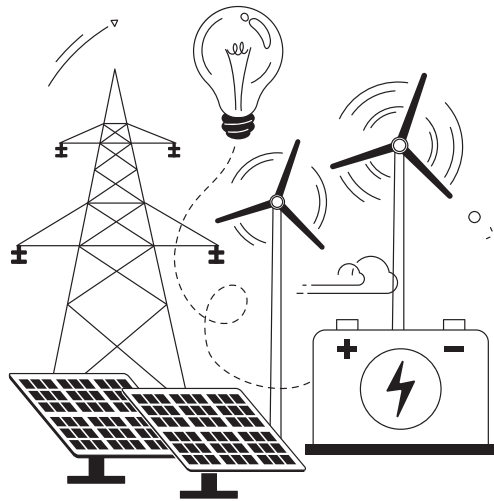


电力技术 与安全管理

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



编委 Editorial Board Member

贺喜巴特尔, 内蒙古能源发电杭锦发电有限公司

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

莫日更高娃, 内蒙古电力(集团)有限责任公司鄂尔多斯供电分公司

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

王娟, 内蒙古电力(集团)有限责任公司鄂尔多斯供电公司

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

谢超善, 北京必可测科技股份有限公司

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3期 2025年3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 高海拔地区光伏电源系统中
蓄电池的应用研究 何树旺, 代文, 曹龙, 陈永强
Application of Battery in Photovoltaic Power System
in High Altitude Area He Shuwang, Dai Wen, Cao Long, Chen Yongqiang
- 004 电网气温敏感性电量特性分析研究 王一帆, 刘昊
Analysis and Research on Power Consumption Characteristics of Temperature
Sensitivity in Power Grid Wang Yifan, Liu Hao
- 007 面向电力系统新能源接入的智能调度自动化系统优化与风险管控 黄腾杰
Optimization and Risk Control of Intelligent Dispatching Automation System for
New Energy Access in Power System Huang Tengjie
- 010 医院安全用电隐患排查与智能化管理对策研究 朱伟辉
Research on Hidden Danger Investigation of Safe Electricity Use in Hospitals and
Countermeasures for Intelligent Management Zhu Weihui
- 013 天然源面波法在抽蓄电站勘察中的应用研究 赵越顺, 韩松, 薛晗鹏
Research on the Application of Natural Source Surface Wave Method in the
Investigation of Pumped Storage Power Stations Zhao Yueshun, Han Song, Xue Hanpeng
- 016 核电站运行中的多物理场耦合分析与优化策略 赵浩然, 巢海平
Multi-Field Coupling Analysis and Optimization Strategy for Nuclear Power Plant
Operation Zhao Haoran, Chao Haiping
- 019 电气工程及其自动化在 AI 人工智能协助下柔性制造生产线的
精准控制与能效提升机制 益西顿珠
Precise Control and Energy Efficiency Improvement Mechanism of Flexible
Manufacturing Lines Assisted by AI in Electrical Engineering and Automation Yixi Dunzhu
- 022 核电站用柔性耐辐射防喷淋耐火电缆生产工艺探讨 徐勇
Discussion on the Production Process of Flexible, Radiation-Resistant, Spray-Proof,
and Fire-Resistant Cables for Nuclear Power Plants Xu Yong
- 025 温度与负荷对电流互感器的影响及补偿研究 吴广生, 王博
Study on the Influence and Compensation of Temperature and Load on Current
Transformer Wu Guangsheng, Wang Bo
- 028 风力发电工程质量控制要点探究 梁雨翰
Exploration of Key Points in Quality Control of Wind Power
Generation Projects Luan Yuhuan
- 031 极端海况下海上风电场应急机制与预防策略 董文强
Study on Emergency Response Mechanism and Disaster Prevention Strategy of
Offshore Wind Farm under Extreme Sea Conditions Dong Wenqiang
- 034 略谈输电线路智能无人机巡检及应用策略 任祥
This Paper Briefly Discusses the Intelligent Uav Inspection and Application Strategy
of Transmission Line Ren Xiang

技术研究 | TECHNICAL RESEARCH

037	熔盐传热介质研究进展 Research Progress on Molten Salt Heat Transfer and Storage Media	卢昀坤, 张少杰, 代海玲, 唐彪, 雷志文 Lu Yunkun, Zhang Shaojie, Dai Hailing, Tang Biao, Lei Zhiwen
040	大能量灯泵浦双掺杂 YAG 脉冲激光器 High-Energy Lamp Pumped Double-Doped YAG Pulsed Laser	余新海, 尹中亚, 尹曰雷, 宋家豪, 秦瑞希 Yu Xinhai, Yin Zhongya, Yin Yuelei, Song Jiahao, Qin Ruixi
044	港口起重机自动化远程监控与故障诊断系统设计 Design of Automatic Remote Monitoring and Fault Diagnosis System for Port Crane	宋浩 Song Hao
047	漏电保护技术在建筑电气工程施工中的应用分析 Application Analysis of Leakage Protection Technology in Building Electrical Engineering Construction	王璐 Wang Lu
050	新能源工程建设中的项目风险管理与控制研究 Research on Project Risk Management and Control in New Energy Engineering Construction	李兆龙 Li Zhaolong
053	光伏电站的自动化运维与远程通信技术应用 Application of Automation Operation and Maintenance and Remote Communication Technology in Photovoltaic Power Station	郑廷富 Zheng Tingfu
056	汽车修理存在的问题分析及措施研究 Analysis and Measures of Problems Existing in Automobile Repair	武文哲 Wu Wenzhe
059	储能变流器模块并联及其控制方式实现 Energy Storage Converter Module Parallel Connection and Its Control Method Realization	吕怀明 Lv Huaiming
062	660MW 超临界 W 火焰锅炉上部水冷壁拉裂治理研究 Research on the Treatment of Upper Water-Cooled Wall Tearing in 660Mw Supercritical W Flame Boiler	王康, 王玲洋 Wang Kang, Wang Lingyang
065	电力工程管理中技术管理与工程风险管理的融合路径 The Integration Path of Technical Management and Engineering Risk Management in Power Engineering Management	曾艳 Zeng Yan
068	“双碳”目标下中国电力系统低碳转型的技术路径与政策协同机制研究 Research on Technical Path and Policy Coordination Mechanism of Low-Carbon Transformation of China's Power System under the "Double Carbon" Target	杨昊瞳 Yang Haotong

高海拔地区光伏电源系统中蓄电池的应用研究

何树旺¹, 代文¹, 曹龙², 陈永强²

1. 国网青海省电力公司玉树供电公司, 青海 玉树 815000

2. 青海德坤电力集团有限公司新能源分公司, 青海 西宁 810000

DOI:10.61369/EPTSM.2025030001

摘 要 : 文章主要以高海拔地区光伏电源系统中蓄电池的应用研究为重点, 首先对蓄电池选型考量进行分析, 其次从安装与布局优化、充放电管理、维护与监测、与其他储能技术整合等方面阐述蓄电池的应用, 最后从三方面阐述蓄电池在高海拔地区光伏电源系统应用面临的挑战, 对此提出一系列解决措施, 致力于提升该区域光伏电源系统蓄电池应用可靠性, 更为相关研究提供参考资料。

关 键 词 : 高海拔地区; 光伏电源系统; 蓄电池; 应用研究

Application of Battery in Photovoltaic Power System in High Altitude Area

He Shuwang¹, Dai Wen², Cao Long², Chen Yongqiang²

1. State Grid Qinghai Electric Power Company Yushu Power Supply Company, Yushu, Qinghai 815000

2. New Energy Branch of Qinghai Dekun Electric Power Group Co., Ltd, Xining, Qinghai 810000

Abstract : This paper focuses on the application research of batteries in photovoltaic power supply system in high altitude areas. Firstly, it analyzes the considerations of battery selection. Secondly, it expounds the application of batteries from the aspects of installation and layout optimization, charge and discharge management, maintenance and monitoring, and integration with other energy storage technologies. Finally, it expounds the challenges faced by batteries in photovoltaic power supply system in high altitude areas from three aspects, and puts forward a series of solutions, aiming to improve the application reliability of batteries in photovoltaic power supply system in this area, and provide reference for related research.

Keywords : high altitude area; photovoltaic power supply system; storage battery; application research

引言

清洁能源需求增长背景下, 光伏电源系统在高海拔地区崭露头角, 伴随该地区丰富的太阳能光照资源, 为光伏电源系统运行提供支持。光伏电源系统中, 蓄电池作为关键储能装置, 受高海拔低温、低气压、强紫外线辐射等特殊环境条件影响, 蓄电池在性能、寿命、放电特性方面都和常规环境存在差异, 容易导致在应用中出现供电不稳、蓄电池过早失效等问题, 为光伏电源系统的蓄电池部件带来新挑战。因此, 相关人员有必要深入开展高海拔地区蓄电池应用研究, 探索优化蓄电池使用的方法, 为高海拔地区居民提供可靠用电。

一、研究背景

一般情况, 类似青海这种高海拔地区, 自然环境比较恶劣, 存在空气稀薄、气温低、气压低的情况。正是这些条件为光伏电源系统、蓄电池运行带来挑战, 如低温会削弱蓄电池充放电性能、存储容量等; 再如高海拔气压变化, 也会对电磁外壳等产生不利影响。与此同时, 当地农牧民居住比较分散, 很多都不再大电网覆盖范围内, 存在用电困难问题。专用便携式户用电源, 可为牧民提供照明、小型电气使用等生活用电, 而蓄电池是储能的关键部件, 其性能优劣与农牧民用电息息相关。

二、高海拔地区光伏电源系统中蓄电池选型考量

(一) 低温适应性

优先选择能在高寒环境稳定工作的蓄电池种类, 如胶体蓄电池, 这种电磁和普通铅酸蓄电池比较, 在低温环境有更加表现, 不仅电解液是胶状, 还能降低电解液冻结的概率, 全满保证充放电效率, 就算处于零下的环境也能稳定储电、放电^[1]。

(二) 能量密度与容量需求

依据农牧民日常生活用电负荷, 优先选择契合能量密度、容量的蓄电池, 也要考虑是否要满足夜间、连续阴天这种无光照情

况对应的用电所需。因此可以根据当地农牧民使用电器功率、使用时间总和，计算所需蓄电池对应的容量——如照明灯具功率10w，一天会使用5h；电视功率50W，一天会使用3h，进一步确定所需蓄电池规格^[2]。

（三）便携性要求

专用便携式户用电源，因此要着重考量蓄电池重量、体积，尽可能选择质量轻、体积小的电池，也可以选择多组小型电池组合形式，让农牧民携带和使用更方便。比如锂电池不仅能能量密度高，重量也比较轻，可有效满足携带要求。

三、高海拔地区光伏电源系统中蓄电池的应用

（一）安装与布局优化

高海拔地区光伏电源系统中，蓄电池安装与布局优化是重要的一项基础工作。一方面，要谨慎选择安装位置，因为高海拔地区有非常强的紫外线，且昼夜温差很大，应选择适当的位置安装蓄电池——如安装在有保温隔热的室内、专门设计的防护箱中，有效阻隔紫外线辐射、外界极端温度环境，从本质上减少对蓄电池性能的影响。例如，一些高原中建立的小型电站项目，大多数是将蓄电池安装在特定保温箱，将其和随时放置的蓄电池进行比较，可有效延长其使用寿命^[3]。另一方面关注通风散热，因为蓄电池充放电期间会产生热量，一旦热量积聚，会直接影响蓄电池性能、寿命，所以要合理规划，确保空气流通，带有产生的热量。针对多组蓄电池衔接，要保证稳固连接，精心布局线路方向，既能减少接触电阻、规避因虚接造成的安全问题，还能降低线路损耗，让光伏电源系统高效运行，为高海拔地区提供电力支持。

（二）充放电管理

高海拔地区中，充放电管理可保证蓄电池性能、寿命，所以要制定契合的充放电管理机制。就充电来说，高海拔地区低温是关键影响因素，会导致蓄电池充电能力降低，因此合适的充电方式非常关键，温和刺激电磁内部化学反应，促使电磁温度持续回升，内部也处于稳定状态；再结合电磁真实状况，有规律增加充电电流，采用这一循环渐进手段，可防止电流直充损伤极板硫化现象，让整个充电过程更安全、更高效。就放电来说，也需要进行精细化管理，依据用电负荷的真实状况，严格管控放电深度，切记不能出现过渡放电。尤其是一些便携式户用电源，因为用户会在很多复杂情况进行使用，有必要制定电量提醒、自动保护制度。若电量无限趋近于临界数，会第一时间提供使用人员；若使用期间发生误操作，造成放电过量，自动保护机制会立即打开，预防电池过渡放电，从多角度维护电池寿命、电池性能，进而为高海拔地区提供用电所需^[4]。

（三）维护与监测

为保证蓄电池能够正常运行，有必要制定定期维护方案。例如，铅酸蓄电池，鉴于注重蓄电池的工作原理、特点，要仔细核查电解液液位，确保其在正常范围；着重关注电解液所占比，直接决定电池充放电性能。若发现液位较低、不足，需要第一时间补充蒸馏水，让电池内部保持最佳化学反应环境^[5]。针对一些蓄

电池来说，必须仔细检查电池外壳，检验其是否存在漏液、破损等问题，就算是细微裂缝，也有可能造成严重后果。此外也不能忽视连接线路，若线路出现松动会在提升接触电阻，不仅影响电池正常运行，还会带来一定的安全隐患。与此同时，引入专门的监测设备也非常关键，动态化监测蓄电池的各项参数，如电压、电流等，采用大数据分析技术，发掘电池性能的变化方向、规律等。比如一旦电压产生波动，温度一直偏离正常范围等，需要工作人员第一时间采取应对方法——如电池性能严重衰退需及时更换，为光伏电源系统运行保驾护航。

（四）与其他储能技术整合

高海拔地区光伏电源系统中，蓄电池单独使用存在局限问题，因此工作人员需将其和储能技术整合，其中超级电容器就是一个理想整合对象。超级电容器有很多特性，其一是功率密度非常高，尤其面对瞬间大电流所需时，可以及时放电，为高海拔地区中的一些设备的启动高功率用电提供支持。其二是充放电速度非常快，遇到光伏系统发电功率波动期间，能够第一时间调节充放电，促使电力供应保持在稳定状态^[6]。其三是循环寿命长，因为蓄电池历经多次充放电以后，性能会逐渐降低，但超级电容器即使长期使用，依旧可保持最佳性能。此外，光伏电源系统工作期间，超级电容器能与蓄电池一起工作，达成优势互补效果。一旦产生瞬间大电流所需，可以和蓄电池协同配合，分担蓄电池放电符合，防止蓄电池瞬时大电流放电遭受影响。进入充电阶段，能够迅速吸收电能，大幅提升系统自身的储能效率、供电效率。

四、蓄电池在高海拔地区的应用挑战与优化措施

（一）存在的问题

目前青海高寒高海拔偏远地区，很多农牧民已经使用含有蓄电池的光伏电源系统，有效改善其生活用电情况，也相继满足夜间照明、手机充电等所需，为生活带来极大的便捷。但在蓄电池实际应用期间，依旧面临一些挑战，主要体现在以下方面：

第一，性能衰减。长期在高寒高海拔区域，蓄电池充放电性能会遭受显著影响，如原本可以维持三天光照的蓄电池，使用一年作用，尽可以照明2天，严重影响供电持续性能。

第二，维护难度大。因为高海拔地区比较偏远，专门的维护人员难以到现场开展蓄电池维护工作——如电解液补充、充放电检测等，导致一些蓄电池即使发生故障，也无法第一时间得到修复。

第三，成本因素。由于高海拔地区非常独特，适用于该区域的蓄电池价格也比较昂贵，对大部分农牧民而言，是一笔非常大的经济负担，还有之后需要更换电池，也要消耗很多费用，在一定程度上阻碍这种电源系统的推广、应用^[7]。

（二）优化措施

（1）加强技术改进

从改进电极材料的角度看，采用特制的合金或复合材料，可改变电极于低温环境下的电化学反应活性，如某些纳米规格的电

池在低温时依旧可以高效充放电。优化电解液配方也是一个不错的方法，传统电解液在低温情形下黏度增大，离子迁移受阻挡，新配方可添入特殊溶剂，实现电解液冰点的降低，提高低温下的流动性，如新型耐寒添加剂可大幅度增强离子导电性，这些添加剂恰似“离子高速路的修缮工”，维持离子在低温环境中顺畅移动^[8]。因为处于高海拔地带，气压偏低、气温偏低，普通电池一般会因性能衰退无法正常运转，而改进后的蓄电池可有效抵御外界环境影响，减缓性能衰退速度，提高使用寿命，向高海拔高寒地区的通信基站、户外监测设备等提供稳定又可靠的电力支持，助力当地生产生活及科研监测等活动顺利开展。

（2）优化维护策略

现代的电力供应体系中，蓄电池作为关键储能物件，对其进行维护十分关键。因此可采用远程监控技术，保障蓄电池平稳运行。远程监控技术如同给蓄电池装上“电子眼”，实时采集电压、电流、温度等关键参量，一旦电压出现异样的波动情形，技术人员可迅速发觉，判断是不是由外部电路问题或者电池内部性能变化引起的；若电流出现不稳定现象，可准确分析出是负载异常，还是电池自身内阻有了变化；也要着重关注温度参数，温度过高、过低均有可能影响电池的寿命，远程监控能迅速进行预警。但很多农牧民掌握的电力知识有限，所以技术人员可以凭借远程监测的数据，采用电话、视频等形式，远程引导农牧民进行简易的维护事项，如清除电池表面的灰尘、查看连接线路有无松垮等，倘若监测到电池存在重大故障风险，马上安排专业人员到家里维修。通过这种维护方法，打破了时间跟空间的限制，既规避了因维护不及时引起的电池损坏状况，也提高了维护的效率、降

低维护成本，保障了偏远地区农牧民电力供应的稳定可靠，使蓄电池更好地助力生产生活^[9]。

（3）成本降低方法

高寒高海拔的偏远区域推广蓄电池应用，成本是核心制约要素，由此看出降低成本是关键。第一，加大政府补贴。从农牧民角度看，蓄电池及光伏电源系统刚开始采购的费用较高，政府借助补贴，能明显减轻农牧民的经济重压，让更多人有实力去采用，给出一定比例的购买津贴，或对后续使用阶段充电、维护等费用做减免处理，直接降低使用费用，引发农牧民的积极性，推动他们积极采用清洁能源设备^[10]。第二，产业规模化发展从生产端着力，伴随蓄电池生产规模的扩大，单位产品分摊固定成本下降，企业能投入更多的资金去进行技术研发与工艺改善，降低生产开销。同时规模化形成的竞争，会引导企业提高产品质量、优化机能，抬高产品的性价比。促使优质产品按更合理价格推到市场上，不仅可满足高寒高海拔偏远地区农牧民所需，还能把市场加以拓宽，造就良性的循环。采用以上两种方法，高寒高海拔偏远地区实现蓄电池普及不再遥远，为当地输送清洁、稳定的电力，有利于提升生产生活水平。

五、结束语

探索高海拔地区光伏电源系统中蓄电池应用期间，相关人员也清楚了解该工作的重要性、面临的挑战。通过合理选型、优化管理方法等，从本质上解决这些问题，进一步增强系统的稳定性，为蓄电池在高海拔地区光伏领域应用奠定基础。

参考文献

- [1] 梁旭耀, 蒙国勇, 黄广汉, 陈源洋, 蓝心, 颜永平, 张茂杰, 方华亮. 区域能源系统中变压器多维测度的优化设计控制研究 [J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(11): 197–203.
- [2] 程前, 蒋献周, 张丽萍. 分布式光伏发电系统在通信基站中的应用研究 [J]. 通信与信息技术, 2024, (06): 95–100.
- [3] 李朋, 李晓林, 张家腾, 许瑞栋, 郭建国. 一种立方星模块化电源系统的设计与在轨试验 [J]. 实验技术与管理, 2024, 41(09): 22–27.
- [4] 萧英楷, 伍星全, 苏杨添, 王吉武, 陆国祥, 张卫见, 董月雷. 航天器 S4R 电源技术在公路零碳中的应用 [J]. 中国交通信息化, 2024, (S1): 552–556.
- [5] 丁瑜, 邓敏茜, 程乔. 基于 5G 移动通信基站的可再生能源通信电源系统研究 [J]. 无线互联科技, 2023, 20(13): 15–17.
- [6] 谭建斌. 便携式电子产品光伏充电器硬件电路设计及系统调试 [J]. 科技创新与应用, 2023, 13(17): 111–114.
- [7] 邓卫梅. 50 MWp 集中式地面光伏电站直流电源系统设计研究 [J]. 水电与新能源, 2022, 36(10): 28–31.
- [8] 熊力颖, 何晓琼, 韩鹏程, 龚子, 王卓然. 基于改进控制策略的交直流独立光储电源系统 [J]. 电气工程学报, 2022, 17(03): 95–103.
- [9] 李龙刚, 任建平, 郭小可. 边远站点光伏自供电电源系统的研究与应用 [J]. 智能建筑电气技术, 2022, 16(03): 46–48.
- [10] 朱秀琴, 黄卫平, 蔡小玲. 多站融合工程交直流混合站用电源系统设计研究 [J]. 能源与环境, 2022, (01): 28–29+58.

电网气温敏感性电量特性分析研究

王一帆, 刘昊

国网重庆市电力公司市北供电分公司, 重庆 401147

DOI:10.61369/EPTSM.2025030005

摘 要 : 随着国内经济和社会由快速发展向高质量发展的变革, 电力消费结构不断优化调整, 居民生活中电力生产和消费比例不断增加, 电力负荷和用电量的尖峰化特征越来越明显。原电力规划普遍采用以最大负荷来决定其建设规模, 存在发输变电低效投资、利用率低、全社会用电成本上升等问题。本文主要探讨如何将气温敏感性电量从历史用电量数据中剥离, 提取温度敏感性等典型特征, 提出气温敏感性电量的分析方法, 进一步研究分析气温敏感性电量时序特性及与气象因素的相关性, 对电量预测精准性具有重要意义。

关 键 词 : 气温敏感性; 电量特性; 气象因素相关性

Analysis and Research on Power Consumption Characteristics of Temperature Sensitivity in Power Grid

Wang Yifan, Liu Hao

North Power Supply Branch of State Grid Chongqing Electric Power Company, Chongqing 401147

Abstract : With the transformation of domestic economy and society from rapid development to high-quality development, the power consumption structure has been continuously optimized and adjusted. The proportion of electricity production and consumption in residents' lives has been increasing, and the peak characteristics of power load and electricity consumption have become more and more prominent. The original power planning generally uses the maximum load to determine its construction scale, which leads to problems such as inefficient investment in power generation, transmission, and transformation, low utilization rate, and increased electricity costs for the whole society. This article mainly explores how to separate temperature-sensitive electricity from historical electricity consumption data, extract typical features such as temperature sensitivity, and propose an analysis method for temperature-sensitive electricity. Further research and analysis of the time series characteristics of temperature-sensitive electricity and its correlation with meteorological factors are important for the accuracy of electricity forecasting.

Keywords : temperature sensitivity; power consumption characteristics; correlation of meteorological factors

引言

(一) 研究背景

根据国内外的研究分析, 采用源荷资源协调控制措施, 可以减少尖峰负荷, 带来节能减排等其他额外社会效益, 有效改善负荷特性。地区电网电量变化受气候变化、用电习惯、产业结构等因素影响, 存在一定的不确定性, 当前以空调为主的夏季降温电量、冬季取暖电量的负荷比重呈上升趋势, 气象变化因素的影响不容忽视。因此, 为进一步解决能源投资低效、利用效率低等问题, 对气温敏感性电量特性以及与气象因素的相关性分析研究具有重要意义。

(二) 研究现状

国内最早关于气温敏感性负荷的研究文献可以追溯到2005年10月, 该文献是测算分析福建省的年最大降温负荷^[1]。由于最大温差分析法测算降温负荷精确度不高, 装接设备容量和降温设备数量推算法测算方式较为复杂, 计算所需数据难以得到。因此在后续的文獻研究中, 通常使用最大负荷比较法和基准负荷比较法来测算降温负荷。关于取暖负荷的文献发表于2016年, 此文献^[2]通过分析广西冬季气象及广西电网随气象的变化情况, 找出冬季影响电网负荷较重的气象因子作为冬季取暖负荷模型的变量, 并将负荷进行标么化处理^[3], 再通过基于灵敏度的方法计算由气象变化引起的取暖负荷。

作者简介:

王一帆(1994-), 女, 汉族, 河南新乡人, 硕士研究生, 工程师, 电力工程。

刘昊(1996-), 男, 汉族, 重庆江北人, 硕士研究生, 工程师, 电力工程。

一、气温敏感性电量特性研究

(一) 气温与电量关联分析

气温敏感性电量是指在空调等降温、取暖设备运行时的用电量，一般出现在夏季或冬季。本文选取重庆作为气温敏感性电量特性研究对象。由于重庆属于亚热带湿润季风气候类型，夏季因地势导致气候闷热，成为长江三大“火炉”之一。随着人民生活水平的不断提高，空调等温控类设备的保有量与使用频度均不断攀升，该现象反映在用电量上便是夏季用电量与室外气温呈正相关，即气温越高，用电量越大，冬季则呈负相关。在天气炎热或寒冷时段电力供应紧张、峰谷差加大。电量的变化受到多种因素的制约，准确地将气温敏感性电量从历史用电量中进行分离是一项复杂而又困难的工作，无法精确统计。因此，本文采用电网的电量曲线进行模拟测算，即有气温敏感性电量时的用电量与无气温敏感性电量的电网电量之差，采用调整后的基准电量比较法来剥离气温敏感性电量。基准电量比较法是指通过对目标月份电量的日用电量与基准电量进行比较，从而确定日最大气温敏感性电量。这种方法较为简单，易于实现。

(二) 基准气温的确定

基准电量比较法测算过程具体可以简化为三步，步骤如下：

(1) 确定比较月：重庆6-9月是全年气温最高的月份，并且电量曲线尖峰也出现在该时段，故该时段发生降温电量；其次第二个小高峰出现在12月至次年2月，该时段正是重庆气温较低的时候，故该时段发生取暖电量。本文选取这两个时段作为研究气温敏感性电量的时段。

(2) 确定基准电量：选取气候比较凉爽、降水较少的月份（称为基准月）中气温位于基准温度区间的电量平均值作为基准电量。

(3) 比较：比较月中气温在基准区间以外的各天的电量减去基准电量，得到的差值如果为正，那么这个差值即为比较月该日的气温敏感性电量；反之，则认为该日不存在气温敏感性电量。

通过上述步骤，可以得知气温敏感性电量的确定是由当天的用电量与基准电量的差值所决定的，因此基准月和基准气温的选取尤为重要。通过对重庆用电量与气温的灵敏度分析研究，选择气温灵敏度较低的温度作为基准温度。并且由于亚热带季风气候存在夏长酷热多伏旱，冬暖少雪云雾多的特点，导致用电居民对于夏季和冬季的空调需求存在不同程度的迫切性。进而影响两者的基准温度区间的选取。如将降温基准温度设定过低或取暖基准温度设定过高，会影响基准电量的计算，从而导致气温敏感性电量剥离的准确性受到影响。因此需要分别计算降温与取暖需求的基准温度。

为排除极端天气和限电措施对研究可能造成的影响，选择2021年温度变化较正常的年份电量数据作为研究基础。通过全年用电量与气温拟合制作散点图，发现在气温为20℃左右时电量处于一个平台期。在20℃以上，随着气温的升高，用电量逐渐升高；在20℃以下，随着气温的降低，用电量依旧逐渐上升。通过全年电量与气温拟合散点图进行求导，可得用电量气温灵敏度曲线，进而得出用电量对气温的灵敏度数值，即可知当最高气温在15℃-25℃区间时，用电量的灵敏度较小，可以视作基本不存在

降温电量，可选取该区间作为降温基准温度区间；当气温在8℃-10℃时，气温灵敏度较小，用电用户在该温度下基本无取暖需求，可选取取暖基准温度区间是8℃-10℃。

(三) 气温敏感性电量时序特性研究

本节先对重庆全用电客户气温敏感性电量的特性进行研究，之后进一步研究三产和居民用电气温敏感性电量变化。通过基准电量数据可以分别将工作日、周末和节假日的气温敏感性电量从历史用电量中剥离出来。将这两个数值与工作日对比并结合实际情况分析，周末和节假日工商业停工停产，用电量下降，而从工商业休假的居民在高温下对于降温需求的大幅上升，从而导致周末、节假日降温电量数据小于工作日，但降温电量占比高于工作日，由此可以发现在周末和节假日时段，居民的降温需求对降温电量变化影响较大。纵向对比相同日期类型下的降温与取暖电量，可以发现，相较于取暖电量，降温电量才是重庆气温敏感性电量中占比最大的部分。这是由于重庆市的气候类型与地理条件导致居民对于降温需求量远远大于取暖需求量。

(1) 第一产业主要包括农、林、牧、渔以及其辅助性活动。由数据可知第一产业降温电量整体的变化与重庆整体降温电量变化类似，第一产业工作日的降温电量均值仅占全客户工作日降温电量均值的0.03%。因为第一产业主要工作地点位于室外，因此对于降温电量的需求相对较低。由第一产业周末和节假日降温电量的数据及占比和工作日的降温电量数据，可以得出周末和节假日对于第一产业的影响较小。这是由于大部分第一产业不会因周末和节假日停工停产，因此节假日不会对第一产业的降温电量需求产生较大影响。综上，第一产业对于气温敏感性电量需求较小。

(2) 第二产业主要是指加工制造业，简称工业，其中包括采矿业、食品、金属、医药制造业等。其变化趋势整体与全客户降温电量变化趋势类似。第二产业的工作安排会受到周末和节假日的影响，第二产业仅有部分行业因周末和节假日停工停产，剩余大部分行业仍需在周末生产，因此在当天的高温下，降温需求加大。

(3) 第三产业是指服务业，具体是除第一、第二产业以外的向全社会提供各种各样劳务的服务性行业。第三产业可具体分为两大部门：一是流通部门；二是服务部门。因此第三产业具有较大的降温需求。由第三产业周末和节假日降温电量数据曲线可知，第三产业降温电量占全客户降温电量占比较高，从而导致全客户周末和节假日的降温电量和第三产业类似，

综上，相较于第一产业和第二产业，第三产业中大部分行业的工作安排会受到周末和节假日的影响。

二、气温敏感性电量与气象因素的相关性分析

(一) 气温敏感性电量与气温影响因素的相关性分析

通过采用多种回归方法分析重庆全客户、三产及居民用电中气温敏感性电量与气温的关系，选择拟合效果最佳者作为最终方案，捕捉气温敏感性电量与气温的相关关系，拟揭示两者之间的变化规律。本文借鉴了以往的研究资料采取了三阶回归模型、一

元线性回归模型和多元回归模型三种回归模型分别分析了气温敏感性电量与日最高气温、日最低气温和平均气温的关系。

通过前文对重庆全客户、三产及居民电量的气温敏感性电量分析可知其存在不同特性,需分别研究其气温敏感性电量与气温的相关性。通过分别计算重庆全客户、三产及居民电量的降温电量、取暖电量与气温拟合的相关系数,选择拟合相关性最高的模型作为最终的研究模型。经过计算得到的各拟合相关系数均小于0.6,因此无法使用其中任一回归模型对全客户、三产及居民电量的降温电量、取暖电量进行回归分析,其研究方法有待考量。

(二) 气温敏感性电量与风速、湿度影响因素的相关性分析

进一步通过拟合相关系数分别研究风速、湿度与气温敏感性电量的相关性。通过回归模型进行分析,发现全客户工作日降温电量与风速、湿度的拟合系数均小于0.5,说明了风速和湿度与降温电量、取暖电量并没有较强的相关性。通过计算重庆全客户降温及取暖电量与风速和湿度拟合相关系数,可知风速与湿度对于气温敏感性电量的影响远小于气温对于两者的影响。因此对未来气温敏感性电量进行预测时,仅需考虑气温这一气象因素。

(三) 气温累积效应对降温电量的影响研究

气温对降温电量存在多日累积效应,连续几天高温和当天突然高温这两种情况下的降温电量会有明显差别。以重庆2021年6月1日至9月30日的降温电量数据为例,在剔除可能影响降温电量的节假日因素后,做出日最高气温和降温电量的标么值曲线,可发现两条曲线的某些峰谷点在时序上没有重合,而是电量变化滞后于气温变化,即存在积温效应。积温效应将进一步影响降温电量,其预测量需考虑积温效应带来的影响,结合前几日的降温电量对预测值进行综合分析。因此,为尽可能精确预测降温电量,本文结合积温效应的影响,提出了预测日温度修正法,并采用修正后的温度进行降温电量预测。

为量化积温效应的影响,通过全面考虑界限温度、最大累积天数以及累积效应系数等因素,建立考虑积温效应的温度修正模型,同时确定修正模型中的三个参数,即界限温度、最大累计天数和累积效应系数。

(1) 界限温度:界限温度的求解存在多种方法^[4-5],本文采

用对重庆全客户用量历史实际电量数值与温度进行多次多项式拟合的方式,选取电量温度弹性系数最大值对应的气温作为本研究的界限温度,即33℃。

(2) 最大累积天数:本文采用试探的方法,计算考虑不同累积天数时降温电量与日最高温度的相关程度,求取使相关程度最高的最大累积天数。选取2021年重庆全客户7月份的降温电量以及日最高温度作为样本,将相邻天的最高电量和最高温度数据作为一组,分别计算每组电量和最高温度的相关系数,并求出相关系数平均数,平均值最大的确定为最大累计天数。本文综合考虑最大累积天数的平均相关系数,选取最能反映降温电量与最高温度的相关程度的最大累积天数,即3天。

(3) 累积效应系数:本文利用累积效应系数对最高气温进行修正,提高修正后的最高温度与最高电量实际值的相关性,即电量预测的精准程度。结合积温效应,日降温电量与修正温度后日最高气温的相关程度得到较大幅度提升。因此,采用累积效应系数进行气温修正,使得修正后的温度更能反映温度对实际降温电量的影响情况,预测气温敏感性电量的回归模型相关拟合系数会得以提高。

三、结语

针对重庆气温敏感性电量快速增长,峰谷差进一步拉大的严峻挑战,本文以重庆历史电量数据为基础,研究降温、取暖电量的时序特性及与气象因素的敏感性。结果表明各产业降温电量的变化趋势与气温息息相关,各产业取暖电量的变化趋势各有不同;气温敏感性电量与风速和湿度气温相关性较低,各产业的气温敏感性电量与气温的拟合相关系数大的回归模型不尽相同;对各产业进行气温敏感性电量预测时,需要考虑积温效应的影响,利用累积效应系数将重庆日最高气温进行修正后,预测气温敏感性电量的回归模型相关拟合系数会得以提高。

参考文献

- [1] 邱向京,周峰,刘升,韩新阳.福建省年最大降温负荷测算分析与研究[J].华东电力,2005(10):90-94.
- [2] 吴茵,张智光,杨小卫,龚利武,苗增强,覃芳璐,李滨.考虑气象因素的冬季取暖负荷计算[J].电网与清洁能源,2016,32(01):7-13.
- [3] 王宁,谢敏,邓佳梁,刘明波,李嘉龙,王一,刘思捷.基于支持向量机回归组合模型的中长期降温负荷预测[J].电力系统保护与控制,2016,44(03):92-97.
- [4] 高赐威,李倩玉,苏卫华,李扬.短期负荷预测中考虑积温效应的温度修正模型研究[J].电工技术学报,2015,30(04):242-248.
- [5] 王丽娟,任永建,陈正洪,何明琼,陈英英,李芬,刘静.基于气温累积效应和炎热指数的夏季日最大电力负荷预测研究[J].气象与环境科学,2021,44(02):106-111.

面向电力系统新能源接入的智能调度自动化 系统优化与风险管控

黄腾杰

广州四方邦德实业有限公司, 广东 广州 510000

DOI:10.61369/EPTSM.2025030006

摘 要 : 新能源接入电力系统影响结构, 带来调度挑战。阐述鲁棒优化算法等策略意义, 介绍三级协同调度体系等创新。还涉及风险因素图谱构建、风险预测模型等内容。通过实证分析验证系统有效性, 指出研究不足及新技术应用前景。

关 键 词 : 新能源接入; 智能调度; 风险管控

Optimization and Risk Control of Intelligent Dispatching Automation System for New Energy Access in Power System

Huang Tengjie

Guangzhou Sifang Bond Industrial Co., LTD, Guangzhou, Guangdong 510000

Abstract : The integration of new energy into the power system affects the structure and brings dispatching challenges. Elaborate on the significance of strategies such as robust optimization algorithms, and introduce innovations such as the three-level collaborative scheduling system. It also involves the construction of risk factor maps, risk prediction models and other contents. The effectiveness of the system is verified through empirical analysis, and the research deficiencies and the application prospects of new technologies are pointed out.

Keywords : new energy access; intelligent scheduling; risk management and control

引言

随着全球对清洁能源的需求日益增长, 新能源在电力系统中的渗透率不断提高(《可再生能源发展“十四五”规划》2021年)。新能源的接入给电力系统带来了多方面的影响, 从电源侧和电网侧结构的改变, 到电力系统调度面临新特征与挑战, 再到需要构建适应新能源的协同调度体系、风险因素图谱、风险预测模型以及预防控制方案等。同时, 还需考虑硬件平台架构、开发包含多种功能模块的调度自动化系统, 并进行实证分析和极端天气条件下的评估。在工程应用与风险管理实践中, 持续改进风险管理和创新管理制度也至关重要。尽管已有诸多研究, 但仍存在不足, 未来新技术的应用有望推动该领域进一步发展。

一、新能源接入对电力系统调度的影响机理

(一) 新能源并网对系统结构的影响

新能源接入电力系统后, 对系统结构产生多方面影响。从电源侧来看, 新能源发电具有间歇性和波动性, 其大规模并网改变了传统电源的结构比例, 使得电力系统的电源构成更加复杂多样^[1]。传统火电等可控电源的主导地位逐渐受到冲击, 新能源电源的占比不断提高。从电网侧而言, 为了适应新能源的接入, 电网的拓扑结构需要进行相应调整和扩展。例如, 需要建设更多的输电线路和变电站, 以满足新能源电力的传输和分配需求。同时, 新能源的分布式特性, 使得配电网的结构也发生了变化, 从传统的单向辐射状结构逐渐向更加复杂的多源网络结构转变, 增加了

系统调度的难度和复杂性。

(二) 新型电力系统调度特征与挑战

随着新能源渗透率提升, 电力系统调度呈现出新特征与挑战。在时空特性方面, 新能源的间歇性和波动性导致电力系统在时间和空间上的耦合更为复杂。例如, 风力发电受风速影响, 光伏发电受光照强度和角度制约, 其出力在不同时间和地点差异显著, 增加了调度的难度^[2]。在多时间尺度协调上, 新能源的快速变化要求调度在不同时间尺度(如实时、短期、中期等)进行更精细的协调。从秒级的功率平衡到小时级、日级的发电计划调整, 都需要考虑新能源的不确定性。安全稳定运行边界也发生变化, 新能源的接入可能改变系统的潮流分布、电压稳定性等, 对系统的安全稳定运行提出更高要求。

二、智能调度自动化系统优化技术

（一）多目标优化算法改进

考虑新能源出力预测误差的鲁棒优化算法及基于深度强化学习的日前 - 日内滚动优化调度策略具有重要意义。对于鲁棒优化算法，需深入研究新能源出力的不确定性特征，构建合理的不确定集合来描述预测误差^[3]。在此基础上，通过优化目标函数和约束条件，使调度方案在面对预测误差时仍能保持较好的性能。基于深度强化学习的策略则利用其强大的学习和决策能力，通过不断与环境交互学习，优化日前和日内的调度决策。这种方法能够更好地适应新能源的随机性和波动性，提高智能调度自动化系统的优化效果和适应性，从而提升电力系统的运行效率和可靠性。

（二）协同控制技术架构创新

构建包含分布式能源集群控制层、区域协调优化层和全局决策层的三级协同调度体系是协同控制技术架构创新的关键。分布式能源集群控制层针对局部区域的分布式能源进行精细化管理与控制，实现能源的高效利用与稳定输出^[4]。区域协调优化层则负责协调多个分布式能源集群之间的能量交互和优化配置，确保区域内能源供需平衡。全局决策层从宏观角度出发，综合考虑整个电力系统的运行状况、新能源接入情况以及负荷需求等因素，做出科学合理的调度决策，以实现电力系统的安全、稳定和高效运行。同时，设计信息物理系统融合架构，加强信息与物理系统之间的交互与协同，提高系统的感知、分析和决策能力。

三、新能源调度风险管控体系构建

（一）风险识别与评估模型

1. 全景风险因素图谱构建

为构建全景风险因素图谱，需建立涵盖设备故障、气象关联、市场波动等多维度的风险指标体系及量化方法。对于设备故障维度，应考虑新能源发电设备的各类故障模式及其发生概率，如风机叶片损坏、光伏板老化等，同时结合设备运行数据和维护记录进行量化分析^[5]。气象关联维度要纳入风速、光照强度、温度等气象因素对新能源发电的影响，通过历史气象数据和发电数据的相关性分析确定风险指标。市场波动方面，关注电价波动、新能源补贴政策变化等因素，分析其对新能源调度的经济风险影响，从而全面构建风险因素图谱。

2. 动态风险评估方法

基于贝叶斯网络与 LSTM 的时序风险预测模型结合了两者的优势。贝叶斯网络能够有效处理不确定性，通过节点和边的结构表示变量之间的概率关系，可对风险因素进行定性和定量分析^[6]。LSTM 作为一种特殊的循环神经网络，在处理时序数据方面具有独特优势，能够捕捉数据中的长期依赖关系。将两者结合，模型可以更好地适应新能源调度中风险因素随时间变化的特点。通过不断输入新的实时数据，模型能够实时更新风险概率，从而实现潜在风险的及时预警，为风险管控提供有力支持，保障新能源调度的安全稳定进行。

（二）风险防控策略设计

1. 预防性控制策略

制定考虑 N - 1 安全准则的预防控制方案是预防性控制策略的重要内容。在电力系统中，任何单一元件的故障都可能引发连锁反应，影响系统的稳定性和可靠性。因此，依据 N - 1 安全准则，对可能出现的元件故障进行全面分析和模拟，提前制定相应的控制措施，确保在故障发生时系统能够快速恢复稳定运行^[7]。同时，提出基于风险价值的备用容量优化配置方法。通过对新能源接入后电力系统的风险进行量化评估，确定合理的备用容量需求。这种方法能够在满足系统可靠性要求的前提下，有效提高备用容量的利用效率，降低系统运行成本。

2. 应急响应机制

构建基于数字孪生的应急演练平台，可有效提升应急响应能力。通过数字孪生技术，精准模拟新能源系统在各种工况下的运行状态，为应急演练提供高度逼真的环境^[8]。针对极端天气下新能源孤岛运行与快速恢复策略设计，需考虑新能源的间歇性和波动性特点。在孤岛运行时，确保重要负荷的稳定供电，优化储能系统的控制策略。同时，制定快速恢复策略，包括合理安排新能源机组的启动顺序，协调与传统能源的配合，以最短时间恢复系统正常运行，提高电力系统的可靠性和稳定性。

四、工程应用与风险管理实践

（一）系统集成方案设计

1. 硬件平台架构

面向电力系统新能源接入的智能调度自动化系统，其硬件平台架构需考虑适应新能源场站分布的边缘计算节点部署。合理的节点部署能有效提高系统对新能源数据的处理效率^[9]。在设计硬件平台架构时，要结合新能源场站的地理位置、规模等因素，确保边缘计算节点能够覆盖到各个场站，实现对新能源数据的实时采集与初步处理。同时，为保障系统中异构数据的有效融合与通信，需设计专门的通信协议。该协议要能兼容不同类型的数据格式，确保数据在硬件平台中的准确传输与交互，从而为智能调度自动化系统的稳定运行提供坚实的硬件基础。

2. 软件功能模块

电力系统新能源接入面临诸多挑战，需要开发包含全景感知、智能决策、风险推演等功能模块的调度自动化系统。全景感知模块可实时收集电力系统各环节数据，包括新能源发电侧、电网侧及用户侧信息，为后续决策提供全面数据支持^[10]。智能决策模块基于收集的数据，运用先进算法进行分析处理，制定合理的调度策略，以优化新能源接入和电力系统运行。风险推演模块则对可能出现的风险进行模拟和评估，提前制定应对措施，降低风险对电力系统的影响，确保系统的安全稳定运行。

（二）典型场景应用验证

1. 区域电网实证分析

选取某高比例新能源示范区进行实证分析。通过应用智能调度自动化系统优化策略，对该区域电网的调度进行调整。在经济

性方面，对比传统调度方式，系统能够更合理地安排新能源发电，减少弃风弃光现象，提高能源利用率，从而降低发电成本。在安全性方面，系统实时监测电网运行状态，准确预测新能源出力波动，及时调整调度计划，有效应对电网故障和不稳定情况，提升了电网的安全稳定运行水平。通过实际数据对比分析，验证了智能调度自动化系统在区域电网中的有效性，为其进一步推广应用提供了有力支撑。

2. 极端工况应对测试

模拟台风、冰灾等极端天气条件下系统的响应能力是评估风险防控体系有效性的关键。通过构建精确的极端工况模型，输入相关气象数据和电力系统参数，观察智能调度自动化系统的运行表现。例如，在台风工况下，分析系统对风电、光伏等新能源发电波动的调节能力，以及对电网负荷变化的适应能力。在冰灾工况中，着重考察系统对输电线路故障的快速诊断和应急处理能力。同时，对比实际运行数据与预设的风险防控指标，评估风险防控体系是否能够有效降低极端天气对电力系统的影响，确保新能源的稳定接入和电力系统的安全可靠运行。

（三）风险管理持续改进

1. 运行监测指标优化

在工程应用与风险管理实践中，风险管理持续改进至关重要，其中运行监测指标优化是关键环节。基于大数据分析构建设备健康度评价体系，通过对大量设备运行数据的收集与分析，精准评估设备健康状况。同时完善风险预警阈值动态调整机制，依据设备实时运行数据以及外部环境变化，动态调整预警阈值。这样能够更及时、准确地发现潜在风险，提高系统对风险的敏感度

和应对能力，确保电力系统新能源接入的智能调度自动化系统稳定运行，有效降低因设备故障或风险预警不及时导致的电力供应中断等问题的发生概率。

2. 管理制度创新

在工程应用与风险管理实践中，风险管理持续改进与管理制度创新至关重要。对于电力系统新能源接入的智能调度自动化系统，需提出适应新型电力系统的调度规程修订建议。这包括考虑新能源的波动性和不确定性，调整调度策略和规则，以确保系统的稳定运行。同时，构建多方协同的风险共担机制。明确各方在风险管理中的责任和义务，如发电企业、电网企业和用户等。通过合作与协调，共同应对新能源接入带来的风险，如功率波动、电网稳定性下降等。这种机制可以促进信息共享，提高风险应对的效率和效果，推动智能调度自动化系统的优化和可持续发展。

五、总结

新能源电力系统智能调度优化与风险管控涵盖关键技术路线。然而，当前研究存在不足，如多时间尺度协调精度不够，这影响了对不同时间跨度下电力系统运行的精准把控；极端场景应对策略有限，难以有效处理突发的复杂情况。未来，数字孪生技术可通过构建虚拟模型与物理系统实时映射，为调度系统提供更精确的决策依据；联邦学习技术则有助于整合多方数据资源，提升系统对不同工况的自适应能力。这些新技术的应用有望弥补现有研究的缺陷，推动电力系统新能源接入的智能调度自动化系统向更高效、更可靠的方向发展。

参考文献

- [1] 辛杨. 新能源接入电力系统无功补偿设计研究 [D]. 西安理工大学, 2016.
- [2] 高洪洋. 考虑新能源接入的电力系统优化调度 [D]. 中原工学院, 2019.
- [3] 张雪婷. 面向重要产品追溯系统的数据挖掘与风险管控 [D]. 国防科学技术大学, 2016.
- [4] 陆珍妮. W 新能源汽车企业的财务风险分析与管控 [D]. 南京邮电大学, 2021.
- [5] 乔百豪. 电力系统智能调度与风电预测方法研究 [D]. 西安电子科技大学, 2022.
- [6] 朱明海. 新能源接入新型电力系统优化控制方法及关键技术分析 [J]. 电力设备管理, 2023(17):206-208.
- [7] 丁琰. 设备协同管控及安全生产智能调度系统的研究 [J]. 能源与节能, 2022(003):000.
- [8] 刘会兰, 袁实, 刘志博, 等. 新能源接入的多机电力系统实验平台研究 [J]. 实验技术与管理, 2018, 35(7):4.
- [9] 卢静. 电网安全风险管控中智能电网调度技术支持系统的应用 [J]. 大科技, 2016(13).
- [10] 宋俊晟. 矿用设备协同管控与安全生产智能调度系统的分析应用 [J]. 机械管理开发, 2022(003):037.

医院安全用电隐患排查与智能化管理对策研究

朱伟辉

广州市第一人民医院, 广东 广州 510180

DOI:10.61369/EPTSM.2025030007

摘 要 : 阐述医院用电设备特征, 包括高功率、需持续运转等, 指出传统管理模式弊端。分析电路老化等隐患及管理漏洞, 介绍剩余电流、线温监测等装置及智能断路器应用, 强调大数据分析等技术在隐患识别及智能化管理中的作用, 提及应急预案与培训系统, 也探讨了研究不足与前景。

关 键 词 : 医院用电; 安全管理; 智能化

Research on Hidden Danger Investigation of Safe Electricity Use in Hospitals and Countermeasures for Intelligent Management

Zhu Weihui

Guangzhou First People's Hospital, Guangzhou, Guangdong 510180

Abstract : This paper expounds the characteristics of electrical equipment in hospitals, including high power and the need for continuous operation, and points out the drawbacks of the traditional management mode. Analyze potential hazards such as circuit aging and management loopholes, introduce devices such as residual current and line temperature monitoring, as well as the application of intelligent circuit breakers, emphasize the role of technologies such as big data analysis in hazard identification and intelligent management, mention emergency plans and training systems, and also discuss research deficiencies and prospects.

Keywords : hospital electricity usage; safety management; intelligentization

引言

医院用电设备具有高功率、需持续运转等特征, 其用电安全管理面临特殊挑战。传统管理模式存在人工巡检主观性强、纸质台账管理有局限等问题。同时, 电路老化、管理性漏洞等也威胁用电安全。近年来, 我国不断强调安全生产的重要性 (如《中华人民共和国安全生产法》2021年修订版), 在此背景下, 医院用电安全隐患排查与智能化管理研究愈发重要。研究涵盖设备监测、智能断路器应用、大数据分析等多方面, 虽存在不足, 但5G+ 边缘计算等新技术展现出良好应用前景, 为医院用电安全管理提供新方向。

一、医院安全用电现状分析

(一) 医院用电设备特征

医院用电设备具有一些显著特征。医疗设备往往具有高功率的特点, 例如一些大型的影像设备, 如CT扫描仪、磁共振成像设备等, 其运行时需要消耗大量的电能^[1]。同时, 许多医疗设备需要持续运转, 以满足医院日常诊疗工作的需求。像医院的一些监测设备, 需要24小时不间断地运行, 对患者的生命体征进行实时监测。此外, 生命支持系统更是对不间断供电有着极高的要求, 如医院的手术室、重症监护室中的一些设备, 一旦停电可能会对患者的生命安全造成严重威胁。这些设备特征使得医院的用电安

全管理面临着特殊的挑战。

(二) 现行管理模式特征

传统医院安全用电管理模式具有一些特定特征。人工巡检制度是常见方式, 依赖于工作人员定期对医院各个区域的用电设备及线路进行检查。这种方式存在主观性和不确定性, 巡检人员的专业素养和责任心参差不齐, 可能导致部分隐患无法及时发现^[2]。同时, 纸质化台账管理在记录用电设备信息、维护记录以及巡检情况等方面较为普遍。然而, 纸质台账存在信息更新不及时、易丢失损坏、查阅困难等局限性, 不利于对医院用电安全的整体把控和动态管理。这些传统管理模式在一定程度上影响了医院安全用电管理的效率和效果。

二、医院用电安全隐患识别

（一）结构性隐患分析

电路老化是医院用电安全的重要隐患之一。随着使用年限的增加，电线绝缘层可能出现破损、龟裂等情况，导致漏电风险增大^[3]。三相不平衡会使变压器和线路损耗增加，可能引发局部过热，影响设备正常运行，严重时甚至会引发电气火灾。接地系统缺陷同样不容忽视，不完善的接地系统无法有效导除漏电电流，会使电气设备外壳带电，对医护人员和患者的人身安全构成直接威胁。这些物理层面的结构性隐患相互影响，增加了医院用电系统的复杂性和风险性，需要全面、细致地排查和解决。

（二）管理性漏洞诊断

医院用电安全管理性漏洞主要体现在以下几个方面。现场监管存在盲区，部分区域的用电设备和线路未能得到及时检查和维护，增加了安全隐患^[4]。应急预案缺失或不完善，一旦发生用电安全事故，无法迅速、有效地进行应对，可能导致事故影响扩大。人员培训不足，医护人员及相关工作人员对用电安全知识和操作规程缺乏深入了解，在日常工作中可能因操作不当引发安全问题。这些管理性漏洞严重影响医院的用电安全，需要针对性地采取措施加以解决，以保障医院的正常运转和患者的生命安全。

三、智能化隐患识别技术应用

（一）物联网监测技术

1. 电气火灾监控系统

剩余电流、线温监测装置在电气火灾监控系统中起着关键作用。其通过物联网监测技术实现多维度数据采集。对于剩余电流监测，利用传感器实时感知电路中的剩余电流值，当该值超出安全阈值时发出预警信号^[5]。线温监测则是借助温度传感器，对电线的温度进行实时监测，因为电线温度异常升高往往是电气火灾的前兆。这些监测装置能够采集到精确的数据，并将数据传输至监控中心。通过对采集到的多维度数据进行分析，可以准确判断是否存在安全隐患，为医院安全用电提供有力保障，有效预防电气火灾的发生。

2. 智能断路器应用

智能断路器在医院安全用电管理中具有重要应用。其具备远程分合闸控制功能，通过物联网技术，管理人员可在远程终端对断路器进行操作，实现对电路的灵活控制，这在紧急情况或需要对特定区域电路进行调整时尤为关键^[6]。同时，负载异常自动切断技术能够实时监测电路负载情况，当负载超过设定阈值时，自动切断电路，防止因过载引发的电气火灾等安全事故，保障医院用电设备和人员的安全。智能断路器的这些应用极大地提高了医院安全用电管理的智能化水平和效率，有效降低了用电隐患带来的风险。

（二）大数据分析技术

1. 用电行为建模

通过对医院大量用电数据的收集与整理，运用大数据分析技

术构建用电行为模型。基于历史用电数据，分析不同设备、不同区域在不同时间段的用电模式和能耗特征，识别出正常用电行为的范围和边界，从而建立设备能耗基线模型。该模型能够实时监测用电数据，当出现与基线模型偏差较大的情况时，即判定为异常用电模式，可能存在安全用电隐患。这种基于大数据的用电行为建模方法，为医院安全用电隐患排查提供了科学、准确的依据，有助于提高医院用电管理的智能化水平，保障医院的正常运营^[7]。

2. 风险预测算法

智能化隐患识别技术应用中，大数据分析技术与风险预测算法至关重要。通过收集大量历史电气数据，包括设备运行参数、故障发生时间及相关环境因素等，利用大数据分析技术挖掘数据中的潜在规律^[8]。基于这些规律，构建风险预测算法。该算法可以对不同因素进行权重分析，例如设备老化程度、使用频率、环境湿度等对电气故障发生概率的影响。通过不断优化算法，使其能够更准确地预测电气故障发生的可能性，为医院安全用电隐患排查提供科学依据，提前采取相应措施，有效降低电气事故风险。

四、智能化管理系统构建

（一）管理平台架构设计

1. 多源数据融合模块

多源数据融合模块在医院智能化管理系统构建中至关重要。该模块需设计电力监控、设备管理、环境感知数据的集成方案。对于电力监控数据，应涵盖医院各区域用电参数，如电压、电流等，以实时监测用电安全状况^[9]。设备管理数据包括医疗设备的运行状态、维护记录等，有助于及时发现设备故障隐患。环境感知数据则涉及温度、湿度等信息，可预防因环境因素导致的用电安全问题。通过合理的数据融合算法，将这些来自不同源的数据进行整合分析，挖掘潜在的安全隐患，为医院安全用电的智能化管理提供有力支撑。

2. 可视化监控界面

开发三维数字孪生医院的可视化用电管理界面，需结合医院实际用电布局与设备分布进行设计。该界面应能实时呈现各区域用电数据，包括电压、电流、功率等关键指标，以不同颜色或动态图表展示正常与异常状态^[10]。通过与医院建筑信息模型（BIM）融合，实现对电气设备位置的精准定位与直观呈现。同时，设置预警功能，当用电参数超出安全阈值时，能及时发出警报并提供可能的故障原因及位置信息。此外，还应具备历史数据查询与分析功能，以便管理人员对用电情况进行趋势分析，提前发现潜在安全隐患，为医院安全用电提供有力保障。

（二）智能预警机制建设

1. 分级预警模型

分级预警模型作为智能预警机制建设的核心枢纽，其构建需系统性整合多维度要素。在确定预警指标时，需深度剖析医院用电系统特性，除电压稳定性、设备负载率外，还要纳入电流谐波含量、功率因数、备用电源状态等关键参数——电压骤变可能干

扰精密医疗设备运行，设备长期高负载易引发过热故障，谐波超标会加速电缆绝缘老化，这些都关乎医院用电安全。基于选定指标，通过历史用电数据的大数据分析，结合行业标准与医院实际需求，将预警等级科学划分为一般预警、重要预警和严重预警三级。当监测数据触及一般预警阈值，系统将以温和的提示音与弹窗，向后勤维护人员推送用电异常信息；达到重要预警级别时，除即时通知外，还会同步生成用电趋势分析报告；一旦突破严重预警阈值，系统将迅速联动配电系统，自动切断非关键设备电源，同时向医院管理层及应急指挥中心发送警报，确保优先保障手术室、ICU 等核心区域供电，全方位筑牢医院用电安全防线，为医疗救治工作保驾护航。

2. 工单闭环管理

智能化管理系统构建需涵盖智能预警机制与工单闭环管理，二者相辅相成，共同守护医院用电安全。智能预警机制通过对医院用电数据的实时监测与深度分析，精准设定阈值，一旦数据异常便迅速发出预警，为后续处理争取宝贵时间。而工单闭环管理作为隐患处理的“高效引擎”，从预警触发的瞬间便开始高效运转。当智能预警系统捕捉到用电隐患，会自动生成标准化工单，系统依据维修人员的专业技能、实时工作负荷等数据，智能匹配责任人，并根据隐患严重程度设定严格的处理时限，确保工单精准派发。维修人员在处理过程中，可通过移动端设备实时上传现场照片、视频及处理进度，便于管理层随时掌握情况。处理完成后，维修人员提交验收申请，验收人员依据医院制定的用电安全验收标准，从设备性能恢复、隐患根源消除等多维度进行严格验收。若验收不合格，系统将自动重新派单，直至隐患彻底消除，真正形成“发现 - 派单 - 处理 - 验收 - 归档”的完整工单闭环，以精细化流程保障医院用电系统稳定运行。

（三）应急管理策略优化

1. 智能切换供电方案

应急情况下的智能切换供电方案至关重要。医院应制定基于

负荷优先级的多电源无缝切换策略，确保重要医疗设备的持续供电。首先需对医院各类用电负荷进行分类，明确关键设备如手术室、重症监护室设备等为高优先级负荷。当主电源出现故障时，系统能迅速检测并自动切换到备用电源，且切换过程要实现无缝衔接，避免对设备运行造成影响。同时，智能系统应具备实时监测电源状态的功能，包括电压、电流等参数，以便及时发现潜在问题并提前预警，为维护人员提供足够的时间进行处理，保障医院用电的可靠性和安全性。

2. 应急演练数字孪生

开发虚拟现实技术支持的应急演练培训系统，可有效提升医院应对用电安全事故的能力。利用数字孪生技术构建虚拟医院环境，精确模拟各种用电安全隐患场景。医护人员通过虚拟现实设备沉浸其中，进行应急演练。系统能实时反馈演练效果，帮助人员熟悉应急流程和操作要点。同时，可根据不同场景设定多种应对方案，让演练更具针对性和实用性。通过反复演练，提高人员的应急反应速度和处理问题的能力，确保在实际用电安全事故发生时，能够迅速、准确地采取措施，保障医院的正常运行和人员安全。

五、总结

医院安全用电隐患排查与智能化管理的研究涵盖多个关键方面。首先明确了电力系统智能化改造的技术路径，包括对电力设备的智能监测、数据采集与分析等技术手段的应用，以实现对医院用电安全的实时监控和精准管理。然而，当前研究存在不足，样本数据局限以及技术验证不够充分，影响了研究成果的全面性和可靠性。尽管如此，随着技术的发展，5G+ 边缘计算在医疗用电安全领域展现出良好的应用前景。它能够提供更快速的数据传输和处理能力，进一步提升智能化管理的效率和准确性，为未来医院安全用电管理提供更有力的技术支撑。

参考文献

- [1] 张冰, 杜天龙. 露天煤矿安全生产隐患排查治理分析及研究 [J]. 幸福生活指南, 2018(42):1.
- [2] 高捍宇. SF 核电工程施工现场智能化安全管理研究 [D]. 山东大学, 2022.
- [3] 杨彬. 山东监狱企业安全管理隐患及对策研究 [D]. 石河子大学, 2015.
- [4] 郑庆华. 安全生产隐患排查管理系统设计与实现 [D]. 电子科技大学, 2014.
- [5] 吴琳. 企业安全隐患排查治理分级管理研究 [D]. 天津理工大学, 2020.
- [6] 王大刚, 王毅强. 北京市医院用电安全隐患消除对策 [J]. 电力设备管理, 2022(000-011).
- [7] 李伟, 章强, 樊庆伟, 等. 用电安全隐患排查与对策探析 [J]. 大科技, 2019(35):94.
- [8] 储金龙, 丁诚. 医院用电安全与管理方面的若干思考 [J]. 中小企业管理与科技, 2019(27):40,42.
- [9] 孙建军. 医院安全用电问题及管理对策研究 [J]. 工程技术研究, 2019,4(7):241-242.
- [10] 王毅强, 王大刚. 北京市医院用电安全隐患分析 [J]. 中国医院建筑与装备, 2020(11):80-82.

天然源面波法在抽蓄电站勘察中的应用研究

赵越顺, 韩松, 薛哈鹏

中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 陕西 西安 710065

DOI:10.61369/EPTSM.2025030008

摘 要 : 天然源面波法具有无需人工震源、对环境的影响小、能有效获取地下地质结构信息等优势。本文介绍了天然源面波的频散特性、基本原理以及处理反演方法,并深入分析了其在电站上水库渗漏、地下厂房围岩稳定、高压岔管围岩渗透等地质勘察关键问题中的应用效果,同时总结实际工程应用中台阵选择、测试时间等应用要点。天然源面波法可以有效探测地下横波速度的分布特征,同时也探讨其在复杂地质条件下存在的局限性,为抽水蓄能电站勘察技术的发展提供参考。

关 键 词 : 天然源面波法; 抽水蓄能电站; 地质勘察

Research on the Application of Natural Source Surface Wave Method in the Investigation of Pumped Storage Power Stations

Zhao Yueshun, Han Song, Xue Hanpeng

Power China Northwest Engineering Corporation Limited, Xi'an, Shaanxi 710065

Abstract : The natural source surface wave method has advantages such as no need for artificial seismic sources, minimal environmental impact, and effective acquisition of underground geological structure information. This paper introduces the dispersion characteristics, basic principles, and inversion processing methods of natural source surface waves. It also provides an in-depth analysis of their application effects in key geological investigation issues such as reservoir leakage, surrounding rock stability of underground powerhouses, and surrounding rock permeability of high-pressure bifurcation pipes in power stations. Additionally, it summarizes practical engineering application points including array selection and test duration. The natural source surface wave method can effectively detect the distribution characteristics of underground shear wave velocity. However, its limitations under complex geological conditions are also discussed, providing a reference for the development of pumped storage power station investigation technology.

Keywords : natural source surface wave method; pumped storage power station; geological investigation

引言

地球内部结构与地质信息的探测对资源勘探、工程建设和地质灾害预防意义重大。天然源面波法作为地球物理勘探的重要手段,利用自然环境中持续存在的微弱震动(如微动)作为信号源,从中提取面波信息来反演地下介质特性。与传统的地球物理探测方法相比,微动探测方法具有无需人工震源、抗电磁干扰能力强、对环境的影响小、操作简便等优点,因此在工程地质勘察、地震学研究、城市地下空间探测等领域得到了广泛的应用。同时对未来研究方向与发展趋势进行展望,旨在推动天然源面波法在更多领域的深入应用与技术革新^[1]。

一、天然源面波法基本原理

(一) 方法概述

天然源面波法是一种基于背景噪声成像理论的地球物理探测技术,它利用地球表面广泛存在的天然微弱振动作为信号源来研

究地下介质结构^[2]。微动信号包含多种波动成分,其中面波能量占据主导地位,超过总能量的70%。该方法通过特定的观测系统采集微动信号,进而提取面波频散曲线,经过反演过程获取地下横波速度结构信息,以此来推断地下地质构造和岩土体特性。

天然源面波勘探基于平稳随机过程理论,从微动信号提取面

作者简介:

赵越顺(1992.12-),男,山西稷山人,硕士研究生,研究方向:主要从事水利水电工程地球物理勘察工作。E-mail: 1132589811@qq.com。

韩松(1991.09-),男,陕西西安人,硕士研究生,研究方向:主要从事水环境勘察工作及工程物探检测工作。

薛哈鹏(1997.11-),男,陕西西安人,硕士研究生,研究方向:主要从事水环境勘察工作及工程物探检测工作。

波频散曲线，再通过反演得到地下横波速度结构。面波在分层介质中传播时，不同频率成分有不同相速度，形成频散特性。通过分析频散曲线，可推断地下介质的分层结构和横波速度分布。不同频率面波能量穿透深度不同，高频面波反映浅部地层信息，低频面波可探测深部地层。

（二）处理方法

1. 空间自相关法（SPAC）

空间自相关法^[4]（SPAC）最初由 Aki 在 1957 年提出，该方法基于微动信号在时空上符合平稳随机过程的假设，并且假定微动中面波的某一振动模式（通常为基阶模式）占主导地位。在实际观测时，采用特定的观测阵列，如圆形阵列，其中一个台站位于圆心，其他台站均匀分布在以圆心为中心的圆周上。通过计算中心测点与圆周上各测点之间信号的空间自相关系数，并对不同频率成分进行方向平均，得到标准化自相关函数方位平均值。该值与面波的波数和频率相关，利用理论公式可以建立起空间自相关系数与面波频散曲线之间的联系，从而从微动信号中提取出面波频散曲线。早期 SPAC 法主要应用于微动探测的理论研究，随着技术的发展，其在实际工程中的应用逐渐增多。但传统 SPAC 法受限于圆形阵列的几何形状，在复杂地形或特定场地条件下实施存在困难。为克服这一局限性，扩展空间自相关法（ESPAC）应运而生，ESPAC 法突破了圆形阵列的限制，可以采用更灵活的阵列形式，如矩形、三角形等不规则阵列，通过对不同阵列几何形状下信号的相关性分析，同样能够准确提取面波频散曲线，大大提高了该方法在实际应用中的适应性。并且，SPAC 法在低频段具有较高的分辨率，对于探测较深地层的结构信息具有优势，适用于深层地质构造研究以及大面积区域的地质普查工作。

2. 频率-波数法（F-K）

频率-波数法（F-K）起源于利用观测台网数据监测核试验的研究工作。该方法通过对微动信号进行时空域的二维傅里叶变换，将信号从时间-空间域转换到频率-波数域。在频率-波数域中，不同频率和传播方向的面波会呈现出不同的能量分布特征，根据这些特征可以识别并提取出面波的频散曲线。相较于 SPAC 法，F-K 法对台站的几何形状要求相对较低，在数据处理过程中能够同时考虑多个台站的信号信息，对于复杂波形的分析能力较强。在实际应用中，F-K 法能够快速处理大量的微动数据，在大面积区域的微动探测项目中具有较高的效率。然而，该方法在低信噪比环境下，由于噪声干扰容易导致频散曲线提取的准确性下降，且对高频信号的分辨率相对较低，在浅层精细结构探测方面存在一定局限性。

3. 其他方法

除了上述两种主要方法外，还有一些针对特定观测场景和需求发展起来的微动阵列方法。无中心圆形阵列法（CCA）摒弃了传统圆形阵列中必须有中心台站的限制，通过多个同心圆布置台站，利用各同心圆上观测信号之间的关系来提取面波频散曲线。这种方法在一些无法设置中心台站的特殊场地（如障碍物较多的区域）具有应用优势，同时也能在一定程度上增加数据采集的冗余度，提高频散曲线提取的可靠性。两点空间自相关法

（2s-SPAC）是对 SPAC 法的简化，该方法仅利用两个测点之间的微动信号相关性来提取频散曲线，适用于场地狭窄、无法布置大规模阵列的情况，具有操作简便、成本低的特点，但探测精度相对有限，一般用于初步的地质调查或对精度要求不高的工程。折射微动法（ReMi）则结合了微动探测和面波折射原理，通过分析微动信号中面波的折射现象来获取地下介质的速度结构信息，在浅层地层分层和速度结构反演方面具有较好的效果，特别适用于工程地质勘察中对浅层岩土体性质的研究。

二、天然源面波法在抽蓄电站勘察中的应用

（一）台阵选择

通过对比直线型台阵与内嵌三角形台阵采集到的数据频散能量图，直线阵列的相速度分辨率一般，但在高频部分分辨率较好，能量团局部发生跳动、错断；内嵌三角形的相速度能量团连续性较好，分辨率较高。从理论上来说，内嵌三角形阵列效果是最佳的，但是兼顾到野外工作的便捷性和经济性，因直线阵列布置简单快捷，满足探测需求的同时选择采用直线排列进行探测^[5]。

（二）对上水库渗漏的探测

通过天然源面波法探测结果与地质资料对比分析，发现上水库库盆边缘某区域地下横波速度异常，结合该区域地形及地层岩性特征，推断该区域存在可能的渗漏通道。后续通过钻孔验证，在相应位置发现了岩石破碎带，证实了天然源面波法探测结果的准确性，为上水库防渗处理提供了重要依据。

（三）对地下厂房围岩稳定性的评估

在地下厂房选址区域，利用天然源面波法获取的地下横波速度分布信息，评估围岩的完整性和稳定性。根据横波速度的变化情况，划分出不同的围岩类别，与传统的地质勘察方法（如钻孔取芯、地质测绘等）结果相互印证。结果表明，天然源面波法能够有效识别出地下厂房区域的断层、破碎带等不良地质体，为地下厂房的设计和施工提供了详细的地质信息。

（四）对高压岔管围岩渗透及渗透稳定的研究

在高压岔管位置，利用天然源面波法探测围岩的渗透性。通过反演得到的横波速度与岩石的渗透性存在一定相关性，根据横波速度分布情况，评估围岩的渗透稳定性。结果表明，某区域围岩横波速度较低，推断该区域渗透性较强，可能存在渗透风险。通过后续的压水试验验证，该区域的透水率较高，与天然源面波法的探测结果一致，为高压岔管的设计和施工提供了关键的渗透稳定性参数。

三、天然源面波法应用优势与局限性

（一）应用优势

（1）无需人工震源：与传统地震勘探需人工可控震源不同，天然源面波法利用自然界存在的微弱震动，无需人工激发震源，减少了勘探成本和对环境的干扰，尤其适用于对环境保护要求严

格的地区以及城市周边的抽水蓄能电站勘察。

(2) 连续观测与高效性：该方法装置可连续对地观测几分钟至十几分钟，即可获得分析地层的面波曲线，相比一些传统勘察方法，数据采集效率较高，能够快速获取地下地质结构的初步信息，为后续详细勘察提供指导。

(3) 全面获取地质结构信息：通过对天然源面波信号的处理和反演，能够得到地下一定深度范围内的横波速度分布，从而全面了解地下地质结构，包括地层划分、岩性变化、断层和破碎带等信息，为抽水蓄能电站的地质勘察提供丰富的数据支持。

(二) 局限性

(1) 受地质条件复杂性影响：在地质条件复杂区域，如存在强烈褶皱、断层交错、岩性变化剧烈等情况，天然源面波信号的传播和频散特性会受到干扰，导致频散曲线的提取和反演结果误差较大，影响对地下地质结构的准确判断。

(2) 对深部地质信息探测能力有限：虽然天然源面波法能够获取一定深度的地质信息，但随着勘探深度增加，信号能量衰减，噪声干扰增大，对深部地质结构的分辨率降低，对于超深部地质情况的探测能力相对较弱。

(3) 依赖信号处理与反演技术：该方法的勘探结果准确性很大程度上依赖于信号处理和反演技术。不同的信号处理方法和反演算法对结果有一定影响，若选择不当或参数设置不合理，可能导致反演结果与实际地质情况偏差较大。

四、未来研究方向与发展趋势

(一) 方法改进与创新

数据处理方法优化：深入研究时间-频率分析方法，提高从微动信号中提取面波频散曲线的精度和稳定性，从而更准确地反演地下横波速度结构。例如，探索新的算法以增强对微弱信号和复杂地质条件下信号的处理能力，减少干扰因素影响。

台阵设计创新：继续优化观测台阵布局，如研究不规则台阵在不同地质条件下的适用性和优化方案，提高台阵对复杂地形和场地条件的适应性，降低环境因素对勘探结果的影响，像在城市建筑物密集区、山区等特殊区域实现更高效勘探。

(二) 拓展应用领域

特殊地质区域勘探：针对深海、冻土、沙漠等特殊地质区域，研究天然源面波法的适应性和改进措施，为这些地区的地质调查、资源勘探提供有效技术手段。比如，研究在深海环境中如何克服海水干扰，获取可靠的面波信号进行地质结构探测。

多领域融合应用：与城市规划、基础设施建设、地质灾害监测预警等领域深度融合。在城市建设中，用于精细探测地下空洞、地下管线分布等；在地质灾害防治方面，实时监测活断层活动性、潜在滑坡体变化等，为灾害预警和防治提供依据。

(三) 融合发展

与其他地球物理方法结合：将天然源面波法与高密度电法、探地雷达、浅层反射地震法等结合，综合利用不同地球物理方法的优势，实现对地下地质结构的多参数、全方位探测，提高勘探结果的准确性和可靠性。如先用天然源面波法确定大致地质结构，再用高密度电法对局部异常区域进行详细探测。

与新兴技术结合：引入人工智能、大数据分析等新兴技术，对大量的天然源面波勘探数据进行智能化处理和分析，利用机器学习算法（如深度学习）自动识别微动信号特征、优化频散曲线提取，训练反演模型智能匹配地质结构，实现数据采集、处理和解释的智能化与自动化，提升处理效率与反演精度，降低人为经验依赖，辅助地质专家做出更科学的决策。

五、结束语

天然源面波法作为一种有效的地球物理勘探方法，在抽水蓄能电站勘察中展现出独特优势，能够在地形选址、上水库渗漏探测、地下厂房围岩稳定性评估以及高压岔管围岩渗透等方面提供有价值的地质信息，为抽水蓄能电站的规划、设计和施工提供重要技术支持。然而，该方法也存在受地质条件影响、深部探测能力有限以及依赖技术手段等局限性。未来，随着信号处理技术、反演算法的不断改进和完善，以及与其他地球物理勘探方法的联合应用，天然源面波法有望在抽水蓄能电站勘察中发挥更大作用，进一步提高地质勘察的准确性和可靠性，推动抽水蓄能电站建设行业的发展。

参考文献

[1] 沈阳, 张慧利, 巩一帆, 等. 天然源面波法在城市道路应急检测中的应用 [J]. 工程地球物理学报, 2024, 21(06): 1006-1013.
[2] 陈实, 金荣杰, 李延清, 等. 天然源面波技术在城市规划区场地评价中的应用 [J]. 物探与化探, 2023, 47(01): 264-271.
[3] 梁坤, 周波帆, 杨正刚, 等. 复杂工况条件下天然源面波方法的探测效果研究 [J]. 云南大学学报 (自然科学版), 2023, 45(S1): 88-95.
[4] 王梦迟. 基于 SPAC 法天然源面波勘探技术研究 [D]. 吉林大学, 2018.
[5] 王河, 陈宗刚, 张明财, 等. 微动台阵探测技术在抽水蓄能工程场地勘查中的应用 [J/OL]. CT 理论与应用研究, 2025. <https://doi.org/10.15953/j.ctta.2024.192>.

核电站运行中的多物理场耦合分析与优化策略

赵浩然, 巢海平

台山核电合营有限公司, 广东 江门 529228

DOI:10.61369/EPTSM.2025030012

摘要： 本文深入探讨核电站运行过程中的多物理场耦合现象，详细分析其耦合机制，介绍常用的多物理场耦合分析方法。同时采用数值仿真与试验相结合的研究手段，进一步阐述基于多物理场耦合分析的核电站运行优化策略，涵盖运行参数、设备设计以及安全监测与预警系统等方面的优化，以提高核电站的安全、稳定和经济运行为目标，通过对多物理场耦合的深入研究与优化，为核电站的高效可靠运行提供有力支持。

关键词： 核电站；多物理场耦合；数值模拟；运行优化

Multi-Field Coupling Analysis and Optimization Strategy for Nuclear Power Plant Operation

Zhao Haoran, Chao Haiping

Taishan Nuclear Power Joint Venture Co., LTD., Jiangmen, Guangdong 529228

Abstract： This paper delves into the multiphysics coupling phenomena during nuclear power plant operations, providing a detailed analysis of its coupling mechanisms and introducing commonly used methods for multiphysics coupling analysis. It also employs a combination of numerical simulation and experimental research to further elaborate on operational optimization strategies for nuclear power plants based on multiphysics coupling analysis. These strategies cover the optimization of operating parameters, equipment design, as well as safety monitoring and early warning systems, with the aim of enhancing the safety, stability, and economic operation of nuclear power plants. Through in-depth research and optimization of multiphysics coupling, this study aims to provide strong support for the efficient and reliable operation of nuclear power plants.

Keywords： nuclear power plant; multi-physical field coupling; numerical simulation; operation optimization

引言

核电是一种高效清洁的能源生产设备，在世界能源供给系统中占有举足轻重的位置。但是，核电站在运行过程中存在着传热、渗流、结构力学响应和中子物理等多个复杂的物理现象，这些个不同的物理过程并不是孤立的，而是相互影响和相互作用，构成了一个复杂的多场耦合体系。多物理场的耦合作用直接关系到核电站的运行性能、安全性和可靠性，因此开展核电运行过程中多场耦合机理的研究，对提升核电运行效率、降低运营成本以及保证核电安全，有着十分重要的现实意义。这不但可以帮助核电站更好地满足能源的需要，还能为核电站的可持续发展提供坚实的技术支撑。

一、核电站运行中的多物理场耦合机制

（一）热-流-结构耦合

在核电站，核燃料裂变时会产生巨大的热量，它先以热传导的方式传送到燃料棒上，冷却剂在冷却剂吸热后升温、密度减小，产生自然对流或强迫对流。冷却介质是由冷却介质驱动的，而冷却介质与燃料棒、堆内构件发生复杂的对流传热。

从结构力学的观点出发，在高温高压环境和冷却介质的作用

下，会发生材料的变形与应力，比如燃料棒在热膨胀过程中会产生轴向、径向的变形，当变形量太大会造成与周边结构件的直接接触，从而影响其工作性能，甚至引起安全隐患。同时构件的形变也将影响冷却剂在管道中的流动路径及速度分布，从而导致传热过程发生变化，因此热-流-固多场耦合作用对核电站的安全稳定运行具有重要影响。

（二）中子物理与热工水力耦合

在核电站的生产操作中，中子物理过程是一个重要的过程，

原子核在中子的轰击下会进行裂变反应，生成新的中子并释放出巨大的能量。中子的产生、传输、吸收等物理过程不仅与材料分布、温度分布有关，而且与冷却剂的流动状况也有很大关系^[1]。

此外，热工水力环境对中子的物理行为具有重要的影响，比如当冷却剂的温度、密度发生改变时，它对中子的氧化能力就会发生变化。随着冷却剂温度的提高，其密度减小，缓化中子的能力也随之下降，引起中子能谱的改变，从而影响到核反应的速度和反应活性。而在反应堆内部，由于中子的作用而生成的能量，也会影响到反应堆内部的热量分配，从而影响到整个反应堆的温度场与流场^[2]。这种中子物理与热工水力之间的强耦合关系，要求在核电站运行分析和设计中必须同时考虑这两个物理场的相互作用，由此确保反应堆的安全稳定运行和高效性能。

二、多物理场耦合分析方法

（一）数值模拟方法

1. 计算流体力学（CFD）与有限元方法（FEM）的结合

计算流体力学（Computational Fluid Dynamics, CFD）是一种重要的数值方法，它可以准确地模拟冷却剂在反应器中的流动情况，包括速度、压力等。有限元法是一种适合于结构力学的数值模拟技术，能够精确地模拟不同载荷下燃料杆及反应堆等构件的应力、应变及变形情况^{[3][4]}。

因此可以采用 CFD 和有限元法相结合的方法对核电站进行多场耦合计算。采用 CFD 方法对冷却剂流动进行数值模拟，得到冷却剂流动速度、压强等物理量，并以此为荷载作用于构件，采用有限元方法对其进行数值求解。在此基础上，对 CFD 计算中的流动边界条件进行修正，以适应构件的变形，重新计算流场，如此反复迭代，直至流场和结构响应达到收敛。由此为核电装备的设计与运行分析提供精细化的数值计算依据，有助于深刻理解多场耦合作用机理，实现装备性能的优化^[5]。

2. 多物理场耦合求解器

近年来，数值模拟技术的进步使得多场耦合问题的求解方法应运而生，该算法可在多物理场中同步求解，并包含多物理场间的耦合项。比如商用的多物理场耦合求解器，可以实现对中子物理、热工水力、结构等多物理场的耦合模拟。

由于多物理场耦合求解方法具有统一的计算格式和数据结构，可以有效地求解复杂耦合问题。在此基础上，提出基于多物理场耦合的新方法能够在一定程度上解决多物理场间的交互作用问题，从而大大降低人工设定耦合边界及迭代次数的复杂程度。因此利用多物理场耦合方法不但能提高计算效率，还能保证多物理场耦合模拟的准确性和可靠性，为核电站运行中的多物理场耦合分析提供强大的工具，尤其适用于大规模、复杂的核电站系统模拟^[6]。

（二）实验研究方法

1. 模拟实验台架

仿真试验台是研究核电站多物理场耦合作用的一种重要试验方法，采用类似于核电站真实系统的试验模型，对核电站在不同

工况下的工作状态进行仿真。通过构建热流固多场耦合试验平台，实现对燃料棒-冷却剂的传热、冷却剂流动、温度场、流场等多场耦合的仿真^[7]。

在试验台架上，实现对冷却液流量、温度、压力、模拟构件材质、几何尺寸等多种试验参数的精确控制，通过对温度、速度、应力等多物理量的测试，获得多场耦合作用下的试验数据。同时通过对试验数据的分析证明数值计算的正确性，还能对数值模型的改进提供依据，有助于深入理解多物理场耦合的基本规律，进而为核电站的设计和运行优化提供实验支持。

2. 堆内测量技术

堆内测试是实现核能系统多物理场直接测量的一种重要手段，可以采用中子探测器、温度传感器和压力传感器等多种传感器对反应堆进行实时监测。堆内实测数据能较好地反映堆内多场耦合作用，比如通过对中子注量、温度等参数的测定，研究中子物性与工质水力学的耦合关系。试验结果对检验核电站的设计合理性、监控反应堆的工作状况，及时发现安全隐患都有着无可替代的意义。同时堆内测量数据也为核电站多物理场耦合数值模式的校验与校验提供更直观、更精确的依据，推动数值仿真在核电站操作过程中的应用与发展^[8]。

三、基于多物理场耦合分析的核电站运行优化策略

（一）运行参数优化

1. 冷却剂流量与温度的优化

冷却剂的流速与温度是决定核电站操作性能的重要因素，研究表明，工质流动对堆芯传热效率及各构件受力状态有重要影响，增大冷却剂流量可改善传热效果使燃料杆及各构件的温升下降，但也会使水泵功率消耗增大。为此，需对其进行优化分析，以求获得最优的冷却剂流量，以确保反应器的安全运行。

同时，冷却剂的温度对核电站的操作也有很大的影响，选择适当的冷却剂温度区间可以确保冷却剂在较好的中子缓化能力下，保持核反应的稳定性。在此过程中，冷却液温度的波动将导致构件的热应力发生改变，开展多物理场耦合仿真，并考虑核电站的运行目标与安全约束，实现对冷却剂进口及出口温度的优化，从而有效地提升核电站的工作效率与稳定性，并且减少设备的疲劳破坏风险。

2. 反应堆功率调节策略优化

在核电站的操作过程中，反应堆功率调整是一个非常重要的步骤，多场耦合计算结果显示，当堆功率改变时，堆内中子通量、温度以及冷却剂流场都将产生复杂的变化。传统的电力调控方法往往不能很好地考虑多物理场的耦合作用，从而造成电力系统失稳、设备使用寿命降低等问题。在此基础上，需要发展更先进的堆内能量调控方法，比如基于多物理场耦合的模型预测控制，对功率调控过程中各个物性参数的变化规律进行预测，并对其优化，从而实现更平稳、高效的功率调控。而所提出的最优功率调整策略既能保证电力系统的正常运行，又能保证系统的正常运行，最大限度地减少对反应堆内部多物理场的不利影响。

响,保障核电站的安全稳定运行,并且提高核电站的经济性和灵活性。

(二) 设备设计优化

1. 燃料棒结构优化

燃料棒作为核能发电装置的关键组成部分,其结构设计对核电站的工作性能及安全起着至关重要的作用。通过多物理场耦合方法,能够研究热、流、中子等多场耦合作用下燃料棒的力学行为,也可以运用理论分析和数值模拟相结合的方法,系统地研究不同几何尺寸、材料成分和内部结构等因素对传热效率、机械性能以及中子吸收性能的影响规律。

在此基础上,研究多场耦合作用下的燃料棒结构优化问题,比如使用新的燃料棒外壳来增强导热系数,增强耐辐射能力。通过对燃料棒内部结构进行改进,在其上加装散热翅片或改变其布置形式,提高传热性能并且降低其运行温度。优化后的燃料棒结构能够提高核电站的功率输出能力,延长其工作寿命、减少核燃料消耗量,并提升核电站的安全可靠运行。

2. 反应堆压力容器设计优化

反应堆压力容器作为承载堆芯的核心装置,承受着高温、高压和复杂的机械载荷,多物理场耦合分析对于反应堆压力容器的设计优化至关重要,通过对反应器内温度场、压力场和结构应力的数值模拟,可以对各种工作状态下的压力容器进行分析。在此基础上,结合实验数据对堆芯材料的选取、几何尺寸及结构的优化进行研究,例如在生产压力容器时,应选用强度高、韧性好、抗辐射能力好的材料;对压力容器的壁厚进行优化设计,使其在保证强度的同时实现轻量化、低成本的目的。同时通过添加肋条、优化焊接等方法提升其承受复杂荷载的能力,保证其运行过程中的安全性和可靠性。

(三) 安全监测与预警系统优化

1. 多物理场参数融合监测

传统的核电站安全监控体系通常是对各物理场参数进行单独监控,很难全面地反映反应堆在多物理场耦合作用下的真实工作状态。因此需要基于多物理场耦合分析,构建多物理场参量融合监控体系,实现对反应堆运行状态的准确全面评估^[9]。

比如通过对中子流与冷却剂温度的耦合变化规律的研究,可以更早期地检测到反应堆内部可能存在的诸如局部功率脉动、冷却剂流动等异常现象。多物理场参数融合监测系统能够提高安全监测的灵敏度和可靠性,及时捕捉到反应堆运行过程中的细微变化,为保障核电站安全运行提供更加有效的监测手段。

2. 故障预警模型建立

利用多物理场耦合分析得到的大量数据,采用机器学习与人工智能相结合的方法,可以构建核电站事故早期预警模型。在此基础上,通过对典型工况及多种故障状态下的多物理场参量进行特征提取与分析,建立基于多场耦合的多物理场参量学习方法。在系统监控系统中,若发现系统的运行参数与常规工况发生偏差,则能及时给出故障报警,并对可能发生的故障类型及发展趋势进行预测。比如通过温度-流动-固多场多场耦合作用下,燃料棒有没有发生变形破坏的危险,反应堆压力容器内会不会产生由应力集中引起的裂纹扩展等。而故障预警模型的建立可以提前发现潜在的安全隐患,为核电站运行人员采取相应的预防措施提供充足的时间,进而有效提高核电站的安全性和可靠性,降低事故发生的概率。

四、结语

综上所述,核电站运行中的多物理场耦合是一个极为复杂且关键的研究领域,研究人员通过深入分析热-流-结构耦合、中子物理与热工水力耦合等多物理场耦合机制,运用数值模拟和实验研究等先进分析方法,能够全面准确地了解核电站运行过程中的物理现象和内在规律。由此制定基于多物理场耦合分析的运行参数优化、设备设计优化以及安全监测与预警系统优化等一系列策略,对于提升核电站运行的安全性、稳定性和经济性具有不可估量的作用。

未来,随着科学技术的不断进步,多物理场耦合分析技术将在核电站领域得到更广泛、更深入的应用,进而为全球核能事业的可持续发展提供坚实的技术保障,助力实现能源的高效、清洁生产与供应。

参考文献

[1] 唐琪,蔡杰进,徐伟峰,等.高性能轻水堆中子物理-热工水力耦合行为分析[J].原子能科学技术,2014,48(S1):227-232.
[2] 齐飞鹏,刘振海,尹春雨,等.燃料元件多物理场耦合分析平台MCAT开发及初步验证[J].核动力工程,2024,45(03):28-36.
[3] 安雨晨,解家春.核热推进燃料形式演变及现状分析[J].科技视界,2023,(16):125-127.
[4] 王兴春,张焰.美启动首座先进燃料商业制造厂建设[J].国外核新闻,2022,(11):17.
[5] 王卫杰,刘燕楠,赵振国.基于谐波分析的封装-电路多物理场耦合仿真方法[J].电子学报,2024,52(08):2718-2725.
[6] 邹晓阳,万承辉,曹良志.堆芯多物理耦合的不确定性分析方法研究及应用[J].哈尔滨工程大学学报,2024,45(12):2400-2407.
[7] 郭高志.核电站离相封闭母线的多场耦合分析及结构优化设计[D].青岛科技大学,2023.
[8] 王胜辉,许育帅,孙凯旋,等.多物理场耦合下不同短路与接地故障对变压器绕组状态影响的仿真研究[J].高电压技术,2023,49(06):2397-2408.
[9] 文宇轩.物理-数据融合的锂离子电池多物理参数退化预测方法研究[D].哈尔滨工程大学,2024.
[10] 张帅涛,蒋品群,宋树祥,等.基于注意力机制和CNN-LSTM融合模型的锂电池SOC预测[J].电源学报,2024,22(05):269-277.

电气工程及其自动化在 AI 人工智能协助下 柔性制造生产线的精准控制与能效提升机制

益西顿珠

国网西藏电力有限公司仁布县供电公司，西藏 仁布 857200

DOI:10.61369/EPTSM.2025030013

摘 要： 本文主要研究了电气工程及其自动化在 AI 人工智能协助下柔性制造生产线的精准控制与能效提升机制，分析了柔性制造生产线在工业自动化中的重要性以及当前面临的技术挑战。文章探讨了人工智能在电气工程自动化中的应用价值，以及人工智能技术在精准控制与能效提升中的作用，评估了应用效果对工业自动化发展的启示。

关 键 词： 人工智能；电气工程自动化；柔性制造；精准控制；能效提升

Precise Control and Energy Efficiency Improvement Mechanism of Flexible Manufacturing Lines Assisted by AI in Electrical Engineering and Automation

Yixi Dunzhu

Renbu County Power Supply Company of State Grid Tibet Electric Power Co., Ltd., Renbu, Tibet 857200

Abstract： This paper mainly studies the precise control and energy efficiency improvement mechanism of flexible manufacturing lines in electrical engineering and automation assisted by AI. It analyzes the importance of flexible manufacturing lines in industrial automation and the current technical challenges faced. The article explores the application value of artificial intelligence in electrical engineering automation, as well as the role of artificial intelligence technology in precise control and energy efficiency improvement, and evaluates the enlightenment of application effects on the development of industrial automation.

Keywords： artificial intelligence; electrical engineering automation; flexible manufacturing; precise control; energy efficiency improvement

一、研究背景与意义

随着全球经济的快速发展和市场需求的多样化，传统的制造业正面临前所未有的挑战。为了适应这种变化，柔性制造生产线作为一种新型的生产方式，逐渐成为工业自动化领域的研究热点。柔性制造生产线能够在同一生产线上快速调整生产过程，以适应不同产品的生产需求，这不仅提高了生产效率，还大大降低了生产成本。当前，柔性制造生产线的发展主要集中在以下几个方面：（1）自动化程度的提升。通过引入更多的自动化设备和智能化控制系统，实现生产过程的自动化和智能化。（2）生产灵活性的增强。通过模块化设计和可重配置的生产设备，实现快速的生产线调整，以适应不同产品的生产需求。（3）生产效率的优化。利用先进的信息技术和数据分析技术，对生产过程进行优化，提高生产效率和资源利用率。

二、当前柔性制造生产线面临的技术挑战

当前，柔性制造生产线在实现高效、精准的生产过程中，面临着多方面的技术挑战。这些挑战主要包括设备智能化水平不足、生产过程中的数据处理能力有限、系统集成与兼容性问题以及能效管理的复杂性等。

设备智能化水平不足是指柔性制造生产线中使用的自动化设备和机器人往往缺乏足够的智能化水平，无法实现高度自主的决策和操作。这直接影响了生产线的灵活性和响应速度。生产过程中的数据处理能力有限，涉及到大量的实时数据采集、分析和处理。由于数据量庞大且复杂，现有的数据处理技术难以满足高效率和高准确性的要求。^[1]系统集成与兼容性问题是指不同厂商生产的设备和系统之间存在兼容性问题，导致整体生产线的协同效率低下。这种问题不仅影响生产效率，还增加了维护和升级的难度。能效管理的复杂性是指在保证生产效率的同时，如何有效地管理和优化能源消耗成为一大挑战。随着能源成本的上升，如何降低能耗、提高能效成为生产线设计和运营中的关键问题。

以下表格展示了柔性制造生产线面临的主要技术挑战及其对应的影响：

技术挑战	影响因素	解决难度（1-10）
设备智能化水平不足	自动化设备和机器人	8
生产过程中的数据处理能力有限	数据采集与处理技术	7
系统集成与兼容性问题	不同厂商设备和系统	9
能效管理的复杂性	能源消耗与优化	6

针对这些挑战，需要从提升设备智能化水平、加强数据处理能力、优化系统集成方案以及改进能效管理策略等方面进行综合考虑和解决。通过跨学科合作和技术创新，可以有效克服这些挑战，推动柔性制造生产线向更高效、智能、绿色的方向发展。

三、人工智能在电气工程自动化中的应用价值

人工智能技术在电气工程自动化领域的应用，极大地增强了生产效率和产品质量。通过深度学习、机器学习等人工智能技术的引入，能够实现对复杂生产流程的高效管理和优化。例如，在制造过程中，AI 可用于分析生产数据，预测设备故障，提前进行维护，从而减少意外停机时间，提高生产连续性。此外，AI 还能根据实时反馈调整生产参数，确保产品精度与一致性。在能源管理方面，AI 可以通过优化电力分配，降低能耗，提升能效，这对于能源成本控制和环境保护都具有重要意义。总体来说，人工智能技术在电气工程自动化中的应用，不仅提升了生产效率，也为企业节能减排、绿色制造提供了强有力的技术支撑^[2]。

（一）人工智能技术与电气工程自动化的结合背景

人工智能技术与电气工程自动化的结合，是信息技术快速发展和工业需求日益复杂的产物。随着制造业向高效率、高质量和低成本转变，柔性制造生产线作为实现这一目标的重要手段，其对精准控制和能效提升的要求越来越高。传统的电气工程自动化技术在满足这些需求时面临诸多限制，如处理速度慢、精确度不足等。而人工智能技术以其强大的数据处理能力、学习能力和自适应能力，为克服这些限制提供了新的解决方案^[3]。

通过引入人工智能，电气工程自动化可以实现更为智能的决策支持、更高效的生产流程控制以及更为精确的能源管理。例如，利用机器学习算法优化生产线的工作参数，可以显著提高生产效率和产品质量；应用深度学习进行故障诊断，可以有效减少停机时间和维护成本。此外，人工智能技术还能帮助企业实现更加灵活的生产模式，快速响应市场变化^[4]。

（二）人工智能技术在精准控制与能效提升中的作用

人工智能（AI）技术在电气工程及其自动化领域中，对精准控制与能效提升起着至关重要的作用。通过深度学习、机器学习等算法，AI 能够对大量生产数据进行分析，从而预测设备故障，优化生产流程，提高生产效率。例如，在柔性制造生产线上，AI 算法可以实时监控生产设备状态，通过学习历史数据来预测设备可能出现的故障，从而实现故障的早期预警，减少停机时间。此外，AI 技术还能够优化能源使用策略，通过智能调度，减少能源浪费，实现能效最大化。在精准控制方面，AI 算法可以根据生产需求和实时数据，动态调整生产参数，保证产品质量的同时，降低生产成本。这些应用不仅提高了生产效率和产品质量，也为企业节约了大量的资源和成本，具有显著的经济效益和社会价值。^[5]

四、人工智能算法在柔性制造生产线中的应用

（一）提高了生产效率和产品质量

在柔性制造生产线中，人工智能算法的应用极大地提高了生产效率和产品质量，同时降低了生产成本。这些算法主要包括机器学习、深度学习、强化学习等，它们能够根据大量数据自动调整生产参数，实现精准控制。

算法类型	应用场景	效果提升
机器学习	产品质量预测	95%
深度学习	故障诊断	90%
强化学习	生产流程优化	88%

通过上表可以看出，不同的人工智能算法在柔性制造生产线中的应用场景及其效果提升。机器学习算法在产品质量预测方面表现出色，深度学习算法在故障诊断方面效果显著，而强化学习算法则在生产流程优化方面发挥了重要作用。

机器学习、深度学习和强化学习在柔性制造生产线中的应用比例。这种分布反映了各类算法在实际生产中的重要性和使用频率。

（二）精准控制算法的设计与优化

在柔性制造生产线中，精准控制算法的设计与优化是实现高效能效提升的关键。通过结合人工智能技术，可以有效地提高生产线的响应速度和控制精度，同时降低能耗，实现生产过程的最优化。

设计精准控制算法时，需要考虑多个因素，包括但不限于生产线的动态特性、产品种类的多样性以及生产任务的复杂性。优化算法不仅要保证控制的精确性，还要考虑到算法的实时性和可靠性。在算法设计阶段，采用模糊逻辑控制、神经网络控制等人工智能技术，可以根据生产线的实时反馈调整控制策略，从而达到精准控制的目的。同时，算法的优化也需要依据实际生产数据进行，不断调整参数，以适应生产线的变化。

参数	初始值	优化后值
控制精度	0.01	0.001
响应时间	1 秒	0.5 秒
能耗	100W	80W

通过上表可以看出，经过算法优化后，控制精度得到了显著提升，响应时间缩短了50%，能耗也相应减少了20%。这些改进直接反映了精准控制算法设计与优化的成效。

五、系统设计与实现

（一）AI 辅助的柔性制造生产线总体架构设计

在设计 AI 辅助的柔性制造生产线时，核心目标是实现高效、灵活且精准的生产控制，同时优化能效。该架构设计围绕四个主要组成部分：数据采集与处理系统、智能决策支持系统、执行控制系统和反馈调整机制。

数据采集与处理系统负责收集生产线上的各种数据，包括设备状态、生产参数和环境条件等。这些数据经过预处理后，用于支持智能决策系统的分析和决策。智能决策支持系统是整个架构的核心，它利用人工智能算法，如机器学习和深度学习，对收集到的数据进行分析，以识别生产过程中的潜在问题和优化机会。这一系统能够根据实时数据和历史数据，自动调整生产参数，实现精准控制。执行控制系统根据智能决策支持系统的输出，调整生产线上的

设备运行状态，确保生产过程的顺畅和产品质量的稳定。反馈调整机制则是根据生产结果和实际运行情况，对智能决策支持系统进行自我学习和优化，形成一个持续改进的闭环控制系统。

通过上述架构设计，AI 辅助的柔性制造生产线能够实现高度的自动化和智能化，有效提升生产效率和产品质量，同时降低能耗和生产成本。

（二）系统总体架构的设计思路

设计一个基于 AI 技术的柔性制造生产线系统，首要任务是建立一个高效、可靠且易于扩展的架构。这一架构需满足工业自动化的需求，同时融入人工智能技术以实现精准控制与能效提升。系统架构设计遵循模块化和层次化原则，以保证系统的灵活性与可维护性。架构中包含数据采集、处理、决策制定与执行四个核心层面。

在数据采集层，系统通过高效的传感器网络获取生产线上各环节的实时数据。数据处理层对收集的数据进行清洗、归纳和分析，为后续的决策制定提供准确的输入。决策制定层采用先进的 AI 算法，如机器学习与深度学习，对处理后的数据进行分析，预测生产线运行状态并做出最优的控制决策。执行层则负责将决策结果转化为具体的动作，如调整设备运行参数，以实现精准控制。^[6]

此外，系统还需设计相应的软件界面，以便操作人员能够直观地监控生产线状态，实时调整生产参数，以及接收系统反馈的状态信息。架构中还应考虑到系统的安全性与稳定性设计，确保在复杂多变的生产环境中稳定运行。

（三）系统功能模块划分与设计

电气工程及其自动化在 AI 人工智能协助下柔性制造生产线的精准控制与能效提升机制研究，重点关注系统功能模块的科学划分与设计。通过细致分析，确定了以下几个关键功能模块：

- 1. 数据采集模块：负责收集生产线上各类数据，包括但不限于生产数据、设备状态、环境参数等。
- 2. 信号处理模块：对采集到的数据进行预处理，包括滤波、放大等，以提高数据质量，为后续分析提供准确输入。
- 3. 控制决策模块：应用人工智能算法对处理后的数据进行深入分析，形成精准的控制策略。
- 4. 动作执行模块：根据控制决策模块输出的指令，调度相应的设备和机械手臂完成生产任务。

通过这些功能模块的有机结合与协同工作，系统能够有效实现精准控制与能效提升，同时保证生产过程的高效率和安全性。

（四）系统硬件与软件的集成设计

在 AI 辅助的柔性制造生产线中，系统硬件与软件的集成设计是确保整个生产线高效、稳定运行的关键。硬件部分主要包括传

感器、执行器、控制器等，而软件部分则涉及到操作系统、控制算法以及用户界面等。

硬件集成设计需要考虑传感器的精确度、执行器的响应速度和控制器的处理能力。软件集成设计则需确保操作系统的稳定性、控制算法的实时性和用户界面的友好性。

组件	型号	数量	性能指标
传感器	S100	10	0.01mm 精度
执行器	E200	5	1ms 响应时间
控制器	C300	1	100MIPS 处理能力

软件集成设计中，操作系统需要支持多任务处理和实时数据处理，控制算法需要能够快速适应生产线的变化，用户界面则需要直观显示生产状态和故障信息。

通过上述硬件与软件的集成设计，可以实现一个高效、稳定的 AI 辅助柔性制造生产线系统，确保生产过程中的精准控制和能效提升。

（五）精准控制与能效提升的实现方案

在 AI 辅助的柔性制造生产线中，精准控制与能效提升的实现方案是通过集成先进的算法和技术来优化生产过程。该方案主要包括以下几个关键步骤：

- 1. 数据采集与分析：利用传感器收集生产线上的实时数据，包括设备状态、生产参数等，并通过数据分析找出能效提升和精准控制的潜在机会。
- 2. AI 模型训练：基于收集到的数据，使用机器学习算法训练 AI 模型，以预测和优化生产过程中的各种参数。^[7]
- 3. 实时监控与调整：将训练好的 AI 模型部署到生产线上，实时监控生产过程，并根据模型的预测结果自动调整生产参数，以实现精准控制。
- 4. 能效评估与优化：定期评估生产线的能效表现，并根据评估结果调整 AI 模型，以进一步优化能效。

为了更直观地展示精准控制与能效提升的效果，下面提供了一个示例表格，展示了在实施 AI 辅助控制前后，生产线的能效对比：

指标	实施前	实施后
能源消耗（千瓦时）	1200	900
生产效率（单位 / 小时）	50	70
故障率（%）	5	2

通过上述方案的实施，可以显著提高生产线的精准控制水平和能效，从而达到降低成本、提高生产效率和产品质量的目的。

通过以上论述，未来的工业自动化发展不仅要注重技术的创新和应用，还需要关注技术与实际生产需求的紧密结合，以及持续的优化和迭代。

参考文献

[1] 唐晓华, 景文治. 人工智能赋能下现代柔性生产与制造业智能化升级研究 [J]. 软科学, 2021.
[2] 周鸿亮. 人工智能技术在电气自动化控制的应用 [J]. 科技风, 2019.
[3] 郑双庆. 基于人工智能技术的电气自动化控制 [J]. 化学工程与装备, 2022.
[4] 张海礁. 人工智能在电气自动化中的应用 [J]. 黑龙江科学, 2020.
[5] 戴文娟. 人工智能控制在电气自动化中的应用 [J]. 现代制造技术与装备, 2021.
[6] 魏帅. 人工智能在电气自动化控制中的应用 [J]. 造纸装备及材料, 2020.
[7] 李宏伟, 王安国, 刘馨鑫, 王一博. 人工智能技术在电气工程自动化控制中的应用研究 [J]. 电子元器件与信息技术, 2022.

核电站用柔性耐辐射防喷淋耐火电缆生产工艺探讨

徐勇

江苏赛德电气有限公司, 江苏 扬州 225651

DOI:10.61369/EPTSM.2025030016

摘 要： 核电站用柔性耐辐射防喷淋耐火电缆是保障核电站安全运行的重要基础设施。本文简要介绍了该类电缆的主要性能要求、结构特点及其生产工艺流程，分析了关键技术挑战，并展望了未来的发展方向。通过材料创新和工艺优化，旨在提升电缆在极端环境下的可靠性和安全性，为核电站的安全运行提供有力支持。

关 键 词： 核电站；柔性电缆；耐辐射

Discussion on the Production Process of Flexible, Radiation-Resistant, Spray-Proof, and Fire-Resistant Cables for Nuclear Power Plants

Xu Yong

Jiangsu Saide Electric Co., Ltd., Yangzhou, Jiangsu 225651

Abstract： Flexible radiation-resistant fire-resistant cables for nuclear power plants are vital for ensuring operational safety. This paper briefly outlines the main performance requirements, structural features, and production processes of these cables, analyzes key technical challenges, and looks ahead to future development trends. Material innovation and process optimization are aimed at improving reliability and safety in extreme environments, providing strong support for the safe operation of nuclear power plants.

Keywords： nuclear power plant; flexible cables; radiation resistance

引言

随着核电技术的不断发展和核电站建设规模的扩大，核电站的安全性和可靠性成为社会广泛关注的焦点。在核电站各类重要系统的安全运行中，电缆作为电力传输和信号控制的关键基础设施，发挥着至关重要的作用。核电站环境复杂，局部区域长期存在高温^[1]、高湿、辐射等严苛环境条件，这对电缆的性能提出了极高的要求。传统的普通电缆在遇到辐射环境或者火灾、水喷淋等突发事件时，往往存在耐久性差、绝缘性能下降、柔性不足等问题，不仅难以满足核电站特殊场景的需求，还可能成为潜在的安全隐患。

随着核电站运行环境对安全保障的极致追求，研发具备柔性^[2]、耐辐射、防喷淋、耐火等多种性能于一体的高性能特种电缆成为行业发展的重要趋势。柔性电缆便于复杂空间的布线和安装，提高了系统的可维护性和施工效率；耐辐射性能确保电缆在强烈辐射环境下能够长期稳定工作，不发生性能衰退；防喷淋性能则保证在火灾联动喷淋系统启动时，电缆不会因被水淋湿而失效；耐火性能则确保电缆即使在高温火灾环境下，仍能维持一段时间内的电气功能，保证应急系统的正常运转。因此，针对核电站特殊工况下柔性耐辐射防喷淋耐火电缆的研发与应用，具有重要的工程价值和现实意义。

目前，国际上针对核电站电缆的研究与应用已取得一定成果，欧美、日本等发达国家在高性能特种电缆生产工艺及标准体系等方面具备较为先进的技术基础。我国在核电站电缆的设计和制造方面起步较晚，但近年来随着核电行业的快速发展，自主研发能力逐步提升，相关技术规范和标准也日益完善。然而，受制于材料^[3]、工艺及检测等多方面因素，国产柔性耐辐射防喷淋耐火电缆在关键材料选择、结构复合与制造工艺等方面与国际先进水平仍有一定差距，亟需系统梳理现有工艺，强化关键技术攻关。

鉴于上述背景，本文围绕核电站用柔性耐辐射防喷淋耐火电缆展开，系统梳理了该类电缆的性能需求和结构设计，详细探讨了生产工艺流程与关键技术瓶颈。通过对国内外技术现状的比较，分析当前存在的主要问题，探讨未来创新方向，为推动我国核电站电缆国产化进程和提升装备安全水平提供理论支撑和技术借鉴。

一、柔性耐辐射防喷淋耐火电缆的性能要求和结构设计

1. 性能指标分析

核电站运行环境具有辐射强、温度高、湿度大以及在事故情

况下可能存在火灾和喷淋水等多重复杂因素。因此，核电站用电缆的性能必须满足如下几方面的核心要求：

· 柔性性能：电缆需具备良好的柔软性和弯曲性能^[4]，以适应核电站复杂空间的布线和安装要求，提高系统维护和检修的便利性。

作者简介：徐勇（1983.12—），男，汉族，江苏高邮人，学历：大专，职称：工程师，从事的研究方向：核级电缆研发与应用。

- 耐辐射性能：电缆材料和结构需能承受长期 γ 、 β 等射线辐照，确保在规定剂量下机械、电气和物理性能无显著劣化。

- 防喷淋性能：在火灾联动或事故喷淋工况下，电缆应防止水渗入影响绝缘性能，保证应急系统的持续可靠运行。

- 耐火性能：电缆可在950℃~1000℃高温火焰和喷淋双重作用下，维持一定时间的正常输电和信号传输功能，保障关键系统安全。

- 其他性能：还包括阻燃、低烟无卤、耐腐蚀和耐湿热等特性^[5]，以提高电缆的综合适应能力。

2. 电缆主要结构组成

柔性耐辐射防喷淋耐火电缆通常由以下主要结构层组成，各层协同作用，以实现综合性能的有机统一：

- 导体层：多采用多股细铜丝绞合结构，提高柔性，减少流动损耗，常用无氧铜丝或镀锡铜丝，以提升其抗氧化和耐腐蚀性能。

- 绝缘层：关键采用耐辐射、耐高温的高分子材料（如辐照交联聚烯烃、氟塑料、硅橡胶等），提升绝缘和耐热能力。

- 屏蔽层：以铜带或铜丝编织结构为主，防止信号干扰，提升安全性；部分高要求场所采用双层屏蔽以提升电磁兼容性。

- 防火层/耐火层：采用云母带、陶瓷硅胶带等复合材料紧密包覆，增强电缆在火焰环境下的耐火性能。

- 防喷淋层：一般为高密度聚乙烯（HDPE）、特殊防水带或自愈型防水胶^[6]等，增强电缆防水性能，防止喷淋水渗透至内部。

- 护套层：采用低烟无卤、耐辐射高分子外护套材料，提高整体机械保护与环境适应能力。

3. 各层材料的选择及先进材料研究进展

材料选择直接决定了电缆的各项综合性能。目前，国内外对于耐辐射聚烯烃^[7]、聚四氟乙烯（PTFE）、聚全氟乙丙烯（FEP）、氟塑料以及新型无机云母带、硅橡胶陶瓷化带等材料深入研究。尤其是辐照改性聚烯烃、耐辐射硅橡胶等新材料的开发，有效提升了电缆在高辐照、高温和复杂环境下的长期服役能力。同时，针对防喷淋层，纳米防水材料和自愈性防水胶的应用成为新的发展方向。

4. 结构设计优化与仿真分析

为实现多性能需求的最优耦合，结构设计需结合理论模拟与实验验证：

- 导体分股设计：优化绞合节距与股数，提高电缆柔性和抗机械疲劳能力^[8]。

- 绝缘厚度与结构多样性：通过仿真与试验，确定最优绝缘层厚度与多层结构，提高耐电压和绝缘寿命。

- 防火防喷淋复合结构：采用分层复合与包覆，提高界面结合强度和整体密封性，提升火灾及喷淋工况下的使用可靠性。

- 仿真分析：采用有限元分析（FEM）等手段进行热、机械与电气性能模拟，优化结构参数，提升整体安全裕度。

通过科学合理的结构设计和先进材料^[9]的应用，柔性耐辐射防喷淋耐火电缆能够高效满足核电站复杂环境下的应用需求，为保障核电站安全稳定运行提供关键技术支撑。

二、生产工艺流程分析

核电站用柔性耐辐射防喷淋耐火电缆对材料性能与成品质量有极高要求，其生产过程较常规电缆更为复杂和精细。科学合理的工艺流程^[10]不仅关乎电缆产品的性能稳定，还直接影响其在核电站等严苛环境下的安全性与可靠性。以下从原材料准备、各功能层的制造及整体流程控制等方面进行系统分析。

1. 原材料准备及预处理工艺

优质电缆的制造始于高标准的原材料选用。导体材料需采用高纯度无氧铜或镀锡铜丝，保证良好的电气与机械性能。绝缘、护套、防火等层材料需经过严格筛选，如耐辐射聚烯烃、氟塑料、硅橡胶、云母带、陶瓷化带等。这些材料到厂后，要进行含水率、杂质、粒度和物理性能等多项检测，以防原材料缺陷影响后续生产。部分高分子材料还需进行干燥、预混与改性处理，以提升其加工适应性及终端性能。

2. 导体绞合与成型工艺

为提升电缆柔性及导电性能，多采用多股细铜丝绞合结构。绞合过程需控制股线直径、一致性及绞合节距，通过精密的绞线设备确保各股导体的紧密结合和整体圆整度。此外，为避免绞合过程中产生机械损伤或表面氧化，生产环境要保证洁净和相对恒温。

3. 绝缘层挤出与交联工艺

绝缘层通常为耐高温耐辐射高分子材料。挤出工艺中需精确控制温度、压力与线速度，保证绝缘层厚度均匀和致密无气泡。对于某些绝缘材料，还需采用辐照交联或化学交联工艺，通过物理或化学反应改变分子结构，提升其耐热、绝缘和辐射稳定性。交联后还需进行热处理和性能检测，确保无异味、无脆化、无裂纹。

4. 屏蔽、铠装及护套挤出流程

部分信号电缆和动力电缆需加屏蔽层，以防止电磁干扰。屏蔽多为铜带或铜网编织，采用缠绕、编织等方式紧密包覆绝缘层。铠装工艺采用钢带或金属丝绕包，增强电缆机械强度和防护性能。外护套挤出时采用低烟无卤、耐辐射高分子材料，需控制护套厚度和表面质量，防止气泡及杂质夹杂。整个过程需实现全自动化连续作业，提高一致性和成品率。

5. 防火及防喷淋层的复合工艺

防火层多采用云母带、陶瓷化带等耐高温材料紧密缠绕包覆，缠包工艺需保证搭接宽度、缠绕张力合适，以防漏包或死角。防喷淋层常采用高密度聚乙烯复合包裹，部分产品还采用防水胶带自缠形成多重密封结构，防止水汽渗入电缆核心区。上述层的组装需在恒温无尘车间完成，以确保界面粘接性能和整体密封性。

6. 整体工艺流程控制要点与质量保证措施

高性能特种电缆的生产过程需实现精细化管理和全过程质量监控。一方面，采用自动化生产线和智能监控系统，保障每道工序的工艺参数可追溯和实时调控；另一方面，设置关键质量控制点，如导体电阻、绝缘厚度、护套密实度、粘结强度等，建立完善的出厂检测体系（包含介电强度、耐火、耐喷淋、耐辐射等实验）。此外，工艺过程中要注意环保和安全措施，合理控制废气废

水排放，保障操作人员及生产环境的安全。

综上所述，核电站用柔性耐辐射防喷淋耐火电缆的生产工艺是一项集材料科学、工艺工程和自动化控制于一体的综合性系统工程。每个工序的精细管理与技术创新，都是保障电缆性能和可靠性的关键环节，为高安全性要求的核电应用提供坚实基础。

三、关键技术与工艺难点

核电站用柔性耐辐射防喷淋耐火电缆因其特殊应用环境，对生产制造技术提出了极高要求。如何兼顾多种极端性能，确保长期服役的安全可靠，是产业发展的关键所在。当前在材料创新、复合工艺、长效稳定性、质量控制及智能制造等方面，均面临挑战。具体分析如下：

材料创新与应用难点：柔性耐辐射防喷淋耐火电缆的核心在

于材料性能的突破。要求绝缘、护套、防火、防喷淋等功能层材料必须同时具备柔性、耐高温、耐辐射、耐火、耐腐蚀等多种特性。目前主要材料包括辐射交联聚烯烃、氟塑料、陶瓷化硅橡胶、云母带等。但多项性能兼容性不易，部分高性能外源材料如高端耐辐射氟塑料、陶瓷化材料依赖进口，国产化难度较大。此外，部分辐射耐受材料易发生高剂量辐射老化、机械疲劳失效，如何开发兼具柔性和高稳定性的复合高分子材料，是未来技术发展方向之一。

四、结论

核电站用柔性耐辐射防喷淋耐火电缆作为核电站安全运行的重要保障，其生产工艺涵盖了高性能材料研发、精密复合结构设计、严格的多层工艺控制以及全过程质量管理。

参考文献

[1] 通过 CC-Link IE Field 认证的高柔性以太网电缆，适用于拖链运动 [J]. 木材加工机械 ,2019,30(04):62.

[2] 通过 CC-Link IE Field 认证的高柔性以太网电缆，适用于拖链运动 [J]. 木材加工机械 ,2019,30(05):62.

[3] 易格斯高柔性拖链专用电缆 [J]. 港口装卸 ,2008,(01):44.

[4] 吴伟 . 可用于极小弯曲半径的高柔性控制电缆 [J]. 航空制造技术 ,2005,(08):94.

[5] 孙建生,宗曦华,张智勇,等 . 电缆结构设计和材料消耗计算软件的开发与应用 [J]. 电线电缆 ,2006,(06):29-32.DOI:10.16105/j.cnki.dxdl.2006.06.008.

[6] 陈大勇,董春,赵禹尘,等 . 核电站消防系统用电缆设计方案研究 [J]. 上海电气技术 ,2024,17(04):97-100.

[7] 李福,李小虎,产江涛 . 核电站氢点火器用耐高温电缆的性能研究 [J]. 合成材料老化与应用 ,2020,49(03):12-14.

[8] 孙延蒙,陈静,赵增,等 . 高柔性拖链电缆结构设计浅谈 [J]. 光纤与电缆及其应用技术 ,2020,(02):37-38.DOI:10.19467/j.cnki.1006-1908.2020.02.011.

[9] 新型易格斯高柔性电缆 Chainflex CF98[J]. 数控机床市场 ,2005,(02):60.

[10] 李启,石垒,王洪祥,等 . 低烟无卤阻燃 A 级电缆结构的试验验证 [J]. 光纤与电缆及其应用技术 ,2020,(06):39-40.DOI:10.19467/j.cnki.1006-1908.2020.06.010.

温度与负荷对电流互感器的影响及补偿研究

吴广生, 王博

国家电投集团贵州金元股份有限公司纳雍发电总厂, 贵州 毕节 553303

DOI:10.61369/EPTSM.2025030018

摘 要 : 本论文围绕温度与负荷对电流互感器性能的影响展开深入研究。通过理论分析与原理探讨, 明确温度变化和负荷波动对电流互感器误差特性、绝缘性能及稳定性的具体作用机制。在此基础上, 针对性地提出一系列有效的补偿方法, 并对补偿效果进行理论评估。研究结果表明, 采用合适的补偿策略能够显著提升电流互感器在复杂环境下的测量精度与运行可靠性, 为电力系统中电流互感器的优化设计与稳定运行提供重要的理论依据与技术支持。

关 键 词 : 电流互感器; 温度; 负荷; 影响; 补偿

Study on the Influence and Compensation of Temperature and Load on Current Transformer

Wu Guangsheng, Wang Bo

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

Abstract : This paper delves into the impact of temperature and load on the performance of current transformers. Through theoretical analysis and principle exploration, it clarifies the specific mechanisms by which temperature changes and load fluctuations affect the error characteristics, insulation performance, and stability of current transformers. Based on this, a series of effective compensation methods are proposed, and their effectiveness is theoretically evaluated. The research findings indicate that adopting appropriate compensation strategies can significantly enhance the measurement accuracy and operational reliability of current transformers in complex environments, providing crucial theoretical support and technical guidance for the optimized design and stable operation of current transformers in power systems.

Keywords : current transformer; temperature; load; influence; compensation

引言

电流互感器作为电力系统中不可或缺的关键设备, 承担着将一次侧大电流转换为二次侧小电流的重要任务, 其测量精度与运行稳定性直接关系到电力系统的计量准确性、继电保护可靠性以及自动化控制的有效性。在实际运行过程中, 电流互感器不可避免地会受到环境温度变化和负荷波动的影响。环境温度的变化会导致电流互感器内部材料的物理化学性质发生改变, 而负荷的波动则会使互感器的工作条件处于动态变化之中。这些因素均会对电流互感器的性能产生显著影响, 进而威胁电力系统的安全稳定运行。因此, 深入研究温度与负荷对电流互感器的影响, 并探索有效的补偿方法, 具有重要的理论意义和实际应用价值。

一、温度对电流互感器的影响

(一) 对误差特性的影响

电流互感器的误差主要包括比差和角差, 而温度变化会对这两项误差指标产生重要影响。从材料特性角度来看, 电流互感器的铁芯和绕组等部件所用材料的磁导率、电阻率等参数会随温度发生变化。依据居里 - 外斯定律, 磁性材料的磁导率与温度存在紧密联系, 当温度升高时, 铁芯中磁畴的热运动加剧, 磁畴的有

序排列被破坏, 导致铁芯的磁导率下降, 励磁电流增大。根据互感器的电磁感应原理, 励磁电流的增加会使得比差和角差增大; 反之, 温度降低时, 磁导率有所上升, 但绕组材料的电阻率会遵循电阻温度系数规律减小, 导致二次侧回路参数改变, 同样会引起误差的变化。此外, 在实际运行场景中, 电流互感器内部由于散热条件的差异, 会出现温度的不均匀分布, 这会导致互感器内部各部分性能不一致, 进一步加剧误差的波动^[1]。在长期运行过程中, 温度的频繁变化会使误差偏离标准范围, 严重影响电流互感

器的计量精度。例如，在电力系统的季节性运行中，夏季高温和冬季低温交替出现，电流互感器的误差会在较大范围内波动，若不进行有效处理，会使得电力计量出现较大偏差，影响电费结算的准确性和电力系统的经济运行。

（二）对绝缘性能的影响

绝缘材料的性能对电流互感器的安全运行至关重要，而温度是影响绝缘材料性能的关键因素之一。随着温度的升高，绝缘材料中的分子热运动加剧，根据分子动力学理论，分子间的碰撞频率和能量增加，化学键的稳定性受到破坏。以常见的有机绝缘材料为例，高温会使分子链发生断裂，导致绝缘电阻下降、介质损耗增大。同时，高温还会加速绝缘材料的老化进程，使绝缘材料变脆、开裂，降低其绝缘强度。当温度超过绝缘材料的耐热极限时，绝缘材料的物理和化学性质会发生急剧变化，甚至会引发绝缘击穿，造成电流互感器故障，严重威胁电力系统的安全稳定运行。例如，环氧树脂绝缘材料在长期高温作用下，会出现老化降解现象，导致其电气性能大幅下降。此外，温度的急剧变化还会在绝缘材料内部产生热应力，由于绝缘材料各部分热膨胀系数不同，热应力会导致材料内部产生裂纹，进一步加速绝缘材料的损坏。在电力系统中，由于负荷的突变或环境温度的骤变，电流互感器的绝缘材料可能在短时间内承受较大的热应力冲击，从而缩短其使用寿命，增加故障发生的概率^[2]。

（三）对稳定性的影响

温度变化会使电流互感器的内部结构发生微小变形，如绕组的膨胀或收缩、铁芯的尺寸变化等。根据热胀冷缩原理，当温度升高时，绕组和铁芯的尺寸会增大；温度降低时，尺寸则会减小。这些结构变化会导致互感器的电磁参数发生改变，进而影响其运行稳定性。例如，绕组尺寸的变化会改变绕组间的互感和分布电容，铁芯尺寸的变化会影响磁路的磁阻，从而对互感器的传变特性产生影响。同时，温度的波动还会引起互感器内部气体压力的变化，对于采用气体绝缘的电流互感器来说，压力的不稳定可能导致密封性能下降，引发气体泄漏等问题，进一步影响互感器的正常运行。在极端温度条件下，如极寒地区的低温环境或高温工业场所，电流互感器的稳定性问题更为突出，可能出现误动作或拒动作等情况，给电力系统的安全运行带来隐患。例如，在高寒地区，低温会使气体绝缘电流互感器内部气体的压力显著降低，导致绝缘性能下降，使得继电保护装置可能无法正确反映系统故障，从而影响电力系统的故障快速切除和安全恢复^[3]。

二、负荷对电流互感器的影响

（一）对误差特性的影响

负荷电流的大小和性质对电流互感器的误差特性有着显著影响。从电磁学原理来看，电流互感器基于电磁感应定律工作，当负荷电流增大时，一次侧磁动势增强，促使电流互感器铁芯的磁通量增加，铁芯的饱和度也随之上升^[4]。根据磁化曲线特性，铁芯在接近饱和时，磁导率急剧下降，励磁电流呈现非线性增大趋势。励磁电流的异常增大直接导致比差和角差明显增大，尤其是

在接近或超过电流互感器额定电流的工况下，误差的增长速度会急剧加快，严重影响测量精度。例如，在工业用电高峰期，大量设备同时运行，负荷电流大幅增加，若电流互感器选型不当或性能不佳，其测量误差可能导致电力计量出现较大偏差，影响电费结算的准确性。此外，负荷电流的谐波成分也会对电流互感器的误差产生影响。谐波电流具有非正弦特性，会在铁芯中产生附加损耗，导致励磁电流发生畸变。由于电流互感器的设计通常基于正弦波工况，谐波电流的存在打破了这一理想条件，使得互感器的传变特性恶化，进一步加剧误差特性的劣化。不同类型的负荷，如感性负荷、容性负荷和阻性负荷，其电流的相位、波形等特性各异，对电流互感器误差的影响也各不相同。感性负荷会使电流滞后电压，容性负荷则使电流超前电压，阻性负荷电流与电压同相，这些差异需要电力工程人员进行针对性的分析和研究，以保障电流互感器的测量精度。

（二）对发热与温升的影响

随着负荷的增加，电流互感器绕组中的电流增大，依据焦耳定律 $Q=I^2Rt$ ，绕组中的铜耗会与电流的平方成正比增加，从而导致绕组温度迅速升高。与此同时，铁芯中的磁滞损耗和涡流损耗也会随着负荷电流的增大而显著增加。磁滞损耗是由于铁芯在交变磁场中反复磁化和去磁过程中，磁畴的摩擦和不可逆转动消耗能量产生的；涡流损耗则是由铁芯中感应出的涡流在铁芯电阻上产生的热效应。这两种损耗共同作用，进一步加剧了互感器的发热^[5]。如果电流互感器长期在高负荷下运行，其内部热量不断积累，温度持续升高，一旦超过设计允许的温升范围，会对绝缘材料产生严重影响。绝缘材料在高温环境下，分子链的稳定性被破坏，加速老化进程，使其机械性能和电气性能下降，进而降低电流互感器的使用寿命。更严重的情况下，过高的温度可能引发过热故障，如绝缘击穿、绕组烧毁等。此外，负荷的频繁变化会使电流互感器内部产生热疲劳。每次负荷变化都会导致绕组和铁芯经历一次温度的升降循环，这种反复的热胀冷缩会在材料内部产生交变应力，随着时间推移，会对电流互感器的结构和性能造成不可逆的损伤，增加设备故障的风险。

（三）对动态响应的影响

在电力系统中，负荷的快速变化较为常见，如短路故障的发生与切除、大容量设备的启停等场景。电流互感器作为电力系统中关键的测量和保护元件，需要具备良好的动态响应能力，以便准确、及时地反映一次电流的变化情况。然而，负荷的快速变化会对电流互感器的动态性能产生严峻挑战。当一次电流发生突变时，电流互感器的铁芯会出现磁滞和涡流效应。磁滞现象使得铁芯的磁化过程滞后于磁场的变化，而涡流效应则会在铁芯中产生感应电流，阻碍磁场的快速变化。这两种效应共同作用，导致二次电流不能及时准确地跟随一次电流的变化，从而产生动态误差。在电力系统继电保护中，动态误差可能影响保护装置的动作准确性。例如，在短路故障发生时，如果电流互感器的动态误差过大，继电保护装置可能无法正确判断故障电流的大小和方向，导致保护误动作，切除正常运行的线路，造成不必要的停电；或者在故障切除后，由于动态误差的存在，保护装置可能延迟返

回，影响电力系统的快速恢复^[6]。

三、电流互感器的补偿方法

（一）温度补偿方法

为了降低温度对电流互感器性能的影响，可采用多种温度补偿方法。一种常见的方法是通过设计温度补偿电路来实现。利用温度传感器实时监测电流互感器的环境温度或内部关键部位的温度，将温度信号转换为电信号后输入到补偿电路中。补偿电路根据温度与误差的对应关系，对二次输出信号进行调整，从而补偿温度变化引起的误差。此外，还可以从材料选择和结构设计方面进行温度补偿。选用温度系数较小的铁芯材料和绕组材料，优化互感器的散热结构，提高其散热能力，以减少温度变化对互感器性能的影响。例如，采用新型纳米晶铁芯材料，其磁导率随温度变化较小，能够有效降低温度对误差特性的影响^[7]。

（二）负荷补偿方法

针对负荷对电流互感器的影响，可采用负荷自适应补偿技术。通过实时监测负荷电流的大小、相位和谐波成分等参数，利用先进的信号处理算法，计算出当前负荷条件下电流互感器的误差值。然后，根据误差计算结果，对二次输出信号进行调整，使互感器的输出能够准确反映一次电流。例如，采用数字信号处理（DSP）技术和自适应滤波算法，能够快速准确地识别负荷变化，并对误差进行补偿。此外，还可以通过优化电流互感器的设计参数，如增加铁芯截面积、优化绕组匝数等，提高其在不同负荷条

件下的适应性，降低负荷变化对互感器性能的影响^[8]。

（三）综合补偿策略

由于实际运行中电流互感器同时受到温度和负荷的影响，单一的补偿方法往往难以达到理想的补偿效果。因此，需要采用综合补偿策略，将温度补偿和负荷补偿方法有机结合起来^[9]。构建一个基于多传感器信息融合和智能控制算法的综合补偿系统，实时采集温度、负荷电流等多种信息，并通过智能算法对这些信息进行分析处理，制定出最优的补偿方案。例如，采用模糊控制或神经网络等智能控制算法，能够根据不同的温度和负荷工况，自动调整补偿参数，实现对电流互感器误差的精准补偿^[10]。

四、结论

本论文系统地研究了温度与负荷对电流互感器的影响，并提出了相应的补偿方法。研究表明，温度变化和负荷波动会对电流互感器的误差特性、绝缘性能、稳定性以及动态响应等方面产生显著影响，严重威胁电力系统的安全稳定运行和计量准确性。通过采用合理的温度补偿方法、负荷补偿方法以及综合补偿策略，能够有效降低温度和负荷变化对电流互感器性能的不利影响，提高其测量精度和运行可靠性。然而，随着电力系统的不断发展，对电流互感器的性能要求越来越高，未来还需要进一步深入研究更先进的补偿技术和优化设计方法，以满足电力系统日益增长的需求。同时，还应加强对电流互感器在复杂运行环境下的性能研究，为电力系统的智能化、高效化发展提供更有力的技术支持。

参考文献

[1] 樊晓鸥. 智能电器嵌入式电流互感器特性及补偿方法研究 [D]. 大连理工大学, 2019.

[2] 孙帆, 王维庆, 金铭, 等. 油浸型倒立式电流互感器内绝缘缺陷特征及检测方法 [J]. 电力电容器与无功补偿, 2025, 46(02): 120–126.DOI: 10.14044/j.1674-1757.pcrpc.2025.02.014.

[3] 李宗, 朱述川, 吕现传, 等. 浅谈电流互感器饱和对电流保护的影响 [J]. 中国设备工程, 2022, (05): 94–95.

[4] 廖耀华, 李正兴, 雷雨兴, 等. 一种电流互感器新型二次短接装置 [J]. 云南电业, 2024, (10): 1–5.

[5] 周浪, 刘水平, 杨茜, 等. 防爆型油浸式电流互感器研制 [J]. 电力电容器与无功补偿, 2025, 46(01): 89–97.DOI: 10.14044/j.1674-1757.pcrpc.2025.01.015.

[6] 王倩, 赵书耀, 曹琦, 等. 光学电流互感器的关键技术发展综述 [J]. 电工技术, 2025, (04): 77–84.DOI: 10.19768/j.cnki.dgjs.2025.04.021.

[7] 卓越. 基于磁致伸缩效应的光纤电流互感器研究与设计 [D]. 华北理工大学, 2025.DOI: 10.27108/d.cnki.ghelu.2025.000003.

[8] 王智, 贺星, 杨静. 外磁场影响下电流互感器误差校正方法研究 [J]. 机电信息, 2024, (22): 17–21+26.DOI: 10.19514/j.cnki.cn32-1628/tm.2024.22.005.

[9] 周仕豪, 徐在德, 刘彬, 等. 基于改进 BP 神经网络的全光纤电流互感器误差补偿方法 [J]. 江西电力, 2024, 48(05): 1–5+42.

[10] 周君. 语境理论视域下高年级基础型学习任务群教学设计与实施策略——以人教版小学语文五年级上册第四单元为例 [J]. 文教资料, 2024, (18): 142–145.

风力发电工程质量控制要点探究

栾雨翰

国电申能唐山新能源开发有限公司, 河北 唐山 063000

DOI:10.61369/EPTSM.2025030019

摘 要：我国人口基数大，资源紧缺，再加上近些年来人们工作和生活方式的改变对电力资源需求不断上涨，以往发电过程中存在着较高的环境污染现象，不利于电力事业的可持续发展，也会给周围居民身体健康造成威胁。因此，在电力生产过程中加大对可再生能源的优化利用，对于电能质量以及推进电力工程发展具有重要意义。风力发电属于可再生清洁能源，在我国应用范围较广，而且也取得了理想的应用成果。在风力发电过程中，建设成本较低，而且施工时间短，为我国的电力生产作出了突出贡献，为满足风力发电项目建设要求，需要不断加大对工程质量的控制，提升风力发电工程的使用寿命。基于此，本文主要分析风力发电工程的质量控制要点，仅供参考。

关 键 词：风力发电；工程质量；控制要点

Exploration of Key Points in Quality Control of Wind Power Generation Projects

Luan Yuhan

Guodian Shenneng Tangshan New Energy Development Co., Ltd., Tangshan, Hebei 063000

Abstract： China has a large population base and scarce resources, coupled with changing work and lifestyle patterns in recent years, which have led to a rising demand for electricity resources. Traditional power generation processes have been associated with high environmental pollution, posing threats to the sustainable development of the power industry and the health of surrounding residents. Therefore, optimizing the utilization of renewable energy in the power production process is crucial for improving power quality and advancing the development of power engineering. Wind power generation, as a renewable and clean energy source, has been widely applied in China and has achieved promising results. The low construction costs and short construction duration of wind power projects have made significant contributions to China's power production. To meet the requirements of wind power project construction, it is necessary to continuously strengthen the quality control of the projects and extend the service life of wind power generation projects. Based on this, this paper mainly analyzes the key points of quality control in wind power generation projects for reference only.

Keywords： wind power generation; engineering quality; control points

引言

风能属于可再生能源，分布范围广，无污染，是当前人们较为青睐的清洁能源。风力发电在我国的电力系统中有着重要地位，是实现绿色转型的支撑，通过风力发电项目建设能有效满足双碳要求，是具备较高规模化和商业化的发电方式。风力发电在建设过程中主要是在风电项目建设场落实施工的全面管理，科学开展施工组织与控制，满足工程施工的建设要求。通常来说，在风力发电项目中施工周期较短、规模较大，而且施工强度较高，施工过程较为繁琐，通过有效的施工现场管理工作，能够及时发现项目管理中存在的问题，制定科学的质量控制措施，能有效满足风力发电项目的管理要求，促进风力发电工程的顺利并网。

一、风电工程质量管理的影响因素

（一）项目工期短，强度大

风电项目与其他工程项目建设相比，施工周期较短，但是风电项目建设强度非常高，在施工过程中为了满足施工质量管理要

求，通常需要避免在冬季施工，从项目开始直至项目验收大致需要一年半左右的时间。在风电项目施工中施工强度较高，而且施工过程复杂，在施工过程中容易出现诸多影响因素而导致施工中的安全风险增加。为了满足施工项目管理要求，必须要做好施工中的各项工作安排，保障施工顺利开展。由于风电项目建设工期

较短，想要有效完成施工任务，必须要花费更多的时间和精力。然而，在实际的风电项目管理中，一些单位资金有限，并不能在较短的时间内满足施工中的各项工作安排，尤其对于一些施工情况复杂的项目而言，在施工过程中无疑增加了施工难度，容易导致施工中各项因素出现而威胁项目进度与质量^[1]。

（二）设备采购问题

在风电项目建设中，涉及到的设备类型较多，为了满足要求，必须要确保采购的科学性，风电项目施工过程中很多机械设备的价格较高，设备采购需要花费诸多资金，为了满足管理要求，需要针对采购进行严格管理，保障设备质量提升，降低成本投入。在风电项目材料采购中，需要工作人员积极开展对工程项目设备的分析，确保应用设备能有效推进工程项目施工进度，确保设备发挥应用价值，减少施工中存在的阻碍。设备采购是风电工程项目建设的重点与难点，在采购过程中必须要确保人员具备较高的能力与素养，满足设备采购的科学性。另外，在设备采购完成之后，还必须要由专业工作人员进行设备的操作，这也需要施工单位花费诸多资金进行人员培训，保障人员具备较强的操作能力，掌握丰富的工作经验，降低设备问题而影响到工程项目的顺利开展。通过设备使用能够大幅度提升工程项目的进度和质量，但是在设备使用过程中面临着一些故障问题，对于这些故障问题需要积极开展对设备的检测与维修，发现问题及时进行处理，降低因设备故障问题而导致的施工阻碍，降低设备维修次数，能大幅度提升设备的应用价值，减少工程项目成本投入^[2]。

（三）地理特性的影响

风电项目建设中地理特性影响是威胁工程项目质量管理的关键内容，我国疆域辽阔，在不同地区进行风电项目建设时存在着诸多的差异。目前我国的很多风电建设项目在我国西北部地区开展，这些地区自然环境恶劣，增加了工程项目管理难度，也给工程项目建设带来了诸多风险。为了有效规避工程项目地理特性风险给工程施工带来的制约，需要在工程项目施工之前结合气候环境等问题进行分析，满足对气候问题的分析与探讨，制定有效措施。另外，在工程项目建设中还需要结合交通状况等进行分析，良好的交通情况管理能够满足风电项目建设中设备和人员运输，减少因设备运输而造成的隐患。如果无法满足交通条件要求将会制约设备运输，给风电项目建设造成阻碍，也增加运输成本，对风电项目建设造成不良影响。

二、风力发电工程质量控制原则

风电项目具备着极高的环境保护价值，在社会效益、经济效益方面也发挥着重要作用，总体来说，风力发电项目前景广阔，目前规模和数量都在增长。但是，在风力发电项目建设过程中，很多地区的建设条件有限，存在着诸多的质量影响因素，比如，地质地貌影响、水文活动等，这些都容易造成风力发电工程的质量影响^[3]。因此，在风力发电项目建设中，施工单位需要加大对施工过程的质量管控，从各细节入手，满足对工程质量管理问题的分析，减少质量风险，促进风力发电项目的顺利并网。为了有效

满足风力发电工程建设质量要求需要在施工过程中落实质量控制原则，风力发电工程建设质量与财产安全、发电效益等有着紧密联系，如果建设过程中出现质量问题，会影响到社会效益和经济效益的增长，建设企业也会面临着社会声誉下降的威胁，而且无法满足质量要求还会赢缩短风力发电建设项目的使用寿命，甚至会对施工人员的生命安全造成影响。因此，在施工过程中必须要坚持质量第一原则，结合工程项目质量管理要求，加大对施工过程的全面监管，降低工程施工中存在的技术问题、材料问题、设备问题等，业主、施工单位与监理单位紧密配合，减少工程施工中的风险发生，满足工程施工质量管理要求。

三、风电工程质量控制要点

（一）风机基础混凝土作业质量控制

1. 混凝土配置

风机基础施工是整个风电建设项目的基础环节，通常来说，在风机基础施工中会应用到大量的混凝土材料，为满足浇筑质量，必须要确保水泥质量符合要求，选用水化热性能合适的水泥提升混凝土浇筑的科学性，强化风机基础应用质量。在进行混凝土的材料配置过程中，工作人员需要根据工程量清单精准落实材料采购，提前进行水泥材料类型分析，加大对水泥材料质量的检验。材料必须要符合国家检验标准，并且配备国家质量检验合格证书，将合适的水泥材料运送到施工现场之后进行混凝土适配试验，从多个不同类型的水泥材料中选取质量性能最佳的水泥材料进行混凝土配置，在混凝土配置过程中，工作人员需要采用合适的搅拌装置，满足材料精准配比，严格参照数据，落实操作的规范化与合理化，降低材料应用过程中出现的质量偏差而影响混凝土浇筑质量^[4]。

2. 混凝土浇筑与振捣

在对混凝土进行浇筑时，普遍采用分层浇筑方式，每层混凝土浇筑中需要严格履行操作规程，参考混凝土原材料质量情况以及施工作业面的钢筋布置情况等进行分析，选择合适的浇筑厚度，通常来说在风机基础的混凝土浇筑过程中需要将浇筑厚度控制在40厘米以下。在混凝土浇筑过程中需要尽量避免天气影响，尤其是雨天，减少雨水冲刷给混凝土材料质量造成的影响，在混凝土浇筑作业之前，加大与气象部门之间的联系，掌握气象变化情况，减少天气因素给混凝土浇筑质量造成的破坏，在连续晴天的情况下，可以开展对混凝土的浇筑施工，浇筑作业需保持连续，而且要达到一次成型，一般要控制在14小时以下，在浇筑中不允许出现中断。在进行基础环外侧的混凝土浇筑中，需要针对浇筑方向进行控制，浇筑人员需要沿着基础环对称的方向进行浇筑作业，通过此种作业方式能够降低侧向应力，保障浇筑质量的提升。混凝土浇筑完成之后，需要利用振捣设备进行混凝土振捣工作，按照振捣顺序满足振捣工作的科学开展，如果在振捣过程中工作面较大，需要采用分区域振捣的施工方式，安排专业工作人员进行振捣作业，在后续的振捣工作中出现问题能够及时进行处理，也可以及时找到责任人，为满足振捣质量的提升，需

要强化振捣人员的质量与安全意识,明确振捣质量要求,避免在振捣过程中出现的漏振和过振。在振捣过程中,为了满足振捣要求,需要让模板与振捣棒保持一定间距,避免在振捣过程中出现对模板的碰撞,也减少与钢筋材料和周围管线的碰撞,确保风机基础混凝土浇筑工作的科学开展。

3. 混凝土养护

混凝土养护工作是提升混凝土浇筑质量的重要措施,在养护过程中,工作人员需要利用草席等进行混凝土作业面的覆盖,避免混凝土作业面受到阳光的长时间照射,减少开裂问题。在混凝土模板拆卸完成之后,工作人员需要及时保温措施以及养护剂的涂抹,确保混凝土工作面温度湿度等达到规定要求,如果出现过度保温的情况,工作人员需要及时打开保温材料,让混凝土工作面达到通风散热效果。完成混凝土浇筑工作后,应在十二小时内施工现场合适的位置设置观测点,每7天进行一次观测,了解混凝土结构的沉降状况,并针对获取的数据进行全面分析,通过计算公式了解风机基础的沉降量,一旦发现存在异常状况,立即根据前期施工各个阶段的状况,采取针对性的处理对策,避免风机基础产生不均匀沉降的问题^[5]。

(二) 风机吊装作业质量控制

1. 安装塔架

第一,在正式开始施工之前,要求工作人员提前对塔架的外观进行全面检查,一旦发现部分位置存在漆膜脱落或者灰尘,应立即进行相应的处理,利用密封胶对塔架的位置进行涂抹,起到防护作用。根据吊装的具体要求,施工企业需要提前开展相应的准备工作,在吊装过程中应注意不能够出现过大的动作,使用螺栓对塔架进行连接之前,需要提前对螺栓进行涂抹,当螺栓到达规定的力矩后,然后再进行塔架作业,吊装环节可以使用双机抬吊法,确保吊装的稳定性。第二,塔架安装过程中,必须严格按照标准的操作要求全面提升地脚螺栓的紧固性,首先工作人员需要将现场的杂物进行彻底清理,并对螺栓进行相应的调节,保证所有的螺栓处于同一水平面上。在下方彻底干净整洁后,然后再对螺栓螺孔进行调节,使用地脚螺栓进行固定,当吊绳在放松状态时,还需要相应的调整力矩,以保证施工的规范性。第三,工作人员需要根据施工要求,对塔架以及纵轴线的垂直度进行检

查,如果发现垂直度无法达到要求需要及时螺母调节,在检查完成之后,垂直度达到要求之后拧紧螺母,之后开展搭架的安装、螺栓紧固以及混凝土的二次浇注作业。

2. 组装风轮

设备组装需要在施工现场进行,工作人员需要在组装之前对风轮装置的组成进行性能检验,确保应用性能达到规定要求。在检验过程中,工作人员需要对各部位进行精准分析,确保组装部分不存在磨损、生锈等情况,只有达到要求才能进行设备的组装。施工现场应用到的叶片、油料、垫木等都需要进行吊装作业,将叶片置于轮毂之上,利用螺栓进行紧固,对安装角存在的误差进行精准控制,误差需控制在规定范围之内。在组装完成之后进行油脂的涂抹,然后落实风轮安装。

3. 安装机舱

正式开始机舱安装工作之前,工作人员也需要提前开启舱盖,对内部进行彻底检查,一旦发现存在污渍或者灰尘应立即进行清理,保证机舱内部干净整洁。检查过程中,如果发现机舱内部有部分位置存在松动的问题,特别是轮毂平盖板或者螺栓等位置,必须立即对其进行加固处理。在起吊之前,还需要做好起吊装置的调节工作,保证所有的位置均处于规范状态,能够满足机舱起吊工作的要求,尤其是在法兰上方的吊装,设备必须使用螺栓进行固定,然后再拆除吊绳。根据实际安装要求,做好液压油管以及偏航刹车的安装工作,连接位置必须做到精准全面提升安装质量,确保后续风力发电系统的安全稳定运行。

四、结束语

总而言之,风力发电项目是我国电力工程重点项目,为了满足风力发电质量要求,需要从各细节入手,加大对混凝土基础浇筑作业的控制,所有的吊装均需满足施工要求,在发生质量问题需及时进行处理,减少给后续施工造成的影响。同时,施工单位需要结合质量要求,落实合适的施工安排,加大对人员能力的培养,确保风力发电项目质量提升,促进风电并网的顺利实施,为我国的电力事业发展奠定基础。

参考文献

- [1] 雷政平. 风力发电工程质量控制要点探究 [J]. 工程技术研究, 2019, 4(03): 161-162.
- [2] 刘淑芳, 毋艳武. 风力发电工程质量控制要点浅谈 [J]. 建设监理, 2017, (11): 71-74.
- [3] 范玉玲. 风力发电工程中竣工档案的收集和整理探究 [J]. 工程技术研究, 2017, (08): 171-172.
- [4] 潘杰平. 风力发电工程成本管理与分析 [J]. 财经界, 2016, (18): 46-47.
- [5] 史俊, 梁永顺. 风力发电工程质量分析与控制研究探析 [J]. 科技创新与应用, 2012, (26): 25.

极端海况下海上风电场应急机制与预防策略

董文强

国家电投集团徐闻风力发电有限公司，广东 湛江 524000

DOI:10.61369/EPTSM.2025030020

摘 要： 随着海上风电场向深远海发展，其面临极端海况的风险日益增加。本文深入剖析极端海况对海上风电场的影响，包括强风、巨浪、风暴潮等引发的风机结构损伤、基础破坏、电气系统故障、海缆受损及运维困难等问题。从应急响应机制构建方面，阐述了监测预警系统的关键作用及多部门联动应急体系的组建方式；在灾害预防策略上，探讨了基于可靠性设计的风机选型、基础加固措施、电气系统防护手段、海缆保护方法及运维保障策略等。旨在为海上风电场应对极端海况提供全面、有效的应对方案，提升其安全性与可靠性。

关 键 词： 海上风电场；应急响应机制；灾害预防策略

Study on Emergency Response Mechanism and Disaster Prevention Strategy of Offshore Wind Farm under Extreme Sea Conditions

Dong Wenqiang

Xuwen Wind Power Co., LTD. State Power Investment Group, Zhanjiang, Guangdong 524000

Abstract： As offshore wind farms expand into deeper waters, the risks associated with extreme sea conditions are increasing. This paper delves into the impact of extreme sea conditions on offshore wind farms, including structural damage to turbines, foundation failure, electrical system malfunctions, cable damage, and operational challenges caused by strong winds, huge waves, and storm surges. In terms of emergency response mechanisms, it highlights the critical role of monitoring and early warning systems and the methods for establishing a multi-departmental coordinated emergency system. Regarding disaster prevention strategies, it explores reliability-based turbine selection, foundation reinforcement measures, electrical system protection techniques, cable protection methods, and operational support strategies. The aim is to provide comprehensive and effective solutions for offshore wind farms to cope with extreme sea conditions, thereby enhancing their safety and reliability.

Keywords： offshore wind farms; emergency response mechanisms; disaster prevention strategies

引言

在全球气候变化的大背景下，极端天气事件的发生频率和强度呈上升趋势，使得海上风电场面临的极端海况威胁日益严峻。因此，深入研究极端海况下海上风电场的应急响应机制与灾害预防策略，对于保障海上风电场的安全稳定运行、促进海上风电产业的可持续发展具有至关重要的现实意义。

一、极端海况对海上风电场的影响

（一）强风对风机的影响

当海上风电场遭遇强风时，风机叶片承受的气动载荷会急剧增加。超过设计风速的强风可能导致叶片产生过大的弯曲变形、疲劳损伤甚至断裂。例如，在某些强台风袭击下，部分海上风机叶片出现了严重的裂纹，甚至完全折断脱落，不仅使风机丧失发电能力，断裂的叶片还可能对周边设备和人员造成严重威胁。同

时，强风引起的强烈振动会对风机的塔筒、机舱等结构部件产生巨大的应力，长期累积可能导致塔筒倾斜、机舱连接部件松动等问题，严重影响风机的结构完整性和稳定性。

强风环境下，风机的控制系统需要快速、准确地做出响应，以调节风机的运行状态，确保其在安全范围内运行。然而，极端强风可能会超出控制系统的设计能力，导致控制信号异常、传感器故障等问题。此外，强风还可能导致电气设备的绝缘性能下降，引发短路、跳闸等故障，进一步影响风机控制系统的正常

运行。

（二）风暴潮对海上风电场的影响

风暴潮会使海平面急剧上升，对位于浅海区域的海上风电场构成严重的淹没风险。当风暴潮水位超过风机基础的设计高程时，风机的基础、塔筒底部以及海上升压站等设施将被海水淹没。海水的浸泡会腐蚀金属结构部件，损坏电气设备，导致短路、漏电等故障，使风机和升压站无法正常运行。而且，长时间的淹没还可能对基础的稳定性产生不利影响，增加基础下沉、倾斜的风险。风暴潮引起的强大水流和冲击力，可能导致海上风电场的一些设施发生移位。

（三）极端海况对电气系统的影响

1. 电气设备短路与故障

极端海况下的强风、暴雨、海水飞溅等因素，容易导致电气设备的绝缘性能下降。在一些海上风电场，曾因极端海况导致海上升压站内的开关柜、变压器等电气设备发生短路故障，造成整个风电场停电事故。

2. 电力传输中断

海缆作为海上风电场电力传输的关键通道，在极端海况下极易受到损坏。强风、巨浪可能使海缆受到过度的拉伸、弯曲和磨损，导致绝缘层破裂、导体断裂，从而引发电力传输中断。

3. 极端海况对运维的影响

极端海况下，海上风浪大、海况复杂，给运维船舶的航行和作业带来极大困难。高海况会使船舶颠簸剧烈，增加船员晕船的风险，影响船员的操作能力和工作效率。同时，强风、巨浪还可能导致船舶偏离预定航线，难以靠近风机进行维护作业。在一些恶劣海况下，运维船舶甚至无法出海，导致风电场的日常巡检、设备维修等工作无法按时进行，使故障设备得不到及时修复，进一步扩大损失。^[1]

二、海上风电场应急响应机制

（一）监测预警系统

1. 气象与海况监测设备

为了及时准确地掌握极端海况的信息，海上风电场应配备先进的气象与海况监测设备。在气象监测方面，可安装气象桅杆，上面配备风速仪、风向仪、气压计、温度计、湿度计等传感器，实时监测风电场区域的风速、风向、气压、温度、湿度等气象参数。此外，还可利用卫星遥感技术、气象雷达等获取更广泛区域的气象信息，对台风、强风暴等极端天气的路径、强度进行预测。^[2]

2. 数据传输与分析处理系统

监测设备获取的大量气象与海况数据，需要通过可靠的数据传输系统及时传输到风电场的监控中心。可采用无线通信技术，如 4G、5G 通信网络，以及卫星通信等方式，确保数据传输的稳定性和及时性。在监控中心，建立数据处理与分析系统，利用大数据分析、人工智能等技术对传输过来的数据进行实时分析处理。通过建立数学模型，对极端海况的发展趋势进行预测，提前发出预警信息，为海上风电场的应急决策提供科学依据。

3. 预警发布与响应流程

当监测分析系统预测到极端海况即将来临，且可能对海上风电场造成威胁时，应立即启动预警发布机制。预警信息应通过多种渠道及时传达给风电场的所有工作人员、相关管理部门以及周边可能受影响的单位和人员。预警信息应包括极端海况的类型、预计到达时间、强度、可能影响的范围等详细内容。

（二）应急指挥与协调机制

海上风电场的应急响应工作涉及多个部门和单位，需要建立有效的多部门联动与协调机制。风电场内部应成立由运行维护、安全管理、工程技术、物资供应等部门组成的应急救援小组，明确各小组的职责和任务，确保在应急响应过程中能够协同作战。与气象部门保持密切联系，及时获取准确的气象预报信息，为应急决策提供依据；与应急管理部门协作，争取外部救援力量和物资支持，共同应对重大突发事件。通过建立定期的沟通协调会议制度、联合演练机制等，加强各部门之间的协作配合，提高应急响应的整体效率。

在应急响应过程中，信息的及时、准确共享至关重要。建立完善的信息共享与沟通渠道，确保风电场内部各部门之间、风电场与外部相关部门之间能够实时传递信息。除了利用传统的电话、传真等通信方式外，还应充分利用现代信息技术，如建立应急管理信息平台，实现数据的实时共享和交互。通过该平台，应急指挥中心可以实时了解各应急救援小组的工作进展、现场设备设施的损坏情况、人员伤亡情况等信息；同时，各部门也能够及时获取应急指挥中心发布的指令和决策，以及外部相关部门提供的支持信息。

（三）应急救援资源储备与调配

1. 应急救援设备与物资储备

海上风电场应根据可能面临的极端海况风险，储备充足的应急救援设备与物资。在应急救援设备方面，应配备专业的海上救援船舶，船上配备先进的导航设备、通信设备、救生设备以及必要的维修工具和设备。同时，储备一定数量的直升机，用于在紧急情况下快速运送救援人员和物资，以及进行人员搜救。^[3]

在物资储备方面，应储备足够的救生衣、救生圈、灭火器、消防水带、应急照明设备、备用电源、电缆抢修材料、风机零部件等物资。此外，还应储备一定数量的食品、饮用水、药品等生活物资，以满足应急救援人员和被困人员的基本生活需求。应急救援设备与物资应定期进行检查、维护和更新，确保其处于良好的可用状态。^[4]

2. 应急救援人员培训与组织

应急救援人员应包括运行维护人员、安全管理人员、专业技术人员以及经过专业培训的海上救援人员等。对应急救援人员应定期进行培训，如海上救生、消防灭火、设备抢修、伤员急救等；同时，还应加强应急救援人员的安全意识教育和心理素质训练，提高其在紧急情况下的应对能力。^[5]

3. 资源调配机制与流程

制定科学合理的应急救援资源调配机制与流程，确保在极端海况发生时，应急救援资源能够得到及时、有效的调配。应急指

挥中心应根据现场的实际情况和救援需求，统一调配应急救援设备、物资和人员。在资源调配过程中，应遵循“先急后缓、保障重点”的原则，优先满足对保障人员生命安全和恢复风电场关键设备运行最为紧迫的需求。

建立资源调配的信息化管理系统，实时掌握应急救援资源的储备情况、使用情况和调配状态。通过该系统，应急指挥中心可以快速查询和调度所需的资源，提高资源调配的效率和准确性。同时，加强对资源调配过程的监督和管理，确保资源调配的公正、合理，避免资源浪费和滥用。

（四）应急预案制定与演练

定期组织应急演练是检验和提高海上风电场应急响应能力的重要手段。应急演练应模拟各种可能发生的极端海况场景，如台风、巨浪、风暴潮等，对应急预案的各个环节进行全面检验。在演练前，应制定详细的演练方案，明确演练目的、内容、流程、参与人员以及演练的组织与保障措施等。演练过程中，应注重实战性和真实性，尽可能模拟实际应急救援中的各种困难和挑战，如恶劣的海况、通信中断、设备故障等，锻炼应急救援人员的应对能力和团队协作能力。演练结束后，应及时对演练效果进行评估和总结，分析演练过程中存在的问题和不足之处，提出改进措施和建议，对应急预案和应急响应机制进行完善。通过不断地组织应急演练，提高海上风电场全体人员的应急意识和应急技能，确保在极端海况发生时能够迅速、有效地开展应急救援工作。^[6]

三、海上风电场灾害预防策略

（一）基于可靠性设计的风机选型与布局

合理的风机布局不仅能够提高风电场的发电效率，还能增强其应对极端海况的能力。在进行风机布局设计时，需要综合考虑风资源分布、海流情况、海底地形以及极端海况的影响。利用计算流体力学（CFD）等技术，模拟不同风机布局方案在不同风向、风速条件下的尾流效应，优化风机间距与排列方式。对于易受强风、巨浪冲击的区域，可适当增大风机间距，减少相邻风机在极端海况下的相互干扰与碰撞风险。同时，依据海流流向调整风机布局，降低海流对风机基础的冲刷作用，提高基础稳定性。^[7]

（二）风机基础加固与防护

针对不同的地质条件和极端海况特点，对风机基础结构进行优化设计。对于单桩基础，可通过增大桩径、增加桩长或采用变

参考文献

- [1] 舒萍. 丹麦拟建设世界最大海上风电场 [J]. 科技创新与品牌, 2011, (03): 86.
- [2] 毕亚雄, 沙先华, 秦海岩, 等. 海上风电场的“心脏”: 海上升压站 [J]. 科学世界, 2017, (12): 46.
- [3] 王伟伟. 海上风电建设施工基地规划及物料管理研究 [J]. 中国战略新兴产业, 2022, (21): 172-175.
- [4] 黄文庆, 马海栋. 我国海上风电场救助现状和展望 [J]. 航海, 2024, (04): 48-52.
- [5] 全球最大漂浮式海上风电场将投运 [J]. 风能, 2019, (11): 10.
- [6] 英国海上风电项目可实现“负补贴”运行 [J]. 中外能源, 2020, 25(12): 91-92.
- [7] 杜杰, 刘碧燕. 海上风电场智慧调度平台开发及应用 [J]. 风能, 2020, (10): 52-55.
- [8] 吉其荣, 陶阔, 张智杨. 海上风电场风机安装风险辨识及对策 [J]. 珠江水运, 2024, (21): 16-18. DOI: 10.14125/j.cnki.zjsy.2024.21.025.
- [9] 宝新能源强势进军海上风电 [J]. 电气制造, 2010, (05): 75.
- [10] 唐广银, 李红涛, 徐辉, 等. 海上风电场项目应建立全生命周期技术标准 [J]. 中国船检, 2016, (12): 95-97+118.

截面设计，提高基础的抗倾覆和抗水平位移能力。在桩周土体易受冲刷的区域，可设置防冲刷裙板或抛石防护，减少海浪、海流对基础周围土体的侵蚀。对于重力式基础，优化基础的形状和尺寸，增加基础的重量和稳定性，同时在基础表面设置防滑、防腐蚀涂层，延长基础的使用寿命。

导管架基础则可通过加强导管架的支撑结构，提高其在极端海况下的承载能力。采用有限元分析方法，对基础结构在不同荷载工况下的应力、应变分布进行计算，找出结构的薄弱环节，进行针对性的加强设计。此外，还可考虑采用新型基础结构形式，如浮式基础与固定式基础相结合的混合基础，提高风机在极端海况下的适应性和稳定性。

（三）电气系统防护与冗余设计

海上风电场的电气设备长期处于潮湿、盐雾、强风等恶劣环境中，极易受到损坏。因此，对电气设备应采取严格的防护措施。选用具有高防护等级（如 IP67 及以上）的电气设备，确保设备在潮湿、盐雾环境下仍能正常运行。对电气设备的外壳进行密封处理，防止海水、潮气侵入设备内部；在设备内部安装除湿装置，保持设备内部干燥。

为提高电气系统在极端海况下的可靠性，采用冗余设计理念。在关键电气设备和系统中设置备用设备或备用线路，当主设备或主线路出现故障时，备用设备或线路能够自动切换投入运行，保障风电场的正常供电。^[8]

（四）海缆保护与监测

建立完善的海缆监测系统，实时监测海缆的运行状态。采用分布式光纤传感技术，监测海缆的温度、应变等参数，及时发现海缆的异常情况，如局部过热、机械损伤等。通过海缆在线监测系统，将监测数据传输到监控中心，利用数据分析软件对数据进行处理和分析，预测海缆的故障风险。在海缆保护方面，在海缆路由上方设置明显的标识，如浮标、警示桩等，提醒过往船舶注意避让，防止船舶抛锚、拖网等行为对海缆造成损坏。在海缆易受外力破坏的区域，如靠近港口、航道的区域，可设置海缆保护区，限制船舶的航行和作业活动。^[9]

（五）运维保障策略

制定科学合理的运维计划，定期对风机、电气设备、海缆等设施进行巡检和维护。采用先进的检测技术，建立设备维护档案，记录设备的运行状态、维护情况、故障处理等信息，通过对这些数据的分析，掌握设备的性能变化规律，预测设备的使用寿命，提前制定设备更换和维修计划。^[10]

略谈输电线路智能无人机巡检及应用策略

任祥

中煤科工重庆设计研究院（集团）有限公司，重庆 400000

DOI:10.61369/EPTSM.2025030021

摘 要： 在当今科技迅猛发展的背景下，无人机智能巡检技术与输电线路现代化运维需求高度契合。该技术不仅显著提升了巡检效率并降低了运维成本，还为作业的可靠性提供了坚实保障。从推广规模和应用实践来看，无人机智能巡检在输电线路领域展现出显著的技术优势。其不仅能够精准识别线路故障，还通过采集高清图像和视频，为后续维护决策与运行管理提供了重要的数据支持，促进了线路管理从经验驱动向数据驱动的转型，提升了管理的科学性和规范化水平。本文系统梳理了无人机智能巡检在输电线路中的应用意义，探讨输电线路智能无人机巡检系统构成，并结合实际需求提出了输电线路中智能无人机巡检技术的应用策略方案，旨在推动相关技术的进一步发展和广泛应用。

关 键 词： 输电线路；无人机；智能巡检；应用

This Paper Briefly Discusses the Intelligent Uav Inspection and Application Strategy of Transmission Line

Ren Xiang

Chongqing Design and Research Institute (Group) Co., LTD., Chongqing 400000

Abstract： In the context of rapid technological advancements, drone-based intelligent inspection technology aligns well with the modernization and operation needs of power transmission lines. This technology not only significantly enhances inspection efficiency and reduces maintenance costs but also provides a solid foundation for operational reliability. From a promotional scale and practical application perspective, drone-based intelligent inspection has demonstrated significant technical advantages in the power transmission line sector. It can accurately identify line faults and, by collecting high-definition images and videos, provides crucial data support for subsequent maintenance decisions and operational management. This promotes the transition of line management from experience-driven to data-driven, enhancing the scientific and standardized levels of management. This article systematically reviews the significance of drone-based intelligent inspection in power transmission lines, explores the composition of intelligent drone inspection systems for power transmission lines, and proposes application strategies for intelligent drone inspection technology in power transmission lines based on actual needs, aiming to promote the further development and widespread application of related technologies.

Keywords： transmission line; UAV; intelligent inspection; application

前言

近年来，无人机技术发展迅猛，应用领域日益广泛，其中输电线路巡检尤为突出。传统的巡检方法多依赖人工攀爬杆塔，过程繁复且存在较高安全风险，且巡检效率和准确性常受限，容易导致漏检和误判。相比之下，智能无人机作为一种先进工具，弥补了人工巡检的诸多不足。凭借自主飞行能力、高效感知技术和远程数据采集，无人机显著提升了巡检的速度和准确度。在输电线路的专业巡检中，无人机不仅革新了作业流程，还促进了巡检体系向智能化和精细化转变，其价值主要体现在灵活的任务调度、精准的故障检测及直观的运维数据展示等方面。

一、输电线路智能无人机巡检的应用意义

在输电线路运维体系中引入基于无人机的智能巡检管理系

统，不仅在实际效能层面带来了显著提升，也体现出其深远的技术价值与战略意义。该系统通过部署无人机替代传统高空人工巡检作业，显著减少了人力成本与设备资源的消耗，尤其是在规

作者简介：任祥（1994.08-），男，汉族，重庆人，大学本科，助理工程师，输电线路。

高危操作方面展现出重要优势，有效降低了作业过程中的安全隐患与事故发生率。此外，系统融合了图像识别、遥感知与智能分析等多项前沿技术，能够对输电线路运行状态进行快速且精准的诊断，有助于及时发现潜在故障与结构性异常，从而为输电系统的安全稳定运行提供坚实支撑。这种实时监测的能力，让设备故障、植被侵限（像杂草覆盖、树木倾斜等）之类的问题能够被尽早发现并处理，不仅保证了供电的持续性，也有效降低了非计划停电的频率^[1]。另外，系统内置的路径规划与飞行控制算法，能够对巡检轨迹进行智能优化，从而提升作业效率和覆盖的全面性。借助这个智能平台，管理人员能够更高效地跟踪任务进度、深入分析数据，并依据分析结果制定科学的维护策略，进而全面提升运维效能和决策的精准度，进一步降低人为因素对线路运行安全造成的潜在威胁。

二、输电线路智能无人机巡检系统构成

本文提出的无人机智能巡检系统在技术架构上实现了多层次算力资源的有机整合，通过云计算、雾计算与边缘计算的协同联动，全面增强了人工智能在巡检任务中的实际应用效果，尤其是在状态感知、信息处理与分布式控制等方面展现出良好性能。系统功能布局合理，涵盖了自主路径规划、多机协调作业以及设备故障的智能识别等核心模块，整体运行效率与任务响应能力得到显著提升。

在架构体系中，云计算层可视为系统运行的决策中心，由主控服务器与区域级作业平台共同组成，具备高并发处理与灵活扩展的能力。该层主要负责关键任务的调度执行，包括航线智能生成、任务动态分配、数据深度分析及缺陷特征识别等。特别是在复杂输电场景下，云平台依托强大的数据整合与计算优势，不仅能够快速制定出最优巡检策略，还能结合以往故障记录与运行数据，提前识别可能存在的风险点，为系统的主动防控与精细化管理提供数据支撑和决策依据。

雾计算层依托无人机巡检装备的物理实体，可视为系统的“躯体”。其凭借高移动性与低延迟特性，高效实现图像传输、数据同步及状态监控等通信保障功能。当无人机在山区等信号薄弱区域作业时，雾计算层能通过边缘节点的本地缓存与实时转发，确保巡检影像的稳定传输，避免因网络延迟导致的决策滞后^[2]。

边缘层主要由无人机终端构成，扮演着系统“手足”的角色。借助边缘计算的本地化处理能力与高时效性优势，显著提升了无人机操控的精确度与灵活性，从而保障协同作业、目标追踪及精准定位等实际作业效能。例如在巡检高压线路时，边缘层可实时处理摄像头捕获的图像，快速识别绝缘子破损等缺陷，并同步调整飞行姿态以实现近距离精准观测。

在整个系统中，云计算、雾计算与边缘计算通过5G通信网络形成数据交互的闭环体系。三者既保持独立的计算逻辑，又在功能层面形成互补：云计算负责全局数据的深度挖掘与策略制定，雾计算承担动态数据的传输中继，边缘计算则专注于本地任务的实时响应。这种异构协同的作业模式，最终构建起兼具高效性与

可靠性的智能巡检体系^[3]。

三、输电线路智能无人机巡检技术的应用策略

（一）无人机自主巡检技术

在电力系统自主巡检作业里，无人机凭借高效灵活的优势，能从多个角度近距离拍摄输电线路导线的高清影像。这些影像中包含着丰富的特征信息，为精准识别导线上的各种缺陷，尤其是异物缠绕以及导线断股、散股等关键问题提供了重要支持。

无人机自主巡检识别导线缺陷的过程大致是这样的：首先，无人机围绕导线飞行，从不同方位和距离进行拍摄，确保能捕捉到导线的整体形态以及可能存在的附着物或损伤。接着，无人机可以贴近导线作业，获取高分辨率图像，让断股、散股等细微缺陷清晰地呈现出来。例如，远程集控巡检系统对输电线路基杆塔全方位、无死角远程自主巡视。无人机远程集控自主巡检没有视角盲区，精度达到了销钉级，可以“远程问诊”和智能测温分析，就像安装了“透视镜”的“千里眼”。随后，采集到的图像数据会传输到分析平台，该平台运用深度学习模型，比如经过优化的FasterR-CNN算法，对图像中的缺陷进行自动检测与分类。模型能够解析图像特征，识别异物在形状、尺寸、色泽和空间位置上的表现，以及断股散股的具体形态。模型输出的结果包括缺陷的类型、具体位置和预估的严重程度，为维护人员制定修复策略提供了依据^[4]。与此同时，识别出的缺陷信息会被系统记录下来，并反馈到维护管理系统中，用于持续追踪缺陷的状态变化，指导后续的维修作业。

可以看出，无人机技术的应用不仅大大提升了巡检工作的效率和安全性，其提供的高质量图像数据也有效降低了缺陷识别的难度，提高了判断的准确性。这对于保障电力系统的稳定运行、提升供电可靠性有着关键意义，同时也实现了对人力资源的有效节约和巡检成本的优化控制。

（二）无人机VR巡检技术

由于边缘物联代理在智能识别精度和应用场景上存在一定短板，输电线路运维工作中，面对系统判定的疑似异常图像与视频，工作人员仍需进行二次复核，以确认线路实际运行状况。在这一关键环节，VR技术为巡检工作带来了全新突破，基于5G网络构建的无人机VR巡检模式应运而生。具体实践中，需在无人机设备上加装360度全景摄像头，以此作为现场数据采集的核心装置。依托5G网络高速传输、大带宽承载、低时延响应和高精度定位的技术优势，运维人员能够在控制中心，通过专用巡检平台对无人机实施远程操控。同时，运维人员佩戴VR眼镜，5G网络将无人机实时采集的视频画面快速、稳定地传输至眼镜端。戴上VR设备后，运维人员仿若置身于巡检现场，可自由切换视角，全方位、无死角地查看输电线路每一处细节，相比传统巡检方式，这种身临其境的体验大幅提升了巡检工作的细致程度和覆盖范围，有效弥补了智能识别技术的不足。

（三）5G网联无人机云巡技术

在实际应用中，多架配备异构传感设备的无人机协同执行基

于5G网络的云端巡检任务，展现出良好的作业灵活性与响应效率。任务开展过程中，装载热成像仪的无人机首先对输电线路设备进行热异常探测，一旦发现温度分布异常，另一架搭载4K高清可见光镜头的无人机便迅速飞抵目标区域，开展针对性图像采集与细致排查。采集的视频资料通过5G网络实时传输至享飞云智能平台，运维人员借助实时画面进行远程研判，并通过图像截帧与注释工具标识故障杆塔的编号与具体坐标，快速定位异常部位，指导检修人员精准抵达目标点位开展维修。此流程有效验证了5G通信技术支撑下无人机系统在突发事件处理中的远程联动能力与现场响应效率。该巡检系统集成任务调度、远程指令执行、高分辨率图像回传与缺陷识别可视化等多项关键功能，依赖5G网络的高速率与低延时特性，保障图像传输时延控制在300毫秒以内，能够清晰呈现线路本体及周边结构中厘米级的轻微异常，为实时判断与风险识别提供稳定支撑。在整个作业过程中，高清图像通过5G网络传送到边缘节点后，由享飞云平台部署的深度学习模型自动进行识别与分析，系统生成结构化巡检报告并完成归档^[9]。以金具销钉缺失检测为例，系统可实现高精度识别并自动标注缺陷类型与位置。通过以算法识别为主、人工核验为辅的作业流程，单基杆塔的巡检时长大幅压缩，整体作业可在10分钟内高效完成，大幅提升了巡检自动化水平与响应速度。

（四）无人机机巢巡检技术

无人机巢作为一种具备自主航行与定位功能的设备，其现场部署通常依靠无人机运输来完成。该设备能够支持无人机自主起降，并通过无线信号对无人机的装载、转运及卸载全流程进行控制，从而实现无人机部署与操控的自动化运行。在输电线路巡检场景中，无人机巢的核心功能是为无人机提供标准化的起降平台，以此支撑自动化巡检流程的有序开展。通过在输电线路沿线多点位部署无人机巢，不仅能够实现对广阔输电区域的全面覆

盖，还能支持多点位同步巡检作业，大幅提升了巡检作业效率与系统运行可靠性。无人机自主智能巡检基于“机巢+平台+算法”的架构，将无人机巢安装在巡检线路附近可以执行输电线路精细化巡检、红外测温、应急特巡等任务。

机巢智慧巡检技术的应用主要体现在两个关键层面：首先，随着架空输电线路远程监控体系的完善，无人值守机巢与中央控制系统实现了深度集成，支持对无人机的远程精准调度和管理；其次，云端监控平台的建设不仅监控后台运行状态，还开放空域管理接口，构建了覆盖广泛的监管体系。这些技术搭载于续航时间超过50分钟、单次巡航距离至少35公里的无人机上。在巡检过程中，中央控制系统远程操作机巢，无人机配备的气象辅助设备可接收指令，自动启动并沿预设航线执行任务，最终准确返回机巢完成停靠。

此外，机巢控制系统集成了自动充电、数据传输与云端智能处理模块，实现了巡检数据的自动上传与后台实时分析，从而实现全流程自动化管理。通过“巢-巢”模式，机巢与后台平台紧密协作，无人机巡检过程智能高效，所有数据通过无线网络即时传输，确保了巡检信息的完整性与时效性。

四、结语

综合而言，智能无人机在输电线路巡检领域展现出强大的应用潜力和独特优势。凭借精准、高效的执行能力，以及自主飞行与远程控制的结合，这一技术正成为优化巡检流程的关键力量。随着无人机技术的持续升级和广泛应用，其在输电线路维护中的角色将更加重要，有助于提升线路的安全运行水平。该技术革新不仅加快了巡检节奏，更通过智能化手段强化了电网的稳定性，推动运维工作向高效、智能的方向迈进。

参考文献

- [1] 温新叶, 杨忠伟, 陈昌. 输电线路无人机智能巡检应用研究 [J]. 中国设备工程, 2021(23):31-32.
- [2] 史永伟. 智能化技术在电气自动化控制中的应用分析 [J]. 电子世界, 2021(16):63-64.
- [3] 周振华. 智能化技术在电气工程自动化控制中的应用分析 [J]. 中国设备工程, 2021(10):5-6.
- [4] 卢银均, 陈克勇, 姜金节, 刘闯, 邓德慧. 输电线路无人机智能精益化巡检技术应用 [J]. 黑龙江电力, 2021, 43(04):320-324+335.DOI:10.13625/j.cnki.hljep.2021.04.009.
- [5] 祝一帆, 王强, 项兴尧, 袁雪珺. 输电线路无人机智能巡检技术概述 [J]. 电气开关, 2021, 59(02):1-3+6.

熔盐传储热介质研究进展

卢昀坤, 张少杰, 代海玲, 唐彪, 雷志文
中国广核新能源控股有限公司, 北京 100160
DOI:10.61369/EPTSM.2025030002

摘 要： 熔盐储热技术是解决能源供需时空错配的关键，主要包括显热、潜热和化学储热三种形式。研究表明，硝酸盐（180–600℃）因导热性好、成本低已商业化应用；氯化盐（399–850℃）适合超临界发电但腐蚀性强；氟化盐（>454℃）高温稳定但成本高；碳酸盐（400–900℃）具有低腐蚀、高储热密度优势。通过复合改性和多元共晶设计可优化性能，但需进一步解决腐蚀、热稳定性和成本问题，以促进其在“双碳”目标下的规模化应用。

关 键 词： 熔盐介质；潜热储热；显热储热；储能技术

Research Progress on Molten Salt Heat Transfer and Storage Media

Lu Yunkun, Zhang Shaojie, Dai Hailing, Tang Biao, Lei Zhiwen
China General Nuclear Power New Energy Holdings Co., Ltd, Beijing 100160

Abstract： Molten salt thermal energy storage (TES) is a pivotal solution for addressing spatiotemporal mismatches in energy supply and demand, primarily categorized into sensible heat, latent heat, and thermochemical storage. Research indicates that nitrate salts (180 – 600 °C) are commercially viable due to their favorable thermal conductivity and low cost. Chloride salts (399 – 850 °C), suitable for supercritical power generation, face challenges due to high corrosivity. Fluoride salts (>454°C) exhibit excellent high-temperature stability but are hindered by high costs. Carbonate salts (400 – 900°C) offer advantages such as low corrosion and high energy storage density. Performance optimization can be achieved through composite modification and multicomponent eutectic design. However, critical issues—including corrosion resistance, thermal stability, and cost-effectiveness—must be further addressed to facilitate large-scale deployment in support of carbon peak and carbon neutrality goals.

Keywords： molten salt medium; latent heat storage; sensible heat storage; energy storage technology

随着全球经济的快速发展，化石能源的过度开采和使用已引发严重的环境问题和能源危机。为应对这一挑战，发展可再生能源和推进节能减排已成为国际共识^[1-3]。中国在《国务院关于加快建立健全绿色低碳循环发展经济体系的指导意见》中明确提出，要构建绿色低碳循环经济体系，力争在2030年前实现碳达峰，2060年前实现碳中和的目标。这一战略部署凸显了发展绿色能源的紧迫性和重要性。在能源转型过程中，储能技术发挥着关键作用。其中，储热技术因其能够有效解决热能供需时空不匹配的问题而备受关注^[4-6]。图1显示了当今能源之间转换的关系图^[7]。据统计，全球约90%的能源转换过程都涉及热能的传输和储存，但当前能源利用效率仍有较大提升空间。熔盐储热材料凭借其高储热密度、优异的热稳定性和宽泛的工作温度范围，在太阳能热发电、核能利用和工业余热回收等领域展现出巨大应用潜力。

本文系统梳理了熔盐储热技术的研究进展，重点分析了不同储热形式（显热、潜热和化学储热）的特点，比较了硝酸盐、氯化盐、氟化盐和碳酸盐等主要熔盐体系的性能优劣及适用温度范围。通过总结工程应用现状，探讨了熔盐储热技术在实现“双碳”目标中的关键作用和发展前景。研究表明，虽然熔盐储热技术已取得显著进展，但在材料腐蚀、热稳定性提升和成本控制等方面仍需进一步突破。

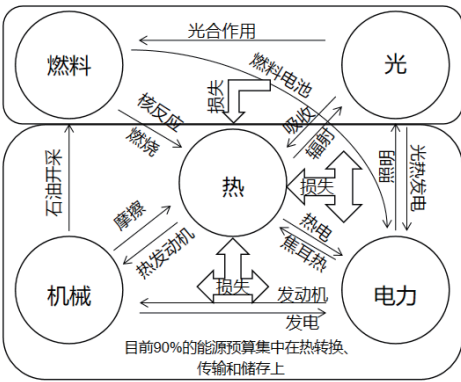


图1 能源之间的转换关系图

一、熔盐储热形式

（一）显热储热

熔盐显热储热基于温度变化时的比热容特性实现热能存储。当温度升高时，熔盐吸收并储存热量；温度降低时则释放热量。该过程仅依赖材料温度变化，不发生相变或化学反应^[8]。这种储热方式具有系统简单、运行可靠的特点，是目前应用最广泛的储热技术。

（二）潜热储热

熔盐潜热储热利用相变过程的能量转换实现高效储热。当材料发生相变（如固-液转变）时，会吸收或释放大量的相变潜热^[9]。这种储热方式的能量密度显著高于显热储热，其中固液相变最为常见，其单位质量储热量可达显热储热的5-10倍^[10]。

（三）化学储热

化学储热通过熔盐的可逆化学反应实现热能存储与释放，主要包括浓度差储热、化学吸附储热和化学反应储热三种形式^[11]。该技术具有储能密度高（可达1MJ/kg）、便于运输等优势，但存在反应条件苛刻、系统复杂、成本较高等技术瓶颈。目前仍处于实验室研究阶段，需进一步优化材料体系和反应工艺才能实现工程应用。

二、熔盐类型及应用温度

（一）硝酸盐

硝酸盐因其优异的应用温度、热传导性、流动性和低廉价格，成为熔盐储热材料的研究热点^[12]，研究表明，二元混合硝酸盐（如 NaNO_3 - KNO_3 质量比6:4）熔点稳定在227℃，分解温度达600℃，而三元Hitec熔盐（ NaNO_3 - KNO_3 - NaNO_2 ）熔点可低至142℃，适用温度180-500℃，但高温遇氧易分解，Peng、Bradshaw R.W等^[13-15]开发了多元混合熔盐，将熔点降至65-100℃，最高使用温度扩展至600℃。热稳定性测试表明， LiNO_3 - NaNO_3 - KNO_3 等体系在500℃以下稳定性良好，但 LiNO_3 在高温易分解。尽管硝酸盐储热性能优越，仍存在腐蚀性强、导热率不足及局部过热等问题，且高温蒸汽腐蚀制约其在高参数太阳能热发电中的应用，亟需开发新型高温熔盐材料以拓宽工作温度范围并提升环境兼容性。

（二）氯化物

氯化盐因其应用温度适合于超临界发电系统，同时结合高比热容、良好的热稳定性等优点，成为理想的下一代熔盐传热介质，吴玉庭等^[16]合成了 NaCl 、 KCl 和无水 MgCl_2 的高温熔盐介质对其热物性性能进行了验证，结果表明，当 MgCl_2 - NaCl - KCl 为2:7:1时，新型高温熔盐储热介质的相变温度为399.6℃，经过测试，该熔盐的热稳定性良好。孙李平等^[17]利用 NaCl 、 KCl 和 MgCl_2 配置了多种配比不同的混合氯化熔盐，熔点在400℃-465℃之间，研究结果表明当 MgCl_2 : NaCl : KCl 的质量比为2:7:1时，混合盐成本价格最低。但其自身较强的腐蚀性严重影响了其发展前景。邹立清^[139]对比了四元硝酸盐和四元氯化盐的腐蚀

性，并且得出氯化物的腐蚀程度远远大于硝酸盐，因此，寻找腐蚀性偏低，使用温度范围广泛的熔盐成为进一步研究的重点。

（三）氟化物

氟化盐（如 LiF 、 NaF 、 KF 等）具有高熔点、大相变焓及良好的金属相容性，是优秀的熔盐传热介质，适用于核电领域。美国橡树岭国家实验室开发的46.5% LiF -11.5% NaF -42% KF 混合氟化盐熔点为454℃，高温稳定性好且腐蚀性较低，美国Sandia国家实验室及自由号空间站（采用80.5% LiF -19.5% CaF_2 ）进一步优化了氟化盐的高温性能。然而，氟化盐存在明显缺陷：固液相变时体积变化剧烈（如 LiF 膨胀率达23%）、导热性差、成本高昂，且对健康和环境有害，制约其大规模应用。通过混合不同氟化盐可调节熔点范围，但需解决其热导率低和安全性问题以拓展实用前景。

（四）碳酸盐

碳酸盐具有腐蚀性低、储热密度大、成本低廉等优势，是理想的中高温相变储热材料。虽然单组分碳酸盐（如 Na_2CO_3 、 K_2CO_3 ）熔点普遍高于700℃，但通过多元混合可显著降低相变温度并拓宽适用温区。李月锋^[18]等开发的 Na_2CO_3 - Li_2CO_3 （6:4）二元盐相变潜热达365.5 J/g，在600℃以下稳定性良好；尹辉斌^[19]等基于 K_2CO_3 - Na_2CO_3 体系添加 NaCl 使相变温度降低133℃、潜热提升1.9倍，工作温度可达850℃；任楠等研究的 K_2CO_3 - Na_2CO_3 - Li_2CO_3 三元盐相变温度约400℃，分解温度达800-900℃，经热冲击测试证实850℃内稳定性优异。美国学者Petri等从热物性与经济性角度验证了碳酸盐的储热优势，而国内马重芳团队开发了百余种混合碳酸盐，其中程晓敏^[20]通过添加 Ba_2CO_3 / Sr_2CO_3 使 K_2CO_3 - Na_2CO_3 - Li_2CO_3 体系相变温度降至385-388℃。尽管碳酸盐性能突出，但因成本限制，研究多聚焦于 Na_2CO_3 / K_2CO_3 基混合体系。当前碳酸盐已实现400-900℃宽温域应用，但需进一步优化配比以平衡性能与成本，推动其在大规模储热系统中的商业化应用。

三、总结

随着全球能源危机与环境问题的日益严峻，发展绿色低碳能源技术已成为国际共识。熔盐储热技术作为解决热能时空不匹配问题的关键手段，在太阳能、核能及工业余热利用领域展现出巨大潜力。本文基于熔盐储热形式及常用熔盐进行汇总，得出以下结论：

1. 熔盐储热主要分为显热、潜热和化学储热三种形式：显热储热通过材料比热容变化实现，具有简单可靠的特点；潜热储热利用相变过程的高能量密度优势，其中固液相变最为常见；化学储热虽具有更高储能密度，但因技术复杂仍处于研究阶段。

2. 在各类熔盐材料中，硝酸盐因其优异的导热性、宽温域（180-600℃）和低成本成为研究热点， NaNO_3 - KNO_3 （6:4）等混合盐已实现商业化应用，但存在高温腐蚀和导热不足等瓶颈。氯化盐（如 MgCl_2 - NaCl - KCl 体系）凭借高比热容和399-850℃的工作温度适用于超临界发电，却因强腐蚀性限制发展。氟化盐

(如 LiF-NaF-KF) 具有 454℃ 以上高温稳定性和低腐蚀特性, 在核电领域表现突出; 碳酸盐则以其低腐蚀、高储热密度 (如 Na_2CO_3 - Li_2CO_3 潜热达 365.5J/g) 和成本优势成为中高温 (400-900℃) 储热优选, 通过多元混合可将熔点从 700℃ 以上降至 385℃, 但需平衡锂盐成本与性能。

3. 当前研究趋势显示, 通过复合改性和多元共晶设计可显著优化熔盐性能, 未来需重点解决材料腐蚀、热稳定性与成本效益等核心问题, 以推动熔盐储热技术在 "双碳" 目标下的规模化应用。

参考文献

- [1] Polkowski W, Sobczak N, Bruzda G, et al. Silicon-Boron Alloys as New Ultra-High Temperature Phase-Change Materials: Solid/Liquid State Interaction with the h-BN Composite[J]. Silicon, 2020, 12(7): 1639-1649.
- [2] BRADSHAW R W, BROSSEAU D. Low-melting point inorganic nitrates as heat transfer fluid: US7588694[P]. 2009-9-15.
- [3] GOODSSH, BRADSHAW R W. Corrosion of stainless steels and carbon steel by molten mixtures of commercial nitrates salts[J]. Journal of Materials Engineering & Performance, 2004, 13(1): 78-87.
- [4] 贺万玉, 闫全英. 熔融盐相变储热材料[J]. 材料导报, 2015(1): 128-130.
- [5] 吴会军, 朱冬生, 李军. 蓄热材料的研究进展[J]. 材料导报, 2005(8): 000096-98.
- [6] 葛志伟, 叶锋等. 中高温储热材料的研究现状与展望[J]. 储能科学与技术, 2012(02): 89-102.
- [7] 贺万玉, 闫全英. 熔融盐相变储热材料[J]. 材料导报: 纳米与新材料专辑, 2015(1): 128-130.
- [8] 李春鸿. 蓄热材料与化学反应[J]. 化学通报, 1983(3): 31-35.
- [9] 李云涛, 晏华, 汪宏涛. 膨胀石墨基复合相变材料的结构与性能研究[J]. 材料研究学报, 2016(30): 545-552.
- [10] Fan L, Khodadadi J M. Thermal conductivity enhancement of phase change materials for thermal energy storage: A review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011(15): 24-46.
- [11] 龚欣欣, 张元芳. 储热材料及其应用[J]. 科技创新与应用, 2014(34): 76-76.
- [12] 卢昀坤, 唐宪友, 尹航, 等. 光热电站熔盐介质应用现状[J]. 电力系统装备, 2023(1): 13-17.
- [13] 吴玉庭, 王涛, 马重芳. 二元混合硝酸盐的配制及性能[J]. 太阳能学报, 2012(1): 148-152.
- [14] Bradshaw R W, Siegel N P. Molten Nitrate Salt Development for Thermal Energy Storage in Parabolic Trough Solar Power Systems[J]. In: Proceedings of ES2008 Energy Sustainability 2008. Jacksonville, Florida USA, 2008: 55-67.
- [15] Glatzmaier G. Summary Report for Concentrating Solar Power Thermal Storage Workshop: New Concepts and Materials for Thermal Energy Storage and Heat-Transfer Fluids, May 20, 2011[J]. Office of Scientific & Technical Information Technical Reports, 2011, 8: 1-15.
- [16] 吴玉庭, 朱建坤, 张丽娜. 高温熔盐的制备及实验研究[J]. 北京工业大学学报, 2007(30): 62-66.
- [17] 孙李平, 吴玉庭, 马重芳. 太阳能高温蓄热熔盐优选的实验研究[J]. 太阳能学报, 2008(29): 1092-1095.
- [18] 李月峰, 张东. 高温相变材料 Li_2CO_3 - Na_2CO_3 循环热稳定性分析[J]. 储能科学与技术, 2013(4): 369-376.
- [19] 尹辉斌, 丁静, 杨晓西等. 碳酸熔盐传热蓄热材料的制备与热性能[J]. 工程热物理学报, 2016(34): 952-956.
- [20] 程晓敏, 陶冰梅, 朱闯. 四元碳酸盐相变储热材料的制备及热物性研究[J]. 化工新型材料, 2014(42): 49-51.

大能量灯泵浦双掺杂 YAG 脉冲激光器

余新海¹, 尹中亚^{2*}, 尹曰雷², 宋家豪², 秦瑞希³

1. 安徽理工大学 电气与信息工程学院, 安徽 淮南 232001

2. 合肥综合性国家科学中心能源研究院, 安徽省能源实验室, 安徽 合肥 230051

3. 电能高效高质转化全国重点实验室, 合肥工业大学, 安徽 合肥 230009

DOI:10.61369/EPTSM.2025030003

摘 要 : 实现焦耳级输出是脉冲激光器的发展趋势。搭建了一种焦耳级大能量灯泵浦双掺杂 YAG 脉冲激光器。该激光器采用双掺 Nd: Ce: YAG 晶体作为工作介质, 利用 Ce^{3+} 的能量吸收与转移机制提高泵浦光的利用效率。基于四能级系统的速率方程组, 推导出激光器的输出能量表达式。通过在谐振腔内引入伽利略式望远镜, 增大了基膜体积, 减小了光束发散角。在不同重复频率下, 实验测量了激光器的输出能量, 结果与理论模拟基本吻合。最终, 该激光器实现了重复频率为 10Hz、单脉冲能量为 30 J、峰值功率为 75 kW、平均功率为 300 W、光束发散角为 1.75mrad、光束参数乘积为 $1.75\text{mm} \cdot \text{mrad}$ 的激光输出。单脉冲激光成功打穿了 1 mm 厚度的金属板。

关 键 词 : 焦耳级; 大能量脉冲激光器; 灯泵浦; Nd: Ce: YAG; 望远镜

High-Energy Lamp Pumped Double-Doped YAG Pulsed Laser

Yu Xinhai¹, Yin Zhongya^{2*}, Yin Yuelei², Song Jiahao², Qin Ruixi³

1. Anhui University of Science and Technology College of Electrical and Information Engineering, Huainan, Anhui 232001

2. Energy Research Institute of Hefei Comprehensive National Science Center Anhui Energy Laboratory, Hefei, Anhui 230051

3. State Key Laboratory of High-Efficiency and High-Quality Conversion for Electric Power Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009

Abstract : Achieving joule-level output is the development trend for pulsed lasers. A joule-level high-energy lamp-pumped, dual-doped YAG pulsed laser has been developed. The laser uses a double-doped Nd: Ce: YAG crystal as the gain medium and improves the pump light utilization efficiency by utilizing the energy absorption and transfer mechanism of Ce^{3+} . Based on the rate equations of the four-level system, the output energy expression of the laser is derived. A Galileo-type telescope was introduced into the resonator to increase the base mirror volume and reduce the beam divergence angle. The output energy of the laser was measured at different repetition rates, and the experimental results were in good agreement with the theoretical simulation. Finally, the laser achieved a laser output with a repetition frequency of 10 Hz, a single-pulse energy of 30 J, a peak power of 75 kW, an average power of 300 W, a beam divergence angle of 1.75mrad, and a beam parameter product of $1.75\text{mm} \cdot \text{mrad}$. The single-pulse laser successfully perforated a 1 mm thick metal plate.

Keywords : joule-level; high-energy pulse laser; lamp pumping; Nd: Ce: YAG; telescope

大能量脉冲激光器凭借其高脉冲能量输出, 广泛应用于深度打孔、激光测距、激光清洗和表面改性处理等制造加工领域^[1-4]。目前该类激光器的发展趋势是实现几十焦耳和几百焦耳的高脉冲能量输出^[5]。尽管 LD 泵浦已成为国内外脉冲激光器的主要泵浦源, 但与灯泵浦相比, 采用 LD 泵浦的主振荡器输出能量通常仅为毫焦耳级, 需经过多级放大才能来实现焦耳级输出^[6]。此外, 基于闪光灯泵浦的自由振荡脉冲激光器可以在 10 μs 的振荡周期内实现超过 10^5 W 的泵浦功率, 成本仅为几千美元, 而若采用 LD 泵浦, 需要 $10^4 \sim 10^5$ 个二极管阵列, 总成本可达数十万美元^[7]。鉴于此, 灯泵浦激光器仍是满足大能量输出需求下的一种重要选择。

钕铝石榴石 (YAG) 是目前应用最广泛的激光工作物质之一^[8]。 Nd^{3+} 因具有较小的量子亏损、低激光阈值和较大的发射截面等优点, 使得 Nd: YAG 晶体在大能量脉冲激光器中得到广泛应用。文献 [9] 报道的高功率 Nd: YAG 脉冲激光器经抽运功率放大后, 输出能

项目信息: 高功率大能量钕灯泵浦脉冲激光器关键热管理技术研究, 项目编号: 2024KF004。

作者简介: 余新海 (2001.09-), 男, 汉族, 安徽六安人, 学历: 硕士研究生在读, 研究方向: 大能量固体脉冲激光器。

通讯作者: 尹中亚 (1996.01-), 男, 汉族, 安徽淮南人, 学历: 博士研究生在读, 研究方向: 大能量固体脉冲激光器, 邮箱: 17855337246@163.com。

量仅为 1.2 J。文献 [10] 报道的灯泵 6 根 Nd: YAG 的脉冲激光器, 尽管光束质量很高, 单光束发散角小于 1.7 mrad, 但经合束后输出能量仅为 1.53 J。文献 [11] 报道的高功率高光束质量灯泵脉冲 Nd: YAG 激光器, 单脉冲能量达到 10 J, 但光束发散角为 17 mrad, 光束参数乘积为 12.7 mm · mrad。目前, 常用的 Nd: YAG 晶体对短波长泵浦光的能量利用效率较低。为此, 文献 [12] 提出了双掺 Nd: Ce: YAG 晶体的方案。在该方案中, Nd³⁺ 不仅能够有效吸收泵浦光, 掺入的 Ce³⁺ 还能够吸收短波长的光。针对上述问题, 本文搭建了一种基于双掺 Nd: Ce: YAG 晶体的大能量灯泵脉冲激光器, 实现了单脉冲能量高达 30 J、光束发散角为 1.75 mrad、光束参数乘积为 1.75 mm · mrad 的激光输出。在实现大能量脉冲输出的同时, 仍保持了较高的光束质量。

一、理论分析

在 Nd: Ce: YAG 晶体介质的工作过程中, Ce³⁺ 与 Nd³⁺ 之间具有辐射能量转换和非辐射能量转换两个过程, 如图 1 所示^[13-15]。

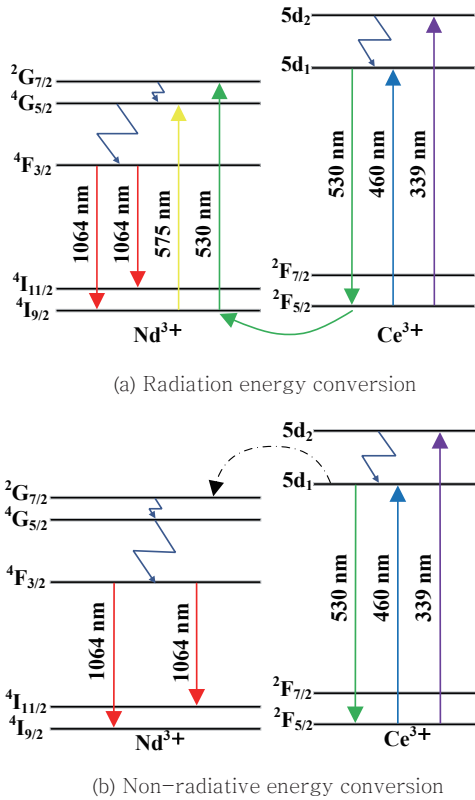


Fig.1 The energy conversion process between Ce³⁺ and Nd³⁺

图 1 Ce³⁺ 与 Nd³⁺ 之间能量转换过程

图 1(a) 为晶体中 Ce³⁺ 与 Nd³⁺ 之间辐射能量转换过程, 在 5d₂ 能级上的 Ce³⁺ 容易弛豫到 5d₁ 能级, 5d₁ 能级上的 Ce³⁺ 通过辐射能量跃迁至基态 ²F_{5/2}, 并发出 530 nm 附近的荧光, 而 Ce³⁺ 在该波段的荧光又恰好与 Nd³⁺ 的 ⁴I_{9/2} → ²G_{7/2} 的吸收带重合, 能量被 Nd³⁺ 吸收后继续产生能级跃迁, 发出 1064 nm 激光。图 1(b) 为晶体中 Ce³⁺ 与 Nd³⁺ 之间非辐射能量转换过程, 部分 Ce³⁺ 将能量转移给 ²G_{7/2} 能级上的 Nd³⁺, 受到激发的 Nd³⁺ 弛豫至 ⁴F_{3/2} 能级, 最后经过跃迁发出 1064 nm 激光。所以双掺杂 YAG 晶体对泵浦光的利用率更高。Nd: Ce: YAG 激光器是四能级系统, 通过简化脉冲激光器的速率方程组, 可以得到激光输出能量表达式^[16-17]。激光电源中储能电容充电后再放电给单根脉冲氙灯的电能为 E, 由氙灯外加电压 U_i、氙灯放电终止电压 U_e 及脉冲电源主电容量 C 决定, 而

氙灯的外加电压远大于其放电终止电压, 本文采用四氙灯泵浦, 则总输入氙灯的总电能为:

$$E_i = 4E = 2C(U_i^2 - U_e^2) \approx 2CU_i^2 \quad (1)$$

四能级系统中, 下能级无辐射跃迁到基态的粒子数密度 n₁ 可近似为零, 此时上能级粒子数密度 n₂ 就是反转粒子数密度 Δn。当跃迁时间 t 小于反转粒子数密度达到阈值的时间 T_{th} 时, 腔内光子数密度 φ 为零, 则上能级粒子数密度 n₂ 随 t 的变化为:

$$\frac{dn_2}{dt} = \frac{\alpha E_i}{Vh\nu_p T} - \frac{n_2}{\tau_2} = \frac{2CU_i^2 \alpha}{SLh\nu_p T} - \frac{n_2}{\tau_2} \quad (2)$$

其中: α 为泵浦到上能级粒子数所吸收的能量占输入能量的比例; V 为激活介质在光束截面内的体积; hν_p 为泵浦光子能量; α / Vhν_p 为单位能量泵浦到激光上能级的粒子数密度; T 是激光脉冲时间; S 为光束横截面积; L 为晶体长度; τ₂ 为激光上能级粒子数寿命。对 (2) 进行积分, 得

$$\int_0^{\Delta n_{th}} \frac{1}{\frac{2CU_i^2 \alpha}{SLh\nu_p T} - n_2} dn_2 = \int_0^{T_{th}} \frac{1}{\tau_2} dt \quad (3)$$

则反转粒子数密度 Δn 达到阈值 Δn_{th} 的时间 T_{th} 为:

$$T_{th} = -\tau_2 \ln\left(1 - \frac{SLh\nu_p \Delta n_{th} T}{2CU_i^2 \alpha \tau_2}\right) \quad (4)$$

当 t > T_{th} 时, 上能级粒子数密度 n₂ 和腔内光子数密度 φ 满足的速率方程为:

$$\begin{cases} \frac{dn_2}{dt} = \frac{2CU_i^2 \alpha}{SLh\nu_p T} - \Delta n \sigma c \phi - \frac{n_2}{\tau_2} \\ \frac{d\phi}{dt} = \Delta n \sigma c \phi - \frac{\phi}{\tau_R} \end{cases} \quad (5)$$

其中, c 为光在 YAG 晶体中的传播速度; σ 为粒子发射截面; 而腔内光子寿命 τ_R 为:

$$\tau_R = \frac{t_r}{\ln\left(\frac{1}{R}\right) + \gamma} \quad (6)$$

t_r 为光在晶体中往返一周的时间, t_r = 2L/c; R 为输出镜的反射率; γ 为腔内的损耗。将速率方程组 (5) 相加并积分得

$$\int_0^T d\phi + \int_{\Delta n}^{\Delta n_{th}} dn_2 = \int_{T_{th}}^T \frac{2CU_i^2 \alpha}{SLh\nu_p T} dt - \int_{T_{th}}^T \frac{\phi}{\tau_R} dt - \int_{T_{th}}^T \frac{n_2}{\tau_2} dt \quad (7)$$

由于自发辐射, 反转粒子数密度 Δn 近似于反转粒子数密度阈值 Δn_{th}, 再把 (6) 代入 (7) 可得

$$\int_{T_{th}}^T \varphi dt = \frac{2L \left(\frac{2CU_i^2 \alpha}{SLhv_p T} - \frac{\Delta n_{th}}{\tau_2} \right) (T - T_{th})}{c \left[\ln \left(\frac{1}{R} \right) + \gamma \right]} \quad (8)$$

而输出能量满足

$$E_o = \int_{T_{th}}^T P_o dt = \int_{T_{th}}^T \frac{Schv}{2} \varphi \ln \left(\frac{1}{R} \right) \quad (9)$$

将(4)和(8)代入(9)可得

$$E_o = \frac{\alpha v}{v_p} \left(2CU_i^2 - \frac{T}{\tau_2} \cdot \frac{SLhv_p \Delta n_{th}}{\alpha} \right) \left[1 + \frac{\tau_2}{T} \cdot \ln \left(1 - \frac{\tau_2}{T} \cdot \frac{SLhv_p \Delta n_{th}}{2CU_i^2 \alpha} \right) \right] \frac{\ln \left(\frac{1}{R} \right)}{\ln \left(\frac{1}{R} \right) + \gamma} \quad (10)$$

其中 v 是激光频率。对于长脉冲激光器, $T \gg \tau_2$ 。此时:

$$1 + \frac{\tau_2}{T} \cdot \ln \left(1 - \frac{\tau_2}{T} \cdot \frac{SLhv_p \Delta n_{th}}{2CU_i^2 \alpha} \right) \rightarrow 1 \quad (11)$$

反转粒子数密度阈值为

$$\Delta n_{th} = \frac{\ln \left(\frac{1}{R} \right) + \gamma}{2\sigma L} \quad (12)$$

将(11)和(12)代入(10)得激光输出能量表达式为:

$$E_o = \frac{\alpha v}{v_p} \left(2CU_i^2 - \frac{TSLv_p}{\alpha \tau_2} \cdot \frac{\ln \left(\frac{1}{R} \right) + \gamma}{2\sigma L} \right) \left[\frac{\ln \left(\frac{1}{R} \right)}{\ln \left(\frac{1}{R} \right) + \gamma} \right] \quad (13)$$

二、大能量脉冲激光器结构

大能量脉冲激光器主要由激光电源、激光聚光腔和激光谐振腔组成,如图2所示。

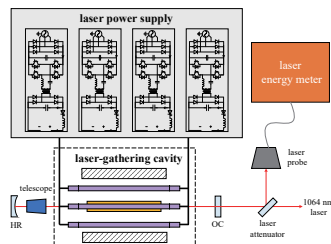


Fig.2 High energy pulse laser structure diagram

图2 大能量脉冲激光器结构图

激光电源系统主要由整流网络、充电网络和放电网络等组成,电源可实现1~10 Hz调频^[18],如图3所示。整流网络采用三相无控整流拓扑,由全桥整流二极管 D_{1-6} 把市电网提供的交流电整流滤波为直流电, C_1 是储能电容;充电网络采用串联LC谐振变换器拓扑,主要由开关器件 Q_{1-4} 、谐振电容 C_r 、谐振电感 L_r 、高频变压器 T 、全桥整流二极管 D_{7-10} 组成,在充电期间能够实现储能电容器的恒流充电并达到充电电压的预设值;放电网络选择晶闸管触发的LC放电电路,由储能电容 C_2 、功率晶闸管和放电电感 L 组成,可实现单次高脉冲电能输出。

激光聚光腔为氙灯与晶体之间提供良好耦合,决定着晶体上泵浦光的分布。传统上腔体的反射层采用玻璃或金属材料,但这类腔体往往导致泵浦光的不均匀分布。相比之下,陶瓷材料具有良好的化学稳定性、耐高温性和光漫反射特性等优点^[19]。本文采用了四氙灯泵浦单晶体棒的陶瓷聚光腔,如图4所示。外壳能够有效地保护反射层免受损坏;反射层具有高反射率,最大限度地确

保泵浦光能够作用于晶体棒上;石英层则起到隔离水流和透过光线的作用。

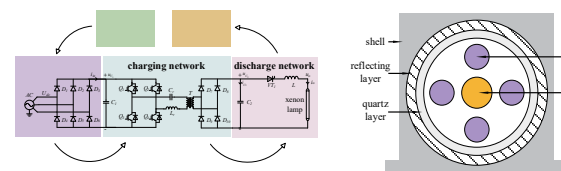


Fig.3 Laser power supply system

Fig.3 Laser condenser side view

图3 激光电源系统

图4 激光聚光腔侧视图

激光谐振腔采用望远镜型设计,如图5所示。具体而言,在腔内插入望远镜进行扩束,通过利用晶体棒边缘抑制高阶模的振荡,实现光束整形匹配。增大激活介质处的光斑大小,充分利用激活介质,降低光束发散角,提高光束质量^[20]。其中,HR为平凹高反射率球面镜,曲率半径为 R ; F_1 和 F_2 分别为焦距 f_1 的平凹透镜和焦距 f_2 的平凸透镜,它们构成了放大倍数为 M 的伽利略式望远镜;晶体棒的长度为165 mm,折射率为1.82;OC为平面耦合输出镜,透过率为 T 。使用reZonator软件进行模拟计算,分析高斯光束在谐振腔内传输过程。考虑到实际实验中光学元件占用的空间,对谐振腔内各光学元件的参数及间距进行了优化。最终取 $R=2000\text{mm}$, $L_1=80\text{mm}$, $F_1=-50\text{mm}$, $F_2=100\text{mm}$, $L_2=50\text{mm}$, $M=2$, $L_3=150\text{mm}$, $L_4=150\text{mm}$, T 为90%。平凹谐振腔和望远镜谐振腔内高斯光束变化如图6所示,激光晶体中心位于谐振腔内约360mm处。可以看出在腔内插入望远镜后,晶体棒中的基模体积明显增大。

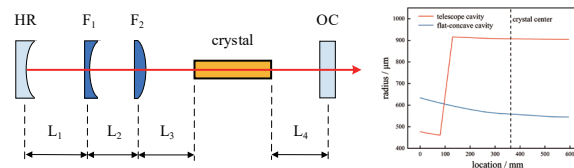


Fig.5 telescope resonator

Fig.6 Gaussian beam variation in the resonator

图5 望远镜谐振腔

图6 谐振腔内高斯光束变化

三、实验结果与分析

分别采用单掺Nd:YAG晶体和双掺Nd:Ce:YAG晶体作为工作物质,如图7所示。当电压设定为300 V,重复频率设定为1Hz时均未产生振荡,无激光输出。电压间隔设为10 V,逐步增压。当双掺Nd:Ce:YAG晶体作为工作物质时,在输入电压达到330 V时,能够检测到有微弱的激光输出,此时输出能量为0.044 J,因此可以确定双掺Nd:Ce:YAG激光器阈值电压约为330 V。相较之下,单掺Nd:YAG激光器的阈值电压约为400 V,此时输出能量为0.027 J。然后,设定初始电压为300 V,电压间隔为100 V,最大电压为1500 V,重复频率为1 Hz。在每个电压点上,均测量了多个单脉冲的能量并取平均值,以提高测量的准确性,实验结果如图8所示。可以看出,随着输入电压的增加,双掺Nd:Ce:YAG激光器输出的能量更高。当输入电压为1500 V时,双掺

Nd: Ce: YAG 激光器实现了单脉冲 30.46 J 的高能激光输出, 而单掺 Nd: YAG 激光器仅 18.72 J。



Fig.7 Nd : YAG (purple) and Nd : Ce : YAG (yellow)

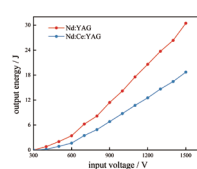


Fig.8 Output energy comparison

图7 Nd: YAG(紫)和Nd: Ce: YAG(黄)

图8 输出能量对比

随后, 测试了双掺 Nd: Ce: YAG 激光器在不同重复频率下测的激光输出能量, 结果如图9所示。在设定激光电源电压为 1500 V、重复频率为 10 Hz 的条件下, 激光器的输出单脉冲能量约为 30 J, 平均功率为 300 W, 峰值功率达到 75 kW (激光脉冲宽度约为 400 μ s)。由于在 1 Hz 到 10 Hz 的频率范围内, 热累积效应较小, 因此不同频率下输出能量近似相等。测试结果与模拟分析的趋势基本一致, 如图10所示。

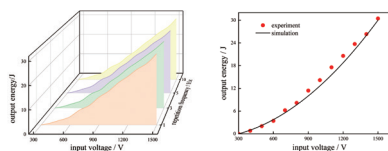


Fig.9 Output energy relationship diagram of double-doped YAG laser

Fig.10 The test results are compared with the simulation analysis

图9 双掺 YAG 激光器输出能量关系图

图10 测试结果与模拟分析对比

为了测试单脉冲激光的输出能力, 设置输入电压 1500V, 重复频率 1Hz。利用感光相纸成像法, 获取了距离激光输出镜面 0.1 m 和 2.1 m 的光斑图像, 如图11所示。图 A 和图 B 分别是采用平凹谐振腔时距离激光输出镜面 0.1 m 和 2.1 m 的光束光斑, 图 C 和图 D 是在谐振腔内插入望远镜后在该处的光斑图像。为使实验结果准确, 分别在两处获取多个光斑并取平均值。经计算可得未插入望远镜时光束发散角为 5.12mrad, 插入望远镜后光束发散角为 1.75mrad。可以看出插入望远镜后, 有效减小了激光光束发散角。在距离输出镜 0.1m 处放置焦距为 1m 的聚焦镜, 聚焦镜焦点处放置 1mm 厚钢板。如图12所示, 激光单脉冲打穿了钢板, 孔在 x 和 y 方向的长度均小于 2mm。则激光束腰半径近似为 1mm, 光束参数乘积约为 1.75mm \cdot mrad。此方法测算的结果较真值大, 实际真值要优于此结果。

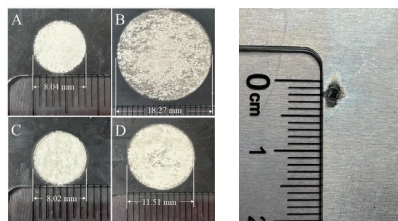


Fig.11 The laser spots are 0.1 m and 2.1 m away from the output mirror Fig.12 Laser focus strikes steel plate 1m away

图11 距离输出镜0.1m和2.1m 激光光斑;

图12 激光聚焦打击1m 远处钢板

四、结论

本文搭建了一种大能量灯泵浦双掺 Nd: Ce: YAG 脉冲激光器。通过理论分析与实验研究相结合, 验证了双掺 Nd: Ce: YAG 晶体的优势。激光器的输出能量从单掺 Nd: YAG 晶体的 18.72 J 提高至双掺 Nd: Ce: YAG 晶体的 30.46 J。通过在谐振腔中引入望远镜以增大基膜体积, 将光束发散角由平凹谐振腔的 5.12mrad 减小至望远镜谐振腔的 1.75mrad。最终, 在 10 Hz 重复频率下, 激光器实现了单脉冲能量 30 J、峰值功率 75 kW、平均功率 300 W 及光束参数乘积 1.75mm \cdot mrad 的输出性能。此外, 本文所搭建的激光器还能够为放大级激光器提供稳定的能量脉冲种子光源。未来的研究将以此激光器为主振荡级, 通过增加放大级进一步提升激光器的输出能量至百焦级。

参考文献

- [1] Mishra YK, Gupta SK, Mishra S, et al. Laser beam drilling of fiber reinforced composites using Nd: YAG and CO₂ Laser: A review [J]. Materials Today: Proceedings, 2023.
- [2] 杨照航, 周子涵, 王志敏, 等. 大能量短脉冲 Nd: YAG 激光 [J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(9): 327-331.
- [3] 郭斌, 徐杰, 苏轩. 大能量高重复脉冲激光智能清洗技术与装备 (特邀) [J]. 红外与激光工程, 2023, 52(2): 16-19.
- [4] LU W, Q., LIU Y, J., WU X., et al. Corrosion and passivation behavior of Ti-6Al-4V surface treated with high-energy pulsed laser: A comparative study of cast and 3D-printed specimens in a NaCl solution [J]. Surface & Coatings Technology, 2023, 470.
- [5] GARANIN S. G., DERKACH V. N., MAKAROV K. N., et al. Current Trends in the Creation of High-Energy Repetitively Pulsed Continuous Wave Lasers [J]. Doklady. Physics, 2023, 68(12): 401-409.
- [6] 王运谦, 秘国江, 杜涛, 等. 高峰值功率大能量 Nd: YAG 激光器 [J]. 激光与红外, 2003, 33(3): 188-189, 191.
- [7] 杜秀兰, 吴峰. 固体激光器的灯泵浦和二极管泵浦方式比较 [J]. 应用光学, 2004, 25(3): 37-40.
- [8] 赵呈春, 李善明, 徐民, 等. 激光晶体研究进展 [J]. 中国激光, 2024, 51(11): 379-404.
- [9] 汪超, 韦辉, 周丽, 等. 10Hz, 1.2J 脉冲波形近方波的纳秒 Nd: YAG 激光器 [J]. 中国激光, 2017, 44(8): 60-66.
- [10] WANG W., YANGS., ZHAO Q., et al. Electro-optical Q-switched laser array with one lamp pumping six Nd: YAG rods for programmable laser reconstruction in space-power-timed domains [J]. Optics & Laser Technology, 2024, 179.
- [11] 王宝华, 李强, 姜梦华, 等. 高功率高光束质量脉冲 Nd: YAG 激光器 [J]. 强激光与粒子束, 2009, 21(5): 663-666.
- [12] 赵振宇, 聂松松, 秦树军. 双掺 Nd: Ce: YAG 晶体激光输出特性 [J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(4): 911-914.
- [13] T. SAIKI, T. IWASHITA, J. SAKAMOTO, et al. Rod-Type Ce/Cr/Nd: YAG Ceramic Lasers with White-Light Pump Source [J]. International Journal of Optics, 2022, 2022(Pt.1): 8480676-1-8480676-10.
- [14] 张佳, 赵长明, 蔡子韬, 等. Nd: YAG、Cr: Nd: YAG 及 Ce: Nd: YAG 在太阳光泵浦下的光谱匹配研究 [J]. 中国激光, 2023, 50(13): 1-8.
- [15] TAI Y, PING, ZHENG, GUO J, UN, WANG, HUI, et al. Near-infrared quantum cutting of Ce³⁺-Nd³⁺-co-doped Y₃Al₅O₁₂ crystal for crystalline silicon solar cells [J]. Journal of Photochemistry and Photobiology, A Chemistry, 2015, 303/304: 80-85.
- [16] 王伶俐, 赵友全, 翟瑞伟, 等. 基于光斑成像的脉冲氙灯发光特性分析 [J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(6): 122-128.
- [17] 张行愚, 赵圣之, 王青圃. 固体脉冲激光器输出能量的普遍表达式 [J]. 光电子. 激光, 1999, 10(5): 408-410.
- [18] 李贺龙, 徐健, 杨之青, 等. 大功率高能脉冲激光电源设计 [J]. 强激光与粒子束, 2024, 36(5): 56-61.
- [19] 李仁兴, 施江澜. 陶瓷材料应用于激光聚光腔的实验研制 [J]. 激光与红外, 2005, 35(5): 338-340.
- [20] 李雪鹏, 杨晶, 筵兴伟, 等. 百瓦级近衍射极限 VCSEL 泵浦激光器 [J]. 强激光与粒子束, 2022, 34(8): 23-28.

港口起重机自动化远程监控与故障诊断系统设计

宋浩

青岛海西重机有限责任公司, 山东 青岛 266000

DOI:10.61369/EPTSM.2025030004

摘 要： 本文探讨港口起重机自动化远程监控与故障诊断系统的设计原则与策略。该系统融合多源数据采集、智能算法分析与分层架构设计，实现设备状态实时监测、故障预判与精准诊断。系统赋能高效作业调度，筑牢安全管控防线，遵循可靠性优先、兼容开放性 & 数据安全保护原则，为港口智能化转型提供技术支撑，显著提升设备维护效率与运行安全性。

关 键 词： 港口；起重机；自动化监控；自动化故障诊断

Design of Automatic Remote Monitoring and Fault Diagnosis System for Port Crane

Song Hao

Qingdao Haixi Heavy Machinery Co., LTD., Qingdao, Shandong 266000

Abstract： This paper explores the design principles and strategies for an automated remote monitoring and fault diagnosis system for port cranes. The system integrates multi-source data collection, intelligent algorithm analysis, and hierarchical architecture design to achieve real-time equipment status monitoring, predictive fault detection, and precise diagnosis. It empowers efficient operation scheduling, strengthens safety control, and adheres to the principles of reliability first, compatibility and openness, and data security protection. This provides technical support for the intelligent transformation of ports, significantly enhancing equipment maintenance efficiency and operational safety.

Keywords： port; crane; automatic monitoring; automatic fault diagnosis

引言

港口起重机作为现代港口装卸作业核心设备，其运行状态直接影响港口整体效能与安全。传统设备管理模式依赖人工巡检与经验判断，面对日益复杂的港机设备与高强度作业需求，已显滞后。数字化浪潮推动港口向智能化方向发展，自动化远程监控与故障诊断系统应运而生。该系统整合传感测量、数据传输、智能分析等技术，构建起全方位设备健康管理体系，突破时空限制实现设备状态感知与风险预判。在港口作业日趋精细化背景下，深入研究自动化监控诊断技术具有重要理论意义与实践价值，为港口装备管理模式变革提供技术引领。

一、港口起重机自动化远程监控与故障诊断系统的价值

（一）赋能高效作业调度

自动化远程监控与故障诊断系统在港口起重机作业调度方面展现出显著价值。该系统实现了设备运行状态的实时监测，使调度中心能够获取完整且动态的设备性能画像，为精确调度决策奠定基础。故障诊断模块则依托智能算法分析运行数据，预判潜在故障风险，促使调度系统在问题发生前主动调整作业计划，有效降低突发停机引起的调度混乱。港机设备健康状态量化评估机制使调度人员得以根据设备实际能力分配任务，避免因设备超负荷运转导致的效率损失。系统还构建了设备间协同作业的数字化映

射，对复杂作业流程进行优化计算，生成最佳调度方案。远程监控技术突破了传统调度信息不对称的限制，提高了决策的准确性与时效性。集成的数据分析平台将设备工况、作业环境与任务需求纳入统一评估框架，实现资源精准匹配与动态调整。值得注意的是，系统建立的设备历史性能数据库为调度策略迭代优化提供科学依据，使调度模式从经验驱动逐步向数据驱动转变，形成自我学习与持续改进的良性循环，从根本上提升港口作业的整体效能与经济性^[1]。

（二）筑牢安全管控防线

港口起重机自动化远程监控与故障诊断系统在安全管控层面构建了坚实防线，形成了全域覆盖、全时段保障的安全闭环体系。该系统借助精密传感器网络实时捕获设备运行参数，依托智

作者简介：宋浩（1997.01-），男，汉族，山东青岛人，学历：本科，职称：助理工程师，工作领域：港口起重机。

能算法对异常状态进行精准识别，在风险萌芽阶段即予以警示。安全管控防线的构筑体现在多维度协同——设备层面实现状态量实时监测，确保超限运行得到即时干预；系统层面建立预警机制，将风险事件分级分类处置；管理层面构建设备健康档案，推动安全管理由被动响应向主动预防转变。港口起重机作为大型高危机械，其安全管控尤为关键，远程监控与故障诊断系统打破了传统人工巡检在时间与空间上的局限，赋予安全管控以新的技术手段。基于大数据分析的故障预测模型使潜在风险可视化，防控措施更具针对性，从根本上消除了安全隐患。安全防线的筑牢并非单纯技术堆砌，而是设备状态感知、风险预警研判、安全处置联动三位一体的系统工程，为港口作业提供了全方位保护，最终实现了安全防线从点状监控到网格化防护的质变^[2]。

二、港口起重机自动化远程监控与故障诊断系统设计原则

（一）坚持可靠性优先原则

港口起重机自动化远程监控与故障诊断系统的设计必须将可靠性置于核心位置。可靠性优先意味着系统在各种工况环境下均能保持稳定运行，确保监控数据采集与传输的连续性 & 准确性。该原则要求系统架构采用冗余备份机制，关键环节设置故障安全模式，监测参数选取具有代表性 & 全面性。设备端数据采集模块应具备抗干扰能力，信号传输链路需配置多路径冗余方案，服务器端则应部署分布式存储与计算框架。诊断算法设计应注重稳健性，面对噪声与异常数据时依然能够作出准确判断。可靠性评估贯穿系统全生命周期，从初期设计到实际部署再到运行维护各阶段均需严格把控。港口特殊的海洋环境 & 高强度作业特点决定了系统必须具备极高的环境适应性 & 长期稳定性，因此可靠性不仅是技术指标，更是系统设计的根本哲学。

（二）遵循兼容性与开放性原则

港口起重机自动化远程监控与故障诊断系统设计环节中，兼容性与开放性原则构成了系统长远发展的根基。现代港口作业环境下，各类起重设备技术体系各异，厂商间产品规格差异明显，监控诊断系统因而须具备跨平台适应特性，与多元设备建立稳定连接。系统构架宜采用模块分解理念，硬件接口实行标准化处理，软件结构落实分层设计方法，保障新设备引入时整体运行稳定性。开放性特质体现于系统边界的包容性上，技术路线应选择行业认可的通信规范，预留充足扩展空间，使系统保有持续演化能力。数据结构需契合行业标准规范，信息交互机制执行统一准则，促成与港口管理系统的高效联通。诊断平台应为外部功能模块提供规范化接入途径，支持应用的多维拓展。秉持兼容与开放设计理念，使自动化监控诊断技术在设备更迭环境中展现持久价值，全面提升港口智能化运营水平，推动设备维护工作向精细化管理方向发展^[3]。

（三）落实数据安全与隐私保护原则

数据安全与隐私保护在港口起重机自动化远程监控与故障诊断系统中占据核心地位，构成系统稳定运行的基石。完善的数据

安全架构需建立多层次防御体系，将加密技术融入数据传输全流程，确保敏感信息免受非授权访问威胁。端到端加密方案保障数据在采集、传输、存储、处理各环节维持安全状态。差异化访问权限管理机制为各级工作人员分配适当权限，实现精细化控制。敏感数据匿名化处理消除个人标识特征，在保留数据分析价值同时降低隐私泄露风险。定期安全审计与风险评估能够发现潜在漏洞，提前部署补救措施。系统设计遵循最小数据收集原则，仅采集必要信息，减少潜在风险面。区分核心数据与边缘数据，采取级别化保护策略，平衡安全投入与保护效果。数据生命周期管理确保过期数据安全销毁，避免残留信息带来安全隐患。安全响应预案明确突发事件处理流程，缩短应对时间。合规性设计满足行业规范与法律要求，为系统长期稳定运行奠定基础^[4]。

三、港口起重机自动化远程监控与故障诊断系统设计策略

（一）构建分层式技术架构策略

图（一）分层式技术架构



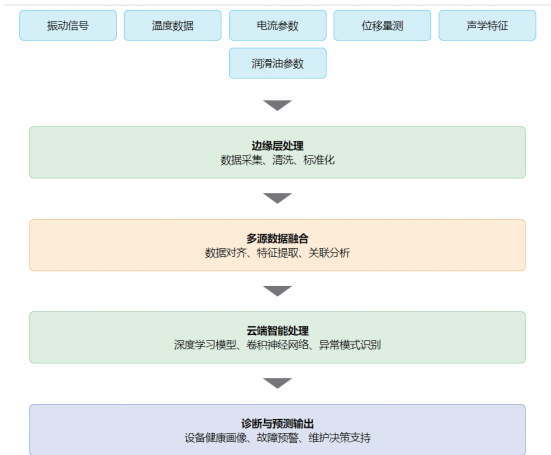
分层式技术架构在港口起重机自动化远程监控与故障诊断系统中扮演着关键角色，其核心理念是将复杂系统依功能划分为相互独立又紧密协作的层级结构。此类架构典型地包含感知层、网络传输层、数据层、应用服务层及用户交互层五大部分。感知层负责将物理设备运行参数数字化；网络传输层确保数据高效可靠流转；数据层执行信息清洗、融合与存储；应用服务层承载监控逻辑与故障诊断算法；用户交互层则实现人机信息交换。各层级间以标准化接口连接，实现功能解耦与模块独立，使系统具备更强韧的抗干扰性与演进潜力。这种层级化设计理念赋予系统良好的容错能力，单点故障影响范围有限，同时支持异构技术集成，满足港口作业环境苛刻性与多变性的需求^[5]。

例如，企业可以在重型港口起重机群监控系统中实施五层分离式架构。感知层部署高精度振动传感器、角度编码器、应变片等设备，持续捕获设备运动状态与健康指标。网络传输层借助工业以太网结合5G技术构建冗余通信网络，解决恶劣天气与电磁干扰问题。数据层在塔式起重机底部安装边缘计算单元进行就地分析，减轻主数据中心负载，提升时间敏感型数据处理效率。应用服务层集成专家知识库与机器学习算法，识别复杂故障

模式，预判设备劣化趋势。用户交互层则为调度员提供三维可视化界面，呈现起重机群实时工况。某沿海集装箱码头引入此架构后，设备故障预判窗口期从小时级延长至天级，系统响应速度达毫秒级别，年均计划外停机时间显著缩减，装卸作业效率与设备寿命双双提升^[6]。

（二）实施多源数据融合与智能处理

图（二）港口起重机多源数据融合与智能处理架构



多源数据融合与智能处理在港口起重机自动化远程监控体系中占据核心地位。该技术架构融合振动信号、温度数据、电流参数、位移量测等多维度信息，构建起全方位的设备健康画像。智能数据处理则依托高级算法对采集信息进行深度挖掘，实现异常模式精准识别^[7]。数据融合策略需在边缘层完成初步清洗与标准化，再于云端执行高阶分析，形成闭环诊断链路。此类系统设计应重视数据质量保障机制，建立严格的异常值筛选标准，确保融

合后信息能真实反映设备状态。深度学习模型在此基础上可挖掘设备运行规律，预测性地发现潜在故障点，大幅缩短诊断周期^[8]。

（三）开发模块化功能组件

模块化功能组件开发是港口起重机自动化远程监控与故障诊断系统构建的核心策略。模块化设计将复杂系统分解为独立且可替换的功能单元，每个模块承担特定职责，具备清晰定义的输入输出接口^[9]。这种架构理念赋予系统高度灵活性与扩展性，使特定功能可独立升级或替换，无需重构整体框架。模块间保持低耦合高内聚特性，有效提升系统稳定性，局部故障不会引发连锁反应导致系统崩溃。标准化接口定义确保模块间信息交换顺畅，为功能演进预留充分空间。设计时应遵循单一职责原则，为每个模块划定明确边界，保证内部逻辑自洽，外部调用简明扼要，实现系统整体协调与局部自治的平衡^[10]。

四、结语

港口起重机自动化远程监控与故障诊断系统设计是一项系统工程，需统筹考量技术可行性与实用价值。本文提出的分层架构、多源数据融合与模块化组件开发策略，为港机智能监控系统构建提供了技术路径。该系统实现由被动维修向主动预防转变，打破传统维护模式局限，赋予设备管理数字化、智能化特质。随着边缘计算、人工智能等技术持续发展，港口起重机监控诊断技术将向更精准、更高效方向演进，进一步提升港口作业安全性与经济性，助力港口走向全面智慧运营。当前技术条件下，推动监控诊断系统实际应用是行业发展的必然趋势，将为港口安全高效运行奠定坚实基础。

参考文献

[1] 张明. 机械自动化技术在港口起重机机械制造中的应用研究 [J]. 模具制造, 2024, 24(11): 201-203.
[2] 钟伟杰, 陈建甫, 刘科雷. 自动化港口起重机技术分析及常用检验方法 [J]. 建设机械技术与管理, 2024, 37(05): 50-53.
[3] 曾钦坚, 王文龙, 全晓军. 门座起重机自动化在港口的应用 [J]. 现代食品, 2023, 29(19): 17-20.
[4] 杨洋洋, 吴平平, 张科昌. 港口自动化起重机传动机构在线监测系统 [J]. 港口装卸, 2021, (05): 43-46.
[5] 赵德龙, 刘建波, 王桂军, 等. 港口起重机箱形梁隔板加强筋自动化焊接工艺 [J]. 起重运输机械, 2019, (06): 59-62.
[6] 王大荣, 任京, 胡佃秋, 等. 大数据驱动的港口堆场及起重机运行状态监测平台研究 [J]. 港口装卸, 2024, (02): 26-29.
[7] 杨振辉, 吴丛铭, 何永康, 等. 港口起重机低表面长效防腐研究 [J]. 港口装卸, 2024, (01): 15-17.
[8] 陈操, 杨希成. 基于中控去中心化的港口起重机分布式远控系统 [J]. 港口装卸, 2024, (01): 53-56.
[9] 孟庆国. 起重机自动化控制关键技术与实现 [J]. 起重运输机械, 2023, (17): 10-11.
[10] 范永昌, 张铠恺. 门座起重机半自动化控制系统 [J]. 港口装卸, 2023, (04): 53-54+64.

漏电保护技术在建筑电气工程施工中的应用分析

王璐

北京德博恒泰信息科技服务有限公司, 北京 100070

DOI:10.61369/EPTSM.2025030009

摘 要： 建筑电气施工中的漏电保护技术是保障现场用电安全与工程质量的重要环节，也是推进建筑智能化与规范化管理的基础。本文围绕施工阶段漏电防控隐患、规范装置选型与配置智能监测系统以及维护巡检机制等方面展开分析，提出针对性实施策略。结合现场实践数据，总结出一套覆盖全过程的技术体系，能够有效提升漏电防护水平，从而提升建筑工程的用电安全性。

关 键 词： 漏电保护；建筑电气工程；施工技术；电气安全

Application Analysis of Leakage Protection Technology in Building Electrical Engineering Construction

Wang Lu

Beijing Debohentai Information Technology Service Co., Ltd., Beijing 100070

Abstract： The leakage protection technology in building electrical construction is an important link to ensure the safety of on-site electricity consumption and engineering quality, and it is also the basis to promote intelligent and standardized management of buildings. This paper analyzes the hidden dangers of leakage prevention and control in the construction stage, standardizes the selection and configuration of intelligent monitoring system and maintains the inspection mechanism, and puts forward targeted implementation strategies. Combined with the field practice data, a set of technical system covering the whole process is summarized, which can effectively improve the level of leakage protection, thus improving the safety of electricity consumption in construction projects.

Keywords： leakage protection; building electrical engineering; construction technology; electrical safety

引言

《建筑业发展“十四五”规划》指出，要加快推进建筑产业现代化，提升工程安全管理水平，强化建筑施工全过程风险防控机制。文件明确提出，要全面提升电气安装质量与安全性能，推动智能监测设备在施工现场的应用，健全用电安全技术标准体系，完善施工现场电气隐患排查、预警以及处置闭环管理，切实降低漏电或触电等事故发生率，推动建筑施工向数字化、精细化以及高效化转型。

一、漏电保护技术在建筑电气工程施工中的主要问题

（一）隐患识别不清

建筑电气工程施工现场环境因素复杂，频繁使用电气设备、密集分布线路，导致安全隐患潜藏于各个环节。由于部分项目缺乏分阶段、分区域的系统排查机制，识别隐患常常停留在初步检查阶段，缺少动态更新或跟踪管理。尤其是在施工周期较长的项目中，用电结构随着进度不断调整，但识别隐患流程并不能同步优化，因此出现识别滞后与覆盖不全的问题。此外，排查隐患往往依赖人工经验判断，缺乏量化标准与技术支持，难以全面深入^[1]。再加上现场管理制度执行不严，采集数据手段落后，不能有

效整合电气风险信息，致使部分关键区域或薄弱环节成为安全监管的盲区，而当隐患长时间未被发现或误判后果，极易引发电气事故，破坏工程整体施工秩序。

（二）装置选型不准

建筑电气施工中，选型与配置漏电保护装置决定整个系统的基础防护能力，然而在实际操作中，不合理的装置选型问题长期存在^[2]。一方面，施工单位缺乏精准评估现场用电负荷、电气环境与线路复杂程度，造成所选装置与实际需求之间存在明显偏差。另一方面，缺乏明确的选型标准与参考依据，使部分装置流于形式，不能发挥应有功能。在具体执行中，常见以价格、供应便捷性作为选型主要考虑因素，忽视性能匹配与技术适用性。此外，

作者简介：王璐（1992.07-），汉族，河北唐山人，政治面貌：群众，学历层次：本科，研究方向：电力工程技术，职称职务：监理工程师。

施工组织设计阶段没有充分纳入漏电防护整体方案,造成装置配置的随意性与局限性^[3]。尤其在多类型设备并存的场景中,如果不能建立对应等级与功能的选配逻辑,会直接影响保护链条的连贯性与响应速度。

（三）检测机制不全

在施工期间,漏电保护装置必须始终保持良好的技术状态,才能在发生电气故障时及时切断电源。然而,在工程实践中,不健全的检测机制成为影响装置有效运行的主要障碍。许多项目未设立专门的检测流程,装置安装后长期处于“无人看护”的状态。部分施工单位把检测工作视为阶段性任务,仅在启用设备前后采取形式化检查,缺少周期性的功能测试与运行评估。同时,检测手段仍以人工巡查为主,技术手段落后,难以对设备运行状态开展实时监控与故障预警。设备维护计划也缺乏科学规划,检修周期不固定,责任分工不明确,造成部分装置在故障初期没有及时发现,最终造成大面积电力系统失效。

二、漏电保护技术在建筑电气工程施工中的优化对策

（一）完善排查隐患流程,提升识别风险水平

在建筑电气施工中,只有构建全流程、多维度的排查体系,才能有效识别并处理各类电气风险。为做到精准化识别隐患,必须在施工不同阶段加入相应的排查节点,使检查具有连贯性与系统性。再者,应结合现场环境变化,灵活调整排查内容与重点,以适应实际施工需求。同时,应做到标准化的排查流程,使执行过程清晰明确,责任落实具体^[4]。此外,在信息管理方面,也需建立隐患记录、反馈与整改的数据通道,避免风险信息的遗漏与延迟反馈。进一步看,科学的排查机制不仅限于表面检查,更应涵盖结构布局、电缆路径及接线节点等关键细节,构成多层次的风险识别框架。

在大型商业综合体电气安装项目中,为解决漏电事故高发问题,施工单位在工程启动阶段就制定涵盖“设计—安装—调试—运维”四阶段的排查隐患流程,首先,在设计图纸阶段,项目技术负责人组织电气设计人员审核负荷性质和用电环境,对涉及潮湿、易腐蚀以及高接地电阻等区域的布线设计采取专项风险评估,并标注为一类风险点^[5]。这类区域在后续施工中被纳入重点排查范围,专门制定增强型漏电保护方案,例如选择动作电流为15mA的高灵敏度剩余电流保护器,以提升对微小漏电的响应速度。进入安装阶段时,项目管理团队依照制定流程,把整个施工区划分为六个电气检查分区,每一区设置专职电气巡查员,依据排查标准表逐项检查配线规范、回路接地连续性、安装保护装置位置与方向,尤其重视保护装置与实际用电设备之间的匹配性。在该过程中,技术人员采用数字钳形漏电流表对施工中的各分支回路实施静态电流检测,若回路空载状态下漏电流超过1mA,即被视为存在潜在故障,需检查开断、复查接头以及绝缘修复处理^[6]。调试阶段则引入热成像技术和电缆绝缘电阻测试仪,分别用于识别因线缆老化或绝缘破损导致的局部发热与漏电趋势,并对每一个已接入保护器的回路开展动作测试。测试中统一采用额定动作

电流30mA,动作时间应小于0.2秒,否则重新调整保护器灵敏度或更换装置。

（二）明确选型配置标准,适应工程实际需求

科学选型漏电保护装置是施工电气系统安全运行的核心环节,制定明确的配置标准,有助于统一技术路线,消除随意性选型。针对不同电压等级、负载特性以及工作环境,应在技术参数范围内设定分级选配要求,保障设备与实际使用条件高度契合。与此同时,需要整合分析装置与接地系统、线路结构等因素,形成成套联动的配置体系,从根本上增强防护能力。在管理层面上,还应配置审核制度,避免因便利采购或考量成本导致低性能装置混入系统,从而破坏保护链条的连续性^[7]。此外,培训施工技术人员理解并执行配置标准也同样关键。

在城市轨道交通控制中心的建筑电气施工项目中,项目管理团队在前期筹划阶段就针对漏电保护装置制定详细的选型与配置标准,把施工现场划分为控制区、办公区与设备区以及地下电缆通道四大功能区域,分别匹配不同类型的剩余电流保护器。由于设备区大量采用大功率变频器与不间断电源,为避免保护器错误动作,该区域统一选用动作电流为100mA、动作延时时间为200ms的延时型漏电保护器。对于控制区,则重点考虑保护人身安全,配置动作电流为30mA、动作时间小于0.1s的高灵敏度保护器,优先拦截低强度漏电风险。为保障配置标准的准确执行,电气工程师在安装阶段依据设计图纸与现场负载实际功率数据采取调整,所有支路保护器均需满足额定电流大于线路最大运行电流10%以上,并且保证线路末端电压降控制在5伏以内,防止因电压不足影响保护器稳定性。

同时,根据接地电阻检测结果,部分高阻区增设双重保护措施,即漏电保护器与接地故障断路器联合使用,提升系统整体动作可靠性。为防止材料采购过程中出现设备替代或参数不符的情况,施工单位建立三级审查机制^[8]。第一道为技术复核,要求项目电气负责人依据现场参数重新核对保护器型号与性能;第二道为入库验收,由设备管理员对照出厂参数逐台查验;第三道为现场功能验证,采用漏电测试仪对装置作实地触发实验,测量动作时间与断电能力,所有测试数据经施工记录系统归档,作为验收依据。

（三）配置智能监测系统,增强运行管理效能

传统漏电保护依赖人工巡查与周期检修,效率与准确性均有限,而引入智能监测技术使系统运行状态管理更加高效。采用实时监测手段可以第一时间掌握各保护装置的运行参数,及时捕捉故障前兆,降低突发风险。为提升整体运行质量,监测系统应具备分析预警、记录数据以及远程干预等多项功能,进而形成动态响应措施^[9]。同时,需要把各项监测指标与项目实际运行需求相匹配,做到信息准确反应及时。

在一项大型政务服务中心的建筑电气施工工程中,项目部为提高施工期间的漏电保护精度与管理效率,引入“安科瑞ARD智能电力监测系统”用于全过程动态监控。由于现场临时用电点多、设备流动频繁,传统人工方式已无法及时掌握各回路漏电保护器的运行状态,特别是在地下室、机电设备层等高湿区域,漏

电风险更为突出。因此，施工技术负责人决定把智能监测系统纳入临时配电系统设计方案中，提前布设监测节点与采集数据线路。在安装布线阶段，电工按照施工图在每一个临时配电箱中增设ARD智能剩余电流监测模块，并接入统一的后台监控平台。施工现场布设48个回路监测点，每个点位都能实时采集剩余电流或电压等核心数据，刷新频率为每10秒一次。

同时，技术人员设置报警阈值为10mA，一旦任一回路剩余电流达到设定值，平台立即弹出报警提示，并定位到具体箱号与楼层位置。与此同时，系统会把异常数据自动生成记录，供技术组随时调取并开展针对性排查。该系统特别适用于临建阶段的不稳定电源状态管理。在结构封顶阶段，现场照明系统曾因线路绝缘老化导致某支路频繁报警。监测平台数据显示该回路电流每两小时上升一次，呈周期性波动。项目技术组根据波动周期分析出故障时间与混凝土湿作业重叠，进一步排查后发现电缆受潮产生间歇性漏电。因此，处理措施得以及时落实，未造成设备损坏，也避免夜间照明系统突然跳闸带来的施工中断。

（四）建立维护巡检机制，确保装置持续稳定

在建筑电气系统的运行周期内，规范的巡检机制应具备定时性、针对性与执行力，不可流于形式。施工单位设立科学的巡检频率能够保证问题在早期阶段被发现，降低设备故障带来的连锁反应。此外，需根据装置运行时长与使用负载情况设定不同级别的检修计划，增强维修工作的实效性。在执行操作过程中，应同步记录检测结果、故障信息以及修复措施，并形成可追溯档案，方便后续对比分析。因此，制度执行应严格依规执行，避免人为因素干扰检修质量^[10]。与此同时，施工单位还需配置应急巡检机制，应对特殊气候、突发施工变更等场景下的突发风险。

在市政综合楼施工现场，为保证漏电保护装置在临时配电和楼层电气系统安装阶段始终处于正常状态，项目方制定并严格执行一套“定人、定点、定频、定表以及定记录”的五定巡检机制，巡检任务主要由三类人员执行，分别为施工班组电工、电气专职技术员与项目电气主管，各有职责分工、检查频次以及数据

提交渠道。每日巡检由施工电工在7:30前完成，巡检内容包括所有已投入使用的漏电保护器的开关状态、试验跳闸功能是否有效、复位按键是否卡顿甚至指示灯是否熄灭或闪烁异常。施工区域平均布置配电箱52台，每天需检查保护器约168个，巡检后填写《现场漏保运行检查表》，逐项标注设备编号、跳闸试验结果与外观状况等内容，签名确认后，统一交给施工电气管理员。每周三为固定专项测试日，由专职技术人员使用标准漏电动作测试仪对所有主干配电箱的保护器开展漏电模拟检测。

检测标准为：动作电流 $\leq 30\text{mA}$ ，动作时间 ≤ 0.2 秒。假如检测值超出范围，系统自动记录异常条目并通知维修组更换，平均每次检测涉及保护器120个左右，检测数据实时上传至“安芯工地管理系统”，由平台生成电子检测报告。每月20日前后，项目电气主管组织技术复核，由2名以上具中级职称的电气工程师组成复检小组，对施工现场随机抽取不少于30组支路回路测量绝缘电阻（标准不得低于 $0.5\text{M}\Omega$ ），并重新核查保护器安装端子有无发热、导线有无烧蚀痕迹。该环节还包含与前期测试数据比对，排查性能衰减设备，并对累计动作频率超过10次的保护器做强制更换处理。针对特殊气候和施工阶段交叉作业频繁的高风险期，项目方设立应急巡检机制。一旦出现暴雨、大风、临时照明大范围启用等情况，2小时内必须完成对地下空间、厨房区以及电缆竖井的临时配电箱漏电保护装置专项检查，重点查看湿度影响、漏电跳闸记录与复位情况。

三、结束语

回顾建筑电气施工中漏电保护技术的实践过程，不难发现，排查隐患、配置选型、智能监测以及维护巡检构成保障电气安全的系统支撑。各环节环环相扣，形成从预防到控制的完整闭环。未来，随着智能化设备的不断发展与施工标准的持续优化，漏电保护会更加高效精准，为建筑工程的安全用电提供坚实保障，也为推动智慧工地建设与提升工程质量奠定基础。

参考文献

[1] 雍芝龙. 探究建筑电气工程施工技术难点[J]. 居业, 2023, (06): 218-220.
[2] 李虎, 余若飞, 石琴. 建筑电气工程施工过程中的质量问题及防治探究[J]. 建筑科学, 2024, 40(03): 185.
[3] 马玉茹. 建筑电气工程施工中漏电保护技术的应用研究[J]. 中国建筑装饰装修, 2023, (08): 68-70.
[4] 刘晓毅. 建筑电气工程施工特点及管理分析[J]. 智能建筑与智慧城市, 2024, (S1): 79-81.
[5] 廖欣毅. 建筑电气工程施工中的质量控制与安全管理[J]. 全面腐蚀控制, 2024, 38 (12): 49-51.
[6] 张硕, 张浩. 建筑电气照明安装工程施工技术与质量控制分析[J]. 光源与照明, 2024, (11): 201-203.
[7] 张成明. 智能建筑电气工程施工质量的控制策略研究[J]. 房地产世界, 2024, (21): 140-142.
[8] 薛飞. 建筑电气工程施工的技术要点探讨[J]. 科技资讯, 2024, 22 (20): 106-109.
[9] 范锦瑞. 建筑电气施工技术要点及质量控制措施[J]. 建材发展导向, 2024, 22 (15): 13-15.
[10] 蔡金铨. 浅谈建筑电气消防工程施工管理[J]. 居业, 2024, (07): 184-186.

新能源工程建设中的项目风险管理与控制研究

李兆龙

云南金元新能源有限公司, 云南 昆明 650000

DOI:10.61369/EPTSM.2025030010

摘 要： 在全球“双碳”目标的驱动之下，新能源工程建设迎来了高速发展期。本文则聚焦新能源工程建设中的项目风险管理与控制，系统地梳理了项目建设全周期面临的技术风险、市场风险、环境风险等关键风险因素，而后通过科学的风险识别、评估方法，提出了涵盖风险预防、监控、应对等环节的全流程控制策略。希望能够为新能源工程降低风险损失、保障项目顺利实施与可持续运营提供理论与实践双方面的指导。

关 键 词： 新能源；工程建设；项目风险；管理；控制

Research on Project Risk Management and Control in New Energy Engineering Construction

Li Zhao long

Yunnan Jinyuan New Energy Co., Ltd., Kunming, Yunnan 650000

Abstract： Under the drive of global "dual carbon" goals, new energy engineering construction has entered a period of rapid development. This article focuses on project risk management and control in new energy engineering construction, systematically reviewing key risk factors such as technical risks, market risks, and environmental risks faced throughout the entire project cycle. Subsequently, through scientific risk identification and assessment methods, it proposes comprehensive control strategies covering risk prevention, monitoring, and response. It aims to provide theoretical and practical guidance for reducing risk losses, ensuring the smooth implementation of new energy projects, and their sustainable operation.

Keywords： new energy; engineering construction; project risks; management; control

引言

由于新能源项目具有投资规模大、建设周期长、技术复杂等特点，因此在项目建设的过程中面临着诸多不确定性。从光伏电站选址时的光照资源评估偏差，到风电项目因极端天气导致的设备损坏，以及从储能技术不成熟引发的安全隐患，到新能源补贴政策调整带来的收益波动，各类风险均贯穿于项目建设与运营全过程。此时有效的项目风险管理与控制，便成为了保障新能源工程经济效益、环境效益和社会效益的关键，其对推动能源结构转型和可持续发展的意义深远。

一、新能源工程建设项目风险类型与特点

（一）主要风险类型

1. 技术风险

新能源工程依赖大量的前沿技术，因此技术风险尤为突出。例如，太阳能光伏项目中，电池转换效率提升缓慢、组件衰减率过高，就会直接地影响到发电收益。又比如风力发电设备的叶片设计不合理、齿轮箱故障率高，就可能导致设备停机维护的成本增加。而在储能技术中，锂电池热失控风险、氢能储运安全性问题，更是制约新能源项目稳定运行的关键因素。

2. 市场风险

市场供需变化、价格波动以及政策调整都会带来市场风险。具体来说：随着新能源产业的竞争加剧，光伏组件、风机等设备

价格可能会大幅度地下降，从而压缩项目的利润空间；电力市场交易机制不完善，致使新能源消纳困难，此时会造成弃风、弃光等问题；而国家补贴退坡、可再生能源配额制调整等政策地变化，也会对项目收益产生重大的影响^[1]。

3. 环境风险

新能源工程建设与自然环境紧密相关。其中水电项目可能改变河流生态系统，影响到鱼类洄游和生物多样性；风电项目的噪音、光影污染则会引发周边居民的抵触；而光伏电站大规模建设可能会破坏到地表植被，加剧土地沙化。此外极端天气如暴雨、台风、地震等，还会直接威胁到项目设备的安全和施工进度。

4. 财务风险

因为新能源项目的投资大、回报周期长，所以财务风险不容忽视。一般融资渠道单一、融资成本过高，就会增加项目的资金

压力，而建设成本超支、运营费用上涨，就可能导致项目资金链断裂。

5. 管理风险

项目管理团队经验不足、组织协调能力差，则会导致施工进度延误、质量管控不到位。例如，在多标段同时施工的新能源项目中，若缺乏了有效的沟通协调机制，各施工单位之间就可能会出现交叉作业冲突。

（二）风险特点

1. 复杂性：新能源工程涉及多个学科技术、多利益主体和复杂的外部环境，而上述风险因素相互交织，最终形成了复杂的风险网络。

2. 动态性：在项目建设周期内，技术进步、市场变化、政策调整等因素会不断地变化，此时风险的性质、影响程度也会随之发生改变。

3. 隐蔽性：部分风险如设备潜在质量缺陷、地质条件变化等，在项目前期难以被准确地识别，可能在后期集中地爆发，最终造成严重的后果。

4. 关联性：一种风险的发生可能引发其他风险，如技术故障可能导致工期延误，进而增加财务成本和市场风险。

二、新能源工程建设项目风险识别与评估

（一）风险识别方法

1. 专家调查法

邀请新能源领域的技术专家、工程管理专家、市场分析师等，通过头脑风暴、德尔菲法等方式，来对项目可能面临的风险进行全面地识别和分析^[2]。

2. 检查表法

依据以往新能源项目经验，制定出标准化的风险检查表，当中需涵盖技术、市场、环境等各个方面。之后在项目建设的过程中，对照检查表逐项进行排查，即可及时的发现潜在风险。

3. 流程图分析法

绘制出项目建设全流程的工艺流程图、组织架构图和资金流动图，以此分析各环节可能存在的风险。以储能电站建设为例，从选址规划、设备采购、施工安装到并网运营，逐一的分析每个环节的风险因素，如设备运输途中的损坏风险、施工过程中的安全风险等。

（二）风险评估方法

1. 定性评估法

通过风险矩阵、风险等级划分等方式，对于风险发生的可能性和影响程度进行定性分析。通常可将风险分为高、中、低三个等级，如政策补贴大幅退坡对项目收益影响大且发生可能性高，便判定为高风险。

2. 定量评估法

运用概率分析、敏感性分析、蒙特卡洛模拟等数学模型，对于风险进行量化评估。此时可通过计算项目净现值（NPV）、内部收益率（IRR）等财务指标，分析不同风险因素的变化对于项目经济效益的影响程度。如通过蒙特卡洛模拟，可用于评估光照资源波动对光伏项目发电量和收益的影响范围。

3. 综合评估法

结合定性与定量评估方法，即可构建多层次的风险评估指标体系。接着利用层次分析法（AHP）确定各风险因素的权重，再运用模糊综合评价法对项目整体风险水平进行评估，就能得出客观、全面的风险评估结果。

三、新能源工程建设项目风险控制策略

（一）风险预防策略

1. 加强前期调研与规划

在新能源项目立项的关键阶段，全面且深入的资源勘查与可行性研究是预防风险的首要屏障。对于风电项目而言，精确地测量风速、风向数据是评估其开发潜力的核心环节。以我国内蒙古某大型风电项目为例，项目团队通过在拟选场址周边设立多个测风塔，且进行了长达12个月的持续监测，获取了每小时的风速、风向、气温等数据，并且运用专业的风资源评估软件，再结合当地的地形地貌，模拟出了不同季节、不同时段的风能分布情况，从而准确地判断出了该区域是否具备建设大型风电场的条件。

2. 优选技术与设备

技术方案和设备的选择直接关系到了新能源项目的安全性和稳定性^[3]。特别是在储能项目中，锂电池技术的选择尤为关键。虽然近年来锂电池技术的发展非常迅速，但不同类型的锂电池在性能和安全性上依然存在着显著的差异。例如，磷酸铁锂电池具有安全性高、循环寿命长的特点，比较适合在对安全性要求较高的大规模储能电站中应用；而三元锂电池的能量密度较高，但热稳定性相对较差，所以在应用时需要配备更完善的热管理系统。

3. 完善合同管理

在项目建设的过程中，涉及到了设备采购、工程施工、技术服务等多个合同签订环节。对于施工合同来说，明确地设置工期延误罚款条款能够有效地督促施工单位按时完工。如某光伏电站施工合同中约定，若施工单位每延误一天工期，需按照合同总价的0.1%向业主方支付违约金，此措施促使施工单位合理地安排施工计划，调配充足的人力和设备资源，确保了项目的按期完成。而在设备采购合同中，详细地约定质保期和售后服务条款是至关重要的。某储能项目在采购锂电池设备时，在合同之中明确地规定供应商需提供5年的质保期，如果在质保期内设备出现非人为的质量问题，供应商需免费提供维修、更换服务，同时供应商还需在项目现场附近设立售后服务点，确保在接到设备故障通知后24小时内能够响应，且48小时内到达现场进行处理，以此保障设备的正常运行，避免了因设备故障导致项目无法正常发电。

4. 优化融资结构

新能源项目通常具有投资规模大、回报周期长的特点，单一的融资渠道可能会导致资金链紧张，此时多元化的融资方式便成为了降低新能源项目财务风险的有效手段。一般企业通过拓宽融资渠道，采用银行贷款、债券发行、股权融资、绿色金融工具等多种方式筹集资金，即可分散财务风险。

（二）风险监控策略

1. 建立风险预警机制

基于科学的风险识别和评估结果，来设定关键风险指标

(KRI)是实现风险预警的核心。而在新能源项目中,发电量偏差率、设备故障率、成本超支比例等都是重要的KRI指标。若利用物联网、大数据等先进技术,对项目运行数据进行实时地监测和分析,就能够及时地发现其中的潜在风险。以光伏电站为例,通过在光伏组件、逆变器等设备上安装传感器,就能实时地采集发电功率、电压、电流等数据,并上传至监控中心。当光伏电站的发电量连续一周低于预期10%时,系统便会自动分析可能的原因,如组件表面灰尘积累导致发电效率下降、逆变器故障、光照资源变化等,并且发出预警信号,同时还会启动相应的应对措施,如安排人员进行组件清洗、通知技术人员检查逆变器等,从而避免了问题的进一步恶化,保障了电站的正常发电。

2. 定期风险评估与报告

在项目建设的过程中,一般每季度都要进行一次全面的风险评估,并且在重大节点或环境发生变化时要及时开展专项评估。每次开展风险评估会议,务必要求项目团队成员、技术专家、财务人员等相关人员共同参与,对于项目当前面临的各类风险进行重新梳理和分析。此时可通过收集项目进度、成本支出、设备运行、市场环境等方面的数据,运用定性和定量相结合的评估方法,判断出风险的变化情况、已采取措施的效果。

3. 加强沟通与协调

由于新能源项目涉及到了业主、设计单位、施工单位、设备供应商、电网企业等多个参与方,因此各方之间的沟通协调是至关重要的。为此可定期召开协调会议,确保项目建设中出现的问题得以及时的解决。例如某风电项目建设过程中,施工单位在基础施工时发现现场的地质条件与设计图纸存在差异,可能会影响到风机基础的稳定性。而施工单位及时通过协调会议向设计单位反馈了这一问題,设计单位在收到反馈后,也迅速地组织了技术人员到现场进行勘查,且重新进行了地质分析和计算,调整了设计方案。最终由于沟通及时、协调到位,避免了因设计与实际不符而导致的工程质量问题和工期延误风险,确保了项目的顺利推进。

(三) 风险应对策略

1. 风险规避

对于高风险且难以控制的情况,需要果断的采取风险规避措施。就新能源项目的选址环节来说,地质条件就是一个重要的考量因素。因为在地质条件复杂、地震频发区域,建设大型新能源项目一般面临着巨大的地质灾害风险,如地基沉降、设备损坏

等,一旦发生灾害,就可能会造成不可估量的损失。因此在项目规划阶段,应尽量避免在这类区域建设项目。同样地,在技术的选择上,当某项新技术研发成本过高、不确定性过大时,选择成熟技术替代便是更为稳妥的做法。

2. 风险减轻

在风电项目当中,叶片结冰是常见的风险之一,其严重地影响了风机的发电效率和设备安全。而为了应对这一风险,企业可以安装加热装置或采用防结冰涂层。某北方风电项目就在风机叶片上安装了电加热装置,此装置通过温度传感器可实时监测叶片的表面温度,当温度低于冰点时,便会自动启动加热装置,以此融化叶片表面的冰层,从而有效地降低了因叶片结冰导致的停机时间和设备损坏风险。

3. 风险转移

购买工程保险是目前转移风险的常见手段,如建筑工程一切险、安装工程一切险、设备运输险等等。上述这些保险可以将自然灾害、意外事故等风险损失转嫁给保险公司^[4]。不过,采用工程总承包(EPC)模式也是转移项目建设风险的重要方式。因为在EPC模式下,总承包商负责了项目的设计、采购、施工等全过程,业主方只需将项目建设风险转移给总承包商。

4. 风险接受

在新能源项目建设的过程中,不可避免地会遇到一些小额材料损耗、临时用工成本增加等风险。针对这类风险,项目方可以预留一定的风险准备金,用于应对此类风险事件。例如某新能源项目在预算中设置了项目总投资5%的风险准备金。实际在项目建设的过程中,由于部分施工材料在运输途中出现了少量的损坏,以及临时增加了部分用工需求,导致了成本的增加,但由于有风险准备金的保障,项目方就能够及时地支付额外费用,确保了项目的正常进行。

四、结语

新能源工程建设项目风险管理与控制是一项系统工程,其贯穿了项目全生命周期。在文中提出准确地识别风险类型,运用科学的评估方法,制定并实施有效的预防、监控和应对策略,即可显著地降低项目风险,从而保障新能源工程的顺利建设与可持续运营。

参考文献

- [1] 张泽成. 新能源光伏工程采购过程中的风险管理与控制策略分析[J/OL]. 中文科技期刊数据库(全文版)经济管理, 2024(9)[2024-09-01].<https://www.cqvip.com/doc/journal/2010228864935855106>.
- [2] 杨瑶. 新能源工程管理中的成本控制与结算优化策略研究[J/OL]. 中文科技期刊数据库(引文版)工程技术, 2024(12)[2024-12-01].<https://www.cqvip.com/doc/journal/2010228872142685696>.
- [3] 程沛源. 基于光伏与物联网的屋顶温室系统研究与设计[D]. 广西大学, 2023.DOI: 10.27034/d.cnki.ggxu.2023.001440.
- [4] 王汉. 新能源发电项目的工程建设与控制策略[J]. 集成电路应用, 2021, 38(08): 86-87.DOI: 10.19339/j.issn.1674-2583.2021.08.034.
- [5] 孟贤. 数字化下特高压装备质量风险管控模型及云平台研究[D]. 华北电力大学(北京), 2024.DOI: 10.27140/d.cnki.ghbbu.2024.000028.
- [6] 郭超然. 地铁施工安全风险动态知识图谱构建及其应用研究[D]. 中国矿业大学, 2024.DOI: 10.27623/d.cnki.gzkyu.2024.001351.
- [7] 崔耿豪. 面向“低碳”电力系统的电力市场风险规避研究[D]. 临沂大学, 2024.DOI: 10.44252/d.cnki.glydx.2024.000127.
- [8] 胡言瑾. 基于模糊层次分析法F 光伏项目投资风险评估研究[D]. 中南林业科技大学, 2024.DOI: 10.27662/d.cnki.gznlc.2024.0000516.
- [9] 王成明. HP 新能源汽车总装项目风险管理研究[D]. 吉林大学, 2024.DOI: 10.27162/d.cnki.gjlin.2024.003771.
- [10] 王昌明. 配网侧储能站系统建模及保护策略研究[D]. 曲阜师范大学, 2024.DOI: 10.27267/d.cnki.gqfsu.2024.000952.

光伏电站的自动化运维与远程通信技术应用

郑廷富

国家电投集团贵州金元威宁能源股份有限公司, 贵州 毕节 553100

DOI:10.61369/EPTSM.2025030011

摘 要 : 在世界新能源格局转变为清洁能源的背景下, 光伏电站的规模不断扩张, 传统的运营管理模式已经很难适应新的要求。本文以光伏电站的自动化维护和远程通讯为研究对象, 对其体系结构和关键技术进行了深入的剖析, 对其技术选择和实现途径进行了探索。以实例说明技术运用的成效, 针对技术、管理及经济上的问题提供相应的解决方案。研究表明, 将远程通讯与自动运维相结合, 可以大幅提高光伏电站的运行效率, 提高发电效率并且减少发电成本, 对于促进光伏行业的可持续发展有着十分重要的意义。

关 键 词 : 光伏电站; 自动化运维; 远程通信技术; 智能监测; 故障诊断

Application of Automation Operation and Maintenance and Remote Communication Technology in Photovoltaic Power Station

Zheng Tingfu

Guizhou Jinyuan Weining Energy Co., Ltd. of State Power Investment Corporation Group, Bijie, Guizhou 553100

Abstract : Against the background of the global energy transformation towards clean energy, the scale of photovoltaic power stations is expanding continuously, and the operation and maintenance mode can hardly adapt to the new requirements. This paper takes the automated maintenance and remote communication of photovoltaic power stations as the research object, deeply analy its system structure and key technologies, and explores its technology selection and implementation paths. The effectiveness of the technology application is explained by examples, and corresponding solutions are provided for technical, management and economic problems. The study shows that the combination of remote communication and automatic operation and maintenance can greatly improve the operation efficiency of photovoltaic power stations, improve power efficiency and reduce power generation costs, which is of great significance for promoting the sustainable development of the photovoltaic industry.

Keywords : photovoltaic power station; automated operation and maintenance; remote communication technology; intelligent monitoring; fault diagnosis

引言

随着世界能源危机与环保问题的日益突出, 光伏作为一种清洁、可再生的新能源, 已成为新一代能源发展的重要趋势。近几年, 光伏发电装机不断攀升, 2023年将新增装机1.5亿千瓦, 累计装机规模已居全球第一。但随着电站规模的增大, 传统的人工巡检和经验管理方式已显现出效率低下、成本高昂、故障响应缓慢等问题, 已成为制约光伏发电企业经济效益与可持续发展的重要因素。

电力系统的自动化运行和远程通讯技术的兴起, 光伏发电系统维护管理方式的革新带来了新的机遇。利用智能监测、故障诊断、预测维修等方法, 对电厂设备进行实时监测和精确管理, 远程通讯为电厂提供有效的数据传送和遥控手段, 使得操作人员不必到现场就能了解电厂的运行状况。本文对光伏发电系统的运行机理、应用效果和挑战进行深入剖析, 采用理论分析和实证研究的方式, 对产业的技术升级和运营模式的创新具有重要的借鉴意义。

一、光伏电站自动化运维技术

(一) 自动化运维系统架构

1. 数据采集层

数据采集层是自动化运维系统的基础, 该系统的核心工作就

是采集各种设备的工作状态和环境参数。在电池模块方面, 通常采用电压和电流传感器对电池的发电特性进行实时监控, 并利用温度传感器对电池的表面温度进行检测, 从而对电池的热斑效应进行评估。由此设计一种新型的太阳能电池系统, 通过采集太阳能电池的光强、温度、湿度、风速等数据, 为研究太阳能电池的发电效率提

作者简介: 郑廷富 (1993.07—), 男, 汉族, 贵州六枝人, 学历或职称: 本科, 助理工程师, 研究方向或工作领域: 从事光伏通讯及自动化专业。

供重要的依据。比如，一座大规模的光伏电站，通过在每个光伏单元阵列之间布置多个传感器，以每秒1次的频率对各个单元的工作状态进行精确的监控，保证系统中的异常信息能够被及时地捕获。

2. 数据传输层

数据传输层负责将采集到的数据高效稳定地传输到数据处理中心，光纤以其高带宽、低时延、抗干扰等优点，被广泛地应用于大规模光伏电站建设内部骨干网。而在边远地区、地形复杂、布线难度大的地方，采用无线通讯技术具有明显的优势。采用4G、5G通讯技术，可以达到较快的数据传送速度，达到实时监测的要求；低功耗的广域网技术，如LoRa，非常适合小数据量和功耗敏感的传感节点。比如，在中国西北戈壁滩上，工作人员将4G和光纤混组网，既能满足实时的数据传输，又能减少工程造价。

3. 数据处理与管理层

数据处理和管理是整个生产过程中的“大脑”，它承担着对大量数据的深入分析和价值发掘的任务。在硬件上，为了满足海量的数据存储和计算的需要，一般都是使用高性能的服务器集群来建立数据处理中心，该软件将数据的存储、清理和分析等功能模块结合起来，采用大数据分析的方法实现对设备运行数据的多维度分析。通过构建装备性能评价模型，实现对电站发电效率、部件损耗率等关键参数的实时估算，为运营管理决策提供依据。比如，一座光伏电站经过一系列的数据处理，发现在一定的时间周期内，逆变器的效率不断降低，经过分析确定是散热风机的故障，并采取相应的维修措施避免更大的损失。

（二）自动化运维关键技术

1. 智能监测技术

智能监测技术针对光伏电站运行中存在的问题，基于机器学习与深度学习的智能监控方法，以光伏组件为研究对象，采用卷积神经网络（CNN）对其进行建模，实现组件表面裂纹、粉尘覆盖等故障特征的提取。申请人所在课题组通过搭载热成像的无人机获取部件表面的温度信息，并采用深度学习方法对部件表面的热斑进行自动识别，达到95%以上的精度。另外，通过智能监控技术，可以实时地分析环境因子，比如通过气象预报来预测发电功率的变化，从而预先调整运行和维护策略。

2. 故障诊断技术

光伏发电系统的故障有多种，主要有光伏组件的短路、逆变器的故障，以及汇流箱的故障等。故障诊断是指通过对设备的工作状态进行分析，从而迅速地对其进行定位和故障诊断。而故障诊断算法通过预先设置的门限，并结合相应的逻辑规则对系统进行故障诊断，通过建立一个设备的数学模型，并将其与实际操作数据进行比较，从而实现故障的诊断。近年来，以人工智能为基础的故障诊断技术得到了快速发展，例如使用长短期记忆网络（LSTM）对时序数据进行分析，可以有效地预测逆变电源的功率波动等故障。

3. 预测性维护技术

预测维修是指通过分析装备的历史与实际操作信息，对装备的剩余寿命及失效概率进行预测，从而达到从被动维护到主动维护的目的。通过对设备振动、温度、电流等多个参数的变化趋势进行分析，并利用PSO对预测模型进行优化，以提高预测精度。

采用预测维修技术，使逆变器的平均失效周期由120天提高到180天，维修费用减少30%，进而建立一套科学的检修方案，有效地降低机组的非正常停工时间，提高机组的发电效率。

二、远程通信技术在光伏电站的应用

（一）远程通信技术选型

1. 不同通信技术特点

各种远程通讯技术在性能和成本上都有自己的特色，4G/5G具有高传输速率和低延迟的特点，其理论峰值速率可以达到10Gbps，能够满足高清视频监控和数据实时传输的要求，但是其网络覆盖受限，应用成本高。卫星通讯不受地域条件的制约，适合在边远地区使用，存在着延迟大，带宽受限等缺点^[1]。光纤通讯以其带宽高、损耗小、抗干扰能力强等特点而被广泛应用于大规模光伏发电系统的内部网中，但存在着铺设成本高，建设困难的问题。LoRa具有低功耗、大范围覆盖等优点，能够在几公里的范围内进行数据传输，非常适合应用于对能量需求较高的传感节点进行通讯。

2. 光伏电站场景适配性分析

由于光伏电站的地理位置、规模以及对数据传输的要求，选择合适的通讯方式是至关重要的。在城区外围或通讯条件较好的区域，应优先采用4G/5G通讯方式，以满足高速数据传输需求；针对偏远山区和沙漠地区的大规模光伏电站，可以将卫星通信和无线自组织网络联合起来，以保证稳定的数据传输。LoRa是一种适合于小型数据采集的传感器；针对青藏高原地区地形复杂、人口稀少等问题，提出基于卫星通信和4G备用网络的混合组网方法，以保证电网和监测中心之间的可靠通讯。

（二）远程通信系统实现

1. 通信网络搭建

建立光伏电站的远距离通信网，需要从内网和外网两个方面进行全面的考虑。在企业内部网中，设备之间的互联一般是通过工业以太网或者无线网状网来实现的。在大规模的光伏发电系统中，为了提高系统的可靠性，可以在某个链路发生故障的情况下，将系统中的数据自动转入备用链路进行传输^[2]。在对外连线上，依据通讯技术的选择，通过运营商基站和卫星地面站等设备与因特网相连，并与远端监测中心或云端进行数据交换。比如，一座光伏电站以工业级路由器为入口，通过4G网络将其内部设备的数据转化成标准的通讯协议，并将其上载到云端，使操作人员可以通过移动端的APP，实时了解电厂的工作状况。

2. 数据安全保障

在远程通讯系统中，数据安全性是一个非常关键的问题，它关系到数据的传输与存储。为了有效地保护用户的信息安全，可以基于SSL/TLS的安全认证方法，在数据的存储上，采取分布式的存储方式，使数据在不同的节点上分布，从而增强了数据的冗余性，增强系统的抗干扰能力。在此基础上，设计一套严格的权限控制机制，为不同的用户设定相应的权限，从而有效地避免用户的非法访问。定期检查和修补网络的漏洞，并使用IDS、防火墙等设备来保证通讯网络的安全。

三、光伏电站自动化运维与远程通信技术应用的挑战与对策

（一）技术挑战

1. 系统集成难题

由于光伏电站的设备多为多家生产厂家生产，通讯协议及接口规范不一，难以整合。比如，一些光伏组件使用 Modbus，逆变电源使用 IEC61850，为了实现不同规格之间的数据交换，必须研制专门的转换模块。另外，新老设备之间的兼容性也给系统的整合带来困难，要解决这个问题，就必须建立一个标准化的通讯标准，并促使各设备制造商采纳标准化的接口与协议，设计通用的通讯中间件，以支持各种协议器件之间的数据交换和互连。

2. 数据处理压力

随着光伏电站规模的不断扩大，传感器数目的不断增多，海量的数据也呈现出爆炸式的增长，这对数据的处理造成很大的压力。现有的数据处理平台已经很难适应对海量数据进行实时存储和分析的要求，利用云计算技术与边缘计算技术的融合，可以有效地减轻系统的运行负荷。边缘计算通过对数据的局部预处理，剔除冗余的信息，并将其上载到云平台以供深入分析。比如将边缘计算节点部署到分布式光伏电站，实时处理各节点的运行数据，只向云平台上载异常及统计分析，以降低数据传输和云计算负担^[9]。

3. 通信稳定性问题

边远地区的通讯基础设施较差，存在信号微弱、网络覆盖不足等问题，且暴雨、沙尘等恶劣天气也会对通讯品质造成不利影响。为了保证通信的稳定，可以采取多链路的备用方案，例如 4G 网络、卫星网络和无线网络网络，在其中一条线路失效后，可以自动切换到其它线路上。在设备选择方面，选用高可靠的通讯模组，强化通讯装置的保护，增强通讯器材的适应性。

（二）管理挑战

1. 运维人员技能要求转变

随着自动化运行和远程通讯技术的广泛使用，对运行维护人员的业务能力提出更高的要求。传统的运行维护人员对设备的运行和机器维护非常熟悉，但是在数据分析、程序设计、网络通讯等方面却很欠缺。通过对网络维护人员进行有针对性的训练，包括对机器学习算法、通讯网络管理等进行培训，以提高其数字技

术水平。同时引入具有一定背景的技术人员，充实运营管理队伍，促进运营管理由“经验”到“数据驱动”的转型。

2. 安全管理风险

由于远程通讯技术的广泛使用，使得光伏电站面临着网络攻击和数据泄露等方面的威胁。黑客可以藉由侵入通讯网络、修改装置的控制命令、盗取电厂的操作资料等方式达到破坏通讯网络之目的。同时建立健全的安全管理体系，定期对系统进行安全评价和漏洞检测，加强对人员的安全教育，避免由于人为错误而造成的安全事故，通过加密、访问控制、入侵检测等技术，建立一套完整的网络安全防御系统^[4]。

（三）经济挑战

1. 前期建设成本高

自动维护和远程通讯系统的建设涉及到传感器、通讯设备和服务器等硬件的购置，同时还需要进行软件的开发和部署，因此需要投入大量的前期资金。通过对体系结构的合理规划，分阶段进行施工，减少一次投资的压力，申请清洁能源发展专项基金、通过融资租赁等方式购买设备，以减轻企业的财务压力。

2. 投资回报周期长

虽然自动化运行和远程通讯可以改善电厂的发电效率，减少运行维护费用，但是其初期投资巨大，导致投资回收期的延长。在此基础上，基于电力市场交易和数据服务的新思路，即通过优化运营管理策略，提升电厂的运行效率并扩大电厂的收益来源，进而强化工程造价控制，对运营费用进行精细化管理，缩短投资回收期。

四、结语

将光伏发电系统的自动化运行和远程通讯技术用于光伏发电系统的智能化和高效率发展是非常重要的。在此基础上，结合工程实例，提出一种基于分布式电源的分布式发电系统，可有效提高电站运行效率，提高发电效率以及减少发电成本。但是该技术的实用化还面临着技术整合、数据处理和安全管理等多重挑战，今后，还需要加大技术研究和创新力度，健全产业标准，培训专业人员，促进光伏发电系统的自动化运行和远程通讯技术的深入应用，为“双碳”战略的实施做出贡献。

参考文献

- [1] 刘刚，许艾，徐延明，等. 变电站自动化设备远程运维关键技术研究与应用 [J]. 电力信息与通信技术, 2025, 23(01): 68-75.
- [2] 邱帅. 光伏电站智能化运维技术的分析与应用 [J]. 通信电源技术, 2024, 41(21): 225-227.DOI: 10.19399/j.cnki.tpt.2024.21.075.
- [3] 张伟. 基于 5G 通信技术的变电站远程监控与运维方案探索 [J]. 通信电源技术, 2024, 41(13): 197-199.DOI: 10.19399/j.cnki.tpt.2024.13.066.
- [4] 卫伟，范军太，焦岚轶，等. 继电保护远程运维管控技术研究与应用 [J]. 煤炭技术, 2021, 40(06): 197-201.DOI: 10.13301/j.cnki.ct.2021.06.053.
- [5] 黄大巧，王鹏飞，丁娇. 基于物联网技术的光伏场站智慧运维管理平台设计与应用 [J]. 无线互联科技, 2025, 22(01): 51-54.
- [6] 胡伟，邹江，胡耀蓉，等. 基于华为盘古大模型的光伏场站智能运维系统设计与实现 [J]. 电工技术, 2024, (23): 122-126.DOI: 10.19768/j.cnki.dgjs.2024.23.029.
- [7] 田昕泽. 含高比例分布式光伏的配电网无功电压控制策略 [D]. 南京邮电大学, 2023.DOI: 10.27251/d.cnki.gnjdc.2023.000251.
- [8] 王金涛，冷智涛，刘海洋，等. 新能源场站主动支撑技术研究及应用 [J]. 新型电力系统, 2024, 2(04): 458-476.DOI: 10.20121/j.2097-2784.ntps.N20240006.
- [9] 沈宁. 基于数据驱动的智能电网光伏能源预测方法研究 [J]. 能源与环境, 2024, 46(11): 193-197+204.DOI: 10.19389/j.cnki.1003-0506.2024.11.030.
- [10] 李书勇. 特高压混合多端直流实时数字仿真试验关键技术与应用研究 [D]. 华南理工大学, 2023.DOI: 10.27151/d.cnki.ghnlu.2023.005735.

汽车修理存在的问题分析及措施研究

武文哲

华能兰州热电有限责任公司, 甘肃 兰州 730000

DOI:10.61369/EPTSM.2025030014

摘 要： 在我国机动车保有量不断增加的同时，汽配产业也得到了较大的发展，但同时也出现了许多问题。本文采用文献调研、实地调研和案例研究相结合的方法，从技术、管理和市场三个层面对我国轿车修理行业存在的设备落后，管理方式落后，市场竞争无序等问题进行深入地剖析。在此基础上，从技术进步、管理优化和市场规范三个方面，提出加大设备投资、引进先进管理模式以及强化市场监管的对策。研究结果显示，提高系统改善能力，可有效提高汽配产业之品质与市场竞争能力，促进汽配产业的规范与可持续发展。

关 键 词： 汽车修理；问题分析；措施研究

Analysis and Measures of Problems Existing in Automobile Repair

Wu Wenzhe

Huaneng Lanzhou Thermal Power Co., LTD., Lanzhou, Gansu 730000

Abstract： As the number of motor vehicles in our country continues to grow, the automotive parts industry has also seen significant development. However, numerous issues have emerged. This paper employs a combination of literature review, field research, and case studies to conduct an in-depth analysis of the problems in China's car repair industry, including outdated equipment, inefficient management practices, and disorderly market competition. Based on this analysis, the paper proposes strategies to enhance equipment investment, introduce advanced management models, and strengthen market regulation from the perspectives of technological advancement, management optimization, and market standardization. The findings indicate that improving the system can effectively enhance the quality and competitiveness of the automotive parts industry, thereby promoting its standardized and sustainable development.

Keywords： automobile repair; problem analysis; measure research

引言

随着我国经济的快速发展，人民的生活质量得到了极大地改善，汽车已经成为人们生活中必不可少的一种交通方式。近几年，随着国内机动车数量的不断增加，给汽配产业带来了空前的发展机会，但是在繁荣的背景下，却出现了一系列的问题，这些问题已经成为汽车修理行业健康可持续发展的瓶颈。本文对存在的问题进行深入分析，寻找可行的对策，对于提高我国汽车修理行业的整体服务水平，提高消费者的信任度，促进我国汽车修理行业的规范化和专业化进程，使其在激烈的市场竞争中健康发展具有重要意义。

一、汽车修理行业概述

（一）汽车修理行业的特点

汽车修理业是一个非常复杂的行业，现代汽车融合机械、电子和计算机等多种尖端科技，结构越来越复杂，其所需的知识范围非常广，对修理人员的技能要求也越来越高。例如汽车发动机要求修理人员既要懂得机械原理，又要懂得电控系统的故障诊断和检修。

汽车修理行业以服务为特色，对车辆进行修理，最根本的目标就是为用户提供良好的维护，以保证车辆的安全运行。从接受客户上门修理到故障诊断、修理作业，再到最终交车，每一个步骤都与用户的满意程度息息相关，及时、高效、周到的服务是汽修行业制胜的法宝^[1]。

（二）汽车修理行业的发展历程

在早期，车辆的构造比较简单，以机械零件为主体修理技术也比较初级，主要是靠修理工人的经验，用简易的工具来检查和

修理。在汽车产业发展的过程中,车辆的性能、结构都得到了最大程度地改善,从而使车辆修理工作日趋专业化。各修配公司都开始配置专业的维护设备,技师经过更加系统化地训练,可以处理比较复杂的故障。

近几年来,由于科学技术的迅猛发展,在汽车行业中得到了广泛地应用,车辆的智能水平越来越高。在此背景下,我国的汽车修理产业正经历着一场巨大的变革,以智能化、信息化为主的修理装备与技术的发展趋势日益明显。例如汽车故障诊断仪能够快速、准确地检测出车辆电子系统的故障代码,为修理人员提供有效的诊断依据。

（三）汽车修理行业的市场规模与趋势

当前,我国的汽配市场是一个巨大的市场,并且还在不断地发展,随着我国机动车数量的持续增长,机动车修理市场的需求量也越来越大。从市场格局上看,4S店以其自身的品牌优势、专业化的技术优势,在高档轿车的保养市场中占有绝对的优势,而一般的修配厂,由于其价格便宜、地理位置便利,在中、低端市场都有较大的顾客群^[2]。

今后,我国的修配产业将朝着智能化、标准化和连锁化的方向发展,智能维护装备将得到推广应用,提升维护的效率与品质,进一步健全行业标准,强化行业监督,推动行业良性发展,以整合资源、达到规模效应、提高竞争能力为目的的连锁经营模式将逐步出现^[3]。

二、汽车修理存在的问题分析

（一）技术层面问题

1. 修理设备落后

由于资金的制约,一些汽车修理企业的设备更新速度较慢,仍然沿用着陈旧落后的设备。比如有些小修理厂的诊断仪器不能与新车型的电子系统相匹配,从而不能精确地判断出汽车的故障。现有的提升装置普遍存在着较大的安全风险,同时也存在着提升效果不佳等问题,根据调研,在小规模汽车修理企业中有30%左右的主要维护设备已服役10年以上,且存在着严重的老化问题。

2. 修理技术人员水平参差不齐

目前我国汽车修理企业中,技术人才的来源较为复杂,其中有些人没有经过正式的职业训练,没有系统的理论知识。在实际的维护工作中,对于某些较为复杂的故障,单纯依靠经验来进行判断是很困难的。比如在新能源汽车高压系统失效问题上,很多传统的维护技术人员由于对此方面的认识不足而一筹莫展^[4]。另一方面,企业员工的技能更新与汽车科技发展不同步,对新车型的维护能力还不够强,根据统计,目前我国汽车修理企业员工中,本科及以上学历文化程度不到20%。

3. 新技术应用困难

随着新能源、无人驾驶等技术的不断革新,新技术的运用对汽修行业提出更高的要求。目前我国汽车修理企业普遍存在着对新技术认识不足、技术储备不足、人才支撑不足等问题,比如在

新能源汽车上,对蓄电池的维护技术提出了更高的要求,而目前国内具备这一技术的修理企业并不多。另外,由于新工艺所需的维护费用较高,给企业带来了很大的经济压力,使新技术在我国的普及和普及受到很大的限制^[5]。

（二）管理层面问题

1. 企业管理模式落后

我国一些汽修企业仍沿用着传统的家族式管理方式,没有形成一套科学的管理体系,没有一套标准化的经营程序。在人事管理方面,由于职责不明确、分工不明确以及工作效率不高,比如在维护车间的排班过程中,存在着排班现象以及维护人员在工作中的被动等待现象。在财务管理方面,存在账目不清晰、成本控制不到位等问题,严重影响了企业的经济效益,根据调研,我国中小汽配企业中,大约40%没有建立健全的财务管理制度。

2. 质量管理体系不完善

我国汽车修理企业普遍存在着对修理工作不够重视、缺少一套行之有效的质量控制系统等问题,在维护时,未严格按照维护规范及工艺规程进行,造成维护质量的不稳定。如一些4S店在换装零件时,不注意零件的质量,而采用了一些质量差的零件,这对汽车的安全运行造成了很大的威胁^[6]。另一方面,由于对汽车大修过程中存在的各种隐患,企业也没有对其进行有效地检验,从而不能及时地发现并消除隐患。

3. 缺乏有效的客户关系管理

目前很多汽修企业对顾客关系管理不够重视,与顾客的交流不够充分,在保养期间,没有将保养进展及出现的问题及时反馈给顾客,造成顾客的满意度降低。比如当顾客将汽车交付修理后,很久没有得到修理进度的通知,容易使顾客感到不安、不满意。同时由于缺乏有效的顾客回访机制,不能及时了解顾客的需要与意见,很难改善与提高服务品质。

（三）市场层面问题

1. 市场竞争无序

我国的汽修行业仍以小规模、小规模、个体修配为主,市场集中度不高,行业内竞争十分激烈。一些厂家采用价格低廉的价格竞争战略、降低维护标准,甚至采用假冒零部件来抢占市场。这一不公平的竞争,不但对消费者造成了极大的伤害,而且严重影响了市场秩序,同时我国轿车市场上出现不少假冒伪劣产品,甚至出现质量低劣的问题^[7]。

2. 配件市场混乱

汽车零部件市场上的商品种类繁多,质量良莠不齐,除原装配件及正规的辅件外,还有相当数量的假货。由于其制造技术以及产品质量不过关,极易造成汽车故障,与此同时,零部件的价格也不透明,甚至出现虚高的情况,消费者在选购饰品时,常常很难辨别饰品的品质及价钱,很容易被骗。

3. 行业标准不统一

当前,国内对汽车修理行业还没有一个统一的技术、服务标准,由于各公司对修理工艺和质量检验标准的不同,用户对修理公司的选择没有一个清晰的参照标准。比如在汽车发动机大修质量标准上,各个厂家在定义、实施上不尽一致,造成消费者权益

保护的难度，同时由于行业标准的不统一，也限制了我国汽车业的规范发展。

三、解决汽车修理问题的措施

（一）技术提升措施

1. 加大设备投入与更新

汽车修理企业要提高对车辆维护保养工作的重视，增加投资力度，对维护设备进行更新。企业可以根据自己的经营需要和发展计划，逐步淘汰落后的设备，引入先进的智能化和信息化维护设备，比如引进新的汽车故障检测仪器，高精度的四轮定位系统。此外，有关部门应制定优惠政策，对主动进行改造的企业，给予财政、税务等方面的补助，以促进其升级改造。

2. 加强技术人员培训与培养

要完善专业人才培养机制，与高职院校和职业院校加强协作，开展多样化、多元化的培训，在培养过程中，要注意把理论和实际操作相结合，要有针对性地进行培养，如对基层技师进行基本维护技术训练，对资深技师进行新工艺的训练。通过举办各类专业技能比赛、学术交流等，开阔眼界、提高业务素质，公司可建立内部培训激励机制，对绩效突出的科技人员进行激励，以激励其学习^[8]。

3. 推动新技术研发与应用

汽车修理企业要加强与汽车制造商和科研院所的协作，共同开发和开发新技术，积极参加本行业的技术标准，对新工艺的关键技术有一定的把握。比如对于新能源车的维护技术，企业可通过与各蓄电池制造商的合作，对蓄电池的工作机理及维护方法有较深的认识。国家要加强对新技术的研究和开发，建立专门的研究基金，以促进新技术的推广和应用。

（二）管理优化措施

1. 引入先进管理模式

采用现代企业的经营方式，改变传统的家族式经营方式，比

如通过对设备维护过程的优化，降低设备的损耗，提高设备的工作效率。制定科学的组织结构及岗位责任制度，确定各个部门及个人的责任，保证各项工作有条不紊地进行。在此基础上，要强化企业的信息管理，运用 ERP、CRM 等信息技术手段，提高企业的管理水平和运作效率。

2. 完善质量管理体系

公司应建立健全的品质控制系统，制订严谨的保养品质标准及作业流程，从进厂检验、故障诊断、修理操作到出厂检验等各个阶段，都要强化质量管理。如在设备维护工作中，实施修理员自我检查、班组长复查和质检人员终检的“三检”制，以保证维护质量达到规范要求。此外，对已修理的汽车，要有完善的维护记录，一旦发生质量问题，就可以追踪并处理^[9]。

3. 强化客户关系管理

建立以顾客为本的服务观念，强化顾客关系管理，并且建立完整的顾客资料库，对顾客的基本资料、车辆保养记录、服务要求等进行记录。负责汽车保养工作，及时与顾客交流，了解保养进展及存在的问题并征询顾客的意见，比如通过短信、微信等方式对用户进行维护。强化顾客回访，定期跟踪顾客，掌握顾客对售后服务的满意程度，及时处理顾客的抱怨及问题，进而提升顾客的忠诚度^[10]。

四、结语

本研究对汽车修理行业存在的问题进行了全面分析，并提出了具有针对性和可操作性的解决措施。通过案例分析验证这些措施在实际应用中的有效性，为汽车修理企业的发展提供有益参考。然而，汽车修理行业的发展是一个动态过程，随着汽车技术的不断创新和市场环境的持续变化，未来还会面临新的挑战和问题。后续研究可进一步关注新能源汽车、智能网联汽车等新兴领域的修理技术发展，探索适应行业新趋势的管理模式和市场规模，持续为汽车修理行业的高质量发展提供理论支持与实践指导。

参考文献

- [1] 张厚明. 我国新能源汽车充电桩新基建存在的问题与建议 [J]. 科学管理研究, 2020, 38(05): 83-86.
- [2] 张伟民. 探讨高职汽车教育人才培养模式的问题分析与对策 [J]. 时代汽车, 2024, (18): 114-116.
- [3] 袁韶华, 于秋祥, 焦文俊, 等. 汽车企业发展数字经济存在的问题及转型策略 [J]. 中国市场, 2024, (26): 185-190.
- [4] 孙青. 汽车销售服务企业财务内部控制存在的问题及对策分析 [J]. 知识经济, 2024, (24): 132-134.
- [5] 陈燕华. 汽车零部件企业成本管理存在的问题与对策分析 [J]. 首席财务官, 2024, 20(13): 96-98.
- [6] 郑旭然, 李生. 浅析电动汽车安全便捷出口海运存在的问题及对策 [J]. 水上安全, 2024, (12): 1-3.
- [7] 岳建东. 汽车制造企业财务内部控制存在的问题及应对措施 [J]. 当代会计, 2024, (07): 85-87.
- [8] 王安朋. 电子汽车衡安装调试的常见问题分析及质量控制措施 [J]. 中国标准化, 2024, (08): 178-181+185.
- [9] 李庆山, 赵长莉. 新能源汽车电气技术课程线上教学存在的问题与解决策略 [J]. 汽车维修技师, 2024, (06): 40-40.
- [10] 董燕, 徐秋玮. 汽车电子企业软件需求工作中从业人员存在的问题及其解决对策 [J]. 企业科技与发展, 2024, (02): 50-53.

储能变流器模块并联及其控制方式实现

吕怀明

杭州得诚电力科技股份有限公司, 浙江 杭州 311100

DOI:10.61369/EPTSM.2025030015

摘 要 : 随着可再生能源的快速发展与智能电网建设推进, 储能变流器模块并联技术成为提升系统容量与可靠性的关键。本文围绕储能变流器模块并联及其控制方式展开深入研究, 分析传统控制方式存在的问题, 重点探讨下垂控制、虚拟同步机控制等新型控制策略的原理与实现路径。通过理论推导与仿真分析, 揭示不同控制方式在功率分配、动态响应及稳定性方面的性能差异, 并针对现有控制方式的局限性提出优化思路。研究表明, 改进后的控制策略可有效提升模块并联系统的均流精度与抗干扰能力, 为储能变流器模块并联技术的工程应用与性能提升提供理论依据与技术支持。

关 键 词 : 储能变流器; 模块并联; 下垂控制; 虚拟同步机控制; 均流控制

Energy Storage Converter Module Parallel Connection and Its Control Method Realization

Lv Huaiming

Hangzhou Decheng Electric Power Technology Co., LTD., Hangzhou, Zhejiang 311100

Abstract : With the rapid development of renewable energy and the advancement of smart grid construction, the parallel technology of energy storage converter modules has become crucial for enhancing system capacity and reliability. This paper delves into the parallel operation and control methods of energy storage converter modules, analyzing the issues with traditional control methods and exploring the principles and implementation paths of new control strategies such as droop control and virtual synchronous machine control. Through theoretical derivations and simulation analyses, the performance differences in power distribution, dynamic response, and stability among various control methods are revealed, and optimization suggestions are proposed to address the limitations of existing control methods. The research findings indicate that the improved control strategies can significantly enhance the current accuracy and interference resistance of parallel module systems, providing a theoretical foundation and technical support for the engineering application and performance enhancement of energy storage converter module parallel technology.

Keywords : energy storage converter; module parallel; sag control; virtual synchronous machine control; current equalization control

引言

随着储能系统容量需求不断增大, 单台储能变流器已难以满足功率要求, 模块并联技术应运而生。通过将多个储能变流器模块并联运行, 可灵活扩展系统容量, 同时提高系统冗余性与可靠性。但模块并联运行也带来新的挑战, 如各模块间的功率不均、环流问题以及系统稳定性下降等, 这些问题直接影响储能系统的整体性能与使用寿命。因此, 研究高效可靠的储能变流器模块并联控制方式, 实现各模块间的精准功率分配与稳定协同运行, 对推动储能技术的大规模应用具有重要的现实意义。目前, 虽然已有众多学者针对储能变流器模块并联控制开展研究, 但在控制策略优化、多模块协同运行等方面仍存在进一步提升的空间, 亟需深入探索与创新。

一、储能变流器模块并联系统架构与运行特性

(一) 系统基本架构

储能变流器模块并联系统主要由多个储能变流器模块、直流侧储能单元、交流侧公共母线以及控制系统组成。各储能变流器

模块的直流侧分别连接储能电池、超级电容等储能单元, 实现电能的存储与释放; 交流侧通过滤波电路并联接入公共母线, 与电网或负载进行能量交互。控制系统是整个并联系统的核心, 负责监测各模块运行状态, 采集电压、电流等关键参数, 并根据控制策略生成驱动信号, 调节各模块的输出功率, 以实现系统稳定运

行与功率均衡分配。^[1]

（二）并联运行特性分析

在储能变流器模块并联运行时，由于各模块的参数差异（如器件特性、线路阻抗等）以及控制算法的细微偏差，会导致模块间出现功率不均现象。功率分配不均不仅会降低系统整体效率，还会使部分模块过载运行，加速器件老化，影响系统可靠性。此外，模块间还可能产生环流，环流的存在会增加系统损耗，引发额外发热，严重时甚至可能导致系统故障。同时，并联系统的动态响应特性与稳定性也面临挑战，当系统负载突变或电网电压波动时，需要各模块快速协同调整输出，以维持系统稳定运行。因此，深入理解并联系统的运行特性，是设计有效控制方式的前提。^[2]

二、储能变流器模块并联传统控制方式及局限性

（一）主从控制

主从控制是一种较为传统的储能变流器模块并联控制方式。在该控制模式下，系统选定一个模块作为主模块，其余模块为从模块。主模块采用恒压-恒频（V/f）控制，通过锁相环（PLL）技术与电压电流双闭环控制，维持交流侧输出电压的幅值与频率稳定；从模块则采用恒流控制，基于主模块下发的电流指令，通过电流内环调节输出电流，实现功率跟随。主从控制的优点在于控制逻辑简单，硬件成本较低，在初期中小功率储能系统中有一定应用，例如在一些分布式光伏发电配套的小型储能项目中，可快速搭建起并联系统。

然而，该控制方式存在明显缺陷。主模块承担了系统电压频率调节的全部任务，其可靠性成为系统运行的关键瓶颈，一旦主模块发生功率器件损坏、控制芯片故障等问题，整个系统将失去电压频率支撑而无法正常运行。同时，从模块仅被动跟随主模块指令，由于各模块间线路阻抗、器件参数存在差异，难以实现各模块间的精准功率分配，据实测数据显示，在多模块并联时功率分配误差可达15%-20%，限制了系统容量扩展能力与运行效率。

（二）集中式控制

集中式控制通过设置中央控制器对所有储能变流器模块进行统一管理与控制。中央控制器基于高速采样技术，实时采集各模块的电压、电流、温度等运行参数，利用优化算法，根据系统功率需求与各模块状态，计算出每个模块应输出的功率指令，并通过高速通信总线将指令下发至各模块执行。相较于主从控制，集中式控制通过全局信息优化，在功率分配精度上有所提升，可更好地实现模块间的协调运行，在早期中等规模储能电站中曾被广泛应用。

但该方式对通信系统依赖度极高，通信延迟、数据丢包等问题会导致控制滞后，当模块数量超过10个时，通信延迟可达5-10ms，严重影响系统动态响应性能；一旦通信线路出现故障，将导致整个系统失控。并且，随着并联模块数量增加，中央控制器需要处理的数据量呈指数级增长，计算与通信负担加重，系统

响应速度变慢，扩展性较差。例如，在百兆瓦级储能电站场景下，传统集中式控制难以满足大规模模块快速协同控制的需求，难以适应现代储能系统向大容量、高可靠性方向发展的趋势。

（三）传统控制方式的局限性

主从控制与集中式控制在储能变流器模块并联应用中，虽在特定场景下能发挥一定作用，但都无法有效解决功率不均、可靠性低以及扩展性差等核心问题。这些传统控制方式在面对复杂多变的运行工况，如新能源发电功率剧烈波动、电网电压频率突变时，难以实现各模块间的高效协同与稳定运行。其控制架构的固有缺陷，导致无法充分发挥多模块并联的优势，难以满足新型电力系统对储能变流器高动态响应、高可靠性、高灵活性的要求，亟需探索更先进的控制策略以适应储能技术的发展需求。^[3]

三、新型储能变流器模块并联控制方式及实现

（一）下垂控制

下垂控制是一种基于分布式控制理念的储能变流器模块并联控制策略，其核心思想是通过模拟同步发电机的外特性，建立输出电压幅值、频率与输出功率之间的下垂关系，使各模块能够根据自身输出功率自动调整输出电压与频率，实现功率自主分配。在下垂控制中，常见的控制方程为： $f=f_0-k_{pf}P$ ； $V=V_0-k_{qv}Q$ 其中， f 和 V 分别为模块输出频率与电压幅值， f_0 和 V_0 为额定频率与电压， P 和 Q 为模块输出的有功功率与无功功率， k_{pf} 和 k_{qv} 为下垂系数。通过合理设计下垂系数，可使各模块在不同负载下实现近似均匀的功率分配。下垂控制无需复杂的通信网络，具有较强的扩展性与可靠性，在分布式储能系统中得到广泛应用。但该控制方式也存在不足，下垂特性会导致系统电压与频率存在一定偏差，且在动态响应过程中，容易出现功率振荡现象。^[4]

（二）虚拟同步机控制

虚拟同步机控制（VSG）通过模拟同步发电机的运行特性，赋予储能变流器转动惯量与阻尼特性，使其具备惯性响应与一次调频能力，有效提升系统稳定性与动态性能。虚拟同步机控制主要包括机械方程与电磁方程的模拟：机械方程： $J\frac{d\omega}{dt}=T_m-T_e-D(\omega-\omega_0)$ ，电磁方程： $L\frac{di}{dt}+Ri=e-u$ 其中， J 为虚拟转动惯量， ω 为角频率， T_m 和 T_e 。

分别为机械转矩与电磁转矩， D 为阻尼系数， L 和 R 为虚拟电感与电阻， e 和 u

分别为虚拟电动势与端电压。通过对这些方程的求解与控制，虚拟同步机控制可使储能变流器在功率分配、频率调节以及抑制电网电压波动等方面表现出与同步发电机相似的特性，增强系统的稳定性与抗干扰能力。不过，虚拟同步机控制参数设计较为复杂，需要综合考虑系统多种因素，且在多模块并联时，各虚拟同步机之间的协调控制仍需进一步研究优化。

（三）自适应控制

自适应控制是针对储能变流器模块并联系统参数时变与不确定性问题提出的一种控制方式。该控制方式通过实时在线辨识系

统参数，并根据辨识结果自动调整控制参数，使系统在不同工况下始终保持最优运行状态。例如，采用模型参考自适应控制（MRAC），通过建立参考模型与实际系统模型，利用两者输出误差实时调整控制器参数，实现对系统的精确控制。自适应控制能够有效应对模块参数差异、负载变化以及外部干扰等因素影响，提升系统的鲁棒性与控制精度。但自适应控制算法计算复杂度较高，对硬件计算能力要求较强，在实际应用中需要权衡控制性能与计算资源消耗。^[5]

四、储能变流器模块并联控制方式的优化与改进

（一）混合控制策略

为充分发挥不同控制方式的优势，弥补单一控制方式的不足，可采用混合控制策略。例如，将下垂控制与虚拟同步机控制相结合，在稳态运行时利用下垂控制实现模块间的功率均衡分配；在系统发生扰动或动态过程中，借助虚拟同步机控制的惯性响应与一次调频能力，快速稳定系统频率与电压，提升系统动态性能。通过合理设计控制逻辑与切换机制，可使混合控制策略在不同工况下均能实现高效稳定运行。

（二）基于智能算法的参数优化

针对下垂控制、虚拟同步机控制等方式中参数设计复杂的问题，可引入智能算法进行参数优化。如利用粒子群优化算法（PSO）、遗传算法（GA）等，以系统功率分配精度、电压频率稳定性等为优化目标，在参数空间内进行全局搜索，寻找最优控制参数组合。智能算法的应用能够提高控制参数的优化效率与准确性，进一步提升控制方式的性能表现。

（三）分布式协同控制

为降低对集中式通信与控制的依赖，提升系统扩展性与可靠性，可研究分布式协同控制技术。通过在各模块间建立局部通信网络，各模块仅需与相邻模块交换少量信息，即可实现分布式协同控制。例如，采用一致性算法，使各模块通过信息交互逐步达成对系统状态的共识，进而实现功率均衡分配与系统稳定运行。分布式协同控制能够有效减少通信负担，增强系统抗故障能力，适应大规模储能变流器模块并联系统的应用需求。

（四）多时间尺度协调控制

储能变流器模块并联系统在运行过程中，涉及不同时间尺度的动态响应需求，从毫秒级的功率快速调节到分钟级的能量优化管理，单一控制策略难以满足全时间尺度的性能要求。多时间尺度协调控制通过划分控制层级，实现不同时间尺度下的协同优化。在硬件层面，构建包含快速响应的底层控制器与慢速优化的上层控制器的分层架构。底层控制器基于实时采样数据，采用比例-积分-微分（PID）控制或滑模控制等快速控制算法，在毫秒级时间尺度内完成功率均衡与电压稳定；上层控制器则以分钟或小时为周期，根据电网电价、新能源预测功率等信息，利用模型预测控制（MPC）或动态规划算法（DP），对各模块的充放电功率进行优化分配，实现能量的经济高效利用。

通过设计时间尺度匹配的通信与协调机制，确保上下层控制指令的无缝衔接。例如，上层控制器将优化后的功率指令分解为底层控制器可执行的参考信号，并预留一定的调节裕度；底层控制器在执行过程中，将实际运行状态反馈至上位机，为上层优化提供数据支持。在某新能源储能电站仿真中，多时间尺度协调控制使系统整体运行效率提升 15%，同时有效降低了电池的充放电损耗，延长了储能设备的使用寿命。^[6]

五、结束语

本文围绕储能变流器模块并联及其控制方式展开深入研究，分析了传统控制方式的原理、特点及局限性，重点探讨了下垂控制、虚拟同步机控制、自适应控制等新型控制方式的实现原理与性能表现，并针对现有控制方式提出优化改进方向。研究表明，新型控制方式在解决模块间功率分配、提升系统稳定性与动态响应等方面具有明显优势，但也各自存在一定局限性。通过采用混合控制策略、基于智能算法的参数优化以及分布式协同控制等优化手段，可进一步提升储能变流器模块并联系统的性能。未来，随着储能技术的不断发展与智能电网建设的推进，储能变流器模块并联控制技术仍需在多模块协同优化、抗干扰能力提升以及新型电力系统的适配性等方面开展更深入的研究，以满足大规模储能系统安全、高效运行的需求，推动能源转型与可持续发展。

参考文献

- [1] 李君，徐德鸿，郑家伟，等. 超导储能系统用多模块电流型变流器载波轮换均流方法 [J]. 中国电机工程学报，2004，24(7):6.DOI:10.3321/j.issn:0258-8013.2004.07.020.
- [2] 朱利锋，吴彬峰，宋恩亮，等. 主从结构下储能变流器并联运行建模与附加控制 [J]. 电力系统及其自动化学报，2022(007):034.
- [3] 陈忠. 电池储能功率调节系统及其控制策略研究 [D]. 合肥工业大学，2014.DOI:10.7666/d.Y2552434.
- [4] 李君. 电流型超导储能变流器关键技术研究 [D]. 浙江大学，2005.
- [5] 徐少华. 储能变流器并联仿真分析 [C]// 中国电工技术学会学术年会——新能源发电技术论坛论文集. 2013.DOI:ConferenceArticle/5af18b65c095d71bc8c5f5f6.
- [6] 徐戎，王跃，潘高峰，等. 基于双下垂控制的船舶直流组网储能变流器控制方法 [J]. 控制与信息技术，2020(3):5.DOI:10.13889/j.issn.2096-5427.2020.03.014.

660MW 超临界 W 火焰锅炉上部水冷壁拉裂治理研究

王康¹, 王玲洋²

1. 国家电投集团贵州金元股份有限公司, 贵州 贵阳 550081

2. 贵州金元茶园发电有限责任公司, 贵州 毕节 551800

DOI:10.61369/EPTSM.2025030017

摘 要 : 聚焦某火电厂两台 660MW 超临界参数 W 火焰锅炉上部水冷壁管频繁拉裂现象, 开展致裂机理分析。在此基础上, 针对水冷壁管温差大、膨胀受限及炉墙晃动叠加效应三个方面的致裂原因进行对应治理策略研究, 并加以实施。实施后的机组运行情况表明, 措施行之有效, 可作为同类型机组运维借鉴, 也可作为该型锅炉预防性检修的重要手段。

关 键 词 : W 火焰锅炉; 水冷壁管; 拉裂; 机理分析; 治理研究

Research on the Treatment of Upper Water-Cooled Wall Tearing in 660Mw Supercritical W Flame Boiler

Wang Kang¹, Wang Lingyang²

1. State Power Investment Corporation Guizhou Jinyuan Co., Ltd., Guiyang, Guizhou 550081

2. Guizhou Jinyuan Tea Garden Power Generation Co., Ltd., Bijie, Guizhou 551800

Abstract : Focusing on the frequent tearing phenomenon of the upper water-cooled wall tubes of two 660MW supercritical parameter W flame boilers in a certain thermal power plant, the cracking mechanism analysis is carried out. On this basis, corresponding treatment strategies are studied and implemented to address the causes of cracking in three aspects: large temperature difference, limited expansion, and combined effect of furnace wall shaking in water-cooled wall tubes. The operation of the unit after implementation shows that the measures are effective and can be used as a reference for the operation and maintenance of similar units, as well as an important means of preventive maintenance for this type of boiler.

Keywords : W-shaped flame boiler; water-cooled wall tube; tension crack; mechanism analysis; treatment research

引言

“双碳”背景下, 新型电力系统中新能源比例的不断增高, 对传统燃煤发电机组的运行方式提出了新的要求。该厂两台 660MW 超临界参数燃煤发电机组是区域骨干电源点, 是区内基础负荷和调峰、调频的主要支撑。针对现有矛盾加强预防性检修, 采取行之有效的治理措施, 提升设备可靠性, 减少主、辅设备故障造成非计划停机, 为区域能源保供提供可靠支撑, 对提高火电企业核心竞争力, 意义重大。

因超临界参数 W 火焰锅炉固有的结构特性, 国内同类型机组水冷壁拉裂造成锅炉停运或降出力的问题普遍存在。该火电厂 2 台 660MW 超临界变压直流炉自 2015 年投运至今, 一直受到水冷壁管频繁拉裂的困扰。针对锅炉机组存在的这一现实问题, 论文聚焦拉裂频次高的上部水冷壁, 开展造拉裂机理分析, 提出系列治理措施, 旨在为预防性检修奠定基础。^[1]

一、水冷壁管拉裂情况

缝。1 号炉冷灰斗水冷壁有 8 条裂缝, 2 号炉冷灰斗有 5 条裂缝。

从 2016 年至 2020 年, 该火电厂 1、2 号炉因水冷壁拉裂引发机组非计划停运 12 次, 其中上部水冷壁拉裂的次数有 6 次, 占比 50%。

因应力长期存在, 在前墙和灰斗均形成水冷壁鳍片大范围裂纹。两台锅炉前墙上部水冷壁各有 3 条长度在 10 米左右的拉裂裂

二、水冷壁拉裂机理分析

结合两台锅炉因水冷壁拉裂停炉后观察到的实际情况及机组运行历史数据, 进行水冷壁拉裂机理研究, 分析造成这一问题的原因

作者简介:

王康 (1974.04-), 男, 汉族, 湖北武汉人, 大学本科, 工程师, 从事的研究方向: 火电机组锅炉可靠性技术管理。

王玲洋 (1995.01-), 男, 汉族, 重庆忠县人, 大学本科, 工程师, 从事的研究方向: 燃煤火力发电厂。

主要包括管壁温差大、水冷壁管膨胀受限和炉膛燃烧工况不稳造成炉墙晃动引起水冷壁间拉扯等三个方面。

（一）管壁温差大

超临界 W 火焰锅炉炉膛较宽，受制于下炉膛结构只能采用垂直管圈，缺乏四角切圆或对冲炉型的螺旋管圈

均温手段，锅炉水冷壁温控制难度大。尤其是在锅炉启动和低负荷工况下，仅有部分磨煤机和燃烧器投入运行，水平方向上的热负荷极不均匀的加剧水冷壁的热偏差。^[2]

变负荷工况：当锅炉由高负荷向低负荷变化时，要降低磨煤机负荷直至进行切磨处理，当磨煤机切除一台后，炉膛水平方向上的热负荷均匀性是恶化的，更易出现水冷壁热偏差大。当锅炉由低负荷向高负荷变化时，要提高磨煤机负荷直至投入新的磨煤机。新投入的磨煤机往往滚筒内有存粉，当再次启动时，大量的煤粉会迅速送入炉膛，造成对应燃烧器的水冷壁区域局部热负荷增加。

工质由湿态转向干态时超温：对于超临界锅炉，水冷壁管内工质既可能运行于超临界状态，也可能工作在汽水两相区域；即便在超临界压力下运行，水冷壁内工质的相变点也将随着负荷的变化而上下移动。在汽水两相区域，相同的压力差下，同一个水冷壁管组内的管子其结构、热负荷均相同时，管子内的流量是唯一的。但是，管子中的流量会随着时间的、负荷的变化而波动，进而管子的壁温也出现波动，从而引起管子的疲劳，而其中流量小的管子就会出现超温现象，导致管组温差大。

以上情况均会导致水冷壁管屏、管子之间存在一定热偏差，造成水冷壁管间承受较大应力，且该应力无法有效吸收、释放，随着锅炉启停次数及运行中汽温、壁温变化，应力反复作用，且刚性梁刚度不足，水冷壁管屏反复弯折，最终在相对薄弱的鳍片与管间部位因金属疲劳产生拉裂或挤裂。

（二）水冷壁管竖向膨胀受限

超临界参数 W 火焰锅炉因炉型特殊，分上下两部分悬挂，上部炉膛水冷壁设置有中混集箱，中混集箱虽与上部水冷壁一体，但其连接管设置了独立吊挂，连接管与中混集箱存在支撑关系，为上部水冷壁增加了一个中间悬挂点。

连接管恒力弹簧吊架设计选型标准低，未能充分吸收水冷壁下行膨胀位移，导致前墙上部水冷壁以该中间悬挂点为分界线，上部膨胀不足向外膨出，并给上部水冷壁沿水平方向晃动预留了柔性空间，尤其以结构简单、自身刚度不足的前墙上部水冷壁矛盾最为突出。

（三）上部炉墙晃动大

W 火焰锅炉水冷壁采用膜式水冷壁，在机组正常运行过程中，一是炉内正常燃烧时，燃烧场压力波动造成炉墙周期性晃动；二是在燃烧不稳、垮焦、炉膛瞬间爆燃等特殊情况，炉墙承受巨大压差变化引起大范围晃动。

第一种情况导致上部水冷壁周期晃动，水冷壁与刚性梁链接卡扣产生微量滑动累积，引发水冷壁沿水平方向收缩或拉伸，产生局部波浪变形，并在波峰部位产生应力疲劳；第二种情况在疲

2016年-2020年1号炉水冷壁拉裂位置				
序号	时间	设备名称（位置）	单位（mm）	备注
1	2016年4月	1号炉水冷壁炉膛上部第一管圈	500mm	
2	2017年1月	1号炉水冷壁炉膛上部第二管圈	400mm	
3	2017年4月	1号炉水冷壁炉膛上部第三管圈	300mm	
4	2017年7月	1号炉水冷壁炉膛上部第四管圈	700mm	
5	2018年10月	1号炉水冷壁炉膛上部第五管圈	1200mm	
6	2018年10月	1号炉水冷壁炉膛上部第六管圈	1000mm	
7	2018年10月	1号炉水冷壁炉膛上部第七管圈	800mm	
8	2018年12月	1号炉水冷壁炉膛上部第八管圈	200mm	
9	2019年1月	1号炉水冷壁炉膛上部第九管圈	600mm	
10	2019年1月	1号炉水冷壁炉膛上部第十管圈	1100mm	
11	2019年1月	1号炉水冷壁炉膛上部第十一管圈	600mm	
12	2019年1月	1号炉水冷壁炉膛上部第十二管圈	200mm	

图1 号炉水冷壁拉裂的时间和部位

劳部位引发撕裂泄漏。

三、水冷壁拉裂治理措施研究

针对前述三方面原因，分别开展治理措施研究，并结合现场实际加以实施。

（一）管壁温差大问题

一是加强水冷壁壁温控制：运行中相邻管壁温度和同一断面最高管壁温差均控制在50℃以内；机组启动时严控锅炉上水速率（一般情况都是控制在4小时以上）；机组停运后控制锅炉冷却速率（启风机强制冷却时间推迟12小时）。

二是主动疏导应力，对水冷壁采取主动开缝释放膨胀，并在开缝两段设置止裂孔阻断裂纹扩展。开缝部位设置 V 型密封，为水冷壁提供柔性约束，并密封炉墙。

开缝设计计算：鳍片拉裂，管子变形。根据现场实际情况，假定沿炉长方向管子变形10mm，沿炉宽方向管子变形20mm；

管道位移最大许用应力： $[\sigma]_a = f[1.25\sigma_c + 0.25\sigma_h]$ ， σ_c 和 σ_h 为低温、高温时的材料许用应力，取147MPa（20℃）、88MPa（500℃，设计温度高，放大了安全系数），全温度循环次数不超过14000， $f = 0.9$ ，计算得 $[\sigma]_a = 185.18MPa$

弹性模量 E 取186GPa（350℃，设计温度低，放大了安全系数），截面惯性矩 $I = \frac{\pi(D_o^4 - D_i^4)}{64} = 41009mm^4$

沿炉长方向管道位移 $y_{Bo} = 10mm$ ，沿炉宽方向管道位移 $y_{Bi} = 20mm$ ，以现让管起弧处为始点，开缝长度另一端为终点，裂缝长度 $l = 1300mm$ ，沿炉长方向始点等效压力根据挠度变形公式推导得 $y_B = \frac{F_l^3}{3EI} \Rightarrow F_o = \frac{3EIy_{Bo}}{l^3} = 104N$ ，沿炉长方向弯曲力矩 $M_o = F_o \cdot l = 135403N \cdot mm$ ；沿炉长方向始点等效压力 $y_B = \frac{F_l^3}{3EI} \Rightarrow F_i = \frac{3EIy_{Bi}}{l^3} = 208N$ ，沿炉宽方向弯曲力矩 $M_i = F_i \cdot l = 270805N \cdot mm$ ，合成力矩 $M_E = \sqrt{M_o^2 + M_i^2} = 302769N \cdot mm$ ；

管道最大位移应力范围： $\sigma_E = \frac{M_E}{W}$ ，其中截面系数 $W = \frac{\pi}{32D_o}(D_o^4 - D_i^4) = 1680mm^3$ ，所以最大位移应力范围 $\sigma_E = \frac{M_E}{W} = 180.22MPa$ ，小于位移许用应力 $[\sigma]_a = 185.18MPa$ ，符合要求。

V 型密封设计计算：

V 型密封夹角 90°，边长均为70mm，长度1500mm。

V型密封焊接连接鳍片，沿炉长（或炉宽）方向位移不超过3.8mm时，为弹性形变，当位移超过7.6mm时，将发生破坏性塑性形变。

当 V 型密封沿炉长（或炉宽）方向位移10mm时，V 型密封将对所连接水冷壁提供约 2.57×10^4N 约束力；位移20mm时，V 型密封将对所连接水冷壁提供约 5.13×10^4N 约束力。

外加 V 型密封在不同温度偏差时均可以有效降低水冷壁管横截面最大等效应力，并改变最大等效应力集中位置使最大等效应力在材料许用应力之下，对水冷壁管及鳍片能起到有效的保护作用，使之能够适应现实运行中遇到的问题，降低因水冷壁拉裂而带来的安全性和经济性问题。^[3]

（二）水冷壁管竖向膨胀受限问题

对恒力弹簧吊架重新选型，由原1.2位移系数调整为1.4位移系数，充分释放上部水冷壁下移膨胀量，使得上部水冷壁主要依靠顶部吊挂承重，向下膨胀自由，以自重张力增强上部水冷壁刚度，降低晃动幅度。

恒力弹簧吊架是一种解决超临界参数 W 火焰锅炉膜式水冷壁拉裂问题的水冷壁柔性性与刚性结合的垂直悬吊与邻墙角部铰接组合结构，包括横列弹性垂直悬吊件和刚性垂直悬吊件，横列弹性垂直悬吊件在锅炉每角设置9个，四个角共设置36个，按联络管系长度方向间隔布置，每个横列弹性垂直悬吊件两端分别固定连接在位于炉膛外的下水冷壁出口水平集箱管系及水冷壁入口水平集箱管系至竖直混合集箱管系之间的联络管系和锅炉中部大板梁上，刚性垂直悬吊件在锅炉左右两侧墙外中心位置各设置1个，每个刚性垂直悬吊件两端分别固定连接在位于炉外的下水冷壁竖直混合集箱管系顶部与和锅炉中部大板梁上，刚性悬吊件确定联络管系热膨胀死点。横列弹性垂直吊件弹性位移系数，指在设计位移量的基础上，预留位移余量，如位移系数1.4，即预留设计位移量的40%。主要为确保设备异常（如水冷壁温度超限、炉膛压力超限等）情况下，充分考虑水冷壁的允许弹性变形量，使其能够自由膨胀、发生弹性形变，不发生局部塑性变形。有限提升了炉膛内水冷壁管向下的膨胀自由，降低了鳍片及水冷壁管的应力水平，降低水冷壁被拉裂的风险。

（三）炉墙晃动大问题

一是在 A 侧标高约50m 处加装止晃装置，止晃装置与水冷壁连接点加装3mm 隔板一块，将该处预留间隙减至2mm，约束炉墙位移量，有效降制约前墙晃动，降低疲劳拉裂风险，如图3所示。

二是对所有刚性梁连接部位间隙予以复查，对安装间隙大的，使用套筒结构调至设计间隙至1mm，如图2所示。

在锅炉炉膛外相邻两面墙角45°角安装的铰接销轴与夹板套筒间隙配合铰链装置，其销轴与夹板套筒间的间隙为1mm，销轴活动穿过夹板套筒，夹板套筒采用两个，分别固定连接在双耳板的两个耳板孔上，双耳板的两个耳板之间插入单耳板且通过销轴与夹板套筒铰接，铰接销轴与夹板套筒间隙配合铰链装置在锅炉标高50m 处，与横列弹性垂直悬吊件和刚性垂直悬吊件相近标高位置，相近标高位置邻墙角部45°角安装铰接销轴与夹板套筒小间隙配合，间隙的存在保证了一定程度的膨胀自由，小的间隙取值限制了水冷壁邻墙角接位置的旷动位移，降低了过大位移传递于邻墙的应力，配合水冷壁柔性性与刚性结合的垂直悬吊，进一步有效降低了水冷壁管拉裂的风险。

同时在标高50m 层前墙刚性梁处沿炉宽方向增设5只液压阻尼器，如图3所示，液压阻尼器两端分别固定连接在前墙刚性梁下方

100mm 处竖梁上和锅炉炉墙的立柱上；阻尼器一端固定连接接长杆，另一端铰接于上滑动板上的铰接双耳，接长杆铰接在竖梁上，上滑动板底部两端分别通过剪力销固定连接在两下滑动板上，剪力销穿过上滑动板和下滑动板后采用上螺母和下薄螺母锁紧，双螺母锁紧限位更可靠，两下滑动板分别固定连接在两根 H 型钢上，两下滑动板与两根 H 型钢之间分别设置有加强筋板，能够提

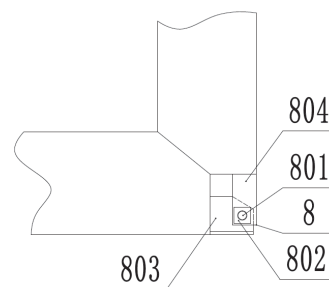


图2 连接部位套筒结构

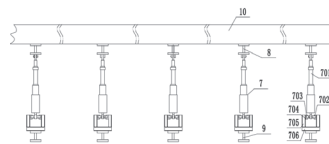


图3 前墙液压阻尼器

高两根 H 型钢同一侧端部固定连接在支撑横梁的两端部，支撑横梁中部固定连接立柱上，竖梁、支撑横梁和立柱为 H 型钢结构，立柱正对的支撑横梁中部处的设置加固板，提高支撑刚性和强度。

通过安装阻尼器，使 W 火焰锅炉的火焰负压气流波动对膜式水冷壁冲击作用下，膜式水冷壁固定连接在前墙上，液压缓冲器能够起到对前墙起到减震缓冲作用，进而使得膜式水冷壁能够在火焰气流的冲击下避免被损坏的概率，尤其是在膜式水冷壁焊接等薄弱处的损坏，将大幅减小锅炉运行期间炉墙晃动量，减少炉墙的交变应力。^[4]

四、结论

针对超临界参数 W 火焰锅炉固有结构特点和新形势下传统燃煤发电机组运行方式发生的根本性改变造成水冷壁频繁拉裂进而导致非计划停机和迫减负荷降出力问题，开展了造成水冷壁拉裂的机理研究，提出相应治理措施。措施实施后的情况表明，水冷壁炉墙晃动幅值降幅达75%，上部水冷壁未再发生拉裂情况，为同类型锅炉机组运维提供了借鉴，也为预防性检修奠定了良好基础。

五、遗留问题

以上治理措施较好的解决了该炉型上部水冷壁和下炉膛前后墙水冷拉裂问题。因设计结构问题，下炉膛角部、侧墙与下炉膛灰斗结合部易撕裂问题有待进一步优化局部结构予以解决。同时该炉型水冷壁鳍片设计厚度6mm，较内螺纹水冷壁壁厚大0.5mm，该矛盾会导致水冷壁应力集中区域优先撕裂水冷壁管壁导致泄漏频发，这一问题在锅炉出厂后无法优化，已反馈锅炉设计单位进一步优化设计标准。

参考文献

- [1] 徐金苗, 李伟科, 吴阿峰, 等. 600 MW 超临界 W 火焰锅炉水冷壁拉裂研究 [J]. 南方能源建设, 2017, 4(01): 49-52. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2017.01.008.
- [2] 王飞, 唐晓飞, 赵海峰. 锅炉炉墙局部晃动分析及处理 [J]. 华北电力技术, 2008, (01): 44-45. DOI: 10.16308/j.cnki.issn1003-9171.2008.01.007.
- [3] 王良伟. 超临界 W 火焰锅炉水冷壁变形、拉裂问题及对策 [J]. 中国设备工程, 2021, (01): 104-105.
- [4] 许好好, 鲍昕. 热力承压部件膨胀不畅引发的失效分析及防范 [J]. 中国特种设备安全, 2014, 30(12): 47-50.

电力工程管理中技术管理与工程风险管理的融合路径

曾艳

身份证号: 520102198308033447

DOI:10.61369/EPTSM.2025030022

摘 要： 电力工程管理涉及技术与风险管理融合。介绍全生命周期等技术管理要素、风险识别等风险管理体系，阐述两者协同价值及影响因素，提出 PDCA 框架、智能决策平台等融合措施，并通过案例及模拟验证效果，强调融合对电力工程的重要性。

关 键 词： 电力工程管理；技术管理；风险管理

The Integration Path of Technical Management and Engineering Risk Management in Power Engineering Management

Zeng Yan

ID: 520102198308033447

Abstract： Power engineering management involves the integration of technology and risk management. This paper introduces technical management elements such as the full life cycle and risk management systems like risk identification, elaborates on the synergistic value and influencing factors of their integration, proposes integration measures including the PDCA framework and intelligent decision-making platforms, and validates the effectiveness through case studies and simulations, emphasizing the importance of integration in power engineering.

Keywords： power engineering management; technical management; risk management

引言

随着电力行业的快速发展，电力工程技术管理与风险管理的融合成为关键课题。2023 年相关能源政策强调了电力工程高质量发展的重要性，要求在保障安全可靠运行的同时提高管理效率。电力工程技术管理涉及全生命周期管理、标准化体系及智能化技术应用等核心要素，而风险管理涵盖风险识别、评估、应对与监控四个维度。二者协同能带来经济安全效益，但受设备可靠性、环境复杂性和人员专业度影响。构建基于 PDCA 循环的标准框架、智能决策支持平台以及融合路径体系等是实现融合的关键举措，对保障电力工程顺利进行具有重要意义。

一、电力工程技术管理与工程风险管理理论框架

（一）电力工程技术管理核心要素

电力工程技术管理涵盖多个核心要素。全生命周期管理至关重要，它贯穿电力工程从规划到退役的全过程，涉及项目前期的可行性研究、设计阶段的优化、施工建设的质量把控以及运营维护和最终的报废处理等各个环节，确保工程在每个阶段都能实现技术与经济的最优结合^[1]。标准化体系是保障工程质量和技术规范的基础，通过制定统一的标准和规范，使得电力工程的各个环节都有章可循，减少因标准不一致导致的技术问题和安全隐患。智能化技术应用是当今电力工程技术管理的发展趋势，如智能电网技术、自动化监测系统等的的应用，提高了工程的运行效率和可靠性，同时也为技术管理提供了更精准的数据支持和决策依据。

（二）工程风险管理理论体系

工程风险管理理论体系涵盖风险识别、评估、应对与监控四

个维度，构成闭环管理体系。风险识别是基础，通过对电力工程各环节可能存在的风险因素进行全面、系统的识别，包括技术风险、环境风险、人为风险等^[2]。风险评估则是对识别出的风险进行量化分析，确定风险发生的概率和影响程度。基于评估结果，制定相应的风险应对策略，如风险规避、风险降低、风险转移和风险接受等。最后，风险监控贯穿整个工程过程，实时监测风险的变化情况，及时调整应对策略，确保风险管理的有效性和适应性，保障电力工程的顺利进行。

二、技术管理与风险管理的协同机制

（一）管理协同的工程价值机理

技术管理与风险管理的协同能够为工程带来显著价值。技术标准规范为工程实施提供了明确的准则和要求，而风险控制目标则聚焦于识别、评估和应对可能影响工程目标实现的不确定性因

素。两者之间存在紧密的耦合关系^[3]。当技术管理与风险管理协同运作时，一方面，技术标准规范的严格执行有助于降低风险发生的可能性，例如符合质量标准的施工技术可减少工程质量风险。另一方面，风险控制目标的设定和实施能够促使技术管理不断优化，例如针对高风险的施工环节，推动技术创新以提高安全性。这种协同效应最终将产生经济安全效益，保障工程在预算范围内按时高质量完成，同时避免因风险事件导致的经济损失和安全事故。

（二）动态关联影响因素分析

设备可靠性是影响技术管理与风险管理协同的关键因素。设备老化、故障等问题不仅影响技术实施效果，也增加了风险发生的可能性^[4]。例如，电力工程中的发电设备若可靠性低，可能导致停电事故，影响技术指标达成，同时引发经济、安全等风险。环境复杂性同样对二者协同产生作用。复杂的自然环境如恶劣天气、地质条件等，可能干扰技术操作，带来技术难题，也使风险难以预测和控制。人员专业度方面，技术人员专业知识和技能不足，可能无法正确实施技术方案，导致技术风险，同时在风险管理中也难以准确识别和应对风险，影响协同效果。

三、融合路径体系构建方法论

（一）顶层设计融合架构

1. 双维度管理标准体系

构建基于 PDCA 循环的技术 - 风险一体化标准框架是实现电力工程管理中技术管理与工程风险管理融合的关键。该框架应涵盖计划（Plan）阶段，明确技术与风险目标及策略；执行（Do）阶段，确保技术措施与风险防控措施的有效实施；检查（Check）阶段，对技术和风险相关工作进行监督与评估；处理（Act）阶段，根据检查结果进行调整与改进。通过 PDCA 循环的持续运转，不断优化技术 - 风险一体化管理流程，提高电力工程管理的效率和质量，增强对工程风险的应对能力^[5]。

2. 智能决策支持平台

为实现电力工程管理中技术管理与工程风险管理的融合，需构建智能决策支持平台。此平台应基于顶层设计的融合架构，整合相关技术与方法。其中，设计整合 BIM 与风险矩阵分析法的数字化管理系统架构是关键。通过 BIM 技术提供的三维可视化模型，可直观呈现电力工程的各个环节，包括技术细节与潜在风险点^[6]。同时，风险矩阵分析法能对识别出的风险进行量化评估，确定风险等级。将两者有机结合在数字化管理系统架构中，实现信息的实时共享与交互，为智能决策提供准确、全面的数据支持，从而有效提升电力工程管理的效率与质量。

（二）实施层面操作路径

1. 技术风险评估矩阵

在电力工程管理中，构建融合路径体系需从实施层面操作路径中的技术风险评估矩阵入手。开发包含设备故障树与工艺参数的量化评估模型是关键步骤之一。通过对设备故障树的分析，能够明确可能导致故障的各种因素及其逻辑关系^[7]。同时结合工艺参

数，可以更准确地量化风险。这种量化评估模型能够为技术管理与工程风险管理的融合提供有力支持，使管理者能够更直观地了解风险状况，从而制定出更有效的风险管理策略，提高电力工程的安全性和可靠性。

2. 动态响应机制建设

基于实时监测数据建立风险预警与应急处置联动流程是动态响应机制建设的关键。通过对电力工程关键指标的实时监测获取数据，利用数据分析技术识别潜在风险^[8]。当风险指标达到预警阈值时，自动触发预警系统，同时将相关信息传递给应急处置团队。应急处置团队依据预先制定的应急预案，迅速采取措施进行应对，如调整工程进度、更换设备或改进技术方案等。在整个过程中，要确保信息的及时、准确传递，以及各部门之间的高效协作，从而实现风险的快速响应和有效控制，保障电力工程的顺利进行。

四、电力工程实践验证体系

（一）特高压建设项目案例设计

1. 技术参数风险管理

GIS 设备安装技术标准与风险控制点的匹配至关重要。在特高压建设项目中，GIS 设备的安装涉及多个技术参数。例如，安装环境的温湿度要求需严格控制，否则可能影响设备的绝缘性能，增加电气故障风险^[9]。其内部元件的装配精度也有明确标准，若不符合，可能导致局部放电等问题。同时，气体密封性检测是关键环节，泄漏将影响设备的正常运行，这与施工工艺及材料质量等风险控制点紧密相关。只有确保技术标准与风险控制点高度匹配，才能有效降低特高压建设项目中 GIS 设备安装的风险，保障电力工程的顺利进行。

2. 融合管理效益评估

通过蒙特卡洛模拟法验证管理融合后的成本节约效果。该方法能考虑多种不确定因素对成本的影响，通过大量随机模拟来预测成本的分布情况。在特高压建设项目中，技术管理与工程风险管理融合后，涉及到设备采购、施工进度、人力安排等多个方面的成本变动。利用蒙特卡洛模拟，可以模拟不同风险因素下的成本变化，如设备故障概率对维修成本的影响，恶劣天气对施工进度及相关成本的影响等。通过对比融合管理前后的模拟结果，可以直观地看到成本节约的效果，从而验证融合管理在特高压建设项目中的效益^[10]。

（二）新能源电站运维案例

1. 智能监测技术应用

在新能源电站运维中，智能监测技术应用至关重要。SCADA 系统作为核心监测工具，可实时采集电站设备运行数据，包括电压、电流、功率等。通过对这些数据的分析，能及时发现设备异常和潜在故障。同时，风险管理信息系统需与 SCADA 系统进行数据对接。对接方案的研究旨在确保数据的准确传输和有效利用。例如，当监测到设备某项参数超出正常范围，相关数据应即时传输至风险管理信息系统，以便及时评估风险等级，制定相应

的运维策略，从而保障新能源电站的稳定运行，提高运维效率，降低故障损失。

2. 风险处置效能分析

在新能源电站运维案例中，对风险处置效能进行分析至关重要。通过对比融合前后故障响应时间与经济损失的量化数据，能直观展现融合路径的效果。融合前，由于技术管理与工程风险管理相对独立，故障响应可能存在延迟，导致经济损失较大。例如，在光伏电站中，因技术监测与风险预警未有效结合，设备故障不能及时发现，维修成本增加。而融合后，借助高效的技术监测手段与风险预警机制协同作用，故障响应时间大幅缩短。如智能监测系统能迅速定位故障点，同时风险评估模块及时给出应对策略，减少了维修时间和经济损失，有效提升了风险处置效能。

（三）城市电网改造项目

1. 地下管廊协同管理

在城市电网改造项目的地下管廊协同管理中，涉及到有限空间作业技术规程与风险预案的集成应用。地下管廊环境复杂，有限空间作业技术规程至关重要。其涵盖了对作业人员的资质要求、设备的选用与操作规范等内容。同时，风险预案需紧密结合。针对可能出现的缺氧、有害气体泄漏等风险，制定详细的应对措施。包括实时监测气体浓度的设备配备，以及应急救援的流程和人员分工。在协同管理方面，各参与方需明确自身职责，严格按照技术规程操作，并确保风险预案的有效执行。通过这种集成应用，提高地下管廊作业的安全性和效率，保障城市电网改造

项目的顺利进行。

2. 社会效益综合评价

在城市电网改造项目社会效益综合评价中，构建包含供电可靠率与安全事故率的双重评价指标体系至关重要。供电可靠率反映了电网对用户持续供电的能力，通过对改造前后供电可靠率数据的对比分析，可直观展现改造项目在提升供电稳定性方面的成效。安全事故率则体现了电网运行的安全性，较低的安全事故率意味着改造后的电网更能保障人员和设备安全，减少因停电事故带来的经济损失和社会影响。综合考虑这两个指标，能够全面、客观地评估城市电网改造项目的社会效益，为后续的电力工程管理决策提供有力依据。

五、总结

电力工程管理中技术管理与工程风险管理的融合至关重要。通过提炼的三大核心机制，能够为两者融合提供坚实基础，明确融合的关键要素与逻辑架构。基于数字孪生技术的路径进一步深化了这种融合，利用其数字化、可视化等优势，精准模拟电力工程的全生命周期，实现技术与风险的实时动态管理。针对新型电力系统建设提出的优化建议，则从实际应用场景出发，考虑到新能源接入、智能电网发展等带来的新挑战与机遇，确保融合后的管理模式能更好地适应新型电力系统的复杂性与多样性，提升电力工程管理的整体效能与质量，保障电力系统的稳定可靠运行。

参考文献

[1] 李念超. 电力工程管理数据挖掘模型设计与实践探析 [J]. 电子制作 ,2014(7X):2.
[2] 隋春明. 基于数据挖掘技术的电力营销分析系统的设计与实现 [D]. 电子科技大学 ,2015.
[3] 申培培. 数据挖掘技术在电力精益生产管控系统的应用研究 [D]. 华北电力大学 ,2015.
[4] 杨楷. 网络计划算法在电力工程管理中的应用 [D]. 华北电力大学 (保定) ,2005.
[5] 张国欣. 国网电力工程总承包风险管理研究 [D]. 华中科技大学 ,2020.
[6] 伍勇辉. 电力工程技术管理的难点与方法 [J]. 科技致富向导 ,2015, 000(008):365-365.
[7] 王佐道. 电力工程中的技术管理难点与对策 [J]. 中国科技期刊数据库 工业 A, 2021(1):2.
[8] 曾春祥. 电力工程中的技术管理难点与对策 [J]. 集成电路应用 ,2020, 37(10):2.
[9] 胡伟. 关于电力工程中的技术管理难点与对策 [J]. 品牌研究 ,2020,(32):95,181-95,181.
[10] 吕巍. 电力工程技术管理反思与探索 [J]. 环球市场 ,2017,(35):191-191.

“双碳”目标下中国电力系统低碳转型的技术路径与政策协同机制研究

杨昊瞳

东北电力科技咨询中心有限责任公司, 辽宁 沈阳 110000

DOI:10.61369/EPTSM.2025030023

摘 要： 本文以“双碳”为背景，以中国电力系统为研究对象，对我国电网的碳排放现状和实现目标所面临的挑战进行深入分析，对可再生能源规模化应用、火电清洁化及灵活性改造、储能及智能电网技术支持的低碳转型技术路径进行系统性梳理。由此建立“政策制定协调－实施监督－效果评价”四个方面的政策协同机制，对我国电力系统的低碳转型进行实证研究，为推动中国电力系统低碳转型提供理论与实践参考。

关 键 词： 双碳目标；电力系统；低碳转型；技术路径；政策协同机制

Research on Technical Path and Policy Coordination Mechanism of Low-Carbon Transformation of China's Power System under the “Double Carbon” Target

Yang Haotong

Northeast Electric Power Science and Technology Consulting Center Co., LTD., Shenyang, Liaoning 110000

Abstract： This paper, set against the backdrop of the 'dual carbon' goals, focuses on China's power system. It provides an in-depth analysis of the current status of carbon emissions in China's power grid and the challenges faced in achieving these goals. The paper systematically reviews the technical pathways for low-carbon transformation, including the large-scale application of renewable energy, the clean and flexible transformation of thermal power, and the support from energy storage and smart grid technologies. A policy coordination mechanism is established, encompassing four key areas: policy formulation, implementation supervision, and effect evaluation. This mechanism aims to conduct empirical research on the low-carbon transformation of China's power system, providing both theoretical and practical references for promoting this transformation.

Keywords： dual carbon target; power system; low-carbon transformation; technical path; policy coordination mechanism

引言

在全球气候变化背景下，冰川消融和海平面上升等环境问题对人类的生存和发展构成了严峻的挑战，因此减排已成为当今世界各国的共识。中国是世界上第一个最大的发展中国家，也是最大的碳排放国，在2020年就已经明确提出“双碳”的目标，即要在2030年之前碳达峰，到2060年达到碳中和。作为碳排放的“主力军”，电力企业在2022年的碳排放量中所占比例超过40%，其低碳转型是“双碳”目标的关键。本文以我国为例，通过对我国电网低碳化发展过程中的关键技术和政策协同机理的深入研究，可为我国能源经济和环境学科的发展提供新的思路，填补相关研究在两者深度融合方面的空白。在实践方面，可以为电力企业降低转型成本，提高竞争能力，提出可行的转型方向和技术方案。在此基础上，本文还将为政府部门优化相关政策的制定和实施，推动各政策之间的协同协作，提升政策执行效率，进而加快我国电网的低碳转型。

一、中国电力系统碳排放现状与挑战

（一）中国电力系统碳排放现状分析

在未来几年内，火电将在全国范围内保持52%的装机容量，

而燃煤发电在火电装机中所占比重将超过80%。以煤为主体的能源结构决定了我国电网的高碳排放强度。在碳排放量方面，2010–2020年间，电力工业的碳排放量继续增加，至2020年约为46亿吨，近几年在新能源的大力开发下，这一增长势头得到缓和，但

作者简介：杨昊瞳（1996.03–），男，满族，辽宁锦州人，学历：本科，职称：助理工程师，建筑电气与智能化专业，从事的研究方向或工作领域：电力。

是其总量仍然很高。在此基础上，提出一种新的节能减排模式，以发电单位的碳排放量计算，目前国内燃煤电厂的碳排放量在800克/度左右，而德国燃煤电厂的二氧化碳排放量可以达到600克/度。这反映出我国电力系统在能源利用效率、清洁技术应用等方面仍有较大提升空间^[1]。

（二）实现“双碳”目标面临的挑战

能源重组困难重重，一方面，由于我国具有丰富的煤炭资源和巨大的煤电行业，煤电的退出关系到大量的固定资产和就业机会，如果大规模关闭燃煤电厂，经济损失将达几千亿，几十万人的工作岗位也将受到影响。而新能源发电具有间歇性和波动性的特点。另一方面，对于风力发电来说，由于风力发电的不稳定性，其大规模地并网将给电网带来巨大的冲击。“三北”地区风电、光伏资源丰富，但当地消纳容量受限，跨区传输走廊建设滞后导致弃风弃光问题突出。

在技术层面，储能技术是制约可再生能源大规模发展的关键瓶颈，目前锂离子电池储能存在成本高、寿命短问题，每千瓦时储能成本约为0.5–0.8元，且循环充放电次数有限；抽水蓄能受地理条件限制，建设周期长，智能电网技术在电力系统中的应用也不够深入，电力需求侧响应机制不完善，无法充分发挥用户侧调节作用。

另外，缺乏政策的协同性是制约我国电网低碳转型的重要因素，国家发改委、能源局和生态环境部等多个部门共同参与电力行业的低碳转型，各个部门的政策目标和重点也不尽相同。比如国家能源局主要负责能源重组和新能源的开发。目前的环保部门主要侧重于污染物的减排和控制，缺少有效的政策交流和协调，造成政策实施的低效。而且，由于新能源补贴政策和电价政策的差异，各区域之间缺少有效的协作，使得我国电力系统的低碳经济发展面临严峻挑战^[2]。

二、“双碳”目标下电力系统低碳转型的技术路径

（一）可再生能源发电技术规模化应用

近几年来，风力发电技术得到了快速的发展，陆地风力发电系统的单机容量也在逐渐增加，从最初的1.5MW到6MW,8MW，乃至更多。增大叶片的长度可使风力发电的效率得到改善。目前，海洋风力发电已经成为一个热门的研究方向，而我国已经具备了适合深海开发的浮式风力发电技术，但是由于电网的落后，一些地方的风力发电系统的失水率已经达到15%。因此在今后的工作中，还需要进一步加强对风力发电的预报技术的研究，以提高其预报的准确性，加快电网扩容并且提高风力发电容量。

在光电领域取得重大的革新，晶硅太阳能电池的光电转化效率已经取得了突破性的进展，目前实验室的光电转化效率已经达到26.8%和23%；钙钛矿型太阳能电池是近年来发展最快的一项技术，具有广阔发展前景^[3]。在工业园区和住宅屋顶，分布式光伏发电将得到广泛的推广，截至2023年，太阳能发电将超过一亿千瓦。但目前光伏发电成本仍然偏高，需要通过“光伏+”的方式，如光伏农业、光伏建筑等，进一步降低组件成本，提升系统集成效率并且扩大其应用范围。

同时，水电是我国可再生能源中最主要的一种可再生能源，例如以金沙江和雅砻江为主的大水电基地为重点，加大对老水电站的技改力度，提高水电的利用效率。自行研制的“华龙一号”已经并网发电，其安全性能已经达到了世界领先水平，将在保障能源安全、降低碳排放方面发挥重要作用。另外，生物质发电对农林废弃物的处理，供热和供电都有一定的优越性，部分地方已经实现了地热发电的商业利用，并具有很大的开发潜力^[4]。

（二）火电清洁化与灵活性改造技术

随着燃煤洁净化技术的发展，超超临界机组在我国得到越来越多的应用，其具有更高的蒸汽参数，发电效率可以达到45%，燃煤消耗可以达到10%–15%，同时还可以显著降低二氧化碳的排放量。联合处理污染物的工艺已经比较成熟，利用脱硫、脱硝和除尘装置，可以有效地降低SO₂、NO_x和粉尘的排放。国内已开展了CCUS技术的试验研究，例如鄂尔多斯地区的CCUS工程，已成功地将CO₂捕获、封存和利用，但由于其昂贵的价格，使得其规模化应用存在一定的经济和技术难题。

煤炭电力系统的适应性改造是一个迫切需要解决的问题，通过对锅炉和汽轮机等设备进行改造，可以将传统火电机组的调峰能力由原来的50–60%提高到30–40%。如通过旁通系统的改造，实现小负荷下的锅炉稳定燃烧，对机组的调整进行优化并且改善机组的响应能力。新建的燃煤机组具有较强的可再生能源消纳能力，提高电网的柔性，但其改造投资巨大，对机组的使用寿命也有一定的影响。

此外，天然气发电是一种清洁、高效和柔性的发电方式，其发电效率超过60%，而二氧化碳排放量只有燃煤发电的一半。在我国，天然气生产的区域和东部的电网负荷集中，是天然气的重要组成部分，因此要加大供气保障力度，加大管道气和液化石油气进口的力度^[5]。

（三）储能与智能电网技术支撑

能量存储是解决新能源发电系统间歇性问题的重要途径，目前使用最多的是锂离子电池，随着科技的发展，其能量密度已从100Wh/kg增长到300Wh/kg，成本不断降低，在过去的10年里，已经减少80%。而抽水蓄能电站作为一种最为成熟的大型储能方式，其装机规模已经突破4000多万千瓦，对调节电网峰谷、保障电网稳定具有重大意义。近年来，一些新的储能技术如压缩空气储能和飞轮储能得到了迅速的发展，并有望在不久的将来实现商业应用。

智能电网是实现电力系统低碳化的重要手段，工作人员采用智能电表和分布式电源监控等先进的检测和测试技术，可以实现对电网运行状态的实时监测，利用通讯技术，可以迅速地传递信息，建立电力物联网^[6]。而基于新能源发电预测和负荷变化的智能调度与控制技术能够对新能源发电方案进行优化，以达到精确的电能分配。通过电价激励和合同管理等手段，对用户进行优化。

三、“双碳”目标下电力系统低碳转型的政策协同机制

（一）政策体系现状与问题分析

目前，我国已经建立了一套覆盖多个领域的、以电网为核心

的并且面向社会的低碳转型的政策体系。《“十四五”现代能源体系规划》指出，截至2025年，我国非化石能源消耗比例将超过20%，风能和风能装机分别超过12亿千瓦，为新能源的发展指明明确的发展方向。随着我国节能减排力度的加大，国家能源局也在逐步提高燃煤发电系统的能效水平，新的燃煤机组的供电煤耗要控制在270克/千瓦时以内，并对污染物的排放进行严格的控制。在可再生能源的补贴政策中，风力发电和光伏发电行业的发展受到一定程度的大力推动，包括固定电价和度电补贴等^[7]。太阳能和风能的装机分别以300多倍和10多倍的速度增长，2021年，国家碳交易市场正式启动，第一批有2162个主要排放主体参与，涵盖45亿吨左右的CO₂排放，为发电企业的减排提供了市场激励。

但是目前的政策制度在协同方面存在着明显的缺陷，通过对新能源补贴的实证分析，发现在实施过程中存在着跨部门协作不足的问题。补贴资金的编制和分配由财政部和国家能源局负责，但因缺少有效的信息交流和交流机制，造成补助资金的发放滞后。由于各部门之间的责任界限不清，导致部分工程的重复申报，浪费了大量的资金，在区域政策协调上，东部发达地区为了引进新能源，纷纷推出较大的优惠政策。

（二）政策协同机制构建原则与框架

在构建政策协同机制时必须坚持三项核心原则。其中，系统性是指突破政策的行业壁垒和部门间的割裂，从全产业链的角度，将发电侧的能源结构调整政策、输电侧电网升级规划、配电网分布式电源接入、用电侧需求响应等政策有机结合起来，形成一个环环相扣、相互协同的政策体系，防止政策“各自为政”。

动态适应是指企业的政策要随着技术创新和市场的发展而变化，在未来10年内，光伏组件价格降幅超过80%、风力发电电价降幅超过40%的情况下，需要对补贴政策进行适时调整，由“输血式”补贴转向“引导式”补贴，使市场起到更好的配置资源的作用^[8]。

利益均衡是指通过制定阶梯电价和峰谷电价等制度，在保证发电企业收益的前提下，减少高能耗企业的用电费用，提升用户的节能热情，达到政府、企业和用户多方共赢的目的。

在此基础上建立“三个层次”的政策协同机制框架，由发改委、能源局、生态环境部和财政部等部门构成的多部门联合政策

制定小组为中心，采用定期召开联席会议和建立联合调研机制，对电力行业的低碳转型政策进行研究和制定，保证政策目标一致、措施互补。通过大数据和区块链等技术，建立政策实施的实时监测平台，跟踪项目审批进度、资金流向、企业减排效果等重要信息，并对实施中出现的偏差进行及时发现和纠正^[9]。

（三）政策协同机制的具体措施

建立常态化和制度化的交流机制，以增强决策部门之间的协调，成立能源低碳转型政策协调小组，以协调各部门间的交流对重要议题进行统筹协调。对各个部门的责任进行划分：

国家发改委负责制订宏观政策指导和产业规划，站在国民经济发展的全局上，为电力工业的低碳转型制定战略目标。能源局负责能源技术开发和产业管理工作，负责制订技术标准和项目审批细则。生态环境部侧重于对政策执行过程中的环境影响进行控制，建立严格的污染物排放标准和碳排放核算制度^[10]。

通过组建区域电网低碳转型协作联盟，可以加强区域之间的政策协同，“三北”地区与东部负荷核心区之间的协作，依托丰富的风能、风能等优势，打造一批规模较大的新能源基地；而东部则充分发挥技术和资金的优势，大力发展分布式能源，先进储能技术。在此基础上，通过签署区域能源合作规划，明晰两国在电力低碳转型过程中的职能定位和协作机制，协同推动特高压输电走廊的建设，促进“三北”新能源向东的高效输电。进而构建各地区之间的政策相互认可和协调机制，统一新能源项目的审批标准和补贴计算方法，形成全国电力系统低碳转型“一盘棋”格局。

四、结语

综上所述，实现“双碳”战略，重点在于电网的低碳化，本文从技术路径和政策协同机理两个层面，结合可再生能源开发、火电改造、储能和智能电网等技术发展方向，提出政策协调、实施监管和区域协同等政策协同对策。但是电网的低碳化是一项复杂的系统工程，今后仍需要继续关注新技术的发展对这一转变的驱动效应，完善政策协同机制，加强各地区、各利益主体之间的协作，为“双碳”目标的早日完成奠定基础。

参考文献

- [1] 韦东明，顾乃华. 城市低碳治理与绿色经济增长——基于低碳城市试点政策的准自然实验[J]. 当代经济科学, 2021, 43(04): 90-103.
- [2] 劳卫伦，蒋亚曼. 数碳融合助力企业绿色低碳转型发展[J]. 中国资源综合利用, 2024, 42(11): 236-239.
- [3] 陈诗一，许璐，吴海鹏. “双碳”目标下中国产业链绿色低碳转型的理论阐释与实现路径[J]. 广东社会科学, 2024, (05): 63-74+286.
- [4] 李靖云，周婧瑜，陈海涛，等. 双碳目标下新型电力系统规划与省域减排路径——以中国南方某省为例[J]. 北京理工大学学报（社会科学版）, 2024, 26(04): 68-75.
- [5] 曹晓路. “双碳”目标下激励我国低碳技术创新的法律机制研究[J]. 科技进步与对策, 2024, 41(05): 80-89.
- [6] 赵玉荣，刘含昉，李伟，等. “双碳”目标下我国电力部门低碳转型政策研究[J]. 气候变化研究进展, 2023, 19(05): 634-644.
- [7] 县祥. “双碳”目标下中国对外贸易绿色低碳发展路径及政策优化研究[J]. 价格月刊, 2023, (09): 45-54.
- [8] 任大伟，肖晋宇，侯金鸣，等. 双碳目标下我国新型电力系统的构建与演变研究[J]. 电网技术, 2022, 46(10): 3831-3839.
- [9] 阮文超. 建筑暖通空调工程节能技术的创新与应用研究[J]. 新城建科技, 2024, 33(10): 33-35.
- [10] 范斌，徐存良，苏均生，等. 制造业绿色转型支撑体系研究[J]. 邮电设计技术, 2024, (11): 7-11.