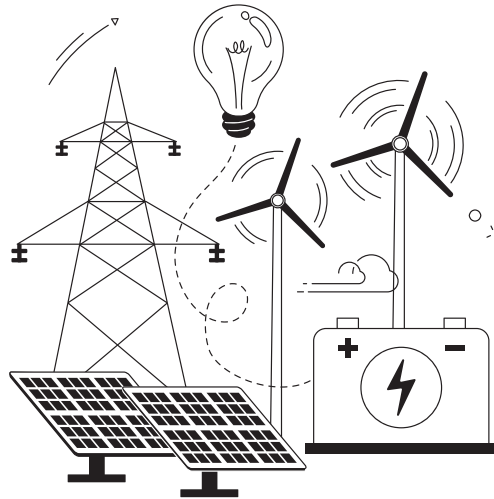


电力技术 与安全管理

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1期 2025年1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。



电力工程 | POWER ENGINEERING

- | | | |
|-----|---|---|
| 001 | “五送”提升零距离服务用电感知
"Five Deliveries" Enhance Zero Distance Service Electricity Perception | 白守平
Bai Shouping |
| 004 | 基于人工智能的新能源发电功率预测模型
Power Prediction Model of New Energy Generation Based on Artificial Intelligence | 马双龙, 裴志超, 李庆祥, 赖毓斌, 张骞
Ma Shuanglong, Pei Zhichao, Li Qingxiang, Lai Yubin, Zhang Qian |
| 007 | 电气自动化在电力工程建设中的核心作用研究
Research on the Core Role of Electrical Automation In Electric Power Engineering Construction | 郝文清
Hao Wenqing |
| 010 | 火电工程建设中的安全风险评估与管控
Safety Risk Assessment and Management in Thermal Power Plant Construction | 高静
Gao Jing |
| 013 | 核电站日常作业风险评估与管理
Daily Operation Risk Assessment and Management of Nuclear Power Plants | 王新兵
Wang Xinbing |
| 016 | 新能源电站投资实践与发展对策
Investment Practices and Development Strategies for New Energy Power Stations | 牛瑾
Niu Jin |
| 019 | 新能源风力发电发展的思路
Ideas for the Development of New Energy Wind Power Generation | 吴厚超
Wu Houchao |
| 022 | 电力优化营商环境中线路损耗管理对电力营销的影响及对策
Impact of Line Loss Management on Electric Power Marketing in the Optimized Business Environment of Electric Power Industry and Countermeasures | 李丽
Li Li |
| 025 | 核电站双层安全壳设计的起源、发展历程和趋势分析
Origin, Development and Trend Analysis of Double Containment Design for Nuclear Power Plants | 汪井春, 岳冲, 任根民
Wang Jingchun, Yue Chong, Ren Genmin |
| 028 | 数字孪生技术驱动下电力监管管理工程的智能化转型路径研究
Research on the Intelligent Transformation Path of Power Supervision and Management Engineering Driven by Digital Twin Technology | 钱忠
Qian Zhong |

电力系统 | POWER SYSTEM

- | | | |
|-----|---|---------------------------------|
| 031 | 模块化智能混合通信电源系统设计研究
Research on the Design of Modularized Intelligent Hybrid Communication Power Supply System | 周高英, 孙赫
Zhou Gaoying, Sun He |
| 034 | 新能源场站中性点不接地系统安全性提升
The Enhancement of Safety for Neutral Point Non-Grounded Systems in New Energy Stations | 周晓
Zhou Xiao |
| 037 | 水电与新能源联合发电系统协同优化生产管理策略
Collaborative Optimization of Production Management Strategy for Hydropower and New Energy Combined Power Generation System | 吴永琦
Wu Yongqi |
| 040 | 电力监控系统中安全防护技术及措施探析
Analysis of Safety Protection Techniques and Measures in the Electric Power Monitoring System | 李绪蛟
Li Xujiao |

技术研究 | TECHNICAL RESEARCH

043	东北地区新能源汽车渗透率研究 Research on the Penetration Rate of New Energy Vehicles in Northeast China	刘冰岩 Liu Bingyan
046	太阳能光伏发电效率提升方法研究 Research on Methods to Improve the Efficiency of Solar Photovoltaic Power Generation	陈玉松 Chen Yusong
049	智能问答系统中的隐私保护与数据安全技术研究 Research on Privacy Protection and Data Security Technology in Intelligent Question Answering System	张森达, 崔昕, 曲延刚, 刘博, 孙健 Zhang Senda, Cui Xin, Qu Yangang, Liu Bo, Sun Jian
052	汽轮机轴瓦温度异常故障的原因分析与检修优化 Cause Analysis and Maintenance Optimization of Abnormal Temperature Failure of Steam Turbine Shbush	班小宇 Ban Xiaoyu
055	基于振动分析的汽轮机故障预警与检修策略 Early Warning and Maintenance Strategy of Steam Turbine Fault Based on Vibration Analysis	刘庆 Liu Qing
058	新型耐磨涂层在火力发电厂高压阀门上的应用研究 Research on the Application of A New Wear-resistant Coating on High-pressure Valves in Thermal Power Plants	陈永波 Chen Yongbo
061	塔式熔盐太阳能光热发电技术分析 Analysis of Tower Molten Salt Solar Thermal Power Generation Technology	沈亚军 Shen Yajun
064	继电保护涉网定值一体化管控平台关键技术及应用研究 Research on Key Technologies and Applications of Integrated Control Platform for Relay Protection Involving Network Setting	单志伟 Shan Zhiwei
067	基于设备全寿命周期的燃煤火电厂电气检修策略优化 Optimization of Electrical Maintenance Strategy for Coal-Fired Power Plant Based on the Whole Life Cycle of Equipment	彭冲 Peng Chong
070	基于大数据分析的新能源电力项目储备潜力评估与预测模型构建 Construction of A Reserve Potential Evaluation and Prediction Model for New Energy Power Projects Based on Big Data Analysis	马斌, 王玲 Ma Bin, Wang Ling
073	演艺灯光设备智能化安装调试关键技术与应用研究 Research on Key Technologies and Applications of Intelligent Installation and Debugging of Performing Arts Lighting Equipment	张济邦, 雷喜文, 戎杰青 Zhang Jibang, Lei Xiwen, Rong Jieqing
076	基于 Co ₉ S ₈ 纳米片层自组装高倍率放电性能的钠离子电池负极材料结构调控研究 The Structure Design of High-Rate Discharge Performance Sodium-Ion Batteries Anode Based on The Self-Assembly of Co ₉ S ₈ Nanosheets	郭德才, 孙蔷 Guo Decai, Sun Qiang
079	永磁同步电机矢量控制中转速辨识方法优化 Optimization of Speed Identification Method in Vector Control of Permanent Magnet Synchronous Motor	张镜照 Zhang Jingzhao

“五送”提升零距离服务用电感知

白守平

国网青海省电力公司海东市乐都区供电公司, 青海 海东 810799

DOI:10.61369/EPTSM.2025010003

摘要： 在当今社会，电力已经成为人类生活和生产不可缺少的基本能源。为更好地满足用户用电需求，提高供电质量，供电公司积极开展“五送”活动，努力为用户提供“零距离”服务，全面提升用户用电感知。“五送”分别为送安全、送知识、送便利、送关爱、送实惠，从多个维度构筑了全方位的优质用电服务系统。

关键词： 电力服务；五送活动；便捷服务；电价优惠

"Five Deliveries" Enhance Zero Distance Service Electricity Perception

Bai Shouping

State Grid Qinghai Provincial Electric Power Company Haidong Ledu District Power Supply Company,
Haidong, Qinghai 810799

Abstract： In today's society, electricity has become an indispensable basic energy source for human life and production. In order to better meet the electricity needs of users and improve the quality of power supply, the power supply company actively carries out the "Five Deliveries" activity, strives to provide users with "zero distance" services, and comprehensively enhances users' perception of electricity consumption. The "Five Deliveries" refer to providing safety, knowledge, convenience, care, and affordability, and have built a comprehensive and high-quality electricity service system from multiple dimensions.

Keywords： power services; "Five Deliveries" activities; convenient service; electricity price discount

在电力普及的今天，供电服务质量直接关系到人民的生活质量和社会的稳定发展。电力作为城市基础设施的重要组成部分，其服务不能仅仅停留在供电层面，而是要向用户提供全方位的体验。“五送”活动就像一座桥梁，架起了电力企业和用户之间的桥梁。通过提供送安全、送知识、送便利、送关爱、送实惠等多个方面的服务举措，努力突破传统服务的限制，建立“零距离”、“贴心”的服务模式，切实提升用户的用电感知，打开电力服务新的篇章^[1]。

一、送安全：筑牢用电防护网

（一）安全用电

电力企业为用户提供了各种安全保障。组织电力专业技术人员到社区、学校、企事业单位开展安全用电知识讲座及培训。在讲座中，技术人员对家庭中常见的电气安全隐患进行了详细的讲解，例如插座过载，电线老化，湿手触摸等。同时，还结合实际例子，结合图片和视频演示，使用户对不安全用电可能产生的严重后果，如火灾、触电等，提高使用者的安全意识^[2]。

（二）用电安全隐患排查

电力企业安排工作人员主动到用户家中进行电气线路、配电箱、电气设备等的检查，及时发现和帮助用户排除隐患。比如，在一些老小区里，很多住户的电线都是很多年前铺设的铝线，这些铝线直径很小，而且绝缘层已经老化，很容易发生短路故障。在调查过程中，电力人员会对住户进行详细记录，并提出合理的整改建议及计划。对部分困难家庭和孤寡家庭，供电公司将为其

提供免费线路改造或更换部分电器，以保证其用电安全。

（三）现代信息技术

通过手机 APP、微信公众号等平台，定期向用户推送安全用电小提示、季节性用电安全提示、电气火灾防范知识等内容，使用户在任何时候都能获得安全用电信息，时刻保持对用电安全的警惕。这一系列的“送安全”举措，为用户筑起了一道坚固的电网，有效地减少了电力安全事故的发生^[3]。

二、送知识：开启电力科普窗

（一）电力科普展览

电力科普展一般设在城市公共区域或社区活动中心，展出内容涉及发电、输电、配电和使用等各个环节。采用实物模型、图文展板、多媒体演示等多种形式，将火电、水电、风电、太阳能等各种发电方式的工作原理及特点进行了直观的介绍；演示高压输电线、变电站等电力设施的构造与功能；介绍智能电表的原

理、电费计算方法等。例如，在风力发电展区内，放置一台小型风力发电机模型，当参观者转动叶片时，旁边的显示器就会将风力发电的过程及电量数据呈现出来，让民众切身感受到风能的奇妙^[4]。

（二）电力营业厅

在电力营业厅这个重要的服务前沿，开启了一扇电力科普之窗。这里不再仅仅是办理业务的场所，更是知识传播的阵地。利用客户等候办理业务时，利用营业厅内设置的电子显示屏，循环播放有关电力安全知识的动画片，将家庭用电安全要点和常见电气事故防范方法等内容，形象生动地展现出来。在宣传架上，摆放着各种各样的电力科普手册，包括电力设施保护的法律法规，新能源的介绍，节约用电的小窍门等等。与此同时，营业厅还定期举办小型科普讲座，请来专业人士对电费计价的原理和使用方法进行深入的讲解，使每个进入营业厅的顾客都能在轻松愉快的气氛中获得实用的电力知识，加深对电力行业的认识和了解。

（三）线上科普活动

电力公司也开展了网上电力知识问答和网上电力课堂等活动。通过参加这些活动，用户可以与电力专家互动交流，解答自己在用电过程中遇到的问题，加深对电力知识的了解。通过开展“送知识”活动，为广大用户打开了一扇通往电力世界的窗户，让电力不再神秘，让用户更方便地用电。

三、送便利：搭建服务高速路

（一）优化业务办理流程

通过“一站式”服务，电力企业可以在同一个营业厅或一个线上服务平台上办理用电申请、报装接电、缴纳电费、变更业务等业务，使用户少跑一趟，少等一会儿。比如，用户可在公司官网或手机 APP 上在线提交用电申请，提交相关信息后，系统自动审核、受理，并及时反馈进展情况。在报装接电环节，电力公司通过整合内部资源、优化建设流程，大大缩短了接电周期；对部分小微企业，实现“当天申请，次日接电”的高效率服务，有力地支撑了企业的生产和运营。

（二）拓展缴费渠道

在传统的营业厅缴费、银行代扣缴费之外，供电公司还积极与第三方支付平台进行合作，开发了多种线上支付模式，如微信支付、支付宝支付、云闪付等，只要动动手指，就能在任何地方、任何地点完成电费的支付，再也不受时间、地点的限制^[5]。同时，为方便附近居民缴费，供电公司还在一些人流量大的小区、商场、超市等场所设立了自助缴费终端。另外，为防止用户忘记交费造成停电，供电公司还推出了用电余额提醒服务，用户可通过短信、APP 推送等方式了解用电余额，提前做好缴费准备。

（三）完善客户服务体系

电力公司设立了 24 小时客服热线，只要客户有任何疑问，都可以通过客服热线得到专业的解答。客户服务人员会根据用户的需求，及时安排维修人员上门维修。同时，通过智能电表、物联

网等技术，实现电力设备的远程监控与故障预警。当发现电力设备有异常时，该系统会自动生成工作单，并将其分发给附近的维护人员，维护人员能够在最短的时间内赶到现场处理，从而极大地提高了故障处理的效率，缩短停电时间，为用户提供更稳定、更可靠的供电。这些“送便利”的举措，使电力公司真正做到“少跑腿”、“办实事”，大大提高了用户对用电服务的满意度^[6]。

四、送关爱：传递电力温情暖

（一）特殊人群

针对行动不便的孤寡老人和残疾人，供电公司建立特殊客户档案，并定期组织志愿者上门服务。志愿者们不仅帮他们检查家里的电器设备，更换灯泡，修理插座，还与他们交谈，了解他们生活中遇到的困难和需要，并给予及时的帮助。比如，寒冬来临时，志愿者们就会提前为独居老人检查取暖设备，保证设备正常运转，让他们能过一个温暖的冬天。

（二）农村地区

在部分农村地区，由于经济发展相对落后，部分困难家庭存在着安全隐患，但又无力进行整改。电力公司开展“电力扶贫”关爱行动，为困难家庭提供电力物资及技术支持，使他们能更好地使用电力。例如，免费为贫困家庭安装节能灯、漏电保护器等电器，改造老旧住宅线路，让他们用上安全稳定的电力。

（三）节假日时期

另外，在节假日、特殊时期，电力公司也将开展慰问活动，为特殊群体、困难用户送去生活必需品及节日祝福。例如，在除夕之夜，电力工作者将米、油、春联等送到孤寡老人、贫困人家，与他们共度佳节，让他们在寒冬中感受到社会的温暖与关怀。通过“送爱”活动，电力企业不仅提供电力服务，而且传递了一种社会责任与人文关怀，拉近了与用户的距离，增强了用户对电力企业的信赖与认同^[7-9]。

五、送实惠：释放红利惠民生

（一）缴费有奖

缴费有奖活动给广大用户带来了实实在在的好处。用户只要按时交电费，就有机会参加抽奖活动。奖品种类繁多，从实用的节能电器，如智能发光二极管、省电水壶等，可以帮助使用者在日常生活中节省电费；大到家用电费优惠券，可以直接抵减后续的电费支出，减轻家庭的电力经济负担。此举既能促使用户主动履行缴费义务，又能加强用户与电力企业的交流和信任。为使用户在享受用电服务之余，得到意想不到的惊喜和实惠，真正体会到电力企业对用户的关心和回馈^[10]。

（二）节能服务

电力公司免费为用户进行节能诊断，并对其进行节能改造。组织专业节能技术人员深入企业、家庭，全面分析、评价用户用电设备、用电习惯，发现存在的能耗问题，提出切实可行的节能对策。比如，向公司推荐节能电机和变压器等设备，帮助

他们优化生产过程，提高能源利用率；为家庭用户提供节能型空调、节能型电冰箱等节能电器的选购建议，并引导用户养成随手关灯，合理设定空调温度等好习惯。采取这些节能服务措施，既可减少用电消耗，节约电费开支，又可达到节能减排的目的。

此外，还开展了用电积分兑换活动和用电抽奖活动，让用户享受到了实实在在的实惠。用户支付电费后可得到相应的积分，积分可用于购买生活用品，电费优惠券，电器设备等；更有机会参与抽奖活动，赢取丰厚奖品。这一系列的活动，既增进了用户与供电公司的互动，又增加了用户对用电的兴趣。

六、总结

随着“五送”活动的深入开展，电力企业开展“零距离服务”和“用电感知”工作成效显著。用户安全用电意识显著提高，对电力知识有了更深层次的认识，用电服务体验更方便、更高效，更多地关爱特殊群体，还能享受到真正的电价优惠和节能优惠。在今后的发展过程中，电力公司将继续秉承“以用户为中心”的服务思想，对服务模式进行创新，丰富服务内容，不断提高服务品质，为用户提供更优质、更高效、更贴心的电力服务，为社会经济的发展和人民的生活水平提供更可靠的电力保障。

参考文献

- [1] 薛波, 薛艳, 李井全. “五送”服务为美丽乡村赋能 [J]. 中国电力企业管理, 2021, (23): 74-75.
- [2] 张海军. “五送”提升“零距离”服务用电感知 [J]. 农电管理, 2021, (06): 67-68.
- [3] 张晓斌, 陈婷婷, 王晓丹. 庆阳: “零距离”服务保“三秋”用电 [J]. 中国电力企业管理, 2022, (32): 89.
- [4] 2020年“电力之光”中国电力科普日在广州开幕 [J]. 新媒体研究, 2020, 6(20)
- [5] 闫晓天. 全专业零距离服务模式的构建与实践 [J]. 电力需求侧管理, 2017, 19(02): 43-45.
- [6] 丁文昊, 董艳敏. 基于远程通信网络的电力数据共享服务系统设计 [J]. 长江信息通信, 2023, 36(12): 85-87.
- [7] 郭燕娜, 何晓丹. 电力服务营销与电力优质服务策略 [J]. 工程研究与实用, 2023, 4(23).
- [8] 彭海燕, 阮钰. 电力赋能促发展优质服务暖人心 [N]. 中国电力报, 2023-08-17(002).
- [9] 王利恒, 陈瑜. 优质电力服务保障点亮百姓美好生活 [N]. 科技日报, 2022-11-24(002).
- [10] 郭智慧. 沟通零距离服务心连心 [J]. 大众用电, 2017, 32(04): 6.

基于人工智能的新能源发电功率预测模型

马双龙¹, 裴志超¹, 李庆祥², 赖毓斌², 张骞³

1. 龙源（北京）新能源工程技术有限公司, 北京 100036

2. 福建龙源新能源有限公司, 福建 南平 353015

3. 河北龙源新能源有限公司, 河北 石家庄 050899

DOI:10.61369/EPTSM.2025010004

摘要： 随着全球气候变化和能源危机的加剧，新能源的开发利用成为各国能源战略的重要组成部分。通过人工智能技术优化新能源发电功率预测，可以提高新能源发电的利用率，减少对化石燃料的依赖，促进能源结构的转型和可持续发展。针对于此本文首先对新能源发电于人工智能技术进行概述，随后说明了基于人工智能的新能源发电功率预测模型构建的意义及重要性，并针对实际预测模型应用中存在的相关问题，如数据采集与处理的挑战和模型泛化能力的局限性以及实时预测与计算资源的矛盾等，提出了针对性的优化策略。通过采用先进的数据采集技术和采用深度学习及迁移学习技术等策略的实施，期望能为系能源发电模型更好应用提供帮助。

关键词： 人工智能；新能源发电；功率预测模型

Power Prediction Model of New Energy Generation Based on Artificial Intelligence

Ma Shuanglong¹, Pei Zhichao¹, Li Qingxiang², Lai Yubin², Zhang Qian³

1. Longyuan (Beijing) New Energy Engineering Technology Co., LTD. Beijing 100036

2. Fujian Longyuan New Energy Co., LTD. Nanping, Fujian 353015

3. Hebei Longyuan New Energy Co., LTD. Shijiazhuang, Hebei 050899

Abstract： With the aggravation of global climate change and energy crisis, the development and utilization of new energy has become an important part of the energy strategy of various countries. Optimizing the power prediction of new energy generation through artificial intelligence technology can improve the utilization rate of new energy generation, reduce the dependence on fossil fuels, and promote the transformation and sustainable development of the energy structure. In this paper, first overview of new energy power generation in artificial intelligence technology, then illustrates the new energy based on artificial intelligence power generation prediction model of the significance and importance, and in view of the problems in the actual prediction model application, such as data acquisition and processing challenges and the limitations of model generalization ability and the contradiction between real-time prediction and computing resources, put forward the targeted optimization strategy. Through the implementation of advanced data acquisition technology and deep learning and transfer learning technology, it is expected to provide help for the better application of the energy generation model.

Keywords： artificial intelligence; new energy power generation; power prediction model

引言

新能源发电，包括风能、太阳能、水能等可再生能源的开发与利用，是应对全球气候变化和能源危机的关键途径。然而，新能源发电的间歇性和不确定性给电网的稳定运行带来了挑战。准确预测新能源发电功率，对于提高电网调度的灵活性、保障电力系统的安全稳定运行具有重要意义。人工智能技术，尤其是机器学习和深度学习，在处理大规模数据、识别复杂模式和预测方面展现出巨大潜力，为新能源发电功率预测提供了新的解决方案。机器学习和深度学习算法能够从历史数据中学习并识别出影响发电功率的各种因素，如天气条件、地理位置、设备特性等。通过这些算法，可以构建出高精度的预测模型，从而实现对新新能源发电功率的准确预测^[1]。

一、新能源发电的发展趋势

随着全球能源结构的转型和环境保护意识的增强，新能源发电技术正迅速发展。太阳能、风能、水能、生物质能等新能源发电方式因其清洁、可再生的特点，成为全球能源发展的重点。未来技术进步将进一步提高新能源发电的效率和稳定性。例如太阳能光伏技术正朝着高效率、低成本的方向发展，新型光伏材料如钙钛矿太阳能电池正在被广泛研究。风力发电技术也在不断优化，更大容量的风力发电机和更先进的叶片设计将提高风能的捕获效率。其次储能技术的发展将解决新能源发电的间歇性和不稳定性问题。随着电池技术，特别是锂离子电池和固态电池技术的进步，储能成本将降低，储能容量将增加，这将有助于平衡电网负荷，提高新能源发电的利用率^[2]。

二、基于人工智能的新能源发电功率预测模型构建的意义

（一）提高能源利用效率与经济效益

基于人工智能的新能源发电功率预测模型构建具有深远的意义，尤其在提高能源利用效率和经济效益方面表现尤为突出。随着全球能源需求的不断增长和传统化石能源的日益枯竭，新能源的开发和利用变得愈发重要。新能源发电，如风能和太阳能，具有清洁、可再生的特点，但其发电功率受自然条件影响较大，具有一定的不确定性。因此构建一个精准的新能源发电功率预测模型显得尤为重要^[3]。

在实际应用中通过人工智能技术构建的预测模型能够精准预测新能源发电的功率输出。这不仅有助于减少能源浪费，还能显著提升发电效率。例如在风力发电的过程中，风力发电设备的效率在很大程度上取决于风速和风向的变化。工作人员通过预测模型可以准确预测这些变化，从而提前调整风力发电机的叶片角度，以最大化捕获风能。这种精准的调整不仅提高了风力发电的效率，还延长了设备的使用寿命，减少了维护成本。同样在太阳能发电领域，预测模型同样发挥着重要作用。太阳能发电的效率受到天气变化和太阳辐射强度的影响。通过预测模型，工作人员可以合理安排储能和供电策略，根据预测的天气和太阳辐射情况，提前做好电力调度和储备工作。这不仅确保了电力供应的稳定性和连续性，还能够在电力需求高峰时段提供充足的电力支持，从而提高整个电网的运行效率^[4]。

（二）有助于促进新能源发电稳定性和可靠性提升

随着全球能源结构的转型和环境保护意识的增强，新能源发电在电力系统中的比重逐渐增加。然而当下新能源发电的间歇性和不确定性给电网的稳定运行带来了挑战。基于人工智能的新能源发电功率预测模型构建的意义在于，它能够显著提升新能源发电的稳定性和可靠性。

例如太阳能光伏发电受天气条件影响较大，传统的预测方法往往难以准确捕捉到复杂的气象变化对发电功率的影响。通过构建基于人工智能的预测模型，可以利用历史数据和实时气象信息，通过机器学习算法对光伏发电功率进行精准预测。

（三）支持电网调度优化与电力市场发展

基于人工智能的新能源发电功率预测模型构建的意义不仅在

于提高发电效率和可靠性，还在于其对电网调度优化与电力市场发展的支持。在电力市场中发电企业可以根据预测结果提前制定售电策略，参与市场竞争。例如某太阳能发电企业通过人工智能模型预测到未来一周的发电量将大幅增加，可以提前与用电大户签订合同，锁定售电价格，从而获得更高的收益。同时，电力市场中的交易商也可以利用这些预测信息，进行更准确的市场分析和投资决策，提高市场的整体效率和透明度。

（四）助力环境保护与可持续发展目标实现

随着全球气候变化问题的日益严峻，减少温室气体排放、保护生态环境已成为全人类的共同责任。而在新能源发电得到广泛应用的当下，基于人工智能的新能源发电功率预测模型构建的意义，不仅体现在提高能源利用效率和经济效益上，更深远地体现在助力环境保护与可持续发展目标的实现上。具体而言在发电的过程中，一个准确的功率预测能够显著提高新能源发电的效率和可靠性。使得工作人员通过预测模型可以提前预知发电量的变化趋势，从而合理安排电网的调度和储能设备的使用，减少因发电量波动导致的能源浪费和对电网的冲击。这不仅有助于降低对化石燃料的依赖，减少二氧化碳等温室气体的排放，而且能够促进能源结构的优化，为环境保护和气候变化应对提供有力支持^[5]。

三、基于人工智能的新能源发电功率预测模型设计的难点

（一）数据采集与处理的挑战

尽管当下人工智能在新能源发电功率预测方面展现出巨大潜力，但研究人员在相关预测模型的设计中仍面临诸多难点。其中数据采集与处理的挑战尤为突出。这是因为新能源发电，如风能和太阳能受自然环境影响极大，数据波动性强采集到的数据往往存在大量噪声和不确定性。这要求数据采集系统必须具备高精度和高稳定性，以确保数据的真实性和可靠性。其次新能源发电数据具有高维性和时间序列特性，传统的数据处理方法难以有效处理这类数据，需要开发更为复杂和高效的算法来提取有用信息。

（二）模型泛化能力的局限性

在设计基于人工智能的新能源发电功率预测模型时，模型的泛化能力是一个关键的难点。泛化能力指的是模型在未见过的数据上的预测表现，即模型能否准确预测未来或不同地点的发电功率。新能源发电，如风能和太阳能，受到多种复杂因素的影响，包括天气条件、地理位置、设备特性等，这些因素在不同时间和地点都有很大的变化性。例如太阳能发电功率预测模型需要考虑太阳辐射强度、温度、云层覆盖、季节变化等因素。一个在特定地区训练得到的模型可能在该地区具有良好的预测性能，但当迁移到其他地区时，由于气候条件和地理位置的差异，模型的预测准确性可能会大幅下降。这是因为模型可能过度拟合了训练数据中的特定模式，而没有捕捉到更普遍的规律^[6]。

（三）实时预测与计算资源的矛盾

当前研究人员在设计基于人工智能的新能源发电功率预测模型时发现，模型应用中存在实时预测与计算资源的矛盾问题尤为突出。这一问题的产生是由于如风能 and 太阳能等新能源在发电的过程中，极其易受到天气、季节和地理位置等多种因素的影响，这就导致了基于新能源的发电功率具有极高的不确定性。而

研究人员为了提高预测的准确性，模型需要实时处理大量数据，并快速做出响应。然而实时预测对计算资源的要求极高，尤其是在大规模新能源发电系统中，数据量庞大，计算复杂度高，这对现有的计算资源提出了巨大挑战。

（四）预测结果的不确定性与风险管理

尽管人工智能技术在新能源发电功率预测方面取得了显著进展，但预测结果的不确定性依然存在，新能源发电，如风能和太阳能，受自然条件影响较大，如风速、云层遮挡等，这些因素的随机性和不可预测性使得发电功率预测存在固有的不确定性。人工智能模型虽然能够通过历史数据学习和模式识别来提高预测准确性，但其预测结果仍然难以完全摆脱不确定性。

四、基于人工智能的新能源发电功率预测模型设计的优化策略

（一）采用先进的数据采集技术

采用先进的数据采集技术是构建高效新能源发电功率预测模型的关键步骤。再实施的过程中，需要部署高精度的传感器网络，这些传感器能够实时监测风速、风向、太阳辐射强度、温度、湿度等环境参数。这些数据对于风能和太阳能发电尤为重要，因为它们直接影响发电效率。其次利用物联网技术将这些传感器连接起来，确保数据能够实时传输到中央处理系统。物联网技术的使用可以提高数据传输的稳定性和安全性，同时降低延迟，这对于实时预测模型至关重要^[7]。

（二）采用深度学习和迁移学习技术

随着近些年来人工智能技术的飞速发展，使得深度学习和迁移学习在新能源发电功率预测领域展现出了巨大的潜力。在这一技术的实际应用中，深度学习技术需要通过构建多层神经网络模型，才能实现自动提取和学习数据中的复杂特征，这对于处理新能源发电功率预测中的非线性问题尤为有效。其次迁移学习技术在应用的过程中，还可以允许模型将在一个领域学到的知识应用到另一个相关领域，这有助于减少工作人员在预测中对大量标注数据的依赖。在新能源发电功率预测中，可以利用迁移学习将预训练模型在大规模数据集上学习到的特征表示迁移到特定的发电场景中^[8]。

（三）优化模型结构和算法

针对于实时预测与计算资源的矛盾问题，实施优化模型结构是提高预测效率和解决问题的关键所在。在优化模型结果的过程中，研究人员可以在预测系统的设计时可以引入注意力机制，使模型能够专注于对预测结果影响最大的输入特征，从而提高预测精度的同时减少不必要的计算。与此同时算法优化也是提升模型性能的重要途径。在实施的过程中，可以在训练时采用更高效的优化算法，如 AdamW 或 Ranger，这些算法结合了自适应学习率和权重衰减，能够加快收敛速度并提高模型的泛化能力^[9]。

（四）引入专家系统和决策支持系统

在当前的时代发展需求之下，有关部门为了进一步提升新能源发电功率预测模型的准确性和可靠性，引入专家系统和决策支持系统成为优化策略的关键一环。这是因为专家系统的应用能够模拟人类专家的决策过程，通过知识库和推理机制来解决特定领域的问题。在新能源发电功率预测中，专家系统可以整合历史数据、气象信息、设备状态等多源信息，利用专家知识对模型进行指导和修正，从而提高预测的精度。而决策支持系统的应用则侧重于为决策者提供信息支持和分析工具。在新能源发电功率预测中，DSS 可以集成多种预测模型和算法，通过交互式界面使用户能够根据实际情况选择合适的预测策略。此外 DSS 还可以提供预测结果的可视化展示，帮助决策者直观理解预测结果和可能的风险^[10]。

五、结语

综上所述，尽管新能源发电功率预测面临诸多挑战，但通过采用先进的数据采集技术、深度学习和迁移学习技术、优化模型结构和算法以及引入专家系统和决策支持系统等策略，可以显著提高预测模型的准确性和可靠性。未来的研究应继续关注模型泛化能力的提升，实时预测与计算资源矛盾的解决，以及预测结果不确定性的管理。随着技术的不断进步和创新，人工智能在新能源发电功率预测领域的应用将更加广泛和深入，为新能源的高效利用和可持续发展提供有力支持。

参考文献

- [1] 赵霞, 王震龙, 余玉乾, 等. 基于人工智能技术的新能源功率预测分析 [J]. 电力设备管理, 2024, (16): 117–119.
- [2] 任苗苗, 舒晓斌. 人工智能在中国新能源领域中的应用与前景分析 [J]. 储能科学与技术, 2024, 13(10): 3619–3621.DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2024.0818.
- [3] 高健, 谭日辉, 高卓. 人工智能技术与新能源相结合打造智慧城市能源系统 [J]. 科技传播, 2024, 16(19): 1–5+10.DOI: 10.16607/j.cnki.1674-6708.2024.19.001.
- [4] 周涛. 新能源汽车智能座舱设计对驾驶者体验的影响研究 [C]// 中国智慧工程研究会. 2024 人工智能与工程管理学术交流会议论文集. 合众新能源汽车股份有限公司, 2024: 3. DOI: 10.26914/c.cnkihy.2024.021046.
- [5] 李国峰. 基于变分模态分解与 LSTM 优化的光伏功率预测方法研究 [D]. 牡丹江师范学院, 2024.
- [6] 刘雨竹, 徐楠. 基于 IQPSO 优化 LSTM 的光伏功率超短期预测模型研究 [C]// 吉林省电机工程学会. 吉林省电机工程学会 2024 年学术年会获奖论文集. 国网吉林省电力有限公司公主岭市供电公司, 2024: 8.DOI: 10.26914/c.cnkihy.2024.033631.
- [7] 邵欣洋, 杨毅, 鲁一宵. 基于生成对抗网络和 NGO-BiLSTM 的少样本光伏功率短期预测 [J]. 昆明理工大学学报 (自然科学版), 2024: 1–12.
- [8] 臧鹏发, 王珂琪, 张中伟, 等. 基于多特征提取的超短期光伏发电功率预测研究 [J/OL]. 激光与光电子学进展, 2024: 1–20.
- [9] 于嘉玮. 储能技术在风力发电系统中的应用 [C]// 中国电力设备管理协会. 全国绿色数智电力设备技术创新成果展示会论文集 (四). 京能秦皇岛热电有限公司, 2024: 3. DOI: 10.26914/c.cnkihy.2024.043846.
- [10] 周晓慧. 基于人工智能的初中物理跨学科实践教学设计——以“搭建风力发电结构系统”为例 [J]. 物理教师, 2024, 45(10): 32–36+40.

电气自动化在电力工程建设中的核心作用研究

郝文清

山西省晋控电力漳泽发电分公司, 山西 长治 046021

DOI:10.61369/EPTSM.2025010005

摘要： 随着科技的不断发展，电气自动化技术在电力工程建设领域得到了广泛应用，并发挥着至关重要的核心作用。本文详细阐述了电气自动化的相关概念与技术特点，分析了其在电力工程建设各阶段，包括规划设计、施工建设、系统调试以及后期运维等环节的核心作用，探讨了电气自动化技术应用所面临的挑战及应对策略，旨在为进一步提升电力工程建设质量与效率，促进电力行业的持续发展提供参考依据。

关键词： 电气自动化；电力工程建设；核心作用；技术应用

Research on the Core Role of Electrical Automation In Electric Power Engineering Construction

Hao Wenqing

Shanxi JinPower Zhangze Power Generation Branch, Changzhi, Shanxi 046021

Abstract： With the continuous development of science and technology, electrical automation technology has been widely used in the field of electric power engineering construction, and plays a vital core role. This paper expounds the related concepts and technical characteristics of electrical automation, analyzes the stages of electric power engineering construction, including planning and design, construction, system debugging and late operations of the core role, discusses the challenges of electrical automation technology application and countermeasures, aims to further improve the quality and efficiency of electric power engineering construction, promote the sustainable development of electric power industry.

Keywords： electrical automation; electric power engineering construction; core role; technology application

引言

电力作为现代社会发展的重要基础能源，其工程建设的质量与效率直接关系到经济社会的稳定运行。电气自动化技术凭借其智能化、自动化、高效化等优势，正逐渐成为电力工程建设不可或缺的关键支撑。深入研究电气自动化在电力工程建设中的核心作用，对于推动电力行业的现代化发展、满足日益增长的用电需求具有重要的现实意义。

一、电气自动化概述

（一）电气自动化的定义与内涵

电气自动化是将电气工程与自动化技术深度融合，通过运用计算机技术、电子技术、自动控制理论等多种先进技术手段，对电力系统中的各类设备、工艺流程进行自动监测、控制与调节，实现电力生产、传输、分配等环节的自动化运行，减少人工干预，提高系统运行的可靠性、稳定性和安全性。

（二）电气自动化的主要技术构成

1. 传感器技术：能够实时感知电力系统中诸如电压、电流、温度、压力等物理量的变化，并将这些非电信号转化为电信号，为后续的控制与监测提供准确的数据基础。例如，在变电站中，

通过温度传感器实时监测变压器油温，以便及时发现潜在的过热隐患。

2. 自动控制技术：基于预设的控制策略和算法，对电力系统的运行状态进行自动调节。常见的控制方法有 PID 控制（比例 - 积分 - 微分控制）、模糊控制、神经网络控制等，可根据不同的工况需求实现精准的控制，确保电力设备在最佳状态下运行。

3. 计算机技术：作为电气自动化系统的核心运算与管理平台，承担着数据处理、存储、分析以及人机交互等功能。借助计算机软件，操作人员可以远程监控电力系统的运行参数，下达控制指令，同时实现对大量运行数据的历史记录和深度挖掘，为电力系统的优化升级提供数据支持^[1]。

4. 通信技术：保障电力系统各部分之间以及与外部控制中心

的信息传输，实现数据的实时共享和协同工作。例如，通过光纤通信、无线通信等方式，将变电站内设备的运行数据传输到调度中心，方便调度人员及时掌握全网运行情况并做出合理决策。

二、电气自动化在电力建设工程中的核心作用

（一）提高电力系统运行效率

电气自动化技术通过实现对电力设备的智能化控制，使得电力系统的运行更加高效，借助计算机辅助设计（CAD）软件以及专业的电力系统分析软件，对电力工程的整体布局进行模拟和优化。通过精确计算电力负荷分布、潮流计算等，合理确定变电站、输电线路等的位置和容量，避免出现供电“瓶颈”或设备过度冗余的情况，提高电力系统的供电能力和资源利用效率。例如，在变电站中，电气自动化系统可以实时监测设备的运行状态，及时发现并处理故障，从而避免设备因长时间运行而损坏，提高设备的可靠性和使用寿命。同时，电气自动化系统还可以根据电力系统的负荷变化，自动调整发电机的输出功率，确保电力系统的供需平衡^[2]。

（二）保障电力供应稳定性

电力供应的稳定性是电力系统运行的重要指标之一。电气自动化系统配备了先进的故障诊断功能，能够利用智能算法对电力设备在调试过程中出现的故障进行快速定位和分析。通过对设备运行数据、故障报警信息等进行综合判断，准确找出故障原因，减少人工排查故障的时间和工作量^[3]。例如，在变电站的综合自动化系统调试中，当保护装置动作异常时，系统可以根据采集到的电流、电压波形以及保护动作逻辑等信息，迅速判断是装置本身故障还是外部回路问题，提高调试效率。电气自动化技术通过实时监测电力系统的各项参数，如电压、电流、频率等，可以及时发现电力系统的异常状况，并采取相应的控制措施，防止电力事故的发生。此外，电气自动化系统还可以实现对电力设备的远程操控，使得在电力事故发生时，能够迅速隔离故障区域，恢复非故障区域的电力供应，从而最大限度地减少电力事故对用户的影响。

（三）促进能源节约和环境保护

电气自动化技术在电工程中的应用，有助于实现能源的节约和环境的保护。一方面，电气自动化系统可以根据电力系统的负荷变化，自动调整发电机的输出功率，避免电力资源的浪费。另一方面，电气自动化技术还可以实现对电力设备的优化运行控制，减少设备的能耗和排放，降低对环境的影响。例如，在风力发电和太阳能发电等新能源领域，电气自动化技术可以实现对风力发电机和太阳能光伏板的智能控制，提高新能源的发电效率和利用率。

三、电气自动化在电力建设工程中的具体应用分析

（一）变电站自动化

变电站是电力系统的重要组成部分，其自动化程度的高低直接影响着电力系统的运行效率和稳定性。电气自动化技术的深度融入，为变电站的运行管理模式带来了革命性变革。借助先进的传感器技术与智能监测设备，能够对站内诸如变压器、断路器、隔离开关等各类核心设备，展开全方位、实时化的状态监测^[4]。不仅可以精准捕捉设备的运行参数，如电压、电流、温度、湿度

等，还能凭借智能算法对设备运行趋势进行预判，一旦发现潜在故障隐患，即刻发出预警信号，极大地提升了设备的可靠性，有效降低了设备突发故障的概率。在控制层面，自动化技术实现了对设备操作的远程化、智能化控制。操作人员无需再身处现场，只需在监控室内，通过自动化控制系统下达指令，即可精准、迅速地完成设备的分合闸、调整参数等操作，大幅提升了操作的准确性与时效性，极大地提高了设备运行效率^[5]。

（二）配电网自动化

配电网是电力系统与用户之间的桥梁，其自动化程度的高低直接影响着用户的用电体验和电力服务的水平^[6]。通过引入电气自动化技术，配电网实现了对线路的智能化监控和控制，可以及时发现并处理线路故障，提高线路的可靠性和供电质量。同时，配电网自动化系统还可以实现对用户用电行为的实时监测和分析，为电力用户提供更加个性化的用电服务^[7]。例如，分析用户的用电高峰期与低谷期、不同季节的用电习惯以及各类电器设备的用电占比等。基于这些详细的分析结果，电力企业可以为用户提供更加个性化的用电服务。比如，针对用电量较大的工业用户，提供定制化的峰谷电价套餐，帮助企业合理安排生产计划，降低用电成本；对于普通居民用户，通过推送节能小贴士、用电优化建议等方式，引导用户养成科学的用电习惯，实现节能减排。此外，配电网自动化系统还能够与其他智能能源系统进行有机融合，如分布式能源发电系统、储能系统等。通过对这些系统的协同控制，实现电力资源的优化配置，提高能源利用效率，推动电力行业向绿色、低碳、智能化方向发展。

（三）发电厂自动化

发电厂是电力系统的源头，其自动化程度的高低直接影响着电力系统的供电能力和稳定性。通过引入电气自动化技术，发电厂实现了对发电机组的智能化控制和管理，让以往依赖人工操作的复杂流程实现了质的飞跃。借助先进的传感器技术，可实时、精准地监测发电机组的各项运行参数，从汽轮机的转速、蒸汽压力，到发电机的电压、电流、绕组温度等，事无巨细，都能被系统敏锐捕捉，这些丰富的数据被传输至智能控制系统后，后者凭借强大的运算能力与先进的算法，对发电机组的运行状态进行全方位评估，并自动生成最为优化的控制指令，提高了发电机组的运行效率和可靠性。同时，发电厂自动化系统还可以实现对燃料消耗、水耗等资源的实时监测和管理，减少燃料浪费意味着降低了有害气体的排放，优化水资源利用则有助于缓解水资源紧张的局面，有助于实现能源的节约和环境的保护^[8]。

（四）电力调度自动化

电力调度是电力系统运行的重要环节，其自动化程度的高低直接影响着电力系统的运行效率和稳定性。通过引入电气自动化技术，电力调度系统实现了对电力系统各项参数的实时监测和分析，可以及时发现并处理电力系统的异常状况。同时，电力调度自动化系统还可以实现对电力资源的优化配置和调度，凭借高速通信网络，海量的运行数据，调度中心能够更为科学、精准地制定电力系统的调度策略，合理分配电力资源，确保整个电力系统始终处于安全、稳定、高效的运行状态，为电力系统的可靠调度与平稳运行提供了无比坚实有力的支撑，提高电力资源的利用效率和经济效益^[9]。

四、电气自动化在电力建设工程中的发展趋势

（一）智能化程度不断提高

随着人工智能技术的不断发展，电气自动化技术在电气工程中的应用将越来越智能化。未来的电气自动化系统将具备更强的自学习和自适应能力，面对复杂多变、动态起伏的电力运行环境，诸如电网负荷的随机波动、电力设备的老化及性能变化等情况，系统能够像敏锐的感知者，精准捕捉到这些变化，并迅速自动调整控制策略，提高电力系统的运行效率和稳定性。

（二）集成化程度不断加深

随着电气工程领域的不断发展，电气自动化系统的集成化程度将不断加深。未来的电气自动化系统将实现与电力系统其他设备的无缝连接和协同工作，形成更加完善的电力系统自动化体系。

（三）可靠性不断增强

可靠性是电气自动化系统的重要指标之一。从系统的规划设计阶段开始，便充分考虑各种可能影响可靠性的因素，并进行针对性优化；在系统运行过程中，通过实时监测与数据分析，不断优化系统的运行参数与控制策略；在设备维护阶段，利用大数据与人工智能技术制定精准的维护计划，实现预防性维护，避免因过度维护或维护不及时而影响系统可靠性。通过这种全流程、全方位的可靠性管理，未来的电气自动化系统将为电力系统的安全运行提供全方位、多层次的保障，确保电力供应的稳定与可靠，满足社会对电力日益增长的需求

（四）环保性更加突出

随着环保意识的不断提高，电气自动化技术在电气工程中的应用将更加注重环保性。未来的电气自动化系统将采用更加节能、环保的技术和设备，降低电力系统的能耗和排放，为环境保护做出更大贡献。

五、电气自动化在电力工程建设应用中面临的挑战

（一）技术更新换代快

电气自动化领域的新技术、新设备不断涌现，如人工智能、物联网、区块链等新兴技术与电气自动化的融合日益加深。电力工程建设企业需要不断投入资源进行技术学习和更新，以确保所采用的电气自动化技术处于行业前沿，否则可能面临技术落后、系统兼容性差等问题。

（二）系统安全风险

随着电力系统自动化程度的提高，其面临的网络安全威胁也日益严峻。黑客攻击、恶意软件入侵等可能导致电力系统的控制

指令被篡改、运行数据泄露，进而影响电力系统的正常运行，甚至引发大面积停电事故。保障电气自动化系统的网络安全，成为电力工程建设和运营过程中亟待解决的重要问题 [10]。

（三）专业人才短缺

电气自动化技术涉及多学科交叉领域，要求从业人员具备扎实的电气工程、计算机技术、自动控制等多方面的专业知识和实践经验。然而，目前市场上既懂电力工程又精通电气自动化技术的复合型人才相对匮乏，这在一定程度上制约了电气自动化技术在电力工程建设中的深入应用和发展。

六、应对策略

（一）加强技术研发与合作

电力工程建设相关企业应加大对电气自动化技术研发的投入，与高校、科研机构建立紧密的合作关系，共同开展前沿技术研究和应用探索。及时将科研成果转化为实际生产力，提升电力工程建设中电气自动化水平的同时，增强企业的核心竞争力。

（二）强化网络安全防护

建立健全电气自动化系统的网络安全管理制度，采用先进的网络安全技术，如防火墙、入侵检测系统、加密技术等，对系统进行全方位的安全防护。定期开展网络安全评估和应急演练，提高应对网络安全事件的能力，确保电力系统的安全稳定运行。

（三）注重人才培养与引进

一方面，加强对企业内部员工的培训，通过举办专业技术培训班、选派员工到高校深造等方式，提升员工的电气自动化技术水平；另一方面，积极引进高素质的复合型人才，完善人才激励机制，吸引和留住优秀人才，为电气自动化技术在电力工程建设中的应用提供坚实的人才保障。

七、结论

电气自动化在电力工程建设中发挥着不可替代的核心作用，从规划设计到施工建设、系统调试以及后期运维的各个环节，都为提高电力工程的质量、效率、安全性和可靠性提供了有力支撑。尽管在应用过程中面临着技术更新、系统安全、人才短缺等诸多挑战，但通过加强技术研发、强化安全防护以及注重人才培养等应对策略，可以有效克服这些困难，进一步推动电气自动化技术在电力工程建设中的广泛应用和持续发展。未来，随着科技的不断进步，电气自动化技术必将与电力工程建设更加深度融合，为构建更加智能、高效、绿色的电力系统做出更大贡献。

参考文献

- [1] 刘建萍, 燕增堂. 电力工程与电力系统自动化技术 [M]. 北京: 中国原子能出版社, 2024: 56-78.
- [2] 付晓鹏. 电气自动化技术在中国电网工程建设中的应用和发展 [J]. 光源与照明, 2022, (05): 246-248.
- [3] 汪永华, 李端超. 供配电系统自动化实用技术 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2010: 58-70.
- [4] 张薇; 任梓瑜. 人工智能技术在电力系统中的应用 [J]. 集成电路应用, 2024, 41 (07): 356-357
- [5] 闫帅. 基于物联网技术的电气自动化系统远程监控系统设计与实现 [J]. 电气技术与经济, 2024, (12): 90-92.
- [6] 廖鹏程. 智能电网中的自动化技术应用 [J]. 电子技术, 2024, 53 (08): 278-279
- [7] 王梦龙. 电能质量分析与控制策略探析 [J]. 科技创业家, 2014 (03): 160
- [8] 杜志强, 徐庆坤. 新能源与电力系统研究 [M]. 北京: 北京工业大学出版社, 2018: 135-150.
- [9] 汪楠. 电力调度自动化中智能电网技术的应用 [J]. 产业创新研究, 2023 (22): 015-107.
- [10] 雷珊珊, 何金栋. 电力系统网络安全保障体系的策略分析 [J]. 电子技术, 2024, 53 (09): 86-87.

火电工程建设中的安全风险评估与管控

高静

贵州织金平远清洁能源有限责任公司, 贵州 毕节 552100

DOI:10.61369/EPTSM.2025010009

摘 要： 火电工程建设具有规模大、技术复杂、施工周期长等特点，其在实际的建设过程中面临众多的安全风险。因此有效的安全风险评估与管控，不仅关系到工程能否顺利地推进，更与人员生命安全、企业经济效益及社会稳定紧密地相连。本文将深入剖析火电工程建设中存在的各类安全风险，在文中系统地阐述安全风险评估的方法与流程之后，从多个维度入手提出了具备针对性的管控策略，希望能为该行业安全管理水平的提升提供一丝助力。

关 键 词： 火电工程建设；安全风险评估；安全管控

Safety Risk Assessment and Management in Thermal Power Plant Construction

Gao Jing

Guizhou Zhenjiang Pingyuan Clean Energy Co., Ltd. Bijie, Guizhou 552100

Abstract： The construction of thermal power plants is characterized by large scale, complex technology, and long construction periods, facing numerous safety risks during actual implementation. Therefore, effective safety risk assessment and control are crucial, not only for the smooth progress of the project but also for the safety of personnel, corporate economic benefits, and social stability. This article aims to thoroughly analyze various safety risks present in thermal power plant construction. After systematically explaining the methods and processes of safety risk assessment, it proposes targeted control strategies from multiple perspectives, hoping to contribute to improving safety management levels in this industry.

Keywords： thermal power plant construction; safety risk assessment; safety control

引言

火电是我国重要的能源供应形式，它在电力结构中占据着主导地位。但由于火电工程建设项目的投资巨大、技术要求高，且施工环境复杂多变，还涉及高空作业、动火作业、大型设备吊装等众多高风险的作业环节，因此极易引发各类安全事故。尽管近年来我国在火电工程建设安全管理方面取得了一定的成效，可是安全事故依然时有发生，如对相关的问题不进行管理将会造成严重的人员伤亡和经济损失。因此开展火电工程建设安全风险评估与管控研究，对于保障工程建设顺利进行，以及推动火电行业可持续发展具有重要的现实意义。

一、火电工程建设中的安全风险分析

（一）人的风险

火电工程建设的主体是人，也就意味着人的不安全行为是引发安全事故的关键因素之一^[1]。一方面由于部分施工人员的安全意识淡薄，自身缺乏了必要的安全知识和技能培训，因此难以在施工的过程中严格地遵守安全操作规程，出现违规操作施工设备、未正确佩戴个人防护用品等现象。另一方面因为部分管理人员的安全管理理念落后，使得安全管理职责难履行位，致使施工

现场的安全隐患排查不够彻底，面对违规行为也未能及时地进行纠正和处理，最终导致安全事故发生的可能性增加^[2]。

（二）物的风险

物的不安全状态同样地也是引发安全事故的重要原因。原因在于，在火电工程建设中使用的施工设备种类繁多，如起重机、升降机、电焊机等，而这些设备在长期使用的过程中，若缺乏有效的维护保养，就容易出现故障，从而导致设备运行不稳定，继而引发安全事故。此外施工材料的质量不合格，如脚手架钢管壁厚不足、安全网强度不够等，也会给工程建设带来一定的安全隐患^[3]。

（三）环境的风险

火电工程施工的环境比较复杂，容易受到自然环境和作业环境的影响。就自然环境方面来说，恶劣的天气条件，如暴雨、大风、雷电等，均会给施工带来诸多的不便，进而增加施工的安全风险^[4]。例如暴雨天气施工现场就容易积水，此时便会导致地基沉降，影响到建筑物的稳定性；又如在大风天气进行高空作业或大型设备吊装作业时，极易容易发生坠落或碰撞事故。而在作业环境方面，如果存在施工现场空间狭窄、通风不良、照明不足等问题，就会对施工人员的安全造成威胁。

（四）管理的风险

除了上述客观原因的影响以外，管理不善也是导致安全事故发生的深层次原因。具体而言：部分建设单位的安全管理制度不完善，且安全管理体系不健全，在实践中安全管理责任未落实到具体部门和个人，此时就会导致安全管理工作无法有效地开展^[5]。此外部分建设单位在工程建设的过程中，为了赶进度、降低成本会忽视安全管理，选择压缩安全投入，从而造成安全设施配备不足，以及安全防护措施不到位等问题，这些问题就会给工程建设埋下安全隐患。

二、火电工程建设安全风险评估

（一）安全风险评估方法

目前常用的安全风险评估方法有故障树分析法、风险矩阵法、层次分析法等。展开来说：故障树分析法是一种从结果到原因描绘事故发生的有向逻辑树，其主要是通过故障树的定性和定量分析，来找出事故发生的原因和概率。而风险矩阵法的原理是将风险发生的可能性和后果严重程度分别划分为不同的等级，以此形成风险矩阵，随后通过对风险事件在矩阵中的定位，即可确定风险等级。层次分析法则是一种将复杂问题分解为多个层次，再通过两两比较来确定各层次因素的相对重要性，进而综合评估风险的方法。一般情况下，在火电工程建设安全风险评估中，相关人员可根据实际情况来选择合适的评估方法，或者是综合地运用多种评估方法，以提高评估结果的准确性和可靠性^[6]。

（二）安全风险评估流程

步骤	具体内容
确定评估目标和范围	明确评估的火电工程建设项目，确定评估的阶段和范围，包括施工前期、施工过程和竣工验收阶段等。
收集相关资料	收集与火电工程建设相关的法律法规、标准规范、设计文件、施工组织设计、安全管理制度等资料，以及施工现场的实际情况信息。
识别安全风险	运用安全检查表、头脑风暴法、故障树分析法等方法，对火电工程建设中可能存在的安全风险进行全面识别，列出安全风险清单。
评估安全风险	根据选定的安全风险评估方法，对识别出的安全风险进行评估，确定风险发生的可能性和后果严重程度，计算风险值，划分风险等级。
制定风险应对措施	针对不同等级的安全风险，制定相应的风险应对措施，包括风险规避、风险降低、风险转移和风险接受等。
编写评估报告	将安全风险评估的过程和结果形成书面报告，报告内容应包括评估目标、范围、方法、结果、风险应对措施等，为火电工程建设安全管理提供决策依据。

三、火电工程建设安全风险管控策略

（一）加强人员安全管理

施工单位及项目管理团队肩负着提升全体施工和管理人员安全意识的重任，为此应该通过多种创新方式来开展安全教育^[7]。如在某大型火电项目中，该施工单位每月都会定期地组织员工进行安全教育培训，还会邀请行业专家结合实际案例，为员工深入地讲解安全理论知识，并在现场进行实操演示，像高空作业时安全带的正确系法与脚手架的搭建规范，就可让施工人员直观地理解。同时该单位每季度还会举办安全知识竞赛，组织员工们以小组为单位进行比拼，而获胜的团队不仅能获得奖金，还能在项目内部宣传栏展示自觉地风采，如此便激发了员工的学习热情。另外项目管理团队在每周都会收集并剖析安全事故案例，像某火电施工现场因未及时关闭施工升降机防护门，致使工人坠落受伤的案例，其会通过播放视频、现场讨论等形式，让全体人员都能深刻地认识到违规操作的严重后果，督促员工们自觉地遵守安全操作规程。

（二）强化设备和材料管理

为了保障施工设备地稳定运行，设备管理部门需建立起详细的设备档案，借此对设备从采购、安装、使用到报废的全生命周期进行管理。举个例子：某火电工程中的设备管理部门，自觉地为每台起重机建立了专属的档案，在档案在记录了设备的型号、采购时间、维修记录等信息。同时还制定了每周一次的定期维护保养计划，且每次保养后要求相关人员详细地记录保养的内容与设备状态。基于此在一次保养过程中，维修人员发现某台起重机的钢丝绳出现磨损迹象，对其及时地进行了更换，从而避免了设备事故的发生。

对于材料的管理来说，采购部门务必严格地把控材料质量。以某火电项目的钢材采购为例，该企业的采购部门通过多轮筛选，最终选择了一家资质齐全、信誉良好的供应商。而在签订采购合同之前，也仔细地审核供应商提供的质量证明文件，并委托专业的检测机构对钢材进行了抽样检验，从而确保了钢材质量符合设计要求。不仅如此，材料管理部门在材料储存的过程中，还采取了防潮、防锈等措施。即对于水泥等易受潮材料，设置了专门的防潮仓库，还在仓库内安装了除湿设备；钢材则采用了涂刷防锈漆、架空存放的方式，有效地防止了钢材生锈。

（三）优化施工环境管理

项目管理团队务必密切关注着天气的变化，以此为基础提前做好恶劣天气的防范工作。如果气象部门预报未来将有强台风来袭，那么项目管理团队就应该立即启动应急预案，即刻停止所有的高空作业与室外施工，并组织人员对施工现场的临时设施进行加固，如用沙袋固定活动板房、拆除易被风吹落的施工标识牌等等^[8]。同时还要清理施工现场的排水管道，以确保排水的畅通，进而避免积水对于施工造成影响。

除此之外，工程管理部门需要合理地规划施工现场布局，目的是为施工人员创造良好的作业环境。比如在某火电项目当中，工程管理部门根据施工流程，将不同的施工区域进行了划分，有

效地避免了施工交叉作业带来的安全隐患。其还在施工现场安装了大功率的通风设备与照明灯具，确保了施工现场具备良好的通风与充足的照明。

（四）完善安全管理制度

建设单位负责牵头建立起健全的、以安全生产责任制为核心的安全管理体系，在其中明确各部门、各岗位的安全管理职责。以某火电项目为例进行阐述，建设单位就制定了详细的安全管理手册，手册之中明确规定了项目经理作为项目安全第一责任人，主要负责全面地管理项目安全工作；安全监督部门则负责日常的安全检查与隐患排查治理工作；而各施工班组组长的职责在于本班组的现场安全管理。最终通过明确职责，形成了层层负责、人人有责的安全管理格局。同时建设单位也应该加大对于安全工作的资金投入，保证安全设施配备齐全，并做到合理地安排安全费用，实行专款专用，这样才能为安全管理工作提供有力的资金保障^[9]。

但安全监督部门也应该加大对于施工现场的安全监督检查力度，在检查中采用专业检查与日常巡查相结合的方式。如邀请特种设备检测机构对于施工现场的电梯、起重机等特种设备进行检测，一旦发现某台电梯的存在故障，就应该立即下达整改通知书，迅速要求施工单位限期进行整改。面对重大安全隐患，务必实行挂牌督办制度，即明确整改责任人、整改期限与整改措施，以确保隐患得到及时地整改。

（五）运用信息化技术提升安全管理水平

基于现下数字化地不断发展，项目信息化管理团队也应该跟随社会的发展，积极地利用信息化技术，搭建起火电工程建设安全管理的信息系统。结合实际来说，其可通过在施工现场部署温湿度传感器、噪声传感器等设备，达到实时采集施工现场环境数据的效果。或者在施工设备上安装智能监控装置，用于采集设备

的运行状态数据。之后这些数据话可以经由无线网络传输到安全管理信息系统，系统则可对数据进行分析与处理，进而为管理人员提供决策依据。而管理人员通过手机 APP 或电脑终端，便可实时地了解施工现场的安全状况，实现安全风险动态监测与预警^[10]。

不仅如此，项目信息化管理团队还需要积极地推广相关企业应用智能安全设备。即在火电项目中，督促施工企业为施工人员配备智能安全帽，而智能安全帽不仅能实时记录施工人员的位置、运动轨迹，并且还能监测施工人员的心率、体温等生理参数。或者应用智能监控摄像头，该摄像头运用了图像识别技术，可自动地识别施工现场的违规行为。另外还可以使用无人机定期地对施工现场进行高空巡查，可助力施工企业快速发现地面难以察觉的安全隐患，像建筑物外墙的裂缝、施工场地的积水等等，可实现对于施工现场的全方位、全天候地监控。

四、结语

基于上文而言，火电工程建设安全风险评估与管控是一项复杂的系统工程，此工程需要从人员、设备、环境、管理等多个方面入手，并综合地运用多种评估方法和管控策略，才能有效地降低安全风险，进而保障工程建设的顺利进行。对此在今后的火电工程建设中，建设单位、施工单位和监理单位应高度重视安全管理工作，不断地完善安全管理体系，以提高安全管理水平，最终为火电行业的可持续发展提供有力的保障。同时随着科技的不断进步，还需要积极地探索运用新技术、新方法，来提升火电工程建设安全管理的智能化水平，持续地为火电工程建设安全管理注入新的活力。

参考文献

[1] 呼红霞,丁贞玉,徐怒潮,等.污染场地风险管控与修复效果评估实践中的挑战和监督管理[J].环境保护,2021,49(20):16-20.

[2] 丁亚琦.基于安全风险评估的城市轨道交通车辆车体裂纹管控策略研究[J].城市轨道交通研究,2023,26(06):184-187.DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.06.034.

[3] 李宗坤,王特,葛巍,等.黄河流域梯级水库大坝风险评估与管控的战略思考[J].人民黄河,2023,45(07):1-6.DOI:10.3969/j.issn.1000-1379.2023.07.001.

[4] 尚锋.浅析火电工程安全风险预控体系建设[J/OL].中文科技期刊数据库(引文版)工程技术,2016(11)[2016-11-01].https://www.cqvip.com/doc/journal/2010228860085569025.

[5] 张立社,程高翔.火电企业双重预防机制信息化应用的实践与思考[J/OL].中国科技期刊数据库工业A,2022(3)[2022-05-10].https://www.cqvip.com/doc/journal/2010228815611594240.

[6] 陈开平.火电机组A级检修项目风险管理研究[D].北京市:华北电力大学,2018.

[7] 金远征,崔守臣,赵礼,等.基于改进LEC法的水利施工安全风险评估与管控[J].人民长江,2018,49(19):63-66+104.DOI:10.16232/j.cnki.1001-4179.2018.19.012.

[8] 杨国梁,多英全,王如君,等.事故灾难类城市安全风险评估基本原则与流程[J].中国安全科学学报,2018,28(10):156-161.DOI:10.16265/J.CNKI.ISSN1003-3033.2018.10.026.

[9] 张程,谢凯,胡书庭,等.太湖流域水利安全生产风险管控“六项机制”建设探索与展望[J].中国水利,2024,(2).

[10] 张丙刚.火电厂检修作业危险源辨识与风险管控研究[J].电力设备管理,2024,(23):237-239.

核电站日常作业风险评估与管理

王新兵

中国广核集团大亚湾核电运营管理有限责任公司，广东 深圳 518124

DOI:10.61369/EPTSM.2025010013

摘 要： 本文深入探讨了核电站日常作业风险评估与管理的全流程。本文介绍了工单产生到现场执行的大致流程，详细描述了作业过程前及期间的风险控制情况。电站在日常作业管理中，从工单准备阶段的风险识别，到日计划中作业风险标识与管控原则，提出了通过风险分级评估、风险挑战制度等方法，实现对作业风险的前端充分识别、过程严格管控、风险挑战科学合理，保障机组安全稳定运行。

关 键 词： 核电站；风险评估；风险管理；风险挑战制度

Daily Operation Risk Assessment and Management of Nuclear Power Plants

Wang Xinbing

China General Nuclear Power Group Daya Bay Nuclear Power Operation Management Co.,
LTD. Shenzhen, Guangdong 518124

Abstract： This paper delves into the entire process of risk assessment and management for daily operations at nuclear power plants. It outlines the general workflow from work order generation to on-site execution, providing a detailed description of risk control measures before and during the operation. In daily operational management, the plant identifies risks from the preparation stage of work orders to the identification and control principles of operational risks in daily plans. The paper proposes methods such as risk classification evaluation and risk challenge systems to achieve comprehensive front-end identification of operational risks, strict process control, and scientifically reasonable risk challenges, ensuring the safe and stable operation of the unit.

Keywords： nuclear power plant; risk assessment; risk management; risk challenge system

引言

核电站的日常作业复杂多样，涉及众多专业领域和大量的人力物力资源。确保作业风险的提前识别和有效控制，是核电站安全运行的核心任务之一。本文将从核电站日常作业的计划管理方式入手，详细阐述如何在各阶段落实风险评估与管理措施。

一、核电站日常作业计划管理方式

核电站采用 12 周计划与三天滚动计划相结合的管理方式。通过协调执行专业合理安排人力，充分发挥各部门专业优势，提前识别作业风险，准备隔离指令，在工作周小组详细安排三天滚动计划时，将各项作业时间安排与机组的实时状态有机结合，从而牢牢掌控作业风险，实现各类工作的有序进行^[1]。

二、工单准备阶段的风险识别

（一）总体原则

从 12 周计划流程的工作准备阶段开始，将风险控制环节深度

嵌入。专业、辐射防护部门、安保、工业安全、运行部门充分识别该项工作可能产生的核风险及运行风险、辐射防护风险、工业安全（人身）风险、环境风险、消防风险、安保风险，专业准备工程师针对识别的风险，制定针对性的缓解措施，要求缓解措施符合 SMART 原则^[2]。

（二）风险评估的载体

专业在工单完成准备后，要进行《日常生产活动的风险分级评估单》的填写，该风险单在 SAP 系统中以工单附加许可证的形式，各环节进行内容填写及审批^[3]。

1. 专业准备工程师根据工单准备过程的风险分析和制定的缓解措施，填写《日常生产活动的风险分级评估单》中由专业负责的部分，包括：“本工作是否涉及大纲项目或定期试验的 A/B/R 类工作”、“五新（新技术、新材料、新工艺、新设备、新窗口）”

范围内工作、“近3年内发生过 LOE/IOE 事件或导致专设安全设施误启动的工作”，若有一项涉及，需要进入填写“失效概率”，并会进入“核风险及运行风险分级评估”（运行隔离经理填写）环节^[4]。

本工作是否涉及“辐射防护风险”“工业安全（人身）风险”“环境风险”“消防风险”“安保风险”，若有涉及，则需填写“失效概率”，并会进入对应风险涉及到的模块进行评估。

若上述内容均不涉及，结束风险分级评估流程。

2.失效概率：准备工程师根据执行的频度，得出不同的失效概率值。

3.执行专业工作风险相关信息：保护动作、执行机构动作、设备启停、缓解措施失效可能导致的具体后果等信息。

4.根据对应的风险进行评估，该模块得分与失效概率相乘，得出风险值，进而得出是否需要启动风险挑战会的结论，若计算得到中风险结论，需流转到辐射防护、消防、工业安全等对应部门给出缓解措施意见，及是否需要启动风险挑战会的建议。准备工程师根据建议选择是否启动风险挑战会。

5.辐射防护风险、工业安全(人身)风险、环境风险、消防风险、安保风险等风险分级评估：

根据对应的辐射防护、工业安全（人身）风险、环境风险、消防风险、安保风险进行评估，该模块得分与失效概率相乘，得出风险值，进而得出是否需要启动风险挑战会的结论，若计算得到中风险结论，需流转到辐射防护、消防、工业安全等对应部门给出缓解措施意见，及是否需要启动风险挑战会的建议。准备工程师根据建议选择是否启动风险挑战会。

6.核风险及运行风险分级评估：专业完成上述环节的评估后，进入“核风险及运行风险分级评估”填写，运行在审查工作包及隔离指令准备环节，从技术规格书/技术要求、反应性变化、冷却功能影响、屏障情况影响、支持功能动作或失去、运行风险等维度开展评估，每类不同情况对应不同分值，与失效概率相乘后得出风险值，进而得出是否需要启动风险挑战会的结论^[5]。

如果评估为高风险工作，则提交该项工作给运行主管日常生产副经理审查并启动风险挑战会，如评估为中风险工作，则根据风险和缓解措施情况决定是否启动风险挑战会。

（三）风险挑战制度

风险挑战分为部门级、TEF 级、公司级三级挑战制度。根据风险分级评估结果和工作的影响程度，决定是否启动相应级别的风险挑战会。风险挑战会对工作的执行条件、风险分析全面性等进行全方位挑战，确保风险降至可接受水平。

生产、维修、技术、工程改造等执行部门主管日常生产副经理，识别某项工作如需启动 TEF 层级风险挑战会，则提交该项工作给日常生产管理副总工审查。

日常生产管理副总工根据《日常生产活动的风险分级评估单》《风险及缓解措施挑战指引单》审查相应工作，并根据审查结果做出最终决策，决定是否启动 TEF 层级风险挑战会。启动风险挑战会则执行《TEF 级风险挑战会决议表》；

日常生产管理副总工识别某项工作如需启动公司层级风险挑战会，则提交该项工作给公司主管生产副总经理审查；

公司主管生产副总经理根据《日常生产活动的风险分级评估单》《风险及缓解措施挑战指引单》审查相应工作，并根据审查结

果做出最终决策，决定是否启动公司层级风险挑战会。如需启动公司级风险挑战会则执行《公司级风险挑战会决议表》；

风险挑战会内容：风险挑战会上由事先指定的挑战者先进行挑战，所有参会人员也均从各自专业角度对该工作的执行条件、风险分析全面性、缓解措施的适当性、执行人员资质及经验等方面进行全方位挑战；如果风险挑战会否决了该项工作，则风险挑战会需给出需要解决的问题和建议的风险缓解措施，以将该工作的风险降到可接受的水平。该项工作的准备工程师和工作负责人根据建议重新制定工作方案和措施，重新进行日常生产活动风险管控流程。

如果风险挑战会批准了该项工作，风险挑战会相关工作的专业安排将挑战问题和澄清答复信息填写完整发给与会人员审查，其作为附录放入工作包中并上传 SAP 存档。

三、日计划中作业风险标识与管控原则

（一）A/B/C/R 类活动管理

1. 风险等级分类及标识：将生产活动分为 A、B、C、R 类不同风险等级。A 类：如果发生一阶或者二阶失效/故障，即可导致跳机跳堆的生产活动；R 类：涉及反应性变化风险控制；B 类：如果发生三阶失效/故障，或者在工作区域附近有敏感设备，可能被误碰导致跳机跳堆的生产活动；C 类：除了 A、R 类和 B 类活动之外的其它所有的生产活动。在日常生产计划“类别”栏中标示风险类别，A/R 类活动红色显示突出^[6]。

2. 安排原则：合理安排高风险活动，避免在同一时间或相近时间安排多项高风险活动，确保专业人力合理分配。

3. 监护制度：A/R 类工作实行操作监护制和管理巡视制，B 类工作实行操作监护制，明确责任人并落实于计划中。

（二）重要敏感区域作业管理

1. 区域界定：机组功率运行期间，可能引起停机、停堆及重大瞬态的设备所在的区域，或存在重大触电人身伤害风险的区域。在现场，一般以地面警示线或进入通道处的警示牌为该区域的界限，界限内（包括该界限）即为重要敏感区域。重要敏感区域作业：运行经理之外的专业在重要敏感区域内实施的试验、检修、改造工作、执行专业人员到现场进行的缺陷诊断或确认，以及其配合工作^[7]。

2. 作业分类及要求：分为一类和二类敏感区域作业，专业准备工程师需进行风险分析并指定监护人，计划工程师在日计划中进行标识和提示说明。

专业准备工程师准备工作时，根据工作内容，对照敏感区域设备清单或到现场核实该工作是否为重要敏感区域作业，要求负责该区域的专业协助提供风险分析和监护人。

计划工程师审查工作包时，需要关注风险分析是否完整、准确，重要敏感区域作业需要使用隔离申请，并在日计划会上对即将开工的重要敏感区域作业进行提示说明。对于一类敏感区域作业，在计划中备注监护人。

（三）核安全相关工作管理

原则上核安全相关工作（A 类、R 类、LCO/TLCO）应由专业部门指定该项工作的核安全责任人，核安全责任人依据《核安全责任人风险控制指引单》，对所负责的工作进行核风险管控，

核安全责任人列入日计划^[8]。

（四）首次执行高风险工作的风险管理

工作周隔离经理依据如下首次执行高风险工作的定义进行识别。Ⅰ类：机组首次执行或间隔大于（不含）一个燃料循环的日常生产工作，经风险分级评估单评估需启动风险挑战会的工作；Ⅱ类：大修后，本燃料循环首次执行的高风险工作：A类/LCO、TLCO类/IS1类^[9]。

工作周隔离经理对于Ⅰ类首次执行高风险工作，在相关文件上加盖专用章，计划工程师标识列入计划，并做好备注，与其它高风险工作错开安排；通过风险监测器进行电厂配置风险管理；要求专业安排经验丰富的工程师作为工作负责人，同时安排管理巡视。

（五）工业安全风险及高辐射工作的管理

1. 工业安全风险分级与标识：对工业安全风险作业进行分级，识别风险级别并标识，明确责任人及职责。

电厂内的工业安全风险作业按风险由高到低分为一、二、三级，电厂典型的一、二、三级工业安全风险作业有：特殊作业、高处作业、地井、密室、容器作业、起重作业等^[10]。

准备工程师识别出风险级别，必要时与工作负责人一起确定作业风险级别。在工作包标识出高风险作业等级。在高风险工序中加盖工业安全一级、二级、三级高风险的风险分级印章。

计划工程师在日常生产计划中标识工业安全风险类别，并落实日常一级高风险作业的执行责任人、管理责任人、监督责任人，并根据具体职责要求进行现场作业及管控。

2. 高辐射作业管理：高辐射作业标准：由于操作本身需要移动高辐射源或破坏辐射源系统固有的屏蔽边界，具有潜在的、较大的易变化的辐射风险。具体界定标准如下：一般高辐射风险作业：工作人员处场所剂量率大于2mSv/h的工作，但地点在黄区；人员进入放射性容器内作业；水池中可能因活化而产生高剂量率的异物打捞作业。

特殊高辐射风险作业：堆芯组件、高放射性浓缩液、树脂、过滤器与高度活化材料等高放射性物品失控后的处理操作；工作人员处场所剂量率大于100mSv/h的工作；堆芯内异物打捞作业。

所有进入高辐射区或进行高辐射风险作业的工作，必须办理“橙区工作许可证”或“红区工作许可证”。

计划工程师在日计划中标注高辐射，并落实执行责任人、管理责任人、监督责任人，跟据机组状态，选择适当的工作时间窗口，避免交叉作业引入额外的风险。

（六）LCO/TLCO 与风险配置管理

1. 计划工作排程风险管理：对涉及 LCO/TLCO 的工作进行风险分析，分为三个清单进行管理，避免并行安排高风险工作。

若工作涉及的 LCO/TLCO 全部已 PSA 模化，应用配置风险管理安排计划工作。

若工作涉及的 LCO/TLCO 全部或部分未 PSA 模化，则分为三个清单进行管理：清单一：“高风险 LCO/TLCO（未 PSA 模化）清单”、清单二：“低风险 LCO/TLCO（未 PSA 模化）清单”，清单三：非清单一及清单二里的工作（无论是否模化）。

通过配置风险管理及其他风险分析方法，甄别多个 LCO 和 / 或 TLCO 并行安排风险。

2. 配置风险管理：识别日常计划中需要配置风险管理评价的工作项目，开展配置风险评价，根据结果执行相应风险管理要求。

白班值隔离经理参照 PSA 编码规范识别日常计划中需要配置风险管理评价的工作项目的 PSA 编码，及时反馈日常计划工程师。

日常计划工程师将 PSA 编码列入三天滚动计划，并对三天滚动计划开展配置风险评价，根据评价结果所处风险区域，对照风险管理矩阵执行相应的风险管理要求，并将评价结果与计划排程一并输出并保存。

四、结论

综上所述，在日常作业安排与风险管理中，通过工作准备阶段，准备工程师、辐射防护、工业安全等部门工程师从工作给机组引入的风险，展开评价，并考虑工作失效概率，从而得出是否需要启动风险挑战会的结论，电站根据结论进一步进行风险挑战，从而使作业风险可知可控。计划编排阶段，通过对跳机跳堆风险工作、工业安全一级、高辐射风险、重要敏感区域工作进行合理安排并牵引电厂各相关部门严格安排相关管控人，落实管控措施，通过配置风险管理，科学安排电站 LCO/TLCO、PSA 工作，使电站配置风险处于较低区域。

通过在工单准备阶段全面识别风险，结合风险分级评估和风险挑战制度，以及在日计划中对各类高风险作业进行合理安排和严格管控，核电站能够实现对日常作业风险的全方位、多层次管理，为核电站的长期可靠性和可持续发展奠定了坚实基础。未来，随着技术的不断进步和管理经验的积累，核电站的风险评估与管理体系将不断完善，为全球能源安全和环境保护做出更大贡献。

参考文献

- [1] 陆雪华. 泰山核电站日常运行计划风险及优化 [J]. 科技视界, 2015, (20): 242+313.
- [2] 李舒, 马宗伟, 毕军. 核电环境风险研究进展及管理启示 [J]. 中国环境管理, 2018, 10(3): 48-52.
- [3] 荆俊婷. 风险评估与控制在电力企业安全管理中的应用 [J]. 企业改革与管理, 2023(15): 17-18.
- [4] 熊刚, 王飞跃, 侯家琛, 等. 提高核电站安全可靠性的平行系统方法 [J]. 系统工程理论与实践, 2012, 32(5): 1018-1026.
- [5] 徐志辉, 刘鹏, 贾明, 等. 基于国际项目实践的核电站人因安全分析方法研究 [J]. 核科学与工程, 2023, 43(5): 996-1003.
- [6] 王川, 何俊男, 沈恩伟. 对集体剂量概念在核电站辐射防护管理中角色的理解和思考 [J]. 辐射防护, 2023, 43(6): 598-602.
- [7] 但体纯, 刘聪, 黄红科, 等. 我国核电站预防性防腐蚀管理 [J]. 腐蚀与防护, 2022, 43(5): 45-48.
- [8] 邹象, 郎明刚. M310 核电站非能动安全改进措施研究 [J]. 原子能科学技术, 2015(7): 1184-1190.
- [9] 魏兴, 陈云. PSA 风险分析方法在核电厂中的应用 [J]. 山东工业技术, 2018, (01): 70.
- [10] 张雨虹. 核电站生产运行系统风险分析与决策方法研究 [D]. 天津大学, 2018.

新能源电站投资实践与发展对策

牛瑾

华电和祥工程咨询有限公司, 山西 太原 030000

DOI:10.61369/EPTSM.2025010014

摘要：在全球积极推进能源转型、应对气候变化的大背景下，新能源电站投资成为能源领域的关键一环。太阳能、风能等新能源凭借清洁、可持续的特性，吸引大量资本涌入。然而，新能源电站投资并非坦途，复杂多变的政策、动态起伏的市场、日新月异的技术以及难以预测的自然环境，都给投资带来诸多风险与挑战。基于此，深入探究新能源电站投资实践，提出切实可行的发展对策，对保障投资收益、推动新能源产业稳健前行具有重要的现实意义。

关键词：新能源电站；投资实践；发展对策

Investment Practices and Development Strategies for New Energy Power Stations

Niu Jin

Huadian Hexiang Engineering Consulting Co., Ltd. Taiyuan, Shanxi 030000

Abstract： In the global context of actively promoting energy transformation and addressing climate change, investment in new energy power stations has become a critical aspect of the energy sector. New energy sources such as solar and wind power, with their clean and sustainable characteristics, have attracted a significant influx of capital. However, investing in new energy power stations is not without its challenges. Complex and changing policies, dynamic market fluctuations, rapidly evolving technologies, and unpredictable natural environments all pose numerous risks and challenges to investors. Based on this, it is of great practical significance to deeply explore the investment practices of new energy power stations and propose practical development strategies to ensure investment returns and promote the steady progress of the new energy industry.

Keywords： new energy power stations; investment practices; development strategies

本文聚焦新能源电站投资实践与发展，新能源电站涵盖光伏、风电等多种类型，具有清洁环保、资源分布广泛等特点。然而，投资面临政策变动、市场供需波动、技术迭代及自然环境等风险。为应对风险，可采取风险预警、风险转移等管理措施。从优化发展看，需加强政策支持，稳定投资环境；优化投资结构，提升资金利用效率；提高技术水平，增强电站效能；加强项目管理，保障投资项目顺利推进，促进新能源电站投资健康发展。

一、新能源电站的类型及特点

新能源电站类型多样，各具特色，常见的有光伏电站，它以太阳能为能源，通过光伏板将光能转化为电能，其特点是分布灵活，可利用荒地、屋顶等空间，且发电过程无排放、无污染，但其受天气和昼夜影响较大，发电不稳定，储能成本较高。

风力发电站依靠风力驱动风机叶片旋转，进而带动发电机发电，风能是清洁可再生能源，风力电站通常建设在风力资源丰富地区，如沿海、高原等，它发电量大，单机容量不断增大，技术也相对成熟。但存在选址受限，风机运行产生噪音、影响鸟类迁徙等问题。

水电站利用水流落差产生的能量发电，可分为大型、中型和小型水电站，水电具有发电稳定、调节能力强的优势，能在电力

系统中承担调峰、调频任务。不过，建设周期长、投资大，对生态环境可能造成一定影响，如改变河流生态、影响鱼类洄游等，这些不同类型的新能源电站，在能源结构调整中都发挥着独特且重要的作用。

二、新能源电站投资的风险因素

（一）政策风险因素

政策是新能源电站投资中极为关键的风险变量。补贴政策在新能源产业发展初期起着关键的推动作用，然而其调整频繁。例如：风电行业曾经历大规模补贴阶段，众多投资者涌入，但当补贴政策开始退坡，部分依赖补贴盈利的风电项目面临经营困境，企业利润大幅缩水。电价政策同样不可忽视，它直接决定了电

站的收入水平，若政府出于宏观调控等目的，下调新能源上网电价，且没有相应的成本控制措施，电站的投资回报率将急剧下降。

此外，项目审批政策的变化也充满不确定性，随着环保理念深入人心，对于新能源电站的环保要求不断提高，如对风电项目的生态保护红线划定、光伏项目的土地使用规范等，若企业在项目前期筹备时未充分考虑这些政策变化，可能面临项目审批受阻、建设延期等问题，前期投入的人力、物力、财力都将面临损失，投资风险剧增。

（二）市场风险因素

市场风险在新能源电站投资中表现多面，从供需角度看，新能源电力市场存在阶段性供需失衡。近年来，光伏产业发展迅猛，大量光伏电站投产，部分地区出现电力供大于求的局面，限电现象时有发生，使得电站发电量无法全部转化为经济效益，企业收入大打折扣^[1]。

电力市场价格波动犹如一把双刃剑，在电力市场化交易过程中，新能源电价受到火电价格、市场供需关系等多种因素影响。峰谷电价差异较大，若新能源电站发电时段多集中在低谷时段，售电价格偏低，收益必然受到影响。而且，市场配套设施的不完善也会带来风险，包括储能设备成本居高不下，导致新能源电力存储与消纳困难，制约电站的稳定运营和收益提升，增加投资的不确定性。

（三）技术风险因素

技术是新能源电站发展的核心驱动力，但也潜藏风险，一方面，技术迭代速度极快。以太阳能光伏为例，从传统晶硅电池到薄膜电池，再到新型钙钛矿电池技术，每一次技术革新都可能使旧技术的电站面临淘汰风险。如果电站投资者未能及时跟进新技术，其电站的发电效率、成本控制等方面将逐渐失去竞争力，投资回报难以保障。

另一方面，设备的可靠性与维护是现实难题，新能源电站设备多暴露于复杂的自然环境中，像海上风电设备，长期经受海水侵蚀、强风冲击，设备故障率高，维修难度大、成本高。而且，新能源电力并网技术尚不完善，部分地区存在新能源电力并网难、弃电率高的问题，这不仅浪费了能源，也让电站投资者承受经济损失，投资收益难以达到预期。

（四）外部环境风险因素

外部环境风险对新能源电站投资影响广泛。首先，极端天气是电站的重大威胁，暴雨、暴雪可能导致光伏电站的支架变形、组件损坏；地震、洪水等灾害甚至可能摧毁整个风电项目设施，造成巨额经济损失。长期的风沙、酸雨等也会加速设备老化，增加维护成本。

其次，社会环境因素同样不可小觑，新能源电站建设可能面临周边居民的反对，例如一些风电项目因噪音、景观影响等问题遭到居民抵制，导致项目建设工期延长，协调成本大幅增加。最后，地缘政治因素在全球化背景下也不容忽视，若涉及国际合作的项目，国际关系紧张可能导致设备进口受阻、资金流动受限等问题，给新能源电站投资与运营带来诸多不便，使投资风险显著

上升。

三、新能源电站投资风险管理措施

（一）风险预警

风险预警是新能源电站投资风险管理的关键前置环节，其通过构建一套科学的风险监测指标体系，对投资过程中可能面临的政策变动、市场价格波动、技术革新及自然环境变化等风险因素进行实时跟踪与量化分析。在政策方面，密切关注国家及地方新能源补贴政策调整、能源规划变动等信息，利用大数据和专业分析模型，提前预判政策走向对电站投资收益的影响。对于市场风险，实时监测电力价格走势、设备原材料成本波动，一旦关键指标触及预警阈值，立即发出警报。技术风险预警则聚焦行业新技术研发进展，评估现有电站技术是否面临被淘汰风险。自然环境风险上，借助气象监测数据，对可能影响电站运行的极端天气提前预警。通过及时准确的风险预警，投资方可提前调整投资策略，如在政策变动前优化电站运营模式，在原材料价格大幅上涨前储备物资，降低风险冲击，保障投资安全^[2]。

（二）风险转移

风险转移是有效应对新能源电站投资风险的重要手段。投资方可通过多种方式实现风险转移。保险是常见途径，购买财产险、营业中断险等，将因自然灾害、设备故障等导致的资产损失和运营中断风险转移给保险公司，一旦风险事件发生，可获得相应经济赔偿，减少损失。在项目合作中，与合作伙伴签订合理的风险分担协议也是方式之一，例如在电站建设阶段，与工程承包商约定，若因施工方原因导致工期延误、质量问题，由承包商承担相应经济责任，将建设风险部分转移给承包商。此外，利用金融衍生工具，如签订电力远期合约，锁定未来一段时间的电力销售价格，规避市场价格波动风险，将价格风险转移给交易对手方。

四、新能源电站投资的优化发展对策

（一）加强政策支持

在新能源电站投资领域，政策支持是关键驱动力，补贴政策应持续发力，政府可依据新能源技术成熟度和成本下降趋势，精准调整补贴额度。例如：对处于技术攻坚阶段的海上风电，加大补贴力度，鼓励企业攻克技术难题，实现规模化发展。同时，设立专项补贴资金，用于支持新能源电站储能设施建设，提升电力消纳能力，缓解新能源发电间歇性问题。

税收政策方面，实施更大力度的减免优惠，对新能源电站建设所需进口设备，免征关税及进口环节增值税，降低初始投资成本。在运营阶段，给予企业所得税优惠，如延长“三免三减半”期限，减轻企业负担，提高投资回报率。并网接入政策需进一步优化，电网企业应简化新能源电站并网流程，明确接入标准与时间节点，为电站提供高效便捷的接入服务。政府可通过补贴或政策引导，促使电网企业加大对新能源消纳的投入，升级电网基础

设施，增强接纳新能源电力的能力^[3]。

（二）优化投资结构

优化投资结构是推动新能源电站投资持续健康发展的关键举措。在投资领域方面，应避免过度集中于单一新能源类型电站。当前，风电、光伏投资热度较高，可适当将部分资金投向发展潜力大但投资相对薄弱的领域，如储能配套设施，储能能有效解决新能源发电间歇性问题，提升电力供应稳定性，投资储能设施既能与现有电站协同发展，又开拓了新的盈利增长点。

另外，不应仅着眼于传统新能源资源丰富地区，在巩固这些地区投资的同时，可关注能源需求旺盛的中东部负荷中心，通过分布式能源项目投资，利用城市工商业屋顶、公共建筑等空间建设小型新能源电站，缩短电力传输距离，降低输电损耗，还能更好地满足当地电力需求，提高投资回报。

除传统的银行贷款、自有资金外，可引入社会资本，通过发行绿色债券、设立产业投资基金等方式，广泛吸纳民间资本和机构资金。多元化的资金来源不仅能缓解投资方资金压力，还能分散投资风险，促进新能源电站项目规模扩张与可持续发展。通过全方位优化投资结构，实现资源合理配置，增强新能源电站投资项目的综合竞争力与抗风险能力。

（三）提高技术水平

提高技术水平是新能源电站投资优化发展的核心驱动力，在发电环节，持续研发与应用新型发电技术，可显著提升能源转化效率。以光伏电站为例，钙钛矿太阳能电池技术的突破有望大幅提高光电转换率，降低发电成本，使光伏投资更具效益。风力发电领域，新型风机叶片设计、智能控制系统的应用，能增强风能捕获能力，提高发电稳定性与发电量。

储能技术的提升同样关键，高效储能设备的研发与应用，如新型锂电池、液流电池等，可有效解决新能源发电的间歇性问题。通过延长储能时长、提升充放电效率，保障电力平稳输出，满足电网调峰需求，拓宽新能源电站的盈利渠道。

在电站运维方面，引入智能化运维技术，利用大数据分析、物联网、人工智能等手段，实现设备状态实时监测、故障提前预警与精准诊断，不仅能减少人工巡检成本，还能降低设备故障率，延长设备使用寿命，提升电站整体运营效率。投资企业应积

极与科研机构、高校合作，加大技术研发投入，促进技术成果转化应用，以技术创新引领新能源电站投资朝着高效、可靠、可持续方向发展，增强投资项目在市场中的竞争力与盈利能力^[4]。

（四）加强项目管理

在新能源电站投资中，加强项目管理是确保投资成功的重要保障，项目前期规划至关重要，需运用专业技术和大数据分析，精准评估资源状况。例如：对风力发电项目，详细勘察风资源分布、风速稳定性等，据此科学选址，避免因资源误判导致发电效率低下，并要做好项目的可行性研究，充分考量政策变动、市场需求波动等因素，制定合理的投资预算与收益预期，降低投资风险。

在建设阶段，一严格把控工程质量，引入优质施工团队，签订严谨的工程合同，明确质量标准与验收流程，以及建立现场监督机制，安排专业监理人员对设备安装、工程施工进行全程跟踪，对关键环节如光伏组件安装、风机基础浇筑等实施重点监控，确保工程质量符合高标准，一旦发现质量问题，立即责令整改，杜绝安全隐患，保障项目顺利推进。

而在运营阶段，则需构建智能化运维体系，利用物联网技术，实时监测电站设备运行状态，收集关键数据，如设备温度、振动频率等。借助大数据分析，提前预测设备故障，及时安排维护，减少停机时间，提高发电效率。此外，制定完善的应急预案，针对自然灾害、设备突发故障等情况，明确应对流程与责任分工，确保在紧急状况下能迅速响应，降低损失，提升项目整体效益，推动新能源电站投资实现可持续发展^[5]。

五、结语

新能源电站投资虽面临政策、市场、技术及外部环境等多重风险，但通过实施风险预警、转移等管理手段，结合加强政策支持、优化投资结构、提升技术水平和强化项目管理等发展对策，可有效应对。未来，需政府、企业、科研机构等多方携手，将各项对策切实落地，这样新能源电站投资有望在保障收益的同时，为能源转型注入强劲动力，助力新能源产业迈向高质量发展新阶段。

参考文献

- [1] 张天龙, 杨靖波, 陈海焱, 等. 新质生产力背景下能源行业电网设计标准化高质量发展研究 [J]. 标准科学, 2024, (9).
- [2] 胡永伟, 徐超, 张峰. 光伏新能源并网对继电保护的影响分析 [J]. 科学技术创新, 2024, (22).
- [3] 单丹妍. 面向新型电力系统的抽蓄电站投资效益评价研究 [D]. 华北电力大学 (北京), 2024.
- [4] 吴俊宏, 陈竹. 电力体制改革背景下储能投资机遇与风险 [J]. 电力勘测设计, 2020, (08): 1-4.
- [5] 尚鑫. 能源投资项目“尽调”是重中之重 [J]. 法人, 2019, (12): 90-93.

新能源风力发电发展的思路

吴厚超

国电投上电广西（新能源有限公司），广西 白色 533000

DOI:10.61369/EPTSM.2025010015

摘要： 本文围绕新能源风力发电的发展现状、技术挑战及未来发展方向展开探讨。通过分析风力发电在资源利用、环境保护和能源结构转型中的重要作用，结合国内外的技术创新与政策支持，提出优化风力发电发展的具体思路。文章重点讨论了提高风力发电效率的技术路径、降低成本的策略以及推动产业可持续发展的政策建议。最终，本文旨在为新能源风力发电的未来发展提供理论参考和实践指导。

关键词： 新能源；风力发电；技术创新；可持续发展；政策支持

Ideas for the Development of New Energy Wind Power Generation

Wu Houchao

China Power Investment Guangxi (New Energy Co., LTD.), Baise, Guangxi 533000

Abstract： This article explores the current development status, technological challenges, and future development directions of new energy wind power generation. By analyzing the important role of wind power generation in resource utilization, environmental protection, and energy structure transformation, combined with domestic and foreign technological innovation and policy support, specific ideas for optimizing the development of wind power generation are proposed. The article focuses on discussing the technological paths to improve the efficiency of wind power generation, strategies to reduce costs, and policy recommendations to promote sustainable development of the industry. Ultimately, this article aims to provide theoretical references and practical guidance for the future development of new energy wind power generation.

Keywords： new energy; wind power generation; technological innovation; sustainable development; policy support

引言

全球能源需求持续增长与化石燃料储量有限性及环境污染问题的矛盾日益凸显，推动能源结构转型已成为国际社会共识。据国际能源署预测，到2050年全球能源需求将增长50%，而化石燃料燃烧导致的二氧化碳排放已使大气中温室气体浓度达到历史最高水平，加剧气候变暖与极端天气事件频发。在这一背景下，新能源开发尤其是风力发电作为技术成熟、可大规模应用的清洁能源形式，其战略价值愈发重要。本文旨在通过系统梳理全球及我国风力发电的资源禀赋特征、技术发展轨迹与现存挑战，揭示其在能源结构优化中的关键作用。研究将重点分析技术创新方向（如大型化机组、漂浮式海上风电）、成本控制路径（包括设备国产化与智能运维）以及政策支持体系（涵盖补贴退坡后的市场机制设计），最终形成具有可操作性的发展建议，为政策制定者、技术研发人员及产业投资者提供决策参考，助力实现“双碳”目标下的能源安全与发展转型。

一、风力发电的资源与技术现状

（一）全球风能资源分布概况

全球风能资源呈现“分布广泛、储量巨大”的特征。据世界风能协会统计，全球陆地和海上可利用风能总量超过200万亿千瓦时/年，约为当前全球电力需求的5倍。从地理分布看，欧洲北海海域因持续强风成为“全球风电金三角”之一，年均风速达

8-10m/s；北美大平原地区依托开阔地形形成优质风场群，美国得克萨斯州风力发电量已占全州用电量的25%；南美巴塔哥尼亚高原和澳大利亚南部海岸同样具备世界级风能开发潜力。值得注意的是，随着漂浮式基础技术发展，深海区域（水深超过50米）的风能开发正成为新热点。

（二）我国风能资源特点及开发潜力

我国风能资源呈现“北多南少、海陆互补”格局。在陆上，

“三北”地区（东北、华北、西北）风能密度达300–400W/m²，新疆达坂城、甘肃酒泉等千万千瓦级风电基地已建成并网。海上风电方面，江苏沿海、福建海峡等区域凭借稳定风速（年均7.5m/s以上）成为开发重点，截至2024年，我国海上风电累计装机量已突破40GW，占全球总量45%。技术创新方面，我国自主研发的16MW海上风电机组已成功并网，刷新全球单机容量纪录。但区域发展不平衡问题依然存在，东南沿海经济发达地区风能资源相对匮乏，需通过特高压输电实现“西电东送”“北电南供”。

（三）风力发电技术的发展历程与现状

风力发电技术历经百年发展，形成完整产业链。20世纪70年代石油危机催现代风电技术，丹麦率先研发出500kW风电机组；90年代兆瓦级机组问世，变桨距控制、双馈异步发电等技术显著提升效率；21世纪进入智能化时代，直驱永磁同步发电机、智能运维系统、数字孪生技术逐步普及。当前我国风电技术已跻身世界前列：金风科技、远景能源等企业掌握核心控制技术，叶片国产化率达95%，齿轮箱等关键零部件实现自主供应。技术趋势呈现三大方向：单机容量持续扩大（陆上6–8MW、海上12–16MW）、智能化运维（基于SCADA系统的故障预测）、深度融合储能技术（风电+抽水蓄能/电化学储能）。

二、风力发电的技术挑战与创新方向

（一）提高风电机组效率的关键技术

当前效率提升技术聚焦三大维度：空气动力学优化、智能控制升级与储能集成。在叶片设计领域，采用碳纤维主梁与玻璃纤维蒙皮复合结构，可使叶片减重30%同时提升抗疲劳性能；通过CFD仿真优化翼型，使风能捕获系数从0.48提升至0.52。智能控制系统方面，基于数字孪生技术的预测控制系统，可实时调整桨距角与偏航策略，在复杂风况下提升发电量8%–12%。储能技术突破带来革命性改变，如配备全钒液流电池的混合储能系统，可平滑风电输出波动，使“弃风率”从15%降至5%以下。

（二）大型风电场与海上风电的技术瓶颈及解决方案

大型风电场面临“尾流效应”与电网接入双重挑战。尾流效应导致后排机组发电量下降10%–30%，通过采用“动态布局优化算法”，结合激光雷达测风数据，可使风电场整体效率提升5%。在电网接入方面，柔性直流输电技术成为关键，张北柔直工程已验证其可将新能源并网稳定性提升40%。海上风电技术瓶颈更为复杂：基础结构成本占海上风电总投资的30%，漂浮式基础技术通过采用半潜式平台设计，可使水深适应性扩展至100米，成本较传统固定式基础降低25%；防腐技术方面，新型纳米涂层可使钢结构寿命延长至30年，较传统环氧涂层提升50%。

（三）新材料与智能化技术的应用前景

材料创新呈现两大方向：轻量化与耐候性。碳纤维复合材料在主轴、轴承等部件的应用，可使机组重量减轻40%，塔筒采用超高强钢（屈服强度 $\geq 690\text{MPa}$ ），壁厚减少35%同时提升抗弯曲能力。智能化技术方面，无人机巡检结合AI图像识别，可使故障发现效率提升60%；数字孪生技术构建的虚拟机组，可提前3个

月预测齿轮箱故障，维护成本降低45%。在前沿技术融合领域，风电+氢能集成系统展现巨大潜力，通过电解水制氢设备消纳弃风电力，丹麦已建成兆瓦级示范项目，能量转换效率达62%。

三、风力发电的成本控制与经济效益

（一）降低设备制造与运维成本的策略

成本压缩呈现“全生命周期管理”特征。在制造端，规模化效应显著：当年产能从1GW增至5GW时，单位千瓦机组成本下降18%；供应链本土化使采购成本降低15%–20%，如中国中车研发的5MW级轴承已替代进口产品，价格降低35%。运维端创新包括：采用无人机巡检+AI缺陷识别技术，使单次巡检成本从5万元降至1.2万元，效率提升70%；智能传感器网络将故障响应时间缩短至30分钟内，年运维成本降低22%。在度电成本（LCOE）方面，通过“大容量机组+高塔架”组合，我国陆上风电LCOE已降至0.35元/千瓦时，海上风电降至0.68元/千瓦时，较十年前下降62%。

（二）风电与其他可再生能源的互补性

多能互补系统通过时空协同显著提升效益。与光伏的互补性体现在昼夜交替发电：风电夜间出力系数达0.45，日间光伏系统可覆盖用电高峰；在甘肃酒泉基地，风–光–储联合运行使弃电率从28%降至9%。与水电的协同则体现在季节性互补：四川雅砻江流域，冬季风电与春季水电形成接力，年发电小时数提升320小时。储能技术进一步放大互补效应，青海玛多基地配置的20MW/40MWh钛酸锂电池，使联合系统可调峰容量提升40%。经济效益方面，宁夏新能源综合示范区数据显示，风–光–火打捆外送模式使电力外送价格提升0.08元/千瓦时，年增收2.4亿元。

（三）经济效益提升路径与数据分析

全生命周期经济性测算显示：陆上风电项目（50MW）投资回收期约6–8年，内部收益率（IRR）达8%–10%；海上风电（300MW）虽投资回收期较长（8–10年），但IRR仍可保持在7%–9%。政策工具创新方面，绿证交易机制贡献显著：浙江某风电场参与绿证交易后，年增收超800万元，占营收的12%。碳交易增强项目吸引力，福建海上风电项目通过CCER开发，年碳资产收益达1500万元。在平价上网背景下，技术迭代成为关键驱动力：采用16MW机组的项目较8MW机组，单位千瓦投资下降12%，发电量提升45%。

四、政策支持与市场机制

（一）国内外政策环境对比分析

全球风电政策呈现多元化到精准化再到协同化的演进趋势。中国构建了“央地协同+财税激励”的立体政策体系：中央层面通过“十四五”规划明确2030年风电装机达8亿千瓦目标，配套可再生能源电价附加补贴及增值税即征即退50%政策；地方政策创新频出，广东推行“风电+储能”配建模式，浙江建立项

目开发权竞拍制度。欧盟则实施“技术+贸易”双轨战略，碳边境调节机制（CBAM）倒逼中国风电企业加速低碳认证，同时以“SET-Plan”路线图推动深海漂浮式风电技术突破。美国采用“消费端激励+制造端回流”策略，生产税收抵免（PTC）政策与本土供应链挂钩，形成30%补贴差贸易壁垒。印度虽出台10%-15%装备投资补贴，但土地征用滞后导致项目延期率达28%。

政策机制创新呈现三大方向：补贴退坡与技术创新挂钩，德国对采用国产轴承的机组给予5%补贴加成；市场机制方面，山东电力现货市场试点“报量报价”模式，海南建设“风光氢储”一体化产业链；国际合作深化策略包括加入IRENA技术转移平台，推动“一带一路”项目采用中国标准。数据显示，中国风电LCOE已降至陆上0.35元/千瓦时、海上0.68元/千瓦时，较十年前下降62%，政策驱动效应显著。然而，国际政策环境日趋复杂，欧盟CBAM和美国PTC政策形成绿色贸易壁垒，倒逼中国风电产业加速技术升级与全球化布局。

（二）风电产业发展的政策建议

我国风电政策机制创新与产业发展建议呈现“双轮驱动+全球视野”特征。政策创新需构建“市场+技术+国际”三维支撑体系：建立电力现货市场与辅助服务市场机制，推动风电参与市场化竞争；完善技术创新体系，组建国家新能源实验室攻关基础技术，支持“链长”企业牵头创建创新联合体；深化国际合作，对接“一带一路”国家风电标准体系。产业发展建议聚焦四大方向：价格机制方面，参照生物质能发电政策，实施“标杆电价+0.3元/度补贴”模式；财税政策方面，调整增值税抵扣范围，参照火电企业实施燃料费抵扣政策；技术创新方面，突破18MW级海上风机技术瓶颈，推动叶片声纹监测等智能运维技术普及；空间布局方面，重点开发“三北”地区存量消纳与深远海漂浮式风电，试点“风光氢储”一体化基地。国际拓展路径包括：组建海上风电产业联盟，推动整机龙头企业牵头国际联合研究项目；参照欧盟CBAM政策，建立碳足迹国际互认体系。数据显示，通过政策机制创新，山东电力现货市场试点使风电交易溢价提升8%，浙江绿证交易使项目增收超800万元/年；技术创新方面，采用16MW机组可使单位千瓦投资下降12%，发电量提升45%。未来需重点突破跨境碳税壁垒，加强与国际能源署（IEA）技术路线图对接，推动中国风电标准国际化进程。

五、风力发电的可持续发展路径

（一）绿色低碳发展的战略意义

风力发电作为可再生能源的核心支柱，其绿色低碳价值体

现在三个维度：环境效益层面，每吉瓦风电年减排CO₂约180万吨，相当于减少燃煤电厂用煤60万吨；空气质量控制方面，风电替代火电可使PM2.5浓度下降2.3μg/m³；能源结构转型层面，风电装机占比每提升1%，能源系统低碳化率提高0.8%。战略意义具体表现为：支撑“双碳”目标实现，风电技术迭代周期（5-7年）显著快于火电（20-30年），成为能源系统脱碳的关键抓手；保障能源安全，我国风能资源技术开发量超50亿千瓦，可支撑年发电量18万亿千瓦时，相当于2023年全国用电量的2.5倍；促进区域经济协同发展，中西部地区通过“风光火储”一体化基地输出绿电，东部地区承接高附加值制造业，形成“绿电-绿氢-绿色制造”产业链闭环。

（二）风电与其他清洁能源协同发展

我国风电协同发展路径设计呈现“创新驱动+生态构建+国际拓展”三维联动特征。技术创新层面，推动磁悬浮风轮机、全直流发电等技术突破，广东阳江基地通过叶片轻量化使机组发电效率提升4.2%；产业协同方面，构建“整机制造-零部件供应-智能运维”全链条合作生态，国家电投揭阳神泉项目实现“海上风电+海洋牧场+渔港经济”多产融合，年增收超9000万元；国际化布局深化，利用自贸区政策优势推动风机设备出口，金风科技2024年海外订单占比达35%。战略规划上实施“三步走”路线图：2025年实现陆上风电全面平价，2030年漂浮式海上风电成本降至0.5元/千瓦时，2035年建成“风光火储”一体化智能电力系统。模式创新方面，江苏试点“源网荷储”协同机制，通过需求侧响应使电网调峰能力提升20%；浙江建立项目开发权竞拍制度，促进资源优化配置。政策协同体系包括：创新税收优惠政策，对核心零部件研发给予加计扣除200%支持；完善绿证交易机制，强制要求非水可再生能源消纳权重年均提升0.5%；深化国际合作，参与ISO风电设备碳足迹标准制定，争取国际规则制定权。数据显示，通过协同发展路径，风电项目全生命周期成本降低18%，系统调峰能力提升40%，形成“技术创新-产业协同-政策保障”的可持续发展闭环。

六、结束语

新能源风力发电作为清洁能源的重要组成部分，不仅有助于缓解能源紧缺问题，还能改善生态环境，推动能源结构转型。本文从技术创新、成本控制、政策支持等多个维度，探讨了风力发电未来发展的可行路径。未来，通过加强技术研发、完善政策体系以及推动国际合作，新能源风力发电必将在全球能源转型中发挥更加重要的作用。

参考文献

- [1]陈阳.D风力发电公司人力资源战略研究[D].内蒙古财经大学,2024.
- [2]华能国际电力江苏能源开发有限公司清洁能源分公司.新能源发电工程技术与管理[M].南京东南大学出版社:202212.290.
- [3]程陈.A风力发电公司电力市场营销策略研究[D].宁夏大学,2022.
- [4]郭志成.新能源风力发电的发展思路探索[J].化工设计通讯,2018,44(11):182.

电力优化营商环境中线路损耗管理对电力营销的影响及对策

李丽

内蒙古电力（集团）有限责任公司阿拉善供电分公司，内蒙古 阿拉善盟 750306

DOI:10.61369/EPTSM.2025010017

摘要： 本文深入探讨在电力优化营商环境下的线损管理，分析其对电力营销的技术、经济和服务层面的影响，从电网规划、用电行为及管理机制角度剖析线损成因，并提出针对性对策，涵盖健全制度体系、优化电力网络架构、深化技术融合应用、精细化绩效考核以及引入多元社会监督。实现电力企业降损增效，提升市场竞争力，促进可持续发展。

关键词： 电力营销；线路损耗管理；供电网络；技术手段

Impact of Line Loss Management on Electric Power Marketing in the Optimized Business Environment of Electric Power Industry and Countermeasures

Li Li

Alashan Power Supply Branch of Inner Mongolia Power (Group) Co., Ltd. Alashan, Inner Mongolia 750306

Abstract： This paper delves into the management of line losses in the optimized business environment of the electric power industry, analyzing its impact on the technical, economic, and service levels of electric power marketing. It examines the causes of line losses from the perspectives of power grid planning, electricity consumption behavior, and management mechanisms, and proposes targeted countermeasures, including improving the institutional system, optimizing the power network architecture, deepening the integration and application of technology, refining performance appraisal, and introducing diversified social supervision. These efforts aim to reduce losses and increase efficiency in electric power enterprises, enhance market competitiveness, and promote sustainable development.

Keywords： electric power marketing; line loss management; power supply network; technical means

引言

电力作为一种能源形式，在现代社会中肩负着重要作用，其供电的稳定性与传输效率对企业的经济效益和客户用电质量有着重要影响。在当前严峻的电力优化营商环境下，线路损耗管理愈发凸显其重要价值，成为电力营销工作的重要环节。高效的线路损耗管理不仅能削减用电成本，为企业拓展利润空间，还能切实提升供电服务质量，稳固并扩大用户群体，强化企业在市场中的竞争力。然而，当前电力企业在线路损耗管理方面面临诸多挑战，从电网规划、用电监管到内部管理机制，均存在一定程度的问题，影响线损管理的成效。

一、线路损耗管理在电力营销中的重要性

（一）技术层面

在电力营销中线损管理如一面精准的“晴雨表”，紧密关联着供电企业的供电质量、运营效益是电力系统稳健、高效运行的关键指标。它分为固定损耗和变动损耗两类，当把变压器铁损、线路介质损耗等固定损耗与铜损这类变动损耗控制在合理范围时，便是电网设备最优的运行状态。这离不开科学精细的规划管理，电网企业要紧跟地方规划，优化电网网架布局，秉持绿色节

能理念，合理选择电气设备，及时淘汰高耗能设备，筑牢电网经济运行根基，保障供电稳定。降损增效能提升企业效益，需技术、管理协同发力^[1]。线损作为衡量电网运行效率的重要指标，在技术上，可通过加强电网规划建设、优化供电半径、配电变压器采用小容量多布点方式、优化线路承载能力对重载地区采用新建线路或转带负荷方式解决重载问题，及时对老旧城区与农村地区的高负荷线路进行改造、设备升级减少电能传输损耗，例如推广节能型变压器使用（如S13、S15型以上规格变压器）、根据负荷增长趋势合理选择导线，优化无功补偿装置配置等方式。同

时，推广智能化监测手段，部署配电自动化系统（DAS）与智能采集终端，实时采集线路负荷数据，精准定位异常损耗区域。

（二）经济层面

对一个高负荷地区，若将线损率降低1%~2%，每年可减少数百万元的电费损失。通过设备升级与网络优化对成本节约有着显著成效，从投资回报方面，长期的技改投入与降损收益平衡分析显示，节能设备的投资回收期一般在3-5年，长远来看设备升级与网络优化可为企业提供稳定的收益预期；在响应国家“双碳”目标方面，降损管理也意义重大，通过降损减少碳排放，电力企业能够争取到财税补贴与绿色金融支持等政策红利。经济层面的量化分析需要紧密结合企业实际情况，制定动态线损目标，以此实现降本与增效的协同发展，对电力企业在成本控制的道路上稳步前行，提升综合竞争力有着积极作用。

（三）服务层面

在服务理念上，将用户需求置顶，全力打造优质服务体系。服务流程持续优化，从用户受理时的热情接待，到办理时简化流程、快速办理，再到故障报修后的迅速响应、高效维修，各环节紧密衔接，极大缩短了业务办理时的等待时长，使服务效率显著提升。同时，构建多渠道的用户反馈，线上通过官网、蒙电E家APP设置反馈入口，线下在营业厅设置意见箱并定期开展问卷调查，广泛收集用户意见，对于用户反馈的问题建立台账，安排专人跟进，快速解决用户疑难问题，确保用户诉求事事能落实，件件有回音。线路损耗管理有力助推了服务升级，对保障供电稳定，减少电压波动，提供了可靠电力。智能电表实时更新用电数据，降低计量纠纷。尤其在偏远农村地区，线损率降低缓解了“低电压”问题，村民用电体验改善，对供电服务认可度提高。此外，电力企业通过95598客服24小时在线解答用户疑问，定期回访用户，深入了解用户需求，进一步提升服务质量。

二、影响电力营销中线损管理工作的主要因素

（一）线路因素

供电网络存在前期缺乏科学规划，供电线路布局欠妥，电能传输路径过长，配变布局不合理，重负荷线路不能得到有效解决，老旧城区、偏远农村线路损耗严重。已有架空裸导线衍生新问题，旅游景区农业地区用电负荷受季节影响较大，致使电能传输效率不稳定。在高污染环境下，线路污秽严重绝缘性能受损，加剧电能损耗，亟待解决。农村地区配电线路普遍存在着线路老化严重、线路线径较细、输送电能距离远等问题，个别地区仍有高耗能变压器（例如S9、S7等变压器）使用等情况^[9]。

（二）用电因素

在电力输送和使用过程中，用电设备与变压器容量不匹配和用户违规用电等问题，如同隐形炸弹，对电力系统稳定和能耗控制构成巨大威胁，让线损治理倍感棘手。在供电过程中，诸多因素会对线损产生不良影响。用户违规用电、私自增容或使用高耗能设备，致使变压器超载运行，变压器容量与负荷不匹配，极大地影响了电力系统的经济运行。用户私自接线用电、更改计量装

置接线、篡改或损坏计量装置等窃电行为造成少计漏计用电量，进而虚增线损率，严重扰乱了供用电秩序等等。

（三）管理机制因素

当前线损管理已形成跨部门协同治理体系，生产、营销等专业通过常态化协同机制实现业务联动。随着管理精细化发展，尤其在新型业务场景拓展过程中，需进一步完善动态化责任衔接机制以提升响应效率。实践表明，虽然基础管理框架能有效支撑日常运作，但局部责任边界交叉可能引发偶发性管理盲区，需通过强化过程监督与责任追溯来巩固管理闭环。面对此类问题，应从细化绩效考核体系着手，线损管理工作一直作为供电公司营销管理方面的一项重要工作，但却未建立起线损率与设备主人制结合，紧密挂钩个人绩效机制，缺乏激励导向，不能充分激发员工工作积极性，工作推进动力不足。同时部分地区存在采控系统管理不成熟，抄表不同期，导致线损升高，难以完全满足智能化线损管理精细化需求。为此，企业要结合各地区线损治理经验，精细完善考核细则，明确各环节人员职责，建立精细绩效考核体系，加大营销采控智能抄表等技术投入，提升数据质量，推动线损管理工作实现突破。

三、电力线损管理存在的问题

（一）线损管理工作制度不够完善

当前线损管理虽有一定成效，但在管理上还存在重叠或空白地方，职责划分缺乏连贯性和延伸性。这并非是企业管理能力不足，而是随着业务发展、技术革新，管理架构未能及时适配新需求所致^[9]。台区责任制在落实过程中，由于缺乏清晰的执行细则与监督机制，导致责任人对职责的理解和执行存在偏差。当异常线损发生时，现有管理流程难以实现快速、精准溯源。这并非员工工作态度不积极，而是管理体系中信息传递与协同机制不够完善。为改善这一状况，企业可着力构建“市-县-所”三级管理体系，进一步精细明确各部门职责。将线损指标科学细化，分解至每个工作岗位，让每一位员工都清楚线损管理中的具体职责。同时，建立跨部门沟通协调机制，定期召开线损管理分析会议，加强信息共享与协同作业。完善监督考核机制，对台区责任人的工作进行量化评估，激励员工积极履行职责，推动线损管理工作迈向新高度。

（二）线损管理工作资金投入力度明显不足

目前，资金短缺问题较为突出。为有效解决这一难题，建议设立专项线损治理基金。该基金应优先投向高损耗台区的改造项目，力求快速降低高损耗台区对线损率的负面影响。此外，引入合同能源管理（EMC）模式也是一个行之有效的办法^[9]。通过与相关能源服务公司合作，借助其雄厚的资金实力与先进的技术优势，由对方承担部分投资，双方以分享节能效益的方式达成合作共赢，既能缓解企业的资金压力，又能加快老旧设备改造与智能化监测系统的建设步伐。

（三）供电线路布局缺乏科学性

在工业园区等负荷集中区域，部分企业不具备环网和新建线

路条件，高负荷、设备老旧导致供电可靠性不足，电力传输过程中损耗较大。在农村地区，单辐射线路占比较高，这种线路布局方式在遇到故障时，容易造成大面积停电，且供电半径不合理，进一步增加了线损。因此，需要紧密结合负荷预测结果，对网架结构进行优化调整。积极推广“小容量、密布点”的配电模式，以提升供电的稳定性与经济性，有效降低线损。

（四）线损管理工作队伍专业性不强

当前，构建“理论+实操”的全方位培训体系成为关键举措。培训重点聚焦现场用电检查与采集信息分析，通过理论课程加深员工对先进节能技术的理解，再借助实际操作让员工熟练掌握技术应用。例，组织员工参与模拟用电检查场景训练，提升其对各类用电问题的排查能力^[7]。同时，推行持证上岗和师带徒制度。持证上岗激励员工自主学习专业知识，确保每位上岗人员都具备扎实的基础。师带徒制度则充分发挥经验丰富员工的传帮带作用，新员工在师傅的指导下，能更快熟悉业务流程，提升业务能力。

四、加强电力营销线损管理工作的有效对策

（一）建立健全线损管理制度体系

为确保线损管理的及时有效，需加强精细管理和线损治理工作，供电公司应由公司分管领导负责牵头工作，各职能部门明确责任划分，并由各部门专人负责具体落实，生产部门确保设备良好运行及时淘汰落后耗能设备，营销部门则需监督用电行为，遏制违规现象，对客户落后耗能设备提出整改建议，严格执行用电检查工作，严厉打击窃电等违法行为，保障用电秩序。对各线路各台区做好线损分析台账，设定具体指标，明确设备主人制，针对线损管理对员工进行绩效评估，调动员工的积极性。此外，做好线损管理人才培养工作，定期培训和交流将有助于提升员工的业务能力^[8]。

（二）着力优化电力网络结构布局

在电力行业迅猛发展的今天，电力网络作为电能传输的“生命线”，其规划的科学性和合理性至关重要，直接影响输电效率、企业效益和服务质量。电力企业要及时掌握台区线路运行情况，结合地方用电特点，负荷增长趋势，城市规划方向，实现精准布局，及时升级老旧线路和设备，减少电能损耗。经验表明，供电

网络优化结构、淘汰老旧耗能设备是降低线损的关键，合理规划可减少电能的传输损失，均衡供电。对于老旧城区和农村地区，应针对性改造线路和升级设备，不断提升供电质量，适应本地用电需求，帮助企业降本增效，提升服务水平。

（三）加强技术手段的应用

在科技快速进步的背景下，电力行业正经历着新的变革，先进的电力监测设备和电力物联网技术成为解决线路损耗的关键^[9]。加快配电网自动化设备的应用和升级，对配电网运行数据进行实时采集，实时监测线路状态，迅速定位异常线路异台区，通过采集数据、远程监控对异常线损做精准评估，为管理人员提供决策支持。广泛应用智能设备，通过整合传感器和智能终端结合物联网技术，构建智能监控网络，对配电网数据做到精准把握，当电网出现异常损耗时及时做到密切相关电气设备，有效降低线损提高电能利用效率，促进电能的高效利用。

（四）完善管理制度和加强社会监督

电力企业在降低线损的过程中，完善企业管理制度和社会监督至关重要，共同巩固降损增效，确保线路稳定运行^[10]。对内管理需建立完善的线损监测和考核体系，积极采用智能监控设备对配电信息实时采集数据，精准计算线损；各部门提高认识明确责任，对线路、台区做到精准管控，明确考核制度，激励全员参与降损。对外，建立社会监督机制，通过官网和公众号公开线损信息，举办科普活动提升公众意识，积极通过客户反映的问题和专家提出的相关意见，进行针对性的整改，共同解决线损问题。

五、结论

在当前电力优化营商环境下，线路损耗管理在电力营销中有着重要影响，关乎企业的生存与发展。影响线损管理的因素繁杂，高负荷线路不能得到缓解、高损耗设备没能及时淘汰，用户违规用电、窃电行为的发生，还有管理机制的不完善、配电设备布局不科学等，以上对线损管理都有一定影响。对此，电力企业需提早规划精准布局，提高电网网架结构，合理布局配电设备，及时更新淘汰老旧设备；积极运用配电自动化监测设备与物联网技术结合，健全线损管理制度，严抓管理落实，不断提升人员技术水平，同时引入社会监督，多措并举，降本提效、不断提高服务水平，提高电能使用效率，实现长远发展。

参考文献

- [1] 李湘勇,杜毅威.电力线路上存在的信息安全隐患及解决方法[J].建筑电气,2021,40(08):38-41.
- [2] 王莹.油田10kV电力线路的节能降耗[J].化学工程与装备,2021,(03):50+34.DOI:10.19566/j.cnki.cn35-1285/tq.2021.03.025.
- [3] 刘沅玲.农村电力线路减损技术及其有效管理分析[J].南方农机,2020,51(24):188-189.
- [4] 殷秀梅.农村电力线路降损技术措施及管理措施关键分析[J].农村实用技术,2020,(11):183-184.
- [5] 王语园,惠亮亮,王江彬.特高压交流电力线路仿真模型的创建[J].无线互联科技,2020,17(05):121-122.
- [6] 汤真荣,肖乔华.基于配网线路同期线损计算的配网线路线损管理分析[J].电器工业,2023,(07):50-53.
- [7] 胡月.配电网生产信息管理系统在油田生产中的应用[J].石油石化节能,2022,12(02):31-34+10-11.
- [8] 王宁.线路线损及台区线损降损管理研究[J].无线互联科技,2020,17(22):114-115.
- [9] 朱真辉.电力计量自动化在线损管理中的应用[J].科技与创新,2021,(09):175-176.DOI:10.15913/j.cnki.kjycx.2021.09.076.
- [10] 潘崇杰.电力线路降损技术措施及管理对策分析[J].中国新技术新产品,2019,(14):122-123.DOI:10.13612/j.cnki.cntp.2019.14.074.

核电站双层安全壳设计的起源、发展历程和趋势分析

汪井春, 岳冲, 任根民

中广核陆丰核电有限公司, 广东 汕尾 516599

DOI:10.61369/EPTSM.2025010021

摘要： 本文深入探讨核电站双层安全壳的设计起源、发展历程与未来趋势。从起源看，是为应对核电站安全需求，尤其是防止放射性物质泄漏。发展过程历经从单层到双层、材料和结构不断优化，技术标准逐步完善。未来趋势是向更安全、智能、经济方向发展，融合新技术，适应不同环境与需求。双层安全壳设计在核电站安全体系中至关重要，对其研究有助于提升核电站安全水平、推动核电产业可持续发展。

关键词： 核电站；双层安全壳；设计起源；发展历程；趋势分析

Origin, Development and Trend Analysis of Double Containment Design for Nuclear Power Plants

Wang Jingchun, Yue Chong, Ren Genmin

CGN Lufeng Nuclear Power Co., LTD. Shanwei, Guangdong 516599

Abstract： This paper deeply explores the design origin, development process and future trends of the double-layer containment of nuclear power plants. In terms of its origin, it is designed to meet the safety requirements of nuclear power plants, especially to prevent the leakage of radioactive substances. During the development process, it has evolved from a single-layer to a double-layer structure, with continuous optimization of materials and structures, and gradual improvement of technical standards. The future trend is to develop towards a safer, smarter and more economical direction, integrating new technologies to adapt to different environments and needs. The design of the double-layer containment is of great significance in the safety system of nuclear power plants, and the research on it helps to improve the safety level of nuclear power plants and promote the sustainable development of the nuclear power industry.

Keywords： nuclear power plant; double-layer containment; design origin; development process; trend analysis

引言

核电站凭借其高效的能源产出特性，在全球能源结构中占据着举足轻重的地位。据国际原子能机构统计，截至2024年，全球范围内运行的核电站总数达439座，为众多国家提供了稳定的电力供应^[1]。然而，核电站运行过程中放射性物质泄漏风险始终如高悬的达摩克利斯之剑，一旦发生核事故，将会对环境和人类健康造成难以估量的巨大危害。

安全壳作为核电站抵御事故风险的最后一道物理屏障，其设计的合理性与可靠性直接关系到核电站能否安全运行。双层安全壳设计通过增设一层防护结构，构建起更为可靠的多重包容体系，极大地增强了对放射性物质的包容能力，显著降低了事故工况下放射性物质向环境释放的风险，已然成为现代核电站安全设计的重要发展趋势。本文将围绕核电站双层安全壳的设计起源、发展进程和未来趋势展开深入剖析，旨在为相关研究和工程实践提供有益参考。

一、核电站双层安全壳的设计起源

（一）早期核电站安全壳设计背景

20世纪50年代，世界上第一批核电站投入商业运行。当时的核电站安全壳主要采用单层结构，材料多为钢或钢筋混凝土。早

期的钢安全壳尺寸较小，1953年，世界上第一个安全壳于美国西米尔顿的诺尔斯核动力试验室建成，其整体设计相对简单，仅仅能够满足最基本的防护要求^[2]。随后出现的供工程实用的球形及圆筒形钢安全壳，尺寸同样不大。这类钢安全壳在一定程度上虽能阻挡放射性物质的泄漏，但由于尺寸和结构的限制，防护能力

较为有限，面对严重核事故时难以提供足够的安全保障。

钢筋混凝土安全壳于60年代初由美国率先采用，其目的在于降低钢安全壳的高昂造价。这种安全壳由内径超过30米的圆筒壳和半球顶组成，并在内侧敷设薄碳钢衬里。该设计在一定程度上解决了钢安全壳成本过高的问题，同时借助混凝土良好的抗压性能，提升了安全壳的承载能力。然而，在实际应用过程中发现，这些早期的单层安全壳在防止放射性物质泄漏方面存在诸多不足，面对严重事故时，很难为核电站提供充分的防护。

（二）双层安全壳设计理念的提出

双层安全壳概念的诞生，源于核电安全需求的持续攀升。早期的核电站事故，如1979年美国三哩岛事故和1986年苏联切尔诺贝利事故，无情地暴露了单一安全壳设计的局限性。三哩岛核电站由于配备了单层安全壳，尽管发生了堆芯熔化事故，但仍有效地阻止了放射性物质向外泄漏；而切尔诺贝利核电站由于缺乏安全壳这一关键防护设施，导致大量放射性物质泄漏到环境中，引发了极为严重的生态灾难和社会危机。这一鲜明对比，凸显了安全壳在核事故防范过程中的关键作用。

随着第三代核电技术的研发，国际社会对核电站抵御极端外部事件，如地震、飞机撞击，以及内部事故，如堆芯熔毁的能力提出了更为严苛的要求。双层安全壳设计应运而生，其核心目标是通过构建多重屏障，显著增强核电站的防护能力^[3]。例如，中国“华龙一号”在设计之初，就将双层安全壳理念融入其中，以应对福岛核事故后全球安全标准的大幅升级。在设计过程中，设计团队充分考虑了各种可能出现事故场景，通过对双层安全壳的结构和材料进行优化，大幅提升了其在极端条件下的防护性能。

二、核电站双层安全壳的发展历程

（一）材料与结构的演变

1. 材料的发展

从材料角度来看，早期钢安全壳壁厚通常被控制在38毫米以内，以避免进行焊后热处理。随着技术的不断进步，材料性能持续提升，对安全壳材料的强度、耐腐蚀性等方面的要求也越来越高。预应力混凝土安全壳于60年代中期首次应用于法国的EL4核电站，通过在混凝土中施加预应力，有效提升了安全壳的承载能力和抗裂性能。这一技术的应用，使得安全壳能够承受更大的压力和变形，显著提高了其在事故工况下的可靠性。

后续，预应力混凝土安全壳不断改进，采用不灌浆无粘接的预应力配筋方式，方便对预应力钢束进行定期检查、补张拉以及必要的更换。这一改进举措极大地提升了安全壳的可维护性，确保了其在长期运行过程中的安全性。与此同时，新型材料的研发工作也在持续推进，例如高强度、耐辐射的复合材料的研究，为安全壳材料的进一步升级提供了新的可能。近年来，部分科研团队探索将纳米材料引入安全壳材料体系，期望借助纳米材料的优异性能，进一步提升安全壳的综合性能。

2. 结构形式的改进

在结构形式方面，安全壳从早期的球形、圆筒形，逐渐向更复杂、更合理的形式发展。

这种结构形式的演变，是基于对安全壳力学性能的深入研究以及丰富的工程实践经验总结。通过优化结构形式，不仅提高了

安全壳的承载能力和稳定性，还降低了建设成本，提升了工程效率。此外，随着计算机辅助设计技术的快速发展，安全壳的结构设计变得更加精确和高效，能够更好地满足工程实际需求。如今，借助有限元分析软件，设计人员可以对安全壳在各种复杂工况下的力学性能进行模拟分析，为结构设计提供科学依据。

（二）技术标准与规范的完善

随着双层安全壳的不断发展，相关的技术标准与规范也在持续完善。安全壳的设计需要综合考虑多种因素，如反应堆发生事故时冷却剂逃逸导致的内压和温度变化、恒载、活荷载、雪荷载、施工荷载，以及地震、龙卷风、飞机失事冲撞等外界不利因素。同时，对安全壳的泄漏率有着严格的限制，一般规定24小时内在设计事故压力下的泄漏量不得超过安全壳自由容积空气总重的0.1 - 0.5%，这就要求安全壳上的贯穿件以及壳体结构本身具备良好的密封措施^[4]。

各国都制定了相应的核安全法规和导则，中国核安全法规 hsf00200《核电厂设计安全规定》和安全导则 hsf0212《核反应堆安全壳系统的设计》，对安全壳完整性监督等方面作出了原则性规定^[5]。各核电厂依据这些规定和导则，并结合自身的安全分析报告及设计规范，制定具体的监督计划。这些法规和导则的出台，为双层安全壳的设计、建造和运行提供了明确的指导和约束，有力地保障了核电站的安全运行。此外，国际原子能机构也定期发布相关标准和报告，推动全球核安全标准的统一和提升^[6]。

（三）典型核电站双层安全壳案例分析

1. AP1000 核电站双层安全壳

AP1000是美国西屋公司和ABB - CE公司联合研发的先进型非能动压水堆。它采用双层安全壳设计，设计容量为110 - 120万千瓦。其非能动安全系统在无需大规模安全支持系统的情况下，仍能保持正常运行功能，有效降低了相应成本。同时，双层安全壳设计极大地提高了核电站的安全性，设计堆芯融化概率和放射性大规模释放概率分别降低为 5.08×10^{-7} /堆·年和 6×10^{-8} /堆·年，相较于现有的二代机组降低了100倍^[7]。

AP1000的双层安全壳设计，充分体现了现代核电技术对安全性和经济性的追求。通过采用非能动安全系统，减少了对外部电源和机械设备的依赖，提升了核电站在事故情况下的自主性和可靠性。双层安全壳的设计进一步降低了放射性物质泄漏的风险，为核电站的安全运行筑牢了根基。此外，AP1000的安全壳在建造过程中，采用了模块化施工技术，大幅缩短了建设周期，降低了建设成本。

2. 华龙一号核电站双层安全壳

华龙一号是我国拥有完整自主知识产权的三代核电技术。它采用双层安全壳设计，内层厚度1.3米，内部衬6毫米钢板，实现完全密封；外层主要用于防御极端外部灾害。其内外安全壳厚度分别达到1.3米和1.8米，采用直径40毫米的高级钢筋，仅外安全壳就设置了4层这样的钢筋，创新性的双层安全壳设计使得钢筋用量比以往核电站增加了两倍。华龙一号的双层安全壳能够承受商用大飞机的直接撞击、17级台风和9级烈度的地震。

三、核电站双层安全壳的发展趋势

（一）安全性提升

未来双层安全壳将在安全性方面实现进一步提升。随着材料

科学的不断发展,研发具有更高强度、更好耐辐射性能和抗冲击性能的先进材料成为可能。例如,纳米材料、高性能复合材料等新型材料的研究和应用,有望为安全壳的材料升级提供新的契机。在结构设计方面,采用更优化的力学模型和分析方法,能够提高安全壳在各种极端工况下的承载能力和密封性。

进一步深入研究严重事故下安全壳的响应特性,优化双层安全壳之间的连接方式和密封结构,确保在事故情况下放射性物质不会泄漏到环境中。通过开展数值模拟和实验研究,深入了解安全壳在不同事故场景下的力学行为和失效机制,为安全壳的优化设计提供坚实的理论依据。部分科研机构正在探索采用多物理场耦合分析方法,全面考虑热、力、流体等因素对安全壳性能的影响,以提升安全壳的设计水平。

（二）智能化与数字化

随着信息技术的飞速发展,双层安全壳的设计和运行将朝着智能化与数字化方向迈进。在设计阶段,采用数字化模拟技术,对不同设计方案进行虚拟仿真分析,提前发现潜在问题,优化设计方案,缩短设计周期,降低设计成本。通过建立安全壳的数字化模型,模拟其在不同工况下的性能,为设计决策提供科学依据。同时,智能化的监测和管理系统能够及时发现安全壳的异常情况,提前采取应对措施,避免事故的发生。例如,利用机器学习算法对监测数据进行分析,能够快速识别安全壳的潜在故障模式,为运维人员提供预警信息。

（三）经济与环保

在满足安全要求的前提下,降低双层安全壳的建设和运维成本是未来的重要发展方向。通过优化设计,减少材料用量和施工难度,提高施工效率,降低建设成本。在运维方面,利用智能化监测和诊断技术,及时发现和处理故障,减少非计划停机时间,降低运维成本。

同时,注重环保因素,采用环保型材料和施工工艺,减少对环境的影响。例如,研发可回收利用的安全壳材料,在核电站退役时,能够更方便、更环保地进行拆除和处理。通过推广绿色施工技术,减少施工过程中的能源消耗和环境污染,实现核电产业的可持续发展。部分研究团队正在探索采用3D打印技术建造安全壳,以提高施工效率,减少材料浪费^[8]。

（四）适应多样化需求

随着核电技术在全球的广泛应用,不同地区的自然条件、地质条件和能源需求存在显著差异,双层安全壳需要适应多样化的需求。对于地震多发地区,加强安全壳的抗震设计,采用

隔震、减震技术,提高安全壳的抗震性能;对于沿海地区,考虑海水腐蚀等因素,采用耐腐蚀材料和防护措施,延长安全壳的使用寿命^[9]。例如,巴基斯坦卡拉奇K-2/K-3机组在采用华龙一号技术时,针对高温高湿环境优化了安全壳防腐涂层,展现了技术本地化的必要性。只有通过全球知识共享与协同创新,才能推动双层安全壳技术持续突破,为核电可持续发展筑牢安全基石。

（五）全生命周期管理的优化

未来双层安全壳的设计将更加注重全生命周期的经济性与可持续性。在建造阶段,模块化施工技术(如AP1000采用的钢制安全壳模块)可减少现场焊接工作量,缩短工期并降低人为误差风险。在运维阶段,基于数字孪生技术的安全壳健康管理系统可实现实时监测与预测性维护。例如,通过传感器网络采集安全壳的应力、温度及密封性数据,结合人工智能算法预测材料老化趋势,提前制定维护计划。此外,退役阶段的环保问题也受到关注。欧盟“H2020”计划资助的“CLEANFACT”项目提出,采用可拆卸式安全壳设计,使用环保复合材料以简化退役流程,减少放射性废物产生^[10]。这些创新方向表明,双层安全壳的发展正从单一安全目标转向安全、经济与环保的多维协同。

四、结论

核电站安全壳作为防止放射性物质泄漏的最后一道物理屏障,其设计直接关系到核能利用的安全性和公众信任。随着核电技术从第二代向第三代的逐步演进,双层安全壳逐渐成为主流设计。核电站双层安全壳的设计起源于对核安全的更高追求,其发展历程伴随着材料、结构、技术标准等多方面的持续进步。从早期的单层安全壳到现在的双层安全壳,在材料上从普通钢材、钢筋混凝土发展到预应力混凝土等高性能材料,结构形式不断优化,技术标准日益完善。典型的AP1000和华龙一号核电站双层安全壳展示了当前先进的设计水平。

展望未来,双层安全壳将朝着更安全、智能、经济、适应多样化需求的方向发展。对核电站双层安全壳设计起源、发展和趋势的研究,对于提升核电站的安全水平、推动核电产业的可持续发展具有重要意义。在未来的核电工程实践中,应不断借鉴先进技术和经验,结合实际需求,持续优化双层安全壳的设计和应用,为核能的安全、高效利用提供坚实保障。通过开展国际合作,共享技术成果,推动全球核电产业的健康发展,为解决全球能源问题贡献力量。

参考文献

- [1] International Atomic Energy Agency (IAEA).Advanced Safety Features of Nuclear Power Plants[R]. Vienna: IAEA, 2019.
- [2] G. F. N. L ó pez, A. M. Fern á ndez.Evolution of Containment Systems in Nuclear Power Plants: From Single to Double Layer[J]. Progress in Nuclear Energy, 2020, 126: 103417.
- [3] 赵敏, 王建国.华龙一号双层安全壳抗飞机撞击分析[J]. 振动与冲击, 2019, 38(10): 234-240.
- [4] 徐立伟, 周宏, 孙晓峰.核电站安全壳密封性试验技术研究[J]. 核动力工程, 2022, 43(1): 102-107.
- [5] 国家核安全.《HAD102-06核动力厂反应堆安全壳系统的设计》[R].北京:国家核安全局,2020.
- [6] 陈思远, 何伟, 张磊.核电站安全壳智能化监测系统设计[J]. 自动化与仪器仪表, 2021(5): 34-38.
- [7] E. D. Kharitonov, V. A. Petrov.Advanced Materials for Nuclear Containment Structures[J]. Journal of Nuclear Materials, 2021, 543: 152588.
- [8] 李伟, 周涛, 黄小林.3D打印技术在核安全壳建造中的应用探索[J]. 核科学与工程, 2023, 43(2): 88-93.
- [9] 张朝弼, 林静, 徐浩.CPR1000核电安全壳结构抗震安全分析[J]. 河南城建学院学报, 2019(2): 12-18.
- [10] 代涛, 刘斯亮, 刘建阁.安全壳冷却系统设计方案的综述[J]. 核科学与技术, 2017, 5(3): 109-115.

数字孪生技术驱动下电力监管管理工程的智能化转型路径研究

钱忠

华电和祥工程咨询有限公司, 山西 太原 030006

DOI:10.61369/EPTSM.2025010026

摘要： 本文围绕数字孪生技术展开，追溯其起源于21世纪初，历经模型构建、数据采集处理等方面的演进，逐渐渗透至电力行业。在火电新能源建设监管中，可实现火电厂设备精准监测与故障预警、新能源发电波动性模拟与优化调度。然而，智能化转型面临数据安全隐患、技术融合、成本效益等挑战。通过加密与访问控制保障数据安全，制定标准与开发中间件解决技术融合难题，优化技术方案与规划项目实施考量成本效益，推动数字孪生技术在电力监管领域更好应用。

关键词： 数字孪生技术；电力监管管理工程；智能化转型；火电新能源

Research on the Intelligent Transformation Path of Power Supervision and Management Engineering Driven by Digital Twin Technology

Qian Zhong

Huadian Hexiang Engineering Consulting Co., Ltd. Taiyuan, Shanxi 030006

Abstract： This article focuses on digital twin technology, tracing its origins to the early 21st century. Through evolutions in model construction, data collection and processing, it has gradually penetrated into the power industry. In the supervision of thermal power and new energy construction, it can achieve precise monitoring and fault warning of thermal power plant equipment, as well as simulation and optimized scheduling of new energy generation fluctuations. However, the intelligent transformation faces challenges such as data security and privacy, technology integration, and cost-effectiveness. By encrypting and accessing control to ensure data security, developing standards and middleware to solve technology integration problems, optimizing technical solutions and planning project implementation to consider cost-effectiveness, we can promote the better application of digital twin technology in the field of power supervision.

Keywords： digital twin technology; power supervision and management engineering; intelligent transformation; thermal power and new energy

引言

电力是现代社会的能源，其供应稳定、安全、合理意义重大。电力监管管理工程保障电力系统可靠运行，避免电力问题影响社会经济与生活，维护安全，促进资源配置、市场公平与行业可持续发展。数字孪生技术为电力行业带来新机遇，通过虚实融合，在电力监管中可提升效率与精准度，帮助监管人员掌握运行信息，分析风险并预防，还为规划等提供依据，提高整体水平。在环保与可持续发展要求下，火电新能源建设成为重点。其监管影响新能源利用等多方面，但面临诸多挑战，传统监管乏力。数字孪生技术可构建模型实现实时监测分析，模拟波动制定策略保障稳定，对火电新能源建设监管智能化转型极为迫切且重要。

一、数字孪生技术发展脉络

（一）数字孪生技术

数字孪生（Digital Twin）是以电力设备、发电机组或新能源场站等物理实体为基础，运用多源数据融合、高精度建模与实时交互技术构建的虚拟镜像系统。其核心特征在于，通过物理实体与虚拟模型间的实时数据交互，实现传感器数据上传与优化指令

下发的双向映射；并贯穿设备从设计、建造、运行到退役的全生命周期管理；还能基于仿真推演提供故障预警、能效优化等预测与决策支持，实现主动干预。

随着碳排放的限制，未来工业企业的能源成本将进一步增加，因此能源系统的结构性调整与生产运行、经营管理的协同优化，对于能源集中型企业，尤其是典型的火力发电企业意义重大。在传统的经营决策与生产运行方式下，全局性的协同提升困

难重重，数字化转型成为各国工业企业发展的共同选择，而数字孪生技术作为推动企业数字化转型、实现物理信息深度融合及智能制造的一个重要方式，已在众多行业被实践^[1]。

（二）在电力行业的渗透

数字孪生技术逐步进入电力行业，并在各个环节实现了广泛应用拓展。在电力设备运维方面，通过构建电力设备的数字孪生模型，可实时监测设备运行状态，提前预测设备故障，实现设备的智能运维与管理，提高设备运行可靠性和使用寿命。在电力系统调度领域，借助数字孪生技术对系统各环节进行广泛深度感知和精准建模，能够实现对电力系统的高效准确调度，应对新能源发电大规模并网以及需求响应、电动汽车等带来的系统不确定性增强的问题。在电网运行层面，基于数字孪生技术构建数字孪生电网，可推进电网安全稳定运行，为建设能源互联网企业提供新思路 and 途径，从设备层、电网层、业务层和运营管理层等多个层面实现电网的智能化升级。

二、火电新能源建设监管中数字孪生技术智能化转型内容

（一）火电厂设备精准监测与故障预警

基于火电厂设备实际参数构建精准的数字孪生模型，是实现火电厂设备有效监管的关键一步。通过深入分析火电厂各类设备的物理特性、运行机制及历史数据，运用专业的建模软件和算法，能够构建出与实体设备高度契合的数字孪生模型。该模型可精确反映设备在不同工况下的运行状态，为后续的设备监测与故障预警奠定坚实基础^[2]。在数据采集方面，借助先进的传感器技术，如温度传感器、压力传感器、振动传感器等，对火电厂设备的各项实时数据进行全面采集。这些传感器紧密部署于设备的关键部位，能够实时感知设备的运行参数变化，并将采集到的数据通过有线或无线通信技术传输至数据处理中心，确保数据的及时性与准确性。同时，为保证数据传输过程中的稳定性与安全性，采用数据加密和冗余传输等技术手段，有效避免数据丢失或泄露。

利用数字孪生模型与实时数据实现故障预警，主要基于模型对设备正常运行状态的模拟与实时数据的对比分析。当实时数据与模型预测的数据出现偏差时，系统能够迅速识别并判断设备可能出现故障的部位及类型。例如，在某火电厂的实际运行中，通过对锅炉设备的数字孪生模型与实时采集的温度、压力数据进行对比分析，成功提前预警了一起因管道堵塞可能引发的故障，避免了设备的损坏与生产事故的发生，相关数据来源于该火电厂的设备运行监测系统^[3]。

（二）新能源发电波动性模拟与优化调度

新能源发电如风电、光伏发电具有显著的波动性特点。风电受风速、风向、气温等气象因素影响，其出力具有间歇性和随机性；光伏发电则受光照强度、天气状况、季节变化等因素制约，发电功率波动较大。这种波动性给电力系统的稳定运行和调度带来了巨大挑战。数字孪生技术可有效模拟新能源发电的波动情

况。通过收集大量的历史气象数据、地理信息数据以及新能源发电设备的运行数据，运用数据分析与机器学习算法，建立能够准确反映新能源发电波动特性的数字孪生模型。该模型能够根据不同的气象条件和环境因素，模拟新能源发电功率的变化趋势，为优化调度提供可靠依据^[4]。

基于数字孪生模拟结果，可制定科学合理的新能源发电优化调度策略。例如，根据模型模拟的风电、光伏发电功率波动情况，结合电力系统的负荷需求，合理安排传统能源机组的出力，实现新能源与传统能源的协同调度，确保电力系统的供需平衡。在某地区电网的实际调度中，依据数字孪生模型对风电、光伏发电的波动模拟，提前调整火电机组的出力，成功应对了新能源发电的大幅波动，保障了电网的稳定运行，相关数据来源于该地区电网的调度运行记录^[5]。

（三）火电设备全生命周期管理的工程实践

某600MW超临界火电机组在锅炉设备管理中引入数字孪生技术，依据锅炉设计图纸、历史运行数据及材料特性，运用ANSYS、ABAQUS等仿真软件构建包含燃烧系统、汽水系统、烟风系统等关键部件的三维数字孪生高精度热力模型，将模型误差控制在 $\pm 2\%$ 以内。同时部署200余个含振动传感器、红外热成像仪等的传感器，以1Hz的数据更新频率对锅炉水冷壁、过热器、再热器等关键部位进行数据采集^[6]。通过对比实时数据与模型预测值，提前48小时预警了因水冷壁管腐蚀导致的泄漏事故，避免了约300万元的直接经济损失。该技术应用也面临一些挑战，初期存在平均延迟5ms的传感器信号传输延迟问题，导致模型与现实存在偏差，通过部署华为FusionPlant边缘服务器等边缘计算节点，将延迟降至1ms以内；针对锅炉燃烧动态特性复杂的问题，引入LSTM神经网络等AI算法对燃烧效率进行动态修正，使模型预测精度从85%提升至92%^[7]。

三、智能化转型面临的挑战

（一）数据安全与隐私问题

在数字孪生技术应用于电力监管的过程中，数据安全与隐私问题尤为突出。一方面，电力监管数据包含大量敏感信息，如电力系统的运行状态、用户用电数据等。这些数据若遭到非法获取或篡改，不仅会影响电力系统的正常运行，还可能泄露用户的隐私信息，造成严重的社会影响。另一方面，数字孪生技术依赖大量的数据采集与传输，在这个过程中，数据面临着诸多安全威胁，如网络攻击、数据窃取等^[8]。此外，随着数据的跨部门、跨区域共享，数据的隐私保护难度进一步加大，如何在保证数据共享与利用的同时，有效保护数据的安全与隐私，是智能化转型面临的重要挑战。

（二）技术融合难题

数字孪生技术与电力监管现有系统及相关技术的融合面临多重挑战。在接口层面，电力监管系统接口标准繁多，与数字孪生技术接口标准不统一，使得数据传输交互不畅，如同不同语言的沟通障碍，严重阻碍信息流动。数据格式方面，电力监测设备采

集的数据格式与数字孪生模型需求不匹配，这种差异迫使系统进行大量数据转换工作，不仅大幅增加开发和运营成本，还在转换过程中存在数据失真风险，影响数据的完整性和准确性^[9]。技术协同同样存在难题，由于缺乏完善的协同工作机制，数字孪生技术与电力监管现有技术无法实现无缝对接，难以形成高效协同的技术体系。各技术模块如同分散的个体，无法凝聚成强大合力，致使电力监管智能化转型进程受阻，难以充分发挥数字孪生技术在电力监管领域的优势与潜力。

（三）成本效益考量

在智能化转型过程中，数字孪生技术应用的成本投入与预期效益之间的关系需要深入研究。从成本构成来看，主要包括硬件设备购置成本，如传感器、数据采集设备等；软件开发与维护成本，用于构建数字孪生模型及相关应用系统；以及人员培训成本，以确保工作人员能够熟练运用新技术^[10]。在效益评估方面，虽然数字孪生技术有望提高电力监管的效率与精准度，降低运维成本，增加电力供应的稳定性等，但这些效益难以精确量化。因此，如何准确评估成本效益，合理规划投资，确保在可接受的成本范围内实现最大的效益，是电力企业在智能化转型中必须面对的重要问题。

四、应对策略

（一）数据安全保障措施

为保障电力监管数据的安全与隐私，可采取多种有效措施。一方面，加密技术是保护数据的重要手段。通过对采集、传输及存储的电力监管数据进行加密处理，将原始数据转化为密文形式，即使数据被非法获取，攻击者也难以解读其真实内容。例如，采用对称加密算法对大量实时采集的设备运行数据进行加密，确保数据在传输过程中的保密性；同时运用非对称加密算法对关键控制指令等进行加密，提高数据的安全性。另一方面，访问控制机制也不可或缺。通过设定严格的用户权限，只有经过授权的人员或系统才能访问特定的数据资源。基于角色的访问控制（RBAC）模型可应用于电力监管系统，为不同职责的工作人员分

配相应的权限，如运维人员只能访问设备运行数据，而管理人员可访问综合监管数据，从而有效防止数据的非法访问和泄露。

（二）技术融合解决方案

为攻克数字孪生技术与电力监管现有系统及相关技术融合难题，可从两方面着手。一方面，建立统一标准是实现技术无缝对接的核心。电力行业需构建覆盖数据格式、接口规范、通信协议的标准化体系，通过明确各类传感器数据格式标准，确保不同厂家设备采集的数据能被统一处理解析，消除技术对接中的“语言壁垒”。另一方面，中间件开发可有效解决技术兼容性问题。作为连接不同技术的桥梁，中间件具备数据转换、协议适配功能，能化解数字孪生技术与现有系统在数据交互、通信上的矛盾，促进各技术模块间的深度协同，推动电力监管智能化转型从理论构想迈向高效实践，助力数字孪生技术与电力监管体系有机融合。

（三）成本效益优化途径

在智能化转型过程中，为降低成本、提高效益，可从多方面入手。其一，优化技术方案至关重要。对数字孪生技术的模型构建、数据采集与处理等关键环节进行优化，采用更高效、精准且成本较低的算法和技术手段。例如，运用先进的数据压缩算法减少数据传输和存储成本，同时提高数据处理效率。其二，合理规划项目实施也不容忽视。在项目前期，对智能化转型的成本进行详细预算，综合考虑硬件设备采购、软件开发、人员培训等各方面的费用，并制定科学的项目进度计划。

五、结束语

数字孪生技术在电力监管领域尤其是火电新能源建设监管中，具备巨大应用潜力，能提升设备监测与调度管理水平。但当前智能化转型存在数据安全与隐私、技术融合、成本效益评估等棘手问题。通过采取数据加密、访问控制、统一标准、开发中间件、优化技术方案及合理规划项目等针对性策略，有望逐步克服这些挑战。未来，随着技术的不断进步与完善，数字孪生技术将在电力行业发挥更大作用，助力电力系统实现更高效、智能、安全的运行与管理，为能源领域可持续发展提供有力支撑。

参考文献

[1] 柴政, 朱凌君, 姚胜平, 等. 基于数字孪生技术的火电智能应用平台研究 [J]. 科技与创新, 2023, (09): 36-39. DOI: 10.15913/j.cnki.kjyex.2023.09.010.

[2] 王新迎, 蒲天骄, 张东霞. 电力数字孪生研究综述及发展展望 [J]. 新型电力系统, 2024, 2(01): 52-64. DOI: 10.20121/j.2097-2784.https.230006.

[3] 相晨萌, 曾四鸣, 闫鹏, 等. 数字孪生技术在电网运行中的典型应用与展望 [J]. 高压技术, 2021, 47(05): 1564-1575. DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20201838.

[4] 胡守超. 智能电网数字孪生技术发展方向及应用 [J]. 太阳能学报, 2023, 44(11): 576.

[5] 辛策. 基于数字孪生的电力系统自动化管理系统研究 [J]. 现代工业经济和信息化, 2024, 14(06): 222-224+245. DOI: 10.16525/j.cnki.14-1362/n.2024.06.069.

[6] 裴育. 试论数字技术在工业电气自动化中的应用和创新 [J]. 信息产业报道, 2024(3): 197-199

[7] 麻淑芳, 杨党政, 孟志东, 等. 数字孪生技术在电厂智慧化转型中的应用 [J]. 集成电路应用, 2024, 41(03): 156-157. DOI: 10.19339/j.issn.1674-2583.2024.03.067.

[8] 潘陈志, 夏晗, 冯加章. 基于数字孪生的电力系统自动化管理系统的研究 [J]. 自动化应用, 2023, 64(20): 64-66.

[9] 温启良, 曾锡池, 张渊洲, 等. 数字孪生关键技术及其在电力行业中的应用 [J]. 华东科技, 2023, (04): 117-119.

[10] 陈浩, 李杏, 陈江, 等. 基于大数据和人工智能的电力安全监管新模式探索 [J]. 电力安全技术, 2023, 25(09): 1-3.

模块化智能混合通信电源系统设计研究

周高英, 孙赫

中国卫星海上测控部, 江苏 无锡 214431

DOI:10.61369/EPTSM.2025010002

摘要： 随着通信技术的飞速发展，通信系统对电源的要求越来越高。笔者期望设计的模块化智能混合通信电源系统能高效地融入光伏发电、风力发电等绿色能源，配合蓄电池组后具备自循环能力，各模块供电无缝切换。对形成“孤岛”的通信设备供电，能提供更长的应急和续航保障能力，在日常的机房供电中有更好的环保及经济效益。

关键词： 模块化智能；混合；通信电源

Research on the Design of Modularized Intelligent Hybrid Communication Power Supply System

Zhou Gaoying, Sun He

China Satellite Maritime Survey and Control Department, Wuxi, Jiangsu 214431

Abstract： With the rapid development of communication technology, the requirements for power supplies in communication systems are becoming increasingly demanding. The author expects the modularized intelligent hybrid communication power supply system designed to efficiently integrate green energy sources such as photovoltaic and wind power generation. When combined with a battery pack, it possesses self-cycling capabilities, enabling seamless power supply switching between modules. For power supply to communication equipment that forms an "isolated island", it can provide longer emergency and endurance support capabilities, offering better environmental and economic benefits in daily power supply for machine rooms.

Keywords： modularized intelligence; hybrid; communication power supply

引言

在当今通信领域飞速发展的大背景下，作为为通信设备提供电力的重要桥梁，通信电源技术需要不断寻求新的突破，以满足通信网络的发展需求。同时，优化和升级通信电源技术也将推动相应的通信设备得到推广和普及。因此，在这种情况下，通信电源技术必然会突破传统的限制，形成一种新型的通信电源技术，以确保通信网络系统的运行稳定性和安全性，并奠定基础^[1]。因此，目前通信电源已然成为维系通信系统稳定运行的关键命脉，一套以开关电源、UPS、柴油发电机为核心设备的供电体系应运而生，与市电紧密配合，高效、稳定地为通信设备注入源源不断的动力。不过，这套传统供电系统逐渐显露出诸多局限性。一旦陷入“孤岛”场景，脱离市电支持，仅靠柴油发电机与蓄电池，续航时长捉襟见肘；况且日常运维中，柴油消耗不仅成本高，还伴有环境污染问题。

有鉴于此，笔者潜心钻研，全力设计模块化智能混合通信电源系统。该系统突破性地融入光伏发电、风力发电等绿色能源，借助大自然之力，配合大容量蓄电池组，达成电能自循环。各供电模块间无缝衔接、智能切换，无惧市电中断。于“孤岛”场景应急供电时游刃有余，机房日常使用中也尽显环保、经济优势，为通信网络的持久畅通筑牢根基。

一、系统组成

在当今多元化的能源应用场景中，模块化智能混合通信电源系统脱颖而出，凭借其精巧的设计与高度灵活性，适配多种使用需求。该系统的输入端口设计独具匠心，涵盖了多个关键模块。整流模块如同系统的“电力枢纽”，专门负责市电、发电机的接入工作，且能依据实际接入数量灵活调整，完美契合不同供电规模^[2]。光伏与风电控制模块顺势接入绿色能源系统，充分响应清

洁能源发展大势，本次研究各选取一个，旨在精准把控系统的基础性能。系统中间级，通信电源直流标准锁定 48V，将其设为融合电压，优势显著——能让市电、风电整流后的电能，以及按 48V 搭建的光伏发电，在这一电压平台无缝衔接、有机融合。不过，48V 电压也暗藏短板，大功率工况下，电流激增，意味着要加粗电缆、汇流排，确保电力高效、安全传输。输出端同样周全考量，直流用电设备可直连中间母线取电；交流设备则借助逆变器，按需灵活调整逆变模块数量，保障供电稳定。一旦遭遇电源

切换或输入中断，蓄电池组立即“补位”，维持电力供应不间断。更值得一提的是，控制及监测模块全程“紧盯”各模块、蓄电池与输入

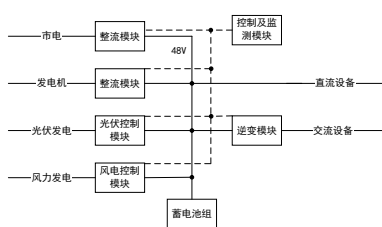


图1 模块化智能混合通信电源系统框图

电模块。这套系统“伸缩自如”，小型化可车载随行，大型化便能稳驻机房，广泛应用于通信、应急保障诸多领域，潜力无限。（图1）

二、关键技术及原理

（一）光伏发电的高效利用

在当代社会，通信系统早已深度融入人们的日常生活，为各类信息交互提供了坚实保障。日常的通信系统配电大多依托交流系统运作，稳定地输送电力，维持设备正常运转。与之不同的是，光伏发电作为绿色新能源的典型代表，产出的是直流电。为适配电网及多数用电场景，直流电需借由逆变器“华丽转身”，逆变成交流电，才能并网供电，或是满足发电站点的现场需求^[3]。即便当下逆变器技术愈发成熟，效率攀升至94%以上，可每次转换，仍不可避免地折损掉部分电能。

通信电源对供电质量的严苛要求近乎苛刻，出于稳定性考量，常直接采用48V直流电，或是借助UPS（不间断电源）供应交流电。值得注意的是，UPS供电还需历经整流、逆变等复杂流程，无形中也会造成能量损耗。鉴于此，在通信系统的前期设计规划阶段，不妨另辟蹊径，让光伏发电绕过烦琐流程，经控制器精准稳压、调压后，直接投入使用。

（二）模块化技术

在当下多元化的用电格局中，不同用户对于供电系统的要求可谓千差万别，这背后是复杂的现实条件与各异的使用诉求在起作用。有些地区得天独厚，日照时长充足、光照强度大，发展光伏发电再合适不过；反观部分区域，风力资源丰富且稳定，极具风力发电的优势。从用户端来看，需求更是五花八门，有的大型数据中心、医院等关键场所，出于用电可靠性的严苛考量，必须配备两路市电，以防断电造成不可挽回的损失；而一些小型商铺、初创企业，出于成本控制的急切需求，会尽量精简设备，连发电机都不想配置^[4]。

在输出层面，同样存在多样化需求，有的普通居民用户仅需一路稳定供电，满足日常家电使用即可；但大型工厂、商业综合体这类用电大户，设备繁多、用电场景复杂，往往要求两路甚至多路输出，才能维持正常运转。面对如此繁复的供电需求，模块化设计脱颖而出，成为不二之选。通过将各输入、输出模块的接口与协议标准化，不仅同类模块间能无缝替换，降低维护成本与难度，还能确保单一模块故障时，其余模块不受牵连，维持系统稳定运行。用户借此能按需灵活选配模块，搭配控制系统的智能设置，轻松实现供电系统的个性化定制与智能管控，贴合自身的用电实际^[5]。

（三）混合供电互补融合

在当下的混合供电系统里，交流与直流电有着截然不同的融合方式，技术难点与操作思路差异明显。交流侧融合涉及交流电并联，这绝非易事，因为并联交流电要满足幅度、频率、相位完全相同的严苛条件，稍有偏差，电力系统就可能陷入紊乱，引发设备故障、供电中断等棘手问题，所以实操极为复杂，对技术精密度要求极高。相较而言，直流侧融合优势突出，操作简便许多。只需有效防止反向回流，就能达成融合目标。具体可按供电优先级灵活调配，把优先使用的一路供电电压稍稍调高，后备的调低，利用电压差有序供电；还能凭借蓄电池，直接关停模块来切换供电。不过，同优先级供电时，要着重把控融合点电压，让其基本持平。光伏与风电同时供电时，需借智能控制技术，精准均衡电量、按比例分配，实现互补融合，保障供电稳定高效^[6]。

（四）供电智能控制

在当今的能源管理领域，智能控制技术发挥着关键作用，它主要分为手动与自动两种控制模式，二者相辅相成，全方位保障供电的稳定与高效。手动控制给予使用者极大的自主性，面对复杂的供电网络，操作人员可依据实际需求，精准地选择具体哪一路供电线路为设备提供能源，灵活适配不同工况。自动控制则彰显智能化优势，依照预设好的优先级有条不紊地调配电力。这一过程，离不开传感器的强力支持，它们如同敏锐的“侦察兵”，实时获取各供电模块的电压、电流、功率等所有状态信息，同时精准捕捉需求侧的用电需求。智能控制系统据此施展精细化管理“手段”。就拿可再生能源来说，天晴时，优先调用太阳能板，让充沛的阳光转化为电能；风力强劲的时段，风电随即加入，与太阳能互补，物尽其用。到了夜晚或是极端天气，自动切换至市电，维持稳定供电。发电机和蓄电池作为“后备力量”，程序会定期安排它们工作一段时间，维持性能，确保关键时刻不掉链子。

（五）供电智能监测报警

在智能系统的搭建过程中，传感器的全方位设置尤为关键。我们配备了功能各异、种类多样的传感器，精准采集各类数据，这些数据不仅是智能控制的“幕后军师”，让设备有条不紊地自动化运行，更是智能监测与报警体系的核心依据。报警管理遵循分级原则，贴合实际运维场景^[7]。部分状态切换引发的报警，像设备待机、自动节能模式切换这类无需人工干涉的情况，系统仅在界面悄然推送提示信息，最大限度减少不必要干扰。但碰上模块故障这类棘手状况则截然不同，故障虽暂时不影响其他模块供电，可一旦搁置，后续使用隐患重重。此时系统会立即触发声光报警，强力吸引工作人员注意，督促其尽快检修，直至故障彻底排除。

三、系统配置计算

在本系统的设计规划当中，为了便于前期快速、精准地开展各项基础计算，均统一以输出功率P设定为1kW作为标准进行估算。如此一来，当实际工况对输出功率有着不同需求，要求达到XkW时，使用者只需将当前所得的各计算结果直接乘以X，便能

迅速、准确地得到与之对应的最终计算数值，操作高效便捷。就发电机的配置要求而言，其额定功率只需大于这一基准功率 P 就行。这意味着发电机在正常运转期间，不但能够稳定输出电力，满足当下各类设备的用电需求，与此同时，还预留有一定余力，可以同步完成对蓄电池的充电工作，确保整个电力系统供电的持续性与稳定性。

（一）蓄电池容量及体积计算

在本系统的架构设计里，有着独特的直流输出模式，其直流直接取自中间级，故而中间级到输出直流这一链路，近乎毫无能量损耗，效率可视为 100%。当系统满负荷输出 1kW 且全部为交流电时，对各环节的性能、配置要求极高，出于严谨考量，本次计算均按此工况进行。当下先进的逆变器，效率 η 已突破 94%，此处保守取值 94%^[8]。纵观全国，多数地区每日峰值日照时长 t 超 4 小时，为方便计算，设定为 4 小时。在静风状态下，要达成系统自循环，电池需具备 20 小时的供电能力^[9]。经缜密推算，电池容量：

$$C = P \times (24 - t) / \eta = 21.281 \text{ kWh}$$

现阶段，磷酸铁锂电池技术稳步发展，体积能量密度 ρ 普遍处于 200 - 300Wh/L 范围，此处取值 250Wh/L，由此算出电池体积：

$$V = C / \rho = 0.085 \text{ m}^3$$

（二）太阳能电池板功率及面积计算

在规划太阳能供电系统时，精确计算太阳能板的各项参数至关重要。已知需在特定光照时长内将蓄电池充足电量，这便对太阳能板功率提出了严苛要求。系统发电效率 η_1 经综合考量，稳定在 79%，以此为基准，结合用电总量 P 与每日光照时长 t，代入专业计算公式，缜密推算得出太阳能电池板功率：

$P_1 = (P \times 24) / (t \times \eta \times \eta_1)$ ，数值精准锁定为 8.081kW。不仅如此，得益于当下前沿科技，高性能太阳能板的转化效率 η_2 已飙升至 40%，依据功率与转化效率间的紧密关联，顺势算出太阳能面

板理想面积：

$$S = P_1 / \eta_2$$
，算得 S 约为 20m²，为项目实操筑牢数据根基。

（三）风力发电机功率计算

在精心擘画电力供应蓝图时，风力发电作为可再生能源领域的“中流砥柱”，其稳定性至关重要，关乎整个供电体系的韧性与可靠性，尤其是极端天气这一特殊“考场”，更是不容有丝毫懈怠^[10]。以全国多数地区为样本深入剖析，会发现大自然的考验变幻莫测，连续阴天无光照的情况时有发生，光伏电力随之陷入“罢工”困境，风力发电却能逆势而上、挑起大梁。依据过往大量实测数据，多数地区风力发电效率 η_3 可达 25%，以此精准推算，风力发电的 P2 功率为：

$$P_2 = (P / \eta + C / 24) / \eta_3 \approx 8 \text{ kW}$$

四、结论

在当今通信领域飞速发展的态势下，模块化混合通信电源系统崭露头角，成为行业瞩目的焦点。本文对其展开了详尽且深入的剖析，全方位阐述了该系统的架构与特性。从系统组成来看，它整合了多类先进组件，各部分各司其职又协同配合；关键技术及原理更是蕴含着科技巧思，依托前沿技术实现高效电能转换与分配，为稳定供电筑牢根基。

尤为亮眼的是，它的自循环能力出众，仿佛拥有源源不断的动力“内核”，多重供电机制并行，筑起坚不可摧的电力防线，无惧突发断电。模块化设计堪称神来之笔，不仅便于维护、升级，还为新能源接入大开方便之门，太阳能、风能等皆能以模块化形式轻松融入。凭借智能化控制，遭遇“孤岛”困境时，它化身续航“担当”，应急时长远超传统电源；日常机房应用里，节能降本优势尽显，环保与经济效益双双“拉满”。有这些突出优势托举，模块化混合通信电源系统无疑会在持续创新的道路上一路疾驰，迎来更广阔前景。

参考文献

[1] 杨哈竹. 通信电源技术发展趋势及标准研究方向 [J]. 中国新通信, 2023, 25(16): 22-24.
[2] 马晓宇. 模块化数据中心通信电源供电技术分析 [J]. 中国新通信, 2023, 25(08): 3-5.
[3] 贾平, 周鸿喜, 冷旭东, 等. 新型柔性通信电源系统的研究与应用 [J]. 电力信息与通信技术, 2021, 19(11): 117-122. DOI: 10.16543/j.2095-641x.electric.power.ict.2021.11.016.
[4] 曹连兵, 周莲, 王新芳. 模块化数据中心通信电源供电技术的研究 [J]. 智能建筑电气技术, 2019, 13(03): 55-59. DOI: 10.13857/j.cnki.cn11-5589/tu.2019.03.013.
[5] 刘斌. 通信电源一体化及关键技术分析 [J]. 中国新通信, 2024, 26(12): 1-3.
[6] 田佳, 王雯婷, 季明明, 等. 基于智能模块化 -48V 通信直流电源的短路测试研究 [J]. 科学技术创新, 2024, (01): 221-224.
[7] 汤连军. 通信电源的发展现状及应用要点分析 [J]. 华东科技, 2023, (02): 112-114.
[8] 周高英, 孙赫. 智能通信电源在通信机房的实践探析 [J]. 中国新通信, 2022, 24(22): 19-21.
[9] 赵建科, 任保将. 高效智能的通信电源技术发展趋势分析 [J]. 价值工程, 2020, 39(15): 255-256. DOI: 10.14018/j.cnki.cn13-1085/n.2020.15.113.
[10] 齐玉兵, 沈旭晓. 基于并联电池和模块化开关技术的一体化电源系统设计 [J]. 机电信息, 2019, (35): 138-139. DOI: 10.19514/j.cnki.cn32-1628/tm.2019.35.074.

新能源场站中性点不接地系统安全性提升

周晓

国电投山东生态能源有限公司，山东 济南 250000

DOI:10.61369/EPTSM.2025010007

摘要： 本文探讨了新能源场站中性点不接地系统的安全性提升问题。分析了该系统的现状与问题，包括过电压风险、故障定位困难和供电可靠性降低等。提出了一系列技术措施来提升安全性，如引入消弧线圈或小电阻接地、改进保护装置、优化接地变压器配置以及采用混合接地方式等。还强调了理论与实践相结合的重要性，通过仿真分析和实际案例研究验证了不同接地方式的效果。展望了未来发展方向，包括智能化保护技术的应用、新型接地技术的探索以及综合优化策略的实施。

关键词： 新能源场站；中性点不接地系统；安全性提升；技术措施

The Enhancement of Safety for Neutral Point Non-Grounded Systems in New Energy Stations

Zhou Xiao

State Power Investment Shandong Ecological Energy Co., LTD. Jinan, Shandong 250000

Abstract： This article explores the safety improvement of ungrounded neutral point systems in new energy stations. Analyzed the current situation and problems of the system, including overvoltage risk, difficulty in fault location, and reduced power supply reliability. A series of technical measures have been proposed to enhance safety, such as introducing arc suppression coils or small resistance grounding, improving protection devices, optimizing the configuration of grounding transformers, and adopting hybrid grounding methods. The importance of combining theory with practice was also emphasized, and the effectiveness of different grounding methods was verified through simulation analysis and practical case studies. Looking ahead to future development directions, including the application of intelligent protection technology, exploration of new grounding technologies, and implementation of comprehensive optimization strategies.

Keywords： new energy station; neutral point non-grounded system; safety enhancement; technical measures

引言

在当前全球能源转型和可持续发展的大背景下，新能源的快速发展正逐步改变着传统的电力系统格局^[1]。风电等新能源场站作为可再生能源的重要组成部分，其在电力系统中的地位日益重要。为了适应新能源场站的特殊需求，降低建设成本以及简化运行维护过程，许多风电场采用了中性点不接地系统。这种系统以其结构简单、成本较低等优点，在新能源场站中得到了广泛应用。然而中性点不接地系统在面对单相接地故障时，由于缺乏有效的电流回路，容易引发过电压、故障定位困难等一系列问题。这些问题不仅会影响系统的供电可靠性，导致供电中断或电压波动，还可能对设备造成安全隐患，如绝缘损坏、设备寿命缩短等。因此，如何提升中性点不接地系统的安全性，有效应对单相接地故障带来的挑战，成为了一个亟待解决的技术难题。

一、中性点不接地系统的现状与问题

中性点不接地系统广泛应用于10kV及以下的配电网中，特别是在农村电网和一些小型工业用户中较为常见^[2]。该系统的主要特点是在正常运行状态下，中性点与地之间没有直接的电气连

接，因此不会形成零序电流通路。这种接线方式在一定程度上简化了系统结构，降低了建设和维护成本，同时也避免了因中性点接地而可能引发的某些类型的短路故障。随着电力负荷的增长和电网结构的复杂化，中性点不接地系统也逐渐暴露出一些问题，尤其是在故障处理和系统保护方面面临着较大的挑战。这种系统

虽然能够避免瞬时性故障的快速切除，但容易引发以下问题：

（一）过电压风险

当单相接地故障发生时，系统中的电感和电容之间会产生振荡，导致过电压的产生。这种过电压可能会对设备的绝缘造成损害，甚至引发更严重事故^[3]。具体来说，过电压的产生机制主要包括铁磁谐振：当系统中存在非线性元件（如变压器的励磁特性）时，容易发生铁磁谐振现象，进而产生较高的过电压。电容耦合：线路中的分布电容会在故障瞬间产生暂态电压，这些电压叠加后可能导致过电压的发生。电感放电：故障点的电感储能会在故障切除后会迅速释放，形成瞬时高电压。为了抑制过电压的危害，通常需要采取相应的保护措施，如安装消弧线圈来补偿接地点的电容电流，或者采用其他限压装置。。

（二）故障定位困难

由于中性点不接地系统在正常运行时没有零序电流的存在，一旦发生单相接地故障，很难迅速准确地定位故障点^[4]。这增加了故障排查的难度和时间成本。具体而言：

缺乏有效的监测手段：传统的电流差动保护方法不适用于中性点不接地系统，因为无法检测到零序电流。信号干扰：现场可能存在多种电磁干扰源，使得故障信号难以被准确捕捉^[5]。依赖人工巡检：在没有自动化监测设备的情况下，往往需要依靠人工定期巡检来发现潜在的故障点。为了解决这一问题，近年来发展了一些新的故障定位技术，如基于行波原理的故障测距技术和利用小电流接地选线装置进行快速定位的方法。

（三）供电可靠性降低

单相接地故障可能导致部分设备退出运行，从而降低整个系统的供电可靠性^[6]。在某些情况下，如果故障得不到及时处理，还可能引发连锁反应，进一步扩大事故范围。非故障相电压升高：故障发生后，非故障相的电压会升高至线电压水平，这可能导致相邻线路上的设备出现电压越限情况。继电保护动作：为了防止设备损坏，相关的继电保护装置可能会动作跳闸，导致供电中断。系统稳定性下降：长时间的供电中断会影响用户的正常生产和生活，严重时甚至会影响到整个电网的稳定性。

为了提高供电可靠性，可以采取优化网络结构：通过合理规划电网布局，减少单点故障对全局的影响^[7]。加强设备维护：定期检修关键设备，确保其在关键时刻能够正常工作。实施智能监控：利用物联网技术实现远程监控和自动报警功能，及时发现并处理异常情况。。

二、安全性提升的技术措施

（一）引入消弧线圈或小电阻接地

通过在中性点接入消弧线圈或小电阻，可以有效限制单相接地故障时的过渡电流，从而降低过电压和故障电流^[8]。例如：消弧线圈接地：利用消弧线圈补偿故障电流，使电弧能迅速熄灭，减少过电压幅度。小电阻接地：通过接入小电阻，快速释放过渡电流，同时限制过电压幅度。

（二）改进保护装置

快速选线技术，采用新型快速消弧选线技术，能够快速识别并隔离故障区段，提高系统运行的安全性和稳定性^[9]。基于矩阵算法的故障定位，利用零序电流与电压相位差等参数，结合算法模型实现故障区段的准确定位。

（三）优化接地变压器配置

接地变压器作为系统的重要保护设备，其配置直接影响系统的安全运行。通过合理选择接地变压器的参数（如阻抗值），可以有效抑制过电压和故障电流。

（四）混合接地方式的应用

对于部分新能源场站，可以考虑采用中性点经消弧线圈接地与经小电阻接地相结合的方式，以兼顾供电可靠性和安全性。

三、理论与实践的结合

（一）仿真分析

为了深入研究中性点不接地系统在单相接地故障下的特性，我们首先需要建立一个准确的仿真模型^[10]。该模型应包含风电场的主要组成部分，如风力发电机、变压器、输电线路以及汇集线等。还需要考虑到系统的参数设置，如电阻、电感、电容等，以确保模型能够真实反映实际系统的电气特性。在MATLAB环境下，我们可以利用其强大的电力系统仿真工具箱（SimPowerSystems）来构建这一模型。通过设定合适的仿真参数和初始条件，我们可以模拟不同接地方式下的系统运行情况，并观察其在单相接地故障时的表现。

（二）实际案例研究

以某风电场为例，该风电场采用中性点不接地系统，汇集线长度较长且穿越多个区域。在实际运行中，发现单相接地故障时系统过电压现象严重，且故障定位困难，影响了供电可靠性。为了解决这一问题，

1. 引入消弧线圈或小电阻接地：在中性点接入消弧线圈或小电阻是一种有效的限压措施。消弧线圈能够补偿接地点的电容电流，使电弧迅速熄灭，从而降低过电压幅度。而小电阻则能快速释放过渡电流，进一步限制过电压的产生。通过对比仿真分析，我们发现消弧线圈在抑制过电压方面效果更佳，但会增加一定的能耗；小电阻则具有更快的响应速度和更低的能耗，但可能对系统的正常运行产生一定影响。因此，在选择具体方案时需要综合考虑实际情况。

2. 改进保护装置

为了提高故障定位精度和供电可靠性，我们建议采用新型快速消弧选线技术和基于矩阵算法的故障定位方法。这些技术能够实时监测系统的运行状态，并在发生单相接地故障时迅速准确地定位故障点。同时，还可以结合智能继电器和自动化控制系统来实现故障的自动隔离和恢复功能。

3. 优化接地变压器配置

接地变压器作为系统的重要保护设备之一，其参数设置直接影响系统的安全运行。通过合理选择接地变压器的阻抗值和容量

等参数，可以有效抑制过电压和故障电流的传播范围。此外，还可以考虑采用多台接地变压器并联运行的方式以提高系统的冗余度和可靠性。

4. 混合接地方式的应用

对于部分特殊区域或重要负荷点，可以考虑采用中性点经消弧线圈接地与经小电阻接地相结合的方式。这种混合接地方式既能兼顾供电可靠性和安全性要求，又能根据实际需要灵活调整接地电阻的大小。通过仿真分析验证了该方案的可行性和有效性。

四、未来发展方向

在未来新能源场站规模不断扩大的背景下，中性点不接地系统的安全性问题变得日益突出。为了应对这一挑战，智能化保护技术与人工智能算法的应用、新型接地技术的探索以及综合优化策略的实施成为了重要的研究方向。这些新技术和策略不仅能够实现故障检测与定位的自动化，提高系统的安全性和可靠性，还能根据不同场站的特定需求制定针对性的优化方案。

（一）智能化保护技术与人工智能算法的应用

随着人工智能技术的飞速发展，其在电力系统中的应用也日益广泛。在中性点不接地系统中，通过引入智能保护装置和人工智能算法，可以实现对故障的快速检测与定位，从而大大提高系统的响应速度和准确性。具体而言，智能保护装置能够实时监测系统的运行状态，一旦检测到异常情况，便立即启动故障诊断程序。而人工智能算法则可以通过对大量历史数据的学习和分析，建立起准确的故障模型，从而实现对故障类型的准确判断和定位。人工智能算法还可以用于优化保护策略，通过模拟不同的故障场景，找出最优的保护方案，从而提高系统的可靠性和稳定性。智能保护装置还可以与自动化控制系统相结合，实现故障的自动隔离和恢复，减少人工干预，提高系统的运行效率。

（二）新型接地技术的探索

除了智能化保护技术外，新型接地技术的探索也是提升中性

点不接地系统安全性的重要途径。其中，Petersen线圈接地技术作为一种新兴的接地方式，受到了广泛关注。与传统的消弧线圈或小电阻接地方式相比，Petersen线圈具有更好的动态性能和限压效果，能够在更广泛的运行条件下保持有效的接地保护。

Petersen线圈通过调节其电感值来改变接地点的电流大小，从而实现对过电压的有效抑制。同时，由于其结构简单、体积小，易于安装和维护，因此在新能源场站中具有很高的应用价值。通过仿真分析和实际案例研究，可以验证 Petersen线圈接地技术的有效性和可靠性，为类似工程提供参考。

（三）综合优化策略的实施

为了进一步提升中性点不接地系统的安全性和可靠性，还需要实施综合优化策略。这包括对系统结构、设备配置、运行方式等多个方面的优化。例如，可以通过合理规划电网布局、增加冗余度、提高设备的耐压水平等措施来增强系统的抗故障能力；也可以通过优化调度策略、加强设备维护管理等手段来降低故障发生的概率和影响。此外，还需要加强对新型技术和策略的研究和应用，不断推动技术创新和进步。通过建立完善的试验平台和测试体系，对新技术进行充分验证和评估，确保其在实际应用中的可行性和有效性。

五、总结

新能源场站中性点不接地系统的安全性提升需要从技术、设备和管理等多个方面入手。通过引入消弧线圈或小电阻接地、优化保护装置、改进接地变压器配置以及采用混合接地方式等措施，可以有效降低过电压风险、提高故障定位精度和供电可靠性。同时结合仿真分析和实际案例研究，为新能源场站的安全运行提供理论支持和技术保障。

参考文献

- [1] 黄晓杰, 张广磊. 新能源场站接地变压器保护配置研究 [J]. 风能, 2024(9): 90-94.
- [2] 邹浩斌. 配电网中性点接地方式研究 [D]. 广东: 华南理工大学, 2007.
- [3] 王丙东, 蔡蕾, 董旭. 中性点不接地系统非对称短路故障分析 [J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(3): 149-153.
- [4] 赵军, 袁雪琼, 扈海泽. 基于变电阻电压扰动的配电网对地参数精确测量新方法 [J]. 电力系统保护与控制, 2015(17): 51-56.
- [5] 朱高波. 110kV 变压器中性点过电压的计算及其保护策略 [J]. 低碳世界, 2015(23): 76-77.
- [6] 张方军. 发电机中性点接地方式及其对定子接地保护的影响 [J]. 电力建设, 2007, 28(2): 43-45.
- [7] 詹启帆, 李天友, 蔡金铨. 配电网高阻接地故障检测技术综述 [J]. 电气技术, 2017(12): 1-7.
- [8] 贺春, 刘力军, 谢颂果. Z型变在中性点经小电阻接地电网中的应用 [J]. 继电器, 2006, 34(14): 15-19.
- [9] 景小平. 快速消弧选线技术在光伏系统中的应用 [C]// 中国电力技术市场协会. 2023年电力行业技术监督工作交流会暨专业论坛论文集 (上册). 中国大唐集团有限公司宁夏分公司青铜峡运维中心, 2023: 8.
- [10] 魏旗. 某改造项目中 35 kV 变电站的中性点接地方式的选择 [J]. 建材世界, 2021, 42(05): 88-90.

水电与新能源联合发电系统协同优化生产管理策略

吴永琦

贵州黔源电力股份有限公司, 贵州 贵阳 550002

DOI:10.61369/EPTSM.2025010016

摘要：水电与新能源联合发电系统面临新能源间歇性、水电调节复杂及系统协调运行难度大等挑战。为应对这些挑战，需采取协同优化生产管理策略。具体策略包括资源优化配置，通过合理规划实现能源高效利用；联合调度运行，建立统一调度中心，制定灵活调度规则，采用滚动优化方法；技术创新应用，加大储能技术研发投入，推广先进预测技术，探索数字化与智能化技术应用。这些策略将提升联合发电系统性能与竞争力，推动能源转型与可持续发展。

关键词：水电；新能源；联合发电系统

Collaborative Optimization of Production Management Strategy for Hydropower and New Energy Combined Power Generation System

Wu Yongqi

Guizhou Qianyuan Electric Power Co., Ltd. Guiyang, Guizhou 550002

Abstract： The combined power generation system of hydropower and new energy faces challenges such as intermittency of new energy, complex regulation of hydropower, and difficulty in coordinated operation of the system. To address these challenges, it is necessary to adopt collaborative optimization production management strategies. Specific strategies include optimizing resource allocation and achieving efficient energy utilization through rational planning; Joint scheduling operation, establishment of a unified scheduling center, formulation of flexible scheduling rules, and adoption of rolling optimization methods; Technological innovation and application, increasing investment in energy storage technology research and development, promoting advanced prediction technology, and exploring the application of digital and intelligent technologies. These strategies will enhance the performance and competitiveness of the combined power generation system, promote energy transformation and sustainable development.

Keywords： hydropower; new energy; joint power generation system

随着全球对环境保护和可持续发展的关注度不断提高，能源结构的转型已成为必然趋势。水电和新能源作为清洁能源的代表，在能源供应中占据着越来越重要的地位。然而，水电和新能源在发电特性上存在一定的差异，单独运行面临着诸多挑战。水电与新能源联合发电系统能够实现优势互补，提高能源供应的稳定性和可靠性，降低对传统化石能源的依赖，具有重要的研究价值和实践意义。

一、水电与新能源联合发电系统面临的挑战

（一）新能源的间歇性问题

新能源发电功率所呈现出的间歇性与波动性，已然成为当前能源领域亟待解决的关键难题。以太阳能发电为例，其发电效率高度依赖于光照强度和日照时间。在昼夜交替的规律下，夜晚缺乏光照，太阳能发电设备自然无法产生电力；而在白天，光照强度又会受到天气状况的显著影响，阴天、雨天时，云层遮挡阳光，导致光照强度大幅减弱，太阳能发电功率随之急剧下降。此外，不同季节的日照时间差异也十分明显，冬季日照时间短，夏季日照时间长，这种季节性的变化进一步加剧了太阳能发电功率

的不稳定性。风能发电同样面临着间歇性与波动性的挑战。风速和风向是影响风能发电功率的核心因素。风速的大小直接决定了风力发电机叶片的转速，进而影响发电功率。然而，风速并非恒定不变，而是时刻处于变化之中，时而微风拂面，时而狂风大作，这种风速的不稳定使得风能发电功率难以保持稳定输出。风向的不确定性也给风能发电带来了困扰，当风向频繁改变时，风力发电机需要不断调整叶片角度以适应风向变化，这不仅增加了设备的运行损耗，还可能导致发电效率降低。而且，不同地区的风能资源分布不均，某些地区可能长期处于风速较低或风向不稳定的状况，使得当地的风能发电项目难以持续稳定地提供电力。

作者简介：吴永琦（1986.12-），女，汉族，贵州贵阳人，大学本科，高级工程师，主要从事水电与新能源生产技术管理。

（二）水电调节的复杂性

水电的调节过程犹如在错综复杂的网络中寻找平衡点，受到水资源、水情、水库调度等多方面因素的深度交织影响，每一个因素都如同精密机械中的齿轮，相互咬合、相互制约，共同塑造了水电调节的复杂局面。水资源作为水电发电的基础，其时空分布极不均衡。从时间维度来看，年内不同季节、年际之间的降水量差异巨大，导致河流径流量呈现出显著的丰枯变化^[1]。在丰水期，大量降水汇聚成汹涌的洪水，为水电站带来了充沛的水源，发电量大幅增加。然而，此时水电站不仅要承担发电任务，还需兼顾防洪、灌溉等综合利用需求。防洪方面，要确保水库有足够的库容来拦蓄洪水，减轻下游地区的洪涝灾害压力，这就要求对水库进行合理的蓄水和泄洪调度；灌溉方面，要保障下游农田的用水需求，根据农作物生长周期和土壤墒情，适时适量地放水灌溉。这些综合利用需求之间往往存在矛盾和冲突，如何在水资源有限的情况下，统筹兼顾发电、防洪、灌溉等多重目标，实现水资源的优化配置，是一个极具挑战性的问题。

（三）系统协调运行难度大

水电与新能源联合发电系统宛如一个庞大且精密的“能源交响乐团”，涵盖了水电站、风力发电场、太阳能光伏电站等多个发电单元，以及水能、风能、太阳能等不同类型的能源。要使这个“乐团”和谐奏响，实现高效、稳定的协调运行，需解决一系列复杂且相互关联的问题。信息共享是系统协调运行的基础，然而目前面临着诸多挑战。不同发电单元的监测设备、数据格式和传输协议存在差异，导致信息难以实现无缝对接和实时共享。例如，水电站的水位、流量等数据与风力发电场的风速、风向数据，以及太阳能光伏电站的光照强度、发电功率数据，在采集、存储和传输过程中，可能因技术标准不统一而出现数据丢失、延迟或错误，影响系统对整体运行状态的准确判断。此外，信息共享还涉及到数据安全和隐私保护问题，如何在保障数据安全的前提下，实现各发电单元之间的信息透明和共享，是一个亟待解决的难题。调度决策是系统协调运行的核心，其复杂性体现在多个方面。一方面，不同类型的能源发电特性差异巨大，水电发电功率相对稳定但受水资源限制，风能发电功率波动频繁且难以预测，太阳能发电功率受昼夜和天气影响显著。如何在这些特性迥异的发电单元之间进行合理的功率分配和调度，以满足电网的负荷需求，同时兼顾能源的高效利用和系统的安全稳定运行，是一个极具挑战性的问题。另一方面，调度决策还需要考虑多种约束条件，如发电设备的运行限制、电网的传输容量限制、能源的环保要求等。这些约束条件相互交织，使得调度决策过程变得异常复杂，需要运用先进的优化算法和智能决策技术，才能实现科学合理的调度。

二、水电与新能源联合发电系统协同优化生产管理策略

（一）资源优化配置策略

在水电与新能源联合发电系统这一复杂且庞大的能源体系

中，资源优化配置策略占据着举足轻重的地位，它是提升能源利用效率、保障电力稳定供应的核心要素与关键路径。

从资源特性角度来看，水电与新能源（如风电、光伏）在时空分布上呈现出显著的差异性与互补性。水电资源主要依赖于流域的水文气象条件，其来水过程具有明显的季节性和年际变化特征，水库库容的调节能力在一定程度上决定了水电的发电出力规模与时间分布。而新能源发电则高度依赖于自然气象因素，风速的随机性、间歇性以及光照强度的不确定性，导致风电和光伏发电功率具有较大的波动性和难以预测性^[2]。因此，在进行资源优化配置时，必须全面、深入地综合考虑不同能源的时空分布特性。这要求对水电站的水库库容进行精确监测与评估，不仅要了解当前库容状态，还需结合历史数据和气象预报，对未来一段时间的来水情况进行科学预测。同时，对于新能源发电场，要建立完善的气象监测网络，实时获取风速、风向、光照强度等气象数据，并运用先进的气象预测模型，提高对新能源发电功率的预测精度。电力负荷预测是资源优化配置的重要依据，准确的电力负荷预测能够为发电出力的安排提供前瞻性指导，使发电系统能够更好地适应电力需求的变化。随着智能电网技术的发展，电力负荷预测方法不断改进，综合考虑了经济、社会、气象等多方面因素，采用机器学习、深度学习等先进算法，提高了预测的准确性和可靠性。基于电力负荷预测结果，运用先进的优化算法是实现资源优化配置的关键技术手段。这些优化算法包括线性规划、非线性规划、动态规划、智能优化算法（如遗传算法、粒子群算法、模拟退火算法等），它们能够在满足各种约束条件（如发电设备运行约束、电网传输约束、环境约束等）的前提下，寻求水电与新能源发电出力的最优组合，以实现能源利用效率的最大化和发电成本的最小化。

（二）联合调度运行策略

在水电与新能源联合发电系统的运行管理中，联合调度运行策略占据着举足轻重的核心地位，它是保障整个系统高效协同运作、实现能源优化配置与可靠供应的关键所在。随着能源结构的不断调整和电力需求的日益增长，水电与新能源联合发电系统面临着更为复杂的运行环境和更高的性能要求，因此，构建一套科学、合理且具备高度适应性的联合调度运行策略显得尤为迫切。

从信息整合与共享的角度来看，建立统一的调度控制中心是联合调度运行的基础支撑。该中心应作为一个高度集成的信息枢纽，全面整合水电站、风电场、光伏电站等各类发电单元的运行信息。这要求部署先进的传感器网络和通信技术，对发电设备的运行状态、发电功率、能源储备等关键参数进行实时、精准的监测与采集。通过构建高效的数据传输通道和存储管理系统，确保海量运行数据能够快速、准确地传输至调度控制中心，并进行有序存储和分类管理。在此基础上，运用大数据分析、云计算等先进技术，对运行数据进行深度挖掘和分析，提取有价值的信息，为调度决策提供全面、准确的数据支持^[3]。同时，为打破各发电单元之间的信息壁垒，实现信息的无缝对接与实时共享，需构建统一的信息交互平台，制定标准化的信息传输协议和数据格式，确保各发电单元能够及时、准确地获取和交换运行信息，为联合

调度决策提供全局视野和协同基础。调度规则的制定是联合调度运行的核心环节，它直接关系到联合发电系统的运行效率和可靠性。由于水电、风电和光伏等不同能源具有截然不同的发电特性，如水电具有较强的调节性能，能够根据电网负荷需求快速调整发电出力；而风电和光伏则具有明显的波动性和间歇性，其发电功率受自然气象条件影响较大。所以说，在制定调度规则时，需充分考虑这些能源特性的差异，并结合电网负荷需求的动态变化和系统安全稳定的约束条件，制定多目标联合调度方案。多目标联合调度方案应涵盖经济性、可靠性、环保性等多个维度，通过构建综合评价指标体系，运用多目标优化算法，如多目标遗传算法、多目标粒子群算法等，在满足各种约束条件的前提下，寻求发电成本最低、能源利用效率最高、污染物排放最少以及系统可靠性最优的调度方案。

（三）技术创新应用策略

在水电与新能源联合发电系统的协同优化进程中，技术创新无疑扮演着至关重要的角色，是推动系统持续进步与发展的核心驱动力。为了实现系统的高效、稳定运行，并进一步提升其性能与竞争力，必须加大在技术创新应用方面的投入力度^[4]。

储能技术作为解决新能源发电波动性问题的关键手段，其重要性不言而喻。为此，应着重加大对储能技术的研发投入，涵盖

电池储能、抽水蓄能等多种技术路线。通过深入研究和开发先进的储能装置，实现其充放电过程的高效调节，从而有效平滑新能源发电的波动。具体而言，电池储能技术凭借其快速响应、灵活部署等优势，能够在短时间内进行大量电能的存储与释放，为应对新能源发电的瞬时波动提供有力支持；而抽水蓄能技术则利用水的重力势能进行电能与机械能的相互转换，具有储能容量大、运行寿命长等特点，适用于长期、大规模的储能需求。通过储能装置的合理配置与优化运行，可以显著提高联合发电系统的灵活性和稳定性，确保在各种运行工况下都能保持稳定的电力输出。除了储能技术外，预测技术的准确性和可靠性对于联合发电系统的运行也至关重要。

三、结语

水电与新能源联合发电系统在实现能源高效利用的征程中，虽面临新能源间歇性、水电调节复杂及系统协调运行难等挑战，但通过实施资源优化配置、联合调度运行以及技术创新应用等协同优化生产管理策略，可有效提升系统性能。这些策略不仅有助于应对当前挑战，更为系统未来的可持续发展奠定了坚实基础，推动能源结构不断优化，助力清洁能源产业迈向新高度。

参考文献

- [1] 贺嘉坤. 基于机器学习的水电能源发电效率预测与优化分析 [J]. 集成电路应用, 2024, 41 (01): 320–321.
- [2] 张阳博, 张帅, 朱燕梅, 黄炜斌, 邓靖微, 曹敏琦. 汛限水位动态控制对水电-新能源互补能力的提升研究 [J]. 四川电力技术, 2023, 46 (06): 15–20.
- [3] 胡人川, 刘俊勇, 刘友波, 刘季昂, 何鑫, 舒俊霖, 宋璐璐. 促进新能源外送的多级水电-风电联盟备用效益均衡模型 [J]. 电网与清洁能源, 2023, 39 (02): 103–113.
- [4] 张晓良. 新形势下水电新能源企业加强技术监督工作的思考 [J]. 产业创新研究, 2021, (24): 124–126.

电力监控系统中安全防护技术及措施探析

李绪蛟

安能二局电力发展建设（厦门）有限公司，福建 厦门 361000

DOI:10.61369/EPTSM.2025010025

摘 要： 数字化时代，电力监控系统自动化程度不断提高，智能化程度不断提高，电力监控系统与外部网络的交互不断增多，网络攻击风险逐步上升。电力作为关键基础设施，监控系统一旦出现安全问题不仅会影响电力供应，还很有可能使不良影响波及到其他行业。许多电力企业开始在电力监控系统中应用安全防护技术，以确保电力监控系统的可行性和有效性。本文主要对电力监控系统中安全防护技术及措施详细分析。电力企业可基于现阶段电力系统规模庞大，结构复杂，设备比较多，不同厂家设备和系统间的兼容性和安全性参差不齐，会增加安全管理难度，积极探索电力监控系统中安全防护技术及有效方法，确保安全防护技术和有效措施能使电力监控系统持续且稳定运行。

关 键 词： 电力监控系统；安全防护技术；措施

Analysis of Safety Protection Techniques and Measures in the Electric Power Monitoring System

Li Xujiao

Anneng Second Bureau Electric Power Development and Construction (Xiamen) Co., Ltd. Xiamen, Fujian 361000

Abstract： In the digital era, the automation and intelligence levels of electric power monitoring systems are constantly improving, and the interaction between electric power monitoring systems and external networks is increasing, leading to a gradual increase in the risk of cyber attacks. As a critical infrastructure, any security issues in the power monitoring system will not only affect power supply but also potentially cause adverse impacts on other industries. Many power companies have begun to apply security protection techniques in their power monitoring systems to ensure their feasibility and effectiveness. This paper mainly provides a detailed analysis of the security prevention and control techniques and measures in the electric power monitoring system. Based on the current large-scale and complex power system structure, as well as the numerous devices and varying compatibility and security among different manufacturers' equipment and systems, which increase the difficulty of security management, power companies can actively explore security protection techniques and effective methods in the electric power monitoring system. This ensures that security protection techniques and effective measures enable the sustained and stable operation of the electric power monitoring system.

Keywords： electric power monitoring system; security protection techniques; measures

引言

电力企业在电力监控系统中落实有效的安全防护技术，把控要点，可保障电力监控系统安全，让电力持续稳定供应，避免因停电造成的社会秩序混乱。防止因系统故障或安全事件导致的经济损失。基于电力是国家关键基础设施的核心，让监控系统的安全防护成为维护国家安全和保障能源安全的重要组成部分，以便于有效抵御外部势力对电力系统的破坏和干扰。电力企业可通过在电力监控系统优化中有效落实安全防护技术，落实可靠措施，达成既定的目标。

一、电力监控系统对安全防护技术的应用所需

电力监控系统对安全防护技术的应用需求体现于多个方面，以下便开展了详细的分析。第一，网络隔离技术。电力监控系统直接关系电力生产的安全性和稳定性，需要与外部网络进行有效

隔离，这样才能防止外部网络攻击和恶意软件入侵。许多电力企业在电力监控系统优化中，应用专用物理隔离装置，借助物理隔离装置的作用实现生产控制区和信息管理区之间的单向或者双向隔离，可以保障数据的安全传输。第二，身份认证和访问控制。电力监控系统在运行的过程中需要对系统内的用户和设备进行严

格身份认证,确保只有经过授权的人员和设备才能访问监控系统的资源。许多电力企业利用访问控制技术,根据用户角色和权限,精细划分对不同数据和功能模块的访问级别,防止越权操作。第三,数据加密技术。电力监控系统中的数据涉及电网运行的关键信息,电力企业需要对电力参数和设备状态等关键数据在传输和存储过程中进行加密处理,这样才能确保数据的保密性。许多电力企业应用先进加密算法,防止数据被窃取,防止数据被篡改,确保数据的机密性,确保数据的完整性。

二、电力监控系统中安全防护技术应用案例

电力监控系统中安全防护技术的优秀应用案例有许多,效果十分显著。某电力企业在电力监控系统优化工作中应用安全防护技术时,在火电厂DCS系统中部署工控监测审计系统,对网络流量、异常事件、操作行为和数据内容等进行安全审计,实时警报异常行为并追踪溯源。另外,企业部署工控入侵检测系统,及时发现网络入侵行为,分析潜在威胁并报警,协助解决安全威胁。此外,企业在工控系统工程师站和操作员站交换机上各部署1台USB安全隔离装置,防止病毒和木马通过USB接口进入系统,解决USB移动设备接入工控系统无管控、无记录的问题。企业还各机组DCS系统网络中部署运维审计系统,实现设备集中管控,限制远程登录地址,审计用户操作权限和行为,提供会话审计和回放功能。某电力企业在探索电力监控系统中安全防护技术应用方法时,提出全流量电力协议解析算法,研制网络行为动态感知装置,实现对网络空间内资产及行为的关键节点、关键路径监测。另外,企业提出基于漏洞价值和资产价值和利用影响业务范围的工控漏洞定级方法,建立工控安全状态脆弱性评价模型,研制专用漏洞定级及脆弱性评价电力网络空间装备。此外,企业还研发网络威胁智能诊断组件,全要素精准量化分析威胁特征、攻击轨迹及危害范围,全方位检测电力网络系统脆弱性,将60000余座变电站、新能源场站的网络空间纳入威胁评估范围,威胁诊断准确率达99.7%。相关电力企业在进行电力监控系统优化时,可通过以实际案例为鉴,丰富安全防护技术应用经验,有效落实安全防护技术,确保电力监控系统优化工作执行的效率和质量。

三、电力监控系统中安全防护技术应用问题

(一) 兼容性问题

电力监控系统包含众多不同厂商和不同时期的设备和软件,不同厂商和不同时期的设备和软件,通信协议和接口标准很有可能存在差异,会导致安全防护技术难以统一应用,影响安全防护技术的作用。举例而论,部分电力企业老旧设备不支持新的加密算法和安全协议,导致电力监控系统在运行的过程中,很难实现医治的安全防护策略。

(二) 漏洞检测问题

电力监控系统规模大,结构复杂,存在许多潜在的安全漏洞,虽然部分电力企业社会发展现阶段未紧随时潮流应用漏

洞扫描工具对漏洞进行检查,但由于系统特殊性和复杂性,很难确保所有漏洞都能被及时和准确的检测到。举例而论,部分电力企业在进行漏洞检测的过程中,针对一些涉及底层硬件或特定业务逻辑的漏洞要用常规扫描工具,并不能对潜在的问题及时发现,并不能对问题进行有效解决^[1]。

(三) 技术更新不及时

网络攻击技术不断发展,电力企业需要在电力监控系统优化工作中应用安全防护技术时,对技术不断更新,这样才能使技术具有现代化和智能化的特性,让技术发挥良好作用。但是,部分电力企业监控系统中的安全防护技术往往比较滞后,主要原因在于系统稳定性要求高,电力企业不敢轻易进行技术更新,或者电力企业因资金和技术人员等方面的限制,无法及时采用最新的安全防护技术^[2]。

四、电力监控系统中安全防护技术的应用方法

(一) 合理应用网络隔离技术

电力企业在监控系统优化工作中应用网络隔离技术时,可通过明确隔离区域划分和选择合适的物理隔离设备等达成既定的目标。电力企业在进行明确隔离区域划分的过程中,可清晰界定电力监控系统的安全区域,如生产控制大区和信息化管理大区,基于控制区域涉及电力生产的直接控制安全要求比较高,非控制区相对低些,信息管理大区主要处理管理信息,实施不同强度的隔离措施,确保隔离措施与不同区域安全等级和功能所需相匹配,确保关键控制区的安全。电力企业在选择合适的物理隔离设备的过程中,可针对生产控制大区和信息化管理大区之间应用物理隔离装置,提高工作效果。电力企业可给予正向隔离装置,允许数据从生产控制大区单向流向信息管理大区,可用于传输实时监测数据,反向隔离装置可在严格的安全控制下允许特定非实时数据从信息管理大区流向生产控制大区,如调度指令,有针对性选择隔离设备,让隔离设备有效防止网络攻击从信息管理大区渗透到生产控制大区中。电力企业为进一步提高网络隔离技术的应用效果,也可通过合理部署网络防火墙,利用网络防火墙进行逻辑隔离,确保工作成效。电力企业可在生产控制大区内部的不同子网之间,以及信息管理大学内不同部门网络之间,合理部署网络防火墙,让网络防火墙发挥良好作用。该过程中,电力企业可通过配置防火墙规则。依据源地址和目标地址以及端口号等条件,对网络流量进行过滤,对网络流量进行控制,限制非法访问和数据传输,以便于实现逻辑层的隔离^[3]。

(二) 合理应用身份认证和访问控制技术

电力企业在应用身份认证和访问控制技术的过程中,可通过选择合适身份认证方法和严格用户账号管理等达成既定的目标。电力企业在选择身份认证方式的过程中,可应用用户名和密码以及数字证书等多种方式,进行方式结合。具体实践中,电力企业可在输入正确用户名和密码之后,插入数字证书或通过生物特征验证,以便于提高身份认证的准确性,提高身份认证的安全性,防止身份被冒用。这一企业也可应用动态口令牌或者手机验证码

等方式,确保每次登录的口令不同,保障信息安全。让动态口令基于时间和事件等因素生成,抵御口令猜测和窃取攻击,有效增加攻击者的破解难度。电力企业在严格用户账号管理的过程中,可通过对用户账号创建和修改以及禁用进行严格管理,做好账号生命周期管理,提高管理水平。电力企业可让新用户经过审批流程创建账号,让离职和调岗人员及时禁用或删除账号,防止账号被非法应用。电力企业可根据用户工作职责和业务需求有针对性分配权限,如让普通操作人员只能进行数据查看和简单操作,让系统管理人员有配置和高级管理权限,管理好权责。电力企业为进一步提高身份认证和访问控制技术的效果,也可通过细化访问控制策略,让相关工作开展得更有意义和价值。电力企业通过将用户划分不同角色,划分成系统管理员和操作员以及工程师等,让每个角色都拥有相应的权限。让不同角色对数据和功能模块等系统资源有不同访问级别,方便管理和维护权限。电力企业也要注重做好基于属性的访问控制,除角色之外,考虑用户部门和工作地点以及时间等其他属性,制定访问控制策略,让访问控制得到良好管理^[4]。

(三) 合理应用数据加密技术

电力企业在应用数据加密技术的过程中,可通过选择合适加密算法和确保数据真实性和确保数据的完整性等达成既定的目标。电力企业在选择加密算法的过程中,可对大量数据的快速加密和解密需求,有针对性应用对称加密算法,确保加密算法的可行性和有效性。电力企业可应用高级加密标准,基于高级加密标准加密速度快和效率高,比较适用于电力监控系统中实时数据的加密,借助高级加密标准,对电力参数和设备状态信息等传输过程中进行加密保护。电力企业也可在需要保证数据来源可靠性和不可抵赖性的场景中,合理应用非对称加密算法,确保加密算法得到有效落实。该过程中,电力企业可在用户认证和数字签名等环节合理利用非对称加密算法对关键信息进行加密处理,确保数据的真实性,确保数据的完整性。此外,电力企业可依据实际情况应用哈希算法,即 SHA-256,对数据进行摘要处理,生成固定长度的哈希值,确保哈希算法在验证数据在传输或存储过程中是否被篡改时,发挥良好作用。电力企业为进一步提高数据加密技术应用的有效性,也可通过确定加密范围进一步提高技术应用效果。电力企业可对电力监控系统中不同设备之间和系统与外部通信的数据进行加密传输,如果在变电站与调度中心之间的数据通信链路中,合理应用加密隧道技术,对,数据进行加密处理,

防止数据在传输的过程中被窃取,被篡改。电力企业针对存储在数据库和服务器硬盘等存储介质中的数据,也要注重做好加密存储。电力企业可通过应用数据库自带的加密功能或者第三方加密工具对敏感数据字段进行加密处理,确保用户账号信息和电力设备配置参数等信息得到良好保护^[5]。

五、电力监控系统中安全防护技术的应用原则

电力企业在电力监控系统优化工作中探索安全防护技术应用方法时,要注重遵循安全分析原则和网络专用原则等,把控原则,提高工作效果。以遵循安全分区原则为例,电力企业要注重根据电力监控系统的功能和实时性以及重要性等因素合理划分安全区域,如果合理划分生产控制大区和信息管理大区,将生产控制大区细分为控制区和非控制区,确保不同安全区域实施不同等级的安全防护策略,确保关键控制区域的安全性。以遵循网络专用原则为例,电力企业要确保电力监控系统使用专用网络设备和通信线路,确保电力监控系统与外部公共网络物理隔离,通过避免使用公用网络进行电力监控数据传输,防止外部网络攻击,防止外部网络干扰让电力监控系统在实际运行的过程中,网络具有独立性和安全性的特点。以遵循安全审计原则为例,电力企业也要注重建立完善的安全审计机制,利用安全审计机制对电力监控系统的操作和访问进行全面记录和审计。如对审计日志进行分析,以便于及时发现潜在的安全问题和违规行为,以便于采取有效措施对问题进行处理,为安全事件追溯和调查提供相应的依据。

六、结语

结合以上论述的相关内容可具体总结为,电力企业基于电力系统是国家重要基础设施,电力系统稳定性是社会经济良性发展的重要保障,对电力监控系统进行优化提升,既可以提升企业综合实力,还可以促进社会发展。电力企业可通过积极引入并合理应用安全防护技术,促使电力监控系统强化功能。电力企业可通过合理应用网络隔离技术、合理应用身份认证和访问控制技术、合理应用数据加密技术等。借助可行性较强和有效性较强的安全防护技术,提高电力系统安全性,提高电力系统的稳定性。

参考文献

- [1] 汤超.浅析电力监控系统网络安全监视体系建设[J].机电信息,2020(32):142-143.
- [2] 蒋涛,董贵山,杨乐怡,黄妮娜.新形势下电力监控系统网络安全风险分析与防护对策[J].信息安全与通信保密,2022(04):79-84.
- [3] 赵兴荣.如何提高水电厂电力监控系统网络安全防护水平[J].云南水力发电,2021,37(09):162-164.
- [4] 杨浩,陈宝靖,李燕.电力监控系统网络安全防护技术应用研究[J].电子世界,2021(01):128-129.
- [5] 郭丰.电力监控系统网络安全加固技术探讨[J].网络安全技术与应用,2020(11):132-134.

东北地区新能源汽车渗透率研究

刘冰岩

国网哈尔滨供电公司, 黑龙江 哈尔滨市 150010

DOI:10.61369/EPTSM.2025010001

摘要： 本研究旨在探讨东北地区新能源汽车的渗透率及其影响因素。通过对东北地区各省市新能源汽车销售数据的搜集与分析，结合政策支持、充电基础设施建设等因素，对新能源汽车在东北地区的渗透情况进行深入分析。研究发现，东北地区新能源汽车渗透率受政策扶持、充电设施建设水平、消费者接受程度等因素影响较大。最后，针对当前存在的问题，提出了相应的政策建议和发展方向。

关键词： 东北地区；渗透率；政策支持；充电基础设施；发展方向

Research on the Penetration Rate of New Energy Vehicles in Northeast China

Liu Bingyan

State Grid Harbin Power Supply Company, Harbin, Heilongjiang 150010

Abstract： This study aims to explore the penetration rate of new energy vehicles in Northeast China and its influencing factors. Through the collection and analysis of sales data of new energy vehicles in various provinces and cities in Northeast China, combined with factors such as policy support and charging infrastructure construction, an in-depth analysis of the penetration of new energy vehicles in Northeast China is conducted. Research has found that the penetration rate of new energy vehicles in Northeast China is greatly influenced by factors such as policy support, level of charging facility construction, and consumer acceptance. Finally, corresponding policy recommendations and development directions were proposed to address the current issues.

Keywords： northeast region; penetration rate; policy support; charging infrastructure; development direction

引言

（一）研究背景与意义

东北地区是中国新能源汽车发展的重要地区之一。随着环保意识的提高和政府对于新能源汽车的支持，东北地区新能源汽车的渗透率逐渐增加。新能源汽车作为一种环保、节能的交通工具，对于改善空气质量、减少能源消耗具有重要意义。因此，研究东北地区新能源汽车渗透率的问题具有重要的理论和实践意义。

（二）研究目的

调查分析东北地区新能源汽车的注册数量和增长趋势，以了解新能源汽车在东北地区的渗透率状况。评估东北地区对新能源汽车的政策支持力度，包括财政补贴、购车优惠和充电基础设施建设等，分析这些政策对新能源汽车渗透率的影响^[1-2]。

一、东北地区新能源汽车市场现状分析

（一）政策支持情况分析

财政补贴政策：东北地区各省市相继出台了新能源汽车财政补贴政策，通过给予购车补贴和免征车辆购置税等方式，鼓励消费者购买新能源汽车。补贴政策的力度和标准因地区而异，但总体来说，东北地区的补贴政策相对较为优惠。

充电基础设施建设：东北地区加大了新能源汽车充电基础设施

建设的力度。各省市积极引导社会资本投入，建设公共充电桩和专用充电站，并推进充电网络的互联互通。同时，加强充电设施的规划布局，确保充电设施的覆盖范围和容量满足日益增长的需求。

车辆购置税优惠：东北地区新能源汽车购置税优惠政策也是支持渗透率提升的重要手段之一。根据国家政策，购买新能源汽车可以享受减免或者免征车辆购置税的优惠，这降低了消费者购车成本，促进了新能源汽车的销售。

（二）充电基础设施建设现状

充电桩数量：东北地区各省市在近年来积极推进新能源汽车充电基础设施建设。据统计，东北地区的充电桩数量逐年增长。大城市如哈尔滨、沈阳、大连等地的公共充电桩数量较多，而乡镇和农村地区的充电桩相对较少。充电桩的覆盖区域主要集中在城市核心区和交通干道。

充电网络互联互通：东北地区各省市加强了充电设施的规划布局 and 互联互通。通过建设充电站、快充桩和慢充桩，并推进充电网络的标准化，提高了充电设施的使用便利性和可靠性。同时，一些充电服务平台也在东北地区逐渐普及，方便用户查询、预约和支付充电服务。

充电技术升级：东北地区的充电技术也在不断升级和改进。除了传统的交流充电技术外，直流快速充电技术也得到了广泛应用，提高了充电速度和效率。此外，一些新型充电技术如无线充电和快充技术也在东北地区的部分城市试点和应用中取得了一定的进展^[3-4]。

二、东北地区新能源汽车渗透率影响因素分析

（一）政策因素对渗透率的影响

东北地区新能源汽车渗透率受多种因素影响，其中政策因素是其中一个重要的影响因素。以下是关于政策因素对东北地区新能源汽车渗透率的影响分析：

补贴政策：政府对新能源汽车购车补贴政策直接影响着消费者的购车意愿。在过去，东北地区各省市相继出台了一系列新能源汽车购车补贴政策，包括补贴金额、补贴对象、补贴范围等。这些政策的变化将直接影响到新能源汽车的销售和使用情况。

免费停车、免费通行政策：一些城市为鼓励新能源汽车的推广和应用，出台了免费停车和免费通行政策。这些政策降低了新能源汽车的使用成本，提高了新能源汽车的竞争力和吸引力，从而促进了新能源汽车的渗透率提升。

建设充电基础设施的政策支持：政府在推动新能源汽车渗透的过程中，也加大了对充电基础设施建设的支持力度。通过投入资金、出台规划和标准，政府扶持充电基础设施的建设和完善，提高了新能源汽车的使用便利性，从而影响了新能源汽车的渗透率。

（二）充电基础设施对渗透率的影响

充电便利性：充电基础设施的建设水平直接关系到新能源汽车的充电便利性。完善的充电基础设施网络能够提高新能源汽车用户的充电体验，减少充电等待时间，增加使用便利性，从而促进新能源汽车的推广和渗透。

充电桩覆盖密度：充电桩的分布密度直接关系到新能源汽车用户的充电便利性。在东北地区，充电桩的覆盖密度不仅影响到城市居民使用新能源汽车的方便程度，也影响到郊区和乡村地区的用户。因此，充电基础设施的覆盖密度对新能源汽车在不同地域的渗透率产生重要影响。

充电设施标准化和互操作性：充电基础设施的标准化和互操

作性将直接影响到新能源汽车用户的充电体验。一致的充电接口标准和互操作性能降低用户的充电成本和使用门槛，提高新能源汽车的市场竞争力，促进渗透率的提升。

（三）消费者接受程度对渗透率的影响

政策激励：消费者接受程度受到政府相关政策的直接影响。东北地区新能源汽车政策的支持力度、购车补贴、免费停车等优惠措施，都会对消费者购买新能源汽车的意愿产生积极影响，从而而影响新能源汽车的渗透率。

知识普及和宣传教育：消费者对新能源汽车的了解程度和认知水平将直接影响其接受程度。加强新能源汽车知识的普及和宣传教育工作，提高消费者对新能源汽车的了解和信心，有助于提升新能源汽车的渗透率。

充电便利性和续航里程：消费者在购买新能源汽车时会考虑充电便利性和续航里程等因素。如果充电基础设施完善、续航里程长，消费者将更愿意购买新能源汽车，从而提高其渗透率^[5-6]。

三、东北地区新能源汽车渗透率提升对策

（一）政策建议

建立完善的新能源汽车补贴政策：通过适当的财政补贴和税收优惠政策，鼓励个人和企业购买新能源汽车，降低购车成本，促进新能源汽车的普及和渗透。

加大充电基础设施建设投入：政府应加大对充电基础设施建设的投入，提高充电桩的覆盖密度，增强充电便利性，为新能源汽车的推广创造良好的环境。

制定新能源汽车推广规划：建立健全的新能源汽车推广规划，明确发展目标和时间表，统筹规划充电基础设施建设、技术创新和市场培育等方面工作，推动新能源汽车产业的健康快速发展^[7]。

（二）充电基础设施建设优化方向

提升充电桩覆盖密度：加大对城市和乡村地区的充电桩建设投入，提高充电桩的覆盖密度，确保新能源汽车用户能够方便地进行充电。

多元化充电设施布局：除了传统的充电桩外，还应鼓励发展更多形式的充电设施，如快充站、换电站、家庭充电桩等，满足不同场景和需求下的充电需求。

推动充电设施标准化：制定统一的充电设施建设标准和规范，推动充电设施的标准化建设，提升充电设施的品质和安全性。

（三）提升消费者接受程度的措施

提供购车补贴和优惠政策：政府可制定购车补贴和税收优惠政策，降低新能源汽车的购置成本，吸引消费者购买新能源汽车。

完善售后服务体系：建立完善的新能源汽车售后服务网络，包括维修、保养、零部件供应等，提升消费者对新能源汽车的使用信心。

加强产品质量监管：严格执行新能源汽车产品质量标准，加

强对新能源汽车生产企业和产品的监管，保障消费者的权益，提升消费者对新能源汽车的信任度^[8]。

四、结论与展望

（一）研究结论总结

目前东北地区新能源汽车渗透率较低，主要受到充电基础设施不足、消费者接受程度不高等因素的制约。政府应加大对充电基础设施建设的支持力度，提高充电桩的覆盖密度，多元化充电

设施布局，推动充电设施标准化，利用新技术手段优化充电基础设施建设。政府还应采取措施提升消费者对新能源汽车的接受程度，包括宣传教育增强、提供购车补贴和优惠政策、完善售后服务体系等方面的措施。

（二）未来发展趋势展望

展望未来，随着政府政策的支持和充电基础设施的改善，东北地区新能源汽车渗透率将逐步提升。新能源汽车产业链的完善以及技术的进步也将推动新能源汽车在东北地区的发展^[9-10]。

参考文献

[1]刘明, & 张军. (2018). 东北地区新能源汽车发展现状及对策研究. 经济研究导刊, (21), 111–112.

[2]王红梅, & 李云. (2019). 东北地区新能源汽车市场发展分析. 科教导刊, (26), 218–219.

[3]李青, & 魏杰. (2020). 东北地区新能源汽车政策与市场发展研究. 经济管理, (12), 88–90.

[4]张磊, & 王蕾. (2017). 东北地区新能源汽车充电基础设施建设现状与对策研究. 能源与节能, (9), 56–58.

[5]孙宇, & 刘伟. (2018). 东北地区新能源汽车消费者接受程度调查与分析. 消费经济, (15), 77–79.

[6]Zhang, J., & Liu, X. (2019). Analysis of influencing factors of new energy vehicles’ market penetration based on system dynamics: A case study of Beijing, China. Energy Reports, 5, 1170–1177.

[7]Wang, Q., & Ouyang, M. (2018). Quantitative analysis of the influential factors for promoting the development of electric vehicles in China. Energy Policy, 122, 304–313.

[8]Chen, H., & Kang, R. (2020). The social acceptance of electric vehicles: A review of the research. Energy Reports, 6, 979–987.

[9]Yin, Y., Wang, J., & Yang, C. (2020). A review of China’ s policies to promote electric vehicles. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 127, 109882.

[10]Zhang, S., Zhang, S., & Li, J. (2018). A review of the factors for promoting the adoption of electric vehicles. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 93, 158–164.

太阳能光伏发电效率提升方法研究

陈玉松

国家电投集团贵州金元集团威宁能源股份有限公司, 贵州 威宁 553100

DOI:10.61369/EPTSM.2025010006

摘要： 随着全球能源需求增长和环保意识增强，太阳能光伏发电作为清洁能源日益重要。但当前面临光吸收效率有限、转换效率低及阴影效应等挑战。本文旨在研究提升光伏发电效率的方法，通过优化半导体材料选择、表面纳米结构化、多层膜设计和光学共振技术等提高光吸收效率；并探索电池结构优化、载流子收集效率提升及新型电池技术，以期提高转换效率。研究成果将为太阳能光伏发电技术的进一步发展提供理论和实践支持。

关键词： 太阳能光伏发电效率；光伏电池转换效率；材料与结构设计优化

Research on Methods to Improve the Efficiency of Solar Photovoltaic Power Generation

Chen Yusong

State Power Investment Group Guizhou Jinyuan Group Weining Energy Co., LTD. Weining, Guizhou 553100

Abstract： With the increasing global energy demand and environmental awareness, solar photovoltaic power generation is becoming increasingly important as a clean energy source. But currently facing challenges such as limited light absorption efficiency, low conversion efficiency, and shadow effects. This article aims to study methods to improve the efficiency of photovoltaic power generation, including optimizing semiconductor material selection, surface nanostructuring, multilayer film design, and optical resonance technology to enhance light absorption efficiency; And explore battery structure optimization, carrier collection efficiency improvement, and new battery technologies to enhance conversion efficiency. The research results will provide theoretical and practical support for the further development of solar photovoltaic power generation technology.

Keywords： solar photovoltaic power generation efficiency; photovoltaic cell conversion efficiency; material and structural design optimization

引言

在全球能源转型与环保的双重驱动下，太阳能光伏发电作为清洁、可持续的能源备受关注，对缓解化石能源危机和实现碳中和目标至关重要^[1]。然而，太阳能光伏发电效率的提升仍面临诸多挑战，如材料光吸收效率、电池转换效率不高，以及阴影效应、温度变化等环境因素对系统效率的负面影响，这影响了其成本效益和大规模应用。因此，深入研究太阳能光伏发电效率提升方法具有重要意义。尽管国内外已取得显著成果，但仍存在材料成本高、技术成熟度不足等问题。基于此背景，本文从材料选择、电池结构优化、系统设计等方面入手，旨在探索提高光伏电池转换效率的有效途径。本研究不仅具有理论价值，而且对推动太阳能光伏发电技术的进一步发展，实现太阳能大规模应用具有重要的实践意义。

一、太阳能光伏发电技术原理及瓶颈

（一）太阳能光伏发电技术原理

太阳能光伏发电技术是一种将太阳能直接转换为电能的技术，其核心在于光伏效应。光伏效应是指当光照射到半导体材料表面时，光子能量激发半导体中的电子从价带跃迁到导带，从而

产生光生电流和光生电压。这一过程中，光能转化为电能，实现了太阳能的直接利用^[2]。光伏电池是太阳能光伏发电技术的核心组件。根据材料类型，光伏电池可分为硅基光伏电池、薄膜光伏电池、染料敏化光伏电池等。硅基光伏电池是目前应用最广泛、技术最成熟的光伏电池，其转换效率较高，但成本也相对较高。薄膜光伏电池则采用较薄的半导体材料，降低了材料成本，但转

转换效率相对较低。染料敏化光伏电池则利用染料分子吸收光能，通过电子传递过程产生电流，具有成本低、易于制备等优点，但转换效率仍有待提高。

（二）太阳能光伏发电技术的瓶颈分析

尽管太阳能光伏发电技术取得了长足的进步，但在实际应用中仍面临诸多瓶颈。光伏电池的转换效率是影响发电量的关键因素^[3]。目前，尽管硅基光伏电池的转换效率已接近理论极限，但薄膜光伏电池和染料敏化光伏电池的转换效率仍有较大提升空间。提高光伏电池的转换效率，不仅可以增加发电量，还可以降低光伏发电的成本。太阳能光伏发电技术的稳定性和可靠性也是制约其大规模应用的重要因素。光伏电池在长期使用过程中，会受到光照、温度、湿度等环境因素的影响，导致性能下降。此外，光伏系统的维护和保养也需要投入大量的人力和物力。因此，提高光伏电池的稳定性和可靠性，延长其使用寿命，对于推动太阳能光伏发电技术的进一步发展具有重要意义。

（三）太阳能光伏发电技术的未来发展方向

针对太阳能光伏发电技术面临的瓶颈，未来的发展方向主要包括以下几个方面。一是继续深入研究光伏效应的物理机制，探索新型半导体材料，提高光伏电池的转换效率^[4]。二是加强光伏电池的稳定性和可靠性研究，开发具有抗老化、耐腐蚀等性能的光伏电池材料。三是优化光伏系统的设计，提高系统的整体性能和发电效率。例如，通过优化电池布局、应用最大功率点跟踪算法等手段，进一步提高光伏系统的发电效率。四是推动太阳能光伏发电技术与智能电网、储能技术等相结合，实现太阳能的高效利用和智能化管理。

二、提高材料吸收效率的方法

（一）材料选择与改性策略

在太阳能光伏发电领域，材料的选择与改性是提高光吸收效率的关键。从基础材料的选择来看，硅因其良好的半导体性能和相对成熟的生产工艺，长期以来一直是光伏电池的主流材料。然而，随着技术的不断进步，人们开始探索其他具有更高光吸收效率和更低成本的新型半导体材料，如铜铟镓硒、碲化镉以及钙钛矿材料等^[5]。这些新型材料在光吸收范围、转换效率和稳定性方面展现出巨大的潜力。除了基础材料的选择，材料的改性也是提高光吸收效率的重要手段。通过对材料进行掺杂、合金化或表面处理，可以有效调整其能带结构，拓宽光吸收范围，从而提高光电转换效率。例如，通过向硅材料中掺入磷或硼等元素，可以形成N型或P型半导体，从而改变其导电性能和光吸收特性。此外，利用纳米技术和表面工程技术对材料进行改性，如构建纳米结构、引入表面缺陷等，也可以显著提高材料的光吸收效率和光电转换性能。

（二）光学设计与多层膜结构应用

光学设计是提高材料光吸收效率的另一个重要方面。通过合理设计光伏电池的光学结构，可以优化光在材料内部的传播路径，减少反射和透射损失，从而提高光吸收效率^[6]。例如，采用

抗反射涂层或陷光结构，可以有效减少入射光在电池表面的反射，使更多的光线进入材料内部被吸收。同时，通过调整材料的折射率和厚度，可以进一步优化光在材料内部的传播路径，提高光吸收效率。多层膜结构的应用也是提高光吸收效率的有效手段。通过在光伏电池中引入多层膜结构，可以形成光捕获效应，使光线在多层膜之间多次反射和散射，从而延长光线在材料内部的传播路径，提高光吸收效率。多层膜结构的设计需要考虑材料的折射率、厚度和层数等因素，以实现最佳的光吸收效果。此外，通过引入具有不同能带结构的材料构成多层膜结构，还可以实现光子的逐级吸收和转换，进一步提高光电转换效率。

（三）表面等离子体共振与量子点技术的应用

表面等离子体共振和量子点技术是近年来在提高材料光吸收效率方面崭露头角的新技术。表面等离子体共振是指在金属纳米结构表面产生的电子集体振荡现象，通过调整金属纳米结构的形状、尺寸和排列方式，可以实现对特定波长光线的强烈吸收和散射^[7]。将SPR效应引入光伏电池中，可以显著提高材料对特定波长光线的吸收效率，从而提高光电转换性能。量子点技术则是利用量子尺寸效应和量子限域效应，通过调控量子点的尺寸和形状，实现对光线的精准调控和吸收。量子点具有优异的光学性能和电学性能，可以作为光伏电池中的光吸收层或电子传输层，显著提高材料的光吸收效率和光电转换效率。此外，量子点还具有可调谐的发光性能，可以实现对光伏电池光谱响应的精确调控，进一步提高光电转换性能。

三、提高光伏电池转换效率的方法

（一）电池结构创新与优化

光伏电池的转换效率是衡量其性能的重要指标，而电池结构的创新与优化是提高转换效率的关键途径之一。传统的光伏电池结构，如单晶硅和多晶硅电池，虽然技术成熟，但在转换效率方面已逐渐接近其物理极限。因此，开发新型电池结构成为提高转换效率的重要方向。一种有效的结构创新是采用叠层电池设计^[8]。叠层电池由多个不同带隙的半导体材料层组成，每层材料吸收不同波长的光线，从而实现光谱的有效利用。这种设计可以显著提高光伏电池的转换效率，因为不同波长的光线都能被有效利用，减少了光损失。此外，钙钛矿/硅叠层电池等新型结构也展现出极高的转换效率潜力，成为当前研究的热点。除了叠层电池，微纳结构的应用也是提高转换效率的重要手段。通过在光伏电池表面或内部引入微纳结构，如纳米线、纳米孔和光子晶体等，可以有效增加光与材料的相互作用面积，增强光的吸收和散射，从而提高转换效率。这些微纳结构还可以引导光线在电池内部多次反射和散射，延长光程，进一步提高光吸收效率。

（二）界面工程与载流子管理

界面工程是提高光伏电池转换效率的另一个关键方面。光伏电池中的界面包括电池表面、材料界面以及电极界面等。这些界面的性质直接影响载流子的传输、复合和收集效率，从而对电池转换效率产生重要影响^[9]。优化界面性质的方法包括表面钝化、

界面修饰和电极设计等。表面钝化可以减少表面态密度，降低载流子的复合速率，从而提高开路电压和填充因子。界面修饰则通过引入缓冲层、隧穿层或反射层等结构，改善界面处的能级匹配和载流子传输特性。电极设计则关注于提高电极的导电性和与电池的接触性能，以减少接触电阻和载流子损失。载流子管理是提高光伏电池转换效率的另一个重要策略。载流子的传输、分离和收集效率直接影响电池的短路电流和填充因子。通过优化电池内部的电场分布、调整掺杂浓度和引入载流子传输层等手段，可以有效提高载流子的传输效率和收集效率，从而提高电池转换效率。此外，采用载流子选择性接触和载流子倍增效应等技术，也可以进一步提高光伏电池的转换性能。

（三）新型材料与工艺探索

除了电池结构和界面工程的优化，新型材料与工艺的探索也是提高光伏电池转换效率的重要途径。随着材料科学的发展，越来越多的新型半导体材料被应用于光伏电池中，如钙钛矿材料、有机-无机杂化材料、二维材料等。这些新型材料具有优异的光电性能和可调性，为光伏电池的性能提升提供了新的可能。钙钛矿材料因其高转换效率、低成本和可调谐的光学性能而成为当前研究的热点^[10]。通过优化钙钛矿材料的组成、结构和制备工艺，可以进一步提高其稳定性和转换效率。有机-无机杂化材料则结合了有机材料的灵活性和无机材料的稳定性，展现出良好的光电性能和可加工性。二维材料如过渡金属硫化物等，因其独特的电子结构和光学性质，在光伏电池中也展现出巨大的应用潜力。在工艺方面，采用先进的制备技术和工艺优化也是提高光伏电池转换效率的重要手段。

四、解决阴影效应及其他环境因素的影响

（一）阴影效应的分析与建模

阴影效应主要由大型障碍物（如建筑物、树木等）引起，这些障碍物会阻挡或吸收部分无线信号，导致信号强度在接收端出现衰减。为了准确描述这一现象，需建立阴影效应的数学模型。

常用的模型包括对数正态阴影模型，该模型假设信号强度的衰减服从对数正态分布，能够较好地反映实际环境中的阴影效应。通过对模型参数的研究，可以预测不同环境下的信号衰减情况，为系统设计和优化提供依据。

（二）多径传播与信号增强技术

除了阴影效应，多径传播也是影响无线通信质量的重要因素。信号在传播过程中会经过多条路径到达接收端，这些路径上的信号可能相互叠加或抵消，导致信号强度的波动。为了克服这一问题，可以采用信号增强技术，如分集接收、波束成形等。分集接收通过多个天线接收同一信号，利用信号在不同路径上的独立性来提高接收质量。波束成形则通过调整天线阵列的权重，使信号在特定方向上得到增强，从而抑制多径干扰。

（三）环境适应性传输策略

针对复杂多变的环境因素，设计环境适应性传输策略是提高无线通信系统性能的有效途径。这包括根据环境变化动态调整发射功率、调制编码方式等参数，以适应不同的传播条件。例如，在阴影效应严重的区域，可以适当增加发射功率或采用更稳健的调制编码方式，以确保信号的可靠传输。同时，利用机器学习等先进技术对环境进行预测和分类，可以进一步提高传输策略的适应性和准确性。

五、结束语

综上所述，太阳能光伏发电效率的提升是实现全球能源转型和碳中和目标的关键。本文通过深入研究材料选择、电池结构优化以及系统设计等方面的内容，探索了提高光伏电池转换效率的有效途径。虽然面临诸多挑战，但随着科技的不断进步和研究的深入，相信太阳能光伏发电技术将会取得更加显著的进展，为实现清洁能源的广泛应用和可持续发展作出更大贡献。未来，我们将继续关注这一领域的发展动态，为推动太阳能光伏发电技术的进一步发展贡献自己的力量。

参考文献

- [1] 李冰. 太阳能光伏发电技术的效率提升与优化 [J]. 中国高科技, 2024, (13): 91-93.
- [2] 马磊. 光伏太阳能发电系统的设计与优化 [J]. 建筑与施工, 2024, 3(7): 22-23.
- [3] 陈恩. 光伏电池组件性能评估及效率提升技术研究 [J]. 电力设备管理, 2024(8): 111-113.
- [4] 张光龙. 光伏系统发电效率提升方法研究 [J]. 科技创新与应用, 2021, (04): 143-146.
- [5] 刘志刚, 王刚, 李国华, 等. 太阳能光伏电站发电效率提升策略研究 [J]. 中国新通信, 2020, 22(08): 240.
- [6] 李研. 太阳能光伏发电的现状与发展 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2024, (15): 100-102.
- [7] 徐凡. 太阳能光伏发电系统的效率优化与性能监测研究 [J]. 电力设备管理, 2024, (19): 115-117.
- [8] 李明臻, 张月靖. 太阳能光伏电站节能技术的应用 [J]. 光源与照明, 2023, (12): 123-125.
- [9] 姚亚军. 太阳能光伏发电技术的应用研究 [J]. 科技创新与应用, 2022, 12(36): 181-184.
- [10] 于晓旭. 太阳能光伏发电并网技术的应用探究 [J]. 装备维修技术, 2020, (02): 183.

智能问答系统中的隐私保护与数据安全技术研究

张森达, 崔昕, 曲延刚, 刘博, 孙健
北京中电普华信息技术有限公司, 北京 102200
DOI:10.61369/EPTSM.2025010008

摘要： 文章围绕智能问答系统展开论述，概述了智能问答系统的定义、特点和技术架构，介绍了数据加密、匿名化、访问控制等隐私保护技术及其在数据收集、处理、输出阶段的应用。同时讲解了数据备份与恢复、入侵检测与防御、安全审计与监控等数据安全技术，分析了这些技术在系统架构、存储、传输层面的应用。

关键词： 智能问答系统；隐私保护；数据安全技术

Research on Privacy Protection and Data Security Technology in Intelligent Question Answering System

Zhang Senda, Cui Xin, Qu Yangang, Liu Bo, Sun Jian
Beijing CLP Puhua Information Technology Co., LTD. Beijing 102200

Abstract： This paper focuses on intelligent question answering system, summarizes the definition, characteristics and technical framework of intelligent question answering system, introduces data encryption, anonymization, access control and other privacy protection technologies and their applications in data collection, processing and output stage. At the same time, it explains data security technologies such as data backup and recovery, intrusion detection and prevention, security audit and monitoring, and analyzes the application of these technologies in system architecture, storage and transmission.

Keywords： intelligent question answering system; privacy protection; data security technology

在当今数字化时代，智能问答系统正广泛应用于众多领域，从客户服务到个人信息查询等，随着其应用的深入，隐私保护与数据安全成为了至关重要的议题。近年来，一系列文件和政策凸显了这一问题的紧迫性，如《中华人民共和国网络安全法》明确规定了网络运营者对用户信息保护的责任，要求保障用户个人信息安全。欧盟的《通用数据保护条例》（GDPR）更是严格规范了数据处理者在数据收集、存储和使用过程中的行为，旨在保护公民的个人隐私和数据权利。因此，深入研究智能问答系统中的隐私保护与数据安全技术，既符合法律法规的要求，也是保障智能问答系统健康发展和用户权益的必然选择。

一、智能问答系统概述

（一）定义与特点

智能问答系统（Intelligent Question Answering System）是一种利用自然语言处理（NLP）和机器学习（ML）技术，模拟人类回答疑问的智能系统，该系统能够理解用户提出的自然语言问题，并从海量数据中检索相关信息，最终给出准确、合理的答案。智能问答系统的核心在于其自然语言理解能力，它使得系统能够解析用户以自然语言形式提出的问题，识别其中的关键词、实体及语义关系，进而理解用户的真实意图，这一过程涉及复杂的语言处理技术，如分词、词性标注、句法分析等^[1]。自动化、个性化、高效性是智能问答系统的主要特点，其中，自动化是指系统能够自动处理用户的问题，无需人工干预，提高了信息处理的效率。个性化则是指系统能够根据用户的历史行为和偏好，提

供定制化的回答，提升用户满意度。高效性体现在系统能够在短时间内处理大量用户的咨询，确保每个用户都能得到及时、准确的回复。此外，智能问答系统还具备持续学习和优化的能力，通过收集用户反馈和不断迭代模型，提高回答的准确性和智能化水平，图1为智能问答系统的工作原理。

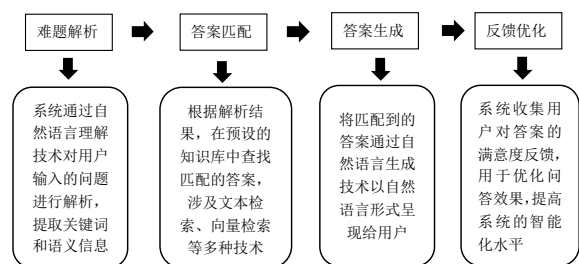


图1 智能问答系统的工作原理

作者简介：张森达（1993.06-），男，满族，黑龙江人，学历：大学本科，专业：信息管理与信息系统，职称：工程师，研究方向：大数据、数据中台、人工智能（数据应用方向）。

（二）技术架构

智能问答系统的技术架构通常包括多个核心组件，这些组件相互协作，共同实现智能问答的功能。自然语言处理（NLP）是智能问答系统的核心技术之一，负责将用户输入的自然语言问题转化为计算机可理解的格式，通过语义分析、情感分析等处理，NLP技术能够准确理解用户的意图和需求。机器学习（ML）技术在智能问答系统中也扮演着重要角色，它通过不断学习和优化，提高系统的智能化水平，如机器学习算法可以用于训练模型以识别用户提问的意图、实体以及语义关系，从而提高答案的准确性和多样性。此外，机器学习还可以用于优化知识库的构建和维护，确保系统能够持续提供高质量的回答。知识库是智能问答系统的另一个重要组成部分，主要用于存储系统所需的知识，包括事实、规则、推理方法等。知识库可以是结构化的数据库、半结构化的文档集合或非结构化的文本数据，它的丰富性和准确性直接影响到系统回答问题的质量。在智能问答系统中，知识库通常与NLP和ML技术相结合，共同实现信息的检索、推理和回答^[2]。除了上述核心组件外，智能问答系统还可能包括预处理模块、召回模块、精排模块和决策模块等辅助组件。预处理模块负责对用户输入的问题进行清洗、分词、词性标注、实体识别等预处理操作。召回模块负责从知识库中检索出与问题相关的信息。精排模块则负责对检索到的候选答案进行排序和选择。决策模块则负责根据用户的意图和需求，生成最终的回答。这些组件相互协作，共同实现智能问答系统的高效、准确和智能化。

二、智能问答系统中的隐私保护技术

（一）隐私保护技术

1. 数据加密技术

数据加密是保护数据安全的重要手段之一，主要分为对称加密和非对称加密两种方式。对称加密采用相同的密钥进行数据的加密和解密操作，具有高效性，但在密钥管理方面相对复杂。非对称加密则使用一对密钥（即公钥和私钥），其中公钥负责加密数据，私钥则用于解密，这一机制可以有效解决密钥分发的安全问题，尽管其加密速度相对较慢（如图2）^[3]。通过运用加密技术，用户数据可以被转换为密文形式，从而确保数据在传输和存储过程中的安全性，有效防止未经授权的访问和数据泄露。

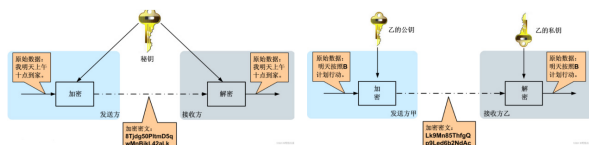


图2 对称加密和非对称加密

2. 匿名化技术

匿名化技术是一种通过对原始数据进行处理，使得数据中的个体无法被识别的技术，该技术主要通过数据变换、模糊处理等方式实现，如删除、替换或混淆数据中的敏感信息。匿名化技术既能保护用户隐私，又能保持数据的可用性和分析价值，在智能问答系统中，这一技术可以应用于处理用户输入的问题和答案，

确保用户身份不会被泄露。

3. 访问控制技术

访问控制技术通过身份验证和授权管理等方式限制对数据的访问，涉及两个主要实体：访问者和资源对象。访问者需要通过身份验证机制证明自己的身份，并获得相应的访问权限，系统管理员则根据用户的角色和需求，为其分配不同的访问权限，以确保数据只能被授权用户访问（如图3）。在智能问答系统中，访问控制技术可以用于保护用户数据和系统资源的安全，防止未经授权的访问和滥用行为。

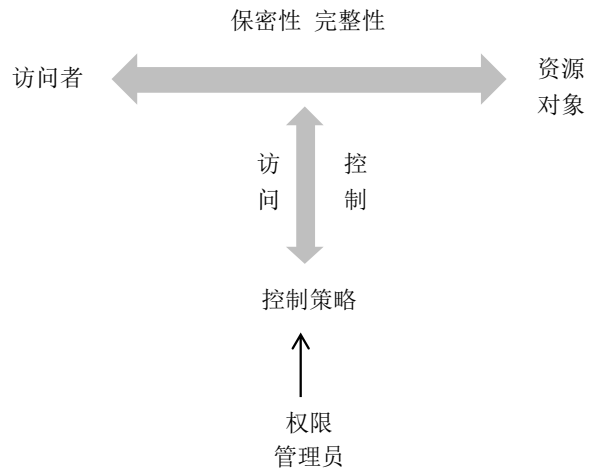


图3 访问控制模型

（二）隐私保护技术在智能问答系统中的应用

在智能问答系统中，隐私保护技术贯穿于数据收集、处理和结果输出等各个阶段，以确保用户隐私的安全。

1. 数据收集阶段

在智能问答系统的数据收集阶段，隐私保护技术起着至关重要的作用，旨在确保用户输入的问题和答案不被泄露或滥用。为此，系统可运用匿名化技术处理用户提问，对敏感信息（如姓名、地址等）进行模糊化处理或彻底删除，以有效保护用户隐私。同时，系统还可以采用数据加密技术对用户输入的数据进行加密存储，保障数据在传输和存储环节的安全性。此外，系统还应严格遵循最小数据收集原则，仅收集提供问答服务所必需的数据，从而降低隐私泄露的风险^[4]。

2. 数据处理阶段

在数据处理阶段，智能问答系统需要对用户输入的问题进行分析处理，以生成准确答案。为了保护用户隐私，系统可以采用差分隐私等技术对处理过程进行保护。差分隐私通过向数据中添加随机噪声来确保个人隐私不被泄露，即使数据被多次分析，个人信息也能得到保护。此外，系统还可以采用同态加密等技术，使数据在加密状态下即可进行处理和分析，避免在解密过程中泄露隐私。

3. 结果输出阶段

在结果输出阶段，智能问答系统需要将生成的答案返回给用户。为了保护用户隐私，系统需要对输出结果进行隐私保护处理，例如，采用匿名化技术处理输出结果中的敏感信息（如用户

身份标识等），确保用户隐私不被泄露；采用数据加密技术对输出结果进行加密传输，保障数据在传输过程中的安全性。同时，系统应遵循最小数据输出原则，仅输出必要的答案信息，以进一步减少隐私泄露的风险。通过这些隐私保护技术的应用，智能问答系统可以在保证服务质量和效率的同时，有效保护用户隐私和安全。

三、智能问答系统中的数据安全技术

（一）数据安全技术

数据安全技术是保障智能问答系统数据安全的重要手段，主要包括数据备份与恢复技术、入侵检测与防御技术、安全审计与监控技术、数据行列控制及鉴权技术。数据备份与恢复技术通过定期备份系统数据，确保在数据意外丢失或损坏时能够迅速恢复，从而保障系统的连续运行和可用性，其原理在于利用冗余存储来抵御数据丢失的风险，即使原始数据遭到破坏，也能依靠备份数据快速恢复系统功能。入侵检测与防御技术侧重于及时发现并有效阻止恶意攻击和数据窃取行为，该技术通过监控系统网络流量、用户行为等关键指标，识别出异常模式，并采取相应的防御措施，如阻断攻击源头、隔离受感染系统等，以切实保护数据安全。安全审计与监控技术则对系统操作和数据访问进行全天候的实时监控和审计，确保系统合规性，它通过详细记录系统操作日志、数据访问记录等信息，为安全事件的调查和责任追溯提供有力依据，同时也有助于及时发现潜在的安全漏洞和违规行为。数据行列控制及鉴权技术是对数据本身进行更细致的安全管理的一种手段，通过对数据的行列进行控制，可以实现对数据访问的精细化管理。具体而言，可以根据数据的敏感程度、用户角色和业务需求等因素，设定不同的行列访问权限，如对于某些敏感数据，可以设定只有特定角色或权限的用户才能访问特定的行或列。在实施数据行列控制及鉴权技术时，首先需要明确数据的敏感程度和访问需求，制定相应的安全策略。然后通过技术手段实现这些策略，如采用数据库管理系统自带的安全控制功能，或开发专门的安全控制模块。此外，还需要对访问控制进行实时监控和审计，确保数据的访问行为符合安全策略，及时发现和处理异常访问行为。

（二）数据安全技术在智能问答系统中的应用

1. 系统架构层面

智能问答系统采用多层次、分布式的架构设计来增强数据安全

全，通过将数据存储、处理和应用逻辑部署在不同的服务器上，实现数据的物理隔离和逻辑隔离，降低数据被一次性窃取的风险。同时，系统架构中融入了容错机制和负载均衡技术，确保即使在部分服务器出现故障或遭受攻击的情况下，也能够迅速切换至备用服务器，保证系统的连续性和稳定性。此外，系统架构还考虑了数据的安全传输问题，采用加密通信协议和隧道技术，确保数据在传输过程中的安全性和完整性。

2. 数据存储层面

第一，智能问答系统运用数据加密技术，对敏感数据进行加密存储，这样，即使数据不幸被非法获取，也能因其加密状态而难以被轻易解密和滥用。第二，智能问答系统实施严格的访问控制技术，通过设定精细的访问权限和身份验证机制，有效限制了对数据的访问和操作权限，确保只有经过授权的用户或系统才能访问到特定的数据资源。第三，为了应对不可抗力因素可能带来的数据丢失风险，数据存储层面还采用了数据备份和容灾技术，智能问答系统会定期对数据进行备份，并将这些备份数据存储在地理位置分散的多个数据中心，确保在遭遇自然灾害、人为破坏等情况时，数据的安全性和可用性能够得到有效保障。

3. 数据传输层面

在数据传输层面，智能问答系统采用了如 TLS/SSL 等先进的加密通信协议，确保数据在传输过程中得到加密处理，有效防止数据被窃听或篡改。同时，系统利用安全传输通道和隧道技术，如 VPN，为数据传输构建了一个安全的网络环境。此外，系统还实施了实时监控和审计机制，详细记录数据传输的各类信息，包括传输时间、传输方和接收方等，以便在发生安全事件时，能够迅速进行追溯和定位问题。这些数据传输层面的安全技术措施，为智能问答系统提供了有力的保障，确保了数据在传输过程中的安全性和可靠性。

四、结语

随着技术的不断演进和攻击手段的日益复杂，隐私保护与数据安全技术成为了智能问答系统发展中的核心议题。业界必须不断探索更为先进、有效的隐私保护和数据安全技术。只有这样，智能问答系统才能在确保用户信息安全的前提下，广泛赢得用户的信任与支持，充分发挥其智能交互、信息精准提供等功能优势，推动整个系统向着更加健康、可持续的未来方向发展。

参考文献

- [1] 许成伟, 贾晓霞, 冉青云. 智能问答系统在装备制造业的应用研究 [J]. 制造业自动化, 2023, 45 (03): 38-43+75.
- [2] 鞠晓峰, 都军, 覃军, 等. 人工智能在智能问答系统中的应用 [J]. 智能建筑与智慧城市, 2021, (03): 36-37.
- [3] 陆毅. 5G 网络中自然语言处理在智能问答中的应用 [J]. 中国宽带, 2023, 19 (11): 124-126.
- [4] 陈志坚, 彭林锋. 基于安全分析大模型应用的智能问答系统设计 [J]. 网络安全和信息化, 2024, (09): 124-126.

汽轮机轴瓦温度异常故障的原因分析与检修优化

班小宇

贵州金元茶园发电有限责任公司, 贵州 毕节 551800

DOI:10.61369/EPTSM.2025010010

摘要： 为了提升汽轮机组的可靠性和经济性，解决轴瓦温度异常问题，文章先明确了诱发汽轮机轴瓦温度异常的原因与检修优化相关内容。并以某电厂汽轮机机组实际检修案例为例，分析其中润滑系统、安装制造、运行工况、监测维护等方面存在的问题。最后提出状态监测技术优化、检修工艺改进、材料与结构升级、运行管理优化等措施。这些措施有效解决了轴瓦温度异常问题，验证了检修优化方案的有效性，为汽轮机轴瓦温度异常故障治理提供了一定参考。

关键词： 汽轮机；轴瓦；温度异常；设备故障；检修

Cause Analysis and Maintenance Optimization of Abnormal Temperature Failure of Steam Turbine Shbush

Ban Xiaoyu

Guizhou Jinyuan Tea Garden Power Generation Co., LTD. Bijie, Guizhou 551800

Abstract： To enhance the reliability and economic efficiency of steam turbine units and address abnormal bearing temperature issues, this paper first clarifies the causes of abnormal bearing temperatures in steam turbines and related aspects of maintenance optimization. Using an actual maintenance case from a power plant's steam turbine unit as an example, it analyzes problems existing in lubrication systems, installation and manufacturing, operating conditions, monitoring, and maintenance. Finally, measures such as optimizing condition monitoring technology, improving maintenance processes, upgrading materials and structures, and enhancing operational management are proposed. These measures effectively resolve abnormal bearing temperature issues, validating the effectiveness of the maintenance optimization plan and providing a reference for the management of abnormal bearing temperature faults in steam turbines.

Keywords： steam turbine; bearing shell; abnormal temperature; equipment failure; maintenance

引言

汽轮机轴瓦作为汽轮发电机组的核心支撑部件，承担着转子径向载荷传递与动态平衡的关键作用，其运行状态直接影响机组的安全性和经济性。轴瓦通过形成稳定的油膜实现低摩擦运转，若温度异常将导致油膜破裂、金属直接接触，进而引发轴瓦烧损、转子振动超标甚至停机事故。行业内针对轴瓦温度异常问题已开展多维度研究，在润滑理论方面通过雷诺方程改进揭示了油膜厚度与温度场的耦合关系，故障诊断领域则发展了基于振动信号、油液光谱分析和红外测温的复合监测技术。但现有检修策略仍以周期性计划检修为主，存在维修不足或过度维修的矛盾，无法精准应对轴瓦温度异常的多因性和突发性特征。因此本文提出基于状态评估的检修优化方案，实现轴瓦温度故障的精准治理，为提升汽轮机组的可靠性和经济性提供理论支撑与工程实践参考。

一、轴瓦温度异常的原因分析

（一）润滑系统问题

润滑系统问题是导致轴瓦温度异常的核心诱因，主要表现为润滑油污染恶化、油量不足以及油温异常的情况。油质恶化主要表现为颗粒污染、水分侵入及氧化变质，其中固体颗粒会加剧轴瓦表面磨损并堵塞油道，水分与油液混合形成乳化液降低润滑效

能，而氧化产物则增加油液粘度并生成漆膜附着于轴瓦表面，三者共同削弱油膜承载能力。油量不足或分布不均常由供油压力不足、油路堵塞或轴瓦间隙设计不当引发，当油泵出力下降或滤网堵塞时，轴瓦供油流量减少导致油膜厚度变薄，而轴瓦间隙过大或过小均会破坏油楔效应，前者使油膜刚度降低引发振动，后者则增加摩擦功耗并加剧温升^[1]。油温异常与冷却系统效能及负荷波动密切相关，冷却水管结垢或冷却介质流量不足会导致散热能

力下降，而汽轮机负荷突变时油膜压力分布瞬时改变，局部高温区可能突破油液闪点引发热分解，同时高温环境下油液粘度指数下降进一步恶化润滑条件。

（二）安装与制造缺陷

安装与制造缺陷也会引发轴瓦温度异常，而且这种影响具有累积性和隐蔽性。轴瓦间隙作为关键设计参数，其偏差直接决定油膜形成质量，间隙过小会导致轴瓦与轴颈的金属接触面积增加，摩擦功耗转化为热量引发局部温升，而间隙过大会使油膜厚度超出临界值，在转子高速旋转时产生油膜涡动甚至振荡，这种非线性振动进一步加剧温度波动。比如，对中偏差是安装过程中常见的系统性误差^[2]，会改变油楔角度，使油膜压力分布失衡，形成高温区与低温区的梯度分布。轴瓦材料问题主要表现为工艺缺陷或材质选型不当，运行中产生交变应力引发疲劳裂纹；磨损通常由轴瓦表面粗糙度超标或异物嵌入引起，而腐蚀则多因油液中酸性物质侵蚀或电化学作用导致合金成分流失，这些缺陷均会破坏轴瓦表面完整性，降低其抗咬合能力和导热性能，最终形成局部热点并引发温度异常。

（三）运行工况影响

汽轮机的运行工况一般比较复杂，当运行过程中负荷突变，汽轮机转子轴向推力和径向载荷发生瞬时变化，轴瓦承受的比压超出设计阈值，油膜厚度在局部区域被压缩至临界值以下，导致金属表面微凸体直接接触，摩擦功耗急剧增加并转化为热量，引起温度异常^[3]。汽轮机设备所在的环境也会影响轴瓦温度变化，高温环境下轴瓦与周围介质的温差减小，热传导效率降低，而通风不良导致空气对流散热受阻，两者共同作用使轴瓦热量累积速率超过散热能力。

（四）监测与维护不足

监测与维护不足一般是汽轮机轴瓦温度异常的间接因素，当对设备的监测和维护不足时，传感器的误差、异常可能会无法被及时检测到，导致设备出现故障。比如温度传感器故障主要表现为信号漂移、接触不良或量程超限，这类硬件缺陷会导致监测数据失真，使运维人员误判轴瓦实际运行状态，当传感器接触端氧化时，测量温度可能低于真实值，掩盖潜在的温升趋势。

数据采集系统误判则常由算法缺陷或阈值设置不合理引发，如未考虑机组启停过程中的动态特性，误将瞬态温度波动归类为正常范围，错失早期预警时机。检修周期不合理体现为计划检修与实际工况的错配。此外，还有检修工艺执行不到位，如轴瓦间隙调整的误差，油质检测不到位等。监测与维护不到位会增大设备故障的概率，监测数据的不可靠性导致维护决策失误，而不当的维护操作又进一步降低监测系统的可信度，最终削弱整个故障防控体系的有效性。

二、检修优化策略

（一）状态监测技术优化

状态监测技术优化中的多参数联合监测是突破传统单一参数诊断局限性的关键手段，其核心在于通过构建多维数据融合模型

实现故障特征的交叉验证与协同分析。轴瓦温度异常往往伴随振动幅值增大、油压波动及油液理化指标变化等多维度特征，单一温度传感器易受环境干扰或测量误差影响，难以准确反映故障本质。多参数联合监测通过在轴瓦关键部位布置分布式光纤测温阵列、加速度振动传感器及压力变送器，同步采集温度场分布、振动频谱和供油压力数据，利用时间序列对齐算法建立参数间的时空关联。例如，当轴瓦局部温度升高时，若同步监测到振动信号中出现1X频率成分增强及油压脉动，则可综合判断为转子不平衡引发的油膜失稳^[4]；若温度升高伴随油压下降和油液颗粒度增加，则更倾向于油路堵塞或油质恶化。通过多参数联合监测，不仅能提高故障识别的灵敏度和准确率，还可实现从被动报警到主动预测的转变。

（二）检修工艺改进

检修工艺改进中的对中精度提升与油质在线净化技术是实现轴瓦温度异常精准治理的关键举措。激光对中技术通过发射激光束并利用高灵敏度接收器获取转子与轴瓦的相对位置偏差，结合三维建模软件实时计算调整量，相比传统百分表法将对中误差从0.1mm级降至0.02mm级，显著减少因中心线偏差导致的附加弯矩和局部接触应力，从而降低轴瓦温升风险。油质在线净化系统采用多级过滤与离心分离相结合的复合处理工艺，通过旁路循环将油液中的固体颗粒（控制至5 μ m以下）、水分（ $\leq 0.05\%$ ）及胶质物持续去除，同时集成的在线颗粒计数器、水分传感器和粘度变送器可实时监测油液品质参数，当污染度超过NAS8级时自动触发反冲洗程序，避免因油质劣化引发的润滑失效^[5]。

（三）材料与结构升级

材料与结构升级通过提升轴瓦本体的物理性能与流体力学特性，从根源上抑制温度异常的发生。含银巴氏合金突破了传统锡基合金的耐高温极限^[6]，银元素的添加可细化晶粒并形成弥散强化相（如图1），使合金熔点提升至420℃以上，同时银离子的抗菌特性有效延缓油液氧化变质，其显微硬度较常规巴氏合金有良好提高，能增强抗咬合能力。在结构优化方面，导流槽的设计采用计算流体力学（CFD）仿真技术，通过在轴瓦承载区开设螺旋状导流槽，将油膜厚度标准差降低30%，使油液在周向和轴向分布更趋均匀，避免局部高压区形成。此外，增设的温度补偿型油囊结构可根据工况自动调节供油量，在负荷突变时通过弹性变形维持油膜厚度稳定。这些改进能使轴瓦表面最高温度降低，临界热负荷提升^[7]。

（四）运行管理优化

运行管理优化中的负荷变化速率限制与冷却系统维护是预防轴瓦温度异常的重要防线。制定负荷变化速率限制可有效抑制轴瓦冲击载荷，通过将汽轮机负荷变化率控制在每分钟5%–8%额定负荷范围内，可避免因轴向推力突变导致的油膜厚度骤减，同时降低油膜压力波动幅值达25%以上，显著提升油膜稳定性。冷却系统维护则需建立定期清洗制度，通过化学清洗去除换热器结垢并恢复换热效率，同时采用在线监测技术实时跟踪冷却介质流量与温度，当油温偏离设计值 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 时自动启动辅助冷却装置，确保轴瓦工作温度稳定在65–80℃的最佳区间^[8]。

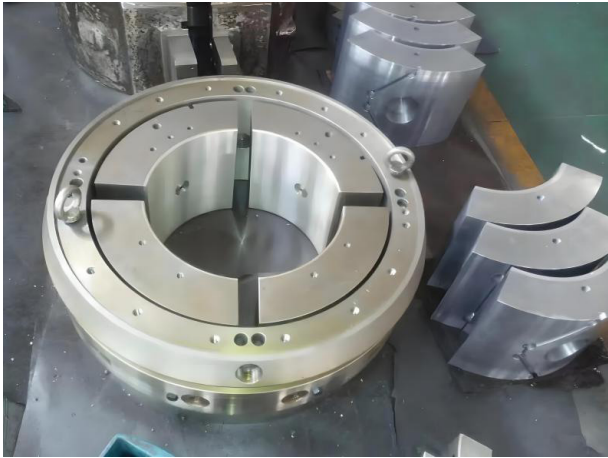


图1 含银巴氏合金轴瓦

三、案例分析

（一）故障现象

某电厂 CLN660-24.2/566/566 型机组 #3 轴瓦温度持续升高至 110℃，超过报警阈值上限。该机型采用可倾瓦结构，理论上具有较好的油膜稳定性，但因中压缸蒸汽参数高（566℃、6.3MPa），轴瓦承受较大热负荷与机械应力，易引发温度异常。

（二）故障分析

考虑到 CLN660 型机组特点，检测发现油液中固体颗粒浓度达 NAS10 级（超标 3 级），主要成分为巴氏合金磨损碎屑及氧化铁；轴瓦间隙测量显示局部磨损量达 0.15mm（设计值 0.10–0.12mm），结合可倾瓦块摆动角度分析，判定因油质污染导致瓦块与轴颈异常摩擦，加剧温升。

（三）解决方案

基于该机型轴承配置（1–8 号可倾瓦），采取针对性措施，如

表 1 所示。

表 1 技术解决方案

解决方向	具体措施
材料与结构方面	①更换含银巴氏合金轴瓦（耐温性提升至 420℃），优化瓦块表面导流槽设计以改善油膜分布
油路系统清理	②采用高压水射流清洗油路系统，清除结垢与沉积物，并在旁路加装高精度双筒过滤器（过滤精度 3μm）
误差控制方面	③调整可倾瓦摆动支点预紧力，确保瓦块自适应能力，同时对中压缸转子进行激光对中（误差控制在 0.03mm 以内）

（四）效果验证

按照技术方案对汽轮机进行优化之后，#3 轴瓦温度稳定在 78–82℃，油液颗粒度降至 NAS6 级，机组满负荷运行时振动幅值由 80μm 降至 45μm，成功解决因油质污染、结构磨损与对中偏差协同引发的温度异常问题，验证了针对 CLN660 型机组可倾瓦特性的检修优化方案的有效性。

四、结语

汽轮机轴瓦温度异常问题关乎汽轮机组的安全稳定运行与经济效益。本文通过系统分析其故障原因，从润滑系统、安装制造、运行工况和监测维护等多方面深入探究，进一步明确了引发轴瓦温度异常的复杂因素^[9]。同时，针对性地提出检修优化策略，涵盖状态监测技术、检修工艺、材料结构以及运行管理等层面，这些优化策略相互配合，为解决轴瓦温度异常问题提供了全面有效的方案^[10]。

参考文献

- [1] 郭雅冬. 汽轮机轴瓦的常见故障及检修技术分析 [J]. 电工技术, 2023, (14).
- [2] 李玎, 张璽, 陆鹏, 等. 离心式压缩机轴瓦温度波动原因探析及解决措施 [J]. 合成润滑材料, 2024, 51(03): 48–52+60.
- [3] 魏学斌. 汽轮机轴瓦温度高原因分析和技术改造 [J]. 设备管理与维修, 2024, (12): 153–155.
- [4] 张巍, 楼昕皓, 张献峰, 等. 某核电汽轮机组高中压缸轴瓦两侧温差大原因分析 [J]. 东方汽轮机, 2024, (02): 70–74.
- [5] 徐鹏程, 汤杰杰, 马大卫. 660MW 机组轴瓦温度超标分析与处理 [J]. 电力安全技术, 2023, 25(03): 29–31.
- [6] 高峰, 李福长. 汽轮机检修中的关键点探究 [J]. 硅谷, 2015, 8(01): 113+115.
- [7] 鲁迎龙. 电厂汽轮机检修及维护技术要点分析 [J]. 设备管理与维修, 2022, (14): 64–65.DOI:10.16621/j.cnki.issn1001-0599.2022.07D.28.
- [8] 张晖. 660MW 机组冷端优化技术的应用 [J]. 集成电路应用, 2021, 38(12): 276–277.DOI:10.19339/j.issn.1674-2583.2021.12.129.
- [9] 史进洲. 基于设计寿命的汽轮机检修周期优化方法的研究 [J]. 动力工程学报, 2020, 40(07): 530–539.DOI:10.19805/j.cnki.jcspe.2020.07.003.
- [10] 石霖. 电厂汽轮机检修中油系统常见故障与应对 [J]. 科技风, 2019, (35): 138.DOI:10.19392/j.cnki.1671-7341.201935116.

基于振动分析的汽轮机故障预警与检修策略

刘庆

贵州金元茶园发电有限责任公司, 贵州 毕节 551700

DOI:10.61369/EPTSM.2025010011

摘要： 为保障汽轮机稳定运行，减少故障造成的经济损失与安全隐患，本文介绍了振动分析技术特点、振动监测技术与传感器应用、汽轮机异常振动常见原因以及基于振动分析的预警与诊断方法等内容。以某型号超临界汽轮机为例，通过分析其在线监测数据与故障案例，准确诊断出故障类型，最后提出调整运行参数、停机检修、预防性措施等应对措施。研究表明，基于振动分析的方法能有效实现汽轮机故障预警与诊断，对提高检修效率和保障设备安全稳定运行具有重要意义。

关键词： 汽轮机；振动分析；频率；故障检测

Early Warning and Maintenance Strategy of Steam Turbine Fault Based on Vibration Analysis

Liu Qing

Guizhou Jinyuan Tea Garden Power Generation Co., LTD. Bijie, Guizhou 551700

Abstract： In order to ensure the stable operation of steam turbine and reduce the economic loss and safety risks caused by faults, this paper introduces the characteristics of vibration analysis technology, vibration monitoring technology and sensor application, the common causes of abnormal vibration of steam turbine, and the early warning and diagnosis method based on vibration analysis. Taking a certain type of supercritical steam turbine as an example, by analyzing its online monitoring data and fault cases, the fault type is accurately diagnosed, and finally the coping measures such as adjusting operating parameters, shutdown maintenance and preventive measures are put forward. The study shows that the method based on vibration analysis can effectively realize the early warning and diagnosis of steam turbine faults, which is of great significance to improve the maintenance efficiency and ensure the safe and stable operation of the equipment.

Keywords： steam turbine; vibration analysis; frequency; fault detection

引言

汽轮机作为电力、石化等行业的关键设备，其运行稳定性直接关系到整个生产系统的可靠性与经济性。一旦汽轮机发生故障，不仅会导致生产中断，造成巨大的经济损失，还可能引发安全事故。因此，对汽轮机的运行状态进行实时监测，并及时准确地预测和诊断故障，制定科学合理的检修策略，具有极其重要的现实意义。通过对汽轮机振动信号的深入分析，实现对潜在故障的早期预警，为设备维护人员提供充足的时间采取应对措施，避免故障的进一步恶化。同时，基于振动分析结果制定针对性的检修策略，可有效提高检修工作的效率和质量，减少不必要的检修工作。

一、振动分析技术特点

振动分析是通过监测和解析机械系统振动信号来评估设备运行状态、识别故障隐患的技术方法。其核心在于利用传感器获取设备振动数据，结合信号处理与特征提取技术，揭示振动幅值、频率、相位等参数的变化规律^[1]，进而判断设备是否处于正常工

况或存在潜在故障。在汽轮机这类旋转机械中，振动分析尤为关键，因为其运行时产生的振动信号包含丰富的设备状态信息，如轴承磨损、转子失衡、热弯曲等故障均会在振动频谱中表现出特定特征（如1/2倍频、2X倍频等）^[2]。该技术通过多维度数据采集和高级信号处理，能够有效分离复杂工况下的多源振动成分，识别出与特定故障相关的特征频率，为预测性维护提供依据。振动分析不仅

是故障诊断的重要手段，还可用于优化设备运行参数、延长使用寿命，在保障大型机组安全稳定运行方面具有显著工程价值。

二、振动监测技术与传感器应用

振动监测是汽轮机状态评估的基础，其关键在于精准获取振动信号。目前，振动速度传感器被广泛应用于轴承盖、壳体等关键部位，通过磁电感应原理将振动转化为电压信号，具有无需外部供电、抗干扰能力强等优势^[3]。该类传感器可实时监测10–1000Hz范围内的振动，灵敏度达20mV/mm/s，能够捕捉早期故障征兆。此外，传感器的安装位置及固定方式需严格遵循规范，以确保信号采集的准确性。

三、汽轮机异常振动的常见原因

（一）机械不平衡

机械不平衡是汽轮机振动的常见诱因，主要由叶轮积污、叶片磨损或安装误差导致转子质量分布不均引发。当转子旋转时，不平衡质量会产生离心力，其频率与转速同步（即1X频率），导致轴承和支撑结构周期性振动。像一般的燃煤机组长期运行后，叶轮表面会形成积灰层，改变转子质心位置，引发振幅逐渐增大的工频振动^[4]。此外，安装过程中叶轮与轴的装配偏差超过0.05mm时，也会造成显著的不平衡响应，需通过激光对中仪进行精准校准。

（二）轴承故障

轴承故障通常由润滑不良、部件老化或异物侵入引起，会破坏油膜稳定性并产生高频振动。像常见的滑动轴承，当润滑油粘度下降或供油压力不足时，轴颈与轴瓦间的油膜厚度变薄，导致金属直接接触（如图1），引发1000Hz以上的高频冲击信号。滚动轴承故障则表现为与滚动体、内外圈缺陷相关的特征频率振动。实践中轴承类故障比例较高，需通过在线油液分析与振动监测协同预警。



图1 轴承外部磨损

（三）动静碰磨

动静碰磨多因汽缸温差过大、膨胀不均或安装间隙不足引发，表现为工频振动增大并伴随2X、3X倍频成分。当转子与静子部件的汽封、隔板等发生摩擦时，接触点产生的局部高温会导致转子弯曲变形，形成恶性循环^[5]。某些超临界机组启动过程中，因汽缸上下温差达60℃，导致转子与汽封发生碰磨，振动值会骤升，频谱中一般会出现明显的2X成分。此时需立即停机并进行直轴处理，同时优化暖机曲线以控制温差在30℃以内。长期碰磨还可能引发轴系裂纹，需通过模态分析评估转子刚度变化。

（四）共振与结构松动

共振现象源于设备固有频率与激励频率耦合，而地脚螺栓松动或基础刚度不足会放大振动响应。机组因基础支撑刚度不足，在高转速时容易发生二阶临界转速共振，振动幅值也会异常增加。地脚螺栓松动时，振动信号会出现0.5X低频成分，同时结构松动还可能导致部件疲劳断裂，需定期采用超声波探伤检测焊缝完整性^[6]。

四、基于振动分析的预警与诊断方法

（一）在线监测系统

以某工厂的实践工作为例，某厂采用CLN660–24.2/566/566型超临界汽轮机，其在线监测系统采用分布式物联网架构，在高压缸、中压缸及双低压缸的1–8号可倾瓦轴承座（每个轴瓦配置3个垂直/水平/轴向振动传感器）、汽缸中分面及发电机端9号轴承处部署高精度振动加速度传感器（如PCB352C66型，频率响应0.5–10kHz，灵敏度100mV/g），通过Profibus-DP总线与DCS系统实时通信。

1. 轴承振动监测模型

系统基于该机型的三缸四排汽结构特性，建立了多维度监测模型：在轴承振动监测方面，针对可倾瓦易发生的油膜振荡问题，设置1X工频幅值预警阈值（7.1mm/s）及2X–4X倍频分量超限判据，当某轴承振动值超过阈值时，系统自动触发相邻轴承温度（Pt100热电阻，精度 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ ）及润滑油压力（扩散硅变送器，量程0–1.6MPa）的联合分析^[7]。

2. 气缸膨胀监测

在汽缸膨胀监测中，利用激光位移传感器（量程 $\pm 20\text{mm}$ ，分辨率 $1\mu\text{m}$ ）实时采集高压缸与中压缸的胀差数据，结合机组负荷（0–660MW）及主蒸汽温度（ $566\pm 5^{\circ}\text{C}$ ）构建动态补偿模型，当胀差超过 $\pm 1.2\text{mm}$ 时启动停机保护逻辑。

3. 智能预警模块设计

该系统还集成了基于LSTM神经网络的智能预警模块，通过历史数据训练，可提前48小时预测轴承磨损、叶轮结垢（特征频率1X幅值增长速率 $>0.5\text{mm/s/周}$ ）等典型故障。系统曾在某日检测到#5轴承振动信号出现1.2mm/s的1X分量阶跃增长，同时油膜温度从68℃升至82℃，经模型诊断为轴瓦巴氏合金局部剥落，提前72小时安排停机检修，避免了因轴承烧损导致的非计划停运^[8]。

(二) 频谱分析诊断案例

1. 案例背景

某电厂 CLN660-24.2/566/566 型汽轮机在 2024 年 3 月 15 日 09:00 负荷 600MW 运行时，在线监测系统报警显示 #3 轴承垂直振动幅值达 7.5mm/s（阈值 7.1mm/s），同时 DCS 系统记录主蒸汽压力 24.1MPa、温度 565℃，润滑油温度 65℃（正常范围 45–65℃）。

2. 诊断方法

(1) 数据采集

技术人员使用 PCB352C66 型加速度传感器（灵敏度 100mV/g），在 #3 轴承垂直方向以 5120Hz 采样率连续采集 30 秒振动信号，同步记录转速 3000rpm（工频 50Hz）。提取时域波形发现周期性冲击特征，峰值达 15g（正常 <10g）。

FFT 频谱分析

技术人员又对振动信号进行了处理，计算 1024 点 FFT 得到频谱图，其中显示主频为 50Hz（1X），幅值 6.8mm/s（占比 90%）；图形在 120Hz 处出现第二主峰，幅值 1.2mm/s；高频段（2000–4000Hz）存在宽频带噪声。

特征频率计算

轴承参数为可倾瓦滚子轴承（型号 NU2320ECJ），滚子数量 12，节径 100mm，滚子直径 15mm，接触角 15°。

将参数代入公式，计算外圈故障特征频率：

$$f_{BPFO} = \frac{n}{2} \times \frac{D}{d} \times (1 - \cos\alpha) \times \frac{\text{转速}}{60};$$

得出 $\frac{12}{2} \times \frac{100}{15} \times (1 - \cos 15^\circ) \times 50 = 122\text{Hz}$ 。实测后 120Hz 与理论值偏差 1.6%，符合轴承故障特征。

诊断结论

故障类型：其中检测到的故障为 #3 轴承外圈滚子剥落，基于 CLN660-24.2/566/566 型汽轮机 #3 轴承垂直振动幅值超限（7.5mm/s）及频谱特征分析，结合轴承参数（型号 NU2320ECJ，滚子数量 12，节径 100mm，滚子直径 15mm），通过特征频率公式计算得外圈故障特征频率理论值为 122Hz，实测频谱在 120Hz 处出现第二主峰（幅值 1.2mm/s），与理论值偏差仅 1.6%，且高频段存在宽频带噪声，符合轴承滚子剥落的振动特性^[9]。

技术依据：基于表 2 的技术要点。技术人员通过频谱分析之后，发现振动信号经 5120Hz 采样率采集后，通过 1024 点 FFT 变

换显示主频 50Hz（1X）占比 90%，120Hz 特征频率与理论值高度吻合，同时高频噪声表明存在冲击性故障；轴承温度 3 小时内从 62℃ 升至 68℃（温升速率 2℃/h），润滑油铁谱分析显示大磨粒浓度达 80 个/mL（超值 3 倍），且近 72 小时 1X 幅值增长速率 0.3mm/s/d，符合轴承磨损渐进规律；振动烈度 7.5mm/s 已超 API612 标准 G2.5 级限值（7.1mm/s），结合 ISO10816 振动评价准则，判定为轴承结构损伤。

表 2 技术要点

频率分辨率	采用 0.5Hz 频率分辨率（5120Hz/1024 点），确保特征频率识别精度
多维度分析	结合振动幅值、频谱特征、温度趋势及油液分析进行综合诊断
安全阈值	根据标准，设置轴承振动烈度报警阈值为 7.1mm/s（ISO10816G2.5 级限值）
故障特征库	建立 CLN660 型机组轴承故障频率数据库

处理建议：一是先调整机器运行参数，立即将机组负荷降至 400MW（振动幅值 <9.0mm/s），通过降低转子离心力延缓故障发展，同步加强振动监测（采样率提升至 10kHz）；二是停机检修，48 小时内实施停机解体，采用激光对中仪（精度 ±0.02mm）检查轴系对中，更换 NU2320ECJ 轴承并进行跑合试验（空载运行 4 小时，振动 <4.5mm/s），同时对轴承座油孔进行内窥镜清洗（孔径 Φ12mm，确保无异物堵塞）；三是进行预防性措施，对同批次轴承进行超声波探伤（探头频率 5MHz，扫查速度 ≤50mm/s），建立轴承寿命周期档案（记录累计运行时间、启停次数等），并优化润滑油过滤系统（加装 3μm 精密滤芯，将清洁度提升至 NAS6 级）。检修后需进行模态分析（扫频范围 10–2000Hz），验证轴承支撑刚度恢复至设计值（≥8000N/μm）。

停机拆检发现 #3 轴承外圈存在 3 处 0.5mm × 1mm 剥落坑，滚子表面出现麻点。技术人员更换轴承后空载试运行，振动幅值降至 3.2mm/s，120Hz 特征频率消失。

五、结语

通过剖析振动分析技术特点、监测技术与传感器应用，明确了汽轮机异常振动的常见原因，如机械不平衡、轴承故障等，并基于此构建了有效的预警与诊断体系。以实际工程为例，验证了相关方法在实际应用中的准确性与可靠性，能够及时发现故障并提出合理处理建议。但实际作业在那个汽轮机运行工况复杂多变，未来仍需进一步完善故障特征库，探索更先进的智能诊断算法，提高对微小故障和早期故障的识别能力^[10]。

参考文献

[1] 钱阳. 630MW 汽轮机运行故障原因与防范措施研究 [J]. 南方农机, 2024, 55(24): 155–157+188.
[2] 张世东, 范洪武, 李存霖. 某 600MW 机组给水泵汽轮机异常振动分析与处理 [J]. 电站系统工程, 2024, 40(04): 51–53.
[3] 谢才千. 汽轮机间歇性振动故障原因分析与处理 [J]. 石油化工安全环保技术, 2024, 40(03): 15–19+5.
[4] 辛士红, 袁海, 吴兴燕, 等. 汽轮机低压转子叶片脱落故障振动特征分析 [J]. 内蒙古电力技术, 2023, 41(06): 57–61.
[5] 李卫军, 何玉灵, 李国明, 等. 1000MW 汽轮机高频共振故障诊断及治理 [J]. 噪声与振动控制, 2023, 43(01): 141–147+202.
[6] 孙鹏浩. 火力发电厂汽轮机检修中的状态检修初探 [J]. 中小企业管理与科技 (上旬刊), 2019, (10): 172–173.
[7] 罗兴祥. 关于汽轮机检修中状态检修的实际应用分析 [J]. 智能城市, 2018, 4(24): 67–68. DOI: 10.19301/j.cnki.znzs.2018.24.041.
[8] 李强. 状态检修在汽轮机检修中的应用研究 [J]. 中国金属通报, 2018, (11): 282–283.
[9] 杨志宾. 新时期热电厂汽轮机检修的节能降耗措施 [J]. 山东工业技术, 2018, (22): 195. DOI: 10.16640/j.cnki.37-1222/t.2018.22.175.
[10] 李清松. 基于广义风险评估的汽轮发电机组检修周期优化 [J]. 齐鲁石油化工, 2015, 43(04): 325–328.

新型耐磨涂层在火力发电厂高压阀门上的应用研究

陈永波

江苏阚山发电有限公司, 江苏 徐州 221134

DOI:10.61369/EPTSM.2025010012

摘要： 本研究深入聚焦于新型耐磨涂层在火力发电厂高压阀门领域的创新性应用。在对新型耐磨涂层的性能剖析过程中，详细探究其硬度、结合强度、耐高温及耐腐蚀性等关键性能指标。通过实验测试与理论分析，明确该涂层凭借独特的材料体系和微观结构，在硬度等方面远超传统涂层。在涂覆工艺探讨方面，全面研究了物理气相沉积、化学气相沉积、热喷涂等多种先进工艺，阐述不同工艺对涂层性能及质量的影响。同时，将新型耐磨涂层与传统涂层进行多维度对比，涵盖耐磨性能、使用寿命、成本效益等。研究结果清晰表明，新型耐磨涂层在关键性能指标上表现卓越，能显著提高高压阀门的耐磨性能，有效延长其使用寿命，为火力发电厂高压阀门实现高效稳定运行，提供了切实可行且极具潜力的全新解决方案。

关键词： 新型耐磨涂层；火力发电厂；高压阀门；应用研究

Research on the Application of A New Wear-resistant Coating on High-pressure Valves in Thermal Power Plants

Chen Yongbo

Jiangsu Kanshan Power Generation Co., Ltd. Xuzhou, Jiangsu 221134

Abstract： This study focuses on the innovative application of a new wear-resistant coating in the field of high-pressure valves in thermal power plants. In the process of analyzing the performance of the new wear-resistant coating, key performance indicators such as hardness, bonding strength, high temperature resistance, and corrosion resistance are explored in detail. Through experimental testing and theoretical analysis, it is clear that the coating, with its unique material system and microstructure, far exceeds traditional coatings in terms of hardness. In terms of coating process exploration, various advanced processes such as physical vapor deposition, chemical vapor deposition, and thermal spraying are comprehensively studied, explaining the impact of different processes on coating performance and quality. At the same time, a multi-dimensional comparison between the new wear-resistant coating and traditional coatings is conducted, covering wear resistance, service life, and cost-effectiveness. The research results clearly show that the new wear-resistant coating excels in key performance indicators, can significantly improve the wear resistance of high-pressure valves, and effectively extend their service life. It provides a practical and potential new solution for efficient and stable operation of high-pressure valves in thermal power plants.

Keywords： new wear-resistant coating; thermal power plant; high-pressure valve; applied research

火力发电是我国电力供应的重要支柱。其中，高压阀门负责蒸汽、水及煤粉等介质的输送与控制，是关键部件。但实际运行中，其面临高温、高压及含固体颗粒介质冲刷的恶劣环境，密封面、阀杆易磨损。磨损不仅引发阀门泄漏，降低设备运行效率，严重时还会造成安全事故与巨大经济损失。传统防护措施应对乏力，开发高性能防护技术刻不容缓。新型耐磨涂层凭借优异的耐磨、耐腐蚀性能，为解决高压阀门磨损问题提供新途径。本文深入研究其在高压阀门上的应用，为提升发电设备运行稳定性与经济性提供支撑。

一、新型耐磨涂层的性能分析

（一）硬度与耐磨性

硬度是衡量涂层耐磨性能的关键指标之一。新型耐磨涂层通

常采用先进的材料体系和制备工艺，使其具有极高的硬度。例如，采用碳化物、氮化物等硬质相作为增强相，通过合理的配比和微观结构设计，涂层的硬度可达到传统涂层的数倍甚至更高。高硬度使得涂层能够有效抵抗介质中固体颗粒的冲刷和切削作

用,显著降低磨损速率。研究表明,在模拟火力发电厂高压阀门工作环境的磨损试验中,新型耐磨涂层的磨损量仅为传统涂层的1/3-1/5,充分证明了其卓越的耐磨性能。

（二）结合强度

涂层与基体之间的结合强度直接影响涂层的使用寿命和防护效果。新型耐磨涂层通过优化涂层与基体之间的界面结构,采用过渡层设计以及先进的表面预处理工艺,极大地提高了涂层与基体的结合强度。如采用物理气相沉积(PVD)或化学气相沉积(CVD)等方法制备涂层时,在涂层与基体之间引入成分和结构逐渐变化的过渡层,可有效缓解涂层与基体因热膨胀系数差异而产生的内应力,增强结合力。此外,对基体表面进行喷砂、抛光等预处理,增加表面粗糙度和清洁度,也有助于提高涂层的附着力。实验测试显示,新型耐磨涂层与基体的结合强度可达50-100MPa,远高于传统涂层的结合强度,确保了涂层在长期复杂工况下不易脱落^[1]。

（三）耐高温性能

火力发电厂高压阀门工作温度通常较高,因此涂层的耐高温性能至关重要。新型耐磨涂层选用耐高温的材料,如陶瓷材料、金属间化合物等,这些材料具有良好的热稳定性和抗氧化性能。在高温环境下,涂层能够形成致密的氧化膜,阻止氧气进一步向内扩散,从而保护基体不被氧化和腐蚀。同时,涂层的高温力学性能保持良好,不会因温度升高而导致硬度和强度大幅下降。研究发现,新型耐磨涂层在500-800℃的高温环境下,仍能保持其大部分的耐磨和力学性能,满足了高压阀门在高温工况下的使用要求。

（四）耐腐蚀性

高压阀门输送的介质中往往含有腐蚀性成分,如二氧化硫、氮氧化物等,对阀门表面造成腐蚀损伤。新型耐磨涂层具备良好的耐腐蚀性,一方面,涂层的致密结构能够有效阻挡腐蚀性介质与基体接触,减少腐蚀反应的发生;另一方面,涂层材料本身具有一定的抗腐蚀能力。例如,含有铬、镍等合金元素的涂层,在腐蚀介质中能够形成钝化膜,提高涂层的耐腐蚀性能。在模拟腐蚀环境的实验中,新型耐磨涂层经过长时间浸泡后,表面仅有轻微腐蚀迹象,而未涂覆涂层或采用传统涂层的试样则出现了明显的腐蚀坑和腐蚀裂纹,表明新型耐磨涂层能为高压阀门提供可靠的耐腐蚀防护^[2]。

二、新型耐磨涂层的涂覆工艺

（一）物理气相沉积(PVD)

物理气相沉积是一种在真空环境下,通过物理方法将涂层材料蒸发或溅射出来,并在基体表面沉积形成涂层的技术。常见的PVD方法包括磁控溅射、离子镀等。在高压阀门新型耐磨涂层制备中,磁控溅射技术应用较为广泛。其原理是利用磁场约束电子运动,提高气体电离效率,使靶材原子在离子轰击下溅射出来并沉积在基体表面。该方法制备的涂层具有纯度高、致密度好、涂层厚度均匀等优点。通过精确控制溅射工艺参数,如溅射功率、

气压、温度等,可以制备出不同成分和结构的耐磨涂层。例如,在制备氮化钛(TiN)涂层时,调整氮气与氩气的比例以及溅射功率,可获得不同氮含量和晶体结构的TiN涂层,从而优化涂层的性能^[3]。

（二）化学气相沉积(CVD)

化学气相沉积是利用气态的先驱体化合物在高温下发生化学反应,在基体表面沉积形成涂层的过程。与PVD相比,CVD能够在复杂形状的基体表面形成均匀的涂层,且涂层与基体的结合强度较高。在高压阀门涂层制备中,低压化学气相沉积(LPCVD)和等离子体增强化学气相沉积(PECVD)应用较多。LPCVD通过降低反应气压,减少气体分子间的碰撞,提高涂层的沉积速率和质量。PECVD则利用等离子体增强化学反应,降低反应温度,可在对温度敏感的基体材料上制备涂层。例如,采用CVD方法制备碳化硅(SiC)涂层时,以硅烷和甲烷等为气源,在高温和特定的反应条件下,硅烷和甲烷分解产生的硅和碳在基体表面沉积形成SiC涂层。该涂层具有优异的耐磨、耐高温和耐腐蚀性能。

（三）热喷涂

热喷涂是将涂层材料加热至熔融或半熔融状态,通过高速气流将其雾化并喷射到基体表面,形成涂层的技术。热喷涂方法包括火焰喷涂、电弧喷涂、等离子喷涂等。其中,等离子喷涂由于其焰流温度高、速度快,能够喷涂多种难熔材料,在高压阀门新型耐磨涂层制备中具有独特优势。在等离子喷涂过程中,将陶瓷、金属陶瓷等涂层材料送入等离子焰流中,使其迅速熔化并高速撞击基体表面,形成致密的涂层。该方法制备的涂层厚度较大,可根据实际需求进行调整,且涂层的结合强度和耐磨性能良好^[4]。例如,采用等离子喷涂制备氧化铝(Al₂O₃)涂层时,通过优化喷涂工艺参数,如等离子功率、喷涂距离、送粉速率等,可获得孔隙率低、硬度高的Al₂O₃涂层,有效提高高压阀门的耐磨性能。

三、新型耐磨涂层与传统涂层的对比

（一）耐磨性能对比

传统的电镀硬铬涂层,凭借铬金属本身的硬度及电镀工艺形成的相对致密结构,在常规工况下确实能够在一定程度上提高高压阀门的耐磨性能。然而,当置身于火力发电厂高温、高压且伴有固体颗粒介质冲刷的恶劣环境时,其局限性便暴露无遗。电镀硬铬涂层硬度范围通常在800-1200HV,面对具有强大冲击力与切削力的介质,难以有效抵御。与之形成鲜明对比的是新型碳氮化钛(TiCN)涂层,其独特的碳氮金属化合物结构,使其硬度飙升至2500-3500HV。在模拟火力发电厂高压阀门实际工作环境的磨损试验中,严苛的条件下,电镀硬铬涂层在短时间内便出现大量磨损,磨损量远超TiCN涂层。长时间测试后,电镀硬铬涂层表面划痕交错、涂层剥落严重,而TiCN涂层表面仅仅是轻微磨损,充分彰显出新型耐磨涂层卓越的耐磨性能^[5]。

（二）使用寿命对比

新型耐磨涂层因其具备更高的硬度,能有效抵抗介质的摩擦损耗,同时其出色的结合强度保证了在复杂工况下涂层与基体紧

密相连，不易脱落，加之良好的综合性能，使其在高压阀门上的使用寿命显著优于传统涂层。以火力发电厂常见的某型号高压截止阀为例，当采用传统涂层时，在阀门运行仅仅6-8个月期间，由于频繁受到高温蒸汽、高压液体以及夹杂固体颗粒的冲击，密封面和阀杆这些关键部位迅速出现明显磨损，导致阀门密封性失效，发生泄漏现象，不得不进行维修甚至更换，这不仅耗费大量人力物力，还造成了生产停滞。但当采用新型耐磨涂层后，该阀门能够稳定运行18-24个月之久。在这期间，涂层持续为阀门提供可靠防护，极大地减少了设备的维护次数，缩短了停机时间，使得生产流程更为顺畅，生产效率大幅提高，同时也有效降低了运营成本^[6]。

（三）成本效益对比

新型耐磨涂层的制备涉及先进的材料科学与复杂的工艺技术，如物理气相沉积、化学气相沉积等，这使得其初期投入成本相较于传统涂层更高。然而，从长远运营角度综合考量，其成本效益优势十分突出。传统涂层由于自身性能局限，使用寿命短暂，频繁出现磨损后需要多次进行维修，维修过程中需要专业技术人员操作，耗费大量人力；同时还需采购相应的维修材料，投入物力成本；而且每次维修都伴随着设备停机，造成生产时间的损失。反观新型耐磨涂层，通过大幅延长阀门的使用寿命，极大减少了设备维修与更换次数。更为重要的是，其提升了阀门运行的可靠性，有效避免了因阀门故障导致的生产中断，降低了潜在的安全风险，这些间接效益为企业带来了更为可观的经济效益^[7]。所以，综合权衡之下，新型耐磨涂层在成本效益方面远超传统涂层。

四、新型耐磨涂层在高压阀门上的应用前景

（一）提高火力发电设备的可靠性

随着新型耐磨涂层技术的不断发展和完善，其在火力发电厂高压阀门上的应用将进一步提高设备的可靠性。通过有效解决阀门的磨损和腐蚀问题，减少阀门泄漏和故障的发生概率，确保火力发电设备能够长期稳定运行。这对于保障电力供应的连续性和稳定性具有重要意义，有助于提高整个火力发电系统的运行效率和安全性^[8]。

（二）适应更严苛的工作环境

未来，火力发电厂为了提高能源利用效率，将朝着更高参数

（更高温度、更高压力）的方向发展。新型耐磨涂层凭借其优异的耐高温、高压和耐磨性能，能够适应这种更严苛的工作环境。在高温高压的蒸汽环境以及含有更多杂质和腐蚀性成分的介质输送中，新型耐磨涂层能够为高压阀门提供可靠的防护，满足火力发电技术发展对设备性能的要求^[9]。

（三）推动阀门制造技术的创新

新型耐磨涂层的应用将促使阀门制造企业不断创新和改进生产工艺。为了更好地发挥新型耐磨涂层的性能优势，阀门制造企业需要在基体材料选择、表面预处理、涂层涂覆工艺以及质量检测等方面进行优化和创新。这不仅有助于提高阀门产品的质量和性能，还将推动整个阀门制造行业的技术进步，促进相关产业的发展。

（四）具有广阔的市场推广潜力

目前，我国火力发电装机容量庞大，高压阀门的使用数量众多。新型耐磨涂层在提高高压阀门性能和降低运营成本方面的显著效果，使其具有广阔的市场推广潜力^[10]。不仅在新建的火力发电项目中可以广泛应用，对于现有的大量在役高压阀门，通过涂层改造也能够有效提升其性能和使用寿命。此外，新型耐磨涂层技术还可以拓展应用到其他工业领域的阀门设备，如石油化工、冶金等，市场前景十分广阔。

五、结论

本研究对新型耐磨涂层在火力发电厂高压阀门上的应用进行了全面深入的探讨。通过对新型耐磨涂层性能的分析，发现其在硬度、结合强度、耐高温和耐腐蚀性等方面具有显著优势。在涂覆工艺上，物理气相沉积、化学气相沉积和热喷涂等方法能够制备出性能优异的新型耐磨涂层。与传统涂层相比，新型耐磨涂层在耐磨性能、使用寿命和成本效益等方面表现出色。新型耐磨涂层在高压阀门上的应用具有提高火力发电设备可靠性、适应更严苛工作环境、推动阀门制造技术创新以及广阔的市场推广潜力等良好前景。因此，新型耐磨涂层作为一种先进的表面防护技术，在火力发电厂高压阀门领域具有重要的应用价值和发展前景，有望在实际生产中得到广泛应用，为火力发电行业的高效稳定发展提供有力支持。

参考文献

[1] 哈恩华, 纪建超, 厉蕾, 等. 航空透明件有机-无机杂化耐磨涂层的应用研究进展 [J]. 化工进展, 2010, 29(10): 1913-1916.
[2] 李闯. 激光熔覆技术及新型耐磨复合材料在锅炉热管上的应用研究 [J]. 中国机械, 2024, (17): 86-89.
[3] 高懂. 风机用滑动轴承耐磨涂层制备及性能研究 [D]. 河南工业大学, 2024.DOI:10.27791/d.cnki.ghegy.2024.000554.
[4] 杨文斌, 李仕宇, 肖乾, 等. 减摩耐磨激光熔覆涂层的研究现状及发展趋势 [J]. 润滑与密封, 2023, 48(04): 171-182.
[5] 李剑锋. 刮板输送机中部槽激光熔覆 Fe 基耐磨涂层研究 [D]. 中国矿业大学, 2022.DOI:10.27623/d.cnki.gzkyu.2022.001048.
[6] 李卡卡. 新型微胶囊制备及其防腐耐磨涂层 [D]. 东北石油大学, 2021.DOI:10.26995/d.cnki.gdqsc.2021.000142.
[7] 武胜金, 王星星, 施进发, 等. 农机部件表面耐磨涂层的国内外研究现状 [J]. 电焊机, 2020, 50(09): 232-238.
[8] 梁源昌, 徐岩琨, 文可. 一种应用于汽油机活塞环槽的新型耐磨涂层 [J]. 材料保护, 2020, 53(07): 110-113+120.DOI:10.16577/j.cnki.42-1215/tb.2020.07.019.
[9] 姜伟. H13 钢激光熔覆耐磨涂层及抗磨机理的研究 [D]. 江苏大学, 2020.DOI:10.27170/d.cnki.gjsuu.2020.001784.
[10] 杨宇璇. 复合耐磨涂层摩擦学性能研究及其优化 [D]. 北京交通大学, 2020.DOI:10.26944/d.cnki.gbfju.2020.001742.

塔式熔盐太阳能光热发电技术分析

沈亚军

中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 陕西 西安 710000

DOI:10.61369/EPTSM.2025010018

摘要： 本文研究旨在详细分析塔式熔盐太阳能光热发电技术。研究阶段，分析技术的政策背景，介绍示范项目，随后分析技术实现原理、塔式熔盐太阳能光热电站的结构、关键实现技术，并指出技术运行阶段的管道冻盐、熔盐泄漏风险与应对措施。期望本文成果能够在促进社会对熔盐太阳能光热发电技术的深度了解同时，促进技术本身的可持续发展，从而在宏观为国家清洁能源产业的发展添砖加瓦，推动该技术在电力产业充分发挥优势。

关键词： 塔式熔盐光热技术；技术原理；电站结构；冻盐风险

Analysis of Tower Molten Salt Solar Thermal Power Generation Technology

Shen Yajun

Power Construction Corporation of China, Northwest Engineering Corporation Limited, Xi'an, Shaanxi 710000

Abstract： The purpose of this study is to provide a detailed analysis of tower molten salt solar thermal power generation technology. During the research phase, the policy background of the technology was analyzed, and demonstration projects were introduced. Subsequently, the principles of technology implementation, the structure of tower molten salt solar thermal power plants, and key implementation techniques were examined. Additionally, risks such as frozen salt in pipelines and molten salt leakage during the technology operation phase were identified, along with corresponding countermeasures. It is hoped that the results of this paper will not only promote a deeper understanding of molten salt solar thermal power generation technology in society but also facilitate the sustainable development of the technology itself. Ultimately, this will contribute to the development of the national clean energy industry at a macro level and enable this technology to fully leverage its advantages in the power industry.

Keywords： tower molten salt solar thermal technology; technical principles; power plant structure; frozen salt risk

近年来，我国大力推动新能源发电项目，致力于加快清洁能源的转型，有效应对化石能源枯竭带来的挑战。为推进熔盐光热技术研究与应用的发展，国家政府近年来陆续颁布了多项指导性政策，更进一步推动了该项技术的快速发展。目前，塔式熔盐太阳能光热发电技术，已经成为最具竞争力的清洁能源发展方向，故而对塔式熔盐太阳能光热发电技术的研究，是促进社会、相关企业对熔盐太阳能光热发电技术的深入理解、推进技术与产业可持续发展的重要研究行为。

一、塔式熔盐太阳能光热发电政策与示范项目背景

（一）政策背景

2023年4月，国家能源局发布《关于推动光热发电规模化发展有关事项的通知》，提出了产业需要力争在“十四五”期间每年在光热发电领域新增开工规模满足300万千瓦左右。2023年6月，能源局再次发布《关于开展熔盐储热等能源增加综合利用项目安全排查的通知》，旨在为熔盐太阳能光热发电项目起到安全风险管理的指导，并提出针对性风险管控的措施。2023年8月，工信部等四部门发布《新产业标准化领航工程实施方案（2023年—2035年）》，提出了研究光热发电标准，并提出对塔式熔盐项目、菲涅尔发电配套技术以及槽式发电技术等大容量储热技术标准的研究要求。在熔盐太阳能光热发电快速发展背景下，

2024年，国家发展改革委、国家能源局针对新能源发电并网发布了《关于加强电网调峰储能和智能化调度能力建设的指导意见》，为塔式熔盐太阳能光热发电的并网作出了有效的技术指导，同时在2024年4月将包括塔式熔盐太阳能光热发电等47个项目纳入《绿色低碳先进技术示范项目清单（第一批）》文件内。除国家政策之外，我国内蒙古、山西、山东、甘肃、江苏等地方政府也纷纷针对熔盐发电项目颁布地方性政策。例如内蒙古自治区人民政府，针对“十四五”期间光热发电发布《自治区新能源倍增行动实施方案的通知》，力争在“十四五”后的2025年全区新能源发电装机容量达到1.5亿千瓦以上，发电量达到3000亿千瓦时。大量政策背景，推动了熔盐光热发电项目的发展，为产业提出了明确的发展方向、要求，并提供了并网等一系列技术保障。

（二）示范项目

2024年11月30日，我国首批“沙戈黄”项目内最大规模塔式光热项目正式全容量并网发电，该项目为我国已投运、规模最大塔式光热电站。该项目国家首批“光热+”示范电站，750兆瓦总装机容量，其中熔盐光热发电占比110兆瓦、640兆瓦为光伏发电，光热电站安装11960面五边形定日镜，建设200m高吸热塔。作为国内首创五边形“巨蜥式”定日镜，该项目具有抗风性能强、荷载均匀分布、面型精度高且跟踪误差小的特点，受热后的高温熔盐会被传输至具有良好保温效果的存储罐内，待夜间进行能量释放，生产蒸汽来驱动发电机组发电^[1]。图1为该示范项目实拍图：



图1 塔式熔盐光热发电示范项目实拍图

二、塔式熔盐太阳能光热发电技术原理与电站结构

（一）塔式熔盐太阳能光热发电技术原理

塔式熔盐光热发电技术，是利用定日镜设备，将太阳光聚集在中心吸热塔的吸热器，通常聚光倍数在500倍~1000倍，这一技术具有蒸汽参数高、聚光倍数高、发电效率高的特征。图2为塔式熔盐光热技术原理图：

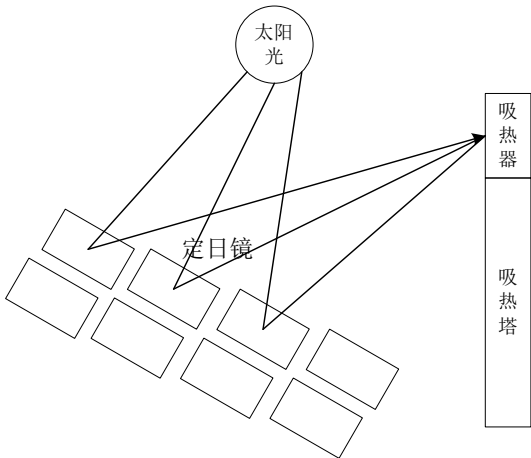


图2 塔式熔盐光热技术原理图

光热技术下，吸热工质是塔式熔盐光热技术核心部分。通常，光热技术吸热工质集中于水、热油、熔盐。塔式光热电站中常用工质为熔盐，部分情况下会使用水。线性菲涅尔技术下吸热工质主要集中于水，热油则主要用于槽式光热电站。

（二）塔式熔盐太阳能光热发电站结构分析

1. 电站结构

塔式熔盐太阳能光热电站结构由定日镜场、动力发电系统以

及熔盐系统联合组成。其中，熔盐系统包括蒸汽发生系统、储热系统以及吸热系统。系统化工作期间，塔式熔盐太阳能光热发电站利用太阳辐射能，通过聚光和热传递，实现电能的转化。此技术依赖于集聚镜、吸热塔、熔盐循环与热转化等核心组件的协同工作。图3为塔式熔盐光热电站结构图：

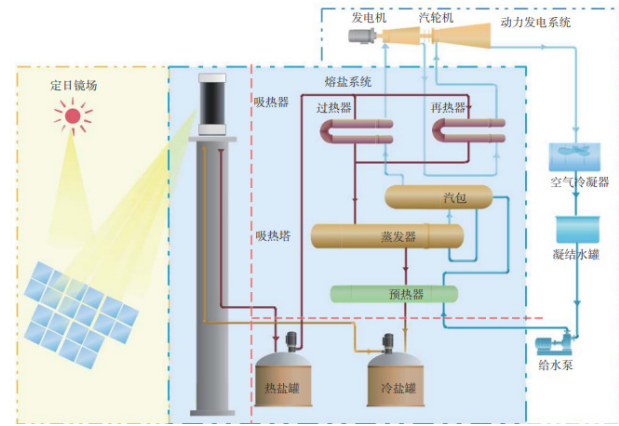


图3 塔式熔盐光热电站结构图

在塔式熔盐光热发电系统中，定日镜场内数以百计的平面镜，会被分布在地面特定区域。这些定日镜会基于计算机控制自动、精确调整方位角度，有效将太阳辐射聚集到中心塔（吸热塔）塔的顶吸热器。吸热器作为塔式光热系统核心单元，由高效的光热转换材料制作而成，负责将集中光束转化为热能，内部流动介质为熔盐，主要由硝酸钠、硝酸钾组成。熔盐有着良好的热传导性能以及宽广的液态温度区间（通常在238℃~600℃范围内）。系统运行阶段，熔盐会在吸热器中被加热至约290℃~565℃，随后被储存在系统内高温熔盐罐中，这一过程可以实现热能的储存，同时，高温熔盐优秀的保温性能优异，可实现昼夜连续发电。电站运行阶段，对热能的输送、转化过程主要依赖于热交换器。高温熔盐通过管道输送到热交换器后会与水进行热交换。水在接受热量后，能够产生高压蒸汽，蒸汽负责驱动汽轮机旋转，随后汽轮机带动发电机运转，继而将能量转换为电能。汽轮机的余热，则会通过空气冷凝器回收，将蒸汽冷凝为水，再送回到循环系统内，确保水资源可以得到高效利用。

塔式熔盐太阳能光热发电系统其独特之处优秀的储热能力，这一特性可有效克服、削弱日照不稳定、昼夜交替对发电过程稳定性带来的影响。即便在无日照条件下，高温熔盐巨大热容量，也允许其在并网后持续性输出热能，保证电站并网后供电的连续性、稳定性^[2]。

2. 关键技术

塔式熔盐太阳能光热电站的关键技术在于熔盐工质、吸热器、熔盐阀门与储罐。熔盐工质方面，系统工质主要集中于二元熔盐，俗称太阳盐，主要组成材料为60%NaNO₃+40%KNO₃，太阳盐凝固点为220℃，最高耐温为620℃。吸热器方面，常规锅炉的受热面和烟气主要采用对流换热形式（水冷壁锅炉除外），采取换热管四周换热。对比之下，塔式吸热器设计采用受光面单侧辐射换热形式，换热面积较小，仅为管周形式1/2左右，同时受光侧和背光侧的壁温温差高达数百度。运行过程中，电站吸热系统采取白天启动、夜晚停机的形式，因此吸热器对吸热管承受热膨胀应力、温差应力以及低周疲劳的能力有着较高要求。

吸热器安装在上百米的吸热塔上,故而设计期间,需要注意尽量减少吸热器的尺寸与重量,以提升安装便捷性,节约安装成本。因此,吸热管在热流密度设计上远高于锅炉,且有着更薄的管壁。

熔盐阀门与储罐方面,熔盐具有凝固点高的特征,故而系统在停机后需要面临一定的冻盐风险,特别是阀门部位,一旦设计结构存在缺陷,可能导致停机、疏盐阶段无法有效疏尽,故而常规锅炉所使用的闸阀不予考虑,而是应使用三偏心蝶阀。熔盐储罐主要用于储存冷熔盐、热熔盐工质,采取现场分段焊接安装形式。通常,熔盐储罐为整个系统中质量要求最高节点,需保证施工、安装质量,以维持后续运行的安全性与稳定性^[3]。

三、塔式熔盐太阳能光热发电系统运行风险分析。

(一) 管道冻盐风险

1. 风险成因与危害

管道冻盐风险,为塔式熔盐太阳能光热发电系统运行主要风险之一,这一风险来源于熔盐在低温下的固化问题。冻盐现象发生的成因具有多样性特点,如环境温度骤变,管道材料保温性能不足或是热管理系统故障等。具体分析,首先,环境温度的变化造成管道冻盐最常见原因。熔盐工作温度区间通常在290℃~565℃之间。夜间或阴天,若管道没有保持足够温度,熔盐容易在低温条件下出现冷凝问题继而形成固态盐,造成管道堵塞。这种情况在昼夜温差较大区域的塔式光热电站尤为明显。其次,管道伴热保温措施不足同样是导致冻盐风险成因。保温材料质量、厚度、施工工艺的有效性,都会直接影响保温效果。例如,若存在保温层不够厚、材料导热性能不佳或是伴,外界冷空气更容易侵入管道造成管道内熔盐温度下降,导致其凝固。特别是在管道较长情况或是管道弯曲部位,保温措施更难实现全面覆盖,有可能成为冻盐风险薄弱环节。最后,热管理系统故障同样会导致冻盐风险。管道中的熔盐循环,需依赖于加热器与泵的协同工作,一旦加热器或泵因故障运转,熔盐无法保持高温流动状态。热量传递、散失失衡背景下会造成局部管道温度下降。此外,冻盐现象对整个熔盐太阳能光热系统造成的后果十分严重,如管道堵塞、设备损坏、运行中断。

2. 风险应对措施

为有效抵御管道冻盐风险带来的危害,应采取多种应对策略联合实施的形式。首先,企业应提升管道的保温效果建设、改造阶段选择高效保温材料,优化保温层厚度与施工工艺,确保管道在低温环境下始终维持熔盐高温。其次,应针对管道、设备设置自动控制系统,实时监测管道温度波动情况,以便及时调整加热功率、熔盐流速参数,以确保运行阶段温度变化始终处于可控范围。最后,对于伴热保温设备应采取冗余设计,如备用加热装置、泵系统,确保主系统故障工况下快速启动备用系统,始终维持熔盐在正常温度下流动^[4]。

参考文献

- [1] 姚亚军.塔式太阳能光热发电熔盐罐设计探讨[J].石油和化工设备,2024,27(10):117-120.
- [2] 许利华,侯晓东,刘可亮.塔式熔盐太阳能光热发电技术[J].能源研究与信息,2020,36(03):135-142.
- [3] 彭恒,闫伟华.太阳能光热发电新技术工艺路线综述[J].电站系统工程,2020,36(03):25-26.
- [4] 李冉.塔式太阳能光热电站经济效益分析[J].上海节能,2020,(01):74-77.
- [5] 江晶亮,顾磊,陈世通.塔式熔盐太阳能光热电站蒸汽发生器传热数值模拟设计计算[J].锅炉技术,2021,52(1):14-20.

(二) 熔盐泄漏风险

1. 熔盐泄漏风险,多数情况源于系统管道、阀门、熔盐储罐等设备的材质老化、机械损伤亦或是密封不良。首先,熔盐作为一种高温介质,长时间输送过程中会对管道内壁产生化学腐蚀效应,特别是在管道连接处、弯曲部位,长期的热应力、机械应力作用下,管道可能会出现微小裂纹,随后逐渐扩展,最终发展为泄漏点。其次,机械损伤同样为熔盐泄漏的重要成因,如施工不当、外界撞击或是地震灾害等一系列偶发事件,均可能导致管道、储罐物理损伤,密封性遭到破坏,进而引发泄漏。最后,密封材料的老化、失效需要得到重点关注。系统长期运行于高温环境之下,一些密封材料如垫圈、密封胶,在高温环境下容易出现硬化、老化问题,继而失去弹性、密封效果,为泄漏埋下潜在。

熔盐泄漏事故对于系统带来的危害十分广泛。首先,泄漏将直接造成热介质损失,降低系统热效率、发电能力。泄漏量较大情况下需要进行机组停机检修,为企业带来经济损失。其次,熔盐泄漏,可能对周围设备、设施产生带来损害。高温熔盐泄漏后,对于附近的电气设备、机械结构可能造成灼烧、腐蚀侵害,同时熔盐泄漏对环境安全也会构成威胁。大量熔盐泄漏背景下一旦进入土壤和水体,可能导致土壤盐碱化、水源污染问题,对生态环境带来破坏,且高温熔盐泄漏亦有可能引发火灾甚至爆炸,威胁现场工作人员的安全。

2. 风险应对措施

应对熔盐泄漏风险,同样需采取综合性措施。首先,设计、材料选择方面,应选用耐高温、抗腐蚀性能优良的金属材料作为储罐、管道材料,推荐使用进口高镍合金,同时优化管道、储罐的厚度与结构,增强结构的抗疲劳、抗压能力。同时,关键位置应采取双层管道设计,确保内层管道泄漏期间外层管仍可起到暂时防护作用。其次,密封材料应选用耐高温、耐腐蚀性能优异的密封材料,并安排专人定期检查、更换老化密封件,确保其长期的有效、稳定性。最后,企业应利用无损检测技术,针对管道内部开展定期检查,及时发现、修复潜在的泄漏点。同时,应配置灵活的应急响应、监测系统,一旦发现泄漏迹象可能迅速启动应急预案,有效控制事态的发展,将对泄漏带来的损失降至最低^[5]。

四、结语

综上所述,本文针对塔式熔盐太阳能光热发电技术分析进行了详细分析,在对塔式熔盐光热项目政策背景、示范项目加以分析后,围绕技术原理、发电站结构与关键技术、系统运行期间的风险类型与应对策略进行详细探讨,继而形成较为完整、全面的塔式熔盐太阳能光热发电的技术体系,供社会、电力产业借鉴、参考,以在宏观推动塔式熔盐发电产业的高质量发展,为我国电力产业的绿色转型起到有效推动。

继电保护涉网定值一体化管控平台关键技术研究

单志伟

内蒙古电力（集团）有限责任公司电力调度控制分公司，内蒙古 呼和浩特 010040

DOI:10.61369/EPTSM.2025010019

摘 要： 我国电力事业高质量发展背景下，涉网厂（场）站继电保护定值工作已经无法满足厂网分离运行要求，为降低涉网厂（场）站保护设备不正确动作次数，防止电厂因交界面涉网定值误整定造成保护拒动、误动，扩大停电范围，必须要构建完善的涉网管控平台。本文以某调控中心涉网定值一体化管控平台为例，说明管控平台构建总体思路及基础模型，平台具体组成、关键技术，并结合技术发展提出技术应用优化形式，以此为提升电厂继电保护水平，确保电网安全稳定运行提供坚实保障。

关 键 词： 继电保护；涉网定值；一体化管控平台；关键技术

Research on Key Technologies and Applications of Integrated Control Platform for Relay Protection Involving Network Setting

Shan Zhiwei

Inner Mongolia Electric Power (Group) Co., LTD. Power Dispatching And Control Branch, Hohhot, Inner Mongolia 010040

Abstract： In the context of high-quality development in China's power industry, the relay protection setting work at power plants can no longer meet the requirements for isolated operation between plants and grids. To reduce the number of incorrect actions by protection devices in grid-connected power plants and prevent misadjustment at the interface causing protection failures or malfunctions, which could expand the scope of power outages, it is essential to establish a comprehensive grid-related control platform. This paper takes an integrated grid-related setting control platform of a certain dispatching center as an example to illustrate the overall approach and basic model of the control platform, its specific components, key technologies, and proposes technical application optimization forms in light of technological advancements. This provides a solid guarantee for improving the level of relay protection at power plants and ensuring the safe and stable operation of the power grid.

Keywords： relay protection; grid-related setting; integrated management and control platform; key technology

引言

发电厂、新能源厂（场）站继电保护整定计算包括高压母线、主变零序及以外设备的继电保护整定计算等系统部分；高压母线以内设备的继电保护整定计算等电厂部分，二者具有相互关联相互影响的直接关系，并通过相互配合构成统一整体。但在实际运行中，由于发电厂、新能源厂（场）站继电保护定值工作相对较为滞后，极容易出现跳闸事故，并暴露出定值审查不严、管理不规范等问题，对电厂设备和电网运行安全产生负面影响。

一、管控平台构建总体思路及基础架构

（一）管控平台构建总体思路

从发电厂、新能源厂（场）站继电保护定值工作实际情况出发，结合涉网定值相关标准规程，充分利用技术发展优势，设计

研发涉网定值一体化管控平台，能够利用电厂相关定值数据和整定校核规范，实现对相关电厂涉网定值的校核，为发电厂、新能源厂（场）站设备及电网安全稳定运行提供坚实保障^[1]。一体化管控平台的构建，需要从涉网定值整定计算现状出发，考虑电厂/新能源场站、电力企业等单位实际运行需求，确保各单位能够

作者简介：单志伟（1987.01—），男，汉族，河北廊坊市人，学历：硕士研究生，职称：高级工程师，目前从事电网继电保护专业整定计算、运行及涉网安全管理、可研评审、技术监督等工作。

基于平台实现涉网定值规范化管理；厂网涉网定值的联合整定计算；涉网定值的自动校核，并有效推动电厂/新能源场站、电网等专项管理工作水平提升。

(二) 管控平台构建基础架构

所搭建的一体化管控平台，需要具备涉网定值流程化上报、自动生成定值校核计算书、自动生成校核报告、涉网定值校核管理优化、数据查询与统计、日常管理等功能，并为后续继电保护一体化、智能化发展奠定基础。以此需求为导向，在遵循一体化、标准化和通用化、先进性和成熟性、安全性和高可靠性基础上，将涉网模块基础架构分为4个基本层次，基础架构设计如图1所示。

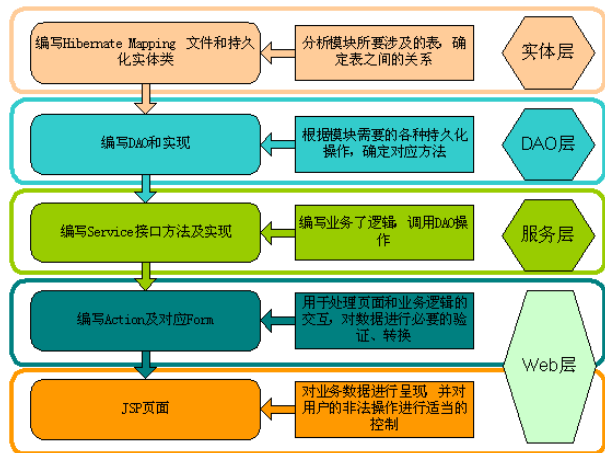


图1 一体化管控平台涉网模块基础架构

基于上述 workflow，能够有效解决涉网定值的审核、批准、备案等业务目标，在多个参与者之间，利用计算机，按某种预定规则自动传递文档、信息或者任务。涉网定值管理应用模块集成定值备案管理、专项工作管理、技术管理于一体的涉网保护管理核心业务功能应用，建立涉网定值校验规则库，实现定值备案流程涉网保护填报过程自动校验，提升涉网保护定值配合准确性^[4]。

二、涉网定值一体化管控平台的具体组成

涉网定值一体化管控平台构建，需先建立设备的基础数据模板，由电厂提供平台所需各项基础资料，并依照相关格式建立和维护电网基础模型。在完善电厂一次模型和二次模型基础上，通过设备基础参数和保护装置的配置，构建完整的二次设备模型，最终实现图形化的定值整定和校核。一体化管控平台具体组成如表1所示。

表1 一体化管控平台的具体组成

模块	组成	作用
继电保护定值校核	新投运涉网保护定值的整定	基于平台建立电厂的模型和基础数据，进行相关继电保护定值的整定计算
	涉网继电保护定值的校核	确定发电机、主变、高厂变、启备变、励磁变（机）等与电网关联紧密等设备的基础信息，研究保护装置配置，建立保护配置模型，完成校核定值整定

涉网定值计算及校核	失磁保护与低励限制	校核发电机组具备失磁保护，且已经进行定值整定；校核失磁保护出口；校核AVC系统定值与低励限制、失磁保护、静稳圆配合关系
	失步保护	保证在进相运行、短路故障、系统振荡、电压回路断线等情况下均不应误动
	定值过电压保护	校核定子过电压保护整定是否符合发电机过电压能力
	频率异常保护	校核低频保护动作方式及延时；校核低频保护与低频减载定值配合关系；校核高频保护定值
	过激磁保护	校核过激磁保护与机组设备设计能力是否适应
	转子过负荷保护、过励限制及保护	校核发电机转子过负荷保护定值是否低于机组设计能力；与发电机转子过负荷保护配合，校核过励限制及保护
	定子过负荷保护、定子电流限制	校核定子过负荷保护设置是否低于机组设计能力；与定子过负荷保护配合，校核定子电流
	电厂重要辅机保护	一次风机、二次风机、给水泵、引风机、送风机、凝结水泵等保护
继电保护整定计算		以电网模型为基础实现厂内各设备基于保护装置的继电保护整定计算
涉网定值备案管理		电厂将涉网定值相关的、已盖单位公章的定值单附件、计算书附件、设备参数附件进行维护，在进行审核后上报给中调及电科院进行确认，审核通过后统一将涉网定值及其相关资料进行归档
专项工作管理		实现专项工作（软件升级、反措报告等）的发布、工作完成情况跟踪、工作完成情况统计等方面管理
技术管理		会议通知、整定资料等方面管理
平台数据管理		权限管理、涉网设备台账管理、厂站综合信息、定值管理、计算书管理、校核结果管理

三、关键技术及具体应用优化

(一) 关键技术

1. 继电保护定值校核

继电保护定值校核是依托定值校验规则库实现的，依据相关涉网保护管理规定、整定规程以及整定计算经验，归纳备案定值校验规则，支持在规则库中维护和添加相关内容，在定值上报过程中，实现自动调取对应定值项校验规则进行定值校验。所上报的涉网保护主要包括：主变复压过流保护、主变零序及间隙零序保护、主变阻抗保护、过激磁保护、发电机复压过流保护、火电厂发电机频率异常保护、水电厂发电机频率异常保护、发电机过电压/低电压保护、发电机失磁保护、发电机失步保护、发电机励磁绕组过负荷保护、发电机定子过负荷保护等，通过合理设定定值项及校验规则，为涉网保护自动校验奠定基础。

2. 涉网定值计算及校核

涉网定值计算机校验，是通过模块内对上述各类涉网定值内容分析，并提炼出定值项关键参数及数据实现的。在平台构建中，涉网保护模板以TAB页形式形成十一合一的机组涉网保护

定值填报界面，界面分为基础参数填报和涉网保护定值填补两部分。平台运行过程中，在基础参数填报完成后，自动生成涉网定值校核计算书，填报涉网定值时，能够直接对计算结果进行定值校验，如出现不满足要求的定值，直接给予告警。基于各保护定值模板，电厂用户可通过专用调度数据通道登陆部署在调度端的服务器，采用浏览器登录继电保护定值管理系统后，可按设计的机组信息填报各涉网保护类型模板下的定值并上传相应机组的定值单、计算书及设备参数附件信息。

3. 基于装置特性的涉网定值校核方法

基于装置特性的涉网定值校核，包括失磁特性分析和失步特性分析两种方法，失磁特性分析是基于系统侧主判据、发电机侧主判据和转子低电压判据实现的。失步特性分析则是基于不同企业装置的保护动作特性，分别设定校核方式。如三元件失步保护动作特性是通过遮挡器特性、透镜特性和电抗线等参数分析实现的；多直线遮挡器特性是根据阻抗边界、电抗定值等参数分析实现的。

4. 基于配合曲线的转子绕组过负荷特性校核

励磁绕组过负荷保护多配置在发变组保护电动机上，由定时限保护和反时限保护组成，若转子过负荷保护只配备定时限保护则无须考虑配合曲线图，若转子过负荷保护定时限与反时限保护均配置，则需考虑反时限曲线部分^[9]。本平台设计中，在涉网保护设计定值自校模板时，充分考虑励磁保护反时限特性，依据所填写的发电机强励倍数，自动计算发电机动作时间，根据厂家给出的励磁调节器时间，自动校验配合曲线关系，不满足转子过负荷与励磁曲线配合时，给出告警提示。

（二）技术应用优化

1. 实验模型搭建

为了更好的验证涉网定值一体化管控平台运行成效，搭建典型电力系统模型并集成管控平台进行仿真实验。模型构建包括三个组成部分，其中发电单元包括：（1）火电厂，配置1台300MW汽轮发电机，含主变（220 kV/15kV）、高厂变、启备变；（2）水电厂配置1台200MW水轮发电机，含主变（220kV/13.8kV）。电网拓扑为220kV双母线系统，连接火电厂、水电厂及3条输电线路，设置正常运行、检修模式（单母线运行）、故障模式（线路短路）等三种实验模式。涉网保护配置为：发电机失磁保护、失步保护、过电压保护、频率异常保护；主变复压过流保护、零序保护、阻抗保护；重要辅机保护。故障场景设定为失磁故障、失步振荡、过电压故障、低频/高频扰动等几种形式。

2. 实验结果分析

基于实验结果可以看出，相对传统人工校核方式而言，本平台自动校核效率提升90%以上，错误检出率由原本的82%提升至95%，误报率由原本的15%降低至3%。通过自动化流程运行，能够显著减少人为疏漏，在失磁保护判据等复杂定值项中表现尤为

突出。同时在故障场景响应测试中，也达到良好效果，所设定的故障场景测试效果如表2所示。

表1 一体化管控平台故障场景响应测试结果

故障类型	平台响应时间（秒）	定值调整准确性	保护动作结果
失磁故障	2.3	100%	正确解列
失步振荡	3.1	98%	正确区分振荡中心
过电压故障	1.8	100%	及时动作灭磁
低频扰动	1.5	95%	与减载配合无误

3. 技术应用优化

通过仿真实验可以看出，继电保护涉网定值一体化管控平台在涉网定值校核和故障响应方面，相对传统方式都有显著优势。为进一步提升关键技术应用水平，在智慧电力快速发展应用背景下，还应当从如下方面进行做好优化：

一是涉网定值校验规则库的智能化扩展与动态更新，基于历史保护动作和实际运行参数，采用聚类算法和关联规则挖掘算法，实现潜在定值冲突或校验漏洞的自动识别。结合 SCADA 系统实时采集的电网频率、电压、负荷波动等数据，动态调整校验规则库的阈值。整合国家标准（如 DL/T 684）、设备厂商技术手册及电厂运维经验，构建多维度知识图谱，支持规则库的语义化查询与智能推荐。通过这些方面优化，能够有效提升规则库的覆盖范围与适应性，减少人工维护成本，增强校核准确性^[4]。

二是基于设备特性的自适应校核模型优化，针对主流保护装置，建立包含装置参数、动作逻辑、判据算法的动态模型库。利用设备运行数据，结合深度学习算法分析装置的实际响应特征，动态修正模型参数。针对复杂保护类型，采用多目标优化算法平衡不同判据的优先级，实现多判据协同优化^[5]。通过这些方面优化，能够有效增强校核方法对不同厂家装置特性的适应性，提升复杂场景下的校核精度。

三是实时数据驱动的动态配合曲线校核优化，在遵循相关标准基础上，实施获取电网运行数据，与平台校核模块无缝对接；基于实时工况，利用数值仿真生成动态配合曲线，结合电厂侧边缘计算节点部署，实现本地快速校核与云端大数据分析的协同。通过这些方面优化，能够有效突破传统静态校核的局限性，实现保护定值与电网实时工况的深度融合^[6]。

四、结束语

继电保护涉网定值一体化管控平台的构建和应用，能够有效解决传统校核方法中规则僵化、设备适配性差、静态数据滞后等问题，为电厂与电网的协同管理提供智能化支撑。在未来发展中，还将与数字孪生、区块链等技术深度融合，推动平台朝向全生命周期管理方向转型，以此为电力系统安全稳定运行提供坚实保障，为推动电力事业高质量发展起到应有支撑作用。

参考文献

[1] 齐雪雯, 万春竹, 赵凌, 等. 基于数据管理的发电厂涉网定值智能校核 [J]. 电工材料, 2024, (05): 18-21.
[2] 阿敏夫, 武占国, 高晨, 等. 基于数据模型的涉网继电保护整定与校核方案 [J]. 自动化技术与应用, 2023, 42 (02): 183-186.
[3] 梁展, 胡磊, 何天磊, 等. 基于多 Agent 协作的涉网保护定值校核系统 [J]. 电气应用, 2022, 41 (12): 58-63.
[4] 洪权, 李理, 刘海峰, 等. 考虑动作误差的低励限制与失磁保护定值配合方法研究 [J]. 电力科学与技术学报, 2019, 34 (02): 91-96.
[5] 罗跃胜, 慕宗江, 金小波, 等. 基于专家系统的涉网电厂继电保护定值风险评估系统 [J]. 广东电力, 2013, 26(11): 68-71.
[6] 梁辰, 胡磊, 何天磊, 等. 基于多 Agent 协作的涉网保护定值校核系统 [J]. 电气应用, 2022, 41(12): 58-63.

基于设备全寿命周期的燃煤火电厂电气检修策略优化

彭冲

江苏阚山发电有限公司，江苏 徐州 221134

DOI:10.61369/EPTSM.2025010020

摘要： 本文围绕燃煤火电厂电气设备的全寿命周期管理展开，分析了传统检修模式的局限性，提出了基于全寿命周期（LCC）的电气检修策略优化方法。首先阐述了设备全寿命周期管理的核心概念，包括规划、采购、运行、维护、退役等阶段。随后从技术、经济、环境等维度构建了电气检修策略优化模型，重点探讨了状态监测技术、风险评估方法、检修资源优化配置等关键技术。最后，提出了基于 LCC 的检修策略实施路径，旨在降低设备全寿命周期成本、提高设备可靠性和安全性，为燃煤火电厂的可持续发展提供理论支持。

关键词： 燃煤火电厂；全寿命周期管理；检修策略优化

Optimization of Electrical Maintenance Strategy for Coal-Fired Power Plant Based on the Whole Life Cycle of Equipment

Peng Chong

Jiangsu Fanshan Power Generation Co., LTD. Xuzhou, Jiangsu 221134

Abstract： This paper focuses on the full lifecycle management of electrical equipment in coal-fired power plants, analyzing the limitations of traditional maintenance models and proposing an optimized electrical maintenance strategy based on the full lifecycle (LCC). First, it elucidates the core concepts of full lifecycle management, including planning, procurement, operation, maintenance, and decommissioning phases. Subsequently, it constructs an optimization model for electrical maintenance strategies from technical, economic, and environmental perspectives, with a focus on key technologies such as condition monitoring, risk assessment methods, and optimal allocation of maintenance resources. Finally, it proposes an implementation path for maintenance strategies based on LCC, aiming to reduce the full lifecycle cost of equipment, enhance reliability and safety, and provide theoretical support for the sustainable development of coal-fired power plants.

Keywords： coal-fired power plant; whole life cycle management; maintenance strategy optimization

燃煤火电厂作为我国能源结构中的重要组成部分，承担着保障电力供应的重要任务。随着电力需求的不断增长和环保要求的日益严格，燃煤火电厂面临着设备老化、维护成本上升、运行效率降低等多重挑战。电气设备作为火电厂的核心组成部分，其运行状态直接影响电厂的安全性和经济性。传统的检修模式主要基于时间周期或故障后维修，存在过度检修或检修不足的问题，难以适应现代火电厂对设备可靠性和经济性的要求。因此，基于设备全寿命周期（Life Cycle Cost, LCC）的电气检修策略优化成为火电厂管理的关键课题。

一、设备全寿命周期管理概述

（一）全寿命周期管理的定义

设备全寿命周期管理是一种系统性的管理理念，旨在通过规划、采购、运行、维护、退役等全过程的协同管理，实现设备全寿命周期成本（LCC）的最小化。LCC 包括设备采购成本、运行成本、维护成本、故障损失成本及退役处理成本等。

（二）全寿命周期管理的阶段划分

全寿命周期管理涵盖设备从规划到退役的完整过程。在规划阶段，需明确设备需求、技术参数及性能指标，为后续工作奠定

基础。采购阶段则聚焦于选择适宜供应商，完成设备选型与采购任务，确保设备质量与性能符合要求。运行阶段涉及设备安装调试、日常运行及性能监测，旨在保障设备稳定运行并实时掌握其性能状况。维护阶段重点开展定期检修、故障维修及备件管理，通过预防性维护降低设备故障率。退役阶段则负责设备报废处理及残值回收，实现资源最大化利用。各阶段紧密衔接，共同构成设备全寿命周期管理的完整体系。

（三）全寿命周期管理的目标

全寿命周期管理旨在达成多维度目标，以实现设备综合效益的最大化。经济性方面，聚焦于降低设备从规划、采购、运行、

维护直至退役整个全寿命周期的成本，通过合理规划资源分配、优化采购策略及提升运行维护效率等手段，减少不必要的资金投入。可靠性上，致力于提高设备运行过程中的可靠性与安全性，降低故障发生率，保障生产稳定。环保性目标强调减少设备运行对环境造成的负面影响，推动绿色发展。同时，注重优化设备维护策略，降低维护难度，提升维护工作的可操作性与有效性。

二、传统检修模式的局限性

（一）时间周期检修的不足

传统时间周期检修（Time-Based Maintenance, TBM）以固定时间间隔作为检修依据，存在显著局限性。一方面，这种模式易导致过度检修，许多设备在未出现故障迹象时就被拆解维护，不仅耗费大量人力、物力，还可能因不当操作引入新隐患。另一方面，检修间隔过长又会引发检修不足问题，部分设备因长期缺乏有效维护，故障率悄然攀升，严重影响设备运行可靠性。此外，TBM未结合设备实际运行状态，检修策略缺乏针对性，难以实现精准维护，导致检修效果大打折扣。

（二）故障后维修的缺陷

故障后维修（Run-to-Failure Maintenance, RTF）模式仅在设备出现故障时才启动维修流程，这种策略存在明显缺陷。设备故障往往伴随着长时间的停机或停产，不仅打乱生产计划，还可能造成原材料浪费、订单延误等连锁反应，导致重大经济损失。同时，故障设备在运行过程中可能已存在安全隐患，故障发生时极易引发安全事故，对人员安全构成严重威胁。此外，紧急维修通常需要调用高成本的资源，包括专业技术人员、特殊工具及备件等，进一步推高了维修成本。

三、基于全寿命周期的电气检修策略优化模型

（一）优化目标

基于全寿命周期的电气检修策略优化，核心目标在于构建一套更为科学、高效且经济的设备维护体系。首要任务是达成最小化LCC（全寿命周期成本），这要求在检修策略的制定上，不仅要考虑直接维修成本，还需兼顾设备采购、运行能耗、退役处理等全链条成本，通过精准预测设备状态、合理规划检修周期与内容，实现成本的有效控制^[1]。同时，提高设备可靠性是优化策略的关键。通过引入先进的监测技术与数据分析方法，实时掌握设备运行状态，提前预警潜在故障，采取预防性维护措施，从而显著降低设备故障率，延长其使用寿命，保障生产连续性与稳定性。此外，降低检修风险亦不容忽视。优化策略需注重检修过程的安全管理，通过标准化作业流程、强化人员培训、提升应急响应能力等措施，有效减少检修过程中的人员伤亡和设备损坏风险，确保检修工作安全、高效进行^[2]。

（二）优化模型构建

在构建优化模型时，需从技术、经济与环境三个维度综合考量。技术维度上，引入状态监测技术，借助传感器与数据采集系

统，实现对设备运行状态的实时监测；运用故障诊断技术，基于监测数据，采用机器学习、深度学习等先进方法，精准识别设备故障；同时，采用风险评估技术，对设备故障风险进行量化评估，明确检修优先级^[3]。经济维度方面，开展全面的成本分析，涵盖设备采购、运行、维护、故障损失及退役处理各环节成本；通过成本效益分析，对比不同检修策略下的经济效益，为决策提供依据，选择最优检修方案。环境维度上，注重环保性能评估，考量设备运行对环境的影响，通过优化检修策略减少污染排放；在设备退役阶段，实施资源回收利用，提高资源利用率，降低环境负荷，实现经济效益与环境效益的双赢^[4]。

（三）关键技术

在设备全寿命周期管理中，关键技术涵盖状态监测、风险评估及检修资源优化配置等方面。状态监测技术是保障设备稳定运行的基础，其中振动监测通过振动传感器实时捕捉设备振动信号，依据信号特征判断设备运行状态；温度监测借助红外热像仪等设备，对设备温度进行精准监测，提前预防过热故障；电气参数监测则关注电压、电流、功率因数等关键指标，全面评估设备性能。风险评估方法为设备检修决策提供科学依据，故障模式与影响分析（FMEA）能够识别设备潜在故障模式，并评估其对系统的影响程度；风险矩阵法基于故障发生概率和影响程度构建风险矩阵，直观确定风险等级^[5]。此外，检修资源优化配置至关重要，人力资源优化根据检修任务需求合理调配人员，提升检修效率；备件管理优化采用先进库存模型，在降低备件库存成本的同时，确保检修需求得到及时满足。

四、基于全寿命周期的电气检修策略实施路径

（一）规划阶段

在设备规划阶段，科学合理的规划是确保设备高效运行、降低运营成本的关键。需求分析是规划的基石，需全面、精准地明确设备功能需求，涵盖设备应具备的基本功能以及特殊功能要求；详细界定技术参数，如功率、精度、效率等具体指标；设定明确的性能指标，包括可靠性、可维护性、安全性等方面的标准，为后续工作提供清晰方向。LCC估算至关重要，基于设备全寿命周期成本模型，综合考虑设备购置成本、运行能耗、维护保养、故障修复、备件更换及报废处理等各个环节的费用，对设备全寿命周期成本进行精确估算，全面评估设备的经济性^[6]。根据LCC估算结果，选择最优检修策略，平衡设备维护成本与运行可靠性，实现设备全寿命周期成本的最小化，保障设备长期稳定、高效运行。

（二）采购阶段

在采购阶段，各环节紧密衔接且至关重要。供应商选择是采购的源头把控，需全面考察供应商的信誉状况，了解其在行业内的口碑、过往合作案例中的表现，同时评估其技术实力，包括研发能力、生产工艺水平等，确保能提供高质量产品与优质服务，为后续合作奠定坚实基础。设备选型需紧密围绕检修策略需求展开，深入分析检修工作对设备性能、功能的具体要求，以此为依

据筛选出最适合的设备型号，保证设备投入使用后能高效满足检修作业需求，提升检修效率与质量^[7]。合同管理则是保障双方权益的关键环节，要在合同中明确设备质量保证条款，规定质量标准、验收方法及不合格处理方式；清晰界定售后服务内容，如响应时间、维修范围等，通过严谨的合同管理，规避潜在风险，确保采购活动顺利推进。

（三）运行阶段

在设备运行阶段，为保障设备高效稳定运行、降低故障风险，需从多方面开展工作。建立设备状态监测系统是基础，通过在设备关键部位安装传感器，实时采集振动、温度、电流等参数，全面掌握设备运行状态，及时发现异常情况。利用大数据分析技术是关键，对海量监测数据进行深入挖掘，运用机器学习等算法，识别设备运行规律，精准预测故障趋势，为提前采取措施提供依据。定期评估设备性能是保障，结合实际运行数据与性能指标要求，分析设备性能变化，若发现性能下降，及时调整检修策略，优化检修周期与内容^[8]。通过这三方面协同配合，实现对设备运行状态的精准把控，提高设备可靠性，延长设备使用寿命，降低运行成本。

（四）维护阶段

在设备维护阶段，为保障设备稳定运行、降低故障风险，需着重开展三项工作。预防性维护是核心，依托状态监测系统获取的实时数据，深入分析设备运行状态与潜在故障趋势，据此制定科学合理的预防性维护计划，通过定期检查、保养等措施，提前消除隐患，延长设备使用寿命。故障维修是保障，当设备突发故障时，迅速启动应急响应机制，组织专业技术人员进行故障排查与修复，尽快恢复设备正常运行，减少停机损失^[9]。备件管理是支撑，建立完善的备件库存管理系统，根据设备运行特点与检修需求，合理储备关键备件，确保在设备维修时能够及时供应所需

备件，提高维修效率，降低因备件短缺导致的延误风险，为设备维护工作提供坚实保障。

（五）退役阶段

在设备退役阶段，需严谨、系统地开展一系列工作，以实现资源合理利用与环境保护的双重目标。设备评估是首要环节，需综合考量设备的技术状况、剩余使用寿命、再利用潜力等因素，全面评估其退役价值，并依据评估结果确定最适宜的退役方式，如报废、转售、改造再利用等。残值回收是降低设备全寿命周期成本（LCC）的关键举措，通过专业的回收渠道与评估方法，最大化回收设备残值，减少企业在设备投入上的损失^[10]。环保处理则是不可忽视的社会责任，严格按照国家及地方环保法规要求，对退役设备进行无害化处理，确保有害物质得到妥善处置，减少对环境的污染，推动企业可持续发展，实现经济效益与环境效益的双赢。

五、结论

本文基于设备全寿命周期理论，针对燃煤火电厂电气检修策略展开深入研究，提出了优化检修策略的方法与路径。研究结果表明，传统以时间周期或故障后维修为主的检修模式存在过度检修或检修不足的问题，难以适应现代火电厂对设备可靠性和经济性的要求。而基于全寿命周期的电气检修策略，通过综合考量设备规划、采购、运行、维护及退役等各阶段的成本与效益，能够实现设备全寿命周期成本的最小化。同时，结合状态监测技术、风险评估方法及检修资源优化配置等关键技术，可显著提高设备运行的可靠性和安全性，降低检修风险，为燃煤火电厂的可持续发展提供了有力支撑。

参考文献

- [1] 陈志钊, 徐晓宇, 周高盛. 燃煤电厂输灰系统优化研究 [J]. 山东煤炭科技, 2023, 41(6).
- [2] 张杨, 杜振, 晏敏, 等. 燃煤电厂脱硝催化剂全寿命管理模式研究 [J]. 化工管理, 2019, (28): 122-124.
- [3] 冯亮. 全寿命周期成本的电力变压器检修策略 [J]. 科技风, 2020, (12): 197.
- [4] 袁诚. 基于电力设备全寿命周期成本最优的检修策略研究 [J]. 电子测试, 2017, (15): 112-113.
- [5] 于东洋, 孙巍, 刘洋, 等. 低温环境下变压器全寿命周期成本优化及检修策略 [J]. 黑龙江电力, 2017, 39 (01): 50-53.
- [6] 雷成华. 全寿命周期管理理念用于输电设备状态检修管理的实现与效果分析 [J]. 机电信息, 2016, (15): 169-170.
- [7] 黄国日, 文福控, 刘昌, 等. 确定变压器更换策略的机会成本方法 [J]. 电力建设, 2016, 37 (04): 35-42.
- [8] 马淑菁. 基于全寿命周期管理的电网设备运维检修策略优化研究 [J]. 青海电力, 2015, 34 (04): 65-69.
- [9] 王佳明, 刘文颖, 魏帆, 等. 基于寿命周期成本管理的输变电设备状态检修策略研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39 (05): 77-80.
- [10] 郑淮, 陈海波, 杨凌辉, 等. 输变电资产全寿命周期管理的探索研究 [J]. 华东电力, 2009, 37 (05): 738-741.

基于大数据分析的新能源电力项目储备潜力评估 与预测模型构建

马斌¹, 王玲²

1. 国网乌鲁木齐供电公司, 新疆, 乌鲁木齐 830001

2. 国网昌吉供电公司, 新疆, 昌吉 831100

DOI:10.61369/EPTSM.2025010022

摘要 : 近年来, 新能源电力产业发展迅猛。本文深入探讨了大数据分析在新能源电力领域的应用。一方面, 详细阐述新能源电力项目储备潜力评估模型的构建, 涵盖评估指标选取的科学性、系统性、可操作性和动态性原则, 以及模型选择与构建要点和易被忽视的问题; 另一方面, 对预测模型进行研究, 包括模型选择、构建训练、评估优化等环节。旨在借助大数据分析技术, 为新能源电力项目的资源配置优化、投资风险降低提供有力支撑, 推动能源产业可持续发展。

关键词 : 新能源电力项目; 储备潜力评估; 预测模型; 大数据分析; 评估指标

Construction of a Reserve Potential Evaluation and Prediction Model for New Energy Power Projects Based on Big Data Analysis

Ma Bin¹, Wang Ling²

1. State Grid Urumqi Power Supply Company, Urumqi, Xinjiang 830001

2. State Grid Changji Power Supply Company, Changji, Xinjiang 831100

Abstract : In recent years, the new energy power industry has developed rapidly. This paper delves into the application of big data analysis in the field of new energy power. On one hand, it elaborates on the construction of a reserve potential evaluation model for new energy power projects, covering the scientific, systematic, operable, and dynamic principles of evaluation index selection, as well as key points and overlooked issues in model selection and construction. On the other hand, it explores the prediction model, including model selection, construction training, evaluation optimization, and other aspects. The aim is to provide strong support for optimizing resource allocation and reducing investment risks in new energy power projects through big data analysis technology, thereby promoting the sustainable development of the energy industry.

Keywords : new energy power projects; reserve potential evaluation; prediction model; big data analysis; evaluation indicators

引言

在全球能源结构加速向清洁化、低碳化转型的大背景下, 新能源电力产业迎来前所未有的发展机遇。风力发电、太阳能光伏、生物质能等新能源技术不断突破, 装机容量持续攀升, 成为推动能源革命的核心力量。然而, 新能源电力项目具有投资大、周期长、不确定性因素多等特点, 科学评估项目储备潜力并进行精准预测, 对于合理配置资源、降低投资风险、保障能源可持续供应至关重要。随着信息技术的飞速发展, 大数据分析技术以其强大的数据处理和挖掘能力, 为新能源电力项目储备潜力评估与预测提供了新的思路和方法。

一、大数据分析在新能源电力领域的应用现状

据国家能源局统计, 2024年上半年, 全国全社会用电量达到46575亿千瓦时, 同比增长8.1%。与此同时, 以风电、光伏为代表的新能源产业迅速崛起。2024年上半年, 全国风电、光伏发电量合计达到1.56万亿千瓦时, 同比增长22%。新能源的蓬勃发展

为电力行业注入了新活力^[1]。

目前, 大数据分析深度融入新能源电力领域, 已取得了诸多成果。在新能源发电预测方面, 通过收集历史气象数据、机组运行数据等, 运用机器学习算法建立预测模型, 能够较为准确地预测风力发电、光伏发电的功率输出, 帮助电网企业合理安排调度计划, 提高电力系统的稳定性和可靠性。例如, 一些地区利用卫

星云图数据、气象雷达数据和历史光照强度数据，对光伏发电功率进行短期预测，预测精度显著提升。

在设备状态监测与故障诊断领域，大数据分析发挥着重要作用。通过对新能源发电设备的实时运行数据、振动数据、温度数据等进行采集和分析，能够及时发现设备潜在故障，实现预防性维护，降低设备故障率和维修成本。另外，在电力市场交易中，大数据分析可以对市场供需数据、电价数据等进行分析预测，帮助发电企业制定合理的竞价策略，提高经济效益。

尽管大数据分析在新能源电力领域已取得一定进展，但在项目储备潜力评估方面的应用仍相对较少。现有评估方法大多依赖传统的经验判断和简单的指标分析，难以充分考虑众多复杂的影响因素，导致评估结果的准确性和可靠性不足^[2]。二、新能源电力项目储备潜力评估模型构建

（一）评估指标选取原则

1. 科学性原则

评估指标的选取必须基于新能源电力项目的客观发展规律与内在逻辑，确保指标能够真实、准确地反映项目储备潜力的本质特征。所采用的指标概念应清晰明确，计算方法需科学严谨，数据来源要真实可靠。

2. 系统性原则

新能源电力项目储备潜力受到多种因素的综合影响，涵盖资源条件、技术水平、经济成本、政策环境等多个维度。因此，指标体系应具有系统性，全面涵盖项目潜力评估的各个方面，避免出现重要因素的遗漏。各指标之间应相互关联、相互补充，形成一个有机的整体。

3. 可操作性原则

选取的评估指标应便于数据的收集、整理与分析。一方面，指标的数据来源要稳定、可获取，能够通过现有的统计渠道、监测设备或调研方式获得；另一方面，指标的计算方法不宜过于复杂，要在保证评估准确性的前提下，尽量简化计算过程，提高评估工作的效率^[3]。

4. 动态性原则

新能源电力行业处于快速发展之中，技术不断创新，市场环境、政策要求也在持续变化。因此，评估指标应具有动态性，能够及时反映行业发展的新趋势、新变化。

（二）评估模型选择与构建

在新能源电力项目储备潜力评估体系里，模型的挑选与搭建极为关键，必须紧密贴合大数据特性以及新能源电力项目的复杂本质^[4]。以往的评估模型多依赖有限样本，基于经验假设构建，在过去数据量少、类型单一的情况下尚可勉强应用。但步入大数据时代，新能源电力领域数据呈现海量、多源异构特征。据统计，仅一个中型风电场，每天产生的设备运行数据就可达数万条，还涵盖气象、地理、市场交易、政策法规等多元数据，不同来源数据在格式、结构和质量上差异巨大^[5]。传统模型难以高效处理和深度挖掘这些数据，严重影响评估结果的准确性与可靠性，因此，机器学习与深度学习模型凭借独特优势，在该领域备受关注。

新能源电力项目中各类数据存在复杂非线性关系，传统线性模型难以捕捉，而神经网络模型模拟人类大脑神经元结构和工作原理，由大量神经元和复杂连接权重组成。通过对海量数据的学习训练，它能挖掘出数据间隐藏的复杂潜在关系^[6]。比如预测分布式光伏发电项目发展趋势时，神经网络模型可同时分析光照强度动态变化、光伏发电设备技术更新、当地电力市场供需波动以及政策导向调整等多种因素，精准预测项目未来走向，为项目规划和决策提供可靠依据。

构建评估模型时，数据质量极为关键。新能源电力项目涉及多源数据，必须对其清洗、预处理，剔除噪声与异常值，统一格式和标准，保障数据准确一致^[7]。同时，要合理确定评估指标体系，除常见的技术可行性、经济收益等指标外，还应纳入环境影响、社会效益等因素。比如，项目对生态环境的潜在破坏程度，以及投产后对当地就业和经济发展的带动作用等，都应作为重要评估依据。

在评估模型选择与构建过程中，存在一些易被忽视的问题。其一，模型可解释性问题，复杂的机器学习和深度学习模型如同“黑箱”，难以直观阐释输出结果的内在逻辑，而在新能源电力项目评估中，决策者需清晰了解评估依据和过程，否则难以信任评估结果^[8]。其二，数据隐私与安全问题，大数据环境下，数据涉及多方利益与敏感信息，在采集、传输、存储和使用过程中，必须采取严格安全措施，防止数据泄露和非法利用。其三，模型适应性和动态更新问题，新能源电力行业发展迅速，政策、技术、市场环境不断变化，评估模型不能一成不变，需依据实际情况及时调整优化，确保评估结果的时效性与准确性。

二、新能源电力项目储备潜力预测模型构建

（一）预测模型选择

传统预测模型中，回归分析模型基于历史数据建立变量间的线性关系，常用于趋势相对稳定、影响因素较为明确的场景，但其对非线性关系的刻画能力较弱；时间序列模型，如 ARIMA，依赖数据的平稳性假设，在处理新能源电力数据的波动性和季节性时存在局限性^[9]。相比之下，机器学习模型展现出更强的适应性，随机森林算法通过构建多个决策树进行集成学习，能够有效处理高维数据和非线性关系，降低过拟合风险；支持向量机在小样本数据预测中表现优异，可通过核函数将数据映射到高维空间，实现复杂边界的划分。深度学习模型中的 LSTM，因其独特的门控机制，能够有效捕捉时间序列数据中的长期依赖关系，在新能源发电功率预测等领域应用广泛。但模型选择时，常因对数据特性把握不足而陷入误区^[10]。另外，过度追求模型复杂度，选择不适合数据规模和特征的深度学习模型，不仅会增加计算成本，还可能导致模型难以训练和解释。

（二）模型构建与训练

数据是模型构建的根基，在实际操作中，需要从多个维度采集和新能源电力项目储备潜力相关的数据，像新能源资源数据（例如太阳能辐射量、风速、水能流量等）、地理环境数据（包

括地形地貌、土地利用类型、生态保护红线等）、社会经济数据（涵盖区域人口数量、GDP、电力需求增长率等）、政策法规数据（包含新能源补贴政策、碳排放政策、电力市场规则等），还有技术发展数据（比如发电设备效率、储能技术成本等）。由于这些数据来源广泛，常常存在格式不统一、数据有缺失或者包含异常值等情况，所以必须进行预处理。具体来说，数据清洗环节会筛选重复数据、修补缺失数据、处理异常数据；通过数据集成技术，把不同渠道的数据整合成一个统一的数据集；再利用数据转换方法，比如归一化、标准化等，让原本格式不一的数据具有可比性。

在新能源电力项目储备潜力预测中，气象数据作为核心输入变量，其准确性直接关系到模型预测精度，然而实际应用中，风速、光照强度等关键气象参数的测量误差往往被低估^[10]。以风速数据为例，在风速测量中，仪器的校准偏差和传感器老化是导致数据失准的主要原因。假设真实风速为 v_t ，由于校准偏差和传感器老化等因素，实际测量风速 v_m 可表示为 $v_m = v_t + \delta_v + \epsilon_v$ ，其中 δ_v 为校准偏差， ϵ_v 为服从正态分布 $N(0, \sigma_v^2)$ 的随机噪声。这种误差会直接影响风力发电功率模型的准确性，风力发电功率通常表示为 $P_w = 0.5 \rho A v^3 C_p$ （其中 ρ 为空气密度， A 为扫风面积， C_p 为功率系数）。当风速存在测量误差时，发电功率的预测值与真实值之间会产生偏差，偏差的方差为 $\text{Var}(\Delta P_w) = (1.5 \rho A v^2)^2 \sigma_v^2$ ，这使得模型难以准确学习气象条件与新能源发电的关联，进而影响对发电功率的预测精度。

模型训练是实现预测模型从理论构建到实际应用的关键步骤，其核心在于通过对历史数据的学习，使模型能够准确捕捉新能源电力项目储备潜力的影响因素及内在规律。模型训练过程中，采用机器学习算法如支持向量机（SVM）、随机森林（RF）等。以支持向量机为例，其核心是寻找一个超平面来最大化样本间的间隔。对于线性可分数据，设训练数据集为 $\{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)\}$ ，其中 $x_i \in R^d$ ， $y_i \in \{-1, 1\}$ ，超平面方程为 $w^T x + b = 0$ ，通过求解优化问题 $\min_{w,b} \frac{1}{2} \|w\|^2$ ，约束条件为 $y_i(w^T x_i + b) \geq 1, i = 1, 2, \dots, n$ ，得到最优超平面参数 w 和 b 。对于非线性数据，则引入核函数 $k(x_i, x_j)$ ，将数据映射到高维空间进行处理。在训练过程中，利用交叉验证法对模型参数进行调优，以提高模

型的泛化能力，确保预测结果的准确性和可靠性。同时，训练数据的划分也需谨慎，若训练集与测试集存在数据泄露，即测试集数据在训练过程中被模型提前“学习”，会导致模型评估结果虚高，无法真实反映模型的泛化能力。

（三）模型评估与优化

模型评估指标的选择需综合考虑预测任务的特点和需求。对于新能源电力项目储备潜力预测，除了常用的MSE、MAE、 R^2 等指标，还应关注预测误差的分布情况，如均方根误差（RMSE）能反映预测值与真实值的平均偏离程度，而平均绝对百分比误差（MAPE）则更直观地展示预测误差的相对大小，适用于不同规模数据的比较。在评估过程中，模型的泛化能力是核心关注点，过拟合模型在训练集上表现良好，但在实际应用中预测精度大幅下降。为解决过拟合问题，可采用正则化技术，如L1和L2正则化通过对模型参数添加惩罚项，限制模型复杂度；Dropout方法在训练过程中随机丢弃部分神经元，增强模型的鲁棒性。此外，模型优化还可从数据增强、模型融合等方向着手。数据增强通过对原始数据进行变换，如旋转、缩放、平移等，扩充训练数据量；模型融合将多个不同模型的预测结果进行组合，充分发挥各模型的优势，提高预测准确性。但模型优化过程中，容易忽视优化方法对模型可解释性的影响，例如复杂的深度学习模型经过多重优化后，其决策过程更加难以理解，不利于向决策者解释预测结果。

三、结束语

大数据分析为新能源电力项目储备潜力评估与预测带来了新机遇与方法。通过构建科学合理的评估与预测模型，能够更精准地把握项目潜力，为新能源电力产业的资源配置、投资决策提供有力支持。然而，在模型构建与应用过程中，仍面临数据隐私安全、模型可解释性、动态更新等诸多挑战。未来，需要持续优化模型，加强数据管理与安全保障，深入研究如何提高模型的实用性和可靠性，以更好地适应新能源电力行业快速发展的需求，推动全球能源结构向清洁化、低碳化转型。

参考文献

- [1] 刘洋. 新能源发展背景下的电力营销市场开拓策略[J]. 销售与市场, 2024, (18): 40–42.
- [2] 伍璇. 大数据技术在新能源电站智能化运营监管中的应用[J]. 时代汽车, 2024, (12): 31–33.
- [3] 王民, 秦天勇. 基于改进因子分析法的新能源电力技术环境影响综合评价方法研究[J]. 环境科学与管理, 2024, 49(07): 184–188.
- [4] 陈鸿鑫, 惠恒宇, 包铭磊, 等. 考虑动态分区可靠性约束的新能源电力系统备用优化模型[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(23): 65–75.
- [5] 王策. 基于分布式模型预测控制的新能源电力系统调频策略研究[D]. 华北电力大学(北京), 2023. DOI: 10.27140/d.cnki.ghbbu.2023.000160.
- [6] 罗政杰, 任惠, 辛国雨, 等. 基于模型预测控制的高比例可再生能源电力系统多时间尺度动态可靠优化调度[J]. 太阳能学报, 2024, 45(06): 150–160. DOI: 10.19912/j.0254-0096.tynxb.2023-0177.
- [7] 陈道平, 廖海风, 谭洪. 考虑可再生能源配额的风水火多能源电力系统年度调度模型[J]. 运筹与管理, 2024, 33(02): 71–77.
- [8] 戴璐平, 沈嘉怡, 张飞飞. 基于时间序列算法的能源电力需求自动预测模型[J]. 自动化技术与应用, 2024, 43(01): 49–51+65. DOI: 10.20033/j.1003-7241.(2024)01-0049-04.
- [9] 占萌, 张亚耀, 马锐. 以新能源为主体的新型电力系统模型体系和同步稳定研究综述[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2023, 59(06): 878–886. DOI: 10.12202/j.0476-0301.2023146.
- [10] 孙杨. 面向新能源电力领域创新技术知识模型构建及系统开发[D]. 北京邮电大学, 2024. DOI: 10.26969/d.cnki.gbydu.2024.002760.

演艺灯光设备智能化安装调试关键技术与应用研究

张济邦¹, 雷喜文², 戎杰青³

1. 杭州亿达时科技发展有限公司, 浙江 杭州 310051

2. 美高电气科技有限公司, 浙江 湖州 313000

3. 杭州之江开关股份有限公司, 浙江 杭州 311234

DOI:10.61369/EPTSM.2025010023

摘要： 本文围绕演艺灯光设备智能化安装调试的关键技术与应用路径展开研究，重点分析了基于“感知 传输 控制 执行”架构的自动化调试原理，并结合某大型文化综合体项目的实际案例，探讨了灯具定位、功能测试、光束聚焦、参数优化及数据反馈等核心技术环节的具体实现方式。研究表明，智能化安装调试技术能够显著提升灯光系统的部署精度和运行效率，实现从灯具安装到参数调节全过程的自动化控制。通过引入激光扫描、图像识别、闭环反馈算法等手段，有效减少了人工干预，提升了调试质量。

关键词： 演艺灯光；智能安装；自动调试；精准定位

Research on Key Technologies and Applications of Intelligent Installation and Debugging of Performing Arts Lighting Equipment

Zhang Jibang¹, Lei Xiwen², Rong Jieqing³

1. Hangzhou Yidashi Technology Development Co., Ltd. Hangzhou, Zhejiang 310051

2. Meigao Electric Technology Co., Ltd. Huzhou, Zhejiang 313000

3. Hangzhou Zhijiang Electric Switch Co., Ltd. Hangzhou, Zhejiang 311234

Abstract： This paper studies the key technologies and application paths of intelligent installation and debugging of performing arts lighting equipment, focusing on the analysis of the principle of automated debugging based on the perception – transmission – control – execution architecture, and combining the actual case of a large-scale cultural complex project, discusses the specific implementation methods of core technical links such as lamp positioning, functional testing, beam focusing, parameter optimization and data feedback. The study shows that intelligent installation and debugging technology can significantly improve the deployment accuracy and operation efficiency of the lighting system, and realize automated control of the entire process from lamp installation to parameter adjustment. By introducing laser scanning, image recognition, closed-loop feedback algorithm and other means, manual intervention is effectively reduced and the debugging quality is improved.

Keywords： performing arts lighting; intelligent installation; automatic debugging; precise positioning

引言

随着舞台演艺产业的持续发展和表演需求的日益多元化，表演灯光系统在视觉效果和舞台气氛营造方面所扮演的角色越来越重要。传统的照明设备配置和调试方法已经很难满足现代演出的精确性、时效性和智能化的需求，特别是对于大型表演、文旅项目和多功能剧院，灯光系统的自动化和智能化是提高演出质量和工程效率的重要环节。同时，5 G通信、物联网、人工智能等技术的飞速发展，为演艺灯光设备智能化安装调试提供了新的技术途径与实现途径，促进舞台技术向集成化、高效率 and 数字化方向发展。本文探讨演艺灯光设备智能化安装调试的关键技术与实际应用路径。

作者简介：

张济邦，男，汉族，本科，中级工程师，杭州亿达时科技发展有限公司，研究方向：演艺专业安装工程；

雷喜文，男，汉族，本科，中级工程师，美高电气科技有限公司，研究方向：机电制造集成服务；

戎杰青，男，汉族，本科，杭州之江开关股份有限公司，研究方向：电气成套设备制造。

一、演艺灯光智能安装调试的基础原理

现代演艺灯光智能安装调试依托于“感知 - 传输 - 控制 - 执行”四层架构。利用视觉定位传感器、红外线测距仪和激光扫描仪等设备,实时获取灯具的三维位置和方位信息;同时,通过分布式传感节点采集环境光照强度、色温以及舞台边缘等数据^[1]。在此基础上,将采集到的感知数据通过有线或无线网络汇聚到中央控制单元,利用 TCP/IP 协议或低时延协议实现高频数据的高速传输,以保证数据的时效性和完整性。在控制和执行层次上,该系统内建有标准化的接口和模块化的驱动程序,可以按照预先设定的照明布局模型,自动寻址和参数分配。在智能化调试中,中心控制器根据预先标定的舞台坐标,利用闭环反馈算法,对灯具的俯仰角、水平角和焦距进行自动修正,以确保照明位置符合设计要求。该算法的核心是最小二乘拟合,卡尔曼滤波和深度学习优化,前者用于初始定位,后者用于动态补偿和提高精度,整个过程不需要人工干预^[2]。

二、项目概况

项目位于国内一座新建的文化综合体内,建筑面积达到5万平方米,包含多个功能性演出厅、音乐厅和多用途展演空间。剧院采用国际先进的舞台技术和智能设备,力求为观众提供高品质的视听体验和创新的舞台演出环境。该工程的核心部分是剧院的灯光系统,它包括舞台灯光、环境灯光、背景灯光等,并且与音响、视频、舞蹈表演等设备有很好地整合和协调。由于场地复杂,演出需求多样,对灯光设备的安装调试提出了高精度、高时效性的要求。

目前,剧院的照明设备以多种品牌的高端智能灯具为主,包括追光灯、射灯、投影灯、染色灯等,每一种都具有遥控和智能调整的功能。传统的人工调试方式已不能满足照明精度、调节速度以及控制灵活性等方面的需求。为此,本项目拟引入智能化安装调试系统,将自动化设备集成于一体,优化调试算法,实现照明系统的高效部署与调试。该系统不仅可以大大提高安装调试的准确性和效率,而且可以为未来的演出提供更加有效和可控的照明管理。

三、智能化安装调试的关键技术要点

(一) 灯具定位与安装

智能灯具安装的第一步就是保证灯具的准确定位和安全安装。在传统的调试方法中,照明灯具的位置及角度一般采用人工测量的方式进行测量,过程繁琐且容易产生误差。在智能化安装中,采用激光扫描仪和三维定位传感器等高精度设备,实现了灯具空间坐标的实时采集,并将数据传送到中央控制系统。系统自动计算,保证每个灯具的安装位置都符合预先设定的参数,避免人为因素引起的误差。在安装灯具时,也要特别注意灯具支架的稳固和安全。智能装配系统可与建筑信息模型(BIM)对接,预先评估灯具安装位置对结构的影响,保证灯具在安装过程中不会对建筑结构造成不良影响。在此基础上,采用智能优化的方法,克服了人工检验可能遗漏的关键因素,从而提高了支护的可靠性。对于需要悬吊、旋转等复杂灯具,智能装配技术可以准确模拟其安装过程,利用传感器监测

安装进度,保证安装效率 and 安全性。

(二) 灯具调试与功能测试

灯具安装完毕后,进行调试是保证整个照明系统正常运转的重要环节。传统的照明调试方式常常要求调试人员对每一种灯的功能进行逐一检查,同时对灯的亮度、角度、色温等参数进行手动调节。这样做既浪费精力又浪费时间,而且很容易漏掉一些细节,造成最后的效果不理想。在智能调试过程中,通过自动控制系统,调试人员只需要对整个系统进行一次设置,系统就可以按照预先设定的参数,自动地对灯具的开关、亮度、色温、光束角度等功能进行测试。智能化系统能实时反馈调节,使每一盏灯都能精确调整,达到设计要求。

智能调试系统采用内置的自动识别技术,先确定灯具是否安装到位,能否正常启动。同时,该系统还可以根据现场的实际情况,自动调整亮度,光束范围,色温等参数。具体来说,智能系统将与传感器数据相结合,对照明参数进行实时监测与调整,以保证灯具在不同的使用环境下,能够实现理想的照明效果与照明光分布。比如,该系统可以根据剧院内不同的表演需要,自动调节灯光的亮度、色温等,甚至还可以根据观众席的分布,调节灯光的投射角度。该方法不需要人为干预,可以极大地提高调试效率,减少人工操作带来的误差与遗漏,从而达到准确高效地调试目的。

(三) 光束定位与聚焦

对于要求精确投影的舞台照明设备,如追灯、射灯等,需要精确调焦。传统调焦方式主要依靠人工,调焦员仅凭目测来调整灯具的角度和焦距。这种人工调整不仅效率低下,而且容易出现误差,不能保证每一盏灯射出的光束都能精确地聚焦在指定区域。人工调焦往往耗时较长,在剧院、演出等环境下,由于多次操作,灯光角度、焦距调节会出现偏差,从而影响最终的灯光效果。为了克服这些问题,智能化调试技术的引入为聚焦过程提供了自动化解决方案。

智能调试系统采用激光定位与自动调焦技术相结合的方式,实现了对光源光束方向及焦距的准确计算与自动调节。具体操作上,该系统内置影像辨识与雷射感测器,可即时追踪射束的位置,并精确定位。该系统可根据预先设定的舞台模型和不同演出场景的需要,自动计算出每一盏灯的最优光束聚焦点。系统采用电动调整装置,可精确控制光源角度、焦点,自动调节光束。相对于传统的人工调试方式,智能调试在提高效率、精度、降低人为误差方面具有重要意义。尤其是在动态的演出环境下,该系统可以实时调整灯光聚焦,保证每一种灯光都能准确地投射到舞台上。这不仅提高了舞台灯光的稳定性和灯光效果,而且使灯光系统可以更灵活地适应不同的演出需要,使调试人员的时间和精力得到极大地节约,确保演出前的准备工作能以最快的速度进行。

(四) 自动化参数调整与优化

在智能化调试过程中,为了保证照明系统的高效率运行,必须进行自动调试。每一盏灯的亮度,色温,光束的角度,都要根据剧院的环境以及演出的需要来调整。传统的人工调试多依靠人工经验,而智能系统可以根据环境信息,实现实时、自动地优化调试。该智能系统可以根据不同的环境条件,对不同环境下的灯光、温度、湿度等参数进行自动识别,从而实现对灯光参数的动态调整。比如白天表演时,系统能根据外界环境的变化,自动调节灯光的亮度、色温;晚上演出时,系统会自动加强灯光强度与

反差，使舞台效果更佳。同时，系统还可以根据不同的场景，自动调整灯光的色温、亮度等，使得每一场演出的灯光效果都更符合导演的创意要求。

（五）调试数据记录与反馈

智能调试系统在提高调试效率的同时，具有较强的数据采集与反馈功能。在传统的灯具调试过程中，调试人员主要依靠人工记录灯具的调试数据，这样很容易出现故障或丢失的情况。智能系统可以在调试时自动收集每一盏灯的各项参数，如亮度，角度，色温等，并实时上传到云数据库中。

利用这些数据，调试人员可随时了解每一种灯具的调试状态及参数变化情况，保证了每一次调试过程的正确性和可追溯性。并能对设备进行详细的调试报告，并对设备的运行状况、调试结果以及今后的维修提出建议。另外，在调试过程中所获得的全部数据均可与设备厂商的技术支持系统进行对接，进行远程诊断和优化，进一步提高了调试的准确性和效率。这种智能化的数据记录和反馈方式，不但提高了调试质量，而且为以后的维护和管理打下了良好的基础。

四、智能化安装调试技术的推广与标准化建议

（一）建立行业统一标准与规范

由国家或行业主管部门牵头，联合标准化机构和龙头企业，共同制定技术规范和实施标准，以促进演艺灯光智能化安装调试技术在业界的推广应用。本标准应从设备选择、安装工艺、数据接口、通讯协议和安全保障几个方面对不同类剧场（多功能厅、音乐厅、露天表演场所）的技术参数及验收标准进行界定^[1]。同时，应充分借鉴国际成熟标准（如 ANSI E1.20、DMX512-A 等），结合国内工程实践进行本土化修订，以保证规范既具前瞻性，又切合实际需求。

在具体内容上，行业标准要求对智能安装调试过程中的各个环节进行细化，包括 BIM 预安装数据格式，激光定位精度，自动调焦误差范围，网络通讯延时上界，系统容错能力等。在此基础上，对数据存储和接口的格式进行明确（如 JSON、XML 等），提出统一的设备寻址和参数下发规范，保证不同品牌、不同厂家的设备之间的无缝集成和互联。建立健全的标准体系，为项目的实施提供可复制和可量化的技术基础，促进产业整体水平的提高。

（二）组织培训与人才培养

智能化安装与调试技术的普及，除了要有技术规范外，还要有大批专业人才作为支持。鼓励产学研深度合作，鼓励高等院校、高职院校在舞台工艺、自动控制、通讯网络等专业课程中增加智能照明安装与调试模块；同时，企业与设备供应商可以合作建立培训基地或网上教学平台，对设备的使用、调试算法的应用以及数据分析等方面进行系统地培训。通过校企合作，不仅提高了学生的实践能力，同时也为企业培养了合格的技术人才。

在人才认证方面，可以建立分级考核和职业资格认证制度，为从事智能调试工程师、系统集成专家、维修维护人员设置不同

的技能等级标准和考试内容。定期组织行业研讨会，技术沙龙，案例比赛，评选“智能灯具安装调试示范工程师”等，以激励员工学习和创新的积极性。同时，鼓励相关专业人员考取中高级职称，把智能安装调试技能纳入职称评定体系，为人才的职业生涯发展提供动力。

（三）推广示范工程与案例分享

示范工程是技术推广的重要抓手。各地文化演艺场所、文旅综合体和重点影院要优先采用智能化安装调试技术，打造一批标杆示范工程。在示范工程中采用统一标准，收集调试数据，对运行效果进行评价，形成详细的项目报告，在专业刊物、行业会议和网络平台上广泛传播。该示范项目既能充分发挥智能技术的优势，又能为后继项目提供可复制的实施路径与经验模板^[4]。

同时，还需要搭建行业层面的案例共享和经验交流平台，对不同类型灯具的选择、安装、调试、性能优化等方面的成功经验进行汇总整理，定期发布相关白皮书或技术指南。该平台可以帮助项目负责人、设计方和安装方迅速掌握新技术的使用要点，并以视频直播、虚拟模拟演示等方式进行。通过示范与共享，促进智能安装与调试技术向更广阔的市场渗透。

（四）促进技术生态与供应链协同

构建开放共赢的技术生态，促进设备制造商、系统集成商、软件开发商和维护服务商的协同创新，才能实现智能化安装调试技术的可持续发展。为此，通过组建产业联盟、技术联盟等方式，共同制定模块化硬件接口规范及软件开放 API，以减少多品牌设备间的集成成本，提高系统的兼容性和可扩展性。同时，引入第三方检测认证机构，专门验证硬件兼容性及软件接口，以保证技术落地后的稳定性和可维护性。在供应链层次上，要加强上下游企业的合作，促进标准化模块化产品的研发和生产，提高部件互换性，提高生产效率^[5]。与云计算远程维护平台相结合，实现设备制造、安装调试和后期维护的闭环服务，能够在降低项目总体成本的同时，实现对系统运行状态的实时监控，为技术升级、标准优化提供数据支撑，构建健康可持续的产业生态体系。

五、结语

演艺灯光设备智能化安装调试技术能够显著提升舞台灯光系统的精度、效率与自动化水平，满足现代演出对高质量视觉呈现和高效工程实施的双重需求。通过激光定位、自动聚焦、闭环反馈控制及数据智能分析等关键技术的应用，灯光系统的部署方式正从传统人工操作向高集成化、数字化方向转型。随着 5 G、物联网、人工智能等技术的不断发展，智能化的安装调试系统必将在越来越多的文化演艺场所推广应用。随着行业标准体系的不断完善和人才培养机制的完善，该技术将进一步实现规模化应用，促进照明工程管理向精细化和可追溯的方向发展，将为照明系统的长周期运行提供可靠的支持，推动整个行业的技术水平与服务水平不断提高。

参考文献

- [1] 裴国梁, 陈灿, 蒋琪. 舞台灯光与电力设备的融合与创新研究 [J]. 光源与照明, 2023, (09): 156-158.
- [2] 朱建书. 基于 PLC 的舞台灯光设备智能控制系统 [J]. 自动化与仪器仪表, 2022, (09): 97-101.
- [3] 赵永建, 田文, 郭建功. 剧场舞台灯光工程设备监理质量控制要点 [J]. 演艺科技, 2021, (03): 52-56.
- [4] 陈美燕. 演播厅灯光设备技术的现状与应用 [J]. 中国传媒科技, 2021, (02): 120-122.
- [5] 李嘉. 现代舞台灯光设备在戏剧表演中的运用与融合 [J]. 戏剧之家, 2021, (02): 30-31.

基于 Co_9S_8 纳米片层自组装高倍率放电性能的钠离子 电池负极材料结构调控研究

郭德才¹, 孙蕾^{2*}

1. 中石化(大连)石油化工研究院有限公司, 辽宁 大连 116045

2. 东北大学, 辽宁 沈阳 110819

DOI:10.61369/EPTSM.2025010024

摘 要 : Co_9S_8 因其出色的导电性、极性和低成本而被认为是一种有前景的钠离子电池负极材料。本研究通过低温溶液硫化工艺合成了由纳米片构建的 Co_9S_8 微球。当用作钠离子电池的电极材料时, 所获得的 Co_9S_8 纳米片组装微球表现出优异的电化学性能和明显的高电流密度下的循环性能, 在 20 A g^{-1} 的电流密度下, 600 次循环后, 放电容量为 435 mAh g^{-1} 。

关 键 词 : 钠离子电池; Co_9S_8 ; 纳米片; 微球

The Structure Design of High-Rate Discharge Performance Sodium-Ion Batteries Anode Based on The Self-Assembly of Co_9S_8 Nanosheets

Guo Decai¹, Sun Qiang^{2*}

1. SINOPEC Dalian Research Institute of Petroleum and Petrochemicals Co., Ltd. Liaoning, Dalian 116045

2. Northeastern University, Shenyang, Liaoning 110819

Abstract : Co_9S_8 is regarded as a promising electrode material for advanced sodium storage because of its remarkable electrical conductivity, polar property and low cost. In this study, Co_9S_8 microsphere constructed by nanosheet was synthesized via a low-temperature solution-based sulfidation process. When using as electrode materials for sodium ion battery (SIB), the obtained Co_9S_8 nanosheets assembled microsphere exhibits excellent electro-properties and distinct high-rate cycling performance, giving a discharge capacity of 435 mA h g^{-1} at a current density of 20 A g^{-1} after 600 cycles.

Keywords : sodium-ion battery; Co_9S_8 ; nanosheet; microsphere

近年来,随着便携式电子产品、电动汽车和电动工具的快速发展,对具有快速充放电能力、低成本的储能电池系统的需求变得更加迫切^[1,2]。然而,当前已经规模化应用的锂离子电池存在锂资源大量消耗和资源分布不均的问题,锂资源的枯竭,将会导致动力电池价格的增加,亟需开发新一代低成本的可替代电源技术体系^[3,4]。众所周知,在元素周期表中,钠属于锂的同一主族元素,这两种金属元素具有相似的物理和化学性质,而且钠具有许多独特的优势,例如丰富的自然储量(钠的元素含量约为23000ppm,而地壳中锂的丰度仅为17ppm)、低廉的成本,以及世界各地资源的均匀分布^[5]。因此,钠离子电池被认为是最有希望取代锂离子电池的新型电池系统^[6]。然而,钠的分子量比锂重,这使得钠离子电池的重量和体积能量密度与锂离子电池相比,还需要进一步提升^[7]。此外,钠离子半径大与锂离子半径,其在电极中的导致扩散动力学缓慢、理论容量低,远不能满足当前动力电池市场需求高比能电池的需求^[8,9]。所以,如何提高钠离子电池的电化学性能,特别是离子扩散动力学,已成为其发展的一个难题。

目前,钠离子电池正极材料的技术开发方面,借鉴锂离子电池正极材料的技术方案,已经形成了较为完善的科学技术体系并形成产业化技术。但是,在钠离子电池的负极材料技术开发方面,研究者进行了大量研究并取得了系列进展,如何进一步提高负极材料的比容量,从而提高钠离子电池的比能量是当前钠离子电池的重要研究领域之一^[10,11]。目前,用于锂离子电池的石墨负极材料,由于石墨层间距与钠离子半径不匹配,半径较大的钠离子难以嵌入到石墨层间,导致钠-石墨系统的热力学性能稳定性较差^[12,13]。因此,迫切需要探索具有高比容量和快速离子传输动力学的新型钠离子电池负极材料。其中,过渡金属硫化物,例如: Co_3S_4 ^[14]、 ZnS ^[15]、 ReS_2 ^[16]和 Co_9S_8 ^[17,18],其作为钠离子电池负极材料,其对钠离子的存储机制是转换反应机制。这种基于转换反应机制的电极材料,因过渡金属硫化物固有的开放框架结构、较大的层间距和较弱的范德华相互作用,可以实现对钠离子的快速传输。因此,过渡金属硫化物电极材料,本质上具有快的钠离子传输动力学特征。在所有的过渡金属硫化物材料中, Co_9S_8 因其高的电化学活性、储量丰富和低成本而被视为钠离子电池的理想转换机制负极材料^[17,18]。但是, Co_9S_8 负极材料在钠离子电池中的实际应用,受制于 Co_9S_8 材料较低的电子导电率和严重的

粉化问题的制约, 这些问题是因为过渡金属硫化物与钠离子化合过程中 Co_9S_8 晶胞结构的巨大体积膨胀 / 收缩引起的。

通过对 Co_9S_8 进行结构调控和组分优化, 以解决上述问题, 从而实现 Co_9S_8 在钠离子电池负极中优异的循环稳定性和倍率性能。 Co_9S_8 结构优化的常用方法是设计具有各种形态的新型纳米结构 (如球形、中空结构、纳米纤维 / 纳米管和纳米片 / 纳米板), 以缩短钠离子扩散距离, 提高钠储存性能^[19,20]。本文中, 我们报道了一种通过低温溶液法硫化合成片状 Co_9S_8 自组装微球的技术研究。定制化设计及制备三维 Co_9S_8 微球, 微球结构中结合了三维网络、纳米片和微米级结构的几种策略。因此, 微球作为钠离子电池负极材料显示出高的倍率性能和长循环寿命。

一、实验部分

(一) 钴前驱体的制

首先, 将 0.015 摩尔的 $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 和 0.15 摩尔的 $\text{CH}_3\text{COO}-\text{Na}$ 溶解在 120 毫升乙二醇中。为确保所有完全溶解, 将混合物置于磁力混合器上并搅拌 30 分钟。将最终完全溶解的溶液转移并密封到容量为 150 ml 的聚四氟乙烯内衬不锈钢高压反应釜中。将高压反应釜置于鼓风干燥炉中加热至 200°C 并恒温保持 8 小时。收集高压釜底部的固体, 用乙醇和水洗涤四次。最后, 通过 80°C 真空干燥, 得到钴前驱体。

(二) Co_9S_8 纳米片组装微球的合成

将 200mg 上述合成的钴前驱体和 1.7mol 硫化试剂 (硫脲 ($\text{CS}(\text{NH}_2)_2$)、硫化钠 (Na_2S) 或硫代乙酰胺 (CH_3CSNH_2)) 溶解在 80ml 水中。然后将溶解的溶液转移并密封到容量为 100ml 的聚四氟乙烯内衬不锈钢高压反应釜中。将高压反应釜加热至 160°C 并保持 4 小时。通过离心获得最终产物, 用水洗涤, 最后 80°C 真空干燥, 制备得到 Co_9S_8 微球产物。

(三) 电化学表征

使用 CR2032 纽扣电池对制备的产品进行电化学测量, 在充有高纯氩气的手套箱中组装纽扣电池组装。将质量百分含量为 70wt% 的活性材料、20wt% 的 Super-P 导电碳和 10wt% 的聚偏二氟乙烯 (PVDF) 的混合物分散到 N-甲基-2-吡咯烷酮 (NMP) 中。然后将浆料刮涂在厚度为 $200\mu\text{m}$ 的铜箔上, 在真空中干燥至少 12 小时以去除多余的溶剂, 并在 10 MPa 的压力下压制。电极中活性材料的质量负载约为 $1 \sim 2\text{mg cm}^{-2}$ 。电解质为 1.0 M 的 NaCF_3SO_3 (溶剂为二甘醇二甲醚), 隔膜为玻璃纤维 (GF/F)。使用 Land CT2001A 电池测试系统在 $0.01\text{V} \sim 3.0\text{V}$ 的电压范围内对组装的纽扣电池进行充放电循环测试。

二、结果和讨论

本研究工作中, 我们通过两步溶剂热合成获得了 Co_9S_8 纳米片自组装微球。第一步溶剂热反应合成了钴前驱体。在合成过程中, 使用 $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 作为钴源, 使用沸点相对较高的乙二醇 (EG) 作为溶剂和还原剂, 使用 CH_3COONa 作为助剂。第二步通过对钴前驱体的溶剂热硫化反应获得 Co_9S_8 材料。我们分别考查了 $\text{CS}(\text{NH}_2)_2$ 、 Na_2S 或 CH_3CSNH_2 三种材料为硫源, 采用低温溶液硫化工艺合成 Co_9S_8 纳米片自组装微球, 分别命名为 $\text{Co}_9\text{S}_8-\text{CS}(\text{NH}_2)_2$ 、 $\text{Co}_9\text{S}_8-\text{Na}_2\text{S}$ 和 $\text{Co}_9\text{S}_8-\text{CH}_3\text{CSNH}_2$ 。

我们利用场发射扫描电子显微镜 (FE-SEM) 观察了所制备的三个样品的结构和形态。如图 1 所示, 在低放大倍率的 SEM 图像中 (图 1a、c 和 e), 三个样品都呈现微米尺寸的球状结构, 粒径约为 $2 \sim 3\mu\text{m}$, 微球由纳米片组装而成。在高放大倍数的 SEM

图像中 (图 1b、d 和 f), 可以清楚地看到厚度约为 $20 \sim 30\text{nm}$ 的纳米片结构。研究发现, 使用 CH_3CSNH_2 作为硫源所制备的 Co_9S_8 样品显示出比样品 $\text{Co}_9\text{S}_8-\text{CS}(\text{NH}_2)_2$ 和 $\text{Co}_9\text{S}_8-\text{Na}_2\text{S}$ 更厚的片层结构特征, 这是因为 $\text{CS}(\text{NH}_2)_2$ 溶液和 Na_2S 溶液都是碱性的, 在溶液硫化过程中会蚀刻钴前体。我们认为片层结构将为钠离子的转换反应提供稳定的骨架以及快速的钠离子传输过程, 以保持 Co_9S_8 材料电化学性能。

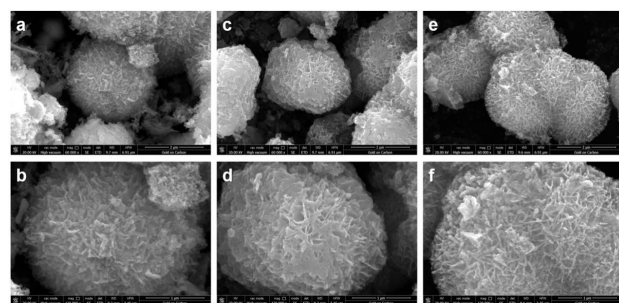


Figure 1. SEM images of the three Co_9S_8 nanosheets assembled microsphere samples: (a, b) $\text{Co}_9\text{S}_8-\text{CS}(\text{NH}_2)_2$, (c, d) $\text{Co}_9\text{S}_8-\text{Na}_2\text{S}$ and (e, f) $\text{Co}_9\text{S}_8-\text{CH}_3\text{CSNH}_2$.

图 1. (a, b) $\text{Co}_9\text{S}_8-\text{CS}(\text{NH}_2)_2$, (c, d) $\text{Co}_9\text{S}_8-\text{Na}_2\text{S}$ 和 (e, f) $\text{Co}_9\text{S}_8-\text{CH}_3\text{CSNH}_2$ 的 SEM 形貌图

我们进一步采用 XRD 解析了三个 Co_9S_8 样品的晶体结构。 $\text{Co}_9\text{S}_8-\text{CS}(\text{NH}_2)_2$ 、 $\text{Co}_9\text{S}_8-\text{Na}_2\text{S}$ 这两个样品的所有衍射峰都可以归属为立方相 Co_9S_8 。而样品 $\text{Co}_9\text{S}_8-\text{CH}_3\text{CSNH}_2$ 显示出比其他两个样品更强的峰强度, 表明 Co_9S_8 的晶体结构更完整, 结晶度更高, 这可能是因为样品纳米片结构较厚。

在 $0.01\text{V} \sim 3.0\text{V}$ (vs. Na^+/Na) 的电压窗口内研究了三种 Co_9S_8 微球样品的电化学性能。恒电流放电-充电电压曲线可以有效地表征钠储存过程的氧化 / 还原过程。如图 2a、b 和 c 所示, 三个样品的初始放电曲线在 0.75V 左右出现较大的放电平台, 这可能是由于 Co_9S_8 ($\text{Co}_9\text{S}_8 + 16\text{Na}^+ + 16\text{e}^- \rightarrow 9\text{Co} + 8\text{Na}_2\text{S}$) 和部分电解液溶剂在 Co_9S_8 表面形成的固体电解质界面 (SEI) 层。在初始循环后, 放电平台增加到约 1.0V , 这可能是由于电极极化减少造成的。约 1.75V 的充电平台可能是由于 Co 的氧化。在三个样品中, $\text{Co}_9\text{S}_8-\text{CH}_3\text{CSNH}_2$ 材料具有最高的首次放电 / 充电容量, 为 $725/614\text{mAh g}^{-1}$, 初始库仑效率为 85%, 这表明其具有优异的电化学性能。经过计算, 第二次和第三次循环的库伦效率分别为 99% 和 100%。 $\text{Co}_9\text{S}_8-\text{CS}(\text{NH}_2)_2$ 和 $\text{Co}_9\text{S}_8-\text{Na}_2\text{S}$ 的初始放电 / 充电容量分别为 $586/506\text{mAh g}^{-1}$ 和 $606/496\text{mAh g}^{-1}$, 对应的库伦效率分别为 86% 和 82% (图 2b 和 c)。

如图 2d 所示, $\text{Co}_9\text{S}_8-\text{CH}_3\text{CSNH}_2$ 在 100 、 200 、 500 、 1000 、 2000 和 5000mA g^{-1} 的电流密度下分别获得 540 、 370 、 226 、 140 、 83 和 46mAh g^{-1} 的比容量。此外, 当电流密度重置为 100mA g^{-1} 时, 材料的放电比容量恢复到 280mAh g^{-1} 。然而, 在相同的电流密度下, $\text{Co}_9\text{S}_8-\text{CS}(\text{NH}_2)_2$ 和 $\text{Co}_9\text{S}_8-\text{Na}_2\text{S}$ 电极仅分

别提供 432、304、182、115、76 和 50 mAh g⁻¹ 以及 435、374、263、166、98 和 54 mAh g⁻¹ 的可逆比容量。样品较厚的片层结构具有更好的稳定性,在钠离子与 Co₉S₈ 进展转换反应过程中,有利于材料结构完整性的保持,从而获得了优异的倍率性能。

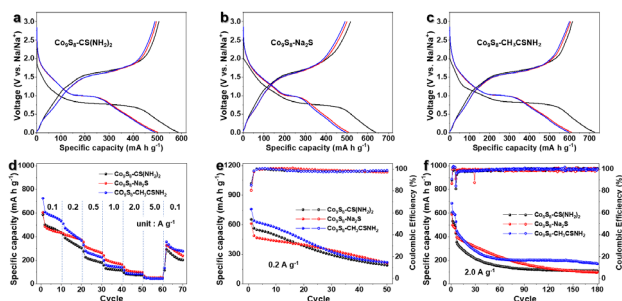


Figure 2. Galvanostatic discharge-charge voltage profiles in the first three cycles at a current density of 100 mA g⁻¹ of sample (a) Co₉S₈-CS(NH₂)₂, (b) Co₉S₈-Na₂S and (c) Co₉S₈-CH₃CSNH₂; (d) Rate performance and cyclic performance at (e) 0.2 A g⁻¹ and (f) 2.0 A g⁻¹.

图2. 样品 (a) Co₉S₈-CS (NH₂)₂、(b) Co₉S₈-Na₂S 和 (c) Co₉S₈-CH₃CSNH₂ 在 100 mA g⁻¹ 电流密度下的前三个循环中的恒流放电-充电电压曲线; (d)、(e) 0.2 A g⁻¹ 和 (f) 2.0 A g⁻¹ 时的倍率性能和循环性能。

进一步我们研究了材料的循环稳定性与材料结构的关系。图2e比较了在电流密度为 0.2 A g⁻¹ 时的循环性能和库伦效率。Co₉S₈-CS (NH₂)₂、Co₉S₈-Na₂S 和 Co₉S₈-CH₃CSNH₂ 的初始库伦效率分别为 87%、81% 和 85%。经过几个周期后,库伦效率均稳定在 100% 左右。值得注意的是,Co₉S₈-CH₃CSNH₂ 在 50 次循环后的比容量为 220 mAh g⁻¹, 高于 Co₉S₈-CS (NH₂)₂ (190 mAh g⁻¹) 和 Co₉S₈-Na₂S (212 mAh g⁻¹)。在五次恒流充放电循环后,在从 0.1 到 2.0 A g⁻¹ 的电流密度下对样品进行了进一步研究 (图2f)。Co₉S₈-CS (NH₂)₂、Co₉S₈-Na₂S 和 Co₉S₈-CH₃CSNH₂ 的初始放电比容量分别为 602、589 和 683 mAh g⁻¹。在接下来的几个循环中,Co₉S₈-CH₃CSNH₂ 的放电比容量逐渐衰减,然后在 170 mAh g⁻¹ 左右保持稳定,直到 180 次循环。然而,Co₉S₈-CS (NH₂)₂ 在 180 次循环后的容量仅为 110 mAh g⁻¹, Co₉S₈-Na₂S 的容量损失严重,在 180 次周期后只能保持 100 mAh g⁻¹。因此,与 Co₉S₈-CS (NH₂)₂ 和 Co₉S₈-Na₂S 相比,Co₉S₈-CH₃CSNH₂ 表现出更高和稳定循环性能。我们认为材料由较厚的片层结构组装成的纳米球,其在充放电循环过程中具有更高的结构稳定性,因此表现出材料较高的电化学循环稳定性。

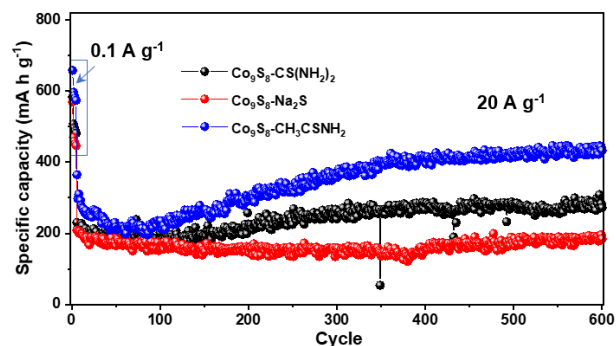


Figure 3. Cyclic performance at 20 A g⁻¹ of the three Co₉S₈ nanosheets assembled microsphere samples vulcanized by using CH₃CSNH₂, Na₂S and CS(NH₂)₂, respectively.

图3. 分别使用 CH₃CSNH₂、Na₂S 和 CS (NH₂)₂ 硫化的三个 Co₉S₈ 纳米片组装的微球样品在 20 A g⁻¹ 下的循环性能。

此外,我们在更高电流密度下比较了材料的长循环稳定性,以进一步阐明厚片层结构与长循环稳定性的优势。如图3所示,

在 0.1 A g⁻¹ 的电流密度下对电极材料进行小电流密度下激活 5 个循环后,在 20 A g⁻¹ 高电流密度下,三个样品中 Co₉S₈-CH₃CSNH₂ 在 600 个循环后仍能保持 435 mAh g⁻¹ 的高可逆比容量。在循环过程中,放电和充电容量逐渐增加,这可归因于 Co₉S₈ 的激活和金属硫化物材料中通常观察到的伪电容行为的贡献。另外两个样品,Co₉S₈ CS (NH₂)₂ 和 Co₉S₈-Na₂S, 分别只能获得 272 和 185 mAh g⁻¹ 的比容量。这可能是由于较薄的片层骨架无法抑制高速循环过程中的体积变化,导致容量低。

三、结论

我们通过简单的两步水热法成功合成了 Co₉S₈ 纳米片自组装微球。通过调整硫化剂的种类,获得了不同片层厚度的 Co₉S₈ 纳米片自组装微球。较厚纳米片层有利于自组装微球整体结构在电化循环过程中稳定性的保持,使用 CH₃CSNH₂ 硫化的样品表现出优异的循环稳定性和突出的倍率性能,在 20 A g⁻¹ 的电流密度下,600 次循环后,放电比容量约为 435 mAh g⁻¹。本研究对转换反应机制钠离子电池负极结构设计给出了一定的指导性规律,即通过对材料一级结构的片层厚度调控,可以有效提高由一级结构自组装形成的二级球状结构的电化学稳定性,通过对电极材料微纳结构的设计和调控,可以显著提高电极材料循环稳定性和贝利性能,从而为高性能钠离子电池的开发提供电极材料技术支撑。

参考文献

- [1] J. Chen, D. H. C. Chua, P. S. Lee, *Small Methods* 2020, 4, 1900648.
- [2] C. Chen, M. Wu, J. Liu, Z. Xu, K. Zaghib, Y. Wang, *J. Power Sources* 2020, 471, 228455.
- [3] H. Yang, R. Xu, Y. Yao, S. Ye, X. Zhou, Y. Yu, *Adv. Funct. Mater.* 2019, 29, 1809195.
- [4] L. Zhang, W. Wang, S. Lu, Y. Xiang, *Adv. Energy Mater.* 2021, 2003640.
- [5] X. Zhao, F. Gong, Y. Zhao, B. Huang, D. Qian, H.-E. Wang, W. Zhang, Z. Yang, *Chem. Eng. J* 2020, 392, 123675.
- [6] X. Liu, L. Tang, Z. Li, J. Zhang, Q. Xu, H. Liu, Y. Wang, Y. Xia, Y. Cao, X. Ai, *J. Mater. Chem. A* 2019, 7, 18940.
- [7] Y. Liu, Y. Fang, Z. Zhao, C. Yuan, X. W. Lou, *Adv. Energy Mater.* 2019, 9, 1803052.
- [8] H. Han, X. Chen, J. Qian, F. Zhong, X. Feng, W. Chen, X. Ai, H. Yang, Y. Cao, *Nanoscale* 2019, 11, 21999.
- [9] H. Huang, R. Xu, Y. Feng, S. Zeng, Y. Jiang, H. Wang, W. Luo, Y. Yu, *Adv. Mater.* 2020, 32, 1904320.
- [10] L. Shen, Y. Wang, F. Wu, I. Moudrakovski, P. A. Aken, J. Maier, Y. Yu, *Angew. Chem. Int. Ed.* 2019, 58, 7238-7243.
- [11] P. Barpanda, G. Oyama, S. Nishimura, S. C. Chung, A. Yamada, *Nat. Commun.* 2014, 5, 4385.
- [12] Z. Chen, R. Wu, M. Liu, H. Wang, H. Xu, Y. Guo, Y. Song, F. Fang, X. Yu, D. Sun, *Adv. Funct. Mater.* 2017, 27, 1702046.
- [13] W. Liu, X. Yuan, X. Yu, *Nanoscale* 2018, 10, 16675.
- [14] H. Li, H. Yang, Z. Sun, Y. Shi, H.-M. Cheng, F. Li, *Nano Energy* 2019, 56, 100-108.
- [15] Y. Zhang, P. Wang, Y. Yin, X. Zhang, L. Fan, N. Zhang, K. Sun, *Chem. Eng. J* 2019, 356, 1042-1051.
- [16] M. Mao, C. Cui, M. Wu, M. Zhang, T. Gao, X. Fan, J. Chen, T. Wang, J. Ma, C. Wang, *Nano Energy* 2018, 45, 346-352.
- [17] Y. Zhang, N. Wang, P. Xue, Y. Liu, B. Tang, Z. Bai, S. Dou, *Chem. Eng. J.* 2018, 343, 512-519.
- [18] M. Yin, X. Feng, D. Zhao, Y. Zhao, H. Li, W. Zhou, H. Liu, X. Bai, H. Wang, C. Feng, Q. Jiao, *ACS Sustainable Chem. Eng.* 2019, 7, 6122-6130.
- [19] H. Zhou, J. Hua, *Mater. Lett.* 2017, 195, 26-30.
- [20] J. Huang, X. Tang, Z. Li, K. Liu, *J. Colloid Interface Sci.* 2018, 532, 407-415.

永磁同步电机矢量控制中转速辨识方法优化

张镜照

武汉船用电力推进装置研究所, 湖北 武汉 430064

DOI:10.61369/EPTSM.2025010027

摘要： 在永磁同步电机矢量控制系统中，转速辨识的精准度对系统性能起着决定性作用。传统转速辨识方法在面对复杂工况时，暴露出诸多缺陷。本文聚焦于永磁同步电机矢量控制，深入剖析现有转速辨识方法的不足，创新性地提出一系列优化策略，为提升永磁同步电机在各类应用场景中的性能提供了有力支撑。

关键词： 永磁同步电机；矢量控制；转速辨识；优化策略

Optimization of Speed Identification Method in Vector Control of Permanent Magnet Synchronous Motor

Zhang Jingzhao

Wuhan Institute of Marine Electric Propulsion Equipment, Wuhan, Hubei 430064

Abstract： In the vector control system of permanent magnet synchronous motors, the accuracy of rotational speed identification plays a decisive role in the system performance. The traditional speed identification methods expose many flaws when facing complex working conditions. This paper focuses on the vector control of permanent magnet synchronous motors, deeply analyzes the deficiencies of the existing speed identification methods, and innovatively proposes a series of optimization strategies, providing strong support for improving the performance of permanent magnet synchronous motors in various application scenarios.

Keywords： permanent magnet synchronous motor; vector control; speed identification; optimization strategy

引言

永磁同步电机（Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM）凭借其在高功率密度、高效率、良好调速性能等方面的诸多优势，在工业生产、轨道交通、电动汽车、船舶、航空航天等领域得到了极为广泛的应用。矢量控制技术作为 PMSM 的核心控制策略，通过巧妙地定子电流解耦为励磁电流和转矩电流，实现了对电机转矩和转速的精准控制^[1]。在这一过程中，转速作为关键反馈量，其辨识的准确性直接关乎矢量控制系统性能的优劣。在实际运行过程中，PMSM 往往面临着负载突变、参数波动、外部干扰等复杂且恶劣的工况。在电动汽车行驶过程中，频繁的加减速、不同路况带来的负载变化，都会对电机转速产生显著影响。

传统的转速辨识方法，如基于传感器的测速方式，虽然精度高，但存在安装复杂，成本高，可靠性有限等弊端，难以满足实际应用的需求。而无传感器转速辨识方法，虽然避免了传感器带来的问题，但是在面对复杂工况时，容易造成转速辨识不准确，鲁棒性差等问题，导致电机运行不稳定，甚至影响整个系统的正常工作。因此，深入研究和优化永磁同步电机矢量控制中的转速辨识方法，具有重要的理论意义和工程实用价值。

一、永磁同步电机矢量控制原理

（一）永磁同步电机数学模型

永磁同步电机的数学模型是了解其运行特性和对其进行有效控制的依据。在建立模型时，通常采用一些合理的假设，以简化分析过程，而且大多数实际应用场景中这些假设是成立的^[2]。这里假设电机的三相绕组完全对称，也就是三相绕组的电阻，电感

等参数是完全相同的，在空间位置上彼此相差 120° 度角度，使得电机运行平稳；忽略磁路饱和的影响，即认为磁导率是常数，这样可以使磁链与电流之间呈线性关系，易于进行数学推导；同时不考虑电机中的涡流和磁滞损耗，因为在有些情况下，它们相对较小。

（二）矢量控制基本原理

矢量控制技术诞生，使交流电机的控制出现了革命性的突

破,其核心思想是借鉴直流电机的控制思想,将交流电机的定子电流进行解耦。具体而言,对电机进行高效控制通过两次关键的坐标变换,即 Clark 变换和 Park 变换实现。Clark 变换将三相静止坐标系下的电流、电压等物理量,准确地转换到两相静止坐标系下,即 $\alpha\beta$ 坐标系下。在这个过程中,电机的物理本质没有发生改变,但通过变换使得后续分析和处理更加简单明了。随后,通过 Park 变换将两相静止坐标系下的物理量进一步转换到两相旋转坐标系(dq 坐标系)下。在 dq 坐标系中定子电流被解耦成相互独立的励磁电流、转矩电流。把复杂的交流电机控制问题,转化为类似于直流电机的控制问题,减少了控制的难度^[3]。

(三) 矢量控制中的转速

在永磁同步电机矢量控制系统中,转速是整个系统稳定运行与性能表现的核心,是矢量控制系统的重要反馈量,它的重要性体现在各个关键环节。在速度环控制中,转速反馈信息是系统的“眼睛”,实时监测电机的实际运行速度。速度环控制器通过对设定转速与反馈实际转速的细致对比,敏感地感知到两者的偏差^[4]。然后根据这个偏差快速而准确地调整输出,从而对给定电流环进行合理的修正。这个过程就相当于一名熟练的驾驶员,他按照车速表的显示,不断地对油门或者刹车进行调整,使得车辆保持稳定行驶。如果对转速的识别不准确,这样势必会使速度环控制出现偏差,使电机的转速无法稳定在设定值附近,出现转速波动过大的情况,严重影响系统的稳定性^[5]。

二、现有转速辨识方法分析

(一) 基于传感器的转速辨识方法

1. 光电编码器测速原理与特点

光电编码器是一种常用于测量转速的基于传感器的装置,主要由码盘、发光元件、光敏元件、信号处理电路等组成。码盘一般是一个圆盘,其上散布着均匀的透光和不透光条纹,并且与电机同步旋转。光电编码器工作原理是采用光学与电子技术紧密结合的方式,当电机转动时,带动码盘也随着转动,从发光元件发出的光线通过码盘纹路照射到光敏元件上^[6],让光敏元件根据接收到的光线强弱变化产生相应的电信号,并经过信号处理电路放大、计数等处理后,精确地计算出电机的转速。光电编码器具有诸多显著的优点。另外,光电编码器输出的数字信号便于与数字控制系统接口,便于数据处理和数据传输。但光电编码器也具有局限性,一是安装过程较复杂,应准确地对准电机的转轴,码盘与电机轴要同心,否则影响测速精度;二是结构比较复杂,包含光学和精密机械部件,成本较高;三是恶劣环境下工作精度受限,在一些工作环境极差的场所,如高温、高湿度、强电磁干扰等,光电编码器的可靠性也会受到严重影响,光学元件会受到灰尘、水汽的污染,引起测量误差增大甚至无法正常工作^[7]。

2. 旋转变压器测速原理与特点

另一类常用的转速测量传感器为旋转变压器,它是基于电磁感应现象的。它主要由定子和转子两部分组成,定子和转子上分别绕有不同绕组。定子绕组通入交流励磁信号时,气隙中产生交

变磁场,由于转子与电机转轴相连并同步转动,转子绕组在交变磁场中感应电动势。旋转变压器的精度较光电编码器略低,通常应用于对转速精度要求不特别苛刻,但对可靠性和抗干扰能力要求较高的应用场合不适合,如船舶推进电机的转速测量,矿山机械设备的电机控制等^[8]。

(二) 无传感器转速辨识法

1. 参考自适应方法的模型

模型参考自适应方法是经典的无传感器转速辨识方法,其基本原理借鉴了自适应控制的思想。在 MRAS 系统中,精心建立了两个重要模型:参考模型和可调模型。参考模型是根据电机的数学模型和已知的控制输入精确建立,它代表了电机在理想状态下的运行特性,犹如一个精准的“标准模板”。参考模型和可调模型相对应,可调模型的参数由自适应机制不断对系统运行情况进行修正。自适应律就相当于智能的“调节器”,它依据这个误差信号,按照一定的算法对可调模型的参数进行实时调整,使可调模型的输出能逐步逼近参考模型的输出。在此过程中,转速作为可调模型的一个重要参数,也随着参数的调整而不断更新,从而实现对电机转速的精确定位^[9]。

2. 滑模观测器方法

另一个比较常用的无传感器转速辨识技术是滑模观测器(Sliding Mode Observer, SMO)方法,它独特的控制策略使得它在电机转速辨识中占据重要的地位。滑模观测器方法是采用一个观测器以一定的滑模面为观察物体的状态,来对电机的状态进行估计。在滑模观测器中,根据电机的数学模型和控制目标,精心设计滑模面。滑模面就像预先设定好的一个“轨道”,观测器的状态会在这个“轨道”上滑动。合理选择滑模控制律,使观测器对电机的电流、电压等可测量信号进行实时监测和处理。当观测器的状态在滑模面上滑动时,观测器的输出可以准确地反映电机的实际状态,包括转速^[10]。

在实际系统中,不连续切换项由于惯性、采样延迟等非理想因素的存在,会使观测器的输出在滑模面附近产生高频振荡,这就是抖振。抖振不仅影响转速辨识的精度,导致转速估计值出现波动,还可能引起电机的转矩脉动,降低电机的运行效率和稳定性,甚至对电机和相关设备造成机械损伤,限制了滑模观测器方法在一些对稳定性和精度要求极高的应用场景中的应用。

3. 卡尔曼滤波方法

卡尔曼滤波 Kalman Filter, KF 方法是一种强大的状态估计技术,在永磁同步电机无传感器转速辨识中也有着广泛的应用。它基于系统的状态空间模型,通过对系统输入和输出数据的最优估计,可以有效地过滤噪声的干扰,从而准确估计电机转速等状态变量。卡尔曼滤波方法的基本原理是把电机系统视为一个动态的线性系统,用状态空间方程描述其运行状态。在该框架下,卡尔曼滤波通过不断地预测和更新两个步骤来达到对系统状态的最优估计。在预测阶段,根据上一时刻的状态估计值以及系统的动态模型对当前时刻的状态进行预测。在更新阶段利用当前时刻的测量值与预测值之间的差异,修正预测值,从而获得当前时刻最优状态估计值。卡尔曼滤波在转速辨识过程中,电机的转速被作

为系统的一个状态变量，通过对电机的电流，电压等测量信号进行处理，不断地更新转速的估计值。

卡尔曼滤波方法具有优良的滤波性能，能够很好地防止噪声对转速识别的影响，在噪声环境较复杂的情况下依然能够给出较为精确的转速估计值。它对系统的动态变化有着较好的跟踪能力，能迅速适应电机转速的突变。但卡尔曼滤波方法对电机模型的精度要求较高，需要准确地知道电机的参数和噪声特性。实际应用中，电机参数往往会随着运行条件的变化而发生改变，噪声特性也很难精确获得，这可能使得卡尔曼滤波的性能下降，转速辨识误差增大。而且卡尔曼滤波的计算过程较为复杂，需要进行大量矩阵运算，对控制器的计算能力提出了较高的要求，增加了系统的硬件成本和计算负担。

三、转速辨识方法优化策略

（一）基于智能算法的优化

神经网络作为一种强大的智能算法，在永磁同步电机转速辨识中具有很大的潜力。神经网络具有很高的非线性映射能力，可以在大量数据学习的基础上建立复杂的输入输出关系模型。

在转速辨识中，其工作原理是用电机的电流，电压，温度等多种可测量信号作为输入，通过神经网络内部复杂的神经元连接和权重调整，对这些输入信号进行深层次的特征提取和模式识别，输出准确的转速估计值。网络结构要精心设计，构建快速识别的神经网络模型。常见的结构有多层感知器 (Multi-layer Perceptron, MLP) 和径向基函数网络 (RBF) 等。多层感知器 (MLP) 作为深度学习领域的基础架构，在电机控制系统中展现出卓越的非线性映射能力。其拓扑结构由输入层、多个隐藏层和输出层构成：输入层作为系统的数据接口，负责接收电机运行过程中的多维度测量信号，包括但不限于电流、电压、温度、转速反馈等物理量，这些原始数据构成了输入向量 $x=[x_1,x_2,\cdots,x_n]^T$ ；隐藏层作为核心计算单元，通过激活函数（如 ReLU、Sigmoid）构建复杂的非线性变换，每一层神经元通过权重矩阵 W 和偏置向

量 b 实现对输入的加权求和与非线性激活，即 $h=f(Wx+b)$ ，这种层级叠加机制使模型能够自动提取信号中的高阶特征，动态适应电机负载变化、电磁干扰等复杂工况；输出层则将处理后的特征映射为控制指令，例如通过全连接层输出目标转速、转向控制量等控制参数，经数模转换后驱动功率器件，实现对电机转矩、转速等运行状态的精确调控。

（二）多方法融合优化

模型参考自适应方法和滑模观测器方法在永磁同步电机转速辨识中各有优缺点，二者融合可以取长补短，提高转速辨识性能。在融合方案中，利用模型参考自适应方法对电机参数变化的适应性，构建参考模型和可调模型，实时跟踪电机参数的变化；利用滑模观测器对系统不确定性和干扰的强鲁棒性，设计滑模面和控制律，对电机转速进行快速准确的估计。具体实现时，以模型参考自适应方法得到的参数估计值作为滑模观测器的部分参数输入，从而使滑模观测器能够更好地适应电机参数变化。滑模观测器产生的转速估计值又反馈给模型参考自适应系统，帮助其进行参数的调整。这样相互协作，有效抑制了模型参考自适应方法在低速时的识别误差和滑模观测器的抖振现象，在不同工况下都能达到较为精确的转速识别。

四、结论

本文对永磁同步电机矢量控制中的转速辨识方法进行了深入的研究，分析了现有的基于传感器和无传感器转速辨识方法的原理，特点和存在的问题。针对这些问题，提出了基于智能算法，多方法融合的优化策略。在复杂工况下，如负载突变，参数波动，外部干扰等情况下，仍然能实现高精度的转速辨识，大大提高了永磁同步电机矢量控制系统的稳定性、鲁棒性以及动态性能。这些优化策略，为永磁同步电机在工业生产、轨道交通、电动汽车、船舶、航空航天等领域的广泛应用提供了更可靠的技术支持，具有重要的理论意义和工程实用价值。

参考文献

- [1] 张楠. 驱动用永磁同步电机参数辨识与优化控制研究 [D]. 江苏：南京理工大学，2020.
- [2] 谭会生，申彦奎. 永磁同步电机矢量控制的 FPGA 设计与实现 [J]. 科技视界，2017，(10):57+44.
- [3] 蒋家强，曹建福. 永磁同步电机矢量控制及其仿真研究 [J]. 电气开关，2011，49(04):51-53.
- [4] 张旭忠. 电动汽车轮毂电机驱动制动系统模糊控制优化 [J]. 工程机械文摘，2024，(04):12-14.
- [5] 王朝庆，李鸿高. 基于参数自适应永磁同步电机电流控制 [J]. 微电机，2023，56(10):55-58+82.
- [6] 吴金岑. 基于矢量控制方法的永磁同步交流伺服电机控制系统研究 [J]. 电子元器件与信息技术，2024，8(04):12-14+17.
- [7] 王莉娜，朱鸿悦，杨宗军. 永磁同步电动机调速系统 PI 控制器参数整定方法 [J]. 电工技术学报，2014，(5).
- [8] 李伟. 永磁同步电机参数辨识及其控制系统研究 [D]. 江苏：江苏科技大学，2020.
- [9] 王成豪. 永磁同步电机控制方法研究 [D]. 四川：西南科技大学，2023.
- [10] 张翀. 基于参数辨识的永磁同步电机矢量控制研究 [D]. 内蒙古：内蒙古科技大学，2021.

