命。

在安全风险层面，辅助吊钩的结构设计以承载刚性构件为目标，缺乏针对柔性负载的动态平衡系统。当担架承载人员时，受人体重心偏移、池内气流扰动等因素影响，易产生横向摆动或旋转。这种不稳定性不仅可能造成受困人员二次伤害，更存在固定装置失效导致人员坠落的隐患，尤其对脊柱损伤、骨折等伤者的风险更为突出。

基于上述特性，换料机辅助吊钩救援法的适用边界需严格界定：仅适用于意识清醒、生命体征平稳且无需紧急医疗处置的受困人员。具体而言，包括因机械挤伤、物体磕碰等外伤导致下肢行动障碍，或因突发肌肉痉挛、关节扭伤而丧失行动能力，但无内出血、颅脑损伤等危急症状的情况。在实际应用中，需结合现场医疗评估结果，通过多参数监测确认受困人员状态后再启动救援，以在发挥设备应急价值的同时，最大限度降低二次风险，为核设施应急救援体系提供补充性技术支撑^[4-6]。

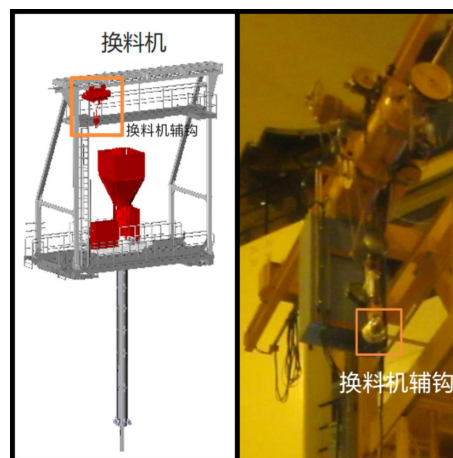


图1 换料机辅助吊钩

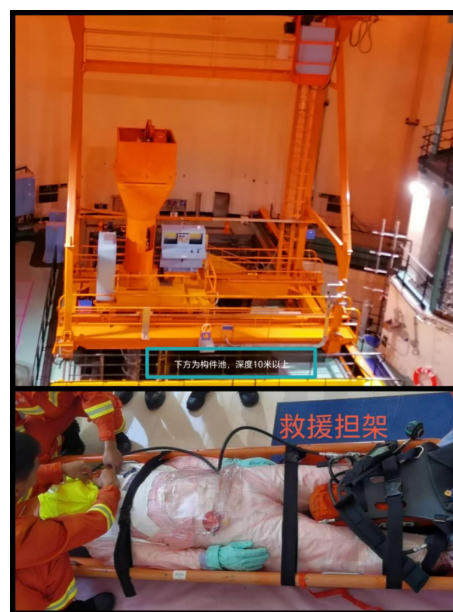


图2 构件池区域、救生担架（模拟场景）

（二）安装专用救援设备

一旦发生人员遭遇大出血、心跳骤停等危及生命的紧急情况，必须迅速启动全套专用救援设备，以系统化的应急响应机制为生命争取生机。此时，第一时间通过紧急通讯系统同步通知主控人员启动应急指挥流程、联系消防救援队伍请求专业支援，并向直属领导汇报现场情况，确保多方力量协同联动，形成救援合力。与此同时，立即安排经过专业培训的工作组成员快速穿戴防护装备：身着具备防污与基础防护功能的纸衣，佩戴能有效隔绝

有害环境的全面罩呼吸器，检查并系紧高强度安全带确保作业安全，随后借助应急下降装置快速、平稳地抵达构件池底部。由于被救援人员通常身穿全覆盖式气衣，这种装备虽能提供全面防护，但也给急救带来关键难点——急救前必须通过应急脱除方式为其脱出气衣，救援人员需熟练操作气衣的快速释放卡扣与拉链系统，在保持伤者身体稳定的前提下，按照“先松懈颈部固定、再解除躯干束缚、最后脱离肢体覆盖”的顺序规范操作，既要避免因操作不当导致气衣内气压骤变对伤者造成额外冲击，又要在最短时间内暴露胸部、颈部等关键急救部位，为后续措施争取时间，这一步骤的熟练度直接影响整个急救流程的推进效率。抵达后，完成气衣脱除的救援人员需立即对失去自主能力的受伤人员展开初步急救：若为大出血，需迅速识别出血点，用专用止血带或压迫法实施止血，同时观察伤者意识与脉搏变化；若为心跳骤停，则立即进行胸外按压与人工呼吸，保持心肺功能的基础循环。在实施急救的同时，迅速启动专用救援工具，小心将伤者平稳转移至升降平台（图3），确保搬运过程中避免二次伤害，同时安排另一名救援人员同步登上平台，在上升过程中持续进行心肺复苏或止血处理，确保急救措施不中断。当升降平台抵达顶部后，立即将伤者转移至预先划定的坚实平整地面，利用现场配备的AED（自动体外除颤器）进行心律分析与除颤操作（如适用），同时配合止血包、绷带等工具深化止血处理，持续监测生命体征变化。在此过程中，所有救援人员需保持高度专注，与等待中的专业救援队伍保持实时通讯，清晰传递伤者状况与已实施的急救措施，为后续专业救治提供关键信息。整个救援流程的核心要义在于，从发现险情到实施急救的每一个环节都必须以“不间断”为准则，通过无缝衔接的急救操作与高效的转运流程，牢牢把控4-6分钟的黄金救援窗口期，用专业与速度为生命筑起防线，直至专业救援力量接手，最大限度提高伤者的生存概率，这既是对生命的敬畏，也是应急救援体系效能的直接体现^[7-10]。



图3 构件池升降平台概念图（由 AI 生成）

二、结语

本文围绕核电站构件池这一特殊高风险区域的应急救援机制展开系统性研究，通过对换料机辅助吊钩救援与专用救援设备应用两种核心方案的技术特性、适用边界及风险控制的深入分析，

构建了一套兼顾辐射安全与救援时效的应急响应体系，为核设施构件池区域的安全作业与应急处置提供了理论支撑与实践参考。

构件池作为辐射环境与机械操作的交叉重叠区域，其救援工作面临着环境放射性、空间局限性、设备适配性及响应时效性等多重约束的严峻挑战。本文提出的换料机辅助吊钩救援方案，依托常驻现场的专用设备实现了救援响应的即时性，在受困人员意识清醒、生命体征平稳的场景下能够发挥快速转运的优势，有效缩短了早期脱困时间，为非紧急状况下的应急救援提供了补充性技术路径。而针对大出血、心跳骤停等危及生命的紧急状况，专用救援设备的系统化应用则构建了从应急通讯、防护装备穿戴、气衣脱除、现场急救到转运衔接的全流程响应机制，通过无缝衔接的操作环节牢牢把控黄金救援窗口期，彰显了专业设备在极端场景下的生命保障价值。

研究同时揭示了现有救援方案的技术局限性：换料机辅助吊钩在运行速度与动态平衡方面的设计缺陷，使其难以满足急症患者的紧急转运需求；专用救援设备的高效应用则高度依赖救援人员的专业素养与操作熟练度，尤其是气衣脱除等关键环节的操作规范直接影响急救成效。这些局限性也明确了未来核设施应急救援体系优化的方向：需加强救援设备的专项研发，针对构件池环境特性设计兼具高速转运与动态平衡功能的专用救援吊钩系统；完善救援人员的常态化培训机制，通过模拟演练强化复杂场景下的应急处置能力，提升关键操作环节的规范性与效率。

在核安全日益受到重视的背景下，构件池区域的应急救援能力建设是核电站安全生产体系的重要组成部分。本文构建的救援方案体系，以辐射防护为前提，以生命保障为核心，通过技术方案的差异化应用与风险的精准管控，实现了事故后果最小化的核心目标。后续研究可进一步结合智能化技术，探索远程操控救援机器人、实时生命体征监测系统等在构件池救援中的应用，持续推动核设施应急救援技术的创新发展，为核电站的安全稳定运行筑牢防线。

参考文献

- [1] 孟维民, 李炯, 郝中航. 核电厂起重设备全面质量管理[J]. 设备管理与维修, 2024, (05): 8-10.
- [2] 张建军, 贾军辉, 邓晓阳, 等. 核电站建造阶段重型起重设备费用分析及选型[J]. 起重运输机械, 2025, (03): 89-93.
- [3] 朱东科, 石蓓蓓, 朱诗威. 核电起重设备经验反馈体系的建立[J]. 起重运输机械, 2015, (07): 78-79.
- [4] 白杰; 王博; 姚兴瑞. 压水堆核电站反应堆保护系统投运与退出方案论述[J]. 自动化博览, 2015(12): 106-108.
- [5] 吕国伟; 张智勇; 徐嘉伟. 大型水电工程起重设备群防撞避让监控技术[J]. 四川水泥, 2021(12): 39-41.
- [6] 杨光远; 赵喜松; 周兰花; 王备; 谢振波. 核电厂火灾与应急响应预案体系化构建与实践研究[J]. 中国设备工程, 2025(S2): 1-3.
- [7] 曹冉冉; 杨嘉. 国内外核电厂吸取取水头部调研及取水安全分析[J]. 给水排水, 2024(S1): 650-654.
- [8] 董建玉. 核电厂地质测绘工程项目的进度与质量标准化控制策略[J]. 大众标准化, 2025(10): 25-27.
- [9] 曹钟引; 陈伟. 关于核电厂厂房混凝土氯离子危害与防治探究[J]. 中国核电, 2024(02): 278-282.
- [10] 代传波; 闫洋洋; 江灏; 刘海峰; 王杰. 压水堆核电站燃料元件破损在线监测分析方法[J]. 设备管理与维修, 2022(06): 37-39.

大数据驱动下的电力工程故障诊断研究

李京雷

内蒙古电投新能源生态建设有限责任公司，内蒙古 通辽 028000

DOI:10.61369/EPTSM.2025060009

摘 要： 大数据技术为电力工程故障诊断提供了全新的解决思路与分析能力。该研究构建了融合多源电力数据的技术框架，设计了基于特征提取与智能诊断模型的分析方法，实现了覆盖数据采集、处理到应用服务的诊断系统。研究表明，大数据技术能够显著提升电力故障识别的准确性与时效性，为电力系统安全稳定运行提供了有效技术支撑。大数据驱动的诊断模式代表了电力工程智能化运维的重要发展方向。

关 键 词： 大数据；电力工程；故障诊断；特征提取；智能模型；系统实现

Research on Power Engineering Fault Diagnosis Driven by Big Data

Li Jinglei

INNER MONGOLIA DIAN TOU NEW ENERGY ECOLOGICAL CONSTRUCTION CO, LTD., Tongliao,
Inner Mongolia 028000

Abstract： Big data technology provides innovative solutions and analytical capabilities for fault diagnosis in power engineering. This study establishes a technical framework integrating multi-source power data, designs an analysis method combining feature extraction with intelligent diagnostic models, and implements a comprehensive diagnostic system covering data collection, processing, and application services. Research findings demonstrate that big data technology significantly enhances the accuracy and timeliness of power fault identification, offering effective technical support for ensuring the safe and stable operation of power systems. The big data-driven diagnostic model represents a crucial development direction for intelligent operation and maintenance in power engineering.

Keywords： big data; power engineering; fault diagnosis; feature extraction; intelligent model; system implementation

引言

电力系统安全稳定运行对国家经济发展与社会民生保障具有重大意义。电力系统结构日益复杂，运行环境多变，故障发生风险持续存在，快速精准的故障诊断是保障供电可靠性的核心环节^[1]。传统诊断方法在处理海量、高速、多样化的电力运行数据时面临效率与准确性的瓶颈。大数据技术的兴起为解决这一挑战开辟了新途径。该技术体系具备强大的数据存储、计算分析与知识挖掘能力，能够深入揭示电力故障的复杂特征与演变规律。

一、大数据技术在电力工程故障诊断中的应用框架

（一）电力系统故障数据的特征分析

电力系统故障数据呈现显著的大数据特征。故障过程中产生的数据量极其庞大，来源于广域部署的各类传感器、保护装置、录波设备及监控系统。^[2]这些数据具有持续高速产生的特性，对实时处理能力提出了严峻挑战。故障数据类型呈现高度多样性，既包含反映电压、电流、功率等电气量变化的数值型数据，也包含开关状态、保护动作信号等离散状态量信息，还涉及设备温度、振动等非电气量监测数据以及地理气象环境等辅助信息。电力系

统故障数据蕴含的价值密度通常较低，关键故障征兆信息往往淹没在大量正常运行数据或噪声干扰之中。

（二）大数据技术体系构建

支撑电力故障诊断的大大数据技术体系是一个融合多种关键技术综合平台^[3]。分布式文件系统与 NoSQL 数据库构成了海量多源异构电力数据存储与管理的基础设施，能够有效应对数据存储扩展性与访问效率的需求。分布式计算框架提供核心的数据处理能力，将庞大的计算任务分解并分配到多台计算节点上并行执行，显著提升数据批处理与流式处理的效率。^[4]专门的数据预处理组件负责完成数据的清洗、转换与集成工作，解决数据质量问题

并为后续分析奠定基础。机器学习库与深度学习框架集成于该体系之中，为构建智能故障诊断模型提供算法支持。

二、基于大数据的电力故障诊断模型设计

（一）故障特征提取算法

1. 时频域特征提取方法

时频域特征提取方法致力于从不同维度揭示电力故障信号的本质特性。短时傅里叶变换（STFT）（如下图1所示）是一种基础且广泛应用的时频分析工具，该方法将长信号分割为多个短时间段，并在每个时间段内进行傅里叶变换，从而获得信号频率成分随时间变化的近似描述，适用于分析变化相对缓慢的故障特征。小波变换克服了STFT固定时频分辨率的局限，能够通过伸缩和平移小波基函数对信号进行多尺度细化分析，特别擅长捕捉故障信号中突变的奇异点或局部特征，例如暂态行波波头或短时脉冲干扰。^[9] 希尔伯特-黄变换（HHT）由经验模态分解（EMD）和希尔伯特谱分析组成，EMD方法能够自适应地将复杂信号分解为一系列具有物理意义的本征模态函数（IMF）。

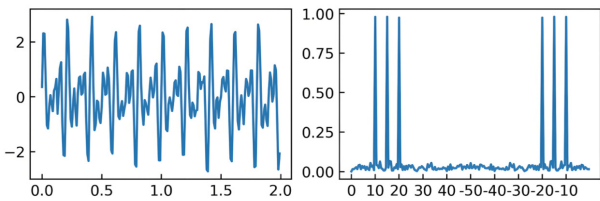


图1 短时傅里叶变换（STFT）

2. 深度学习特征自动提取

深度学习特征自动提取技术避免了传统方法依赖人工设计特征的局限性^[6]。卷积神经网络（CNN）擅长处理具有网格拓扑结构的数据，例如二维时间序列信号（通过变换）或设备状态图像，其卷积层通过滑动滤波器自动学习信号中的局部模式，池化层实现特征降维与平移不变性，深层网络结构能够逐步组合低级特征形成高级抽象表示。循环神经网络（RNN）及其改进型如长短期记忆网络（LSTM）和门控循环单元（GRU）专门设计用于处理序列数据，它们能够记忆历史信息并捕捉时间序列中的长期依赖关系，非常适用于分析电力故障录波数据这类具有强烈时序关联性的信号。^[7]

（二）智能诊断模型构建

1. 基于机器学习的分类模型

基于机器学习的分类模型在电力故障诊断中扮演着重要角色。支持向量机（SVM）通过寻找一个最优超平面来最大化不同类别故障样本之间的间隔，该模型在小样本情况下表现出色且具有坚实的理论基础，核函数技巧使其能够有效处理非线性分类问题^[8]。随机森林（RandomForest）是一种集成学习方法，该模型构建多棵决策树并将它们的预测结果进行投票集成，有效降低了单棵决策树过拟合的风险，同时具有较好的抗噪声能力和特征重要性评估功能。梯度提升决策树（如XGBoost, LightGBM）则是另一种强大的集成技术，该模型以串行方式迭代训练决策树，

每一棵树都致力于纠正前一棵树的预测残差，最终形成强预测模型，在处理结构化数据和特征交互方面表现优异。^[9]

2. 神经网络诊断模型

神经网络诊断模型凭借其强大的表示学习能力在复杂故障诊断任务中展现出巨大潜力。卷积神经网络（CNN）模型能够自动学习电力信号（如波形、频谱图）或设备图像（如红外热像图、可见光图像）中的空间或局部时频特征，通过多层卷积和池化操作提取出对故障类型判别至关重要的抽象模式。循环神经网络（RNN），特别是长短期记忆网络（LSTM）或门控循环单元（GRU）模型，专门设计用于处理具有时间依赖性的序列数据，该类模型能够有效捕捉电力故障录波数据中蕴含的动态时序演变规律和长期依赖关系。图神经网络（GNN）为处理电力系统这一具有天然图结构（节点代表母线、发电机、负荷等，边代表线路、变压器等连接）的对象提供了新范式。

3. 混合智能诊断模型优化

混合智能诊断模型优化旨在融合不同模型的优势以克服单一模型的局限并提升整体诊断性能。一种常见的策略是结合传统机器学习模型与深度学习模型，例如利用深度自编码器或CNN进行无监督或有监督的特征学习，然后将学习到的深度特征输入到SVM或随机森林等强分类器中进行最终故障分类，这种组合既利用了深度学习强大的特征提取能力，又结合了传统分类器在小样本或高维特征空间中的优势。集成学习框架是另一种有效的优化途径，该框架可以集成多个同质（如多个不同结构的CNN）或异质（如同时包含CNN、LSTM和SVM）的基础模型，通过Bagging、Boosting或Stacking等集成策略将基础模型的预测结果进行组合，集成模型通常比单一模型具有更高的泛化能力和鲁棒性。

三、电力工程故障诊断系统实现

（一）系统架构设计

1. 数据采集层实现

数据采集层构成了整个故障诊断系统的基础与数据来源。该层部署了广泛分布的传感器网络，传感器类型包括电气量传感器（如电压互感器、电流互感器）、非电气量传感器（如温度传感器、振动传感器、油色谱传感器）以及环境监测传感器（如气象站）。智能电子设备（如保护继电器、故障录波器、PMU）实时采集电网运行的详细状态信息。数据采集网关或边缘计算节点负责接收来自传感器和智能电子设备的原始数据流，网关设备执行初步的数据缓存、格式转换、简单过滤和协议适配功能。该层采用高可靠性的通信网络（如光纤专网、电力线载波、5G/4G无线通信）确保数据能够高效、稳定地传输至数据中心或云平台。

2. 分析处理层构建

分析处理层是系统进行核心计算与智能分析的中枢。该层构建于分布式大数据处理平台之上，分布式存储系统提供海量电力数据的持久化存储能力。分布式计算引擎负责执行大规模数据的批处理任务（如历史故障数据分析、模型离线训练）和流处理任

务（如实时故障检测）。数据预处理模块对原始数据进行清洗（处理缺失值、异常值）、转换（格式标准化、数值归一化）和集成（关联不同来源的数据）。特征工程模块应用时频分析、深度学习等方法从原始数据中提取或学习有价值的故障特征。模型计算模块部署并运行训练好的故障诊断模型（如机器学习分类器、深度神经网络），对输入的特征数据或原始数据进行实时分析或批量预测。

3. 应用服务层开发

应用服务层面向最终用户提供具体的故障诊断功能和服务接口。该层封装了分析处理层的核心能力，提供诸如实时故障监测告警服务、故障类型识别服务、故障定位服务、故障诊断报告生成服务等关键功能模块。可视化界面为用户提供直观的电网运行状态总览图、详细的故障信息展示（包括波形、定位点、可能原因、处理建议）、历史故障查询以及系统配置管理入口。应用程序接口（API）开放了系统核心诊断能力，允许与其他电力自动化系统（如 SCADA 系统、能量管理系统 EMS）或高级应用软件进行数据交互和功能集成。该层还负责用户管理、权限控制、日志记录等系统运维功能。

（二）关键技术实现

1. 实时故障检测算法

实时故障检测算法需要具备在数据流中快速识别异常的能力。滑动窗口技术是处理流式数据的基础，该技术将连续到达的数据流分割为固定大小或可变大小的窗口进行处理^[10]。基于统计过程控制（SPC）的方法，如 CUSUM（累积和）控制图或 EWMA（指数加权移动平均）控制图，持续监控关键电气量（如电流、电压有效值、相角差）或其衍生统计量（如均值、方差、偏度），一旦监控量超出预设的控制限或变化趋势显著偏离正常模式，算法即触发故障告警。基于实时计算的特征提取方法（如计算短时窗内的波形畸变率、高频分量能量、不对称度）也常用于快速检测异常。

2. 故障类型识别模块

故障类型识别模块的目标是对检测到的故障事件进行精确分

类。该模块的核心是加载并运行在分析处理层训练好的故障诊断分类模型（如 SVM、随机森林、CNN、LSTM 或其混合模型）。当实时故障检测算法触发警报后，相关的故障录波数据或特征向量会被送入该模块。模块首先对输入数据进行必要的预处理和特征提取（如果模型需要输入特征而非原始数据）。随后，分类模型根据学习到的故障模式知识，计算出输入数据属于各种预设故障类型（如单相接地短路、两相短路、三相短路、断线、设备内部故障等）的概率或置信度。模块根据模型的输出结果，选择概率最高的故障类型作为最终识别结果。

3. 故障定位技术实现

故障定位技术旨在确定故障发生的物理位置。^[11]行波测距法是一种高精度的定位技术，该方法利用故障瞬间产生的暂态电压/电流行波在输电线路上的传播特性，通过测量行波到达线路两端监测点的时间差来计算故障点距离。阻抗法是应用最广泛的定位方法之一，该方法利用故障后稳态的电压、电流测量值计算从测量点到故障点的线路阻抗，进而推算出故障距离，其精度受系统运行方式、过渡电阻、线路参数不对称等因素影响较大。智能定位方法结合大数据分析，利用历史故障数据、线路参数、拓扑信息以及实时量测数据训练机器学习或深度学习模型（如支持向量回归 SVR、神经网络、图神经网络 GNN），该模型能够学习复杂的故障特征与位置之间的映射关系，克服传统方法的某些局限。

四、总结

大数据技术为电力工程故障诊断领域带来了革命性的变革潜力。本研究系统性地构建了涵盖数据特征分析、技术体系框架、诊断模型设计及系统实现方案的全链条研究内容。大数据驱动的故障诊断模式能够有效应对电力系统数据的复杂性、提升诊断的准确性与时效性。该模式代表了电力系统智能化运维的重要发展方向，为保障电网安全、稳定、高效运行提供了坚实的技术支撑。未来研究需持续关注模型可解释性、小样本学习、边缘智能部署及跨域数据融合等关键挑战。

参考文献

- [1] 李冰. 电力工程中电力设备故障诊断技术的研究与应用 [C]// 中国智慧工程研究会智能学习与创新研究工作委员会. 2025 人工智能与工程管理学术交流会议论文集. 国网河南省电力公司鹤壁供电公司, 2025: 93-94.
- [2] 李硕, 丁佳伟, 曹浚源. 人工智能技术在电力工程配电运维中的应用与研究 [J]. 自动化应用, 2024, 65(S1): 188-190.
- [3] 杨小川. 电力工程输电线路故障识别方法设计与应用研究 [J]. 光源与照明, 2025, (03): 99-101.
- [4] 王安生. 基于大数据分析的电力系统故障诊断与预测方法研究 [C]// 广西网络安全和信息化联合会. 第七届工程技术管理与数字化转型学术交流会论文集. 国网河南省电力公司, 2025: 551-552. DOI: 10.26914/
- [5] 杨珊珊. 基于深度学习的电力系统故障自动化诊断方法 [C]// 中国电力设备管理协会. 全国绿色数智电力设备技术创新成果展示会论文集（五）. 国网山东省禹城市供电公司, 2024: 262-264.
- [6] 王瑞达, 刘士凯, 黄景帅. 电力工程中电力设备故障诊断技术的研究与应用 [J]. 电气时代, 2025, (02): 102-104.
- [7] 袁春, 张雪松. 电力故障录波数据综合处理系统功能分析 [J]. 电力设备管理, 2020, (09): 64-66.
- [8] 刘文艺, 段恩强. 智能化技术在电力工程设备故障诊断与维修中的应用 [J]. 光源与照明, 2025, (01): 105-107.
- [9] 刘琼. 基于深度学习的电力负荷多因素短期预测模型设计与应用 [J]. 光源与照明, 2024, (12): 192-194.
- [10] 李陶然. 电力工程中的自动化系统故障分析 [J]. 电子技术, 2023, 52(05): 280-281.
- [11] 彭裕龙. 基于深度学习的电力系统故障诊断与定位方法研究 [J]. 电工技术, 2024, (S1): 469-471.

基于有限元分析的高功率电子模块热管理与机械强度协同设计

丁晓阳

中国电子科技集团公司第五十四研究所，河北 石家庄 050000

DOI:10.61369/EPTSM.2025060010

摘 要： 针对高功率电子模块在工作过程中产生大量热量导致器件性能下降甚至失效的问题，构建有限元分析模型对模块进行热-力耦合仿真。通过优化器件结构布局与封装材料参数，实现热管理与机械强度的协同设计。在保障热量有效传导与散逸的同时，提升模块在热应力作用下的结构稳定性。仿真结果显示，合理设计能够显著降低器件内部温升与热应力峰值，提高模块运行的可靠性与寿命，为高功率电子系统提供有效的热-力设计方案。

关 键 词： 高功率电子模块；有限元分析；热管理；机械强度；协同设计

Collaborative Design of Thermal Management and Mechanical Strength for High-Power Electronic Modules Based on Finite Element Analysis

Ding Xiaoyang

The 54th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Shijiazhuang, Hebei 050000

Abstract： To address the issue of performance degradation or even failure of high-power electronic modules due to excessive heat generation during operation, a finite element analysis model is constructed to perform thermal-mechanical coupling simulations on the modules. By optimizing the structural layout of the components and the parameters of the packaging materials, a collaborative design of thermal management and mechanical strength is achieved. This design ensures effective heat conduction and dissipation while enhancing the structural stability of the modules under thermal stress. Simulation results indicate that rational design can significantly reduce internal temperature rise and peak thermal stress in the components, thereby improving the reliability and lifespan of module operation. This provides an effective thermal-mechanical design solution for high-power electronic systems.

Keywords： high-power electronic modules; finite element analysis; thermal management; mechanical strength; collaborative design

引言

随着功率电子技术的快速发展，高集成度和高功率密度电子模块被广泛应用于电动汽车、电力电子设备等领域。然而，功率器件在运行中所产生的高热通量，不仅影响系统效率，还可能引发封装结构损伤，降低模块可靠性。如何在有效散热的同时保障结构稳定性，已成为当前工程设计中的关键挑战。通过有限元分析开展热管理与机械强度的协同设计，有望实现性能与可靠性的双重优化，为工程应用提供科学依据。

一、高功率电子模块热与力耦合失效机理分析

高功率电子模块在持续高功率密度条件下运行时，内部会产生大量热量。若散热不及时或设计不合理，芯片结温迅速升高，不仅降低器件性能，还可能导致热击穿和系统失效。尤其在大功率场景中，器件往往处于极限热负荷边缘，温度梯度大，局部过热现象严重，使得材料间热膨胀不一致的问题更加突出。热量积聚造成封装结构受热变形，加剧了焊点、键合线、导热层等薄弱

部位的热应力集中，成为触发器件损坏的主要原因之一。因此，深入理解热与力相互作用下的失效机制，是实现模块高可靠性设计的基础^[1]。

从材料层级来看，不同封装材料的热导率、热膨胀系数和杨氏模量存在明显差异，在热循环过程中形成复杂的热-力耦合场。芯片与基板之间、焊料层与封装体之间的界面是应力集中的核心区域，易发生剥离、裂纹甚至疲劳破坏。特别是在快速启动、频繁开关或外部环境波动剧烈的工况下，瞬态热应力峰值可

能数倍于稳态条件下的载荷，导致结构应力远超材料屈服强度。

在实际设计中，若仅依赖经验或单一物理场分析，难以全面揭示耦合失效的本质过程。有限元分析作为一种多物理场耦合仿真手段，可在温度场、应力场之间建立精细的映射关系，辅助工程师识别高风险区域与失效路径。通过对器件运行全过程进行热-力联合仿真，可以准确评估不同结构布局、材料选择与热控策略对模块热应力行为的影响，避免局部设计优化带来的整体性能退化问题。理解热力耦合失效机理，不仅有助于提升单个模块的可靠性，也为系统级热-力协同设计提供理论支撑与工程指导^[2]。

二、有限元建模方法及热-力分析参数设置

有限元建模是实现高功率电子模块热-力协同分析的关键步骤，决定了后续仿真结果的准确性与工程指导价值。构建模型时需充分考虑模块内部的多层封装结构，包括芯片层、焊料层、基板层、导热介质以及外壳材料等，建立精细的三维几何结构和材料划分。由于各功能层之间存在明显的热物性与力学性能差异，必须在建模初期就对各材料属性进行精确定义，如热导率、比热容、密度、弹性模量、泊松比及热膨胀系数等。此外，接触界面也是建模的重点之一，应引入热接触电阻与机械接触行为的边界设置，以真实还原芯片封装内部的传热与应力传递路径。考虑到高功率工作条件下的非线性热应力响应，网格划分需兼顾计算效率与局部精度，尤其在应力集中区应适当加密，提高仿真结果的分辨能力^[3]。

在热分析方面，边界条件设置直接影响热场分布的合理性。高功率电子模块通常处于强制对流或自然对流环境中，需根据散热器类型和流体速度设定对流换热系数，并设定外壳与环境之间的辐射热传导边界。同时，模块内部热源的设置应基于器件额定功率密度与实际工作电流、电压条件，通过热源函数精确加载芯片表面或体积内部。此外，若考虑瞬态热效应，还需输入合理的时间步长和总模拟时长，以观察热量积聚、传导与散逸过程中的动态演变。仿真中可获取温度云图、热流矢量图与最大结温数据，为进一步结构应力分析提供热场输入。值得注意的是，在高功率工作场景下，温度梯度对应力分布影响显著，因此热仿真结果需具备空间分辨率高、边界拟合真实的特点，才能为力学分析提供准确的初始条件。

进行热-力耦合分析时，需在有限元平台中建立多物理场之间的耦合关系，将热场计算结果作为载荷传递至结构力学模块。应力分析中，应重点关注器件在温度载荷下产生的热膨胀变形与应力集中区域，评估材料是否超出屈服极限或产生塑性变形。通过分析各关键结构的位移分布、主应力、剪应力与应变能密度，可识别可能发生失效的高风险部位。实际仿真过程中还需考虑热循环载荷、封装预应力、安装固定约束等因素的叠加影响，提升

模型对现实工况的覆盖能力。在模拟复杂载荷作用下的非线性响应时，需采用渐进式求解方法并引入材料非线性本构模型，以避免求解发散或物理失真^[4]。仿真结果不仅可用于验证热设计方案的有效性，还能为器件结构优化提供反馈依据，实现从“热控优先”向“热-力协同”的设计范式转变。

三、热管理策略对温升控制的影响研究

在高功率电子模块运行过程中，大量电能转化为热能使得芯片结温迅速升高，温升问题成为限制模块性能和寿命的关键因素。有效的热管理策略不仅可降低器件温度，还能缓解由热梯度引发的热应力集中，提高整个模块的结构稳定性与长期可靠性。不同的热管理方式对温升控制效果存在明显差异，常见策略包括提高材料热导率、优化结构布局、增强散热路径、设置冷却系统等。有限元热分析可作为评价各策略有效性的基础手段，通过仿真模拟不同设计下的温度分布与热流路径，量化温升变化趋势，为热设计提供科学依据。例如，在模块设计中引入高导热界面材料，可显著提升芯片与散热结构之间的热耦合效率，从而减少结温与壳温之间的温差，减缓局部过热现象^[5]。

从材料角度来看，导热性能是影响模块整体热阻的关键因素。采用高热导率的陶瓷基板（如氮化铝、氮化硅）替代传统氧化铝材料，能有效提高散热能力，降低芯片区域温度。同时，焊料层和填充材料的导热性也对温升控制起到决定性作用，特别是在高频开关器件中，导热胶、TIM等界面材料的热阻占比高于50%。因此，在材料选型阶段，应优先选用低热阻、高稳定性的复合导热介质，以保障热流快速穿透多个封装层向外传导。此外，模块整体结构布局的优化也是提升热管理能力的重要手段。通过调整芯片排布方式、减小功率密集区域、优化热流通道，可实现热量在模块内部的均匀分布，避免局部热点的形成。

冷却系统设计是主动热管理策略的核心，尤其在高热流密度应用中，采用强制对流散热、液冷冷板、喷流冷却等方式已成为常规选择。冷却方式的选择需根据模块功率等级、尺寸限制与运行环境进行匹配。在有限元仿真中，可以分别对自然对流与强制对流进行建模，并通过设置换热边界条件分析其对温升控制的具体影响。仿真结果表明，在同等热源条件下，强制对流可将最大结温降低20%以上，大幅提升模块安全工作裕度。进一步地，采用液冷冷却结构，尤其是微通道冷板等先进技术，能够实现大面积快速热交换，为未来更高功率密度模块提供散热保障^[6]。

四、机械强度设计在热应力控制中的作用

在高功率电子模块中，机械强度设计对于控制热应力、提升结构可靠性具有至关重要的作用。由于不同材料在热环境下的热膨胀特性存在显著差异，热循环过程中产生的热应力往往集中于

界面位置与几何突变区域，极易引发裂纹、剥离、翘曲等结构失效问题。合理的机械强度设计不仅能够提高模块在热载荷下的结构稳定性，还能有效调节内部应力分布，使其远离材料屈服极限，从而降低失效风险。在热—力耦合仿真中，通过精细分析结构在热载荷下的应力响应，发现模块常见失效区域集中于芯片与焊料层、基板与铜层之间，若材料强度不足或界面结合薄弱，即使温度不高，也可能因局部应力峰值引发破坏。因此，结构层级的强度设计不应作为热管理的附属条件，而应与热设计协同进行，共同保障模块的长期可靠运行。

在结构设计中，首先需选取力学性能稳定、热循环疲劳寿命高的材料，尤其是在焊点、键合线、填充胶等微小连接区域，应重点考虑其弹性模量、剪切强度与疲劳性能。弹性模量的选择直接影响热变形协调能力，例如在芯片与基板之间添加中间缓冲层或使用低模量导热材料，有助于释放热应力，减缓界面应变集中。此外，在器件布局上，应尽量避免尖角、孔洞等应力集中结构，采用圆角过渡、对称布置等结构优化手段，使热应力在各功能层之间逐步衰减，避免因局部强化导致整体结构脆弱的问题。在模块封装过程中，通过设置预压装配、强化边缘加固结构等手段，也能有效提升整体机械强度，抑制热胀冷缩带来的结构翘曲与脱层现象。特别是在器件反复通断、高频震动或环境变化频繁的应用场景中，结构强度冗余设计成为保障其热应力控制能力的关键因素^[7]。

有限元热—力耦合仿真为机械强度设计提供了定量分析手段，通过构建材料本构模型与边界加载路径，可模拟实际工况下各部位的应力分布与变形状态。仿真结果显示，在热源功率一定的前提下，结构强度优化可显著降低芯片热应力峰值及基板变形量，提升封装完整性。例如，对比分析不同厚度铜层或不同热膨胀系数填充材料对结构应力的影响，可发现强度分布均匀、材料匹配度高的结构在热循环后表现出更好的稳定性与疲劳抗力。此外，通过参数化建模与敏感性分析，可以识别关键结构尺寸对应力响应的控制权重，指导工程师在设计阶段进行尺寸调整与材料替换，从根本上实现“结构分担热应力”的设计目标^[8]。

五、热管理与结构强度的协同优化设计方案

在高功率电子模块的设计过程中，热管理与结构强度往往被视为两个相对独立的设计方向，但实际工程应用表明，两者间存在复杂而密切的耦合关系。热管理追求高效散热，往往强调导热性能优越的材料和结构形式；而结构强度设计则关注材料匹配性、力学承载能力与热应力释放路径的合理性。如果仅强调散热而忽视结构强度，可能导致热应力集中、材料疲劳失效；反之，过度强化结构而牺牲导热路径，又会引发局部过热、功率器件性能衰退。因此，构建一种热管理与结构强度协同优化的设计方法，能够在实现高效散热同时保证模块结构稳定性，成为提升

高功率电子模块可靠性与寿命的关键策略。协同优化不仅是参数调整，更是一种设计思维的融合，即在材料、结构、工艺等多个维度上协调各项性能指标，推动多物理场设计的系统化发展^[9]。

实现热—力协同优化，需依托于高精度有限元仿真平台，构建涵盖热传导、热膨胀、力学响应与材料失效等因素的多物理场模型。在建模过程中，首先对模块进行三维几何建构，明确各功能层的材料属性、边界条件与热源分布，通过稳态与瞬态热分析获取温度场分布，再将其作为载荷输入至结构力学模块，分析热应力与变形行为。在此基础上，可引入参数化设计手段，对材料厚度、几何尺寸、界面形态等关键参数进行变量定义，并通过灵敏度分析识别对热应力影响最大的设计变量。接着，借助多目标优化算法（如响应面优化、遗传算法等），对目标函数（如最大结温、应力峰值、变形量）进行全局优化搜索，寻求热性能与结构强度的最优平衡点。该过程不仅能实现设计效率提升，还可避免传统依靠经验逐步试错的低效路径，为工程实际提供高可靠性的设计方案。

例如，在某 SiC 功率模块设计中，研发团队采用 ANSYS Workbench 进行热—力耦合优化。初始设计中芯片中心结温高达 173℃，焊料层最大剪应力超过 45 MPa，存在失效风险。仿真模型首先建立芯片—焊料—DBC 基板—散热器的全结构层级，设置功率热源、对流换热边界与材料热膨胀本构关系。通过调整 DBC 铜层厚度与焊料层弹性模量，结合热导胶界面优化，系统结温下降至 152℃，焊料层应力降低约 30%。同时，优化铜层布局避免了应力集中，实现了热性能与结构可靠性的协同提升。最终方案通过红外热像验证热分布一致性，并以应力测试片确认焊接区域应力分布匹配仿真预测。如图 1 所示。

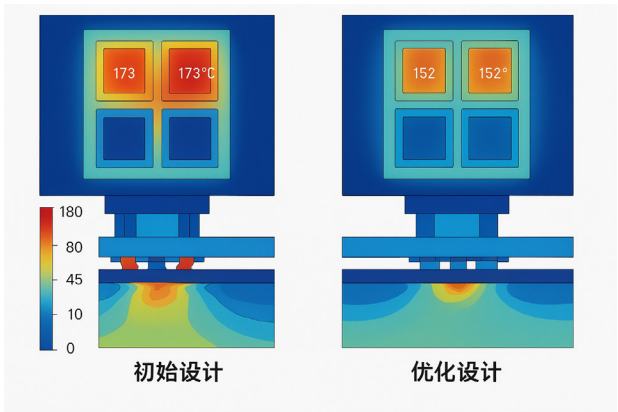


图1 SiC 功率模块设计前后对比图

该类优化策略也可因应用场景差异而灵活调整。在高频高热环境中，应选用导热性与抗热疲劳能力兼优的复合材料；在结构振动显著的装备中，则应强化边界支撑区域，降低器件应变与裂纹扩展速率。结构布局方面应避免热桥或冷桥形成，增强热应力缓释通道^[10]。采用分层协同设计法，可将热控聚焦于散热路径通畅与导热层配置，将结构优化集中于几何应力平滑与固定点布置，从系统维度统筹协调各模块性能。最终通过红外成像、应力

片分析及热应变监测等手段对优化模型进行验证，确保热—力预测结果与实际环境响应相一致，从而显著提升模块在复杂工况下的稳定性与可靠性，体现协同设计的工程优势。

六、结语

高功率电子模块在高热流密度和复杂载荷条件下的可靠运行，离不开热管理与机械强度的协同设计。通过有限元多物理场

建模与仿真，可系统分析热与力耦合机制，优化材料选型、结构布局与冷却策略，实现温升控制与结构稳定性的同步提升。协同优化方法不仅提升模块在热循环与机械应力下的耐久性，也为高集成度、高可靠性电子系统的设计提供了理论支撑与技术路径，具有广泛的工程应用前景与现实价值。

参考文献

- [1] 谢天赐. 某型水下目标模拟器高功率密度驱动技术研究 [D]. 北华航天工业学院, 2024.DOI:10.27836/d.cnki.gbhht.2024.000097.
- [2] 牛海君, 银军. 一种宽带高功率放大器的设计与实现 [J]. 通讯世界, 2024, 31(05): 4-6.
- [3] 王广来. 基于石墨嵌入式 SiC 功率模块封装的结构设计与优化 [D]. 桂林电子科技大学, 2024.DOI:10.27049/d.cnki.gglde.2024.000606.
- [4] 刘响黎. 大功率碳化硅功率模块多芯片并联封装集成方法 [D]. 桂林电子科技大学, 2024.DOI:10.27049/d.cnki.gglde.2024.001188.
- [5] 史海林, 张军, 黄栋, 等. 高功率密度 DC/DC 电源模块结构与封装 [J]. 电子工艺技术, 2024, 45(03): 10-12+20.DOI:10.14176/j.issn.1001-3474.2024.03.003.
- [6] 陈鸿. 低感叠层电路功率模块封装技术及其开关特性研究 [D]. 桂林电子科技大学, 2024.DOI:10.27049/d.cnki.gglde.2024.001519.
- [7] 雷霖. 智能功率模块栅极驱动电路的研究 [D]. 贵州大学, 2024.DOI:10.27047/d.cnki.ggudu.2024.003159.
- [8] 岳嘉瑞. 高功率微波对 MOSFET 集成电路的损伤仿真研究 [D]. 西安石油大学, 2024.DOI:10.27400/d.cnki.gxasc.2024.000921.
- [9] 陈兴, 张超, 陈东博, 等. 一种三维集成的 Ku 波段高功率 T/R 模块 [J]. 半导体技术, 2024, 49(06): 569-574.DOI:10.13290/j.cnki.bdtjs.2024.06.010.
- [10] 殷超, 解鹏程, 刘彬, 等. 高功率密度电力电子模组热特性研究与试验 [J]. 高压电器, 2024, 60(12): 143-151.DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2024.12.016.

火力发电厂低碳电力生产高效率的自动控制方法研讨

万奎

连云港虹洋热电有限公司, 江苏 连云港 222000

DOI:10.61369/EPTSM.2025060012

摘 要： 火力发电厂是我国电力供应的主要力量，其碳排放问题日渐突出，发展低碳高效的自动控制技术是达成双碳目标的关键途径。本文剖析了火力发电厂碳排放状况以及自动控制技术在节能减排方面的重要作用，探讨了燃烧过程智能优化控制，碳捕集与利用自动化控制，能效监测与即时调控等关键技术，给出多参数协同优化控制。依靠大数据的预知性维护与控制，智能电网协调下的负荷优化调度等策略，通过形成全方位的自动控制体系，实现火力发电厂生产过程的精确控制并改善运行，从而减小碳排放强度，提升能源利用效率，给电力行业绿色转型提供技术支撑。

关 键 词： 火力发电；低碳生产；自动控制；节能减排；智能优化

Discussion on High-Efficiency Automatic Control Methods for Low-Carbon Electricity Production in Thermal Power Plants

Wan Kui

Lianyungang Hongyang Thermal Power Co., Ltd. Lianyungang, Jiangsu 222000

Abstract： Thermal power plants constitute the mainstay of China's electricity supply, with their carbon emission issues becoming increasingly prominent. Developing low-carbon and efficient automatic control technologies is a crucial approach to achieving the dual carbon goals. This paper analyzes the carbon emission status of thermal power plants and the significant role of automatic control technologies in energy conservation and emission reduction. It explores key technologies such as intelligent optimization control of the combustion process, automated control of carbon capture and utilization, and energy efficiency monitoring and real-time regulation, proposing multi-parameter collaborative optimization control. By relying on strategies such as predictive maintenance and control based on big data, as well as load optimization dispatching coordinated by smart grids, an all-encompassing automatic control system is formed. This system enables precise control and improved operation of the production processes in thermal power plants, thereby reducing carbon emission intensity, enhancing energy utilization efficiency, and providing technical support for the green transformation of the power industry.

Keywords： thermal power generation; low-carbon production; automatic control; energy conservation and emission reduction; intelligent optimization

在全球应对气候变化及我国“双碳”战略背景下，火力发电厂面临着严峻的减排压力，火力发电行业作为主要碳排放源之一，迫切需要依靠技术创新达成低碳转型。自动控制技术是改善发电效率，削减碳排放的关键途径，它在改良燃烧流程，提升能源利用效率，缩减污染物排放等方面有着不可或缺的作用，现代控制理论同人工智能，大数据等新兴科技的融合，给火力发电厂实现智能化，细致化经营赋予了新的可能。

一、火力发电厂低碳生产自动控制的现状与意义

（一）火力发电厂碳排放的现状与挑战

目前，我国火力发电厂年碳排放量占全国碳排放总量的40%以上，是碳减排的重点领域。传统火电机组运行效率较低，平均

供电煤耗依然高于发达国家水平，单位发电量的二氧化碳排放强度较高，机组负荷频繁波动导致燃烧不充分，热效率降低，碳排放增加，煤质参差不齐，燃烧控制粗放等问题也使排放压力增大。随着可再生能源并网规模扩大，火电机组需要频繁调峰，运行工况复杂多变，给低碳生产带来新挑战，碳达峰碳中和时间表

倒逼火力发电厂必须加快技术升级,通过精准的自动控制手段实现生产全过程优化,从源头上减少碳排放,这已成为行业转型发展亟待解决的问题^[1]。

（二）自动控制在节能减排中的应用与作用研究

自动控制技术对发电过程实施精确调节和改良之后,火力发电厂的运作效率和环保水准均得到明显提升,先进的燃烧控制系统可按照煤质改变和负荷需求,及时调节风煤比例,给粉量等参数,从而保证燃烧足够充分,削减不完全燃烧产生的损失。智能化的汽轮机控制系统改良蒸汽参数,改进热力循环效率,减小能耗,分布式的控制系统达成全厂设备协调运转,缩减能量损失,预测控制,模糊控制等高级算法被采用以后,控制精度得以大幅度提高,机组运作变得更为稳定高效,自动控制技术可实现污染物排放的在线检测和即时控制,保证达标排放,创建起较为完善的自动控制体系之后。火力发电厂既能在保障电力供应的前提下,又能最大程度地削减碳排放强度,从而实现经济效益与环境效益两者的共赢^[2]。

（三）低碳高效生产对能源转型的重要意义

火力发电厂实现低碳高效生产对于推动能源结构改良和绿色转型有着非常重要的战略价值,在可再生能源还不能完全取代化石能源的过渡时期,改进火电效率就是缩减碳排放的现实途径。通过自动控制技术改善以后,每发一度电可节约10克标准煤,全国火电行业每年就能削减上亿吨二氧化碳排放量,低碳生产的推行会拉长火电机组的服役期限,削减资产搁浅的风险,保证能源供应安全。高效运作削减了发电成本,提升了火电在电力市场中的竞争力,有益于发挥火电的调峰调频作用,助力新能源的消纳,低碳技术创新还可以带动相关产业发展,形成新的经济增长点,火力发电的低碳转型给其他高耗能行业起到了带头作用,对于推动整个社会的节能减排,达成碳中和目标有着引导意义^[3]。

二、火力发电厂低碳生产的自动控制关键技术

（一）燃烧过程的智能优化控制体系

燃烧过程是火力发电厂能量转化的关键部分,它的控制好坏直接关联到机组效率和排放情况,智能优化控制系统借助先进的传感器技术,随时监测炉膛温度场分布,氧量,一氧化碳含量这些重要参数,形成燃烧过程的动态模型。依靠神经网络和深度学习算法,它可以辨认煤质变动,预估燃烧特性,自动调节配风方案和燃烧器运作模式,多目标优化算法兼顾效率最大值和排放最小值,随时寻找到最优运行点。智能控制系统还具备故障诊断功能,可以及时察觉燃烧异常,防止出现结焦,爆管等情况,通过对煤粉细度,二次风配比,燃尽风等方面的控制,达成分级燃烧与低氮燃烧,而且采用分布式结构,各个控制回路相互协作,从而保障燃烧过程的稳定与经济性,从实际运用来看,智能燃烧优化控制之后,锅炉效率提升了2-3个百分点,氮氧化物排放削减了30%以上,为低碳生产形成稳固根基^[4]。

（二）碳捕集与利用的自动化控制技术

碳捕集与利用技术是火力发电厂实现深度减排的关键路径,

其自动化控制水平决定着系统运行的可靠性和经济性,控制系统要协调吸收塔、解吸塔、压缩机等单元的运行。保证碳捕集过程连续稳定,先进过程控制技术借助吸收剂循环、能量平衡、物料平衡的数学模型来优化操作参数,减少再生能耗,自适应控制策略可以应对烟气流量和二氧化碳浓度的波动,维持捕集率在设定范围内,智能控制系统会随时检测吸收剂性能退化情况。自动调节补充和更换策略,延长使用寿命,二氧化碳压缩和输送环节,控制系统保证压力,温度,纯度等符合下游利用或者封存的需求,碳捕集装置和主机组协同运作,按照电网负荷来调整捕集强度,实现减排目标 and 经济效益的均衡,通过控制改良,碳捕集系统的能耗能削减15-20%,运行成本大幅度下降,提升了技术的可行性和推广价值^[5]。

（三）能效监测与实时调控系统

能效监测与实时调控系统是火力发电厂精细化管理的关键工具,对全厂能量流实施实时追踪并加以优化配置,从而发掘节能潜力,该系统布置了覆盖锅炉、汽轮机、辅机等设备的传感器网络,搜集温度、压力、流量、振动等运行数据,创建数字孪生模型。依靠大数据分析技术,系统可以找到能效偏差,找出能量损耗环节,衡量节能空间,实时优化算法按照机组负荷,环境状况,设备状态等要素,随时改变运行参数,让机组一直处在最佳工况,性能计算模块在线判断锅炉效率、汽轮机热耗率、厂用电率这些指标。将这些数值与标杆值比较,从而指引运行方面的改动,故障预警利用趋势分析法和模式辨别技术,在问题发生前就能预判设备性能下滑,以此防止效率下降,该系统还有个能源审计的功能,它会自动做出能效报告,给经营决定提供依照,通过建立起完整的能效体系管理循环流程之后,发电厂就能持续改善其运行水平,进而使供电煤耗下降到5-8克标准煤每度,每年节约标煤好几万吨,并且减排的效果明显。

三、提升火力发电厂低碳生产效率的控制策略

（一）多参数协同优化控制策略

多参数协同优化控制策略属于系统级控制方案,通过创建各子系统之间的耦合联系模型,实现整体最优运行效果。这个策略冲破了传统分散控制的局限性,把锅炉侧的燃烧参数,汽轮机侧的热力参数以及环保设施的运行参数统统纳入统一建模和协调控制范畴,控制系统采用分层递阶架构,上层承担全局优化决策任务,按照机组负荷需求,煤质特性,环境约束这些边界条件,用多目标优化算法求出最优工作点;下层执行控制任务。凭借预测控制,自适应控制等先进算法实现迅速准确的调节,协同控制重点在于动态过程的改良,创建起动态反应模型,预估系统行为,预先调节控制策略,削减过渡过程的能量耗费与排放波动,这种策略还采用了鲁棒控制理论,提升系统应对不确定性因素的能力,保证在煤质波动,设备性能改变等干扰之下仍旧可以实现优化运作。

例如,在实际应用中,火电厂部署协同优化控制系统,先构建一个包含主蒸汽压力、温度、给水流量、燃料量、送风量等参

数的多变量模型，系统实时采集这些参数数据。采用遗传算法或者粒子群算法执行在线寻优，每隔5秒更新一次最优设定值，当机组负荷指令发生变化的时候，控制系统会提前10到15秒就开始调节燃料和风量，让锅炉蓄热与汽轮机的需求相匹配。同时协调脱硝、脱硫系统的喷氨量以及浆液流量，以保证污染物排放不超标，建立不同的工况控制策略库，使控制系统可以根据各种不同的启停、变负荷、稳态等工况快速进行控制模式切换，完成全工况的运行，同时在控制系统中设置专家规则库，一旦检测出异常工况就会立即触发应急预案，以避免控制参数越限和设备损坏，保障机组安全稳定运行。

（二）大数据驱动预测性维护与控制策略

基于大数据的预测性维护与控制策略利用数据挖掘和机器学习技术，对设备故障进行早期预警和性能改善，其核心是创建设备健康评价模型。通过分析振动，温度，压力，电流等各方面监测数据的变动趋向和相关性，找出设备劣化的迹象，系统借助时间序列分析，支持向量机，深度神经网络等算法来构建故障预估模型，算出设备的健康指数和余命。控制策略按照设备状态评定的结果，及时调节运转参数，以维持生产任务的完成为前提，削减设备所承受的负荷强度，减缓其劣化速度，知识库系统汇集起历史故障实例和专家意见，给故障判断和保持决定提供支撑，而且，此策略还采取数字孪生技术，创建设备的虚拟仿真模型，凭借仿真分析来检验保持方案是否有效，改良保持策略。

例如，火电厂执行该策略的时候，先在关键设备，像给水泵，风机，磨煤机等装置上安装振动传感器，温度传感器等监测装置。创建起设备监测网络，数据搜集体系按照每秒一次的频率搜集运转数据，把这些数据经过数据清洗，提取特征之后，再输入到预测模型当中，要是检测到轴承振动频谱存在异常峰值，就会自动把设备转速调低10-15%，而且加大润滑油供应量，进而生成检修工单，对于像汽轮机这样的核心设备来说。系统会创建起性能退化曲线，一旦效率下滑超越了某个阈值，就会自动改良汽封间隙调节方案，或者提议执行通流部分清洗，维护人员依据系统给出的故障概率以及影响程度，来制订检修计划，把原本定时的检修变成依照状态开展维护，系统借助边缘计算技术，在设备端执行即时的数据处理并做初步诊断，缩减数据传输延迟，加快对故障的反应速度，保障重要设备正常运行。

（三）智能电网下负荷优化调度的协调策略

智能电网协调下的负荷优化调度策略借助与电网调度系统的

信息交流，实现火电机组运行同电网需求的动态匹配，它创建起包含新能源出力不确定性，电力市场价格波动。碳排放约束等要素的优化调度模型，系统利用预测算法对将来24-72小时的负荷需求，新能源出力执行滚动预测，制订机组启停计划和负荷分配方案，调度优化不但考量经济性指标。而且加入了碳排放强度，调峰能力，响应速度等诸多评价指标，通过与储能系统、需求侧响应资源协同调度，平抑新能源波动，提升系统运行稳定性和经济性，虚拟电厂技术把分散的火电机组聚合起来统一管理，实现资源优化调配，此策略还应用区块链技术，创建起去中心化的调度交易市场，从而增强调度决策的透明度和可追溯性。

例如，在实际运行过程中，火电厂调度系统首先接入省级电网调度中心的数据接口，获取未来24小时的负荷预测曲线和新能源出力预测数据，根据各个机组的煤耗特性曲线、爬坡速率、最小技术出力等参数。采用混合整数规划算法来制定优化调度方案，当预测到光伏发电会在中午达到峰值时，提前2小时开始降低火电机组出力，部分机组降到40%额定负荷进行深度调峰，利用配置好的储能系统，在新能源出力突降时快速补充功率缺口，避免火电机组频繁调节，调度系统还同大用户签署可中断负荷协议，在电网紧张时刻通过需求反应削减负荷压力，促使火电机组维持在高效率区间运行。系统运用多时间尺度协调手段，在日前、日内、实时等诸多不同时间段展开滚动优化，按照实际运行偏差及时修正调度计划，保证调度方案可行且经济。

四、结语

火力发电厂低碳生产高效率自动控制技术研发与应用，是电力行业绿色转型的关键举措，创建智能化、系统化的自动控制体系，融合先进控制理论。人工智能，大数据等技术，火力发电厂可以实现生产过程的精确调控并持续改善，燃烧优化，碳捕集控制，能效监测等关键技术的冲破。多参数协同，预测性维修，智能调度等策略的执行，给低碳高效生产提供有力支持，往后要持续深化技术创新，促使控制系统智能化提升，加大与新能源的协同补充，探究零碳火电的实现途径，为我国能源安全和“双碳”目的的达成作出更大贡献。

参考文献

- [1]胡建辉.火力发电厂低碳运行的经济性研究与分析[J].知识经济,2016,(14):104-104.
- [2]王俊峰.电厂热工智能自动化控制过程的先进方法研究[J].今日自动化,2020,(03):92-94.
- [3]张国兴,高秀林,杨阳,等.电力系统低碳转型的减排效应:基于结构优化的视角[J].管理评论,2025,37(05):3-16.
- [4]赵殿瑞,裴振英,刘伟乾.火力发电厂低碳电力生产高效率的自动控制方法研究[J].沈阳工程学院学报(自然科学版),2019,15(03):255-259.
- [5]颜紫藤.火力发电厂低碳运行的经济性研究与分析[J].海峡科技与产业,2020,33(03):51-53.

超临界对冲燃烧锅炉金属壁温超限分析与治理

梁云旺

广州粤能电力科技开发有限公司, 广东 广州 510000

DOI:10.61369/EPTSM.2025060013

摘 要 : 某电厂 660MW 超临界对冲燃烧锅炉运行过程中金属壁温超限及壁温偏差大, 经过对锅炉制粉系统进行全面优化调整, 在各种负荷工况下进行不同燃烧器投运方式和燃烧器沿炉膛垂直高度、宽度以及深度方向上的配风优化调整, 使得锅炉热负荷分布均匀, 解决各负荷段下水冷壁金属壁温超温现象, 使得水冷壁、屏过、高过、高再壁温均在可控范围之内, 提高了锅炉运行的安全性及经济性。

关 键 词 : 超临界锅炉; 壁温超限; 运行调整; 机组安全

Analysis and Treatment of Metal Wall Temperature Overrun of 660Mw Supercritical Opposed Firing Boiler

Liang Yunwang

Guangzhou Yueneng Power Technology Development Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510000

Abstract : During the operation of supercritical opposed firing boiler in a power plant, the metal wall temperature exceeds the limit and the wall temperature deviation is large. Through comprehensive optimization and adjustment of the boiler pulverizing system, different burner operation modes and air distribution optimization and adjustment of burners along the vertical height, width and depth of the furnace are carried out under various load conditions, so that the boiler thermal load is evenly distributed, and the phenomenon of metal wall temperature overheating of the water wall in each load section is solved, The temperature of water wall, platen superheater, high temperature superheater and high temperature reheater are all within the controllable range, which improves the safety and economy of boiler operation.

Keywords : supercritical boiler; wall temperature overrun; operation adjustment; unit safety

一、概况

某发电有限公司 660MW 超临界锅炉由东方锅炉（集团）股份公司设计制造。锅炉型号为 DG2060/26.15- II 2, 型式为 π 型、单炉膛、一次中间再热、尾部双烟道结构、前后墙对冲燃烧方式、旋流燃烧器、平衡通风、固态排渣、全钢构架、全悬吊结构露天布置, 采用内置式启动分离系统、三分仓回转式空气预热器、采用正压冷一次风机直吹式制粉系统、超超临界参数变压直流本生型锅炉。

锅炉在中低负荷特别是低负荷（250MW）经常出现锅炉水冷壁金属壁温偏差大、容易超温, 同时凝渣管 43 号点也容易出现超温; 锅炉屏式过热器和高温过热器金属壁温在机组加减负荷时候经常出现壁温超温等影响锅炉安全运行的问题。

本文通过总结锅炉制粉系统全面优化调整试验数据, 得出制粉系统最佳运行方式, 并在不同负荷下进行不同燃烧器投运方式和燃烧器沿炉膛垂直高度、宽度以及深度方向上的配风优化调整系列试验数据, 进一步掌握锅炉的运行特性, 使锅炉热负荷均匀分布, 解决锅炉运行过程中稳态下的金属壁温超限及壁温偏差大

和减少动态变负荷过程中屏式过热器和高温过热器金属壁温超限, 以提高锅炉运行的安全及经济性。

二、分析试验

（一）原理分析

对于已经运行的锅炉, 其结构参数无法调整, 可调整参数主要为一、二次风率, 氧量, 一次风温, 一次风量及风速, 燃烧器分级配风状况等。

对冲旋流燃烧煤粉燃烧器将燃烧用空气分为四部分: 一次风、内二次风、外二次风和中心风。其中一次风经煤粉管道、燃烧器一次风管、煤粉浓缩器后喷入炉膛; 内二次风和外二次风通过燃烧器内同心的内二次风、外二次风环形通道在燃烧的不同阶段喷入炉内（外侧为外二次风）, 实现分级供风, 降低 NO_x 的生成量。进入每个燃烧器的内二次风量可通过燃烧器上的套筒式二次风门进行调节, 为手动。通过调节内二次风门的开度可得到适当的内二次风量, 以获得最佳燃烧工况, 即良好的着火稳燃性能、高的燃烧效率、低的 NO_x 排放量及防止燃烧器结焦等。进入

每个燃烧器的外二次风量可通过燃烧器上切向布置的叶轮式风门挡板进行调节。调节外二次风门挡板的开度,即可得到适当的外二次风量和外二次风旋流强度,以获得最佳燃烧工况。燃烧器内设有中心风管,其中布置油枪、高能点火器等设备。每个燃烧器的中心风由该层中心风母管提供,中心风母管入口处设有风门挡板用以调节风量^[1]。

氧量:氧量是锅炉运行的一个重要监测参数,它的改变导致炉内燃烧风量和烟气量的变化,而燃烧风量是一个重要参数,烟气量是一个重要传热参数,因此合理调整燃烧氧量,可以确保煤粉燃烬、NO_x生成量低、炉膛不发生高温腐蚀、各段受热面汽温、壁温符合经济安全运行的要求,减温水量和排烟温度都在合理范围之内。现在大容量锅炉由于炉膛热负荷高,燃尽状况一般都很好,在确保炉膛水冷壁不发生高温腐蚀的情况下采用低氧燃烧,其好处主要有:一、低氧燃烧意味着燃烧风量的减少,NO_x也有一定程度的降低,具有环保意义;二、低氧燃烧,其烟气量减少,排烟损失减小,提高运行经济性。

一次风温:锅炉制粉系统采用直吹式中速磨系统,一次风温的选择主要取决于制粉系统的防爆要求和磨煤机掺冷风量的大小。一次风温越高,则煤粉气流达到着火点所需热量就越少,着火点提前,着火速度就越快。但一次风温过高,对于燃用高挥发分的煤种时,往往会由于着火点离燃烧器喷口过近而造成结渣或烧坏喷燃器。反之,一次风温过低,则会使煤粉的着火点推迟,对着火不利。为确保制粉系统安全,一次风温(磨煤机出口风温)尽量选择相对较低温度,对于燃烧烟煤,通常不超过90℃;对于燃烧印尼煤,通常不超过70℃;而为了减少制粉系统掺冷风量,提高锅炉效率,同时提高炉内燃烧温度和一次风燃烧稳定性,要求选取相对较高一次风温。

一次风的风量、风速:正常运行中,减少风粉混合物一次风的数量,一方面相当于提高煤粉的浓度,使煤粉的着火热降低;另一方面在同样高温烟气回流量下,可使煤粉达到更高的温度,因而可加速着火过程,对煤粉的着火和燃烧都有利。但一次风量过低,则往往会由于着火初期得不到足够的氧气,使反应速度反而减慢而不利于着火的扩展。因此,对应于一种煤种,有一个一次风率的最佳值。一次风量应以能满足挥发分的燃烧为原则。一次风速对着火过程也有一定影响。一次风速过高,会降低煤粉气流的加热速度,使着火点推迟,容易引起燃烧不稳,且煤粉燃烧也不易完全;特别是低负荷时,由于炉内温度较低,有可能产生火焰中断或熄火,此时,便应设法调整降低一次风速。但一次风速过低则会造成一次风管堵塞,而且着火过于靠前,还可能烧坏燃烧器。

燃烧器分级配风:分级送风是根据煤粉的燃烧过程适时补充氧量,一方面防止局部氧量过大而使燃烧温度降低和NO_x生成量增大;另一方面避免后期氧量不足导致燃尽度变差。分级配风方式与炉型、煤种密切相关,需通过燃烧调整试验获得优化的分级配风方式。一、二次风的混合特性也是影响着火和燃烧的重要因素。二次风在煤粉着火以前过早地混合,对着火是不利的。因为这种过早地混合等于增加了一次风量,将使煤粉气流加热到着火

温度的时间延长,着火点推迟。如果二次风过迟混入,又将使着火后的燃烧缺氧。故二次风的送入应与火焰根部有一定距离,使煤粉气流先着火,当燃烧过程发展到迫切需要氧气时,再与二次风混合^[2]。

除了锅炉的运行参数对煤质燃烧有重要影响外,煤质本身的成分对燃烧影响也很重要,这主要成分包括挥发分、灰分、水分,另外煤的发热量也是重要影响因素。

挥发分是固体燃料的重要成分特性,对燃料的着火和燃烧有很大影响。挥发分是气体可燃物,其着火温度低,使煤易于着火。另外,挥发分从煤粉颗粒内部析出后使煤粉颗粒具有孔隙性,与助燃空气接触面积变大,因而易于燃烬。挥发分含量降低时情况则相反,锅炉飞灰可燃物相对偏高;同时,火焰中心上移,对流受热面的吸热量增加,尾部排烟温度也随之上升,排烟热损失增大。

煤的灰分对锅炉运行的经济性的影响主要体现在以下两个方面:(1)影响着火和燃烧过程。煤质中灰分在锅炉燃烧中起到阻碍氧气与碳产生化学反应的作用,灰分升高容易导致着火延迟,同时炉膛燃烧温度下降,煤的燃烬度变差,从而造成较大的不完全燃烧损失;(2)煤炭中的灰分是不可燃部分,在煤炭燃烧过程中,不但不发生热量,反而因由炉膛排出的高温炉渣,损失大量的物理显热。

水分增加对煤燃烧过程的影响主要体现在降低炉内温度,增加烟气量,但水分的增加也会使得排烟温度下降。因此,其对锅炉经济性的影响将在正反两个方面得到抵消。

若煤的发热量降低,则同样的锅炉负荷所用的实际煤量增大,而对于直吹式制粉系统,输送煤粉所需的一次风量也相应增加,导致理论燃烧温度和炉内的温度水平下降,使煤粉气流的着火延迟,燃烧稳定性变差,影响煤粉的燃烬。煤的发热量降低同时会使锅炉排烟温度升高,增加排烟热损失。煤的发热量降低还可能导致锅炉熄火等严重事故的发生^[3]。

(二) 实际调整分析

1. 一次风量调整分析

一次风的作用有两个:煤粉的干燥风和煤粉的携带风。作为干燥风,那么一次风温就直接影响着煤粉的干燥;作为携带风,则风压则直接影响煤粉刚性以及细度。若是运行中风压设置过高,煤粉得不到充分的研磨,将使颗粒变粗,同时由于煤粉刚性增大,煤粉在炉膛的着火时间将会推迟,煤粉得不到充分燃烧,排烟损失加大;若风压设置过低,一次风流速降低,会使煤粉管发生堵塞,并削弱火焰刚性,火焰容易形成回火,造成燃烧器烧损。在保证磨煤机通风量的前提下,如在正常运行中合理降低一次风压,则磨煤机入口风门自动开大,可有效降低一次风系统的节流阻力,降低一次风机电耗以及减少空预器一次风侧漏风率。通过降低一次风率,可减少制粉系统的冷一次风量,在相同的运行氧量下,可以有效的降低排烟温度,从而降低排烟热损失,提高锅炉效率^[4]。660MW负荷时一次风通风量推荐为国内煤85t/h,印尼煤90t/h左右。如磨煤机煤变化较大,推荐该负荷下的风量为90t/h左右。660MW负荷下没有出现明显的偏烧现象,且凝

渣管金属壁温偏差较小,最大偏差12.1℃,另外在维持磨煤机通风量的基础上,可尽可能降低一次风压运行,防止火焰直接冲刷水冷壁。总一次风量对凝渣管出口金属壁温的影响见图1。

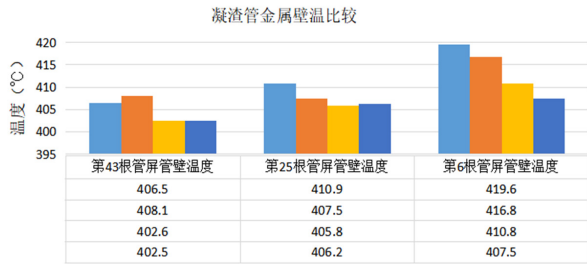


图1 总一次风量对凝渣管出口金属壁温的影响

2. 进行磨煤机组合及配风调整试验

在660MW不同磨组合两个工况中,调整后 ABCDF 磨煤机组合各部位水冷壁金属壁温最大偏差整体均比调整前 BCDEF 磨煤机组合要低。调整前该负荷下的右侧墙螺旋水冷壁出口和水平烟道底部出口金属壁温最大偏差较大,调整后的右侧墙和水平烟道水平底部出口壁温最大偏差分别从38.7℃和32.7℃降为26.9℃和25.4℃,其它部位的金属壁温偏差均小于20℃。调整后 ABCDF 磨煤机组合的屏过、高过、高再的金属壁温最大偏差均比调整前 BCDEF 磨煤机组合的三者金属壁温低的多,可以看出两台上层磨投运时,各部位壁温偏差较高,反之有所缓解。在各层燃烧器及炉膛出口(屏过底部)各区间内所有的看火孔处用高温仪对炉膛火焰温度进行测量。测量结果显示炉膛火焰中心均在上层燃烧器与燃尽风中间处,且炉膛出口热负荷分别较为均匀,两侧烟温偏差小。但C层燃烧器两侧的炉膛温度偏差在100℃左右,这与C磨粉管的浓度偏差和燃烧器进风量有一定的关系^[5]。

经分析,在660MW负荷下,磨煤机投运组合对锅炉运行的安全性和 NO_x 排放的影响较大,对经济性影响较小,但磨煤机 ABCDF 运行时的安全性优于磨煤机 BCDEF。建议660MW负荷时,投运5台磨煤机,并优先采用 ABCDF 三台磨煤机运行。各种磨煤机组合运行下对金属壁温的影响见图2-图3。

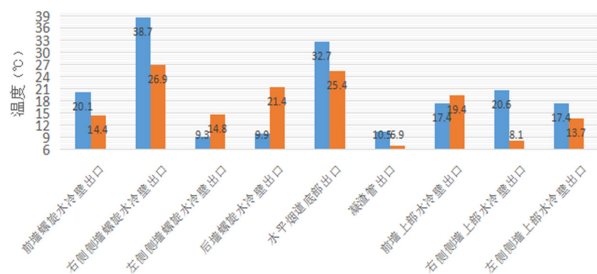


图2 660MW不同磨组合各部位水冷壁金属壁温最大偏差值示意图

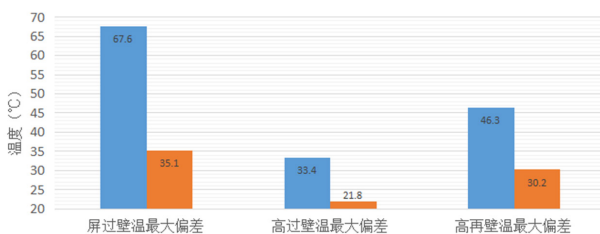


图3 660MW不同磨组合各部位过热器金属壁温最大偏差值示意图

3. 燃烧器配风方式调整

配风方式试验保持制粉系统及燃烧系统主要运行参数不变,仅改变燃烧器二次风箱挡板开度,改变配风方式,上中下层燃烧器风箱挡板开度全部分别为90%/75%/60%,试验工况下主蒸汽温度分别为试验工况下主蒸汽温度分别为602.8℃、602.4℃、602.9℃,对应的过热器总减温水流量分别为172.4t/h、152.6t/h、157.4t/h;再热蒸汽温度分别为600.9℃、600.3℃、601.0℃,对应的再热器减温水流量分别为0t/h、7.99t/h、5.02t/h;排烟温度(修正后)分别为138.7℃、136.1℃、135.7℃。

根据试验结果,660MW负荷时投运燃烧器风箱挡板均开至75%~85%(五磨运行),但各层燃烧器风箱挡板开度应根据煤种和燃烧器出力不同而轻微改变,因锅炉低负荷时炉渣含碳量较高,建议中层燃烧器风箱挡板开度介于在下层和上层开度的中间位置,这样可以增加底层二次风量,提高二次风托粉能力^[6]。为提高氧量利用率,停运燃烧器风箱挡板关至20%。

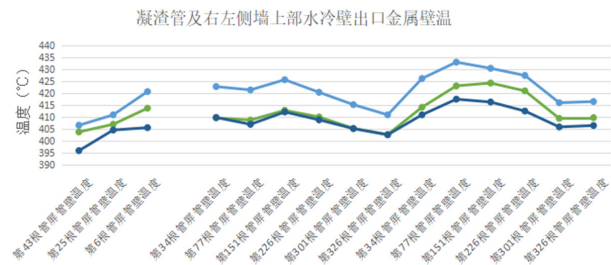


图4 660MW负荷(BCDEF)对凝渣管和左右侧上部水冷壁出口金属壁温的影响

在660MW负荷下,投运燃烧器的不同风箱挡板开度对水冷壁各部位金属壁温偏差影响较小,水冷壁出口各部位金属壁温最大偏差在15.6℃,凝渣管金属壁温最大偏差在14.2℃。

燃尽风对壁温的影响:燃尽风量大小对汽温特性有着显著影响,燃尽风开大后,过热汽温下降,壁温同时降低^[7]。对于管壁温度偏差控制影响,现阶段采取的措施均是A、B两侧燃尽风挡板差异化单独调整来缓解两侧壁温差。

三、分析结论及建议

(一) 通过上述试验分析,基于低负荷水冷壁壁温偏差大,提出以下控制措施:

1. 适当降低机组主蒸汽温度,尽量使用烟气挡板来减少减温水的用量。保证在同样机组负荷下,同样的给水量流经水冷壁较多,缓解水冷壁超温状况。

2. 掺烧煤质的热值尽可能高点,因为低热值的煤会导致进入炉膛的总煤量和总风量偏高,更容易导致凝渣管和水冷壁超温。且磨煤机动态分离器转速过低导致煤粉过粗,使燃烧整体整体推后,导致屏式过热器和凝渣管部位受热过强,容易发生超温的可能。

3. 机组变负荷过程中应控制好降负荷速率和各个磨煤机煤量。在升降负荷过程中,可能会产生煤量过调现象,如果过调应及时人工干预,同时关注屏式过热器出口温度变化趋势,保证主

蒸汽温度和再热器温度稳定，切勿引起主蒸汽温度大幅波动。锅炉减负荷时，应考虑锅炉有一定的蓄热能力，过程中锅炉整体热负荷偏高，应注意水冷壁和凝渣管管壁变化趋势，及时通过给水偏置或减少总煤量^[8]。

4. 合理安排选择性吹灰：掺烧印尼煤会经常性导致水冷壁部位结焦，导致受热面换热不均匀，致使部分水冷壁区域壁温高且可能超温。

（二）针对机组目前机组运行情况，提出以下运行建议：

1. 煤粉细度和浓度：煤粉细度大和浓度偏差大目前暂无有效的调整手段，其根本问题在于设备性能。建议适当对磨煤机进行改造，降低煤粉细度和减小浓度偏差大的现象，从而改善热负荷偏差^[9]。

2. 二次风量：低负荷时总二次风量偏大且各燃烧器间风量存在偏差，容易导致凝渣管和水冷壁超温。从试验低负荷段磨不同组合运行方式可以看出各燃烧器间风量存在明显的偏差，就地调整可调锁孔以改善煤粉浓度后，温度偏差无明显好转。建议冷态时对二次风量进行标定及炉内测量燃烧器喷口的二次风量，以均衡单只燃烧器的风量偏差。

3. 在正常运行过程中炉膛负压建议在-80pa--100pa左右，

它能明显增加煤颗粒在炉膛内的滞留时间，使煤充分燃烧提高热效率。

4. 对于对冲燃烧的旋流锅炉来说，要想实现经济运行、节能降耗的目标，首先需要避免燃烧不均的问题。建议定期对锅炉燃烧均匀性进行测试（特别是当煤质有较大变化时），若发现有燃烧不均的问题，需对各支燃烧器的风门开度进行重新调整。同时建议在锅炉燃烧器外二次风门增加执行机构，有利于提高运行人员对燃烧器送风量的可控性，可减少锅炉两侧汽温偏差和氮氧化物的生成量，提高锅炉安全性及经济性^[10]。

四、结束语

锅炉是燃煤电厂的三大主机设备之一，在当前的运用中，由于设备本身质量及操作管理不善等方面的原因，致使其存在各种问题，严重影响了电厂生产的稳定性。通过研究发现，经过调整一次风量、配风方式、磨煤机组合能够有效解决锅炉壁温超限问题，提高机组运行安全性。同类型机组在遇到类似问题时，应及时进行合理调整，从而提高机组运行的经济性和安前性。

参考文献

[1] 李德波, 沈跃良. 前后对冲旋流燃煤锅炉 CO 和 NO 分布的试验研究, 动力工程学报 [J], 2013(7):502-506, 554.
[2] 丁小骄. 应用于煤粉锅炉柔和燃烧技术试验研究 [D]. 中国科学院研究生院 (工程热物理研究所), 2016.
[3] 杨忠灿, 王志超, 李炎, 贾晓艳. 电站煤粉锅炉掺烧兰炭试验研究 [J]. 锅炉技术, 2017.48(03):31-36.
[4] 黄伟荣. 锅炉屏式过热器热偏差及金属壁温超温整治 [J]. 2014(9):11-11.
[5] 郭涛. 大型电站锅炉高温受热面热偏差分析研究 [D]. 华北电力大学, 2014.
[6] 李湘岳. 电厂锅炉高温过热器爆管原因分析及预防措施 [J]. 科技与创新, 2016(24).
[7] 黄新元. 电站锅炉运行与燃烧调整 [M]. 中国电力出版社, 2007.
[8] 高峰. 锅炉热经济性燃烧调整分析 [J]. 锅炉技术, 2007, 38(4): 43-46.
[9] 黄耀. 煤粉锅炉制粉系统常见事故及预防措施 [J]. 中国高新科技 2019(14): 100-102.
[10] 陈坚, 郑庄明, 徐林, 鲁杰. 某化工企业煤粉锅炉设计方案对比分析 [J]. 应用能源技术, 2019(04):23-25.

火电厂安全生产双重预防机制的数字化构建与实践

黎潇云

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 553300

DOI:10.61369/EPTSM.2025060014

摘 要： 火电厂安全生产至关重要，双重预防机制是其重要保障。传统双重预防机制存在一定局限性。本文聚焦火电厂，探讨安全生产双重预防机制的数字化构建与实践。分析传统机制面临的挑战，阐述数字化构建的必要性。提出数字化构建的体系架构，包括感知层、平台层和应用层。介绍物联网监测、大数据分析等关键技术支撑。从标准化流程嵌入、跨部门协同等方面说明实施策略。研究表明，数字化构建能提升火电厂安全生产管理水平，实现风险的精准管控与隐患的有效治理，为火电厂安全生产提供有力支持，具有显著的实践意义和推广价值。

关 键 词： 火电厂；安全生产；双重预防机制；数字化；构建实践

Digital Construction and Practice of Dual Prevention Mechanism for Safety in Thermal Power Plant

Li Xiaoyun

State Power Investment Group Guizhou Jinyuan Co., LTD. Nayong Power Plant, Bijie, Guizhou 553300

Abstract： Ensuring safety in thermal power plant operations is paramount, with the dual prevention mechanism serving as a critical safeguard. Traditional approaches to this dual prevention system demonstrate inherent limitations. This study focuses on thermal power plants, exploring the digital transformation of safety management mechanisms. It analyzes challenges in conventional systems and underscores the necessity of digital implementation. The proposed framework comprises three layers: perception layer, platform layer, and application layer. Key technological pillars include IoT monitoring and big data analytics. Implementation strategies are detailed through standardized process integration and cross-departmental collaboration. Research findings indicate that digital transformation enhances safety management capabilities, enables precise risk control and effective hazard mitigation, thereby providing robust support for thermal power plant operations. These advancements demonstrate significant practical value and broad applicability across similar facilities.

Keywords： thermal power plant; production safety; double prevention mechanism; digitalization; construction practice

引言

火电厂作为国家能源供应的关键环节，承担着为社会提供稳定、可靠电力的重要使命。其安全生产不仅关系到自身的正常运营，更直接影响着电力系统的稳定运行以及社会公共安全。双重预防机制，即风险分级管控和隐患排查治理，是当前我国安全生产领域的重要制度创新，为火电厂预防事故发生提供了重要的思路和方法。然而，在传统模式下，双重预防机制在火电厂的实际应用中面临诸多挑战。随着数字化时代的发展，火电厂安全生产双重预防机制的数字化构建成为必然趋势。本文旨在探讨如何通过数字化手段构建与实践双重预防机制，提升火电厂安全生产水平。

一、火电厂安全生产双重预防机制传统模式及挑战

（一）双重预防机制概述

双重预防机制是安全生产领域的一项重要制度，由风险分级管控和隐患排查治理两部分组成。风险分级管控是指通过系统地

识别生产过程中的各类危险有害因素，采用科学的方法对风险进行评估，根据风险的大小将其划分为不同的等级，然后针对不同等级的风险制定相应的管控措施，实现对风险的有效控制，从源头上预防事故的发生。隐患排查治理则是在生产过程中，通过定期或不定期的检查、监测等方式，及时发现可能导致事故发生的

安全隐患，对排查出的隐患进行登记、评估、治理和验收，确保隐患得到及时消除，防止事故的发生^[1]。

（二）传统模式的特点与局限

在传统模式下，风险分级管控主要依靠人工经验进行风险识别和评估，通过定期检查、会议讨论等方式确定风险等级。隐患排查治理依赖人工巡检，巡检人员凭借经验和感官检查设备运行状况、环境安全等情况，发现问题后记录在纸质表格上，再层层上报处理。这种模式存在明显局限，人工经验判断主观性强，不同人员对风险的认知和评估可能存在差异，导致风险分级不准确。人工巡检效率低，难以做到实时、全面覆盖，一些潜在隐患可能无法及时发现。而且纸质记录信息传递慢，责任追溯困难，隐患治理的闭环管理难以有效落实。

（三）火电厂安全生产的特殊需求

火电厂的生产过程极为复杂，涉及高温、高压、高速旋转设备，以及易燃易爆的燃料储存和使用等多个环节。锅炉需要在高温高压下运行，将水转化为蒸汽，为汽轮机提供动力；汽轮机则在高速旋转的状态下将蒸汽的能量转化为机械能，带动发电机发电。这些设备和工艺都具有较高的风险性，一旦发生故障或事故，可能会导致严重的后果，如锅炉爆炸、汽轮机飞车、电气火灾等，不仅会造成设备损坏和人员伤亡，还会影响电力供应的稳定性。

此外，火电厂的燃料储存和使用也存在较大的安全隐患。煤炭、天然气等燃料具有易燃易爆的特性，如果储存不当或使用过程中出现泄漏，可能会引发火灾、爆炸等事故。因此，火电厂对安全生产的要求极高，需要更加精准、高效的风险管控和隐患治理手段，以确保生产过程的安全稳定运行。传统的双重预防机制难以满足火电厂的特殊需求，亟需引入新的技术和方法进行改进和完善^[2]。

二、火电厂安全生产双重预防机制数字化构建的必要性

（一）适应行业发展趋势

随着科技的飞速发展，数字化、智能化已成为各行业发展的必然趋势。在电力行业，数字化转型也在加速推进。火电厂作为电力生产的重要组成部分，引入数字化技术构建双重预防机制是顺应行业发展潮流的必然选择。通过数字化构建，火电厂能够提升自身的管理水平和竞争力，更好地适应未来能源市场的发展变化^[3]。数字化技术的应用可以实现生产过程的自动化、智能化控制，提高生产效率和能源利用效率，降低生产成本。同时，数字化构建还能够提升火电厂的安全管理水平，减少事故的发生，保障电力供应的稳定性。

（二）解决传统模式痛点

数字化构建可以有效解决传统双重预防机制的痛点。利用先进的传感器和物联网技术，能够实时采集生产设备的运行数据和环境参数，实现对风险的动态监测和精准识别。传感器可以安装在设备的关键部位，实时监测设备的温度、压力、振动等参数，通过数据分析和比对，及时发现设备的异常情况，避免人工经验判断的主观性和局限性。通过信息化系统，实现隐患排查治理的线上管理，提高信息传递效率，方便责任追溯，确保隐患治理的

闭环管理。工作人员可以通过移动终端实时上传隐患信息，系统能够自动对隐患进行分类、评估和派单，对隐患的治理进度进行跟踪和监督，确保隐患得到及时消除^[4]。

（三）提升安全生产水平

数字化双重预防机制能够实现对火电厂生产全过程的实时监控和风险预警。通过对大量生产数据的分析和挖掘，能够深入了解生产过程中的安全规律和风险特点，为制定更加科学合理的安全管理策略提供依据。当系统检测到潜在的安全风险时，能够及时发出预警信号，提醒相关人员采取措施进行处理，将事故隐患消灭在萌芽状态。数字化构建还能够提高事故应急响应能力，在事故发生时，系统能够快速提供相关的信息和数据，为应急救援提供支持，减少事故的损失。从而有效降低事故发生概率，保障火电厂的安全生产，为社会提供稳定的电力供应^[5]。

三、火电厂安全生产双重预防机制数字化构建的体系架构

（一）感知层

感知层是数字化双重预防机制的基础，主要通过部署各类传感器实现对生产设备和环境信息的采集。在火电厂中，传感器可以安装在锅炉、汽轮机、发电机等关键设备上，实时监测设备的温度、压力、振动、转速等运行参数。在环境中，传感器可以用于监测烟雾、可燃气体浓度、温湿度等信息。这些传感器就像“眼睛”和“耳朵”，能够实时感知生产过程中的各种变化，为后续的风险评估和隐患排查提供数据支持。

（二）平台层

平台层是整个数字化双重预防机制的核心，负责对感知层采集的数据进行存储、分析和处理。平台通过大数据技术对海量数据进行整合和管理，建立风险数据库和隐患数据库。利用数据分析算法，对生产设备的运行状态进行评估，识别潜在的风险因素，并对风险进行分级。同时，平台能够对隐患排查治理的过程进行跟踪和管理，实现隐患的动态监控和预警。平台层还提供用户管理、权限管理等功能，确保系统的安全性和可靠性。

（三）应用层

应用层是面向用户的应用界面，为火电厂的管理人员、安全人员、巡检人员等提供具体的应用功能。通过应用层，管理人员可以实时查看生产设备的运行状态、风险等级和隐患排查治理情况，做出科学合理的决策。安全人员可以利用系统进行风险评估、隐患排查计划的制定和执行，对隐患治理情况进行监督和考核。巡检人员可以通过移动终端接收巡检任务，实时上传巡检数据，发现隐患后及时上报。应用层还可以提供报表生成、数据分析等功能，为安全管理提供数据支持^[6]。

四、火电厂安全生产双重预防机制数字化构建的关键技术

（一）物联网技术

物联网技术是实现感知层数据采集和传输的关键。通过在火电厂生产设备和环境中部署大量的物联网传感器，将采集到的数据通过无线通信网络传输到平台层。物联网技术具有实时性、可

靠性和远程监控的特点，能够实现对生产过程的全面感知和实时监控。通过物联网技术，管理人员可以随时随地了解生产设备的运行状况，及时发现潜在的安全问题。

（二）大数据分析技术

大数据分析技术是平台层的核心技术之一。火电厂生产过程中产生大量的数据，包括设备运行数据、环境监测数据、隐患排查数据等。大数据分析技术能够对这些海量数据进行清洗、挖掘和分析，发现数据背后的规律和潜在的风险。通过对历史数据的分析，建立风险预测模型，对未来的风险进行预测和预警。同时，大数据分析技术还可以对隐患排查治理的效果进行评估，为优化管理策略提供依据。

（三）人工智能技术

人工智能技术在数字化双重预防机制中也发挥着重要作用。例如，利用机器学习算法对设备运行数据进行分析，实现设备故障的智能诊断和预测。通过图像识别技术对巡检图像进行分析，自动识别设备的外观缺陷和安全隐患。人工智能技术能够提高风险识别和隐患排查的准确性和效率，减轻人工工作量，提升双重预防机制的智能化水平。

（四）数字孪生技术

数字孪生技术是通过建立物理实体的虚拟模型，实现对物理实体的实时映射和仿真。在火电厂中，可以建立生产设备和生产过程的数字孪生模型，实时反映设备的运行状态和生产过程的变化。通过对数字孪生模型的分析 and 模拟，能够提前预测设备故障和事故的发生，为风险管控和隐患治理提供决策支持。数字孪生技术能够实现生产过程的可视化和智能化管理，提升火电厂的安全生产水平^[7]。

五、火电厂安全生产双重预防机制数字化构建的实施策略

（一）标准化流程嵌入

将风险分级管控和隐患排查治理的标准流程嵌入到数字化系统中，确保各项工作按照规范的流程进行。通过系统设定风险识别的方法、风险分级的标准、隐患排查的周期和内容、隐患治理的流程和要求等，使工作人员在操作过程中有章可循。标准化流程的嵌入能够提高工作的规范性和一致性，避免人为因素的干扰，确保双重预防机制的有效运行。

（二）跨部门协同管理

火电厂安全生产涉及多个部门，如运行部门、维护部门、安监部门等。数字化双重预防机制需要实现跨部门的协同管理，打破部门之间的信息壁垒。通过系统实现各部门之间的数据共享和业务协同，例如，运行部门发现的设备异常情况可以及时传递给维护部门，维护部门制定的维修计划可以同步给安监部门进行安全监督。跨部门协同管理能够提高工作效率，增强各部门之间的协作能力，共同做好安全生产工作^[8]。

（三）人员培训与意识提升

数字化双重预防机制的实施需要工作人员具备相应的技能和意识。因此，要加强对工作人员的培训，包括数字化系统的操作使用、风险识别和隐患排查的方法、安全意识的培养等。通过培训，使工作人员能够熟练掌握数字化工具，提高风险识别和隐患排查的能力。同时，要加强对安全生产重要性的宣传，提升工作人员的安全意识，使他们自觉参与到双重预防机制的实施中。

（四）持续优化与改进

数字化双重预防机制不是一成不变的，需要根据火电厂的实际情况和生产过程的变化进行持续优化和改进。通过对系统运行数据的分析和评估，不断调整风险分级标准和隐患排查策略，优化管理流程和方法。同时，要关注新技术的发展和应用，及时将新的技术引入到双重预防机制中，提升机制的智能化水平和有效性。持续优化与改进能够确保双重预防机制始终适应火电厂的安全生产需求，为安全生产提供有力保障^[9]。

六、结论

火电厂安全生产双重预防机制的数字化构建与实践是提升火电厂安全生产水平的重要途径。通过构建感知层、平台层和应用层的体系架构，运用物联网、大数据分析、人工智能和数字孪生等关键技术，实现风险的分级管控和隐患的排查治理的数字化、智能化。同时，通过标准化流程嵌入、跨部门协同管理、人员培训与意识提升以及持续优化与改进等实施策略，确保数字化双重预防机制的有效运行。数字化构建能够提高风险识别的精准性、隐患治理的时效性和管理过程的透明性，为火电厂的安全生产提供有力支持，具有显著的实践意义和推广价值。未来，随着技术的不断发展，火电厂安全生产双重预防机制的数字化水平将不断提升，为电力行业的安全稳定发展做出更大贡献^[10]。

参考文献

- [1] 王锐, 周立, 黄荣, 等. 火电厂建设期双重预防机制有效运转探究 [J]. 电力安全技术, 2025, 27(05): 4-8.
- [2] 马瑞东, 翟丽莉, 叶智. 新型电力系统背景下新能源发电企业技术监督管理体系创新 [J]. 电器工业, 2024, (11): 79-83.
- [3] 王方勇, 黄葵. 火电厂双重预防机制建设实践 [J]. 现代职业安全, 2022, (10): 62-65.
- [4] 万磊. 电厂安全管理中双重预防机制的构建研究 [J]. 现代工业经济和信息化, 2022, 12(10): 180-181.
- [5] 郭晓林. 火电厂安全生产管理评价体系的研究 [J]. 自动化应用, 2020, (10): 105-106. DOI: 10.19769/j.zdhy.2020.10.037.
- [6] 黄思林, 沈小兵, 刘琪, 等. 数字化技术在火电厂安全检修中的应用研究 [J]. 中国设备工程, 2023, (17): 182-184.
- [7] 郭明. 火电厂安全生产网格化管理探索 [J]. 福建水力发电, 2024, (01): 85-86. DOI: 10.19565/j.cnki.cn35-1153/tv.2024.01.025.
- [8] 马新敏. 火电厂安全生产风险分级管控与隐患排查治理双重预防机制建设工作实施办法 [J]. 科学技术创新, 2019, (36): 177-178.
- [9] 董青青. 构建双重预防机制在电厂安全管理中的实践 [J]. 科学咨询 (科技·管理), 2019, (10): 24.
- [10] 冯洪亮. 火电厂安全生产创新管理应用与实践研究 [J]. 绿色环保建材, 2021, (09): 185-186. DOI: 10.16767/j.cnki.10-1213/tu.2021.09.092.

智能配电网中自适应继电保护算法的设计与实现

李福祥

华能兰州热电有限责任公司, 甘肃 兰州 730104

DOI:10.61369/EPTSM.2025060015

摘 要 : 随着智能配电网的快速发展, 其结构日益变得复杂, 尤其是分布式电源的大量接入、负荷的动态变化等因素, 对传统继电保护系统的可靠性和灵活性提出了更为严峻的挑战。由于自适应继电保护算法能够根据配电网运行状态的变化, 实时地调整保护参数和动作策略, 以此有效地提升了保护系统的适应性和速动性。本文就针对于智能配电网的运行特性, 深入地研究了自适应继电保护算法的设计与实现方法。

关 键 词 : 智能配电网; 自适应继电保护; 算法设计; 运行状态识别; 参数优化; 边缘计算

Design and Implementation of Adaptive Relay Protection Algorithm in Smart Distribution Network

Li Fuxiang

Huaneng Lanzhou Thermal power Co., LTD. Lanzhou, Gansu 730104

Abstract : With the rapid development of smart distribution networks, their structures have become increasingly complex. Factors such as the massive integration of distributed power sources and dynamic load variations pose more severe challenges to the reliability and flexibility of traditional relay protection systems. Adaptive relay protection algorithms, capable of real-time adjustment of protection parameters and operation strategies according to changes in distribution network operational conditions, effectively enhance the adaptability and responsiveness of protection systems. This paper conducts an in-depth study on the design and implementation methods of adaptive relay protection algorithms tailored to the operational characteristics of smart distribution networks.

Keywords : smart distribution network; adaptive relay protection; algorithm design; operation status identification; parameter optimization; edge computing

引言

近年来, 为了推动能源的转型和实现“双碳”目标, 智能配电网这一新型电力系统的重要组成部分, 得到了广泛地建设与应用。它与传统配电网相比, 不仅接入了大量的分布式电源(如光伏、风电等), 还具备双向潮流、多微网互联、用户互动性强等特点, 正是这些特性才使配电网的运行状态呈现出显著的动态性和不确定性。传统的继电保护系统则是基于预设的固定运行方式和故障场景设计得到的, 其保护定值一旦设定便难以灵活地进行调整, 所以当配电网发生拓扑结构变化、分布式电源出力波动或负荷突变时, 就容易出现保护误动、拒动或动作延时过长等问题, 严重地威胁着配电网的安全可靠运行。因此本文结合智能配电网的运行特点, 从算法设计与工程实现两个维度提出了一套完整的自适应继电保护解决方案。

一、自适应继电保护算法的设计

(一) 算法整体框架设计

基于智能配电网的需求, 自适应继电保护算法的整体框架应采用着“感知-分析-决策-执行”的闭环结构, 其主要包括了数据采集与处理模块、运行状态识别模块、保护参数自适应调整模块以及动作决策模块。只有各个模块协同工作, 才能实现保护

功能的自适应优化, 对于各模块的具体阐述如下:

数据采集与处理模块: 该模块是算法运行的基础, 其负责实时地采集配电网的运行数据, 当中包括了各节点的电压、电流、功率、频率等稳态数据, 以及故障发生时的暂态电流、电压波形数据^[1]。为了确保数据的实时性和准确性, 建议采用边缘计算节点来部署数据采集单元, 将采集设备(如电子式电流互感器、电压互感器)与边缘计算模块集成, 进而实现数据的本地预处理,

如数据滤波、异常值剔除和数据标准化^[2]。

运行状态识别模块：其功能是根据预处理后的运行数据，判断出配电网当前的运行状态（如正常运行、分布式电源出力波动、负荷突变、故障状态等）。通常采用“特征提取+机器学习分类”的设计思路，即先提取能够表征运行状态的关键特征，然后构建基于改进随机森林的分类模型，再将提取的特征输入模型进行训练，最终实现对不同运行状态的精准识别。相较于传统的阈值判断方法，机器学习模型能够处理多维度、非线性的特征数据，有利于提高状态识别的准确率。

保护参数自适应调整模块：它可以根据运行状态的识别结果，动态地优化保护参数。就正常运行状态而言，若分布式电源出力或负荷发生了小幅度地波动，便需要采用基于灵敏度分析的参数微调方法，也就是通过计算运行参数（如短路电流）对保护定值的影响系数，再小幅度地调整过流保护的動作电流，以确保保护装置在保证选择性的前提下，能够提高動作速动性。而当配电网发生故障时，则需根据故障类型（如单相接地、三相短路）和故障位置，快速地调整保护的動作时限和跳闸策略^[3]。

動作决策模块：此模块负责根据保护参数调整的结果和实时故障信息，生成保护動作指令。实践当中可以采用“双重校验”机制，来确保動作决策的可靠性。首先需根据调整后的保护参数，判断故障是否达到了保护動作的条件；接着结合故障方向的识别结果（如基于负序电流的故障方向判断方法），再次校验保护動作的合理性。如果两次校验结果一致，便生成跳闸指令，但若存在矛盾，则启动容错机制，调用备用的保护方案（如基于阻抗的保护算法），从而避免因单一判断失误导致的保护误动或拒动。

（二）关键技术设计建议

1. 数据同步与融合技术

智能配电网中数据采集设备的分布非常广泛，且不同设备的采样频率和时钟可能存在差异，极易容易导致采集数据不同步，影响到算法对运行状态的准确判断。因此在数据采集与处理模块中，需要设计高精度的数据同步技术。为此可以采用基于IEEE1588精确时间协议（PTP）的时钟同步方案，经由在边缘计算节点部署PTP从时钟，使其与配电网调度中心的主时钟保持同步，确保各采集设备的采样时间偏差均控制在10 μ s以内。同时为了解决多源数据（如互感器采集数据、智能电表数据、分布式电源监控数据）的异构性问题，应该采用基于本体论的数据融合方法，构建起统一的数据模型，即将不同格式、不同维度的数据转换为标准化数据，然后通过加权平均法或贝叶斯估计法融合多源数据，如此便能提高数据的可信度^[4]。

2. 保护参数优化算法

传统的参数优化方法（如枚举法、梯度下降法）存在着寻优速度慢、易陷入局部最优解的问题^[5]。所以建议采用改进粒子群优化（PSO）算法作为保护参数寻优策略，关键点是引入惯性权重自适应调整机制和变异操作，来提升算法的寻优效率和全局搜索能力。

3. 故障暂态特征提取技术

故障暂态过程包含丰富的故障信息，而准确地提取暂态特征

就是提高故障识别精度的关键。可传统的暂态特征提取方法（如傅里叶变换）难以有效地处理非平稳的暂态信号，因此需要使用小波包变换（WPT）技术提取故障暂态的特征。原因是小波包变换能够将暂态电流、电压信号分解到不同的频率bands，再通过计算各频率band的能量熵或小波系数模极大值，构建起能够表征故障类型的暂态特征向量^[6]。

二、自适应继电保护算法的实现方法

（一）硬件平台搭建

自适应继电保护算法的实现需要依托于高性能的硬件平台，且该平台需具备数据采集、实时计算、通信交互和動作执行功能，那么就应该采用“边缘计算单元+嵌入式控制单元+执行单元”的硬件架构。展开来说：边缘计算单元是数据处理和算法运行的核心，通常选用基于ARMCortex-A72架构的处理器（如树莓派4B），因为该处理器具备四核1.5GHz的运算能力，已然能够满足实时数据处理和机器学习模型运行的需求。同时为了实现与采集设备的对接，边缘计算单元还需配备丰富的接口，其中包括以太网接口（用于连接智能互感器、分布式电源监控系统）、RS485接口（用于连接智能电表）和模拟量输入接口（用于采集传统互感器的模拟信号）。而嵌入式控制单元主要负责的是接收边缘计算单元输出的保护参数调整指令和動作决策指令，再驱动执行单元動作，所以建议选用基于ARMCortex-M4架构的微控制器（如STM32F407）。因为该微控制器具备高速运算能力和丰富的外设资源，它支持PWM输出、继电器控制和故障信号采集功能。其中嵌入式控制单元与边缘计算单元之间通过CAN总线得以进行通信，CAN总线具备实时性强、抗干扰能力好的特点，以此保障了指令传输的可靠性。执行单元则包括了继电器、断路器和故障指示器，它的职责是执行保护動作指令。对此继电器需要选用电磁式直流继电器，确保额定电压为24V、额定电流为5A，这一才能能够快速地响应控制单元的跳闸指令，且動作时间不超过10ms；对于断路器地选用，建议使用具备远程控制和状态监测功能的智能真空断路器^[7]。

（二）软件程序开发

自适应继电保护算法的软件程序开发基础为Linux操作系统和KeilMDK开发环境，其被分为边缘计算单元软件和嵌入式控制单元软件两部分。

1. 边缘计算单元软件

边缘计算单元软件采用C++语言开发，当中主要涵盖了数据采集程序、数据处理程序、运行状态识别程序、保护参数优化程序和動作决策程序。首先数据采集程序通过多线程技术实现对不同采集设备的数据采集，每个采集设备均对应一个独立的线程，而线程的优先级会根据数据的重要性进行设定。其次在数据处理程序采用了模块化设计，即滤波模块、异常值剔除模块和数据标准化模块，上述各模块通过函数调用的方式得以实现数据处理功能。接着是运行状态识别程序，其基于TensorFlow Lite框架实现，可以将训练好的改进随机森林模型转换为TensorFlow Lite模

型，再加载到边缘计算单元中，随后通过调用模型的推理接口，便能实现对运行状态的实时识别^[8]。

2. 嵌入式控制单元软件

嵌入式控制单元软件主要采用 C 语言进行开发，但需要基于 Keil MDK 的开发环境，它涉及到了通信程序、指令解析程序、执行控制程序和状态监测程序。具体来说：通信程序实现与边缘计算单元的 CAN 总线通信，需要采用 CANoe 软件进行通信协议的设计和调试，而通信协议包括了数据帧格式、指令编码和校验方式，其中数据帧格式采用标准帧（11 位标识符），指令编码采用了 ASCII 码，校验方式采用的是 CRC16，如此确保了指令传输的准确性。而指令解析程序将对接收的 CAN 总线数据帧进行解析，从中提取保护参数调整指令和动作决策指令，且存储到指定的寄存器中^[9]。执行控制程序则根据解析后的指令，驱动继电器和断路器动作，比如接收到跳闸指令时，控制继电器吸合的同时驱动断路器分闸。最终状态监测程序实时地采集断路器的状态信号和故障指示器的信号，再通过 CAN 总线反馈至边缘计算单元，便实现了对保护动作执行情况的监测。

（三）算法测试与优化

为了验证自适应继电保护算法的有效性和可靠性，应当在实验室环境下构建智能配电网仿真平台进行算法测试与优化。该智能配电网仿真平台需要基于 MATLAB/Simulink 软件进行搭建，仿真模型则包括了分布式电源模型（光伏电站、风电场）、负荷模型（居民负荷、工业负荷）、配电网线路模型和故障模型。算

法测试部分则被分为功能测试和性能测试。经由功能测试主要希望验证算法各模块的功能是否正常，该部分涉及到了数据采集功能测试、运行状态识别功能测试、保护参数调整功能测试和动作决策功能测试。而性能测试主要评估的是算法的实时性和可靠性，即数据处理延迟测试、保护动作延迟测试和长期运行稳定性测试^[10]。

三、结语

本文针对智能配电网的动态性、复杂性及对继电保护的高要求，完成了自适应继电保护算法的设计与实现研究。但本文相关的研究仍存在一定的局限，如算法目前主要针对 10kV 配电网设计，对于更高电压等级或微网互联场景的适应性需进一步验证，以及机器学习模型的训练依赖于大量的标注数据，若处于数据稀缺的特殊故障场景下其性能可能会下降。基于此，未来的研究可从两方面展开：一是拓展算法的电压等级适配范围，旨在研究多微网互联场景下的协同保护策略；二是引入半监督学习或迁移学习技术，目的是减少模型对于标注数据的依赖，提升其在复杂故障场景下的鲁棒性。综上所述，本文设计的自适应继电保护算法可以为智能配电网继电保护系统的升级提供可行的方案，此举对推动新型电力系统建设、保障配电网安全高效运行具有重要的工程价值和理论意义。

参考文献

- [1] 刘一民. 智能变电站继电保护在线监测系统的设计与实现 [D]. 广东省：华南理工大学，2022.
- [2] 李长朋. 基于自适应遗传算法的短道速滑仿真系统智能体的设计与实现 [D]. 黑龙江省：哈尔滨工业大学，2012.
- [3] 李雪娇. 配电网的智能继电保护改造研究与设计 [D]. 山东省：山东科技大学，2022.
- [4] 李子武. 智能变电站中继电保护稳定控制系统的设计与应用 [J]. 通信电源技术，2022，39(24): 34–37.
- [5] 吴梦晓，吴挺星. 继电保护系统中的智能算法设计与实现 [J]. 电子技术（上海），2024，53(11): 378–379.
- [6] 苏慧平. 人工智能算法的船舶电网继电保护整定研究 [J]. 舰船科学技术，2021，(10): 94–96.
- [7] 钱海，邱金辉，张道农，等. 继电保护信息语义智能识别算法的研究与应用 [J]. 电力系统保护与控制，2018，46(03): 83–88.
- [8] 马洪. 智能配电网中线路监测及故障检测技术研究 [J]. 光源与照明，2024，(12): 53–55.
- [9] 吴梦玥，刘旺盛. 智能配电网建设中配电自动化技术运用 [J]. 电工技术，2024，(S2): 387–389.
- [10] 王柏富. 智能配电网关键技术在电网规划中的应用 [J]. 电工技术，2024，(S2): 224–226.

基于用户用电行为聚类与经济指标关联的工业 sector 中长期电力需求预测方法

冯胜涛, 马宏图, 杨娜, 董宇, 王少敏
国网邯郸供电公司经研所, 河北 邯郸 056001
DOI:10.61369/EPTSM.2025060018

摘 要 : 本文聚焦工业 sector 中长期电力需求预测方法, 提出一种融合用户用电行为聚类与经济指标关联的预测方法。在数据层面, 整合多源异构的工业用户用电数据、生产数据及外部环境数据, 通过数据清洗、标准化与特征工程, 构建了反映用户用电特性的高维特征体系。在用户画像层面, 综合比较 K-Means、层次聚类、DBSCAN 等算法, 选取最优聚类模型对工业用户进行细分, 识别并提炼出稳定型、波动型、高耗低效型等典型用电模式, 为差异化预测奠定基础。在经济关联层面, 筛选出工业增加值、产业结构、单位产值电耗等关键经济指标, 运用相关性分析、回归模型及时间序列分析等方法, 量化各指标与不同用电模式群体电力需求的内在关联机制与动态影响。在模型构建层面, 设计“分群-关联-预测”的融合框架, 针对不同用电模式群体建立差异化预测子模型, 并通过加权集成形成总需求预测。研究表明, 该方法通过精细化用户分群与深度经济关联分析, 能够有效捕捉工业用电的复杂性与规律性, 相比传统单一模型, 显著提升了预测的准确性和稳定性, 可为电力系统规划、调度及能源政策制定提供更科学、可靠的决策支持。

关 键 词 : 电力需求预测; 中长期预测; 用户用电行为聚类; 经济指标关联

A Medium-to-long-term Electricity Demand Forecasting Method for the Industrial Sector Based on the Correlation between User Electricity Consumption Behavior Clustering and Economic Indicators

Feng Shengtao, Ma Hongtu, Yang Na, Dong Yu, Wang Shaomin

Economic Research Institute of State Grid Handan Power Supply Company, Handan, Hebei 056001

Abstract : This paper focuses on medium- to long-term electricity demand forecasting methods for the industrial sector and proposes a forecasting approach that integrates user electricity consumption behavior clustering with economic indicator correlations. At the data level, it integrates multi-source heterogeneous industrial user electricity consumption data, production data, and external environmental data. Through data cleaning, standardization, and feature engineering, a high-dimensional feature system reflecting user electricity consumption characteristics is constructed. At the user profiling level, it comprehensively compares algorithms such as K-Means, hierarchical clustering, and DBSCAN, selecting the optimal clustering model to segment industrial users. It identifies and refines typical electricity consumption patterns, such as stable, fluctuating, and high-consumption-low-efficiency types, laying the foundation for differentiated forecasting. At the economic correlation level, key economic indicators including industrial added value, industrial structure, and electricity consumption per unit of output value are screened. Methods such as correlation analysis, regression models, and time series analysis are employed to quantify the internal correlation mechanisms and dynamic impacts of these indicators on the electricity demand of different electricity consumption pattern groups. At the model construction level, a "clustering-correlation-forecasting" integrated framework is designed. Differentiated forecasting sub-models are established for different electricity consumption pattern groups, and a total demand forecast is formed through weighted integration. Research indicates that this method, through refined user clustering and in-depth economic correlation analysis, can effectively capture the complexity and regularity of industrial electricity consumption. Compared to traditional single models, it significantly enhances the accuracy and stability of forecasts, providing more scientific and reliable decision support for power system planning, scheduling, and energy policy formulation.

Keywords : electricity demand forecasting; medium-to-long-term forecasting; clustering of user electricity consumption behavior; correlation with economic indicators

引言

中长期电力需求预测不仅需反映工业生产的季节性、周期性规律，更需适配产业结构调整、技术升级及宏观经济波动带来的动态变化，是保障电力系统安全稳定运行、推动电力企业高质量发展的关键前提。本文提出一种融合用户用电行为聚类与经济指标关联的工业领域中长期电力需求预测方法，该方法通过多源用电数据的清洗与特征提取，结合 K-Means、DBSCAN 等聚类算法对工业用户进行分群，识别稳定型、波动型、高耗低效型等差异化用电模式；筛选工业增加值、产业结构占比、单位工业增加值电耗等关键经济指标，运用灰色关联分析、VAR 模型等方法量化其与各用电群体电力需求的动态关联机制；构建“分群—关联—预测”的一体化模型，实现从微观用电行为到宏观经济趋势的多维度耦合预测。研究为工业领域中长期电力规划、电力市场交易及能源政策制定提供科学、精准的决策依据，助力新型电力系统在工业领域的落地应用。

一、用户用电行为聚类剖析

（一）用电行为数据收集与整理

随着智能配电网信息化、自动化、互动化程度的不断提高，各种先进的配用电自动化和管理系统得到广泛的应用，由此产生并积累了海量多源异构数据。对这些数据进行有效挖掘和科学合理地利用，可以有效提升智能配电网的运行管理水平，同时也是大数据背景下电力企业发展的必然要求^[1]。在用电行为数据收集与整理环节，需明确数据收集范围，按制造业、重工业、轻工业等细分用户群体进行区分，避免数据混杂导致特征失真，同时确定时间维度，中长期预测需覆盖3-5年历史数据以反映季节性与周期性规律，短期数据则用于捕捉突发波动^[2]。数据来源应整合多维度信息，包括智能电表采集的实时负荷数据、用户生产调度系统中的生产计划与产能数据、电力营销系统中的用户基本信息及缴费记录，以及气温、湿度、节假日等外部环境数据，并明确各数据源的采集频率、格式与传输方式，保障数据获取的及时性与稳定性^[3]。数据预处理是关键步骤，先进行数据清洗，通过箱线图等可视化方法识别异常值，结合生产日志排查原因后采用插值或删除处理；针对缺失值，缺失比例低时用均值、中位数或相邻数据填充，比例高时则基于历史用电模式构建预测模型填充。接着进行数据标准化或归一化处理，采用 Z-score 或 Min-Max 方法消除量纲差异，对时间序列数据进行平稳性检验，非平稳数据通过差分、对数变换转为平稳序列^[4]。最后进行数据特征提取，构建包含时间维度、生产关联和用户属性的特征体系，并通过主成分分析、因子分析等方法对高维特征降维，保留核心特征以降低计算复杂度。

（二）聚类算法原理与选择

主流聚类算法各有特点，选择时需结合数据特征、规模与业务需求。划分式聚类以 K-Means 为代表，通过距离度量将数据划分为 K 个簇，计算效率高，适合大规模用电数据，但对初始中心敏感且难以处理非球形分布^[5]。层次式聚类如层次凝聚聚类，通过构建树状结构展示数据层级关系，无需预设簇数，但计算复杂度高，不适合大规模数据。密度聚类如 DBSCAN，基于数据点密度识别任意形状簇，对异常值不敏感，但对参数设置依赖强，在密度不均匀数据中表现不佳。算法选择需综合考虑数据分布特征、规模大小及簇数确定方法，如肘部法则、轮廓系数或业务经验，确保聚类结果具备实际业务意义。

（三）聚类结果分析与用电模式识别

聚类有效性评估需从内部与外部两方面开展，内部评估通过簇内紧凑性与簇间分离度衡量聚类质量，常用 Davies-Bouldin 指数和 Calinski-Harabasz 指数等指标^[6]。外部评估则结合业务知识，将聚类结果与用户行业、规模、工艺等已知信息匹配，验证同一簇内用户业务属性是否相似，不同簇间是否存在显著差异，若出现行业混杂则需回溯数据或算法环节。用电模式特征提取从时间序列与经济关联两方面入手，时间序列分析通过绘制日、周、季节负荷曲线，识别稳定型、波动型和突发型等模式；经济关联分析结合产值、能耗等数据，提炼高效型、高耗低效型和规模驱动型等模式^[7]。用电模式分类与标签化需基于聚类结果与特征分析，构建涵盖时间、经济、行业等维度的标签体系，并为每个标签设定明确阈值标准，确保新增用户可快速匹配模式标签，为中长期电力需求预测提供依据。

二、经济指标关联研究

（一）关键经济指标选取

关键经济指标的选取需紧密贴合工业电力需求的影响逻辑，确保指标能精准反映工业生产规模、结构变化及发展趋势，同时兼顾数据的可获取性、时效性与连续性^[8]。工业增加值是核心指标，直接体现产出总量并与电力消耗显著正相关，辅以工业总产值验证关联强度；产业结构方面需关注高耗能产业产值占比和战略性新兴产业占比，分析结构调整对电力需求的差异化影响，其中高耗能产业拉高需求，新兴产业可能提升效率；投入与效率维度则以单位工业增加值电耗为核心，反映用电集约化程度，其下降会抑制需求增长，同时考虑工业固定资产投资，特别是设备与产能投资，预示未来电力需求变化；宏观环境方面引入地区 GDP 及增速作为背景指标，反映经济活跃度对工业的带动作用，并纳入大宗商品价格指数，其波动影响企业生产意愿与盈利水平，间接作用于电力需求。指标筛选过程中需剔除关联性弱或数据质量差的指标，通过相关性检验优化，形成层次清晰、逻辑连贯的指标体系，为后续关联分析奠定基础。

（二）经济指标与电力需求的关联分析方法

经济指标与电力需求的关联分析需综合运用多种方法，以全面揭示线性与非线性、静态与动态的内在联系^[9]。相关性分析中，Pearson 系数适用于线性关系判断，Spearman 等级相关系数

则可捕捉单调非线性关联；灰色关联分析在样本量不足时能有效评估各指标对电力需求的影响权重。回归分析进一步量化影响程度，线性回归模型可明确各指标单位变化对电力需求的具体作用，非线性回归或引入交互项则可提升复杂关系的拟合度。时间序列分析聚焦动态关联，通过向量自回归模型（VAR）和脉冲响应函数研究经济指标波动对电力需求的滞后影响，协整检验与误差修正模型（ECM）则揭示长期均衡与短期调整机制，为动态预测提供支持。

（三）经济指标的预测与趋势分析

经济指标的预测与趋势分析是衔接经济关联研究与电力需求预测的关键环节，需根据指标特性选择适宜方法，并考虑宏观环境的不确定性影响^[10]。时间序列法适用于数据连续、趋势稳定的指标，移动平均法可平滑短期波动，Holt-Winters指数平滑法可处理趋势性与季节性波动；回归预测法适合多变量驱动的指标，可引入政策虚拟变量量化政策影响；情景分析与德尔菲法则适用于数据少或受突发因素影响的指标，通过设定乐观、基准、悲观情景，结合专家意见提供多维度参考。在趋势分析中，需提炼指标的长期规律与短期波动特征，例如通过工业增加值增速预判工业生产整体趋势，奠定电力需求基础增速；通过产业结构比例变化评估对电力需求的抑制或拉动效应；通过单位工业增加值电耗趋势测算用电效率提升带来的节电量。同时需关注指标间联动关系，避免孤立解读，确保趋势分析全面支撑电力需求的中长期预测逻辑。

三、中长期电力需求预测模型构建

（一）融合用电行为聚类与经济指标的预测模型原理

融合用电行为聚类与经济指标的中长期电力需求预测模型，通过“分群—关联—预测”框架，打破单一维度局限，实现预测精度与解释性的双重提升。模型以用电模式分层为基础，将聚类得到的稳定型、波动型、高耗低效型等群体作为分组依据，分别提取用电行为特征与经济关联特征，构建多维特征体系。针对不同群体采用差异化建模策略，稳定型用户适用线性回归或时间序列模型；波动型用户引入非线性模型并考虑经济指标滞后影响。通过加权集成等方法融合各群体预测结果，形成整体需求预测。模型具备动态适配能力，可在用户模式或经济结构变化时自动调整特征与参数，确保预测结果既贴合实际用电行为，又反映经济发展趋势。

（二）模型参数确定与优化

模型参数的确定与优化是保障预测精度的关键环节，需遵循

“初步设定—迭代优化—验证筛选”的流程，确保参数既符合模型数学逻辑，又适配工业电力需求实际变化规律。在初步设定阶段，根据模型类型与特征属性设定参数初始范围，如线性回归模型需设定正则化参数，非线性模型如SVR需确定核函数参数与惩罚系数，时间序列模型如ARIMA则通过ACF与PACF图判断自回归、差分与移动平均阶数，集成学习权重可按用电规模占比分配。在迭代优化过程中，采用网格搜索、随机搜索或贝叶斯优化等方法，结合交叉验证策略评估参数性能，避免过拟合，同时需平衡精度与可解释性，确保经济指标相关参数符合逻辑。最终形成参数文档，记录参数含义、优化过程、最优值及性能指标，为模型复现与更新提供依据。

（三）模型验证与评估

模型验证与评估需从准确性、稳定性和适用性三个维度展开，通过多组验证实验与量化指标全面检验模型性能，并结合业务场景判断其是否满足中长期电力需求预测的实际需求。在准确性验证中，采用历史数据回测结合MAE、RMSE、MAPE等指标评估预测误差，确保误差分布合理且精度达标；在稳定性验证中，通过数据扰动、时间分段和场景迁移测试，检验模型在不同条件下的性能一致性；在适用性评估中，关注模型的可解释性、预测周期适配性及决策支持能力，确保预测结果能为电力规划提供有效依据。最终形成验证评估报告，若模型满足要求则投入使用，否则需迭代优化直至达标。

四、结束语

本研究围绕工业领域中长期电力需求预测的精准性与实用性需求，构建了一套融合用户用电行为聚类与经济指标关联的预测方法，系统解决了传统预测中维度单一、忽视用户异质性及宏观经济关联不足的核心问题。从应用价值来看，本研究提出的方法不仅有效提升了工业领域电力需求预测的精度，更通过用电模式标签化与经济关联机制分析，为电力企业提供了兼具数据支撑与逻辑解释的决策工具。研究构建的预测方法为工业领域中长期电力需求分析提供了新的思路与范式，后续可通过更多实证数据验证与多维度优化，持续完善方法体系，使其在电力系统规划、能源政策制定等领域发挥更大作用，为工业能源转型与电力行业高质量发展提供更坚实的技术支撑。

参考文献

- [1] 陈俊艺. 计及用户用电行为聚类的不确定性需求响应概率模型研究 [D]. 湖北：武汉大学，2019.
- [2] 黄薇，温蜜，张照贝. 考虑用户用电行为聚类的电力负荷预测方法 [J]. 计算机仿真，2022, 39(12): 148–153. DOI: 10.3969/j.issn.1006-9348.2022.12.027.
- [3] 汪颖，杨维，肖先勇，等. 基于去噪自编码器网络特征降维与改进小批优化K均值算法的海量用户用电行为聚类及分析 [J]. 电力自动化设备，2022, 42(6): 146–153. DOI: 10.16081/j.epae.202203017.
- [4] 冯志颖，唐文虎，吴青华，等. 考虑负荷纵向随机性的用户用电行为聚类方法 [J]. 电力自动化设备，2018, 38(9): 39–44, 53. DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2018.09.007.
- [5] 于文龙. 基于用电特征选择的用户用电行为聚类分析及应用 [D]. 湖南：湖南大学，2020.
- [6] 龚钢军，陈志敏，陆俊，等. 智能用电用户行为分析的聚类优选策略 [J]. 电力系统自动化，2018, 42(2): 58–63. DOI: 10.7500/AEPS20170726009.
- [7] 李春燕，蔡文悦，赵落生，等. 基于优化SAX和带权负荷特性指标的AP聚类用户用电行为分析 [J]. 电工技术学报，2019, 34(z1): 368–377. DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.L80097.
- [8] 国网上海市电力公司，上海电力大学. 一种基于用户用电行为聚类的电力负荷概率预测方法：CN202110635884.8[P]. 2021-09-07.
- [9] 朱炎平. 基于聚类的用户用电行为分析研究 [D]. 华北电力大学，华北电力大学（北京），2017. DOI: 10.7666/d.Y3264136.
- [10] 李顺昕，远振海，丁健民，等. 基于聚类的用户用电行为及其影响因素分析 [J]. 电力需求侧管理，2019, 21(3): 53–58. DOI: 10.3969/j.issn.1009-1831.2019.03.012.

关于新能源风力发电设备的预防性维护策略探析

温钊, 王彬

天津明智润阳技术有限公司, 天津 300308

DOI:10.61369/EPTSM.2025060019

摘 要 : 风力发电作为新能源领域的重要支柱, 其设备长期运行于野外复杂环境, 受强风、盐雾、温度波动等因素影响, 易出现部件老化、性能衰减等问题, 非计划停机将直接导致发电量损失与运维成本激增。预防性维护通过提前识别潜在故障、优化维护周期, 成为保障风电场高效运行的关键手段。故此, 文章以新能源风力发电设备为切入点, 明确风力发电设备预防性维护的核心目标及维护重点, 提出新能源风力发电设备的预防性维护策略, 希望能够为风电场制定科学运维方案提供实践参考, 助力提升风力发电项目的投资回报率与可持续运行能力。

关 键 词 : 新能源; 风力发电设备; 预防性维护; 故障风险; 全生命周期成本

Analysis of Preventive Maintenance Strategies for New Energy Wind Power Generation Equipment

Wen Chai, Wang Bin

Tianjin Mingzhi Runyang Technology Co., Ltd., Tianjin 300308

Abstract : As a crucial pillar in the field of new energy, wind power generation equipment operates in complex outdoor environments over extended periods, where it is susceptible to issues such as component aging and performance degradation due to factors like strong winds, salt spray, and temperature fluctuations. Unplanned shutdowns directly result in power generation losses and a surge in operational and maintenance costs. Preventive maintenance, by identifying potential faults in advance and optimizing maintenance cycles, has become a key approach to ensuring the efficient operation of wind farms. Therefore, taking new energy wind power generation equipment as the entry point, this article clarifies the core objectives and maintenance priorities of preventive maintenance for wind power generation equipment, and proposes preventive maintenance strategies for new energy wind power generation equipment. It aims to provide practical references for wind farms to formulate scientific operational and maintenance plans, thereby enhancing the return on investment and sustainable operational capabilities of wind power generation projects.

Keywords : new energy; wind power generation equipment; preventive maintenance; fault risk; whole-life cycle cost

在“双碳”目标推动下, 截至2024年底, 全国风电累计装机容量已突破6亿千瓦, 我国风力发电产业实现规模化发展。然而, 风电机组多部署于草原、沿海、山地等野外区域, 运行环境恶劣且机组结构复杂, 任一部件故障都可能引发连锁反应, 导致机组停机。随着物联网、大数据技术在风电领域的应用, 基于实时数据的预测性维护虽展现出优势, 但在数据采集精度、故障诊断模型适配性^[1]等方面仍需完善。基于此, 深入探究新能源风力发电设备的预防性维护策略对于提升风电场运行稳定性、降低全生命周期成本具有重要现实意义。

一、风力发电设备预防性维护的核心目标

(一) 保障机组运行连续性, 降低非计划停机风险

风力发电设备的运行效率与发电收益直接挂钩, 而野外复杂环境下, 设备部件长期承受力学载荷、环境侵蚀等多重作用, 易出现隐性故障隐患。非计划停机不仅会直接中断发电过程, 导致电能产出量减少, 还可能因停机期间设备处于非稳定状态, 增加后续启动时部件损坏的概率。预防性维护的首要目标便是通过主

动排查与干预, 提前识别设备运行中的异常信号, 如部件磨损初期的细微变化、系统参数的微小漂移等, 在故障萌芽阶段采取针对性措施, 避免故障扩大化引发的停机事件。这种主动防控模式能够有效减少设备运行中的不确定性, 确保机组始终处于稳定运行区间, 为风电场持续输出电能提供基础保障, 进而维护发电业务的连续性与稳定性, 避免因突发停机造成的产业链上下游协同受阻。

(二) 延缓设备老化进程, 延长部件与整机使用寿命

风力发电设备作为高价值资产, 其使用寿命直接决定了项目

的投资回报周期与长期收益能力。设备在长期运行中，部件会因摩擦、腐蚀、疲劳等因素逐渐老化，性能随之衰减，若不加以干预，老化速度会不断加快，最终导致部件提前报废、整机运行效率大幅下降。预防性维护通过对设备各核心部件的定期养护、状态校准与性能优化，能够有效减缓老化进程。例如，对传动系统进行定期润滑，可减少部件间的摩擦损耗，降低机械应力对部件结构的破坏；对电气系统进行绝缘检测与维护，可避免绝缘层老化引发的电气故障，保护电路系统的完整性，这不仅能延长单个部件的使用周期，还能保障整机各系统间的协同运行效率，避免因某一部件过早损坏引发的连锁反应，从而整体延长设备的使用寿命，提升设备全生命周期内的价值产出。

（三）优化维护资源配置，控制全生命周期成本

风力发电项目的成本管控贯穿设备采购、运行、维护至报废的全流程，其中维护成本在全生命周期成本中占比极高，若维护策略不合理，易出现过度维护导致成本浪费，或维护不足引发故障维修成本激增的问题。预防性维护的核心目标之一便是通过科学的维护规划，实现维护资源的精准配置，平衡维护投入与故障损失。一方面，通过提前识别故障风险，可避免故障发生后高额的紧急维修费用，如更换核心部件的成本、紧急调用维修人员与设备的额外开支等；另一方面，通过制定合理的维护周期与维护内容，可避免不必要的维护操作，减少人力、物力资源的浪费，避免对状态良好的部件进行频繁拆解检查，降低维护过程中对部件造成的二次损伤风险。

二、风力发电设备预防性维护的关键对象与维护重点

（一）机械系统：聚焦核心传动与受力部件的状态保障

机械系统作为风力发电设备实现风能向机械能转化与传递的核心功能载体，其运行稳定性直接决定整机发电效率与安全水平，因此预防性维护需聚焦系统内承受载荷强度高、力学损耗风险大的关键部件，构建针对性维护体系。

叶片作为机组直接与风能作用的核心部件，需长期承受野外复杂环境的综合作用：一方面，气流在叶片表面形成的动态载荷易引发疲劳损伤，盐雾、沙尘、紫外辐射等环境因素会加速叶片表面材质老化与腐蚀；另一方面，极端天气下的异物撞击可能造成局部结构损伤。基于此，叶片维护需形成“外观－内部－防护”三维管控：定期开展外观检测时，需结合视觉巡检与表面粗糙度测量，识别涂层剥落、边缘缺损等显性损伤；通过超声波探伤或射线检测技术对叶片腹板、叶根等应力集中区域进行内部结构探伤，排查隐性裂纹；同时需定期评估表面防护涂层的附着力与抗腐蚀性能，及时补涂或更换防护层，防止环境侵蚀进一步渗透至叶片基体，导致结构强度衰减。

传动系统作为衔接叶片与发电机的动力传递中枢，由主轴、齿轮箱、联轴器等部件构成，其运行过程中部件间的啮合传动与旋转运动易产生两类核心损耗：一是齿轮、轴承等运动副的机械摩擦损耗，二是传动过程中因对中性偏差引发的附加载荷损耗。针对此类问题，传动系统维护需以“润滑保障－状态监测－异常

溯源”为核心：优先保障润滑系统的功能有效性，通过定期采集润滑油样进行理化指标分析与污染度检测，判断内部部件磨损程度与润滑失效风险；同步对主轴轴承、齿轮箱高速轴等关键部位布设振动传感器，结合噪声监测设备实时采集振动频谱与声压级数据，通过对比正常运行工况下的特征参数，识别异常振动源，避免因局部磨损加剧导致传动效率下降，或因部件卡滞引发系统停机，最终保障机械系统各部件间的协同运行精度。

（二）电气系统：强化能量转换与传输部件的安全防护

电气系统承担着将机械能转化为电能并实现高效传输的功能，维护重点需聚焦能量转换核心部件与电路系统的稳定性，防范电气故障引发的安全风险与性能损耗。发电机作为能量转换的核心设备，其定子与转子绕组的绝缘性能直接影响运行安全，需定期开展绝缘电阻检测，避免绝缘层老化导致的漏电或短路问题，同时关注轴承运行状态，通过温度监测与润滑维护，减少机械摩擦对发电效率的影响。变流器作为调节电能输出的关键装置，内部功率模块与电容组件易受电流冲击与温度变化影响，需重点监测模块工作温度与电容性能衰减情况，及时清理散热系统积尘，保障散热效率，防止因过热导致的模块损坏或电能转换效率下降。

（三）控制系统：保障信号采集与指令执行的精准性

控制系统是机组运行的“中枢神经”，负责实时采集环境与设备状态信号、执行运行调节指令，维护重点需围绕传感器与主控模块的可靠性，确保指令传输与执行的精准性。传感器作为数据采集的前端设备，涵盖风速、风向、转速等关键参数采集单元，需定期开展数据校准，避免因环境干扰或部件老化导致的数据漂移，确保采集信息能真实反映机组运行状态与外部环境变化，为主控系统决策提供准确依据。主控系统作为指令处理与下发的核心，需保障程序运行稳定性与通信链路通畅，定期检查控制系统的程序完整性，测试应急停机关键逻辑的响应速度，避免因程序故障或通信中断导致的机组失控。

三、新能源风力发电设备的预防性维护策略

（一）时间基预防性维护策略：基于周期标准的规范化养护实施

时间基预防性维护策略以设备运行时长或固定周期为核心依据，依托设备制造商提供的设计寿命参数与行业积累的维护经验，构建统一的维护周期体系与操作规范。在策略启动阶段，需先对设备各核心部件的设计使用周期进行系统梳理，区分易损部件与长效部件的维护间隔差异，明确不同周期下的维护内容清单，例如短期周期内的部件紧固性检查、中期周期内的润滑系统养护、长期周期内的核心部件拆解检测等。

在时间基预防性维护策略的实施阶段，需以预设维护周期为基准，严格落实各项养护操作，确保所有维护内容均符合设备技术标准与行业规范要求。例如，针对传动系统螺栓的紧固作业，需依据设备设计文件规定的力矩参数执行，保障螺栓连接的稳定性；针对电气部件的绝缘性能检测，需遵循电力行业相关技术规

程,确保检测方法判定标准的合规性^[1]。与此同时,需构建完整的维护档案管理体系,对每次维护的具体执行时间、操作流程步骤、消耗的养护材料规格及数量,以及维护时设备的基础运行参数进行详细记录,形成可追溯、可核查的维护记录链条,为后续维护周期调整与设备状态评估提供基础数据支撑。

此外,需定期开展维护周期合理性评估工作,结合设备实际运行环境的特殊性对周期参数进行动态校准。对于处于高盐雾浓度的沿海风电场,金属部件易受腐蚀侵蚀,需适当缩短防腐维护周期,增强部件抗腐蚀能力;对于位于高沙尘含量的内陆风电场,空气过滤系统易发生堵塞,需提高清洁操作频率,保障设备散热与进气质量。通过周期性的维护周期校准,既能避免因维护间隔过长造成的人力、物力资源浪费,又能防止因周期过长导致潜在故障隐患未被及时发现,最终实现规范化养护流程与设备实际运行需求的精准适配。

(二) 状态基预防性维护策略: 依托实时监测的动态化干预执行

状态基预防性维护策略以设备实时运行状态数据作为核心支撑依据,通过构建全维度、多参数的状态监测体系,实现对设备运行状态的持续动态追踪与异常情况的及时干预。在该策略实施的前期准备阶段,需完成监测系统的整体搭建工作:根据设备不同核心部件的运行特性与故障敏感参数,选取适配的监测传感器类型,具体来说,在传动部件上安装振动传感器,实时捕获部件运行中的振动信号;在电气部件上部署温度传感器,动态监测部件工作温度变化;在控制系统中设置参数采集模块,实时采集系统运行中的关键控制参数,确保能够全面、准确地捕获设备运行过程中的核心状态数据。

在数据采集环节,需重点保障传感器安装位置的精准性,确保传感器安装于部件故障敏感区域,以获取有效监测数据;同时保障数据传输的稳定性,通过专业数据采集终端与传输链路,实时采集振动频率、温度波动幅度、电压电流变化曲线、系统压力数值等参数,并将采集到的原始数据实时传输至中央数据分析平台。中央平台需搭载专业的数据处理与分析算法,对实时采集的数据进行动态解析,将当前监测参数与预设的正常运行阈值进行对比分析,识别数据变化的异常趋势,进而判断对应部件是否处于潜在故障状态,为后续维护干预提供科学决策依据。

当监测数据超出预设预警范围时,需立即启动专项维护响应流程:组织具备专业资质的运维技术人员,对数据异常对应的部件进行针对性拆解检查与状态评估,明确异常产生的根本原因,并据此制定专项修复方案^[2]。同时,需定期对状态监测体系进行优化完善:随着设备运行年限的增加,部件老化程度与故障特性会发生变化,需相应调整监测参数的预警阈值;结合历史监测数据

中的异常案例,不断完善预警机制的判定逻辑,提升状态判断的准确性,最终实现维护干预措施与设备异常状态的动态匹配。

(三) 预测性维护策略: 基于数据建模的前瞻性维护规划

预测性维护策略以大数据分析技术与故障预测模型作为核心技术支撑,通过整合设备全生命周期内的多维度数据构建预测分析体系,实现对设备潜在故障的提前预判与维护工作的前瞻性规划。在该策略实施初期,需重点完成数据基础建设工作:全面收集设备从投运至当前阶段的全生命周期运行数据,具体包括设备在不同工况下的运行参数、历年开展维护操作的详细记录、历史故障发生的具体时间节点与故障原因分析报告、设备所处运行环境的长期监测数据等。对收集到的原始数据需进行系统化处理,包括数据清洗、数据去重、数据标准化,消除数据干扰因素,确保数据质量能够满足故障预测模型的建模需求。

在数据准备工作完成后,需依托机器学习、深度学习等人工智能算法,结合设备不同部件的故障特性,选择适配的模型构建方法:针对齿轮箱等旋转部件的故障预测,可采用时序数据分析模型,通过分析振动数据的时间序列特征预判故障;针对发电机绝缘老化等渐进式故障^[3],可采用趋势预测模型,通过分析绝缘电阻等参数的变化趋势预判故障发展阶段。在模型训练过程中,需持续输入设备历史故障数据与对应运行参数,不断优化模型的核心参数,提升模型对故障类型的识别精度、故障位置的定位准确性及故障发生时间的预判准确度。

基于故障预测模型输出的预判结果,需制定个性化维护计划:明确需要开展维护的具体部件、维护操作的详细技术流程及维护工作的实施时间窗口,并提前调配维护所需的人员、工具与备件资源。同时,需建立模型动态优化机制:将设备新产生的运行数据与故障案例持续输入预测模型,对模型的算法逻辑与参数设置进行迭代更新,确保模型能够适应设备运行状态的动态变化,使维护计划始终保持前瞻性,最终实现对设备潜在故障的提前干预,避免故障扩大化。

四、结束语

综上所述,新能源风力发电设备的预防性维护,是平衡设备可靠性与运维经济性的核心环节,其策略选择与实施效果直接关系到风电场的长期稳定运行与收益水平,可通过时间基、状态基以及预测性等维护策略,构成覆盖设备全生命周期的维护框架。在实际应用中,风电场需结合自身设备型号、运行环境、运维资源及管理能力,灵活选择与组合策略,并通过不断校准维护方案,适配设备运行状态的动态变化。

参考文献

[1] 乌友坦达来. 风力发电设备检修维护中的火灾风险挑战与应对策略研究 [J]. 消防界 (电子版), 2024, 10(16): 76-78.
[2] 王庆春, 王源治. 风力发电设备运行维护分析 [J]. 光源与照明, 2021, (09): 71-73.
[3] 张所成, 张润宏, 陆元英. 风力发电设备安全保护技术研究 [J]. 中国新技术新产品, 2021, (04): 146-148.
[4] 王瑞雪, 武姿廷. 风力发电设备安全管理与运行维护 [J]. 中国高科技, 2020, (12): 13-14.
[5] 董晓晨. 风力发电设备安全管理与运行维护 [J]. 现代制造技术与装备, 2020, (01): 163+169.

