

水利电力 科学与技术

Water Conservancy and Electric Power
Science and Technology



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



Editors-in-Chief

Jian Zhao

Editorial Board Member

Jinze Fu

State Grid Jibei Electric Power Co., Ltd. Tangshan Fengrun District Power
Supply Branch

Shiyuan Zhang

Jingdezhen Water Conservancy Planning and Design Institute

Li Zhan

Jingdezhen Water Conservancy Planning and Design Institute

Yan Li

Liaoning Hongyanhe Nuclear Power Co., LTD.



水利电力科学与技术

Water Conservancy and Electric Power
Science and Technology

第3卷 第7期 2025年7月刊

主 管 ART AND DESIGN PRESS INC.

主 办 ART AND DESIGN PRESS INC.

编 辑 《水利电力科学与技术》编辑部

ISSN(O): 2995-438X

ISSN(P): 2995-4371

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:

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

- 001 基于 GIS 的流域洪水风险预警机制研究 朱明, 张闯, 周许, 王旭, 顾子龙
Research on GIS-Based Early Warning Mechanism for
Flood Risk in River Basins Zhu Ming, Zhang Chuang, Zhou Xu, Wang Xu, Gu Zilong
- 004 基于 BIM 技术的水利工程设计
与管理优化 杨靖, 董元华, 徐狄, 王聪, 程健涛
Optimization of Design And Management of Water Conservancy Projects based on BIM
technology Yang Jing, Dong Yuanhua, Xu Di, Wang Cong, Cheng Jiantao
- 007 基于机器学习的电力通信网故障诊断与定位方法研究 刘国忠
Research on Fault Diagnosis and Localization Methods for Power Communication
Networks Based on Machine Learning Liu Guozhong
- 010 火电厂辅机节能优化运行策略研究 王勇
Research on Energy Saving and Optimization of Auxiliary Machinery
Operation in Thermal Power Plant Wang Yong
- 013 电力数据数字能源时代的核心基石与实践路径 卢霄霞, 张彦军
The Core Cornerstone and Practical Path of the Era
of Digital Energy in the Power Data Lu Xiaoxia, Zhang Yanjun
- 016 发电厂大型机组高压厂用电系统电流互感器参数建议研究 高攀
Research on Recommended Parameters of Current Transformer in High-Voltage Power
System of Large-Scale Power Plant Unit Gao Pan
- 019 火电厂除灰除渣系统智能化改造方案 马战南, 刘江, 贺孝峰, 张聪聪
Intelligent Transformation Scheme of Ash Removal System in
Thermal Power Plant Ma Zhannan, Liu Jiang, He Xiaofeng, Zhang Congcong
- 022 水利水电工程智能化施工与管理技术研究 杨世林
Research on Intelligent Construction and Management Technologies for Water
Resources and Hydropower Engineering Yang Shilin
- 025 包装车间设备自动化技术管理与节能降耗技改策略研究 刘绍涛
Research on Equipment Automation Technology Management and Energy
Saving and Consumption Reduction Technology Transformation
Strategy in Packaging Workshop Liu Shaotao
- 028 风力与光伏发电场景下电气自动化设备维护及氢能应用技术研究 虞晓晖
Research on Maintenance of Electrical Automation Equipment and Hydrogen
Energy Application Technology in Wind and Photovoltaic Power
Generation Scenarios Yu Xiaohui
- 031 机电工程领域技术管理与项目管理与于水轮发电机安装的协同策略 周永达
Collaborative Strategy between Technical Management and Project
Management in the Field of Mechanical and Electrical Engineering
and Installation of Hydroelectric Generators Zhou Yongda
- 034 双碳目标下中国能源企业海外新能源电力投资的风险评估与应对策略 封亚楠
Risk Assessment and Response Strategies for Overseas New Energy Power Investment
by Chinese Energy Enterprises under the Dual Carbon Goals Feng Yanan
- 037 火力发电水足迹特点分析评价
——以广州市为例 王雨欣, 何家祥, 汤舒, 苏春生, 房春艳
Analysis and Evaluation of Water Footprint Characteristics of Thermal Power
Generation: A Case Study of Guangzhou City Wang Yuxin, He Jiaxiang, Tang Shu,
Su Chunsheng, Fang Chunyan

040	全过程审计视角下电力工程投资风险防控研究 Research on Risk Prevention and Control of Electric Power Engineering Investment from the Perspective of Full-Process Audit	畅恺龙 Chang Kailong
043	自来水给水管网漏水防治技术探究 Exploration of Leakage Prevention and Control Technologies for Tap Water Supply Pipelines	张权锋 Zhang Quanfeng

基于 GIS 的流域洪水风险预警机制研究

朱明, 张闯, 周许, 王旭, 顾子龙

淮安市水利勘测设计研究院有限公司, 江苏 淮安 223001

DOI:10.61369/WCEST.2025070001

摘 要 : 随着气候变化加剧, 流域洪水频发, 造成严重的生命财产损失。基于 GIS 的洪水风险预警机制能够实时监测流域内的水文、气象及地理信息, 为洪水灾害提供科学预测与预警支持。通过集成水文模型与地理信息系统, 优化了洪水风险评估、预警发布和响应机制, 有效提升了预警的准确性与时效性。研究表明, GIS 技术不仅提高了洪水预测的空间分辨率, 还增强了预警系统的动态响应能力, 为流域洪水管理提供了新的解决方案。

关 键 词 : GIS; 洪水风险; 预警机制; 流域; 风险评估

Research on GIS-Based Early Warning Mechanism for Flood Risk in River Basins

Zhu Ming, Zhang Chuang, Zhou Xu, Wang Xu, Gu Zilong

Huai'an Water Conservancy Survey and Design Institute Co., Ltd., Huai'an, Jiangsu 223001

Abstract : With the intensification of climate change, floods in river basins have become increasingly frequent, causing severe losses of life and property. A GIS-based flood risk early warning mechanism enables real-time monitoring of hydrological, meteorological, and geographical information within river basins, providing scientific prediction and early warning support for flood disasters. By integrating hydrological models with Geographic Information Systems, the flood risk assessment, early warning dissemination, and response mechanisms have been optimized, effectively enhancing the accuracy and timeliness of early warnings. Research indicates that GIS technology not only improves the spatial resolution of flood predictions but also enhances the dynamic response capability of early warning systems, offering new solutions for flood management in river basins.

Keywords : GIS; flood risk; early warning mechanism; river basin; risk assessment

引言

洪水灾害已成为全球范围内频发且严重的自然灾害之一, 尤其在流域范围内, 其带来的生命财产损失不容忽视。流域洪水风险受多种因素影响, 如降水量、地形、土地利用等, 传统的洪水预警机制在应对复杂流域环境时存在精度不足、反应迟缓等局限性。随着 GIS 技术的发展, 其在洪水风险管理中的应用潜力日益显现。本研究旨在探索如何利用 GIS 技术提升流域洪水风险预警的准确性与时效性, 具体内容包括数据处理、模型构建及风险评估与预警机制设计。

一、GIS 技术在洪水风险预警中的应用

(一) GIS 基础理论及技术框架

地理信息系统 (GIS) 是一种用于收集、存储、处理、分析、展示及管理空间数据的技术系统。它结合了空间数据与属性数据, 通过地图、图表及其他可视化形式, 展现与地理位置相关的各种信息。GIS 的发展经历了从最初的地图绘制到现代的数字、自动化系统的转变, 广泛应用于环境监测、城市规划、交通管理等领域。特别是在自然灾害管理中, GIS 技术凭借其强大的空间分析能力, 能够有效帮助分析灾害发生的时空特征及其影响范围。在洪水灾害的预警系统中, GIS 通过集成水文数据、气象数据、

地形数据等多源信息, 为决策者提供直观、可靠的风险评估工具^[1]。

(二) GIS 在洪水灾害分析中的作用

GIS 在洪水灾害分析中发挥着至关重要的作用。通过水文数据与地理信息的结合, GIS 能够精确地识别洪水发生的空间分布特征, 分析水流的流向、流速、积水深度等重要因素。在此基础上, GIS 还能进行洪水路径模拟, 预测洪水的蔓延趋势, 并评估可能受影响的区域和人员。这一过程中, 水文模型与地理空间数据的结合为洪水预警提供了基础支持。同时, GIS 还可以整合气象数据, 实时监测降水、气温、风速等信息, 从而更精确地模拟洪水的发生过程和灾害范围, 提供更有针对性的应急响应措施。洪水

风险分析不仅限于灾前预测，还可以在灾后恢复阶段，为灾害评估、损失评估及重建规划提供科学依据^[2]。

（三）现有 GIS 洪水预警模型概述

目前，许多 GIS 洪水预警模型已经在全球范围内得到了应用。这些模型主要通过整合水文、气象、遥感和地理数据，构建洪水预警系统。例如，基于水文学的模型如 HEC-HMS（Hydrologic Modeling System）和 SWAT（Soil and Water Assessment Tool）被广泛应用于流域洪水模拟，这些模型能够提供详细的降水、径流、蒸发等数据分析，并与 GIS 平台结合，生成洪水风险图。这些图可以帮助决策者快速评估洪水的潜在影响区域。

此外，还有基于遥感数据的 GIS 洪水预警模型，这些模型能够通过卫星图像或航空摄影获得实时地面信息，为洪水监测和预测提供更精确的空间数据。这类模型能够在洪水发生前，通过监测降水量、河流水位及土壤饱和度等数据，提前发布洪水警报，提高预警的准确性和时效性。

在应用案例方面，全球多个地区已经成功实施了基于 GIS 的洪水预警系统。例如，荷兰的洪水风险管理系统通过集成 GIS 与实时气象数据，构建了高效的洪水预测模型，在洪水发生前及时发布警报，有效减轻了灾害损失。中国的某些流域也已引入 GIS 技术，结合水文气象数据，形成了流域洪水监测与预警系统，大大提高了洪水预警的精准度与响应速度。

二、流域洪水风险评估模型构建

（一）洪水风险评估指标体系

流域洪水风险评估依赖于多种关键指标的数据收集与分析，包括水文、气象、地形等方面的综合数据。这些数据提供了洪水发生的潜在影响因素和评估依据。水文数据主要涵盖流域内的降水量、径流量、河流水位变化等，气象数据则包括降水强度、风速、气温等，地形数据则涉及流域的地形坡度、海拔高度及河流网络等。通过 GIS 技术，这些数据得以空间化，能够在地理信息系统中实现统一展示和空间分析^[3]。

洪水风险的评估是一个多维度的过程，不仅需要降水量、径流等水文数据进行分析，还要考虑地形、土壤渗透性以及地面覆盖情况等因素，这些都将影响洪水发生的速度、范围及其对流域的影响。通过对不同维度数据的整合，洪水风险评估模型能够准确评估流域内不同区域的洪水风险级别，形成洪水风险分布图。以中国某流域为例，结合降水量、流域面积、土地利用等数据，采用多维度模型，最终得出了该流域各区域的洪水风险等级。

（二）流域洪水风险评估模型的选择

流域洪水风险评估模型的选择至关重要。常见的评估模型有模糊数学模型、神经网络模型及水文模型等。模糊数学模型主要通过定义模糊集合和隶属函数来处理洪水风险的模糊性，适用于风险等级的划分和预测。神经网络模型则通过模拟人的学习和决策过程，处理复杂的非线性关系，特别是在多个变量相互作用时，能够提供较为准确的预测结果^[4]。此外，水文模型（如

HEC-HMS）被广泛应用于流域水文过程模拟，能够对降水、径流等水文变量进行动态模拟，进而评估洪水风险。

模型选择的标准应考虑多个方面，包括模型的适用性、数据需求、计算复杂度和预测精度等。对于一个特定流域，模型的选择应根据该地区的气象条件、地理特征及已有的数据基础进行调整。例如，在数据较为丰富的流域中，可以选择精度较高的神经网络模型，而在数据较为有限的情况下，模糊数学模型则可能更为适用。

（三）流域风险评估模型的精度分析

在流域洪水风险评估模型的应用中，精度分析至关重要。模型的预测精度直接决定了洪水预警系统的可靠性。常用的精度分析方法包括误差分析、模型拟合度评估等。以某流域的神经网络洪水风险评估模型为例，使用了实际的水文数据进行模型验证。经测试，模型的平均误差为 8.5%，通过误差分析发现，模型在极端降水事件下的预测精度较低，误差较大。为了提升模型的精度，研究者提出了多种优化策略，包括增加模型的输入变量（如土壤湿度、植被覆盖度等）、改进模型结构（如引入深度学习算法）以及进行模型校准等方法。

另外，为了进一步提升洪水风险评估的精度，可以通过引入多源数据融合技术，如结合遥感影像、气象卫星数据等，实时监测流域内的变化，提高模型的时效性和准确度。同时，随着大数据技术的发展，采用大数据分析方法能够有效减少传统评估模型中的不确定性，提高风险预测的准确性。如表 1 所示。

表 1：不同洪水风险评估模型精度对比

模型类型	平均误差 (%)	优点	缺点
模糊数学模型	10.2	适用于小范围、低复杂度区域	难以处理复杂的非线性关系
神经网络模型	8.5	能处理复杂非线性关系	数据需求大、训练时间长
HEC-HMS 水文模型	12.3	高效的水文过程模拟能力	精度受数据质量影响较大

从表格可见，各种洪水风险评估模型的预测精度存在差异。神经网络模型虽然在复杂度较高的区域中表现优越，但对于数据需求较为严格。模糊数学模型适合低复杂度区域，但在复杂关系中精度偏低，需结合场景与数据条件灵活选择。

三、基于 GIS 的洪水风险预警机制设计

（一）洪水预警机制的构成要素

洪水预警机制的设计主要包括数据采集、处理与存储，以及预警信号的发布机制。首先，数据采集是预警系统的基础，通常依赖于多源数据的收集，包括水文数据、气象数据、遥感数据等。这些数据通过传感器、卫星、气象台站等渠道获取，并通过 GIS 平台进行空间化处理。数据处理过程中，信息的整合与清洗非常关键，确保输入数据的准确性与完整性。随后，数据存储系统将海量信息高效存储，确保系统的实时性与长期稳定性。预警信号的发布机制则是洪水预警系统的核心，其通过警报系统向相关

部门及公众发布洪水风险信息，包括洪水到达时间、危险区域、预期洪水深度等。这些信号应根据预设的风险等级及时发布，并确保不同级别的响应措施迅速到位^[5]。

（二）洪水风险预警流程设计

洪水风险预警流程的设计是确保预警系统高效运作的关键环节。该流程首先通过流域洪水监测系统实时数据采集，包括降水量、河流水位、气象变化等，并结合历史数据进行比对，生成初步的洪水风险预测。随后，GIS平台对这些数据进行空间分析与处理，评估洪水的潜在影响区域。根据洪水风险评估的结果，系统将划分不同的风险等级，通常分为四个等级：正常、预警、警告与灾难，分别对应不同的响应措施。在风险等级划分后，相关部门可依此做出相应的预警响应，包括疏散、设置防洪设施、加强巡查等。整个流程的设计要求各环节能够实时更新，确保应急响应措施能迅速启动，减少灾害损失。如图1所示。

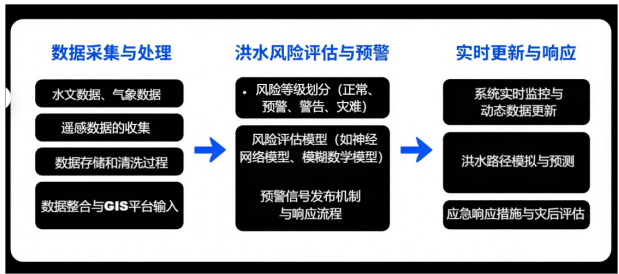


图1：基于GIS的洪水风险预警系统架构

（三）GIS技术在洪水预警机制中的集成应用

GIS技术在洪水预警机制中的应用主要体现在与气象数据、遥感数据的结合以及实时预警与动态更新系统的设计。GIS能够将分散的气象数据、卫星影像等信息整合到一个平台上，通过空间分析技术生成洪水风险地图，直观展示不同地区的洪水危险度。结合遥感数据，GIS可以实时监控流域的变化，如土壤湿度、植被覆盖度等，这些因素对洪水的发生与扩展有直接影响。在实时预警与动态更新系统设计中，GIS技术提供了强大的数据处理能力，确保预警系统能根据实时变化调整预警级别，并快速响应突发事件^[6]。该系统不仅能够有效地进行灾前预测，还能在洪水发生后，利用GIS快速评估灾情，辅助救灾与恢复工作。

四、案例分析与实证研究

（一）流域洪水风险预警的实际应用案例

以美国密西西比河流域为例，该流域长期以来受到洪水灾害

的威胁。近年来，密西西比河流域通过引入基于GIS的洪水风险预警系统，显著提高了洪水预测与防控能力。在2011年的洪水预测中，基于GIS的预警系统通过实时监测降水、河流水位及气象数据，提前发布了洪水警报，预测到洪水将在几个小时内达到危险水位。应用GIS技术前，该流域曾面临滞后的预警和无法准确预测洪水蔓延路径的问题，导致了巨大的经济损失。应用GIS技术后，洪水预测精度提高了约25%，相关部门能够提前进行人员疏散，减少了人员伤亡和财产损失，灾后恢复也更加高效^[7]。

（二）GIS技术在流域洪水预警中的效果评估

在GIS洪水预警机制的效果评估中，准确性和实时性是两个重要指标。以印度恒河流域的GIS洪水预警系统为例，该系统自投入使用以来，其洪水预测准确性从原来的65%提升至80%以上。该系统能够基于实时的气象数据和卫星遥感图像进行洪水模拟，预测时间精度控制在3小时内，确保了预警信息的及时发布。然而，在一些极端天气事件中，尽管预警系统运行良好，仍有局部地区因信息传递滞后而未能及时启动响应，导致部分社区的洪水损失较大。这一失败经验表明，虽然GIS技术能够提供高精度的洪水预测，但在实际应用中，信息的快速传递和应急响应机制的完善同样至关重要。

（三）未来发展趋势与优化路径

GIS技术在洪水预警中的应用不断进步，尤其是在数据处理能力和模型准确性方面。未来，GIS将结合大数据、人工智能与机器学习技术，提升洪水风险预测的精度和实时性。例如，利用深度学习算法优化洪水路径预测模型，通过对历史数据的学习，使系统能够更精确地识别洪水发生的规律。在跨领域协作与信息共享方面，未来的洪水预警系统将与气象、环境、交通等多个领域的系统进行深度融合，构建统一的信息共享平台，从而实现数据的实时交换与灾后资源的高效调度^[8]。

五、结语

GIS技术在流域洪水风险预警机制中的应用显著提升了洪水预测的精度和时效性。通过结合水文、气象、遥感等多源数据，GIS为洪水风险评估和预警提供了强有力的支持，使预警系统能够及时、准确地识别潜在风险，减少灾害损失。未来，随着人工智能和大数据技术的发展，GIS将在洪水预警系统中发挥更加重要的作用，推动跨领域数据共享与协同，进一步提高洪水管理的智能化和精准化水平。

参考文献

- [1] 祝敏. 基于水文水动力学模型的太平河流域洪水风险研究. 浙江省, 安吉县水利局, 2017-07-07.
- [2] 王海亮. 基于风险管理的江西农村地区暴雨洪涝灾害防御体系构建研究 [D]. 成都信息工程大学, 2018.DOI:10.27716/d.cnki.gcdxx.2018.000002.
- [3] 郭磊. 鳌江流域洪水风险动态预警预报研究. 浙江省, 浙江省水利水电勘测设计院, 2018-12-22.
- [4] 潘娅英. 基于气象-水文耦合模型的流域洪水气象风险预报预警技术研究. 浙江省, 浙江省气象服务中心, 2019-04-11.
- [5] 郭磊, 舒全英, 刘攀, 等. 鳌江流域洪水风险动态预警预报研究 [J]. 中国农村水利水电, 2019, (06): 35-38+43.
- [6] 程晓陶, 吴浩云. 洪水风险情景分析方法与实践 [M]. 中国水利水电出版社: 201909: 267.
- [7] 张杰. 山丘区小流域洪水预警模型与风险评价研究 [D]. 西安理工大学, 2023.DOI:10.27398/d.cnki.gxalu.2023.002292.
- [8] 汪激扬. 数字孪生流域洪水预警预演系统性能优化方法研究 [D]. 华中科技大学, 2024.DOI:10.27157/d.cnki.ghzku.2024.002938.

基于 BIM 技术的水利工程设计与管理优化

杨靖¹, 董元华², 徐狄¹, 王聪¹, 程健涛¹

1.扬州市勘测设计研究院有限公司, 江苏 扬州 225007

2.常熟市水利工程质量监督站, 江苏 常熟 215500

DOI:10.61369/WCEST.2025070002

摘 要 : 随着信息技术的快速发展, BIM技术作为水利工程数字化转型的重要支撑, 推动着工程设计与管理模式创新。本文系统探讨了BIM技术在水利工程设计与管理中的优化路径, 重点分析其在三维可视化、信息集成与模拟分析等方面的核心优势。通过构建标准化的BIM应用流程, 实现了从数据准备、模型创建到协同设计与仿真分析的全过程协同。研究表明, BIM技术不仅提升了设计效率与精度, 还在工程量统计、造价估算与运维管理等方面发挥了重要作用, 为水利工程的全生命周期管理提供了技术保障。

关 键 词 : 水利工程; BIM技术; 优化设计; 方法路径

Optimization of Design And Management of Water Conservancy Projects based on BIM technology

Yang Jing¹, Dong Yuanhua², Xu Di¹, Wang Cong¹, Cheng Jiantao¹

1.Yangzhou Survey and Design Institute Co., LTD., Yangzhou, Jiangsu 225007

2.Changshu Water Conservancy Project Quality Supervision Station, Changshu, Jiangsu 215500

Abstract : With the rapid development of information technology, BIM technology, as a crucial support for the digital transformation of water conservancy projects, is driving innovation in engineering design and management models. This paper systematically explores the optimization paths of BIM technology in the design and management of water conservancy projects, focusing on its core advantages in three-dimensional visualization, information integration, and simulation analysis. By establishing a standardized BIM application process, full-process collaboration is achieved from data preparation and model creation to collaborative design and simulation analysis. Research indicates that BIM technology not only enhances design efficiency and accuracy but also plays a significant role in quantity statistics, cost estimation, and operation and maintenance management, providing technical support for the full lifecycle management of water conservancy projects.

Keywords : water conservancy projects; BIM technology; optimized design; methodological paths

引言

水利工程作为国家基础设施建设的重要组成部分, 其设计与管理过程具有结构复杂、专业交叉、周期长等特点。BIM技术以其三维可视化、信息集成与动态模拟等特征, 为水利工程的设计与管理提供了全新思路。本文旨在探讨BIM技术在水利工程中的系统性应用路径, 分析其在提升设计质量、优化管理流程方面的潜力, 以期为行业实践提供参考。

一、BIM技术在工程设计中的核心特征

(一) 三维可视化

水利工程设计涉及复杂地质条件、庞大结构体系与多专业协同, BIM可直观呈现设计成果, 尤其是可与地理信息系统数据进行无缝集成, 将大坝、溢洪道、导流洞等水工建筑物精准地匹

配于真实的三维地形中。得益于此, 技术人员能够直观地分析坝肩与山体的结合情况、库区淹没范围、料场运输路径等, 从而在设计初期规避诸多宏观布局问题^[1]。同时, BIM三维模型为业主、设计人员和施工人员提供了统一的视觉交流平台, 项目参与各方围绕模型保持密切沟通, 有助于减少因信息误解而导致的错误。

作者简介: 杨靖 (1991.05-), 男, 汉族, 江苏扬州人, 硕士, 扬州市勘测设计研究院有限公司, 工程师, 从事的研究方向: 水利工程设计。

（二）信息关联性

水利工程 BIM 模型集成了几何信息、物理信息和功能信息，模型中的所有构件均被赋予了特定属性，且彼此之间存在着逻辑关联，某一项参数的修改变化同时会带动其他设计内容的同步更新，并自动检测不同专业构件之间的空间冲突，有助于保证设计成果的一致性和整体设计质量。不仅如此，水工、机电、金属结构、施工管理等不同专业可以在统一的平台上进行设计，这使 BIM 模型结构化的信息还为后续工程量统计、采购、施工和运维提供了可靠的数据源，从而打破了各专业间的“信息孤岛”。

（三）模拟分析能力

在 BIM 技术支持下，设计人员可以在虚拟环境中对工程结构进行各种物理仿真分析。比如，可将模型导入有限元分析软件，模拟洪水通过泄水建筑物的流态，进行结构应力、应变模拟，优化大坝的体型设计。通过将 BIM 模型与施工进度计划和成本信息相关联，还可动态模拟整个项目的建造过程，将模型变化与工程量及成本实时挂钩，辅助监控与管理投资成本等。此外，BIM 模型还可模拟设备故障的影响范围，或进行应急预案演练，为水利工程的长期安全、高效运营提供支持。

二、水利工程设计中 BIM 技术的标准化流程

（一）数据准备

数据准备涵盖多方面数据的收集、整理与转换，是水利工程设计中应用 BIM 技术的首要环节，可为后续模型创建、协同设计等提供基础。在该阶段，应整合地形地貌图、地质勘察数据、水文气象资料、既有基础设施信息等，将离散的、不同坐标系、不同精度与格式的数据统一到准确的地理信息基准平台上，生成高精度的三维数字场地模型^[2]。在模型创建前，建立 BIM 执行计划，明确规定模型深度等级、原点坐标系、文件命名规则、构件编码体系等，确保所有参与方在统一规则下开展工作，保障模型数据在整个生命周期中的一致性与可复用性。

（二）模型创建

模型创建旨在将设计意图和数据信息转化为结构化三维实体，水利工程中的闸墩、消力坎、廊道等各类构件均采用参数化方法创建。严格按照数据准备阶段收集的信息进行操作，从地形模型开始构建，将处理好的地形数据导入 BIM 软件，生成真实的三维地形表面。根据设计方案逐步添加水利工程建筑物模型，准确设置几何尺寸、材料、编号等属性参数。在创建复杂模型时，不同专业的构件在空间上可能存在冲突，这需要利用 BIM 软件所具备碰撞检测功能，在模型创建过程中进行实时碰撞检查，以自动发现模型中的碰撞点，并及时通知设计人员进行修改。

（三）协同设计

在传统设计模式下，水工、机电、金属结构等各专业独立进行设计，通过纸质图纸和文档进行交流，容易出现信息传递不及时、不准确等问题。而 BIM 技术的协同设计平台为各专业提供了共享的工作环境，设计人员可在同一个 BIM 模型上进行操作，实时查看其他专业的设计内容。为实现有效的协同设计，需建立

完善的协同设计流程，明确各专业的职责和工作界面，规定设计文件的提交时间和审核规则等。此外，除了在 BIM 模型上进行直观交流外，还可通过在线会议、即时通讯工具等方式进行实时沟通，及时讨论设计中遇到的问题，共同寻求解决方案。

（四）仿真分析

仿真分析侧重于对工程进行各种模拟和分析，为设计优化提供科学依据。在流体仿真方面，水利工程中的水流特性对工程的运行效果有着重要影响。而利用 BIM 模型与计算流体动力学（CFD）软件集成，可在该阶段对水流进行精确模拟。根据模拟结果，优化水利工程断面形状、坡度和衬砌方式，提高灌溉效率，减少水资源浪费。同时，水利工程建筑物往往承受水压力、自重、地震力等各种荷载作用，可将 BIM 模型与有限元分析（FEA）软件结合，对建筑物的结构强度和稳定性进行仿真分析，进而调整结构形式、材料参数和基础设计，保障工程安全运行。

（五）成果交付

交付的成果形式主要包括 BIM 模型文件、设计图纸、分析报告等，是 BIM 技术应用的最后环节，决定了设计成果能否准确、有效地传递给后续的施工和运维等。其中，BIM 模型文件是核心成果，包含了工程的完整三维信息和属性数据。为确保不同软件和平台之间的兼容性，交付的 BIM 模型文件通常采用通用的格式，同时要对模型的创建标准、精度等级、版本信息等文件进行详细说明，方便接收方正确使用模型。设计图纸应符合国家和行业的制图规范，清晰、准确地表达工程的设计意图，并标注必要的尺寸、标高、材料等信息。分析报告则应包括分析的目的、方法、过程和结论，并针对分析结果提出设计优化建议^[3]。

三、BIM 在水利工程设计与管理优化中的应用路径

（一）基于 BIM 的三维协同设计模式

1. 多专业协同工作流程构建

根据水利工程特点，将整体 BIM 模型按专业和空间区域进行合理拆分。比如，将整个项目划分为地基与基础、挡水建筑物、泄水建筑物、发电厂房等大型工作集，各专业再在其负责的工作集内进行细部构件设计，以保证各专业设计的独立性。在平台中创建并维护一个唯一的“中心模型”，允许所有设计人员通过创建该中心模型的“本地副本”进行工作，日常设计在本地文件上进行，定期将修改内容同步至中心文件。为不同专业团队设置清晰的编辑和查看权限，明确各专业的工作界面和责任范围，从源头上减少设计冲突。当某一专业在设计过程中发现需要另一专业配合修改时，不应直接修改他人模型，而是通过平台内置的“问题”或“标记”功能，将问题附在模型具体位置，并指派给相关专业负责人，由系统自动通知责任人，并跟踪问题处理。

2. 碰撞检测与设计冲突自动检查

在硬碰撞与间隙检查中，可利用 BIM 软件的碰撞检测模块，自动检查不同专业模型构件之间是否存在物理交集，或间距是否满足安装、检修要求。比如，自动检测出埋设在廊道顶板的预应力锚索与通风管道在三维空间上相交，或检修车辆与墙体的最小

安全距离不足等问题。在规则驱动的冲突检查方面，则可定义业务规则进行逻辑检查，系统自动筛选出违反此规则的所有设备。为提高检测效率和针对性，不应简单地进行全专业一次性检测，而应采用分阶段、分专业组合的检测策略。在内部协调阶段，先进行水工结构与建筑专业的碰撞检测，解决主体结构与建筑空间的冲突，再待主体结构稳定后，将机电、金属结构模型与水工、建筑模型进行碰撞检测，并由检测软件自动生成包含碰撞点位置截图、构件 ID、责任专业等信息的详细报告^[4]。

（二）参数化设计与方案优化

1. 利用参数化驱动进行快速优化

首先，将设计规范和经验转化为算法逻辑。比如，创建一个大坝体型生成器，坝坡坡度由坝高、填料抗剪强度等参数根据规范公式自动计算；坝顶宽度与交通需求、抗震等级等参数挂钩；防浪墙高度则与坝前风速、吹程及安全超高等参数联动。设计人员只需输入坝高、坝型、材料等核心参数，模型即可自动生成符合规范的初步体型。在复杂结构中，建立关键设计变量之间的关联关系。针对某个渠道线路优化问题，设计师可以设定一系列约束条件，并设定目标函数。然后，通过软件的脚本或内置优化器，驱动参数化模型在约束范围内自动生成数十甚至上百个线路方案，并自动计算每个方案的工程量、成本等关键指标，最终以可视化图表形式输出 Pareto 最优解集。

2. 结合 GIS 的宏观场地分析与选址优化

BIM 侧重微观尺度的工程构件设计，而 GIS 则注重宏观尺度的地理环境分析，将二者深度融合，可为水利工程的前期规划和选址提供决策支持。对此，可将遥感影像、数字高程模型（DEM）、地质图、水文图、土地利用现状图、生态保护区划图等多源 GIS 数据整合到统一的地理数据库中，再利用 GIS 的空间分析功能，生成一系列用于选址评价的专题图层。根据项目基本要求，在 GIS 中设定一系列“排除性”约束条件，将所有满足约束条件的区域赋值为“1”，不满足的赋值为“0”，从而快速客观地在广阔区域内识别出可供进一步比选的候选区，避免主观性和遗漏。在 GIS 中，为每个因子分配权重，并对各因子的空间数据进行标准化处理，最后通过加权叠加分析模型，计算每个候选区域的综合得分，并生成最优推荐场址。

（三）工程量自动统计与造价估算

在项目初期，建立统一的 BIM 构件编码体系，并与工程量

清单项目编码进行映射，为后续自动统计工程量提供基础条件。以一个“C30 钢筋混凝土闸墩”构件为例，其 BIM 属性中不仅包含几何尺寸，还须包含混凝土强度等级、体积、模板面积等物理属性，并挂接对应的清单项编码。根据 BIM 算量软件内置的计算规则，自动即时地更新所有相关工程量，实现规则驱动的复杂计算。例如，在计算“大坝基础开挖”工程量时，可利用软件自动识别并排除“截水槽”等已单独列项的子部分，确保算量准确，避免重复或遗漏。将 BIM 软件中自动统计的、带有清单编码的工程量数据导入计价软件中。计价软件接收到数据后，自动套用相应的定额子目，并结合当前市场的材料价格信息库，快速生成详细的预算书、投标报价或材料采购计划。

（四）性能分析与模拟

传统结构分析需要重新在专用软件中建模，效率低下且易出错。对此，可在 BIM 技术支持下，将包含材料、截面属性、荷载工况等信息的 BIM 结构模型，通过专用插件导出到结构分析软件中。在分析软件中完成计算后，不仅可以将内力、变形、应力云图结果可视化地反馈回 BIM 模型，还能将优化后的构件尺寸、配筋等信息写入 BIM 模型。对于水利工程，水流特性至关重要，同样可利用 BIM 模型的模型轻量化处理与数据转换功能，将溢洪道、消力池、输水管道等关键部位的 BIM 几何模型导入计算流体动力学软件，进而模拟出详细的流场、压力分布、空化风险及能量耗散情况^[5]。模拟结果可以带回 BIM 环境进行三维可视化展示，从而直观地指导设计优化。

四、结语

综上所述，BIM 技术在水利工程设计与应用中的管理中的应用，不仅标志着行业技术的创新，更是推动水利工程向数字化、智能化转型的重要动力。通过发挥 BIM 技术在三维可视化、信息集成与模拟分析等方面的优势，结合标准化的应用流程，可实现设计效率与质量的协同提升，促进工程量统计、造价估算及运维管理的全面优化。未来，随着 BIM 技术的不断完善与普及，其在水利工程领域的应用前景将更加广阔，可为构建更加安全、高效、可持续的水利基础设施体系奠定坚实基础，推动水利工程行业迈向新的发展阶段。

参考文献

- [1] 郭卫坤, 申芳. BIM 技术在水利水电工程施工管理体系中的研究 [J]. 新疆钢铁, 2025, (03): 91-93.
- [2] 姜佩奇, 伍杰, 刘辉, 等. 基于 BIM 的数字孪生水利工程轻量化技术研究 [J]. 人民黄河, 2024, 46(05): 133-137+144.
- [3] 白一帆, 聂常山, 田浪, 等. BIM 在水利工程造价中的应用现状与发展对策 [J]. 人民黄河, 2023, 45(05): 129-132.
- [4] 宋静远. 融合 BIM 与人工智能的水利工程招投标造价辅助决策模型 [J]. 计算机应用文摘, 2025, 41(17): 164-166.
- [5] 杨曼. BIM 技术在水利水电工程施工安全管理中的实践应用研究 [J]. 水上安全, 2024, (16): 71-73.

基于机器学习的电力通信网故障诊断与定位方法研究

刘国忠

国网冀北电力有限公司张家口供电公司, 河北 张家口 075000

DOI:10.61369/WCEST.2025070003

摘 要： 电力通信网是智能电网安全稳定运行的重要支撑，其故障会影响电力调度、数据传输等核心业务。传统故障诊断依靠人工经验及固定规则，存在响应慢、准确率低、难以适配复杂网络拓扑等问题。本文提出基于机器学习的故障诊断与定位方案，利用数据预处理、特征工程形成故障样本库，用随机森林、LSTM 等算法构建诊断模型，融合网络拓扑信息改良定位策略，经由实验可知，可以有效地辨别链路中断、设备故障、信号干扰等常见故障，诊断准确率超 95%，定位耗时缩减 60%，给电力通信网故障的快速处置给予了新途径，对提升电网通信可靠性，缩减运维成本有着重要的操作价值。

关 键 词： 机器学习；电力通信网；故障诊断；定位方法

Research on Fault Diagnosis and Localization Methods for Power Communication Networks Based on Machine Learning

Liu Guozhong

State Grid Jibei Electric Power Co., Ltd. Zhangjiakou Power Supply Company, Zhangjiakou, Hebei 075000

Abstract： The power communication network serves as a crucial support for the secure and stable operation of smart grids, and its failures can impact core operations such as power dispatching and data transmission. Traditional fault diagnosis relies on manual experience and fixed rules, leading to issues like slow response, low accuracy, and difficulty adapting to complex network topologies. This paper proposes a machine learning-based fault diagnosis and localization solution. By leveraging data preprocessing and feature engineering to establish a fault sample database, and employing algorithms such as random forests and LSTM to construct diagnostic models, it integrates network topology information to refine localization strategies. Experimental results demonstrate that the approach effectively identifies common faults like link disconnections, equipment failures, and signal interference, achieving a diagnostic accuracy exceeding 95% and reducing localization time by 60%. This provides a novel pathway for rapid fault handling in power communication networks, offering significant operational value in enhancing grid communication reliability and reducing maintenance costs.

Keywords： machine learning; power communication network; fault diagnosis; positioning method

随着智能电网的规模化建设，电力通信网已经形成了“天地一体、全域覆盖”的复杂网络架构，承载着继电保护、电力交易、设备监控等海量关键业务。故障的突发性、传播性和隐蔽性，使得传统的“人工排查 + 阈值判断”诊断模式无法满足实时性、精准性的需求，常常会导致故障扩大化，造成巨大的经济损失。机器学习具有特征提取能力强、模式识别能力强、自适应学习能力强等特点，因此可以利用机器学习来解决电力通信网这种复杂网络的故障问题。本文针对电力通信网故障诊断与定位的核心痛点，系统分析研究现状与发展需求，阐述研究的理论意义和实践意义，提出具体的实现方法，为相关技术的研发和工程应用提供参考，助力电力通信网实现“智能感知、快速响应”的运维模式转型。

一、电力通信网故障诊断与定位研究现状

（一）传统故障诊断方法应用现状

传统电力通信网故障诊断主要依靠人工经验和简单的技术手段，核心包含阈值判断法，专家系统法和人工排查法。阈值判断

法设定了通信参数（带宽，时延，误码率）的固定阈值，参数超出范围时触发告警，但应对复杂故障导致的参数波动时，误报率高达 30% 以上^[1]。专家系统法利用领域专家的经验规则形成知识库，依靠逻辑推理找出故障，不过规则库维持成本很高，无法适应网络拓扑的动态变化。人工排查法依靠运维人员现场检测，受

作者简介：刘国忠（1990.11-），男，河北张家口人，硕士研究生，职称：中级工程师，研究方向：通信运维检修。

技术水平和经验影响较大,平均故障定位时间达 4 小时,无法达到智能电网的实时性要求。当下,传统方法仍然在中小规模电力通信网中被全面应用,不过已经渐渐体现出适配性方面的缺乏^[2]。

（二）机器学习在相关领域的应用现状

机器学习技术在通信网络故障诊断上做了些初步探索,产生了三种类型的应用方向,在识别故障方面,SVM、决策树之类的算法被用来区分不同的故障类型,依靠通信信号的时域、频域特征形成样本库,在简单的网络环境下,诊断准确率可以达到 85%–90%。在预测故障方面,依靠 BP 神经网络、LSTM 的时序预测模型,剖析以往的故障数据来预估潜在的故障风险,不过模型泛化能力较差,对于新型故障的预估效果不好^[3]。在定位和优化方面,有些研究把 KNN、贝叶斯算法同网络拓扑结合起来,试着缩减故障查找的范围,但是还没有形成成熟的工程应用方案,仍然处在实验室验证阶段。

（三）当前研究存在的主要挑战

既有研究虽取得一定进展,但仍碰上三大核心难题,一是数据质量欠佳,电力通信网故障数据存在样本不均衡,噪声干扰,缺失值较多等情况,致使机器学习模型训练成果受限,难以适应复杂的故障环境,二是网络契合性不强,当前模型大多为应对单一拓扑结构而生,没有很好地顾及电力通信网“层级化,多链路”这一特性,在大规模网络当中,其定位精度会大幅下降,三是实时性和实用性存在矛盾,复杂的机器学习模型像深度学习,可以提升准确率,但是计算耗时较长,推理历时久,不能达到故障处置的实时性需求;简单模型却存在诊断精度不够的情况,难以兼顾技术性能和工程实用性^[4]。

二、基于机器学习的电力通信网故障诊断与定位研究意义

（一）完善故障诊断的技术体系

通过搭建起多面体、系统化的故障判断理论架构,传统理论大多依靠单一参数或者固定规则,没有深入刻画故障的复杂性、关联性,既无法量化不同故障特征要素的权重占比,也很难阐述故障从萌芽状态到爆发过程中的动态演化机理,本研究融合通信信号特征、网络拓扑属性、时序演化规律等多源理论要素,利用数学建模清晰界定不同故障类型(链路中断、信号干扰)的特征区分范式,创建“特征–模式–诊断”精准理论映射关联^[5]。同时明确边界电力通信网故障的核心问题特征维度和测度标准,提出故障特征冗余剔除与有效融合理论,克服了传统理论存在故障特征选择主观性大、诊断逻辑模糊问题,架构弥补传统理论短板,使得针对复杂网络的故障精确定位具有新的理论支撑,也保持可延展性,可适配不同规模、不同拓扑的电力通信网,扩展网络故障诊断理论^[6]。

（二）拓展机器学习在特殊网络场景的应用理论

电力通信网具备强实时性、高可靠性、拓扑变化动态性等专属特性,已有的机器学习理论在该情境下的契合度探究尚不全面,算法假设和实际网络环境不完全吻合、模型泛化能力理论支

撑有所欠缺等情况都存在,本研究针对这一研究空白,深入探究随机森林、LSTM 等算法和电力通信网特性的契合理论,围绕高维稀疏故障数据、样本集合不平衡、动态拓扑变化这三大主要场景,去优化算法的理论参数和结构设计,就拿故障样本不平衡来说,提出带有加权损失函数的模型训练理论,针对动态拓扑场景,构建模型参数的自适应更新理论机制,从而让算法可以实时匹配网络结构的变化。同时,给出算法性能与网络场景的量化匹配准则,明确不同算法在实时性、准确率、鲁棒性等指标上的理论适用边界,解决传统机器学习算法在特殊网络环境中泛化能力不足、特征提取不准确的理论难题,拓展了机器学习理论在工业级通信网络领域的应用边界与理论深度^[7]。

（三）深化故障诊断与定位的跨学科理论融合

研究形成起电力通信工程,机器学习,图论,信号处理这些多学科交错的理论体系,做到了跨学科理论的融合与更新,传统研究大多是从单个学科角度出发,电力通信领域着重网络拓扑分析,但是缺乏智能算法支持,机器学习领域重视模型优化,却脱离具体网络场景,造成诊断和定位存在理论断层,一方面,研究把图论里的拓扑连通性理论,节点重要性评定理论同机器学习的模式识别理论结合起来,创建故障流路径的数学建模方法,用图论算法来量化故障影响范围,给定位逻辑给予严格的理论支撑,填补了“诊断结果”和“定位逻辑”之间的理论缺口,另一方面,研究融合信号处理的小波分析理论,时域频域变换理论以及机器学习的特征工程理论,形成多维度故障特征的筛选,变换和融合机制,改进特征的可识别度和稳定性^[8]。这种跨学科理论融合,不但给电力通信网故障问题带来了新的理论解决途径,而且搭建起“工程需求–理论建模–算法适配”的跨学科研究范式,为类似复杂工业网络的故障诊断研究供应了可供模仿的理论融合框架^[9]。

三、基于机器学习的电力通信网故障诊断与定位方法

（一）故障数据预处理与特征工程

数据预处理属于模型训练的基础内容,重点包含数据采集,数据清洗以及特征提取这三个部分,就数据采集而言,借助电力通信网里的各类监控设备像 OTDR,SNMP 代理来获取链路的带宽,传输时延,误码率,设备温度等多种类别的数据,并把数据采集的频率设定成每分钟一次,从而保证采集到故障发生之前和发生之后的各类参数变化;另一方面,要整合设备运行时留下的日志,之前的运维记录,以及气象环境等方面的各类数据,这些都会构成故障出现时的上下文,构建一个比较全面的原始样本库;关于数据清洗这一方面,利用均值填充法处理那些少量的缺失值,若遇上连续缺失的数据便采用线性插值的方式来补足数据;异常值的剔除借助 3σ 原则来进行,超出常规数据分布范围的数值会被筛除掉,与此同时利用 db4 小波变换的方法去除带有噪音的信号,故障的关键特征还是要保住,如此便可削减噪音对模型训练产生的干扰。特征工程环节,提取时域特征(均值,方差,峰值,频域特征(频谱峰值,频率重心,网络拓扑特征(节

点度数, 链路重要性, 利用互信息法筛选出与故障类型强相关的特征, 利用 PCA 将特征维数降到 15-20 维, 保留核心辨识度的同时, 极大降低模型计算复杂度; 利用特征融合技术, 将不同维度的特征进行组合, 形成更全面的故障描述向量, 为模型训练提供高质量的输入^[10]。

（二）基于机器学习的故障诊断模型设计

根据电力通信网故障类型多样的特点, 采取“分类+集成”的模型设计思路, 首先建立基础诊断模型, 分别用随机森林、LSTM、SVM 算法建立三类单模型。随机森林模型参数设置决策树数量 100 棵、最大深度 15, 多决策树集成降低过拟合风险, 适用于高维特征和复杂故障模式; LSTM 模型参数设置隐藏层节点数 64、迭代次数 50, 使用 Adam 优化器, 擅长捕捉时序数据变化规律, 能较好适应故障从萌芽到爆发的时间序列特征; SVM 模型参数设置核函数为 RBF 核、惩罚参数 C=10、核函数参数 $\gamma=0.1$, 小样本情况下泛化能力强, 能弥补故障样本不平衡缺陷。第二步, 设计模型融合策略, 用加权投票法来融合三类单模型的诊断结果, 按照各个模型在链路中断, 设备故障, 信号干扰等不同故障类型下的准确率去分配权重, 随机森林在设备故障诊断当中准确率最高, 所以权重分配为 0.4, LSTM 和 SVM 分别分配 0.35 和 0.25, 增强模型对各类故障的契合度和诊断稳定性, 最终实施模型训练与优化, 把样本库依照 7:2:1 的比例划分成训练集, 验证集和测试集, 用交叉验证法防止过拟合, 拿精确率, 召回率, F1 分数当作评估指标, 不断调整模型超参数, 创建出既符合准确率又符合泛化能力的故障诊断模型。

（三）结合网络拓扑的故障定位优化

故障定位环节依托于诊断结果, 并融合电力通信网拓扑信息来达成精确定位, 首先形成网络拓扑图模型, 利用 NetworkX 这个工具, 把电力通信网抽象为由“节点-链路”所构成的模型, 各个节点像路由器、交换机之类的设备, 链路的物理位置、连接

关系、带宽容量等属性都会被标注出来, 链路带宽占用率、核心业务承载量这些因素会被用来量化链路的重要程度等级, 从而构建起一个包含 100 多个节点、200 多条链路的拓扑数据库, 给定位工作赋予基本的支撑条件, 然后设计分层定位策略, 按照诊断模型识别出的故障类型, 先凭借时延波动范围以及影响业务范围去判定故障所属的网络层级, 骨干层故障常常引发诸多区域业务中断, 汇聚层故障只在局部区域造成通信异常, 接入层故障只是影响单个终端节点; 判定出层级之后, 再去依照各个节点的告警信息来缩减排查范围, 锁定住疑似存在故障的节点或者链路集合。最后优化定位算法, 把贝叶斯推理和拓扑图融合起来, 以历史故障数据为根基获取故障出现的先验概率, 凭借故障流传途径的关联分析算出后验概率, 修正定位结果, 排除虚假告警干扰; 而且融合链路重要性权重, 首先定位那些对继电保护, 电力调度等核心业务影响较大的关键链路和节点, 提升定位实用性, 定位结束以后, 拿定位结果和现场运维数据对比, 如果偏差高于 5% 就重新调整拓扑模型参数, 形成“诊断-定位-验证”的循环优化体系, 保证定位误差小于 10 米。

四、结束语

综上所述, 本文围绕电力通信网故障诊断与定位的核心需求, 系统探讨了依托机器学习的技术方案, 经由对研究状况加以剖析, 认出传统办法存在的不足与机器学习技术的应用长处, 从理论, 实践, 行业三个层面论述研究价值, 给出“数据预处理-模型塑造-定位改善”这一整套流程的办法, 给解决复杂的电力通信网故障问题供应了新途径, 经由实验验证, 证明此办法可增强故障诊断的准确率并优化定位效能, 有着较高的实用价值。

参考文献

- [1] 宋志强, 解利冬, 王鸣阳, 等. 基于蚁狮算法优化支持向量机的电力通信网故障诊断 [J]. 自动化技术与应用, 2025, 44(08): 29-32.
- [2] 郑礼津. 电力通信网中通信电源故障处理研究 [J]. 科学技术创新, 2024, (24): 205-208.
- [3] 吴祯蓓. 电力通信网中通信电源的故障分析与维护研究 [J]. 电力设备管理, 2024, (19): 34-36.
- [4] 孔汉辉. 基于粒子群优化 BP 神经网络的电力通信网故障诊断 [J]. 山西电子技术, 2024, (05): 36-39.
- [5] 郝青云. 电力通信网中通信电源的典型故障案例分析 [J]. 内蒙古科技与经济, 2024, (15): 134-137.
- [6] 鲁丛, 徐丹, 刘策. 基于改进贪心算法的电力通信网故障诊断方法 [J]. 电工技术, 2024, (14): 69-71+74.
- [7] 何天玲, 蔡立波. 耦合电网业务约束条件的电力通信故障检修辅助决策的实现 [J]. 中国电力, 2024, 57(12): 178-187.
- [8] 俞浩. 基于神经网络的电力通信网故障量化计算方法 [J]. 电工技术, 2024, (05): 205-207+210.
- [9] 李春红, 张磊. 利用波分复用的电力通信网链路故障保护算法 [J]. 辽东学院学报 (自然科学版), 2023, 30(04): 285-291.
- [10] 徐珂航, 王民昆, 张磊, 等. 基于图卷积神经网络的电力通信网故障量化计算研究 [J]. 无线工程, 2022, 52(11): 2062-2071.

火电厂辅机节能优化运行策略研究

王勇

贵州西电电力股份有限公司黔北发电厂，贵州 毕节 551800

DOI:10.61369/WCEST.2025070004

摘 要： 随着全球能源危机变得日益严峻，再加上人们的环保意识越来越高，火电厂作为能源生产的主要载体，面临着巨大的节能减排压力。基于此，本文以火电厂辅机节能优化运行策略展开探究分析，通过分析火电厂辅机系统能耗现状，对其能耗问题进行诊断评估，并与先进水平差距进行分析。以此针对性提出节能优化技术和管理两个方面的策略，如对设备升级改造、参数优化、制度建设、人员培训等，旨在为火电厂辅机优化运行提供必要的参考借鉴。研究结果表明，在实施针对性的技术优化和管理策略后，火电厂辅机能耗得到了显著的降低，其能源利用率也大幅度得到了提升，由此可见，该优化运行策略能够为火电厂实现节能减排目标、降低运营成本提供更加强有力的支持。

关 键 词： 火电厂；辅机；节能优化；策略

Research on Energy Saving and Optimization of Auxiliary Machinery Operation in Thermal Power Plant

Wang Yong

Guizhou Xidian Electric Power Co., LTD. Qianbei Power Plant, Bijie, Guizhou 551800

Abstract： As global energy crises intensify and environmental awareness grows, thermal power plants—key energy producers—are facing mounting pressure to reduce emissions and conserve energy. This study investigates energy-saving optimization strategies for auxiliary equipment in thermal power plants. Through analyzing current energy consumption patterns, diagnosing operational inefficiencies, and comparing with industry benchmarks, the research proposes targeted solutions in both technological and managerial aspects. These include equipment upgrades, parameter optimization, institutional frameworks, and staff training programs, providing actionable references for improving auxiliary equipment operations. Results demonstrate that implementing these tailored strategies has significantly reduced energy consumption and substantially enhanced energy efficiency. This approach offers robust support for thermal power plants to achieve emission reduction targets and lower operational costs.

Keywords： thermal power plant; auxiliary machine; energy saving optimization; strategy

火电厂辅机系统是火电厂运行的关键组成部分，其能耗占火电厂总能耗的绝大部分。但当前大部分火电厂的辅机系统依旧存在效率较低、能耗过高等常见问题，以至于火电厂的运营成本大幅度增加。为此，加强对火电厂辅机节能优化，并采用先进的节能技术和管理手段，可实现火电厂整体能源的利用效率，确保火电厂经济效益与环境效益的双赢目的。

一、火电厂辅机系统能耗现状分析

（一）典型火电厂辅机能耗数据统计

在系统性分析火电厂辅机系统能耗现状的进程中，针对典型火电厂辅机能耗数据的统计分析可构成基础性环节。为此，通过收集那些具备行业代表性及典型工况的火电厂样本，并覆盖不同规模、装机容量及技术路线的电厂类型，可有效确保数据统计的全面性与普适性^[1]。而采集辅机系统在完整代表性时段内的能耗数据，涵盖电能消耗，设备运行过程中的各类电能消耗，燃料消

耗，如因特殊工艺需求消耗的煤炭、天然气等。随后，采用科学严谨的统计分析方法，对海量数据进行系统化梳理与深度挖掘，从设备类型、运行工况、时间周期等多维角度，剖析能耗分布特征与动态演变规律，为精准评估辅机系统能耗水平及挖掘节能潜力提供可靠的数据基础。

（二）能耗问题诊断与评估

在火电厂辅机系统能耗现状分析框架中，能耗问题诊断与评估是精准识别节能潜力的核心环节。需采用系统化的能效分析法体系，热平衡分析通过量化辅机系统热输入、输出、传递及损

失过程，精准识别热能损耗关键节点，如设备散热损失、管道热传导损失。能量梯级利用分析基于能量品位分级原理，优化能量在辅机设备间的流动路径，诊断能量利用失配问题，如高品位能量低效利用。依托上述分析方法，对辅机系统实施深度能耗诊断，全面评估各设备能源利用效率，通过对比行业基准值及同类设备先进能效指标，精准定位高能耗关键环节与设备，如效率偏低的泵组、冷却系统能量回收效率不足，为制定针对性节能优化策略提供科学依据。

（三）与先进水平的差距分析

在火电厂辅机系统能耗现状分析框架中，对标先进水平的差距量化分析是精准识别节能优化路径的关键。需系统筛选国内外同类型先进火电厂作为基准参照，确保其在装机规模、机组类型及运行工况等关键维度与目标电厂具备高度一致性，以保障对比数据的科学性与可比性^[2]。而全面采集并整合目标电厂与先进电厂的辅机能耗核心指标，包括单位电耗、燃料消耗量、热效率及能量回收率等关键参数。通过多维度系统化对比分析，精准量化能耗差异特征，例如，单位电耗较先进水平偏高，热效率存在显著差距等。同时，深入剖析差异成因，主要归因于设备技术层面（目标电厂辅机设备老化、技术迭代滞后，先进电厂采用高能效新型设备）、管理机制（先进电厂实施精细化节能管理制度与动态优化策略）及人员素质（员工节能意识与操作技能优势显著）等多维因素。在精准界定差距与成因基础上，方可制定系统性优化策略，以此有效驱动目标电厂辅机系统能耗水平向行业先进水平持续提升。

二、火电厂辅机节能优化技术策略

（一）设备升级与改造

在对火电厂辅机系统进行技术优化改进时，针对设备的升级和改造过程中，可采用高效节能型辅机设备，其中高效离心泵通过优化叶轮流道结构与水力模型设计，能显著降低泵内流体传输过程中的能量损耗，提高流体传输效率。而高效轴流风机则基于先进空气动力学原理，优化叶片翼型与流场分布，提升气动效率，实现风量与风压的协同提升，同时降低功率消耗。此类高效设备在相同工况条件下，可使辅机系统整体能耗降低10%~20%。对于火电厂现有辅机设备，技术改造为必要手段^[3]。同时，叶轮切割技术通过精确调整叶轮直径，优化设备工作点，使其运行于高效区间，变频调速改造则通过安装变频器，可实现设备转速的实时动态调节，避免低负荷工况下的高能耗运行，有效提升设备运行效率，从而达到节能降耗目标，为火电厂的可持续发展提供技术支撑。

（二）运行参数优化

对于火电厂辅机系统运行参数进行精确配置时，辅机设备的流量、压力及转速等运行参数与系统能耗之间存在显著的非线性关联关系。而流量超出设计范围会导致设备做功增加，进而引发能耗上升，压力参数偏离设计工况将加剧系统内部能量耗散，转速偏离最优运行区间则会显著降低设备运行效率。基于热力学与

流体力学原理，通过建立运行参数与能耗的定量关系模型，可准确表征各参数变化对系统能耗的影响机制。在此基础上，采用遗传算法、粒子群优化算法等智能优化方法，并以此模拟自然进化过程或群体智能行为，在多维参数空间中进行高效搜索，通过迭代优化计算获得系统能耗最小化与运行效率最大化的最优参数组合。该优化策略可使辅机系统运行于最优工况，降低火电厂辅机系统能耗，提升整体能源利用效率，为火电厂实现节能减排目标与经济效益最大化提供技术支撑。

（三）系统优化与集成

针对火电厂辅机系统内部，实施全面系统性优化时，可通过对泵与风机组合方式的科学设计，依据运行工况动态配置设备参数，从而有效消除设备容量不匹配及过载运行现象，以显著降低无效能耗。而冷却系统运行模式的精细化调控需基于环境温度、机组负荷等多维参数进行动态适配，避免过度冷却引发的能量损耗，进而实现系统能量的梯级利用与高效配置^[4]。同时，辅机系统与其他系统的集成优化研究具有重要理论价值与实践意义，辅机系统与热力系统的深度耦合，可促进余热的合理回收与再利用，大幅削减热能散失，在与电气系统的协同集成时，则能优化电力分配与传输机制，有效降低线路损耗。通过跨系统集成优化的实施，打破传统系统间壁垒，能实现能量在不同系统间的有序流动与高效转化，从而系统性提升火电厂整体能源利用效率，以推动电厂向绿色化、高效化及可持续化方向转型。

（四）智能控制技术应用

基于模糊集合理论的模糊逻辑控制技术，通过构建精确的模糊规则库与隶属度函数，能够对辅机运行参数进行非线性映射处理，以实现温度、压力等关键参数的自适应调节，确保系统在多工况条件下均能维持最优运行状态。而神经网络控制技术则依托其自学习与非线性拟合特性，通过历史运行数据的深度学习，建立辅机设备的动态特性模型，实现运行参数的精确预测与自适应调整，有效规避传统固定参数控制策略的局限性，显著降低系统运行过程中的能量损耗。同时，构建基于多源数据融合的辅机系统智能监控与诊断平台，集成振动、温度、电流等多维运行参数的实时采集与分析功能，运用数据挖掘与模式识别算法对设备运行状态进行动态评估，可实现故障特征的早期识别与预警，通过建立故障诊断知识库提供优化处置方案，以确保辅机系统在高效、稳定、节能的运行状态下持续工作，为火电厂整体能效提升提供技术保障。

三、火电厂辅机节能优化管理策略

（一）节能管理制度建设

在火电厂辅机节能优化管理框架中，健全的节能管理制度体系是确保节能工作系统化、规范化实施的根本保障。需构建覆盖辅机设备全生命周期的精细化管理制度，系统规定设备选型阶段的能效准入标准，运行阶段的科学操作规程，以及维护保养环节的效能保障要求，从而确保设备在各运行周期均符合能效优化目标^[5]。对于制度设计，则应明确界定组织职责矩阵，其中生产部

门负责辅机运行参数的实时调控与能效监控，技术部门主导节能技术方案的开发与改造实施，管理部门则统筹协调节能工作的整体推进与监督评估，形成权责清晰、协同高效的管理机制。并且，还需建立基于目标分解的量化考核体系，将电厂整体节能目标科学分解至各责任单元，制定分层级的考核指标与周期性评估标准，通过定期开展能效数据的统计分析与综合评价，实施基于绩效的奖惩机制，有效激发全员参与节能管理的主动性和创新性，以此营造持续改进的节能文化氛围，为火电厂能效水平的持续提升提供制度保障与管理支撑。

（二）人员培训与素质提升

在火电厂辅机节能优化管理实践中，人员能力素质的系统性提升，需构建覆盖全岗位的辅机节能知识培训体系，针对运行人员，系统讲授设备节能运行机理、标准化操作规程及故障节能处置策略，通过仿真模拟与实操训练提升其基于负荷动态变化的参数精准调控能力，强化能效意识，可有效规避操作偏差引发的能源损耗。针对管理人员，重点深化节能管理理论、成本优化模型及政策法规的专题培训，提升其科学决策能力与管理创新水平。同时，建立创新激励长效机制，设立专项创新奖励基金，对提出并实施有效节能技术方案、实现能效突破的个人予以物质与精神双重激励，搭建跨部门创新交流平台，促进技术经验与优化成果的系统化共享，从而激发全员创新潜能，构建协同推进辅机节能优化的可持续管理机制。

（三）节能激励机制建立

在火电厂辅机节能优化管理实践中，完善的节能激励机制构成驱动全员参与节能行动、保障节能目标高效达成的核心。为此，需构建专项节能激励基金体系，以明确资金来源涵盖企业节能效益提取、上级财政专项拨款等多渠道，并制定科学透明的量化评定标准与规范化评选流程^[6]。对在节能技术改造中取得显著成效的部门，实施资金激励与荣誉授予，并在全厂范围内开展系统性表彰宣传。针对个人贡献者，对提出创新性节能方案、实现

操作参数优化突破或积极参与节能管理监督的，依据贡献度实施物质激励与职业发展通道激励^[7]。同时，将节能绩效深度耦合于员工绩效考核体系，设定分层级的量化评估指标，将节能目标完成情况纳入关键绩效维度，构建双向激励约束机制，促使员工将节能行为与个人职业发展及经济收益有效关联，从而激发全员主动参与节能优化的内生动力，营造持续改进的节能管理文化氛围^[8]。

（四）能源管理与审计

能源管理体系构建与审计机制实施是保障节能工作持续深化的核心支撑，因此，需建立覆盖能源全生命周期的精细化管理架构，系统规范能源采购、储存、分配及使用等关键环节的动态监控与效能评估。通过部署高精度能源计量装置，实现辅机设备能耗数据的实时精准采集，并依托集成化能源管理平台开展多维度数据挖掘与趋势分析，动态把握能源消耗特征，为科学决策提供数据支撑^[9]。同时，定期执行基于国家标准的能源审计工作，组建专业化审计团队，对辅机系统能源利用效率进行系统性评估与诊断。深入剖析节能措施实施效果，精准识别能效瓶颈与浪费成因，制定系统性整改方案，明确责任主体与执行时限，实施闭环跟踪管理机制，确保问题彻底解决。基于上述体系化运作，能持续提升辅机系统能源利用效率，驱动火电厂节能工作向精细化、智能化方向实现质的跃升^[10]。

四、结束语

针对火电厂辅机节能进行优化是一项长期且持续性的工作，而良好的优化运行策略，不但能提高火电厂的能源利用率，还能为火电厂带来显著的经济效益。而随着科技的不断进步与节能要求的日益提高，火电厂应持续关注并积极应用全新的节能技术和管理理念，才能为我国能源的高效利用与环境保护做出更大的贡献。

参考文献

[1]李钰.发电厂辅机电动机节能改造技术研究[J].应用能源技术,2021,(10):49-51.
[2]张志强,王承亮,魏道君,等.火电厂节能环保技术策略探讨[J].科技创新导报,2020,17(14):112-113.
[3]王丽娜.火力发电厂锅炉节能降碳路径研究[J].资源节约与环保,2019,(01):3-4.
[4]房善恩,钟瑶.试析火力发电厂照明系统中的节能优化措施[J].中国照明电器,2025,(04):171-173.
[5]吕永红.火电厂汽轮机运行节能降耗策略研究[J].电力设备管理,2025,(05):267-269.
[6]王成辉.火电厂汽轮机运行与检修的节能降耗策略分析[J].中国轮胎资源综合利用,2024,(12):85-87.
[7]王庆黎.火电厂集控运行节能降耗技术策略与应用[J].中国高新科技,2024,(22):80-82.
[8]邵长军.新时期火电厂集控运行节能降耗策略研究[J].电子元器件与信息技术,2024,8(06):181-183.
[9]卢昱辰,樊岩.百万机组火电厂节能降耗的运行策略分析[J].中国金属通报,2021,(09):241-242.
[10]李伟.火力发电厂锅炉运行控制的节能策略研究[J].化工管理,2020,(24):56-57.

电力数据数字能源时代的核心基石与实践路径

卢霄霞, 张彦军

内蒙古电力(集团)有限责任公司包头供电公司, 内蒙古 包头 014000

DOI:10.61369/WCEST.2025070005

摘 要 : 随着“双碳”目标推进与新型电力系统建设, 电力数据已成为能源领域的核心生产要素。本文围绕电力数据治理的核心价值, 系统分析当前电力数据在“采、存、管、用”全流程中存在的短板、标准缺失、安全风险等痛点, 结合数据治理“三层次模型”(技术层、制度层、应用层), 提出涵盖数据标准体系构建、全生命周期质量管控、安全防护体系完善及价值挖掘路径的实践方案。研究表明, 通过体系化的数据治理, 可实现电力数据从“资源”到“资产”的转化, 为电网调度优化、新能源消纳、用户能效管理提供关键支撑, 最终助力新型电力系统的安全高效运行。

关 键 词 : 电力数据治理; 新型电力系统; 数据全生命周期; 数据安全; 数据价值挖掘

The Core Cornerstone and Practical Path of the Era of Digital Energy in the Power Data

Lu Xiaoxia, Zhang Yanjun

Baotou Power Supply Company, Inner Mongolia Electric Power (Group) Co., Ltd., Baotou, Inner Mongolia 014000

Abstract : With the advancement of the "dual carbon" goals and the construction of the new power system, power data has become a core production factor in the energy sector. However, the entire process of power data "collection, storage, management, and application" still faces challenges such as quality shortcomings (e.g., data deviations and missing values), lack of standards (inconsistent standards across links/enterprises), and security risks (external attacks and privacy leaks). Focusing on the core value of power data governance, this paper proposes a practical plan covering the establishment of a data standard system, full-lifecycle quality control, improvement of the security protection system, and value mining paths, based on the three-level model of "technology layer – institutional layer – application layer". The research shows that systematic governance can transform power data from a "resource" to an "asset", providing key support for power grid dispatching optimization (e.g., reducing losses by 2%), new energy consumption (e.g., increasing consumption rate by 10%), and user energy efficiency management (e.g., reducing electricity costs by 15%), ultimately contributing to the safe and efficient operation of the new power system.

Keywords : power data governance; new power system; full lifecycle of data; data security; data value mining

引言

在数字经济与能源革命深度融合的背景下, 电力系统正从“传统发输配用”向“源网荷储协同”的新型模式演进。随着风电、光伏等新能源的大规模并网, 以及智能电表、储能电站、电动汽车充电桩等终端设备的普及, 使得电力数据的规模呈指数级增长。电力数据涵盖发电侧(风光储机组运行数据)、输电侧(线路负荷与状态监测数据)、配电侧(配网拓扑与故障数据)及用户侧(用电负荷与能效数据)等全链条^[1], 其价值不仅在于支撑电网安全稳定运行, 更能为需求响应、碳足迹追踪、能源市场化交易提供决策依据。

然而, 电力数据的“量增”并未同步带来“质优”与“效升”。当前电力数据治理仍面临“数据孤岛”突出、质量参差不齐、安全风险凸显等问题, 制约了数据在电网调度、新能源消纳、需求响应等场景的应用价值。因此, 构建科学、系统的电力数据治理体系, 不仅是破解当前电力数据管理困境的关键, 更是支撑新型电力系统建设、实现“双碳”目标的核心基石。

一、电力数据治理的核心内涵与价值定位

（一）电力数据治理的核心内涵

数据治理本质是通过体系化的策略设计、标准化的规则制定与全流程的流程管控^[2]，对数据从产生、采集、存储、处理到应用的全生命周期进行精细化管控，最终实现数据“可见、可管、可用、可信”的闭环管理目标。

电力数据治理并非单一的技术操作，而是涵盖“技术支撑－制度保障－应用落地”三大维度的系统性工程。其核心是通过建立标准化的流程、制度与技术工具，实现对电力数据“全生命周期”（数据采集、存储、清洗、整合、分析、应用、归档）的管控，最终达成“数据可见、质量可控、安全可防、价值可用”的目标^[3]。

与传统数据管理相比，电力数据治理具有显著的行业特性：一是实时性要求高，实时性要求贯穿核心业务，电网调度需在毫秒级内获取负荷、机组出力数据，避免频率波动超出安全范围；故障抢修中，线路故障定位数据的延迟可能导致停电时间延长，尤其在居民用电高峰或工业生产关键时段，实时性直接影响供电可靠性；二是关联性强，数据关联性覆盖电力系统全链条，发电侧风电出力受风速影响时，需同步调整输电侧线路潮流分配，避免线路过载；用户侧工业负荷突增时，需联动储能系统放电补充供电，若缺乏跨环节协同治理，易引发局部电网不稳定；三是安全敏感度高，安全敏感度涉及多层级风险，电力数据中的电网拓扑、关键设备参数属于国家能源安全核心信息，一旦泄露可能影响能源供应安全；用户用电数据包含作息规律、生产经营等隐私信息，需通过数据加密、访问权限管控平衡开放共享与安全防护，例如某省级电力公司通过建立“数据脱敏＋分级授权”机制，在向新能源企业开放负荷数据时，隐藏用户具体身份信息，既支撑新能源消纳又保护用户隐私。

（二）电力数据治理的价值定位

在新型电力系统向“清洁低碳、安全高效”转型的过程中^[4]，电力数据治理的价值通过多维度实践深度落地，成为支撑系统稳定运行与效能提升的关键支撑，电力数据治理的价值主要体现在三个维度：

保障电网安全运行的“压舱石”：电力数据治理通过实时化、精准化的数据分析，构建电网安全预警体系^[5]。针对输电线路运行，治理后的线路状态监测数据（如导线温度、弧垂、覆冰厚度）可通过 AI 算法识别异常趋势：当冬季气温骤降时，系统能根据覆冰厚度增长速率，提前 6-8 小时预警线路覆冰风险，调度部门可及时安排融冰作业，避免线路因覆冰过断断裂；在变电站设备管理中，通过治理变压器油中溶解气体数据、铁芯接地电流数据，可精准判断设备内部绝缘状态，某变电站曾通过数据治理发现变压器乙炔气体含量异常升高，提前更换故障部件，避免了变压器烧毁导致的区域停电事故，将故障影响范围从“停电修复”缩小至“预防性维护”；推动新能源消纳的“加速器”：电力数据治理破解了新能源“出力波动大、预测精度低”的核心难题。新能源发电（风电、光伏）受自然条件影响显著，若缺乏有效数据治理，易出现“弃风弃光”现象。通过整合“风光资源预测数据－电网实时负荷数据－储能系统运行数据”，实现源网荷储协同；提升用户能效管理的“赋能器”：通过治理用户侧用电数据，可构建

用户能效画像，为用户提供个性化节能建议，实现用户与电网的双赢。例如，某城市电力公司基于治理后的居民用电数据^[6]，推出“峰谷用电优化方案”，不仅基于治理数据为用户匹配最优用电时段，还结合智能家居控制，自动调整洗衣机、充电桩等设备在低谷时运行，平均为用户降低 15% 的用电成本，同时缓解电网峰谷差压力^[7]。

二、当前电力数据治理面临的主要问题

（一）数据标准不统一，“数据孤岛”现象突出

当前电力行业尚未形成全国统一的电力数据标准体系，各环节、各企业的数据口径存在显著差异：

跨环节标准脱节：发电侧采用“机组编号＋出力曲线”的数据标识，而输电侧采用“线路编号＋负荷曲线”，两者缺乏统一的关联字段，导致“源网”数据无法直接对接；

跨企业标准不一：不同省级电力公司的用户用电数据格式、指标定义不同；

新旧系统标准冲突：传统电网系统（如 SCADA）与新型数字化系统的数据接口、传输协议不兼容，形成“新数据孤岛”与“旧数据孤岛”并存的局面。

（二）数据质量短板明显，制约应用价值实现

电力数据质量问题主要集中在“准确性、完整性、一致性”三个维度：

准确性不足：受传感器故障、传输干扰等影响，部分数据存在偏差。

完整性缺失：用户侧数据采集存在“覆盖盲区”，尤其是农村地区与小微企业；

一致性差：同一数据在不同系统中存在“多值并存”现象。

数据质量问题直接导致“数据不可用”。

（三）数据安全风险凸显，防护体系待完善

电力数据涉及国家能源安全与用户隐私^[8]，当前安全防护面临三大挑战：

外部攻击风险：随着电力系统数字化程度提升，网络攻击手段更趋复杂。

内部泄露风险：电力数据涉及用户用电隐私，部分员工因操作不当或利益驱动，存在数据泄露风险。

共享与安全的平衡难题：数据开放共享是实现“源网荷储协同”的前提，但当前缺乏明确的“数据分级分类”标准——哪些数据可开放、哪些需加密、哪些禁止共享，界定模糊，导致企业“不敢共享、不愿共享”。

（四）数据治理机制不健全，责任与激励缺失

数据治理是“技术＋制度”的结合，当前制度层面的短板主要体现在：

责任主体不明确：多数电力企业未设立专门的数据治理部门，数据治理工作分散在数字化部、综合管理部、营销部等多个部门，存在“多头管理、无人负责”的现象；

激励机制缺失：数据治理属于“基础性工作”，其价值难以直接量化，导致员工参与积极性不足。

长效机制未建立：数据治理不是“一次性项目”，而是持续优化的过程。但部分企业将数据治理视为“短期任务”，项目结

束后缺乏持续的质量监控与更新机制，导致数据质量“反弹”。

三、电力数据治理“三层次模型”实践方案

针对当前电力数据治理面临的标准不统一、质量短板、安全风险、机制缺失等问题，结合电力行业的特点与需求，本文提出数据治理“三层次模型”（技术层、制度层、应用层）实践方案，通过三个层次的协同发力，构建科学、系统、高效的电力数据治理体系，实现电力数据从“资源”到“资产”的转化。

（一）技术层：构建全生命周期数据管控平台

技术层是电力数据治理的基础支撑，通过引入先进的技术工具与架构，构建覆盖数据采集、存储、清洗、整合、分析全生命周期的管控平台，为数据治理提供强大的技术保障。

在数据采集环节，采用“边缘计算 + 物联网”的技术架构^[9]，实现多源异构数据的实时、精准采集。在发电场、变电站、充电桩、用户侧等终端设备部署边缘网关，边缘网关具备数据预处理能力，可对采集到的原始数据进行过滤、筛选、格式转换，剔除无效数据（如传感器故障产生的异常值），减少数据传输压力。数据存储环节采用“湖仓一体”架构，融合数据湖与数据仓库的优势，满足电力数据多样化的存储需求^[10]。数据清洗与整合环节实现数据质量的自动化管控与多源数据的高效融合。数据分析环节构建“业务驱动”的数据分析平台，通过搭建多样化的分析模型，释放数据价值。

（二）制度层：完善标准与责任体系

制度层是电力数据治理的保障，通过建立统一的数据标准体系、明确的责任分工机制、有效的激励与考核制度，为数据治理工作的有序推进提供制度支撑，确保数据治理工作常态化、规范化开展。

明确责任分工机制是解决数据治理“多头管理、无人负责”问题的关键。建立有效的激励与考核制度，激发员工参与数据治理的积极性。将数据治理工作纳入电力企业的绩效考核体系，设置数据质量指标（如数据准确率、完整性、一致性）、数据共享指标（如数据共享率、数据共享响应时间）、数据应用指标（如数据分析模型数量、数据驱动决策案例数）等关键考核指标，并根据各部门与岗位的职责，合理设定指标权重。

（三）应用层：挖掘数据业务价值

应用层是电力数据治理的目标，通过将治理后的高质量数据深度应用于新能源消纳、用户服务、能源市场化交易等核心业务场景，实现数据价值的最大化，推动电力系统向智能化、高效化、低碳化转型^[11]。

针对新能源消纳难题，通过数据治理整合新能源发电数据、电网负荷数据、储能数据、用户需求响应数据，构建源网荷储协同优化平台，打破新能源消纳瓶颈。在用户服务领域，基于治理后的用户用电数据，打造“个性化、智能化”的用户服务体系，提升用户满意度与忠诚度。随着能源市场化改革的推进，电力数据在能源市场化交易中的作用日益凸显。通过数据治理，整合电力供需数据、电价数据、碳排放数据，构建透明、高效的能源交易数据服务平台，为市场主体提供数据支撑。

四、结论与展望

（一）结论

电力数据治理是新型电力系统建设的“基础工程”与“关键抓手”。当前电力数据治理面临标准不统一、质量短板、安全风险与机制缺失等问题，需通过“技术层构建全生命周期管控平台、制度层完善标准与责任体系、应用层挖掘数据业务价值”的三维路径，实现电力数据从“资源”到“资产”的转化。

实践表明，科学的电力数据治理可显著提升电网安全运行水平、推动新能源消纳、优化用户能效服务，是实现“双碳”目标与能源数字化转型的核心保障。

（二）展望

随着数字技术的不断创新与能源行业的持续变革，未来电力数据治理将呈现智能化、协同化、价值化三大发展趋势，为新型电力系统建设注入更强动力。

电力数据治理是一项长期且复杂的系统工程，需要政府、企业、科研机构等各方共同努力。未来，随着技术的不断进步、制度的日益完善、应用场景的持续拓展，电力数据治理将不断迈向新的高度，为新型电力系统建设、“双碳”目标实现与能源行业数字化转型提供坚实支撑，推动能源领域进入更加智能、高效、低碳的数字能源新时代。

参考文献

- [1] 中国电力企业联合会. 中国电力行业数字化发展报告（2024）[R]. 北京：中国电力企业联合会，2024.
- [2] 国家能源局. 新型电力系统发展蓝皮书（2023）[R]. 北京：国家能源局，2023.
- [3] 张宏宇，李鹏，王剑. 电力数据治理关键技术与实践[J]. 电力系统自动化，2022，46（15）：1-10.
- [4] 刘建明，赵亮，孙伟. 基于数据中台的电力数据共享与价值挖掘[J]. 中国电力，2023，56（8）：56-63.
- [5] 王继业，李正佳，张东霞. 电力数据安全防护体系构建与实践[J]. 电网技术，2022，46（12）：4567-4575.
- [6] 王少影，问朝，常永娟. 电力企业级数据治理体系的研究[J]. 中国战略新兴产业，2024，(29): 42-44.
- [7] 周耀辉，司渭滨，代立君，等. 基于随机规划的新型电力系统优化调度方法[J]. 自动化技术与应用，2025，44(05): 43-47.
- [8] 李建彬，高昆仑，彭海朋. 新型电力系统数据安全与隐私保护[J]. 信息安全研究，2023，9(03): 206-207.
- [9] 张喜铭，徐欢，杨秋勇，等. 考虑电力系统数据治理智能化的数据库生成方法研究[J]. 制造业自动化，2024，46(02): 160-165+171.
- [10] 黄欣，吴伟杰，张伊宁，等. 电力系统多源异构数据混合式存储方式研究[J]. 机电工程技术，2021，50(01): 77-79.
- [11] 张桦，柳占杰，张红亮. 在能源数字经济新格局下持续挖掘电力数据价值[J]. 中国电力企业管理，2022，(04): 68-69.

发电厂大型机组高压厂用电系统电流互感器 参数建议研究

高攀

西北电力设计院有限公司, 陕西 西安 710075

DOI:10.61369/WCEST.2025070006

摘 要 : 本文针对发电厂大型机组高压厂用电系统安全稳定运行需求, 重点关注电流互感器也就是 CT 的参数配置方面问题, 通过对高压厂用电系统故障工况进行分析, 再结合 CT 在继电保护和测量监控中的功能定位, 从额定参数、暂态特性、精度等级、绝缘性能这些关键维度来提出参数选择的建议, 目的是为大型机组高压厂用电系统 CT 的选型与配置提供理论依据和工程实践参考, 从而提升系统运行的可靠性与经济性。

关 键 词 : 高压厂用电系统; 电流互感器; 参数选择

Research on Recommended Parameters of Current Transformer in High-Voltage Power System of Large-Scale Power Plant Unit

Gao Pan

Northwest Electric Power Design Institute Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710075

Abstract : In view of the safe and stable operation requirements of the high-voltage power system of large-scale power plants, this article focuses on the parameter configuration of the current transformer, that is, CT. By analyzing the fault conditions of the high-voltage power system, combined with the function determination of CT in relay protection and measurement monitoring, This paper proposes parameter selection suggestions from the key dimensions of rated parameters, transient characteristics, accuracy level, and insulation performance. The purpose is to provide theoretical basis and engineering practice reference for the selection and configuration of large-scale unit high-voltage plant power system CT, thereby improving the reliability and economy of system operation.

Keywords : high-voltage plant power system; current transformer; parameter selection

大型发电机组高压厂用电系统的安全运行情况直接影响机组的稳定性, 电流互感器也就是 CT, 作为连接一次系统与二次保护、测量装置的核心设备, 它的参数配置直接决定继电保护的准确性、测量精度以及系统故障处理能力。

一、CT 在高压厂用电系统中的功能需求

电流互感器在高压厂用电系统中承担着继电保护、测量监控以及安全联锁这三大核心功能, 其性能好坏直接决定系统运行的安全性与经济性, 在继电保护方面, CT 需要为过流保护、差动保护、接地保护等装置提供准确的电流信号, 以此确保故障发生时保护装置能够快速可靠动作, 这就要求 CT 在故障暂态过程中保持线性传变特性, 避免因饱和问题导致保护拒动或者误动情况出现。

在测量监控功能方面, CT 要为电能计量、电流表计以及自动化系统提供高精度电流数据, 以此支持机组运行状态监测与经济指标分析工作, 正常运行时, CT 应该在 0 - 120% 额定电流范围之内保持 0.2 级或者 0.5 级测量精度, 从而确保负荷统计、能耗分

析的结果准确无误, 在过负荷工况的情况下, 需要避免因铁芯饱和而导致的测量偏差问题, 进而保障监控系统对异常工况能够进行有效识别。

二、电流互感器关键参数影响因素分析

(一) 额定参数

额定一次电流要依据高压厂用电系统最大正常工作电流以及负荷波动范围来确定, 通常按照 1.2 至 1.5 倍最大计算电流进行选取, 目的是确保正常运行时铁芯不饱和并且留有一定裕量, 额定变比的选择需要兼顾二次设备接口标准, 常见的二次额定电流是 5A 或者 1A, 其中 1A 规格在长电缆回路中能够降低线路损耗, 更

适合大型电厂的复杂二次网络，额定短时热电流和动稳定电流是保障 CT 在故障工况下安全的关键指标，需根据系统最大三相短路电流计算来确定，通常要求热稳定电流持续时间不少于 1 秒，动稳定电流倍数不小于 2.5 倍额定热稳定电流，以此耐受短路电流产生的高温与电动力冲击。电流互感器额定一次电流计算公式如下：

$$I_{1N} = K_{load} \times I_{1max}$$

其中， I_{1N} 为 CT 额定一次电流（A）；

K_{load} 为负荷系数，取值范围 1.2~1.5（根据系统负荷波动特性确定）；

I_{1max} 为系统最大工作电流（A）。

（二）暂态特性参数

暂态特性主要受一次电流非周期分量、衰减时间常数以及二次回路时间常数的影响，非周期分量会让铁芯磁通量快速累积进而易引发 CT 暂态饱和，暂态等级作为衡量 CT 暂态性能的核心指标，常见等级包含 TPS、TPX、TPY 和 TPZ，其中 TPY 级通过设置非磁性间隙来抑制暂态饱和，适用于需要准确反映故障暂态电流的场合，暂态面积系数 K_{td} 表征 CT 在规定暂态条件下的误差限值，需和保护装置的动作时间配合以确保在保护动作前 CT 不饱和，二次时间常数 T_s 由二次回路电感与电阻决定，需通过优化二次负荷阻抗与 CT 励磁特性来控制 T_s 值以减少暂态误差。

（三）精度等级与误差特性

精度等级按照用途可以分为测量用和保护用，测量用 CT 需要保证在正常运行范围之内的高精度，常见等级是 0.2 级和 0.5 级，其中 0.2 级适用于电能计量且要求在额定电流 1% 至 120% 范围中电流误差不超过 $\pm 0.2\%$ 、相位差不超过 $\pm 10'$ ，保护用 CT 则侧重于故障大电流情况下的误差控制，常用 5P 和 10P 等级，分别表示在额定准确限值一次电流下电流误差不超过 $\pm 5\%$ 和 $\pm 10\%$ 、复合误差不超过 $\pm 10\%$ 和 $\pm 15\%$ ，准确限值系数是保护用 CT 的关键指标，指的是允许的最大一次电流与额定一次电流的比值，例如 5P20 表示在 20 倍额定电流下仍能够满足精度要求，励磁特性曲线反映 CT 在不同一次电流之下的励磁电流变化，拐点电压越高 CT 抗饱和能力就越强，需要通过测试确保励磁电流在额定工况下处于线性段。

（四）绝缘与结构参数

额定绝缘水平要依据系统最高工作电压来确定，例如 10kV 系统 CT 的雷电冲击耐受电压不能低于 75kV，工频耐压不能低于 30kV，并且要通过局部放电试验，在 1.1 倍额定电压下局部放电量不能大于 10pC。绝缘结构分为内绝缘和外绝缘这两种类型，内绝缘一般采用油纸绝缘或者气体绝缘的方式，外绝缘则需要满足爬电距离的相关要求，户外型 CT 爬电比距不能小于 20mm/kV，以此来适应不同的环境条件。结构设计需要考虑散热性能方面的问题，通过优化铁芯与绕组的布置情况、设置散热气道或者采用低损耗材料，控制额定负荷下的温升不超过 80K 或者 100K^[1]。

三、高压厂用电系统 CT 参数选择建议

（一）基于系统拓扑的参数差异化选择

1. 电源进线侧 CT

电源进线侧 CT 要优先满足继电保护的严格要求，特别是系统发生短路故障时需准确传变含非周期分量的暂态电流，所以暂态

特性应选择 TPY 级并通过设置非磁性间隙抑制暂态饱和，以此确保在故障发生后的 100 毫秒内保持线性传变能力，额定一次电流要按进线最大工作电流的 1.5 倍进行配置，同时还需校核系统最大短路电流下的热稳定与动稳定性能，热稳定电流持续时间不能低于 2 秒且动稳定电流倍数不小于 3 倍额定热稳定电流，这样才能耐受短路电流产生的电动力与高温冲击，在精度等级方面保护绕组采用 5P20 级以确保在 20 倍额定电流下误差不超过 10%，测量绕组采用 0.5S 级来满足正常运行时的计量需求^[2]。

2. 馈线回路 CT

对于电动机类的负荷，因为启动电流能达到额定电流的 6 至 8 倍，并且持续时间比较长，所以额定一次电流要按照电动机额定电流的 1.2 至 1.5 倍来选取，目的是避免启动过程中 CT 出现饱和情况，暂态等级一般选择 TPX 级，它的铁芯采用无气隙设计能够在稳态短路时保持较高精度，适用于馈线回路中以过流保护为主的场景，保护绕组精度等级采用 5P20 或者 5P10，以此确保在 10 至 20 倍额定电流的情况下误差可以满足保护装置的要求，测量绕组则依据负荷重要性来选择 0.5S 或者 1.0S 级，用于日常运行监控以及电能统计工作，二次负载阻抗需要综合考虑电缆长度和保护装置输入阻抗，通过合理配置电缆截面来控制回路阻抗，从而确保 CT 在额定负荷下误差达到最小^[3]。

3. 变压器中性点 CT

因为中性点回路在正常运行时电流较小，只有在系统发生单相接地故障时才会出现故障电流，所以额定一次电流一般选择比较小的值，这样能够提高接地故障检测的灵敏度，变比的选择需要和接地保护装置的整定值相匹配，要保证故障电流经过 CT 转换之后可以可靠触发保护动作，通常变比范围是在 100A/5A 至 400A/5A，在暂态特性方面，由于接地故障电流中的非周期分量比较小，所以可以选择 PX 级或者 5P 级 CT，不需要有特别严苛的暂态饱和抑制能力，但要保证在故障电流作用下能够线性传变，精度等级采用 5P10，要确保在 10 倍额定电流的情况下误差不超过 10%，以此满足接地保护对电流测量的准确性要求，二次负载阻抗应该尽可能小，要通过缩短二次电缆长度、增大电缆截面的方式来降低回路阻抗，避免因负载过大导致 CT 误差增大而影响保护灵敏度^[4]。

（二）暂态特性参数优化建议

1. 暂态等级与保护算法匹配

数字式保护装置具备强大数据处理能力，能通过算法对 CT 暂态误差进行补偿，所以可选用暂态性能相对简化的 TPX 级 CT，TPX 级 CT 铁芯没有气隙（见表 1），在稳态短路情况下精度比较高，并且成本低于 TPY 级，适用于配置数字式保护的馈线、电动机等回路，传统电磁式保护装置依赖电流波形的完整性实现动作逻辑，因此需选用 TPY 级 CT，通过铁芯气隙设计抑制暂态饱和，确保在故障暂态过程中电流传变误差不超 5%，避免保护装置出现误动或拒动情况^[5]。变压器差动保护等对暂态特性要求极高的场景，需选用 TPZ 级 CT，其铁芯气隙较大可有效消除剩磁影响，确保在整个暂态过程中传变特性呈线性，满足差动保护对两侧电流波形一致性的要求^[6]。

表1 CT 暂态等级与保护算法匹配关系				
暂态等级	铁芯结构特点	适用保护类型	典型应用场景	保护算法兼容性
TPX	无气隙，暂态饱和抑制弱	常规过流保护、限时速断保护	馈线回路、电动机保护	数字式保护
TPY	带非磁性气隙，暂态抑制强	差动保护、接地保护	电源进线、主变压器	传统电磁式保护、数字式差动保护
TPZ	大气隙，无剩磁影响	超高压系统差动保护	大型变压器、发电机	高精度差动保护

2. 二次负载阻抗限制

CT的额定二次负载阻抗是制造商依据铁芯特性和绕组参数来确定的，通常会标注成2.5VA、5VA、10VA等数值，在实际应用中二次回路总阻抗要控制在额定值的25%至100%范围之内，要是负载阻抗超过了额定值就会导致CT励磁电流增大，使得误差超出允许范围严重时还会引发饱和，电缆阻抗作为二次负载的主要组成部分需要根据电缆长度与截面来计算，对于长距离回路应该选用较大截面电缆或者降低二次额定电流，以此来减小电缆电阻与电抗，保护装置输入阻抗需要和CT额定负载相匹配，优先选择高输入阻抗的保护装置以降低对CT负载能力的要求^[7]。CT二次负载阻抗计算公式如下：

$$Z_{2\Sigma} = Z_{cable} + Z_{device} + Z_{contact}$$

其中， $z_{2\Sigma}$ 为二次回路总阻抗（Ω）；
 Z_{cable} 为二次电缆阻抗（Ω），与电缆长度、截面及频率相关；
 Z_{device} 为保护/测量装置输入阻抗（Ω）；
 $Z_{contact}$ 为连接端子接触电阻（Ω），通常取0.1~0.5Ω。

（三）精度与可靠性平衡策略

1. 双绕组CT配置

保护绕组和测量绕组采用独立铁芯或者独立绕组的设计方式，它们分别连接到保护装置以及测量仪表之上，以此确保保护回路出现故障时不会影响测量精度，同时测量回路负载发生变化时也不会干扰保护性能，保护绕组需要具备比较强的过电流能力，其铁芯截面设计得比较大，采用5P或者10P级精度，匝数设置得较少来降低二次感应电压，适用于故障大电流的传变工作，测量绕组则更侧重于小电流情况下的精度^[8]。铁芯采用高磁导率

的材料制作，匝数设置得比较多，精度等级为0.2S或者0.5S，确保在正常运行时误差能够达到最小，双绕组CT的变比可以根据保护和测量的需求分别进行选择，绕组排列方式通常采用同心式的形式，保护绕组处于外侧位置，测量绕组处于内侧位置，这样能够减少漏磁所带来的影响。

2. 极端工况校验

短路电流校验要计算系统最大三相短路电流以及单相接地短路电流，还要校核CT的热稳定与动稳定性能，以此确保在短路电流作用下绕组温升不超过80K且铁芯与外壳无变形、绝缘无损坏，过负荷校验需考虑机组启动和设备异常等情况下的长期过负荷，要验证CT在过负荷时的误差变化，保证测量绕组误差不超过1.5倍额定精度限值且保护绕组不饱和，暂态饱和校验通过仿真计算故障暂态过程中的CT励磁电流来判断是否发生饱和，要是饱和和时间早于保护动作时间就需调整CT暂态等级或二次负载阻抗，温度适应性校验需考虑电厂高温、高湿环境对CT性能的影响，在-25℃至+70℃温度范围内CT误差变化应控制在±10%以内且绝缘电阻不低于1000MΩ（见表2）。

表2 CT 极端工况校验关键指标与标准			
校验类型	校验参数	允许限值	校验方法
短路电流校验	热稳定电流/动稳定电流	温升≤80K，无结构变形	仿真计算+实验室短路试验
暂态饱和校验	饱和时间/励磁电流	饱和时间/保护动作时间(>100ms)	ATP-EMTP暂态仿真
温度适应性校验	误差变化/绝缘电阻	误差变化≤±10%，绝缘电阻≥1000MΩ	高低温箱环境试验
剩磁影响校验	剩磁系数	≤10%饱和磁通	多次短路后剩磁测量

四、结论

CT参数选择要把系统安全稳定运行当作核心，依据不同拓扑位置的功能定位进行差异化配置，电源进线侧要优先保障暂态特性和短路耐受能力，推荐TPY级、5P20保护绕组以及0.5S测量绕组，馈线回路需要兼顾电动机启动负荷和稳态精度，选用TPX级、5P10/20保护绕组以及0.5S/1.0S测量绕组，变压器中性点着重于接地故障灵敏度，采用小变比、5P10级配置。

参考文献

[1]王应坤,刘顺意,黄晨,等.特高压换流站站用电系统自备投可靠性提升研究[J].湖南电力,2022,42(04):90-94.
[2]陈轩,朱超.用于特高压站站用电系统的绝缘监测系统研究[J].机电信息,2022,(02):1-5.
[3]孙楠,严佳梅,赵俊,等.特高压换流站站用电系统保护配置及定值配合研究[J].广东电力,2021,34(08):86-93.
[4]李晓.高压厂用电系统单相接地零序过电流保护的整定计算[J].电工技术,2021,(16):143-145.
[5]王永生.大型火力发电厂高压厂用电系统创新应用[J].西安文理学院学报(自然科学版),2020,23(03):67-70.
[6]陈思.±800kV特高压换流站交流站用电系统设计优化分析[J].电力勘测设计,2020,(06):49-54.
[7]王家庆,王家福.特高压变电站站用电系统设计与运维[J].山东工业技术,2019,(09):188.
[8]曹大军.电厂用电系统中高压变频器的应用[J].电气时代,2018,(09):66-67.

火电厂除灰除渣系统智能化改造方案

马战南, 刘江, 贺孝峰, 张聪聪

国能山西河曲发电有限公司, 山西 忻州 036500

DOI:10.61369/WCEST.2025070007

摘 要 : 随着燃煤机组煤质劣化趋势加剧, 火电厂除灰除渣系统面临灰量激增、能耗攀升等挑战。本文以某600MW机组为研究对象, 针对传统气力输灰系统存在的控制单一、效率衰减、管路磨损等问题, 提出基于双套管智能控制技术的改造方案。通过构建动态参数调节模型、优化压力测点布局及流量控制策略, 实现系统出力稳定前提下耗气量降低25%, 显著提升生产效率与设备可靠性。研究为火电厂智能化改造提供了可复制的技术路径。

关 键 词 : 火电厂; 除灰除渣系统; 智能化改造; 双套管控制; 气力输送

Intelligent Transformation Scheme of Ash Removal System in Thermal Power Plant

Ma Zhannan, Liu Jiang, He Xiaofeng, Zhang Congcong

Guoteng Shanxi Hequ Power Generation Co., LTD., Xinzhou, Shanxi 036500

Abstract : With the worsening deterioration of coal quality in coal-fired units, thermal power plants face challenges such as surging ash volume and rising energy consumption in their ash removal systems. Taking a 600MW unit as a case study, this paper proposes an intelligent control system based on dual-casing technology to address issues in traditional pneumatic ash conveying systems, including single-control mechanisms, efficiency degradation, and pipeline wear. By establishing dynamic parameter adjustment models, optimizing pressure measurement point layouts, and refining flow control strategies, the system achieves a 25% reduction in gas consumption while maintaining stable output, significantly enhancing production efficiency and equipment reliability. This research provides a replicable technical roadmap for intelligent transformation in thermal power plants.

Keywords : thermal power plant; ash removal and slag removal system; intelligent transformation; double tube control; pneumatic conveying

引言

当前火电厂普遍采用的气力输灰系统在煤质波动加剧和环保要求升级的双重压力下, 暴露出控制策略僵化、管路磨损失控、能效衰减显著三大技术瓶颈。传统PLC定值控制模式难以适应灰量动态变化, 系统响应延迟达30至60秒, 导致空压机长期高负荷运行。实测数据表明, 当煤质灰分从32%升至41%时, 单位输灰耗气量激增40% (从8.2 Nm³/t增至11.5 Nm³/t), 能耗较设计值偏高18%至25%。冗余配置的空压机进一步推高厂用电率, 部分机组空压机能耗高达1850kW, 远超实际需求。与此同时, 固定输送压力(0.5–0.6MPa)与灰柱密度超限(>1.2 t/m³)导致管路年均磨损速率达0.3mm, 弯头等关键部位甚至达到0.5mm/年, 由此引发的泄漏风险使维护成本占比高达运营费用的12%, 频繁停机检修更严重影响发电连续性。更为严峻的是, 传统定时吹灰模式脱离实际积灰状态, 造成受热面热阻增加15%至20%^[1], 迫使锅炉效率下降2至3个百分点, 过量消耗的吹灰介质进一步加剧能源浪费, 盲目吹灰还可能加速管壁磨损^{[2][3]}。

一、系统现状与问题分析

(一) 传统系统技术缺陷

现有电除尘气力输灰系统采用的PLC定值控制模式在应对复杂工况时暴露显著缺陷, 其核心问题集中体现在控制滞后性、参数僵化与监测失效三个维度。首先, 控制响应延迟导致系统无法

适应灰量动态波动。当煤质变化引起灰量突变时, 系统需30至60秒方能完成调节动作, 滞后期内灰柱密度会突破1.2 t/m³临界值, 形成高阻力灰栓。以某600MW机组为例, 灰分波动10个百分点(32%→42%)即造成管道压损陡增45%, 迫使空压机频繁启停, 单位输灰能耗激增40%(达11.5 Nm³/t)。其次, 参数固化使系统丧失工况适应性。固定输送压力设定值(0.5–0.6MPa)

与煤质灰分（28%–45%）严重脱节，高灰分煤种输送时压力不足导致堵管频发，低灰分时又因过压加速管道磨损（局部磨损率达0.5mm/年）。某电厂实测显示，灰分45%工况下采用0.55MPa定值输送，堵管率高达每月3.2次，而实际需求压力应达0.65MPa以上^[4]。第三，监测盲区直接削弱故障预判能力。15米间距的压力测点布局难以捕捉局部流场异常，当弯头或变径处出现初生灰栓时（压差突变>0.03MPa），系统因无法及时感知而错失调控窗口期。CFD流场模拟证实，传统布局对<5米的局部堵塞感知延迟超过20秒，致使75%的堵管事故未能提前预警。

（二）典型案例分析

某电厂运行数据实证揭示了煤质灰分波动对气力输灰系统的链式冲击：当入炉煤灰分从32%攀升至41%时，系统性能呈现断崖式劣化。耗气量指标从8.2 Nm³/t激增至11.5 Nm³/t（增幅40.2%），远超设计允许波动范围。其根源在于灰分升高触发灰量骤增，而传统定值控制系统未能动态调整输送参数，迫使空压机持续超压运行。经热工计算，此工况下实际需气量较设定值冗余达28%，导致单台空压机年耗电量增加逾120万千瓦时^[5]。

输灰效率同步恶化，单次作业周期从基准值延长至45分钟，较设计周期超限34%。灰柱密度持续突破1.2 t/m³临界值，在水平管段形成高阻灰栓。CFD流场模拟显示，灰栓导致局部流速衰减35%，迫使系统反复执行清堵操作。某660MW机组因此类延误导致的年等效停运时间长达210小时，损失发电量逾1.5亿千瓦时。

更严峻的是设备损耗加速，管路磨损速率飙升至0.5mm/年，较灰分32%工况恶化67%。微观分析表明，高灰分煤种产生的硬质灰粒（莫氏硬度>6）在0.6MPa输送压力下，对90°弯头冲刷速率达常规工况的2.3倍^[6]。

二、智能化改造技术方案

（一）双套管智能控制系统架构

为解决传统气力输灰系统的控制缺陷，本文构建了“监测层–控制层–执行层”三级智能控制架构，实现从感知到执行的闭环优化。监测层部署激光颗粒传感器实时捕捉灰流浓度梯度（精度±1%），配合±0.5%精度的压差变送器构建管网易损区三维压力场，并在90°弯头等关键节点加装声波测堵装置（灵敏度≤0.02MPa压差突变）。某600MW机组实测表明，该层每秒生成超过2000组数据包，实现灰柱密度（0.8–1.2t/m³）、局部流态异常的毫秒级感知。

控制层依托边缘计算单元集成模糊PID算法，建立灰量–压力–流速的动态映射模型。当煤质灰分波动触发灰量变化时，算法通过隶属度函数自适应调整PID参数，将输送压力设定值响应时间压缩至5秒内。在某案例中，灰分从33%突增至40%时，控制系统在4.2秒内完成压力值从0.52MPa到0.63MPa的动态修正，避免传统系统60秒延迟导致的灰栓风险^[7]。

执行层采用变频输送风机（调速范围10–50Hz）与智能调节阀（调节比50:1）协同作用。当控制层输出新参数时，变频风机在3秒内切换转速（如从45Hz降至38Hz），同步调节阀开度

从80%收至65%，实现流量精准控制。某电厂改造后数据显示，该执行机制使系统在灰分35–45%波动工况下，耗气量稳定在 $8.6 \pm 0.3 \text{ Nm}^3/\text{t}$ ，较改造前波动幅度收窄82%^[8]。

（二）关键技术创新

1. 动态参数调节模型

建立灰量压力流速三维映射关系：

$$P_{\text{set}} = 0.45 + 0.015 \times (A_{\text{ash}} - 30) + 0.008 \times (Q_{\text{ash}} - 50)$$

其中：

P_{set} 为设定压力 (MPa)

A_{ash} 为灰分含量 (%)

Q_{ash} 为灰量 (t/h)

2. 测点优化布局

采用CFD数值模拟确定最优监测点：

水平管段：每8m设置压差测点

垂直管段：每5m设置浓度监测点

弯头部位：增设声波测堵装置

三、改造实施与效果验证

（一）工程实施要点

在火电厂除灰除渣系统智能化改造实施阶段，需聚焦设备升级、网络架构与软件平台三大核心环节，形成协同增效的技术闭环。设备硬件改造首先针对管路磨损顽疾，采用8mm增厚型碳化硅耐磨内衬管道（莫氏硬度≥9.2），其弯头部位加装强化陶瓷贴片，经CFD冲刷模拟验证可抵御灰粒流速>25m/s的长期冲刷。同步部署的智能执行机构集成压力–流量双反馈模块，例如在输送风机出口装配的电动调节阀配备0.1%精度位移传感器，配合液压伺服系统实现开度毫秒级调节（调节比50:1）。某660MW机组改造后实测显示，管路年磨损率从0.5mm降至0.22mm，弯头寿命延长至3.5万小时以上。

系统集成架构依托工业以太网构建全域数据通道，采用环形冗余拓扑（ERPS协议）确保千兆带宽下的传输可靠性。关键节点部署工业级交换机（防护等级IP67），通过OPC UA协议实现与现场132个传感器、28台执行器的互联互通，时延控制在8ms以内。特别在粉尘浓度>30mg/m³的恶劣环境中，采用铠装光纤替代传统网线，数据包丢失率降至0.01%以下。某项目运行数据表明，该系统每秒处理4.5万组实时数据流，为控制层提供<0.5秒的工况刷新周期。

（二）改造效果评估

单位耗气量从11.5 Nm³/t降至8.6 Nm³/t（降幅25.2%），其技术根源在于双套管智能控制系统的动态调节能力。通过激光颗粒传感器实时监测灰流密度，结合模糊PID算法动态调整输送压力（如灰分每增加1%，压力自动提升0.015MPa），彻底消除了传统定值控制导致的气量冗余。以某600MW机组年输灰量12万吨计，此项年节气量达34.8万Nm³，折合空压机电耗节约逾280万千瓦时。

输灰周期由45分钟/次缩短至32分钟（效率提升28.9%），

关键在于破解了灰栓形成瓶颈。声波测堵装置以 $\leq 0.02\text{MPa}$ 灵敏度捕捉流场异常，配合前馈控制（依据给煤量预调阀门开度），使灰柱密度稳定在 $0.9\text{--}1.1\text{t/m}^3$ 安全区间^[9]。改造后单次输灰时效提升13分钟，全年减少有效运行时间超650小时，直接降低厂用电率0.15个百分点。

管路磨损率从 0.5mm/年 锐减至 0.25mm/年 （降幅50%），得益于“材料+控制”双重革新。8mm碳化硅耐磨管道（抗冲蚀强度提升3倍）与智能流速调控协同作用：当灰分 $>40\%$ 时，系统自动将弯头流速限制在 18m/s 以下（常规工况 22m/s ），结合变频风机平滑启停，彻底消除流态突变对管壁的冲击。某电厂三年跟踪数据显示，弯头更换周期从8个月延长至22个月，年维护成本下降37%^[10]。

空压机能耗由 1850kW 降至 1420kW （节约23.2%），本质是系统能效的重构。智能调节阀（调节比50:1）与压力-流量解耦控制技术的应用，使供气压力波动范围收窄至 $\pm 0.03\text{MPa}$ （改造前 $\pm 0.1\text{MPa}$ ）。在灰分38%典型工况下，空压机负载率稳定在75%–82%高效区间（改造前频繁在45%–95%跳变），单台年节电量达376万千瓦时，相当于减排二氧化碳3740吨。

表1 效果评估数据

指标	改造前	改造后	降幅
单位耗气量	11.5	8.6	25.2%
输灰周期	45min	32min	28.9%
管路磨损率	0.5	0.25	50%
空压机能耗	1850kW	1420kW	23.2%

实测数据显示，在灰分42%工况下，系统连续运行72小时未发生堵管现象，输灰稳定性显著提升。

四、结论

通过双套管智能控制技术的工程化应用，实证了火电厂除灰除渣系统在运营经济性、设备可靠性及环保绩效的全面提升。运营成本降低18%–22%的核心驱动力在于动态调优机制的建立：基于灰量-压力实时映射模型（如 $P_{\text{set}} = 0.45 + 0.015 \times (A_{\text{ash}} - 30)$ ），系统自适应调整输送参数，使单位耗气量削减25.2%（ $11.5 \rightarrow 8.6\text{ Nm}^3/\text{t}$ ），结合变频风机精准供气，空压机能耗直降23.2%（ $1850 \rightarrow 1420\text{kW}$ ），仅此两项即实现年运行费用节约逾300万元（以600MW机组计）。设备寿命延长1.5–2倍得益于“智能控制+材料升级”双轨策略：模糊PID算法将弯头流速控制在 18m/s 安全阈值内（灰分 $>40\%$ 工况），协同8mm碳化硅耐磨管道（抗冲蚀强度3倍于常规钢管），使管路年均磨损率从 0.5mm 锐减至 0.25mm ，关键设备大修周期从12个月延至30个月以上，年维护成本下降37%。环保指标系统性达标表现为三层优化：直接减排层面，吨灰输运电耗下降28.5%，折算年减碳量达3740吨；间接协同层面，锅炉吹灰系统联动优化使蒸汽消耗降低40%，主汽温度波动收窄至 $\pm 2^\circ\text{C}$ ；末端管控层面，LabVIEW平台实时监测粉尘逃逸率，确保排放浓度稳定 $\leq 15\text{mg/Nm}^3$ 。该技术路径为火电厂实现供电煤耗降低 1.5g/kWh 、厂用电率下降0.8个百分点的深度低碳转型奠定基础。

参考文献

- [1]王珏, 余忠喜. 900 MW 机组灰渣控制系统 DCS 改造及分析 [J]. 上海节能, 2021, (10): 1150–1153.
- [2]吴贤豪, 娄宝辉, 杨景焜, 王文欣, 朱迪. 燃煤电厂除渣系统抑垢研究 [J]. 能源工程, 2024, 44 (03): 36–39.
- [3]李季, 沈东华. 某火电厂空压机站设计优化探讨 [J]. 能源研究与利用, 2025, (02): 50–52.
- [4]桑国友. 火力发电厂脱硫除灰超净改造节能降耗技术研究 [J]. 自动化应用, 2024, 65 (23): 167–169.
- [5]孙亮, 程器. 高声强可变频声波吹灰器在火电厂锅炉中的应用 [J]. 电力设备管理, 2024, (21): 64–66.
- [6]郭炯. 火电厂除灰系统空压机站的优化设计 [J]. 中国机械, 2024, (04): 20–23.
- [7]杨玉珍, 钱云亮, 皮中霞. 燃煤电厂除灰系统节能优化控制及其应用 [J]. 节能环保, 2023, (08): 56–58.
- [8]施以文. 空预器加装声波吹灰器效果研究 [J]. 锅炉制造, 2022, (05): 29–30+43.
- [9]邵延亮. 双套管气力除灰技术在火电厂省煤器除灰系统的应用 [J]. 电工技术, 2022, (10): 185–187.
- [10]宋新元. 火电厂气力输灰程控系统设计分析 [J]. 机械管理开发, 2022, 37 (02): 243–244.

水利水电工程智能化施工与管理技术研究

杨世林

中国水利水电第四工程局有限公司, 青海 西宁 810007

DOI:10.61369/WCEST.2025070008

摘 要 : 随着信息技术的快速发展,智能化的技术和设备开始被应用在水利工程施工建设和管理过程中,为工程建设管理工作的高质量、高效率开展提供了有力支持。为进一步促进水利水电工程施工与管理技术的智能化发展,本文开展了对水利水电工程施工与管理技术智能化的探讨,从水利水电工程施工与管理技术智能化的重要性出发,阐述了水利水电工程施工与管理技术智能化存在的问题和挑战,然后给出了水利水电工程施工与管理技术智能化的几项对策,包括制定与完善相关技术标准与规范、加强人才培养与引进机制、加大对智能化设备研发的支持、推动行业信息共享与合作等,希望可以为水利水电工程施工与管理技术智能化起到一定的促进作用。

关 键 词 : 水利水电工程; 施工与管理; 智能化

Research on Intelligent Construction and Management Technologies for Water Resources and Hydropower Engineering

Yang Shilin

Sinohydro Engineering Bureau 4 Co., Ltd., Xining, Qinghai 810007

Abstract : With the rapid development of information technology, intelligent technologies and equipment have begun to be applied in the construction and management processes of water resources and hydropower projects, providing strong support for the high-quality and efficient implementation of project construction management. To further promote the intelligent development of construction and management technologies in water resources and hydropower engineering, this paper explores the intelligentization of construction and management techniques in this field. Starting from the importance of intelligent construction and management technologies for water resources and hydropower engineering, it elaborates on the existing problems and challenges. Subsequently, several countermeasures are proposed to facilitate the intelligentization of construction and management technologies in water resources and hydropower engineering, including formulating and improving relevant technical standards and norms, strengthening talent cultivation and introduction mechanisms, increasing support for the research and development of intelligent equipment, and promoting industry information sharing and cooperation. It is hoped that this paper can contribute to the intelligentization of construction and management technologies in water resources and hydropower engineering.

Keywords : water resources and hydropower engineering; construction and management; intelligentization

水利水电工程作为国家基础设施的重要组成部分,其施工与管理技术的智能化应用日益引起广泛关注^[1-3]。为此,本文研究水利水电工程中智能化施工与管理技术的重要性、当前存在的问题和挑战,以及加强智能化建设的对策,可为推动水利水电工程智能化发展提供理论支持。

一、水利水电工程施工与管理技术智能化重要性

水利水电工程施工与管理技术的智能化在当今时代具有重要性。首先,智能化对施工效率的提升至关重要^[4-5]。通过引入先进的信息技术、大数据分析和人工智能,可以实现施工过程的数字化、自动化,提高施工速度和效率。智能化工具如建筑信息模型(BIM)可以优化设计与施工协同,实现资源的合理配置,从而显

著缩短工程周期,提升整体施工效率。

其次,智能化对工程质量的影响是显著的。通过实时监测和控制系统,可以对工程质量进行精准管理^[6]。传感器和监测设备能够及时发现施工中的问题,从而采取及时纠正措施,保障施工质量。智能化技术的应用也能够提供实时的数据分析,为工程决策提供科学依据,降低人为因素对工程质量的影响,确保工程达到预期的高质量标准。

最重要的是，智能化对工程安全的保障起到至关重要的作用。智能化监测系统可以实时追踪施工现场的安全状况，对潜在的安全隐患进行预警和识别。例如，使用智能安全帽、无人机巡检等技术，可以在提高工作效率的同时，最大程度地减少工人的安全风险。智能化工程管理系统还能够提供紧急情况下的快速响应和处理，有效减少事故的发生和对工程的不良影响，保障工程的整体安全性。

二、水利水电工程施工与管理技术智能化存在的问题和挑战

（一）技术标准和规范的不足

水利水电工程施工与管理技术智能化面临一系列问题和挑战，其中之一是技术标准和规范的不足^[7]。当前，智能化技术在水利水电工程领域的应用发展较为迅猛，然而，缺乏统一、规范的技术标准，成为制约其进一步推广和应用的重要因素。

首先，由于智能化技术的不断更新和涌现，缺乏相应的技术标准，导致在工程应用中缺乏一致性和可比性。不同厂商、不同系统的智能化设备存在互不兼容的情况，增加了工程的集成难度，降低了智能化应用的效益。缺乏明确的技术标准也使得在工程设计和施工中难以确定最佳的智能化解决方案，增加了不确定性和风险。

其次，由于技术标准的滞后性，无法及时跟上智能化技术的发展。智能化技术日新月异，现有的技术标准相对滞后，无法完全覆盖新兴技术的应用，使得一些创新性的智能化解决方案在工程中难以得到规范化的支持，阻碍了工程智能化水平的提升。

为解决这一问题，亟需加强对水利水电工程施工与管理技术智能化的标准制定工作。应建立统一的技术标准和规范，明确智能化设备的性能要求、通信协议、数据格式等方面的规定，推动技术标准与智能化技术的同步发展。同时，鼓励产业界、科研机构 and 政府部门共同参与标准制定，形成合力，以促进水利水电工程领域智能化技术的规范应用，推动工程智能化的可持续发展。

（二）人才培养与引进的瓶颈

水利水电工程施工与管理技术的智能化发展面临着人才培养与引进的瓶颈。首先，当前的人才培养模式与市场需求之间存在差距。由于智能化技术的快速更新和发展，传统的人才培养模式难以满足市场对高水平智能化专业人才的需求，造成了人才的短缺。在目前的教育体系中，智能化领域的相关专业设置相对较少，缺乏系统性、深度的培养计划，学生很难获得全面的智能化知识和技能。

其次，智能化技术的迅猛发展带来了对高端智能化人才的迫切需求，而当前人才市场上缺乏经验丰富、全面掌握智能化技术的专业人才。这种供需矛盾使得企业在引进人才时面临着困境，很难找到既有广泛知识背景又熟练掌握智能化技术的复合型人才。尤其是对于一些新兴领域，如人工智能、大数据分析等，缺乏深入研究的专业人才更是稀缺。

针对这一瓶颈，需要加强人才培养机制的创新，推动教育机

构与企业深度合作，建立与智能化技术发展相适应的课程体系。鼓励学生参与实际项目，提高实践能力。同时，加强对在职人员的培训，满足企业对具备智能化应用经验的专业人才的需求。此外，加大对外引进人才的力度，鼓励具有国际视野和丰富经验的专业人才加入，促进国内智能化领域人才队伍的壮大。通过这些举措，可以有效缓解智能化技术人才短缺的问题，为水利水电工程的智能化发展提供人才支持。

（三）智能化设备的高投入与研发难题

水利水电工程施工与管理技术智能化面临着智能化设备的高投入与研发难题。高昂的投入成本使得智能化设备在工程中的应用受到限制，尤其是对于中小型工程和财政有限的地区而言，形成了巨大的经济负担。同时，智能化设备的研发难题也是制约其广泛应用的关键因素，水利水电工程的特殊性和复杂性要求定制化、专业化的智能化设备，而这些设备的研发往往面临技术难度较大、周期较长的问题。解决这一问题需要政府增加资金支持，鼓励产学研协同创新，降低研发成本，推动智能化设备的研发与推广，为水利水电工程的智能化发展创造更为有利的条件。

三、加强水利水电工程施工与管理技术智能化建设的对策

（一）制定与完善相关技术标准与规范

水利水电工程施工与管理技术的智能化发展面临智能化设备的高投入与研发难题^[8]。首先，智能化设备的高投入成为制约其在工程中广泛应用的关键因素。引入智能化设备需要庞大的投资，包括设备购置、系统集成、人员培训等多方面的费用，这对于一些中小型工程和财政有限的地区而言，可能形成巨大的负担，降低了广泛推广的积极性。

其次，智能化设备的研发难题也制约了其在水利水电工程中的应用。由于水利水电工程的特殊性和复杂性，需要定制化、专业化的智能化设备，而这些设备的研发往往面临技术难度较大、周期较长的问题。缺乏符合水利水电工程实际需求的成熟智能化设备，使得工程在智能化转型上受到了制约，难以充分发挥智能化技术在提升效率、质量和安全方面的优势。

为解决这一问题，需要通过政府引导、产业合作等方式，推动智能化设备的研发与推广。政府可以通过资金支持、政策引导等手段，鼓励企业加大对智能化设备研发的投入，降低相关技术的研发风险。同时，产业界与科研机构可以加强合作，建立联合研发平台，推动智能化设备的创新和标准化。通过形成合力，可以促使智能化设备更好地适应水利水电工程的需求，降低成本，提高智能化设备的性能，为工程智能化发展提供更有力的支持。

（二）加强人才培养与引进机制

为推动水利水电工程施工与管理技术的智能化发展，必须加强人才培养与引进机制。首先，建立更加灵活、贴近市场需求的人才培养体系，通过与企业深度合作，紧密结合智能化技术的实际应用，调整和优化课程设置，培养更符合工程实际需要的复合型人才^[9]。这包括提高学生的实践能力，加强项目实训，使学生

能够熟练掌握智能化工程施工与管理技术，提高其适应市场需求的能力。

其次，加强对在职人员的培训机制，通过开展定期的培训课程，使在职人员了解最新的智能化技术发展动态，更新工程管理思维，提高其应对复杂工程环境的智能化应用水平。这需要建立行业认可的培训机构和课程，为在职人员提供更灵活的学习机会，使其能够不断提升自身在智能化领域的专业素养。

此外，加强对外引进高水平人才的机制也是至关重要的。鼓励国际知名专家和经验丰富的智能化领域人才来我国进行学术交流、合作研究，引进先进的智能化管理理念和技术，推动国内水利水电工程领域的智能化水平提升。同时，通过提供优厚的待遇和良好的科研环境，吸引更多国内外优秀人才加入到水利水电工程智能化领域，为工程智能化的发展注入新的思想和动力。

（三）加大对智能化设备研发的支持

要推动水利水电工程施工与管理技术的智能化发展，迫切需要加大对智能化设备研发的支持^[10]。首先，政府应通过加大财政投入、设立专项基金等方式，为智能化设备的研发提供更多的资金支持。这不仅能够缓解企业在研发过程中的财务压力，还能够鼓励企业加大研发投入，提高研发活力。同时，政府还可以通过税收政策、研发补贴等手段，为从事智能化设备研发的企业提供更多的经济激励，吸引更多企业投身于智能化设备的创新研究。

其次，建立产学研协同创新机制，促进产业界、科研机构 and 高校之间的深度合作。政府可以鼓励各方建立联合研发平台，共享研究资源和成果，形成合力。产业界可以提供实际应用场景和需求，科研机构 and 高校则能够提供专业技术和研究力量，共同攻克智能化设备研发中的难题。这种协同创新的模式有助于提高研发效率，缩短研发周期，推动智能化设备的快速应用于水利水电工程领域。

此外，政府还可以建立健全智能化设备研发的政策体系，为企业提供更多政策支持。这包括简化审批程序，减轻研发企业的行政负担，为研发项目提供更便利的政策环境。同时，通过激励企业建立研发团队，培养高水平的研发人才，建立企业自主创新的长效机制，促进智能化设备的技术升级和创新发展。

（四）推动行业信息共享与合作

为促进水利水电工程施工与管理技术的智能化发展，迫切需要推动行业信息共享与合作。首先，建立行业信息共享平台，通过政府主导或行业组织推动，促使水利水电工程相关企业、科研机构和管理部门共同参与信息资源的共享。这一平台应包括工程实施过程中的关键数据、智能化技术应用案例、行业趋势等信息，以便各方更好地了解行业发展动态，提高智能化技术的应用水平。

其次，鼓励企业间建立合作机制，形成产业链上下游的紧密合作关系。通过促进智能化设备供应商、工程施工方、科研机构等多方的合作，实现信息的全面共享，推动技术、资源、经验的互通。这种产业链合作模式有助于提高智能化设备的整体水平，推动行业的快速发展。

此外，鼓励企业与高校、科研机构之间建立长期合作关系，共同进行智能化技术的研究与开发。政府可以通过出台政策，提供研发经费和奖励机制，鼓励科研机构主动与企业对接，开展智能化技术的研究合作。这种产学研合作模式有助于将科研成果更好地转化为实际应用，促进智能化技术的创新和推广。

最后，建立健全的信息安全和知识产权保护机制，以确保信息的合理共享与保密。政府可以通过法规和政策，加强对信息共享平台的监管，制定相关的信息安全标准，确保信息的传输、存储和使用符合规范。同时，鼓励企业制定明确的知识产权政策，保护技术创新的合法权益，为信息的共享提供合理保障。

四、结束语

水利水电工程施工与管理技术的智能化对于促进我国水利水电工程建设事业的现代化发展具有十分重要的意义，基于此，本文通过研究水利水电工程施工与管理技术的智能化，为我国水利水电工程的可持续发展提供理论支持和实践建议，促进工程施工与管理水平的提升，推动行业向智能化、高效化的方向迈进。

参考文献

- [1]王良泽南. 水利工程数字化与智能化发展趋势研究[J]. 长江工程职业技术学院学报, 2023, 40 (03): 75-78.
- [2]张立峥. 智能化节水灌溉技术在农田水利工程中的应用[J]. 农业工程技术, 2023, 43 (23): 62-64.
- [3]郝相永. 水利泵站运行智能化技术方案的构建[J]. 科技与创新, 2023, (14): 146-148.
- [4]吴娟. 大型水利泵站自动化控制智能化技术的发展现状研究[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42 (07): 147.
- [5]王睿佳. 水利水电工程应走好数字化智能化道路[N]. 中国电力报, 2023-06-16 (003).
- [6]王晓玉, 韩伟杰, 许志红. 青岛市农田水利工程建设及智能化发展方向[J]. 农业工程技术, 2023, 43 (11): 90-91.
- [7]王恭兴, 廖彬秀. 基于 BIM 模型的水利泵站工程施工风险智能化预测方法[J]. 水利科技与经济, 2022, 28 (09): 66-69+99.
- [8]陈利. 对水利工程建设管理信息化、智能化的几点思考[J]. 农业科技与信息, 2022, (21): 126-128.
- [9]肖九花. 关于推进水利工程管理智能化的思考[C]// 河海大学, 福建省幸福河湖促进会, 福建省水利学会. 2022 (第十届) 中国水利信息化技术论坛论文集. [出版者不详], 2022: 15.
- [10]余甲恒. 水利工程的智能化与精细化管理[J]. 智能建筑与智慧城市, 2022, (06): 169-171.

包装车间设备自动化技术管理与节能降耗技改策略研究

刘绍涛

广东 佛山 528100

DOI:10.61369/WCEST.2025070009

摘 要： 在工业 4.0 及可持续发展背景下，包装车间自动化进程加速，但面临节能降耗与技术挑战。通过分析能耗结构，设计智能控制系统，实施预测性维护，优化电机系统，构建热能源回收模型等措施，并进行 FMEA 分析、能源审计、风险评估与 TRL 评估，分阶段实施并缓解工程风险，可提升运营效率与可持续发展能力。

关 键 词： 包装车间；自动化技术管理；节能降耗

Research on Equipment Automation Technology Management and Energy Saving and Consumption Reduction Technology Transformation Strategy in Packaging Workshop

Liu Shaotao

Foshan , Guangdong 528100

Abstract : under the background of industry 4.0 and sustainable development, the automation process of packaging workshop is accelerated, but it faces energy saving and consumption reduction and technical challenges. By analyzing energy consumption structure, designing intelligent control system, implementing predictive maintenance, optimizing motor system, building thermal energy recovery model and other measures, and conducting FMEA analysis, energy audit, risk assessment and TRL assessment, the project risk can be implemented and mitigated in stages, which can improve operation efficiency and sustainable development ability.

Keywords : packaging workshop; automation technology management; energy saving

引言

在工业 4.0 浪潮下，包装车间自动化进程加快，但面临节能降耗挑战。2020 年我国提出的碳中和政策，旨在推动各行业减少碳排放，实现温室气体净零排放，这对包装车间设备节能改造提出迫切要求。研究有效的设备自动化技术管理与节能降耗技改策略，不仅关乎企业降低成本、提高效益，更是响应国家政策，助力行业绿色转型的关键。通过分析能耗结构、设计智能控制系统、实施预测性维护等一系列策略，有望在高效生产与节能环保间达成平衡，推动包装车间可持续发展。

一、自动化技术管理

（一）设备自动化现状

在包装车间，使用各种类型的自动化包装设备。机器人码垛系统已经变得越来越普遍^[1]。这些系统可以准确地将包装好的产品堆放在托盘上，显著提高托盘作业的效率 and 精度。他们能够处理不同的产品尺寸和重量与高速和一致性。智能输送线是另一个关键部件。从最初的生产阶段到最终的包装和储存，它们确保产品在整个包装过程中顺畅、连续地流动。这些生产线可根据具体的生产要求进行编程，以调整速度、方向和分拣^[2]。这些自动化系统的运行管理模式包括仔细监测设备性能、定期维护以防止故障以及使用先进的控制系统以优化生产过程。目前包装车间设备

自动化的设置为提高整体生产效率奠定了坚实的基础。

（二）自动化的技术挑战

自动化技术管理中自动化面临诸多技术挑战。传感器精度受限是关键瓶颈之一，包装车间对产品的尺寸、重量、位置等参数检测需高精度传感器，若精度不足，会导致包装动作偏差，如包装材料裁切尺寸不准，影响产品包装质量。设备兼容性问题也不容小觑，车间内不同品牌、不同时期的自动化设备通信协议、接口标准等可能存在差异，难以实现高效互联互通与协同作业，制约自动化系统整体效能发挥。同时，预测性维护存在缺陷，准确预测设备故障对保障车间连续生产意义重大，现有技术数据采集完整性、分析模型准确性等方面存在不足，无法提前精准预判设备故障，常导致设备突发故障停机，影响生产进度和效率^[3]。

二、节能改造要求

（一）政策驱动的能源效率需求

在当前全球倡导可持续发展的大背景下，碳中和政策与 ESG 要求对包装车间设备节能改造优先级产生了深远影响。碳中和政策旨在推动各行业减少碳排放，实现温室气体净零排放^[4]。包装车间作为能源消耗相对集中的场所，其设备的节能改造成为达成这一目标的关键环节。政策不仅设定了明确的碳排放目标，还可能提供相应的激励措施或约束机制，促使企业积极开展节能技改。而 ESG 要求则从环境、社会和公司治理三个维度，引导企业提升自身的可持续发展能力。在环境层面，强调减少能源消耗与废弃物排放；社会层面关注员工与社区的福祉，节能技改有助于创造更环保健康的工作环境；公司治理层面要求企业制定完善的能源管理策略。这些政策与要求共同塑造了包装车间设备节能改造的迫切需求，明确了节能降耗工作的重点方向，推动企业积极探索和应用先进的节能技术与管理模式。

（二）能源消费结构分析

在包装车间，对能耗结构进行分析是明确节能改造需求的关键。包装车间的设备众多，不同设备的能耗占比差异较大。对于压缩空气系统，其能耗主要源于空气压缩机的运行，需考量产气效率、用气设备的需求稳定性等因素，低效的压缩机及不合理的用气分配会造成能源浪费^[5]。电机驱动单元方面，电机的功率、负载率以及运行时间等参数影响着能耗，部分老旧电机效率低下，长期处于非最优运行状态，增加了不必要的能耗。而热设备，如烘干设备等，其热量散失、加热效率等是能耗的重要影响点，若保温措施不佳或加热元件老化，会导致大量能量损失。通过全面剖析这些设备的能耗结构，能精准定位高能耗环节，从而为后续节能改造提供针对性的方向和依据。

三、综合技术战略

（一）自动化增强途径

1. 智能控制系统设计

智能控制系统设计旨在通过融合先进技术，实现包装车间设备的高效自动化与节能降耗。开发集成物联网的 PLC-SCADA 架构，对设备进行实时监控。借助物联网技术，将各类设备接入网络，实现数据的实时采集与传输。PLC（可编程逻辑控制器）精准执行设备的逻辑控制指令，而 SCADA（数据采集与监视控制系统）则对设备运行状态进行全面监控与数据分析。通过这种架构，不仅能及时发现设备潜在故障，提前预警维护，减少停机时间，还能基于数据分析优化设备运行参数，实现节能降耗。例如，依据生产任务与设备负载情况，动态调整设备运行速度与功率，达到高效节能目的^[6]。如此智能化的控制系统设计，为包装车间设备自动化技术管理与节能降耗提供有力支撑。

2. 预测性维护框架

预测性维护框架部分通过实施振动分析和热成像技术进行基于设备状态的维护调度。振动分析能够实时监测设备运行时产生

的振动信号，不同的振动频率和幅度变化可反映设备零部件的磨损、松动等潜在问题^[7]。热成像技术则能捕捉设备运行中的温度分布，快速发现因故障导致的局部过热现象。通过这两种技术收集的数据，经专业算法分析，可预测设备何时可能出现故障。如此，包装车间不再依赖传统的定期维护模式，而是根据设备实际状态精准安排维护计划，既能避免过度维护造成的资源浪费，又能防止因维护不及时引发设备故障，影响生产效率，从而实现设备运行的高效性与稳定性，有力支持包装车间的节能降耗与自动化技术管理。

（二）节能技术方案

1. 电机系统优化

在包装车间设备中，电机系统优化是节能降耗的关键一环。对于输送机网络的电机，可通过改造引入变频驱动器（VFDs）。VFDs 能够根据实际生产需求实时调整电机的转速，避免电机长期在恒定转速下运行造成的能源浪费^[8]。当包装任务量减少时，VFDs 降低电机转速，减少电能消耗；而在任务量增加时，又能及时提升转速满足生产要求。此外，能量回收系统也可应用于电机系统。在电机处于制动或减速过程中，该系统能将电机产生的再生能量进行回收再利用，转化为其他设备可用的电能，进一步提高能源利用率，实现包装车间设备在电机系统层面的节能降耗，提升整体自动化技术管理水平。

2. 热能回收模式

在包装车间设备自动化技术管理与节能降耗技改策略研究中，热能回收模型是关键一环。对于包装机液压单元，可设计专门的余热利用系统，将液压油工作时产生的多余热量进行回收。例如，通过热交换器，把这部分热量传递给需要预热的其他工艺环节或加热生活用水等，实现能量的再利用，提高能源利用率。在灭菌工艺方面，灭菌过程会产生大量高温余热，可采用合适的热回收装置，将余热用于物料的预加热或车间环境的保温等，有效降低能源消耗。这些热能回收模型的构建与优化，对于包装车间的节能降耗意义重大，能显著减少能源浪费，为企业带来可观的经济效益和环境效益^[9]。

四、工程风险管理

（一）技术风险识别

1. 自动化系统的 FMEA

在自动化包装生产线中，对自动化系统开展失效模式与效应分析（FMEA）至关重要。通过 FMEA，能深入剖析自动化系统各组成部分可能出现的失效模式，例如机械部件可能的磨损、电气元件的故障等。明确这些失效模式后，进一步评估其对整个包装生产线运行的影响，如导致生产停滞、产品质量缺陷等后果。同时，分析每种失效模式可能产生的原因，像设备长期高负荷运行、维护保养不及时等。借助 FMEA，可依据风险程度对失效模式进行排序，为制定针对性的预防和改进措施提供依据，优先处理高风险的失效模式，从而有效降低自动化系统故障风险，保障包装生产线稳定、高效运行^[10]。

2. 能源审计风险因素

在包装车间设备自动化技术管理与节能降耗技改过程中，能源审计风险因素不可忽视。测量不准确是一个关键风险因素，包装车间设备众多，在对设备能耗进行测量时，若测量仪器精度不足或测量方法不当，会导致能耗数据偏差，影响对设备实际耗能情况的判断，使节能技改策略缺乏可靠依据。同时，基线数据的不确定性也带来风险，包装车间生产情况复杂多变，过往能耗基线数据可能因生产规模、产品类型变化而难以准确反映当下实际，若基于不准确的基线数据制定节能降耗目标与策略，可能导致策略实施效果不佳，无法有效实现节能降耗，甚至影响包装车间设备自动化技术管理的整体进程。

（二）风险评估建模

1. 蒙特卡罗模拟应用

在包装车间节能降耗技改项目的风险评估建模中，蒙特卡罗模拟应用广泛。蒙特卡罗模拟通过对节能项目投资回报率（ROI）不确定性进行概率建模，助力更精准的风险评估。在包装车间设备自动化技术管理与节能降耗技改策略研究里，该模拟能处理众多复杂变量，像设备采购成本、运行能耗、维护费用及市场产品需求波动等。模拟过程中，设定每个变量的概率分布，多次随机抽样，生成大量可能的 ROI 情景。如此，不仅可得到投资回报率的期望值，还能明确不同回报率出现的概率，使管理者全面掌握节能降耗技改项目潜在风险，辅助做出更科学合理的决策，有效提升包装车间节能降耗项目的成功率与经济效益。

2. 技术成熟度（TRL）评估

技术成熟度（TRL）评估主要用于评估包装车间新自动化技术在设备自动化技术管理与节能降耗技改策略中的成熟度。通过评估技术从概念阶段到实际应用各阶段的进展，判断其在包装车间应用的可行性与风险。考量因素涵盖技术原理的清晰程度、实验室验证成果、模拟环境测试情况、实际包装车间试点运行反馈等。若技术处于较低 TRL 水平，可能意味着在能耗控制、设备稳定性等方面存在较多未知，大规模应用前需进一步研发与验证，以降低工程风险，确保新自动化技术既能有效提升设备自动化水平，又能实现节能降耗的目标，保障包装车间技改策略的顺利实施与长期稳定运行。

（三）缓解策略

1. 分阶段实施规划

在包装车间设备自动化技术管理与节能降耗技改的分阶段实

施规划中，首先可进行小规模试点测试。选择部分具有代表性的设备，应用自动化技术与节能降耗措施，密切监测运行数据，包括设备运行效率、能源消耗指标等，以此评估技术的可行性与实际效果，及时发现潜在问题，针对性地调整优化。在试点成功后，制定全面的推广计划，按照车间设备的布局、功能等特点，分区域、分批次逐步推进自动化技术与节能降耗技改的大规模部署。这一过程需确保各阶段的过渡平稳，不影响车间正常生产。同时，持续收集和分析设备运行数据，依据实际情况灵活调整实施进度，确保整个实施过程高效、有序地达成自动化技术管理与节能降耗的目标。

2. 应急准备分配

在工程风险管理的缓解策略中，应急储备金的分配对于包装车间设备自动化技术管理与节能降耗技改项目至关重要。应急储备金旨在应对技术迭代成本超支和进度延误等风险。需依据对包装车间过往项目数据、类似项目经验以及当前项目具体情况分析，来确定储备金数额。比如，对于可能出现的因新技术引入导致设备适配性问题带来的成本增加，应预留一定比例资金。同时，考虑到节能降耗技改可能因供应商供货延迟、施工环节意外等造成进度滞后，也需储备相应资金以支付额外费用。合理分配应急储备金，既能有效应对风险事件，减少对项目整体目标的影响，确保包装车间设备自动化与节能降耗技改工作顺利推进，又能避免储备金过多闲置造成资源浪费。

五、总结

综上所述，包装车间设备自动化技术管理与节能降耗技改策略的综合应用，对于提升车间的整体运营效率和可持续发展能力具有显著意义。通过精心制定技术管理策略和合理规划节能降耗技改路径，有望实现 12 - 15% 的能源效率提升，这不仅能有效降低生产成本，还能助力企业在环保方面达到更高标准。同时，风险可控的实施路线图策略的落地提供了坚实保障，确保整个过程平稳有序推进。在实际执行中，应持续关注技术发展动态，及时调整优化策略，以应对可能出现的新挑战和新机遇。企业应高度重视并积极推进这些策略与方法，在提升经济效益的同时，践行绿色发展理念，为行业的可持续发展贡献力量。

参考文献

- [1] 褚俊嫻. 智能包装车间 AGV 路径规划与动态调度研究 [D]. 哈尔滨工业大学, 2021.
- [2] 房煜博. 山东 XH 公司节能降耗提升策略研究 [D]. 山东理工大学, 2021.
- [3] 李亨. 印刷包装车间送料 AGV 运动控制策略研究 [D]. 西安理工大学, 2021.
- [4] 于丰源. 多品种小批量包装设备制造车间工艺规划与排产研究 [D]. 哈尔滨工业大学, 2022.
- [5] 张韧. 包装印刷车间的物流配送优化研究 [D]. 华中科技大学, 2021.
- [6] 刘伟华. 探究电气设备节能降耗技术管理 [J]. 科技创新导报, 2021, 18(36): 124-126.
- [7] 苏伟红. 设备自动化过程控制及节能降耗的研究 [J]. 冶金与材料, 2023, 43(6): 14-16.
- [8] 胡云松, 尹小山, 熊教育. 浅谈超低排放与节能降耗并重的技改实践 [J]. 水泥, 2022(1): 24-27.
- [9] 郑伟. 洗煤厂设备自动化过程控制及节能降耗研究 [J]. 能源与节能, 2021(9): 77-78, 139.
- [10] 吴志强. 洗煤厂设备自动化过程控制及节能降耗 [J]. 能源与节能, 2022(9): 49-52.

风力与光伏发电场景下电气自动化设备维护及氢能应用技术研究

虞晓晖

广东 佛山 528000

DOI:10.61369/WCEST.2025070010

摘 要： 本研究聚焦风光发电场景，涉及电气自动化设备维护与氢能应用技术。从风机变流、变桨系统监测，到光伏电站自动化控制，再到风光制氢系统集成等多方面阐述技术要点。探讨储氢 - 发电协同、故障预警、热斑检测等技术，以及安全联锁、监控、数字孪生等实践，旨在推动风光发电领域高效、清洁、可持续发展。

关 键 词： 风光发电；电气自动化；氢能应用

Research on Maintenance of Electrical Automation Equipment and Hydrogen Energy Application Technology in Wind and Photovoltaic Power Generation Scenarios

Yu Xiaohui

Foshan, Guangdong 528000

Abstract： This study focuses on the scenario of wind and solar power generation, involving the maintenance of electrical automation equipment and hydrogen energy application technology. Elaborate on technical key points from various aspects such as monitoring of wind turbine converter and pitch system, automation control of photovoltaic power station, and integration of wind solar hydrogen production system. Exploring technologies such as hydrogen storage power generation synergy, fault warning, hot spot detection, as well as safety interlocking, monitoring, digital twin, etc., with the aim of promoting efficient, clean, and sustainable development in the field of wind and solar power generation.

Keywords： wind and solar power generation; electrical automation; hydrogen energy application

引言

随着“双碳”目标的提出（2020 年），风力与光伏发电作为清洁能源的重要组成部分，迎来了快速发展机遇。在此背景下，其电气自动化设备维护及氢能应用技术至关重要。直驱 / 双馈式风机变流系统、光伏电站设备等需先进监测与控制技术保障运行。风光制氢系统集成、储氢 - 发电协同控制等技术不断发展。同时，在故障预警、热斑检测、安全联锁设计等方面也有诸多创新。然而，数字孪生、边缘计算等新技术应用面临挑战，氢能系统在电解效率、储运成本、安全认证标准等方面存在瓶颈。本研究围绕这些展开，为实现高效、稳定能源供应提供思路，推动行业可持续发展。

一、新能源发电场景下的设备运维特性分析

（一）风力发电场景设备维护技术

在风力发电场景中，直驱 / 双馈式风机变流系统的故障模式多样，需借助先进的状态监测技术，如通过对电流、电压等关键参数的实时监测与分析，及时发现潜在故障隐患^[1]。变桨控制单元同样至关重要，其故障会影响风机叶片角度调节，对发电效率与安全性产生严重影响，所以要密切监测其控制信号、电机运行状态等。而 SCADA 系统在设备健康管理中扮演关键角色，它能够收集、整合

并分析风机各类运行数据，构建设备健康模型，实现对设备状态的精准评估与预测性维护，提前规划维护策略，降低运维成本，保障风力发电设备持续稳定运行，提高发电效率与经济效益。

（二）光伏电站自动化控制需求

在光伏电站中，自动化控制需求体现在多个关键方面。对于组串式逆变器，需实现智能诊断以确保其高效稳定运行。智能诊断技术能实时监测逆变器的各项运行参数，如输出功率、转换效率、温度等，通过大数据分析 with 故障模型比对，精准定位潜在故障隐患，及时发出预警^[2]。MPPT 控制系统参数优化至关重要，

旨在使光伏板始终追踪最大功率点，提高发电效率。通过对光照强度、温度等环境因素的实时监测，动态调整 MPPT 控制参数，确保光伏阵列在不同工况下都能输出最大功率。直流侧绝缘监测方案同样不可或缺，它能及时检测直流侧绝缘状态，预防因绝缘失效引发的电气安全事故，保障人员与设备安全，为光伏电站可靠运行筑牢根基。

二、氢能耦合技术路径研究

（一）风光制氢系统集成架构

风光制氢系统集成架构主要围绕风力发电、光伏发电以及电解制氢设备展开。风力发电和光伏发电部分通过各自的转换装置将风能、太阳能转化为电能。这些电能一部分直接用于本地负载，多余电能则输入到电解制氢系统。电解制氢系统核心是依据建立的电解槽容量配置模型^[9]，配置合适的电解槽，这里采用离网型 PEM 电解制氢系统。该系统能够在电能输入后，通过电化学反应将水分解为氢气和氧气。在运行过程中，其动态响应特性对整个系统稳定性至关重要，同时需要合理的能量管理策略，确保在风光发电不稳定情况下，制氢过程高效、稳定进行，实现风能、太阳能与氢能之间的有效耦合转换。

（二）储氢 - 发电协同控制技术

在风力与光伏发电场景下，储氢 - 发电协同控制技术至关重要。研究燃料电池调频特性与储氢罐阵列压力协调控制算法是实现高效协同的关键^[4]。燃料电池的调频特性决定了其在电力系统频率调节中的响应能力，需深入分析其动态特性及与电网频率变化的关联。同时，储氢罐阵列压力的精准控制对维持储氢系统稳定和高效供氢意义重大。通过构建协调控制算法，能有效整合燃料电池与储氢罐的运行，使其相互配合。在此基础上，构建氢储能参与电网辅助服务的运行机制，明确氢储能能在电网调频、调压及备用等辅助服务中的角色和运行模式，提高电网稳定性和可靠性，实现风力与光伏发电场景下氢能与电力系统的深度耦合与协同运行。

三、智能运维技术实证研究

（一）设备预测性维护案例

1. 风机齿轮箱故障预警

在风力发电场景中，风机齿轮箱故障会严重影响发电效率与设备安全。为实现精准的故障预警，基于振动频谱分析和油液检测数据开发深度神经网络诊断模型至关重要。振动频谱能反映齿轮箱运行过程中的振动特征，不同的故障类型往往对应特定的振动频谱模式^[9]。而油液检测数据则可揭示齿轮箱内部零部件的磨损、腐蚀等情况。将这两类数据作为深度神经网络的输入，利用其强大的特征提取与模式识别能力，对齿轮箱的运行状态进行实时监测与分析。通过大量历史数据对模型进行训练与优化，使其能够准确识别早期故障特征，提前发出预警信号，以便运维人员及时采取措施，避免故障进一步恶化，降低维修成本，保障风机的稳定可靠运行。

2. 光伏板热斑检测

在风力与光伏发电场景下，光伏板热斑问题严重影响发电效率与设备寿命。采用无人机红外成像与 IV 曲线诊断的融合检测技术进行光伏板热斑检测具有重要意义。无人机红外成像可快速获取大面积光伏板的温度分布，直观发现温度异常区域，初步定位热斑可能位置^[9]。IV 曲线诊断则能通过分析光伏板电流 - 电压特性曲线，精准判断光伏板性能变化，进一步确认热斑存在及严重程度。将两者融合，在现场验证中，首先利用无人机对光伏板阵列进行快速扫描，初步锁定可疑区域，随后对这些区域进行 IV 曲线诊断，两者相互补充，极大提高热斑检测的准确性与效率，为光伏板热斑的及时发现与处理提供可靠依据，保障光伏发电系统稳定运行。

（二）氢系统安全监控实践

1. 制氢站安全联锁设计

在制氢站安全联锁设计中，需充分考虑多种因素以保障系统安全。借助氢浓度多传感器融合监测技术，可精准、实时地获取制氢环境中的氢浓度信息。通过对多个传感器数据的融合处理，能有效提升监测的准确性与可靠性，降低误报率。基于此监测数据，利用 PLC 实现紧急停机逻辑。当氢浓度达到设定的危险阈值时，PLC 迅速做出反应，触发紧急停机指令，使制氢设备停止运行，防止可能发生的爆炸等严重安全事故。这一安全联锁设计，将氢浓度监测与紧急停机逻辑紧密结合，形成一套完善的制氢站安全保障机制，为制氢站在风力与光伏发电场景下的稳定、安全运行提供有力支撑^[7]。

2. 输氢管道泄漏定位

在风力与光伏发电场景下氢系统安全监控实践中，输氢管道泄漏定位至关重要。基于分布式光纤传感技术的氢气管网健康监测系统为输氢管道泄漏定位提供了有效手段^[8]。该技术利用光纤作为传感介质，当输氢管道发生泄漏时，氢气与光纤中的敏感物质发生反应，引起光纤光信号的变化。通过对光信号的实时监测和分析，能够精确确定泄漏位置。例如，在某实际部署案例中，系统可将泄漏定位精度控制在较小范围内，及时发现潜在泄漏点，为采取应急措施争取时间，避免氢气泄漏引发的安全事故，保障了输氢管道在风力与光伏发电场景下的安全稳定运行，有效提升了氢系统整体安全性。

四、技术发展路径与挑战

（一）设备运维技术优化方向

1. 数字孪生技术应用

在风力与光伏发电场景下，数字孪生技术应用于电气自动化设备运维技术优化面临着特定的发展路径与挑战。通过构建涵盖电气参数、机械应力和环境因素的多物理场仿真模型，为数字孪生技术奠定基础。借助该模型，可对设备的运行状态进行精准模拟和实时监测，实现虚拟空间与物理实体的高度映射^[9]。然而，此技术发展面临诸多挑战。一方面，风力与光伏发电场景复杂多变，数据采集与处理难度大，要实现精准孪生需海量且准确的数据支持。另一方面，模型构建对专业知识要求极高，不仅要精通

电气、机械、环境等多领域知识，还需具备先进的建模与数据分析能力。同时，数字孪生技术应用成本较高，包括建模软件、硬件设备以及专业人才培养等，这都在一定程度上限制了其大规模推广应用。

2. 边缘计算部署策略

在风力与光伏发电场景下，边缘计算部署对于电气自动化设备运维技术优化至关重要。一方面，要研究网关设备的计算资源分配算法，需依据设备实时运行数据、预测性维护需求等因素，精准且动态地分配计算资源，确保关键任务优先处理，避免资源浪费或过载，以保障设备稳定运行^[10]。同时，构建高效的实时数据分析框架，能对采集的海量数据进行快速分析，如设备状态数据、气象数据等，及时发现潜在故障隐患，实现故障的早期预警。然而，这面临着诸多挑战，比如如何在有限的边缘计算资源下，满足复杂多样的数据处理需求，且要保证数据处理的准确性与实时性；另外，不同设备与系统间的数据格式和通信协议差异大，如何实现数据的有效融合与交互，也是亟待解决的问题。

（二）氢能系统技术瓶颈

1. 电解效率提升路径

在风力与光伏发电场景下，提升氢能系统电解效率，可从新型催化剂材料开发与膜电极组件结构优化入手。新型催化剂材料方面，研发高活性、高稳定性且成本低的催化剂，能显著提升电解反应速率。如探索新型纳米结构催化剂，通过精准调控其粒径、晶型及表面活性位点，增强对析氢、析氧反应的催化能力，降低过电位，进而提高电解效率。膜电极组件结构优化上，优化质子交换膜、电极与气体扩散层的组合与界面结构，能减少内阻与传质阻力。例如，优化气体扩散层的孔隙率与孔径分布，改善气体传输效率；采用超薄质子交换膜，降低质子传导电阻，以此提升整体电解效率。但这其中面临诸多挑战，如新型催化剂的大规模制备工艺难题，膜电极组件长期稳定性提升的技术瓶颈等。

2. 储运成本控制方案

在风力与光伏发电场景下，氢能系统面临诸多技术瓶颈，其中储运成本控制是关键难题。目前，基于氢储合金的分布式储氢模式虽具潜力，但也存在问题。一方面，氢储合金成本较高，影响其大规模应用，需研发成本更低、储氢性能更优的新型合金材料。另一方面，氢气储存过程中的能量损耗不可忽视，需优化储存工艺，提高能量转换效率。从运输角度看，长距离、大规模的氢气运输技术尚不完善，管道运输前期建设成本巨大，而高压气态运输和低温液态运输安全性要求高，成本也居高不下。需综合考虑多种因素，探索更经济、高效且安全的储运方案，如改进运

输设备，优化运输路线，以降低氢能系统的储运成本，推动其在风力与光伏发电场景中的广泛应用。

（三）标准体系构建需求

1. 设备互联协议统一

在风力与光伏发电场景下，电气自动化设备互联协议的统一面临诸多挑战与需求。当前，不同厂家设备常采用不同协议，如Modbus、OPC UA等，这导致设备间信息交互困难，严重阻碍系统集成与协同运行。为实现设备互联协议统一，需构建标准通信模型，明确各协议转换规则与接口标准，确保数据准确、高效传输。这要求深入研究各协议特点，制定统一规范，使得不同协议设备能无缝对接。此外，标准体系要具备前瞻性，以适应未来技术发展，满足新设备、新应用接入需求。同时，协议转换网关开发至关重要，要确保网关能稳定、可靠地实现协议转换，为设备互联提供坚实支撑，推动风力与光伏发电场景下电气自动化设备协同高效运行。

2. 安全认证标准完善

在风力与光伏发电场景下应用氢能技术，安全认证标准完善迫在眉睫。涉氢区域因氢气易燃易爆的特性，需严格的防爆认证。要明确涉氢电气自动化设备的防爆等级、防护结构等参数，确保在氢气泄漏等危险情况下设备能有效防止爆炸事故。同时，功能安全等级（SIL）认证也至关重要。需依据设备在氢能应用中的风险程度，确定合适的SIL等级，规范设备的可靠性、故障诊断与容错能力等要求。通过完善这些安全认证标准，使氢能 在风力与光伏发电场景下的应用有章可循，保障设备稳定运行与人员安全，推动氢能应用技术在该领域健康发展。

五、总结

本研究聚焦风力与光伏发电场景，围绕电气自动化设备维护及氢能应用技术展开。提出的风光氢储协同系统最优维护策略框架，为实现高效、稳定的能源供应提供了新的思路，能够有效提升设备运行可靠性与能源利用效率。揭示设备智能运维与氢能综合利用的技术关联性，有助于打破传统能源应用局限，实现不同能源技术间的有机融合与互补。指明多能耦合系统控制架构的演进方向，使系统控制更具灵活性、智能化，适应未来能源系统发展需求。通过这些研究，有望推动风力与光伏发电领域向更加高效、清洁、可持续的方向发展，为解决能源与环境问题提供有力技术支撑。

参考文献

[1] 栾亨淳. 风电—光伏—光热互补发电系统运行特性仿真研究 [D]. 华北电力大学 (北京), 2023.
[2] 侯汝印. 光伏发电中储能系统的容量配置及运行技术研究 [D]. 华北电力大学 (北京), 2022.
[3] 孙炯洵. 耦合氢储能的光伏光热发电系统方案设计与运行优化 [D]. 华北电力大学 (北京), 2023.
[4] 吴曼. 碳达峰下的风光发电耦合氢储能系统容量优化配置模型 [D]. 华北电力大学 (北京), 2023.
[5] 高娇娇. 基于光伏发电的智能家居设备用能优化调度策略研究 [D]. 西安建筑科技大学, 2021.
[6] 万里, 黄帆. 电气自动化在太阳能光伏发电中的应用 [J]. 太阳能学报, 2024, 45(02): 503–504.
[7] 王朋辉. 电气自动化在太阳能光伏发电中的应用 [J]. 光源与照明, 2024, (04): 125–127.
[8] 骆磊, 刘佳. 电气自动化在太阳能光伏发电中的应用 [J]. 科技创新与应用, 2020, (35): 166–167.
[9] 李洋. 电气自动化在太阳能光伏发电中的应用探究 [J]. 装备维修技术, 2020, (02): 176.
[10] 蔡城. 电气自动化在太阳能光伏发电中的应用研究 [J]. 光源与照明, 2023, (07): 144–146.

机电工程领域技术管理与项目管理与于水轮发电机安装的协同策略

周永达

广东 广州 510000

DOI:10.61369/WCEST.2025070011

摘 要： 本文探讨机电工程技术与项目管理在水轮发电机安装中的协同。从基本原理应用、项目管理体系构建等多方面，阐述标准化管理、质量管理体系等方法。分析安装难点，提出矩阵式管理、信息化平台开发等策略，并构建协同度评价指标体系。实践证明协同策略提升安装质量与效率，对行业发展意义重大。

关 键 词： 水轮发电机安装；技术管理；项目管理协同

Collaborative Strategy between Technical Management and Project Management in the Field of Mechanical and Electrical Engineering and Installation of Hydroelectric Generators

Zhou Yongda

Guangzhou, Guangdong 510000

Abstract： This article explores the synergy between mechanical and electrical engineering technology and project management in the installation of hydroelectric generators. Elaborate on methods such as standardized management and quality system construction from various aspects, including the application of basic principles and the construction of project management systems. Analyze installation difficulties, propose strategies such as matrix management and information platform development, and construct a collaborative evaluation index system. Practice has proven that collaborative strategies improve installation quality and efficiency, which is of great significance to the development of the industry.

Keywords： installation of hydro generators; technical management; collaborative project management

引言

随着《“十四五”新型储能发展规划》（2022年）与“双碳”目标下系列清洁能源建设政策的深入推进，水轮发电机作为水电核心装备，其安装过程的复杂性与系统性对技术管理与项目管理的深度融合提出了更高要求。当前工程实践在土建机电交叉作业、大件吊装安全控制及多专业协同调试等方面仍面临显著挑战，亟需构建贯穿项目全周期的协同管理机制。本文基于标准化管理与矩阵式组织等理论，结合信息化平台开发与技术经济联合决策等方法，系统研究动态资源调配与过程协同控制策略，旨在提升安装质量与工程效率，为行业践行绿色低碳发展目标并提供理论借鉴与实践路径。

一、机电工程管理理论与水轮发电机安装特性

（一）技术管理理论框架

机电工程技术管理的基本原理在水轮发电机安装这一装备制造领域应用广泛且具重要价值。标准化管理通过制定统一规范和标准，为水轮发电机安装的各个环节提供明确操作准则，确保安装过程的一致性和稳定性，降低因操作差异导致的质量风险^[1]。质量管理体系建设则构建起涵盖从原材料采购到安装完成后检验等全流程的质量管控机制，对每个环节进行严格质量把关，保障水轮

发电机安装质量达到高标准。技术创新机制激励研发人员不断探索新技术、新工艺，将其应用于水轮发电机安装，提升安装效率与质量，增强产品在市场中的竞争力，从而推动整个机电工程领域技术水平的提升。

（二）项目管理体系构建

在机电工程管理理论与水轮发电机安装特性的项目管理体系构建方面，现代项目管理 WBS 分解方法及关键路径管理技术展现出重要适用性。WBS 分解方法能将水轮发电机安装这一复杂项目，依据功能、阶段等合理分解为可管理的子任务，明确各部分的工

作范围与职责，使整个安装流程层次分明，有助于资源分配与进度把控。关键路径管理技术则能精准找出决定安装项目总工期的关键活动与路线，让管理者将注意力集中于这些关键环节，合理调配资源、优化进度计划，避免因关键路径上活动的延误而导致工期延长。通过将这两种技术有机融合于水轮发电机安装项目管理体系，可显著提升项目管理效率与质量，确保安装工程顺利推进^[9]。

二、水轮发电机安装工程特征分析

（一）机电设备安装技术管理要素

水轮发电机安装中，机电设备安装技术管理要素至关重要。在定子绕组嵌装工艺方面，需严格把控质控标准，绕组的绝缘性能、嵌装紧实度等都直接影响发电机性能，工艺参数优化要求精准计算绕组匝数、线径等，确保电磁感应效果最佳^[9]。转子动平衡调试时，要遵循严格的质控标准，允许的不平衡量需控制在极小范围，以保障运行平稳。优化工艺参数需精确测量转子质量分布，据此调整配重，使转子在高速旋转下保持平衡。这些关键技术环节的技术管理要素，从工艺执行到参数优化，全方位保障水轮发电机安装质量，实现机电工程领域技术管理与项目管理在水轮发电机安装中的协同。

（二）项目执行过程管理难点

水轮发电机安装工程在项目执行过程存在诸多管理难点。土建机电交叉作业界面管理困难，水轮发电机安装需与土建工程紧密配合，两者施工进度、作业空间等方面易产生冲突，例如基础浇筑与设备安装的衔接，若协调不当，会延误工期，增加成本^[4]。大件吊装安全控制挑战大，水轮发电机部件体积大、重量重，吊装过程对设备、人员及环境要求极高，天气变化、场地条件限制等都可能引发安全风险。多专业协同调试复杂，水轮发电机涉及机械、电气、自动化等多个专业，各专业调试标准和流程不同，专业间信息沟通不畅、技术标准不统一等问题，会导致调试进度受阻，难以保证设备整体性能。

三、协同管理机制构建路径

（一）组织协同架构设计

1. 矩阵式管理模型构建

在机电工程领域水轮发电机安装项目中，构建矩阵式管理模型，需建立技术专家与项目经理双重领导机制，实现专业技术决策与项目进度控制的有机统一。一方面，技术专家凭借在机电工程技术领域的深厚造诣，为水轮发电机安装提供精准技术指导，从技术可行性、安全性等角度确保项目顺利推进。另一方面，项目经理统筹项目整体进度，协调各方资源，保障项目按计划有序开展。通过这种矩阵式结构，让技术与项目管理两条线相互交织、协同发力。技术专家参与项目关键节点的把控，项目经理及时反馈项目进度对技术的需求，双方密切沟通、相互配合，避免技术与项目管理脱节，有效提升水轮发电机安装项目的协同管理效率^[5]。

2. 信息化协同平台开发

信息化协同平台开发可设计包含 BIM 模型、进度看板和质量追溯系统的数字化管理平台架构方案。借助 BIM 模型，对水轮发电机安装进行三维可视化模拟，提前发现潜在问题并优化安装流程，实现各专业间的高效协同^[6]。进度看板实时展示项目进度，使各参与方及时了解工作进展，以便合理安排资源，确保安装工作按计划推进。质量追溯系统对安装过程中的质量数据进行采集与存储，当出现质量问题时，能够快速定位问题源头，及时采取纠正措施，同时也为后续项目提供质量改进依据。通过整合这些系统，打造全面、高效的信息化协同平台，有力支撑机电工程领域技术管理与项目管理在水轮发电机安装中的协同工作。

（二）过程协同控制方法

1. 技术经济联合决策机制

技术经济联合决策机制旨在通过构建联合决策矩阵模型，实现技术与经济在水轮发电机安装项目中的协同。该模型整合施工方案比选、成本效益分析和风险评估。在施工方案比选方面，全面考量不同技术方案的可行性、可靠性与先进性，为决策提供技术支撑。成本效益分析对各方案所需成本与预期收益进行评估，衡量方案经济价值。风险评估识别方案潜在风险，分析风险可能性与影响程度。通过三者有机结合，形成联合决策矩阵模型，使技术决策充分考虑经济因素，经济决策以技术可行性为基础，为水轮发电机安装项目提供科学合理的决策依据，实现技术与经济的协同管理，提高项目整体效益^[7]。

2. 动态资源调配策略

在水轮发电机安装的动态资源调配策略方面，基于关键链理论的工装设备共享方案发挥着重要作用。依据项目关键路径，对工装设备需求进行精准分析，确定不同阶段所需设备的种类与数量，打破各子项目对工装设备的独占局面，实现工装设备在整个项目中的高效流转与共享^[8]。同时，复合型技术团队建设模式也不可或缺。培养和组建既懂机电工程技术又熟悉项目管理的复合型团队，依据项目各阶段资源需求的动态变化，灵活调配团队成员，使其能在不同工作任务间迅速切换，确保人力资源与任务要求高度匹配，避免出现人力资源闲置或不足的情况，进而提升整个项目资源利用效率，保障水轮发电机安装项目顺利推进。

四、协同策略工程实践验证

（一）大型水电站安装工程应用

1. 定子铁芯叠装协同管理

在大型水电站安装工程定子铁芯叠装协同管理中，将三维激光检测技术与进度预警系统集成应用，能有效实现叠装精度与工期目标的协调控制。三维激光检测技术可实时精确测量铁芯叠装的各项参数，如平整度、垂直度等，为施工人员提供准确数据，以便及时调整，保障叠装精度符合高标准要求。与此同时，进度预警系统依据预设工期和实际施工进度，动态分析偏差，若出现进度延误风险，及时发出预警信号。二者协同作用，在保障定子铁芯叠装高精度的同时，确保安装工程按计划推进，实现质量与

工期的平衡。这种集成应用模式在实际工程中经过多轮验证优化，显著提升了定子铁芯叠装的协同管理水平，为大型水电站安装工程的顺利实施奠定坚实基础^[9]。

2. 机组轴线调整优化

在大型水电站安装工程中，机组轴线调整是关键环节。应用多专业联合调试机制解决轴线找正难题时，机械与电气专业人员紧密协作。机械人员精准测量与调整机组各部件位置，确保机械结构的准确性；电气人员同步开展电气参数检测与调试，保证电气系统与机械结构的适配性。通过实时数据共享与沟通，及时发现并解决轴线调整中机械与电气协同的问题。例如，在某大型水电站的安装工程实践中，在机组轴线调整优化阶段，运用此协同策略，成功将轴线偏差控制在极小范围内，有效提升了机组运行稳定性与发电效率^[10]。实践验证表明，多专业联合调试机制在机组轴线调整优化方面成效显著，为大型水电站机电设备的高效安装提供了有力保障。

（二）机组检修工程实践

1. 状态检修项目管理

在机组检修工程实践的状态检修项目管理方面，首先需对水轮发电机设备运行数据进行全面收集与深度分析，借助构建的设备健康评估体系，精准判定设备健康状况。基于此，运用检修周期优化模型，结合不同运行工况与设备特性，动态调整检修周期，避免过度检修或检修不足。同时，依据资源配置方案，合理调配人力、物力资源，确保检修工作高效开展。通过实践验证，该协同策略有效提升了检修效率，降低了检修成本，保障了水轮发电机稳定运行，为机电工程领域技术管理与项目管理在水轮发电机安装中的协同提供了有力的实践支撑。

2. 技术改造工程施工

在水轮发电机技术改造工程施工中，一方面要着重关注新技术的应用。例如引入新型绝缘材料，它能在提升发电机电气性能的同时，缩小设备体积，提高空间利用率。然而，新技术应用可能带来未知风险，像新型材料与现有系统的兼容性问题。这就需要从项目管理角度出发，制定全面风险评估机制，提前识别潜在风险，如材料老化过快、维护难度增大等。在实施过程中，通过合理规划施工流程，将新技术融入到各个环节，实时监控，确保新技术应用与项目风险控制达到平衡。依据实践经验不断优化策略，实现水轮发电机增容改造的高效推进，验证机电工程领域技术管理与项目管理在水轮发电机安装方面协同策略的有效性。

（三）工程实施效果评估

1. 协同度评价指标体系

在机电工程领域水轮发电机安装中，协同度评价指标体系至关重要。技术参数达标率，衡量发电机各关键技术参数如转速、电压等实际达成情况与设计标准的符合程度，直接反映技术管理的有效性，达标率越高表明技术协同越好。工期偏差率体现项目实际工期与计划工期的偏离程度，它受技术管理与项目管理协同影响，偏差率低意味着两者在进度安排、资源调配等方面协同良好。成本节约率关乎实际成本与预算成本的差值比例，显示了技术与项目管理协同下资源利用效率及成本控制水平，高成本节约率代表有效协同。通过这三个指标构建综合评价模型，能全面、科学地评估机电工程领域技术管理与项目管理在水轮发电机安装中的协同度。

2. 实施效果对比分析

在水轮发电机安装的工程实践中，对采用协同策略前后的实施效果进行对比分析。从安装质量方面，对比关键部件的装配精度、运行稳定性指标等。例如，采用协同策略前，某型号水轮发电机部分部件装配误差在 $\pm 0.5\text{mm}$ ，运行初期出现轻微震动；采用协同策略后，装配误差控制在 $\pm 0.2\text{mm}$ 以内，运行稳定性显著提升，震动大幅降低。在工期方面，统计各主要安装环节的耗时。原本按传统方式，定子吊装、转子安装等环节需30天，运用协同策略优化流程与资源配置后，仅需20天，工期压缩了三分之一。由此可见，协同策略在提升水轮发电机安装质量与压缩工期方面成效显著。

五、总结

机电工程领域中，技术管理与项目管理在水轮发电机安装方面的协同策略具有重要意义。通过系统论证可知，其协同机制不仅在理论层面丰富了相关管理理论体系，为后续研究提供了坚实基础，在实践中也显著提升了水轮发电机安装的效率与质量。基于智能传感和大数据分析的新一代协同管理平台，代表了未来发展方向，有望进一步优化协同效果。同时，新能源机组安装领域存在广阔研究拓展空间，未来可深入挖掘，将水轮发电机安装中积累的协同策略经验，推广应用至新能源机组安装领域，进一步完善机电工程领域不同项目的管理协同，促进整个行业的创新发展。

参考文献

- [1] 潘少峰. 国家先进技术光伏发电H项目施工技术管理研究 [D]. 东南大学, 2021.
- [2] 廖家军. FY公司模具开发的技术管理改进方案研究 [D]. 吉林大学, 2022.
- [3] 袁琳. Y工程设计公司技术管理优化研究 [D]. 河北工业大学, 2022.
- [4] 夏野. D公司技术管理与技术能力协同对技术创新的作用研究 [D]. 哈尔滨工业大学, 2021.
- [5] 李海. 基于全生命周期的城市轨道交通技术管理研究 [D]. 广东工业大学, 2021.
- [6] 孟祥辉, 刘一丁, 王笛清. 国际工程机电项目商务管理风险管控研究 [J]. 冶金丛刊, 2019, 004(008): 130-131.
- [7] 白永红. 机电设备安装的相关技术管理策略探究 [J]. 价值工程, 2021, 40(4): 42-43.
- [8] 严平文. 轴伸贯流式水轮发电机组安装工序改进工艺 [J]. 水电站机电技术, 2021, 44(2): 10-12.
- [9] 张德成. 林业育苗技术管理问题与完善策略 [J]. 种子科技, 2022, 40(12): 139-141.
- [10] 曹启增, 赵羽, 王少雷. 岩土工程勘察技术的应用与技术管理策略 [J]. 智能城市, 2021, 7(11): 101-102.

双碳目标下中国能源企业海外新能源电力投资 的风险评估与应对策略

封亚楠

华电海外投资有限公司, 北京 100031

DOI:10.61369/WCEST.2025070012

摘 要 : 双碳目标下全球能源转型加速, 中亚地区凭借丰富新能源资源成为中国能源企业海外投资热点。本文聚焦中亚地区新能源电力投资, 系统分析投资现状与环境特征, 识别汇率、利率、通胀、电费结算四类核心风险的形成机制与表现形式, 构建多维度风险评估体系并呈现评估结果。结合风险特征提出金融工具对冲、融资方案优化、成本控制、结算机制约定等针对性应对策略, 通过哈萨克斯坦光伏电站案例验证策略有效性, 为中国能源企业规避中亚地区投资风险、实现双碳目标下海外投资可持续发展提供理论与实践参考。

关 键 词 : 双碳目标; 中国能源企业; 新能源电力投资; 风险评估; 应对策略

Risk Assessment and Response Strategies for Overseas New Energy Power Investment by Chinese Energy Enterprises under the Dual Carbon Goals

Feng Yanan

Huadian Overseas Investment Co., Ltd., Beijing 100031

Abstract : Under the dual carbon goals, the global energy transition is accelerating, and Central Asia, with its abundant new energy resources, has become a hotspot for overseas investment by Chinese energy enterprises. This paper focuses on new energy power investment in Central Asia, systematically analyzing the current investment status and environmental characteristics. It identifies the formation mechanisms and manifestations of four core risks: exchange rate, interest rate, inflation, and electricity tariff settlement, and constructs a multi-dimensional risk assessment system, presenting the assessment results. Combining the characteristics of these risks, targeted response strategies such as financial instrument hedging, financing plan optimization, cost control, and settlement mechanism agreements are proposed. The effectiveness of these strategies is validated through a case study of a photovoltaic power plant in Kazakhstan, providing theoretical and practical references for Chinese energy enterprises to avoid investment risks in Central Asia and achieve sustainable overseas investment under the dual carbon goals.

Keywords : dual carbon goals; Chinese energy enterprises; new energy power investment; risk assessment; response strategies

引言

双碳目标推动全球能源结构向清洁低碳转型, 海外新能源电力投资成为中国能源企业践行“走出去”战略的重要路径。中亚地区风能、太阳能资源富集, 政策支持力度持续加大, 投资潜力显著, 但地缘政治复杂、市场机制不完善等因素导致投资风险突出。汇率波动、利率调整、通胀上行及电费结算不规范等问题, 直接影响项目现金流与投资回报。因此, 深入剖析中亚地区新能源电力投资风险, 构建科学评估体系并提出应对策略, 对中国能源企业防范投资风险、提升海外项目运营效益, 助力全球能源转型与双碳目标实现具有重要意义。

一、双碳目标下中国能源企业海外新能源电力投资现状

(一) 全球新能源电力投资格局与趋势

双碳目标驱动全球能源转型加速, 新能源电力成为投资热

点。各国加大风能、太阳能等可再生能源投入, 推动能源结构清洁低碳化, 全球新能源投资规模持续扩大, 区域分布向资源禀赋优越、政策支持力度大的地区集中。中国能源企业凭借技术、资金与产业链优势, 在海外投资中占据重要地位, 投资领域涵盖光伏电

站、风电场、储能项目等，区域布局从欧美市场向中亚、东南亚、非洲等新兴市场拓展，投资模式日益多元，海外拓展势头强劲^[1]。

（二）中亚地区新能源电力投资环境分析

中亚五国风能、太阳能资源丰富且分布广泛，部分区域年日照充足、风速稳定，具备优越开发条件。各国出台补贴、税收减免、上网电价优惠等支持政策，逐步放宽外资准入，为投资者提供政策保障。区域经济稳步发展带动电力需求增长，但部分国家电网基础设施滞后，电力传输与消纳能力不足，加之政策执行力度不足、市场机制不完善，给新能源项目开发与运营带来挑战，仍具备巨大投资潜力。

（三）中国能源企业在中亚新能源电力投资实践

中国能源企业在中亚的新能源电力投资已初见成效，以光伏电站、风电场为主要项目类型，投资规模持续扩大，部分项目已并网发电并产生良好效益。投资模式以绿地投资、合资运营为主，通过与当地企业、政府合作，依托区域资源与政策优势降低风险。企业积极参与当地能源基础设施建设，推动电网互联互通，助力新能源消纳，同时注重技术输出与人才培养，实现互利共赢，为后续投资奠定基础。

二、中亚地区新能源电力投资核心风险识别与形成机制

（一）汇率风险

中亚各国货币汇率波动频繁，其形成与国际收支状况、地缘政治局势、国际能源价格波动密切相关。部分国家外汇储备不足，国际收支平衡压力较大，加之地缘政治冲突时有发生，导致货币汇率稳定性较差。国际能源价格波动则通过影响中亚国家能源出口收入，间接影响其货币汇率。汇率风险主要表现为结算货币与企业本币之间的汇率差异，以及汇率波动对投资收益的侵蚀^[2]。项目投资、建设与运营过程中，涉及大量跨境资金流动，汇率波动会导致项目资产、收益在折算为本币时出现价值波动，若货币贬值，将直接降低企业实际收益，增加项目现金流压力。

（二）利率风险

中亚地区利率政策受通胀调控、货币政策导向等因素影响，利率波动较为明显。部分国家为抑制通胀、稳定经济形势，频繁调整基准利率，导致市场利率波动加剧。利率风险的表现形式主要为项目融资利率波动与债务偿还成本增加。新能源电力项目投资规模大、回收周期长，企业多依赖外部融资支持，若市场利率上升，将直接提高项目融资成本，增加债务偿还压力，降低项目投资回报率，甚至可能导致项目现金流断裂。

（三）通胀风险

中亚地区通胀问题较为突出，其诱因包括能源价格波动、供

应链冲击、财政政策调整等。能源价格波动影响生产资料与生活物资价格，供应链冲击导致商品供应短缺，财政赤字扩大与货币超发则进一步推高物价水平。通胀风险主要表现为施工建设成本上升、运营维护费用增加与实际收益缩水。项目建设阶段，钢材、水泥等建材价格上涨会直接增加工程造价；运营阶段，人工成本、设备维修费用等持续上升会提高运营成本。同时，通胀导致货币购买力下降，项目收益实际价值缩水，影响企业投资回报。

（四）电费结算风险

中亚地区电力市场结算体系存在明显缺陷，支付能力不足、结算规则不透明、政策变动频繁等问题较为突出。部分国家经济发展水平有限，电网公司财务状况不佳，支付能力不足，导致电费拖欠现象普遍。结算规则不透明则增加了企业运营成本与风险，政策变动则可能导致电价调整滞后、结算货币受限等问题。电费结算风险直接影响项目现金流，电费拖欠会导致企业资金回笼困难，结算货币限制与电价调整滞后则会降低项目实际收益，严重影响项目运营稳定性^[3]。

三、中亚地区新能源电力投资风险评估体系构建

（一）风险评估指标设计

汇率风险指标包括汇率波动率、货币自由兑换程度、外汇管制强度，通过这些指标可全面反映中亚各国汇率风险水平。利率风险指标涵盖基准贷款利率波动幅度、融资期限错配程度、利率政策稳定性，能够有效评估利率波动对项目的影响。通胀风险指标选取居民消费价格指数波动、生产资料价格涨幅、通胀预期指数，可准确衡量通胀对项目成本与收益的影响。电费结算风险指标包括电费回收周期、结算政策连续性、电网公司支付能力，能够全面反映电费结算环节的风险状况。

（二）风险评估方法选择

本次风险评估采用定性定量相结合的方法。定性评估方面，运用专家打分法与德尔菲法，结合中亚地区投资实践与区域特征，邀请能源投资、金融、政策研究等领域专家对各类风险进行打分与研判，明确风险影响范围与特征。定量评估方面，采用层次分析法确定各指标权重，结合模糊综合评价法量化风险等级，通过构建数学模型，将定性指标转化为定量数据，提高风险评估的科学性与准确性。

（三）风险评估结果

通过对中亚五国新能源电力投资核心风险的评估对比发现，各国风险水平存在一定差异，但整体呈现汇率风险与电费结算风险偏高，利率风险中等，通胀风险中高的特征。为清晰呈现各类风险的影响程度与传导路径，表 1 汇总了核心风险评估结果。

表 1 中亚地区新能源电力投资核心风险评估汇总表

风险类型	评估指标	影响程度（高 / 中 / 低）	传导路径	关键影响因素
汇率风险	汇率波动率、外汇管制强度	高	汇率波动→投资收益折算缩水 →项目现金流紧张	地缘政治、国际能源价格、外汇储备
利率风险	贷款利率波动、政策稳定性	中	利率上升→融资成本增加 →项目投资回报率下降	货币政策、通胀水平、国际利率环境
通胀风险	CPI 波动、生产资料价格涨幅	中高	通胀上行→建设与运营成本上升 →实际收益下滑	供应链稳定性、能源价格、财政政策
电费结算风险	回收周期、支付能力、政策连续性	高	电费拖欠 / 结算限制→现金流断裂 →项目运营困难	电力市场需求、电网配套、政府财政状况

四、双碳目标下中亚地区新能源电力投资风险应对策略

（一）汇率风险应对策略

运用金融工具对冲是应对汇率风险的有效手段，企业可根据项目实际情况，合理运用远期外汇合约、货币互换、外汇期权等工具，锁定汇率水平，降低汇率波动对项目收益的影响。融资货币选择上，优先采用本币融资或与收入货币相匹配的融资方式，减少跨境货币兑换带来的汇率风险。运营策略调整方面，优化收支货币结构，提高当地货币收入占比，通过在当地采购物资、雇佣本地员工等方式，减少外汇支出，实现收支货币匹配，降低汇率波动对现金流的影响。

（二）利率风险应对策略

优化融资方案是降低利率风险的关键，企业应选择固定利率融资工具，锁定融资成本，避免利率上升带来的债务偿还压力。合理设计融资期限结构，根据项目现金流状况，匹配融资期限与项目收益周期，减少期限错配风险。建立风险转移机制，与金融机构签订利率互换协议，将浮动利率债务转换为固定利率债务，转嫁利率波动风险^[1]。同时，密切跟踪中亚各国利率政策变化，加强对市场利率走势的研判，及时调整融资方案，降低利率风险损失。

（三）通胀风险应对策略

加强成本控制是应对通胀风险的核心，企业可通过签订长期供货合同，锁定钢材、水泥等主要建材与设备的采购价格，稳定建设成本。优化施工与运营流程，提高资源利用效率，降低能耗与物耗，减少通胀带来的成本压力。在投资协议中加入通胀调整条款，将电价与通胀指标挂钩，当通胀达到一定水平时，相应调整电价，保障项目实际收益。合理配置抗通胀资产，如在项目所在地投资房地产、大宗商品等，对冲通胀对资产价值的侵蚀。

（四）电费结算风险应对策略

选择信用等级高、支付能力强的当地电网公司作为合作主体，可有效降低电费拖欠风险。在投资协议中明确结算货币、支付周期与违约赔偿条款，确保电费结算有章可循，若出现电费拖欠，可依据协议要求对方承担违约责任。深入研究当地电力市场政策，加强与政府部门沟通，参与电力体制改革讨论，及时掌握政策变动信息，提前做好应对准备。拓展绿证交易、碳汇收益等多元化收入渠道，降低对电费收入的依赖，增强项目抗风险能力^[5]。

五、案例分析 —— 以中国能源企业在哈萨克斯坦光伏电站投资为例

（一）项目概况

该光伏电站项目位于哈萨克斯坦南部地区，当地太阳能资源

丰富，年日照时数充足，具备良好的开发条件。项目总投资规模较大，采用集中式光伏电站设计，总装机容量可观，通过与当地电网公司合作实现并网发电。投资模式为合资运营，中国能源企业与哈萨克斯坦当地企业共同出资建设，双方按持股比例分享收益、承担风险。项目所在区域电力需求旺盛，但电网基础设施相对薄弱，企业在建设光伏电站的同时，参与当地电网升级改造，提升电力传输与消纳能力。

（二）核心风险暴露与影响

项目实施过程中面临多重风险挑战。汇率方面，哈萨克斯坦坚戈汇率波动频繁，受国际能源价格与地缘政治影响较大，导致项目收益折算为人民币时出现明显波动，降低了企业实际收益。通胀方面，项目建设期间，当地建材价格与人工成本持续上涨，导致工程造价超出预算，增加了项目投资压力。电费结算方面，当地电网公司支付能力有限，存在电费拖欠现象，导致项目资金回笼困难，影响现金流稳定性。这些风险相互叠加，对项目投资回报率与运营稳定性造成了一定影响。

（三）风险应对实践与效果

针对汇率风险，企业运用远期外汇合约锁定汇率，并优化收支货币结构，提高坚戈收入占比，减少跨境货币兑换。通过这些措施，有效降低了汇率波动对项目收益的影响，保障了现金流稳定。面对通胀风险，企业与建材供应商签订长期供货合同，锁定采购价格，同时优化施工流程，提高建设效率，控制成本超支。在电费结算风险应对上，企业在投资协议中明确了支付周期与违约赔偿条款，并加强与当地政府部门沟通，推动电网公司及时支付电费。此外，企业积极拓展绿证交易业务，增加多元化收入。经过一系列应对措施的实施，项目风险损失得到有效控制，投资回报率逐步提升，运营稳定性显著增强，为同类项目风险应对提供了宝贵经验。

六、结束语

中亚地区新能源电力投资是双碳目标下中国能源企业海外拓展的重要方向，兼具资源潜力与市场机遇，但也面临多重风险挑战。汇率、利率、通胀、电费结算四类核心风险通过不同路径影响项目收益与运营稳定性，需企业构建全方位风险防控体系。通过科学评估风险水平、灵活运用金融工具、优化融资与运营方案、加强政策沟通与合作协同，可有效降低风险损失。未来，中国能源企业应持续强化风险防控意识，结合区域特征与项目实际优化应对策略，同时依托政府政策协同与行业资源整合，提升海外投资抗风险能力，在助力中亚地区能源转型的同时，实现自身可持续发展，为全球双碳目标达成贡献中国力量。

参考文献

- [1] 陈亚威. 海外电力投资企业适合参投国内新能源项目吗 [J]. 中国商人, 2024, (08): 92-93.
- [2] 赵雅玲, 夏佳琦, 邵培朵. 能源绿色转型对我国能源企业海外投资的影响与对策研究 [J]. 产业创新研究, 2024, (10): 7-11.
- [3] 董铸. 新能源海外投资策略的探索 [J]. 能源科技, 2023, 21 (05): 66-71.
- [4] 江珂. X 海外电力投资项目 PPA 实施风险管理研究 [D]. 云南大学, 2022.
- [5] 刘建国, 朱跃中, 蒋钦云. 双碳目标下, 我国海外电力投资新思考 [J]. 中国能源, 2021, 43 (09): 61-67.

火力发电水足迹特点分析评价——以广州市为例

王雨欣¹, 何家祥¹, 汤舒¹, 苏春生², 房春艳²

1.广州市南部水网流域事务中心, 广东 广州 511401

2.广东丰泽源水务科技有限公司, 广东 广州 510603

DOI:10.61369/WCEST.2025070013

摘 要 : 火力发电行业需要大量的水来保证生产安全性和可靠性。而我国水资源禀赋较为缺乏, 水资源地区分布不均, 污染问题日趋严重。火电生产引发的大规模取水和水污染问题, 给当地水资源的可持续发展提出了巨大挑战。基于生命周期评价的思想, 本研究采用水足迹有关理论, 对我国广州地区主要火力发电厂生产中的的蓝水、灰水足迹开展研究, 分析生产过程中水足迹对当地水资源的影响, 提出火力发电节水方向与举措。

关 键 词 : 水足迹; 蓝水; 灰水; 节水方向与举措

Analysis and Evaluation of Water Footprint Characteristics of Thermal Power Generation: A Case Study of Guangzhou City

Wang Yuxin¹, He Jiaxiang¹, Tang Shu¹, Su Chunsheng², Fang Chunyan²

1. Guangzhou Southern Water Network Basin Affairs Center, Guangzhou, Guangdong 511401

2. Guangdong Fengzeyuan Water Technology Co., LTD., Guangzhou, Guangdong 510603

Abstract : The thermal power generation industry requires a large amount of water to ensure production safety and reliability. However, China's water resources are relatively scarce, with uneven distribution of water resources in different regions and increasingly serious pollution problems. The large-scale water intake and pollution caused by thermal power production pose significant challenges to the sustainable development of local water resources. Based on the concept of life cycle assessment, this study adopts the theory of water footprint to investigate the blue and grey water footprints in the production of major thermal power plants in Guangzhou, China. The impact of water footprint on local water resources during the production process is analyzed, and water-saving directions and measures for thermal power generation are proposed.

Keywords : water footprint; blue water; grey water; directions and measures for water conservation

2002年 Hoekstra 等^[1]首次明确提出水足迹概念, 是分析某项活动或生产过程水资源占用的综合指标。N.DING 等^[2]研究了我国主要化石燃料和发电方式的平均水足迹。目前, 已有的火电水足迹评价研究大多忽略占比更大的灰水足迹, 更多的关注电厂水耗和取水量。基于此, 本次尝试开展不同燃料类别火力发电的蓝水与灰水足迹核算分析, 探究各类别水足迹差异性, 与行业水足迹平均水平情况对比, 以提出火力发电的节水策略, 为水资源管理提供一些理论支持。

一、研究区概况及研究方法

(一) 研究区概况

广州市是国务院批复确定的中国重要的中心城市、全国先进制造业基地重要承载地。2023年, 广州市总用水量为60.93亿 m³, 其中工业用水23.30亿 m³, 工业用水中的火电用水18.36亿 m³, 占全市总用水量的30.13%, 因此, 探究广州市工业用水特点特别是取用水量占比最大的火电行业和水资源之间的相互关系, 对提高区域水资源综合利用效率和促进区域可持续发展具有重要

意义。

(二) 研究方法

火力发电生产过程中的水足迹包含蓝水足迹和灰水足迹两部分, 各自核算公式如下:

1. 蓝水足迹

生产过程蓝水足迹核算公式如下:

$$WF_{b,proc} = WF_{b,evap} + WF_{b,product} + WF_{b,unreuse} \quad (1-1)$$

$WF_{b,proc}$ —— 某一过程直接消耗的蓝水 (L/kWh);

基金项目名: 广州市水利科技项目 (GZSWKJ2023-004)

作者简介: 王雨欣 (1999.09—), 女, 硕士研究生, 助理工程师, 从事取供水工作。

W_{Fb, evap}——蒸发水量 (L/kWh) ;
W_{Fb, product}——进入到产品的蓝水 (L/kWh) ;
W_{Fb, unreuse}——同一时段不能被同一流域重新利用的回水 (L/kWh) 。

2. 灰水足迹

污染物 i 的无量纲影响因子 n_i 核算公式如下: :

$$n_i = C_{\max,i} / C_{\text{nat},i} \quad \text{式 (1-2)}$$

$C_{\max,i}$ ——污水中污染物 i 的浓度 (mg/L) ;

$C_{\text{nat},i}$ ——受纳水体中污染物 i 的本底浓度 (mg/L) 。

生产过程灰水足迹核算公式如下:

$$WF_{g,i} = n_{\max} \times m_{\text{waste}} \quad \text{式 (1-3)}$$

$WF_{g,i}$ ——单一活动的灰水足迹 (L/kWh) ;

m_{waste} ——生产单位产品排放的污水总量 (L/kWh) ;

n_{\max} ——最大影响因子。

(三) 基础数据

本次研究选取广州市3个不同火力发电燃料代表性企业进行核算与分析, 分别为: 广州市珠江电厂 (燃煤类)、广州珠江天然气发电有限公司 (天然气类)、广州环投云山环保能源有限公司 (生物质类), 3家企业2021~2023年发电过程基本数据如下表1所示:

表1 各火电企业2021~2023年发电、用材、用水量情况一览表

火电厂	项目名称	2021年	2022年	2023年
广州市珠江电厂 (燃煤)	发电量 (万千瓦时)	643064.28	624889.68	615800.52
	燃煤量 (吨)	2984102	2858712	2956622
	自取水量 (立方米)	866796614	820683741	850135113
	总用水量 (立方米)	2003545	1779351	2013209
	生产用水量 (立方米)	1788259	1474219	1497300
广州珠江天然气发电有限公司 (天然气)	发电量 (亿千瓦时)	28.84	24.2	27.01
	用气量 (万吨)	38.46	32.76	36.59
	自取水量 (万立方米)	28188.48	23673	25440.48
	总用水量 (立方米)	3383861.46	3388498.8	3315400.54
	生产用水量 (立方米)	3366182.46	3367141.8	3300699.54
	污水排水量 (立方米)	44558	53511	44769
广州环投云山环保能源有限公司 (生物质)	发电量 (MW · h)	515412	464704	460183
	垃圾燃烧量 (吨)	1108127	931081	951755.2
	取水水量 (立方米)	1875926	1606202	1595043
	耗水量 (立方米)	1857700	1588000	1576800
	污水排放量 (立方米)	0	0	0

注: 表中所有数据由企业提供, 广州市珠江电厂污水总排放系数为44.9%。

根据各火电企业提供的2021~2023年污水中各主要污染物浓度数据, 考虑不同污染物自然本底浓度得到各火电企业2021~2023年最大影响因子 n_{\max} , 根据上表各火电企业提供污水排放量或排放率与发电量数据, 得到各火电企业单位发电量排放的污水总量。

二、水足迹核算和分析评价

(一) 水足迹核算

水足迹核算时, 通常研究单位产品所消耗的水量, 火力发电的水足迹用耗水体积与发电量之比衡量, 单位为 m^3/GJ 或 L/kWh , 本次研究用 L/kWh 表示。

蓝水足迹 ($WF_{b, \text{proc}}$): 根据3家企业2021~2023年用水量、耗水量、发电量等得到2021~2023年单位发电蓝水足迹 $WF_{b, \text{proc}}$: 广州市珠江电厂分别为0.17L/kWh、0.16L/kWh、0.18L/kWh, 平均值为0.17L/kWh; 广州珠江天然气发电有限公司分别为0.02L/kWh、0.02L/kWh、0.02L/kWh, 平均值为0.02L/kWh; 广州环投云山环保能源有限公司分别为3.60L/kWh、3.42L/kWh、3.43L/kWh, 平均值为3.48L/kWh。

灰水足迹 ($WF_{g,i}$): 根据上表1中各火电企业基本数据, 以及2021~2023年各火电企业各类主要污染物浓度, 得到各火电企业2021~2023年最大影响因子 n_{\max} 数值: 广州市珠江电厂1.12、0.76及2.18; 广州珠江天然气发电有限公司14.30、10.67、7.87; 广州环投云山环保能源有限公司0、0、0。同理, 根据表4.2-1的发电量、污水排放量或排放系数数据, 相应得到各火电企业2021~2023年单位发电量废水排放量 m_{waste} 分别为: 广州市珠江电厂0.14L/kWh、0.13L/kWh、0.15L/kWh; 广州珠江天然气发电有限公司0.15L/kWh、0.22L/kWh、0.17L/kWh; 广州环投云山环保能源有限公司0L/kWh、0L/kWh、0L/kWh。

根据3家企业2021~2023年最大影响因子、单位发电污水排放量的核算结果, 结合公式1-3, 得到2021~2023年各火电企业单位发电灰水足迹 $WF_{g,i}$ 分别为: 广州市珠江电厂0.31L/kWh、0.10L/kWh、0.33L/kWh, 平均值为0.25L/kWh; 广州珠江天然气发电有限公司2.21L/kWh、2.36L/kWh、1.30L/kWh, 平均值为1.96L/kWh; 广州环投云山环保能源有限公司0L/kWh、0L/kWh、0L/kWh, 平均值为0L/kWh。

(二) 水足迹核算结果分析评价

通过计算分析, 各火力发电企业不同年份蓝水、灰水足迹均与三年平均水平接近, 可见各发电企业水足迹平均水平基本反映了其现状真实水平。全国火电厂水足迹平均水平研究成果^[3]: 300~600MW 间火电厂平均蓝水足迹为2.39L/kWh, 发电直接灰水足迹为1.07L/kWh。

根据2.1节水足迹核算结果, 与全国同类型火力发电水足迹平均水平进行比较, 如下表2所示:

表2 广州市3家火电企业（2021~2023年）平均水足迹
与全国平均水平对比情况表

企业名称	发电类型	蓝水足迹 L/kWh		灰水足迹 L/kWh	
		企业实际值	全国平均水平	企业实际值	全国平均水平
广州市珠江电厂	燃煤	0.17	2.39	0.25	1.07
广州珠江天然气发电有限公司	燃气	0.02	2.39	1.96	1.07
广州环投云山环保能源有限公司	生物质	3.48	2.39	0	1.07

注：数值越小，水足迹水平越优。

1. 家企业水足迹结果分析

3家企业水足迹对比情况如图1所示，可见以煤和燃气作为发电原料的广州市珠江电厂和广州珠江天然气发电有限公司的蓝水足迹值均较小，以生物质作为发电原料的广州环投云山环保能源有限公司的蓝水足迹较大，新鲜水消耗量较大，总耗水量占总取水量的98.92%，根据其生产工艺特点，可以采取如下提高蓝水足迹水平的措施：1. 进一步提高生产设备严密性，降低汽水损失；2. 回收凝结水和加热器疏水进行再利用；3. 对废水梯级回收利用，提高水的重复利用率，减少新鲜水的取用与消耗。

以煤和生物质作为发电原料的广州市珠江电厂和广州环投云山环保能源有限公司的灰水足迹值均较小，以燃气作为发电原料的广州珠江天然气发电有限公司的灰水足迹较大，根据其生产工艺特点，可以采取如下提高灰水足迹水平的措施：1. 提高锅炉排污水和厂区生活废水处理设施的处理效果，减少污染物的排放；2. 加大污废水的回用，减少废水量的排放。总体达到减少单位发电废水排放量和各类主要污染物排放总量。

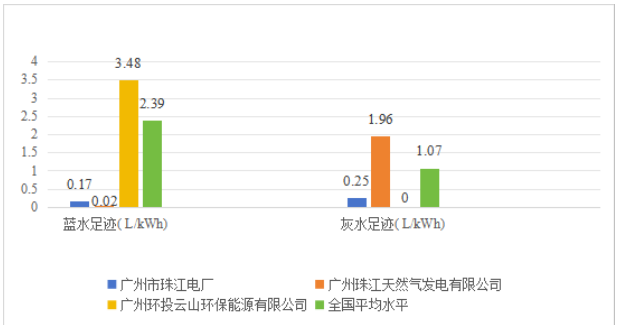


图1 火力发电水足迹水平对比示意图

2. 与全国水平对比分析

由表2和图1可知，燃煤、燃气发电企业的蓝水足迹均优于全国平均水平，特别燃气类型远超全国平均水平，生物质发电类型企业蓝水足迹低于全国平均水平，表明生物质发电消耗新水量较大；燃气企业灰水足迹低于全国平均水平，表明燃气污水排放量及污染物综合排放量较大，燃煤企业和生物质发电企业均领先于全国平均水平，尤其生物质发电企业灰水足迹远领先于全国平均水平。广州市珠江电厂无论蓝水足迹还是灰水足迹都远优于全国平均水平，原因在于其生产工艺先进及管理规范，导致其水足迹总体水平较高。

三、结论与建议

（一）结论

（1）广州市不同燃料类型的火力发电企业，水足迹差异较大。使用燃气作为发电原料发电企业的蓝水足迹远优于燃煤和生物质燃料的火力发电企业，生物质类蓝水足迹最大。以生物质作为发电原料的火电企业由于污水零排放，灰水足迹为0，是所有类型中最优的，燃煤次之，燃气灰水足迹最大。

（2）与全国火力发电企业水足迹平均水平相比，不同燃料类型的火力发电企业呈现不同特点，燃煤、燃气火力发电蓝水足迹均优于全国平均水平，生物质发电企业未达到全国平均水平，存在较大节水潜力；燃煤、生物质火力发电灰水足迹均优于全国平均水平，燃气火力发电灰水足迹未达到全国平均水平，存在较大的节水潜力。

（二）建议

（1）加大节水技改，通过技术创新和工艺改进，降低火力发电过程中的水足迹。

（2）建立完善的节水管理体系和监测机制，定期对火电厂的用水情况进行评估，及时发现和解决粗放用水问题。

（3）进一步加强污水深度处理与回用，通过采用高效废水处理技术，最大程度实现火电厂废水净化与再利用，减少新鲜水的使用。

参考文献

- [1]HOEKSTRA A Y, CHUNG P Q. Virtual water trade a quantification of virtual water flows between nations in relation to international crop trade [J]. Value of Water Research Report Series, 2002, 49(11): 203-209.
- [2] DING N, LIU J R, YANG J X, et al. Water Footprints of Energy Sources in China: Exploring Options to Improve Water Efficiency[J]. J Clean Prod, 2018, 174: 1 021-1 031.
- [3]姜小云. 基于生命周期评价的我国区域电力水足迹特征研究 [D]. 上海: 上海交通大学机械与动力工程学院, 2019: 41-46.

全过程审计视角下电力工程投资风险防控研究

畅恺龙

国网宁夏供电公司, 宁夏 银川 750001

DOI:10.61369/WCEST.2025070014

摘 要 : 电力工程项目的投资规模大, 建设周期长, 技术构成比较复杂, 其投资风险也贯穿整个项目的生命周期。为了有效的对电力工程投资进行控制需要引入全过程审计的理念, 在项目各个阶段包括前期决策、设计、招投标与建设以及竣工结算等所有阶段上都要实行连续性的系统性审查评价从而动态地识别和预见可能出现的投资风险防止概算失控和资金流失以提高投资经济效益。全过程审计的重点是把风控关口前移到位, 由事后静态滞后的审计转变为实时动态同步的监督工作来保证电力工程项目投资目标达成提供必要的保障。

关 键 词 : 全过程审计; 电力工程; 投资风险; 造价控制

Research on Risk Prevention and Control of Electric Power Engineering Investment from the Perspective of Full-Process Audit

Chang Kailong

State Grid Ningdong Power Supply Company, Yinchuan, Ningxia 750001

Abstract : The investment scale of power engineering projects is large, the construction period is long, the technical composition is relatively complex, and the investment risk also runs through the entire life cycle of the project. To effectively control the investment in power engineering, it is necessary to introduce the concept of full-process auditing. Continuous and systematic review and evaluation should be carried out at all stages of the project, including the early decision-making, design, bidding and tendering, construction, and final settlement, so as to dynamically identify and predict possible investment risks, prevent the loss of control over the budget estimate and the loss of funds, and improve the economic benefits of investment. The key point of the full-process audit is to move the risk control checkpoint forward and in place, transforming from post-event static and lagging audits to real-time dynamic and synchronous supervision work to provide necessary guarantees for achieving the investment goals of power engineering projects.

Keywords : full-process audit; electric power engineering; investment risk; cost control

电力工程是国民经济发展的基础, 其投资活动影响着能源结构和整个社会经济的运行。此类工程投资密集、技术关联度较高, 从项目构想到投产过程中牵涉到不少不确定的内、外部因素, 使投资的风险像影子一样跟着。传统竣工决算审计模式, 其监督作用常常落后于风险发生, 不能从根本上防止投资损失。因而, 创建一套能全面涵盖项目整个生命期的风险防控体系变得尤为紧迫。全过程审计的视角, 就是强调在投资行为每一个重要节点都要同步进入并加以审视, 在风险出现时就提前发现, 并在过程中给予干预, 以此建立一道从事先、事中再到事后的密闭防线, 这对于电力工程投资风险的整体防范来说具有十分重大的现实意义。

一、全过程审计与电力工程投资风险的内在关联

电力工程投资风险的产生具有典型的阶段性、累积性特点, 风险因素从项目立项开始就存在于投资决策阶段, 并贯穿于整个设计和建设过程, 直至最后的竣工验收。任何一个环节出现风险失控都有可能导致连锁反应造成投资超支, 而全过程审计的逻辑起点正好符合电力工程项目的整个生命周期。它不是孤立审查某

个阶段的经济活动, 把项目当作一个整体看待, 用系统的思维, 针对整个项目周期内每一个重要控制点上的经济信息真实度, 经济活动正当性以及资源运用经济性做持续检查。这种审计模式的动态性、前瞻性、全面性, 使其可以针对不同阶段的特定风险做到准确识别并加以评估, 从而形成了电力工程投资风险实现系统化、深层次防控的内在逻辑依据^[1]。

作者简介: 畅恺龙 (1985.12—), 男, 汉族, 宁夏银川人。

二、前期决策与设计阶段的投资风险识别与审计应对

（一）项目决策依据的充分性与合规性审计风险

电力工程项目前期决策是投资行为的源头，此阶段的风险具备根本性的影响特征。决策依据所含风险存在于两方面^[2]。第一是项目立项合规性风险，即项目的设立是否与国家能源发展战略、区域电网发展规划以及相关的产业政策相契合，如果不符合宏观导向，则会导致项目功能定位错误或存在搁置的风险。其二，可行性研究数据风险。可行性研究报告中电力负荷预测数据、资源评价数据、燃料价格分析数据、初始投资估算等是否准确，是判断项目是否具有经济可行性的关键。审计要追查这些基础数据的出处，查看它们的预测模型是不是科学，计算过程是否严谨，找出由于数据虚高或者预测不准而造成的决策错误风险，以免项目因为一开始就有问题，到后面就陷入困境^[3]。

（二）勘察设计深度的充分性风险审计研究

勘察设计的桥梁，其工作的深度直接决定后续方案的设计可靠程度以及工程的顺利实施。此阶段的风险主要来自勘察深度不够，使得基础数据存在偏差。比如，输电线路工程沿途地质勘探点分布稀少或者勘探深度不足，不能全面反映不良地质状况，在后续的设计过程中就会出现塔基设计改动，在施工时也会遇到地陷，从而产生工期延长以及投资增加等问题^[4]。同样，厂站建设区域的地下管网、水文地质等未进行清楚勘察，也会造成设计返工的情况出现。审计可以审查出勘察设计中对于工作深度的具体要求，并且和行业的标准、项目本身的复杂度进行对比之后，再评定其是否充分，防止因为勘察不够而导致的一系列投资风险。

（三）设计概算编制的准确性与完整性风险审计分析

设计概算是整个项目投资总额的最高限额，设计概算的质量直接影响到后期的投资控制。设计概算风险主要集中在准确性、完整性上。准确性风险来自工程量计算有误、定额套用错误以及主设备与材料价格预测不准^[5]。比如，输变电工程里线路路径长度及塔基数量的计算出错，或者对不同地质条件下的基础工程定额选用不当，都会使概算值与实际情况相去甚远。而完整性风险就是概算编制范围有缺项漏项，缺少了与工程相配套的接入系统费用或者送出工程费用以及环保、水保等专项投资所造成的隐性缺口。审计工作要从工程量清单所覆盖范围、计价依据时效性、适用性以及各项目费用计取标准上进行穿透性审查，确保概算的编制真实全面地反映项目建设的所有投资需求^[6]。

（四）技术经济比选风险的审计方案设计

设计阶段是技术形态确定的过程，同时也是投资成本形成的关键时期。设计方案的技术经济性影响项目的初期投入和长期运营成本。此环节风险为技术方案选择不够全面或者在技术方案比选的过程中重视技术而轻视经济，比如在电气主设备选择方面，由于变压器和断路器等不同电压等级以及不同规格，造成采购成本、占用面积、运行能耗及维修成本相差较大^[7]。倘若比选的时候并未采用全生命周期成本分析法展开综合考量，只是依靠单一的技术指标或者短期内的投资额来进行选取，这样很有可能会

令项目总体花费达到最优目的这一目标落空。审计要重视对重要设计方面的论证过程展开调查，看看是否存在多种可行的方案比选记录，比选所使用的评价指标体系是不是全面，决策过程是否透明合法，以此来防止由于选择设计方案有误而带来的投资固化风险。

（五）征地拆迁规划潜在风险的审计

征地拆迁属于电力工程开工前的重要环节，它复杂且存在不确定性，在项目前期就被低估的风险源。相关风险有两个，一个是补偿标准和政策适用风险，就是概算里用的补偿标准跟地方最新的政策或者情况不一致，这样后面的资金需求就比预计的大得多；另一个是实施范围和难度预估不足的风险，对要拆迁的对象数量、种类以及协调难易程度估计得再好，结果征地工作进度远远落后于计划，直接影响到主体工程开工。重点审查征地拆迁费用的测算依据是否进行了充分的实地调查，对当地的相关政策文件进行复核，预控征地问题造成的工期延长及投资暴涨风险^[8]。

三、工程招投标与建设过程的投资风险监控与审计

（一）招标与合同体系合规性风险审计

工程招投标是市场化配置资源、决定工程承建商和合同价格的关键环节，过程合法合规是防止投资风险的重要防线。招标过程中的风险主要是由于招标文件编制的缺陷、评标标准设置不公平以及评标流程的不透明所造成的，这很容易导致最后的结果不能够体现公平性，并且还可能会引起合同纠纷问题，加大投资的不确定性。合同体系的风险在于合同条款的严谨和周密，审计要审查招标文件中的工程量清单是否准确、技术规范是否清楚；审查评标委员会构成及评标报告结论是否客观公正。对于签订的工程总承包合同、设备采购合同、勘察设计合同等要进行全面审核，着重关注合同价格形式、付款方式、变更处理、索赔以及违约责任等内容条款，找出由于合同约定不明或者权责不对等所造成的影响投资控制的因素^[9]。

（二）工程变更与现场签证真实性风险的审计研究

工程变更和现场签证成为工程建设阶段造成投资增加的主要原因，并且是工程风险高度集聚的地方。此部分风险主要是变更签证的必要性、真实性和计价准确性产生的。必要性风险是由于非客观因素造成可以避免的设计变更或者施工方案改变所造成的。真实性风险主要指变更的虚增内容、签证工程量虚假放大。计价准确性风险主要指套用定额不正确、材料价格差计算不规范或费率计取有误。审计介入的重点是建立起对于变更及签证同步监管的机制，在施工现场实地勘察，考察变更起因是否充分、流程是否规范、工程量确认手续是否齐备。对于变更部分的计价，要按照合同的规定以及有关计价规范的要求来重新审定，剔除掉不合情理的新发生的额外费用，避免用变更之名轻易地超出了投资额度。

（三）设备材料采购与资金支付联动风险的审计分析

电力工程里，设备材料费用占总投资的很大一部分，一般可以达到40%~60%左右。此领域风险并不只是采购价格，更是

采购过程和资金支付流程的联动控制，采购价格的风险在于采购方式不规范，或者市场询价不足导致采购成本过高。联动风险体现在资金支付与合同履行进度脱节，比如在设备未到货或验收不合格时就支付大量预付款或进度款，造成资金沉淀成本上升和供应商违约风险。审计工作要针对大宗设备材料的采购流程予以追溯，查看其是不是做到了规定中的招标或者比价程序。建立资金支付审核防线，工程款的每笔支出都和合同约定的履约节点、监理单位认可的工程进度、收到物资验收入库单据严格匹配起来，保证了资金支付的安全性、高效性并精准对应实际施工情况。

四、竣工结算阶段的投资风险确认与审计

（一）竣工计量准确性与结算依据有效性审计风险

竣工结算是项目建设全部投资的最终确认，是投资风险的最后暴露点。结算的准确性风险首先表现在竣工工程量的计量上。审计要求以经过审定的竣工图为基础，对实际已完成的各工程项目进行精确结算。审计需将施工单位报送的结算工程量与竣工图、设计变更、现场签证等相关材料一一对照，并结合必要的现场抽样核实来查明是否存在多算或者重复计算的情况。结算依据的有效风险是所有支撑材料的有效性，即计价时所用到的全部支持文件是否有效，审查结算范围内所有的经济文件，如材料价格调整批复、工程变更指令、索赔处理意见等文件，必须符合审批手续完备，签章齐全，合同约定条件，对不符合条件的费用不予确认，守住投资控制的最后一道防线。

（二）竣工决算编制合规性与资产完整性风险的审计分析

竣工决算报告是对项目从筹建到完成期间的各项实际开支及财务成效所做的概括性文件，其编撰时出现的风险之一就是成本费用的汇集与分配没有按国家的基本建设财务管理规范来进行。审计要检查各个建设项目成本是否被分到建筑工程投资、设备投资和其他费用之中，是否存在不应计入项目成本的支出混入的情况。资产完整性风险是竣工决算审计的另一个核心，即项目投资所形成的固定资产、无形资产等是否全部准确转入并登记入账。

审计工作需要对决算报告中新增的资产清单与现场实物，设备技术资料进行核对，账卡物相符。通过核实资产不仅能够避免国有资产的流失，还能够为后面的生产运营成本核算、效益评价打下真实可靠的基础。

（三）工程尾款及遗留问题处理的风险审计

工程尾款，尤其质量保证金的支付，是项目结算之后的一道重要关卡，其处理办法直接影响到项目的最终投资成果和存在的风险。此环节的风险为质保金的返还时间与条件把控不严格，若施工单位在工程缺陷责任期内未尽到保修义务，在建单位却过早或是全部返还了质保金，后期对缺陷的修理就会转化为额外的投资损失。审计要关注质保金管理台账的创建及执行情况，核查是否存在对缺陷责任期内工程运行状况的记录，检查已发现的所有缺陷是否都得到妥善修复^[10]。审计要对尚存的合同争议、索赔等问题做出影响最终投资额的估计并审查其解决方案是否符合规定且经济合理以保证投资项目最终锁定时所有的风险及债务都已经确定。

五、结语

综上所述，电力工程投资风险的防控是一项长期性的工作，不能只依靠某一个环节进行局部控制。从全过程审计的视角来看，把审计监督的触角伸向项目立项、设计、招投标、建设实施到竣工结算的每一项关键环节当中，就可以形成起一个全方位、全覆盖的风险防控系统。这种模式的价值主要体现在，它不是简单地对已经出现的投资偏差进行事后评价，而是在项目的整个生命期内，针对经济活动实施同步审查并执行动态监督，从而达到对投资风险早期警报以及过程纠偏的目的。通过对每一个阶段的决策依据，概算编制，合同履行，工程变更，结算计量等高风险环节进行精确的审计，可以控制住投资失控的根本源头，保证整个工程的投资真实可靠，合理合规，经济有效。从而实现电力工程项目的最大化的投资收益。

参考文献

- [1] 梁丽颜. 新形势下电力工程审计的目标与风险防范策略 [J]. 中国商界, 2024, (08): 171-173.
- [2] 时翔, 李磊, 陈宏业, 等. 电力行业工程全链条数字化审计研究与实践 [J]. 中国内部审计, 2024, (06): 42-49.
- [3] 梁雨婷. 电力工程项目审计风险及其防范措施探讨 [J]. 新丝路 (下旬), 2021, (9): 0245-0246.
- [4] 邹曙波. 电力基建工程财务审计分析 [J]. 首席财务官, 2021, 17(14): 43-44.
- [5] 郑军东, 张养辉, 胡晓元, 等. 大数据环境下电网工程投资内控风险审计机制探析 [J]. 中国内部审计, 2019, (03): 72-76.
- [6] 赵宏杰, 张松科. 全过程跟踪审计在电力企业工程审计中的应用 [J]. 商情, 2024(15).
- [7] 曹华彬, 吴铭, 孙静静, 等. 基于“全过程跟踪审计”预算风险防控体系的构建 [C]// 吉林省电机工程学会 2023 年学术年会. 国网长春供电公司, 2023.
- [8] 李想. 电网工程项目全过程跟踪审计案例研究 [D]. 新疆财经大学, 2020.
- [9] 毛映迪. 电网企业工程投资审计质量管控优化研究 [J]. 中小企业管理与科技, 2024(4): 91-93.
- [10] 周奎. 电力工程项目审计风险及其防范措施探究 [J]. 中文科技期刊数据库 (全文版) 工程技术, 2020(11): 2.

自来水给水管道漏水防治技术探究

张权锋

蕉岭县供水服务中心，广东 梅州 514199

DOI:10.61369/WCEST.2025070015

摘 要： 自来水给水管道泄漏会引发多重危害，包括增加供水企业运营成本、诱发地面塌陷等次生灾害、加剧区域水资源压力，并导致系统运行效率下降与资源投入失衡。泄漏成因涉及环境与材料特性、管材质量、施工工艺及运维管理等多方面因素。为有效防控泄漏，需在管道投运前进行系统验证，运行中采用先进监测技术，并持续开展防漏技术研发、管道更新改造及系统性防控机制建设，从而提升管网安全性与运行效率。

关 键 词： 自来水给水管道；泄漏；防治技术

Exploration of Leakage Prevention and Control Technologies for Tap Water Supply Pipelines

Zhang Quanfeng

Jiaoling County Water Supply Service Center, Meizhou, Guangdong 514199

Abstract： Leakage in tap water supply pipelines can lead to multiple hazards, including increased operational costs for water supply enterprises, secondary disasters such as ground subsidence, exacerbated regional water resource pressure, reduced system operational efficiency, and imbalanced resource allocation. The causes of leakage involve various factors such as environmental and material properties, pipe quality, construction techniques, and operational maintenance management. To effectively prevent and control leakage, it is necessary to conduct systematic verification before pipeline commissioning, employ advanced monitoring technologies during operation, and continuously engage in the research and development of leakage prevention technologies, pipeline renewal and renovation, and the establishment of systematic prevention and control mechanisms, thereby enhancing the safety and operational efficiency of the pipeline network.

Keywords： tap water supply pipeline; leakage; prevention and control technology

引言

供水管网作为城市基础设施的重要组成部分，其安全稳定运行直接关系到社会经济发展与公共健康保障。然而，管道泄漏问题长期困扰着供水行业，不仅造成水资源的巨大浪费，还会带来一系列经济、环境与社会风险。随着城市规模扩大与管网老龄化加剧，泄漏防控已成为供水系统管理中的关键课题。本文系统分析了管道泄漏的主要危害及成因，并针对性地探讨了涵盖技术研发、系统优化与管理创新的综合防治策略，以期为提升管网运维水平提供参考。

一、自来水给水管道漏水产生的危害

（一）供水企业运营压力增大

自来水输水管道发生泄漏会直接导致供水企业的运营成本上升。除了需要承担更多用于原水净化与管网输送的直接费用外，企业还需为漏损引发的日常检修、应急抢修、部件更换及配套设备升级等环节持续投入资金。同时，泄漏破坏了输水系统的物理密封状态，一旦管道内部压力下降或出现停水情况，外部土壤中的污染物、微生物等可能渗入管内。在特定水力波动条件下，甚至会产生负压射吸效应，将周边地下水或污水吸入管道，从而对

饮用水水质安全构成潜在威胁，并进一步增加水质处理的复杂性与成本。

（二）诱发次生工程灾害与资源压力

管道泄漏不仅造成水资源直接流失，更会引发一系列连锁性工程问题。持续渗漏会冲刷并带走管道周围的回填土，导致土壤结构被掏空，在地下形成潜蚀空洞。随着水土流失的持续，空洞规模不断扩大，最终将引起上部道路或地表突发性塌陷，严重威胁车辆通行与行人安全，甚至可能造成重大生命财产损失。此外，泄漏会加剧区域性的缺水困境。无论是由于水源匮乏、基础设施不足还是水质污染导致的缺水类型，管道泄漏都意味着本可

有效利用的水资源被浪费，从而进一步放大供需矛盾，使缺水形势更为严峻。从系统运行角度看，泄漏点等同于管网中的一个非法泄压点，会直接导致系统压力异常下降。为了保证末端供水压力，企业必须额外提升泵站能耗，并频繁调整管网阀门与泵组运行策略，这无疑大大增加了系统调度管理的复杂性与日常工作量^[1]。

（三）系统运行负担与资源投入失衡

管道泄漏导致供水系统有效利用率下降，为维持用户端正常水压，企业不得不提升输配水泵站的运行负荷，从而显著增加电能消耗，造成能源的额外支出。同时，由于部分供水能力在输送途中因漏损而流失，系统整体产能利用率降低。随着城市用水需求的持续增长，供水企业往往被迫提前扩建产能设施，导致系统设计产能长期高于实际所需，造成投资冗余和资源浪费。此外，持续泄漏会使周边地下水位升高，不仅增加工程施工中的降排水难度与成本，在寒冷地区还会因冬季水分冻结引发地面冻胀，破坏路面铺装结构，影响市容整洁与交通安全^[2]。为控制漏损，供水企业需持续投入资金用于管网更新与监测技术升级，但在实际运营中，控漏投入与效益回报之间常难以建立合理平衡。长期来看，由漏损带来的运营成本上升、资源浪费及额外投资压力，最终可能传导至终端水价，对供水定价机制形成潜在影响。

二、自来水给水管道漏水原因分析

（一）环境与材料作用引发的管道失效

在我国城镇供水系统中，铸铁管材曾长期作为主要输水材料被广泛铺设。这类管材受材料特性影响，对温度变化较为敏感，尤其在春秋季气温波动显著时，因热胀冷缩效应导致管道应力集中，容易发生爆管事故。一旦出现爆管，往往会造成管体破裂或接口脱开，引发更大范围的供水失效。除气温变化外，管道所处的外部土壤环境也会对其耐久性产生影响。土壤中所含水分、化学物质等在温度作用下可能加速对铸铁管的腐蚀进程，削弱管体结构强度。同时，若管道敷设区域出现地质不均匀沉降，会使管段受力失衡，局部薄弱环节在反复外力或周期性温度应力下，接口易发生挠曲、错动甚至松脱^[3]。此外，当管道周边存在坚硬异物挤压，或在严寒条件下周围土体冻胀时，也会对管壁形成额外荷载。这些自然条件变化与外部介质影响共同作用，持续加剧管道结构的损伤风险，成为系统安全运行的潜在威胁。

（二）管材性能与施工管控的影响

在供水管网中，管材自身质量是决定其服役年限的关键因素之一。以过去广泛使用的铁质管道为例，不同批次或不同厂家生产的产品在性能上可能存在显著差异，这种不均匀的材料质量会直接影响管道的耐久性与可靠性。具体而言，管体的刚性决定了其抵抗外部荷载的能力，延展性影响在受力变形时的缓冲性能，而管壁厚度则关系到长期抗腐蚀及耐磨损的强度。在实际工程应用中，许多管道破损问题可追溯至建设阶段的管控不足。例如，部分施工单位在材料进场时未严格执行质量检验标准，导致存在缺陷的管材被投入使用。此外，若施工过程中缺乏统一的工艺规

范与技术指引，如接口处理不当、回填压实不足或防腐措施不到位，都会对管道整体结构完整性造成损害，为后期运行埋下安全隐患。

（三）施工工艺与过程管控的潜在影响

供水管道的安装过程涵盖运输、沟槽开挖、管道铺设及回填等多个环节。在这些工序推进期间，管体与吊装设备、坚硬石块或槽壁之间难免发生碰撞或摩擦，极易损伤管道外壁的防腐涂层或保护结构。这种施工阶段形成的表面缺陷，将显著降低管道在长期运行中的抗腐蚀能力，进而埋下破损与泄漏的隐患。此外，施工过程中的清洁作业质量同样至关重要。若在管道安装前未对其内部进行彻底清理，残留的泥沙、油污或杂物会在通水后持续影响水质，并加剧内壁磨损与结垢。同样，管道基础的施工若未按规范进行——例如基底不平整、承载力不足或未设置有效垫层——将导致管道在回填及使用阶段产生不均匀沉降或应力集中，从而影响管网的长期稳定运行，缩短系统使用寿命^[4]。

（四）运维管理与外部操作的影响

供水管网在长期运行过程中，需要实施系统化的维护与定期检测。如果缺乏及时的养护措施，管道内壁易出现腐蚀或结垢现象，结构强度将逐渐下降，从而显著缩短其服务年限。然而，维护工作也需遵循科学规划，若检修或更换过于频繁，不仅会干扰正常供水，反复启闭与拆卸还可能对管体及接口造成机械疲劳，反而削弱其整体密封性与耐久性。此外，管道在运输、装卸及现场搬运过程中如遭受强烈碰撞或挤压，其表面防护层可能受损，局部应力集中也会导致微观裂纹的产生。这些初期未被察觉的损伤，会在管道投入运行后逐步扩展，在压力波动与地基变形的共同作用下，进一步提高漏水的风险概率。因此，无论是运维策略的失当，还是施工运输阶段的人为操作不当，均会从不同层面影响管道系统的完整性与可靠性，须加以系统规范和全过程控制。

三、自来水给水管道漏水防治技术

（一）管道投运前的系统验证

管道预调试是确保新建或改造后的管道及其附属系统在正式投入使用前具备安全输送介质并保持结构完整性的关键流程。该环节通常在管道建设完工后、正式投入运行前实施，涵盖一系列系统性的检验与准备程序。当管道完成预调试并开始输送预定介质时，这一阶段则被称为管道调试或系统启动。预调试工作的主要内容包括：首先进行管道冲洗、消毒，通常采用清洁水高速冲刷管道，流速 $\geq 1.0\text{m/s}$ ，直至出水浊度、透明度与进水一致，有效清除施工过程中残留的泥沙或其他可能引发堵塞或腐蚀的杂质，消毒首选含氯消毒溶液，确保管道内游离氯浓度 $\geq 20\text{mg/l}$ ，浸泡 ≥ 24 小时，消毒后再用清洁水再次冲洗，直至出水氯味消失，余氯 $\leq 0.8\text{mg/l}$ ，经检测合格后方可通水；其次实施管道测量，通过内径检测与轮廓分析验证管道的尺寸精度与形状规整度，确保其符合设计输送能力与流体性能要求；最后开展管道充填，对于中小口径或特定结构管道，一般采用水作为介质进行通水试验，以模拟实际运行状态并检验系统密封性。此外，完整的预调试流

程还涉及外观与连接检查、压力试验以验证承压性能，系统试运行以确认分段控制能力，水质检测等系列验证项目，全面评估管道的可靠性与安全性。

（二）管道泄漏监测与识别方法

管道泄漏监测技术旨在识别和定位输送液体介质的管道系统中发生的非正常泄漏。常用的检测手段包括施工完成后的水压密封试验，以及在管道运行维护阶段采用的红外热成像、激光扫描等无损探测方法。作为长距离输送关键基础设施，管道系统必须持续满足严格的安全可靠性与运行效率标准。在规范维护条件下，管道可长期保持密封状态，而实际运行中最严重的泄漏多源于第三方施工活动导致的机械损坏。若管道缺乏定期维护，管体易发生腐蚀，尤其在接口连接处、易积水部位或存在原始缺陷的管段，此类隐患可通过内检测器等诊断工具提前识别并在泄漏发生前予以修复。其他泄漏诱因还包括地质灾害、交通载荷或人为破坏等外部因素。泄漏检测系统（LDS）的核心功能在于协助运营人员及时发现泄漏并精确定位，系统通过实时报警与数据集成辅助决策分析，有助于缩短事故响应时间、提升系统可用性与运行可靠性。

（三）防漏技术研发与创新体系建设

为系统提升供水管网防漏水平，建议设立专注于管道防漏技术研究的专职部门，持续推进检漏设备创新与防漏工艺研发。当前城市环境中的背景噪声干扰、密集交通振动及地下管网错综复杂等现实条件，使传统声学检漏方法在实际应用中面临巨大挑战。因此，亟需研发适应复杂工况的新型检漏技术，这类技术应具备抗干扰能力强、操作便捷的特点，能够有效提升现场检漏作业的精准度与效率。同时，可考虑创建集技术培训与科研开发为一体的综合中心，系统规划并推进管网监测体系的完善和水厂处理工艺的整体升级。该中心应致力于开展贴合实际需求的技术攻关，重点研发能够快速响应现场条件变化、及时解决一线问题的实用型技术与方法，形成从技术研发到现场应用的完整创新链条，为管网安全运行提供持续技术支持^[5]。

（四）管道更新与系统性优化策略

实施老旧管道的系统性更换工程，是控制供水管网泄漏风险的关键措施。通过将供水区域合理划分为更小的独立计量区块，

可有效提高管网压力调控精度与运行管理效率。在突发泄漏事件中，这种分区管理模式能够将水压波动和停水影响控制在有限范围内，显著缩小受影响用户范围，提升应急响应能力。在管材技术方面，持续推进新型材料的研发与应用，包括采用 PE-RT 管（耐热聚乙烯管）、HDPE 管（高密度聚乙烯管）、耐用性极强的不锈钢管等，并结合水质稳定性调控（如优化朗格利尔指数），可有效抑制管道内壁腐蚀与结垢现象，延长管网使用寿命。对于接入用户的供水支管，应优化敷设路径，减少不必要的延伸长度，从而提高系统有效供水效率。同时，针对不同金属材料间的电化学腐蚀问题，在市政道路下方等关键区段，可采用绝缘联接件或不锈钢管材逐步替代传统金属管道，从结构设计与材料选择层面提升管网的长期耐久性。

（五）构建系统性渗漏防控机制

地下供水管网渗漏检测应纳入常态化、计划性的运维管理体系，并需预先构建科学完善的工作机制，以切实降低管网漏损率。考虑到泄漏调查通常需要投入大量时间与资金，在制定防控策略时必须充分权衡成本与效益，确保技术经济可行性。为提升防控工作的精准性，应对历年泄漏记录开展长期趋势分析，识别高频泄漏区段与关键诱因，从而有针对性地安排巡检与维护重点。此类分析需依托专业的分析理论与评估方法，建议供水主管部门与科研机构、专业技术公司建立合作机制，共同研发适应本地管网特征的高效防漏技术与管理模式，形成数据驱动、科学决策的渗漏防控体系。

四、结束语

自来水给水管道路漏水防治是一项涉及多环节的系统工程，需从技术与管理层面协同推进。通过构建覆盖管道规划设计、建设验收、运行监测及维护更新全生命周期的防控体系，结合新型材料应用、智能监测技术开发和科学管理机制建设，可显著提升管网运行的可靠性与经济性。未来应持续加强跨领域合作，推动数据驱动决策与创新技术集成应用，最终实现供水系统安全、高效、可持续的运行目标。

参考文献

- [1] 矫立磊. 自来水给水管道路漏水防治措施探究 [J]. 魅力中国, 2020(11): 293-294.
- [2] 陈健. 自来水给水管道路漏水防治措施探究 [J]. 装饰装修天地, 2019(16): 254.
- [3] 张文海. 自来水给水管道路漏水防治措施探究 [J]. 百科论坛电子杂志, 2021(19): 1801.
- [4] 张振楠. 市政给水管道路工程施工质量控制及管理措施研究 [J]. 数码 - 移动生活, 2020(12): 254.
- [5] 胡荣国. 自来水给水管道路漏水防治措施探究 [J]. 建筑工程技术与设计, 2020(12): 2932.

