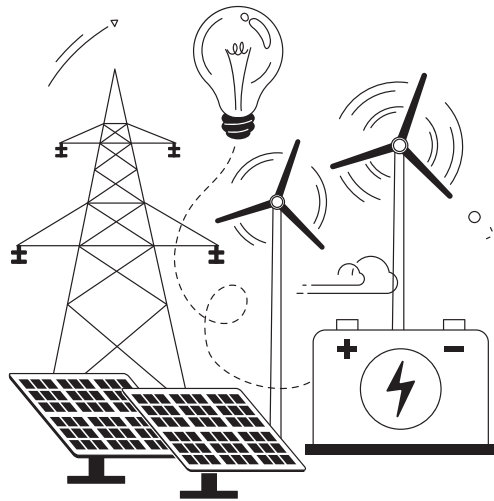


电力技术 与安全管理

Electric Power Technology and Safety Management



ART AND DESIGN PRESS INC.

(626 810 4480)

119 S Atlantic Blvd, Suite 300D

Monterey Park, CA 91754

Copyright © 2025 by ART AND DESIGN PRESS INC.

Complimentary Copy



Editorial Board Member

Bateer Hexi

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

Gaowa Morigeng

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

Juan Wang

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

Chaoshan Xie

Beijing BKC Technology Co., Ltd.

电力技术与安全管理

Electric Power Technology and Safety Management

第2卷 第9期 2025年9月刊

主管 ART AND DESIGN PRESS INC.

主办 ART AND DESIGN PRESS INC.

编辑 《电力技术与安全管理》编辑部

ISSN(O): 2997-3503

ISSN(P): 2997-3473

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

网址: <https://www.artdesignp.com>

本刊说明:

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

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



电力系统 | POWER SYSTEM

- 001 基于电子围栏与定位数据的电厂两票安措风险预警方法 黄永波
Risk Warning Method for Power Plant Two-Ticket Safety Using
Electronic Fencing and Positioning Huang Yongbo
- 004 电力系统漏电保护分级配置模型 王健梅, 周渊, 朱茂荣, 杨婷婷, 雷济坤
Research on The Application of Hierarchical Configuration Model for Power Leakage
Protection in Power Systems Wang Jianmei, Zhou Yuan, Zhu Maorong,
Yang Tingting, Lei Jikun
- 008 高压开关柜联锁与报警防护方案 杨婷婷, 周渊, 朱茂荣, 刘强博, 王健梅
Interlocking and Alarm Protection Scheme for High-Voltage
Switchgear Yang Tingting, Zhou Yuan, Zhu Maorong, Liu Qiangbo, Wang Jianmei
- 012 基于电气工程自动化技术在电力系统运行中的运用 苏东杨
The Application of Electrical Engineering Automation Technology
in The Operation of Power Systems Su Dongyang
- 015 解析建筑电气智能化系统联动控制技术 郑振洞
Analysis of Linked Control Technology in Intelligent
Building Electrical Systems Zheng Zhendong
- 018 分析输变电工程造价的控制策略 郑萍
Analyze The Cost Control Strategies for Power Transmission
and Transformation Projects Zheng Ping

技术研究 | TECHNICAL RESEARCH

- 021 新能源光伏发电技术发展挑战与趋势研究 刘杰
Research on Development Trends and Challenges of New Energy Photovoltaic Power
Generation Technology Liu Jie
- 024 输电线路防雷仿真技术在电力设计中的应用研究 张威威
Research on the Application of Lightning Protection Simulation Technology for
Transmission Lines in Electric Power Design Zhang Weiwei
- 027 电力安全监管: 提升电力管理水平的关键要素分析 何达昂
Electric Power Safety Supervision: Analysis of Key Elements for Enhancing Electric
Power Management Level He Da 'ang
- 030 冬季冰冻天气对电力线路安全的影响及应对措施 王晶, 王迪
Influence of Winter Freezing Weather on Power Line Safety
and Countermeasures Wang Jing, Wang Di
- 033 风电场集电线路损耗分析与降损措施研究 孙忠江
Study on Loss Analysis and Reduction Measures of Wind
Farm Collector Line Sun Zhongjiang
- 036 基于实时 IV 测试的光伏电站发电量预测方法 郭杰
A Method for Predicting The Power Generation of Photovoltaic Power
Stations based on Real-Time IV Testing Guo Jie
- 039 火电厂智能监盘场景下基于深度迁移学习的设备故障
诊断与运行风险评估方法 高晓东, 刘彦飞, 赵路, 董栋
Equipment Fault Diagnosis and Operation Risk Assessment Method based on
Deep Transfer Learning in Intelligent Monitoring Scenario of Thermal
Power Plant Gao Xiaodong, Liu Yanfei, Zhao Lu, Dong Dong

042	百万发电机组锅炉电除尘电场输灰管堵灰问题分析 Analysis of Ash Conveying Pipe Blockage in Boiler Electrostatic Precipitator of Million-Kilowatt Units	王小龙 Wang Xiaolong
045	人工智能在电气设备故障诊断中的应用 The Application of Artificial Intelligence in Fault Diagnosis of Electrical Equipment	侯雪 Hou Xue
048	基于高分辨率卫星遥感与三维设计模型的电网工程建设质量管控技术研究 Research on Quality Control Technology for Power Grid Engineering Construction based on High-Resolution Satellite Remote Sensing and 3d Design Model	张卓群, 苑博, 李沛洁, 张苏 Zhang Zhuoqun, Yuan Bo, Li Peijie, Zhang Su
051	漏电保护器全生命周期运维管理研究与应用 Research and Application of Full-Lifecycle Operation and Maintenance Management for Residual Current Devices	朱茂荣, 周渊, 雷济坤, 刘强博, 王健梅 Zhu Maorong, Zhou Yuan, Lei Jikun, Liu Qiangbo, Wang Jianmei
054	可转动连接器配合结构的核心设计与应用性能研究 Research on The Core Design and Application Performance of Rotatable Connector Mating Structures	谢森荣 Xie Senrong
057	电力工程电气专业与土建施工配合的建议措施分析 Analysis of Suggested Measures for Coordination Between Electrical Engineering and Civil Construction in Power Projects	闵松鸣 Min Songming

基于电子围栏与定位数据的电厂两票安措风险预警方法

黄永波

东莞深能源樟洋电力有限公司, 广东 东莞 523637

DOI:10.61369/EPTSM.2025090011

摘 要：“两票三制”中的“两票”安全，即两票工作（工作票、操作票），是抓好电力行业安全生产的最基本依据。传统“两票三制”以人为管控、纸质记录为主，存在“两票”安措布置执行不充分、人员进“危”区域、监看时效性差等问题，本文创新性地提出了基于 UWB 高准精度定位技术、电子围栏、BIM 可视化的动态风险管控及违章提醒技术机制，通过为作业人员和设备固定绑定定位标签，虚拟场景建立对应工作票安措的动态电子围栏，人员位置、人员身份、作业许可状态动态关联，系统自动识别无票进人、超区、与作业区安全距离太近等违章情况，现场声光告警、远程告警。本文设计了总体技术方案、工作流程和关键技术方法，模拟场景应用验证了机制对于提高电厂“两票”执行、事前预知、事中预警、降低安全事故发生概率的“前瞻性”。

关 键 词： 两票安措；电子围栏；风险管控；违章提醒；智慧电厂

Risk Warning Method for Power Plant Two-Ticket Safety Using Electronic Fencing and Positioning

Huang Yongbo

Dongguan Shenzhen Energy Zhangyang Electric Power Co., Ltd. Dongguan, Guangdong 523637

Abstract： The "two tickets" in the "two tickets and three systems" refer to the safety measures of the two tickets (work permits and operation permits), which serve as the fundamental basis for ensuring safety in the power industry. Traditional "two tickets and three systems" rely primarily on human control and paper records, leading to issues such as insufficient implementation of safety measures in the two tickets, unauthorized entry into hazardous areas, and poor real-time monitoring. This paper innovatively proposes a dynamic risk management and violation alert mechanism based on UWB high-precision positioning technology, electronic fences, and BIM visualization. By permanently binding positioning tags to personnel and equipment, virtual scenarios establish dynamic electronic fences corresponding to work permit safety measures. Personnel location, identity, and work permit status are dynamically linked, enabling the system to automatically detect violations such as unauthorized entry, exceeding designated zones, and being too close to work areas. On-site audiovisual alerts and remote notifications are triggered accordingly. The paper outlines the overall technical framework, workflow, and key methodologies, with simulated scenarios demonstrating the mechanism's "proactive" effectiveness in improving the execution of "two tickets," preemptive awareness, real-time alerts, and reducing the probability of safety incidents in power plants.

Keywords： two-ticket safety measures; electronic fence; risk control; violation alerts; smart power plant

引言

电力生产过程具有参数高、能量大、复杂性强的特点，火力发电、核电等企业内部有高温、高压、带电设备、旋转机械、有毒有害气体等固有危险因素。为规范行为、防止误操作，我国电力行业强制落实“两票三制”^[1]，“两票”（工作票、操作票）是现场安全生产管理的总开关。工作票“安全措施”栏所列隔离的能源、悬挂的标牌、设置的遮栏等是作业人员生命屏障。

但是，由于传统“两票”管理过多依靠人的责任心和经验，存在布置安措靠人、易错失、区段监管盲区与滞后、过程监管及追溯难、难以主动预警等困难。

随着物联网技术、高精度定位技术、数字孪生技术的出现，上述问题解决思路得到了新方向^[1]，文章尝试着将电子围栏与人员定位数据技术、电厂“两票”管理业务深度融合，构建智能化、动态化、可视化的区域危险预知与违章警示系统，使安全管理数字化，从深层次上提升电厂安全生产质量，保障电厂安全生产水平。

作者简介：黄永波（1976.10-），男，汉族，湖北黄冈人，本科，工程师，从事热能动力研究。

一、技术基础

（一）UWB 高精度定位技术

超宽带指的是单位时间极短的非正弦窄脉冲的信号传输，其信号传输速率很快。与其他无线通信技术（Wi-Fi、蓝牙等）相比，UWB具有穿透距离大、不易产生多径信号、发射功率小、定位精度高、尤其静态定位精度高达10–30cm，且适用于室内外复杂电厂环境的优势^[2]。通过将UWB基站部署于厂区内，为作业人员、巡检工、设备等贴上UWB标签，就能准确定位人员和资产等的厘米级位置。

（二）电子围栏技术

电子围栏是一种基于位置服务的虚拟地理边界。在数字地图或BIM模型上创建一个或多个封闭的多边形区域，并与特定的规则，如准入、滞留期限等关联^[4]。具有定位标签的实体进入、退出或停留在围栏内，可以自动触发事件。在本应用中，电子围栏根据每张工作票的入站要求实时准确地创建并激活。

（三）BIM与数字孪生技术

建筑信息模型不仅仅包括电厂物理实体的三维几何模型，而且还包含大量的属性信息，通过BIM构建电厂孪生体，将人员实时地理位置、设备状态、电子围栏等实时动态信息与电厂静态的工厂模型结合起来，构建出直观的、统一的可视监控平台，极大地提升了管理人员态势感知能力^[3]。

二、系统总体架构设计

本系统设计遵循分层设计的理念，即感知全面感知、传输稳健传输、决策智能决策、应用高效应用。系统主要是将系统的前端物理世界的数据与后台的业务逻辑紧密地结合起来，分成了4层，分别是：

感知层是系统“末梢神经”，承担系统内所有信息采集的工作，主要包含部署于厂区内外的UWB定位基站设备，部署于现场作业人员、安全帽的UWB人员标签、部署于关键移动装备的UWB设备标签、部署于危险场所周边的声光报警器及其他环境探测器。感知层是精准管控的物理层，是信息来源和质量的源头。

网络层是“神经网络”，承担着无缝隙传输数据覆盖全厂，以工业以太网、5G / IP等通信技术为基础的通信，将感知层感知的海量原始数据（尤其是位置数据）以恒定、低延时、高可靠方式传输给后端的平台层进行处理，保障实时性。

平台层是系统的脑部，负责算数据、跑逻辑，主要有几个引擎：位置解算引擎是将UWB原始信号变成厘米级的三维坐标位置；电子围栏管控模块实时管理着“两票”安措所绑画的虚拟地理范围；而规则引擎是智能大脑，实时匹配实时位置、人、电子围栏和已配置安全规则，自动甄别违章违纪行为；数据中台则汇聚全局历史、实时数据，支持分析、决策。

应用层是系统实现“五官和触手”，是面向不同用户（安全员、工作负责人等）的可视化大屏，集成BIM+风险可视化监测、实时违章告警推送、两票管理流程联动、多维度统计分析报表

等，将后台的智能研判进行可视化呈现，实现数到点决策闭环。

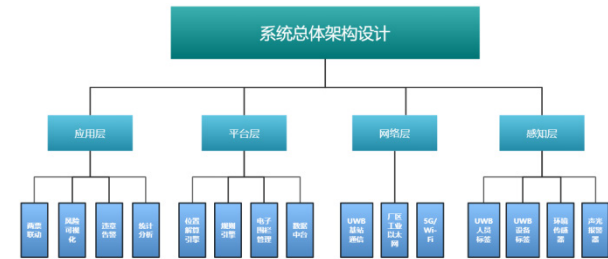


图1 系统总体架构图

三、“两票安措”区域风险管控与违章警示机制

（一）动态电子围栏的生成与管理

动态电子围栏机制实现安全空间生命周期自动。主要思路是把安措电子围栏的生成、投用、取消与工作票业务过程紧密结合，将安全工作许可期间运行人员在BIM数字孪生模型上，通过安措需求，勾画“安措电子围栏”，实现物理隔离区域的虚拟、精细定义，系统默认预设的“预警电子围栏”是对应风险源高风险区域做缓冲。重点创新是状态耦合，电子围栏的生命周期状态（启/休）与对应的工作票许可、间断、终结保持一致，是一个具备“空、权、时”耦合关系，智能管控单元，实现了风险的区域动态定义、动态启用和待终结后其电子围栏取消释放系统，实现精准授权、及时回收，从根源上避免了安措的虚设与滞后。

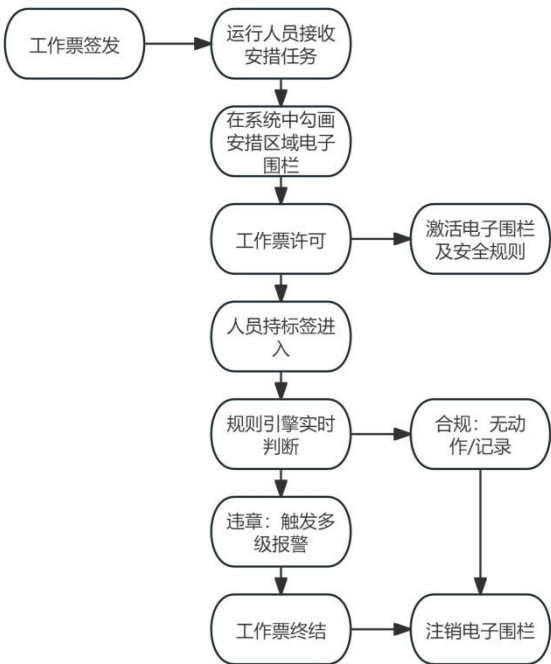


图2：动态电子围栏生成与工作票状态联动流程图

（二）违章行为识别与多级警示机制

本方法是以规则引擎为驱动，实时根据定位解算结果和电子围栏、人、设备等信息的规则关系判定常见型违章，规则预置“无票”“安全距离”“滞留”“超时”，规则触发后，现场即时预警，

通过人员标签触觉 / 声觉信息反馈、区域声光等发出报警信号，现场级、平台级、数据中心级联动，利用“端一边一云”预警体系让安全风险预警从事后追溯转化为事前预警、事中拦截，实现实时高效管控。

表 1：核心违章行为识别规则库

违章类型	规则描述	系统动作（警示机制）
无票进入	检测到人员标签已经进入激活的“安措电子围栏”之中，但并非属于本工作票的认证人员。	1.现场级：标签人员震动 / 蜂鸣；区域声光报警器：音闪“没权力，请快走！”
		2.平台级：监控中心告警弹窗，通知安全管理员和工作负责人。
超范围作业	许可人员进入工作票所对应的围栏内，但活动范围长时间 (>60 秒) 不在主要工作区域，出现在相邻的潜在危险区域。	1.现场级：人员标签震动提醒：“您已偏离作业区”。
		2.平台级：记录事件并提示工作负责人关注。
安全距离不足	移动起重机等大型施工机械的定位标签与带电设备(位置固定)之间的距离，小于《电业安全工作规程》规定的最近距离。	1.现场级：机械操作室声光报警；机械标签告警。
		2.平台级：紧急告警，建议远程锁定机械操作。
单人误入危险区域	对于至少需要两人同时进入区域才能工作的区域，系统识别出仅有一人进入区域保持时间超过阈值。	1.现场级：进入者标签告警。
		2.平台级：立即通知其同伴及负责人。
滞留超时	人员在高温、有限空间等高危环境内作业时间超过安全时限。	1.现场级：提前预警（如剩余 5 分钟时标签震动）。
		2.平台级：超时后强制告警，提醒轮换或撤离。

（三）与“两票”管理流程的深度融合

系统使用同一 API 接口与现行工作票管理系统进行数据交互，打通“两票”流程全链条自动化 [1]。许可环节，以电子围栏勾画，赋予安措布置数字“身份证”。作业环节，使用位置信息、票面信息，对工作负责人、安管人员、工作成员进行实时位置可视化、状态异常化，实现穿透式、高效化远程监管。终结环节，系统自动归置带时空信息轨迹、违章事件的安全电子档案，实现数据全链条、事故反演、溯源分析、考核管理，为安全管理提供客观、可靠的数据支撑，实现安全管理持续改进提升。

四、应用场景模拟与效益分析

（一）场景模拟：汽轮机本体检修

背景：汽机高压缸检修，四周装设遮栏上挂“止步，危险！”标牌。

传统模式：由运行人员用物理围栏将一块区域围住。或是因为围圈太大了走不过去，或是因为围圈太小没有隔开的必要性。安全员频繁在场。

智能模式：

运行人员使用 BIM 紧贴汽轮机检修处画一个定位精确的“检修隔离区”电子围栏，工作票上张三、李四两位检修人员的定位标签授权检修隔离区。

模拟场景 1：一个非本工作组王五误入。当进入电子围栏边缘，他身上佩带的标签就会立刻震动、发声，现场报警灯亮起，并监控中心报警。王五随即离开，报警解除。

模拟场景 2：检修人员张三在作业过程中因其取工具过于靠近运行中的汽轮机系统，发现其标签进入汽轮机区域的预警围栏时，在其标签弹出“注意安全距离”的温馨提示时，及时撤回回到自己的安全区域。

（二）效益分析

本系统的使用，达到了良好效益，表现在两个方面：一方面，本系统的安全价值，最重要的价值体现在风险管理从事后处理，向事前控制和事前预防的转变。基于 UWB 的厘米级定位和电子围栏，对风险点进行准确定位，将粗放的物理隔离转化为精确的数字空间管理，实时干预通过规则引擎实现对不安全行为的有效控制，减少人为失误，真正从根本上保障安全。

在管理端，构建全域感知、远程可视的监管体系，拓展了安全监督的范围和质量，节约了人力。推动了“两票”管理由纸质化、片段化过程向全过程数字化可视、闭环管理跨越，做到从设置到收回的全过程无缝隙、可溯源。最后，系统运行产生的时空轨迹和违章事件数据积淀成为安全的数据资产，通过大数据为安全风险规律揭示、安全改进、精准培训提供了客观的量化指标，驱动着安全治理体系不断迭代升级 [1]。

五、结论

本文进而研究和设计了基于电子围栏和 UWB 定位数据信息融合的电厂“两票安措”区域风险管控及违章警示系统，通过物理世界数字化、空间化，安措数字化、空间化、与人员身份、作业许可状态等实时关联，实现对“无票进入”“超范围作业”等典型违章自动识别、自动干预，对“两票”管理空间化、实时性、主动性不足进行有效补充，将“人防”转化为“技防”，其实践落地将为电厂“数字安全”，保障人身和设备安全运行提供有力支撑和参考。

参考文献

[1] 国家能源局. 电力安全工作规程 (发电厂和变电站部分) [M]. 中国电力出版社, 2012.02
[2] 王磊, 李强. 基于 UWB 的电厂人员定位系统设计与实现 [J]. 自动化仪表, 2021, 42(5)(5): 78-82.
[3] 张伟, 刘洋. “两票”管理面向智慧电厂框架的研究与创新设计 [C]//2021 中国电力设备管理大会论文集, 2021: 12.
[4] 陈晓, 高飞. 电子围栏技术及其在工业生产中的应用 [J]. 工业安全与环保, 2020, 46(8): 1-5.

电力系统漏电保护分级配置模型应用研究

王健梅, 周渊, 朱茂荣, 杨婷婷, 雷济坤
华能甘肃能源开发有限公司, 甘肃 兰州 730070
DOI:10.61369/EPTSM.2025090012

摘 要 : 在电力行业安全生产体系中, 漏电保护装置 (RCD) 是保障人员安全、防范触电事故的关键装备。但传统 RCD 配置存在 “一刀切” 问题, 未考虑不同场景风险差异, 导致高风险场景防护不足、低风险场景资源浪费。为此, 本文提出基于多维风险评估的漏电保护分级配置模型。该模型构建风险因子体系, 通过量化方法与权重机制形成风险评估矩阵, 将作业场景划分为极高、高、中、低、可接受五个风险等级, 并制定差异化配置策略。经八〇三分公司实践验证, 模型实现了漏电保护精准配置, 提升了人身触电防护可靠性, 解决了越级跳闸问题, 为电力作业本质安全设计提供理论支撑与实践指南, 推动安全防护从 “经验驱动” 向 “数据驱动” 转型。

关 键 词 : 人身触电防护; 漏电保护器 (RCD); 风险评估; 分级配置; 风险矩阵

Research on The Application of Hierarchical Configuration Model for Power Leakage Protection in Power Systems

Wang Jianmei, Zhou Yuan, Zhu Maorong, Yang Tingting, Lei Jikun
Huaneng Gansu Energy Development Co., Ltd., Lanzhou, Gansu 730070

Abstract : In the safety production system of the power industry, Residual Current Devices (RCDs) are key equipment to ensure personnel safety and prevent electric shock accidents. However, the traditional RCD configuration has the problem of "one-size-fits-all", which fails to consider the risk differences in different scenarios. This leads to insufficient protection in high-risk scenarios and resource waste in low-risk scenarios. To address this issue, this paper proposes a leakage protection hierarchical configuration model based on multi-dimensional risk assessment. The model constructs a risk factor system, forms a risk assessment matrix through quantitative methods and weight mechanisms, divides operation scenarios into five risk levels (extremely high, high, medium, low, and acceptable), and formulates differentiated configuration strategies. Verified by the practice of the 803 Branch Company, the model realizes the precise configuration of leakage protection, improves the reliability of personal electric shock protection, and reduces the problem of over-level tripping. It provides theoretical support and practical guidance for the intrinsic safety design of power operations, and promotes the transformation of safety protection from "experience-driven" to "data-driven".

Keywords : personal electric shock protection; residual current device (RCD); risk assessment; hierarchical configuration; risk matrix

引言

(一) 研究背景与意义

电力行业是国民经济 “能源动脉”, 安全稳定运行关乎工业生产、民生保障与社会秩序。然而, 人身触电事故仍是电力作业重大隐患, 传统 RCD 配置 “一刀切”, 无论场景风险 (如干燥室内巡检与潮湿污水泵房维护), 均采用统一型号参数 RCD, 导致 “低风险过度防护、高风险防护不足”。

现有 RCD 配置标准多基于宏观行业规范 (如 GB 13955-2017), 未考虑场景复杂性与多样性, 且缺乏对 “人员能力、设备状态、环境因素” 等动态风险因子的考量, 如新手操作失误概率高, 但标准未调整防护等级, 放大安全风险。

在 “双碳” 目标与新型电力系统建设背景下, “精准防护” 与 “本质安全” 成电力安全发展必然要求。新能源电站、新型储能设施带来新风险, 传统防护难适配; 《“十四五” 国家安全生产规划》要求建立 “双重预防机制”。因此, 构建科学、量化、场景化的漏电保护分级配置模型, 可解决 “防护失衡”, 为本质安全设计提供支撑, 助力 “零触电事故” 目标, 具有现实意义与工程价值。

（二）国内外研究现状

国际上，英国 HSE 在《电气安全管理指南》提出“风险矩阵评估法”，将电气风险分为四级，结合环境湿度、电压等级制定防护策略，为量化研究提供框架。美国橡树岭国家实验室用物联网采集数据，建立机器学习风险预测模型，可提前 1-2 小时预警漏电隐患，但仅针对配电线路，未覆盖复杂作业环境。

国内研究以标准完善与工程应用为核心，清华大学电机系 2023 年提出“多维度漏电风险评估指标体系”，将风险因子分为四类 12 项指标，但无具体量化分级标准，未与 RCD 配置直接关联，落地性弱。

1. 现有研究的不足

（1）场景化覆盖不全面：现有标准与模型多聚焦低压、常规环境，对高压设备、新能源场景、特殊环境覆盖不足，如光伏电站直流漏电需 B 型 RCD，却无统一配置标准。

（2）量化程度不足：多数风险评估模型依赖定性描述，缺乏可量化分级指标，如“环境湿度”未明确对应风险等级，评估结果主观性强，同一场景判定差异达 30% ~ 50%，难标准化应用。

（3）动态响应能力缺失：现有模型基于作业前静态评估，未考虑作业中风险因子动态变化，无法实时调整防护措施。

（三）本文主要工作

1. 构建多维度风险矩阵模型

基于“事故可能性 - 后果严重性”双维度，建立含 10 项关键因子的风险评估体系：

（1）事故可能性（L）因子：含“发生危害事件频率（L₁）、安全检查（L₂）、操作规程（L₃）、人员胜任程度（L₄）、控制措施（L₅）”5 项指标，各指标分 5 级量化（如 L₁按“从未发生 - 每次作业发生”划 1-5 级），通过文献调研、事故数据分析验证指标合理性。

（2）事故后果严重性（S）因子：含“法律法规符合性（S₁）、人员伤亡情况（S₂）、财产损失（S₃）、停工影响（S₄）、企业形象影响（S₅）”5 项指标，参照相关法规明确量化分级（如 S₃按“无损失 - > 50 万元”划 1-5 级）。

（3）风险等级计算与验证：用统一权重法（各因子权重 0.2）计算 L、S 加权得分，将风险划“可接受、低、中、高、极高”5 级，形成风险矩阵表，实现“因子评分 - 风险等级 - 配置方案”直接映射。

2. 制定差异化分级配置策略

针对 5 级风险场景，明确 RCD 选型、配套措施与维护要求：

可接受风险（LS ≤ 5.0）用符合标准空气开关，每季度测跳闸；

低风险（6.0 ≤ LS ≤ 12.0）配 30mA 瞬时型 RCD（动作 ≤ 0.1 秒），每月检查；

中风险（13.0 ≤ LS ≤ 16.0）30mA RCD 需抗湿热，每日班前检查；

高风险（17.0 ≤ LS ≤ 20.0）配 15mA B 类 RCD（动作 ≤ 0.05 秒），每月防护测试；

极高风险（21.0 ≤ LS ≤ 25.0）用“15mA RCD + 隔离 / 监护”，保障现场安全。

一、漏电保护分级配置风险矩阵模型构建

（一）风险因子体系建立

风险因子体系是模型核心，从事故可能性（L）和后果严重性（S）维度，建含 10 项关键因子的评估体系，量化分级实现精准度量。

1. 事故可能性（L）因子体系

事故可能性指漏电事故发生概率，经文献调研与事故数据分析，筛选 5 项关键因子，分别为：发生危害事件频率、安全检查、操作规程、人员胜任程度、控制措施。根据 5 项关键因子产生的频率、检查频次、规程覆盖度、人员水平、措施完善程度分别细化为 5 级，其中 1 级为最安全状态，5 级为最高风险。

2. 事故后果严重性（S）因子体系

事故后果严重性指漏电事故对多方面的影响程度，结合相关法规与标准，建含 5 项关键因子的体系，分别为法律法规符合性、人员伤亡情况、财产损失、停工影响、企业形象影响，根据

合规、伤亡、财产损失、停工影响、企业形象受损程度等细化为 5 级，其中 1 级为事故后果最轻，5 级为事故后果最严重。

（二）风险矩阵模型设计

风险矩阵模型是连接风险量化与配置方案的桥梁，借鉴国际 LS 法，结合电力行业特性，经“因子权重校准 - 矩阵阈值验证 - 场景适配调整”，构建适配模型。

1. 模型设计依据与核心原理

LS 法核心逻辑为“风险 = 可能性 × 后果”，针对电力漏电事故特点，优化 L 和 S 计算：

（1）事故可能性（L）加权计算：L 含 5 项因子（L₁-L₅），权重均 0.2，避免单一因子主导。公式： $L=0.2 \times L_1+0.2 \times L_2+0.2 \times L_3+0.2 \times L_4+0.2 \times L_5$ ，结果保留 1 位小数，等级划分：1 级（1.0-1.8）、2 级（1.9-2.7）、3 级（2.8-3.6）、4 级（3.7-4.4）、5 级（4.5-5.0）。

（2）事故后果严重性（S）加权计算：S 含 5 项因子（S₁-S₅），权重均 0.2，均衡多维度后果。公式： $S=0.2 \times S_1+0.2 \times S_2+$

$0.2 \times S_3 + 0.2 \times S_4 + 0.2 \times S_5$ ，结果保留 1 位小数，等级划分同 L。

(3) 风险等级 (LS) 阈值确定与验证：LS 为 L 与 S 乘积 (1.0–25.0)，结合近 5 年事故案例反推：

$LS \leq 5.0$: 90% 无人员伤亡，损失 < 8 万元，“可接受风险”，仅用空开。

$6.0 \leq LS \leq 12.0$: 82% 轻微电击或小型设备损坏，“低风险”，30mA 瞬时型 RCD。

$13.0 \leq LS \leq 16.0$: 73% 人员轻伤或中型设备故障，“中风险”，30mA RCD + 日常检查。

险”，30mA RCD + 日常检查。

$17.0 \leq LS \leq 20.0$: 68% 人员重伤或大型设备停机，“高风险”，15mA RCD。

$21.0 \leq LS \leq 25.0$: 83% 人员死亡、核心设备报废等，“极高风险”，15mA RCD + 隔离 / 监护。

2. 风险矩阵表的优化与使用说明

整合优化风险矩阵表 (表 2-1)，便于现场查询：

表 2-1 电力作业场景漏电风险矩阵与保护配置表

L (事故可能性) \ S (后果严重性)	1 级 (可接受后果)	2 级 (轻微后果)	3 级 (一般后果)	4 级 (严重后果)	5 级 (极端后果)
1 级 (极低可能性)	可接受风险，空开	可接受风险，空开	低风险，30mA RCD	低风险，30mA RCD	低风险，30mA RCD
2 级 (较低可能性)	可接受风险，空开	可接受风险，空开	低风险，30mA RCD	低风险，30mA RCD	低风险，30mA RCD
3 级 (中等可能性)	可接受风险，空开	低风险，30mA RCD	低风险，30mA RCD	中风险，30mA RCD	中风险，30mA RCD
4 级 (较高可能性)	可接受风险，空开	低风险，30mA RCD	中风险，30mA RCD	高风险，15mA RCD	极高风险，15mA RCD + 隔离 / 监护
5 级 (极高可能性)	可接受风险，空开	低风险，30mA RCD	中风险，30mA RCD	极高风险，15mA RCD + 隔离 / 监护	极高风险，15mA RCD + 隔离 / 监护

使用说明：
因子评分：对照 2.1 节分级标准，打分并按权重算 L、S 得分，定等级。

矩阵查询：在表中找 L、S 等级交叉单元格，获风险等级与配置方案。

动态调整：场景因子变化时，重新评分调整配置，适配风险状态。

(三) 基于风险等级的分级配置策略

1. 可接受风险场景 ($LS \leq 5.0$)：空开为主，简化防护
- (1) 空开选型：符合 GB 50054–2011，额定电流匹配回路，分断能力 $\geq 6kA$ 。
- (2) 适用场景：非直接接触人体且有完善整体保护措施的高压电气设备区域，如高压变电站的部分设备，其本身有严格的绝缘、间距等防护措施，人体接触概率极低，通常依赖系统级的过流、过压保护等，无需专门的高灵敏度漏保，每季度测试跳闸功能。
- (3) 维护要求：每季度检查外观，测试跳闸功能，无锈蚀、松动、过热。
2. 低风险场景 ($6.0 \leq LS \leq 12.0$)：30mA 瞬时型 RCD，基础防护
- (1) RCD 选型：符合 GB 13955–2017， $I\Delta n=30mA$ ，动作时间 ≤ 0.1 秒，A/B 型按需选 (A 型适交流，B 型适交直流)。
- (2) 适用场景：干燥、人员较少接触的普通办公区域的电气设备，如办公楼的照明电路、普通办公电器等；还有一些远离人员活动区域的固定低压电气设备，如部分非关键的电动阀门驱动装置等。
- (3) 配套措施：每月检查外观，测试跳闸；每季度紧固接线端子，防止接触不良。
- (4) 成本控制：单价 45–90 元，比 15mA 型号低 50%+，安装兼容常规空开，批量适用。
3. 中风险场景 ($13.0 \leq LS \leq 16.0$)：30mA RCD + 强化管

- 理，双重防护
- (1) RCD 选型：除低风险参数，需抗湿热 (GB/T 14048.2–2020，40°C / 93% RH)、防误跳闸 (内置浪涌抑制)。
- (2) 适用场景：辅助车间，如检修间、工具间等场所的电气设备，这些地方可能会有人员频繁操作电动工具，且环境相对潮湿一些；另外，一些半封闭的电气设备区域，如电缆夹层内的部分电气设备。
- (3) 配套管理：每日检查测试；每月 1 次全面测试 (15mA 漏电模拟，跳闸 ≤ 0.05 秒)；每季度紧固端子。
4. 高风险场景 ($17.0 \leq LS \leq 20.0$)：15mA 瞬时型 A/B 型 RCD，灵敏防护
- (1) RCD 选型：符合 GB 13955–2017 “高灵敏度型”， $I\Delta n=15mA$ ，动作时间 ≤ 0.05 秒，优先 B 型 (适配变频器等)。
- (2) 适用场景：锅炉本体附近、汽轮发电机组的润滑油系统区域等，这些地方环境潮湿，设备运行时可能会有油水泄漏，人员在进行巡检、维护时可能会接触到带电设备；还有水处理车间，由于存在大量的水和电气设备混合的情况，漏电风险较高。
- (3) 配套措施：每月全面测试；每月清理端子积尘水渍；作业用 II 类双重绝缘工具。
- (4) 技术优势：模拟测试中，漏电至 40mA 时，跳闸 0.03–0.04 秒，远低于致命时间 (0.5 秒+)。
5. 极高风险场景 ($21.0 \leq LS \leq 25.0$)：15mA RCD + 隔离 / 监护
- (1) RCD 选型：同高风险，加隔离 / 监护。
- (2) 适用场景：氢气冷却系统区域，还有一些涉及水下作业的区域，如循环水系统的水下泵等设备。
- (3) 应急准备：作业前定专项预案，配备急救箱、绝缘救援钩；与医院建立 “绿色通道”，15 分钟内可达。

二、模型应用与效果分析

（一）案例验证

八〇三分公司在高风险脱硫区浆液循环泵房验证：

1.场景信息：作业区为脱硫区浆液循环泵房，作业内容检修电源箱测试，2 名作业人员（持低压电工证，4 年经验），设备运行 12 年（近 1 年 1 次漏电故障）。

2.匹配方案：15mA 瞬时型 B 类 RCD + 每月防护测试。

实施效果：作业中临时设备绝缘破损漏电（32mA），RCD 0.04 秒跳闸，人员无伤，验证方案必要。

（二）现有模型的局限性

1.动态风险响应不足：基于作业前静态评估，未考虑作业中因子变化（如突降暴雨湿度升，L_s需提分，无法实时调）。

2.特殊场景覆盖不全：新能源场景（光伏逆变器维护、风电塔筒电缆检修）未纳入“直流漏电”“高海拔影响”等因子，适用性受限。^[1]

（三）模型优化方向

1.构建量化评分数据库：收近 3 年事故案例，提因子数据，建“数据 - 评分”映射（如“省级及以上媒体报道≥3 次→S_s=5 分”），降主观性。^[2]

2.开发动态风险监测系统：整合物联网设备（温湿度、漏电流传感器），实时采数据，自动计算 LS 值推调整方案（如湿度

> 90%，预警加绝缘）。

3.拓展特殊场景因子体系：新能源场景新增“直流漏电类型（L₆）”“高海拔影响（L₇）”“新能源设备特性（S₆）”，与新能源单位合作完善。^[3]

三、总结与展望

（一）研究总结

本文构建的基于多维风险评估的漏电保护分级配置模型，解决传统“一刀切”问题。通过建风险因子体系、量化评估、定差异化策略，经工程验证，提升防护可靠性，降成本与误跳闸，为电力作业本质安全提供理论与实践支撑，推动安全防护转型。

（二）未来展望

1.与智能运维平台融合：嵌入平台，实现“场景识别 - 评分 - 方案匹配 - 效果复盘”自动化，调设备历史数据算分。

2.推广至泛电力行业：适配建筑电气、轨道交通供电等，调因子分级（如 S₄加“地铁停运”等级）。

3.助力安全文化建设：为安全培训提供素材，推动“被动防护”转“主动预防”。

模型后续将持续优化动态响应与场景覆盖，为电力安全发展提供更有力量支撑。

参考文献

[1] 国家质量监督检验检疫总局，中国国家标准化管理委员会. 剩余电流动作保护装置安装和运行：GB/T 13955 - 2017[S]. 北京：中国标准出版社，2017.

[2] 中华人民共和国建设部. 施工现场临时用电安全技术规范：JGJ 46 - 2005[S]. 北京：中国建筑工业出版社，2005.

[3] 中华人民共和国住房和城乡建设部，中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 低压配电设计规范：GB 50054-2011[S]. 北京：中国计划出版社，2012.

高压开关柜联锁与报警防护方案

杨婷婷, 周渊, 朱茂荣, 刘强博, 王健梅
华能甘肃能源开发有限公司, 甘肃 兰州 730070
DOI:10.61369/EPTSM.2025090013

摘 要： 为全面提升高压开关柜安全防护水平，杜绝误入带电间隔、强行开启带电背板等违章操作导致的触电事故，实现高压设备防触电的本质安全化升级，构建了“主动强制联锁+被动报警提示”的双重防护体系。该体系包含两大核心技术：一是基于“结构闭锁+电气硬接点+逻辑优先”的高压侧强制性联锁保护系统，以“变压器柜门状态触发高压柜联锁动作”为核心逻辑，实现变压器柜门打开后高压开关柜的强制性停运与操作闭锁；二是中压开关柜背板强行开启报警装置，针对开关柜工作状态下背板误开启风险，通过部件联动实现精准报警。测试与应用表明，强制性联锁系统可在变压器柜门开启 $\leq 150\text{ms}$ 内触发分闸并闭锁，动作响应一致性100%；背板报警装置可精准区分工作/试验位置实现差异化报警。体系适配10kV-35kV电压等级设备，为变配电系统安全提供全场景技术防护。

关 键 词： 高压开关柜；本质安全；强制性联锁；背板报警；双重防护

Interlocking and Alarm Protection Scheme for High-Voltage Switchgear

Yang Tingting, Zhou Yuan, Zhu Maorong, Liu Qiangbo, Wang Jianmei
Huaneng Gansu Energy Development Co., Ltd., Lanzhou, Gansu 730070

Abstract： To comprehensively improve the safety protection level of high-voltage switchgear, eliminate electric shock accidents caused by illegal operations such as mistakenly entering live compartments and forcibly opening live back panels, and realize the intrinsic safety upgrade of high-voltage equipment against electric shock, a dual protection system of "active forced interlocking + passive alarm prompt" has been constructed. This system includes two core technologies: first, a high-voltage side forced interlocking protection system based on "structural locking + electrical hard contact + logic priority", which takes "transformer cabinet door status triggering high-voltage cabinet interlocking action" as the core logic to realize forced shutdown and operation locking of high-voltage switchgear after the transformer cabinet door is opened; second, an alarm device for forced opening of the back panel of medium-voltage switchgear, which aims at the risk of mistaken opening of the back panel when the switchgear is in working status and realizes accurate alarm through component linkage. Test and application results show that the forced interlocking system can trigger opening and locking within $\leq 150\text{ms}$ after the transformer cabinet door is opened, with a 100% consistent action response; the back panel alarm device can accurately distinguish between working/test positions to realize differentiated alarms. The system is suitable for equipment with voltage levels of 10kV-35kV, providing full-scenario technical protection for the safety of power transformation and distribution systems.

Keywords： high-voltage switchgear; intrinsic safety; forced interlocking; back panel alarm

引言

（一）研究背景与意义

高压开关柜作为电力系统核心设备，其安全运行直接关系到电力系统稳定和运维人员生命安全。近年来，高压设备检修过程中安全事故频发，呈现两类典型风险：一是误入带电间隔导致的严重事故，2023年某风电场因高压开关柜误操作引发电弧爆炸，造成3台变压器烧毁及1名运维人员重伤；2024年某储能电站发生检修人员误入带电间隔的触电伤亡事故。二是开关柜工作状态下强行开启背板的触电风险，尤其在接地刀闸机械闭锁失效时，此类误操作易直接导致人员伤亡。

目前电力行业普遍采用的“五防”系统，其逻辑主要依赖机械闭锁和微机监控系统的双重闭锁。实际运行中，该体系暴露出诸多漏洞：一方面，机械闭锁机构易因长期运行磨损、锈蚀导致卡涩失效，2024年电力行业设备缺陷统计显示，机械闭锁失效占高压开关柜缺

陷总数的18.7%；另一方面，微机五防系统依赖软件逻辑和网络传输，存在因程序漏洞、网络延迟或人为解锁导致的防护失效风险^[2]。传统“五防”系统本质上是“管理约束型”防护，过度依赖运维人员的规范操作，无法从技术层面实现“不可违章”的强制性防护^[3]。

在此背景下，研发一套不依赖人为操作、具备独立强制防护能力的“强制性联锁+背板报警”的双重防护系统，实现从“被动防御”到“主动防护”、从“管理约束”到“技术强制”的本质安全升级，对杜绝误入带电间隔事故、保障变配电系统安全运行具有重要的工程价值和现实意义。

（二）国内外技术现状

高压开关柜机械联锁技术作为最早应用的闭锁形式，核心原理是通过连杆、锁具等机械结构实现设备操作互锁，在10kV及以上高压场景中，其局限性突出：一是适应性差，不同厂家、不同型号的高压设备难以实现标准化联锁；二是可靠性随运行时间衰减，环境因素导致机械部件锈蚀，使闭锁成功率逐年下降。

微机五防系统是当前高压配电领域的主要防护技术，其对“软件依赖型”特性使其缺点突出：一是存在网络延迟，当需要紧急切断高压电源时，网络传输过程可能导致防护失效；二是存在人为破解风险；三是软件漏洞可能导致系统崩溃，某变电站曾因操作系统漏洞导致微机五防系统瘫痪，被迫停运检修72小时^[1]。在背板防护领域，传统依赖机械闭锁的方式同样存在失效风险，缺乏兼具状态识别与主动报警功能的专项装置。现有技术尚未形成“全局联锁+局部报警”的协同防护模式，无法覆盖不同场景的安全需求^[4]。

综上，现有闭锁技术均存在“单一防护”“依赖人为或软件约束”的共性缺陷，无法实现高压设备检修场景下的本质安全防护，需研发一种具备多重防护、强制动作、独立运行特性的新型联锁保护系统。

（三）本文研究内容

针对传统闭锁技术的不足，本文提出一套基于“结构闭锁+电气硬接点+逻辑优先”的高压开关柜强制性安全联锁保护系统，主要研究内容包括以下三方面：

第一，系统总体架构设计。构建三重防护架构：第一重为增强机械闭锁；第二重为无源电气硬接点，实现柜门状态信号采集；第三重为逻辑优先跳闸回路，实现接点直接触发高压柜停运，确保单一环节失效时系统仍能可靠动作。

第二，核心关键技术实现。由“柜门开启信号→跳闸指令”直接转换，确保“无条件、无延时”跳闸特性。

第三，系统测试与工程验证。开展机械操作、电气接点、跳闸动作时间等多项测试，验证系统动作一致性和可靠性[1]。

第四，背板强行开启报警装置研发，解决局部误操作的预警问题；

第五，体系协同验证，确保两类技术适配兼容与防护互补。

一、强制性联锁保护系统总体架构设计

（一）设计原则与目标

传统闭锁技术的根本缺陷在于“防护依赖人为遵守”，本文提出“技术强制”的核心设计思想，即通过硬件回路的物理约束和强制动作，实现“无论人员是否违规操作，只要触发危险工况，系统必能强制切断风险源”的防护效果。该思想具体体现为两个核心准则：一是“故障安全”原则，当系统自身出现故障时，默认切换至“闭锁高压柜操作”的安全状态；二是“优先级最高”原则，系统的跳闸指令优先级高于任何常规控制指令，即使运行人员发出合闸指令，只要系统检测到危险工况，仍能强制分闸并闭锁。

为实现这一思想，系统设计摒弃“单一环节防护”模式，采用“多重冗余+独立运行”的架构，确保每个防护环节既相互独立又能相互校验，彻底摆脱对常规控制网络、软件逻辑和人为操作的依赖。设计目标包括：实现变压器柜门开启 $\leq 150\text{ms}$ 内高压柜强制分闸闭锁；背板开启报警准确率100%，工作状态误开启报警响应时间 $\leq 1\text{s}$ ；体系适配10kV–35kV油浸式与干式变压器及主流高压开关柜^[1]；单一环节失效时，另一环节仍能保障核心防护

功能。

双重防护体系由“主动联锁层”和“局部报警层”构成：主动联锁层即高压侧强制性联锁保护系统，通过三重架构实现全局风险强制阻断；局部报警层即中压开关柜背板强行开启报警装置，通过部件联动实现局部风险预警提示。两层防护独立运行又相互协同，覆盖设备全操作场景。

（二）三重架构

1. 第一重：增强型机械闭锁设计

机械闭锁作为物理防护的第一道防线，设计核心是“提高闯入难度、实现操作互锁”。本文设计的增强型机械闭锁采用“双锁舌+联动连杆”结构，主要包括两个关键部件：

一是防拆卸机械锁，采用特制六角梅花锁芯，配合防钻钢板外壳，锁芯与柜门采用焊接固定，无法通过常规工具拆卸；锁具内置位置检测机构，只有当锁具完全闭合时，才能解除高压柜的操作闭锁，避免“虚锁”导致的闭锁失效。

二是联动式隔离开关闭锁杆，将变压器柜门与高压柜隔离开关通过高强度合金连杆连接，当柜门开启角度超过 5° 时，连杆带动闭锁杆插入隔离开关操作机构的锁孔，强制锁定隔离开关的分合闸操作；该连杆采用伸缩式结构，可适配不同型号变压器与高

压柜的安装间距。

该增强型机械闭锁的防护可靠性较传统结构提升3倍，经测试，在施加10kN外力冲击时，锁具仍能保持闭锁状态，满足 GB 3906-2020《3.6kV ~ 40.5kV 交流金属封闭开关设备和控制设备》的机械强度要求^[1]。

2.第二重：电气硬接点设计

电气硬接点作为信号采集环节，其设计核心是“高可靠、无源化、抗干扰”。开关安装采用“三点定位”方案：在变压器柜门内侧上、中、下三个位置各安装1个微动开关，通过并联方式连接形成信号采集回路，只要任一开关被触发（即柜门开启），即可生成闭锁信号。这种安装方式可避免因柜门变形导致的信号采集失效，信号采集准确率达100%。

信号传输回路采用“双屏蔽”设计：电缆选用铜芯铠装屏蔽线，外层采用镀锌钢带铠装，内层采用铜丝编织屏蔽层，屏蔽效能达80dB以上，可有效抵御高压设备产生的电磁干扰；回路两端设置浪涌保护器，可承受2.5kV的冲击电压，确保在雷击等极端工况下信号传输稳定。

3.第三重：逻辑优先设计

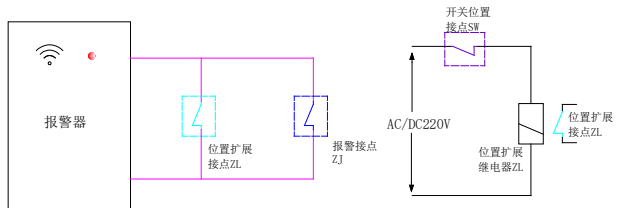
逻辑优先环节是系统的核心防护单元，其设计核心是“独立运行、强制动作、最高优先级”。该环节采用纯硬件回路设计，不依赖任何软件程序和网络传输，主要由硬接线完成^[3]。

当变压器柜门开启后，常开接点闭合，立即通过专用电缆向高压柜的保护装置跳闸回路发送指令。该指令采用“干接点”形式，直接接入保护装置的跳闸出口，优先级高于保护装置的任何内部逻辑和外部控制指令，确保“无条件”跳闸。

（三）背板强行开启报警装置设计与实现

1.主要部件由断线报警器、开关柜辅助触点，扩展继电器，电源、磁性接点、连接线组成。断线报警器：采用内置电池，报警器引出两颗连接线，连接线连接良好时不报警，连接线断开时发出语音报警，进行提示；开关柜辅助触点：采用断路器本体工作位置闭合、试验位置断开的备用接点；扩展继电器：采用小型快速动作继电器 MY2NJ,线圈电压可以是 AC220V、也可以是 DC220V，需要与开关柜提供的电源配套，使用继电器常闭接点作为报警器回路使用；电源：采用开关柜内提供的电源小开关，可以是 AC220V、也可以是 DC220V，需要与扩展继电器配套；磁性接点：两片接点接近时其内部接点闭合，两片接点远离时其内部接点断开。

2.回路连接方式



3.安装方法：

断线报警器及两片磁性接点分别安装在后柜门上下两扇门之间，磁性接点之间间距不大于1cm；扩展继电器安装于开关柜正面二次端子室，利用断路器位置辅助接点通过控制线将其连接^[2]。

二、系统测试与工程应用

为全面验证系统性能，模拟变压器检修、高压柜操作、电磁干扰等多种工况，测试动作时间、可靠性等数据^[1]。

动作时间测试数据统计如下：单次动作时间最短82ms，最长148ms，平均115ms，其中 ≤ 150 ms的动作次数为100次，动作响应一致性达100%；关键环节耗时分布为：信号采集环节 ≤ 10 ms，逻辑处理环节 ≤ 35 ms，跳闸执行环节 ≤ 60 ms，闭锁执行环节 ≤ 43 ms，各环节耗时均满足设计要求^[3]。

人为模拟系统各环节故障，测试系统的防护效果：

1）机械闭锁故障：拆卸其中1个机械锁舌，开启柜门后，电气硬接点和逻辑优先环节仍能可靠动作，高压柜成功分闸并闭锁；

2）电气硬接点故障：断开1个微动开关，剩余2个开关仍能正常采集信号，系统动作正常。

3）断路器在工作位置，无论断路器是否合闸带电，报警器控制回路中断路器辅助位置接点 SW 闭合，扩展继电器 ZL 带电吸合，扩展继电器 ZL 常闭接点断开；当人为误强拆后柜门时，两片磁性接点相互远离，其闭合接点打开，此时报警器发出报警，提示操作人员，降低触电不安全事件发生。

4）断路器在试验位置或隔离位置，报警器控制回路中断路器辅助位置接点 SW 打开，扩展继电器 ZL 不带电，扩展继电器 ZL 常闭接点处于闭合状态；当后柜门被打开时，两片磁性接点相互远离，其闭合接点打开，此时报警器也不报警，操作人员可以正常工作。

三、结论

本文设计并实现的基于“结构闭锁+电气硬接点+逻辑优先”的高压开关柜强制性安全联锁保护系统，通过三重架构和核心技术创新，解决了传统闭锁技术“依赖人为约束、单一防护、可靠性不足”的核心缺陷，主要结论如下：

第一，系统实现了高压设备检修场景的本质安全防护。相较于传统“五防”系统的“被动防御”，该系统通过“技术强制”实现了“主动防护”：当变压器柜门开启时，系统可在 ≤ 150 ms内强制触发高压柜分闸并锁闭合闸机构，动作响应一致性达100%，从物理层面彻底阻断误入带电间隔等8类典型误操作，真正实现了“不可违章”的本质安全目标。报警装置精准预警背板误开启风

险，两者协同覆盖全局与局部风险，全场景本质安全防护，实现“不可违章”目标^[3]。

第二，系统具备高可靠性、速动性和适配性。系统通过三重设计，在机械闭锁失效、电气信号等故障工况下仍能可靠动作； $\leq 150\text{ms}$ 的动作时间远快于人员接触危险部位的时间，确保危险工况下的快速防护；标准化接口模块设计使其可适配10kV–35kV电压等级的油浸式与干式变压器及主流品牌高压开关柜，适配性

达100%^[4]。

综上，该系统实现了对传统安全防护理念的技术性革命，将高压开关柜的安全防护从“管理约束”升级为“技术强制”，为变配电系统检修作业安全提供了全链路技术保障，具有重要的工程应用价值和推广前景。

参考文献

-
- [1] GB 3906–2020, 3.6kV ~ 40.5kV交流金属封闭开关设备和控制设备[S]. 北京：中国标准出版社，2020.
- [2] 王建华，李刚，刘军. 高压开关柜五防闭锁系统的缺陷分析与改进措施[J]. 电力系统保护与控制，2021, 49(12): 165–170.
- [3] 张伟，陈晓峰，王磊. 微机五防系统的可靠性分析及优化设计[J]. 高压电器，2022, 58(3): 189–196.
- [4] 刘建国，赵亮，孙伟. 高压设备电磁兼容测试技术研究[J]. 电气技术，2020, 21(7): 45–50.

基于电气工程自动化技术在电力系统运行中的运用

苏东杨

金泽科技服务（潮州市）有限公司，广东 潮州 521000

DOI:10.61369/EPTSM.2025090015

摘 要： 文章系统阐述了电气工程自动化技术在电力系统运行中的核心作用、关键技术应用及未来管理优化方向。通过分析仿真、智能控制等具体应用，论证了自动化技术在提升故障诊断精度、优化资源配置、降低运维成本方面的显著优势。文章提出通过推进技术标准化、构建网络一体化架构、实现全流程集成管控等策略，以加强技术应用管理，最终全面提升电力系统的综合效益与可持续发展能力。

关 键 词： 电气工程；自动化技术；电力系统运行

The Application of Electrical Engineering Automation Technology in The Operation of Power Systems

Su Dongyang

Jinze Technology Services (Chaozhou) Co., Ltd., Chaozhou, Guangdong 521000

Abstract： This article systematically elaborates on the core role of electrical engineering automation technology in the operation of power systems, key technological applications, and future directions for management optimization. By analyzing specific applications such as simulation and intelligent control, it demonstrates the significant advantages of automation technology in enhancing fault diagnosis accuracy, optimizing resource allocation, and reducing operational and maintenance costs. The article proposes strategies such as promoting technological standardization, constructing a network-integrated architecture, and achieving full-process integrated management and control to strengthen the application management of technology, ultimately the comprehensive benefits and sustainable development capabilities of power systems.

Keywords： electrical engineering; automation technology; power system operation

引言

传统依赖人工为主的运行管理模式，在应对海量数据、快速故障响应和精细化调度等方面已显乏力。因此，推动电气工程自动化技术的深度应用与创新融合，成为引领电力系统转型升级、实现现代化管理的必然选择。文章旨在深入探讨电气自动化技术在电力系统运行中各环节所发挥的关键作用，分析主要技术分支的应用价值，并就如何加强技术应用管理、优化系统运行提出建设性思路，以期为电力行业的智能化发展提供理论参考与实践指引。

一、电力系统运行中电气工程自动化技术运用的重要作用

（一）自动化控制的核心任务

作为电气自动化技术在电力系统中的基石性应用，自动化控制承担着对电网进行全面或局部智能化管理与状态监测的核心任务。该系统能够实时采集运行数据并精准诊断设备工况，继而将处理后的关键信息清晰呈现给控制中心的工作人员。这一过程实现了对电力系统全天候、不间断的运行监视，为技术人员快速识别隐患、制定精准决策并执行有效措施提供了坚实依据，从而显著降低因人为疏忽或响应延迟引发的意外事故概率。通过其对系

统运行的自主管理与智能监控，自动化控制从根本上保障了电力供电的安全性与稳定性，是维系电网可靠运行的不可或缺的技术支柱。

（二）强化核心自动化技术在电力系统调控中的深度应用

电气自动化技术在电力系统中的有效运行，深度依赖于继电保护、稳定控制与能量管理等专业系统与现代信息技术的融合。这些核心技术通过部署于厂站、线路的智能终端（如 RTU、PMU），能够实时采集电网的电压、电流、功率潮流及设备状态等关键运行参数。所采集的海量数据经由高速通信网络上传至调度控制中心，为系统的实时监控与决策提供了数据基石。在此基础上，高级应用软件（如状态估计、最优潮流、自动发电控制

AGC)对数据进行分析与计算,进而生成并执行精准的控制指令,如调节发电机出力、投切电容器组或执行故障隔离。这一从“数据感知”到“智能决策”再到“精准执行”的闭环过程,极大地提升了电力系统应对负荷波动、故障扰动时的自适应与自愈能力,保障了电网运行的安全、稳定与经济性^[1]。

（三）优化系统运行与增强综合效益

电力系统的运行效能直接关系到社会生产的顺利进行与居民日常生活的质量保障,其重要性不言而喻。通过引入电气自动化技术,系统在稳定性、可靠性及安全性等关键指标上均得到了显著提升。这种提升不仅意味着供电质量的优化和服务能力的增强,还体现在对运行过程的精细化管理上,从而有效降低了不必要的电能损耗,实现了节能降耗。它通过提升运营效率、降低运营成本、保障供电安全,帮助企业同时实现了可观的经济利润和广泛的社会价值,达成了可持续发展目标。

二、电力系统运行中的电气工程自动化技术运用

（一）推进电力系统自动化技术标准的统一与协同

当前,我国电力系统在自动化技术的应用广度上已臻成熟,但在设备接口、通信协议与数据模型等技术标准的统一性与互操作性上,与国际先进的 IEC 61850(变电站通信网络与系统)、IEC 61970(能量管理系统应用程序接口)等标准体系仍存差距。由于早期建设过程中设备厂商众多、技术路线不一,导致系统中存在多种私有通信规约和异构数据模型,这为调度中心与厂站之间、不同自动化系统(如监控系统 SCADA 与管理信息系统 MIS)之间的信息集成与共享设置了壁垒。为解决这一问题,必须在行业层面大力推进以 IEC 61850/IEC 61970(CIM 模型)为核心的标准体系建设。在新建或改造自动化系统时,应强制要求设备支持标准化的通信接口与统一的数据模型,以实现“即插即用”和无障碍信息交互。

（二）仿真技术的应用与价值

在传统的电力系统运行管理中,正式投运前必须进行严格的模拟测试,以评估其是否满足安全运行条件。基于电气自动化原理发展起来的现代仿真技术,则能有效替代这些传统检验方式。该技术依托先进的计算机系统,遵循标准的 TCP/IP 通信协议,可快速将系统模型数据通过网络传输至供电单位的监控中心。这使得技术人员能够在极短时间内完成对海量运行参数的全面校验与分析,一旦识别出任何偏离标准值的异常情况,便可立即启动预警并采取针对性优化措施,从而为电力系统的安全、稳定投运构筑起一道坚实的技术防线。对于供电单位而言,仿真技术的深度应用所带来的效益是多方面的。它不仅是验证系统性能的工具,更实现了对资源的最优化配置。通过在虚拟环境中对即将上线的电力系统进行充分的“压力测试”与工况模拟,能够从源头上把控其建设质量与运行安全,将潜在隐患消除在萌芽状态。这种前置性的风险管控,显著降低了系统投运后因故障引发的维修频次与保养成本,实现了从被动抢修向主动预防的根本性转变,为企业创造了显著的经济效益与管理效益^[2]。

（三）智能控制技术的融合与优势

电力系统中所应用的电气工程自动化技术,必须保持持续的创新活力与技术迭代,方能紧跟时代发展的步伐。这就要求我们高度重视并积极推动其与计算机技术、人工智能等前沿智能控制技术的交叉融合。强化智能控制技术的集成应用,能够构建出具备更高感知、决策与执行能力的自动化系统。此类系统可对运行状态进行实时精准监测与智能分析,从而极大地提升了对潜在故障和异常情况的早期预警与快速诊断能力。一旦发现隐患,系统能自动或辅助管理人员迅速定位并采取应对策略,有效遏制故障扩大,避免造成更严重的运行中断和设备损坏。传统的故障排查模式,由于缺乏精准的定位技术,往往需要组织大量人力对庞大系统进行地毯式检查。这种方法不仅耗费巨大的人力、物力和时间成本,且排查过程盲目性高,效率低下,甚至可能因判断失误而错过真正的故障点。智能控制技术的引入,则从本质上改变了这一被动局面。通过部署智能传感器和高级算法,系统能够自动精准地识别并定位故障源,将运维人员从繁重的体力排查中解放出来,实现了从“人海战术”到“精准打击”的转变^[3]。

（四）智能化技术的实践成效

在传统运维模式下,系统一旦出现异常,检修人员不得不对庞杂的线路网络进行逐段排查,整个过程高度依赖人工经验与体力劳动。这种排查方式不仅需要投入大量的人力与检测设备,而且效率低下,故障定位耗时漫长,导致停电范围可能扩大,修复时间延长,无论对企业的正常生产还是居民的日常生活都造成了显著的负面影响。智能化技术的引入彻底扭转了这一被动局面。通过部署智能传感器、数据分析平台和专家诊断系统,自动化系统能够对运行中产生的海量数据进行实时监测与智能分析。当故障发生时,系统可以在极短时间内精准定位异常点,并智能分析出导致故障的根本原因,甚至生成初步的维修决策建议。这使得维修人员能够迅速抵达现场,并依据系统提供的精准信息采取最有效的处理方案,极大地缩短了故障修复时间。因此,智能化技术的深度应用,不仅大幅提升了供电可靠性,有效降低了因停电带来的各类经济损失与生活不便,更重塑了高效、精准的现代化电力运维新范式。

（五）实时监控技术的功能与价值

互联网技术与电气自动化技术的深度融合,催生了具备高度自感知和自决策能力的智能电网系统。该系统的核心优势在于实现了对电网运行状态的广域实时监控。当系统监测到用电设备或输电线路出现异常或损坏时,能立即将精确的故障数据上传至中央监控平台并自动触发多级警报,为快速响应赢得宝贵时间。同时,这种精细化的监控能力也能有效识别异常的用电模式,从而精准发现并遏制窃电行为,这不仅提升了用电管理的效率与精准度,也为终端用户构建了一个更为安全、可靠的用电环境。先进的监控技术则能通过部署的智能终端,持续、自动地采集并回传精确的负荷数据,从根本上减轻了供电部门的日常运维压力与管理复杂度。

（六）以太网技术在电力系统中的整合与效能

面对社会用电需求的持续快速增长,现代电力系统的架构与

运行模式日趋复杂，随之产生了海量的运行数据亟待处理。若仅依赖传统的人工方式进行数据记录、核算与分析，不仅工作效率低下，严重制约决策与响应速度，更因人工操作的局限性极易引入计算错误，给电网的安全稳定运行埋下隐患。通过构建统一的信息高速公路，使得调度中心、变电站、用户终端等各个环节的数据得以无缝对接与集中处理，这显著减少了对重复人力劳动的依赖，实现了人力资源的优化配置，并降低了因分散式管理产生的额外成本。此外，以太网技术所具备的高可靠性与标准化的通信协议，有效保障了所传输电网信息的真实性与完整性。这种对数据质量的根本性提升，为高级分析、智能决策等自动化功能的实现奠定了坚实基础，从而从信息底层有力地推动了整个电气自动化技术体系向更高效、更智能的方向演进^[4]。

三、加强电气自动化技术在电力系统中的应用管理

（一）实现系统运行全流程的集成化自动管控

在传统的电力系统运维模式下，各项管理职能通常被划分为多个相对独立的板块，例如电力能源的调度分配、系统安全防护以及日常的运行维护等。这些板块各自为政，职责分明，虽在一定程度上明确了分工，但也导致了信息壁垒的形成。每个环节独立运行所产生的数据难以顺畅流通和共享，致使整体管理工作量繁重，且各类电气设备的协同运行效率低下，资源无法得到最优配置。为彻底扭转这一局面，显著提升电力系统运行管理的效能与质量，必须打破原有的条块分割模式，转向一体化的集成管理。其核心路径在于，运用先进的自动化与信息技术，将电力分配、设备维护、安全监控等原本孤立的技术与管理环节进行深度整合与无缝链接。通过构建一个统一的管控平台，实现对各环节数据流的集中处理与指令的协同下发，推动电力运维向集约化、智能化方向发展。这种根本性的变革，不仅能够大幅提升运维工作的效率与精准度，更能从全局层面增强系统内部各单元之间的

协调性与响应速度，从而在本质上保障电力系统运行的安全、经济与高效。

（二）基于网络一体化与现代技术的系统运行优化

为深化电气自动化技术在电力系统运行管理中的应用效能，关键在于大力推进网络一体化架构的建设。这要求我们科学规划和高效利用以互联网为代表的现代信息技术，实现信息网络与物理电力系统的深度融合。通过这种集成，可以显著增强系统测量、控制和决策的精准度，为精细化运维提供支撑。同时，必须紧密结合电力生产的实际需求，有针对性地引入先进的自动化技术。例如，利用成熟的以太网等技术构建高速、可靠的内外部通信网络，能够极大提升系统的数据交互能力和远程管理能力，从而从整体上改善管理质量与响应速度。对当前电力系统的运行状况进行分析不难发现，随着智能终端和传感设备的普及，系统运行时产生的信息数据正呈指数级增长。传统的数据处理方式需要耗费大量的人工时间和精力，已成为制约运行管理效率提升的瓶颈。为了有效应对这一挑战，实现真正高效的自动化管理，就必须依据现实基础，合理采用以太网等技术构建统一、高效的数据传输与处理平台^[5]。

四、结束语

综上所述，电气工程自动化技术的广泛应用是推动电力系统迈向智能化、高效化的核心动力。从自动化控制、智能诊断到实时监控与高速数据传输，这些技术共同构筑了现代电网稳定运行的坚实防线，显著提升了供电质量、运维效率和经济与社会效益。未来通过坚定不移地推进技术标准的统一、打破信息壁垒实现系统集成，以及构建基于网络一体化的智能管控体系，方能充分释放自动化技术的巨大潜能，最终实现建设安全、清洁、高效、智能的现代化电力系统的宏伟目标。

参考文献

- [1] 杨兆实. 电力系统中电气工程自动化技术的运用 [J]. 通信电源技术, 2019, 36(12): 122-123.
- [2] 王涛. 电力系统中工程自动化技术运用研究 [J]. 电力设备管理, 2025, (14): 204-206.
- [3] 朱敏忠. 基于电气工程自动化技术在电力系统运行中的应用 [J]. 科技风, 2022(16): 85-87.
- [4] 王乾洋. 电气工程自动化技术在电力系统运行中的应用 [J]. 今日自动化, 2021(8): 100-101.
- [5] 朱宗晖, 魏育才. 电气工程及自动化技术在电力系统中的应用分析 [J]. 消费电子, 2025(7): 149-151.

解析建筑电气智能化系统联动控制技术

郑振洞

广东美的暖通设备有限公司，广东 佛山 528000

DOI:10.61369/EPTSM.2025090017

摘 要： 文章旨在系统探讨建筑电气智能化系统联动控制的技术架构与实践路径，分析其在促进建筑节能、提升用户体验及实现系统集成化方面的核心价值。研究聚焦于智能化系统的设计理念、构造基础及关键技术应用，重点论述如何通过联动控制技术优化建筑能耗管理、强化安全防护体系，并构建以用户需求为导向的智能服务模式，以期为现代建筑的智能化转型提供理论支持与技术参考。

关 键 词： 建筑电气；智能化系统；联动控制技术

Analysis of Linked Control Technology in Intelligent Building Electrical Systems

Zheng Zhendong

Guangdong Midea HVAC Equipment Co., Ltd., Foshan, Guangdong 528000

Abstract： This article aims to systematically explore the technical architecture and practical pathways of linked control technology in intelligent building electrical systems, analyzing its core value in promoting building energy efficiency, enhancing user experience, and achieving system integration. The research focuses on the design philosophy, structural foundation, and key technological applications of intelligent systems, with particular emphasis on how linked control technology can optimize building energy consumption management, strengthen safety protection systems, and establish a user-demand-oriented intelligent service model. The goal is to provide theoretical support and technical references for the intelligent transformation of modern buildings.

Keywords： building electrical; intelligent systems; linked control technology

引言

随着城市化进程加速与建筑规模持续扩张，能源消耗激增与用户对建筑环境品质要求的提升，对建筑电气系统的智能化水平提出了更高要求。传统独立运行的电气设备已难以满足现代建筑在能效管理、功能协同及人性化服务方面的综合需求。在此背景下，基于联动控制技术的电气智能化系统成为推动建筑可持续发展的重要路径。本文通过分析其发展进程、设计理念与实现机制，探索智能化系统在建筑领域的深度融合与创新应用。

一、建筑电气智能化系统联动控制发展进程

（一）节能环保的迫切性

社会经济快速发展导致部分行业对不可再生资源的依赖加剧，长期来看可能引发资源短缺与生态破坏。在绿色低碳政策推动下，越来越多企业将节能理念融入生产流程与设备改造，以减轻对环境的负面影响。同时，智能化技术的普及为建筑电气系统实现能效优化提供了重要支持，不仅改善了能源使用结构，也引导公众形成低碳生活习惯，从而推动全社会生态保护意识的提升。

（二）以人为本的智能化导向

智能系统以用户需求为核心，通过深入调研实际使用习惯，开发出更贴合个体需求的功能模块。此类设计有效简化了居民日

常操作，提升了生活便捷性与满意度。在系统评价体系中，操作的便捷性、功能的适配度及交互体验成为关键指标。随着生活品质不断提高，技术团队持续优化系统的人性化设计，通过联动控制等技术进步，不断满足用户对高品质居住环境的需求^[1]。

二、关于建筑电气的智能化联动控制的设计理念

（一）绿色建筑与能耗管理

建筑规模扩大与城市化加速导致能源资源消耗显著增加，建筑运行阶段的电力、水力及热能消耗与电气系统运行模式密切相关。在建筑的全生命周期中，其长期运行阶段的能源消耗占据了绝大部分比重，其中暖通空调、照明系统等通常是主要的用能单

元。这种固有的能耗结构决定了必须从整体系统优化的角度出发，统筹协调各设备的运行。在推进智能调控过程中，需重点围绕能耗控制展开，通过集中联动策略统筹各类电气设备，形成协同节能效应。具体而言，可以建立统一的能源管理平台，实时监测并分析各子系统的能耗数据，依据建筑的实际使用状态、环境参数乃至天气预报等信息，自动调整设备运行策略，例如在人员密集时段与闲置时段采用不同的通风模式，或根据自然光照强度自动调节人工照明^[2]。

（二）用户导向的智能建筑路径

信息技术发展使用户能够及时获取前沿设计理念，并将其与实际建筑功能结合，催生了室内环境调控、空气流通管理等智能化系统。这些系统通过物联网传感器、人工智能算法等技术手段，能够持续学习用户的行为模式与偏好，实现从“人适应系统”到“系统适应人”的根本转变。例如，智能家居系统可通过分析用户日常作息，自动生成个性化的场景模式；办公建筑可根据人员流动情况，动态调整公共区域的能源分配。设计方依据用户偏好对系统功能进行个性化调整，形成更贴合需求的控制环境与服务模式，显著提升使用体验。这种个性化服务不仅体现在基础的环境参数调节上，还延伸至健康关怀、节能参与等层面，如根据用户身体状况推荐适宜的室内环境，或通过可视化界面激励用户参与节能行为。坚持以用户为中心的设计原则，不断优化控制技术的实用性与适配性，有助于推动智能建筑行业的整体发展。

（三）智能建筑系统的集成化发展特征

现代建筑中的电气系统正日益依赖联动控制技术作为其核心架构，这一技术导向不仅构成了系统运行的基础，也顺应了人们对智能化生活环境不断增长的需求。得益于智能化设计的全面推进，现代楼宇的控制功能日趋完善与综合，其中联动控制技术的迭代发展，更实现了楼宇内部所有电气设备运行数据的互联互通。基于统一平台对各类监测信息进行整合分析与智能处理，系统能够自动生成并传递操作指令，从而精准调控各类终端设备。这种高度协同的运行机制，使建筑整体能够作为一个有机整体响应外部环境 with 内部需求的变化，充分展现了智能建筑在集成化与响应性方面的显著优势^[3]。

三、联动控制功能实现的构造基础

（一）智能系统的结构特点与效能体现

当前，在各类现代化建筑项目中，电气智能化系统正凭借其出色的功能整合与服务升级能力获得大规模应用。其中，自动化联动控制作为该体系的核心技术代表，在促进建筑能源节约与消耗控制方面展现出显著成效。依托分布于建筑各处的环境监测传感器与智能执行单元，该系统实现了对照明调节、暖通运行、安防监控等关键子系统的统一协调与精细管理。这种深度集成的管控模式不仅拓展了传统电气设备的功能边界，还通过各子系统间的协同响应，构建起全方位覆盖的智能管理网络。该网络架构通过实时数据采集与智能分析处理，为建筑能源的动态调配与高效

利用提供了可靠平台，从而显著提升了整体能源管理水平，为可持续建筑运营提供了坚实的技术支撑。

（二）系统回路结构与安全防护体系

构建完整的控制回路架构是实现建筑设备联动功能的关键所在。该体系通常包含启动控制、辅助保护、状态反馈及半自动控制等多个专业回路，这些回路通过精密的逻辑关联构成统一整体，既保障了各环节控制流程的准确执行，又促进了能源资源的优化配置。特别值得关注的是，半自动控制回路专门针对突发异常工况进行设计，当出现电力供应中断导致系统无法自动运行时，可通过人工操作实现控制模式的快速转换，从而及时消除设备故障，防止系统运行状态持续恶化。

在安全防护层面，辅助保护回路承担着至关重要的保障职能。由于建筑电气系统常面临负载波动频繁、运行环境多变等复杂情况，该回路通过配置继电保护器、熔断装置及电压监测线圈等多重防护元件，构建了完善的故障应对机制。当系统出现过载、短路等异常状况时，这些元件能够迅速作出反应，实施分级保护，确保电气设备的安全稳定运行。这种多层次、相互配合的回路结构与防护机制，共同形成了联动控制系统可靠运行的基础支撑，为智能建筑的功能实现提供了坚实保障。

四、建筑电气智能化弱电系统联动控制技术

（一）现代建筑照明系统的智能化演进

在当代建筑电气设计中，照明子系统已被纳入弱电工程的关键范畴，其方案规划需统筹考量技术、环境与人文等多重维度。工程师应当系统评估建筑内部弱电照明的拓扑结构，现代建筑中的照明体系普遍划分为日常照明控制与紧急照明保障两个功能单元。根据不同空间场景的光照需求实施定制化智能方案，能够有效提升能源使用效率。弱电智能化领域的协同控制技术近年来取得显著突破，借助先进的低电压控制方案与环境感知技术，照明回路得以实现最优化的动态配置。在完成各类智能控制终端的安装与系统集成后，每个照明节点均可纳入统一的智能管理平台。现代建筑弱电体系普遍采用24V及以下的低电压供电标准，这一方面契合智能照明设备的电气特性，另一方面也极大提升了系统的安全性能。紧急照明单元与日常照明系统在功能上互为补充，当建筑主要供电回路发生异常时，备用照明系统将自动投入运行。依托弱电智能平台的实时状态监测功能，系统能够快速识别电网异常，并毫秒级启动应急预案，确保建筑内部始终保持符合安全规范的最低照度标准，为人员疏散和重要操作提供基本照明保障。

（二）弱电控制系统的模块化构建方案

在智能化建筑不断演进的过程中，弱电控制系统已普遍采用高度模块化的架构设计。该系统通过分布独立的单元自主运作，最终实现整体协同控制的目标。在实施弱电智能化联动技术时，各类控制模块的装配作业严格遵循国家标准化规范，普遍选用35mm工业标准导轨作为基础安装载体。这种标准化设计理念充分兼顾了多样化的现场应用场景，其高度集成化的物理结构显著降

低了对安装空间的占用要求。这种导轨式装配体系不仅具备优异的机械稳定性，其简明的安装流程也大幅提升了施工效率。配合专门设计的防护外罩，整套系统能够形成有效的物理保护屏障。此种构建模式在优化安装工序的同时，更显著节约了建筑内部空间资源。与此同时，模块化的设计理念为系统后续的功能拓展预留了充分余地，使终端用户能够享受到更加完善、便捷的智能化服务体验。这种灵活可扩展的架构特点，使得系统能够适应建筑后期功能调整和智能化升级的需求，为建筑的可持续发展提供了坚实的技术支撑^[4]。

（三）室内环境智能调控系统的技术特征

在现代建筑弱电集成体系中，环境调节子系统通过先进的联动控制技术展现出显著的技术优势。该系统能够对室内温度、湿度、空气质量等多项环境参数进行实时采集与智能分析，为营造舒适健康的室内环境提供数据支撑。作为建筑能源消耗的关键环节，环境调节系统的架构设计需要建立科学的拓扑结构，依据中央控制系统与末端执行设备之间的数据交互特征，持续完善设备运行逻辑，增强各子系统之间的协同运作能力，从而提升整体环境调控效能。

在系统实际运行层面，需要精准界定各类环境控制设备的操作权限与调节范围，通过优化控制算法不断提升系统的灵活性与适应性。基于数字化管理平台的支撑，系统能够对环境调控设备的运行数据进行多维度的采集与分析，建立完善的运行状态评估体系。这种智能监控机制不仅能够及时发现设备异常状态，还能通过历史数据分析预测系统运行趋势，从而保障环境调节系统始终维持在最优工作状态，实现能效管理与环境舒适度的有机统一^[5]。

（四）安防与消防系统的智能化融合应用

在现代建筑安全体系中，弱电联动控制技术的深度应用显著提升了安防与消防系统的整体效能。基于智能建筑的发展导向，安防消防一体化系统在设计阶段就注重能源使用的精细化管理和运行效率的全面提升。系统需要根据不同功能区域的安全防护等级差异，制定差异化的设备配置策略——例如公共走廊需要部署更高密度的探测传感器，而独立办公空间则可采用标准配置方

案，以此实现精准化防护与资源优化的平衡。在系统架构设计层面，需要充分考虑建筑的空间特征与使用功能，科学规划设备布局方案。智能烟感与温感探测器应当设置在空气流通路径和热量易积聚的关键位置，视频监控系统则需构建无死角的全方位视觉覆盖网络。作为自动监测系统的重要补充，各楼层明显位置均需配置易于识别和操作的手动报警终端，确保在自动识别系统发生故障时仍能建立有效的报警通道。

（五）弱电智能化系统的分布式架构特征

在电子信息产业持续创新的推动下，建筑弱电系统经历了显著的技术演进与性能提升。通过构建更加完善的弱电智能化体系，联动控制技术的潜力得到充分释放，使系统能够长期维持高效稳定的工作状态。该系统采用分布式架构理念进行设计，当系统中某个局部单元发生临时故障时，其余模块仍可保持正常运转，从而有效避免整个系统的瘫痪风险。在弱电智能化系统的运行机制中，各类智能终端借助联动控制协议实现数据的高效交互，同时各控制单元保持着相对独立的处理能力。虽然不同功能模块需要在统一框架下实现协同运作，但每个单元都具有自主运算和独立执行的特性。系统通过标准化的网络通信端口、串行数据接口等通用连接方式，建立设备间的信息传输通道。

五、结束语

文章系统阐述了建筑电气智能化系统联动控制的发展背景、设计理念与技术实现路径，突出了其在能耗管理、用户体验及系统集成方面的核心价值。通过构建统一的能源管理平台、模块化的弱电控制系统及智能化的环境调控机制，实现了对建筑能源使用与设备运行的精细化管理。同时，分布式架构与多层次安全回路的应用，保障了系统运行的可靠性与应急响应能力。未来需进一步探索人工智能与大数据技术在建筑能耗预测与个性化服务中的深度应用，加强跨系统协议的统一与标准化建设，推动智能建筑向自适应、可演进的方向发展。

参考文献

- [1] 陈全乐. 建筑电气智能化发展 [J]. 建筑·建材·装饰, 2021(4): 117-118.
- [2] 曲明安. 建筑电气智能化发展策略 [J]. 电子元器件与信息技术, 2023, 7(2): 94-96, 113.
- [3] 焦学渊. 建筑电气智能化系统联动控制技术研究 [J]. 工程技术研究, 2024, 9(1): 97-99.
- [4] 谭敬博. 建筑电气工程中智能化系统联动控制技术应用研究 [J]. 现代工程科技, 2023, 2(6): 53-56.
- [5] 傅王健. 浅议建筑电气智能化系统联动控制技术 [J]. 建筑与装饰, 2020(7): 171, 174.

分析输变电工程造价的控制策略

郑萍

揭阳明利电力设计有限公司，广东 揭阳 522000

DOI:10.61369/EPTSM.2025090019

摘 要： 工程造价受到工程技术方案、自然地理条件、土地政策及市场价格波动等多维度因素的复杂影响。为有效应对这些挑战，文章构建了覆盖项目全生命周期的造价管控体系，提出了从投资决策阶段的科学计价与估算、设计阶段的方案优化与限额设计，到招投标阶段的竞争机制引入，乃至施工阶段的动态成本控制等一系列具体策略，旨在实现工程造价的有效管理与项目综合效益的最大化。

关 键 词： 输变电工程；造价；控制策略

Analyze The Cost Control Strategies for Power Transmission and Transformation Projects

Zheng Ping

Jieyang Mingli Electric Power Design Co., Ltd., Jieyang, Guangdong 522000

Abstract： Project cost is complexly influenced by multidimensional factors such as engineering technology solutions, natural and geographical conditions, land policies, and market price fluctuations. To effectively address these challenges, the article establishes a cost management and control system covering the entire project lifecycle. It proposes a series of specific strategies, ranging from scientific pricing and estimation during the investment decision-making phase, solution optimization and quota design during the design phase, to the introduction of competitive mechanisms during the bidding phase, and even dynamic cost control during the construction phase. The aim is to achieve effective management of project costs and maximize the overall project benefits.

Keywords： power transmission and transformation project; cost; control strategies

引言

当前，输变电工程造价管理正面临着一个复杂的局面：一方面，设备制造技术的进步与集中采购策略的应用使得核心设备成本显著降低；另一方面，土地资源紧张、环保要求提高、社会补偿标准上升以及复杂自然条件等因素，又持续推高着项目的部分建设成本。因此，深入剖析输变电工程造价的内在特点与外部影响因素，并据此制定系统化、全过程的控制策略，对于提升项目投资决策水平、优化资源配置具有至关重要的现实意义。

一、输变电工程造价特点

（一）工程成本呈现下行趋势

近年来，在变电站及相关设施的建设过程中，整体投资额度呈现出明显的逐步降低态势。这一变化主要受到多方面因素的共同推动，各类关键设备，包括开关柜、继电保护装置及配套组件的市场价格持续走低，直接拉低了项目采购支出。其次，随着电力需求的不断增长，新建变电站的工程规模逐步扩大，形成了规模效应，从而有效分摊了单位建设成本。此外，大容量主变压器在行业中的普及率不断提高，其在提升能效的同时也降低了单位容量的设备投入。在这些因素的共同作用下，变电站工程的整体造价水平得到了有效控制，并保持稳步下降的势头。

（二）关键设备市场价格波动分析

当前，随着装备制造业的持续快速发展，行业内技术迭代不断加速，各类核心设备的生产成本得到有效控制。以变电站工程中广泛使用的主变压器、组合电器及断路器为例，其市场价格近年来呈现出明显的下行趋势。面对这一市场变化，电力建设企业积极调整采购策略，在设备招标过程中通过集中采购、技术标优化及供应商协同等方式，有效应对价格波动带来的影响。这一系列举措不仅降低了项目整体采购成本，还有力增强了企业在市场竞争中的成本优势和抗风险能力，为企业的可持续发展注入了新的动力^[1]。

（三）站址获取与场地整理成本分析

在变电站建设过程中，获取土地使用权及完成场地前期整理

所需的费用，主要包括站区永久征地补偿、场地内既有构筑物及青苗等附着物的清理赔偿等多项内容。从投资结构来看，新建变电站工程中占主导地位的建筑安装工程费及设备购置费，通常可达到项目总投资的80%左右，这一比例使得项目选址在空间和条件上具有较大的弹性。在前期规划阶段，项目单位通常会主动规避涉及高额拆迁补偿的区域，从而有效控制前期土地成本，使其对项目总投资的影响保持在相对有限的范围。

二、分析影响输变电工程造价的因素

（一）工程技术要素对投资方案的影响

在输变电工程投资控制体系中，技术要素是决定造价方案是否具备科学性与适用性的核心条件。由于不同工程项目所处的地理环境和建设条件存在显著差异，其对应的技术标准与施工要求也需进行针对性调整。与一般农建项目相对标准化的建造模式不同，输变电工程在实施过程中受到多种外部条件的制约，包括但不限于地基承载力、地下水位、地形起伏等工程地质条件，以及配电装置的选型配置、进出线布置方式等电气设计方案。这些因素共同构成了项目特有的技术边界，直接关系到材料选型、施工工艺和工程量的确定，进而对投资构成的合理性与经济性产生系统性影响^[3]。

（二）场地获取成本持续攀升的驱动因素

当前，在输变电工程推进过程中，土地征用、林木清理及其他地上附着物的补偿工作，正面临日益复杂的政策环境与成本压力。一方面，随着各级政府对城乡规划区、历史文物保护区域及各类开发区管控力度的持续强化，项目选址所面临的不确定性显著增加，直接推高了前期用地获取的整体投入。另一方面，社会公众对征地拆迁的权益意识普遍提升，各地实施的房屋动迁、道路占用等补偿标准也呈现逐年上调态势，导致实际执行的补偿支出持续走高。在此背景下，输变电工程中与场地获取及清理相关的费用呈现明显上涨趋势，其在项目总投资中的占比也逐步提高。此外，为满足跨越铁路、高等级公路及既有高压线路等复杂区段的建设要求，工程中大量采用高跨设计、特殊防护等技术方案，进一步增加了线路区段的建设成本。从发展趋势来看，上述各类成本推动因素在今后一段时期内仍将持续存在，并继续对工程整体造价构成上行压力。

（三）自然地理条件对工程造价的影响

在输变电工程投资控制过程中，项目所在地的地质结构与气候环境等自然因素，对造价管理工作具有直接影响。复杂的地形地貌与特殊的气候条件不仅会显著增加施工技术难度，还会引起工程基础处理、材料运输及施工组织等方面的投入上升，从而推高整体项目管理成本。从工程结构来看，输变电项目中与地基处理、杆塔基础施工相关的费用通常占比较高，这在山区、软土地区等不良地质区域表现得尤为突出。在传统选址实践中，为降低土地征用成本，部分项目倾向于选择低洼地带作为建设场地。然而，这类地区往往面临地下水位高、地基承载力不足等工程难题，实际施工中需采取额外的排水、地基加固等技术措施，不仅

显著增加了人力与机械投入，也造成了工程造价的额外增长^[3]。

（四）市场价格波动对投资构成的传导效应

在输变电工程的投资结构中，设备购置与装置性材料支出通常占据总投资的50%以上，这使得市场价格变化成为影响项目造价的关键变量。主变压器、高压开关柜、电缆及铁塔等核心设备与材料的价格波动，会直接传导至工程总成本，形成显著的价格弹性特征。从价格影响机制来看，主要设备报价、结构性材料成本及施工辅助材料费用共同构成了价格风险的主要来源。这些要素受到多重市场因素的影响：上游大宗原材料的价格周期性调整、行业供需关系变化带来的市场溢价，以及技术迭代过程中新型设备、新材料应用引发的价格重构，都会通过供应链层层传递，最终反映在工程投资总额的变动上。这种由市场价格机制主导的成本传导路径，使输变电工程造价管理始终处于动态调整的过程中。

三、输变电工程造价的控制策略

（一）投资决策阶段的造价管控策略

1. 科学确立工程造价计价体系

构建合理的输变电工程造价计价体系，是提升投资决策阶段造价精度的关键环节。该体系的建立需遵循系统化的工作流程：首先应全面收集与整理已建项目的造价数据，深入分析其在工程技术、施工工艺及设备选型等方面的特征，形成可参照的造价数据库；其次，将拟建项目与已建项目在结构形式、场址条件、资源配置、技术方案等维度进行细致比对，识别差异因素对造价的影响；在此基础上，根据项目特性选择适用的计价模型与方法；最终通过精细化测算，形成具有较高可靠度的投资预测，为项目决策提供量化依据^[4]。

2. 强化项目投资估算管理

投资估算是在可行性研究阶段形成的项目经济评价成果，其编制涵盖多个专业领域：包括投资环境评估、市场供需分析、区位条件与竞争格局研究、项目定位策划、规划设计方案比选、建设模式与进度安排、收益预测与融资计划、财务效益评价及风险不确定性分析等。通过这九个方面的综合论证，能够筛选出最优投资方案，并从经济合理性角度判断项目实施的可行性。投资估算结论直接关系到项目能否通过决策审批，既是争取投资方支持的核心依据，也是保障项目经济效益的基础工作，需要在决策阶段给予充分重视。

（二）设计阶段的造价管控措施

1. 强化设计方案的比选与优化

工程造价的控制需要从设计源头着手，高度重视设计方案的优化比选。在确定工艺技术方案时，应立足我国现阶段发展实际，以提升投资效益为核心目标，在确保工程可靠性的基础上，积极采用经过验证的先进技术方案与成熟的新工艺、新材料。通过多方案的技术经济比较，选取既满足功能需求又具备经济合理性的最优设计方案，为后续造价控制奠定坚实基础。

2. 全面推行限额设计管理

限额设计是通过建立分层投资控制目标来实现造价管控的方

法。具体而言，初步设计阶段需严格遵循可行性研究报告批准的投资估算额度；技术设计与施工图设计阶段则不得超过初步设计审批的总概算指标。各专业设计应在确保工程使用功能完整实现的前提下，按照分配的投资限额进行方案设计，严格控制设计标准任意提高和方案的不合理变更，从而保证项目总投资目标的实现。

3. 完善设计变更管控机制

对于确需发生的设计变更，应当坚持“尽早控制、提前介入”的原则。设计变更发生的时间越早，所产生的损失和影响越小。在设计阶段进行变更，仅需调整设计图纸，尚未引发后续采购和施工费用；若在设备材料采购阶段变更，则需重新修改图纸并重新组织采购；若在施工阶段变更，除上述成本外还需承担已完工程的拆除费用，将造成较大经济损失。因此，应建立健全设计变更管理制度，尽可能将变更控制在设计初期，对涉及造价重大调整的变更，必须实行“先核算、后变更”的审批程序，确保工程造价始终处于受控状态。

（三）招投标机制在造价控制中的关键作用

招投标制度是我国建筑业与固定资产投资管理体系改革的重要成果，也是推动电力建设领域规范化发展的重要举措。在输变电工程建设中推行招投标机制，标志着建设任务的发包方式实现了从计划分配到市场竞争的根本性转变，促使工程承包模式发生质的飞跃。通过引入设计招标机制，能够有效激发设计单位的竞争意识，拓展方案比选的范围与深度。这一机制不仅有助于遴选出技术先进、功能完善、结构安全且符合电力行业技术规范与环境要求的优质设计方案，还在控制项目总投资、缩短设计周期、优化设计费用等方面发挥显著作用。更重要的是，它将市场竞争压力直接传导至设计源头，倒逼设计单位在保障安全可靠的前提下，主动进行成本优化与技术创新，摒弃冗余保守的设计，实现技术经济性的最佳平衡。设计招标通过竞争性比选，促使设计单位在方案中综合考虑技术可行性与经济合理性，从而在源头上提升工程建设的综合效益^[5]。

（四）施工执行阶段的成本管控要点

施工阶段作为项目投资控制的关键环节，具有建设规模庞大、涉及专业领域广泛、施工周期较长等特点。同时，该阶段还面临着政策法规调整、设备材料价格波动、市场供需变化等多重不确定因素的影响。为确保工程质量达标、投资效益最大化，必须在这一阶段强化全过程的造价监管，建立覆盖项目全生命周期的成本控制体系。在施工过程中，由于工程本身的复杂性及外部环境的变化，常常会出现预期之外的费用支出。对工程变更与现场签证实施规范化管理尤为关键。虽然项目实施过程中难以完全避免设计调整和现场签证，但通过建立分级审批机制和变更评估流程，可有效控制由此产生的额外成本。施工图预算的审核工作应当与工程实际进度保持同步。当发现预算指标超出既定概算时，需要从设计标准、材料选型、施工工艺等多方面进行溯源分析，并及时与项目管理团队协同调整控制目标，实现成本的动态管理。专业分包单位的选择应通过市场竞争机制择优录用，特别要防范部分特殊行业利用其专业优势制造价格壁垒。此外，项目管理团队需要深入施工一线，及时掌握现场施工条件、资源投入状况等基础数据，为造价决策提供可靠依据。

四、结束语

综上所述，输变电工程造价管理是一项贯穿项目全生命周期的动态、系统性工程。它既受益于技术进步与市场竞争带来的设备成本红利，也承受着资源环境约束与社会发展带来的外部成本压力。成功的造价控制绝非单一环节的管控，而是依赖于一个环环相扣的完整体系：在决策阶段，需夯实投资估算，确立科学的计价基础；在设计阶段，应通过方案比选与限额设计，从源头锁定成本；在招投标阶段，要充分利用市场竞争机制，优化资源获取；在施工阶段，则需强化变更管理与动态监控，应对不确定性。

参考文献

[1] 张惠玲, 崔翔, 刘芳, 等. 输变电工程造价管控全过程风险识别与策略研究 [J]. 电力与能源, 2023, 44(6): 670-673.
[2] 黄鑫杰. 造价控制在输变电工程设计阶段的探究 [J]. 数码设计 (上), 2020, 9(4): 81.
[3] 卢兴旺, 洛桑丁增. 电网建设新形势下工程造价突出问题及控制策略探析 [J]. 文渊 (小学版), 2023(5): 355-357.
[4] 杨文生, 叶宝玉, 周文奇, 等. 输变电工程造价控制指标深化研究 [J]. 中国管理信息化, 2021(6): 136-138.
[5] 贺鑫. 输变电工程项目造价管理在施工过程中的控制研究 [J]. 建筑工程技术与设计, 2022, 10(21): 91-93.

新能源光伏发电技术发展趋势与挑战研究

刘杰

中国长江三峡集团有限公司山西分公司, 山西 大同 037100

DOI:10.61369/EPTSM.2025090001

摘 要 : 在全球能源危机与环境问题日益严峻的背景下, 新能源光伏发电技术的重要性愈发凸显。其作为清洁能源的关键组成部分, 对缓解能源压力、减少环境污染具有不可替代的作用。从发展趋势来看, 高效电池技术研发、光伏组件轻量化与智能化以及光伏与其他能源形式融合发展成为主要方向。然而, 该技术也面临诸多挑战, 包括技术层面的光电转换效率提升瓶颈与储能技术配套难题, 经济层面的成本居高不下与投资回报周期长, 以及政策与环境层面的政策变动风险和土地资源限制与生态环境影响。针对这些挑战, 可通过加强技术创新合作、优化产业链降低成本以及完善政策与应对环境挑战等策略加以应对。新能源光伏发电技术对于推动能源结构转型、实现全球可持续发展意义重大, 有望在未来能源体系中占据更重要地位。

关 键 词 : 新能源; 光伏发电技术; 发展趋势; 挑战研究

Research on Development Trends and Challenges of New Energy Photovoltaic Power Generation Technology

Liu Jie

Shanxi Branch of China Three Gorges Corporation, Datong, Shanxi 037100

Abstract : Against the backdrop of escalating global energy crises and environmental challenges, renewable photovoltaic (PV) technology has become increasingly vital. As a cornerstone of clean energy solutions, it plays an irreplaceable role in alleviating energy pressures and reducing environmental pollution. Current technological trends highlight three key directions: developing high-efficiency solar cells, advancing lightweight and intelligent PV modules, and integrating PV systems with other energy sources. However, the technology faces multiple challenges including technical bottlenecks in photovoltaic conversion efficiency and energy storage infrastructure integration, persistent high costs with extended payback periods, as well as policy uncertainties, land resource constraints, and ecological impacts. To address these issues, strategies such as strengthening collaborative innovation, optimizing industrial chain cost reduction, and enhancing policy frameworks with environmental safeguards are essential. Renewable PV technology holds significant importance for driving energy transition and achieving global sustainable development, positioning it to assume a more prominent role in future energy systems.

Keywords : renewable energy; photovoltaic technology; development trends; challenge research

引言

随着全球经济的快速发展, 能源需求不断攀升, 传统化石能源的过度消耗引发了严重的能源危机与环境问题。全球气候变暖、海平面上升、极端天气频繁等现象, 使得人类面临着前所未有的生存挑战。在此背景下, 光伏发电作为一种清洁、可再生的能源解决方案, 其重要性日益凸显。光伏发电不仅能够有效减少温室气体排放, 还能缓解对有限化石能源的依赖, 为人类提供可持续的能源供应。然而, 尽管光伏发电技术近年来取得了显著进展, 但其在实际应用中仍面临诸多挑战。因此, 深入研究新能源光伏发电技术的发展趋势与挑战, 对于推动能源结构转型、实现全球可持续发展目标具有重要意义。

一、新能源光伏发电技术发展历程

（一）早期萌芽阶段

光伏发电技术起源可追溯至19世纪对光电效应的基础研究。1839年，法国物理学家埃德蒙·贝克雷尔发现光伏效应，即光照下半导体材料产生电压，为后续发展奠定理论基础。20世纪初，爱因斯坦用量子理论深入解释光电效应，推动研究。此阶段光伏技术主要在实验室研究，未实际应用。1954年，美国贝尔实验室成功研制出第一块实用化硅基太阳能电池，标志其从理论迈向实际应用，虽早期电池光电转换效率低、成本高，但为后续突破提供依据与积累。

（二）技术发展阶段

科技进步使光伏发电技术走向小规模应用。20世纪70年代，全球能源危机促使各国加大可再生能源研发投入，光伏技术迎来快速发展期。期间，电池材料和组件制造工艺创新不断。单晶硅和多晶硅电池研发提升光电转换效率、降低生产成本；薄膜太阳能电池出现，因轻量化、柔性化特点，在建筑一体化等领域前景广阔。组件制造工艺优化，如引入自动化生产线、推广模块化设计，大幅提高生产效率与质量稳定性，推动小规模商业化应用，为规模化发展打基础^[1]。

（三）规模化应用阶段

21世纪，光伏发电技术迈入规模化应用阶段，大型光伏电站广泛建设并网。全球对清洁能源需求增长及政府政策支持，使其成为能源结构转型重要部分。中国、德国等国通过补贴政策和建大规模电站，提升其在全球能源市场占比。大型电站缓解环境污染，促进电力系统去中心化，提高能源供应安全性与可持续性。此外，规模化应用影响能源市场，成本下降接近传统能源，分布式特性推动智能电网和综合能源系统发展，成为现代能源体系核心。

二、新能源光伏发电技术发展趋势

（一）高效电池技术研发方向

全球对清洁能源需求持续增长，高效电池技术成光伏发电研究重点。钙钛矿电池凭借优异光电性能与较低制作成本备受瞩目。多结电池通过叠加不同带隙材料，实现更宽光谱吸收，大幅提升光电转换效率，为大规模应用提供技术支撑^[2]。钙钛矿与硅基叠层电池结合，突破单结电池效率瓶颈，是当下研究热点之一。尽管高效电池技术在实际应用中存在稳定性、耐久性问题，但其技术进步为光伏发电未来发展筑牢根基。

（二）光伏组件轻量化与智能化趋势

光伏组件轻量化与智能化是重要发展方向。轻量化材料如聚合物基复合材料、柔性薄膜材料的应用，降低了组件重量与安装成本，提升了系统适应性与便携性。智能化技术引入提升了光伏系统运行效率与管理水平。智能跟踪系统实时监测太阳位置调整组件角度，提高发电量。基于物联网和大数据技术的监测管理系统，可实现光伏电站远程监控与故障诊断，优化维护策略，延长设备使用寿命^[3]。

（三）光伏与其他能源形式融合发展

光伏与其他能源形式互补融合是构建综合能源系统的重要途径。光伏与风能结合，能弥补发电时间和地域分布差异，形成稳

定电力输出，北方地区风光互补模式已广泛用于大型清洁能源基地建设，提高了电力供应可靠性与经济性。光伏与储能技术协同发展，可解决光伏发电间歇性与波动性问题，平滑电力输出曲线，提升电网调峰能力^[4]。此外，光伏与氢能技术结合，为能源转型提供新可能，通过光伏发电制氢实现能源长期储存与多元化利用。

三、新能源光伏发电技术面临的挑战

（一）技术层面挑战

1. 光电转换效率提升瓶颈

当前，光电转换效率的提升面临诸多限制因素，其中材料特性和电池结构是关键瓶颈。光伏电池的核心材料特性直接影响其光电转换能力，例如晶硅太阳能电池的带隙宽度限制了其对太阳光谱的利用率，从而导致理论光电转换效率无法进一步提升。此外，电池结构的设计也对效率提升构成制约，传统平面结构难以充分利用入射光子，而新型三维结构虽能提高光捕获能力，但在工艺实现上存在较大难度。因此，如何突破材料特性和电池结构的限制，成为提升光电转换效率的重要研究方向。

2. 储能技术配套难题

储能技术与光伏发电的匹配问题主要体现在成本、效率及寿命等方面。光伏发电具有间歇性和波动性，储能系统的引入可有效缓解这一问题，但目前储能技术的成本仍然较高，尤其是锂离子电池等主流储能技术，其采购、安装及维护费用显著增加了光伏发电系统的整体成本^[5]。同时，储能系统的充放电效率较低，导致能量损耗较大，进一步降低了系统的经济性。此外，储能设备的寿命问题也不容忽视，频繁的充放电循环会加速电池老化，从而影响整个光伏发电系统的长期稳定运行。

（二）经济层面挑战

1. 成本居高不下

光伏发电的成本构成主要包括设备采购、安装及维护等环节，这些因素共同导致其成本居高不下。在设备采购方面，光伏组件尤其是高效电池组件的价格虽然近年来有所下降，但仍占据较大比例的成本支出。此外，安装过程中涉及的土地租赁、基础设施建设以及人工费用也进一步推高了总体成本。维护成本同样不可忽视，光伏电站需要定期检查和维修，以确保设备正常运行，而这些费用随着电站规模的增加而显著上升，对项目的经济效益形成压力。

2. 投资回报周期长

投资回报周期的长短受到多种因素的影响，其中电价政策和市场需求是最为关键的两点。在电价政策方面，部分地区的补贴政策逐渐减少甚至取消，导致光伏发电项目的收益下降，从而延长了投资回报周期。此外，市场需求的波动性也对投资回报产生重要影响，当市场对电力的需求不足时，光伏发电项目的上网电量可能无法完全消纳，进而影响项目的现金流和盈利能力。因此，如何通过政策支持和市场调节优化投资环境，成为缩短投资回报周期的关键所在^[6]。

（三）政策与环境层面挑战

1. 政策变动风险

政策调整对光伏产业的发展具有深远影响，尤其是补贴政策

的变化和市场准入规定的调整。补贴政策的缩减或取消直接降低了光伏发电项目的经济性，使得部分企业面临经营困境，甚至可能导致行业洗牌。此外，市场准入规定的变化也可能增加企业的合规成本，例如更严格的环保标准和技术要求可能迫使企业投入更多资源进行技术升级和设备改造。因此，政策的稳定性和可预测性对于光伏产业的可持续发展至关重要。

2. 土地资源限制与生态环境影响

光伏电站的建设需要大量土地资源，这对土地资源的供给提出了较高要求，尤其是在土地资源稀缺的地区，土地成本可能成为项目的重要负担。此外，光伏电站的建设还可能对生态环境造成一定影响，例如大规模土地开发可能导致植被破坏和水土流失，而光伏组件的生产和废弃处理也可能带来环境污染问题。因此，在推进光伏电站建设的同时，如何合理规划土地资源并采取措施减少生态环境影响，成为亟待解决的问题^[7]。

四、应对新能源光伏发电技术挑战的策略

（一）加强技术创新合作

产学研合作模式是推动新能源光伏发电技术突破的重要途径。通过整合高校、科研机构与企业的资源，可以形成技术研发与产业化的良性互动，从而加速高效电池和储能等关键技术的创新进程^[8]。例如，在高效电池技术研发领域，钙钛矿电池和多结电池的研究已成为全球热点，而这些技术的商业化应用离不开产学研各方的协同努力。此外，储能技术的配套难题也需要通过跨学科、跨领域的合作来解决，尤其是在提升储能效率、降低成本以及延长使用寿命方面，技术创新合作将发挥至关重要的作用。

（二）优化产业链降低成本

优化产业链各环节是降低新能源光伏发电成本的关键措施。从原材料供应到组件制造，再到电站建设与运营，每一个环节都存在着降本增效的潜力。在原材料供应方面，应加强对硅料、银浆等关键材料的技术研发，以提高资源利用率和生产效率；在组件制造环节，可通过自动化生产和工艺改进来降低单位制造成本；而在电站建设过程中，则需注重设计方案的优化和施工流程的标准化，以减少不必要的浪费。

（三）完善政策与应对环境挑战

稳定的政策支持是新能源光伏发电技术可持续发展的保障。

政府应制定长期电价机制和产业扶持政策，以缓解投资回报周期长的问题，并增强市场信心。例如，通过明确补贴政策的方向和力度，可以有效引导资本流向光伏产业，同时促进技术进步和成本下降^[9]。此外，针对土地资源限制和生态环境影响等挑战，政策制定者需统筹规划光伏电站的布局，并推动绿色施工技术的应用，以最大限度地减少对生态环境的负面影响。与此同时，鼓励企业参与生态修复和环境保护项目，也将有助于实现经济发展与环境保护的协同共赢。

五、新能源光伏发电技术未来展望

（一）在能源结构转型中的地位

随着全球能源需求的持续增长与传统化石能源的逐步枯竭，新能源光伏发电技术在能源结构转型中的地位愈发重要。根据相关研究，光伏发电的装机容量和发电量占比将显著提升，这不仅得益于技术进步带来的成本下降，还受到政策支持与市场需求双重驱动的影响。特别是在中国，随着“碳达峰、碳中和”目标的推进，光伏发电作为清洁、可持续的能源形式，将在能源结构优化中发挥关键作用。其对传统能源的替代作用主要体现在减少对煤炭、石油等化石燃料的依赖，从而降低温室气体排放并改善生态环境质量^[10]。

（二）对全球可持续发展的意义

新能源光伏发电技术对全球可持续发展的贡献不可忽视，其在减少碳排放、推动经济发展与环境保护协同方面具有显著优势。首先，光伏发电作为一种零排放的能源形式，能够有效减少因传统能源使用而产生的温室气体排放，为应对全球气候变化提供重要支持。其次，光伏发电技术的广泛应用能够促进经济可持续发展，通过创造就业机会、带动产业链上下游发展以及降低能源成本，为经济增长注入新动力。同时，光伏发电的普及还有助于缓解能源贫困问题，特别是在偏远地区和发展中国家，为当地居民提供可靠且廉价的电力供应。最后，光伏发电与储能技术的结合将进一步推动综合能源系统的发展，提高能源利用效率并减少资源浪费，从而为实现联合国可持续发展目标提供有力支撑。

参考文献

[1] 程梓筠. 新能源光伏发电技术应用研究 [J]. 光源与照明, 2021, (2): 132-133.
[2] 王怡. 中国新能源产业高质量发展: 进展、挑战及对策 [J]. 当代经济管理, 2024, 46(8): 64-72.
[3] 张震峰. 探究新能源光伏发电技术的应用与发展前景 [J]. 人民珠江, 2024, 45(S2): 101-103.
[4] 苗青青, 石春艳, 张香平. 碳中和目标下的光伏发电技术 [J]. 化工进展, 2022, 41(03): 1125-1131.
[5] 董华展. 太阳能光伏发电发展趋势探析 [J]. 现代工业经济和信息化, 2023, 13(4): 282-284.
[6] 陆琨. 可再生能源发电中光伏系统的性能评估与优化策略 [J]. 现代盐化工, 2024, 51(1): 69-71.
[7] 李艳坤, 周荣斌. 光伏发电的现状与发展前景 [J]. 现代工业经济和信息化, 2021, 11(01): 53-54.
[8] 张博, 郭丹凝, 彭苏萍. 中国工程科技能源领域2035发展趋势与战略对策研究 [J]. 中国工程科学, 2017, 19(01): 64-72.
[9] 金秋实, 王晓, 倪依琳, 等. “双碳”背景下光伏行业发展研究与展望 [J]. 环境保护, 2022, 50(Z1): 44-50.
[10] 陈春顺. 新能源分布式光伏发电的前景、问题及对策 [J]. 中阿科技论坛 (中英文), 2024, (4): 49-52.

输电线路防雷仿真技术在电力设计中的应用研究

张威威

河源旭耀能源有限公司, 广东 河源 517000

DOI:10.61369/EPTSM.2025090002

摘 要： 输电线路防雷仿真技术融合电磁暂态与蒙特卡洛模拟，通过构建杆塔、绝缘子等模型，提升特殊地形和差异化雷电参数区域的设计精度。智能算法用于优化接地装置与避雷器配置，实现经济与可靠性平衡。该技术在沿海强风、高海拔及城市走廊等复杂场景中均有应用，为线路设计提供科学依据。

关 键 词： 输电线路；防雷仿真；智能算法

Research on the Application of Lightning Protection Simulation Technology for Transmission Lines in Electric Power Design

Zhang Weiwei

Heyuan Xuyao Energy Co., Ltd., Heyuan, Guangdong 517000

Abstract： This paper introduces lightning protection simulation technology for transmission lines. It covers the development of mathematical models based on multi-disciplinary principles, classifications and characteristics of methods including transient simulation and Monte Carlo methods, along with applications in special terrains and micro-meteorological zones. The modeling of towers, insulators, and related criterion systems is also addressed. Optimization techniques like neural networks are discussed, while current model limitations and the potential of digital twin technology are highlighted.

Keywords： transmission lines; lightning protection simulation; intelligent algorithm

引言

雷击对输电线路安全稳定运行构成严重威胁，传统设计方法难以精确应对复杂地形及多变雷电参数。为提升电力系统韧性、确保电网安全，国家能源局于2024年10月发布《电网安全风险管控办法》，强调建立全过程风险管控机制。因此，利用防雷仿真技术对输电线路进行精准设计与评估，成为满足政策要求、保障电网可靠性的关键。该技术通过精细化建模与模拟，显著提高了雷击防护措施的科学性与有效性，是现代电力设计的重要支撑。

一、输电线路防雷仿真技术概述

（一）防雷仿真技术的定义与原理

防雷仿真技术是一种通过计算机模拟等手段，对输电线路防雷相关物理过程进行建模和分析的技术。它基于电磁学、电路理论等多学科原理^[1]。该技术通过构建精确的数学模型来描述输电线路在雷击情况下的电气特性。例如，对于雷击过程，会考虑雷电流的波形、幅值和陡度等参数，以及它们与线路绝缘性能之间的复杂关联。通过模拟雷电流在输电线路中的传播路径和产生的电磁场分布，能够分析线路上的过电压和过电流情况。同时，电磁暂态仿真技术可用于模拟雷击瞬间线路中的暂态过程，包括绝缘子闪络、避雷器动作等现象，从而为输电线路防雷设计提供理论依据和参考。

（二）主流防雷仿真技术分类

输电线路防雷仿真技术主要分为暂态仿真和蒙特卡洛法等。

暂态仿真侧重于分析雷电过电压在输电线路中的暂态过程，通过精确模拟电路元件和线路参数，研究雷电冲击下的电压、电流变化特性，其结果对于理解防雷装置的动作原理和优化设计具有重要意义^[2]。蒙特卡洛法则是一种基于概率统计的方法，它考虑了雷电参数的随机性，通过大量的随机抽样模拟不同雷电场景下输电线路的防雷性能，能够更全面地评估防雷措施的有效性和可靠性，为输电线路防雷设计提供概率性的决策依据。同时，像 ATP-EMTP、PSCAD 等主流仿真软件也各有其技术特点，适用于不同的防雷仿真需求。

二、防雷仿真技术在输电线路设计中的应用场景

（一）特殊地形区域的雷电防护设计

山区/高海拔地区等特殊地形因地形复杂，雷电活动频繁且强烈，对输电线路的安全运行构成严重威胁。针对这些区域，需

依据差异化防雷设计原则开展防雷设计。通过建立杆塔接地装置优化模型,综合考虑土壤电阻率、地形地貌等因素,模拟接地装置在不同工况下的散流特性,以优化其结构和布局,降低接地电阻。同时,采用冲击接地电阻仿真计算方法,准确计算接地装置在雷电冲击下的电阻值,评估其防雷性能。这些措施有助于提高输电线路在特殊地形区域的防雷水平,保障电力系统的稳定运行^[3]。

（二）区域差异性雷电参数建模与仿真

输电线路穿越不同地理区域时,雷电活动特征(如雷电流幅值、波形、极性分布)存在显著差异,传统统一参数模型难以准确反映实际风险。针对此问题,需构建基于地理分区的雷电参数差异化仿真模型。通过统计分析历史雷击数据,结合区域地质构造(如土壤电阻率分布、矿藏影响)和气候背景(如雷暴日分布、大气电场特征),建立区域化的雷电流概率分布模型库^[4]。该模型库集成至防雷仿真平台,可为特定线路走廊选取最匹配的雷电参数集。仿真时,输入线路途经的具体地理位置信息,自动调用对应的参数模型进行雷击风险概率计算和过电压仿真分析。这种基于地理差异性的参数建模方法,显著提升了不同区域输电线路雷击风险评估的准确性,为差异化防雷策略(如绝缘水平选择、避雷器配置密度)的制定提供了更精细化的数据支撑,从而优化整体防雷资源配置效率与线路运行可靠性。

三、防雷仿真模型构建与算法优化

（一）多尺度雷电冲击仿真建模

1. 杆塔波阻抗特性建模

建立包含塔身结构、斜材分布的频变参数线路模型是杆塔波阻抗特性建模的关键。该模型需综合考虑塔身的几何形状、材料特性以及斜材的分布规律等因素。通过精确构建这些参数,可以更准确地模拟雷电波在杆塔上的传播过程。分析雷电波传播过程中的衰减特性对于理解防雷机制至关重要。在这个过程中,要考虑到波在传播过程中由于杆塔自身的电阻、电感以及电容等参数的影响而产生的能量损耗。这种衰减特性的研究有助于评估雷电对输电线路的影响程度,为防雷措施的制定提供理论依据^[5]。

2. 绝缘子闪络判据建模

构建动态电弧模型与改进先导发展模型相结合的绝缘子闪络判据体系。动态电弧模型能够更好地描述电弧的动态特性,考虑了电弧的温度、电流等因素对电弧电阻的影响,更符合实际情况^[6]。改进先导发展模型则侧重于对雷电先导发展过程的精确模拟,包括先导的起始、传播以及与绝缘子的相互作用等。将两者相结合,可以综合考虑电弧和先导发展对绝缘子闪络的影响,从而更准确地判断绝缘子是否会发生闪络。这种判据体系为输电线路防雷设计提供了更可靠的理论依据,有助于提高输电线路的防雷性能。

（二）智能算法在防雷设计中的应用

1. 神经网络参数优化技术

在防雷设计中,神经网络参数优化技术至关重要。通过合理

优化神经网络参数,可提高防雷模型的准确性和有效性。采用先进的智能算法,如遗传算法、粒子群算法等,对神经网络的权值和阈值进行优化调整^[7]。这些算法能够在复杂的参数空间中搜索到最优解,使神经网络更好地拟合防雷相关数据。同时,利用交叉验证等方法,评估模型的性能,进一步指导参数优化过程。通过不断迭代优化,神经网络能够更精准地预测防雷相关指标,为地网优化设计提供可靠依据,从而实现更科学合理的防雷设计。

2. 遗传算法驱动的防护方案迭代

遗传算法在防护方案迭代中具有重要作用。通过设定合适的适应度函数,以避雷器布置方案的经济性和可靠性为目标,对不同的布置方案进行评估。利用遗传算法的选择、交叉和变异操作,不断生成新的布置方案种群。在迭代过程中,适应度高的方案更有可能被保留和进一步优化,逐渐逼近最优的避雷器布置方案,实现经济性与可靠性的平衡。这种基于遗传算法的迭代方法能够有效处理复杂的多目标优化问题,为防雷设计提供科学合理的防护方案^[8]。

四、防雷仿真驱动下的线路设计实例分析

（一）沿海强风区输电线路设计

1. 防风偏设计联合仿真

在沿海强风区输电线路设计的防风偏设计联合仿真中,需开展导线摆动状态下的空气间隙动态校核。强风环境下导线会发生摆动,这会改变空气间隙的距离,影响线路的绝缘性能。通过精确的仿真模型,考虑风荷载、导线张力等多种因素,模拟导线的摆动轨迹,从而准确计算空气间隙的动态变化。在此基础上,提出防风偏绝缘子配置新方案。该方案应综合考虑空气间隙动态变化的结果,合理确定绝缘子的数量、位置和型号,以提高线路在强风环境下的防风偏能力,确保输电线路的安全稳定运行^[9]。

2. 台风气候雷电参数修正

在沿海强风区输电线路设计中,台风气候下的雷电参数修正至关重要。需建立台风移动路径影响下的雷电活动概率预测模型,考虑台风对雷电活动的影响机制。同时,改进传统雷击密度计算方法,综合考虑强风、湿度、地形等因素对雷击密度的影响。通过对雷电参数的准确修正,可以更精确地评估输电线路的雷击风险,为防雷设计提供科学依据,从而提高输电线路在台风气候下的防雷性能,保障电力系统的安全稳定运行^[10]。

（二）高海拔地区差异化设计

1. 空气密度修正的绝缘配合

在高海拔地区,空气密度较低,这对输电线路的绝缘配合有显著影响。由于空气密度的改变,操作冲击放电特性也发生变化。研究发现海拔梯度与操作冲击放电特性存在一定规律。基于此,提出绝缘配置海拔校正系数。该系数考虑了空气密度对绝缘性能的修正。通过对不同海拔地区的实际数据进行分析 and 模拟仿真,确定合适的校正系数值。在输电线路设计中,应用此校正系数来调整绝缘配置,确保线路在高海拔地区能够安全稳定运行,有效提高输电线路的防雷性能,降低雷击跳闸率,保障电力系统

的可靠供电。

2. 冻土地区接地网优化

在高海拔地区,由于其特殊的地理和气候条件,输电线路设计需差异化考虑。例如,空气稀薄等因素会影响线路的电气性能。而在冻土地区,接地网的优化至关重要。构建季节性冻融条件下的接地装置暂态响应模型,能够更好地了解接地装置在不同季节的性能变化。设计螺旋型立体地网结构,可增加接地面积,提高接地效果。这种结构在冻土地区能更好地适应土壤的冻融变化,减少因土壤冻融导致的接地电阻变化过大的问题,从而保障输电线路的安全稳定运行,提高输电系统的防雷性能。

(三) 城市走廊综合防雷设计

1. 建筑群屏蔽效应建模

输电线路附近的高层建筑会对其雷电屏蔽效能产生影响。在建筑群屏蔽效应建模中,需考虑建筑物的高度、间距、分布等几何特征。通过建立合适的几何模型,可模拟雷电先导与建筑物及输电线路的相互作用。例如,利用电磁仿真软件,设定建筑物的导电率、介电常数等参数,以准确反映其电学特性。同时,考虑不同天气条件下大气的电学参数变化,使模型更贴近实际情况。通过大量的仿真计算,分析不同建筑布局下输电线路的雷电屏蔽效能变化规律,为线路设计提供依据,从而优化线路走向和杆塔位置,提高输电线路的防雷性能。

2. 多回线路防雷协同设计

建立同塔多回线路电磁耦合模型是研究多回线路防雷协同设

计的关键。通过精确建模,考虑线路的各种参数,包括导线的半径、材质、间距以及杆塔的结构等。研究导线排列方式对雷电防护效果的影响时,分析不同排列方式下线路的电感、电容等电气参数的变化。例如,水平排列与垂直排列的线路在遭受雷击时,雷电波的传播特性不同。水平排列可能导致相邻导线间的电磁耦合更强,影响雷电过电压的分布。而垂直排列在某些情况下可能对雷电防护更为有利。通过仿真分析这些影响,为多回线路的合理设计提供依据,优化导线排列方式,提高线路的防雷性能,确保电力系统的安全稳定运行。

五、总结

输电线路防雷仿真技术在电力设计中具有重要应用。它能有效提升线路设计质量,通过模拟雷击过程等为设计提供科学依据。然而,现有防雷仿真模型存在一定局限性,特别是在动态气象参数表征方面,这可能影响对雷击情况的准确模拟和分析。它可实现对输电线路及其运行环境的精准映射和实时监测,为智慧电网防雷设计提供更全面、准确的数据支持和决策依据,有望进一步提高防雷设计的科学性和有效性,推动电力设计行业的发展。

参考文献

- [1] 麦晓明. 粤西气候环境下输电线路防雷策略研究 [D]. 华南理工大学, 2022.
- [2] 李建桥. 胶囊网络在输电线路故障检测中的应用研究 [D]. 安徽理工大学, 2021.
- [3] 郭红旭. 同塔双回输电线路防雷技术研究 [D]. 哈尔滨理工大学, 2021.
- [4] 吴统帅. 基于输电线路关键部件电磁暂态分析的防雷方法 [D]. 西南交通大学, 2022.
- [5] 高晓丽. 河南 220kV 输电线路综合防雷措施研究及应用 [D]. 郑州大学, 2021.
- [6] 唐学用, 梁焱, 孙斌, 等. 数字孪生技术在区域多能源系统中的应用展望 [J]. 南方电网技术, 2021, 15(5): 104-114.
- [7] 姚少荣. 防雷技术在输电线路设计中的应用 [J]. 科学与信息化, 2021(31): 49-52.
- [8] 杨岗, 姚少荣. 简述防雷技术在输电线路设计中的应用及理论依据 [J]. 商业故事, 2016, (9): 26-26.
- [9] 邱凤蓉. 线路防雷技术在输电线路设计中的运用 [J]. 引文版: 工程技术, 2014, (18): 144-146.
- [10] 周文钧. 输电线路设计中线路防雷技术的运用 [J]. 设备管理与维修, 2021, 000(016): 102-103.

电力安全监管：提升电力管理水平的关键要素分析

何达昂

广东 珠海 519000

DOI:10.61369/EPTSM.2025090003

摘 要： 阐述电力安全监管的重要性、理论基础及与电力管理的关联。分析现有监管流程的不足，包括法规执行、部门协调等问题。介绍风险分级管控等制度创新路径，以及无人机巡检等技术应用。强调专业资质认证、多维培训、动态预案管理等对提升监管水平的作用。

关 键 词： 电力安全监管；制度创新；技术应用

Electric Power Safety Supervision: Analysis of Key Elements for Enhancing Electric Power Management Level

He Da 'ang

Zhuhai, Guangdong 519000

Abstract： This paper expounds the significance of power safety supervision, its theoretical basis and its connection with power management. Analyze the deficiencies of the existing regulatory processes, including issues such as the enforcement of regulations and departmental coordination. Introduce the innovative paths of systems such as risk classification and control, as well as the application of technologies like unmanned aerial vehicle inspection. Emphasize professional qualification authentication, multi-dimensional dynamic plan management training, to enhance the level of regulatory role.

Keywords： electric power safety supervision; institutional innovation; technology application

引言

电力安全监管是电力管理的重要组成部分，对保障电力系统的安全稳定运行至关重要。我国已构建电力安全法律法规体系框架，但现有监管流程仍存在薄弱环节。随着电力行业快速发展，如2021年发布的《“十四五”电力发展规划》强调提升电力安全保障能力，电力安全监管面临新挑战。本文从制度创新、技术应用、人才培养等多方面展开研究，探讨如何提升电力安全监管水平，完善社会共治机制，拓展公众参与渠道，为电力行业的健康稳定发展提供有力支持。

一、电力安全监管的核心要素分析

（一）电力安全监管的基础理论

电力安全监管是电力管理的重要组成部分，具有法定内涵。它以系统论和风险管理理论为基础，旨在确保电力系统的安全稳定运行。系统论强调从整体出发，分析电力系统各要素之间的相互关系和相互作用，以实现系统的最优运行^[1]。风险管理理论则注重识别、评估和控制电力系统中的风险因素，预防事故的发生。安全监管与电力管理存在紧密的逻辑关联性。有效的安全监管能够规范电力企业的生产经营行为，提高电力管理水平，保障电力供应的可靠性和安全性。同时，电力管理水平的提升也有助于更好地落实安全监管措施，促进电力行业的健康发展。

（二）现行管理机制现状评估

我国已构建了电力安全法律法规体系框架，包括电力法及一系列配套法规，为电力安全监管提供了法律依据^[2]。然而，现有

监管流程仍存在薄弱环节。在法律法规执行方面，部分企业对法规理解和落实不到位，存在违规操作行为。监管过程中，各部门之间的协调配合有时不够顺畅，信息共享存在障碍，影响监管效率。从近五年事故统计来看，一些典型问题值得关注。例如，部分电力设备老化失修导致故障频发，反映出设备维护管理环节的不足；还有一些人为因素引发的事故，如操作人员违规操作、安全意识淡薄等，凸显了企业在人员培训和安全文化建设方面的欠缺。这些问题都需要在后续的电力安全监管中加以重视和解决。

二、提升管理效能的关键要素

（一）标准化制度体系建设

构建包含风险分级管控、隐患排查双重预防机制的制度创新路径，对于电力安全监管至关重要。首先要明确风险分级管控的标准和流程，依据不同的风险等级制定相应的管控措施^[3]。同

时，建立健全隐患排查机制，确保及时发现并处理潜在的安全隐患。在此过程中，需重点论证国家强制标准与行业规范的协同机制。国家强制标准为电力安全监管提供了基本的准则和底线，行业规范则可根据电力行业的特点和实际需求进行细化和补充。两者应相互配合、相互促进，共同推动电力安全监管制度的不断完善，提升电力管理水平。

（二）智能监管技术创新应用

无人机巡检、物联网感知设备部署及能源互联网平台在电力安全监管中具有重要实践应用效果。无人机巡检可快速覆盖大面积区域，精准获取电力设施的图像及数据信息，及时发现潜在安全隐患^[4]。物联网感知设备能够实时感知电力系统的各类参数，如温度、湿度、电流等，通过对这些数据的分析处理，提前预警可能出现的故障。能源互联网平台则整合了电力系统的各类信息资源，实现了数据的共享与交互，为实时监测预警提供了强大的技术支撑。这些智能监管技术创新应用有助于提升电力管理水平，保障电力系统的安全稳定运行。

三、人员素质与组织能力提升

（一）安全监管人才培养机制

1. 专业资质认证体系优化

电力安全监管领域，专业资质认证体系优化至关重要。设计覆盖注册安全工程师继续教育、特种作业人员技能认证的阶梯式培养方案是关键举措。对于注册安全工程师，继续教育能使其知识不断更新，适应电力行业快速发展带来的新安全要求。通过定期的课程学习、案例研讨等形式^[5]，提升其专业素养和解决实际问题的能力。特种作业人员技能认证方面，建立严格的考核标准和流程，确保其具备熟练的操作技能和安全意识。这种阶梯式培养方案，能根据不同岗位需求和人员层次，有针对性地提升人员素质，进而优化专业资质认证体系，为电力安全监管提供坚实的人才保障。

2. 全员安全意识培育路径

构建包含虚拟现实安全演练、事故案例情景模拟的多维培训矩阵是提升全员安全意识的有效途径。虚拟现实安全演练可让监管人员及全体员工身临其境地感受电力安全事故场景，通过模拟操作掌握正确的应对方法，提高在实际工作中的应急反应能力^[6]。事故案例情景模拟则通过对真实事故的还原和分析，使员工深刻认识到安全问题的严重性，从而增强安全意识，避免类似事故的发生。这种多维培训矩阵能够从多个角度、多个层面提升人员素质，强化组织的安全监管能力，为电力安全管理水平的提升奠定坚实基础。

（二）应急管理能力现代化建设

1. 预案动态修订机制构建

随着电力行业的不断发展，电力安全监管面临着越来越复杂的风险。为了提升电力管理水平，建立基于风险图谱的动态预案管理平台运作模式至关重要。该模式通过构建风险图谱，对电力系统可能面临的各种风险进行全面、系统的识别和评估^[7]。在此

基础上，动态预案管理平台能够根据风险的变化实时调整应急预案，确保预案的科学性和有效性。同时，平台还应具备强大的数据分析能力，以便更好地预测风险的发展趋势，为电力安全监管提供有力支持。通过这种运作模式，可以提高电力企业的应急管理能力，使其在面对突发情况时能够迅速、有效地做出反应，保障电力系统的安全稳定运行。

2. 应急资源协同配置模型

应急资源协同配置是应急管理能力现代化建设的关键环节。在电力安全监管领域，运用系统动力学方法优化跨区域电力救援资源配置体系具有重要意义。系统动力学通过分析系统内部各要素之间的因果关系和反馈回路，能够模拟不同情景下资源配置的动态变化过程。通过构建电力救援资源配置的系统动力学模型，可以明确各参与主体（如电力企业、监管部门等）在资源调配中的作用和相互关系。同时，该模型能够考虑到电力事故的复杂性和不确定性，如不同地区的电力需求差异、救援队伍的响应时间等因素。在此基础上，通过对模型的模拟和分析，可以找到最优的资源配置方案，提高电力救援资源的利用效率，进而提升电力安全监管的整体水平，保障电力系统的稳定运行^[8]。

四、多维协同保障机制创新

（一）政府监管效能提升

1. 数字化监管平台建设

随着电力行业的快速发展，构建数字化监管平台对于提升政府监管效能至关重要。应开发整合行政许可、执法检查大数据的新型监管系统架构^[9]。通过整合行政许可数据，可全面了解电力企业的准入情况，包括资质审核、经营范围等关键信息，为后续监管提供基础。同时，执法检查大数据的整合能实时掌握企业的运营状况，如安全生产措施的执行、设备维护情况等。利用先进的数据分析技术，对这些数据进行深度挖掘，能够精准识别潜在的安全风险和违规行为，从而实现提前预警和及时干预，有效提升电力安全监管的效率和质量，保障电力行业的稳定运行。

2. 信用评价体系应用

建立包含黑名单制度与联合惩戒机制的市场主体信用管理系统是信用评价体系应用的重要举措。通过设立黑名单制度，将那些违反电力安全规定、存在严重安全隐患或不良信用记录的市场主体列入其中^[10]。同时，联合惩戒机制确保这些不良主体在市场中受到多方面的限制，如招投标受限、信贷受限等。这不仅对违规主体起到了威慑作用，促使其提高自身的安全管理水平和信用意识，还能引导其他市场主体规范自身行为。这种信用管理系统能够有效整合各方资源，形成监管合力，提升政府对电力市场的监管效能，保障电力安全，促进电力行业的健康稳定发展。

（二）企业主体责任落实

1. 本质安全型电网建设

智能变电站改造中设备全生命周期管理的实施路径涉及多个关键环节。从规划设计阶段开始，需考虑设备的选型与配置，确保其符合智能变电站的技术要求和未来发展趋势。在设备采购环

节,要严格把控质量,选择可靠的供应商。安装调试过程中,应遵循规范标准,确保设备正常运行。运行维护阶段,利用先进的监测技术实时掌握设备状态,及时进行维护和检修。同时,建立完善的设备档案,记录设备从采购到报废的全过程信息。通过这些措施,实现设备全生命周期的有效管理,提高智能变电站的运行可靠性和安全性,为电力系统的稳定运行提供保障。

2.安全投入保障机制

安全生产费用的合理提取与绩效评价对于安全投入保障机制至关重要。构建动态提取模型需考虑电力企业的生产规模、设备状况、风险等级等多因素。例如,依据设备老化程度和故障率调整提取比例,以确保费用能满足实际安全维护需求。同时,绩效评价方法应涵盖安全投入后的事故发生率降低情况、安全措施的执行效果等。通过对电力企业安全投入前后的各项指标对比分析,客观评估投入的有效性。这不仅能促使企业合理安排安全费用,提高资金使用效率,还能强化企业主体责任意识,保障电力安全生产,推动电力安全监管工作的有效开展。

（三）社会共治机制完善

1.公众参与渠道拓展

电力安全监管需要创新多维协同保障机制,完善社会共治机制并拓展公众参与渠道。可设计电力设施保护有奖举报与科普教育联动的社会监督体系。通过设立有奖举报制度,激发公众参与监督的积极性,对发现电力设施破坏等安全隐患的行为及时举报。同时,开展科普教育活动,提高公众对电力设施保护重要性的认识以及对电力安全知识的了解。利用多种渠道,如社区宣传、线上教育平台等,广泛传播相关知识。这样不仅能增强公众

的安全意识,还能使公众更好地参与到电力安全监管中,形成全社会共同关注和维护电力安全的良好氛围,提升电力管理水平。

2.第三方技术服务体系

电力安全监管中第三方技术服务体系的构建至关重要。需培育涵盖安全评估、检测认证的专业化市场服务主体。这些主体应具备专业的技术能力和资质,能够为电力企业提供客观、准确的安全评估报告以及检测认证服务。专业化的安全评估可以帮助电力企业提前发现潜在安全隐患,制定针对性的整改措施。检测认证服务则确保电力设备和系统符合相关安全标准和规范。同时,政府应加强对这些市场服务主体的监管,建立健全的准入和退出机制,保障服务质量。通过完善第三方技术服务体系,促进电力安全监管的有效实施,提升电力管理水平。

五、总结

电力安全监管对于提升电力管理水平至关重要。通过对制度创新、技术创新和人才建设的研究,明确了三位一体的提升路径。制度创新为电力安全监管提供了坚实的框架和规范,确保各项工作有章可循;技术创新则为监管提供了更高效、精准的手段,如区块链技术在电力安全追溯中的应用前景广阔,可实现对电力生产、传输等环节的全程追溯,增强安全性和可靠性;人才建设是保障监管工作有效实施的核心,专业的人才队伍能够更好地运用制度和技术进行监管。同时,分级分类监管策略的提出,有助于提高监管的针对性和有效性,进一步提升电力管理水平,保障电力系统的安全稳定运行。

参考文献

- [1] 阮凡. 基于风险管控导向的电力安全监督管理体系研究 ——以 M 市为例 [D]. 南昌大学, 2023.
- [2] 郑岩岩. 煤炭企业外部雇主品牌的关键要素分析与提升策略研究 [D]. 辽宁工程技术大学, 2022.
- [3] 徐亚兰. 电力物联网系统优化关键问题研究 [D]. 电子科技大学, 2021.
- [4] 黄秀成. 纯电动汽车集成电力驱动系统效率提升分析研究 [D]. 华南理工大学, 2021.
- [5] 刘浴霜. 电网故障下并网电力电子变流器运行韧性分析及提升策略 [D]. 武汉大学, 2021.
- [6] 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.
- [7] 任志丹. 关于提升电力营销项目管理水平的思考 [J]. 科技经济市场, 2022, (11): 104-106.
- [8] 胡丛飞. “四精” 导向 提升电力营销服务管理水平 [J]. 农村电工, 2023, 31(07): 11-11.
- [9] 李靖. 全面提升电力施工企业工程管理水平策略 [J]. 低碳世界, 2024, 14(03): 124-126.
- [10] 吴燕华. 电力施工企业预算管理水平提升策略研究 [J]. 当代会计, 2023, (01): 148-150.

冬季冰冻天气对电力线路安全的影响及应对措施

王晶, 王迪

国网哈尔滨供电公司, 黑龙江 哈尔滨 150000

DOI:10.61369/EPTSM.2025090004

摘 要 : 冬季冰冻天气的出现将对电力线路运行的安全性与稳定性造成严重影响。本文针对冬季冰冻天气对电力线路安全的影响进行了系统分析, 主要有因线路覆造成的杆塔失去稳定性、因线路覆冰缺乏均匀性导致线路摇摆引发断线或者管路故障、因绝缘子覆冰致使绝缘性能下降、因气温较低使得电力设备内部材料发生损坏等。基于此, 本文站在技术、管理的角度提出了具体的应对措施: 利用覆冰监测装置、卫星遥感技术、无人机以及和气象部门建立合作关系, 对天气情况进行监测; 在设计和建设电力线路时, 选择使用具有抗冰性的设备和通过防护装置的安装, 做好线路防护工作; 借助热力融冰法、直流融冰法、机械除冰法以及无人机除冰法等及时将覆冰清除; 事先制定完善的应急预案、准备足够的应急物资, 同时进行应急演练。本研究的主要目的为保障电力线路在冬季冰冻天气下的安全、稳定运行。

关 键 词 : 冬季; 冰冻天气; 电力线路; 安全

Influence of Winter Freezing Weather on Power Line Safety and Countermeasures

Wang Jing, Wang Di

State Grid Harbin Power Supply Company, Harbin, Heilongjiang 150000

Abstract : The appearance of winter freezing weather will seriously affect the security and stability of power line operation. In this paper, the influence of winter freezing weather on the safety of power lines is analyzed systematically, such as the loss of stability of poles and towers caused by the covering of lines, the breakage of lines or pipeline failure caused by the lack of the uniformity of the covering of lines, the decline of insulation performance caused by the icing of insulators, and the damage of internal materials of power equipment caused by the low temperature. Based on this, this paper puts forward specific countermeasures from the point of view of technology and management: using icing monitoring device, satellite remote sensing technology, UAV and establishing cooperation with meteorological departments to monitor weather conditions; in the design and construction of power lines, choosing to use anti-ice equipment and installing protective devices to do a good job in line protection; removing icing in time by means of thermal icing, direct current icing, mechanical de-icing and UAV de-icing; making perfect emergency plan in advance, preparing enough emergency materials and conducting emergency drills. The main objective of this study is to ensure the safe and stable operation of power lines in winter freezing weather.

Keywords : winter; freezing weather; power lines; safety

引言

电力能源在社会发展中发挥着重要的支撑作用, 与社会正常秩序的维持、居民的正常生产与生活存在着密切的关系。冬季无论是居民供暖, 还是工业生产等对电力能源的需求量明显增加, 但冬季气温较低, 一旦出现冰冻天气很容易影响电力线路运行的安全性^[1]。一旦电力线路发生故障问题, 轻则可能造成局部地区无法正常供应电力能源, 严重影响居民的生活与生产; 重则可能造成长时间、大面积停电, 致使交通设施、通信设施以及医疗设施等无法正常运行, 对社会秩序造成较大影响。为此, 本文针对冬季冰冻天气对电力线路安全的影响进行了探析, 并提出了具体的应对措施。

一、冬季冰冻天气对电力线路安全的影响

（一）电力线路覆冰

冬季受冰冻天气的影响，电力线路很容易因为严重覆冰而发生故障。当气温下降到0℃以下，并且空气中存在有较多水汽时，雨滴从云层降落时会发生冷却，冷却的水滴与温度在0℃以下的电力线路相接触时，将快速冻结，在其表面形成薄冰层。若未能够及时处理，随着附着冷却水滴的不断增多，电力线路表面的冰层将越来越厚^[2]。这种因为水滴冷却、冻结在电力线路表面形成的冰层，又叫做雨凇。一旦电力线路严重覆冰，导线重量明显增加。当电力线路表面的冰层增加到一定厚度后，杆塔实际承受的压力高于限值，杆塔很容易发生倾斜、倒塌，严重影响周围地区的供电，给附近居民的生产、生活造成较大影响^[3]。

（二）线路在风雪中摇摆

在冬季冰冻天气中，电力线路覆冰一般缺乏均匀性。一些位置的冰层厚度较大，一些位置的冰层相对比较薄。一旦遇到大风天气，电力线路很容易因为覆冰不均匀，而在空气中舞动。当线路在风雪中摇摆，相邻导线的距离将随之不断发生变化，很可能会引发导线相间短路的故障问题^[4]。若线路摇摆比较严重，当导线承受的拉力达到限值时，将发生线路断线的事故。并且杆塔也可能受导线摇摆的影响，而发生损坏，严重情况下还可能引发倒塔安全事故，严重影响电力能源的正常供应。

（三）绝缘子性能降低

绝缘子是电力线路中不可缺少的一个部件，其可保证电力线路的绝缘性。但在冬季冰冻天气下，很容易在绝缘子表面积雪、凝露、覆冰，其将导致绝缘子的绝缘性能下降，甚至还可能致使绝缘子表面漏电^[5]。随着时间的推移，绝缘子表面泄漏的电流将随之不断增加，当增加到一定数值，将造成闪络放电，在较短的时间内释放较多的能量，易造成线路短路，引发电力故障。一旦引发闪络放电安全风险，很可能会导致多条电力线路发生故障，无法正常输送电力能源。这些安全事故的出现，除了会对当地居民的正常生活造成较大影响以外，还将增加电力企业抢修电力线路的难度。

（四）设备和密封材料损坏

冬季冰冻天气还会影响到电力设备的内部结构。其一，对于电力设备内部的金属材料，在冰冻天气很容易脆化。例如，变压器内部的绕组、铁芯，一般为金属材料，在冬季冰冻天气下，金属材料的韧性将明显下降，同时脆性增加，易出现裂纹；开关设备内部的金属部件，也可能受冰冻天气的影响脆化，操作时很容易导致金属部件断裂，致使开关设备无法正常分合^[6]。其二，电力设备的密封材料在冬季冰冻天气下，很容易发生收缩，影响其密封性。其不单单会对电力设备的安全、可靠运行造成影响，同时还可能造成更为严重的线路故障，严重影响当地电力能源的供应。

二、应对冬季冰冻天气对电力线路安全影响的有效措施

（一）精准监测冰冻天气

为了保证电力线路在冬季冰冻天气的安全运行，需事先了解线路的覆冰情况，电力企业将覆冰监测装置（如拉力传感器、气象传感器等）安装在关键线路上。当线路覆冰时拉力将随之增加，传感器监测到该信号后，可利用力学模型（如悬链线方程等），根据导线的材质、长度与直径等，通过计算获得覆冰的厚度。气象传感器的安装，则可实时获取现场的风速、温度、湿度和降水等，为工作人员预测线路覆冰提供依据。一旦监测到的环境参数超出预设阈值时，系统将自动发出预警，提示工作人员存在高危覆冰风险因素，以便工作人员及时作出处理。另外，电力企业还需借助卫星遥感技术，从宏观的视角监测电力线路。该技术的分辨率较高，可全方位的监测电力线路和周围环境，帮助工作人员及时发现线路覆冰隐患。电力企业还可利用无人机对电力线路进行巡检，其不仅更为高效与灵活，同时在恶劣天气、复杂地形区域，依然可以凭借红外线成像仪和相机实现精细化、近距离检查线路。电力企业还应加强与气象部门之间的合作，以便实时掌握气象数据^[7]。气象部门拥有先进的监测气象的设备与模型，可较高精确度的预测天气变化，一旦通过监测发现近些天可能出现冰冻天气，其将及时将天气预警信息传递给电力企业。电力企业可根据天气预报，事先准备好应对的物资，并提前做好防范工作。

（二）加强对电力线路的防护

在设计、建设电力线路时，为了减少冬季冰冻天气电力线路故障的出现，在设计阶段，需选用具有抗冰性的杆塔、导线。相对于普通杆塔来说，抗冰杆塔的稳定性和强度更高，并且可承受的荷载更大^[8]。例如，使用采用加强型钢材制作而成的杆塔，其壁厚、横截面积相对较大，即便在冰冻天气覆冰，也不容易倒塌、倾斜。具有抗冰性的导线材质与结构均较为特殊，且抗拉伸性、耐寒性较强。例如，部分抗冰性导线内部增加有增强材料（如碳纤维等），导线强度明显增加，并且其表面涂刷有特殊涂层，冰层不易在其上方附着。在加强电力线路防护时，还需注重提高线路的抗风性、抗摇摆性，可将间隔棒、防震锤安装在导线上。间隔棒可让分裂导线保持一定的距离，避免在受风力的影响，发生冲击、碰撞，防震锤则是借助自身的惯性、重量，减少导线在微风中的振动。

（三）制定应急预案

事先制定健全电力线路安全应急预案，可保障电力线路在冬季冰冻天气的安全运行。在具体制定的过程中，需明确各部门与工作人员的职责，以便在遇到突发状况时，各部门以及工作人员可快速做出正确应对，协同处理突发状况^[10]。其中，应急指挥部门的职责为制定应急预案、协调和指挥应急处置工作；抢修部门的主要职责为第一时间到达现场，抢修发生故障的电力线路；物资保障部门的主要职责为应急抢修工作提供物资，保障抢修工作的及时、顺利开展。在制定应急预案的同时，还需加快应急物

资库的建立，储备足够的电力线路应急抢修物资（如发电机、杆塔、绝缘子、电缆、防寒保暖物品、应急照明设备、抢修工具等）。并定期对这些物资进行维护与检查，保证在应急处置中可正常使用。除此之外，电力企业还需定期组织各部门以及工作人员进行应急演练。对冬季冰冻天气电力线路可能出现的故障进行模拟（如电路线路覆冰、倒塌、断线等），促使相关工作人员熟悉各种可能发生故障的应急处置流程，增强其处置突发事件的能力。并且还可利用模拟演练对应急预案进行检验，及时发现其中存在问题，并做出调整，以此保证应急预案的有效性与可行性。

三、结束语

综上所述，冬季冰冻天气的出现，将从多个维度威胁电力线路运行的安全性，一旦电力线路覆冰、线路摇摆、绝缘子绝缘性

降低、设备材料受损，均可能会导致电力线路出现故障问题，从而影响电力能源的正常供应，进而给社会秩序、居民的生活与生产带来较大影响。近些年，随着全球气候变化异常，冬季频频出现冰冻天气，这也给电力线路的安全、稳定运行带来了较大的挑战，电力企业必须根据冬季冰冻天气对电力线路安全的影响，构建健全的应对冰冻天气灾害的体系，以此为电力能源的可靠供应提供重要保障。

参考文献

- [1] 张朝晖, 彭小桐. 国网湖南电力应对低温雨雪冰冻灾害 "大考" [J]. 大众用电, 2024, 39(2): 11-12.
- [2] 骆小明, 吴晓飞. 电网冰冻灾害及风险防控措施 [J]. 今日自动化, 2023(12): 157-159.
- [3] 唐国瑛, 李丰全, 万蓉, 等. 2024年2月我国两次雨雪冰冻过程中闪电活动特征对比分析 [J]. 暴雨. 灾害, 2024, 43(4): 479-489.
- [4] 张文龙, 李承阳, 吴金玲, 等. 冻土状态下的接地系统安全参数的分析与研究 [J]. 云南电业, 2023(6): 35-39.
- [5] 刘永臣, 王超, 胡畔. 山东潍坊: 应对低温雨雪冰冻灾害 清雪除冰保畅通 [J]. 中国减灾, 2024(8): 47-49.
- [6] 邹月海. 冰冻灾害气候下对铁路供电系统故障的监控探究 [J]. 现代工业经济和信息化, 2022, 12(1): 229-231.
- [7] 《农电管理》编辑部. 全力应对寒潮 保障电力可靠供应 [J]. 农电管理, 2024(1): 前插1.
- [8] 樊灵孟, 龚博, 高锡明, 等. 低温雨雪冰冻灾害监测预警技术与业务实践 [J]. 中国减灾, 2022(23): 30-33.
- [9] 陈杰, 张迺龙, 邱刚, 等. 适用于小样本数据库的输电线路导线覆冰预测灰色模型及应用 [J]. 电力科学与技术学报, 2023, 38(6): 267-272.
- [10] 陈剑波, 唐锐, 王迁, 等. 基于改进 YOLOv8 的输电线路覆冰检测 [J]. 测控技术, 2024, 43(11): 23-30.

风电场集电线路损耗分析与降损措施研究

孙忠江

金寨华西新能源发展有限公司，安徽 六安 237000

DOI:10.61369/EPTSM.2025090005

摘 要： 风电场集电线路是电能从风机传至升压站的关键通道，其损耗关乎风电场发电效率与经济效益。本文从损耗机理入手，系统剖析了线路电阻损耗、电压降损耗及运行管理损耗的影响因素，如线路长度、导线选型、布局、负载率及运维水平等。结合行业实践，从规划设计、设备选型、运行管理三方面提出降损举措，包括合理规划线路缩短长度、选用低电阻高导电率导线、采用多分段联络布局、动态调整负载分配防过载、加强巡检与绝缘维护等。研究表明，综合应用这些措施，能有效降低集电线路损耗，提升风电场能量转化效率，为风电场经济运行提供参考。

关 键 词： 风电场；集电线路；损耗分析；降损措施

Study on Loss Analysis and Reduction Measures of Wind Farm Collector Line

Sun Zhongjiang

Jinzhai Huaxi New Energy Development Co., LTD. Lu 'an, Anhui 237000

Abstract： As the critical transmission channel for power from wind turbines to substations, wind farm collector lines significantly impact overall efficiency and economic performance. This study systematically analyzes the mechanisms of line resistance losses, voltage drop losses, and operational management losses, examining key factors including line length, conductor selection, layout design, load factor, and maintenance practices. Drawing from industry best practices, the paper proposes three-tier mitigation strategies across planning/design, equipment selection, and operational management. These encompass optimized line length reduction, adoption of low-resistance high-conductivity conductors, multi-segment interconnection layouts, dynamic load distribution control, and enhanced inspection protocols with insulation maintenance. The research demonstrates that implementing these integrated measures can effectively reduce collector line losses, improve energy conversion efficiency, and provide actionable insights for optimizing wind farm operations.

Keywords： wind farm; collector line; loss analysis; loss reduction measures

随着我国“双碳”目标的深入推进，风电作为清洁能源体系中的关键支柱，其装机规模正持续快速扩大，在能源结构转型中发挥着不可替代的作用。集电线路作为风电场内部的“电力动脉”，承担着将分散布置的风力发电机组所发电能高效、稳定地汇集并传输至升压站的核心功能，其运行效率直接影响风电场的整体发电效益。然而，当前行业研究更多聚焦于风机本体效率的提升，而对集电线路损耗的关注相对薄弱，尤其在非技术性损耗方面存在明显短板。例如，线路布局不合理导致传输距离过长、运维管理缺失引发设备异常损耗等问题，尚未得到系统性解决^[1]。本文从集电线路损耗的实际成因出发，结合风电场运行特点，探讨系统性降损措施，对提升风电场整体经济性具有重要现实意义。

一、风电场集电线路损耗的主要影响因素

（一）线路电阻损耗

电阻损耗是集电线路损耗的基础性来源，主要由导线的电阻特性与电流通过时的焦耳效应决定。导线的电阻与其材质、横截面积及长度直接相关——材质导电率越低、横截面积越小、线路总长度越长，电阻值越大，损耗越高。此外，环境温度升高会导

致导线电阻率增大，进一步加剧损耗。风电场中，风机通常分散布置于较大区域，若集电线路布局未优化，可能导致单条线路过长或分支过多，增加不必要的电阻损耗。而且，不同材质的导线在不同的湿度环境下，其表面会形成不同程度的氧化层，这也会在一定程度上增加电阻，进而影响损耗。例如，在潮湿且有一定污染的环境中，铝导线表面容易形成氧化铝薄膜，虽然氧化铝薄膜有一定的绝缘性，但在电流长期作用下，也会对电阻产生微小

影响，累积起来就会影响整体的损耗情况^[2]。

（二）电压降损耗

当电流通过集电线路时，线路阻抗会引起电压降低。若电压降超过一定阈值，不仅会影响风机的正常运行效率，还可能导致无功补偿设备频繁动作，间接增加系统损耗。电压降的大小与线路阻抗、负载电流密切相关——负载电流越大、线路阻抗越高，电压降越显著^[3]。同时，线路的电抗与线路的布局方式、导线的相间距离等因素有关。例如，当导线的相间距离较小时，电抗会相对较大，在相同的负载电流下，电压降也会相应增大。另外，风电场中风机的不同时启动和停止，会导致负载电流的波动，这种波动也会对电压降产生影响，使得电压降在一定范围内动态变化，增加了控制的难度。

（三）运行管理损耗

除物理特性导致的损耗外，运行管理不当也是重要影响因素。例如，部分风电场因运维计划缺失，长期未对线路绝缘层老化、接头松动等问题进行检测修复，导致漏电或接触电阻增大；负载分配不均可能使部分线路长期处于过载状态，进一步增加损耗；此外，集电线路的保护定值设置不合理，可能导致故障时无法及时切除异常线路，延长高损耗运行时间。另外，运维人员的专业水平和责任心也对运行管理损耗有重要影响。如果运维人员对设备的性能和运行状况了解不足，在进行巡检和维护时可能会遗漏一些潜在的问题。而且，如果运维人员缺乏责任心，不按照规定的时间和标准进行巡检和维护工作，也会导致线路故障和损耗的增加。同时，风电场的运行管理规章制度是否完善，执行是否严格，也关系到运行管理损耗的控制。例如，如果没有明确的设备检修周期和质量标准，就可能导致设备维护不到位，从而增加损耗^[4]。

二、风电场集电线路的降损措施

（一）规划设计优化：从源头降低损耗潜力

合理的规划设计是降低集电线路损耗的基础。首先，应结合风电场地形与风机分布，优化集电线路的整体布局——优先采用“辐射状+局部环网”的混合结构，在减少线路总长度的同时提升供电可靠性。在规划布局时，要充分考虑地形地貌对线路长度的影响，尽量选择直线距离较短的路径，避免因地形起伏而增加不必要的线路长度^[5]。例如，对于山地风电场，要合理规划线路的走向，避开陡峭的山坡和不稳定的地质区域，以减少线路的曲折程度。其次，科学划分集电线路的分段与联络关系，通过多分段联络设计，可在故障时快速隔离异常段，确保非故障段正常运行，减少因停电检修或故障导致的额外损耗。在划分分段时，要根据线路的长度、负载分布等因素进行合理划分，确保每个分段的负载相对均衡。最后，根据风机容量与预期负载电流，合理确定线路的路径走向，避免迂回或重复敷设，从源头缩短电能传输距离。同时，在规划路径时，要考虑未来的扩建需求，预留一定的空间，避免因后期扩建而破坏原有的优化布局。

（二）设备选型改进：提升线路传输效率

导线是集电线路的核心载体，其选型直接影响电阻损耗与电

压降。优先选用高导电率的导线材料，在相同截面积下可显著降低电阻值。在选择导线材料时，要对不同材料的导电率、机械性能、耐腐蚀性等进行综合比较，选择最适合风电场环境的导线。例如，对于沿海风电场，要考虑导线的耐腐蚀性，选择具有良好抗腐蚀性能的导线材料。根据风机最大负载电流，合理增大导线横截面积，虽会增加初期投资，但可长期降低电阻损耗。在确定导线横截面积时，要进行详细的计算和分析，考虑未来负载增长的可能性，适当留有一定的裕度。对于长距离或高负载线路，可考虑采用分裂导线或绝缘导线，进一步提升传输效率。分裂导线的采用可以降低线路的电抗，从而减少电压降，但同时也会增加一定的建设成本和维护难度。绝缘导线可以有效减少外界环境对线路的影响，如树木、鸟类等对线路的干扰，但绝缘导线的散热性能相对较差，需要进行合理的设计和选型。此外，合理配置无功补偿装置，可补偿感性负载引起的无功电流，间接降低线路的有功损耗。无功补偿装置的配置要根据线路的无功需求进行精确计算，确保补偿效果最佳，同时要定期对无功补偿装置进行维护和检测，保证其正常运行^[6]。

（三）运行管理强化：动态控制损耗增量

运行阶段的精细化管理是降损措施落地的关键。

一是建立动态负载监测系统，实时采集各线路的电流、电压数据，通过智能分析识别过载或轻载线路，动态调整风机的并网分组，避免局部线路长期过载运行。动态负载监测系统要具备高精度的数据采集和快速的分析处理能力，能够及时准确地发现线路的负载异常情况。同时，要根据监测数据建立合理的负载分配模型，实现风机的科学分组和调度^[7]。

二是加强线路的日常巡检与维护，重点检查绝缘层破损、接头氧化、金具松动等问题，并定期清理线路周边可能引发短路的异物。巡检人员要具备专业的技能和丰富的经验，能够及时发现线路的潜在问题。在巡检过程中，要详细记录线路的运行状况和存在的问题，为后续的维护和改进提供依据^[8]。

三是优化运维计划，根据季节特性调整重点——夏季高温时增加电阻监测频率，冬季大风期加强防风偏检查。在不同的季节，要根据线路的运行特点和环境变化，制定相应的运维计划。例如，在夏季高温时，要对线路的散热情况进行重点检查，确保线路的温度在合理范围内。

四是完善保护定值管理，根据线路实际参数动态调整过流、过压保护阈值，确保故障时能快速切除异常线路，减少高损耗运行时间。保护定值的调整要基于线路的实际运行数据和故障分析结果，确保保护装置能够在故障发生时准确动作，同时避免误动作^[9]。此外，要加强对运维人员的培训和管理，提高运维人员的专业水平和责任心，确保运行管理措施的有效执行。

三、降损措施的综合效益分析

综合应用上述降损措施，不仅能够显著降低风电场集电线路的损耗率，更能在多个层面带来深远且积极的综合效益。

从经济效益维度深入剖析，降低集电线路损耗具有直接而显

著的经济价值。损耗的减少意味着在能源传输过程中浪费的电能大幅降低，风电场的实际发电效率得以实质性提升。这直接反映在发电量的增加上，进而为风电场带来更为可观的发电收益，增强其在能源市场中的竞争力^[10]。同时，在项目初期，虽然优化设备选型和进行科学合理的规划设计需要投入一定的资金，但从长远视角审视，这一策略极具经济性。优质的设备选型能够降低设备在运行过程中的故障率，减少维修次数和维修成本；合理的规划设计有助于提高整个风电场的运行效率，降低后期的运维成本。而且，高品质的设备往往具有更长的使用寿命，能够减少设备更换的频率和成本，实现全生命周期内的成本优化。

从环境效益层面考量，减少集电线路损耗对于环境保护意义重大。能源在传输过程中的损耗，本质上也是一种能源的浪费，而能源生产往往伴随着碳排放。降低损耗就相当于减少了能源生产过程中的碳排放量，这与我国积极推进的“双碳”目标高度契合，有助于减缓全球气候变暖的趋势，为构建绿色、低碳的生态环境贡献力量。

此外，通过提升风电场的运行可靠性和稳定性，还能带来可观的社会效益。运行可靠性和稳定性的提高，能够有效减少因故障停机而导致的经济损失，保障风电场的持续稳定供电。同时，也能降低对电网的冲击和影响，确保电网的安全稳定运行，为社会提供更加优质、可靠的电力服务，促进经济社会的可持续发展。

四、结论

风电场集电线路损耗作为影响风电场整体经济性的关键因素，其有效控制对于提升风电场运营效益、降低度电成本具有至

关重要的意义。集电线路作为连接风电机组与升压站的核心环节，承担着将分散风能汇集并输送至电网的重要任务，但线路电阻、传输距离、运维质量等因素导致的能量损耗，直接削弱了风电场的发电效率和经济效益。因此，集电线路损耗的控制需贯穿规划设计、设备选型、运行管理全流程，通过多维度协同发力实现降耗目标。

在规划设计阶段，优化线路布局是降低传输损耗的基础。通过科学规划集电线路路径，缩短风电机组至升压站的传输距离，可显著减少线路电阻损耗。同时，结合地形地貌和风电场布局特点，采用环形或辐射状拓扑结构，避免线路迂回和交叉，进一步提升传输效率。在设备选型环节，优选高导电率导线是降低电阻损耗的核心措施。相较于普通铝绞线，钢芯铝绞线或铝合金导线具有更低的电阻率和更高的载流能力，可有效减少线路发热和能量损耗。

运行管理阶段，强化运维质量是减少异常损耗的关键。通过定期巡检、红外测温、局部放电检测等手段，及时发现并处理线路接头松动、绝缘子污损、树障等隐患，避免因设备故障引发额外损耗。同时，建立集电线路健康档案，利用大数据分析技术挖掘损耗规律，为运维决策提供数据支撑。

未来，随着智能电网技术的深入推广，数字孪生、在线监测等数字化手段将为集电线路损耗控制注入新动能。通过构建集电线路数字孪生模型，模拟不同工况下的损耗特性，可实现损耗的精准预测；结合物联网传感器实时采集线路电流、电压、温度等参数，动态调控无功补偿装置和运行方式，可实现损耗的动态优化，为风电场高效运行提供更强大技术保障。

参考文献

- [1] 龙德海. 降低感城风电场综合损耗的探讨 [J]. 中国高新技术企业, 2013, (13): 130-131.
- [2] 时靖博. 有效降低风电场 35kV 集电线路跳闸率技术探析 [J]. 电力设备管理, 2024, (24): 135-137.
- [3] 郭鹏, 刘文颖, 但扬清, 等. 大规模风电接入电网的无功协调降损方法 [J]. 系统仿真学报, 2017, 29(01): 190-199.
- [4] 田栋栋. 风电场输变电系统中的损耗分析及节能对策研究 [J]. 节能, 2024, 43(11): 42-44.
- [5] 郭鹏. 风电集群接入电网的荷—网—源协调降损控制方法研究 [D]. 华北电力大学 (北京), 2017.
- [6] 丁旺, 魏立明. 基于风功率预测对风电场并网稳定性影响分析 [J]. 日用电器, 2020, (05): 32-35.
- [7] 许晓艳, 石文辉, 李岩春, 等. 风电场集中接入对区域电网的影响分析 [J]. 中国电力, 2009, 42(01): 93-97.
- [8] 林少鹏. 风电场集电线路保护研究与孤网运行状态分析 [D]. 昆明理工大学, 2021.
- [9] 党向东. 风电场集电线路故障原因分析及预控措施 [J]. 电工技术, 2023, (04): 30-32.
- [10] 吴益航. 风电场集电线路保护配合优化策略探析 [J]. 中国战略新兴产业, 2024, (32): 91-93.

基于实时 IV 测试的光伏电站发电量预测方法

郭杰

华电甘肃能源有限公司, 甘肃 兰州 730300

DOI:10.61369/EPTSM.2025090006

摘 要： 基于实时 IV 测试的光伏电站发电量预测方法通过分析组件的电流-电压特性曲线（IV 曲线），结合环境参数（辐照度、温度）进行发电量预测。其核心优势在于能精准评估组件在不同光照和温度条件下的最大输出功率，从而提升预测精度。实时 IV 测试的光伏电站发电量预测方法与传统方法相比，在精度和适应性上具有显著优势。传统方法受环境因素影响较大，而实时 IV 测试通过动态数据采集和算法优化，能更精准地预测发电量波动。

关 键 词： 实时 IV 测试；光伏电站；发电量预测方法

A Method for Predicting The Power Generation of Photovoltaic Power Stations based on Real-Time IV Testing

Guo Jie

Huadian Gansu Energy Co., Ltd., Lanzhou, Gansu 730300

Abstract： The power generation forecasting method for photovoltaic power stations based on real-time IV testing predicts power generation by analyzing the current-voltage characteristic curves (IV curves) of the modules, combined with environmental parameters (irradiance and temperature). Its core advantage lies in its ability to accurately assess the maximum output power of the modules under varying light and temperature conditions, thereby enhancing forecasting accuracy. Compared to traditional methods, the real-time IV testing-based power generation forecasting method for photovoltaic power stations offers significant advantages in terms of accuracy and adaptability. Traditional methods are heavily influenced by environmental factors, whereas real-time IV testing, through dynamic data collection and algorithm optimization, can more precisely predict fluctuations in power generation.

Keywords： real-time IV testing; photovoltaic power station; power generation forecasting method

光伏组件 IV 测试基于负载扫描法实现电流-电压特性曲线的实时采集，通过电子负载模块模拟不同负载条件，同步采集组件输出电流与电压数据，最终生成 IV 曲线并计算关键参数。

一、基于实时 IV 测试原理与数据采集

IV 测试仪通过电压扫描与电流同步测量技术，结合高精度传感器与自动化控制，实现光伏板或半导体器件的电流-电压特性曲线（IV 曲线）的精准测量。其核心原理包括：光电效应与电路测量结合：光伏板在光照下产生光生电流，测试仪通过施加外部电压（从 0V 到开路电压 V_{oc} ），同步记录每个电压点的电流值，利用高精度电流传感器（如电流放大器+测量电阻）捕捉微小电流变化。负载扫描法：通过电子负载模块对组件施加连续可变负载，采集电流-电压数据并拟合生成 IV 曲线，关键参数包括短路电流（ I_{sc} ）、开路电压（ V_{oc} ）、最大功率点（ P_{max} ）及填充因子（FF）。数据采集流程与技术特点，自动化扫描：测试仪

通过电子负载逐步调整电压，同步采集电流数据，确保曲线平滑性与参数准确性。环境参数修正：部分仪器集成辐照度与温度传感器，将数据修正至标准测试条件（STC：1000W/m²、25°C、AM1.5 光谱）。高精度测量：采用欧姆定律与半导体物理特性，通过可控电压信号（直流/交流/脉冲）实时记录电流-电压关系，适用于二极管等器件的 IV 特性分析。应用与设备示例，便携式 IV 测试仪（如水境 SJ-IV2）：支持单块组件/组串的快速检测，一键导出数据，配备高压隔离电源与修正模型数据库，适用于户外复杂场景。半导体测试：IV 自动曲线量测仪通过脉冲电压测试，捕捉器件的反向击穿特性等关键参数，为半导体产业提供战略决策支持。

二、实时 IV 测试的预测方法与传统预测方法的对比

1. 理论基础与数据来源, 实时 IV 测试: 基于光伏组件的电流-电压 ($I-V$) 特性曲线, 通过负载扫描法直接采集组件的短路电流 (I_{sc})、开路电压 (V_{oc})、最大功率点 (P_{max}) 等参数, 结合辐照度和温度等环境数据, 动态修正发电量预测模型。其数据来源于实际组件的实时性能表现, 避免了理论假设的误差。传统方法: 依赖数值天气预报和统计模型, 通过历史发电数据或物理模型 (如组件标称功率、理论转换效率) 推算发电量。例如, 部分方法假设辐照量符合正态分布, 但实际测试显示其与理论高斯分布曲线偏差显著 (误差达 32.3%)。

2. 预测精度与误差, 实时 IV 测试: 通过高精度传感器 (电流测量误差 $\leq \pm 0.5\%$, 电压 $\leq \pm 0.2\%$) 和动态修正模型, 可精准定位组件隐裂、热斑等故障, 预测误差显著降低。例如, 某案例中实测日发电量 ($0.515\text{Kw} \cdot \text{h}$) 与理论值 ($0.761\text{Kw} \cdot \text{h}$) 的误差由 32.3% 缩小至可控范围。传统方法: 受限于气象预测的准确性和组件性能的静态假设, 多云或阴雨天气下均方根误差可达 5%~24%, 且无法实时反映组件衰减或遮挡问题。

3. 适用场景与运维价值, 实时 IV 测试: 适用于新建电站或运维阶段, 无需历史数据支持, 可快速诊断组件性能衰减 (如填充因子 FF 下降)。便携式设备 (如 SJ-IV2) 支持现场检测, 提升运维效率。传统方法: 更依赖长期历史数据, 适合已稳定运行一年的电站, 但对突发天气变化 (如云层遮挡) 响应滞后。技术发展趋势, 混合方法: 结合物理模型与实时 IV 测试数据, 通过统计校正进一步提升预测精度, 尤其适用于辐照和温度监测完善的新建电站^[1]。智能分析: 高端 IV 测试仪集成云端数据同步功能, 生成动态性能报告, 推动预测模型从“静态计算”向“动态优化”演进。实时 IV 测试通过直接捕捉组件实际性能, 解决了传统方法因理论假设和气象误差导致的预测偏差问题, 尤其在故障诊断和短期预测中优势显著。而传统方法在数据积累充足时仍具成本优势, 未来两者融合或成为主流方向。

三、预测模型构建流程

1. 数据预处理: 实时 IV 测试的光伏电站发电量预测模型构建流程中, 数据预处理是关键环节, 需结合 IV 曲线特性与环境参数进行多维度处理。数据采集与清洗, IV 曲线数据获取: 通过 IV 测试仪采集组件的短路电流 (I_{sc})、开路电压 (V_{oc})、最大功率点 (P_{max}) 等参数, 测试速度需 ≤ 2 秒以保证实时性, 电流/电压测量精度应 $\leq \pm 0.5\%$ 。环境参数同步记录: 需同步采集辐照度 (精度 $\leq \pm 5\%$) 和组件温度 (精度 $\leq \pm 1^\circ\text{C}$), 用于数据标准化修正。异常值剔除: 通过 3σ 原则或箱线图分析识别因阴影、热斑等导致的异常 IV 曲线, 例如填充因子 (FF) 显著低于 75% 的数据需标记。数据标准化与特征提取, STC 条件转换: 将实测数据修正至标准测试条件 (STC: $1000\text{W}/\text{m}^2$ 、 25°C 、AM1.5 光谱), 消除环境波动影响。特征工程: 从 IV 曲线提取关键特征, 包括: 动态参数: I_{sc} 、 V_{oc} 、 P_{max} 、FF 及曲线斜率变化率; 形态特征:

曲线台阶、拐点等异常形态, 用于诊断隐裂或二极管故障。数据融合与增强, 多源数据对齐: 将 IV 测试数据与气象站辐照度、温度数据时间戳对齐, 采用线性插值处理采样频率差异。生成衍生特征: 如计算性能比 ($PR = \text{实际功率} / \text{理论功率}$)、温度修正系数 (温度每升高 1°C , V_{oc} 下降 $2-3\text{mV}$)。数据划分与验证, 时序分割: 按 7:2:1 划分训练集、验证集和测试集, 确保季节性分布均衡 (夏季高辐照与冬季低辐照数据均需覆盖)。

2. 故障诊断: 基于 IV 曲线测试的光伏发电量预测与故障诊断需融合实时数据采集、环境参数修正及智能算法分析, 其核心流程如下: 数据采集与 IV 曲线生成, 通过 IV 曲线测试仪对光伏组件进行动态负载扫描, 采集电流-电压数据并生成 IV 特性曲线。测试仪需同步记录辐照度 ($100-2000\text{W}/\text{m}^2$) 和组件温度 ($-20-80^\circ\text{C}$), 数据精度要求: 电流 $\leq \pm 0.5\%$ 、电压 $\leq \pm 0.2\%$ 、辐照度 $\leq \pm 5\%$ 、温度 $\leq \pm 1^\circ\text{C}$ 。关键参数提取与标准化, 从 IV 曲线中提取短路电流 (I_{sc})、开路电压 (V_{oc})、最大功率点 (P_{max}) 及填充因子 (FF) 等参数, 并修正至标准测试条件 (STC: 辐照度 $1000\text{W}/\text{m}^2$ 、温度 25°C)。例如, 温度每升高 1°C , V_{oc} 下降 $2-3\text{mV}$, 需通过温度传感器实时校准。预测模型构建, 输入特征: 结合 IV 参数、环境数据 (辐照度、温度、湿度) 及历史发电量数据。算法选择: 采用混合模型 (如 TDE-SO-AWM-GRU), 通过时变数据增强 (TDE) 提升特征表现力, 蛇优化算法 (SO) 优化超参数, 自适应权重模块 (AWM) 动态调整输入权重。训练与验证: 利用光伏电站历史数据训练模型, 并通过滚动预测 (如 15 分钟更新) 验证精度。故障诊断与预测性维护, 异常检测: 对比实测 IV 曲线与标准曲线, 识别隐裂 (I_{sc} 下降)、热斑 (FF 降低) 或串联电路故障 (V_{oc} 异常)。智能运维: 集成专家系统或机器学习算法, 结合 IV 测试数据与物联网传感器, 实现故障定位与维护建议生成。系统集成与优化, 将模型嵌入光伏电站智能运维平台, 支持边缘计算实时处理, 并通过云计算优化长期预测策略。技术挑战与趋势, 数据质量: 需高精度传感器减少环境干扰。算法泛化: 适应不同组件类型与气候条件。实时性: 提升测试速度 (单次 ≤ 2 秒) 以支持大规模电站巡检。通过上述流程, IV 测试数据可精准支撑发电量预测与故障诊断, 提升光伏电站运维效率。

3. 功率预测: 数据采集与预处理, IV 曲线实时测试, 通过 IV 测试仪采集组件的电流-电压特性曲线, 同步记录辐照度、温度等环境参数。测试需覆盖全工作电压范围 ($0-V_{oc}$), 并确保数据采集频率与负载变化速率匹配, 避免曲线失真。数据清洗与修正, 对异常数据 (如飞鸟遮挡、云层干扰) 采用 KNN 插值法处理, 并将测试数据修正至标准测试条件 (STC: 辐照度 $1000\text{W}/\text{m}^2$ 、温度 25°C)。特征工程与模型输入, 关键参数提取, 从 IV 曲线中提取短路电流 (I_{sc})、开路电压 (V_{oc})、最大功率点 (P_{max}) 及填充因子 (FF) 等核心指标。时序特征增强, 结合辐照度、温度、湿度等气象数据的时序性, 通过时变数据增强 (TDE) 技术重构输入矩阵, 提升模型对非线性特征的捕捉能力。预测模型构建, 混合模型选择, 物理模型: 基于组件物理特性 (如电池板效率、逆变器转换损耗) 建立基础预测框架。统计

模型：采用 LSTM、GRU 等时序模型学习历史数据规律，或通过 XGBoost 等集成算法优化特征权重。动态优化，引入蛇优化算法（SO）调整模型超参数，结合自适应权重模块（AWM）动态分配气象参数与 IV 特征的预测权重。验证与部署，误差分析，对比传统理论预测（如高斯分布模型）与实时 IV 测试结果，验证模型误差（如某案例中误差从 32.3% 降至 5% 以下）。系统集成，将模型嵌入光伏电站功率预测系统，通过气象数据处理服务器实时接收 IV 测试数据，并输出短期（0~24h）及超短期（0~4h）发电量预测。技术优势，高精度：实时 IV 测试直接反映组件实际状态，避免传统理论模型因环境波动导致的偏差。适应性：混合模型兼顾物理可解释性与数据驱动优势，适用于新建及存量电站。

四、应用场景与局限性

1. 应用场景。电站运维与故障诊断，通过实时 IV 曲线测试，可快速定位组件隐裂、热斑、功率衰减等故障，结合发电量预测模型，优化运维策略。例如，便携式 IV 测试仪可在 1~2 天内完成 1MW 电站的检测，显著提升效率。生产质量控制，在组件生产环节，IV 测试用于筛选合格产品，确保性能符合标准。通过实时数据与预测模型联动，可动态调整生产工艺^[2]。项目前期评估与验收，测试不同型号组件的 IV 特性曲线，结合发电量预测模型，评估项目经济性，并为验收提供量化依据。智能电网调度，短期发电量预测（0~24 小时）依赖 IV 测试数据修正模型，辅助电网平衡光伏波动性，降低备用成本。

2. 局限性。环境依赖性，IV 测试需同步采集辐照度、温度等参数，但户外环境波动可能导致数据偏差，需通过 STC（标准测试条件）修正。设备精度限制，低精度测试仪（电流误差 $> \pm 0.5\%$ ）会影响预测模型输入数据的可靠性，尤其对高效组件的细微衰减难以捕捉。实时性挑战，超短期预测（0~4 小时）需高

频 IV 数据更新，但大规模电站的逐组件测试耗时较长，可能无法满足分钟级调度需求。模型适配性，物理方法（如基于组件参数的模型）对新建电站适用，但统计方法（如神经网络）需历史数据支持，两者混合应用时可能面临校准复杂度。

五、技术演进方向

1. IV 测试数据驱动预测模型升级。动态参数修正：通过 IV 曲线测试仪实时采集组件的短路电流（ I_{sc} ）、开路电压（ V_{oc} ）及最大功率点参数（ P_{max} ），结合辐照度与温度传感器数据，构建动态修正模型，将预测误差从传统方法的 3%~11% 降低至 1%~3%。故障特征嵌入：利用 IV 曲线形态诊断隐裂、热斑等故障，通过神经网络将异常特征量化为预测模型的衰减因子，提升长期预测精度。

2. 混合预测算法的创新应用，物理-统计混合模型：基于 IV 测试的物理参数（如填充因子 FF）建立基础模型，再通过历史发电数据采用布谷鸟算法或果蝇优化算法（FOA）进行动态校正，适用于新建电站的快速建模。小波神经网络融合：结合 IV 曲线的时序波动特性，采用小波分解提取特征频段，优化 RBFNN 等神经网络的结构，解决传统方法在阴雨天气下的局部最小问题。

3. 边缘计算与实时性提升。便携式设备集成：如 SJ-IV2 测试仪通过一体式封装技术实现现场 IV 数据采集，结合边缘计算模块实现 15 分钟级超短期预测滚动更新。高压隔离电源设计：保障测试仪在复杂电网环境下的稳定性，为预测系统提供高精度实时数据源。

总之，未来技术将进一步聚焦 IV 测试与 AI 算法的深度耦合，例如通过生成对抗网络（GAN）模拟极端天气下的 IV 曲线变异，提升预测鲁棒性。

参考文献

[1] 张华, 基于实时 IV 测试的光伏电站发电量预测方法探讨 [J]. 太阳能. 2011, (1):39-40

[2] 李浩宇, 关于实时 IV 测试的光伏电站发电量预测方法分析 [J]. 气候变化研究进展. 2011, (2):26-27.

火电厂智能监盘场景下基于深度迁移学习的设备故障诊断与运行风险评估方法

高晓东, 刘彦飞, 赵路, 董栋

国能山西河曲发电有限公司, 山西 忻州 036500

DOI:10.61369/EPTSM.2025090007

摘 要 : 火电厂作为能源供应的核心环节, 其设备运行的安全性与稳定性对保障电网可靠性至关重要。随着电力系统智能化进程的加速, 传统监盘模式在复杂工况下对设备异常信号的捕捉存在滞后性、诊断不精准等问题, 导致机组负荷波动、发电效率降低, 甚至引发系统故障, 造成重大经济损失与安全隐患。现有故障诊断方法多依赖专家经验或单一模型, 难以应对设备老化、工况变化导致的特征漂移问题, 而多模态数据融合技术虽能拓展监测维度, 但尚未与深度迁移学习框架深度结合, 限制了其在跨机组、跨工况场景下的适应性。因此, 构建基于深度迁移学习的设备故障诊断与运行风险评估体系, 成为提升火电厂智能化运维水平的关键需求。

关 键 词 : 火电厂智能监盘; 深度迁移学习; 设备故障诊断; 运行风险评估

Equipment Fault Diagnosis and Operation Risk Assessment Method based on Deep Transfer Learning in Intelligent Monitoring Scenario of Thermal Power Plant

Gao Xiaodong, Liu Yanfei, Zhao Lu, Dong Dong

China Energy Shanxi Hequ Power Generation Co., LTD. Xinzhou, Shanxi 036500

Abstract : As the core link of energy supply, the safety and stability of thermal power plant equipment operation are very important to ensure the reliability of power grid. With the acceleration of intelligent power system, the traditional monitoring mode has problems such as lagging detection of abnormal signals and inaccurate diagnosis under complex working conditions, which leads to unit load fluctuation, power generation efficiency reduction, and even system failure, resulting in heavy economic losses and safety risks. Existing fault diagnosis methods mostly rely on expert experience or a single model, which is difficult to deal with the problem of feature drift caused by equipment aging and working condition changes. Although multimodal data fusion technology can expand the monitoring dimension, it has not been deeply combined with the deep transfer learning framework, which limits its adaptability in cross-unit and cross-working condition scenarios. Therefore, the construction of equipment fault diagnosis and operation risk assessment system based on deep transfer learning has become a key requirement to improve the intelligent operation and maintenance level of thermal power plants.

Keywords : smart monitoring of thermal power plants; deep transfer learning; equipment fault diagnosis; operational risk assessment

引言

随着电力系统智能化进程的加速, 火电厂作为能源供应的核心环节, 其设备运行的安全性与稳定性成为保障电网可靠性的关键。智能监盘技术作为实现设备状态实时监测与异常预警的重要手段, 通过整合多源数据与智能算法, 显著提升了机组运行管理的精细化水平。在实际运行中, 诸如安庆电厂2号机大机5号高调门波动事件等典型故障案例表明, 传统监盘模式仍存在对复杂工况下设备异常信号的捕捉不及时、诊断不精准等问题, 导致机组负荷波动幅度达 $\pm 12\text{MW}^{[1]}$, 严重影响发电效率与安全性。此类问题凸显了构建智能化故障诊断与运行风险评估体系的紧迫性。

一、基于深度迁移学习的设备故障诊断方法

（一）迁移学习策略选择

在火电厂智能监盘场景下，设备故障诊断面临数据不足、工况复杂以及跨机组特征差异显著等挑战。迁移学习策略的选择需综合考虑数据特征、领域差异和模型泛化能力，以实现有限数据条件下的高精度诊断。持久同源深度元迁移学习（PHDMTL）通过振动数据的条形码图生成技术，能够提取故障的拓扑特征，从而构建多任务学习框架下的预训练模型。该策略在数据量有限时，通过元学习机制提升模型的泛化能力，特别适用于火电厂设备因维护周期或传感器限制导致的样本稀缺场景。

针对多源域数据分布差异问题，深度流形迁移学习通过特征空间的流形对齐，将源域与目标域的几何结构进行映射，有效缓解旋转机械跨机组诊断的性能退化。例如，变分模态分解结合深度迁移学习的方法，通过信号分解降低噪声干扰，并利用迁移网络捕捉不同机组间的共享特征，从而在故障模式迁移过程中提升诊断鲁棒性^[2]。此外，多尺度卷积类内迁移学习策略通过设计可调节的卷积核尺寸，能够自适应提取轴承故障信号中的多尺度特征，适用于火电厂中高精度旋转设备的复杂振动模式分析。

（二）模型训练与优化

在火电厂智能监盘场景下，基于深度迁移学习的设备故障诊断模型的训练与优化需系统性地整合数据处理、网络架构设计及训练策略。数据预处理阶段，原始运行数据需经过特征归一化和缺失值插补，以消除不同传感器信号间的量纲差异并确保数据完整性。针对火电厂工况复杂且样本分布不均衡的问题，采用过采样与数据增强技术扩展故障样本库，例如通过时间序列插值生成伪故障数据，同时结合频域变换增强信号特征的可辨识性^[3]。此外，借鉴多保真度数据利用策略，利用历史维护记录构建低保真仿真数据集进行模型预训练，随后通过实际运行中的高保真实时监测数据进行参数微调，有效缓解高保真样本不足导致的过拟合风险。

模型训练流程遵循迁移学习框架，首先选取预训练的卷积神经网络（CNN）作为基础架构，其卷积层参数通过 ImageNet 等通用数据集完成初始化。针对火电厂设备振动、温度等时序信号的特殊性，对顶层全连接层进行结构调整，增加注意力机制模块以强化关键特征的提取能力。在参数优化阶段，采用自适应矩估计（Adam）优化器，设置初始学习率 0.001 并引入余弦退火学习率衰减策略，通过动态调整梯度更新步长平衡收敛速度与稳定性^[4]。为解决模型在跨机组迁移时出现的域偏移问题，引入最大均值差异（MMD）正则化项约束源域与目标域特征分布，同时采用早停法监控验证损失曲线以防止过拟合。

二、基于深度迁移学习的运行风险评估方法

（一）风险评估模型设计

基于深度迁移学习的运行风险评估模型采用分层架构设计，通过融合多源异构数据特征与领域知识迁移能力实现风险动态量

化。模型整体分为数据预处理、特征提取、迁移学习适配、风险评估四个核心模块，其中特征提取网络基于改进的卷积神经网络（CNN）构建，采用多尺度卷积核设计以捕捉不同时间窗口的设备状态特征。输入层接收来自火电厂 SCADA 系统的多维时序数据，包括主设备运行参数、环境监测指标及历史故障记录，通过标准化处理和缺失值插补完成数据清洗。特征提取模块采用残差连接结构缓解深度网络梯度消失问题，通过堆叠 3 组卷积 - 池化单元逐层抽象高阶特征，最终生成设备状态的紧凑特征向量。

迁移学习模块采用领域对抗适应（Domain Adversarial Neural Network, DANN）策略，构建共享特征提取器与领域分类器的双网络结构。共享层提取的设备状态特征同时输入到风险评估任务分支和领域判别器中，通过最大化领域分类损失与最小化风险预测损失的对抗训练过程，强制特征空间消除源领域（历史故障数据）与目标领域（实时运行数据）的分布差异^[5]。为适应火电厂设备运行工况的动态变化特性，设计动态权重调节机制，根据实时数据与预训练数据的统计距离动态调整对抗损失权重，提升跨工况迁移的鲁棒性。

（二）风险评估结果分析

在火电厂智能监盘场景下，基于深度迁移学习的运行风险评估结果需要结合设备工况特征、历史数据规律及领域知识进行系统性分析。评估结果的解读需遵循定量与定性相结合的原则，首先通过模型输出的概率分布或风险评分量化设备状态的异常程度，同时结合机组运行参数的时序变化特征进行多维度关联分析。例如，针对汽轮机叶片振动异常风险，模型输出的高风险概率需与振动频率谱图、负荷波动曲线及润滑油温参数进行交叉验证，以排除瞬时干扰或传感器误差导致的误判。

风险等级划分是结果分析的关键步骤。基于迁移学习模型的输出结果，可采用动态阈值法将风险划分为预警、告警和紧急三个等级。阈值的设定需结合领域专家经验与统计学方法，例如通过历史故障案例的分布特征确定预警阈值，利用敏感性分析优化告警阈值的置信区间。此外，针对不同设备类型的风险特征差异，需建立差异化评估标准。例如锅炉受热面管壁温度的风险阈值需综合考虑燃料种类、燃烧效率及环境温度变化的影响，而发电机绝缘系统的风险评估则需关注湿度、振动及局部放电参数的耦合效应^[6]。

三、实验与分析

（一）实验方法与步骤

本研究实验设计围绕深度迁移学习框架在火电厂智能监盘场景下的设备故障诊断与运行风险评估展开，实验流程严格遵循数据采集、预处理、模型构建与训练、结果验证的标准化流程。实验数据来源于某大型火力发电厂 SCADA 系统近五年历史工况数据，包含锅炉、汽轮机、发电机等核心设备的温度、压力、振动、负荷等多源时序特征参数，同时整合了人工巡检记录与故障报告形成标注样本集。实验数据集按 7:1:2 比例划分为训练集、验证集和测试集，以确保模型泛化能力的客观性评估。

数据预处理阶段采用多阶段特征清洗与标准化策略：首先通过滑动窗口算法对原始时序数据进行异常值检测，利用 3σ 准则剔除超出合理范围的离散点；其次采用线性插值法修复因设备故障或通信中断导致的缺失数据片段；最后对连续特征进行 Z-Score 标准化处理，并通过小波包分解技术将时域信号转换为频域特征矩阵，以增强模型对非线性故障模式的捕捉能力^[7]。为解决样本类别不平衡问题，引入 SMOTE 过采样方法对故障样本进行合成扩展，使各类别样本比例控制在 $\pm 5\%$ 的差异范围内。

（二）实验结果与对比分析

本研究采用某大型火力发电集团提供的脱敏数据集开展实验验证，数据集涵盖汽轮机、锅炉、发电机等关键设备的温度、压力、振动等多维度传感器数据，时间序列采样频率为 1Hz，包含正常工况与 21 类典型故障样本。实验采用 5 折交叉验证策略，训练集与测试集按 7:3 比例划分。为验证模型在小样本场景下的泛化能力，特别设置子实验组仅使用 10% 的标注数据进行模型训练。

模型性能评估采用准确率（Accuracy）、召回率（Recall）、F1 分数及 AUC-ROC 曲线综合评估。迁移学习框架采用 ResNet-50 作为特征提取器，在 ImageNet 数据集上进行预训练后，针对目标设备数据进行微调。实验结果表明，基于深度迁移学习的故障诊断模型在完整数据集上取得 92.7% 的平均分类准确率，显著高于传统支持向量机（SVM）的 85.3% 和随机森林（RF）的 88.1%。在召回率方面，本模型对转子振动异常、轴承磨损等关键故障的检测达到 95.2%，较传统方法提升 6.8 个百分点，尤其在汽轮机叶片裂纹等低频故障的识别中，召回率从 78.4% 提升至 91.6%^[8]。

四、结论

本研究针对火电厂智能监盘场景下的设备故障诊断与运行风险评估需求，提出了基于深度迁移学习的多维度分析方法。通过构建跨机组特征迁移框架，有效解决了传统方法在小样本条件下模型泛化能力不足的问题，为燃煤机组核心设备的智能运维提供了新的技术路径。研究创新性地将深度卷积神经网络与迁移学习相结合，设计了具有自适应特征融合机制的双流网络架构，实现了不同机组运行数据间的知识迁移。实验表明，该方法在汽轮机轴承故障诊断任务中达到 96.8% 的识别准确率，较传统方法提升 12.3 个百分点，验证了模型在跨机组场景下的有效性。

在运行风险评估方面，本研究建立了基于时空特征耦合的风险预测模型，通过融合设备状态参数与工况数据，构建了动态风险评估指标体系。采用注意力机制对多源异构数据进行权重分配，显著提升了关键参数的辨识能力。在某 300MW 机组的实测验证中，模型对主蒸汽温度异常波动的预测误差控制在 $\pm 1.2\%$ 以内，较常规统计方法降低 34%，充分证明了方法在复杂工况下的稳定性。此外，提出的迁移学习框架有效缓解了新机组部署时的数据依赖问题，迁移训练时间缩短至传统方法的 1/3，为火电厂设备维护策略优化提供了可复用的技术方案。

参考文献

- [1] 刘聪, 陈晓辉, 闫俊北. 数字化火电厂能源计量与智能化设备自控的联合应用 [J]. 自动化应用, 2022, (10): 136–138.
- [2] 马怀成. 基于 PDCA 循环理论的火电厂电气设备故障诊断方法分析 [J]. 光源与照明, 2022(006): 000.
- [3] 成景宾. 火电厂电气设备状态监测与故障诊断技术的应用探讨 [A]2025 人工智能与工程管理学术交流会论文集 [C]. 中国智慧工程研究会智能学习与创新研究工作委员会, 中国智慧工程研究会, 2025: 3.
- [4] 肖琦, 林杰. 基于数据驱动的火电厂关键辅机设备故障诊断技术 [J]. 电工技术, 2025, (02): 204–206+212.
- [5] 梁栋. 火电厂设备故障诊断与检修技术研究 [J]. 自动化应用, 2024, 65(16): 150–152+155.
- [6] 姚尧. 火电厂设备运行常见故障和处理措施研究 [J]. 中国仪器仪表, 2024, (07): 89–92.
- [7] 曾阳, 张莉, 李国朋. 基于深度学习的火电厂发电装备智能故障诊断与预测研究 [J]. 自动化应用, 2024, 65(06): 102–104.
- [8] 姜连轶. 基于 LabVIEW 的火电厂旋转设备故障诊断系统研究与应用 [J]. 电站系统工程, 2023, 39(05): 47–50.

百万发电机组锅炉电除尘电场输灰管堵灰问题分析

王小龙

国能岳阳电厂, 湖南 岳阳 414000

DOI:10.61369/EPTSM.2025090008

摘 要： 随着百万千瓦级发电机组在电力行业的广泛应用，锅炉电除尘电场输灰系统的稳定运行对环保达标和机组安全至关重要。然而，输灰管堵灰问题频发，成为制约系统高效运行的关键因素。本文基于实际运行经验，系统分析了输灰管堵灰的成因，包括煤质特性、设备状态、系统参数、环境条件及操作管理等方面，并提出针对性优化措施，旨在提升输灰系统可靠性，保障机组长期稳定运行。

关 键 词： 百万发电机组；电除尘；输灰管堵灰；系统优化；可靠性提升

Analysis of Ash Conveying Pipe Blockage in Boiler Electrostatic Precipitator of Million-Kilowatt Units

Wang Xiaolong

China Energy Yueyang Power Plant, Yueyang, Hunan 414000

Abstract： With the wide application of million-kilowatt units in the power industry, the stable operation of the boiler electrostatic precipitator (ESP) ash conveying system is crucial for meeting environmental standards and ensuring unit safety. However, frequent blockages in ash conveying pipes have become a key factor restricting the efficient operation of the system. Based on practical operational experience, this paper systematically analyzes the causes of ash pipe blockages, including coal quality characteristics, equipment conditions, system parameters, environmental conditions, and operational management, and proposes targeted optimization measures aimed at enhancing the reliability of the ash conveying system and ensuring long-term stable operation of the unit.

Keywords： million-kilowatt units; electrostatic precipitator; ash conveying pipe blockage; system optimization; reliability improvement

引言

百万千瓦级发电机组作为电力行业的主力机型，其锅炉电除尘系统承担着高效捕集烟气中粉尘、减少污染物排放的核心任务。输灰系统作为电除尘的关键环节，负责将收集的飞灰输送至灰库，其运行效率直接影响电除尘效果及机组环保指标。然而，输灰管堵灰问题长期困扰运行人员，尤其在煤质波动、设备老化或参数设置不合理时，堵灰频发导致电场停运、灰斗超载，甚至引发灰斗坍塌等严重事故。因此，深入分析堵灰成因并制定有效对策，对提升机组运行安全性与经济性具有重要意义。

一、煤质特性对输灰的影响

煤质作为影响输灰系统稳定性的核心要素，其特性变化会通过飞灰的物理与化学性质直接作用于输灰过程，进而引发管道堵塞、系统效率下降等一系列问题。具体而言，煤中灰分含量、粒度分布、化学成分及燃烧特性共同构成了影响输灰系统运行的关键变量。

（一）灰分含量与输灰负荷

煤中灰分含量是决定飞灰生成量的直接因素。高灰分煤燃烧后，单位燃料产生的飞灰量显著增加，当飞灰量超出输灰系统的设计容量时，管道内灰流密度上升，流动阻力增大，易在管道低

洼处或阻力较大的部位形成沉积。例如，若输灰系统按中低灰分煤种设计，而实际燃用高灰分煤时，系统需频繁启动以排空灰斗，长期超负荷运行会导致设备磨损加剧，同时增加堵灰风险。

（二）粒度分布与灰流流动性

飞灰的粒度分布直接影响其流动性。粗颗粒飞灰（如粒径 $> 50\mu\text{m}$ ）因比表面积小、表面粗糙，颗粒间摩擦力大，流动性显著低于细颗粒飞灰。在输灰管道中，粗颗粒易在弯头、变径处因离心力作用沉积，形成“堵点”；而细颗粒飞灰（如粒径 $< 20\mu\text{m}$ ）虽流动性较好，但易因静电作用吸附在管道内壁，长期积累后同样会阻碍灰流。此外，粒度分布不均会导致灰流分层，粗颗粒在下层沉积，细颗粒在上层流动，形成“桥接”效

应，进一步加剧堵塞。

（三）化学成分与灰分结块

煤中硫分、钙分等化学成分对飞灰的结块特性有显著影响。高硫煤燃烧后生成的硫酸盐灰分（如硫酸钙、硫酸镁）具有强吸湿性，在潮湿环境下易吸水膨胀，形成硬质结块；高钙煤燃烧后生成的氧化钙（CaO）会与飞灰中的二氧化硅（SiO₂）反应生成低熔点的硅酸钙，在高温下熔融粘附管道内壁。此外，煤中钠、钾等碱金属化合物在燃烧过程中会形成低熔点共晶物，附着在飞灰表面，降低颗粒间摩擦力，但同时会因吸湿性增强而导致灰分结块。

（四）煤粉细度与燃烧效率

煤粉细度不均会导致燃烧不充分，未燃尽碳粒混入飞灰中，形成“含碳灰”。含碳灰的密度、粒度与正常飞灰差异较大，易在输灰过程中因沉降速度不同而分层，导致管道局部堵塞。同时，未燃尽碳粒在输灰管道中可能因摩擦生热引发二次燃烧，产生高温结块，进一步威胁系统安全。此外，煤粉细度过粗会导致燃烧延迟，飞灰中残碳量增加；细度过细则会因燃烧速度过快导致局部过热，生成熔融态灰分，粘附管道内壁。

二、设备状态与维护管理

设备老化或缺陷是堵灰的直接诱因。仓泵流化装置故障导致灰流化不充分，管道内灰柱形成；平衡管堵塞引发仓泵排气不畅，灰斗压力失衡；压缩空气系统含水、含油导致气动阀门卡涩，输灰动力不足。此外，灰斗加热器失效使灰温降低，飞灰吸湿结块；布袋除尘器故障导致灰库排气不畅，系统背压升高。定期检修设备、更换磨损部件、加强压缩空气净化，是保障设备可靠运行的关键。

（一）设备老化对输灰系统堵灰风险的直接影响

设备老化是输灰系统堵灰问题的核心诱因之一，其影响贯穿于灰流输送的全过程。仓泵作为输灰系统的关键设备，其流化装置的老化会导致灰流化不充分。流化装置通过压缩空气使飞灰形成流态化，若布风板磨损、透气层破损或空气分布管堵塞，会导致局部流化风量不足，飞灰无法均匀悬浮，进而在管道内形成灰柱。灰柱的堆积会直接阻塞灰流通道，尤其在长距离输送管道中，灰柱的扩展会引发连锁堵塞，迫使系统停机清理。

平衡管作为仓泵排气的重要部件，其老化或堵塞会导致仓泵内压力失衡。在输灰过程中，仓泵需通过平衡管与灰斗保持压力平衡，若平衡管因积灰或腐蚀导致流通截面减小，仓泵排气不畅，灰斗内压力会持续升高，引发灰斗变形或排灰口堵塞。此外，平衡管堵塞还会导致仓泵进料阶段灰斗与仓泵压力差过大，飞灰无法顺利进入仓泵，形成“假满”现象，进一步加剧输灰中断风险。

压缩空气系统的老化对输灰动力的影响同样显著。压缩空气作为输灰的动力源，其质量直接影响气动阀门的动作可靠性。若空压机滤芯老化、干燥器失效，会导致压缩空气含水、含油量超标。水分在低温环境下会凝结成液态水，与飞灰混合后形成泥浆

状物质，粘附在管道内壁；油分则会污染气动阀门密封面，导致阀门卡涩或泄漏。气动阀门动作不畅会引发输灰程序中断，如进料阀无法关闭导致灰斗漏灰，或出料阀无法开启导致仓泵憋压，最终形成系统性堵塞。

（二）关键部件缺陷对灰流特性的劣化作用

灰斗加热器作为防止飞灰吸湿结块的核心部件，其缺陷会直接改变飞灰的物理状态。灰斗加热器通过维持灰温在露点以上，防止飞灰吸湿板结。若加热器功率不足或温控系统失效，灰温会降至露点以下，飞灰中的硫酸盐、氯化物等吸湿性成分会吸收环境水分，形成硬质结块。结块飞灰在排灰过程中会卡滞在灰斗排灰口，形成“灰塞”，迫使系统停机清理。此外，灰斗加热器缺陷还会导致灰斗内壁冷凝水积聚，与飞灰混合后形成腐蚀性溶液，加速灰斗本体腐蚀，缩短设备使用寿命。

布袋除尘器作为灰库排气系统的核心设备，其故障会引发系统背压升高。布袋除尘器通过过滤飞灰维持灰库负压，若布袋破损、脉冲清灰系统失效或灰斗积灰，会导致除尘器阻力上升，灰库排气不畅。系统背压升高会反向影响输灰管道压力，导致灰流速度降低，飞灰在管道内沉积。此外，布袋除尘器故障还会引发二次扬尘，未被过滤的细颗粒飞灰会重新进入输灰系统，与粗颗粒飞灰混合后形成黏附性更强的混合灰，进一步加剧管道堵塞。

气动阀门作为输灰系统的执行机构，其缺陷会直接导致输灰程序失控。气动阀门通过压缩空气驱动开闭，若阀体磨损、密封圈老化或执行机构故障，会导致阀门内漏或外漏。内漏会引发仓泵与灰斗压力串通，飞灰无法顺利输送；外漏会导致压缩空气压力不足，输灰动力下降。气动阀门缺陷还会引发输灰程序误动作，如进料阀未关闭时启动输灰，导致灰斗与仓泵同时排灰，形成管道内灰流对冲，引发严重堵塞。

三、环境条件与操作管理

环境温度、湿度对输灰系统影响显著。低温环境下，飞灰吸湿性增强，管道内壁结露导致灰块粘附；高温季节，灰库排气量不足引发系统背压升高。操作管理方面，输灰支线与省煤器支线动作不同步、单一电场故障未及时处理、灰斗料位计误报未校准等，均可能引发连锁堵灰。加强环境监控、规范操作流程、建立应急预案，是降低环境与操作风险的有效手段。

（一）环境温度对输灰系统运行稳定性的作用机制

环境温度通过改变飞灰物理特性与设备运行状态，直接影响输灰系统稳定性。低温环境下，空气含湿量饱和度和降低，管道内壁温度易降至露点以下，导致飞灰中吸湿性成分（如硫酸盐、氯化物）吸收环境水分，形成黏附性灰块。这些灰块在管道弯头、变径处堆积，逐步缩小流通截面，最终引发堵塞。低温还会导致压缩空气中的水分凝结，在气动阀门、执行机构内部形成冰晶，阻碍阀门动作，造成输灰动力中断。此外，低温环境下灰斗加热器需持续运行以维持灰温，若加热器功率不足或温控系统失效，灰斗内壁冷凝水与飞灰混合后形成腐蚀性溶液，加速灰斗本体腐蚀，缩短设备使用寿命。

高温环境对输灰系统的影响主要体现在灰库排气与设备散热方面。高温季节，环境温度升高导致灰库内气体膨胀，若排气风机功率不足或布袋除尘器阻力上升，灰库排气量会显著下降，系统背压随之升高。^[1]背压升高会反向影响输灰管道压力，导致灰流速度降低，飞灰在管道内沉积。同时，高温环境下空压机、仓泵等设备散热效率下降，压缩空气温度升高，含水量增加，进一步加剧气动阀门卡涩与管道结露问题。此外，高温还会加速橡胶密封件老化，导致气动阀门内漏、管道连接处泄漏，引发输灰动力不足与灰流泄漏。^[2]

环境温度波动对输灰系统的复合影响更为显著。昼夜温差大的地区，管道内壁温度随环境温度变化而频繁升降，导致飞灰在管道内壁反复吸湿与脱水，形成硬质结垢层。结垢层会逐步增厚，最终完全堵塞管道。同时，温度波动还会引发设备热胀冷缩，导致管道法兰连接处松动、气动阀门执行机构位移，进一步加剧系统泄漏与故障风险。因此，维持环境温度稳定、优化设备保温措施、加强灰斗加热控制，是降低温度相关堵灰风险的关键。

（二）环境湿度对输灰系统堵灰风险的加剧效应

环境湿度通过改变飞灰吸湿性与设备运行环境，直接加剧输灰系统堵灰风险。高湿度环境下，空气含湿量升高，飞灰中吸湿性成分（如硫酸钙、氯化钠）会快速吸收水分，形成黏附性灰浆。这些灰浆在管道内壁附着后，会与后续飞灰混合形成硬质结块，逐步堵塞管道。尤其在管道低点、水平段等流速较慢区域，灰浆沉积更为严重。此外，高湿度环境还会导致压缩空气含水量超标，水分在气动阀门、管道内部凝结后，会与飞灰混合形成泥浆状物质，进一步加剧阀门卡涩与管道堵塞。^[3]

低湿度环境对输灰系统的影响则体现在静电积聚与飞灰扬尘方面。低湿度环境下，空气导电性下降，飞灰颗粒在输送过程中易因摩擦产生静电。静电积聚会引发飞灰在管道内壁吸附，形成“灰膜”，逐步缩小流通截面。同时，静电还会导致飞灰在灰斗、仓泵等设备内部扬尘，形成二次污染。此外，低湿度环境会加速

设备金属部件氧化，导致管道内壁粗糙度增加，飞灰摩擦力上升，进一步降低灰流流动性。

环境湿度波动对输灰系统的复合影响更为复杂。湿度频繁变化会导致飞灰反复吸湿与脱水，形成多孔状硬质结块。这些结块在管道内滚动时，会与管道内壁摩擦产生细颗粒飞灰，细颗粒飞灰又会填充粗颗粒结块间隙，形成致密堵塞体。同时，湿度波动还会引发设备金属部件疲劳，导致管道连接处密封失效，引发灰流泄漏与系统压力失衡。因此，控制环境湿度稳定、加强压缩空气干燥处理、优化管道内壁材质，是降低湿度相关堵灰风险的核心措施。

四、综合优化措施与实践

针对堵灰问题，需采取“预防为主、综合治理”的策略。一是强化煤质管理，通过配煤掺烧降低灰分、优化粒度分布；二是升级设备，采用耐磨损管道、高效流化装置及智能监控系统；三是优化参数，建立基于锅炉负荷的动态调整模型；四是完善维护体系，制定设备检修周期表，加强压缩空气、灰斗加热器等关键部件的定期检查；五是提升操作水平，通过培训强化运行人员对堵灰征兆的识别能力，建立快速响应机制。^[4]

五、结语

百万发电机组锅炉电除尘电场输灰管堵灰问题涉及煤质、设备、参数、环境及操作等多维度因素。通过系统性分析堵灰成因，并从煤质优化、设备升级、参数调整、环境控制及操作规范等方面制定综合对策，可显著提升输灰系统可靠性。实践表明，实施动态参数管理、加强设备预防性维护、建立快速排堵流程，能有效减少堵灰频次，保障电除尘系统长期稳定运行，为机组安全环保运行提供坚实支撑。

参考文献

[1] 李颖菲. 600MW 燃煤发电机组掺烧绿氨的能源—环境—经济综合评价研究 [D]. 华中科技大学, 2024.

[2] 吴吉, 王伟哲, 金国强, 等. 百万千瓦发电机组协调控制策略分析与优化 [J]. 上海电气技术, 2021, 14(04): 10–19.

[3] 谢誉军, 郑庆第, 杨荣东, 等. 百万千瓦发电机组炉内顶板梁翻转技术 [J]. 安装, 2019, (10): 26–28.

[4] 郑庆第, 谢誉军. 新技术在百万千瓦发电机组炉内顶板梁吊装中的应用 [J]. 安装, 2019, (10): 29–31.

人工智能在电气设备故障诊断中的应用

侯雪

石家庄职业技术学院, 河北 石家庄 050000

DOI:10.61369/EPTSM.2025090009

摘 要 : 随着电力系统向智能化、复杂化方向发展, 电气设备故障诊断的准确性与时效性对保障系统稳定运行至关重要。传统的故障诊断方法是依靠人工经验, 效率低, 主观性强等特点, 无法适应现代电气设备的诊断需求。人工智能技术以其强大的数据处理, 特征提取与模式识别能力为电气设备故障诊断提供了新方案。本文从人工智能在电气设备故障诊断中的核心技术原理出发, 深入分析机器学习, 深度学习, 专家系统等技术, 在变压器, 电机, 断路器等典型电气设备中的具体应用路径, 探讨当前技术应用中存在的样本依赖, 泛化能力不足等问题, 并展望融合多源数据融合, 边缘计算的未来发展方向, 为人工智能技术在电气设备故障诊断领域的深度应用提供理论参考与实践思路。

关 键 词 : 人工智能; 电气设备; 故障诊断; 机器学习; 深度学习

The Application of Artificial Intelligence in Fault Diagnosis of Electrical Equipment

Hou Xue

Shijiazhuang Vocational Technology Institute, Shijiazhuang, Hebei 050000

Abstract : As the power system evolves towards intelligence and complexity, the accuracy and timeliness of fault diagnosis in electrical equipment are crucial for ensuring the stable operation of the system. Traditional fault diagnosis methods, which rely on manual experience, are characterized by low efficiency and strong subjectivity, making them unable to meet the diagnostic needs of modern electrical equipment. Artificial intelligence (AI) technology, with its powerful capabilities in data processing, feature extraction, and pattern recognition, provides a new solution for fault diagnosis in electrical equipment. Starting from the core technical principles of AI in electrical equipment fault diagnosis, this paper delves into the specific application paths of technologies such as machine learning, deep learning, and expert systems in typical electrical equipment like transformers, motors, and circuit breakers. It explores issues such as sample dependency and insufficient generalization ability in current technological applications and looks forward to future development directions that integrate multi-source data fusion and edge computing, providing theoretical references and practical ideas for the in-depth application of AI technology in the field of electrical equipment fault diagnosis.

Keywords : artificial intelligence; electrical equipment; fault diagnosis; machine learning; deep learning

引言

电气设备是电力系统的核心组成部分, 其运行状态直接影响着电力供应的可靠性与安全性。电气设备在长期运行过程中, 易受电压冲击, 环境腐蚀, 机械磨损等因素的影响, 产生潜伏性故障, 如果不及时诊断与处理, 可能引发设备损坏, 系统瘫痪甚至安全事故。传统故障诊断方法采用人工巡检, 定期检测为主, 依靠技术人员的经验判断, 不仅耗费大量的人力成本, 而且还存在故障识别滞后, 误判率高等问题。随着人工智能技术的快速发展, 其在数据驱动的故障诊断领域体现出巨大的优势, 能够从海量运行数据中挖掘故障特征, 实现故障的自动识别与定位^[1]。因此, 深入研究人工智能在电气设备故障诊断中的应用, 对于提高电力系统运维水平, 减少故障损失具有重要意义。

一、人工智能在电气设备故障诊断中的核心技术

(一) 机器学习技术

机器学习技术是人工智能在故障诊断领域应用的基础, 其核

心是通过算法让计算机从历史数据中学习故障特征, 建立故障诊断模型。在电气设备故障诊断中, 常用的机器学习算法主要有支持向量机 (Support Vector Mechanics, SVM), 决策树, 随机森林等。SVM通过寻找最优分类超平面, 完成故障数据的分类,

特别适用于小样本，高维度的电气设备故障诊断场景。例如，在变压器油中溶解气体分析（DGA）故障诊断中，SVM能够从少量的气体浓度数据中提取特征，区分变压器的过热、放电等故障类型。与传统的DGA诊断方法（如三比值法）相比，SVM无需依赖人工设定的判断规则，可自动适应不同变压器的运行特性，降低误判率。决策树算法以树状结构实现故障分类，具有可解释性强的优势，能够清晰地呈现故障诊断的逻辑过程。在电机故障诊断中，决策树可根据电机的电流、电压、温度等运行参数，逐步划分故障类别，技术人员可通过树状结构直观了解故障判断的依据，便于后续的故障排查与维护^[2]。随机森林则通过集成多个决策树，降低单一决策树的过拟合风险，提升模型的稳定性，适用于运行环境复杂、干扰因素多的电气设备故障诊断场景，如高压断路器的机械故障诊断，能够有效排除环境温度、湿度对诊断结果的影响。

（二）深度学习技术

随着电气设备监测数据量的激增，传统机器学习技术在特征提取环节的局限性逐渐显现——需依赖人工手动筛选特征，难以从海量非结构化数据（如振动信号、红外图像）中挖掘深层故障信息。深度学习技术通过构建多层神经网络，实现特征的自动提取与分层学习，大幅提升了故障诊断的深度与精度。CNN在图像类故障诊断中得到了广泛的应用。电气设备的红外热像图，局部放电超声图像等包含丰富的故障信息，CNN可以通过卷积层、池化层自动提取图像中的纹理、灰度等特征，进行故障的可视化诊断^[3]。例如高压开关柜的故障诊断中，开关柜内部的接触不良，绝缘老化等故障会引起局部温度异常，通过CNN对红外热像图的分析可以对温度异常区域进行精准定位并识别故障类型，比人工肉眼观察，提升诊断效率，能够发现肉眼难以察觉的微小故障。时序数据的故障诊断则采用循环神经网络（RNN）及改进的长短期记忆网络（LSTM）。电气设备运行参数如电流、电压、振动信号具有明显的时间序列特征，故障的发生总是伴随参数的动态变化。LSTM通过引入门控机制解决了RNN的梯度消失问题，捕捉时序数据中长期依赖关系，实现故障发展趋势的预测与早期诊断。以异步电机故障诊断为例，电机轴承磨损，转子断条等故障都会导致电流信号周期性波动，LSTM可以通过分析电流信号的时序特征，在故障萌芽阶段识别异常，为设备维护争取时间，避免故障进一步扩大。

（三）专家系统

专家系统是一种基于知识的人工智能技术，通过将领域专家的故障诊断经验转化为计算机可识别的规则库，实现故障的推理与诊断。其核心组成包括知识库、推理机、解释器等模块，在电气设备故障诊断中，尤其适用于故障机理明确、专家经验丰富的场景。在电力变压器故障诊断中，专家系统可将领域专家积累的DGA数据判断经验、油质分析经验等转化为规则库，当系统获取到新的变压器运行数据时，推理机通过匹配规则库中的知识，得出故障诊断结果，并通过解释器向技术人员说明诊断依据。专家系统的优势在于能够完整保留专家经验，实现知识的传承与复用，尤其适用于缺乏资深技术人员的基层电力运维单位^[4]。但该技术也存在局限性，当面对未纳入规则库的新型故障时，诊断能力不足，且规则库的更新依赖人工维护，难以适应电气设备技术的快速迭代。

二、人工智能在典型电气设备故障诊断中的应用实践

（一）变压器故障诊断

变压器是电力系统中的核心设备，其故障类型主要包括过热故障、放电故障、绝缘故障等，故障诊断难度大、影响范围广。人工智能技术在变压器故障诊断中的应用，主要围绕油中溶解气体分析（DGA）、振动信号分析、红外热像分析三个方向展开。在DGA故障诊断中，传统方法依赖人工设定的比值规则，难以适应不同厂家、不同运行年限变压器的差异。基于机器学习的SVM、随机森林模型，可通过对大量历史DGA数据的学习，建立个性化的故障诊断模型。同时，结合LSTM网络对DGA数据的时序分析，还可实现对变压器故障发展趋势的预测，当模型检测到气体浓度变化率异常时，提前发出预警，为运维人员争取维护时间^[5]。在变压器振动信号诊断中，深度学习技术发挥重要作用。变压器的铁芯松动、绕组变形等机械故障会导致振动信号的频率、幅值发生变化，传统方法难以从复杂的振动信号中提取故障特征。基于CNN与LSTM的融合模型，可先通过CNN提取振动信号的频域特征，再通过LSTM分析特征的时序变化，实现对机械故障的精准识别。

（二）电机故障诊断

电机是工业生产与电力系统中的关键动力设备，其故障类型主要包括轴承故障、转子故障、定子故障等，故障发生率高，对生产活动影响大。人工智能技术在电机故障诊断中的应用，以电流信号、振动信号、温度信号的分析为核心。在电机轴承故障诊断中，基于深度学习的故障诊断模型应用广泛。轴承磨损、剥落等故障会导致电机电流信号中出现边频带成分，传统傅里叶变换难以捕捉这些微弱成分。基于小波变换与CNN的融合模型，可先通过小波变换对电流信号进行降噪处理，再通过CNN提取故障特征，实现对轴承故障的早期诊断。在电机转子故障诊断中，LSTM网络展现出优异的时序分析能力。转子断条、偏心等故障会导致电机电流信号出现周期性波动，且波动规律与故障严重程度相关。LSTM网络可通过对电流时序数据的学习，建立故障与信号特征的映射关系，不仅能够识别故障类型，还能评估故障严重程度。

（三）高压断路器故障诊断

高压断路器是电力系统中的关键控制设备，其故障主要包括机械故障与电气故障，故障会导致断路器拒动或误动，严重威胁电网安全。人工智能技术在高压断路器故障诊断中的应用，主要聚焦于机械特性与电气特性的综合分析。在机械故障诊断中，基于机器学习的决策树、随机森林模型应用较多。高压断路器的机械特性参数（如分合闸时间、分合闸速度、操作功）直接反映其机械状态，通过对这些参数的分析，可判断操作机构是否存在卡涩、弹簧性能是否下降等故障。同时，结合振动信号的CNN分析，还可实现对断路器机械故障的实时监测，当断路器操作时，振动信号通过传感器采集后，CNN模型可实时提取特征，判断是否存在异常，避免故障积累。在电气故障诊断中，专家系统与深度学习技术结合应用效果显著。高压断路器的绝缘故障诊断需结合绝缘电阻、泄漏电流、局部放电等多维度数据，专家系统可整合领域专家的绝缘故障判断经验，建立规则库；深度学习模型则可从局部放电超声图像、红外热像图中提取深层特征，补充规则

库的不足。

三、人工智能在电气设备故障诊断中的应用问题

（一）样本数据质量与数量不足

人工智能模型的性能依赖大量高质量的标注样本数据，但在电气设备故障诊断领域，样本数据存在两方面问题：一是故障样本稀缺。电气设备的正常运行时间长，故障发生率低，尤其是严重故障的样本数量极少，导致模型在故障类别上存在“数据不平衡”问题，对少数类故障的识别准确率极低。二是样本数据质量参差不齐。现场采集的运行数据易受干扰（如电磁干扰、传感器误差），存在数据缺失、异常值等问题，若未进行有效预处理，会导致模型训练偏差，降低诊断精度。

（二）模型泛化能力不足

当前人工智能模型多为“特定场景定制化”模型，即基于某一区域、某一类型电气设备的样本数据训练，当应用于其他区域、其他类型的设备时，泛化能力不足。一方面，不同区域的电气设备运行环境差异大（如温度、湿度、海拔），会导致设备故障特征的变化，模型难以适应；另一方面，不同厂家的设备设计、制造工艺不同，故障机理存在差异，基于某一厂家设备样本训练的模型，无法准确识别其他厂家设备的故障。

（三）模型可解释性差

深度学习模型（如 CNN、LSTM）具有“黑箱”特性，其故障诊断过程难以解释，技术人员无法知晓模型判断故障的具体依据，导致模型在实际应用中面临“信任危机”。例如，模型判断某电机存在轴承故障，但无法说明是基于电流信号的哪个特征、哪个时间段的数据分析得出结论，运维人员难以根据模型结果制定针对性的维护方案，尤其在关键设备故障诊断中，模型的不可解释性限制了其应用范围。

四、人工智能在电气设备故障诊断中的发展方向

（一）多源数据融合与迁移学习

针对样本数据不足与泛化能力差的问题，未来需加强多源数据融合与迁移学习技术的应用。多源数据融合可整合电气设备的运行参数、状态监测数据、环境数据等多维度信息，丰富故障特

征，减少单一数据的局限性。例如，将变压器的 DGA 数据与振动信号、红外热像数据融合，可全面反映设备的电气与机械状态，提升故障诊断的准确性。迁移学习则可利用已有的大量样本数据训练基础模型，再通过少量目标区域样本数据微调模型，实现模型在不同场景下的快速适配，解决“数据不平衡”与“泛化能力不足”的问题。

（二）模型可解释性优化

为提升模型的可信度，需加强对人工智能模型可解释性的研究。一方面，可通过“模型透明化设计”，如采用可解释性强的算法（决策树、线性模型）与深度学习模型结合，构建“透明 + 深度”的混合模型，在保证诊断精度的同时，提升模型的可解释性；另一方面，可引入“模型解释工具”，如 LIME、SHAP 等，通过分析模型输入与输出的关联关系，生成故障诊断的可视化解释报告，帮助运维人员理解模型判断依据。

（三）边缘计算与实时诊断

随着电力系统对故障诊断时效性要求的提升，未来人工智能故障诊断将向“边缘计算 + 实时诊断”方向发展。边缘计算可将诊断模型部署在设备本地或就近的边缘节点，减少数据传输延迟，实现对电气设备运行状态的实时监测与故障诊断。例如，在风电场的风机故障诊断中，将 LSTM 诊断模型部署在风机控制器上，可实时分析风机的电流、振动数据，当检测到故障时，立即发出预警并启动保护措施，避免故障扩大。与此同时，边缘计算还能够减少云端数据传输量，降低网络带宽压力，提高诊断系统的稳定性。

五、结论

人工智能技术应用机器学习，深度学习，专家系统等技术为电气设备故障诊断提供高效、精准的解决方案，实现了从传统“经验驱动”向现代“数据驱动”的诊断模式转变。在变压器，电机，高压断路器等典型的电气设备中，人工智能技术已显现出一定的应用价值，能够提高故障诊断的准确率与时效性，为电力系统运维提供有力的支持。但是目前技术应用仍存在样本数据不足，泛化能力差，可解释性弱等问题，需要借助多源数据融合，迁移学习，模型可解释性优化等技术手段逐步解决。

参考文献

- [1] 张旭. 人工智能在电气自动化系统故障诊断中的应用 [J]. 中国高科技, 2025, (13): 19-21.
- [2] 陈志华. 人工智能在机械设备故障诊断与维修中的应用 [J]. 中国机械, 2025, (14): 91-94.
- [3] 温晓东. 人工智能在机械制造设备故障诊断与维修中的应用 [J]. 机械管理开发, 2024, 39 (09): 310-313.
- [4] 胡周达, 林红冲, 李凯璇, 刘嘉, 王凯. 人工智能在发电厂设备故障诊断中的应用 [J]. 电子技术, 2023, 52(07): 242-243.
- [5] 刘军强. 人工智能在电气设备故障诊断中的应用 [J]. 自动化应用, 2023, 64(07): 1-3+6.

基于高分辨率卫星遥感与三维设计模型的电网工程建设质量管控技术研究

张卓群, 苑博, 李沛洁, 张苏
国网经济技术研究院有限公司, 北京 102209
DOI:10.61369/EPTSM.2025090010

摘要 : 电网工程建设质量直接关系着国家的经济民生, 是新型电力系统的重要基础设施底座。本文介绍了高分卫星遥感技术与三维设计建模标准的特点与优势, 重点探讨了基于高分卫星遥感与三维设计模型的电网工程建设质量管控的具体实施方法和流程, 以及其在设计、施工和验收各阶段的应用场景和成效, 有效支撑工程数字化转型。最后, 对高分卫星遥感、三维设计建模和人工智能技术在电网工程的高质量建设过程中的融合应用给予了建议和展望。

关键词 : 高分卫星遥感; 三维设计模型; 人工智能; 电网工程

Research on Quality Control Technology for Power Grid Engineering Construction based on High-Resolution Satellite Remote Sensing and 3d Design Model

Zhang Zhuoqun, Yuan Bo, Li Peijie, Zhang Su
State Grid Economic and Technological Research Institute Co., Ltd., Beijing 102209

Abstract : The quality of power grid engineering construction is directly related to the national economy and people's livelihood, serving as a critical infrastructure foundation for the new power system. This paper introduces the characteristics and advantages of high-resolution satellite remote sensing technology and 3D design modeling standards, with a focus on exploring the specific implementation methods and processes of quality control in power grid construction projects based on high-resolution satellite remote sensing and 3D design models. It also discusses their application scenarios and effectiveness across the design, construction, and acceptance phases, effectively supporting the digital transformation of engineering. Finally, recommendations and prospects are provided for the integrated application of high-resolution satellite remote sensing, 3D design modeling, and artificial intelligence technologies in the high-quality construction process of power grid engineering.

Keywords : high-resolution satellite remote sensing; 3D design model; artificial intelligence; power grid engineering

引言

电网工程是国民经济的重要命脉^[1], 在现代能源供应体系中发挥着重要的枢纽作用, 持续推动能源清洁低碳转型。面对新型电力系统建设和工程数字化转型需求^[2], 电网工程作为连接能源生产和消费环节的重要纽带, 迫切需要融通先进技术, 提高建设质量, 拓展资源共享, 共同提升电网工程“六精四化”智能建造水平, 全面保障电网建设安全、优质、高效, 全面保证电网运行经济、可靠、稳定。

为了更好适应大规模高比例新能源外送、大规模跨区输电和跨流域的水火互济, 以及极端天气导致多种自然灾害频繁等, 如何采用先进的遥感与数字技术保障电网工程高质量建设已成为必然趋势。依托高分卫星遥感技术在输变电工程通道或场地清理范围内工程建设质量, 以及周围自然环境、安全隐患的监测等, 结合三维设计 BIM 模型的仿真模拟与灾害推演, 能够对工程总体施工进度、安全质量和建造过程等进行有效监控和预警, 确保输变电工程高质量建设与安全施工。

一、高分卫星遥感技术

高分卫星遥感技术主要是依托我国自主建立的卫星系统, 利

用可见光、红外、微波等探测仪器, 通过摄影、感应、传输和处理等手段, 实现卫星影像对地面物体运动轨迹和特征性质的识别^[3]。高分卫星遥感技术具有视点高、视域广、采集快和连续好

等优势，可直接从遥感技术平台获取特定时间段内的卫星数据，并能通过计算机进行图像处理和加工。目前，高分卫星遥感技术已普遍应用于土地资源、森林资源、地质矿产资源、水利资源调查和农作物估产等方面的普查，并逐步推广至工程建设领域，特别是电网工程^[4]。

（一）高分卫星

目前，国内外高分辨率商业卫星其空间分辨率已达到亚米级水平，我国高分卫星已构建起高空间、高光谱、高时间分辨率的自主遥感体系，为国民经济建设提供了持续、稳定、高精度的对地观测数据支撑。近些年，国产高分专项系列卫星相继发射，高分卫星遥感图像获取质量显著提升。其中，高分一号于2013年4月26日在酒泉卫星发射中心发射，它突破了高空间分辨率、多光谱与高时间分辨率结合的光学遥感技术；高分二号于2014年8月19日在太原卫星发射中心发射，具有亚米级空间分辨率、高定位精度和快速姿态机动能力等特点；高分三号于2016年8月10日在太原卫星发射中心成功发射升空，也是我国首颗分辨率达到1米的C频段多极化合成孔径雷达（SAR）卫星等。随着高分辨率立体测绘卫星数据处理技术的持续突破，基于卫星影像的分析技术也逐步走向实用化。

（二）遥感监测

基于现代摄影测量与遥感科学技术理论，融合计算机和网络技术等，高分辨率卫星遥感影像数据完全具备在大范围区域内进行测绘和数据分析。基于高分卫星遥感技术，可实现高精度遥感影像的地物判读，并能快速获取大尺度、大范围的工程建设相关区域的实施状况，对总体施工进度和通道清理施工过程进行监控和预警；也能利用高分卫星遥感技术，实现电网工程建设全过程对环境影响的评估、监测和预警，特别是地质等各类自然灾害。此外，利用高分卫星遥感技术，也能实现对电网线路工程施工前、后的房屋拆迁范围、林木采伐范围进行复核监测，以及对施工道路及运维道路的方案及环水保方案进行评估和监控等。

二、三维设计模型应用

2010年起，电网行业积极的推动三维数字化技术，盛大凯、郝鑫和胡君慧等^[5]首先提出了电网信息模型概念，并建立以GIM为基础的智能电网信息模型共享平台。目前，电网工程三维设计模型（简称：GIM模型）已成为电网三维设计的主要载体，并针对电网工程数字化需求，构建了完善的电网工程三维设计标注体系，包括：数据存储、信息交互、建模深度、工程移交等技术标准，为规范电网工程BIM技术应用奠定了坚实的基础。

（一）模型标准

2018年以来，电网行业构建了涵盖输变电工程设计全专业、全过程的输变电工程GIM标准体系，对数据格式、设计对象、设计过程、软件功能、数字成果等方面进行了规范，国网公司形成了上下游全业务环节数据对接的企业系列标准11项，国家标准1项。以此为基础，国网和南网公司共同依托中电联电网工程三维设计标准化标委会，构建了团体三维设计模型搭建与应用标准体

系，累计发布6项行标、9项团标，涵盖了数据标准、建模规则、设计要求、移交标准、软件支撑等方面。

（二）模型应用

BIM技术是数字化技术发展的重要里程碑，电网三维设计模型及工程应用具有明显的技术优势，主要体现在工程建设全寿命周期可视化与仿真模拟。其中，在电网工程设计与建设过程中，三维设计模型替代了二维图纸的表达，有效支撑了工程的设计与校核、专业的提资与交互、方案的校核与评审、施工的预测与推演等，都可以直观的展现与可视化，克服了原有二维图纸建造的局限性。此外，同样在电网工程设计与建设过程中，以三维设计模型为载体，可以附加工程图纸、设备信息、安装检测等信息，实现建设阶段的“同生共长”，并能提早开展设计方案、造价方案、安装方案、施工方案和管理方案等的仿真模拟与安全推演，有效提升了工程建设质量，也为数字孪生电网建设搭建了数据底座。

三、电网工程建设质量管控

（一）管控措施

基于高分遥感技术采集的电网工程本体及周围环境的影像数据，结合三维设计模型在不同工况下的仿真模拟情况，有效推导出工程建设的全过程的质量与安全等级，实现对电网工程建设质量的精准管控。其中，高分遥感技术应对电网工程站区及线路塔位的原始环境、施工过程和验收环节分段进行影像拍摄采集、数据处理存储、内容对比分析等，有效提取建设质量问题。对于工程大范围区域，以及地质等各类自然环境的变化，结合三维设计模型搭建地理信息场景，高效准确的完成工程建设方案及自然灾害的推演与预测，全方位提升工程各环节质量管控力度。

（二）设计阶段

以高分卫星遥感影像为基础，结合电网工程三维设计模型，设计人员可快速搭建电网工程地理信息场景，涵盖主要交叉跨越、重要道路、水系等地物；也能通过基于人工智能的专业化影像数据解译，辨识特殊地形地貌，以及滑坡、断裂构造及岩土类型等，辅助开展工程设计阶段的站址比选、路径优化，确保电网工程建设安全与合理，有效避让自然保护区、环境敏感点、地质危险区等。例如：设计阶段，可以采用高分辨率卫星遥感影像构建工程地理信息场景，生成DEM和DOM数据，构建架空输电线路三维设计模型，完成线路路径的优化比选和杆塔排位，有效支撑杆塔逐基逐腿配置与精准投资^[6]。

（三）施工阶段

利用高分卫星遥感技术可对电网工程施工与建设过程进行监控，基于电网工程建设区域的卫星遥感影像，结合人工智能算法实现对影像的识别与解译，并结合施工建设质量问题语义标签开展电网工程建设全过程的监控，满足大范围、全覆盖、全过程、可追溯的施工质量管控需求^[7,8]。结合工程三维设计模型“同生共长”对比机制，构建施工质量问题库和问题语义标注，形成基于人工智能技术的全色、多光谱影像数据融合与分析监控预警智

能体, 有效提高工程质量问题的提取能力, 实现准确和高效的智能监控。对于复杂多变的自然环境, 设计、施工、监理和建管单位均可结合电网工程三维设计模型和高分卫星影像开展灾害模拟和隐患推演, 确保工程建设经济合理与安全可靠。例如: 施工阶段, 可以采用高分辨率卫星遥感影像识别房电网站址和线路通道内容的植被信息, 结合多时相遥感影像变化监测和三维模型实施进度, 监控工程建设方案的合理性与植被清理进度等, 也可监控施工牵张厂或施工道路布置的经济性和准确性, 以及弃土、垃圾等的堆放情况, 从而预测施工建设方案对周围环境的影响, 以及可能存在的风险隐患。

(四) 验收阶段

依托跨阶段高分卫星遥感技术影像数据对比, 结合电网工程施工验收规定、环保水保管理要求等, 重点对验收阶段的工程本体和周围环境进行分析, 辅助开展工程验收工作。通过高分辨率卫星影像与三维设计模型的对比分析, 完成工程本体建设方案一致性验收, 以及站区和通道内障碍物清理情况分析与检查, 有效提升了工程验收效率^[9]。通过高分辨率卫星影像与工程验收质量

数据要求对比分析, 也能完成环保水保验收与植被恢复情况确认, 有效提高了环保水保管控力度。例如: 验收阶段, 充分利用高分遥感影像采集与数据编程分析, 可以完成房屋拆迁、树木砍伐、扰动土地整治等环保水保和通道清理验收工作, 也可通过三维设计模型与高分卫星遥感影像进行模型与实物一致性校验等工作, 全面提升工程验收质效, 实现电网高质量建设。

四、结论与展望

基于高分卫星遥感、三维设计模型和人工智能技术, 电网工程建设质量管控技术能够有效支撑设计、施工与验收等各环节质量与效率提升, 不仅能够实现工程建设方案的优化比选, 也能支撑施工建设质量管理与验收, 更好实现电网工程的高质量建设与智能化发展。未来, 随着高分卫星遥感技术、三维设计建模技术、人工智能图像识别技术和“空-天-地”一体化监测技术的不断发展, 卫星遥感+三维模型的融合技术必将在构建安全、高效、智能的现代电网体系中将扮演越来越重要的角色。

参考文献

- [1] 张卓群, 李宏男, 李士锋, 等. 输电塔-线体系灾变分析与安全评估综述 [J]. 土木工程学报, 2016, 12(49): 75-88.
- [2] 齐立忠. 电网工程 BIM 技术应用 [M]. 中国电力出版社, 北京.
- [3] 宋继明, 倪向萍, 唐明利, 等. 高分卫星遥感技术在特高压工程环保水保管理中的应用研究 [J]. 矿产勘查, 2021, 12(8): 1829-1834.
- [4] 阎平, 王刚. 面向对象的遥感分类方法在输电线路地表信息提取中的应用 [J]. 北京测绘, 2020, 34(4): 575-579.
- [5] 盛大凯, 郑鑫, 胡君慧, 等. 研发电网信息模型 (GIM) 技术, 构建智能电网信息共享平台 [J]. 2013, 34(8): 1-5.
- [6] 姚林, 徐春, 白明启. 多源遥感影像在输电线路优化设计中的应用 [J]. 山西建筑, 2023, 49(18): 181-184.
- [7] 赖余斌, 袁太平, 洪巧章, 等. 基于卫星遥感技术的电网建设全过程动态监控技术研究 [J]. 绿色科技, 2018, 24: 187-190.
- [8] 丁永福, 张金德, 刘皓, 等. 数据分析技术在特高压直流工程施工中地质灾害预警的应用研究 [J]. 矿产勘查, 2020, 11(10): 2317-2323.
- [9] 洪巧章, 赖余斌, 彭飞. 高分辨率遥感影像在电网工程建设中的应用研究 [J]. 绿色科技, 2020, 18: 229-232.

漏电保护器全生命周期运维管理研究与应用

朱茂荣, 周渊, 雷济坤, 刘强博, 王健梅
华能甘肃能源开发有限公司, 甘肃 兰州 730070
DOI:10.61369/EPTSM.2025090014

摘 要 : 针对电力行业漏电保护器 (RCD) 长期存在的“装而不管、坏而不知”的运维管理困境, 提出并构建了一种基于数字化平台的全生命周期运维管理模式。该模式通过集成高精度专用测试仪、移动端应用程序和云端数字化管控平台, 实现了对 RCD 测试数据的精准采集、线上实时录入、系统自动判据与缺陷处理闭环管理。核心创新在于建立了覆盖“计划生成、现场执行、数据溯源、自动判据、缺陷驱动、整改闭环”的标准化运维流程, 并为每一台 RCD 建立了全生命周期电子健康档案。实践应用表明, 该模式实现了 RCD 运维状态的透明化、维护决策的数据化以及安全责任追溯的精准化, 将运维管理模式从“被动响应、经验主导”成功转型升级为“数据驱动、主动预警”, 显著提升了电力作业现场的人身触电安全防护水平。

关 键 词 : 漏电保护器; 全生命周期管理; 数据驱动; 数字化运维; 预测性维护

Research and Application of Full-Lifecycle Operation and Maintenance Management for Residual Current Devices

Zhu Maorong, Zhou Yuan, Lei Jikun, Liu Qiangbo, Wang Jianmei
Huaneng Gansu Energy Development Co., Ltd., Lanzhou, Gansu 730070

Abstract : To address the long-standing operation and maintenance (O&M) dilemma of "installed but unmanaged, faulty but undetected" for residual current devices (RCDs) in the power industry, this study proposes and establishes a full-lifecycle O&M management mode based on a digital platform. By integrating high-precision dedicated testing instruments, mobile applications, and a cloud-based digital management and control platform, this mode enables accurate collection of RCD test data, real-time online data entry, automatic system criterion judgment, and closed-loop management of defect handling. Its core innovation lies in establishing a standardized O&M process covering "plan generation, on-site execution, data traceability, automatic criterion judgment, defect-driven action, and rectification closed-loop," and creating a full-lifecycle electronic health record for each RCD. Practical application shows that this mode achieves transparency in RCD O&M status, data-driven maintenance decisions, and precision in safety responsibility tracing. It successfully transforms the O&M management mode from "passive response and experience-driven" to "data-driven and proactive early warning," significantly improving the personal electric shock protection level at power operation sites.

Keywords : residual current device (RCD); full-lifecycle management; data-driven; digital operation and maintenance; predictive maintenance

引言

电力工业作为国民经济的基础命脉, 其安全生产至关重要。在电力生产、传输、建设的全链条中, 人身触电事故始终是威胁作业人员生命健康的“头号杀手”^[1]。RCD作为防止人身触电事故的最后一道关键技术防线, 其运行的可靠性直接关系到作业人员的安全。然而, 传统的 RCD 运维管理普遍存在严重短板: 配置上“一刀切”, 运维上“靠人管”, 状态上“不可知”^[2]。现场普遍依赖人工按动试验按钮进行功能性检查, 这种方式无法获取 RCD 精准的动作电流和动作时间, 导致大量“亚健康”(动作特性漂移但未完全失效) 设备无法被及时发现, 形成了巨大的安全隐患。

随着《电力安全生产“十四五”行动计划》明确提出要“推进电力安全治理数字化转型升级”, 利用数字化、智能化手段解决传统安全问题已成为行业共识^[3]。当前, 已有研究侧重于 RCD 的配置选型^[4]或在线监测技术^[5], 但尚缺乏一套覆盖 RCD “采购-安装-运

维-报废”全生命周期、线上线下深度融合的运维管理体系的系统性研究。

本文立足于一线电力企业的迫切需求，旨在研究并构建一套以数据为核心、以流程为牵引、以平台为载体的 RCD 全生命周期数字化运维管理模式，有效解决了 RCD 状态不可知、管理不闭环、责任难追溯等问题，为提升电力企业本质安全水平提供一套可复制、可推广的解决方案。

一、RCD 传统运维管理模式痛点分析

通过对近年来多起人身触电事故的深度剖析，本文总结出传统 RCD 运维管理模式存在以下三大核心痛点：

（一）运维状态“不可知”

传统的运维方式仅能通过人工按压试验按钮定性判断 RCD “动”或“不动”，无法定量获取其动作电流值（ $I_{\Delta n}$ ）和动作时间（ t ）这两个关键参数。因此，对于动作特性已发生漂移（如动作电流从 30mA 漂移至 40mA，动作时间从 0.1s 延长至 0.3s）但尚未完全失效的 RCD，传统方法无法识别，导致其带病运行，在发生漏电时无法有效起到保护作用。

（二）管理流程“不闭环”

RCD 的定期校验工作多依赖人工记录，易出现漏检、超期、记录造假等问题。即使发现了缺陷 RCD，其更换、维修过程也缺乏有效的跟踪与监督，缺陷整改是否完成、复测是否合格等环节管理松散，无法形成有效的计划（Plan）- 执行（Do）- 检查（Check）- 处理（Act）闭环。

（三）决策支持“无数据”

由于缺乏历次测试数据的积累，运维决策（如备品备件采购、预防性更换）只能基于设备年限或故障后进行，属于典型的“经验判断”和“被动响应”模式的决策。管理人员无法从全局掌握所有 RCD 的健康状态分布，难以进行精准的资源调配和趋势预警。

二、数字化运维管理模式的系统构成与运行机制

为解决传统运维模式的系统性痛点，本研究构建了一套以数据为驱动、以流程为主线的 RCD 数字化运维管理系统。该系统围绕 RCD 全生命周期管理的核心环节，设计了五个关键功能模块，并通过标准化的业务流程将其串联，形成了一个协同高效、闭环管理的有机整体。

（一）系统核心功能模块

为实现 RCD 运维的标准化与闭环管理，本系统构建了五个协同运作的核心功能模块，将管理制度固化为线上流程，确保运维数据在系统内有序流动、闭环管理。

1. RCD 设备数字身份与档案管理模块

该模块是实现设备个体化精细管理的基础。系统为每一台在册 RCD 建立并维护其唯一的数字身份和档案。此唯一身份是设备在系统中的关键索引，确保了所有运维数据都能准确无误地归集至对应设备，实现全流程可追溯。档案内容聚焦于设备的使用与运维过程，完整记录了其“初始健康状态”与动态运维历史，主要包括：设备安装位置、名称、配电系统级别、额定动作电流与

动作时间等基准参数，以及是否采用防溅型或防爆型等关键防护属性。当运维人员在系统中执行任何操作时，系统均自动关联并校验此档案，确保运维对象明确、数据记录精准，为后续所有流程提供了唯一、可信的数据源。

2. 测试计划自动生成与派发模块

该模块是驱动运维工作从“被动响应”转向“主动预防”的引擎。系统基于预设的校验周期（可根据设备类型、安装区域、风险等级自定义），结合 RCD 设备档案，自动、批量地生成周期性的测试工作计划。这些计划被自动转化为具体的工作任务单，并通过系统接口推送至相关责任人员的移动端 APP 或 PC 端任务列表。此举彻底取代了传统依赖人工记忆与手动派单的模式，从源头上杜绝了工作的疏漏与延迟，确保了运维工作的计划性、规范性与时效性。

3. 移动端 /PC 端测试数据录入模块

该模块是确保运维数据“源头精准、过程真实”的关键环节，其设计充分考虑了不同现场环境的适用性。现场运维人员登录系统后，在待办任务列表中接收并执行具体的测试工单。每个工单已自动关联了目标 RCD 的设备信息与历史数据。人员依据标准作业流程，使用高精度 RCD 专用测试仪执行测试后，可根据现场网络条件，选择以下方式录入数据：在信号良好的区域，通过移动端 APP 实时在线录入；在偏远或信号不佳的作业现场，则启用移动端 APP 的离线模式进行数据暂存，待网络恢复后自动同步至平台；或返回驻地后，通过 PC 端进行集中录入。为保证数据真实性，系统在上述所有录入模式下均强制要求上传测试过程照片或仪器数据截图作为佐证。这种灵活的数据录入策略，确保了系统在各类复杂环境下的高可用性，同时实现了数据与任务、设备、人员的强绑定，为后续的智能判据提供了真实、可靠的输入。

4. 状态自动判据与缺陷工单闭环模块

该模块是系统的“智慧大脑”，实现了运维管理的智能诊断与刚性闭环。系统自动比对实测数据与额定参数，实现智能诊断。对于动作时间超标或动作电流值超出允许误差范围的 RCD，系统自动将其状态标记为“不合格”，并立即触发缺陷管理流程，生成一张“缺陷处理工单”。该工单被自动分配给相应的维修班组，并全程跟踪其更换或维修过程，直至相关人员完成处理并提交复测合格数据后，工单方可在系统中关闭。由此，形成了严格的线上 PDCA 管理闭环，确保每一个缺陷都被及时发现、有效处理。

5. RCD 全生命周期电子档案模块

该模块是承载与升华运维数据价值的核心仓库，是前述所有模块运作成果的最终体现。它并非一个静态的数据库，而是一个随运维任务执行而动态生长、持续更新的有机体。系统以设备的唯一数字身份为主线，自动将从“测试计划”触发的任务信息、从“数据录入”环节采集的实测数据、以及由“状态判据”驱动的缺陷处理全记录，无缝归集至对应的设备档案中。这份日益丰

富的电子健康档案，不仅是进行设备状态趋势分析、实现预测性维护和优化管理策略的宝贵数据资产，也为安全责任追溯与绩效管理提供了客观、公正的数据依据。

（二）模块化协同运行机制

以上五个核心模块并非孤立运作，而是通过数据流与业务流紧密衔接，形成一个协同高效的运行整体。

其运行机制如下：“测试计划模块”自动触发生成任务工单；“数据录入模块”在执行任务中确保源头数据的精准与真实；“状态判据模块”对数据进行即时诊断并驱动缺陷处理流程，实现业务闭环；整个过程的所有动态与静态信息，最终都归集于“全生命周期电子档案模块”，并以此丰富和夯实“设备档案模块”的数据基础。档案数据的积累又反过来为优化测试计划周期、精准定位薄弱设备提供了数据洞察，从而开启新一轮更精准、更高效的运维循环。

这一模块化架构确保了 RCD 运维管理从传统的“人治、经验主导”向“流程化、数据驱动”的根本性转变，为实现“主动预警、本质安全”的运维目标奠定了坚实的系统基础。

三、数据驱动的运维决策与优化机制

在上述系统构成的支撑下，该模式通过以下机制实现数据驱动的运维决策优化：

（一）运维状态透明化与管理定向化

平台集成了 RCD 的台账信息与实时测试数据，生成企业统一的《RCD 安全状态一览表》及基于 GIS 地图的可视化看板。管理人员可全局掌控所有 RCD 的分布、状态（以“合格”“待测”“不合格”“超期”等颜色区分），并可一键筛选定位所有“不合格”或“超期未测”设备，生成批量处理工单。这使得管理资源能够精准、高效地投向最薄弱环节，实现了从“粗放管理”到“精准施策”的转变。

（二）维护决策从“经验判断”到“数据支撑”

平台内置的数据分析引擎能够对 RCD 的历年测试数据进行趋势分析，自动绘制“性能衰减曲线”。系统可自动识别那些虽然当前测试“合格”，但动作值或时间已连续多次逼近标准上限的 RCD，并发出“早期预警”，提示重点关注或提前更换，实现预测性维护。例如，华能陇东公司基建现场实际应用中，该功能已成功预警并提前更换了数十台存在潜在失效风险的 RCD，有效防范了事故于未然。同时，基于大量历史数据建立的寿命预测模型，可为制定科学的备品备件采购计划和预防性更换策略提供数据依据。

（三）责任追溯与绩效管理闭环化

整个运维管理过程的所有关键节点均在平台中完整留痕，实

现了责任的可追溯。平台可自动统计各基层单位的 RCD “测试完成率”“一次合格率”“缺陷整改及时率”等关键绩效指标，并生成分析报告，为安全绩效考核与评先评优提供客观、公正的数据支持，形成有效的激励与约束机制。

四、应用成效分析

该模式在华能甘肃公司系统内部全面推广后，取得了显著的经济效益与社会效益。

（一）管理效能显著提升

效率提升：RCD 缺陷的发现、上报、处理、复核平均时长从过去的数周缩短至 3 天以内。

质量提升：通过专用测试仪的精准校验和系统的强制流程，RCD 运维工作的质量得到根本性保障。全公司因漏电引起的越级跳闸事件同比下降超过 90%。

（二）安全可靠根本性增强

实现了对“亚健康”RCD 的早期发现和干预，避免了保护失效。在八〇三电厂电动工器具故障漏电的案例中，一台 30mA 高灵敏度 RCD 在 0.08 秒内成功切断故障电流，使流经人员的电流被限制在 10mA 以下，作业人员仅感轻微麻刺感，实现了“电不伤人”的防护目标。

运维模式从“事后维修”向“预测性维护”进阶，设备健康水平和系统安全冗余度大幅提高。

五、结论与展望

本研究成功构建并应用了一套基于数字化平台的 RCD 全生命周期运维管理模式。该模式的核心创新，在于通过“流程闭环”确保了运维过程的规范性，通过“数据驱动”实现了管理决策的科学性，二者的深度融合构成了一个能够自我迭代优化的智能系统。这一根本性变革，有效解决了电力行业 RCD “装而不管、坏而不知”的长期困境。应用数据证实，该模式能将缺陷处理周期从数周缩短至 3 天以内，极大提升了运维效能与人身安全防护的可靠性。

本模式不仅为 RCD 管理提供了具体方案，更为电力安全治理的数字化转型树立了可复制、可推广的范式。展望未来，研究工作将从三个维度持续推进：一是开发嵌入式的 RCD 物联网监测单元，实现从“定期检测”到“实时感知”的跨越；二是将现有模式拓展至接地线、绝缘工具等更广泛的安全工器具管理领域；三是引入人工智能算法，深度挖掘数据价值，实现从“预警”到“预测”的进阶，最终构筑起更加智慧主动的安全风险防控体系。

参考文献

- [1] 国家能源局. 电力安全生产“十四五”行动计划 [R]. 2021.
- [2] 李建国, 王磊. 电力作业现场漏电保护器应用现状与故障分析 [J]. 电力安全技术, 2020, 22(5): 1-5.
- [3] 刘强, 陈晓云. 数字化转型驱动电力安全管理变革的路径研究 [J]. 中国电力, 2022, 55(8): 203-210.
- [4] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 13955-2017 剩余电流动作保护装置安装和运行 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [5] 张华, 李昕, 等. 基于无线传感网络的剩余电流保护器在线监测系统 [J]. 电测与仪表, 2021, 58(12): 125-130.

可转动连接器配合结构的核心设计与应用性能研究

谢森荣

安费诺科技（珠海）有限公司，广东 珠海 519000

DOI:10.61369/EPTSM.2025090016

摘 要： 文章围绕可转动连接器配合结构展开研究，聚焦其核心设计与应用性能优化。针对现有可转动插头结构在通电时弹性接触部位易失效的问题，结合快速锁紧设计思路，提出优化方案。通过简化零件组成、改进组装工艺，在保证连接器使用便利性与连接稳定性的同时，降低材料及组装成本，提升其在电力传输系统中的可靠性，为电连接器领域相关产品的研发与应用提供参考。

关 键 词： 可转动连接器；配合结构；核心设计；应用

Research on The Core Design and Application Performance of Rotatable Connector Mating Structures

Xie Senrong

Amphenol Technology (Zhuhai) Co., Ltd., Zhuhai, Guangdong 519000

Abstract： This article focuses on the research of the mating structure of rotatable connectors, with an emphasis on optimizing their core design and application performance. Addressing the issue of the easily failing elastic contact part in existing rotatable plug structures when powered on, an optimization solution is proposed by integrating the concept of rapid locking design. By simplifying the component composition and improving the assembly process, the solution ensures the convenience of use and connection stability of the connector while reducing material and assembly costs. It also enhances the reliability of the connector in power transmission systems, providing a reference for the research and application of related products in the field of electrical connectors.

Keywords： rotatable connector; mating structure; core design; application

引言

在现代生产生活中，电力传输系统对电连接器的要求日益严苛，既需保障连接稳定性以确保电流传输可靠，避免插接后松动掉落，又须具备良好的使用便利性，适应多角度插接场景。当前市场上的可转动插头结构，虽能实现插头相对插座自由旋转，但完全插入后仍可随意转动，通电过程中弹性接触部位易出现失效风险，严重影响使用可靠性。在此背景下，深入研究可转动连接器配合结构的核心设计，解决其应用难题，对提升电连接器性能、降低生产成本具有重要意义，也能更好地满足电力传输系统不断发展的需求。

一、工程概况

文章针对可转动连接器配合结构的工程应用需求，以解决现有产品可靠性与经济性矛盾为目标展开设计与分析。该连接器主要应用于各类电力传输场景，涵盖工业设备供电、电子仪器连接等领域，需在不同安装角度下实现稳定的电流传输，同时满足IP67以上防水标准，适应复杂的工作环境。从工程实践来看，传统可转动连接器在使用中常出现插接到位后仍可转动导致的接触失效问题，且部分产品的锁紧结构组装流程烦琐，增加了生产周期与成本。文章通过优化结构设计，如采用同轴端子布局、多组导向与锁定部件配合，以及简化快速锁紧机构零件组成，旨在提升连接器的工程适用性。

二、可转动连接器配合结构的核心设计

（一）整体结构布局设计

可转动连接器的配合结构，其核心在于插头与插座两组件的协同设计。二者通过内部多部件的精准衔接与互动，共同实现连接与锁定的核心功能^[1]。

1. 插座部分

插座部分由第一本体、第一导向件与第一端子构成，如图1所示。其中，第一本体作为整个结构的基础承载部件，其上部设置有第一锁定部，为后续的机械锁定提供结构性支撑。第一导向件则与第一本体形成转动连接；它采用空心圆柱结构，直接套设在第一本体的圆筒部外部，以此保证其在工作时能实现顺畅的转动

灵活性。第一端子被固定于第一本体圆筒部的中心轴线位置，并与第一导向件保持同轴关系，此举从根本上确保了电流传输路径的稳定性。

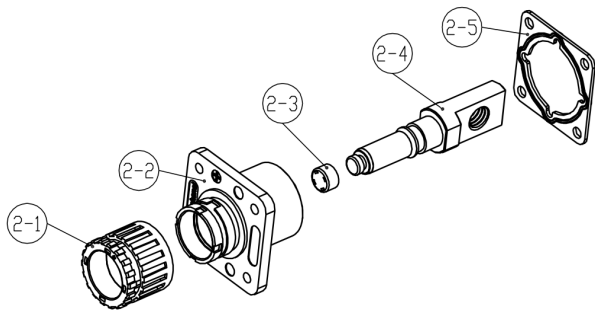


图1 插座部分零件明细

2. 插头部分

插头部分则由第二本体与第二端子组成，如图2所示。第二本体的设计集成了第二锁定部与第一配合部两大关键特征：第一配合部的主要职能，在于与插座侧的第一导向件进行精确对接与引导；而第二端子则与插座内部的第一端子在空间位置上严格对应，以此构成完整且高效的电流传导通道。

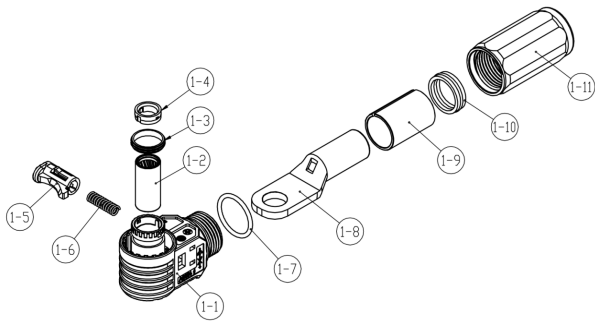


图2 插头部分零件明细

整体布局严格遵循“先转动调节，后到位锁定”的逻辑顺序进行工作。在插头与插座未达成完全配合状态时，插头可借助其第一配合部与插座第一导向件之间的引导关系，相对于插座进行自由转动，从而充分满足多样化的安装角度需求。一旦插头被推入至最终位置，使第一端子与第二端子实现电性配合到位后，设置于第一本体与第二本体上的第一锁定部与第二锁定部便会立即产生机械相互作用，从而严格限制二者的相对转动。这一最终锁定机制，为整个连接器在通电使用状态下的长期稳定性与可靠性提供了根本保障。

（二）导向与防错设计

为提升插头与插座对接的精准性和灵活性，结构中融入了多组导向部件，并兼具防错功能。第一导向件的外壁开设有沿上下方向延伸的导向槽，导向槽沿第一导向件周向均布，数量根据实际需求设定；对应的，插头第一配合部包含可插入导向槽的第一配合凸筋，且多个第一配合凸筋沿第二端子周向均布。这种设计使得插头在与插座对接时，第一配合凸筋可沿导向槽滑动，引导插头精准插接，同时，在未完全锁定前，插头可随第一导向件的转动而调整角度，提升安装便利性。此外，导向槽与第一配合凸筋的分布角度、宽度需严格匹配，若二者尺寸或布局不契合，插头

将无法插入插座，形成有效的防插错机制，避免因误插导致的部件损坏或电流传输故障，进一步保障连接安全性与可靠性。

（三）锁定与解锁机构设计

锁定机构是确保连接器配合到位后稳定运行的关键，结构中采用多组锁定部件协同作用。第一导向件外壁开设有环形锁定槽，插头的第二本体上可移动设置锁定件，当第一端子与第二端子插接到位时，锁定件插入锁定槽，限制插头与插座的轴向运动，防止松动。同时，第一锁定部与第二锁定部形成辅助锁定，第二锁定部为设置在第二本体下端的第二配合凹槽，第一锁定部则是圆筒部内壁底部的第一导向凸筋，且二者均沿圆筒部周向均布，配合到位后第一导向凸筋插入第二配合凹槽，限制二者相对转动。为便于后续拆卸，插头还设计有解锁按钮，解锁按钮与锁定件联动（可一体成型），当需要分离插头与插座时，按压解锁按钮可带动锁定件退出锁定槽，解除轴向锁定，同时第一导向凸筋与第二配合凹槽分离，实现快速解锁，兼顾锁定可靠性与操作便捷性。

三、可转动连接器配合结构的核心设计应用难题

（一）转动与锁定的协同控制难度较大

若第一导向件与第一本体的转动连接稳定性不足，易出现转动卡顿或过度松动，影响角度调节精度；同时，锁定部件（如锁定件与锁定槽、第一导向凸筋与第二配合凹槽）的配合公差若控制不当，可能导致锁定不到位或解锁困难，甚至在通电运行中出现意外解锁，引发接触失效风险^[2]。

（二）防水性能与结构兼容性存在矛盾

该连接器需适应多环境应用，尤其在潮湿或粉尘场景中须具备良好的防水防尘能力，虽可通过设置防水胶圈（如插头第二配合部外壁的防水胶圈、插座的O型密封圈）提升密封效果，但胶圈的安装位置与结构设计可能影响部件的转动灵活性，如何在保障防水性能的同时不干扰核心功能，成为应用难点。

（三）成本与性能平衡难度高

传统快速锁紧结构常由4个零件组成（本体、按钮、弹簧、封盖），零件数量多导致材料成本上升，且组装工艺复杂（如烘烤固化需较长时间、超声波焊接对设备与公差要求高），若为简化结构减少零件，可能影响锁紧可靠性，如何在精简结构、降低成本的同时保障性能，是工程应用中的关键挑战。此外，大电流传输场景下的散热问题也不容忽视，连接器长期传输大电流易产生热量，若结构设计中未充分考虑散热路径，热量积聚可能导致端子接触电阻增大，影响传输效率，甚至引发部件老化失效^[3]。

四、可转动连接器配合结构的核心设计应用的解决措施

（一）优化转动与锁定部件的配合精度

为解决转动与锁定协同控制难题，需从部件加工与装配工艺

两方面入手。首先，严格控制第一导向件与第一本体圆筒部的配合公差，采用高精度加工设备确保圆筒部外圆与第一导向件内孔的同轴度，减少转动卡顿；同时，在第一本体圆筒部开设第一环形凹槽与第二环形凹槽，第一导向件内壁对应设置第一限位扣与第二限位扣，限位扣插入环形凹槽后，既能限制第一导向件的轴向运动，又能通过凹槽与限位扣的滑动配合提升转动稳定性。其次，对锁定部件进行公差优化，锁定槽的深度、宽度与锁定件的尺寸需精准匹配，采用精密冲压工艺加工锁定件，确保其插入锁定槽后紧密贴合；第一导向凸筋与第二配合凹槽的截面形状设计为梯形，提升配合导向性，同时通过工装夹具保证二者在装配过程中的周向位置精度，避免因错位导致锁定不到位。此外，在锁定件与第二本体的连接部位设置导向结构，确保锁定件移动顺畅，减少解锁阻力，实现转动与锁定功能的精准协同。

（二）改进防水结构设计以兼容核心功能

针对防水性能与结构兼容性的矛盾，采用分层密封与灵活密封件布局的方案。在插头第二配合部外壁设置防水胶圈，胶圈采用耐老化、弹性好的橡胶材料，其内径与第二配合部外壁过盈配合，外径则与插座第一本体的圆筒部内壁紧密接触，形成径向密封；同时，在插座第一本体与安装面板的连接部位设置密封胶垫，通过螺钉紧固实现端面密封，保障整体防水效果。为避免防水胶圈影响转动功能，将防水胶圈设置在非转动接触区域，如插头第二配合部的固定段，与第一导向件的转动区域错开，减少胶圈与转动部件的摩擦；此外，在第一导向件与第一本体的配合间隙处设置防尘唇，既能防止粉尘进入影响转动，又不会对转动灵活性造成明显阻碍。通过这种分区密封设计，在保障 IP67 以上防水标准的同时，确保转动与锁定功能的正常实现。

（三）精简快速锁紧机构以平衡成本与性能

借鉴新型快速锁紧结构设计思路，将传统 4 零件结构（本体、按钮、弹簧、封盖）精简为 3 零件结构（本体、按钮、弹簧），取消封盖零件，降低材料成本。具体而言，将按钮设计为一体式结构，按钮上集成弹臂与凸台，弹簧装入按钮槽内后，二者一同装入本体槽内；当按钮完全组装到位时，弹臂受挤压后落入本体的

孔槽内，形成扣合定位，同时在弹簧弹力作用下，按钮弹臂端面与本体止挡面贴合，实现稳定定位。这种组装工艺无需额外的封盖固定步骤，通过按钮弹臂与本体孔槽的扣合即可完成装配，简化了流程（如无需粘合剂或超声波焊接），降低了组装成本。为保障锁紧可靠性，对按钮弹臂的弹性系数进行优化，通过材料力学计算确定弹臂的厚度、长度，确保其在长期使用中不易疲劳失效；同时，在按钮凸台与插座本体凸台的配合面设置防滑纹路，提升扣合后的摩擦力，避免意外解锁，实现成本降低与性能保障的平衡^[4]。

（四）设计高效 散热路径以适应大电流传输

为解决大电流传输下的散热问题，从端子结构与整体散热布局两方面优化。采用高性能端子设计，插头的第二端子选用 Amphenol 专利的 RADSOK 端子，该端子通过特殊的栅格结构增大接触面积，降低接触电阻，减少热量产生；插座的第一端子采用高导电率的铜合金材料，并进行表面镀银处理，提升导电性能，进一步降低电阻损耗。其次，在第一本体与第二本体的结构设计中预留散热通道，第一本体的圆筒部开设散热孔（沿周向均布），插头第二本体采用镂空设计，便于空气流通；同时，在端子与本体的接触部位涂抹导热硅脂，提升热量从端子向本体的传导效率，本体选用导热性能较好的工程塑料（如增强尼龙），加速热量散发^[5]。

五、结束语

文章聚焦可转动连接器配合结构的设计与应用性能，分析现有产品不足后提出针对性方案。核心设计上，优化结构实现插头插座转动调节与锁定，借导向防错提升对接精准安全，通过锁定解锁协同设计兼顾稳定与便捷。针对转动锁定、防水等应用难题，从精度优化、防水改进等方面解决，提升性能与适用性。该结构精简零件、优化工艺，降本同时保障便利可靠，适用于多角度安装、大电流传输等场景。后续可探索新型材料应用与智能化设计，助力电连接器升级。

参考文献

[1] 陈庭威. 新型装配式结构梁柱连接器的性能及应用研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2018.
[2] 孙丽君, 闫涛, 刘波, 等. 用户能耗监测的智能插座原型设计 [J]. 机械设计与制造, 2025(5): 125-130.
[3] 翟艳. 智能时代下插头插座的安全性设计与研究 [J]. 当代农机, 2025(7): 101-102.
[4] 姜成. 冠簧连接器电连接性能退化分析 [J]. 铁道车辆, 2025, 63(3): 196-203.
[5] 柴兴, 马飞, 时春东, 等. 大电流集成测温型连接器的设计 [J]. 机电元件, 2024, 44(5): 3-6, 12.

电力工程电气专业与土建施工配合的建议措施分析

闵松鸣

中科电投（广东）智慧能源技术有限公司，广东 广州 510000

DOI:10.61369/EPTSM.2025090018

摘 要： 文章立足电力工程建设实践，围绕电气专业与土建施工在同一工期与同一工地的协同关系展开研究。研究归纳出多源信息衔接不足、计划逻辑错位、责任边界含混与过程控制松散等共性问题，并指出问题的本质在于沟通机制、基准规则与过程清单的缺位或执行偏差。研究建议采用以清单化管理、里程碑联动、接口矩阵、样板先行、供采装一体化、统一基准与台账闭环为核心的配合策略，构建面向全过程的协同框架。

关 键 词： 电力工程；电气专业；土建施工

Analysis of Suggested Measures for Coordination Between Electrical Engineering and Civil Construction in Power Projects

Min Songming

China Science & Technology Power Investment (Guangdong) Smart Energy Technology Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510000

Abstract： Based on the practice of power engineering construction, this article focuses on the collaborative relationship between electrical engineering and civil construction when they are carried out simultaneously at the same construction site and within the same timeframe. The study identifies common issues such as inadequate integration of multi-source information, misalignment of planning logic, ambiguous responsibility boundaries, and lax process control. It points out that the essence of these problems lies in the absence or execution deviations of communication mechanisms, benchmarking rules, and process checklists. The study recommends adopting a collaborative strategy centered on checklist management, milestone linkage, interface matrix, prototype demonstration, integrated supply-procurement-installation, unified benchmarking, and closed-loop ledger management to construct a comprehensive process-oriented collaborative framework.

Keywords： power engineering; electrical engineering; civil construction

引言

文章从设计深度、计划联动、接口划分、预留预埋、物资设备、测量控制、现场组织等几方面展开分析，先对主要配合问题进行归纳，再提出针对性的建议措施，最终构建以清单化、标准化与时窗化为支撑的协同体系，力求在不增加过多管理负担的前提下，提升工程的稳定性与可预期性。

一、电力工程电气专业与土建施工配合存在的问题

（一）设计深度不足导致预留预埋错漏

电力工程电气专业与土建施工的配合首先受制于设计深度不足，表现为预留预埋信息不全与定位不准。第一，电缆桥架、设备基础、孔洞套管等关键尺寸未被完整表达，导致土建结构放样无法与电气安装精准对应，出现偏位与遗漏。第二，专业之间的界面定义不清，电气与土建对管线穿墙、穿楼板及防火封堵的责任分工理解不一致，出现重复施工与责任争执^[1]。第三，设计变更频次较高而传递不畅，现场执行与图纸版本无法对应，形成返

工链条。第四，土建结构深化与电气深化不同步，导致机房、管井、综合管线空间内净距不足，影响设备安装与维护通道。第五，套管材质、标高与编号体系不统一，电气难以形成可追溯的预埋台账。第六，局部节点大样缺失，施工人员仅能依据经验处理，影响整体质量一致性。

（二）进度计划脱节导致关键工序错位

进度计划脱节使电力工程电气专业与土建施工在关键时段无法实现同频配合，形成等待与抢占作业面的恶性循环。第一，总控计划与月周计划脱节，里程碑对电气安装窗口的约束不明确，电气无法按期穿插^[2]。第二，土建节点交付标准未与电气需求对

齐，结构移交后仍不具备安装条件，造成二次准备与反复清理。第三，关键线路识别偏差，机房、配电室、管井等关键区域未被纳入优先序列，影响主线推进。第四，资源配置与工序节奏不匹配，电气所需的垂直运输与临时用电时段与土建高峰冲突，出现排队等待。第五，变更与签证影响未进入计划滚动调整，现场临时协调取代计划管理，造成多点失控。第六，周计划兑现评审流于形式，偏差分析与纠偏措施缺位，问题跨周累积。

（三）接口划分不清导致施工组织与交接受阻

接口划分不清使电力工程电气专业与土建施工在组织安排与工序交接上频繁摩擦，影响整体效率。第一，预留预埋、套管防水、防火封堵、孔洞修补等环节的责任边界不明确，导致同一工作由多方介入，产生质量与外观差异。第二，交叉作业权限不清，电气与土建对作业面优先级理解不同，现场协调成本增加^[3]。第三，机房与管井移交标准模糊，洁净度、平整度与定位标识不统一，影响电气设备就位。第四，分包单位之间的接口未在合同与技术协议中固化，出现相互推诿与结算争议。第五，检验批划分口径不一致，隐蔽工程检查节奏无法统一，造成漏验与补验。第六，图纸会审纪要落实不到位，接口清单未与现场作业清单一一对应，执行层缺乏依据。

（四）预留预埋管理薄弱导致后续穿插困难

预留预埋管理薄弱是电力工程电气专业与土建施工配合中的高频痛点，直接影响后续安装质量与效率。第一，放线与定位缺少复核环节，孔洞与套管出现偏位与高度误差，给桥架与管线安装带来困难。第二，套管规格与材质未与设备接口一致，后续需要二次适配，增加工期^[4]。第三，标识与台账管理缺失，预留位置、标高、编号无法追溯，影响隐蔽验收与竣工资料编制。第四，隐蔽前的联合验收不到位，问题未在可控阶段解决，而是在面层完成后集中爆发。第五，首件样板未建立统一标准，不同区域施工质量差异明显，整改量大。第六，土建结构施工中的保护不到位，已完成的套管被踩踏、堵塞或损坏，形成反复清理。第七，工序衔接时间安排不合理，电气未获得有效作业时窗，导致抢工穿插。

（五）材料设备计划失配导致到货与安装脱节

材料设备计划失配使电力工程电气专业与土建施工在供应与安装之间出现脱节，形成堆放、挤占与等待。第一，技术参数与接口标准未在订货前完成一致性确认，到货后发现不匹配，影响安装连续性^[5]。第二，到货批次未与施工时窗对应，材料集中到场，现场堆放超出容量，干扰管理。第三，关键设备到货不稳定，安装顺序被打乱，主线推进受阻。第四，采购周期与设计变更不同步，变更信息未能及时传递到供应链，导致无效采购。第五，现场收货与检验不充分，质量问题进入安装环节，返工风险升高。第六，临时仓与堆场布置不合理，二次搬运频繁，效率低下。第七，供货单位与安装单位沟通不足，现场配合与技术服务不到位，问题处理滞后。

（六）测量基准与控制点不统一导致安装偏差

测量基准与控制点的不统一使电力工程电气专业与土建施工在标高、轴线与定位上频繁出现偏差，给成排成线的电气安装带

来系统性误差。第一，标高基准由不同团队分别建立与维护，导致设备标高与结构标高不一致。第二，轴线复核不到位，桥架与支吊架在长距离范围内产生累计偏移。第三，控制点保护不充分，施工过程中被破坏或遮挡，复测频发。第四，复核记录与测点编号不统一，电气难以对异常作出准确溯源。第五，施工放样受现场条件影响，未形成统一的放样基线，导致不同楼层与区域无法对齐。第六，沉降与变形监测结果未及时反馈到安装放线，后续调整欠缺依据。

（七）临建布置与通道组织冲突导致施工效率下降

临建布置与通道组织的不合理直接削弱电力工程电气专业与土建施工的配合作用，现场效率明显下降。第一，垂直运输资源被土建高峰占用，电气大件与成排材料无法按计划上料，造成作业中断。第二，临时用电与临水布置与施工通道相互干扰，频繁迁改，影响连续作业。第三，材料堆场与临时仓位置偏离作业面，二次搬运多，时间浪费严重。第四，脚手体系与支撑占用电气安装空间，管线敷设与设备吊装受限。第五，作业面移交节奏紊乱，电气进入后遇到未清理与未找平的状态，无法直接施工。第六，现场交通组织缺少优先规则，电气与土建车辆互相干扰，装卸效率低。

二、电力工程电气专业与土建施工配合的有效建议措施

（一）在初设与施工图阶段完成预留预埋清单复核与专业会签

电力工程电气专业与土建施工的配合需要在设计阶段奠定统一底板。第一，形成覆盖孔洞、套管、设备基础与桥架落位的预留预埋清单，做到图表一致与编号统一。第二，组织专业会审，建立接口矩阵，明确职责边界与移交标准，固化在会审纪要与附件。第三，完善节点大样与关键细部做法，确保施工有据可依。第四，建立变更快审机制与版本管理规则，确保现场只用同一版本并保留红线标注。第五，设置首件认可的技术要求，明确样板制作与复核流程，为后续批量施工提供参考。第六，统一标高与轴线基准表达方式，将控制点嵌入图纸与清单。第七，开展专项对齐会，确保土建深化与电气深化同步推进。第八，形成可追溯的预埋台账模板，明确记录要素与责任人。

（二）以里程碑为牵引实现总控计划与三级计划的滚动联动

进度管理要把电气专业与土建施工的关键时窗纳入统一逻辑。第一，在总控计划中设置电气关键窗口，将机房、管井、配电室与线路敷设作为受控里程碑。第二，建立总控、月度与周度三层计划的联动校核机制，周周校核并及时纠偏。第三，梳理关键线路，明确穿插顺序与硬约束关系，减少临时调整。第四，设置资源配给规则，对垂直运输、临电与通道使用建立优先权。第五，对变更与签证形成影响评估，及时滚动调整计划并同步责任人。第六，实施周计划兑现评审，形成偏差清单与闭环措施。第七，建立季节性与区域性应对方案，将雨季与交叉高峰提前纳入排布。第八，设置时窗化管理，分离不相容作业，保障关键吊装

与安装连续性。

（三）以接口清单和移交标准实现组织与交接的清晰可执行

接口管理要以可操作的清单化文件为抓手，确保电力工程电气专业与土建施工高效衔接。第一，编制接口清单与权责矩阵，将预留预埋、防火封堵、孔洞修补与成品保护等事项逐项明确。第二，制定机房与管井移交标准，细化洁净度、平整度、定位标识与放线痕迹的要求。第三，将接口约定写入合同与技术协议，实现可考核与可结算。第四，建立联合签认流程，设置时限与责任链，缩短问题闭环时间。第五，完善图纸会审到执行的转化路径，形成作业清单与现场检查表。第六，设立现场协调岗位，负责跨专业冲突的快速裁决。第七，统一检验批划分口径与隐蔽验收流程，减少漏验与重复验收。第八，建立争议快处机制，固定裁决规则与记录模板。

（四）以首件带动与定位复核保障预留预埋一次到位

预留预埋需要以首件先行与过程复核确保质量稳定。第一，制定首件方案，明确制作位置、检验项目与允许偏差，组织电力工程电气专业与土建联合确认。第二，实施全站仪放线与复核，形成测点编号与记录，确保孔洞与套管定位准确。第三，执行隐蔽前联合验收，问题清单化、照片化并当场整改。第四，建立唯一编号的预埋台账，打通图纸、现场与资料的映射关系。第五，明确保护措施与责任人，防止施工过程对套管造成破坏。第六，细化后置工艺触发条件，明确何时预埋与何时后置的判定规则。第七，推广控制线与定位标识标准化做法，提升不同区域的一致性。第八，组织复盘与标准固化，将首件经验转化为批量施工指引。

（五）以供采装一体化计划消除到货安装脱节

供采装协同是电力工程电气专业与土建施工配合的关键支点。第一，订货前完成技术参数与接口标准的复核，确保设备与管线系统一致性。第二，编制到货与安装窗口匹配表，按作业面顺序分批到场，减少堆放。第三，设置关键设备到货预警，明确替代方案与责任时限。第四，完善收货检验流程，现场快速筛查质量问题，避免劣质进入安装。第五，优化临时仓与堆场位置，缩短二次搬运路径并保障通道畅通。第六，建立供货单位技术服

务机制，现场问题快速响应。第七，同步变更信息到供应链，避免无效采购。

（六）以统一基准与控制点保护确保安装精度

测量控制是电气安装质量的基础，应以统一基准与严格保护为抓手。第一，统一标高与轴线基准，完成交接签认并形成永久标识。第二，设置放样复核点与分区编号，建立复核记录，实现可追溯。第三，实施控制点实体保护，明确保护范围与检查频次。第四，将沉降与变形监测结果及时纳入放线调整，保证长期一致性。第五，统一仪器配置与人员培训，提升测量结果稳定性。第六，建立测量交接程序，明确责任人与签认路径。第七，制定异常处置流程，偏差超限时立即停检与纠偏。

（七）以施工总平与路径优化提高现场组织效率

现场组织需要在总平面与路径上为电力工程电气专业与土建施工留足空间与时窗。第一，统筹垂直运输、临时用电与临水布置，避免占用主通道与关键出入口。第二，按工序路线设置堆场与临时仓，优先靠近作业面并减少转运。第三，制定作业面移交计划，明确清理与找平要求，实现无障碍进入。第四，优化脚手与支撑体系，预留电气安装通道与吊装孔位。第五，建立现场交通组织规则，明确车辆通行与装卸优先级。第六，实施现场标识与导引标准化，让人员快速识别路径与区域。第七，配置材料上料固定时段，与土建高峰错时运行。

三、结论

研究围绕电力工程电气专业与土建施工的协同关系，指出问题集中体现为规则不统一、信息不同步与过程不闭环。文章提出以清单化、标准化与时窗化为核心的建议措施，构建从前期会签到过程管控再到验收移交的完整协同框架，强调以里程碑联动、接口矩阵、首件认可、供采装一体化与统一基准作为关键抓手，实现预留预埋准确、工序衔接顺畅、安装精度稳定与验收口径一致的综合目标。研究的实施路径具有可复制性与可操作性，可为电力工程项目在电气专业与土建施工配合方面提供实践指南。

参考文献

- [1] 朱明军. 电力项目安装及土建施工的配合策略 [J]. 居业, 2025, (02): 123-125.
[2] 骆文君. 电力工程中电气安装与土建施工的配合 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2024, (29): 13-15.
[3] 李悦. 电力设备安装中的施工配合技术研究 [J]. 中国设备工程, 2024, (05): 198-200.
[4] 张德胜. 电力工程中电气安装与土建施工的配合 [J]. 大众用电, 2024, 38(11): 50-51.
[5] 张敬敏. 电力工程电气专业与土建施工配合的建议措施新探 [J]. 科技创新与应用, 2024, 11(17): 115-117.

