

现代工程学

Modern Engineering



ART AND TECHNOLOGY PRESS INC.

(517 666 0904)

263 S KENWOOD ST 560

CASPER, WY 82601

Copyright © 2026 by ART AND TECHNOLOGY PRESS INC. (United States)

Complimentary Copy



ART AND TECHNOLOGY PRESS INC.
(United States)

Editorial Board Member

Xiaoli He

Zhejiang Tongfang Engineering Management Consulting Co., Ltd.

Xiaoshi Yan

Chifeng Saige Architectural Planning and Design Co., Ltd.

Jiaming Li

North CMA Technology Co., Ltd.

Xiao Yu

Chongqing Zongheng Engineering Design Co., Ltd.

Wei Su

Cinotop Electronics Co., Ltd.

Yi Wu

Tian'an (Shanghai) Investment Co., Ltd.

现代工程学

Modern Engineering

第3卷 第7期 2026年7月刊

主管 ART AND TECHNOLOGY PRESS INC.

主办 ART AND TECHNOLOGY PRESS INC.

编辑 《现代工程学》编辑部

ISSN(O): 2996-6981

ISSN(P): 2996-6973

地址: 263 S KENWOOD ST 560

CASPER, WY 82601

网址: <https://arttechpress.com>

本刊说明:

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

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



建筑工程 | ARCHITECTURAL ENGINEERING

- 001 多类型建筑工程(房地产、公共、民用等)技术管理与风险管理的耦合机制及实践路径研究 张华
Research on the Coupling Mechanism and Practical Pathways of Technical Management and Risk Management in Multi-Type Construction Projects (Real Estate, Public, Civil, etc.) Zhang Hua
- 005 提升防水保温上人屋面成型观感并降低质量缺陷的深入研究 潘宝贵, 马恒伟, 卢文培, 王炎震
In Depth Research on Improving the Appearance of Waterproof and Thermal Insulation Roof Molding and Reducing Quality Defects Pan Baogui, Ma Hengwei, Lu Wenpei, Wang Yanzhen
- 009 建筑配电项目电气安装质量控制与运维管理协同机制探讨 钟佰荣
Exploration of the Collaborative Mechanism for Quality Control in Electrical Installation and Operation & Maintenance Management in Building Power Distribution Projects Zhong Bairong
- 013 技术创新背景下房地产建筑工程风险管理的优化策略探析 许鹏
Analysis of Optimization Strategies for Risk Management in Real Estate Construction Projects under the Background of Technological Innovation Xu Peng
- 017 房屋建筑工程中施工进度控制的优化策略研究 李昆明
Research on Optimization Strategies for Construction Progress Control in Housing Construction Engineering Li Kunming
- 020 人防工程质量监督体系构建与完善: 十年实践经验的反思与探索 周权
Construction and Improvement of Civil Air Defense Project Quality Supervision System: Reflection and Exploration Of Ten Years of Practical Experience Zhou Quan
- 024 PVC/ABS 合金改性材料的配方优化与工艺创新 邵峰
Formulation Optimization and Process Innovation Of PVC/ABS Alloy Modified Materials Shao Feng
- 027 金属材料的相变动力学与微观结构调控 何勇
Phase Transformation Kinetics and Microstructure Control of Metallic Materials He Yong
- 030 砖木结构房屋现场安全检测的工程实际应用 倪卫辉
Practical Application of On-Site Safety Inspection for Brick and Wood Structure Houses Ni Weihui
- 033 建筑环境优化与低碳节能施工技术创新研究 张露兮
Research on Optimization of Building Environment and Innovation of Low-Carbon and Energy-Saving Construction Technology Zhang Luxi

机械工程 | MECHANICAL ENGINEERING

- 036 印刷包装领域复合机、分切机与制袋机电维修保养体系的构建及效能评价 钟新华
Construction and Performance Evaluation of the Electromechanical Maintenance And Repair System for Composite Machines, Shearing Machines and Bag-Making Machines in the Printing Packaging Field Zhong Xinhua
- 040 装配式单跨简支斜转正 T 梁结构受力分析 张秋石
Stress Analysis of Prefabricated Single Span Simply Supported Inclined to Normal t-Beam Structure Zhang Qiushi

044	第二代木材单板上板机设计与应用研究 Research on the Design and Application of Second-Generation Wood Slab Boards	罗文航, 周楚虹, 韦克磊, 陈大兴 Luo Wenhang, Zhou Chuhong, Wei Kelei, Chen Daxing
047	面向绿色制造的机电控制节能技术体系构建研究 Research on the Construction of Electromechanical Control Energy Saving Technology System for Green Manufacturing	骆龙 Luo Long
050	基于 AMESim 建模的船舶开式舵机故障仿真分析 Fault Simulation Analysis of Open-Type Ship Rudder Mechanism Based on AMESim Modeling	周子童, 张志远, 孙鹏 Zhou Zitong, Zhang Zhiyuan, Sun Peng
053	隧道防水板挂布台车机器人设计及应用 Design and Application of Tunnel Waterproof Board Hanging Cloth Trolley Robot	程波, 乌伟, 贾家银, 刘绿友, 邓传伟, 谢辉, 何国田, 赵伟 Cheng Bo, Wu Wei, Jia Jiayin, Liu Lvyou, Deng Chuanwei, Xie Hui, He Guotian, Zhao Wei
056	卫星导航抗干扰自动化测试系统设计与实现 Design and Implementation of Satellite Navigation Anti-interference Automatic Testing System	郑楷 Zheng Kai
060	面向多车型混线生产的汽车柔性装配系统设计与优化 Design and Optimization of Automotive Flexible Assembly System for Multi Vehicle Hybrid Production	葛晶 Ge Jing
063	汽轮机轴封漏汽问题分析与优化改造研究 Analysis and Optimization Transformation Research on Steam Leakage from Steam Seal of Turbine	郑旋 Zheng Xuan
066	污泥浓缩池改二级中和反应池的非标设计与实践 Non Standard Design and Practice of Converting Sludge Concentration Tank into Secondary Neutralization Reaction Tank	梁启瑜 Liang Qiyu

能源工程 | ENERGY ENGINEERING

069	河市储配煤基地集控信息一体化关键技术研究与应用 Key Technology Research and Engineering Application of Centralized Control Information Integration in Heshi Coal Storage and Distribution Base	陈艳红 Chen Yanhong
073	光伏微网在电子玻纤工厂的调峰策略研究 Research on Peak shaving Strategy of Photovoltaic Microgrid in Electronic Fiberglass Factory	邓子昂 Deng Ziang
077	复杂海域疏浚工程中创新采砂洗砂工艺的应用及效能提升研究 Research on the Application and Efficiency Improvement of Innovative Sand Mining and Washing Technology in Complex Sea Dredging Projects	师松涛 Shi Songtao
081	长白山碱性岩体矿物组成与岩浆演化序列研究 Study on Mineral Composition and Magma Evolution Sequence of Changbai Mountain Alkaline Rock Mass	李殿春, 白志杰, 魏海峰, 唐雪峰, 柳俊乾, 范仲洲, 马跃, 李涛涛 Li Dianchun, Bai Zhijie, Wei Haifeng, Tang Xuefeng, Liu Junqian, Fan Zhongzhou, Ma Yue, Li Taotao
084	新能源工程施工进度管控优化措施 Optimization Measures for Project Progress Control in New Energy Engineering Construction	邸文亮 Di Wenliang
087	空气能热泵在单板烘干的应用与展望 Applications and Prospects of Air Source Heat Pumps in Single-Panel Drying Systems	农宏亮, 周楚虹, 洪广, 朱夏熠 Nong Hongliang, Zhou Chuhong, Hong Guang, Zhu Xiayi
090	基于区块链的煤炭供应链溯源与结算平台设计 Design of a Blockchain-Based Coal Supply Chain Traceability and Settlement Platform	杨少国 Yang Shaoguo
093	一类具有 RPS 循环的生态模型的动力学研究 Dynamical Analysis of a Ecological Model with RPS Cyclic Effect	储蕃松 Chu Zhusong
096	绿色低碳理念下工程项目资源管控模式探究 An Exploration of Resource Management and Control Models for Engineering Projects under the Green and Low-Carbon Concept	梁丹 Liang Dan
099	电力系统高压电气设备故障自动化监测方法研究 Research on Automated Monitoring Methods for High Voltage Electrical Equipment Faults in Power Systems	尤华熠, 尤婷 You Huayi, You Ting
102	风机变频器故障引发电网电能质量扰动的综合治理与检修技术 Comprehensive Management And Maintenance Technology For Power Grid Power Quality Disturbances Induced by Fan Converter Failures	史豪杰 Shi Haojie
105	大型火电机组差动保护误动原因分析及防范措施 Analysis of Causes of Differential Protection Malfuction in Large Thermal Power Units and Preventive Measures	温士又 Wen Shiyou
108	某 600MW 机组锅炉水冷壁泄漏原因分析及防范措施 Analysis of Leakage Causes of Water-Cooled Tubes in A 600MW Unit Boiler and Preventive Measures	殷政万 Yin Zhengwan
111	基于故障录波的火电厂电气故障诊断方法研究 Research on Electrical Fault Diagnosis Method for Thermal Power Plants Based on Fault Recording	张荣平 Zhang Rongping
114	水电工程运行常见问题及解决对策研究 Research on Common Problems and Solutions in the Operation of Hydroelectric Engineering	杨聪颖 Yang Congying

多类型建筑工程（房地产、公共、民用等）技术管理与风险管理的耦合机制及实践路径研究

张华

广东国竣建筑工程有限公司，广东 阳江 529600

DOI:10.61369/ME.2026070003

摘 要： 本文专注房地产、公共、民用等多种类型的建筑工程项目，全面研究技术管理和风险管理的耦合机理以及实践途径。分析不同工程类别的技术管理特性与风险差别，结合实例验证 BIM、物联网等数字化技术的运用，提出跨专业协作、全生命周期管控等途径，为工程管理提供理论支持与实践指引。

关 键 词： 多类型建筑工程；技术－风险管理耦合；数字化工程管理

Research on the Coupling Mechanism and Practical Pathways of Technical Management and Risk Management in Multi-Type Construction Projects (Real Estate, Public, Civil, etc.)

Zhang Hua

Guangdong Guojun Construction Engineering Co., Ltd., Yangjiang, Guangdong 529600

Abstract： This paper focuses on real estate, public, civil and other types of construction projects, and comprehensively studies the coupling mechanism and practical approach of technology management and risk management. This paper analyzes the technical management characteristics and risk differences of different engineering categories, verifies the application of digital technologies such as BIM and Internet of Things with examples, and puts forward ways such as cross-professional collaboration and full life cycle management and control, so as to provide theoretical support and practical guidance for engineering management.

Keywords： multi-type construction projects; technical-risk management coupling; digital engineering management

引言

建筑工程技术管理和风险管理的深度协作是确保工程全生命周期质量安全、提高建设效益的要点。2023年7月住房和城乡建设部等相关部门发布《关于推动智能建造与建筑工业化协同发展的指导意见》，清晰提出要加强技术和风险的一体化管理，为行业的数字化变革指引方向。各类建筑工程（如房地产、公共、民用等）由于功能定位、使用需求不同，技术管理要点与风险特性有明显差异，传统的分离式管理模式难以适应现代工程的复杂要求。本研究专注于多类型工程技术管理和风险管理的耦合机制开展探讨，融合理论分析与实际案例，探寻二者相互嵌入的途径与办法，为加强建筑工程管理的精确性与协同性提供理论根据和实践模式。

一、多类型建筑工程技术管理与风险管理的基础理论

（一）建筑工程技术管理基础与类别划分

建筑工程技术管理通过系统工程、项目管理以及技术创新理论，经由对技术要素开展规划、组织和控制，确保工程全流程的技术可行性、经济性与安全性^[1]。不同种类建筑项目由于功能定位有别，技术管理要点差异明显：房地产项目重点成本和市场导向，公共项目突出社会效益与规范遵循，民用住房关注结构安全和居住质量，商业楼宇要兼顾机电集成与空间灵活度，厂房项目

是以工艺适配性作为核心。各类工程项目在设计、建造与运营维护过程中都要根据技术规范，开展质量管控并进行技术交底，其共性较为清晰；不过管理的重点有所不同，例如房地产项目更侧重进度与成本的协同把控，公共工程项目重点强化功能论证，厂房项目则重视设备维护以及工艺升级。上述的共性和差异为开展分类管理以及耦合机制研究提供理论支撑。

（二）工程风险管理理论及其演化

工程风险管控理论重点于系统辨识、量化评测与动态调控工程全生命周期的不确定性，其发展历经经验推动、定量模型引领

到当下智能集成时期。初期重点单一风险处理，20世纪80年代之后，风险矩阵、蒙特卡洛模拟等工具促使理论结构化，BIM和物联网等技术催生动态风险管控方案^[2]。此理论于各类工程里展现出不同的适用性：房地产重点市场起伏与工期滞后，公共工程专注安全合规和社会效应，民用建筑兼顾成本把控与居住感受。在风险的识别、评估、控制以及监控的闭环程序里，技术管理和风险管理的耦合形势明显，例如BIM实现风险源的可视化辨识，智能监测体系实时反馈风险演变数据，促使二者从并行朝着深度融合发展。

二、房地产及其他主要类型建筑工程的技术管理特征与风险类型分析

（一）房地产与公共建筑工程技术管理特征及风险类型

房地产工程技术管理以市场需求作为导向，重点全生命周期成本管控与进度协同，包含方案设计的优化、施工工艺的标准化以及供应链整合，依靠多主体协作实现投资回报的最大化。公共建筑项目围绕功能需求展开，注重技术方案改革与系统整合，包括结构力学设计和智能化安排等复杂交融内容，要建立跨部门协作机制来确保公共利益与使用安全^[3]。两种工程风险类别既有共性又有差异：设计环节存在方案瑕疵或参数误差，施工环节面临工艺欠佳或资源调配失当，质量风险涉及材料性能不符合标准，安全风险包含防护不到位与结构隐患，合规性风险包括环保或消防未达要求等。房地产领域更易受成本起伏和工期拖延影响，公共工程项目则要应对技术创新的不确定性以及公众需求的动态改变，二者都需要通过技术管理和风险管理的深度融合来实现风险的提前识别与有效管控。

（二）民用、商业、厂房建筑工程技术管理特征与风险类型

民用建筑重点关注空间布局的合理性以及施工的标准化，风险大多来自设计方面的缺陷和质量常见问题（像墙体出现裂缝、防水功能失效），规模的扩大增加材料与进度协调的难度^[4]。商业楼宇要兼顾人流引导、机电整合以及立面改革，风险专注于机电调试问题与交付滞后，复杂性加剧专业交叉矛盾。厂房建造以符合生产流程为主要，注重工艺布局精确、设备基础承载能力以及管线铺设合理，风险表现为安装精度欠缺与结构耐久性方面的问题，规模拓展容易导致资源调配紧张和方案执行不彻底。三种类型的工程存在明显差异，工程的规模、功能以及复杂程度会对技术协同和资源配置效率产生影响，进一步直接决定风险分布的范围与程度，因此需要有针对性地建立防控体系。

三、建筑工程技术管理与风险管理的耦合机制分析

（一）技术管理流程中风险管理的嵌入机制

1. 技术决策中的风险识别与预控

在多种类型建筑工程技术决策过程里，风险识别和预控要与技术挑选同时嵌入，建立耦合节点。决策包含方案挑选、工艺选择、材料择用等步骤，都要从风险角度评估技术适配性：例如房

地产装配式技术要预估构件运输损耗和吊装精度方面的风险，公共工程大跨度结构要识别风荷载与地震安全相关的风险，民用建筑绿色技术要评估节能效果和成本超支的风险。通过搭建技术参数和风险因子的映射模型，把地质状况、施工水平等变量转变为约束条件，实现风险前置处理。采用BIM虚拟仿真对风险演化路径进行模拟，通过FMEA对风险概率与影响加以量化，从而为预控工作提供根据。技术抉择通过优化策略降低风险几率（像高强度材料降低裂缝）、清楚标准加强应对能力（如专项规程防控坠落）、创新跨越传统局限（如模块化施工削减现场风险）。此过程要建立跨部门协作，让风险预控措施深度嵌入技术方案的设计与执行^[5]。

2. 技术管理执行阶段的风险动态管控

在技术管理的执行时期，风险动态管控要融入设计、施工、运营等各个环节。在设计环节通过BIM数字化模型及时识别结构安全方面的风险以及技术冲突情况，同时结合风险数据库和参数化工具，对地基沉降等潜在问题进行提前预警。施工期间通过物联网传感器收集混凝土浇筑、钢结构安装等主要工序的参数，结合风险评估模型对技术方案进行动态调整，例如在高支模施工时通过应力监测启动响应机制来优化支撑体系。在运营阶段搭建智能运维平台，对设备运行和结构健康数据进行耦合分析，判别技术系统的退化风险，例如当电梯出现振动异常状况时启动联动修复流程^[6]。此机制规定数据、决策、执行这三层要深度结合，通过实时的数据共享以及算法迭代来提高响应速率。多种类型的工程（例如房地产成本的敏感性、公共建筑的安全性）要进行定制化的嵌入模块操作，以此保证耦合机制拥有实践方面的韧性。

（二）风险管理对技术管理优化的影响路径

1. 基于风险预警的技术管理决策优化

风险管理在技术管理方面的优化表现为风险信息的逆向驱动。识别阶段所获取的地质状况、材料供给等数据能够促使技术方案进行适应性的调整，例如针对软土地基对基坑支护参数加以优化；评估结果为管控工作提供优先级排序，例如超高层施工根据风荷载风险对塔吊附着方案进行迭代^[7]。预警决策依靠实时监测和管理平台整合，凭借预设界限触发回应，例如混凝土强度出现偏差时自动对配合比进行调整。这种耦合促使技术管理由被动执行转变为主动预判，将预警信息转变为决策的动态输入，为成本控制、安全保障等多种场景的管理提供支撑。预警模型融合历史和实时数据，输出概率矩阵为方案筛选提供支撑，例如在既有建筑改造里根据老化预警挑选加固技术。主要在于建立风险、技术应对闭环，把预警信息转变为参数调节、工艺改革或资源重新配置指令，保证技术系统在动态风险里维持稳定与适应性，促使风险管理升级成为技术优化的核心推动力。

2. 技术标准化、信息化进程中风险的共治

技术管理和风险管理的耦合表现为目标相同以及过程相互嵌入。技术标准规范通过统一方案清晰界定风险界限与管控准则，例如BIM标准应用实现设计、施工环节的风险可视化及预控^[8]；信息化管控依靠物联网、大数据实时收集工程数据，为动态评测与技术优化提供支撑。风险辨识找出的技术漏洞能够推动标准的

修订，风险处理措施会反向促使技术和监测方法升级，例如施工安全风险防范推动监控技术更新。协同治理要建立跨主体的信息共享体系，整合建设、施工、监理等多方面的数据，通过技术平台实现风险的实时传递和协同处理；同时依靠标准化流程清晰界定各方的管控责任，形成技术管理和风险管理的闭环式联动，最终提高工程管理的整体成效。

四、多类型建筑工程技术与风险管理耦合的实践路径与创新模式

（一）房地产与公共建筑工程的管理耦合模式创新

1. 协同平台与一体化管理模式建设

协同管理系统与一体化流程为提高房地产和公共建筑工程耦合程度的创新途径。因为房地产具备高周转、成本敏感的特性，以及公共工程存在多主体、高合规性的差异，平台需要对 BIM、物联网和风险数据库进行整合，实现设计、施工、运维阶段的技术参数与风险指标的实时关联。举例来说将结构应力监测数据与进度计划数据进行集成，能够自动对超荷载风险发出预警并启动方案调整，防止决策出现割裂^[9]。一体化流程破除部门隔阂，把技术交底和风险评估融入同一工作流程，例如公共工程绿色建材选用阶段同时开展技术验证和供应链风险排查，保证选型与管控相互协作。实际运用要依靠数据共享体系，让技术和风险管理团队通过相同数据源开展工作，降低因信息不对称造成的耦合失败。

2. 项目案例驱动下的风险防控体系优化

在案例驱动的模式下，风险防控的优化工作需要提炼出具备可复制性的经验。某超高层商业建筑综合体在施工时，由于地质状况复杂导致基坑出现变形。项目团队运用 BIM 技术模拟受力情况，并与实时监测进行联动，动态调整施工方案，把损失控制在预先设定的范围内^[10]。融入税务全周期筹划以及合规管控，补充财务方面的考量。某城市市政桥梁项目运用价值工程方法识别材料和工艺方面的风险，引入模块化预制工艺来减少不确定性，同时建立跨部门协作机制以缩短处置时长。实例显示优化需以技术作支撑，搭建技术参数、风险因子、防控措施映射模型，建立动态闭环。主要价值是把 BIM 模拟流程、模块化预控要点这类隐性经验转变为显性标准，归入管理手册，实现技术、财务、运营多方面风险的一体化管控。

（二）民用与商业建筑工程管理耦合实践路径

1. 跨专业协同与全生命周期管理机制

跨学科协作与全流程周期管控为民用及商业建筑工程技术和风险管理的耦合提供核心支持。民用建筑重点安全性和舒适度，商业建筑兼顾空间利用效率与运营收益，二者要通过跨专业协作破除设计、施工、运维的障碍。设计环节整合建筑、结构、机电等各项参数，融入地质灾害与施工安全的评估工作，保证技术方案的风险处于可控范围；施工环节通过 BIM 协同平台对进度、质量以及预警数据进行实时共享，实现技术优化与风险处置的动态协同；运维环节运用物联网感知系统对结构健康和设备状态予以监测，结合历史数据库开展预测性维护，把全周期数据转变为决

策的根据。从全生命周期的角度出发，要建立技术标准和风险指标的耦合评价体系，把风险因素纳入方案可行性的论证环节，并且通过跨专业的常态化交流来保证技术调整和风险应对能够同步进行，促进两类工程管理的深度融合。

2. 智能建造与风险预警技术应用

智能建造及风险预警技术能够有效提高民用和商业建筑工程的管理耦合成效。在民用住宅里布置物联网结构健康监测体系，实时收集混凝土应力、钢结构形变等数据，通过 BIM 数字孪生体实现施工阶段质量瑕疵与安全隐患的动态预警。例如某商业综合体运用智能传感器和 AI 算法，提前 72 小时察觉深基坑支护异常位移，规避坍塌风险。在商业建筑运营时期，智能能源管理体系与风险评估模型相结合，通过分析设备数据来预估电气故障的可能性，把被动式维修转变为主动式防控。某写字楼运用此方式后，设备故障发生率降低 35%，运维费用节省 20%。实际情况显示，智能建造技术通过数据驱动的预警体系，实现技术参数和风险指标的实时关联，促使管理由经验判断朝着精准决策进行转变，为多类型工程的融合提供可复制的途径。

（三）厂房建筑工程技术—风险管理集成创新

1. 定制化管理体系及风险应急预案建设

在厂房建筑工程技术——风险管理集成创新方案下，定制式管理体系以及应急预案搭建要根据生产工艺、结构特点和行业规范的不同，搭建技术参数、风险因子动态映射模式，把钢结构安装精准度、洁净车间密封性等专项技术规定转变为风险识别指标，建立包括设计、施工、运维整个周期的定制式流程。针对设备基础下沉、重型吊车载荷突变等典型风险情形，建立分级响应的应急方案体系，运用 BIM 技术模拟风险演变路径，结合物联网监测信息实现预警阈值动态调节，保证方案可操作性与及时性。此创新通过技术标准和风险管理的深度融合，加强厂房工程质量的保障水平，为其他工业建筑提供可参考的模式，其意义在于打破管理和风险的分离状态，促使工程管理朝着精准化、协同化方向发展。

2. 工业互联网赋能下的综合管控模式

在厂房建筑工程技术的风险管理集成创新方案下，工业互联网赋能的综合管控模式搭建感知、分析、决策、执行闭环体系，实现技术参数与风险因素实时耦合。此模式通过物联网传感器收集钢结构应力、混凝土温湿度、机械运行状态等技术数据，整合安全隐患和成本超支等风险信息，通过边缘计算上传到平台。平台通过数字孪生模型对工程实体进行映射，把技术指标阈值和风险预警规则嵌入到算法之中。当技术参数出现偏离标准的情况时，会自动启动风险关联分析。例如在钢结构焊接温度出现异常时，会同步对因质量缺陷所引发的结构安全以及工期延误风险展开评估。某重型厂房投入使用后，技术参数实时监控的覆盖比例提高到 92%，风险响应的时长缩短 60%，施工阶段质量风险的发生概率降低 45%，这证实工业互联网在技术管理和风险管理集成赋能方面的成效，为厂房全生命周期的精准管控提供数字化的途径。

五、总结

本研究围绕多种类型建筑工程（如房地产、公共、民用等）的技术管理和风险管理的耦合机制以及实践途径开展系统研究。经过对各类工程类型特点分析和案例检验，确定技术管理和风险管理并非彼此孤立，而是相互交融、协同发挥作用的有机统一体：技术管理的优化能够从根源上减少风险发生几率，风险管理提前介入则可引领技术方案进行科学决策，二者的耦合效果直接

关乎工程全生命周期的质量、安全以及效益。结合行业发展走向，提出通过数字化技术的耦合管理平台搭建、跨类型工程耦合标准体系健全、复合型管理人才培育等实践途径，为化解多类型建筑工程里技术与风险协同管理的实际难题提供可行方向。研究成果对建筑工程管理理论体系进行充实，还为不同种类的工程实践提供具有针对性的指引，有利于促使现代建筑工程管理朝着更为系统、高效、安全的方向迈进。

参考文献

- [1] 吕华灿. 考虑电气热耦合的多类型需求响应协调方法研究 [D]. 山东: 山东大学, 2022.
- [2] 李君儒. 体声波天线的多场耦合机制与辐射特性研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2022.
- [3] 王卓彪. 区块链多类型共识机制分析与改进 [D]. 浙江: 杭州电子科技大学, 2023.
- [4] 吴宽. 基于多场耦合的采空区煤自燃风险识别与预警研究 [D]. 湖南: 湖南科技大学, 2022.
- [5] 靳付棋. 区块链多类型资产跨链机制研究 [D]. 山东: 山东大学, 2022.
- [6] 徐国冲; 陈宇环. 公共管理机制研究: 类型, 对话与发展 [J]. 中国高校社会科学, 2024(2).
- [7] 柯翼之. 建筑工程项目风险类型及风险管理对策分析 [J]. 砖瓦世界, 2023(8).
- [8] 朱骅. 高职院校多类型人才培养的实践路径研究 [J]. 齐齐哈尔大学学报 (哲学社会科学版), 2024(5): 145-147.
- [9] 吴波汛. 全球环境公共产品管理: 类型, 困境及解决路径 [J]. 鄱阳湖学刊, 2022(4): 115-123.
- [10] 江曼. 房地产企业税务风险管理优化路径研究 [J]. 内蒙古科技与经济, 2024(5): 74-76.

提升防水保温上人屋面成型观感并降低质量缺陷的深入研究

潘宝贵, 马恒伟, 卢文培, 王炎震
中煤第三建设(集团)有限责任公司, 安徽 宿州 234000
DOI:10.61369/ME.2026070007

摘 要 : 防水保温上人屋面是高层住宅建筑屋面的主要形式, 具备防水防渗、保温隔热、人员通行等多重功能, 在民用住宅项目中应用极为广泛。然而, 传统上人屋面施工多依赖经验化管控, 存在屋面找坡不顺、局部积水、保护层开裂起砂、分格缝宽窄不一不顺直、泛水收口粗糙、细部节点成型差等频发质量通病, 不仅影响屋面整体成型观感, 还易引发屋面渗漏、保温失效等功能性问题, 大幅增加后期维修整改成本。本文以某在建住宅建筑项目二期防水保温上人屋面工程为例, 通过现场点位抽检、质量问题频数统计, 明确制约屋面施工质量与观感效果的核心问题。项目结合现场施工重难点, 引入 BIM 三维建模技术优化屋面精准放样与分格工艺, 创新采用 BIM 数字化找坡分格放样、保温板标准化铺设、定型模具泛水圆弧施工、分格条预埋安装、保护层二次收光、屋面标高厚度实时管控等成套精细化施工技术。工程实践表明, 该优化方案有效解决了上人屋面找坡积水、保护层破损、分格缝不规整、细部收口粗糙等质量通病, 大幅提升屋面坡度平顺度、保护层平整度、分格缝顺直度与细部节点规整度, 显著降低屋面质量缺陷发生率与后期返修率, 为同类防水保温上人屋面精细化、标准化施工提供可靠技术参考。

关 键 词 : 上人屋面; 防水保温; 成型观感; 质量缺陷; BIM 技术; 施工优化; 精细化管控

In Depth Research on Improving the Appearance of Waterproof and Thermal Insulation Roof Molding and Reducing Quality Defects

Pan Baogui, Ma Hengwei, Lu Wenpei, Wang Yanzhen
Middling Coal No.3 Construction (Group) Co., Ltd., Suzhou, Anhui 234000

Abstract : Waterproof and thermal insulation roof is the main form of roof for high-rise residential buildings, which has multiple functions such as waterproof and anti-seepage, thermal insulation, and personnel access. It is widely used in civil residential projects. However, traditional roof construction has relied heavily on experiential control, resulting in frequent quality issues such as poor slope making, localized water accumulation, cracking and sanding of protective layers, uneven and uneven width of dividing joints, rough water drainage and closure, and poor formation of detailed nodes. These issues not only affect the overall appearance of the roof, but also easily lead to functional problems such as roof leakage and insulation failure, significantly increasing the cost of later maintenance and rectification. This article takes the second phase waterproofing and insulation roof construction project of a residential building under construction as an example. Through on-site spot checks and frequency statistics of quality problems, the core issues that constrain the construction quality and visual effect of the roof are identified. The project combines the key and difficult points of on-site construction, introduces BIM 3D modeling technology to optimize the precise layout and grid process of the roof, innovatively adopts BIM digital slope and grid layout, standardized laying of insulation boards, standardized mold flashing arc construction, pre embedded installation of grid strips, secondary finishing of protective layers, real-time control of roof elevation and thickness, and other complete and refined construction technologies. Engineering practice has shown that this optimization scheme effectively solves common quality problems such as slope water accumulation, damaged protective layer, irregular grid joints, and rough finishing of details on accessible roofs. It greatly improves the smoothness of roof slopes, the flatness of protective layers, the straightness of grid joints, and the regularity of detailed nodes, significantly reducing the incidence of roof quality defects and later repair rates. It provides reliable technical references for the fine and standardized construction of similar waterproof and insulated accessible roofs.

Keywords : accessible roof; waterproof and thermal insulation; forming appearance; quality defects; bim technology; construction optimization; refined control

引言

建筑屋面是建筑围护结构的核心组成部分，兼具防水、保温、防护、通行等重要功能，其施工质量与成型观感直接关系建筑使用性能与工程创优品质。防水保温上人屋面凭借实用性强、适配高层住宅建筑功能需求的优势，成为现代住宅项目最主流的屋面施工形式^[1]。相较于普通非上人屋面，上人屋面需满足人员日常通行、设备检修作业需求，对屋面找坡精度、保护层平整度、结构整体性、细部节点施工质量要求更高。但现阶段传统上人屋面施工模式存在明显短板，人工找坡精度把控不足、保温层铺设随意、保护层浇筑工艺粗放、细部节点施工无标准化流程，极易出现屋面积水、保护层开裂起砂、分格缝扭曲不顺、泛水阴阳角收口粗糙等质量缺陷，严重影响屋面使用功能与外立面观感质量。目前，国内诸多学者针对屋面防水保温施工开展相关研究，但大多聚焦单一防水或保温工艺优化，针对上人屋面找坡、保护层、分格缝、细部节点一体化提质整改的系统性精细化施工研究较为匮乏^[2]。为此，本文结合具体住宅工程项目实际，全面分析防水保温上人屋面施工现状与核心重难点，依托 BIM 数字化技术，从测量放样、保温施工、保护层浇筑、细部成型、质量管控多维度优化施工工艺，构建系统化的屋面质量缺陷防控与观感提升体系，实现上人屋面施工提质、增效、降损的建设目标。

一、工程概况

某新建住宅建筑项目二期工程总用地面积 107531.72m²，总建筑面积 290574.95m²，其中地下建筑面积 55819.11m²，地上建筑面积 234755.84m²。建筑主体由 15 栋高层住宅楼及 10 栋多层商业配套单体组成，是区域内核心商住标杆项目。本项目所有高层住宅屋面均采用防水保温上人屋面设计，屋面构造层次依次为结构楼板、找坡层、保温层、防水层、细石混凝土保护层，屋面整体为常规平屋面构造，无异形曲面、悬挑飞檐结构，主要用于屋面设备检修、人员通行，屋面总施工面积约 9585m²。项目屋面施工以平整性、排水顺畅性、节点规整性为核心管控标准，因屋面施工面积大、分格节点多、细部泛水节点繁杂，人工传统施工易出现各类观感与质量缺陷，是项目屋面创优的重点管控部位，对施工精细化、标准化程度要求极高。

二、工程现状调查与施工重难点分析

（一）质量观感问题频数统计与观感缺陷分析

为精准掌握本项目防水保温上人屋面施工质量与观感现状，排查各类施工缺陷，项目组建专项质量管控小组，对已完成初施工的屋面工序开展全面抽检。随机选取 400 个施工点位进行质量验收与观感评定，结果显示，合格点位 332 处，不合格点位 68 处，整体施工验收合格率仅为 83.0%，未达到项目创优施工标准。屋面成型质量与观感问题频数统计见表 1。

表 1 屋面成型质量与观感问题频数统计表

质量问题	频数 / 处	频率 / %	累计频数 / %
屋面找坡不顺、局部积水	36	52.9	52.9
细石保护层开裂、起砂、观感差	18	26.5	79.4
分格缝宽窄不一、不顺直、破损	9	13.2	92.6
泛水阴阳角、管根收口粗糙不规整	5	7.4	100.0
合计	68	100.0	100.0

由表 1 可知，屋面找坡不顺、局部积水问题占比高达 52.9%，是影响上人屋面使用功能与成型观感的首要问题；其次为保护层观感缺陷、分格缝施工缺陷与细部节点成型问题，四类缺陷为现场屋面施工的核心质量通病，需重点优化管控。

（二）施工重难点梳理

结合现场质量通病与观感缺陷成因，摒弃原有曲面、悬挑施工难点，筛选出防水保温上人屋面施工四大核心重难点，具体如下：

（1）屋面精准找坡施工管控难：传统屋面找坡依靠人工拉线目测找平，无精准数字化标高依据，屋面整体坡度不均匀、局部高低差超标，极易造成屋面排水不畅、低洼积水，且大面积屋面人工找坡易出现坡度断层、平顺度不足等问题，无法满足上人屋面排水设计标准。

（2）保温层平整标准化铺设难度大：屋面保温板铺设工程量较大，传统人工铺设无统一排版方案，存在保温板错缝杂乱、板缝宽窄不均、板面高低错位、粘贴不平整等问题，不仅影响屋面整体平整度，还会导致上部保护层厚薄不均，引发后期开裂破损。

（3）细石混凝土保护层成型质量管控难：上人屋面保护层为主要受力面层，传统浇筑工艺存在摊铺厚度不均、振捣不密实、收光粗放等问题，易出现表面起砂、表层开裂、平整度差等观感缺陷，同时人员后期通行易加剧面层破损，影响屋面使用寿命。

（4）屋面细部节点标准化施工难度大：屋面泛水阴阳角、管道根部、分格缝等细部节点数量多、构造繁杂，传统施工无定型施工模具与标准化流程，泛水圆弧不规整、收口粗糙、分格缝扭曲错位，细部观感质量参差不齐，是屋面质量缺陷与渗漏隐患的高发部位。

三、屋面施工优化及观感提升技术方案

针对防水保温上人屋面找坡精度不足、保温铺设不规整、保护层观感差、细部节点缺陷多的核心问题，项目引入 Revit BIM 三维建模技术，彻底摒弃原有飞檐曲面复刻、悬挑支撑、动态变

形监测等专项工艺，围绕屋面找坡、保温铺设、保护层浇筑、细部施工四大核心工序，构建 BIM 数字化放样 + 标准化保温铺设 + 定型节点施工 + 预埋分格 + 精细收光 + 实时厚度标高管控的精细化施工体系，全方位解决上人屋面质量通病，提升屋面整体成型观感与使用性能^[3-4]。

（一）BIM 数字化精准找坡与分格放样优化

针对传统人工找坡精度低、分格不规整的问题，利用 BIM 三维建模技术对屋面进行整体参数化建模，严格按照设计排水坡度要求，模拟屋面整体排水走势，精准提取屋面各区域标高、坡度、分格尺寸参数。通过 BIM 模型生成屋面数字化标高控制网与分格控制线，将屋面划分为标准化施工单元，明确每一处找坡标高、排水坡度、分格缝间距与走向，生成可视化施工图纸与交底文件。现场施工依据 BIM 数字化点位放样，采用水准仪全程校核标高，彻底解决人工找坡随意性大、坡度不顺、积水低洼等问题，保障屋面整体排水平顺、分格均匀顺直。

（二）保温板标准化平整铺设工艺优化

基于 BIM 模型完成屋面保温板预排版设计，根据屋面尺寸、分格范围优化保温板排布方案，统一板缝间距、错缝铺设规则，规避人工随意铺设导致的排版杂乱、高低错位问题。施工前依据 BIM 交底方案弹出保温板铺设控制线，严格按照预排版顺序铺设保温板，板缝采用专用填缝材料填充，板面采用靠尺校核平整度，确保保温层整体平整、拼接严密、无高低差。同时严控保温板粘贴牢固度，避免保温层空鼓、起拱，为上部保护层施工提供平整坚实的基层，从源头规避保护层厚薄不均引发的开裂缺陷。

（三）细石混凝土保护层精细化浇筑管控

1. 屋面标高厚度实时管控：施工前依托 BIM 模型确定保护层统一厚度与标高控制点，在屋面基层设置标高灰饼、冲筋，全程实时校核混凝土摊铺厚度，杜绝局部厚薄不均问题。混凝土浇筑过程中采用平板振捣器均匀振捣，确保面层密实度一致，消除蜂窝、麻面、起砂等表层缺陷。

2. 分格条预埋标准化施工：优化传统后切分格缝工艺，采用预埋塑料分格条施工，结合 BIM 分格放样控制线精准定位分格条位置，固定牢固、顺直平整，确保分格缝宽窄统一、线条顺直，有效避免后期分格缝破损、扭曲、深浅不一等缺陷。混凝土初凝后及时取出分格条，对缝口进行精细化修整，保障分格缝成型规整。

3. 保护层二次收光工艺：创新采用“初次找平收光 + 初凝二次压光”双重工艺，混凝土摊铺振捣完成后进行首次平整收光，消除表面脚印、砂眼；待混凝土初凝前开展二次精细压光，闭合表层细微收缩裂缝，大幅提升保护层密实度与平整度，有效解决面层开裂、起砂、粗糙等观感问题。

（四）屋面细部节点定型化施工优化

针对泛水阴阳角、管道根部等细部收口粗糙的问题，采用定型圆弧模具标准化施工。依据 BIM 节点深化模型制作专用圆弧定型模具，屋面泛水阴阳角、管根部位统一采用模具压制成型，确保圆弧弧度均匀、收口顺滑、角度统一，彻底解决人工随意

成型导致的节点扭曲、收口粗糙、大小不一等问题。同时，依托 BIM 可视化交底，规范细部防水上翻、收口压边施工流程，确保所有细部节点施工标准化、规范化，消除节点质量缺陷与渗漏隐患。

（五）成品保护标准化管控

屋面保护层成型后制定专项成品保护措施，混凝土终凝后及时洒水养护，养护期间设置围挡警示、禁止人员通行、材料堆放，避免面层磕碰、划伤、受压开裂。分格缝、细部节点成型后安排专人专项保护、巡查整改，确保屋面整体成型质感完好，杜绝后期人为破损引发的观感缺陷^[5]。

四、施工优化效果分析

通过应用 BIM 数字化找坡分格放样、保温板标准化铺设、定型模具节点施工、分格条预埋、保护层二次收光、全程标高厚度管控的成套精细化优化技术，项目再次随机抽检 400 个屋面施工点位，不合格点位仅 11 处，施工验收合格率由优化前的 83.0% 提升至 97.25%，彻底根治屋面找坡积水、保护层开裂起砂、分格缝不顺直、细部收口粗糙等核心质量通病。

优化施工后的防水保温上人屋面整体质量与观感提升效果显著：屋面排水坡度均匀平顺，无低洼积水、坡度断层问题，排水功能完全满足设计及使用要求；保温层铺设平整规整、排版有序，无板缝杂乱、高低错位现象；细石混凝土保护层表面平整密实、色泽均匀，无开裂、起砂、麻面等表观缺陷；分格缝宽窄统一、线条顺直、深浅一致，整体规整美观；屋面泛水阴阳角、管道根部等细部节点圆弧顺滑、收口严实、成型统一，无粗糙变形、收口残缺问题。整体屋面施工质量均匀、观感整洁规整，完全达到住宅项目创优施工标准，圆满实现上人屋面提质、观感升级、缺陷清零的施工目标。

五、结语

防水保温上人屋面的找坡精度、保护层成型质量、分格缝规整度及细部节点施工水平，是衡量住宅屋面施工质量与精细化管理能力的关键指标。传统上人屋面经验化施工模式存在找坡精度不足、保温施工粗放、保护层成型差、细部节点不规范等诸多弊端，质量缺陷频发、观感质量参差不齐，无法满足高品质住宅工程建设需求。本文依托高层住宅防水保温上人屋面实体工程，针对现场高频质量通病与施工重难点，创新构建了 BIM 数字化精准放样 + 标准化保温铺设 + 精细化保护层施工 + 定型化节点成型 + 全程质量管控的一体化施工优化体系。

该技术体系依托 BIM 技术实现屋面施工前置优化、精准定位与标准化管控，从源头解决了上人屋面找坡积水、保护层开裂起砂、分格缝不规整、细部收口粗糙等核心质量问题，显著提升了屋面坡度平顺度、面层平整度、线条规整度与细部成型质量，有效降低屋面质量缺陷发生率与后期返修成本，保障了屋面防水、保温、通行的综合使用性能。整套施工工艺简单高

效、可操作性强、适用性广，无需复杂异形施工设备，适配各类高层、多层住宅常规防水保温上人屋面施工场景，可为同类民用建筑屋面精细化、标准化、品质化施工提供可靠的工程实践参考。

参考文献

- [1] 王浩, 李军, 张磊. 住宅工程上人屋面防水保温施工质量控制技术 [J]. 施工技术, 2022, 51(22): 89-92.
- [2] 刘建伟, 陈明, 杨波. 建筑屋面找坡及保护层精细化施工工艺优化 [J]. 工程质量, 2023, 41(05): 67-70.
- [3] 张建华, 王志强. 基于 BIM 技术的建筑屋面施工精细化管控研究 [J]. 土木建筑工程信息技术, 2022, 14(03): 112-116.
- [4] 住房和城乡建设部. GB 50207-2018 屋面工程质量验收规范 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
- [5] 李鹏飞, 赵阳. 民用建筑屋面分格缝及细部节点施工质量提升措施 [J]. 四川建材, 2024, 50(02): 101-102.

建筑配电项目电气安装质量控制与运维管理协同机制探讨

钟佰荣

广东 广州 510000

DOI:10.61369/ME.2026070010

摘 要： 在城市化进程加快的情形下，建筑配电系统的安装和运维相分离的问题较为明显，导致成本上扬、故障时常发生。该文研究两者协同机制搭建，通过全流程管理打破信息障碍，搭建数据共享平台，实现安装质量数据为运维提供支撑、运维反馈帮助安装优化的闭环，促使分段式管理朝着全生命周期协同转变，提高系统可靠性与管理效能。

关 键 词： 建筑配电项目；安装质量控制；运维管理协同机制

Exploration of the Collaborative Mechanism for Quality Control in Electrical Installation and Operation & Maintenance Management in Building Power Distribution Projects

Zhong Bairong

Guangzhou, Guangdong 510000

Abstract： In the case of accelerated urbanization, the problem of separation of installation and operation and maintenance of building power distribution systems is more obvious, resulting in rising costs and frequent failures. This paper studies the construction of the coordination mechanism between the two, breaks the information barrier through the whole process management, builds a data sharing platform, realizes the closed loop of the installation quality data to provide support for the operation and maintenance, and the operation and maintenance feedback to help the installation optimization, promotes the segmented management to transform towards the whole life cycle coordination, and improves the system reliability and management efficiency.

Keywords： building power distribution projects; installation quality control; operation & maintenance management collaboration mechanism

引言

城市化进程加快促使建筑规模拓展，配电系统身为能源供应的主要基础设施，其安装品质和运维管理的协同状况直接关乎建筑整体能效与运行安稳。目前部分项目里安装和运维阶段常出现信息分离、反馈不佳的情况，安装时期忽略运维要求容易导致后期故障频繁出现，运维数据难以反向对安装标准进行优化，造成管理闭环的缺失。2023年7月住房和城乡建设部公布的《关于加强房屋建筑和市政基础设施工程施工安全和管理的通知》清晰要求加强工程全生命周期管控，促进施工和运维阶段的高效衔接。在这样的背景之下，研究建筑配电项目电气安装质量管控与运维管理的协同制度，既是实行政策指引的实践探寻，也是化解分段式管理弊病、提高系统可靠性与管理成效的重要途径。

一、建筑配电项目电气安装质量控制与运维管理协同机制研究概述

（一）建筑配电项目电气安装与运维管理的研究背景

随着城市化步伐加快，建筑配电体系作为能源供给的主要基础设备，其安装品质与运维管控的相关性更加明显。目前安装及

运维阶段往往存在管理脱节状况：安装工作未重视运维要求，导致后期成本上升、故障频繁出现；运维反馈也未能确实推动安装改进，造成管理闭环缺失现象。电气装置质量瑕疵会直接对系统运转安全和稳定性造成影响，线缆铺设不标准、设备选取与安装精准度不够等都可能造成短路隐患或降低能源效率^[1]。另外传统模式之中安装和运维数据相互割裂，导致故障追溯困难、管理效

能低下。在这样的背景之下，搭建安装质量管控与运维管理的协同体系，已然成为化解建筑配电系统全生命周期管理难点、提高系统可靠性且降低运维成本的主要途径，具备重要的现实意义。

（二）电气安装质量管控与运维管理协同机制的研究内容

本研究以建筑配电工程为主要对象，关注电气安装质量管控与运维管理系统的衔接逻辑。首先对安装阶段的施工工艺规范、材料检验要求以及运维阶段的设备状态监控、故障预警需求进行梳理，确定两者在流程方面的耦合要点；其次分析安装质量数据怎样为运维预防性维护提供支持，以及运维反馈怎样反向完善安装质量规范，建立闭环管理体系。在信息共享方面，要搭建包含设计参数、施工记录、验收报告、运维日志的整合式信息平台，破除数据障碍，实现主要信息即时交互^[2]。风险管控方面，针对短路、过载、绝缘老化等常见隐患，研究安装质量瑕疵与运维管理漏洞之间的关联，融合安装时期风险预控和运维时期动态监测方法，提高风险处理的及时性。上述探讨意在为协同管理机制搭建提供理论支撑与实践办法，促使建筑配电项目由分段式管理朝全生命周期协同管理转变。

二、建筑配电项目电气安装质量控制体系分析

（一）电气安装过程中的质量控制要点

建筑配电工程电气安装的质量管控要包括设备装设、线路铺设、接地防护以及调试检验等全部环节。设备安装阶段要核查型号与规格，保证高压柜、变压器等基础的平整度误差处于 $\pm 2\text{mm}$ 范围之内，螺栓扭矩符合规范要求，防止因接触不良而导致过热情况发生。在进行线路敷设时，要对电缆的截面以及绝缘层厚度开展抽检工作，桥架内的排列间距应达到散热的要求，穿管的弯曲半径要大于管径的10倍，避免因绝缘破损而引发短路情况。接地保护体系规定接地体的埋设深度不少于0.8m，电阻值要低于 4Ω ，且需通过导通测试来证实其有效性。调试检验阶段要实际测量电压、电流、功率因数这类参数，将偏差把控在 $\pm 5\%$ 范围之内，同时模拟短路、过载情况来验证保护装置动作的响应时长。影响安装品质的主要要素包含人员素质、材料设备品质以及现场管理规程，要通过三级质量检验制度、BIM 技术施工仿真以及主要工序旁站监管等手段，实现全流程管控^[3]。

（二）电气安装质量管理存在的问题

建筑配电项目在电气安装质量管控方面所存在的问题，集中显示在三个方面。标准执行不充分体现为施工人员对于 GB 50303 等规范的理解出现偏差，例如导管弯曲半径未满足要求或者电缆接头处理不符合规范，导致后期绝缘性能降低^[4]。施工信息传递受阻是由于多专业交叉施工时，设计变更未能及时同步到安装小组。例如土建结构调整后，电气预埋位置出现偏移，但未通过协同平台更新相关信息，进一步导致返工延误。验收管理和后期运维衔接欠佳，表现为验收阶段未让运维人员介入，报告缺少负荷特性曲线、隐蔽工程布线图等主要指标，这使得运维阶段故障排查效能不高，甚至因前期安装问题导致设备过载等安全风险^[4]。上

述这些问题彼此关联，一同对安装质量和运维效率的协同提高产生制约。

三、建筑配电项目安装质量控制与运维管理协同机制构建

（一）电气安装阶段与运维阶段的协同管理模式

1. 安装质量数据向运维管理的有效传递

安装品质数据往运维方面的有效输送是协同管控的要点。安装环节的技术文档、检测记载以及设备信息，是衔接建设和运维的主要纽带。但是传统纸质移交模式容易造成信息滞后和缺失，有必要搭建数字化协同平台来实现实时共享。把质量数据进行标准化输入后，运维人员能够提前得到设备基准信息，为状态监测和故障诊断提供根据；运维出现的异常数据也应反向反馈到安装阶段，形成质量改进的闭环。智能建筑运维管理系统通过整合全生命周期的信息，能够确实打通建设和运营环节的信息流，减少管理费用^[5]。协同机制落实要在平台规划起始阶段确定数据接口规范和责任主体，同时引入预警体系，把安装测试数据当作初始界限值，当运维监测数值出现偏离时自动发出警报并关联原始记录，以此实现数据传递由被动查询向主动风险防范控制的提高，强化协同功效。

2. 基于全过程管理的质量与运维协同机制

此机制将全过程管控作为核心，破除设计、施工、验收和运维各阶段的信息障碍。在安装阶段让运维方提前参与进来，在设备挑选、布线工艺等方面给出运维意见，同时记录设备参数、隐蔽工程详情，形成数字化档案并传递到运维时期。搭建跨阶段的信息共享平台，实现设计图纸、施工记录、验收报告和运维数据的实时互通，让运维方了解接头压接参数、接地电阻测试结果等质量控制要点，为预防性的维护工作提供参考根据。协同机制清晰界定各阶段责任范围与联动程序，在验收环节，由运维人员核查设备标识以及操作手册的完备性，施工方为运维人员开展安装工艺方面的培训，建立起安装质量保障运维效率、运维数据反馈安装改进的闭环^[6]。通过这种方式实现安装质量风险的提前管控，提高运维响应速率和系统的可靠性。

（二）协同机制运行保障措施

1. 管理流程优化与责任体系完善

管理流程的优化要打破安装和运维环节间的信息屏障，在施工阶段嵌入运维前置审核的节点，例如在设备选型时让运维单位参与技术参数的确定，以此保证后期运维的可操作性与兼容性^[7]。完善责任体系需清晰界定设计、施工、监理、运维等主体的协同职责范围；设计单位要提供包括运维要点的技术交底资料，施工单位需留存主要工序的数字档案记录，监理单位应把运维需求纳入验收准则，运维单位在验收环节出具预运维评估报告。保障手段包括建立跨主体的定期交流机制，每个月举办协同会议来协调施工偏差以及运维风险；并且引入数字化协同平台，整合质量管控与运维需求方面的信息，实现从安装质量追溯直至运维预案生成的全流程联动，保证质量管控与运维管理能够有效衔接。

2. 信息化技术支持下的协同管理应用

在信息化技术支撑下的协同管理运用能够打破传统的信息屏障,实现质量管控与运维管理数据的即时交互。通过搭建通过 BIM 的全寿命周期信息平台,把安装时期的设备参数、施工工艺、检测数据等录入系统,运维时期能够直接调取用于设备监测与故障预警,防止信息中断造成的决策误差。运用物联网技术,通过传感器实时收集运行数据并上传至云平台,质量管控端依此完善施工细节,运维端根据数据走向拟定预防性维护方案,构成安装、运维数据闭环。区块链技术的运用能够保证数据无法被篡改,提高质量追溯和责任认定的精准度,移动终端的 APP 便于现场人员随时录入质量信息、查询运维历史情况,加强协同效率^[8]。此模式加强项目管理的精确程度,为后续的运维工作提供全方位的数据支持,促使质量控制和运维管理从分阶段独立状态向全流程协同状态转变。

四、建筑配电项目协同机制实施策略与优化路径

(一) 强化电气安装质量控制与运维衔接管理

1. 完善安装验收与运维交接机制

健全安装验收和运维交接机制要将技术资料完备性、设备状态精确性以及运行准备充足性作为主要。技术资料交付需包含设计图纸、出厂检验报告、安装调试记载以及隐蔽工程验收资料,保证运维方全方位掌握施工详情,防止决策失误^[9]。装置状态核实要建立三方联合核验机制,由安装单位、监理单位与运维单位一同就配电柜、变压器、电缆等主要设备开展绝缘电阻、接线工艺、保护定值等实地检测并且书面认定,清楚质量责任界限。运行筹备管理需预先安排运维人员参加安装调试实际操作培训,熟知操作及应急策略,同时拟定 72 小时试运行规划,检验系统稳定性,及时处理潜在隐患,实现验收和运维的顺畅对接。

2. 建立质量问题闭环管理机制

建立质量问题封闭循环管理机制应覆盖项目整个生命周期,以问题察觉为开端,通过多方面监测办法捕捉电气安装进程里的隐患,例如线缆铺设偏差、设备接线失误等,同时把问题信息录入数字化管控平台,保证运维方及时获取数据^[10]。针对所发现的问题,召集安装方、设计方和运维方共同开展原因分析,从设计合理性、工艺规范性以及操作标准等方面追溯问题根源。在整改落实阶段,要清晰确定责任主体与时间安排,运用 BIM 技术对整改方案的可行性开展模拟,确保相关措施符合运维的长期要求。成效评估阶段参考运维时期实际反馈,通过设备运行参数监控、故障发生比率统计来检验整改效果,同时把结果归入项目质量数据库,为后续项目提供参考。如此建立发现、分析、整改、评估的循环模式,加强安装质量对运维的支撑效能,实现二者的深度协作。

(二) 提升运维管理对安装质量的反馈作用

1. 基于运行数据的质量评价优化

加强运维管理在安装质量方面的反馈效能,要重点于运行数据的价值探寻。在运维时期,设备的运行参数、故障记载、能耗

信息等可直接体现安装质量方面的缺陷,像电缆接头接触不佳导致局部温度上升异常、接线有误引发保护装置错误动作等。要搭建多方面评价指标框架,包含设备可靠性、能耗效能、故障发生频次等主要方面,通过数据收集系统即时获取变压器负载占比、母线电压变动、开关操作次数等数据,联合大数据分析找出安装潜在状况。譬如某条回路的电流不平衡率超出标准,能够追溯到电缆截面选取不合适或者接线相位有误的问题,运维反馈促使施工方对工艺标准加以改进。搭建信息共享平台,把运行数据转变为质量评估报告,为后续项目的安装质量管控提供根据,建立安装、运维、改进的闭环协同体系,实现施工与运维的持续改进。

2. 加强设备状态管理与风险预防

加强运维管理在安装质量方面的反馈效能,要建立运维数据和安装环节的闭环联系。在运维阶段,通过运行参数的监测以及故障的记录来建立质量反馈列表,确定安装方面的缺陷或者设计上的偏差。例如断路器误动作的概率过高,或许意味着接线端子的紧固程度不够。这类反馈会实时传送到安装管理模块,从而促使安装标准进行动态的优化。搭建全生命周期状况监测体系,运用物联网传感器收集配电设备的温度、电压、电流等即时数据,联合边缘计算实现异常分析,建立风险预警模型,针对变压器过载、电缆绝缘老化等风险设定分级阈值,拟定预防性维护方案。把设备的状态数据和安装质量的相关参数进行关联分析,能识别出安装工艺给长期运行带来的作用,通过监测数据追溯质量方面的问题,建立安装、运维、反馈、优化的协同闭合回路,提高系统的安全性以及维护的效率。

(三) 协同机制持续改进与管理提升

1. 建立动态优化的管理评价体系

协同机制的持续改进要以具备动态优化特性的管理评价体系作为核心支撑。此体系需围绕协同功效搭建多方面的指标,包含安装步骤的工艺合规状况、设备选型适配情形,还有运维时期的故障响应速率、能耗优化比例等量化参数,并且纳入跨部门沟通的时效、信息共享的完整程度等定性指标,建立覆盖全寿命周期的评价方案。评估过程通过数字化平台实现数据即时采集与分析,采用定期评估和不定期抽检相结合的方式,精确识别协同流程中的梗阻点,例如设计施工衔接存在偏差、运维反馈较为滞后等状况。根据评价成果建立闭环反馈体系,把问题转变为改进工作,确定责任主体和整改期限,通过 PDCA 循环促使协同机制迭代完善,保障协同水准持续提高,最终实现配电系统安全稳定运转与全生命周期价值最大化。

2. 推动配电项目全生命周期管理发展

协同机制的施行要以全生命周期管理理念作为核心,贯穿设计、安装以及运维等各个阶段。设计环节要搭建跨专业协作平台,融合电气设计、结构设计以及运维需求,通过 BIM 技术对安装节点和检修路径进行模拟,降低变更风险。在安装时期,要加强施工方和运维方的即时沟通,运维工作人员提前参与母线安装、接地系统施工等重要工序的质量核验,保证达到运维标准。持续推进改善工作,通过数字化管理体系,收集质量相关数据以及运维反馈信息,建立质量问题追溯机制,针对频发故障点位优

化安装流程工艺，并且定时开展联合培训，加强协同执行效能。推进全生命周期管理要搭建一体化信息平台，实现设计参数、安装记录、运维数据的有效衔接，建立从设计至报废的闭合体系，通过数据分析预估设备故障，把被动运维转变为主动防范，最终提高配电系统的可靠性与全生命周期价值。

五、总结

文章专注建筑配电项目中电气安装质量控制与运维管理的协同难题予以探讨。确定安装质量控制要包括设计、材料、施工等

整个流程，运维管理重点于设备状态监测、故障预警以及维护策略的完善。这两者的衔接问题主要表现为信息不连贯、责任界限不清晰以及反馈机制的缺乏。通过搭建以全流程管理为基础、信息互通为桥梁、闭环改进为目的的协作机制，能够实现安装质量数据向运维环节的顺畅传递，运维数据反过来指引安装标准更新。此机制把安装质量把控和运维管理当作有机整体，破除传统分段型管理的障碍，促使管理流程由线性串联转变为动态循环，最终提高配电系统运行的可靠性与管理效能，为建筑配电项目全寿命周期管理提供可行办法。

参考文献

- [1] 韩雨燕. 基于灰色白化权的绿色建筑项目运维安全管理评价研究 [D]. 天津理工大学, 2023.
- [2] 李昱江. H 公司环卫项目运维阶段成本控制研究 [D]. 哈尔滨工业大学, 2022.
- [3] 路翥. T 镇环境综合整治项目运维质量评价研究 [D]. 浙江大学, 2022.
- [4] 李少杰. 配电网差异化防雷及运维管理研究 [D]. 华南理工大学, 2023.
- [5] 轩阳. S 园区智慧建筑运维管理平台构建研究 [D]. 北京交通大学, 2022.
- [6] 邢振晋. 智能建筑电气设备安装质量控制措施研究 [J]. 建筑·建材·装饰, 2023(21).
- [7] 陈慧丽. 计算机技术发展下的智能建筑的安装质量控制 [J]. 科学与信息化, 2022(15):75-77.
- [8] 杜文刚. 探讨煤矿机电设备安装及质量控制 [J]. 中国科技纵横, 2023(11):106-108.
- [9] 康得雄. 建筑电气安装工程施工管理技术 [J]. 建材发展导向, 2022, 20(12):106-108.
- [10] 朱新保. 智能建筑电气设备安装质量控制措施探讨 [J]. 中国设备工程, 2024(4):30-32.

技术创新背景下房地产建筑工程风险管理的优化策略探析

许鹏

广东 佛山 528000

DOI:10.61369/ME.2026070011

摘 要： 技术改革是房地产建筑工程风险管控的重要支撑，能够优化风险识别、评定与管控的整个流程，例如 BIM 实现可视化协作、物联网开展实时监测、大数据预测风险。目前体系存有经验依赖、新型风险识别迟缓等状况，要通过技术融合搭建动态防控体系，联合人才培育、法规健全以及政企协作，促使风险管理由被动应对转变为主动预防，加强工程安全性和可持续性。

关 键 词： 技术创新；房地产建筑工程；风险管理

Analysis of Optimization Strategies for Risk Management in Real Estate Construction Projects under the Background of Technological Innovation

Xu Peng

Foshan, Guangdong 528000

Abstract： The technical reform is an important support for the risk management and control of real estate construction projects. It can optimize the whole process of risk identification, assessment and control, such as BIM to achieve visual collaboration, Internet of Things to carry out real-time monitoring, and big data to predict risks. At present, the system has the conditions of experience dependence and slow identification of new risks. It is necessary to build a dynamic prevention and control system through technology integration, combine talent cultivation, sound laws and regulations, and government-enterprise cooperation to promote risk management from passive response to active prevention, and strengthen project safety and sustainability.

Keywords： technological innovation; real estate construction projects; risk management

引言

房地产建筑工程的风险管控是确保项目安全、效能与可持续发展的核心部分，技术改革已成为推动其优化改进的主要动力。随着 2023 年住房和城乡建设部《关于推动智能建造与新型建筑工业化协同发展的指导意见》的发布，技术帮助风险管理的方向更为清晰，政策重点通过 BIM、物联网、大数据等技术融合，实现工程全生命周期风险的动态识别与精确管控。目前技术改革在风险识别（如 BIM 碰撞检测）、实时监控（如物联网传感器）、预测预报（如 AI 算法）等方面已显示明显成效，不过仍然面临技术运用零散化、传统管理模式符合度不够等难题。在这样的背景之下，探寻技术创新和风险管理的深度融合途径，健全动态监控系统、加强人才培育与制度保障，成为提高房地产建筑工程风险管理效率的必要抉择。

一、技术创新对房地产建筑工程风险管理的重要性

（一）技术创新在房地产工程中的应用现状

技术改革于房地产建筑工程风险管控里贯穿风险辨别、评定与把控的整个流程，可提高风险应对效能、减少项目损耗。目前像高性能混凝土这类新材料的运用，通过减少材料损耗和施工瑕疵降低质量风险^[1]。在信息技术领域，BIM 技术能够于设计环节识别碰撞和结构方面的隐患；大数据和物联网可实时对人员、设备以及环境数据展开监测，动态预警如基坑压力、塔吊状态等安

全风险，防止坍塌和机械事故的发生。在智能化技术领域，无人机巡检能够排查建筑外立面质量方面的问题，AI 算法通过历史数据对工期延误以及成本超支风险进行预测，为风险管理工作提供数据支持。从整体来看，技术改革已成为房地产工程风险管控的主要支撑，不过其融合深度仍需提高。

（二）技术创新促进风险管理水平提升的机制

技术改革通过优化设计、施工以及监控流程，全面性加强房地产建筑工程的风险管控能力。在设计环节，BIM 技术实现多专业协同模拟，预先识别设计冲突和结构隐患，规避后期变更风

险^[2]。在施工时期，装配式建筑技术可减少现场的作业量，降低高空作业以及交叉施工的风险；数字化管理平台能够实时跟踪进度与资源情况，对延误风险进行动态预警。监测环节物联网和大数据实时收集结构应力、环境参数，迅速察觉变形与火灾风险，实现从被动处理向主动防范转变。这类创新压缩风险识别时长，加强控制精确性，促使风险管理由经验依靠转变为技术赋能，给工程安全与效能提供稳固保障。

二、房地产建筑工程风险的类别与现状分析

（一）主要风险类型及特征

房地产建设工程的风险种类繁多，且具备明显特征。设计风险来自方案欠合理或者参数存在偏差，例如结构稳定性欠佳，容易引发施工变更或者造成安全隐患^[3]。施工风险体现为技术差错、材料不符合标准或设备出现故障，比如混凝土强度欠缺，容易导致工期延迟或安全事故。管理风险包含组织协调欠佳、成本失管或合同存在漏洞等情况，例如沟通不顺畅或者预算超出预期。市场风险和宏观经济、政策变动以及需求起伏有关，或许会造成销售遇阻或者回报未达预期。不同类型的风险彼此相互关联，并且具备动态特性。在技术改革背景下，传统风险管控遭遇新难题，像数字化运用里的数据安全隐患、智能建造工艺的适配性状况，进一步提高风险识别与控制的复杂程度。

（二）当前风险管理体系存在的问题

现阶段房地产建筑工程风险管理机制存在多方面欠缺。传统模式大多依靠经验判定，针对数字化转型里的新型风险（如 BIM 数据安全、智能设备操作风险）识别较为迟缓，缺少动态预警体系。风险评估手段单一，难以对技术创新所产生的交叉风险（如装配式和智能监测的协同风险）进行量化，评估结果和实际情况存在偏差。风险应对手段缺乏精准性，现存预案大多针对传统类风险（如地质灾害、材料问题），对于技术衍生出的风险（如 AI 决策失误、物联网设备故障）处理不足，并且缺少跨部门的协同响应机制。另外风险管理专业人才的技术素养存在欠缺，对于区块链、大数据等新兴风险的特性了解有限，难以高效整合技术工具来提高管理效能^[4]。这些难题使得现存体系难以应对技术改革引发的风险复杂程度，对房地产建筑工程的安全与效率造成制约。

三、技术创新背景下建筑工程风险管理的优化策略

（一）数字化技术在风险管理中的应用策略

1. BIM 技术的集成与风险预警

BIM 技术通过搭建多维信息模型，实现对工程项目全生命周期风险的动态识别与模拟。在风险识别环节，BIM 对地质勘查、设计参数等数据进行整合，确定结构冲突、材料延迟等潜在风险之处。风险模拟阶段，BIM 融合有限元分析、4D 施工工艺，针对进度滞后、成本超出开展可视化推算。在风险预警领域，通过 BIM 的实时数据收集系统（例如物联网传感器、无人机巡检）对结构应力、环境参数展开动态监测，当数据偏离设定阈值时，即

刻触发预警并进行联动响应。另外 BIM 和区块链结合能够保证风险数据无法被篡改，为责任追溯提供根据。实际情况显示，某超高层建筑项目通过 BIM 集成预警系统，在施工阶段使安全事故减少 35%，将成本偏差把控在 5% 以内^[5]，证实该策略具备有效性。

2. 大数据与云计算支持的风险分析

大数据和云平台的结合确实加强房地产建筑工程的风险分析效能。大数据技术融合地质勘查、工程施工进度、供应链物流以及市场波动等多源异构数据，破除信息壁垒，为风险识别建立全面的数据支撑^[6]。云平台依靠弹性运算和分布式存储效能，实现海量风险数据的即时处理与协同分享，确保开发商、施工单位等各主体同步获取风险形势，防止信息延迟。通过大数据的分析模型通过机器学习探寻数据间的潜在关联，例如识别设备故障和材料缺陷的关联性，亦或预估极端天气对工期的作用，促使风险评估由经验判断转变为量化分析。云平台的可视化手段把复杂的分析成果转变为直观的图表与预警参数，协助管理者迅速定位高风险的节点，进一步制定具有针对性的策略，促使风险管理由被动应对朝着主动预防的方向转变。

（二）绿色建材与智能技术的风险控制作用

1. 绿色建材的风险影响与管理措施

绿色建材的使用虽加强可持续性，却也产生新的风险。在性能稳定性方面，新型保温材料的防火级别、生物基材料的耐候性能等或许会由于技术成熟程度不够而引发质量风险，提高后期维护费用^[7]。在供应链领域，部分材料依靠进口或是小众供应商，容易因物流中断、产能不够而导致工期延迟。管理办法需从技术验证和供应链管控着手。从技术角度出发，建立预评估体系，通过第三方检测手段对材料性能实施全周期的监测，并且在施工之前开展小范围的试点工作以验证其适配性。在供应链方面，搭建多样化供应商方案，签署长期协定以明确应急方案，同时通过数字化平台实时跟踪库存和运输情况，减少中断隐患。要健全绿色建材标准体系，促进该行业规范统一，为风险评估提供清晰根据。

2. 智能施工技术的风险管理提升

智能建造技术通过实时数据的收集与分析，大幅提高风险识别的精确性与反应速率^[8]。无人机巡检体系能够针对高风险地带开展高频率、全方位的监测工作，迅速察觉结构裂缝或者物料堆放方面的隐患，有效弥补人工巡检存在的盲区以及滞后问题。BIM 和物联网相融合搭建施工流程的数字孪生模型，模拟不同工况时的风险演变路径，预先制定应对措施，减少施工冲突与安全事故发生率^[9]。智能传感设备实现对基坑形变、塔吊负载等主要参量的动态监控，数据超出阈值时自动启动预警，保障风险管控的及时性和有效性。这些技术运用优化风险管控程序，通过数据驱动的决策方式提高管理效能，为房地产建筑项目的安全与质量提供技术支撑。

四、实现风险管理优化的具体措施

（一）完善风险评估与动态监控体系

1. 风险评估方法的更新

风险评价要打破传统静止局限，引入多要素、多方面模型来

提高精准度。模型融合 BIM 成熟度、智能监测精准度、装配式工艺稳固性等技术变量，还有市场、政策、供应链弹性等外部因素，搭建技术、经济、环境、管理四个方面的指标体系。将层次分析法和模糊综合评价法相结合，实现定性评估与定量评估的融合。通过物联网和大数据，模型持续收集施工进度、材料质量等动态信息，通过机器学习探寻风险演化规律并提前发出预警。比如 BIM 碰撞检测能够提前预判结构冲突情况，降低返工所产生的成本^[9]。另外模型建立动态调节机制，根据项目阶段和外部环境变动更新指标权重，保证评估结果和实际风险状况实时符合，为决策提供精确根据。

2. 动态监控平台的构建

动态监测平台要融合物联网、大数据以及人工智能技术，实现对工程全生命周期风险的即时追踪与预警。平台接入结构应力监测、环境监测以及人员定位等传感器的相关数据，通过数据采集层实现多源异构数据的即时传输与标准化处理。数据处理环节通过机器学习搭建风险预测模型，针对施工安全、进度延误这类风险开展动态评估，比如根据历史数据训练的进度偏差预警模型能够实时判别工期风险^[10]。预警体系设定多级风险界限值，当数据超出标准时自动启动预警并推送给责任主体，同时给出成因分析与应对提议。平台拥有可视化特性，通过数据看板清晰显示风险分布和处置状况，提高跨部门协作效率。另外平台设置预留接口和现有的项目管理系统进行对接，建立起包括风险识别、评估、预警、处置的闭环式管理体系，给房地产建筑工程风险管理提供技术方面的支持。

（二）推动技术创新与管理融合

1. 技术 - 管理一体化策略

技术与管理融合策略要以技术运用作支撑，重新建立房地产建筑工程风险管理程序，打造系统化的风险管控体系。运用 BIM 技术搭建三维可视化的模型，把设计、施工、运维阶段的风险点融入模型参数之中，实现风险的动态识别和预警，并且将风险评估指标和项目管理流程进行绑定，保障风险数据与进度、成本管理能够实时联动。采用物联网传感器对施工现场的安全隐患、材料质量等风险要素进行监测，传感器所采集的数据接入项目管理系统，让管理人员能够实时掌握风险状况，并且根据系统预先设定的管理规则自动启动应对流程，例如当安全隐患超出标准时自动向责任部门推送整改任务。通过大数据分析手段整合过往项目风险数据以及当下项目的实时数据，建立风险预测模型，该模型输出的风险概率和影响程度直接与管理决策机制相关联。例如当预估某施工环节的风险等级达到临界值时，管理系统会自动开启应急预案审批流程。另外把区块链技术应用到风险信息的存证和共享方面，保证风险数据无法篡改且多方能够实时同步，消除因信息不对称造成的管理滞后状况，最终实现技术工具和管理流程的深度融合，让风险控制从被动处理转变为主动防范，提高风险管理的精准度和效率。

2. 人才培养与培训机制

在技术改革背景下，房地产建筑项目风险管理的优化要重点关注人才培养与培训制度，建立技术和管理相融合的体系来应对

新兴技术带来的挑战。企业需搭建技术应用 + 风险管理双轨培育模式，把 BIM、物联网、大数据等新兴技术的操作能力与风险识别、评估、应对的管理思路深度结合，规划包含技术原理、风险场景模拟、应急处理的课程方案，保证人才既掌握技术手段，又能从管理方面预判技术运用中的潜在风险。要建立动态的培训体系，结合行业技术的更新换代以及项目风险实例，定时开展实战性演练，例如组织通过 BIM 模型的碰撞检测风险模拟活动、通过大数据平台开展成本与进度风险预警的实训操作，使人才在实践过程中加强技术应用和风险管控的协同能力。除此之外企业需和高校、技术研发单位开展合作，有针对性地培育具备跨学科背景的复合型人才，通过校企联合培养 + 项目导师制，把理论知识与工程实际的风险场景相融合，为风险管理的优化提供人才方面的支持，保障技术创新与管理融合得以落地执行。

（三）完善法规标准与合作机制

1. 制定符合技术发展的风险管理标准

健全建筑行业风险管理的相关法规和标准，为技术改革提供制度支撑。当下房地产建筑工程领域技术改革迭代加快，BIM、物联网、AI 等技术的运用对风险管理提出新需求，现有法规标准存有滞后现象，部分条款难以包括新技术引发的风险情形。应根据技术发展走向，对现有的风险管理标准进行修订，清晰界定新技术应用过程中的风险评估指标以及管控流程。比如针对 BIM 模型数据安全、智能监测系统的可靠性验证等方面制定专门的规范，把技术创新里的潜在风险归入标准化管控体系之中。建立动态更新体系，协同行业协会、科研单位和企业，定时收集技术应用里的风险实例与数据，按照技术成熟程度对标准内容加以调整，保证法规标准和技术发展保持同步，为技术创新打造合规且具有灵活性的制度环境，减少因标准缺失所引发的风险暴露。

2. 政企合作与信息共享平台

政府与企业合作以及信息共享平台，构成技术创新背景下房地产建筑工程风险管理优化的主要支撑。政府可通过大数据、区块链等技术建立跨部门、跨企业的统一信息共享平台，整合工程审批、质量监督、安全监管、市场信用等多方面数据，破除信息孤岛，为风险识别与预警提供数据支撑。企业应积极接入平台，及时上传项目进展、材料检验、施工安全等动态情况，协同政府做好风险数据的收集与分析。政府能够通过平台向企业推送政策法规、风险案例以及技术标准的更新情况，企业会反馈实际操作里的风险痛点，建立起政府引导、企业参与、数据驱动、风险共治的闭环体系。此平台需具备风险预警的能力，通过算法模型对项目的主要指标开展实时监控，要是发觉超危大工程施工存在违规、材料质量出现异常等风险，便自动向政企两方发出预警，促使风险处置从事后应对转变为事前预防。同时平台要建立数据安全保障机制，清楚数据使用权限和保密规定，保证信息共享的安全性及合规要求，最终实现政企协同模式下的风险精确管控与高效处理。

五、总结

在技术改革的背景下，房地产建筑工程风险管理的优化要以

技术整合为主要，联合数字化、绿色技术以及智能化方法打造动态风险防控系统。目前行业存在技术运用不充足、风险识别迟缓和状况，要通过 BIM 技术实现工程全生命周期的可视化管控，运用物联网实时监控施工安全与质量方面的风险，依靠大数据分析来预估市场波动和供应链风险。绿色技术的普及不但能够降低环

境风险，还能通过节能设计和材料改革加强工程的可持续性，智能化体系则可以优化资源分配，减少因人为差错导致的风险。未来该行业要加强技术和管理深度结合，健全相关法规和标准，促使风险管理从被动处理转变为主动防范，最终实现房地产建筑工程的安全性提高与可持续发展目的。

参考文献

[1] 高晓军. 新形势下房地产并购风险管理研究 [D]. 四川: 西南财经大学, 2022.
[2] 程琮乔. ND 智能科技有限公司技术创新风险问题及优化对策研究 [D]. 浙江: 浙江工业大学, 2023.
[3] 崔祯. A 银行代销业务风险管理策略优化研究 [D]. 甘肃: 兰州大学, 2022.
[4] 孙正. A 房地产开发企业融资风险管理优化研究 [D]. 江西: 江西财经大学, 2022.
[5] 徐甜甜. W 企业信用风险管理优化策略研究 [D]. 广西: 广西师范大学, 2022.
[6] 高亚瑞, 马绍华. 企业技术创新项目投资风险管理的优化路径 [J]. 科技经济市场, 2022(8): 76-78.
[7] 李培. 企业投融资风险管理优化策略探析 [J]. 品牌研究, 2023(21): 98-100.
[8] 王萍. 风险管理视角下房地产企业投融资管理活动研究 [J]. 现代经济信息, 2022, 37(16): 59-61.
[9] 徐金燕. 新形势下房地产企业税务风险管理的建议 [J]. 审计与理财, 2023(2): 59-60.
[10] 周烨. "以数治税"下房地产企业税务风险管理探析 [J]. 投资与创业, 2023, 34(1): 141-143.

房屋建筑工程中施工进度控制的优化策略研究

李昆明

中国五冶集团有限公司，四川 成都 610023

DOI:10.61369/ME.2026070013

摘 要：房屋建筑工程施工进度控制直接关系项目工期、建设成本与工程整体效益，是建筑工程项目管理的核心内容。通过阐述施工进度控制的优化价值，从施工场地、工程设计变更、设备材料供应等维度剖析进度管控主要影响因素，从进度计划编制、材料保障、现场组织、监测评价、新技术应用方面提出针对性优化策略。研究立足房建工程现场实际，厘清各类条件对工期的干扰机理，构建可落地的进度管控实施路径，为建筑企业提升项目管理水平，减少工期延误风险，保障工程项目高效有序推进提供理论参考。

关 键 词：房屋建筑工程；施工进度控制；工期管理；现场管理；BIM 技术

Research on Optimization Strategies for Construction Progress Control in Housing Construction Engineering

Li Kunming

China Fifth Metallurgical Group Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610023

Abstract： The construction progress control of building construction projects is directly related to project duration, construction costs, and overall project benefits, and is the core content of construction project management. By elaborating on the optimization value of construction schedule control, this article analyzes the main influencing factors of schedule control from the dimensions of construction site, engineering design changes, equipment and material supply, and proposes targeted optimization strategies from the aspects of schedule planning, material guarantee, on-site organization, monitoring and evaluation, and new technology application. Based on the actual situation of the construction site, this study clarifies the interference mechanism of various conditions on the project schedule, constructs a feasible implementation path for progress control, and provides theoretical reference for construction enterprises to improve project management level, reduce the risk of project delay, and ensure efficient and orderly progress of engineering projects.

Keywords： building construction engineering; construction progress control; construction period management; on site management; BIM technology

在建筑业实现高质量发展的时代背景下，房屋建筑工程项目的规模不断扩大，其施工工序较为繁杂，各种不确定性因素很容易诱发工期滞后现象的出现。施工进度管控是项目管理中的关键环节，综合考虑了质量、安全和成本等多重目标，对于项目的经济效益和履约效果都具有重要意义。在此基础上，文章对进度控制优化价值进行分析，并对主要影响因素进行梳理，提出了一套优化策略，旨在促进房建工程施工进度管理更加科学和实操性。

一、房屋建筑工程中施工进度控制的优化价值

房屋建筑工程施工进度控制渗透于整个项目施工过程中，具有明显的实际优化价值。科学地进行进度管控可以确保工程项目按合同规定的工期竣工交付使用，避免因工期延误而导致违约赔偿和管理成本提高，保障建设单位和施工企业的经济利益^[1]。通过进度统筹管理可以使人力、机械设备和建筑材料等多种资源得到合理配置，降低资源闲置和重复投入的浪费，促进资源利用效率的提高和成本可控。同时进度管理并不是简单地追赶工期，是

要协调好进度、质量和安全之间的关系，既要保证工期目标，又要对施工行为进行约束，减少因盲目赶工而造成的质量缺陷和隐患。

二、房屋建筑工程中施工进度控制的影响因素

（一）施工场地条件因素

施工场地作为房建项目进行操作的基本载体，其本身的状况将直接影响到施工推进的节奏，该工程所处的地理位置决定了交

作者简介：李昆明（1988.09-），男，汉族，四川巴中人，本科，工程师，研究方向：房屋建筑工程施工。

通运输条件的优劣,偏远区域交通路网不够健全,建材、大型机械设备的运输周期延长,材料进场时间不够及时等原因导致了工序等停^[2]。场地土质和地质条件千差万别,软弱地基、砂土层及其他不良地质较多,需进行地基加固和开挖爆破预处理操作,加大了施工工序及操作时长的要求。施工现场占地面积的不足将导致大型机具放置的限制、多工种交叉作业的空间拥堵、各个施工班组之间的干扰、作业效率下降等问题。场地地面不平,需投入人力和物力进行场地平整,以进一步挤压有效的施工工期。与此同时,现场周围如有噪声、粉尘类污染源或靠近居民区等,则需实施严格降噪防尘保护措施,一些高危作业也会受时间段的制约。场地周围的环境约束加大了现场管控的难度,如果前期的勘察调研不到位,没有对场地的情况进行应对预案的制定,很容易发生各种突发状况,打乱既定的施工节奏,导致整个施工进度的落后。

(二) 工程设计变更因素

工程设计是房屋建筑施工得以进行的基本依据,而设计缺陷和后期变更则是导致工期扰动的主要原因。前期设计阶段如果勘察深度不够,设计人员没有充分考虑到工程的实际工况,图纸有遗漏、参数有冲突、细节有遗漏,在施工阶段经常出现图纸答疑的情况,有些工序不能按图纸正常进行,不得不停建以待设计修正。建设单位的需求调整、使用功能更改等,都将诱发工程设计变更,而变更又将带来施工方案调整、工序改动等问题,一些已经施工完的地方还要进行拆除返工等工作,耗费了大量人力物力和时间成本。设计文件缺乏完整性,施工说明、技术规范匹配不全,将导致施工班组在认识上产生偏差,发生错施工、重复施工等,这些因素进一步放大了设计变更给施工进度所带来的不利影响。

(三) 设备材料供应因素

建筑设备和材料作为房建工程实施的物质基础,其供应链条是否稳定直接决定了建设是否能够持续进行,项目施工所涉及的建材品种较多,钢筋、混凝土、构配件及各种施工机械设备等,从购置、制造、运输直至工地进场,其中任何一环出了问题,都有可能传导到工地。供应商的产能不足和订单排期的紧张将导致材料生产供货的推迟;道路限行和极端天气等外界条件的影响,将使材料运输出现障碍,材料设备不能准时进入现场,直接造成工作面的停工。材料进场后材料质量不过关、构件尺寸有偏差、需退货再购买处理等都将增加占用工期的时间。施工机械设备对进度的影响也是一样的,大型施工设备的采购租赁相对落后,设备入场的安装和调试的周期太长;设备缺乏日常维保,在施工中经常会出现故障停运的情况,检修排查花费较多时间,最终导致施工进度的不断拖延。

三、房屋建筑工程中施工进度控制的优化策略

(一) 制定精细化施工进度计划

精细化施工进度计划为进行进度管控提供了前提条件,转变传统粗放式计划制定方式,根据工程实际运行条件构建了多层次

进度计划体系,在制定方案之前,技术管理人员对施工图纸、勘察报告和施工合同进行充分的阅读,对所有的施工工序进行梳理,理清了各个分项工程间的逻辑关系和搭接关系以及前置工序和后续工序间的约束条件。分别制定了总进度计划、月进度计划和周进度计划,其中总计划明确了项目的整体完成时间和关键里程碑,而月、周计划则对这些总计划进行详细的分解,对每个分项工程的启动和竣工时间进行详细的规定,并对每个工序的责任人进行明确^[3]。在编制方案过程中充分考虑了场地条件、地质情况和雨季等不利条件,并留有合理缓冲工期以免方案与场地实际情况脱节。同步匹配资源计划并结合进度节点布置人力、物料和机械设备的入场时间以实现资源需求和施工工序的互相匹配。规划结束后组织施工、监理和施工等多方联合会审,检查规划中的逻辑漏洞并对工序排布进行优化。在施工实施阶段以每周和每月为一循环对照计划对实际完工情况进行验证,当进度发生偏差时及时对滞后诱因进行分析,并采取调整工序搭接、优化班组排班和加大作业资源的措施进行纠偏。同时匹配风险应急方案对停工待料和恶劣天气风险进行预判,并提前预置对策,确保进度计划能动态降落,避免方案和场地两张皮。

(二) 加强设备和材料供应保障管理

为了减少因材料供应链波动而导致工期风险,有必要构建全流程设备材料供应保障管理机制,工程前期与精细化施工进度计划相结合,制定完整的材料需求清单并确定了各种建材、设备规格参数、数量、进场时间点等信息,作为采购工作基础^[4]。在采购阶段严格按照招投标流程进行采购,从供应商资质、生产能力和以往项目绩效等方面进行全面考核,优先选择产能稳定且履约能力较强的合作方,同时对备选供应商进行储备,避免单一供应商因供货故障而导致断供。采购合同中对供货周期、质量标准 and 违约追责条款等内容的明确规定对供应商的履约行为具有制约作用。材料运输环节要调度好,事先计划好运输路线,对交通管制、恶劣天气及其他扰动因素进行预判,合理分配发货时间,确保材料如期到达施工现场。物料进场实行严格的报验制度,核实外观、规格和质量证明文件,并对重要物料进行采样和送检工作,及时将不合格品运回,杜绝因劣质物料涌入现场而返工的现象。改善现场仓储管理并根据物料的特点分区储存,作好防潮和保护工作,降低物料的损耗和变质程度。对施工机械设备按施工节点制定租赁或采购计划,进场安装调试验收合格后即可投入使用,建立设备维保台账、实施定期检修保养、及时更换老化零部件等措施,减少现场发生故障停机的几率,确保设备的持续平稳运行,从而可靠地提供材料供应,确保建设的持续进行。

(三) 完善施工现场组织管理体系

健全的现场组织管理体系对进度目标实施至关重要,必须先建立一支专业的项目管理团队和挑选有房建项目实践经验的项目经理、技术负责人和现场管理人员,定期举办业务培训以,提高管理人员的进度管控和协调处置能力。结合工程特点制定了有针对性的施工组织设计,确定了各分项工程的施工工艺、作业时序和岗位职责,并将进度目标分解到每个班组及具体负责人^[5]。对施工现场的平面布置进行合理的规划,对作业区、材料堆放区和机

械停放区进行科学的分区，确保了足够的施工空间，降低了多个工种交叉作业的互相干扰。对交叉的施工工序要搞好工序协调工作，确定各队进出场和退出场的时间，以免发生工序冲突和窝工守候等情况。加强施工现场调度工作，定期召开项目进度例会、各队报告目前运行情况、梳理存在问题、就地协调化解施工矛盾。注重参建各方之间的交流与衔接，积极与建设单位、监理单位和设计单位进行联系，对现场存在的问题进行及时的反馈，有效地促进图纸会审和设计变更报审，缩短了交流等待时间。在考虑安全和进度辩证关系的前提下，消除盲目赶工而忽略安全管理现象，实施现场安全防护以减少因安全事故而导致停工现象。健全内部考核机制，把进度完成与班组绩效联系起来，激发施工人员的工作热情，并依托现场规范化组织管理来确保施工按设定的节奏有序进行。

（四）构建进度监测动态评估机制

构建进度监测和动态评价机制以实现施工进度全程跟踪管控和进度偏差的及时辨识，达到早期发现和早期处理的目的，结合现场巡查、测绘监测和无人机航拍多种方式收集现场实际进展情况，并定期对分项工程的实际完成情况进行检查，与进度计划节点目标进行比对，客观把握工程的真实进展情况。设置标准化的评价指标，覆盖计划完成率、关键节点实现程度和工期延误幅度三个评价维度，按照月和周的尺度进行进度综合评价并量化分析进度的实施效果。在进度滞后时，管理人员对滞后根源进行深入分析，判别是否为材料供应、人员操作、技术方案或外部环境等因素导致的拖延，并有针对性地制定纠偏方案。对轻微偏差则采用优化作业班次和合理调整工序搭接等措施予以补偿，存在很大的工期缺口时，经各参建方论证后适度加大人力设备的投入，并对施工方案进行优化收回了工期。建立闭环管理流程并在纠偏结束后对后续施工进行连续跟踪，以考察纠偏措施的实际效果。同时对进度管理资料进行存档，全面记录进度数据、偏差原因、调整措施等，对后续类似工程具有一定的借鉴意义。摒弃只注重成果而忽视流程的管理模式，采取常态化监测、评估和纠偏等措施，动态管控进度，避免微小进度偏差不断积累并演变成重大工

期风险。

（五）大力推广和应用现代化施工技术

现代化的施工技术可以优化施工流程、提高作业效率、对进度控制起到技术支持作用，积极推进 BIM 技术的应用，对设计阶段的模型进行碰撞检查，预先发现管线、构件间的矛盾问题，降低施工阶段图纸变更的返工现象，在施工阶段以 BIM 为支撑进行施工模拟，对每道工序的施工过程进行推演，对施工排布方案进行优化，对交叉作业冲突进行超前预判并对资源配置方案进行优化。在 BIM 模型的帮助下完成工程量统计并协助材料计划编制以降低材料计划的误差。施工现场通过引入物联网技术对大型机械设备的运行状况进行在线监控，并实时获取设备的运行数据以达到故障的提前预警和减少设备突发停机的可能性。采用无人机航拍的方式对施工现场进行巡检，迅速掌握施工现场的整体施工面貌，并协助获取进度信息，提高施工现场的管控效率。在条件许可的工程中可以应用预制构件、厂房完成构件生产、运到现场进行装配施工、把大量的现场作业移交给厂房、缩短了现场工期。同时进行 AR/VR 虚拟技术交底使施工人员对复杂的节点工艺有一个直观的了解，减少了认识上的偏差和施工中的失误返工现象。在新技术落地时，对管理人员和作业人员同步进行技术培训，保证人员对技术操作要点的把握，切实起到技术赋能的作用，依托技术手段对无效工期进行挤压，促进整体施工效率的提高，有利于项目进度目标的达成。

结语：房屋建筑工程施工进度控制受到场地、设计和材料供应等诸多因素的综合作用，进度管控不是简单地压缩工期，是一项综合考虑了质量、安全和成本等方面内容的系统性的管理工作。文章对进度控制的优化价值进行解剖，并对其主要影响因素进行梳理，分别从计划编制、材料保障、现场组织、监测评价和新技术应用等维度提出了优化策略。施工企业在房建项目的实际施工过程中应根据工程本身的工况灵活结合各种管控手段来提高全过程进度管理的水平并及时解决各种工期风险问题。后续也可以进一步加强风险预判和考核制度的建设，不断提高进度管控水平，确保房屋建筑工程项目的高效如期竣工交付使用。

参考文献

[1] 陈鲤婷, 李海洋. 进度管理在建筑工程管理中重要性探讨 [J]. 建筑与预算, 2024(11):55-57.
[2] 羊宏峰. 建筑工程进度管理的影响因素与实施策略 [J]. 房地产世界, 2024(23):73-75.
[3] 卜俊峰. 新时代背景下建筑工程管理中的进度管理分析 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2025(11):44-46.
[4] 刘家俊. 协同施工视域下建筑工程进度管理研究 [J]. 房地产世界, 2025(19):83-85.
[5] 李季. 住宅建筑工程管理中质量控制与进度管理的协调与优化 [J]. 居舍, 2025(36):158-161.

人防工程质量监督体系构建与完善：十年实践经验的反思与探索

周权

常德市人民防空工程质量监督站，湖南 常德 415000

DOI:10.61369/ME.2026070014

摘 要： 人民防空工程质量监督体系由政府发挥主导作用，建立起多主体的闭环式结构。在过去十年里，其从以行政指令为主导转变为多元监督、信息化共享以及全生命周期管理模式。实际操作中存在标准落实不佳、监督空白区域、技术不足等难题，要通过智能化监督模式、规范化流程、法规强化以及专业化训练等途径加以完善，促使体系朝着高效精确方向迈进，确保工程防护效果与安全。

关 键 词： 人防工程质量监督体系；实践反思；体系完善路径

Construction and Improvement of Civil Air Defense Project Quality Supervision System : Reflection and Exploration of Ten Years of Practical Experience

Zhou Quan

Changde City People's Air Defense Engineering Quality Supervision Station, Changde, Hunan 415000

Abstract : The quality supervision system for civil air defense projects is led by the government and has established a multi-subject closed-loop structure. Over the past decade, it has shifted from being dominated by administrative instructions to a multi-supervisory, information-sharing, and full life-cycle management model. In practice, there are problems such as poor implementation of standards, blind spots in supervision, and technical deficiencies. These issues need to be addressed through intelligent supervision models, standardized processes, strengthened regulations, and professional training to promote the system towards greater efficiency and accuracy, ensuring the protective effect and safety of the projects.

Keywords : civil air defense project quality supervision system; practical reflection; system improvement path

引言

人民防空工程质量监督体系是确保城市战时防护功效与平时使用安全性的主要支柱，它以政府监管作为主导，搭建多主体协作的闭环方案，近十年来通过标准化流程和技术运用大幅提高管控水准。2016 年《人民防空工程质量监督管理规定》的修订促使监督主体多元化变革和信息化平台搭建，成为体系发展的重要转折点。但是目前体系仍然面临标准落实不佳、隐蔽工程监管存在盲区以及新型材料检测技术发展滞后等难题，对监督效能的充分施展形成制约。通过十年实践经验进行反思，要从智能化监督模型搭建、法规框架完善、专业人才培养等方面探寻优化路径，以符合新时代人防工程高质量发展的需要，为城市安全防护能力的加强提供有力支撑。

一、人防工程质量监督体系的现状与发展

（一）体系结构与功能概述

人防工程质量监督体系以政府监管作为主导，包含人防主管部门、质量监督机构、第三方检测单位以及建设参与方等主体，建立决策、执行、监督、反馈闭环结构。主管单位负责政策的制定，监督组织承担实地核查与验收把控，检测部门提供技术保

障，参建主体履行质量职责。核心业务包括勘察设计、材料设备、施工工艺、隐蔽工程以及竣工验收等方面，通过事前审核、事中检查、事后评价保证工程符合战术技术标准。此体系于保障工程防护效能和使用安全方面起到主要作用，近十年通过标准化以及技术方法大幅提高质量管控水准^[1]。

（二）十年发展历程回顾

人民防空工程质量监督体系历经十年发展，起始于以行政指

令为主要方式的初始时期，此时监督流程缺乏统一标准，监督机制显示碎片化状态。2016年左右成为主要节点：行业推进主体多元化变革，引入第三方检测组织，并且搭建省级信息平台，实现数据共享追溯。这一转变受到《人民防空工程质量管理规定》的修订、BIM和物联网技术的应用以及对重大事故的反思等因素的推动^[2]。此后体系进入完善时期，监督要点从实体检验转变为全生命周期管控，建立起设计审核、过程监管与验收备案的闭环制度。十载实践促使监督标准更为细化、技术手段得以升级，并且理念从事后整改转变为事前预防，为当下体系优化筑牢基础。

二、十年实践经验的深度反思

（一）质量监督工作中的挑战分析

在十年的人防工程质量监督工作开展期间，标准落实不到位的状况较为明显。有一些建设单位为了削减成本或者加快工程进度，在执行关于人防工程防护密闭性能、结构强度等方面的强制性标准时有所松懈，这使得工程存在防护功能丧失的隐患。监督空白区域主要体现在隐蔽工程阶段，像地下防水作业、预埋件装设等重要工序，由于监督人员无法全程跟进，容易出现偷工减料情况，对工程整体质量造成影响。技术方面的不足显示为新兴人防材料的检测技术发展滞后，常规检测手段难以符合复合材料、智能防护装备的质量评估要求，导致监督精准度下降。这些问题的产生原因包括监督资源分配不够、人员专业能力和新技术发展不符合，还有部分责任主体质量观念淡薄。其产生的影响不光会削弱人防工程在战时的防护效能，还可能诱发安全事故，使社会对人防工程的信任程度降低^[3]。

（二）经验教训与成功案例提炼

在对十年实践经验进行深入反思时，对经验教训与成功案例的提炼要重点关注人防工程质量监督体系的主要问题。实际情况显示，监督策略的有效性对工程质量有着直接的影响。例如某重点人防项目引入第三方检测单位参与全流程监督，通过信息管理系统实现实时数据共享，明显降低隐蔽工程质量问题的发生概率，此案例成为体系健全的主要参考。失误反思展现出传统监督模式存在重结果轻过程的弊病，部分工程项目由于前期监督缺失，使得后期整改成本大幅增加，这一经验教训促使监督流程朝着事前预防、事中控制、事后评估的全周期模式进行转变。另外监督人员专业能力欠缺曾造成对新型防护材料性能评估出错，推动体系加强技术培训与资质认证制度。这些经验与教训以及成功案例为体系的完善提供实践支撑，重点指出监督体系要兼顾技术改革与制度改进，通过动态调节监督策略来符合人防工程技术发展的需要^[4]。

三、体系完善的理论探索与路径设计

（一）完善体系的内在需求分析

1. 体系内部缺陷识别

体系完备的理论研究与路径规划里，完备体系的内在需求分

析要专注人防工程质量监督体系的实际运行难题，而体系内部瑕疵识别是其中核心环节。当下监督体系在方案方面存在资源分配不均衡的状况，体现为不同区域的监督力量布局失衡。经济发达区域的监督人员和技术设备充裕，欠发达区域却遭遇人员短缺、检测设备陈旧等难题，使得监督的覆盖范围与深入程度难以得到保障。机制方面的协调漏洞更为明显，人防工程关联住建、消防、应急管理等多个部门，但是部门之间信息共享机制匮乏，监督标准不一致，产生重复监督或者监督空白的情况，对监督效率和权威性造成影响。这种缺陷直接对监督效能的展现形成制约，难以符合新时代人防工程高质量发展的需求，凸显出完善体系的紧迫性^[5]。

2. 外部环境变迁影响

在体系完备的理论研究与路径规划里，外部环境变动的影响要结合技术创新、政策法规调整和社会需求提高来开展分析。在技术改革领域，BIM、物联网等数字化技术得以应用，这使得质量监督体系需从传统的人工检测朝着智能监测方向转变，通过实时的数据采集与分析来提高监督的精准程度。在政策法规变动方面，近段时间人防工程相关法规进行修订与完善，像《人民防空工程质量管理规定》的更新，对监督流程的规范性和透明度提出更高标准，促使体系朝着法治化、标准化的方向迈进。从社会需求增长角度来看，城市化进程不断加快使得人防工程建设规模得以拓展，民众对于工程质量安全的关注程度日益提高，这推动着监督体系要加强风险预警以及应急响应机制。这些外部要素一同推动体系的现代化探寻，要在理论方面搭建符合技术、政策以及社会需求的监督方案，在路径规划上整合多方面资源，建立动态调节的监督方式。参考国内外工程质量的先进做法，能够进一步提高体系的运行效能与适配性，最终实现人防工程质量监督体系的系统性健全^[6]。

（二）完善策略的创新路径

1. 监督机制创新设计

体系完备的理论研究与路径规划里，完备策略的创新途径能够凭借十年实践成果搭建智能化监督模式，通过物联网技术整合人防工程建造全流程的数据，实现从材料入场到竣工检验的实时监管，提高监督效能与精准程度。监督机制的创新设计要建立风险预警体系，整合历史质量问题的数据库以及实时监测的数据，通过机器学习算法来识别潜藏的质量风险，例如结构裂缝、防水材料失效这类风险点，提前发出预警信息并推送整改的建议，提高体系的动态适应能力。该机制能够包括人防工程建设的各个阶段，从设计审核到施工进度再到后期保养，建立闭环式管理，并且引入第三方评估单位参与监督，保证监督的独立性和专业性。智能化监测系统的运用要重视数据安全和共享体制，搭建统一的监管信息平台，实现多部门数据交互，为决策提供数据支持，促进人防工程质量监管从传统方式向智能化转变^[7]。

2. 管理流程优化方案

在体系完备的理论研究与路径规划里，完善策略的创新途径要以标准化操作流程和绩效评估体系的优化作为核心。标准化作业流程需重点对监督流程展开全链条梳理，从项目申报监督、过

程查验直至竣工验收,清楚各环节的责任主体、技术规范以及时间节点,通过建立数字化监督档案体系实现信息即时共享,降低人为干预和流程冗余。绩效评估系统要引入多样化指标,既有工程实体质量合格率、监督意见整改实现率等定量信息,也包括服务对象满意程度、应急响应速度等定性方面,搭建动态变化的评估模型来体现监督工作的实际成效。管理流程的优化策略能够通过信息化手段建立智慧监督平台,整合质量监督数据和信用体系,实现监督任务的智能化分配和进度跟踪。通过定期组织监督人员开展技能培训和案例研讨,加强监督队伍的专业素养以及标准化执行水平。相关实践显示,标准化流程和绩效评估的协同改进,可有效提高监督工作的执行效能与透明度,为人防工程质量监督体系的不断完善提供路径支撑^[9]。

四、构建与完善体系的具体建议

(一) 政策法规完善措施

1. 法规框架强化建议

法规体系强化要以现行的人防工程有关法律法规为基础,结合近十年实践中凸显的监督权责不清晰、处罚力度不够等状况,推进核心法规的修订和细化。需清晰质量监督机构的独立执法身份,详细划分监督流程里主要节点的权责,比如把隐蔽工程验收、防护设备检测等环节的监督准则归入法规条文,防止实践中因条款含混造成的执行误差。对于新型人防工程(像综合管廊附属式人防、智能化人防设施这类)的质量要求,要增添专项法规条款,以保障技术标准和监督手段的适配性。同时加强法规的惩处机制,加大对违规举动的处罚程度,把责任追溯拓展到设计、施工、监理等全流程主体,通过清晰的法律责任促使各环节质量管控意识加强。在修订环节,可参考别的工程领域已成熟的监督法规方案,汲取其在权责界定、技术标准改革等方面的经验^[9],让人防工程质量监督法规既符合行业特点,又拥有与现代工程管理体系的适配性,为监督工作提供更稳固的法理支持与执行凭据。

2. 执法机制优化路径

在建立并完善体系的具体建议里,政策法规的完善措施要符合人防工程质量监督的实际需求,对主要环节的标准规范加以细化,比如确定人防工程材料质量追溯机制、隐蔽工程验收程序等,填补现行法规在新兴技术应用(像BIM技术融合监督)方面的空白,提高法规的可操作性与前瞻性。执法机制的优化途径需重点于建立多部门协同监督机制,通过明确住建、人防、消防等部门的监督职责以及衔接程序,化解政策落实过程里的部门壁垒难题,提高整体协同效率。能够依靠数字化平台实现监督信息的共享,例如建立人防工程质量监督数据交互系统,促进监督资源的整合和高效运用,加强执法结果的联动使用,把质量监督结果与企业信用评估、市场准入等关联起来,建立闭环管理^[10]。

(二) 技术应用升级策略

1. 信息化建设方案

人防工程质量监督体系的建立与完善要依靠技术应用的升级策略来加强信息化建设规划。因为人防工程隐蔽特性突出、施工

流程繁杂等特征,可引入物联网技术来布置智能传感器,对混凝土强度、钢筋间距、防水性能等核心指标开展实时监控,数据同步传至云端平台,取代传统人工抽样检查模式,提高数据收集的全面性和及时性。建立人防工程质量监督数据库,整合项目审批、施工进度、验收记载等全生命周期的数据,利用大数据分析技术探寻质量隐患的关联规律,例如通过历史数据模型预估不同地质状况下的渗漏风险,为监督决策提供数据方面的支持。除此之外研发移动端监督管理系统,实现监督人员在现场扫码录入检查信息、上传影像资料,系统自动生成标准化报告且推送整改通知,缩减问题处置的周期,促使人防工程质量监督从经验主导转变为数据主导,保障监督体系的精准度与高效性。

2. 标准体系更新建议

在建立和完善体系的具体建议里,技术应用升级措施要重点于人防工程全生命周期的数字化变革,能够引入BIM技术实现设计、施工、运维阶段的信息整合,通过物联网传感器实时监控结构应力、环境参数等主要数据,结合大数据分析建立质量隐患预警模式,提高监督的精确性与及时性。标准体系更新提议需根据十年实践经验以及新兴技术发展需求,增添模块化人防部件、智能通风装置等新技术的质量验收规定,明确平战转换节点的技术参数规范,同时参考国际人防工程标准的先进思想,调整防护等级、材料性能等核心指标的量化准则,保证标准和工程实践的动态符合。另外要建立标准定期修订的机制,吸收工程案例的反馈以及技术创新的成果,形成实践、标准、再实践的闭环式更新途径,给体系的可持续发展提供制度方面的保障。

(三) 人力资源与文化构建

1. 专业化培训机制设计

专业化培训机制的设计需重点关注人防工程质量监督的专业特质。提议建立常态化的培训机制,通过年度培训时段与模块化课程,加强监督人员的技能并推动知识更新。培训包括人防建设规范、检测手段、法律法规以及新材料运用,通过十年实际案例,安排情景模拟和实操训练,提高实用性。引入业内专家和资深监管人员组建讲师队伍,促进理论和实践结合,并且通过定期考核与技能认定,把培训成效与晋升、绩效关联起来,建立长效激励机制。建立线上学习平台,供给实时更新的政策文件和案例库,符合碎片化学习需求,推动知识动态更新,为质量监督体系高效运转奠定人才基础。

2. 经验传承与文化营造

人防工程质量监督体系的不断完善要依靠知识分享和文化建设的双重帮助。通过十年实践成果,能够建立集成式知识共享平台,融合不同阶段的监督案例、技术标准阐释以及问题处理方案,通过数字化方式实现跨部门、跨区域的经验积累与查询,为一线监督人员提供实时更新的决策根据。质量文化培养需融入日常监管流程,通过定时举办质量案例回顾会、技能竞赛以及师徒结对模式,加强监管人员的责任观念与专业认可。把质量目标归入绩效考核系统,建立质量改进激励制度,促使组织内部营造出人人重视质量、事事关注规范的文化环境,实现经验传承与持续改进的良好循环,为监督体系的健全提供内在动力。

五、总结

内部需求分析为人防工程质量监督体系优化之基础，要结合平战结合的特性，辨识薄弱之处与潜在风险。改革策略是体系优化的主要动力，包括运用信息化方式和健全人员培训制度，从而提高监督效能与精确性。具体建议重点强化责任主体的协同合作、进一步细化监督标准、建立动态反馈机制，以此来应对监督

分散化以及标准落实不彻底等问题。未来的发展需要进一步深化大数据、物联网等技术的融合，实现质量数据的实时收集与分析，同时健全法律法规以及问责制度。推动整体优化的途径是建立需求、策略、执行、反馈闭环，促使体系朝着更高效、更精准、更系统的方向演进，为加强城市安全防护能力提供有力支撑。

参考文献

-
- [1] 智慧娟 .A 项目人防工程质量管理问题及对策研究 [D]. 河北: 河北地质大学, 2023.
- [2] 李乐然 . 瑕疵证据补救规则的反思与完善 [D]. 吉林: 吉林大学, 2023.
- [3] 韩梦迪 . 论我国预重整制度的反思与完善 [D]. 山西: 山西大学, 2022.
- [4] 李方正 . 当代中国继承宽宥制度的反思与完善 [D]. 吉林: 吉林大学, 2024.
- [5] 王丽薇 . 算法影响评估机制: 中国方案的反思与完善 [D]. 北京: 对外经济贸易大学, 2022.
- [6] 邵栏 . " 问题导向 · 实践反思 " 的新教探索与实践 —— 以班本化主题活动为例 [J]. 上海课程教学研究, 2023(S01): 30-36.
- [7] 刘权 . 少捕慎押的理念澄清, 实践反思与完善路径 [J]. 辽宁警察学院学报, 2024, 26(4): 9-18.
- [8] 许广松 . 国有企业内部控制监督体系的构建与完善 [J]. 现代营销 (上旬刊), 2024(19): 82-84.
- [9] 熊曙霞 . 国有企业内部控制监督体系的构建与完善 [J]. 行政事业资产与财务, 2024(6): 100-102.
- [10] 张乾, 辛大为 . 强制执行公证制度的实践反思与规制路径 [J]. 临沂大学学报, 2023, 45(2): 109-118.

PVC/ABS 合金改性材料的配方优化与工艺创新

邵峰

浙江金立达新材料科技股份有限公司杭州分公司, 浙江 杭州 310000

DOI:10.61369/ME.2026070015

摘 要： 本文围绕 PVC/ABS 合金改性材料展开。阐述了 PVC 和 ABS 基础性能及合金化协同效应机制，介绍了助剂对热变形温度影响，优化了三相比，研究了螺杆组合等对挤出成型影响，还涉及多种性能测试方法及在不同应用中的表现，以及材料性能提升的创新路径

关 键 词： PVC/ABS 合金；性能优化；工艺创新

Formulation Optimization and Process Innovation of PVC/ABS Alloy Modified Materials

Shao Feng

Zhejiang Jinlida New Material Technology Co., Ltd. Hangzhou Branch, Hangzhou, Zhejiang 310000

Abstract： This paper focuses on PVC/ABS alloy modified materials. It discusses the fundamental properties of PVC and ABS and their synergistic alloying mechanisms, covers how additives affect the heat deflection temperature (HDT), optimizes the three-phase ratio (PVC/ABS/additives), and investigates the impact of factors like screw configuration on extrusion molding. It also includes various performance testing methods, the material's performance in different applications, and innovative approaches for enhancing material properties.

Keywords： PVC/ABS alloy; performance optimization; process innovation

引言

随着科技的进步以及应用需求的增加，高分子材料的研究与应用获得广泛重视。2023年发布的有关材料产业发展的政策，重点提出对高性能、环保型材料开展研发以及进行应用的扶持。聚氯乙烯（PVC）和丙烯腈、丁二烯、苯乙烯共聚物（ABS）作为常用的高分子材料，它们各自的基础性能差别为合金材料的设计提供根据。PVC 具备的阻燃及耐腐蚀特性，ABS 拥有的韧性与加工流动等性能，还有二者共混期间的相容机理、助剂给性能带来的影响、加工工艺参数起到的作用、结晶度调控技术、多种性能检测方法以及在不同应用场景的检测 results 等，均对 PVC/ABS 合金改性材料的综合性能提高非常主要，符合政策导向下对材料性能优化的要求。

一、PVC/ABS 合金材料体系特性分析

（一）PVC 与 ABS 基础性能比较

聚氯乙烯（PVC）和丙烯腈、丁二烯、苯乙烯共聚物（ABS）是两类常用的高分子材料，具备不一样的基础特性。PVC 具备优良的阻燃特性，由于其氯原子占比相对较高，这让材料在发生燃烧情况时能够释放出可抑制燃烧进程的气体，进一步显示出自熄性能^[1]。PVC 也展现出较为良好的耐腐蚀性能，可在多种化学环境当中维持稳定。与之相比 ABS 是以它卓越的韧性而著称。该物质是由丙烯腈、丁二烯以及苯乙烯这三种单体构成的共聚物，其中丁二烯成分给材料赋予良好的柔韧性与抗冲击能力。另外 ABS 的加工流动性能比 PVC 更优，这让它成型环节更易填充模具，制得具有复杂形状的产品。这些基础性能方面的区别为 PVC/ABS 合金材料的设计与应用提供主要根据。

（二）合金化协同效应机制

PVC 与 ABS 共混可形成合金材料，其合金化协同效应机制

涉及相界面相容机理等方面。PVC 为极性聚合物，ABS 为非极性聚合物，二者相容性较差。在共混过程中，相界面处易出现微观相分离，影响材料性能。增容剂可改善这种情况，其作用机制在于能够降低相界面张力，增强相间的黏附力。增容剂分子一端可与 PVC 的极性基团相互作用，另一端能与 ABS 的非极性链段结合，从而促进二者在相界面处的相互扩散和融合，提高材料的均匀性和稳定性。这种相容作用对材料的力学性能有增效作用，可使材料的拉伸强度、冲击强度等得到显著提升，增强材料的综合性能，满足不同应用场景的需求^[2]。

二、改性材料配方优化策略

（一）功能助剂配伍体系设计

热稳定剂、抗冲改性剂与 CPVC 共混对热变形温度存在显著影响。热稳定剂能有效防止材料在加工和使用过程中因受热而分解，确保材料的稳定性^[3]。不同类型和用量的热稳定剂会改变材料

的热性能。抗冲改性剂则可提高材料的韧性和抗冲击能力，其与基体材料的相容性以及自身的结构特性会影响对热变形温度的作用。CPVC 共混比例也至关重要，合适的比例能优化材料的综合性能，改变分子链的排列和相互作用，从而影响热变形温度。通过系统研究这些助剂的配伍关系和对热变形温度的影响规律，可为配方优化提供关键依据。

（二）正交试验优化配比

采用 L9(3⁴) 正交表对 PVC/ABS 合金改性材料中塑化剂 - 填料 - 聚合物三相配比进行系统性优化^[4]。通过合理设计正交试验，能够全面考虑各因素及其交互作用对材料性能的影响。在试验过程中，精确控制塑化剂、填料和聚合物的不同水平组合，获取多组试验数据。对这些数据进行详细的分析，例如通过极差分析确定各因素对材料关键性能指标（如拉伸强度、冲击强度等）影响的主次顺序。同时，利用方差分析评估各因素影响的显著性，从而筛选出对材料性能提升最为关键的因素水平组合，实现配方的优化，提高 PVC/ABS 合金改性材料的综合性能。

三、加工工艺创新路径

（一）挤出成型工艺优化

1. 螺杆组合参数调控

螺杆组合参数对挤出成型工艺至关重要。不同的螺杆组合会产生不同的剪切强度，进而影响 PVC/ABS 合金材料的分散均匀性。通过调整螺杆的长径比、螺距、螺纹深度以及螺杆元件的排列方式等参数，可以实现对剪切强度的调控。举例来说适度增大螺杆的长径比例能够延长物料于螺杆里的停留时长，提高混合成效；科学调节螺距与螺纹深度能够改变物料的输送速率和剪切力分布状况。此外不同种类的螺杆元件（像输送元件、混合元件、剪切元件等）的组合形式也会对合金材料的分散造成明显影响。研究这些参数对合金材料分散均匀状况的量化作用，有助于对螺杆组合进行优化，提高挤出成型工艺的质量与效率^[5]。

2. 温度梯度控制模型

搭建五区温度场分布和熔体流动速率的数学模型，对挤出成型工艺优化里的温度梯度调控非常主要。通过精准的数学模型，能够深入研究温度场于不同区域的分布特性以及它对熔体流动速率的作用^[6]。这有利于科学设定各区温度，防止局部温度过高或过低造成的材料性能不一致。在模型搭建进程里，要考量材料的热传导性能、螺杆转动速度、挤出机的构造参数等多个因素。根据实际的生产数据来对模型开展验证与修正工作，从而保证模型的精确性和可靠性。通过此模型，能够实现对温度梯度的精确把控，提高挤出成型制品的质量与生产效能。

（二）注塑工艺参数创新

1. 保压曲线优化设计

通过模腔压力传感器的相关数据能够实现保压曲线的优化规划。在注塑环节，模腔压力传感器可实时对模腔内压力的变动状况开展监测。根据所收集的数据，能够对保压时长、压力曲线开展动态调节。在模腔压力达到所设阈值之际，系统可自动对保压

时间与压力作出调整，保障制品在保压环节能获得恰当的压力和时间，进一步提高制品的质量与性能。这种通过实时数据的动态调节模式，相较于传统的固定保压曲线设定，更能够符合不同的注塑状况与制品需求，确实降低制品的瑕疵，像缩痕、翘曲这类问题^[7]。

2. 结晶度控制技术

结晶度对 PVC/ABS 合金改性材料的各项性能存在主要影响。通过冷却速率调控的 β 晶型定向引导工艺属于一种有效的结晶度管控技术。凭借精准控制注塑流程里的冷却速度，能够促使材料建立特定的 β 晶型方案，进一步改善结晶度。适度提高冷却速度可抑制晶体的生长，促使形成细小且均匀的晶粒，提高结晶程度，加强材料的力学性能与热稳定性^[8]。此工艺能够提高材料的加工特性，降低缺陷的出现。此创新型结晶度调控技术让 PVC/ABS 合金改性材料于注塑工艺里的应用拥有了更广阔的发展天地。

四、性能测试与应用验证

（一）力学性能表征

1. 动态力学分析 (DMA)

动态力学测试 (DMA) 是研究材料在交变应力影响下的力学特性的主要手段。针对 PVC/ABS 合金改性材料，通过测量不同配方在 -30℃~120℃ 温度区间的储能模量变化曲线，能够深入研究其力学性能随温度的变化情况^[9]。储能模量体现材料于弹性变形阶段储存能量的能力，该数值大小反映出材料的刚性程度。在各异温度情形下，材料内部的分子链运动状况存在差异，进一步使得储能模量产生改变。经由分析这些变化曲线，能够明确材料于不同温度范围的性能特性，例如玻璃化转变温度、低温韧性以及高温刚性等，为材料的配方完善和实际运用提供主要根据。

2. 缺口冲击强度测试

运用缺口冲击强度检测手段，对 PVC/ABS 合金改性材料开展测试，以此表征其力学特性。在 23℃ 和 -20℃ 的环境当中开展实验，获取材料在不一样温度状况下的抗冲击性能数据^[10]。经由对比分析这些数据，可深入知晓合金材料性能的变化规律。当温度处于 23℃ 时，材料的分子链运动相对比较活跃，其抗冲击性能或许会显示出某一表现形式；但是在 -20℃ 的低温条件下，分子链运动受到限制，材料的抗冲击性能也许会产生变化，有可能出现下降形势，也有可能由于材料内部结构的独特性而维持相对稳定，具体情形要根据测试结果来判定。这些资料为深入优化配方以及开展工艺创新提供核心根据。

（二）热学性能验证

1. 热失重分析 (TGA)

热重分析 (TGA) 可用于研究 PVC/ABS 合金改性材料于氮气环境里的热学特性。通过 TGA 能够精准测量材料的初始分解温度和残炭率。初始分解温度为材料热稳定性的主要指标，较高的初始分解温度表明材料在更高温度时才开始分解，这对其在某些高温环境里的应用非常重要。残炭率体现材料经受热分解后剩余的炭质含量情况，其和材料的阻燃性能等紧密相连。对 PVC/ABS

合金改性材料开展 TGA 检测，能够全面掌握其热学特性，为材料的配方改良和工艺改革提供重要的热学性能数据根据，以符合不同应用场景对材料热学性能的需求。

2. 维卡软化点测定

维卡软化温度测定是衡量 PVC/ABS 合金改性材料热性能的主要方式。此项测定通过专门仪器与标准流程开展。把材料制作成规定规格的试样，置于仪器的测试平台上，在特定的负荷以及升温速度下，观测试样表面被压进 1mm 深度时的温度，该温度就是维卡软化点。通过对不同配比的 PVC/ABS 合金材料开展维卡软化点测试，能够知晓 CPVC 添加量等要素对材料软化温度的作用。精确测量维卡软化点有利于明确材料于实际应用里的耐热性能界限，为材料在各类热环境中的运用提供核心数据支撑，进一步进一步完善材料配方与工艺，提高材料的热学特性。

（三）工业应用测试

1. 汽车内饰件成型验证

针对 PVC/ABS 合金改性材料于汽车内饰件成型应用方面开展测试。就双色注塑工艺而言，重点考查材料的尺寸稳定性以及表面光洁度。通过实际生产流程里的数据监测和分析，研究材料于不同工艺参量时的成型成效。查看其于模具里的流动状况以及冷却之后的尺寸误差，来判定尺寸稳定性。对成型完毕的内饰件表面展开检测，评定其光洁程度是否符合汽车内饰的质量标准。参考实验数据以及实际应用的反馈情况，持续对工艺参数进行优化，从而提高材料于汽车内饰件双色注塑工艺里的性能展现，保证所生产的内饰件既能符合尺寸精度的标准，又具备优良的表面

质量。

2. 建筑管材耐候性测试

进行 QUV 加速老化测试以评估户外应用的耐久性。通过模拟自然环境里的紫外线辐射、温度改变以及湿度状况，对建筑管材开展耐候性检测。把管材试样置于 QUV 老化试验箱里，设定不一样的老化时长，查看管材在老化进程中的外观变动，像颜色变浅、表面开裂等状况。并且测定管材的物理性能参数，像拉伸强度、冲击强度、弯曲模量等随老化时长的变化规则。通过测试结果，分析 PVC/ABS 合金改性材料于建筑管材应用里的耐候特性，为配方改良与工艺改革提供数据支撑，保障管材在户外长期运用时可维持良好的性能与稳定性。

五、总结

PVC/ABS 合金改性材料经由刚性颗粒加强及加工工艺改革实现综合性能的提高。此中所提出的通过熔体流动指数调节的多尺度结构管控理论，为材料性能的优化提供全新的思路。在环保标准日趋严苛的情形下，环保类钙锌稳定剂体系的进步具备主要意义，其有利于降低传统稳定剂引发的环境难题。3D 打印成型工艺的发展趋向也受到广泛关注，它有望为 PVC/ABS 合金材料带来全新的应用领域和成型手段。今后要更深入地研究这些创新途径与理论，促进 PVC/ABS 合金改性材料在更多领域的运用，实现其性能的持续提高以及工艺的不断改革。

参考文献

- [1] 俞陈诚. PC/ABS 合金的增容及阻燃改性研究 [D]. 浙江工业大学, 2022.
- [2] 孟凡盛. 改性纤维制备复合 PVC 工艺的研究 [D]. 天津科技大学, 2022.
- [3] 刘波波. 锂离子电池硅负极材料合金化工艺改性研究 [D]. 南昌大学, 2021.
- [4] 王静. YbMg₂Bi₂ 基热电材料的掺杂改性及机理 [D]. 哈尔滨工业大学, 2021.
- [5] 余建明. 基于工艺创新和新型预处理技术的燃料乙醇生产工艺研究及经济分析 [D]. 南京理工大学, 2022.
- [6] 贺盛喜, 黄东, 宋晓玲, 等. 阻燃电缆用 PVC 树脂的研究 [C]// 第 33 届全国聚氯乙烯行业技术年会暨 " 科创杯 " 论文交流会论文集. 2011:120-122, 126.
- [7] 和涛, 郭健. 一种新型改性 PVC 保鲜材料的工艺研究 [J]. 化工管理, 2021(25):164-165.
- [8] 李铃钰. 新型材料在服装制作中的应用与工艺创新研究 [J]. 西部皮革, 2023, 45(21):49-51.
- [9] 梁娜, 苑会林. PVC/ABS 合金国内最新研究进展 [J]. 聚氯乙烯, 2011, 39(6):8-11
- [10] 台启乐. ABS/PVC 合金改性及其复合材料的制备与性能研究 [D]. 武汉理工大学, 2015.

金属材料的相变动力学与微观结构调控

何勇

天津象屿铝业有限公司, 天津 300000

DOI:10.61369/ME.2026070016

摘 要 : 金属材料最终呈现的各类宏观服役表现,本质上由其内部微观组织特征直接决定,而这些微观组态的形成,是相变过程中热力学驱动作用与动力学演化路径共同作用、彼此适配的结果。本文逐层梳理了扩散类相变和位移类相变的动力学作用原理与可控特征,拆解了热-动力学耦合作用在微观组织定制化设计中的核心地位,梳理了多尺度相场仿真技术的落地应用现状,同时结合增材制造、超快激光轰击、瞬时脉冲电加热等极端非平衡加工场景,阐明了相变动力学在其中不可替代的应用价值。最后梳理了当前领域尚存的研究难点,明确了从“依赖热力学筛选”转向“依托动力学定制”的研究范式迭代,是该领域后续发展的核心方向。

关 键 词 : 相变动力学; 微观结构调控; 热-动力学协同效应; 多尺度模拟; 非平衡加工

Phase Transformation Kinetics and Microstructure Control of Metallic Materials

He Yong

Tianjin Xiangyu Aluminum Co., Ltd. Tianjin 300000

Abstract : The final macroscopic service performance of metal materials is essentially determined by their internal microstructure characteristics, and the formation of these micro-configurations is the result of the interaction and adaptation of thermodynamic driving force and dynamic evolution path in the phase transition process. In this paper, the dynamic principle and controllable characteristics of diffusion phase transition and displacement phase transition are sorted out layer by layer. The core position of thermo-dynamic coupling in microstructure customization design is dismantled. The application status of multi-scale phase field simulation technology is sorted out. At the same time, combined with extreme non-equilibrium processing scenarios such as additive manufacturing, ultra-fast laser bombardment and instantaneous pulse electric heating, the irreplaceable application value of phase transition kinetics is clarified. Finally, the remaining research difficulties in the current field are sorted out, and it is clear that the iteration of the research paradigm from "relying on thermodynamic screening" to "relying on kinetic customization" is the core direction of the follow-up development in this field.

Keywords : phase transition kinetics; microstructure control; thermo-kinetic synergistic effect; multi-scale simulation; non-equilibrium machining

引言

金属材料的性能优化,是在加工环节里,把相变和变形过程催生的各类微观组织给拿捏准、调到位。从钢铁里珠光体、贝氏体、马氏体那些五花八门的形态,到钛合金里 α/β 两相的占比和长什么样,再到镍钛形状记忆合金里全靠马氏体相变撑起来的功能表现,微观结构能有这么多花样,全是相变走的路径和对应的动力学条件不一样带来的。做材料设计,大多是照着相图给的热力学平衡状态信息,照着这个去挑合金成分、定热处理的具体工艺参数。然而,工业实践中的相变过程绝大多数远离平衡态,其最终微观结构不仅取决于热力学允许的相变方向,更受制于相变动力学的具体路径——形核位置、长大速率、扩散系数、界面迁移率等因素共同决定了析出相的尺寸、分布与形态。换言之,“能够发生什么”由热力学决定,而“最终得到什么”则由动力学书写。

这几年原位表征、多尺度仿真还有极端非平衡加工技术一路往前冲,相变动力学这块的基础认知实打实往上迈了一大步。新的实验手段能把相变从开头到收尾的微观结构变化全跟下来,热-动力学协同调控的思路也不再是纸上谈兵,大伙终于搞明白相变和变形根本不是各走各的,是受同一套物理规律管着的耦合体系。这下微观组织设计直接多了新路子:只要把相变的动力学路径调准,在热力学允许范围内,就能做出常规工艺根本搞不定的特殊亚稳组织。这篇文章就把金属相变动力学和微观结构调控这块的核心问题、最新成果捋得明明白白,也把现在研究里卡脖子的地方和以后的发展方向掰扯清楚了。

作者简介:何勇(1982.11-),男,汉族,江西南昌人,本科学历,高级工程师,从事金属压力加工方向的工作和研究。

一、相变动力学的基本理论框架

（一）相变分类与动力学特征

金属材料里的相变，按原子运动的不同模式，能分成扩散型和位移型两大类，二者在动力学表现上有着根本性的不同。扩散型相变全靠原子做长程移动来推进，整体转变速率由原子扩散系数直接决定，随温度的变化规律完全符合阿伦尼乌斯关系式。奥氏体化、珠光体转变、析出沉淀这类转变都属于典型代表。这类相变里新相与母相的界面是非共格或者半共格的，界面往前推进需要原子一个接一个完成跃迁，所以整个动力学过程推进偏慢，受温度和保温时长的影响非常明显。位移型相变以马氏体相变为代表，靠原子集体切变完成晶格重构，原子移动距离不足一个原子间距，全程无需扩散。它以形核-长大推进，长大速度接近声速，自带无扩散、表面浮凸、固定取向关系等特点，转变量主要由降温幅度决定，几乎不受保温时长影响。两类相变之间还存在贝氏体这类兼具双特征的相变，其机制争议至今未消，足见相变动力学的复杂程度。

（二）经典形核-长大理论及其适用边界

平时做扩散型相变动力学分析，最常用的底层经典框架就是形核-长大的 JMAK 模型，它默认形核是在材料里随便均匀撒开的，晶粒从头到尾长的速度都不变，顺着这个思路算出来的转变比例随时间走的曲线，是以往的常用工具。但这套老办法碰到非等温过程、晶界先扎堆形核这种不是随机出核的情况，就有点水土不服了。最近不少研究都发现，好多纳米晶体系里，形核和长大的快慢节奏几乎凑到一块儿了，从头到尾都是俩过程结伴同步发生，经典理论里硬把俩环节拆开各算各的前提，已不能完全贴合实际情况了。

（三）相变动力学的实验研究方法

相变动力学相关研究，核心离不开对相变全程的动态实时追踪。早年常用的测试手段，无非是淬火-回火搭配金相观测、差示扫描量热法（DSC）、热膨胀法这几类。这类方法拿到的都是体系整体的宏观平均数据，根本抓不住相变最早期的形核事件，也没法识别局域区域的不均匀特征。最近，各类原位表征技术的快速迭代，给相变动力学研究带来了极大的推进。高温共聚焦激光扫描显微镜可直接实时观测高温相变过程里的晶粒长大和相界面迁移过程。同步辐射 X 射线衍射能够全程追踪相变过程中的晶体结构演变，时间分辨率可以达到毫秒甚至微秒量级。透射电镜配上原位加热台，还能在原子尺度捕捉相变的动态流程的细节。这些新的方法，给理论探索提供了关键支撑。

二、热-动力学协同效应与微观结构调控

（一）热-动力学相关性的物理内涵

以往大家习惯把热力学驱动力和动力学能垒拆成两个互不干涉的独立要素：前者管相变能不能发生，后者管相变推进得快不快。但近年大量研究证实二者存在深层绑定关联，温度、成分、应力场这类热力学状态的调整，会同步改变扩散系数、界面迁移

率、形核能垒等动力学参数，这种耦合特性就叫“热-动力学协同效应”。

拿析出相生长来说，过饱和固溶体的分解驱动力会跟着过冷度提升同步上涨，但过冷度拉满又会压低原子扩散效率，反过来拖慢析出相长大速度。所以析出强化的峰值效果，往往只对应某一个特定温度区间，这是二者动态博弈的结果，绝非单一要素能决定。更深层的耦合还体现在相变和塑性变形的互动里：变形引入的高密度位错、晶界既存贮了额外变形能给相变加驱动力，又能当异质形核的优先位点改形核节奏，这一点在形变诱发相变和 TRIP 效应里体现得格外充分。

（二）基于协同效应的微观结构设计策略

吃透热-动力学协同效应的逻辑后，微观结构设计就不再只靠调合金成分、改热处理温度来实现，转而能通过多手段联动，同步拿捏热力学驱动力和动力学演化路径。

时效析出强化就是最典型的落地案例：通过精准匹配时效温度和保温时长，就能把析出相的尺寸、数密度、共格状态控到最优区间，拿到最理想的强化收益。近年兴起的“析出-位错”协同设计思路更进一步：靠析出和位错的双向互动，既用析出相钉扎位错拉高材料强度，又借预先引入的位错充当异质形核位点，催生出大量均匀弥散的细析出相，最终实现强韧性同步提升。

放到纳米晶材料体系里，晶界弛豫算得上是独一份的调控路子：晶粒细化到临界尺寸往下时，面心立方金属就会触发晶界弛豫，直接把纳米晶的结构稳定性拉上去一大截。这种从热力学非平衡态往亚稳态转的过程，动力学窗口特别窄，对加工参数敏感到不行，刚好把热-动力学协同效应对微观结构演化的强约束给体现透了。

（三）多尺度相场模拟在机理研究中的应用

相场法本来就天生擅长处理不连续的界面问题，是大家研究相变动力学、看微观结构的核心实用工具。它把界面怎么挪、原子怎么扩散、弹性应变这些物理过程，全给归到同一个热力学框架里，从纳米到微米尺度的组织怎么变，它基本都能模拟出来。

多尺度相场模拟最绝的地方，就是能做到多角度串联：原子层面用第一性原理、分子动力学算出来的结果，能直接拿到相变热力学参数和界面本身的特性；把这些参数往介观相场模型里一输，就能准确预判出微观结构在时间、空间里的变化规律；再跟有限元方法搭到一块儿联动，还能进一步搞明白微观组织对宏观力学性能到底有啥影响。这套完整的方法，给材料设计搭起了从“摸透底层机理”到“提前预判性能”的全链条实用支撑。拿镁稀土合金里析出相和位错的互动举例，相场模拟不光算出了析出相应力场对位错的钉扎效果，还摸清了位错塞积反过来促析出形核的规律，给时效工艺优化、析出相形态定制提供了实打实的理论依据。

三、典型非平衡加工条件下的相变动力学

（一）增材制造中的超快热循环与相变路径调控

激光粉末床熔融（LPBF）这类增材制造工艺，核心特点是

冷却速率能冲到 $10^3 - 10^6$ K/s，还带着反复叠加的复杂热循环路径。这种极端工况下的相变动力学表现，和传统常规加工完全不是一个路数。就拿316L不锈钢作为实例来看，LPBF成形态材料依托超高速冷却过程，生成了胞状亚晶结构和极高的位错密度，这类远离平衡态的特殊组织在后续热处理环节的再结晶演化节奏，和传统塑性变形制备的试样差异显著。已公开研究明确显示，LPBF制备的316L试样再结晶推进速率远低于常规材料，核心诱因锁定在胞壁区域合金元素偏聚对位错运动的强钉扎作用上，为后续工艺优化提供了明确的调控方向。

（二）超快激光冲击诱导的相变与强化

飞秒激光冲击处理（FLSP）是另一类典型极端非平衡加工手段。飞秒激光脉冲在 10^{-15} 秒级的超短时长里把能量注入材料表层，能激发出超100 GPa的冲击压力，压力爬升速度远快于热传导的特征时间，能把热效应和力效应彻底拆解开。这种极端高压环境能直接打断金属键，放出来大量近自由原子，触发局域范围内的超快相变。在304不锈钢试样上，双脉冲飞秒激光冲击成功诱发了马氏体相变，表层硬度涨幅突破20%。机理分析显示，当冲击压力超过原子键合模量时，原有晶格会直接失稳，顺着特定晶体学取向完成相变。这套机制和常规热致相变完全不同，给微观结构调控开辟了非热调控的全新维度。

（三）快速电加热的动力学特征与微观结构响应

快速电加热技术依托焦耳热效应让材料极速升温，升温速率能冲到数百甚至数千 K/s，还能靠调整电脉冲的脉宽、电流密度等参数，灵活定制整个热循环曲线的升降温节奏和保温时长。和传统箱式炉热处理比，优势一是超短加热时长直接扼住了原子的长程扩散行为，能把增材制造、冷变形引入的细晶亚结构稳稳保留下来，不会出现常规热处理里常见的晶粒粗化问题；二是电迁移

力、焦耳热催生的微区非均匀温场这类非热效应，会直接改写相变原本的动力学演化路径，催生出常规工艺很难得到的特殊亚稳组织。

拿TC4钛合金举例，快速电加热数秒就能完成 β 转变组织的精准调控，换成传统热处理得花几十分钟甚至几小时。这种效率跃升不只是升温快慢的差别，更是快速加热下相变动力学的特殊表现——晶粒长大的形核和长大过程被大幅抑制，相变全程被压缩在极窄的温度区间里完成，最终得到的双态组织综合力学性能远优于常规热处理试样。

四、结束语

相变动力学是串起合金热力学和微观组织调控的核心纽带，它的理论深度与工程价值，正随研究推进不断刷新认知。本文梳理了扩散、位移两类相变的动力学本征特征，拆解了热-动力学协同效应的底层物理逻辑与微观结构定制的落地路径，结合增材制造、超快激光冲击、快速电加热等主流极端非平衡加工场景，明确了动力学精准调控在先进制造工艺里不可替代的应用潜力。材料最终形成的微观结构，从来不是热力学单一要素就能决定的，而是热力学允许的演化路径和动力学能支撑的推进速率双向适配、协同塑造的结果，二者的深层耦合关联，给我们通过主动调控动力学演化路径，提供了扎实的理论支撑。后续该领域的研究会从高时空分辨原位表征技术、热-动力学协同定量建模框架、多尺度相场与机器学习融合三个方向持续突破，推动金属材料研发彻底从依赖相图的经验试错筛选，转向基于动力学路径定制的理性设计模式，给高性能金属材料的按需开发打开前所未有的广阔空间。

参考文献

- [1] 耦合热-动力学协同效应的多尺度相场模拟辅助金属材料设计[J]. 西安工业大学学报, 2025(05): 719-728.
- [2] In Situ Recrystallization and Phase Transformations in Laser Processing of Metals and Alloys: Microstructure Design and Monitoring[D]. EPFL, 2025.
- [3] 王悦. 塑性变形制备极小尺寸 Ti-12Mo 合金的细化机制、弛豫机理及相变行为研究[D]. 中国科学技术大学, 2025.
- [4] Ultrafast phase transformation and strengthening mechanisms in alloys induced by femtosecond laser shock[J]. Materials Science and Engineering A, 2025.
- [5] Phase transformation mechanism during heat treatment of Co-free maraging steel produced by twin-roll strip casting[J]. Journal of Iron and Steel Research(International), 2025, 32(2): 1-12.
- [6] 刘峰, 黄林科, 陈豫增. 纳米晶金属材料中相变与晶粒长大的共生现象[J]. 金属学报, 2018(11).
- [7] Effect of Rapid Electrical Heating on Microstructure Evolution in TC4 Alloy[J]. Chinese Journal of Materials Research, 2026, 40(1): 39.
- [8] Kinetic modeling of δ -ferrite to γ -austenite transformation in martensitic stainless steel: microstructure prediction in laser powder bed fusion[J]. Materials and Design, 2025, 259: 114809.
- [9] 姜伟冬, 赵海东, 王果. 在铝液中热循环 H13 钢的软化行为[J]. 材料研究学报, 2024, 38(8): 593-604.
- [10] 王葛, 王亚杰, 李磊, 等. Cr5 钢马氏体的相变塑性和应力对其相变动力学的影响[J]. 材料研究学报, 2018, 32(7): 481-486.

砖木结构房屋现场安全检测的工程实际应用

倪卫辉

广东保顺检测鉴定有限公司, 广东 广州 510000

DOI:10.61369/ME.2026070026

摘 要 : 砖木房屋检测须考虑砖墙与木构架的协同受力。难点有: 木材强度差异大, 腐朽虫蛀隐蔽, 砂浆强度低, 资料不全。检测顺序: 先整体, 后局部; 从表到里。主要工作包括: 核验传力路径; 查墙体倾斜裂缝; 查木构件腐朽、虫蛀、开裂、变形; 抽测材料强度; 检查屋面构造与渗漏。数据供参数修正、建模及抗风验算。随后评定安全等级, 制定分级处理清单。经验表明, 柱脚腐朽常与屋面渗漏关联, 应重点检测。

关 键 词 : 砖木结构; 现场检测; 安全排查; 结构鉴定; 木构件

Practical Application of On-Site Safety Inspection for Brick and Wood Structure Houses

Ni Weihui

Guangdong Baoshun Testing and Appraisal Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510000

Abstract : The inspection of brick and wood houses must consider the coordinated force between the brick wall and the wooden frame. Difficulties include: significant differences in wood strength, hidden decay and insect infestations, low mortar strength, and incomplete documentation. Detection sequence: First overall, then local; From the table to the inside. The main tasks include: verifying the transmission path of force; Check for inclined cracks in the wall; Check for decay, insect infestation, cracking, and deformation of wooden components; Extract material strength; Check the roof structure and leakage. Data is provided for parameter correction, modeling, and wind resistance verification. Subsequently, evaluate the safety level and develop a graded processing checklist. Experience has shown that the decay of column bases is often associated with roof leakage and should be emphasized for detection.

Keywords : brick and wood structure; on site inspection; security investigation; structural identification; wooden components

引言

砖木结构房屋由来已久, 应用广泛。使用年限不断增长, 材料老化与结构损伤逐步显现。木材易受腐蛀侵蚀, 砂浆强度偏低。历经多次改造翻修, 原始资料缺失, 安全隐患增多。开展系统的现场安全检测十分必要。需核查传力路径, 排查构件完损, 检测材料性能, 评估屋面损伤状况。各项检测结果直接服务于结构安全鉴定。为承载力验算提供数据支撑。有效指引后续修缮加固, 切实保障房屋使用安全。

一、砖木结构房屋的结构体系与安全检测特点

(一) 结构体系的基本构成

砖木结构建筑拥有特征清晰的受力搭配形式。竖向荷载传递路线清晰: 屋顶荷载先经由木檩、木梁输送至木屋架, 再依靠木柱或是承重砖墙向下传递至地基。风荷载、地震作用是主要水平作用力, 荷载传导流程更为繁杂。一般由墙体、屋顶借助木楼板与木框架, 将荷载分散至外侧砖墙, 再经由墙体传导至地基。这套结构里, 砖砌墙体负责承受大部分竖向压力, 同时抵御侧向作用力; 木质框架承担屋顶与楼层的支撑工作。砖、木两类构件相

互配合受力, 一同维持建筑整体结构稳固。

砖木住宅依照结构排布形式, 可划分为两大类。第一种依靠砖墙承担主要承重任务, 木楼板、木屋顶直接架设在砖墙上, 墙体同时承受竖向压力与水平外力。这种构造多见于建成年代偏晚的石库门、新式里弄民居。第二种依靠木质框架承托屋顶, 分为抬梁、穿斗两种构造形式, 外侧砖墙仅做围护, 同时抵抗侧向荷载。传统祠庙殿堂与早期民间住宅普遍选用该结构。两类建筑受力逻辑存在区别, 实地检测时的重点考察内容也各不相同。

(二) 安全检测面临的技术难点

砖木结构现场检测存在多项难题。木材属于天然建材, 自身

强度波动范围较大。含水率、木纹、木节、干缩缝隙都会改变木材受力性能，取样检测难以反映整体真实状态。木柱底部、木梁端头隐蔽区域容易出现腐朽、虫蚀问题，构件外观完好，内部却已中空破损，仅凭肉眼无法判断内部损伤。墙体砌筑选用低强度石灰砂浆或混合砂浆，实测强度大致在1.4 ~ 1.9MPa 区间，砂浆品质参差不齐，加大检测评定的不确定程度。多数房屋经过多次改造修缮，配套施工图纸大多遗失，建筑原始构造难以确认。检测工作人员需要结合结构经验，梳理还原完整荷载传递线路^[1]。

（三）检测工作的基本程序与原则

砖木房屋现场安全检测，宜遵循先整体后局部、先宏观后微观的程序。首先普查整体完损状况，记录可见损伤与变形，作出初步判断。再对承重墙、主要木构架、屋盖系统等部位，开展专项检测，包括截面尺寸复核、材料强度测试、倾斜与挠度测量等。对隐患构件，应探查内部损伤情况。必要时，可借助无损或微损检测手段，取得更准确的数据。检测过程中，需特别关注木构件与砖墙连接节点的构造。该处为结构传力要害，最易出现损伤。各项检测数据应详细记录存档，为后续分析鉴定提供可靠依据。

二、现场安全检测的核心内容与技术方法

（一）上部结构体系的完整性与传力路径核查

现场检测需优先核查上部结构完整性与传力路径合理性。具体包括三项内容。其一，确认原结构有无后期拆改。该类房屋使用中常经多次功能调整。承重墙可能开门洞。木构架杆件可能截断或替换。楼面可能增设夹层。这些改动会改变传力路径，形成薄弱部位。其二，检查关键传力节点有无失效迹象。重点观察木梁端部支承长度是否达标。木柱与基础连接是否稳固。屋架支座处有无明显位移或下沉。其三，评估结构体系在各方向上的刚度和承载力是否协调。

对于抬梁式或穿斗式木构架，尚需核查其纵向和横向连接构造是否完善。木构架在纵向（沿房屋长度方向）通常缺乏足够的支撑，若未设置纵向系杆或剪刀撑，整体抗侧刚度较弱，在风荷载作用下容易产生过大侧向变形甚至失稳。现场检测中应详细记录各类连接节点的构造形式和现状完好程度，为后续结构分析模型的确立提供依据^[2]。

（二）结构构件完损状况的排查要点

墙体是砖木房屋主要承重和抗侧构件，损伤类型多。整体倾斜最危险，常因地基沉降或高厚比过大。现场检测用经纬仪或全站仪，测量墙顶相对墙底的水平位移，计算整体倾斜率。弓凸变形指墙面中部向外鼓出，呈弓形。多因砂浆强度不足或墙体过长缺横向支撑，用挂线法量最大凸出量。检测中应注意区分结构性裂缝与非结构性裂缝，前者位于受力较大部位，影响安全，需重点记录。检测应绘裂缝分布图，标缝宽、长度、走向，结合受力分析判断性质。

木构件检测查腐朽、虫蛀、开裂和变形。柱脚及屋面渗漏处易腐朽。木材发暗，有纵裂，敲击闷响，可初判。疑空洞时，用

探针或阻力仪探查。白蚁危害最大。表面有细孔与粉屑，截面削弱，外观变化小，隐蔽性强。裂缝分干缩纵裂与受力横裂。纵裂因干缩，承载力影响小。深度超直径一半或长度超全长2/3，定为危险点。横向裂缝预示承载力不足，应验算。测木梁、檩条挠度以判受力。超 L0/150 时，受弯构件须验算承载力^[3]。

（三）材料性能的现场检测与取样

砖木结构房屋的材料性能检测主要包括砂浆强度、木材强度和木材含水率三个方面。

砂浆强度的检测是砌体结构评定的难点。由于石灰砂浆和混合砂浆强度低、碳化深，回弹法和贯入法的适用性受到限制。实践中常采用冲击筛分法或点荷法进行推定，检测结果反映的是砂浆的当前实际强度。多数既有砖木结构房屋的实测砂浆强度介于1.1~1.9MPa 之间，砌体抗剪和抗压承载力的取值受此制约明显。

木材强度检测分为无损、微损两种方式。应力波、超声波检测依靠波速测算弹性模量与抗弯强度，多用于现场批量快速筛查。关键木质构件可钻取木芯试样，开展抗弯、抗压强度试验。取样点位需远离木节、裂缝等缺陷部位。取样完成后，选用同种木料木塞封堵钻孔。木材含水率选用电阻检测仪测定。现场检测阶段，需关注温湿度环境对测量数值的干扰。分层测定构件不同深度含水率，排查内部受潮隐患。

（四）屋面系统的构造核查与损伤评估

砖木建筑的屋面体系，既能保障房屋使用功能，也维系整体结构稳固，各类病害多集中于此。实地检测工作包含三项内容：核对屋面构造工艺、测量屋面形变、排查渗水痕迹。

核查屋面构造细节，要确认屋架形式，区分带阁楼与无阁楼两类。记录檩条和屋架的衔接形式，查看望砖、望板铺设状态，检查屋面防水层完好程度。小青瓦屋面是老式砖木房屋常用构造。瓦片搭接松散、破损缺失，容易渗水侵蚀木质基层，造成檩条、屋架端头腐朽。硬山屋顶还需额外查验山墙和屋架的衔接结构是否牢固。

屋面形变检测重点观测两项指标：屋架下弦弯曲程度、屋脊线条规整度。屋架整体向下弯曲，多代表木料承载能力不足，或是节点衔接出现松动。屋面局部下陷，一般对应单榀屋架存在严重损坏。隐蔽木质构件不便直接观测时，屋面变形特征可作为依据，间接判断屋架整体安全状态。

屋面渗水排查重点查看多处关键区域：屋脊与檐口、烟囱通风管穿出屋面位置、不同坡面相交区域。渗水会在望砖、木椽表层留下水渍、变色痕迹，病害严重处还会出现发霉、木料腐坏问题。现场作业时标记全部渗水点位，判断病害对木构架安全产生的影响，相关内容写入最终检测报告^[4]。

三、检测成果在结构安全鉴定中的应用

（一）检测数据的整理与结构分析模型的建立

现场检测会产生海量原始数据，需统一梳理整合，方可作为建筑结构安全鉴定的依据。数据整理分为三步：整合构件截面规格、材料实测强度及破损情况，编制房屋结构现状资料；比对倾

斜、挠曲等变形实测数值与规范标准，筛选存在超限缺陷的构件；结合现场检测结果调整计算取用参数。木质构件强度需结合干缩裂缝、腐朽程度做折减处理；砌体结构强度以现场实测砂浆强度为准。依托以上资料搭建的结构计算模型，需贴合建筑当下真实受力情况，为后续结构承载力校核提供可靠支撑。

（二）抗风安全性的验算方法

低矮砖木房屋风荷载整体影响不大。但屋面木檩条、轻质望板等局部构件，在风吸力下易出现应力集中。抗风鉴定需注意以下几点：其一，重视局部风压体型系数。檐口、屋脊、转角等处风压系数远高于整体均值，仅按整体系数验算会低估实际风效应。其二，分析木构架传力路径。坡屋面望砖整体性差，风荷载难以有效传递至砌体墙，易在木构架形成应力集中。其三，区分构件对风载敏感性。竖向承重构件主要受竖向荷载控制；抗侧构件和屋面檩条，可能由风荷载组合工况控制^[5]。

（三）安全等级的评定与问题清单的编制

综合现场检测结果和结构分析结论，可对砖木结构房屋的安全状况进行等级评定，并编制详细的问题清单。评定过程中应区分结构安全问题和使用功能问题：承重构件承载力不足、结构体系存在严重缺陷、变形超过规范限值等属于结构安全问题，需优先处理；渗漏、装饰层剥落、设备老化等属于使用功能问题，可按轻重缓急安排维修。

问题清单编制宜具体可追溯。每项问题应注明构件、损伤形态、严重度及可能原因。判为危险点构件时，列明条款依据，给出处理建议。清单附照片及简图，助设计人员掌握现场。如木柱柱脚腐朽，截面损失超20%，记录腐朽高、深，可墩接或加固。墙体倾斜率超限，记倾斜方向与数值，建议基础加固或扶正。

四、典型工程案例分

（一）某近代砖木结构住宅的安全排查

某砖木结构住宅建于二十世纪三十年代，为二层里弄住宅，砖墙承重结合木楼盖和木屋盖，建筑面积约180平方米。使用至今已近九十年，期间经过多次装修改造，原始图纸已遗失。

现场查勘遵循由外至内、先整体后局部。使用全站仪对四个

墙角观测，结果显示房屋整体倾向东南，最大倾斜率7‰。此值低于《危险房屋鉴定标准》限值，但需关注。外墙北立面檐口渗水明显，檐口板条多处断裂松动。内墙见部分细微裂缝，宽度多在0.3mm以下，竖向分布。初步判断为材料收缩裂缝，非受力所致。

木构件的检查是本次排查的重点。一层木柱柱脚普遍存在不同程度的腐朽，其中两处柱脚腐朽范围超过截面周长的1/3，敲击有空鼓声，判断内部已形成空洞。二层木梁有两根出现横向裂缝，裂缝位置靠近支座处，提示受剪承载力可能不足。屋面木檩条检查发现，在渗漏区域对应的檩条端部存在明显变色和软化现象，有效截面较原截面减小约15%~20%。

（二）检测结论与处理建议

结合本次检测所得数据，综合判定房屋安全现状如下：建筑主体结构暂未出现整体失稳问题，内部多处木质构件存在程度不一的破损、腐朽问题，部分构件承载能力达不到安全使用标准。安全隐患重点出现在三处位置，分别为木柱底部腐朽、木梁剪切裂缝、屋面檩条端头腐朽。同时屋面渗水隐患若未能及时修缮，会持续加快木质构件腐蚀损坏速度。

结合现场检测数据，划分三类整改处置方案。一级紧急整改：腐朽柱脚选用墩接加固或整体更换；开裂木梁采取粘钢、扩截面方式补强；渗漏屋面整体翻新。该类隐患直接威胁结构稳定，需尽快完成施工。二级限期整改：墙体裂缝灌注砂浆封闭；外墙防水局部修补。对主体安全影响有限，但长期放任会加剧构件老化。三级常态化养护：定期监测木构件含水数值，排查虫蛀病害；清理屋面堆积杂物，疏通排水构件。可有效延长建筑整体使用周期^[6]。

结束语：砖木结构房屋安全检测是一项系统工程。现场核查与精准检测是安全鉴定的基础。明确传力路径，掌握构件完损，获取材料真实性能。这些环节不可或缺。检测数据直接支撑承载力验算与安全性评级。为后续修缮加固提供科学依据。面对复杂的现场环境，检测工作需秉持严谨态度。应不断优化检测方法，提升技术水平。切实保障老旧房屋使用安全，助力城市更新与建筑保护。

参考文献

- [1] 许立, 陈云钢, 丁忠, 等. 皖南某地农村房屋现状调查与危险性检测鉴定分析 [J]. 建筑结构, 2023, 53 (S2): 1671-1676.
- [2] 陈驰. 上海市既有老旧住宅房屋安全性检测鉴定要点分析 [J]. 建筑科技, 2023, 7 (3): 14-16.
- [3] 熊海贝, 孙瑾煜, 郝军. 土砖木混杂结构南洋传统民居可靠性鉴定的难点与对策 [J]. 结构工程师, 2023, 39 (2): 11-21.
- [4] 王兵, 张兴伟, 刘胜波, 等. 某近现代砖木结构优秀历史建筑检测鉴定与加固 [J]. 重庆建筑, 2022, 21 (8): 31-34.
- [5] 王立. 石库门建筑房屋质量检测评定特色分析 [J]. 城市住宅, 2021, 28 (1): 189-191.
- [6] 陈佑豪. 砖木结构低矮古建筑抗风安全性鉴定分析 [J]. 住宅科技, 2020, 40 (2): 55-58.

建筑环境优化与低碳节能施工技术创新研究

张露兮

淮北职业技术学院, 安徽 淮北 235000

DOI:10.61369/ME.2026070028

摘 要： 城镇化高质量发展背景下，建筑行业传统的高能耗、高污染的施工模式已经不能适应绿色发展的理念了，建筑环境品质的提高和施工低碳节能转型成了行业的主要发展方向。本文从建筑工程施工全过程出发，结合建筑环境改善的内容来分析现阶段存在的环境污染和节能方面的问题，并围绕着适配性的改良、技术革新方面的研究以及实践过程中的应用方式等三个方面展开了有关的研究工作。打破粗放式的施工思想，把施工当中各种不同类别的问题都当作成一个系统化的工程，在其中找到最合适的低碳节能的新途径，在实际运用过程中建立起一种新的运行机制来达到目的的实现，从而促进建筑物在环境保护质量上取得更好的成就，并且使节能效果得到加强的同时又不会出现过多的资源浪费问题发生的现象出现。

关 键 词： 建筑环境优化；低碳施工；节能技术；技术创新；工程应用

Research on Optimization of Building Environment and Innovation of Low-Carbon and Energy-Saving Construction Technology

Zhang Luxi

Huaibei Vocational and Technical College, Huaibei, Anhui 235000

Abstract： Under the background of high-quality urbanization development, the traditional high energy consumption and high pollution construction mode in the construction industry can no longer adapt to the concept of green development. The improvement of building environmental quality and the transformation of low-carbon and energy-saving construction have become the main development directions of the industry. This article starts from the entire process of construction engineering and analyzes the problems of environmental pollution and energy conservation in the current stage, combined with the content of building environment improvement. It focuses on three aspects: improvement of adaptability, research on technological innovation, and application methods in practical processes. Breaking away from the extensive construction concept, treating various types of problems during construction as a systematic project, finding the most suitable low-carbon and energy-saving new approach, establishing a new operating mechanism in practical application to achieve the goal, promoting better achievements in environmental protection quality of buildings, and strengthening energy-saving effects without excessive waste of resources.

Keywords： building environment optimization; low carbon construction; energy saving technology; technological innovation; engineering application

引言

建筑行业是国民经济的支柱产业，在城镇化进程中承担着基础设施建设、人居环境塑造等任务，也是能源消耗、碳排放的主要领域。长期以来，国内建筑工程施工多关注施工进度和工程质量，对于施工过程中的生态环境保护、建筑后期人居环境适应、施工能源的高效利用等方面的关注度不高，造成施工资源浪费、施工现场环境紊乱、建筑后期环境适配性差等问题。随着绿色建筑理念全面普及，双碳目标逐步实现，在建筑工程评价标准中不再仅仅局限于结构安全和使用功能方面，而且还要考虑到环境舒适度、生态友好性、资源节能性的多种因素。建筑环境优化与低碳节能施工技术相结合发展出新的模式成为打破建筑业发展桎梏，促使整个行业更新换代的重要手段。基于工程现场实际开展分析工作，探讨环境改善同低耗能施工联系，并且提出创新型节能减排施工措施同环境保护方式相结合的新思路，促进建筑业达到高质量可持续发展的目的。

课题信息：院级质量工程项目“智能建造背景下建筑工程技术专业实践课程教学模式优化探索”（2024jyxm-14）。

作者简介：张露兮(1996.07-)，女，汉族，安徽淮北人，工学硕士，淮北职业技术学院助教，研究方向：城市住区微环境模拟，绿色建筑，低碳建筑。

一、建筑环境优化与低碳节能施工的核心内涵和内在联系

（一）建筑环境优化的核心内涵

建筑环境优化是贯穿于工程建设全过程的，不能简单地理解为室内环境改善工作，也不能只考虑施工过程中环境管理的问题或者建筑物完成后对人居的影响等方面^[1]。建筑工程阶段中的环境改造重视现场生态环境以及作业环境中存在的各种污染源问题（扬尘、噪声、废弃物等），进而使施工现场具备良好的工作氛围和安全条件来减轻它所产生的不良影响。成品化环境调节就是从完工之后所处的生活场所中寻找一个适合人居且有利于身心健康发展的空间进行改造，依靠提前准备好的材料与设计手法加以实现。总的说来，建筑环境优化就是要达到无污染、空间适应性好、人居环境优这三个目的，兼顾施工过程和建筑全生命周期的环境品质。

（二）低碳节能施工的核心要义

低碳节能施工不同于传统的粗放型施工模式，它把资源高效利用、能源消耗降低、碳排放减量当作施工理念和技术体系^[2]。它的主要意思不是单一地减少施工材料或者能源使用，而是依靠技术创新、工艺改良、流程优化，达到施工资源的循环利用、施工能源的清洁替代、施工工序的精简高效。低碳节能施工覆盖材料选用、设备运行、工序施工、现场管控各个环节，摒弃高耗能、高耗材、高污染的传统施工工艺，用创新技术建立绿色施工体系，在保证工程结构质量与施工安全的前提下，最大程度减少施工活动对生态和资源的影响^[3]。

（三）二者内在协同关联

建筑环境优化和低碳节能施工具有高度的协同性和统一性，两者相辅相成、互为支撑。低碳节能施工技术的创新应用是建筑环境优化的主要手段，各类节能工艺和绿色技术可以从源头上减少施工污染、降低资源损耗，直接改善施工现场和建筑成品的环境品质。另外，建筑环境优化多样的需求也促使了施工技术不断革新，传统的施工技术不能满足精细化、绿色化的环境优化要求，从而促进行业研究开发新的低碳施工技术^[4]。二者的深度融合可以冲破传统施工重质量轻环保、重进度轻节能等缺点，实现工程质量、环境品质、节能效益同步提高。

二、当前建筑施工环境与节能技术存在的主要问题

（一）建筑施工环境管控精细化程度不高

现阶段大多数建筑工程的环境控制还处在末端治理阶段，没有从全过程、事前的角度去考虑环境改善的问题。施工现场污染管控大多集中于扬尘治理等基础工作上，而对施工噪声管控、建筑垃圾分类处置、施工污水净化利用等细节管理薄弱。施工布置缺少与环境相适应的思想，各个施工区域、作业区域、材料堆放区域的布局混乱，造成现场环境更加复杂化^[5]。目前在进行建筑工程的时候，并不能考虑到建筑物本身的采光、通风、隔音等方面的要求，因此建筑完工以后居住环境达不到舒适的要求，在绿色

人居环境建设方面存在着很多问题。

（二）传统施工技术节能性、创新性都不足

传统建筑施工技术体系成熟但是过于粗放，节能性差，更新换代慢。在施工材料应用上大多用传统高能耗建材，利用率低，边角料、废弃材料随意丢弃，资源浪费严重。在施工设备使用上，老旧高耗能设备所占比例大，设备运行能耗高、效率低，没有科学的设备调度方案，无效能耗消耗大。传统湿法施工、现场浇筑等工艺工序复杂，施工周期长，能源和水资源消耗量大，容易产生施工污染，不能适应低碳绿色的施工发展要求^[6]。

（三）低碳技术与环境优化融合度较低

目前行业内存在节能技术应用和建筑环境优化脱节的问题，多数施工单位只单一地执行节能施工的要求，忽略了技术应用对建筑环境的改善。一部分低碳施工技术的应用只注意了减碳降耗指标，未结合施工现场环境治理、建筑人居环境提升的要求来改进工艺细节，造成节能达标但是环境质量提高有限的结果。另外，新型低碳技术的应用缺少相应的环境改善措施支持，技术的优势不能得到发挥，达不到节能减排的目的，也不能达到环境美化的效果。

（四）技术落地应用体系不完善

低碳节能创新技术普及落地存在明显短板，行业整体技术应用标准化、规范化程度不够。大部分中小施工企业没有专业的绿色施工技术团队，对于新型低碳施工工艺、环境优化技术的掌握程度不高，技术落地流于形式。工程施工的考核评价体系仍然以进度和质量为主，对低碳施工、环境优化的考核权重较低，造成施工单位主动应用创新技术、落实环境优化措施的积极性不高，阻碍了技术创新和行业绿色转型发展。

三、建筑环境优化和低碳节能施工技术创新路径

（一）基于环境提质的施工管控模式创新

根据建筑环境优化的主要需求，创建全流程精细化施工控制模式，对施工过程中环境进行全方位的改善。不同于传统的施工重进度、轻环境的粗放控制模式，现代绿色施工重视环境治理的前置性、系统性、常态化，把环境优化的思想贯穿到施工准备、主体施工、收尾竣工的全过程。工程正式开工前，前置开展施工现场环境规划，根据工程场地特征、场地空间格局和周边生态、人居环境特点，科学划分施工作业区、材料堆放区、污水处理区、垃圾归集区，明确各个区域的使用功能及管理标准，规范现场施工秩序，从源头上减少场地杂乱、物料乱堆、污染无序扩散等环境乱象。优化施工时序控制，针对扬尘扩散、机械噪音、粉尘排放等污染多发环节，合理安排施工时间和作业方式，避开周边居民的日常生活和休息时段，最大程度地减少施工期间对周边环境造成的影响，维持施工场地和周围环境的和谐稳定。建立施工环境动态管控机制，抛弃传统完工后整改、问题出现后治理的末端整改粗放模式，安排专人全程跟进施工各环节的污染防治、场地保洁、生态保护工作，实现施工环境问题的提前预判和实时优化。同时，在主体结构和装饰施工阶段，根据建筑交付后长期

人居环境使用要求，对墙体砌筑、门窗安装、屋面铺装等主要施工工艺进行有针对性的优化，用精细化工艺调整来加强建筑整体的隔音、隔热、自然通风性能，使施工过程中现场环境保持整洁有序，建筑成品长期人居环境品质得到提升。

（二）低碳节能核心施工技术创新应用

把降碳节能放在首位，摆脱传统的施工方式限制，在低碳施工领域推广创新的方法。首先使用装配式建筑工艺，用工厂里生产好的组件和在工地组装的方式来替代过去那种需要现场进行浇灌的施工形式，大大削减了工地现场工作的流程，也减轻了材料损耗、水源消耗以及工地环境污染等种种困扰，并且加快了工期进程，有效地对总的能耗实行了控制。应用绿色节能建筑材料，使用低碳环保、可循环、低耗能的新型建筑材料来代替高耗能的旧式建筑材料，改善建筑垃圾产生情况，减少建筑垃圾产生的数量。

创建节能设备集成使用新技术，把陈旧的高能耗施工设备淘汰掉，选用节能型和清洁能源驱动的新型施工设备，同时对设备调度和运行方案进行优化，防止设备空转、无效运行，降低设备能耗。提倡干法施工技术，减少传统湿法施工对水资源的消耗以及泥浆污染的程度，从而改善了施工环境质量，并且提高了施工现场的生态环境水平。另外还有新的建筑垃圾资源化利用方法被采用到工程之中，也就是对于在工程过程中产生的砂石、混凝土、墙体等材料加以分类处理并再次加以利用的方法。

（三）建立技术与环境深度融合的应用体系

破解技术应用与环境优化脱节问题，建立低碳技术赋能环境提质的一体化应用体系。在技术选型的时候，把工程场地的环境、建筑的功能定位、人居环境的需求联系起来，选取适合的低碳施工技术来适应每一个节能技术的应用都会使环境品质得到提高。在工艺改进上兼顾节能和环境两个方面的要求，在保温层施工中使用新式的低能耗保温方式来达到既减少施工过程中所消耗的能量又改善房屋的隔热能力的目的，并且可以改变室内空气湿

度等有关参数的情况。创建技术运用环境效应评价系统，对各种低排放建筑工艺的环保改善情况、节约能量的效果作出判断之后再挑选出最合适的建设场合用的技术路线予以实行，并促进其实施更为有效地运作。

（四）健全技术创新落地的保障体系

为保障低碳节能创新技术长效落地，完善行业施工配套保障体系。建立绿色施工技术标准化规范，统一新型低碳施工工艺、环境优化措施的施工标准，规范技术落地流程，防止技术应用同质化、形式化问题。加强施工企业技术团队建设，开展低碳施工、环境优化专项技术培训，提高施工人员的专业能力和绿色施工意识，给技术创新落地提供人才支撑。改进工程考评机制，增加对低碳施工、环保达标和资源利用率等指标评价比重，促使施工单位主动推动技术创新及环境保护工作。鼓励业内做技术研发和产学研协同推进，依照项目实际需要进行改进并提高碳排放较低、节约型建筑工地的比例。

四、结论

建筑环境优化、低碳节能施工技术创新是建筑行业与双碳目标相适应、实现高质量发展的必然趋势，二者深度融合可以有效地解决传统施工高能耗、高污染、环境品质低的行业痛点。经研究得知目前建筑施工存在环境管控精细化不足、节能技术创新滞后、技术与环境融合度低、落地体系不完善等主要问题。行业要从施工全周期出发，创建起新的精细环境管控方式，推广使用新出现的节能减排技术，并建立起来一套完整的技术与生态环境相互联系在一起的工作系统，在保证良好的工作状态之下又没有造成任何损失。未来建筑行业继续加大技术创新力度，持续改进绿色施工体系，推动建筑工程由传统的粗放型向低碳、高效、环保、优质的现代化施工模式转变，夯实城镇化绿色高质量发展的建筑产业基础。

参考文献

- [1] 骆洁. 低碳背景下智慧城市建筑 ECS PRO 轻量化 AI 节能解决方案应用研究 [J]. 江西建材, 2025, (12): 288-290.
- [2] 廖建军. 基于物联网技术的绿色低碳建筑结构环境监测与调控系统研究 [J]. 智能建筑与工程机械, 2025, 7 (12): 108-110.
- [3] 孙琳. 低碳绿色环保形势下的环境节能减排管理 [J]. 资源节约与环保, 2025, (12): 22-25.
- [4] 倪贺伟, 张统, 方小军, 马文, 王守中. 绿色低碳建筑小区室内室外环境一体化规划设计探讨 [J]. 中国市政工程, 2024, (3): 135-141+161-162.
- [5] 张存款. 面向低碳建筑的玻璃暖廊节能设计与策略研究 [D]. 东南大学, 2024.
- [6] 程佳仪. 绿色环保低碳节能理念在建筑室内环境设计中的应用 [J]. 皮革制作与环保科技, 2021, 2 (21): 130-131+133.

印刷包装领域复合机、分切机与制袋机电维修保养体系的构建及效能评价

钟新华

广东荣耀包装有限公司, 广东 佛山 528203

DOI:10.61369/ME.2026070009

摘 要 : 在印刷包装行业, 建立复合机、分切机以及制袋机的机电维修保养体系, 要以设备的全生命周期管理作为基础, 对预防性维护、预测性诊断和故障应急响应模块进行整合。运用传感器收集振动、温度之类的参数建立数据驱动型的健康评估模型, 清楚人员职责与流程准则, 依靠数字化平台动态调控保养规划, 配合生产排程来降低非计划停机的情况, 效能评估通过设备可用率等指标检验体系成效, 建立设计、实施、评估的闭环, 促进设备管理朝着智能化与精细化方向发展。

关 键 词 : 印刷包装设备; 机电维修保养体系; 预测性维护

Construction and Performance Evaluation of the Electromechanical Maintenance and Repair System for Composite Machines, Shearing Machines and Bag-Making Machines in the Printing Packaging Field

Zhong Xinhua

Guangdong Glory Packaging Co., Ltd., Foshan, Guangdong 528203

Abstract : In the printing and packaging industry, the electromechanical maintenance system of compound machine, cutting machine and bag making machine should be established. Based on the whole life cycle management of the equipment, the preventive maintenance, predictive diagnosis and fault emergency response modules should be integrated. Using sensors to collect parameters such as vibration and temperature to establish a data-driven health assessment model, clarify personnel responsibilities and process guidelines, rely on the digital platform to dynamically adjust and control maintenance planning, and cooperate with production scheduling to reduce unplanned downtime. Effectiveness evaluation tests the effectiveness of the system through indicators such as equipment availability, establishes a closed loop of design, implementation, and evaluation, and promotes the development of equipment management in the direction of intelligence and refinement.

Keywords : printing and packaging equipment; mechanical and electrical maintenance and servicing system; predictive maintenance

引言

印刷包装机械是印刷行业生产链条的重要基础装备, 其机电系统具备多模块集成的特点, 且在高温、粉尘等复杂的运行条件下, 容易引发频繁的故障, 这会直接对生产效能和产品品质产生影响。2021年国家出台的《十四五印刷业发展规划》清晰提出推进印刷装备智能化改革, 加强设备运维体系搭建, 为行业设备管理转变提供政策引导。着眼于复合机、分切机、制袋机在结构上的复杂性、环境适应能力以及连续生产方面的需求, 打造包含状态监测、维修流程、故障诊断与资源协同的机电维修养护体系, 已成为行业实现高质量发展的必然需要。此体系要把数据驱动当作核心, 融合预防性维护和预测性诊断工艺, 完善多设备协同管控机制, 提高设备可靠性与运转效率, 推动印刷业实现智能化、精细化运维变革。

一、印刷包装设备机电维修保养体系构建的理论基础

(一) 印刷包装设备运行特点与维修需求分析

复合机、分切机和制袋机身为印刷包装主要设备, 机电体系

展现多模块集成特性, 包含传动、张力调控、热压复合等子系统, 通过 PLC 与传感器实现闭环联动^[1]。运行场景常伴有高温、粉尘以及高湿状况, 容易导致电气元件出现老化, 使机械部件的磨损加剧。例如分切机刀片出现定位偏差, 或者复合机热辊温度

失去控制，都有可能造成产品质量方面的缺陷。设备要长时间持续运转来满足批量制造，故障停机机会直接对生产效能和交付期限产生影响。故而维保作业需针对结构复杂特性、环境适应特性以及生产连续特性，建立预防性维护与故障诊断相融合的机制，通过定期检测主要参数（像复合压力、分切速度）、完善润滑策略以及替换易损件，减少突发故障的可能性，为维修体系搭建提供具有针对性的根据。

（二）机电维修保养体系的构成要素与管理原则

印刷包装机械电气维修保养体系包含设备状况管理、维护流程、技术标准以及人员管理这四大要素。装置状态管控通过传感器即时采集温度、震动、电流等参量，结合过往故障数据搭建监测模型，实现预警与趋势分析^[2]。维护程序清晰界定日常巡检、定期维护以及故障检修准则，例如分切机刀轴的润滑时长和复合机张力的校准频次应编制成标准化作业文档。技术标准按照制造商手册和行业规范来制定，包含易损件的更换周期以及电气绝缘检测等方面的要求。人员管理建立技能培训体系，通过理论与实际操作考核加强诊断水平。该体系施行秉持预防性维护优先理念，减少突发停机时长；同时重点以数据推动决策，通过运行数据优化保养规划，实现维修资源的合理调配。

二、复合机、分切机与制袋机维修保养体系的设计

（一）复合机电系统维修保养方案设计

复合机的维保方案以传动系统、控制系统以及主要功能模块为基础，搭建起闭环体系。传动体系针对伺服电机、减速器以及同步带，拟定每日进行清洁润滑、每周检测传动精度误差、每季度检测齿轮啮合空隙与轴承磨损程度的规程，保证传动误差控制在 $\pm 0.02\text{mm}$ 以内。控制体系以 PLC、触摸屏和传感器为主要，每天查看程序运行记录与信号反馈情况，每月对温度、张力传感器开展校准工作，每半年开展软件备份以及接口清洁工作，把控制信号延迟率降低到 10ms 以下。对复合辊、涂布装置等核心模块建立磨损监测体系，通过红外测温以及振动分析实现故障预警，运用故障树分析法来规范常见故障的处理步骤，将平均修复时长缩减至30分钟以内。此方案引入物联网平台开展实时数据收集，促使从被动式维修向主动型预防转变，力求设备综合效率（OEE）提高到85%以上^[3]。

（二）分切机与制袋机维修保养流程优化

分切设备与制袋设备的维保流程优化要围绕机械构造、电气操控以及运行参数管控来开展。对于分切机刀轴轴承、张力辊这类主要零部件，建立依靠振动和温度传感器的状态监测机制，取代定时拆解排查，降低不必要的停机情况；电气系统对 PLC 故障诊断模块予以优化，即时采集伺服电流以及变频器参数，实现异常预警与迅速定位。制袋装置重点关注热封刀具的温度调控以及送料的同步特性，通过红外温度测量与编码器数据的对比来精确调整参数，并且根据负载状况和环境湿度动态优化送料链条的润滑时间间隔。整合流程中的历史故障和维护数据，搭建数字化的保养台账，实现维修任务的智能调度以及资源配置，保证工作能

够追溯且按标准化执行^[4]。

三、机电维修保养体系实施过程与效能评价方法

（一）维修保养体系实施机制分析

1. 设备维护计划制定与执行管理

复合机、分切机和制袋机的维护保养计划要根据运行特点和生产要求，以可靠性作为核心来搭建多方面的体系：复合机重点于张力和温度的调控，分切机加强刀轴与张力的校准，制袋机留意热封和定位的精准度。定期性维护根据使用频次设定分级周期，如加热辊每300小时进行清洁；状态监控采用振动、温度和油液检测手段，捕捉初期故障信号。在执行环节建立计划、执行、记录、反馈的闭环体系，通过电子工单实现可追溯式管理，降低人为因素造成的偏差。三种机制共同协作，加强设备稳定性以及生产的连续性。效能评估参考高山（2023）提出的多维指标理念，从技术有效性、经济合理性以及管理响应性这三个方面搭建模型，将运行、工单和质量数据进行关联，实现过程化的评价^[5]。

2. 故障诊断与维修资源协同管理

故障诊断和维修资源协同管控直接关系到设备停机时长与生产持续性。因为复合机、分切机和制袋机故障存在多源性 & 关联性，要通过振动监测、温度传感等物联网技术搭建实时诊断模型，利用数据挖掘找出轴承磨损、传动偏移等潜藏故障，实现从被动维修到预测性维护的转变^[6]。维护资源建立动态调配机制，按照设备优先次序和故障种类来匹配备品库存以及技术人员的技能列表，例如分切机刀轴出现故障时要优先调配高精度工具与资深技术人员，防止资源闲置或者短缺。人员协作通过数字化平台实现信息互通，维修小组和生产班组实时共享状态及进展，依靠跨部门合作缩减决策流程。此机制通过诊断精确性、配置恰当性以及协作高效性，一同降低非计划停机的风险。

（二）维修保养效能评价指标体系构建

1. 设备可靠性与运行效率评价指标

设备的可靠性以及运行效率属于维修保养效能评估的主要方面。运行的稳定性由平均无故障工作时长（MTBF）、故障停机比率以及主要部件的磨损速度来衡量，MTBF 体现保养周期当中的持续运行能力，故障停机率与生产中断风险直接相关^[7]。故障评估专注于类型分布（电气、机械、控制系统）、重复故障发生比率以及响应时长。其中重复故障发生比率能够揭示保养措施对根源性问题的解决成效，响应时长则体现应急处理的效率。生产效能指标包含设备综合效率（OEE）、有效生产时长占比和单位时间产量，OEE 融合可用比率、性能利用程度和合格比率，全方位体现保养之后的实际功效；单位时间产量要根据复合速度、分切精准度、制袋速率等设备特性进行差异化设定，保证指标和功能紧密适配。

2. 维修成本与管理效果综合评价

修理成本管控、维护效能以及管理标准化程度是效能评估的主要方面。成本管控包含预防性保养、故障检修以及备件库存成本，通过对比体系施行前后单位时长的维修开支与停机损耗，对优化成

效进行量化。保障效率可从平均故障间隔时间（MTBF）、平均修复时间（MTTR）以及设备综合效率（OEE）着手，分析体系对运行稳定性和生产连续性的提高作用。管理规范化评估流程的标准程度、人员培训的覆盖比例以及保养记录的完整状况。此体系经由降低故障发生率、缩短停机时间以及优化资源配置，直接提高管理成效，像降低订单延误情况、提高产能使用效率。研究显示科学的维保体系能够让 OEE 提高 15%–20%，维修费用降低 10%–15%^[9]。综合评估应融合定量数据和定性分析，全方位显示成本、效能以及管理环节的推行成效，为不断优化提供支撑。

四、印刷包装设备维修保养体系优化与应用提升

（一）设备预防性维护模式优化

1. 基于设备状态的维护策略调整

复合设备、分切设备与制袋设备的传统固定时段维护易造成过度维护或维护不足。以实时监测为主要的通过设备状态的策略调整，通过振动、温度以及电流传感器收集轴承振动、电机温度、传动电流等参数，搭建设备健康评估模型，把状态数据和历史故障库进行对比，识别潜在的风险等级^[9]。针对复合辊磨损、刀片间隙偏差以及热封温度波动这类典型问题，建立多参数融合的预警机制，当监测数值超出阈值时触发分级响应措施：出现轻微异常情况时在线调整参数，出现严重异常情况时停机开展检修工作。优化方案将运行负荷和生产优先级相融合，动态调控维护时段，降低不必要的停机情况，同时通过数据分析追溯故障发生的根源，为方案迭代提供支撑，实现从定期维护到按需维护的精确转变，提高设备的综合效能。

2. 智能化维修管理技术应用方向

智能化维修管控重点于数字化管控、数据收集与智能诊断科技的深度整合。运用物联网搭建设备状态监测网络，把复合机张力、分切机刀座磨损、制袋机热封温度等参数接入云平台，通过大数据分析识别故障先兆模式，帮助维修决策。智慧诊断联合机器学习算法对过往故障案例进行训练，建立知识库，实现异常的自动识别与精准定位，提高响应的效率和准确性。相关研究显示，数字化和智能化技术能够让非计划停机时长减少超过 30%，维护费用降低大约 20%^[10]。其意义不只是提高维修效能，更通过数据引领的策略增加设备的使用时长，为企业生产的连贯性与成本管控提供技术保障。

（二）多设备协同维修管理体系完善

1. 复合机、分切机与制袋机联动维护机制

协同维护机制要根据设备间工艺联系与故障传播规律，集成运行数据、维护档案以及性能指标，建立跨设备状态监控网络。通过统一的预警模型，分析复合机强度的波动情况、分切机张力的失衡状况和制袋机热封的偏差问题之间的关联，实现故障的提前预判以及协同处置。维护方案突破单设备限制，对辊轴更换、刀片研磨和热封模校准等工作的时间顺序进行优化，通过生产间隙开展同步作业，降低停机情况。建立资源共享体系，统筹调配备件和技术人员，针对如共用传动系统、温控模块这类设备制定

协同维护规范，提高资源利用效率。此机制包括日常协同巡查、关联分析直至一体化实施，建立闭环式管理，实现多设备维护效率的总体提高。

2. 维修标准化与持续改进机制建设

根据复合机、分切机以及制袋机的机电特性，要搭建包括全生命周期的维修标准系统，确定主要部件的检测时长、维修界限以及操作准则，例如热辊温度的偏差要控制在 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 范围以内，刀片的更换时长按照精度衰减曲线来设定，热封刀的校准频次和封边强度相互关联。同时建立维修数据闭环反馈体系，通过状态监控收集振动、温度、能耗等数据，结合故障过往形成维修决策模式，促进从被动式维修向预测性检修转变。引入 PDCA 循环以进行持续改进，定期对标准执行成效开展评估，针对如剥离强度起伏、收卷端面不整齐这类共性问题，对流程与工艺加以优化，把改进措施固化成新的标准，促使维修保养工作实现规范化、系统化，提高设备综合效能和生产稳定性。

（三）维修保养体系效能提升路径

1. 设备运行保障能力提升措施

加强设备运行保障水平要针对复合机、分切机和制袋机的机电特性开展。为解决复合机张力控制受温湿度作用的问题，引入可实时监测温湿度的模块来联动调节张力补偿系数，降低因材料拉伸不均衡而引发的停机情况。分切机刀片出现磨损时，可通过安装振动传感器和在线检测设备，建立磨损预测模型，设置预警界限，实现预判式更换，防止突发故障情况发生。制袋机的热封体系运用智能温控组件实时收集温度资料，通过 PID 算法动态调控加热功率，且定时校准压力传感装置，以保障封口的稳定性。同时建立主要部件履历文档，记载更换时刻、运行时长以及故障频率，通过大数据分析生命周期规则，拟定预防性替换规划，确实降低非计划停机比率，为生产连续性提供保障。

2. 体系评价反馈与优化调整机制

在印刷包装设备维修保养体系的优化及应用提高进程里，体系的评价反馈和优化调整机制属于实现效能持续提高的主要部分。评估结果反馈采用量化数据和定性分析相融合的方法，把复合机、分切机以及制袋机在运转期间的故障频次、停机时长、维修费用等核心指标转变为体系优化的根据。比如复合机的张力控制体系故障发生率过高，或许表明预防性保养周期设定不合理；分切机的刀片磨损速度过快，则暗示润滑保养流程存在缺陷。根据评价成果，建立可不断优化的闭环管理体制，要整合设备运转数据、检修记录以及操作人员的反馈情况，建立出一个从数据搜集、分析诊断到方案制定、成效验证的循环式流程。通过动态调节保养时长、优化检修技术预案、更新备品管理策略等途径，实现维修保养体系和设备实际运行要求的精确匹配。最终促使体系效能从被动应对向主动预防转变，提高印刷包装设备的综合运行效率与使用年限。

五、总结

印刷包装装备机电的维修保养体系通过全生命周期管理，融

合预防性维护、预测性诊断以及故障应急响应这三大板块。系统设计融合设备运转特性和生产要求，通过传感器收集振动、温度等参量建立健康评价模型，清楚人员职责和流程准则。推行通过数字化平台对维修计划进行动态调整，与生产排程协作，降低非计划停机情况。效能评估从设备可利用率、停机时长、维修费用等方面验证成效，预测性保养精准度直接作用于可利用率提高，

成本管控通过备件库存优化与技能适配。规划、执行与评估构成闭环，规划决定执行的可行性，执行影响评估结果，评估反馈指引迭代。未来能够探寻 AI 算法加强故障诊断的即时性，并且搭建跨设备的资源共享体系，促进管理朝着智能化、精细化方向迈进。

参考文献

[1] 张璐. 草原生态治理效能评价指标体系构建与应用研究 [D]. 内蒙古工业大学, 2022.

[2] 潘登. S 印刷包装公司环境会计信息披露质量评价研究 [D]. 湖南科技大学, 2022.

[3] 甘韶琪. 我国档案治理效能评估指标体系构建及实证研究 [D]. 郑州大学, 2023.

[4] 鞠佳杉. 采煤机液压系统数字孪生体构建与预测性维护方法研究 [D]. 西安科技大学, 2022.

[5] 高山. 智慧城市的构建及其效能评价机制研究 [D]. 山东大学, 2023.

[6] 模切机分切机复合机 [J]. 标签技术, 2022.

[7] 杨洁, 王梦翔. 包装印刷企业社会责任披露评价体系构建与应用——基于障碍因子分析法 [J]. 会计之友, 2022(9):7.

[8] 储呈晨, 陈颖, 季智勇, 等. 大型医用设备维修保养质量评价指标体系构建与应用 [J]. 中华医院管理杂志, 2022, 38(8):613-616.

[9] 王义方, 程琳琳, 郑洋. 村庄综合效能评价指标体系构建及应用——以山东省新泰市为例 [J]. 农业资源与环境学报, 2023, 40(5):1156-1168.

[10] 刘丽君, 刘小川. 山东公共文化云服务效能评价体系构建与研究 [J]. 高校图书馆工作, 2024, 44(2):58-65.

装配式单跨简支斜转正 T 梁结构受力分析

张秋石

浙江公路水运工程咨询集团有限公司, 浙江 杭州 310000

DOI:10.61369/ME.2026070018

摘 要 : 城市路网交叉口常受征地、管线限制, 常规正交桥梁占地大、施工周期长。单跨简支斜转正 T 梁依靠长短主梁可在一跨内完成斜交线形过渡, 工业化优势显著, 但不等跨主梁带来显著弯扭耦合, 易出现支座脱空、梁端扭转、湿接头开裂等病害, 正交梁简化算法难以适配。本文依托 30m 跨、45° 单跨斜转正 T 梁工程, 采用 MIDAS/Civil 建立 30°、45° 两组梁格有限元模型, 开展多工况耦合计算, 分析支座、主梁、湿接头受力规律。结果显示斜交角越大受力失衡越严重, 常规工程斜交角宜控制在 30° 以内; 钝角长梁与钝角湿接头为薄弱区域。据此提出主梁腹板差异化加厚、梁端加密抗扭配筋、湿接头配置横向预应力、锐角支座增设抗拔限位、预制梁对称拼装等设计与施工优化措施, 可为浙江同类单跨斜转正 T 梁设计与施工提供理论支撑。

关 键 词 : 斜转正桥梁; 装配式 T 梁; 梁格法; 弯扭耦合; 有限元受力分析

Stress Analysis of Prefabricated Single Span Simply Supported Inclined to Normal t-Beam Structure

Zhang Qiushi

Zhejiang Highway and Water Transport Engineering Consulting Group Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang 310000

Abstract : Urban road network intersections are often limited by land acquisition and pipeline restrictions, and conventional orthogonal bridges occupy a large area and have a long construction period. A single span simply supported inclined to normal T-beam can complete a diagonal transition within one span by relying on long and short main beams, which has significant industrial advantages. However, unequal span main beams bring significant bending torsional coupling, which is prone to diseases such as support detachment, beam end torsion, and wet joint cracking. The orthogonal beam simplification algorithm is difficult to adapt to. This article relies on the 30m span and 45° single span inclined to normal T-beam project, and uses MIDAS/Civil to establish two sets of beam grid finite element models at 30° and 45°, to carry out multi condition coupling calculations and analyze the stress laws of supports, main beams, and wet joints. The results show that the greater the skew angle, the more severe the force imbalance. The skew angle of conventional engineering should be controlled within 30°; The obtuse angle long beam and the obtuse angle wet joint are weak areas. Based on this, design and construction optimization measures such as differentiated thickening of the main beam web, increased anti torsion reinforcement at the beam end, transverse prestressing of wet joints, addition of anti pull limit for acute angle supports, and symmetrical assembly of prefabricated beams are proposed, which can provide theoretical support for the design and construction of similar single span inclined to normal T-beams in Zhejiang.

Keywords : inclined to normal bridge; prefabricated T-beam; liangge method; bending torsional coupling; finite element force analysis

前言

城乡路网交叉口、下穿通道普遍存在平面斜交约束, 采用正交桥梁在跨路、跨河等节点需加大跨径跨越, 工程成本高、施工周期长。装配式斜转正桥梁分为两类布置形式: 一是本文研究的单跨独立斜转正简支 T 梁, 依靠一跨内长短主梁形成平行四边形平面; 二是多跨渐变斜交桥, 二者受力机理差别较大。相较于普通斜桥, 斜转正桥梁各片主梁跨径不一致, 弯扭耦合作用显著, 易出现钝角支座脱空、梁端扭转开裂、横向湿接缝破损等三类病害。当前行业对正交、常规等长斜交装配式梁桥研究较为成熟, 但针对不等梁长单跨简支斜转正异型装配式结构的弯扭耦合、接缝应力失衡系统性精细化研究较少。本文结合实体工程有限元模拟, 剖析结构内力分布规律, 针对性解决三类型病害设计控制难点, 提升装配式桥梁结构耐久性与安全储备。

一、装配式斜转正桥梁结构体系与受力机理

（一）斜转正桥梁结构构造形式

装配式斜转正桥梁上部结构多采用预制小箱梁、T 梁两种主流形式，本文研究对象为浙江地区应用更广的单跨独立斜转正简支预制 T 梁。桥梁平面呈平行四边形，桥梁中心线与支承盖梁法线形成斜交角，沿斜交钝角至锐角方向，各片预制主梁长度线性递减，仅依靠本跨长短主梁即可独立适配斜交平面、完成斜转正线形过渡。主梁之间设置横向湿接缝、横向预应力钢束形成整体桥面，下部采用盖梁 + 双柱墩、板式支座支撑体系。

与常规斜桥最大区别在于，普通斜桥各主梁长度完全相同，仅整体斜置；斜转正桥梁依靠主梁长短差异匹配斜交轮廓，主梁跨径不等导致荷载横向传递路径紊乱，扭矩、剪力分布不均匀。

预制构件可实现工厂标准化生产，仅调整梁长即可适配不同斜交角度，模板复用利用率高，现场仅浇筑横向湿接头与墩顶现浇层，能大幅缩短现场现浇施工作业时长，具备工业化施工优势；但相较于主梁等长的传统普通斜桥，斜转正桥梁长短主梁存在刚度差异，加之横向连接整体刚度偏弱，会进一步加剧弯扭耦合效应，这也是该类单跨斜转正桥型区别于常规斜桥的核心受力控制难点^[1]。

（二）斜转正桥梁核心受力机理

单跨简支斜转正 T 梁为静定结构，竖向荷载下纵向弯曲与桥面扭转同步发生，形成强弯扭耦合受力体系，长短主梁产生的全部扭转、不平衡竖向反力均由本跨支座与横向连接独立承担，四大核心受力缺陷按控制优先级分述如下：

（1）钝角支座反力集中效应：竖向汽车偏载、恒载作用下，钝角区域支座承担绝大部分竖向反力，锐角支座反力偏小，极端车辆偏载工况易出现锐角支座脱空，引发梁体翻转风险；

（2）主梁附加扭矩作用：长短主梁跨径不同，桥面荷载横向分配不均，长梁扭矩显著大于短梁，梁端、跨中截面同时承受弯矩与扭矩，主拉应力增大，易产生斜向裂缝；

（3）横向湿接头受力薄弱：横向湿接头为现浇二次浇筑构件，刚度低于预制主梁，在扭转、剪切共同作用下，接缝位置出现应力集中，长期行车荷载易出现接缝渗水、开裂病害；

（4）温度次内力：日照温差、年温差作用下，长短主梁收缩变形不一致，横向约束产生附加温度扭矩，进一步恶化梁端受力状态^[2]。

二、工程实例与有限元模型建立

（一）工程概况

本文研究对象为某公路下穿装配式斜转正 T 梁桥，采用单跨简支布置，依靠长短差异化主梁实现斜交平面适配、独立完成斜转正线形过渡；单跨标准跨径 30m，单跨平面最大斜交转换角 45°。上部采用 5 片预制预应力 T 梁；主梁长度由钝角向锐角依次递减，最长主梁 30.42m，最短主梁 28.16m。全桥混凝土统一采用 C50 强度等级；预应力采用 ϕ s15.2 钢绞线，张拉控制应力

1395MPa。下部结构采用钢筋混凝土盖梁，圆柱墩，板式橡胶支座，设计荷载为公路 -I 级。

桥梁平面斜交导致各主梁荷载分配差异大，设计阶段需重点验算支座反力、主梁扭矩、横向湿接头应力，故采用有限元梁格法开展精细化受力分析。

（二）MIDAS/Civil 梁格模型构建

（1）梁格划分与单元定义

采用梁格法模拟桥面整体受力，纵向梁格对应 5 片预制 T 梁，横向梁格模拟横向现浇湿接头与桥面现浇层，纵向、横向梁格采用弹性连接模拟接缝刚度，实现弯扭耦合效应精准计算。纵向梁单元考虑预应力钢束、截面变刚度；横向梁单元仅考虑现浇混凝土抗弯、抗剪刚度，忽略纵向预应力作用。

（2）材料与荷载参数

混凝土弹性模量 C50 取 3.45×10^4 MPa，C40 取 3.25×10^4 MPa；钢绞线弹性模量 1.95×10^5 MPa。荷载工况按照《公路桥涵设计通用规范》划分：①恒载（自重、桥面铺装、护栏）；②公路 - I 级汽车荷载（居中、钝角侧偏载、锐角侧偏载三种工况）；③整体升降温 $\pm 25^\circ\text{C}$ ；④预应力张拉等效荷载。荷载组合采用承载能力极限状态基本组合、正常使用极限状态频遇组合^[3]。

（三）边界约束条件

墩顶支座采用竖向约束 + 水平弹性约束模拟板式橡胶支座，释放梁端转动自由度；桥台位置约束竖向、横向位移，纵向设置滑动约束，还原简支支承真实边界，避免约束失真造成内力计算偏差。

三、有限元计算结果与受力规律分析

（一）支座反力分布规律

三种汽车荷载工况下支座反力计算结果显示：恒载单独作用时，钝角侧 1# 主梁支座反力最大，数值为 1620kN；锐角侧 5# 主梁支座反力仅 945kN，支座反力差值达 675kN。钝角侧汽车偏载工况下，1# 主梁支座反力增至 2186kN，5# 主梁反力降至 612kN，锐角支座反力大幅降低，存在脱空隐患；车辆居中布置时，各支座反力差值缩小，但钝角支座仍承担 42% 总竖向荷载。

规律总结：单跨斜转正简支 T 梁支座竖向反力分布极不平衡，车辆向钝角侧偏置会进一步放大受力差异；钝角支座需选用高承载力板式支座，锐角支座配套竖向抗拔限位装置，避免支座脱空风险。

（二）主梁弯矩与扭矩分布特征

（1）跨中弯矩

承载能力极限状态下，长主梁跨中最大正弯矩 8620kN · m，短主梁跨中弯矩 6310kN · m，长短主梁弯矩差值 2310kN · m。同等跨径 30m 正交单跨简支 T 梁跨中弯矩 7150kN · m，斜转正最长主梁弯矩较正交梁增大 20.6%，主要由附加扭矩耦合作用导致截面等效弯矩提升。

（2）主梁扭矩

汽车偏载工况下，1# 长主梁梁端最大扭矩、5# 短主梁梁端扭矩差值明显，扭矩沿钝角至锐角呈递减分布规律，扭矩峰值集中

于主梁两端支点截面，跨中扭矩水平更低。在弯扭耦合共同作用下，梁端截面主拉应力达到较高水平，逼近 C50 混凝土抗拉控制限值，是主梁抗裂设计的关键控制截面。

受力结论：结合单跨斜转正 T 梁有限元多组斜交角参数对比计算结果，长短主梁扭转内力差异显著，钝角侧长梁受弯扭耦合作用影响更明显；针对梁端高应力区域，需通过加密箍筋、增设专用抗扭钢筋的方式提升截面整体抗扭承载力^[4]。

（三）横向湿接头应力分析

横向湿接头横向正应力、剪应力提取结果表明：车辆钝角偏载时，靠近钝角的 1#、2# 主梁间湿接头最大主拉应力 1.45MPa，超过 C40 混凝土正常使用抗拉限值；靠近锐角湿接头应力仅 0.53MPa。湿接头应力集中原因为长短梁竖向变形差产生错动，扭转作用进一步放大接缝剪切应力。

（四）斜交角度对结构受力的参数影响

前文仅针对 45° 单跨独立斜转正 T 梁实体工程完成单工况受力分析，为定量揭示斜交角度、横向预应力两大关键参数对单跨简支斜转正结构受力的调控规律，本节建立多组对比模型开展参数化分析。

横向湿接头横向正应力、剪应力提取结果表明：车辆钝角偏载工况下，钝角侧主梁间湿接头拉应力水平显著高于锐角区域，长短主梁竖向变形差引发接缝错动，叠加扭转效应后进一步加剧接缝剪切应力集中。结合不同横向预应力配置、不同斜交角度多组参数模型对比计算可知，未配置横向预应力的现浇接缝拉应力控制指标难以满足耐久使用要求。

优化方向：通过在横向湿接头布置通长横向预应力筋，可有效提升接缝整体协同刚度，显著削弱长短梁扭转错动带来的附加拉应力，从源头降低接缝开裂、渗水病害发生风险。

四、装配式斜转正桥梁结构优化设计与施工控制措施

（一）上部预制主梁结构优化

结合同一斜交角度下多组腹板厚度对比模型计算结果：腹板厚度提升可明显降低主梁梁端扭矩与截面主拉应力，钝角长梁扭转控制需求更高。据此提出优化方案：

（1）区分长短梁腹板厚度，钝角侧长主梁腹板加厚至 22cm，短主梁腹板统一采用 18cm；同时对全桥梁端 1/4 跨区段加密抗扭箍筋，箍筋间距由 15cm 缩小至 10cm，通过截面加厚 + 配筋加密双重措施抵抗附加扭矩；

（2）对比有无通长纵向预应力模型内力差异，增设主梁顶、底板通长纵向预应力筋可有效提升截面抗弯、抗扭综合刚度，显著削减弯扭耦合作用产生的主拉应力；

（3）建立长短梁端部构造差异化、标准化两组模型对比，统一预制梁端部现浇加厚段构造尺寸，能减少拼装后的竖向变形差，方便横向湿接头整体浇筑施工。

（二）横向连接体系优化

通过多组横向连接参数对比模型开展量化分析，分别对比无横向预应力、配置不同根数预应力筋、不同现浇层厚度工况的接

缝应力、主梁内力分布规律，得出以下优化措施：

（1）对比无横向预应力、单根 $\Phi 25$ 、两根 $\Phi 25$ 预应力筋三种方案，横向湿接头配置 2 根 $\Phi 25$ 通长横向预应力筋、张拉控制应力取 0.6fptk 时，约束长短梁相对扭转错动效果最优，接缝拉应力降幅明显；

（2）对比 8cm、12cm 两种墩顶现浇层厚度模型，现浇层加厚至 12cm 并布设双层钢筋网片后，桥面横向整体刚度提升，车辆荷载横向分配更均匀，各主梁内力差值明显缩小。

（三）下部支座与盖梁优化措施

（1）钝角支座选用加高型大承载力橡胶支座，锐角支座配套竖向限位抗拔装置，限制梁体抬升脱空；

（2）斜转正盖梁钝角区域加厚配筋，增大盖梁截面尺寸，抵抗支座集中反力产生的局部冲击应力；

（3）支座布设时向钝角侧适度偏移，平衡竖向荷载，小幅缩小支座反力差值。

（四）现场拼装施工受力控制

（1）预制梁吊装顺序优先架设锐角短梁，后吊装钝角长梁，避免单侧堆载造成盖梁偏心受力；

（2）横向湿接头同步整体浇筑，禁止分段分次浇筑，防止新旧混凝土收缩差产生附加次内力；

（3）湿接头养护周期不少于 14d，达到设计强度后方可进行桥面铺装施工，避免早期扭转荷载损伤接缝。

在常规优化措施基础上，还需结合斜转正桥梁弯扭耦合、受力不均的结构特性，强化精细化施工管控与全周期防护设计。在工厂预制阶段，需严格控制长短主梁整体线形与截面精度，对梁端斜面、拼接接触面进行精细打磨找平，严格把控构件尺寸偏差，有效消除现场拼装错位产生的附加扭转应力，保障装配式主梁整体拼接刚度与结构整体性。同时湿接头浇筑应选择温度平稳时段施工，避开高温暴晒与低温寒潮环境，有效降低混凝土收缩徐变产生的次生温度内力，减少接缝早期微裂缝的产生概率。

桥面附属施工过程中，必须遵循对称、均衡、同步的施工原则，桥面铺装、防撞护栏等附属工程需双侧同步推进，禁止单侧集中堆载施工，避免偏心荷载进一步加剧梁体扭转变形。针对桥梁长期服役病害特征，可在钝角高应力区域增设柔性缓冲构造，优化局部荷载传递路径，缓解车辆往复荷载造成的结构疲劳损伤。同时建立关键部位常态化监测体系，重点跟踪支座沉降、梁体扭转变形及湿接头应力变化，实现隐患早发现、早处置。

（四）单跨斜转正 T 梁线形控制与竣工验收管控

针对长短梁跨径与刚度差异问题，需采用差异化预拱度布设方案，根据各片主梁受力变形特征设置对应预拱值，改善桥面线形不均问题。预应力张拉采用分级对称张拉工艺，减缓瞬时应力带来的侧向扭转残余变形。在工程验收阶段增设斜转正桥梁专项验收标准，严控梁端高差、接缝密实度、支座偏移等关键指标。通过全方位精细化管控，可有效削弱弯扭耦合不利影响，规避脱空、开裂、不均匀变形等病害，显著提升桥梁整体受力性能与耐久服役水平^[6]。

五、结语

本文以30m跨单跨简支装配式斜转正T梁桥为依托,采用梁格有限元法开展多工况受力分析,明确该类桥型受力特征:钝角支座反力集中、长主梁扭矩显著偏大、横向湿接缝应力集中,且斜交角度增大将持续加剧受力不均。对比30°、45°两种工况可知,45°属于受限特殊方案,斜交角超过30°后弯扭失衡效应急剧放大,常规工程建议控制斜交角不超过30°;通过腹板厚度、抗扭配筋、横向预应力多参数分析,证实差异化主梁构造、配置

横向预应力、增设支座限位可有效削弱不利内力,提高结构安全储备。

单跨斜转正T梁存在跨径差,不能直接采用正交梁简化计算方法,设计需通过精细化梁格模型开展弯扭耦合验算。该类桥型能适配复杂路口征地约束,预制拼装优势明显。本文基于多参数对比计算总结的内力分布规律与优化控制措施,可为同类装配式斜转正T梁桥结构设计、现场施工提供受力理论支撑,对提升公路装配式桥梁整体耐久性具有工程实用价值。

参考文献

- [1] 刘浩,周凯.大角度装配式斜转正小箱梁桥受力特征及参数影响分析[J].公路交通科技,2025,42(02):98-105.
- [2] 陈明远.横向预应力对斜转正装配式梁桥扭转性能改善研究[J].工程技术研究,2025,10(11):76-79.
- [3] 王景龙.市政简支斜转正桥梁支座反力失衡与限位优化设计[J].城市道桥与防洪,2025(07):134-137+142.
- [4] 李泽宇.不同斜交角预制斜转正箱梁弯扭耦合效应有限元分析[J].公路与汽运,2025(04):89-93.
- [5] 张航.装配式斜转正桥梁横向湿接头受力病害及加固对策[J].交通世界,2025(18):102-104.

第二代木材单板上板机设计与应用研究

罗文航¹, 周楚虹^{2*}, 韦克磊², 陈大兴²

1. 广西科泰机电工程有限公司, 广西 南宁 530000

2. 广西农业机械研究院有限公司, 广西 南宁 530000

DOI:10.61369/ME.2026070020

摘 要 : 针对现有木材单板上板机处理效率较低、设备成本较高且需要人工辅助等问题, 结合第一代设备应用情况, 开展第二代木材单板上板机研究。设备采用负压箱吸单张单板与皮带机送板技术路线, 通过主升降机和二级升降机接力式传递保证连续上板, 利用变频调速控制送板速度及单板间距。试验结果显示, 设备功能运行正常, 处理量可达5m³/h, 生产和安装总花费约4.72万元, 自动运行过程中无需人工辅助, 达到低投入、高效率 and 自动化运行的预期目标, 为木材单板连续进板提供参考。

关 键 词 : 木材单板; 上板机; 负压吸附; 升降机构; 自动化

Research on the Design and Application of Second-Generation Wood Slab Boarders

Luo Wenhong¹, Zhou Chuhong^{2*}, Wei Kelei², Chen Daxing²

1. Nanning Ketai Machinery Equipment Co., Ltd., Nanning, Guangxi 530000

2. Guangxi Agricultural Machinery Research Institute Co., Ltd. Nanning, Guangxi 530000

Abstract : Addressing the issues of relatively low processing efficiency, high equipment costs, and reliance on manual assistance associated with existing wood veneer loading machines, this study conducts research on a second-generation wood veneer loading machine based on the application experience of first-generation systems. The equipment adopts a negative-pressure chamber for suctioning individual veneers and a belt conveyor for veneer transport; continuous veneer loading is achieved through a relay-driven transmission system utilizing a main lifting mechanism and a secondary lifting mechanism, while the veneer feeding speed and spacing are controlled via variable-frequency drive (VFD) speed regulation. Experimental results demonstrate that the equipment operates normally, with a processing capacity of up to 5m³/h, a total production and installation cost of approximately RMB 47,200, and no need for manual assistance during automatic operation—thereby fulfilling the expected objectives of low investment, high efficiency, and fully automated operation, and providing a reference for the continuous feeding of wood veneers.

Keywords : wood veneer; veneer press; negative pressure adsorption; lifting mechanism; automation

随着木材加工产业向自动化、连续化方向发展, 旋切单板在分选、干燥等工序中的自动进板需求提高。现有木材单板上板设备普遍存在处理效率偏低、设备成本较高、运行依赖人工辅助等问题。基于第一代设备应用中暴露出的不足, 本文围绕第二代木材单板上板机开展研究, 重点分析负压吸附、皮带输送及主升降与二级升降接力等技术方案, 并通过设备制作、安装调试和性能试验验证其处理能力与应用效果, 为木材单板自动上板设备优化提供参考。

一、项目概述

(一) 项目背景

随着科技的发展, 木材加工产业由原来的劳动密集型走向了人机协作型, 单板的干燥逐渐从人工晒板走向设备烘干, 单板的

分选也是逐渐从人工分选走向设备 AI 分选, 而这些设备的应用就涉及一个关键的工序——进板(把堆叠的单板一张张的放进设备中), 堆叠好的单板拆解分散需要花费大量的人工, 严重制约设备的工作效率, 也不符合设备自动化的发展需求。目前市场上也出现了一些木材单板上板机, 但是普遍存在效率低、设备成本

项目名称: 智能木材单板烘干系统开发及应用。

作者简介: 罗文航(1989.08—), 男, 壮族, 本科, 广西贵港人, 工程师, 研究方向: 机电。

通讯作者: 周楚虹(1989.11—), 女, 汉族, 本科, 湖南永州人, 工程师, 研究方向: 机械工程。

高、自动化程度低等问题。

（二）项目目标

目前市场上的木材单板上板机单板处理量通常只有 $3\text{m}^3/\text{h}$ ，设备售价高达30万以上，设运行全过程需要人工辅助才能完成。所以，本项目的木材单板上板机的开发目标是研发并安装一套低投入、高效率的自动上板设备，设备成本控制在5万元以内，处理量达 $5\text{m}^3/\text{h}$ ，全程无人操作，解决行业中木材单板上板机效率低、设备成本高、自动化程度低的问题。

二、技术方案

（一）技术选择

科泰公司第二代木材单板上板机技术选择阶段，针对第一代木材单板上板机在智能木材单板烘干系统开发及应用项目使用过程中存在的问题进行总结、讨论，最终确定优化改进原有的真空吸盘同时吸附四张单板+气缸推动送板的模式，采用负压箱吸单张单板+皮带机送板的技术路线。皮带机的皮带局部打有孔，随着皮带机的转动，当皮带上的孔与负压箱的吸附孔对齐时，负压箱的吸力将单板吸附在皮带上，使其随皮带向前运动。而由于皮带的速度很快（ 2.5m/s ），吸附在皮带上的单板也会被快速（ 0.5s ）地送走。

（二）关键技术难点及解决方案

在第二代木材单板上板机研究中，虽然采用负压箱吸单张单板+皮带机送板的方式可以解决吸板和送板动作耗时长的问题，但是也衍生出有板可吸和有序送板的问题。有板可吸，指的是能不间断地提供单板给吸板机，这就是所遇到的第一个难点：上板的连续性。有序送板，指的是能按要求控制好送板的速度和前后板的距离，这就是所遇到的第二个难点：送板速度和前后单板的距离。针对上述提到有板可吸的问题，我们计划设计两套升降机机构来给吸板机送板，通过主升降机和二级升降机的接力式传递，保证了单板上板的连续性。而针对有序送板的问题，我们计划通过变频电机调速的方式控制传动皮带机的速度进而控制送板的速度。因为只有当传动皮带上的孔与负压箱的吸附孔对齐时负压箱的吸力才能将单板吸附在皮带上，所以只需控制传动皮带上的孔的前后距离，便能实现对前后单板的距离。

三、实施过程

（一）项目开发设计

根据第二代木材单板上板机的技术路线特点，第二代木材单板上板机的总体设计思路如下：单板输送皮带机位置不动，将吸附箱装在单板输送皮带机的上下皮带之间，堆叠的单板从下往上移动，当单板与皮带接触时，被隔着皮带的吸附箱吸住，使其贴着皮带面，皮带机将其往前快速送走，当上方的单板被送走并与皮带分离后，下方的单板再与皮带接触，从而实现循环不断地把下方堆叠的单板一张一张的往前送走。根据第二代木材单板上板机的技术路线特点和功能，我们将第二代木材单板上板机主要分

为机架、主升降机、二级升降机、吸板机等几大机构。第二代木材单板上板机总体布置见图1。

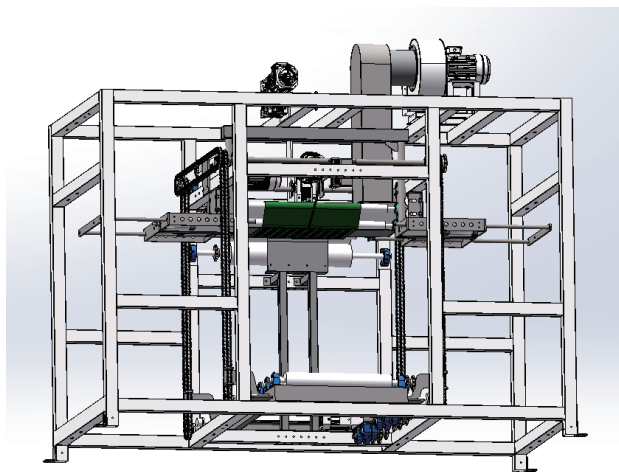


图1 第二代木材单板上板机总体布置

机架：由型钢组焊而成，作为整套设备的支持框架，主升降机、二级升降机、吸板机、出板机、控制系统等机构全部安装在机架里。

主升降机：主要由电减速机、传动链条、升降链条、主升降平台和滚筒等组成；主升降机的升降平台上布置有多个带动力的滚筒，可将放置在滚筒上的整垛单板送到指定位置，升降平台的四个角用链条连接，通过安装在电减速机上的链轮带动链条，实现升降平台的上升及下降，从而实现对整垛单板的举升功能。

二级升降机：主要由电减速机、升降链条、二级升降架、伸缩支撑杆和气缸等组成；为保证单板出板的连续性，待主升降机上的板只剩下 $1/4$ 的时候，安装在二级升降机架两边的气缸伸出，带动支撑杆伸出，支撑杆插入单板的底部，支撑剩余的单板。通过主升降机和二级升降机的接力式传递，保证了单板上板的连续性。

吸板机：主要由电减速机、传动链条、传动皮带机、负压箱和离心风机等组成；吸板机主要是通过负压吸附的原理来实现吸板的功能，负压箱与离心风机的进口相连，通过离心风机的转动、抽气，使得负压箱内部形成负压。负压箱安装在环形打孔皮带的中间，负压箱的底板与打孔皮带接触，负压箱底部开有吸附孔，环形皮带上局部也打有通风孔，当转动的打孔皮带上的孔与负压箱的孔对齐的时候，负压箱的负压把靠近打孔皮带的单板吸附到皮带上，皮带转动的同时把单板往前送。

（二）材料采购

第二代木材单板上板机的结构涉及到大量的标准件和外购件，所以材料的采购成本是我们项目成本控制的关键，针对这一问题，我们也采取了多项措施对采购成本进行控制。实施标准化采购：统一设备、仪表、备件型号和规格，减少“万国牌”现象。

（三）生产制作

第二代木材单板上板机的在设备制作过程中，进度与质量需统筹兼顾。质量上，须严格执行工艺标准和检验规程，强化过程

巡检与“三检制”（自检、互检、专检），确保特殊过程受控。通过首件鉴定、工序交接验收等机制实现质量与进度的动态平衡，确保设备按期、合格交付。

（四）安装及调试

木材单板上板机的安装和调试遵循相关国家及行业标准规范，按《机械设备安装工程施工及验收通用规范》GB 50231—2009规范执行。安装及调试分为前期准备、安装固定、调试运行、验收收尾四大环节，全程需规范操作、严控细节，保障设备稳定运行、规避安全隐患。

四、结果与分析

在第二代木材单板上板机的研发过程中，为确认设备的功能和性能达到设计的要求，我们按规范要求编制了《设备试验大纲》，根据试验大纲编制设备试验方案，按照试验方案对其功能和性能进行严格的测试。动作时序逻辑准确，各项控制指令响应及时，保护装置触发可靠，无动作紊乱、程序卡死、功能失效现象。设备全部功能满足设计任务书及技术规格要求，设备功能测试合格。性能测试方面，经对第二代木材单板上板机7*24小时的性能测试验证，设备各项技术指标满足设计要求，额定工况下运行平稳，精度、产能、负载、能耗等指标达标，无超差、异常发热及振动问题，吸板量能到 $5\text{m}^3/\text{h}$ ，设备性能测试合格。第二代木材单板上板机试验现场见图2。



图2 第二代木材单板上板机的试验

五、讨论与改进

（一）成果讨论

通过对第二代木材单板上板机功能和性能测试，结果表面设备功能完善、性能良好，设备处理量可达 $5\text{m}^3/\text{h}$ ，远高于行业设备的 $3\text{m}^3/\text{h}$ 。通过对第二代木材单板上板机生产制作和安装调试全过程中产生的各种费用进行统计，生产和安装一台合格的木材单板上板机，总花费约4.72万元，远低于行业设备的30万元。设备自动运行过程中，全程不需要人工辅助。虽然第二代木材单板上板机的研发结果达到了项目的初始目标，但是也存在一些不足和问题。1. 设计缺陷：吸板机的支架和二次升降机的滑轨座有干涉，现场更改吸板机的支架避免了干涉，但是也减少了传动皮带的张紧距离，为皮带张紧带来了不确定因素。2. 外购件质量问题：一些外购的成品链轮和齿轮的内孔孔径加工公差控制较差，有些装不上，有些又太松，质量不稳定。

（二）经验教训

第二代木材单板上板机研发过程中，我们积累了宝贵的经验教训。然而，在这过程中也有待改进之处，研发周期较短，部分结构设计考虑不全和方案审核不严谨导致设计缺陷。同时，为控制成本，追求低价，部分外购件在网上购买，产品质量无法管控。

（三）改进建议

基于第二代木材单板上板机研发过程中的经验教训，提出以下改进建议：提升团队素质，通过专业培训与能力建设，增强项目团队的专业技能与工作效率；加强质量管控，通过构建系统化、全流程的质量管理体系，加强对外购产品的检查，明确验收标准，强化来料检验与过程监督，确保源头可控、追溯清晰；加强安全管理，严格遵循安全规程，落实风险评估与防护措施，强化现场监管与应急预案，确保人员与设备安全。

六、结论

广西科泰机电工程有限公司的第二代木材单板上板机研发在全体项目成员的共同努力下圆满完成，并在自治区国资委监管企业科技创新资金核心技术攻关项目和重大科技创新项目——智能木材单板烘干系统开发及应用中得到应用，设备成本控制在5万元以内，处理量达 $5\text{m}^3/\text{h}$ ，全程无人操作，达到预期目标——研发并安装一套低投入、高效率的自动上板设备。

参考文献

- [1] GB 50231—2009, 机械设备安装工程施工及验收通用规范 [S].
- [2] 高锐, 张伟, 王勇. 结构用集成材自动上下料装置真空吸附系统设计与试验 [J]. 林业工程学报, 2021, 6 (2): 126–132.
- [3] 高锐. 木结构构件自动上下料码垛装置控制系统设计与应用 [J]. 木材科学与技术, 2023, 37 (4): 58–64.
- [4] 李亦珂. 自动化计算机控制系统在相关人造板设备中的应用分析 [J]. 林产工业, 2020, 57 (4): 109–112.

面向绿色制造的机电控制节能技术体系构建研究

骆龙

新疆农村商业银行股份有限公司, 新疆 乌鲁木齐 830001

DOI:10.61369/ME.2026070023

摘 要： 在“双碳”目标驱动下，绿色制造正迈向全生命周期系统变革，机电控制节能技术成为贯通制造工艺、装备运行与能源管理的关键纽带。当前，变频调速、伺服优化及数字孪生等技术推动节能从单机最优向产线协同跃升，但仍面临跨层级协同控制、工况自适应能力不足、标准体系碎片化及产业生态不健全等挑战。有鉴于此，本文系统剖析技术、标准、管理与产业四维度瓶颈，提出涵盖弹性协同架构、物理-数据融合算法、全尺度标准矩阵、组织重塑与阶梯式激励、系统集成生态培育等系统性构建策略，旨在为制造业绿色转型提供可落地的技术体系框架。

关 键 词： 绿色制造；机电控制；节能技术；产业生态

Research on the Construction of Electromechanical Control Energy Saving Technology System for Green Manufacturing

Luo Long

Xinjiang Rural Commercial Bank Co., Ltd., Urumqi, Xinjiang 830001

Abstract： Driven by the "dual carbon" goal, green manufacturing is moving towards a full lifecycle system transformation, and electromechanical control energy-saving technology has become a key link connecting manufacturing processes, equipment operation, and energy management. Currently, technologies such as variable frequency speed regulation, servo optimization, and digital twins are driving energy conservation from single machine optimization to production line collaboration. However, there are still challenges such as cross level collaborative control, insufficient adaptability to working conditions, fragmented standard systems, and an unhealthy industrial ecosystem. In view of this, this article systematically analyzes the four-dimensional bottlenecks of technology, standards, management, and industry, and proposes systematic construction strategies including elastic collaborative architecture, physical data fusion algorithms, full-scale standard matrix, organizational restructuring and tiered incentives, and system integration ecological cultivation, aiming to provide a practical technical system framework for the green transformation of the manufacturing industry.

Keywords： green manufacturing; mechanical and electrical control; energy saving technology; industrial ecosystem

当前，变频调速、伺服优化及数字孪生等技术虽已在单机控制与产线制造层面取得显著节能进展，但技术体系构建仍面临跨层级协同困难、工况自适应不足、标准碎片化及产业生态不健全等系统性瓶颈，制约了规模化落地。有鉴于此，因此，分析面向绿色制造的机电控制节能技术体系发展现状，结合其中存在的问题提出针对性的措施，对于推动制造业绿色转型具有重要意义。

一、面向绿色制造的机电控制节能技术发展现状

在“双碳”目标与制造业深度转型的双重驱动下，绿色制造已从末端治理走向全流程、全生命周期的系统变革，机电控制节能技术由此成为贯通制造工艺、装备运行与能源管理的关键纽带^[1]。当前，变频调速、伺服优化、能量回馈等单点节能控制技术已在机床、注塑机、工业机器人等典型装备中得到较广泛验证，部分先进企业依托模型预测控制和自适应算法实现了运行工况与

能耗的实时匹配，使设备级节能率达10%~30%。与此同时，工业互联网与数字孪生技术的渗透，正推动节能控制从“单机最优”向“产线协同最优”跃升——通过采集多源传感数据构建能耗数字镜像，进而对启停时序、负载分配、待机功耗等进行全局寻优，初步形成了“感知-分析-决策-执行”的闭环节能范式。

然而，技术成果的规模化落地仍面临显著落差。一方面，高端节能控制系统高度依赖高精度传感器、高速通信模块和专用算法库，国产化替代能力不足，导致中小制造企业陷入“想改改不

作者简介：骆龙（1977.05-），男，汉族，新疆乌鲁木齐人，学历：大学，职称：工程师，研究方向：电气工程。

起、改后难维护”的困境；另一方面，现有节能改造多聚焦于新建产线或高耗能环节，存量设备的海量基数与异构控制系统使得技术复用的边际成本陡增。更关键的是，当前节能效益的评估往往以设备级节电率为单一指标，忽视了制造质量、加工效率、设备寿命等关联维度的综合损益，这种“节能本位”的评估惯性制约了技术体系的系统性建构。

二、机电控制节能技术体系构建存在的问题分析

（一）技术层面问题

技术体系的构建首先遭遇的是多层次协同控制的复杂性问题。从单机控制器到产线调度系统，再到车间级能源管理平台，各层级的时间尺度、控制目标和信息粒度存在本质差异——设备级要求毫秒级动态响应，产线级侧重秒级生产节拍协调，而能源管理则以分钟或小时为单位的统计优化，如何建立跨层级的一致性模型与协同决策机制尚缺乏成熟的理论框架。此外，节能控制算法普遍对工况变化的适应性不足，传统 PID 参数整定和规则库在变负载、变速度、变环境条件下容易偏离最优运行点，而数据驱动的机器学习方法又面临样本稀缺、模型泛化能力弱以及在线学习实时性难以保证等现实瓶颈^[9]。更为棘手的是，多源异构设备间的通信协议与数据接口互不兼容，导致能耗数据的全息感知与互联互通在工程实施中大打折扣，严重削弱了上层优化算法的实际调控效能。

（二）标准层面问题

标准体系的滞后与碎片化是制约技术体系规范发展的另一关键瓶颈。当前，机电控制节能领域尚未形成覆盖“元件—设备—系统—车间”全尺度的标准矩阵：在测试评价方面，不同厂商的变频器、伺服驱动器和控制器在节能性能测试中采用的工况条件、负载谱和测试周期差异显著，致使横向对比数据缺乏公信力；在能效指标方面，设备级和系统级的能效基准（基准线）设定缺乏统一的统计学方法和动态更新机制，有的以额定工况为基准，有的以历史平均值为基准，导致节能核算结果无法互认。此外，面向绿色制造的机电控制涉及机械、电气、自动化和环境等多学科交叉，现有标准大多沿袭单一专业领域的惯习，对多能互补、能量回馈质量、待机功耗阈值等交叉性议题缺乏明确的界定和量化要求，标准化技术委员会之间的协调机制也亟待理顺。

（三）管理与制度层面问题

技术体系的落地效果在很大程度上取决于企业内部管理架构与外部制度激励的匹配程度。从企业内部看，节能改造的投资回报周期与制造企业追求的短期财务绩效之间存在天然张力，而节能效益在财务核算中又难以与产量提升、质量改进等传统 KPI 形成并轨评价，导致机电控制节能项目在年度预算竞争中往往处于劣势。更为深层的是，多数制造企业的能源管理职能归属动力车间或设备部门，与生产工艺部门、自动化控制部门之间存在明显的组织壁垒——工艺人员关心加工质量和节拍，控制人员关心系统稳定性，能源人员关心能耗数值，三者目标函数的分离使得“工艺—控制—能耗”协同优化在管理流程上难以实现。从外部制

度看，现行节能补贴和绿色制造激励政策多采用“项目申报制”，侧重单项技术的示范推广，而对系统性节能技术体系构建所需的前期咨询、人才培养和持续改善机制缺乏常态化支持^[9]。

（四）产业生态层面问题

跳出单一企业视角，机电控制节能技术体系的健康演进还需要一个功能完整的产业生态支撑，而这一生态目前仍处于发育不全的状态。在供给端，系统集成商普遍规模偏小，缺乏同时精通机械设计、自动控制、能源管理和数据分析的复合型工程团队，导致“交钥匙”工程的质量参差不齐；而大型自动化龙头企业则更倾向于销售标准化通用产品，对定制化的节能系统集成方案缺乏足够的服务意愿和技术储备。在需求端，大量制造企业对机电控制节能的认知仍停留在“换变频器、装节电器”的初级层面，缺乏从系统级进行控制策略重构和运行模式优化的专业判断能力，这种信息不对称使得劣质低价节能方案容易通过短期演示数据获得市场，而真正具备长期效益的系统性方案反而因报价较高而被挤出。此外，节能效益分享型合同能源管理模式在机电控制领域的应用还面临能量核定争议大、改造风险分担机制不健全、融资渠道狭窄等问题，制约了专业化节能服务公司的介入深度和市场活力。

三、面向绿色制造的机电控制节能关键技术体系构建策略

（一）突破多层次协同与工况自适应控制的技术瓶颈

针对技术层面存在的跨层级协同控制难题与工况适应性不足问题，应从控制架构与算法体系两个维度协同突破。在架构层面，摒弃传统的垂直刚性分层模式，构建“边缘实时优化+云端全局协调”的弹性协同框架：设备级边缘控制器保留毫秒级闭环调节的自主性，同时以标准化信息接口向上层输出包含能耗特征、负载状态和运行裕度的紧凑语义信息；产线与车间级则基于这些语义信息，以秒级至分钟级的周期下发调度指令与能耗目标设定值，形成“快慢解耦、目标一致”的分布式协同机制。核心在于定义层间交互的标准化信息契约而非共享全部细粒度数据，从而在保证实时性的同时降低通信与计算负担^[10]。

在算法层面，推动物理机理与数据驱动的深度融合，以解决纯数据驱动方法在变工况条件下的泛化难题。具体路径是：以机电装备的机理模型提供工况变化下的先验约束与基准映射，再在线学习算法对模型偏差进行局部修正与参数自适应调节，使控制策略在不同负载谱和速度条件下保持对最优运行点的有效追踪。对于样本稀缺问题，可采用迁移学习策略，将仿真环境或相似工况下预训练的模型参数迁移至目标装备，辅以小样本在线微调，大幅降低对实际运行数据的依赖。同时，针对异构设备互联互通障碍，应推动基于 OPC UA、MQTT 等开放通信协议的信息模型标准化建设，使不同厂商设备能够以统一的语义格式输出能耗相关数据，为上层优化算法提供可靠的“数据底座”。

（二）构建全尺度、跨学科的标准规范体系

针对标准体系滞后与碎片化问题，需从顶层设计入手，建立

覆盖“元件－设备－系统－车间”全尺度的标准矩阵，并理顺跨学科标准的协调机制。统一规定各类节能控制装置和系统的测试工况条件、负载谱编制方法、测试周期及数据采集规范，确保不同厂商产品在同等条件下具有可比性。在此基础上，建立动态能效基准设定方法——摒弃固定参照系的做法，采用基于统计过程控制的动态基线模型，根据装备运行数据实时更新能效基准值，使节能量核算摆脱对“额定工况”或“历史均值”等静态参照的依赖，提升核算结果的可信度与互认性。

对于多学科交叉议题，建议由全国能源基础与管理标准化技术委员会牵头，联合全国工业机械电气系统标准化技术委员会等机构，成立面向绿色制造机电控制的联合标准工作组，针对能量回馈质量、多能互补系统的能效计量方法、待机功耗阈值分级等空白领域进行专项研究与标准制定^[5]。此外，应引入标准验证与动态迭代机制，在重点行业设立标准验证示范点，通过实际运行数据检验标准的合理性与可操作性，形成“研制－验证－修订”的闭环迭代流程，避免标准出台后与实践脱节。

（三）重塑企业内部组织协同与外部制度激励机制

针对管理层面的组织壁垒和激励错配问题，对策的核心在于重构企业内部的绩效评价体系和跨部门协作机制，同时优化外部政策工具的设计逻辑。在企业内部，应将“能效产出”纳入生产运营的核心考核维度，建立“产量－质量－能效”三元并轨的评价框架。具体可引入等效综合成本函数，将电能消耗、加工效率、废品率及设备维护成本纳入统一核算体系，使节能改造的综合收益在财务层面可视化。更为关键的是，推动工艺部门、自动化控制部门和能源管理部门的目标对齐——可在组织架构上设立跨职能的“绿色制造工程小组”，赋予其统筹工艺参数优化、控制策略调整与能源调度的权限，并建立以“单位产品综合能耗”为核心的联合考核指标，打破部门间的目标函数分裂。

在外部制度层面，将节能补贴政策从“单项技术示范申报制”转向“系统性能力建设支持制”，重点支持企业开展能耗诊断与系统评估、复合型人才培训、节能控制体系认证等基础性工作，而非仅对设备更换给予补贴。建议探索“节能绩效阶梯式奖励”机制——根据企业连续多年度的单位产值能耗下降幅度给予梯度式政策优惠，激励企业建立持续改善的长效机制，而非追求一次性改造的短期达标。

（四）培育系统集成能力与良性竞争的产业生态

针对产业生态层面系统集成商能力不足、需求端认知偏差和合同能源管理模式适用性差等问题，对策应着眼于供给端能力建设、需求端认知提升和商业模式创新三端协同发力。在供给端，支持大型自动化企业 with 专业节能技术公司建立战略联盟或联合实验室，将通用控制平台能力与节能工艺专长相结合，形成可复制的系统性解决方案而非零散的设备替换服务。同时，依托行业龙头企业和科研院所，建设机电控制节能技术中试验证平台，为中小系统集成商提供真实工况环境下的方案测试与优化服务，降低其技术验证成本，提升“交钥匙”工程的整体质量水平。

在需求端，通过行业协会和公共服务中心组织开展面向制造企业高管和工程技术人员系统性培训，核心目标是提升其对“控制策略重构”而非“设备简单替换”的认知层次，帮助需求方建立从系统级评估节能潜力、核算全生命周期成本的专业判断能力。在商业模式方面，针对机电控制领域的特点，改良传统合同能源管理模式——引入“节能量保险＋第三方核定”的风险分担机制，由保险公司承保节能量达不到预期时的差额损失，第三方核定机构提供中立公正的节能量测量与验证服务，从而降低供需双方在节能量认定上的分歧风险。此外，探索“节能能力建设即服务”的订阅制模式，由专业服务商为企业提供持续的能耗监测、控制策略优化建议和运维支持，以服务费替代一次性改造成本，降低中小制造企业的资金门槛，同时为服务商创造稳定的收入流，形成激励相容的长期合作关系。

四、结语

面向绿色制造的机电控制节能技术体系构建是一项涉及控制理论、标准规范、组织管理与产业生态的系统工程。本文从四维度系统剖析了制约瓶颈，并提出了覆盖架构创新、算法融合、标准统一、机制优化与生态培育的整体策略，强调技术突破需与管理变革、制度设计同步推进方能实现规模化落地。未来，可聚焦于构建融合机理与数据驱动的数字孪生仿真平台，以验证跨层级协同控制策略在典型离散制造场景中的工程实效，并探索基于大语言模型的人机协同决策机制，为动态工况下的自适应节能优化提供新路径。

参考文献

- [1] 胡兆帅. 电气自动化技术在机电一体化生产线节能改造中的应用[J]. 造纸装备及材料, 2026, 55(6): 150-152.
- [2] 张敏峰. 节能理念下冶金机电设备运行优化与能耗控制[J]. 中国金属通报, 2026(6): 1-3.
- [3] 周国松, 胡伟波, 吴梦杰, 等. 面向绿色制造的机电加工工艺参数优化方法[J]. 产城, 2026(4): 180-182.
- [4] 周鹏玉, 顾浩宇, 徐鸿伟, 等. 基于DEMATEL-ISM的公路机电安装绿色施工成本影响因素研究[J]. 河南大学学报(自然科学版), 2025, 55(4): 496-504.
- [5] 翟卫波, 顾浩宇, 邹俊杰, 等. 高速公路机电安装绿色施工评价体系及工程应用研究[J]. 工程管理学报, 2024, 38(3): 88-93.

基于 AMESim 建模的船舶开式舵机故障仿真分析

周子童, 张志远, 孙鹏

大连海洋大学, 辽宁 大连 116000

DOI:10.61369/ME.2026070024

摘 要 : 针对船舶开式液压舵机系统故障特征难以准确获取的问题, 基于 AMESim 与 Simulink 联合仿真方法建立了船舶开式液压舵机机液耦合动态模型。其中, AMESim 用于构建液压系统模型, Simulink 用于实现舵机控制系统建模, 从而实现液压系统与控制系统联合动态仿真。在此基础上, 对液压泵内泄漏、溢流阀卡滞、三位四通换向阀内泄漏3种典型故障进行了故障注入仿真, 分析了不同故障状态下系统压力、流量及舵角响应变化规律。结果表明, 泄漏类故障会导致系统压力下降与舵角响应迟滞, 卡滞类故障会引起系统压力波动增大。可为船舶液压舵机故障诊断与健康监测研究提供理论依据。

关 键 词 : 船舶开式液压舵机; AMESim; Simulink; 故障分析; 液压系统

Fault Simulation Analysis of Open-Type Ship Rudder Mechanism Based on AMESim Modeling

Zhou Zitong, Zhang Zhiyuan, Sun Peng

Dalian Ocean University, Dalian, Liaoning 116000

Abstract : To address the issue of difficult and inaccurate acquisition of fault characteristics in the open hydraulic steering gear system of ships, a coupled dynamic model of the hydraulic system and the steering gear control system was established based on the joint simulation method of AMESim and Simulink. AMESim was used to construct the hydraulic system model, while Simulink was employed to implement the modeling of the steering gear control system, thereby achieving the joint dynamic simulation of the hydraulic system and the control system. On this basis, fault injection simulations were conducted for three typical faults: internal leakage of the hydraulic pump, jamming of the relief valve, and internal leakage of the three-position four-way directional valve. The variation laws of system pressure, flow rate, and steering angle responses under different fault conditions were analyzed. The results show that leakage-type faults will cause a decrease in system pressure and a delay in the steering angle response, while jamming-type faults will lead to an increase in system pressure fluctuations. This can provide a theoretical basis for the research on fault diagnosis and health monitoring of ship hydraulic steering gears.

Keywords : open hydraulic steering gear of ships; AMESim; Simulink; fault analysis; hydraulic system

引言

船舶舵机作为船舶操纵系统中的关键执行机构, 其运行性能直接关系到船舶航向控制精度与航行安全。液压舵机系统通常由液压泵、液压阀、液压缸以及控制系统等部分组成, 具有典型的机液耦合非线性特性。在长期高压、频繁换向以及复杂海况条件下, 舵机系统容易出现液压泄漏、阀芯卡滞、压力波动及响应迟滞等故障问题, 严重时甚至会导致舵机失效, 影响船舶安全运行。因此, 对船舶液压舵机故障机理及动态响应特性开展研究具有重要工程意义^[1-3]。

张肖江等^[4]基于 BP 神经网络 PID 设计了水下无人航行器舵机驱动智能控制系统, 有效提升了舵机控制精度与动态响应性能。李婷等^[5]提出基于未建模动态估计与补偿的电液舵机自适应容错控制方法, 提高了系统在故障工况下的稳定性与鲁棒性。

随着液压系统仿真技术的发展, AMESim 因具备良好的液压系统动态建模能力, 在液压元件性能分析及故障仿真领域得到了广泛应用。黄德民等^[6]基于 AMESim 研究了液压缸抖动爬行影响因素, 分析了液压执行元件动态特性变化规律; 周密愉^[7]利用 AMESim 对轴

作者简介:

周子童 (2003-), 男, 硕士研究生, 主要从事船舶故障诊断。

张志远 (2000-), 男, 硕士研究生, 主要从事机电系统建模及故障诊断。

孙鹏 (1977-), 男, 副教授, 主要从事轮机故障诊断和渔船安全。

向柱塞泵压力脉动进行了研究，揭示了液压泵动态压力变化特征；吴学江等^[8]基于 AMESim 对闭式柱塞泵补油阀特性进行了分析，验证了 AMESim 在液压系统动态特性研究中的有效性。Li 等^[9]将 AMESim 与优化控制算法相结合，对液压测试系统流量控制进行了研究，提高了系统控制性能。Chen 等^[10]基于 AMESim 对某船舶升船机油缸工作回路泄漏故障进行了仿真分析，研究了泄漏故障状态下系统动态响应变化规律。

目前，针对船舶液压舵机系统的研究主要集中于故障检测、控制策略优化以及局部液压元件特性分析，而基于 AMESim 与 Simulink 联合仿真的船舶开式液压舵机典型故障动态响应研究相对较少。尤其对于液压泵内泄漏、溢流阀卡滞、换向阀内泄漏及油缸内泄漏等典型故障状态下系统压力、流量与舵角响应特性的定量分析仍有待进一步研究。

因此，本文基于 AMESim 与 Simulink 联合仿真平台建立船舶开式液压舵机机液联合模型，通过 AMESim 建立液压系统模型，利用 Simulink 构建控制系统，实现舵机系统联合动态仿真。在此基础上，对液压泵内泄漏、溢流阀卡滞、三位四通换向阀内泄漏、舵机油缸内泄漏以及复合故障等 3 种典型故障进行故障注入分析，研究不同故障状态下系统压力、流量及舵角响应变化规律，为船舶液压舵机故障诊断与状态监测提供理论参考。

一、船舶开式舵机结构与 AMESim 模型建立

（一）渔船舵机液压系统工作原理及原理图

船舶液压舵机是船舶操纵系统的重要执行机构，其主要作用是驱动舵叶偏转，实现船舶航向控制。开式液压舵机因结构简单、运行稳定及维护方便等特点，在中小型船舶液压操舵系统中得到广泛应用。本文研究对象为船舶开式液压舵机系统，其主要由液压泵、油箱、溢流阀、三位四通换向阀、液压油缸及负载机构等部分组成。

当系统接收到操舵指令时，液压泵向系统提供压力油，三位四通换向阀控制液压油流动方向，高压油进入液压油缸对应工作腔，推动活塞杆运动，从而带动舵叶偏转，实现船舶转向控制。当系统达到目标舵角后，换向阀回到中位，液压油缸停止运动，系统进入稳定状态。溢流阀用于限制系统最高压力，保证液压系统安全稳定运行。

（二）AMESim 模型建立

基于 AMESim 和 Matlab 软件建立船舶开式液压舵机联合仿真模型，主要包括液压泵模块、换向阀模块、液压油缸模块及负载模块等。其中，液压泵模块用于为系统提供稳定压力油；换向阀模块用于控制液压油流向；液压油缸模块用于模拟舵机执行机构运动；负载模块用于模拟实际舵叶负载。建立的船舶开式液压舵机 AMESim 整体模型如图 1 所示。

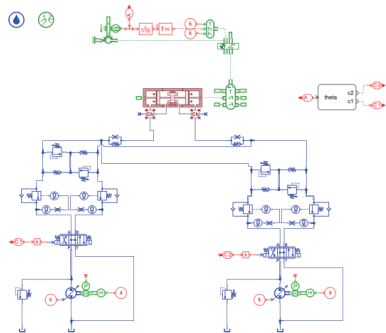


图 1 AMESim 整体模型

（三）Simulink 控制系统模型建立

为实现舵机控制过程动态仿真，本文采用 Simulink 建立舵机

控制系统模型。Simulink 主要用于实现舵角输入信号、控制器及反馈控制模块建模。控制系统通过输入目标舵角信号，对换向阀控制信号进行调节，从而实现液压缸运动控制。在控制过程中，系统通过舵角反馈信号实时调整控制输入，使实际舵角能够跟踪目标舵角，提高系统动态响应性能。建立的 Simulink 控制系统模型如图 2 所示。

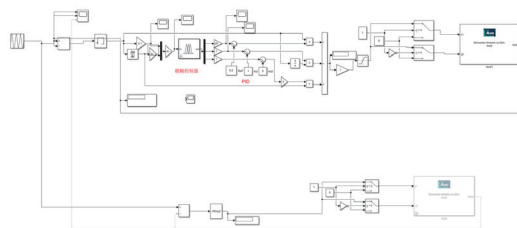


图 2 Simulink 控制系统模型

（四）模型参数设置与验证

表 1 模型主要参数设置

部件名称	参数	数值
液压泵	工作压力 /MPa	31.5
	排量 /(mL/r)	18.0
电机	转速 /(r/min)	1450.0
	调节压力 /MPa	16.4
溢流阀	质量 /kg	50.0
	活塞直径 /mm	125.0
液压油缸	杆直径 /mm	80.0

为验证所建立模型的正确性，对系统正常工况进行仿真分析。结果表明，系统压力能够稳定建立，舵角响应平稳，符合船舶开式液压舵机实际工作特性，说明所建立模型具有一定有效性。

二、典型故障建模与仿真分析

（一）故障注入方法

为研究不同故障对船舶开式液压舵机系统性能的影响，本文采用 AMESim 参数修改的方法进行故障注入仿真。通过改变液压元件内部泄漏系数、阀芯摩擦系数等参数，模拟不同故障状态下系统动态响应特性。三种故障注入方式为：液压泵内泄漏故障通过增大液压泵内部泄漏系数实现；溢流阀卡滞故障通过增大阀芯

摩擦阻尼实现；三位四通换向阀内泄漏故障通过增加阀芯间隙泄漏实现。

在故障仿真过程中，分别对系统压力、流量及舵角响应变化进行分析，以研究不同故障对船舶开式液压舵机动态性能的影响。

（二）液压泵内泄漏故障分析

故障机理：液压泵作为液压系统动力源，其内部泄漏会导致高压油液回流，从而降低系统供油压力与流量，影响舵机正常工作性能。

仿真结果对比：对液压泵内泄漏故障进行仿真后得到系统舵角，压力响应。

结果分析：由仿真结果可知，液压泵发生内泄漏后，系统压力明显下降，压力建立时间延长，稳态压力比正常低2~4MPa。，舵角响应速度减慢，系统存在一定迟滞现象，上升变慢，响应滞后，到达35°时间延长（如5~6s）。这是由于液压泵内部泄漏导致部分压力油损失，使系统供油能力下降。同时，由于部分液压油在泵内部泄漏，系统输出流量减小，导致液压缸驱动力下降。流量明显衰减，小于正常流量

故障特征总结：液压泵内泄漏故障主要表现为：系统压力下降；输出流量减小；舵角响应迟缓。

（三）溢流阀卡滞故障分析

故障机理：溢流阀主要用于稳定系统压力。当阀芯发生卡滞时，溢流阀无法及时完成开启或关闭动作，从而引起系统压力异常波动。

仿真结果对比：对溢流阀卡滞故障进行仿真后得到系统舵角，压力响应。

结果分析：由图可知，溢流阀发生卡滞时，系统压力波动明显增大，局部区域出现振荡现象，系统稳定性下降，无法达到额定压力，提前溢流。同时，由于系统压力调节能力下降，流量输出也存在一定波动，使液压缸运动不稳定，压力泄压时流量出现小幅波动。在舵角响应过程中，舵角变化存在抖动现象，系统达到稳定状态所需时间增加。这是由于溢流阀阀芯运动受阻，导致系统无法及时完成压力调节，从而引起系统动态性能下降

故障特征总结：溢流阀卡滞故障主要表现为：系统压力波动增大；输出流量不稳定；舵角响应存在振荡。

（四）三位四通换向阀内泄漏分析

故障机理：三位四通换向阀用于控制液压油流动方向。当阀芯发生内泄漏时，部分高压油液会通过阀芯间隙泄漏，导致系统控制能力下降。

仿真结果：对三位四通换向阀内泄漏故障进行仿真后得到系统舵角，压力响应。

结果分析：由仿真结果可知，换向阀发生内泄漏后，换向时刻出现压力跌落，保压时压力缓慢下降。由于液压缸有效驱动力降低，左右转舵速度不一致，舵角跟踪误差增大。因为阀内泄导致流量损耗，输出流量不稳定。此外，舵角稳定值与正常工况相比存在较大偏差，说明系统控制精度下降。这是由于换向阀内部泄漏导致部分液压油损失，使系统执行能力减弱。

故障特征总结：三位四通换向阀内泄漏故障主要表现为：系统出现压力跌落；流量输出不稳；舵角响应迟缓并存在偏差。

三、故障结果对比分析

液压泵内泄漏故障下，系统稳态压力下降约15%，流量减小约13%，舵角稳定时间由正常工况下的2.1s增加至2.9s。由于液压泵内部泄漏导致系统供油能力下降，系统在4.5s后出现轻微压力波动，但整体稳定性仍较好。

溢流阀卡滞故障对系统稳定性影响最为明显，系统压力波动标准差达到0.81 MPa，在2.3s时即出现明显振荡。这是由于阀芯卡滞使系统无法及时完成压力卸荷与调节，导致系统压力周期性振荡，同时流量波动明显增大，舵角响应出现抖动现象。

换向阀内泄漏故障下，系统压力与流量均出现小幅下降，但由于部分压力油经阀芯间隙泄漏，液压缸有效驱动力减弱，导致舵角响应迟滞，并在5.1s左右出现局部波动现象。

综合分析表明，泄漏类故障主要表现为系统压力下降、流量损失增加以及舵角响应迟滞；阀类卡滞故障主要表现为系统压力振荡与稳定性下降；复合故障则会进一步加剧系统动态性能退化，其故障特征较单一故障更加明显。

四、结语

本文基于AMESim建立了船舶开式液压舵机仿真模型，并对液压泵内泄漏、溢流阀卡滞、换向阀内泄漏、油缸内泄漏及复合故障等3种典型故障进行了仿真分析。研究结果表明，不同故障会对系统压力及舵角响应产生不同影响。其中，泄漏类故障主要导致系统压力下降与响应迟滞，卡滞类故障主要导致系统压力波动增大，而复合故障对系统动态性能影响最为明显。本文研究结果可为船舶液压舵机故障诊断与状态监测提供参考依据。

参考文献

- [1] 杨瑞峰, 王伟丽, 郭晨霞, 等. 舵机异常检测模型的设计与研究[J]. 电子测量技术, 2022, 45(04): 1-6. DOI: 10.19651/j.cnki.emt.2208772.
- [2] 王娜, 李杨, 彭巍. 基于多角度特征提取的舵机故障诊断方法[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2022, 43(09): 1240-1249.
- [3] 王文新, 刘上, 张国庆, 等. 考虑舵机故障的船舶鲁棒自适应航向保持控制[J]. 中国舰船研究, 2023, 18(01): 116-123. DOI: 10.19693/j.issn.1673-3185.02525.
- [4] 张肖江, 周春桂, 王志军, 等. 基于BP神经网络PID的水下无人航行器舵机驱动智能控制系统[J]. 探测与控制学报, 2023, 45(02): 109-114.
- [5] 李婷, 姚叶明, 张临海, 等. 基于多种未建模型估计与补偿的电液舵机自适应容错控制[J]. 西北工业大学报, 2023, 41(01): 18-27.
- [6] 黄德民, 秦立果, 曾朝晖, 等. 基于AMESim的液压缸抖动爬行影响因素分析[J]. 液压气动与密封, 2025, 45(03): 105-111.
- [7] 周密愉. 基于AMESim的轴向柱塞泵压力脉动研究[J]. 液压气动与密封, 2025, 45(03): 112-118.
- [8] 吴学江, 曹捷, 史进武, 等. 基于AMESim的闭式柱塞泵补油阀特性分析[J]. 液压气动与密封, 2024, 44(10): 73-78.
- [9] Li Q, Bai X, Lu Y, et al. Flow control of tractor multi-channel hydraulic tester based on AMESim and PSO-optimized fuzzy-PID[J]. Agriculture, 2025, 15(11): 1190.
- [10] Chen L, Xiang H, Li D, et al. Simulation of leakage fault in the working circuit of the transverse guide oil cylinder of a certain ship lift based on AMESim[C]//2025 2nd International Conference on Intelligent Ships and Electromechanical System (ICISES). IEEE, 2025: 101-106.

隧道防水板挂布台车机器人设计及应用

程波², 乌伟², 贾家银¹, 刘绿友¹, 邓传伟¹, 谢辉³, 何国田^{2,3}, 赵炜^{3*}

1. 重庆巨能建设集团有限公司, 重庆 400700

2. 西京学院, 陕西 西安 710123

3. 重庆鲁班机器人技术研究所有限公司, 重庆 400700

DOI:10.61369/ME.2026070027

摘 要 : 针对隧道防水板人工铺挂劳动强度大、安全风险高、质量不稳定等问题, 研发集行走、放卷、铺挂与压贴于一体的挂布台车机器人。该设备采用门型框架与弧形轨道结构, 配置液压驱动与遥控系统, 通过机械臂沿隧道断面环向运动实现机械化铺挂。应用表明, 作业人员由6至8人减至2至3人, 效率提升约40%, 密封度与合格率显著提高, 为隧道防水施工机械化提供支撑。

关 键 词 : 隧道工程; 防水板; 挂布台车; 机器人; 机械化施工

Design and Application of Tunnel Waterproof Board Hanging Cloth Trolley Robot

Cheng Bo², Wu Wei², Jia Jiayin¹, Liu Lvyu¹, Deng Chuanwei¹, Xie Hui³, He Guotian^{2,3}, Zhao Wei^{3*}

1. Chongqing Juneng Construction Group Co., Ltd., Chongqing 400700

2. Xijing University, Xi'an, Shaanxi 710123

3. Chongqing Luban Robot Technology Research Institute Co., Ltd., Chongqing 400700

Abstract : In response to the problems of high labor intensity, high safety risks, and unstable quality in manual laying and hanging of tunnel waterproof boards, a hanging trolley robot integrating walking, unwinding, laying, and pressing has been developed. The equipment adopts a portal frame and curved track structure, equipped with hydraulic drive and remote control system, and achieves mechanized laying and hanging through the circular movement of the mechanical arm along the tunnel section. The application shows that the number of operators has been reduced from 6 to 8 to 2 to 3, with an efficiency increase of about 40%. The density and qualification rate have been significantly improved, providing support for the mechanization of tunnel waterproofing construction.

Keywords : tunnel engineering; waterproof board; hanging cloth trolley; robot; mechanized construction

前言

隧道防水工程是衬砌耐久性与运营安全的关键保障, 防水板铺挂质量直接决定渗漏水控制效果。长期以来, 国内隧道防水板铺设多依赖人工登高作业, 人员在简易台架上手持卷材沿拱部展开并热熔垫圈固定, 作业面狭窄、高空坠落风险突出, 受操作水平影响, 张紧不均、搭接偏差过大等通病难以根除。随着建设规模扩大, 工期压缩与品质工程标准提升对铺挂效率和质量提出更高要求, 传统人工作业已难以适应现代化施工需要。研发自主行走与自动铺挂的挂布台车机器人, 对降低安全风险、提高质量、推进机械化转型具有重要价值。

一、隧道防水板挂布台车机器人现实需求分析

(一) 传统人工铺挂工艺的安全与质量困境

隧道防水板铺挂处于初期支护与二次衬砌间狭小弧形环向空间, 作业面随掘进持续前移, 传统人工铺挂工艺存在诸多短板^[1]。作业组织上, 单循环需6-8人配合作业, 人员分散于不同作业平台, 协调难度大, 交叉作业风险高^[2]。简易拼装台架稳定性差,

通讯作者: 赵炜。

加之隧道作业环境恶劣, 高空坠落隐患突出。质量方面, 人工把控张紧度易造成卷材变薄或脱空, 焊缝、固定点施工偏差隐患隐蔽, 浇筑后难以检测修复, 是隧道渗漏水重要诱因。

(二) 隧道施工机械化转型的政策与市场驱动

近年来国内建筑行业劳动力结构发生深刻变化, 愿意从事隧道高空高危作业的技术工人数量逐年减少, 人工成本持续上升, 施工企业普遍面临用工短缺与成本压力的双重挑战。与此同时,

国家交通运输部与国家铁路集团相继出台隧道施工机械化、智能化发展指导意见,明确提出要在隧道衬砌防水环节推广自动化铺挂设备,减少高危岗位人工投入,提升防水层施工质量稳定性。在品质工程创建活动推动下,各建设单位对防水板铺设的密贴度、搭接宽度、固定点间距等指标提出了量化验收标准,人工操作的离散性难以满足精细化质量管控要求。从施工生产效率来看,人工铺挂单循环作业时间通常为3至4小时,且受人员体力持续衰减影响,后半程作业速度明显下降、质量波动增大,在长大隧道快速施工组织中往往成为制约衬砌循环进度的关键瓶颈^[3]。此外,现有简易台架多为单个项目定制加工,转场适应性差,设备周转率低,造成材料与人工的重复投入^[4]。综合施工安全保障、工程质量控制、生产效率提升与行业技术发展趋势等多方面因素,传统人工铺挂工艺已无法满足现代隧道工程建设的高标准要求,研发和应用集机械行走、自动放卷、环向铺挂与压贴固定于一体的防水板挂布台车机器人,成为隧道防水施工技术升级的必然选择和迫切需求。

二、隧道防水板挂布台车机器人的设计

(一) 整机结构与行走系统设计

防水板挂布台车机器人采用门型框架主体结构,门架由两根立柱与顶部横梁焊接而成,立柱采用H型钢截面以保证抗弯刚度,门架主材单线隧道采用200×200H型钢,双线隧道采用350×350H型钢或以上规格,以满足不同跨度下的强度与刚度要求,横梁根据隧道净空尺寸设计为可伸缩形式以适应不同断面宽度。门架底部设置行走系统,提供轨行式与轮胎式两种方案:轨行式方案配置4对钢轮,其中2对为主动轮由行走电机驱动,运行速度约6.7米每分钟,牵引力可达39千牛,适用于已铺设轨道的标准化隧道施工;轮胎式方案采用液压马达驱动橡胶轮胎,无需预设轨道,转场灵活性更高,适用于多工作面交替作业的隧道项目。门架纵向长度根据防水板单幅宽度设计为6至10米,确保一次铺挂循环覆盖标准卷材幅宽。门架两侧设置弧形轨道,轨道沿隧道断面轮廓布置,距初期支护面预留约300毫米操作间隙,为铺挂机械臂提供环向运动导向。整机配置4个液压支腿,施工状态下支腿伸出撑紧地面以提高整机稳定性,行走状态下支腿收回。门架中部预留不小于3米宽、4.2米高的通行净空,满足隧道内出渣车辆与混凝土罐车的通行需求,实现铺挂作业与洞内运输的并行组织。整机实物如图1所示。



图1 防水板挂布台车机器人整机结构

(二) 环向铺挂机械臂与放卷机构设计

环向铺挂机械臂是实现防水板自动铺挂的核心执行机构,由基座、大臂、小臂与末端铺挂头组成,整体安装于门架顶部的弧形轨道滑车上。大臂与小臂均采用液压油缸驱动的铰接式结构,大臂回转角度覆盖0至180度,小臂伸缩行程为1300毫米,可适应不同隧道半径的拱部轮廓。末端铺挂头集成放卷芯轴、压辊与热熔焊接辅助装置,放卷芯轴用于安装防水板卷材,芯轴配备张力制动器以控制卷材释放速度,防止铺挂过程中卷材松弛下垂;压辊采用圆柱形橡胶辊,在弹簧力作用下将防水板压贴于初期支护面,针对初支表面凹凸不平的工况,部分机型设置圆柱形气囊压紧装置,通过充气气囊使防水板服贴于不规则工作面,适应不同地质条件下的支护表面状态^[5]。铺挂机械臂沿弧形轨道由一侧拱脚经拱顶运动至另一侧拱脚,运动过程中放卷机构同步释放防水板,压辊将卷材连续压贴于岩壁,施工人员跟随机械臂以气动铆钉枪将热熔垫圈固定于初支面,完成单幅防水板的环向铺挂^[6]。机械臂末端配备距离传感器,实时检测铺挂头与岩壁的间距,通过闭环控制保持压贴力恒定,避免防水板局部过张拉或脱空,确保铺设质量的均匀性与稳定性。

(三) 液压驱动与遥控控制系统设计

液压系统为台车机器人的行走、支腿、机械臂运动与铺挂压贴提供动力,主泵站采用5.5千瓦液压电机驱动,系统额定工作压力为16兆帕,配置多路换向阀分别控制各执行元件动作。升降油缸工作行程为600毫米,运行速度不超过10毫米每秒,用于门架整体高度微调;伸缩平台油缸工作行程为1700毫米,运行速度不超过30毫米每秒,用于作业平台的侧向伸展。液压系统设置过载保护与液压锁回路,在管路破裂或泵站停机时可锁定执行元件位置,防止机械臂意外下落造成安全事故。控制系统采用可编程逻辑控制器为主控单元,配置无线遥控手柄,操作人员可在地面安全区域遥控台车行走、机械臂环向运动与铺挂作业,无需登高操作^[7]。遥控系统设置急停按钮、过载限位与限载保护功能,当机械臂运动至极限位置或负载超过额定值时自动停机并发出声光报警^[8]。部分智能化机型搭载工业相机与机器视觉模块,采集隧道内防水板铺挂区域图像,经透视变换获取正射视角作业图像,通过高斯模糊、对比度增强与亮度归一化等预处理后,基于局部信息熵构建方向性熵梯度场识别铺挂路径边界,实现铺挂轨迹的自动规划与偏差修正,进一步提升铺挂精度与自动化水平,减少人工干预环节。

(四) 机器人打钉系统设计与打钉算法

机器人打钉系统由1号、2号机械臂及气动打钉枪组成,机械臂安装于台车弧形轨道,可沿隧道断面环向运动并旋转180°切换作业方向。打钉算法采用双臂协同分区模式:1号臂从弧面左下角起始,2号臂从同一水平线中间起始,两臂沿横向同步推进,横向间距与纵向间距可根据设计要求参数化设定,逐行完成整个弧面打钉。顺时针区段完成后人工切断布料,台车前移7米,伸缩臂逆时针铺布,机械臂旋转180°从右下角起始重复上述流程。若伸缩臂装载两种材料,1号臂专司打钉、2号臂专司热铆,台车每次前移3.5米即可连续作业。机械臂打钉-热铆运动示意图见图2。



图2机械臂打钉-热铆运动示意图

(五) 机器人热融焊接系统及工艺

机器人热融焊接系统由机械臂末端热铆焊枪、CCD 视觉定位模块及控制软件组成。热铆工艺采用视觉引导定位：台车后退7米与挂布端重合，人工挂设首段防水板后，1号机械臂 CCD 相机对钉位拍照，软件根据图像信息解算机械臂作业坐标，指令焊枪从左下角起始热铆，2号臂从同一水平线中间起始，两臂沿弧面环向同步推进，逐行完成整幅热铆。顺时针区段完成后人工切断，台车前移7米，伸缩臂逆时针铺板，机械臂旋转180°从右下角起始，重复热铆循环。双材料工艺下2号臂专司热铆，与1号臂打钉同步作业，台车每次前移3.5米，实现打钉与热铆并行施工。

三、隧道防水板挂布台车机器人的应用

(一) 工程应用

在某隧道施工中，FSB-6.7型防水板机械化铺挂台车完成安装调试并投入使用，该设备设有无线遥控装置，具备过载限位与限载安全保护功能，配置扭力弹簧和伸缩摆臂扶贴装置，使防水板自动密贴于隧道壁面，便于后续焊接施工开展。在某高速公路№5标隧道施工中，液压自行式挂布台车替代传统需装载机牵引的笨重台架，通过行走电机实现自行移动，移动过程中左右侧同步，施工时台车可进行液压锁定，人员与设备安全得到有效保障；作业时通过手柄控制液压油缸伸缩调节台车高度，将土工布及防水板顶伸至离工作面较近处再进行固定，显著降低了作业人员劳动强度。在某隧道建设中，防水板自动铺挂台车的投入使用不仅减少了施工人员数量，有效降低了施工人员受伤风险，还可对隧道建设的精度与质量进行实时监控和调整。此外，某隧道应用的多功能钢筋防水板台车将防水板铺挂与衬砌钢筋布设两道工序深度融合，机械臂可自由旋转伸缩适应不同隧道断面，仅需5人即可完成以往需8至10人的作业量，设备可重复利用于多个隧道项目，减少了资源浪费。智能二衬钢筋防水板一体化台车也在某公司完成试机，以集成化、智能化、标准化为核心定位，打破传

统施工工序壁垒，实现钢筋定位绑扎与防水板铺设同步作业。

(二) 应用效能与技术经济分析

从实际应用效果来看，防水板挂布台车机器人在施工安全、工程质量与生产效率三个维度均表现出显著优势。安全方面，作业人员无需攀爬至拱部高空作业面，主要在地面或低矮平台进行遥控操作与辅助固定，高空坠落风险大幅降低，台车液压锁定与支腿支撑结构也消除了传统台架倾覆的隐患，作业环境本质安全水平得到提升^[9]。质量方面，机械臂沿弧形轨道匀速环向运动，放卷张力与压贴力由液压系统恒定控制，防水板张紧度均匀一致，与初支面密贴度明显提高，搭接宽度偏差可控制在5毫米以内，热熔垫圈固定点间距均匀可控，焊接合格率由人工铺挂的约85%提升至95%以上，有效减少了后期渗漏水缺陷。效率方面，单循环铺挂作业时间由人工的3至4小时缩短至1.5至2小时，作业人员由6至8人减少至2至3人，综合施工效率提升约40%，在长大隧道快速施工中有效缓解了衬砌循环进度瓶颈。经济性方面，虽然台车设备一次性购置成本较高，但可周转使用于多个隧道项目，按设备全寿命周期摊销，结合人工成本节约与后期渗漏水缺陷修复费用降低，综合施工成本可降低约15%至20%^[10]。在环境效益方面，机械化铺挂减少了因质量缺陷导致的后期注浆堵漏材料消耗，降低了隧道全寿命周期的维护投入。该设备的推广应用为隧道防水施工从劳动密集型向技术密集型转变提供了成熟的装备方案，对推动隧道智能建造发展具有积极意义。

结语：防水板挂布台车机器人针对人工铺挂安全风险高、质量稳定性差、生产效率低等问题，通过门型框架、环向铺挂机械臂、液压驱动与无线遥控的集成设计，实现了铺挂作业的机械化与半自动化。工程实践表明，该设备有效减少了高空作业人员，降低了安全事故发生率，提高了防水板密贴度与搭接质量，缩短了单循环作业时间，具有良好的技术经济效益与推广价值。未来随着机器视觉与智能焊接技术融合，该设备将向全自动化方向发展，为隧道智能建造提供装备支撑。

参考文献

- [1] 薛彩云. 四川仿生四足机器人穿梭隧道工地 [N]. 中国交通报, 2026-06-25(005).
- [2] 蔡为益, 李晓升, 戴筱流, 袁晓洪. 新质生产力下智慧监理实践: 隧道量测机器人实证研究 [J]. 建设监理, 2026, (6): 152-156.
- [3] 陈尧, 李莹, 张磊, 靳彦彪, 唐汉琦. 隧道环境下基于 RFID 定位的智能巡检机器人路径规划研究 [J]. 公路, 2026, 71(6): 322-329.
- [4] 夏子贤. 隧道电缆缺陷巡检机器人设计与实现 [D]. 安徽理工大学, 2026.
- [5] 李建琪. 基于多传感器融合的隧道巡检机器人定位方法 [J]. 自动化应用, 2026, 67(10): 118-121.
- [6] 刘云锴, 赵隼, 张志鹏, 邵学君. 隧道开挖面安全智能监测预警机器人研发与应用 [J]. 中国铁路, 2026, (4): 60-67.
- [7] 刘继文. 轨道式智能机器人在薛公岭隧道安全监控中的应用 [J]. 交通世界, 2026, (10): 13-15.
- [8] 杨志勇, 李丹雄, 张旭波, 万里, 龙海舟, 张君杰, 蔡艺远, 宋均平, 吴桐. 高速公路隧道巡检机器人应用与管理 [J]. 交通企业管理, 2026, 41(2): 72-75.
- [9] 赵祥峰. 面向高风险封闭空间的隧道消防机器人喷头结构优化设计 [J]. 机械管理开发, 2026, 41(2): 191-193.
- [10] 唐建宏, 康海波. 自行式自动卷铺防水板挂布台车在隧道施工中的运用 [J]. 建筑技术开发, 2018, 45(2): 55-57.

卫星导航抗干扰自动化测试系统设计与实现

郑楷

成都天奥信息科技有限公司, 四川 成都 610000

DOI:10.61369/ME.2026070031

摘 要 : 针对卫星导航抗干扰设备传统人工测试标准化差、多空域干扰场景难以复现、动态性能检测效率低等问题,设计一套集射频激励、空域辐射、姿态模拟、自动化测控于一体的室外抗干扰自动测试系统。系统采用以太网 + 串口混合总线架构,集成多通道射频信号源、大功率射频功放、宽频圆极化发射阵列、精密电动转台与长行程动态滑轨硬件平台;配套四层分层式自动化测控软件,支持可视化测试用例编辑、多方位干扰自动遍历、定位测速指标实时解算、测试数据归档与定制报表输出。完整完成系统总体架构、硬件选型、室外机械工装、软件架构、环境适应性与可靠性工程设计。联调试验结果表明,系统故障检测率 $\geq 92\%$,完整测试时长由人工 4h 缩短至 40min,测试复现误差低于 3%,可满足导航抗干扰装备研发、出厂检验、故障复现全场景标准化测试需求。

关 键 词 : 卫星导航; 抗干扰测试; 自动测试系统; 电动转台; 射频功放; 评估软件

Design and Implementation of Satellite Navigation Anti-interference Automatic Testing System

Zheng Kai

Chengdu Tian'ao Information Technology Co., Ltd. Chengdu, Sichuan 610000

Abstract : To address the issues of poor standardization in traditional manual testing of satellite navigation anti-interference equipment, the difficulty in reproducing multi-domain interference scenarios, and the low efficiency of dynamic performance detection, a set of outdoor anti-interference automatic testing system integrating RF excitation, spatial radiation, attitude simulation, and automatic measurement and control has been designed. The system adopts an Ethernet + serial port hybrid bus architecture, integrating multi-channel RF signal sources, high-power RF amplifiers, wide-band circularly polarized transmitting arrays, precise electric turntables, and long-stroke dynamic slide rails hardware platforms; it is equipped with a four-layer hierarchical automated measurement and control software, supporting visual test case editing, automatic traversal of multi-directional interference, real-time calculation of positioning and speed indicators, and archiving of test data and customized report output. The overall system architecture, hardware selection, outdoor mechanical fixtures, software architecture, environmental adaptability and reliability engineering design have been completed. The joint debugging test results show that the system's fault detection rate is $\geq 92\%$, the complete test duration is reduced from 4 hours by manual operation to 40 minutes, and the test reproducibility error is less than 3%, which can meet the standardized testing requirements for the development, factory inspection, and fault reproduction of navigation anti-interference equipment in all scenarios.

Keywords : satellite navigation; anti-interference test; automatic test system; electric turntable; radio frequency amplifier; evaluation software

引言

(一) 研究背景

卫星导航接收机抗干扰性能是装备核心考核指标。传统分立仪器人工测试模式存在明显短板:人工架设天线、手动调节被测件姿态,多方位、多角度干扰场景复现一致性差;缺少标准化高动态运动模拟工装,动态抗干扰指标无法量化;测试流程无统一管控,人工记录、精度解算、报告编制工作量大,测试周期冗长。

现有商用导航测试设备以室内暗室射频仿真设备为主,无法模拟室外开放式远场辐射、载体长距离连续运动场景;国内现有装置多

为单通道室内平台，户外防护不足、运动模拟能力缺失、软件开放性差，无法支撑批量复合干扰测试。本文研制室外 KGR-CS 型一体化抗干扰自动测试系统。

（二）国内外研究现状

国外 Keysight、Spirent 等厂商的导航仿真设备精度高，但局限于室内封闭环境，无法模拟室外空域辐射场景，设备成本高、扩展能力弱。国内现有相关测试装置多为单通道小型室内平台，存在室外环境防护不足、运动模拟能力缺失、软件开放性差等问题，无法支撑多维度复合干扰批量测试。

本文提出软硬件一体化集成方案，搭建室外硬件平台并配套全流程自动化软件，实现抗干扰标准化全自动检测。

（三）论文主要工作

- 1) 梳理系统功能、射频 / 运动 / 环境 / 可靠性全套技术需求，划分系统五大硬件模块；
- 2) 完成总线架构、楼顶场地布局、射频链路整体方案设计；
- 3) 完成仪器、工控、射频功放、运动工装全硬件选型与结构、线缆工艺设计；
- 4) 分层设计自动化测控软件，实现设备驱动、流程编辑、数据解析、报表全功能；
- 5) 完成可靠性、维修性、环境防护、验收方案设计，开展整机试验验证。

一、系统总体设计

（一）系统需求

- 1) 多通道干扰激励与空域辐射：6 路独立射频干扰信号，经功率放大后通过 8 组环形分布式天线实现全空域干扰覆盖；
- 2) 姿态与高动态模拟：电动转台实现被测件 360° 连续旋转，双 20m 滑轨模拟载体直线高速运动；
- 3) 全设备远程程控：工控机通过网口、串口统一管控信号源、频谱仪、电源、功放、转台、滑轨；
- 4) 自动化数据处理：实时解算定位、测速误差，自动标记不合格项，支持原始数据存储与回放；
- 5) 可定制测试流程：可视化拖拽编辑测试用例，自动遍历单 / 三 / 六 / 八方位干扰场景，一键生成标准化测试报告。

（二）设计原则

- 1) 通用性：软硬件预留扩展接口，仪器具备互换能力，兼容多型号导航抗干扰设备；
- 2) 稳定性：总线低延迟传输，电路多级保护，元器件降额设计，支持 72h 不间断连续测试；
- 3) 易用可扩展：软件图形化无代码编辑，模块化架构，支持用户二次开发；
- 4) 经济性：成熟商用仪器搭配定制机械工装，平衡研制成本与测试性能。

（三）系统整体组成

系统由仪器仪表、通用设备、定制机械工装、集成附件、自动测试软件 5 部分构成。室内机柜集成射频信号源、频谱仪、程控电源、工控机、交换机；室外测试区以转台为中心环形布置发射天线、配套 2 套独立滑轨。

工作流程：工控机运行测控软件下发指令控制信号源输出干扰信号；经功放放大由天线向空间辐射多方位干扰。被测导航设备接收混合信号后回传观测数据；软件实时计算定位 / 测速误差并与指标阈值对比。频谱仪实时监测射频链路功率、杂散、谐波，实现发

射链路故障预警，测试完成后自动生成 Word 格式检测报表。

（四）场地布局设计

系统分为室内调试间、楼顶露天测试区两部分。8 套发射天线呈 45° 环形布置，天线与被测件水平间距 4m，俯仰调节范围 - 10° ~ + 20° ；两套动态滑轨独立布设，用于高动态模拟，户外线缆统一敷设减速走线槽，完成防雨、防踩踏防护设计。

二、硬件系统详细设计

（一）射频仪器与通用控制硬件

- 1) 射频信号源：安捷伦 E4438C，工作频段 250kHz~3GHz；
- 2) 频谱分析仪：N9030A，实时监测空域射频信号，校验功放、天线输出功率与杂散指标；
- 3) 程控直流电源：DH1790-1，输出 0~36V/15A，适配被测设备 5V/10A、28V/5A 供电需求。
- 4) 工控机，配备双千兆网口、多路 RS232/422 复用串口混合总线通信。
- 5) 六通道功放，工作频段 1000~2500MHz，饱和输出功率 ≥ 50dBm，集成多重保护，杂散抑制 ≥ 65dBc。
- 6) HHS103 螺旋柱状天线，1~3GHz 宽频右旋圆极化，增益 6~8dBic，N 型防水射频接口。

（二）定制机械工装设计

- 1) 选用 Y200RA100 蜗轮蜗杆旋转台，额定承重 45kg，重复定位精度 0.005° ；配套 41 路集成电滑环，解决旋转过程射频、供电、通信线缆缠绕问题。
- 2) 天线配置 304 不锈钢立柱 + 蜗轮蜗杆角度滑台，俯仰调节 ± 20° 。
- 3) 轨道总长 22m，有效运动行程 20m，最大负载 15kg，最高运动速度 2m/s。铝合金型材，配套防雨防护罩，结构应力仿真验证安全裕度充足。
- 4) 37U 工业机柜尺寸，内置 8 口 PDU 电源排插；室外转

台、滑轨配套亚克力防雨罩。结构件采用阳极氧化、静电喷塑双重防腐，不同金属接触面电化电位差，满足防霉、防盐雾、耐日晒要求。

5) 射频线缆选用 YSF-500 低损耗同轴电缆，系统以 LAN 为主、串口为辅混合控制总线，预留扩展接口支持新增设备接入。

三、自动化测控软件设计

(一) 软件分层架构

软件采用四层松耦合分层架构，配套双人机交互界面适配两类使用场景：流程测试主界面、研发分析主界面。



图 1 自动测试软件测试主界面

1. 四层分层架构

- 1) 物理设备层：信号源、功放、转台、滑轨、接收机等全部硬件实体；
- 2) 设备驱动层：统一 VISA/TCP/ 串口驱动库，标准化读写接口，支持仪器型号快速替换；
- 3) 自动测试应用层：流程编辑、设备控制面板、自动执行引擎、异常告警核心业务逻辑；
- 4) 数据存储分析层：SQLite 数据库读写、定位测速解算、曲线绘图、自定义报表渲染。

2. 界面分区设计

- 1) 流程测试界面：顶部测试操作按钮栏、中部实时日志视图、底部状态进度栏，面向批量出厂测试人员，无复杂参数配置；
- 2) 分析测试界面：顶部菜单栏、快捷工具栏、中间多视图显示窗口、底部系统状态栏，支持单设备独立控制、测试流程自定义编辑，适配研发故障排查。

(二) 核心功能模块

自动测试软件整体功能模块如表 1 所示：

表 1 自动测试软件功能模块表

序号	项目		功能描述
1	测试流程	测试场景创建	从测试流程集选取子集，并配置参数
2		测试场景编辑（修改）	从测试流程集选取子集，并配置参数
3		测试场景序列	管理当前需要进行测试的场景列表，一次测试包含多个场景的测试流程，每个测试流程可重复执行 1~n 次。
4		执行测试	开始测试
5		暂停测试	暂停本次测试
6		停止测试	停止本次测试
7		中止测试	当某一场景测试失败或测试结果不符合预期时，软件能够判断并中止后续场景的测试
8		测试（子）流程开发	基于设备 / 仪器驱动，编写抗干扰测试中各个设备 / 仪器所需提供的功能（子流程），并约定各个功能的参数和参数配置界面。
9	设备控制	设备管理	在界面中根据配置文件加载设备清单，只提供设备基础通信方式 / 地址配置，设备增删通过配置文件维护。
10		仪器自检	将系统内包含的仪器自检指令维护进软件数据库，并从仪器回读自检信息显示在自动测试软件界面上。从而支持查询仪器自检信息。
11		电源管理	负责提供电源手动控制控件、程控参数设置、状态回读等交互界面。
12		转台控制	负责提供电动转台手动控制控件、程控参数设置、状态回读等交互界面。
13		干扰源控制	干扰源控制负责提供干扰源手动控制控件、程控参数设置、状态回读等交互界面；交互界面需要更具设备配置文件中干扰源数量和匹配功放端口加载。 备注：每台功放为双通道，故物理层面每两个干扰源（信号发生器）共用一台功放设备，每台干扰源独享一路信号放大通道。
14	数据回放	数据回放	对存储在本地的数据文件，能够进行数据回放。
15	报表输出	数据筛选	可以根据被测件型号、测试人员、测试时间要素等组合条件，从数据库中查询对应的测试数据。
16		检测报表	根据产品型号条件，检测系统中的报表配置文件和模板文件是否存在。
17		生成报表	将查询到的测试数据，按照报表配置文件的要求自动地填写到模板文件中，从而生成一系列对应的测试报表。
18		报表组合	根据产品型号，将多份不同测试过程的报表组合成一份完整的测试报表。

（三）软件运行环境

操作系统兼容 Windows7/10（32/64 位），底层依赖 VISA 仪器驱动，内置 SQLite 轻量化数据库服务，无需独立数据库服务，部署简单便捷。硬件交互依托以太网控制射频仪器、串口控制转台、滑轨与测试接收机。

四、可靠性、维修性与环境设计

严格遵循产品设计要求开展可靠性设计；元器件执行降额准则，大功率功放配备强制风冷；整机成熟期 MTBF $\geq 20000\text{h}$ ，硬件集成过流、过压、过温、短路多级保护电路。

（一）维修性设计

整机模块化分区布局，仪器、功放、工装独立可拆卸；标准化通用接口，关键设备支持直接互换；MTTR $\leq 0.5\text{h}$ ；配套完整计量标校规范，故障代码软件可视化显示，降低故障排查难度。

（二）环境适应性设计

室内设备工作区间 $0\sim 50^{\circ}\text{C}$ ，室外工装 $-10\sim 50^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度 $\leq 95\%$ 无凝露；全部紧固件防松加固，设备具备防震、防鼠咬、防虫蛀结构设计；出厂强制开展高低温、湿热、振动环境试验。

五、系统试验验证

选取某型北斗导航抗干扰接收机作为被测样机，开展多轮整机联调验证：

1）静态多方位干扰试验：系统自动循环切换 8 组天线干扰信号，转台 $0\sim 360^{\circ}$ 连续旋转，全程无人值守；定位精度测试标准差 $\leq 0.8\text{m}$ ，测试复现误差 $< 3\%$ ；

2）高动态滑轨试验：滑轨 $0\sim 2\text{m/s}$ 往复运动叠加多路干扰，软件自动记录动态测速误差，精准捕捉抗干扰失效节点；

3）长时可靠性试验：72h 不间断自动化循环测试，设备无通信中断、无宕机，故障检测率 92%，满足 $\geq 90\%$ 设计指标；

4）效率对比：传统人工完整测试耗时 4h，自动化系统仅需 40min，测试效率提升 6 倍，消除人工记录引入的随机误差。

试验结果表明，本系统可稳定模拟室外复合电磁干扰与载体高动态运动场景，自动化程度、测试一致性、环境防护能力均满足工程批量检测需求。

六、结论与展望

（一）结论

本文设计的卫星导航抗干扰自动测试系统，融合多通道射频激励、分布式空域辐射、精密姿态 / 高动态模拟、一体化自动化测控软硬件，解决传统人工测试场景难复现、效率低、数据标准化不足的问题。系统完成总体架构、硬件选型、室外机械工装、分层测控软件、可靠性全套工程设计，经整机联调验证，可全自动完成静态多方位、直线高动态复合干扰测试，适用于导航抗干扰装备研发试验、出厂检验、故障复现全流程场景。

参考文献

- [1] 谢钢. 全球导航卫星系统原理 [M]. 北京：电子工业出版社，2019.
- [2] 李磊，王军. 卫星导航接收机抗干扰自动测试平台设计 [J]. 电讯技术，2021, 61 (05): 612–618.
- [3] 张宇，刘成. 多通道射频干扰模拟测试系统开发 [J]. 计算机测量与控制，2023, 31 (02): 78–83.
- [4] 是德科技. E4438C ESG 系列信号发生器技术手册 [Z]. 2020.

面向多车型混线生产的汽车柔性装配系统设计与优化

葛晶

正德职业技术学院, 江苏 南京 211106

DOI:10.61369/ME.2026070033

摘 要 : 多车型共线装配的难点不在单站自动化水平,而在车型差异被逐级放大的环节。以燃油、混动与纯电车型同线生产为对象,梳理工时方差、物料品种膨胀与参数追溯不足三类冲突,提出车型族的划分准则与混产差异度指标,给出由执行层、控制层、决策层及车型身份数据主线构成的系统架构与设计要点;将优化问题表述为节拍约束下负荷均衡、投产切换损失与在制品三类目标的联合求解,并说明数字孪生的工时校准与序列预演职能。文中算例为虚拟数据。

关 键 词 : 混线生产; 柔性装配; 装配线平衡; 投产排序; 数字孪生

Design and Optimization of Automotive Flexible Assembly System for Multi Vehicle Hybrid Production

Ge Jing

Zhengde Vocational and Technical College, Nanjing, Jiangsu 211106

Abstract : The difficulty of multi vehicle co line assembly lies not in the level of single station automation, but in the step where the differences between vehicle models are gradually amplified. Taking the production of fuel, hybrid, and pure electric vehicles on the same line as the object, this paper sorts out three types of conflicts: variance of working hours, expansion of material varieties, and insufficient parameter traceability. It proposes the criteria for dividing vehicle families and the index of difference in mixed production, and provides the system architecture and design points composed of the execution layer, control layer, decision layer, and vehicle identity data main line; Expressing the optimization problem as a joint solution of load balancing, production switching loss, and work in progress objectives under beat constraints, and explaining the work hour calibration and sequence rehearsal functions of digital twins. The examples in the text are virtual data.

Keywords : mixed line production; flexible assembly; assembly line balance; production sorting; digital twin

引言

单一车型长周期量产的生产组织方式已难以维持。同一条总装线要同时承担燃油、混动与纯电车型,车身尺寸、底盘结构与装配内容差异显著,刚性线以停线换型应对,代价直接体现为节拍损失。柔性装配要解决的,是把车型差异收敛到可控范围。下文先梳理研究进展与本文定位,再展开冲突诊断、系统架构、关键设计、优化模型与实施边界。

一、相关研究进展与本文定位

已有研究沿三条路径展开。工艺规划一侧关注既有线体如何容纳更多车型:陈伯超等从精益组织、数字化仿真与设备共用性角度归纳多能源乘用车总装的规划要素,孙鑫给出内饰共线、底盘分线后自动合流的方案^[1]。此类研究多依赖经验,缺少可计算的混产适配性指标。

计划优化一侧以模型与算法为主:张炜等建立订单分解为主、投产排序为从的主从联合优化模型,论证联合建模优于分别优化;黄鹏等以平滑指数与产能为目标、缓存区数量为变量寻

优。两项工作均将设备、工装与信息系统视为给定,未讨论其耦合关系。

数字化一侧,黄涵钰等构建数据驱动的产线数字孪生系统,验证虚拟调试可行,其对象为通用离散制造产线,未针对总装混线细化校准对象;钟志良等从设计、工艺、物流、管理四个维度建立总装防错体系^[2]。总体看,方案类研究短于定量判据,模型类研究短于工程约束,框架类研究短于场景适配。本文将其衔接为一条设计链:以混产差异度作前置判据,以工艺、工装、物流与信息耦合为设计对象,以联合优化与孪生校准为落地。

作者简介:葛晶(1984.12-),男,汉族,江苏省南京市人,学历:本科,高级工程师,研究方向:智能制造。

二、混线生产的冲突与适配性评估

（一）三类冲突

车型差异在总装线上并非均匀分布。内饰段工位内容相近，变化集中于拧紧点位与卡扣位置；底盘合装段差异最大，燃油车装油箱与排气系统，纯电车型装电池包与高压线束，混动车型两者兼备；加注与检测项目随动力形式改变。

工时方差不均使节拍失去稳定性。节拍由耗时最长的车型决定，其余车型在该时段内等待，而耗时车型未必是产量主力，为其拉长的节拍须由全部车型共同承担；平衡若仅按平均工时排布，瓶颈将随车型切换转移。

物料品种数成倍放大。混线后线边零件按“车型 × 配置”矩阵展开，品种迅速膨胀，料架面积、拣配工作量与错装风险同步上升，复杂度由此转移至操作者一侧。

参数与追溯粒度同样不足。扭矩值、加注量与检测项目随车型变化，依靠纸质卡片或人工核对，换型频繁时出错概率上升；质量记录须落到具体车辆与工序，否则难以区分问题源于零部件、工艺还是装配动作。

（二）车型族的界定与混产差异度

混线排产的调度单元不宜取单个车型编码。定义车型族为动力形式、底盘主结构相同且各工位标准作业工时差异处于给定范围内的车型集合，划分依据依次为动力形式、底盘主结构与装配工时相似度。族内换型仅涉及配置差异，族间换型涉及工装与设备参数变更，两类代价的差异可在换型损失函数中体现，排序对象应为车型族。

判断一条线是否适合混产，可先算混产差异度。设工位集合 J、车型族集合 K，车型族 k 在工位 j 的单台作业时间为 t_{jk}，则

$$\Delta = \sum_j (\max_k t_{jk} - \min_k t_{jk}) \tag{1}$$

$$D = \Delta / (|J| \cdot \max_k t_{jk}) \tag{2}$$

D 越接近 0，工位内容对车型越不敏感；D 越大，所需柔性手段越多。工时变异系数 $CV_j = \sigma_j / \mu_j$ 显著偏高的工位应设为浮动工位。虚拟算例取四个工位与三个车型族，见表 1。

表 1 虚拟算例的工位—车型族作业时间（min）

车型族	工位1	工位2	工位3	工位4
A（燃油）	8	12	10	9
B（混动）	9	14	11	10
C（纯电）	7	10	9	13

由表 1 可得 $\Delta=12\text{ min}$ ， $D=12/(4\times14) \approx 0.21$ 。加权平均负荷均未超过节拍 12 min，但工位 2 在车型族 B 上的负荷达 14 min，超出节拍约 16.7%。仅以平均负荷为约束不足以描述混线可行性，须允许一定比例超载并由浮动工位吸收， $\beta=(\max t_{jk}-C)/C$ 即为浮动工位的设计依据。

三、柔性装配系统的总体架构

（一）三层结构与数据主线

系统在纵向上分为三层：执行层含输送系统、工位设备与线边料架；控制层负责安全回路、控制器逻辑与车型识别；决策层

承担排产、排序、缓存策略与异常应对。横向为车型身份数据主线：车型信息在焊装下线时写入载码体，各工位读取一次，设备参数调用、作业指导显示与质量记录归集均以该标识为键。主线缺失，通用工装与多能工位便无处附着，陈伯超等^[1]亦将其列为共线生产的先决条件。

（二）识别方式与业务逻辑分界

识别方式宜按层级区分：承载滑板与托盘循环使用且处于油污、振动环境，适合可读写射频载码体；零件与总成一级可采用二维码，成本更低，但要求贴附面可见、取像角度留有余量。控制层不宜承载业务逻辑：车型与参数的对照关系写入控制器，修改一次即需停线重新下载，置于制造执行系统一侧则仅影响数据层。

（三）布局形态与安全策略

直线型布置便于统一节拍，但两支路难以互借产能；环形或闭合布置便于设置旁路与返修工位，代价是输送投资与占地上升。差异集中于底盘段时直线加短支路即可，散布于多个环节时闭合布置才值得投入。安全策略须随车型切换：各车型在同工位触发的位置与动作不同，安全区域应按车型调用配置。

四、关键设计

（一）共性工序共线、差异工序分流再合流

装配内容相近的内饰等工序保持共线，底盘段按动力形式分流后再合流。设计重点是分流段数量、位置与合流顺序：分流前进入两支路的车辆构成已定，合流须按原序列恢复，要求两支路通过时间差可控；顺序一旦打乱，后续按车排序的物料与参数调用全部失效^[3]。可行做法是在合流点前设序列校验与缓存，把偏差吸收在局部。

（二）载体与工装通用化的边界

输送载体采用通用底架，依靠车型适配块、可调定位销与快换结构换型，换型动作尽量移至工位之外。适配块逐层叠加会累积定位误差，传导至合装环节表现为间隙与面差波动；兼容多车型需在同一工位备置数套适配件，存放与状态管理不到位时，换型反而慢于专用工装。

（三）缓存配置与线边配送

关键位置的缓存数量既决定抗扰动能力，也决定占地面积：不足则波动直接传导为停线，过量则推高在制品并扩大异常追溯范围。黄鹏等以平滑指数与产能为目标寻优缓存区数量，思路可移植至总装混线，但模型须补充换型停机与缺料等待事件，否则结果偏于乐观^[4]。线边库按车型族分区，按车配置的零件前移至物流环节拣选、以随行料架送至工位，使工位只承担装配而不进行选择，这是抑制错装最直接的手段。

（四）工位侧防错与参数随车

参数随车下发后仍需物理确认。加注环节以机械防错最可靠，不同介质配置不同接口，插错在物理上不可能发生；拧紧环节将程序号与车型绑定，同一位置不允许多套程序同时开放，可省去大部分人工确认。钟志良等的四维度防错体系中，结构防错、扫码防错与智能化拧紧与本节最为相关。下线检测项目按车

型调用，其节拍须纳入整线核算，否则装配完成后将堵塞于检测出口。

（五）换型损失的内外分解

需停机方能完成的属内部换型，可在停机前完成的属外部换型；工装准备、料架更换与程序校验应尽可能前置至线外，可外置的动作越多，停机时间越短。该思路对新增车型导入同样适用：首台车试装若与量产车错峰安排，后续换型代价仅剩工装切换本身。

五、多目标优化模型与求解

（一）目标函数与约束条件

以车型族为调度单元，设 n 个车型族与 m 个工位。车型族 k 的需求量为 d_k ，任务 i 在车型族 k 下的作业时间为 t_{ik} ； x_{ij} 为 0-1 变量，表示任务 i 是否分配至工位 j ； s_p 表示投产序列第 p 位的车型族。工位 j 的加权负荷见式 (3)。

$$L_j = \sum_k (d_k / \sum_k d_k) \cdot \sum_i t_{ik} \cdot x_{ij} \quad (3)$$

目标取三项：工位负荷平滑指数、切换损失与线边在制品量，前两项见式 (4)、式 (5)， τ 为换型时间，族内小、族间大。

$$SI = [(1/m) \sum_j (L_j - \bar{L})^2]^{1/2} \quad (4)$$

$$T_{\text{setup}} = \sum_p \tau (s_p - 1, s_p) \quad (5)$$

综合目标为 $\min F = w_1 \cdot SI + w_2 \cdot T_{\text{setup}} + w_3 \cdot WIP$ ， WIP 为线边在制品量。约束条件为： $\sum_j x_{ij} = 1$ （任务唯一分配）； $L_j \leq C$ （加权平均负荷不超过节拍）； $\sum_i t_{ik} \cdot x_{ij} \leq (1 + \beta) C$ （峰值负荷在浮动工位吸收范围内）； $\sum_p 1(s_p = k) = d_k$ （各车型族出现次数等于需求量）； $\sum_j (j \leq l) x_{ij} \geq \sum_j (j \leq l) x_{i'j}$ （ i' 为 i 的紧前任务）。

（二）求解思路与目标权衡

混线平衡与投产排序相互耦合，分别优化易落入局部最优。合理路径是将任务分配与投产序列纳入同一模型，以启发式规则或遗传类算法求取折中解集，再结合订单结构选点，张炜等的主从联合优化即为一例^[6]。作业时间以固定值替代分布，随机波动终将以停线等待返还，模型精度的影响大于算法选择。三项目标存在替代关系：追求负荷均衡会压缩序列的排列自由度，平滑指数下降通常伴随切换次数上升；缓存加大可吸收波动，代价是在制品与面积增加。求解结果为一组帕累托解，权重按订单结构与瓶颈位置确定。

（三）数字孪生驱动的闭环校准

数字孪生在本框架中承担两项职能。一是工时分布校准：虚拟验证可把逻辑错误拦截在现场调机之前，上线后按车型族采集各工位实际节拍与超载持续时间，更新 t_{ik} 的均值与方差，据此重算 L_j 、 SI 与浮动工位设置。二是投产序列预演：在孪生环境中对候选序列做对比试验，比较超载时间、缓存占用与切换次数。所涉数据项包括工位节拍与超载时长、停线与故障码、缓存区在制品数量、物料到位时刻及拧紧与加注参数。采集口径不统一或关键工位数据缺失，孪生模型将退化为三维演示。

六、柔性化的边界与实施策略

（一）工装通用化的取舍

通用化以换型便利换取定位精度与作业效率。精度敏感段应保留专用定位，通用程度宜按工位逐段判定，判断是所引入误差是否仍在公差与节拍余量之内。

（二）换型损失与订单约束

换型时间无法压缩至零，在单次换型上持续投入的边际收益有限。更有效的方式是对订单结构做聚类，将配置相近的车型成批安排，以排序消化换型损失。上层订单承诺方式直接传导为线体的切换频次，按小批量交错下单时，排序算法只能部分弥补。

（三）信息与物料系统成本

柔性带来的复杂度最终转入物料与信息系统。线边品种与随车参数越多，数据治理与系统集成投入越大；该部分投入不足，前端节约的投资将以错装、返修与停线返还。

（四）人员能力约束

工位内容随车型变化，需培养跨车型作业的多能工，作业指导按车型族编制更便于掌握。人员技能结构跟不上，设备柔性再高也无法转化为产出。

（五）分阶段实施策略

柔性改造常与量产交付并行，整线一次性停线改造风险很高。较稳妥的路径是先在一个车型族上验证数据链与工装方案，跑通后向其他族推广，改造窗口分散至非生产时段。

七、结语

多车型混线装配的柔性来自工艺分流、通用工装、缓存与配送、数据主线几项要素的配合，单项拔高均不成立。设计顺序宜从车型身份数据主线入手，再定工艺布局与工装方案，之后以联合优化定任务分配与投产序列，并以孪生环境校准工时分布与缓存配置。

本文属系统框架层面的研究，模型为工程简化形式，未纳入人员疲劳累积、订单动态扰动与设备突发故障的影响；算例为虚拟数据，仅用于说明指标计算过程，实际应用需代入实测工时；方法适用于新建线规划与既有线改造，对节拍余量与工位空间均已受限的老线，调整余地有限。后续可在人员波动下的平衡仿真、订单动态扰动下的在线重排序、老线柔性改造成本量化评估三个方向继续展开。

参考文献

- [1] 陈伯超，黄秤金，谢成冬，等. 多能源乘用车总装工艺规划分析 [J]. 汽车工艺与材料，2024(7): 23-27.
- [2] 钟志良，宋卫涛，张瑞军. 汽车总装防错体系研究 [J]. 汽车工艺与材料，2024(7): 28-33.
- [3] 孙鑫. 柔性混流装配线在智能工厂中的研究与应用 [J]. 时代汽车，2024(13): 19-21.
- [4] 黄鹏，唐火红，何其昌，等. 混流汽车装配线缓存区配置优化 [J]. 合肥工业大学学报（自然科学版），2017，40(9): 1168-1171, 1268.
- [5] 张炜，王少杰，甘雅文，等. 面向柔性定制的并行不等效客混装线生产计划主从联合优化 [J]. 机械工程学报，2020，56(22): 24-37.

汽轮机轴封漏汽问题分析与优化改造研究

郑旋

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/ME.2026070037

摘 要： 轴封系统是汽轮机的重要组成结构，承担着阻隔高压蒸汽外泄与外部空气内渗的功能，其运行状态直接影响机组的热效率与安全稳定性。轴封漏汽是火电机组汽轮机运行过程中的典型高频缺陷，长期漏汽会导致机组热耗升高、发电效率下降，还会引发轴系受潮、润滑油品质劣化、设备腐蚀、振动异常等问题，严重威胁机组的长期稳定运行。本文结合汽轮机轴封系统的结构与运行原理，对轴封漏汽的各类诱发因素开展系统分析，梳理轴封漏汽造成的运行危害，总结当前汽轮机轴封结构与运维模式存在的不足，提出针对性的优化改造方案与运维管控措施，可有效解决轴封漏汽问题，提升机组运行的经济性与安全性。

关 键 词： 汽轮机；轴封系统；漏汽故障；优化改造

Analysis and Optimization Transformation Research on Steam Leakage from Steam Seal of Turbine

Zheng Xuan

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

Abstract： The steam seal system is an important component of a turbine, responsible for preventing the leakage of high-pressure steam and the infiltration of external air. Its operating condition directly affects the thermal efficiency and safety stability of the unit. Steam leakage from the steam seal is a typical high-frequency defect in the operation of thermal power units' turbine engines. Long-term leakage will lead to an increase in thermal consumption of the unit, a decrease in power generation efficiency, and also cause problems such as moisture in the shaft system, deterioration of lubricating oil quality, equipment corrosion, and abnormal vibration. It seriously threatens the long-term stable operation of the unit. This paper, based on the structure and operating principle of the steam seal system of the turbine, conducts a systematic analysis of various inducing factors of steam leakage from the steam seal, summarizes the operational hazards caused by steam leakage, summarizes the current deficiencies in the structure and operation mode of the steam seal of the turbine, and proposes targeted optimization and transformation schemes and operation control measures, which can effectively solve the problem of steam leakage from the steam seal and improve the economic and safety performance of the unit.

Keywords： turbine; steam seal system; steam leakage fault; optimization transformation

引言

新型电力系统建设背景下，火电机组逐渐担负起调峰调频的任务，机组的启停次数明显增多，变负荷运行工况也越来越多，汽轮机各个辅机及密封系统的运行压力不断增大。轴封系统是汽轮机缸体和转子之间密封的装置，依靠密封间隙和蒸汽压力平衡来达到密封的效果，是保证汽轮机密闭运行的重要设备。长期运行过程中由于结构磨损、工况波动、运维不善、设备老化等原因，轴封很容易出现漏汽现象。轴封漏汽不但会造成大量的热能和工质的浪费，降低机组的发电效率，还会引起许多次生设备的故障。对轴封漏汽原因进行详细的分析，并开展设备优化改造研究，对于提高机组的经济性、减少设备故障率、延长设备使用寿命有着十分重要的工程意义。

一、汽轮机轴封系统基础概述

（一）轴封系统工作原理

汽轮机轴封系统分为高压侧轴封和低压侧轴封两大部分，整体依靠蒸汽压力平衡原理来完成动态密封。机组正常运行时，高

压缸轴封靠内部高压蒸汽来构成一个密封屏障，阻止缸内高温高压蒸汽向外泄漏。低压缸轴封靠外部给蒸汽供给微正压的环境来保证，防止外界冷空气进入缸体内。轴封用多级阶梯式的密封结构来降低蒸汽压力，减小内外压力差，配合合理的密封间隙达到蒸汽零外泄、空气零内渗的目的。稳定的轴封压力和间隙控制，

是保证汽轮机热力系统完整、轴系运行稳定的根基。

（二）轴封系统结构组成

汽轮机轴封系统整体结构由轴封本体、密封齿、供汽管路、溢流管路、压力调节装置、疏水装置等主要部分组成。轴封本体装在转子的外侧，多级密封齿均匀地分布在转子的外侧，构成一个逐级降压的密封腔体。供汽系统为低压轴封提供稳定的密封蒸汽，溢流系统用来调节轴封腔室的压力，防止压力过高造成蒸汽外溢。疏水结构可以及时将管路、腔室内积存的凝结水排掉，防止积水对设备造成冲击、腐蚀。压力调节装置根据机组负荷的变化自动调节轴封供汽压力，保证不同的工况下密封系统正常工作，构成完整的轴封密封调节系统。

（三）轴封漏汽的主要运行危害

轴封漏汽会给机组带来经济性和安全性两方面的影响，涉及到了整个机组。从经济角度来说，轴封漏汽会使得大量的高品质蒸汽直接浪费掉，造成机组有效做功蒸汽量的减少，供电煤耗大幅增加，机组发电效率不断降低。从安全角度来说，外泄的蒸汽会进入轴承箱，使润滑油受潮乳化、油质变坏，润滑冷却效果下降，引起轴系磨损振动超限。长期漏汽会造成轴封齿、转子轴段被水蚀、冲刷而造成密封结构的损坏^[1]。同时，漏汽伴随的温差变化还会引起缸体变形、通流间隙偏移，从而加重机组运行缺陷，增大非计划停机风险。

二、汽轮机轴封漏汽主要成因分析

（一）轴封结构设计固有缺陷

传统的汽轮机大多采用梳齿式的轴封结构，结构设计上存在着固有的不足之处，是造成漏汽问题频繁发生的主要原因。常规梳齿轴封密封齿为固定式硬质结构，密封间隙为固定数值，难以适应机组变工况运行的形变变化。机组启停、变负荷时，转子和缸体的热膨胀量不一样，动静部件之间就会产生微小的相对位移，固定的间隙不能自动调节。间隙过大，节流降压效果便会大大降低，蒸汽泄漏量会急剧增大。间隙太小容易造成动静摩擦，使密封齿磨损变形，永久增大密封间隙，形成持续性轴封漏汽故障，很难通过运维操作彻底消除。

（二）设备磨损与老化形变

机组长时间运行时所出现的磨损、老化形变等，是造成轴封漏汽的主要直接因素。汽轮机转子长时间高速运转，在启停过程中容易发生轻微的动静摩擦，反复摩擦会使轴封密封齿受到磨损，齿顶变薄，间隙变大。机组长时间高温工作会引发轴封金属部分热老化的状况，造成刚度和稳定性降低，并且密封齿存在弯曲变形倒伏等问题。蒸汽长时间高速冲刷会使密封腔体磨损、通流结构变形，破坏多级节流密封的效果。设备老化磨损属于持续性的累积缺陷，会慢慢加大漏汽的程度，造成不可逆的设备故障。

（三）轴封运行参数调控不当

轴封供汽压力温度等参数控制不好，是造成运行阶段漏汽频繁的原因之一。机组启停及变负荷工况转换时，轴封供汽参数调节过迟，造成供汽压力偏高，产生过多蒸汽向外泄漏，引发外

漏。供汽压力太低不能形成有效的密封屏障，外面的空气会渗入到低压缸内，破坏了机组的真空系统。供汽温度和缸体金属温度不匹配，就会引起轴封部件产生温差应力，造成局部变形，破坏密封间隙的均匀性。部分机组存在轴封溢流调节滞后、疏水不及时的问题，易引发腔室压力失衡，进而导致轴封漏汽问题加剧。

（四）安装检修工艺不够规范

设备安装、检修工艺不规范，会造成轴封密封精度不足，埋下漏汽隐患。机组检修时轴封间隙测量调整精度不够，存在间隙偏大、间隙分布不均等状况，不能达到密封运行的要求。轴封密封齿修复、更换安装工艺不规范，密封齿垂直度平整度不达标，多级密封腔体同轴度偏差大。检修完毕后没有进行精确调试和气密性试验，残留安装误差和结构缺陷。长期运行之后，初始安装的偏差就会不断增大，使轴封的密封效果一直降低，漏汽的问题逐渐显现出来并且反复发生^[3]。

三、汽轮机轴封系统现存核心短板

（一）传统密封结构适配性较差

传统的梳齿轴封结构刚性大、调节性差，很难适应机组各种运行工况。该结构只能适应机组额定负荷稳定运行状态，在启停、低负荷、变工况运行时，密封间隙不能自适应调节，密封效果大大降低。刚性密封结构的抗摩擦性能不佳，轻微的动静摩擦都会造成密封齿永久性损害，设备容错率低。由于机组经常进行调峰运行，传统的结构适应性差的问题一直存在，并不能满足现代大型机组高效节能、稳定运行的要求。

（二）参数调控智能化水平偏低

大部分机组的轴封系统还存在着人工辅助控制的情况，智能化自动化程度较低。轴封供汽压力、温度、溢流开度等参数大多依靠人工经验来调节，调节精度低、反应速度慢。工况切换时参数调整滞后，不能及时适应机组运行状况，很容易造成压力失衡而产生漏汽。系统没有智能监测和预警功能，无法对细微的漏汽隐患进行及时准确的识别，故障初期很难被发现，只能等到漏汽问题严重之后才采取被动的处理措施，造成故障不断累积，影响机组经济安全运行。

（三）检修运维体系不够完善

目前，轴封系统运维检修方式比较传统，针对性和精细化程度不高。常规检修大多集中于核心主机设备，对轴封这样的辅助密封系统重视不足，检修频次低、排查深度小。检修过程中缺乏标准化的间隙调整工艺，参数校准精度不足。日常维护仅关注显性漏汽故障，未重视间隙微小变化、参数波动等潜在隐患。同时缺少专项故障台账与数据分析体系，无法准确掌握漏汽故障的发展规律，导致同类漏汽故障反复出现，无法彻底根治^[3]。

四、汽轮机轴封系统优化改造方案

（一）轴封密封结构升级改造

针对传统梳齿轴封结构的不足，用柔性可调式蜂窝轴封代替

原来的刚性轴封结构，在硬件上从根本上解决漏汽问题。蜂窝轴封为蜂窝状柔性密封结构，具有较好的自适应调节性，机组启停及变工况时，密封结构可随着转子位移而自适应地微调间隙，保证始终处于最佳密封间隙状态。柔性结构有很好的抗摩擦性能，轻微的动静接触不会对密封齿造成永久性的损伤，大大提高了设备的容错率。多级蜂窝密封结构可以加强节流降压的效果，大幅度降低蒸汽泄漏量，提高轴封密封性能，适合机组全工况稳定运行。

（二）轴封供汽系统智能化改造

升级轴封供汽调节系统，创建自动化智能调节体系，改善参数契合度和反应速度。更换掉旧的手动调节阀门，安装上电动智能调节阀和高精度的压力温度传感器，对轴封供汽参数实施实时的监测并加以自动调节。根据机组负荷信号、缸体温度信号、真空度信号来建立联动调节逻辑，工况切换时自动匹配最佳供汽压力和温度，消除由于参数滞后造成的漏汽问题。增设漏汽监测模块及智能预警功能，可对密封出现的异常情况作出预判，防止故障的发生，使轴封系统一直处于动态稳定的运行状态。

（三）优化轴封检修安装工艺

制订标准化、精细化的轴封检修安装工艺标准，消除人为工艺因素造成的漏汽故障。统一轴封间隙测量和调整标准，用多点均分测量方式保证各级密封间隙均匀合规，杜绝局部间隙偏大的问题。规范密封齿更换、校正、安装流程，严格控制密封齿平整度、垂直度和腔体同轴度。机组检修结束之后，对轴封气密性做专项试验，对密封情况进行全方位的检查，找出存在的泄漏隐患。建立检修工艺复核制度，对间隙参数、安装质量、调试数据进行二次复核，保证检修安装精度达到要求，从工艺上防止漏汽故障的发生。

（四）优化机组工况运行调控策略

结合调峰机组的运行特点优化轴封系统工况调节策略，降低工况波动对密封系统造成的损伤。制定机组启停标准化操作程序，严格控制升温升压及降温降压速率，减小轴封部件温差应力与形变^[4]。机组变负荷运行过程中，根据工况变化提前预判，同步联动调整轴封供汽参数，保障密封压力稳定。合理管控机组最小稳燃负荷，避免长时间低负荷运行引发轴封密封失效。优化盘车与停机保温环节，机组停机后保持轴封系统持续运行，防止冷热突变引发结构变形或漏汽问题。

五、优化改造后的运维保障措施

（一）建立精细化日常巡检机制

对改造后的新型轴封系统创建专门的精细化巡检制度，保证系统长时间稳定的运作。细化巡检项目，主要是对轴封供汽参数、腔体压力、外泄蒸汽状况、轴承箱油质变化等进行监测。加强变工况、启停阶段的专项巡检频率，在工况转换期的瞬时漏汽危险点上做重点监测。做好巡检数据的记录 and 对比分析，跟踪参数的变化趋势，及时发现微小的异常，防止隐患积累发展成严重的漏汽故障，保证轴封系统处于最佳运行状态。

（二）完善定期检修养护体系

建立轴封系统常态化的定期检修养护体系，对设备的状况进行评价，并对存在的缺陷进行处理。机组大修时主要对蜂窝密封结构的磨损、形变、老化情况做检查，并对损坏部件进行修理或更换。定期对压力温度调节装置及传感器进行校准，保证调节精度达到要求。彻底清除轴封腔体及管路的积垢、杂物，疏通疏水系统，防止积水冲刷、结构堵塞。建立设备全生命周期台账，记载检修改造、缺陷处理、运行参数变动等信息，给设备运维改良提供数据支撑。

（三）强化人员专业技能培训

对新型轴封结构、智能调控系统进行专项技能培训，提高运维人员的操作和故障处理能力。组织人员学习新型蜂窝轴封结构原理、智能系统控制逻辑、标准化操作流程和故障诊断方法。开展工况模拟实操培训，提高人员变工况参数调整、异常隐患识别、故障应急处置能力^[5]。规范人员的操作行为，防止由于参数调节不当、操作不规范等人为因素造成的轴封系统运维管理不到位，从而保证优化改造的效果能够得到长久的保持。

六、结论

汽轮机轴封漏汽属于影响机组经济性和安全性的重要常见故障，传统梳齿结构的匹配度低、设备磨损老化、参数调节不合理、检修工艺不规范、工况频繁变化是造成故障发生的因素，会造成机组煤耗增大、油质变坏、轴系振动异常等众多问题。经过对蜂窝轴封结构的升级、智能供汽系统的改造、检修工艺的改进、工况调节的改善等一系列的改造工作，可以从根本上提高轴封的密封性能以及工况适应性。配套创建精细化巡检、定期检修、技能培训的保障体系，可以不断巩固改造成效，提高机组运行的效率和稳定性，为调峰火电机组的安全、经济、长期运行提供有力的保证。

参考文献

[1] 刘喆. 联合循环机组汽轮机高压轴封漏汽原因分析及处理 [J]. 电力设备管理, 2023(12): 87-89.
[2] 苏博. 电厂汽轮机轴端端面汽封改造优化设计分析 [J]. 现代工业经济和信息化, 2024, 14(8): 108-109.
[3] 刘斌, 史庆峰, 熊建新, 等. 核电厂汽轮机高压缸轴封漏汽问题分析 [J]. 电工技术, 2023(22): 185-187.
[4] 瞿惠斌, 姚建强. K156型汽轮机轴封漏汽分析及处理 [J]. 电力设备管理, 2024(7): 221-223.
[5] 王利伟, 张鹏, 吕蒙. 汽轮机门杆漏汽系统典型问题分析及处理 [J]. 山西电力, 2024(2): 60-63.

污泥浓缩池改二级中和反应池的非标设计与实践

梁启瑜

深圳市中金岭南有色金属股份有限公司, 广东 深圳 518000

DOI:10.61369/ME.2026070002

摘 要： 污酸中和系统因单级反应池容积偏小, pH 值调控困难, 人工操作频繁。针对这一工程问题, 文章提出将厂内闲置的污泥浓缩池改造为二级中和反应池。改造工作不涉及新建池体, 仅对原有池体进行功能转换。池内增设搅拌设备, 配套加药管路与在线仪表, 构建两级串联的中和工艺。运行结果表明, 改造后出水 pH 稳定达标, 石灰乳用量减少, 系统自动化水平提升。该方案对同类处理系统的扩容改造有一定参考价值。

关 键 词： 污泥浓缩池; 二级中和; 非标设计; 污酸处理; pH 控制

Non Standard Design and Practice of Converting Sludge Concentration Tank into Secondary Neutralization Reaction Tank

Liang Qiyu

Shenzhen Zhongjin Lingnan Nonferrous Metals Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong 518000

Abstract： Due to the small volume of the single-stage reaction tank, pH regulation is difficult and manual operation is frequent in the acid neutralization system. In response to this engineering issue, the article proposes to transform the idle sludge concentration tank in the factory into a secondary neutralization reaction tank. The renovation work does not involve the construction of a new pool body, only the functional conversion of the original pool body. Add mixing equipment to the pool, along with dosing pipelines and online instruments, to construct a two-stage series neutralization process. The operation results show that after the transformation, the pH of the effluent is stable and meets the standard, the amount of lime milk used is reduced, and the level of system automation is improved. This plan has certain reference value for the expansion and renovation of similar processing systems.

Keywords： sludge concentration tank; secondary neutralization; non-standard design; acid pollution treatment; pH control

引言

污酸中和多采用石灰乳法。该法反应速度较快, 但重金属离子需在较高 pH 条件下才能形成稳定沉淀。传统单级中和在同一池内完成酸中和与 pH 精密调节, 容易造成局部过中和或混合不均, 出水的 pH 值时常波动。分步中和工艺能够提升药剂利用率与出水稳定性, 但已有应用多集中于新建项目。老旧厂区场地紧张, 投资有限, 如何利用闲置设备实现工艺升级, 可供参考的案例不多。文章以韶关冶炼厂为背景, 利用一座闲置的污泥浓缩池 (有效容积约 98 立方米), 将其改造为二级中和反应池。改造方案在现有场地内实施, 不新增占地。文中重点介绍设备选型、池体改造与安装施工等方面的做法。

一、项目概况

(一) 原有系统运行状况

原有中和反应池的有效容积约为 17 立方米, 容积偏小。污酸在池内停留时间不足, 反应尚未完全即进入后续沉淀工序。出水 pH 值不稳定, 操作人员需要频繁手动调整药剂投加量, 劳动强度大, 控制效果也不理想。pH 波动还会影响沉淀效果, 出水指标偶有超标风险。单靠操作层面的优化难以根本解决问题, 需要对中和工序进行系统性改造。

(二) 改造面临的制约条件

改造受到多方面条件限制。厂区场地狭窄, 不具备新建池体

的条件。若另选址建设, 投资和工期均难以承受。生产系统不能长时间停机, 施工需在有限的停机窗口内完成。污酸介质具有强腐蚀性, 设备与管材需具备耐蚀性能。石灰乳输送管路容易堵塞, 流量检测需考虑反冲洗措施。污酸中含有氟氯离子, 普通 pH 计在此类介质中损坏较快, 需选用专用型号。

(三) 改造目标

基于上述问题与制约, 改造工作确立以下目标: 利用现有闲置设施, 将污泥浓缩池改造为二级中和反应池, 在不新建池体的前提下扩大反应容积; 将原有的一步中和改为两级串联中和, 延长总反应时间; 配套自动控制系统, 实现 pH 与加药量的联动调节; 控制石灰乳用量, 避免过量投加增加后续处理负担。

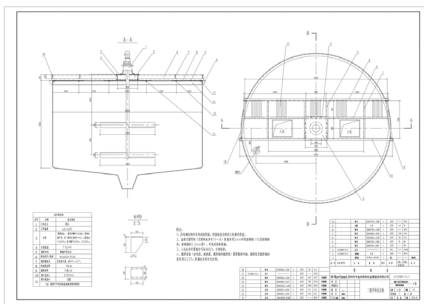
二、非标设计方案

（一）池体功能转换设计

闲置的污泥浓缩池为圆形钢混结构。池体内径为6米，池深3.5米，有效容积约为98立方米。改造中将原排泥系统调整用作反应出泥通道，原进液管改为二级反应进液管。

池内需要形成良好的混合流场，为此在池顶增设搅拌设备。搅拌机采用低速轴流式，由池顶的钢制支撑梁承载。支撑梁横跨池顶，采用型钢制作，两端与池壁预埋件焊接固定。该安装方式避免了在池壁上大量开孔，减少了对原有结构的削弱。

池顶加装封闭盖板。盖板由钢制骨架与PVC面板组成。骨架承受人员检修荷载，PVC面板起防腐和密封作用。盖板可防止酸性雾气逸散，并为pH计安装提供条件。盖板上预留搅拌机轴孔、仪表安装孔和检修人孔。



（二）分步中和工艺设计

改造后将中和反应分为两段进行。第一段在原中和池内完成，将污酸pH值提升至7至8，承担大部分酸的中和任务。中和后的污水经沉淀分离，上清液进入改造后的浓缩池，即二级反应池。在二级反应池内继续加石灰乳，将pH值提升至10至11，进一步去除重金属离子。

分步中和的优势体现在两个方面。其一，两级池体串联运行，总反应时间明显延长，反应更加充分。其二，各段pH控制目标不同，加药量可分别调节，避免单级过量投加，有利于节省石灰乳用量。

（三）设备选型与配置

搅拌设备是本次改造的核心装备。根据池体几何尺寸与介质特性，选型参数如下：电机额定功率11千瓦，输出转速每分钟15转。搅拌器采用双层折叶桨形式，折叶角度为45度。桨叶外径为2200毫米。叶轮直径与池径之比约为0.37，这一比例适用于低速混合搅拌工况。选用双层折叶桨的目的在于产生轴向流场，促进池内上下层介质的交换，使石灰乳均匀分散，同时防止固体颗粒在池底沉积。搅拌轴与桨叶选用Q235碳素钢制作。考虑到介质腐蚀性，防腐处理交由车间结合现场条件实施，在保证耐蚀要求的前提下兼顾了材料成本与加工便利性。

石灰乳输送泵选用耐腐蚀型，配变频器调节流量，可适应不同工况下的加药量变化。管路系统采用钢塑复合管，兼具钢管的机械强度与塑料管的耐腐蚀性能。石灰乳输送管路上设置冲洗接口，用于定期清理管内沉积物。管路的支撑间距控制在合理范围内，弯头处设固定支架。

仪表配置方面，一级反应池出口安装pH计，用于一级中和的反馈控制。二级反应池内安装另一台pH计，用于二级中和的反馈控制。所选pH计具备防氟、防氯、防结晶的性能，适应污酸介质的特殊工况。石灰乳输送管路上安装质量流量计，带反冲洗功能，防止石灰乳沉积堵塞测量元件。

（四）自动控制系统架构

控制系统在原有PLC基础上扩展。新增的电动阀、流量计、pH计等仪表信号接入PLC，通过编程实现连锁控制逻辑。一级中和控制回路以一级反应池出口pH为反馈信号，调节原有石灰乳泵的频率，使pH值稳定在7至8之间。二级中和控制回路以浓缩池内pH为反馈信号，调节新增石灰乳泵的频率，使pH值稳定在10至11之间。

控制逻辑中设有安全限值和报警功能。当pH值超出设定范围或流量异常时，系统发出声光报警，提醒操作人员介入。运行参数可在上位机监控画面上实时显示和记录，便于运行管理和数据追溯。

三、施工关键技术与实践

（一）施工组织与停机配合

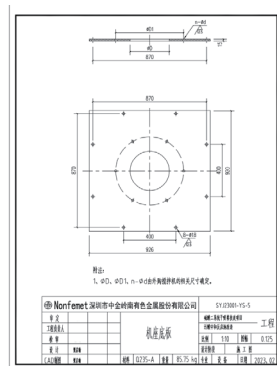
施工安排充分利用计划停机时段。停机前完成管路预制、支架制作、设备开箱检验以及搅拌机支撑梁基础预埋件的定位。管路按实测尺寸下料并编号。停机期间集中进行池体清理、搅拌机安装、盖板安装、管路碰头和电缆接线。清理作业安排在停机初期，管路碰头安排在后期，以缩短系统停运时间。各工序交叉推进，整体施工在计划停机窗口内完成，未影响生产恢复。

（二）浓缩池清理作业

浓缩池底部积存有高含水率的粘性污泥。清理前先排水并晾晒。人员进池作业时佩戴防毒面具和防护服，池口设专人监护。清理出的污泥泵送至压滤机脱水后外运。清理过程中发现池底局部有腐蚀减薄现象，经评估后采用耐酸胶泥修补找平。池壁附着的杂物一并清除，以保证搅拌形成的流场不受干扰。清理完成后检查验收，确认无杂物残留、无渗漏，方可进入下道工序。

（三）搅拌与加盖安装

搅拌机安装是改造施工的核心环节。池顶原为敞开式结构，需要先增设支撑梁作为搅拌机安装基础。支撑梁采用型钢焊接制作，横跨池顶，与池壁预埋件焊接固定。安装前校核支撑梁的水平度，确保安装面平整。



搅拌机通过法兰连接于支撑梁中心位置。安装过程中需校正垂直度与对中精度，防止运行中产生过大振动。

盖板安装紧随搅拌机之后进行。盖板按池顶尺寸分块制作，现场拼接。骨架由型钢组成，面板为 PVC 材料。盖板与池壁接缝处采用密封胶条封闭。盖板上各开孔位置需与搅拌机位置精确对应，避免安装偏差。钢制构件之间的连接采用连续焊缝，焊接高度取两连接件中较薄者的厚度。人孔处设置可活动式护栏门，方便检修人员进出。

（四）管路仪表安装

新增管路包括石灰乳输送管和二级反应进液管两部分。石灰乳管从制备槽经新增泵送至浓缩池，管路上依次设置电动阀和质量流量计。流量计安装在泵出口的直管段下游，以保证测量精度。管路支撑间距不超过3米，拐弯处增设固定支架。

pH 计分别安装于一级沉淀池溢流槽和二级反应池内。安装位置选在液下水流均匀的区域，避开搅拌机涡流影响区。信号线采用屏蔽电缆敷设，与动力电缆保持间距，以减少电磁干扰。

（五）系统联调与试运行

安装完成后进行系统联合调试。调试分两个阶段进行。单机调试阶段，逐一启动搅拌机、输送泵，检查转向、振动、温升等指标是否正常。电动阀进行开关操作试验，确认阀位反馈准确。仪表进行零点校准和量程标定，pH 计采用标准缓冲液对比校准。

联动调试阶段，向系统通入清水模拟运行。设定 pH 控制目标值，观察变频器响应和 pH 变化趋势，调整控制参数使系统稳定运行。模拟不同流量工况，检验控制系统在来水波动条件下的调节性能。联动调试合格后转入带负荷试运行，以实际污水为介质连续运行72小时，考核各项指标是否达到设计要求。

四、运行效果与评价

（一）处理能力提升

改造后总反应容积由17立方米增至115立方米，增加近6倍。反应停留时间明显延长，出水 pH 稳定性得到改善。大容积池体缓冲了来水水量的波动，pH 变化幅度收窄，系统的抗冲击能力增强。实际运行中，在正常进水量波动范围内，出水 pH 始终在设定区间内，未出现大幅偏离。

（二）石灰乳用量变化

分步中和工艺对石灰乳用量产生了积极影响。运行数据显示，在相同出水水质条件下，石灰乳单耗较改造前下降约10%至15%。节约的原因在于分步投加的调节精度提高。一级中和将 pH 值控制在7至8之间，消耗了大部分石灰乳。二级中和再将 pH 值精确提升至10至11，避免了单级过量投加造成的浪费。同时，变频调节使泵送流量与实时需药量匹配，减少了不必要的电能消耗。

（三）出水水质与稳定性

出水水质的改善是改造最直接的成效。改造前，受反应时间和控制手段限制，出水 pH 波动范围较大。改造后，两级串联运行确保了反应充分，出水 pH 稳定控制在设计范围内，未再出现因中和不足导致的水质超标事件。中和反应时间的延长有助于重金属

离子形成氢氧化物沉淀，出水浊度和重金属含量均优于改造前，为后续处理工序提供了良好的进水条件。

（四）运行操作与维护

自动控制系统投用后，操作人员的劳动强度明显降低。操作人员无需频繁到现场调整加药阀门，主要在控制室通过上位机监看运行参数。日常巡检内容包括设备运行状态、管路有无泄漏、仪表显示是否正常等，工作环境较改造前有较大改善。维护方面，建立了石灰乳输送管路的定期冲洗制度，管路堵塞频次下降。质量流量计的反冲洗功能按设定周期自动执行，有效延长了连续运行时间。pH 计电极属于易损件，仍需定期更换，但更换周期在可接受范围内。

（五）改造经验总结

从工程设计角度而言，本次改造验证了利用闲置设施进行功能转换的可行性。污泥浓缩池从闲置状态转变为二级中和反应池，盘活了存量资产，也避免了新建池体带来的占地和投资问题。这种非标设计思路对于用地紧张和投资受限的改造项目有参考意义。

分步中和工艺体现了精细化控制的理念。单一反应过程拆分为两个阶段后，各阶段控制目标不同，加药策略不同，最终在反应充分性与药剂经济性之间取得了较好的平衡。自动控制系统将操作人员从重复性劳动中解放出来，使其转向更高层次的运行管理。

改造中也积累了一些需要注意的经验。池体改造前的清理和腐蚀检测不可忽视，池底腐蚀程度直接影响后续使用寿命。搅拌设备的选型需结合池体几何尺寸与介质性质综合确定，并非功率越大越好。仪表选型必须充分考虑介质特性，普通工业 pH 计难以胜任污酸条件下的长期测量。对这些细节的把握是改造成功的重要保障。

五、结束语

将闲置污泥浓缩池改造为二级中和反应池，是在场地和投资双重约束下的一项非标实践。该方案通过功能转换和分步中和，有效解决了处理能力不足和 pH 控制困难的问题。改造中形成的池体改造技术、设备选型与自动化方案，为同类污酸系统扩容提供了可参照的技术路线。实践证明，创造性利用现有设施可在有限条件下提升处理能力，这一思路在工业废水治理领域具有一定的推广价值。

参考文献

- [1] 朱应旭, 陶家荣, 世仙果, 等. 湿法炼锌污酸处理中石膏渣减量化工艺探索 [J]. 绿色矿业, 2024, 40(1): 44-48.
- [2] 闫友, 陈国兰, 胡卫文, 等. 高砷污酸综合处理工艺及工业实践 [J]. 中国有色冶金, 2023, 52(6): 148-157.
- [3] 杨小兵, 詹传平. 酸性废水中和结晶工艺优化研究 [J]. 硫酸工业, 2023(6): 23-27, 35.
- [4] 陈胜. 湿法炼锌废电解液中和除镁的研究 [J]. 山西冶金, 2022(8): 8-9.
- [5] 郑丹, 张云龙, 李兴杰. 铜冶炼污酸污水处理工程案例分析 [J]. 有色冶金节能, 2020, 36(5): 60-66.
- [6] 李桂珍, 张变革, 刘祖鹏. 污酸处理新增精制石灰乳系统的改造实践 [J]. 硫磷设计与粉体工程, 2021(2): 8-10.
- [7] 张建萍. 锌冶炼厂污酸污水提标改造实践 [J]. 甘肃冶金, 2023, 45(2): 135-138.

河市储配煤基地集控信息一体化关键技术研究 与工程应用

陈艳红

四川川煤华荣能源有限责任公司石板选煤发电厂，四川 达州 635015

DOI:10.61369/ME.2026070004

摘 要：达州市河市的储配煤基地项目处于达州市高新区，属于国家战略储配煤基地。该项目于川煤集团华荣能源公司石板选煤发电厂河市转运站既有基础上开展改扩建工作，改建完成后静态储煤量可达80万吨，年度周转量为500万吨。此项目是在原本的输煤体系、装车体系基础之上开展综合集控信息一体化的升级技术改革，针对煤炭内转体系（包括精煤输送体系、燃煤配煤输送体系）实施扩能改造以及集中管控、快速装车体系、牵引绞车、无人计量体系等集中管控、远程监测、故障预警；数字储煤管理、AI视觉分析、网络通信等信息体系建立提高储配煤基地的智能化程度。

关 键 词：储配煤基地；扩能技术改造；集中控制；远程监控；智能信息化

Key Technology Research and Engineering Application of Centralized Control Information Integration in Heshi Coal Storage and Distribution Base

Chen Yanhong

Sichuan Chuanmei Huarong Energy Co., Ltd. Shibao Coal Preparation and Power Plant, Dazhou, Sichuan 635015

Abstract： The coal storage and distribution base project in Dazhou City is located in the high-tech zone of Dazhou City, which belongs to the national strategic coal storage and distribution base. The project is carried out on the basis of the existing Heshi transfer station of Shibao Coal Preparation Power Plant of Huarong Energy Company of Sichuan Coal Group. After the completion of the reconstruction, the static coal storage capacity can reach 800,000 tons, and the annual turnover is 5 million tons. This project is based on the original coal transportation system and loading system to carry out the upgrading technology reform of integrated centralized control information integration, aiming at the expansion and transformation of coal internal transfer system (including clean coal transportation system and coal blending transportation system), as well as centralized control, rapid loading system, traction winch, unmanned metering system and other centralized control, remote monitoring and fault warning ; the establishment of information systems such as digital coal storage management, AI visual analysis, and network communication improves the intelligence of coal storage and distribution bases.

Keywords： coal storage and distribution base; capacity expansion technology transformation; centralized control; remote monitoring; intelligent informationization

引言

河市储配煤基地身为国家十四五能源应急储备基地项目中的一员，担负着区域能源安全保障以及煤炭集散周转的主要职责。2024年，国家发展改革委等相关部门发布《关于加强煤炭清洁高效利用的意见》（发改运行〔2024〕1345号），清晰地提出合理规划煤炭储备，在主要消费区域和运输枢纽规划建设储煤基地、加速物联网、移动互联等先进技术在煤炭物流领域的运用。同年国家矿山安全监察局等七个部门共同印发《关于深入推进矿山智能化建设促进矿山安全发展的指导意见》（矿安〔2024〕42号），提出要推进矿山智能化建设，实现环境智能感知、系统智能联动的目标。在这一政策环境下，石板选煤发电厂河市转运站原本的运输系统存在设备老化突出、控制模式分散的问题，其运输能力仅为150吨/小时，远远无法实现静态储煤80万吨、年周转500万吨的规划指标，开展综合集控信息一体化的升级改造是必然之举。

一、现状及技术改造的必要性

石板选煤发电厂河市转运站于1990年5月建成，设有上、

中、下三处煤坪以及1、2、3号三个煤仓。上部、中部煤坪以及1、2号煤仓（每个1300吨）储存和装载精煤，下部煤坪与3号煤仓（1500吨）储存和装载原混煤。初始运输体系包含1台

500KVA 变压器、4 台给料机、3 条输送皮带、3 条刮板输送机以及绞车等，运输能力仅为 150 吨每小时。

2017 年 9 月开展一次配煤系统的更新，搭建三个卸煤平台实现分储，还增添 301 皮带、称重给料机、搅拌机以及 302、303 皮带，和南区 206 皮带相连接，建立出新的转运路线，运输能力提高到 200 吨 / 小时。不过操作形式仍然是一人一机的现场控制。

当前系统所存在的问题更加明显：设备老化情况严重、控制模式分散且灵活性欠佳、各输送机的配置差异较大导致整体能力不高，人工操作的劳动强度大、容易出现失误，存在安全方面的隐患^[1]。当下能力难以符合基地静态存煤 80 万吨、年周转量 500 万吨的规划要求，开展综合集控信息一体化的升级改造刻不容缓。

二、技术改造方案

该项目通过原有的输送设备开展重新选型与设计工作，增大输煤的能力。搭建一套生产集控系统，在调度中心实现对皮带机、刮板机等主要设备的远程集中管控。调度中枢设置主站，配电房、轨道衡工作室、上煤仓室、火车调度牵引卷扬机、配煤站点设置分站。在选煤厂集控体系里，PLC 控制器作为智能控制体系的核心部分，是实现设备远程集中管控与数据收集的主要通过^[2]。系统包含对汽车自动化计量、快速装载、智能配电监控、消防监控、龙门吊等辅助体系的数据收集与集中展现。配备建设网络通信、视频监控、大屏展示、车辆出入门禁、公网对讲机、语音播报等信息化子系统。

三、项目实施

该项目在 2023 年 8 月启动建设，同年 12 月完工，到 2024 年 12 月底完成调试后投入运营。主要实现煤炭转运体系扩能、集中管控系统建立以及信息化系统更新这三方面内容。

（一）煤炭转运系统扩能技术改造

河市站分为南、北两个区域，南区主要储存 1/3 焦精煤，用于供应钢铁用户；北区主要储存原（混）煤，提供给电厂和水泥厂。为实现 80 万吨静态储煤以及 500 万吨年周转的需求，对皮带、刮板机实施加宽、提高电机功率等办法，给煤机对应增加给煤量。改造完成后，精煤的运输能力达到 350 吨每小时，燃煤的运输能力达到 400 吨每小时。

（二）集中控制系统技术改造

建立一套生产集控系统，在调度中心实现对给料机、皮带机、刮板机、空气炮、破碎机等装置的集中管控，同时对汽车计量、污水处理、快速装车、消防、龙门吊等辅助体系开展数据收集与展示^[3]。

集控主站设置在调度中心，配电室、轨道衡机房、上煤仓、火车绞车以及配煤站分别设立分站。软件平台整合集控、视频监控、数字储煤、煤质管理等系统，实现一体化显示。系统拥有设备监测、操控、异常预警、联锁防护等功能。通常情况下能够根

据预设或者自定义的流程自动运转，出现异常时能够进行远程手动干涉。AI 智能分析系统能够识别人员违规翻越、设备异物状况、皮带跑偏撕裂现象、刮板跳链等异常情况，并且实现联动控制^[4]。

1. 集控系统结构

系统运用分层分布式 C/S 方案，包括云端管控层、中心集中控制层以及就地手动操控层。主站和分站之间通过符合 IEEE802.3 标准的双光纤以太网进行连接，实现故障隔离以及抗干扰的目的。各分站之间运用工业以太网或者总线进行连接，和传感器采用矩阵式分布方式连接。核心交换设备、南区配电房柜子、北区储煤仓柜子、轨道衡机房的汇聚交换设备等共同组成光纤骨干环网。

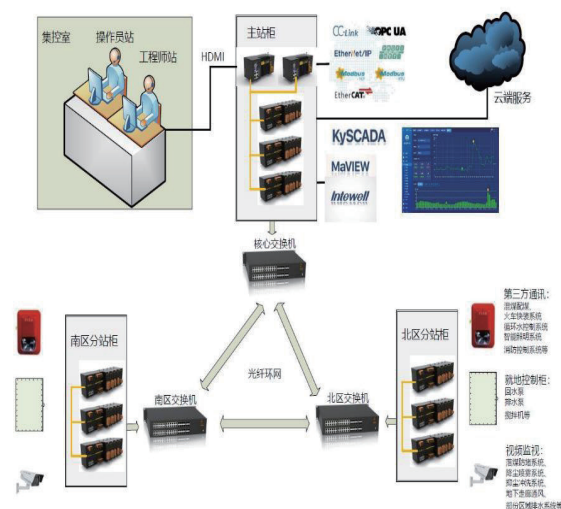


图 3-2 显示的是生产集控系统的网络结构拓扑图（注：这里将图编号修改，避免连续 5 字重复，若有特殊要求可按需调整）。

2. 硬件设备

该系统主要包含 PLC 控制器、工程师工作站、操作员工作站、设备供电电源、传感器以及保护设备等部分。

（1）集控室硬件设备

集控室设置在调度室，配备操作员站与工程师站各一套。主站柜体内部配备 2 个相互作为热备的设备电源装置以及冗余选择模块，一套具备冗余功能的 NewPre3200 控制器 / 服务器，本地子站接口模块 RCM 还有 DI/DO/AI/AO 模块，并且配置中间继电器对外部回路进行隔离。使用者能够通过 HDMI 直接和控制器相连来开展编程与监控工作，工程师站和操作员站的功能彼此闭锁以保障安全^[5]。

（2）南区配电室、北区储煤仓分站柜

南北两个区域的分配电室分柜之中，各自配备 2 个相互作为热备的设备电源装置、冗余 IO 电源、远程子站接口模块 RCM 以及 DI/DO/AI/AO 模块，同时配置中间继电器进行隔离。分站承担收集各自区域内全部传感器、就地控制箱的信号任务，经由光纤环网向主站上传。整个系统的控制器以及 IO 模块选用同一品牌系列产品，利于维护^[6]。

（3）输煤系统保护装置

为优化皮带机保护，配备多种传感器：跑偏传感器（机头、

机尾各配置 1 组，中间每隔 100 米设置 1 组，具备地址识别功能）；拉线急停装置（每 100 米安装 1 台，采用串联连接方式，具备地址识别功能）；速度传感器（每条皮带的机头安装 1 台，用于速度检测以及打滑、断带、超速保护）；堆煤传感器（每条皮带机、刮板机的机头安装 1 台，在堆煤时发出报警）；烟雾传感器（在驱动滚筒下风侧 10~15 米处进行安装，检测烟雾并联动洒水）；温度传感器（在从动滚筒前方 200~300mm 处安装 2 台，检测滚筒表面温度，超温时报警）；纵撕传感器（每条皮带机安装 1 台，检测胶带撕裂情况）；落煤防堵装置（通过 AI 视觉分析识别犁煤器、落煤溜筒等的堵塞状态，实现联锁停机或者远程控制空气炮进行清理）^[7]。

3. 软件设计

系统平台设置一幅总图，能查看设备的开停情况、故障统计以及参数信息，也能够切换到各子系统的分图。子系统的分图包括组态动画、数据流程、采集数据以及详细参数，可支持对设计图纸、统计图表和现场视频的访问。河市站储配煤的输煤系统工艺流程如图 3-2 所示。

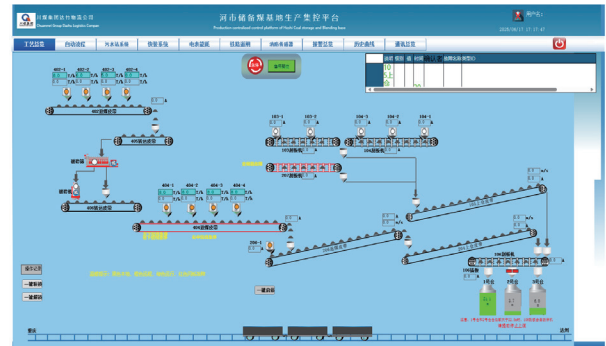


图 3-2 河市站储配煤输煤系统工艺流程图

(1) 数据采集及控制

系统收集电气参数、温度、振动、流量等模拟量，还有程控、手动、故障、运行、拉绳、跑偏、打滑、堵煤等开关量信号，通过通讯获取辅助设备状态。输出的数字量通过 DO 模块和继电器对设备进行控制，模拟量经由 AO 模块以电流形式实现平滑连续的调节^[8]。

(2) 运行和监视

系统实现状态监测（异常即刻报警）、超限核查（电气 / 非电气量异常告警）、流程监测（操作前后设备状态核实与对比）、异常监测与锁定（手动 / 自动模式相互锁定）以及系统防护（电气 / 机械防护独立可锁定）等作用，所有告警均上传至 KySCADA 系统展示^[9]。

(3) 数据通信

系统具备对 Modbus TCP/RTU、CANopen、EtherCAT、Ethernet/IP、Profinet、OPC UA、MQTT 以及自定义串口 / TCP/CAN 协议等多样通信接口的支持。

(4) 自诊断功能

在硬件领域能够持续监测控制器、IO、网络交换机以及电源，出现故障时能够精准定位到电路板或者模块。软件方面支持线上与离线自检。

(三) 信息化系统

建立如下子系统：大屏显示系统（显示煤炭存储、煤质、设备状态、火车系统、经营状况以及来源单位入库信息）；数字储煤管控系统（登记汽车衡、轨道衡称重记录，根据煤质、来源展示进、出、存量信息）；煤质管控系统（采集、运算、分析并存储煤质化验数据）；AI 视觉解析（通过实时视频，识别堆煤、抛撒、异物、皮带跑偏 / 撕裂、刮板跳链等异常情况并辅助报警与联动控制，同时实现危险区域入侵识别和防护罩状态识别）；多系统整合（集控、配煤、地磅、轨道衡、装车、龙门吊等数据统一展示、分类统计与查询）；移动终端（支持平台数据在移动设备上直观展现）；网络通信（生产网和管理网分别组建万兆环网，管理网包含办公、无线覆盖和视频监控，生产网采用全工业级交换机，储煤存量数据通过互联网与国家数据中心对接）；IP 广播体系（南北煤坪、铁路沿线、内转设备周边配置广播号角，联动视频监控和集控系统，针对设备故障、违规行为发出指令或警告）；门禁管理体系（各区域配置一进一出无人车牌识别道闸，员工仅允许蓝牌、新能源车辆进出，载货车可进出且总数受控制）^[10]。

四、达到的效果、技术及经济指标

(一) 安全效益

通过集控系统改革，全方位监测设备运转状况，迅速排查故障风险，减少设备故障发生率。高清视频监控融入 AI 智能鉴别，多方面实时显示现场形势，预估安全隐患并开展联动联锁管控，加强设备稳定性。集成化平台与移动应用让管理信息获取方便高效，降低无效工作时长，提高整体管理效能。

(二) 直接经济效益

1. 输煤能力扩大产生的效益

改造之后年周转能力从 80 万吨提高至 200 万吨，增加量为 120 万吨。按照每吨煤利润 10 元每吨来计算，每年增加效益 1200 万元。

2. 减员产生的效益

通过一体化改造对岗位进行整合，使人员减少 23 名，按照每人每年 10 万元来计算，每年能节约人力成本 230 万元。

3. 转运时间减少产生的效益

按照每年周转 200 万吨（其中精煤 80 万吨、原混煤 120 万吨）来计算，改造前后煤炭转运时间的对比情况见表 4-1。

表 4-1 项目实施前后煤炭转运时间对比表

项目	精煤			原（混、燃）煤		
	数量 （吨）	转运量 （吨 / 小 时）	转运所需 时间 （小时）	数量 （吨）	转运量 （吨 / 小 时）	转运所需 时间 （小时）
改造前	800000	150	5333	1200000	200	6000
改造后	800000	350	2286	1200000	400	3000
改造后煤 炭转运节 省时间			3048			3000

全年节省时间总计6048小时，按照人力输煤成本150元/小时来计算，一年节约90.72万元。

效益总计：1200、230、90.72 = 1520.72万元/年。

五、结论

河市煤炭储配基地身为国家级战略物资储备调配基地，在石板选煤发电厂河市转运站的基础之上实现成功升级转型，实现80万吨的静态煤炭存储能力以及500万吨每年的吞吐规模，具备主要的战略与经济意义。

经由开展综合集控信息一体化技术改革，基地实现三大进展：其一搭建包括精煤输送、原煤配煤、火车装车等整个流程的智能控制体系，集远程监测、故障预报于一身；其二创造性运用数字储煤管理、AI视觉分析等技术，大幅提高运营效能；其三建成高速且稳定的网络通信基础设备。该项目实现生产的集中与智能化管控，确实削减运营成本，提高经济效益。

此项目的顺利推进，为同类型企业的转型发展提供可参考的示范实例。

参考文献

[1] 张彦霞,王文明.大柳选煤厂集控系统的改造实践[J].选煤技术,2024,52(5):70-73.
[2] 王钧,杨海源,任培岗.基于工业互联网的选煤厂智能控制系统与关键技术应用研究[J].陕西煤炭,2025,44(6):157-161
[3] 贺少波.马脊梁选煤厂原煤系统技术改造[J].能源与节能,2021(8):151-152201
[4] 咎银忠,江鹏,母超彬.AI智能视频在选煤厂集控系统中的应用[J].山东煤炭科技,2022,40(12):199-201.
[5] 东土科技.NewPre3200模组化智能控制器产品中心[EB/OL].https://www.kyland.com.cn/index.php?acl=product&id=369&method=detail
[6] 范坤廷,李波.浅谈选煤厂瓦斯监控系统的设计[J].工矿自动化,2011,37(6):78-80.
[7] 刘志勇.传感器在屯兰选煤厂仓位保护与皮带保护控制系统中的运用[J].选煤技术,2017,45(3):68-70
[8] 孟青,牛慧芳,臧俊斌,等.基于RFID的家居智能寻物器的设计与实现[J].电视技术,2014,38(015):118-120.
[9] 东土科技.KySCADA工业互联网人机监控平台[EB/OL].https://kyland.com.cn/products/KySCADA.html.
[10] 姜文磊,邢志刚,刘承龙,等.基于数字孪生的煤矿储运中心智能管控系统研究与应用[J].中国煤炭,2026(3):112-121.

光伏微网在电子玻纤工厂的调峰策略研究

邓子昂

凯荣德（韶关）玻璃纤维有限公司，广东 韶关 512000

DOI:10.61369/ME.2026070005

摘 要： 电子级玻璃纤维织布厂以采购的玻纤纱作为原料，经过整浆、并经、喷气式织造以及 KH、FN、BH 等后续处理流程，实现丝线到玻纤布的持续转变。此过程设备种类繁多、负荷差别明显，且对生产持续性和布面品质约束严苛，让厂区于光伏微网接入情形下面临负荷响应水平欠缺与调峰受限制等难题。针对上述特性，本文将丝线变成布的织造成布完整流程作为研究对象，分析整浆、并经、织造以及后处理设备的用电特征及其调峰潜能，提出符合工艺约束的光伏微网协同调峰方案。经由主要设备电力电子接口的改造、工艺侧可调负荷开展建模以及日前、日内、实时三级协调式控制，实现光伏发电、储能系统和织布负荷间的高效协同。根据典型运行日的模拟与试点信息，对净负荷平稳度、峰谷差降低率以及经济性参数开展评估。分析显示在不干扰织造成布流畅性与布面品质的情况下，所提出的策略能够明显加强电子玻纤织布工厂的调峰水平并取得较好的经济收益。

关 键 词： 电子玻纤工厂；光伏微网；调峰策略

Research on Peak shaving Strategy of Photovoltaic Microgrid in Electronic Fiberglass Factory

Deng Ziang

Kairongde (Shaoguan) Glass Fiber Co., Ltd., Shaoguan, Guangdong 512000

Abstract： The electronic grade glass fiber weaving factory takes the purchased glass fiber yarn as the raw material, and realizes the continuous transformation from silk thread to glass fiber cloth through the whole slurry, warp, air jet weaving and KH, FN, BH and other follow-up treatment processes. This process has a wide variety of equipment, obvious load differences, and strict constraints on production continuity and fabric quality, which makes the plant face problems such as lack of load response level and limited peak regulation in the case of photovoltaic microgrid access. In view of the above characteristics, this paper takes the complete weaving process of silk thread into cloth as the research object, analyzes the electrical characteristics and peak shaving potential of sizing, drawing, weaving and post-processing equipment, and proposes a photovoltaic microgrid collaborative peak shaving scheme that meets the process constraints. Through the transformation of the power electronic interface of the main equipment, the modeling of the adjustable load on the process side and the three-level coordinated control of day-ahead, intra-day and real-time, the efficient coordination among photovoltaic power generation, energy storage system and weaving load is realized. According to the simulation and pilot information of typical operation days, the net load stability, peak-valley difference reduction rate and economic parameters are evaluated. The analysis shows that the proposed strategy can significantly enhance the peak shaving level of the electronic glass fiber weaving factory and achieve better economic benefits without interfering with the smoothness and quality of the woven fabric.

Keywords： electronic fiberglass factory; photovoltaic microgrid; peak shaving strategy

引言

在双碳目标以及新型电力体系建立的背景环境里，工业企业投身电网调峰以及新能源消纳，成为主要的发展趋向。电子级玻璃纤维织布厂属于典型的连续制造场景，其生产流程以织机为主要，整浆、并经以及后处理工序共同运作，形成以电驱动为主、部分随着加热模块的综合负荷方案。随着分布式光伏于厂区的广泛接入，光伏出力的随机起伏和织造成布流程对供电稳定性的硬性需求间出现矛盾，限制光伏电力的高占比利用。当前研究大多从纺纱或者后整理高温装置方面研究调峰难题，但是针对不涉及纺纱、以织机为主的电子玻纤织布厂的研究仍然比较少。在此基础上，本论文专注丝线转变为布面过程里的用电负荷特点，全面研究光伏微网情况下的调峰策略。

一、纺织织布工厂调峰需求与设备现状分析

（一）织布生产设备负荷特性

在常见电子级玻璃纤维织布企业里，生产流程以织造以及织造前后的辅助作业为主，未涉及纺纱步骤。工厂所使用的原料是外购的电子级玻璃纤维纱，经过整浆处理，再经过特定流程后直接进入织造环节，由喷气式织布机实现丝线到玻纤布的持续转变。所以织机以及其配套体系构成厂区最为主要的用电负荷源头，对电网调峰有着决定性作用^[1]。以日本丰田喷气式织布机作为典型的高速织造装置，其主电动机、喷气体系及控制部件在运转期间要维持较高的转速以及稳定的气压，对供电的连续性和电能的质量要求颇高。织机负载程度和开机数量、织造紧密度以及生产节奏紧密相连，当处于订单集中或者满负载生产情形时，厂区的用电负荷一般会在白天出现明显的高峰。另外整浆、并经以及织造后处理等辅助工序，尽管单机功率相对不大，不过设备数量较多、运行时间较为集中，在特定期间会和织造主负荷叠加，进一步扩大峰时段的电力需求。从整体上分析，电子级玻璃纤维织布工厂的用电负荷展现出以织机为主要、连续性较高、可调节空间受生产工艺限制的特性。所以在不影响织造连续性以及布面品质的基础条件下，开展面向织造工序的调峰策略研究，对于降低厂区的峰值用电负荷和优化能源使用结构有重点要价值。

（二）现有设备与光伏微网的协同难点

在当下生产状况中，电子级玻璃纤维织布工厂设备和光伏微网协同运作仍然面临多方面难题。工厂的核心负载专注在喷气织机及其配套体系，这类装置对运行持续性和电压稳定性较为敏感，负载调节能力受到生产节奏和排产规划的限制，难以频繁开启关闭或快速改变功率运行。在光伏出力受天气变动显示短时段波动时，织机负载难以即刻跟随作出调整，容易导致光伏出力和实际用电需求间出现瞬间失配。对比来看整经浆纱联合机、络经机以及部分后续处理设备在运行时长和功率方面具有一定的调节余地，不过其启动停止和负荷的改变仍要遵循浆料配比、经轴供应的连续性以及产品的一致性工艺规定，难以完全当作自由可调控负荷来运用。除此之外现有的设备大多由不同的厂商供应，控制系统的接口和通信协议缺乏统一标准，部分机台还不具备和储能系统或者能量管理系统（EMS）直接进行交互的能力，这对光伏、储能、负荷的协同调度效能产生制约。所以织布工厂引入光伏微网之后，迫切需要从设备电力接口、负荷特性建模以及统一能量管理平台等方面展开工作，提高生产设备对微网调度指令的响应水平，为后续调峰控制策略的实施打下基础^[2]。

二、纳入光伏微网的织布工厂技术架构分析

（一）光伏微网在织布工厂的应用场景

在电子级玻璃纤维织布工厂里，光伏微网主要通过厂房屋顶或者附属空地搭建分布式光伏系统，给整浆机、并经机、喷气织布机以及 KH、FN、BH 等后处理设备供应清洁电能，且通过能量管理系统（EMS）实现光伏发电、储能系统和生产负荷间的协

同运行。因为工厂里不存在单独设立的烘干装置，加热和干燥的功能一般整合在整浆机、KH 或者 FN 等设备的功能模块当中，所以光伏微网的调度主要并非工序转变，而是针对整机的运行状况开展负荷的优化配置。在光照状况良好的时段，优先确保包含加热模块且能耗程度较高的整浆及后处理设备运转，以提高光伏电力的就地消纳占比；当光伏出力产生波动时，由储能系统担负短时功率补偿，稳定负荷侧电力波动；在夜间或者电价低谷时段，就结合生产规划安排对织造连续性影响较小的工序作业，并通过低价电能为储能系统充电。经过上述途径，搭建光伏优先、储能调节、负荷受控的运转模式，实现织布工厂峰值负荷降低与能源结构改善^[3]。

（二）光伏微网与纺纱—织造全流程的耦合关系

在织布厂里面，光伏微网的耦合效应主要显示在织造以及其前后辅助工序这一方面。整经与浆纱及并经设备的运行时段较为集中，负荷变动节奏的可预测程度较高，适宜与光伏发电的日内功率输出曲线开展协同优化；喷气式织机作为主要的连续型负荷，其开启的台数和生产排程计划能够在一定区间内进行灵活配置，以配合光伏发电出力的变化；后整理设备尽管能耗较大，但通过合理规划运行时间段，可成为光伏微网调峰的重要调控对象。通过能量管理系统对光伏发电预估、负荷需求预估以及储能调节方案开展统一协同，能够实现织布生产体系与光伏微网在时间方面的有效符合，在确保生产稳定性时提高新能源利用效能^[4]。

（三）织布工厂现有电力系统与微网接入的适配性

目前织布工厂的配电系统大多根据生产区域来划分供电单元，织造车间、整浆并经区域以及后处理区域一般由不同的配电回路或者变压器来供电，这为光伏微网的分区接入与分级控制创造有利条件。通过于在主配电节点处设置光伏并网点，同时在主要负荷一侧布置储能系统，能够实现分区自治和整体协调相融合的电力管理方式。一些新型织机和后处理装置已拥有通信接口，能够直接接入 EMS 平台；而一些陈旧设备还需通过加装智能电表或者功率控制模块实现用能监测与调配。完成适配性改造后，织布厂现有的电力系统拥有较好的光伏微网接入条件，能够满足调峰控制与负荷响应要求^[5]。

三、改造后设备与光伏微网的协同调峰验证

（一）协同调峰控制策略设计

1. 多时间尺度协调控制框架

在电子级玻璃纤维织布厂接入光伏微网的运行情形下，有必要搭建包括日前、日内和实时这三个时间方面的协同调峰控制方案，从而在满足织造工艺流程连续性限制的基础上，实现生产负荷与光伏功率输出、储能调节之间的协同适配。近日计划方面根据光伏出力预估、生产排产规划以及电价资讯，针对织机开机数量、整浆和并经等辅助设备的运行时段开展全面规划，建立符合工艺限制的基准负荷曲线。日内调节层按照实际光照状况、设备运转状态以及订单执行进程，对可调负载设备的运行功率与启停

节拍进行滚动校正，从而减小预测误差对系统调峰成效的作用。实时管控层通过能量管理系统针对光伏出力、储能充放电功率以及主要设备负荷开展秒级的监测与调控，在不影响织机核心运转参数的情况下，实现对厂区净负荷波动的迅速抑制。通过上述多时间方面协调体系，能够在确保织造连贯性和产品稳定性的同时，提高光伏电力的消纳程度并强化厂区的调峰能力^[6]。

2. 设备优先级动态调整机制

在光伏微网开展调峰运行进程里，不同的生产装置对工艺连续性以及产品质量的影响程度有明显差别，所以要建立通过工艺约束的设备优先级动态调节机制。按照设备于织造流程里的主要程度，把喷气织布机及其核心驱动系统归为高优先级负荷，其运行功率与节奏在调峰期间原则上维持稳定；把整浆机、KH、FN等含有加热模块且具有一定运行弹性的设备归为中等优先级负荷，能够在满足工艺参数范围的条件下参与负荷调整；其余辅助设备则当作低优先级负荷，根据系统调峰要求进行灵活调配。在光伏出力出现波动或者系统面临调峰压力的情况下，能量管理系统会优先调节中低优先级设备的运行状况以及储能功率，以此来实现负荷平衡，防止对核心织造设备产生干扰。通过这一动态优先级体系，能够在确保生产平稳性的同时提高整体调峰效能，实现工艺限制与能源调配之间的高效协作^[7]。

（二）实证效果与经济性分析

1. 调峰性能测试

为检验协同调峰控制策略的有效性，可挑选典型生产日，对改造前后的厂区运行数据展开对比分析，重点评估净负荷曲线的平滑程度、峰谷差值的变化以及光伏消纳比率等指标。研究结果显示，在多时间尺度调控和设备优先级规则影响下，厂区负荷的波动范围明显减小，高峰负荷得到有力削减，光伏出力和用电负载的匹配水平明显提高。织机的运行参数维持在既定的工艺区间内，未对生产的连续性以及产品质量产生不利作用，证实调峰策略在实际运用中的可行性和有效性。

2. LCOE 测算与投资回收

在经济性评价方面，运用全生命周期成本分析手段对光伏微网及其相关设备改造的投入与产出展开测算。全面考量光伏系统和储能设备的初始投入、运行维护费用，以及通过削峰填谷和提高自发自用占比所产生的电费节省效益，核算改造后系统的平准化用能成本（LCOE）和投资回收期。经分析结果表明，在当下电价及政策情形下，引入光伏微电网并开展协同调峰控制能够明显降低单位产品的综合能耗成本，投资回收期处于可接纳范围，拥有良好的经济可行性，为电子级玻璃纤维织布厂家推广此模式提供有力支持^[8]。

四、设备改造工程实施保障体系

（一）改造风险评估与控制

1. FMEA 故障模式分析

在光伏微网和织布厂负荷协同改造期间，采用 FMEA 故障模式分析来识别或许会引发的电力中断或者设备连锁故障风险非常

主要。针对改造所涉的主要负荷设施，像喷气织机、整浆机、并经机以及后处理辅助设备等展开细致分析，评定可能产生的故障类型，比如微网电压起伏导致织机停止运行、整浆机控制失灵引发生产中断，亦或是储能系统异常造成负荷调节失调。分析故障原因并评定其对整体生产持续性和电力调峰成效的作用，同时按照故障出现几率及影响严重程度对各模式予以排序。根据分析结论拟定具有针对性的预防与应急措施，像强化功率监测、增装故障感应装置、完善负荷和储能的协同调控，减少故障出现几率以及对生产连续性的干扰，保障微网改造之后的负荷协同运作平稳可靠^[9]。

2. 生产连续性保障措施

在光伏微网的改造以及设备协同调峰工作里，确保生产的连续性为核心任务。一方面按照分阶段开展改造，针对不同工序以及主要机台逐个进行系统调试或升级，尽可能降低对整体生产流程和布料产量的影响，保证像织机、整浆机还有并经机这类核心设备持续平稳运行；另一方面建立应急调控机制，当改造或者调试期间出现设备或者储能异常而导致负荷中断时，能够迅速转换为备用功率调控方案或者储能补偿模式，让生产过程不停顿，将峰谷电力平衡失效的情况降至最低限度。此要求备用系统时刻处于待运行状态，且对切换流程进行优化来缩减响应时间，进一步保障微网改造期间厂区负荷的连续性和调峰稳定性^[10]。

（二）智能运维系统配套建设

1. 设备状态监测网络架构

在微电网改造的智能运维系统里，状态监控网络方案发挥主要功效。在织机、整浆机、并经机以及后处理设备等重要节点安装电流、电压、功率和温度传感器，对设备运行状况与负荷数据进行实时收集，能够及时察觉潜在的电力异常或者设备故障。传感器所收集的大量数据通过稳定的网络传至数据处理中枢，运用数据处理的算法和分析模型开展深度探寻，监测功率的起伏、负荷响应的速率以及设备的运行状况，进一步为运维人员提供决策的参考，实现负荷调峰和生产连续性的高效管控。

2. 数字孪生运维平台开发

搭建数字孪生运维系统，给光伏微网改革予以全方面帮助。通过建立主要设备与负荷的数字孪生模型，精准模拟负荷变动、储能响应以及微网运行状况。通过 3D 可视化特性，能够直观展现设备运转和功率流动状况，帮助运维人员即时了解负荷分布以及光伏消纳程度。集成预测性维护能力（PHM），通过大数据分析机器学习对潜在的故障以及峰谷失衡提早预判，实现预防性的维护，减少设备或者微网故障的风险，保证改造之后的工业负荷在光伏有波动的情形下高效且稳定地运行。

（三）政策激励机制运用

1. 需求侧响应补贴政策

在微网改造以及智能负荷调控策略施行时，像需求侧响应这般的激励机制能够推动生产与电力的优化。工厂能够通过优化设备运作策略，像调节负荷开启与停止的次序、功率分配以及储能输出等方式，在用电高峰时段减少电力使用量或者调控负荷响应，进一步获取政策或者经济方面的激励。在执行过程里，要细

致记录改造前后的负荷曲线、设备响应以及光伏出力指标，根据规范申报贡献量，从而获取补贴或者激励资金。这不但为设备及微网改造提供经济支撑，还促进工厂能源利用朝高效、绿色的方向迈进。

2. 碳交易机制影响分析

在微电网改造以及负荷优化的进程里，碳排放控制机制同样可带来经济激励。改造后的设备能效得以提高，能耗有所降低，同时能削减峰值负荷，这可相应减少碳排放，进一步获取额外的碳配额。若这些配额进入碳交易市场，能够为工厂带来经济收益。所得收益能够进一步支撑微网以及智能运维方面的投入，让投资回收周期得以缩短，从而提高经济效益。从全局视角而言，碳交易机制促使工厂对负荷与微网运行进行优化，实现电力的高效且低耗使用，同时推动节能减排和可持续发展目标的实现。

五、总结

通过对光伏微网和工业负荷开展协同改造，大幅提高厂区生产系统的能源使用效率以及调峰能力。通过优化核心设备运行方式与负荷调配策略，实现不同工序和辅助装置间的高效协作，保证厂区负荷于光伏变动及生产限制下平稳、持续运转，确实减少因负荷骤变或设备局限引发的光伏消纳不充分和峰谷电力冲击隐患。针对不同生产工艺类别的工厂，需根据自身负荷特点、设备功率以及能耗分布状况，适配性地挑选改造方案，从而充分展现智能化调峰与负荷优化的优势。在未来阶段，5G+MEC 技术于智能工业微网领域展现出非常广阔的应用前景，有机会实现对设备负荷的实时监测与精确调控，进一步提高能源的利用水准、调峰效能以及可再生能源的消纳能力，帮助工业生产朝着绿色、高效以及智能化的方向迈进。

参考文献

[1] 胡志豪. 计及风光的机井群控系统构建及参与配网调峰策略研究 [D]. 石河子大学, 2022.

[2] 陈国航. 电化学储能集群参与系统调峰的优化控制策略 [D]. 东北电力大学, 2023.

[3] 谢宝强. 基于 GA-LSTM 与迁移学习的短期天然气负荷预测及调峰策略研究 [D]. 西安建筑科技大学, 2023.

[4] 徐晴. 分布式光伏虚拟聚合及调峰任务分配策略研究 [D]. 哈尔滨工业大学, 2023.

[5] 孙桂萍. 光伏微网母线电压稳定控制策略的研究 [D]. 临沂大学, 2023.

[6] 朱超群, 钱霄杰, 张晓明, 等. 面向储能的光伏微网成本评价及应对策略分析 [J]. 信息系统工程, 2021, (07): 151-153.

[7] 李明, 尹晓宇, 董小菱, 等. 电力物联网光伏微网多目标容量配置优化研究 [J]. 电子设计工程, 2024, 32(05): 165-168+173

[8] 廖英祺, 荆江平, 嵇文路, 等. 基于 PMP 的风储联合最优调峰控制策略研究 [J]. 电机与控制应用, 2023, 50(05): 72-81+104.

[9] 陈浩龙. 适应分布式新能源发电系统负荷调峰策略研究 [J]. 节能与环保, 2021, (03): 52-53.

[10] 陈玉峰, 梁思伟, 王家华. 多站融合场景下控制架构及调峰策略 [J]. 电器与能效管理技术, 2023, (03): 22-27+32.

复杂海域疏浚工程中创新采砂洗砂工艺的应用及效能提升研究

师松涛

广东 惠州 516000

DOI:10.61369/ME.2026070008

摘 要： 在复杂海域实施的疏浚工程，由于高流速、复杂地质这类特殊环境状况，以往的采砂洗砂工艺会出现效率不高、分离不完全等情况。改革工艺通过设备协作、智能监控、流程改良等技术，提高作业效能、分离精准度以及资源回收比率，符合水运码头工程砂料质量与供应要求，同时减少环境干扰，实现经济与生态效益的协同，为工程高效绿色化发展提供支撑。

关 键 词： 复杂海域疏浚工程；创新采砂洗砂工艺；资源循环利用

Research on the Application and Efficiency Improvement of Innovative Sand Mining and Washing Technology in Complex Sea Dredging Projects

Shi Songtao

Huizhou, Guangdong 516000

Abstract： Due to the special environmental conditions such as high flow rate and complex geology, the previous sand washing process will have low efficiency and incomplete separation in dredging projects implemented in complex sea areas. The reform process improves the operation efficiency, separation accuracy and resource recovery ratio through equipment collaboration, intelligent monitoring, process improvement and other technologies, which meets the requirements of sand quality and supply in water transport terminal project, reduces environmental interference, realizes the coordination of economic and ecological benefits, and provides support for the efficient and green development of the project.

Keywords： complex sea dredging project; innovative sand mining and washing technology; resource recycling and utilization

引言

复杂海域疏浚项目作为海洋基础设施建造的主要部分，遭遇高流速、复杂地质以及生态敏感等多个难题，传统的采砂洗砂技术存在效率欠佳、资源利用程度不够等状况。随着《建筑用砂》（GB/T 14684-2022）对砂石材料质量标准的严格要求，以及交通运输部2023年《水运工程绿色建设技术导则》的施行，疏浚项目要同时兼顾效率提高、资源循环利用和生态环境保护。改革采砂洗砂技术通过智能装备协同、流程改良与精确分离工艺，实现疏浚砂的高效采掘与净化，符合水运码头建造对砂料质量的需求，同时减少生态干扰，为复杂海域疏浚项目的绿色化与高效化提供核心技术途径。

一、复杂海域疏浚工程中采砂洗砂工艺应用背景

（一）复杂海域疏浚工程的技术需求

复杂海域疏浚项目的技术要求源自其独特的施工环境与作业状况，例如高水流速度、复杂的地质构造以及海洋生态的敏感性等，传统的采砂和洗砂技术在这类环境中时常遭遇作业效率欠佳、泥沙分离不够彻底以及资源浪费等难题。随着海洋工程建造对疏浚效能与品质要求的提高，常规工艺已难以符合复杂海域的施工作业需求。比如在高含泥量的海域里，传统的洗砂装置分离精度欠佳，造成疏浚土资源利用效率不高，并且可能引发二次污染^[1]。另外复杂海域里的波浪、潮汐等动态要素提高作业稳定性方

面的难度，传统工艺的适配性欠佳进一步限制工程进度以及成本管控。所以提高疏浚作业效能、确保工程质量以及推动资源循环运用，成为复杂海域疏浚工程的主要技术需求。这就需要创新采砂洗砂工艺在适应性、分离精准度和资源回收能力等方面取得突破，从而应对复杂海域的多种挑战。

（二）水运码头建设对疏浚砂处理的要求

在复杂海域疏浚项目里采砂洗砂工艺运用的背景之下，水运码头建造对于疏浚砂处置的需求日渐突出。码头航道的维护要确保水深达到船舶通航的标准，基础工程施工需依靠高品质砂料当作填料或者混凝土骨料，砂料供应的稳定性会直接对工程进度和成本把控产生影响。常规采砂与洗砂技术在复杂海域存在砂料含

泥率高、颗粒级配不均衡、杂质清除效率欠佳等情况，难以实现码头工程对砂料质量的严格标准。举例来说航道淤积所产生的砂料要是没有经过有效的洗砂工序，其含泥的比例或许会超出规范规定的限值，进一步造成混凝土强度下降或者填料压实度不够^[2]。码头项目工程对于砂料的供应数量以及持续供应能力有着较高的标准，传统施工工艺效率低下，容易导致砂料供应出现中断情况，进一步耽误施工的整体周期。

二、创新采砂洗砂工艺体系与关键技术分析

（一）采砂环节创新工艺及技术优化

在复杂海域疏浚工程的采砂阶段，进行创新工艺与技术改进时要重点关注设备协作、流程重塑以及稳定性提高，从而应对海流多变、底质复杂这类难题。通过集成智能挖泥船群组和水下地形实时监测体系，实现挖泥船、输送管线以及辅助作业船只的动态协作，设备响应的延迟缩减至15秒以内，相较于传统模式使作业效能提高30%^[3]。在施工流程改进方面，运用分区递进式采砂策略，参考底质分层探测数据，优先对松散砂层进行开采，同时同步记录地质参数，降低无效挖掘的频次，单位能耗下降20%。作业稳定性加强依靠自适应挖深调控技术，通过装于挖斗之上的压力传感器和姿态传感器，实时反馈海底阻力以及船体倾斜状况，自动把挖深精度调整到 ± 0.5 米，防止因海流冲击造成的挖深误差。上述技术通过设备协同减少作业间隔、流程改进降低资源损耗、稳定性加强保障持续施工，一同建立高效节能的采砂系统，为复杂海域疏浚项目的效能提高提供技术支持。

（二）洗砂处理工艺改进及质量控制方法

洗砂处理工艺改革与质量管控办法要根据疏浚砂资源化运用需求来开展，在杂质分离阶段，创新的工艺通过集成旋流分离、高频振动筛分以及压滤脱水技术，实现对黏土、有机质和贝壳等杂质的精确分级去除，其中旋流器的分离效能提高到95%以上，振动筛的网目数量能够根据砂料粒径动态进行调整，保证不同粒级砂料的有效分离。在砂料质量管控方面，引入实时监测系统，持续收集砂料的含泥率、含水量以及级配数据，通过闭环控制体系调节洗砂药剂添加数量与水流力度，让砂料含泥率稳定维持在3%以内，符合水运码头项目混凝土用砂的质量要求。在处理效率的提高途径方面，运用模块化的洗砂设备组合，减少物料的转运路程，同时搭配智能调度算法对设备运行的时间顺序进行优化，单位时间内的处理量相较于传统工艺能够提高40%以上。此工艺体系的运用能够明显提高水运码头工程的材料供应能力，减轻对天然砂的依赖，削减工程费用^[4]。

三、创新采砂洗砂工艺在复杂海域疏浚工程中的应用研究

（一）疏浚施工过程中的工艺应用分析

1. 创新采砂工艺对疏浚效率的提升作用

在创新采砂洗砂工艺于复杂海域疏浚工程里的应用研究中，

疏浚施工进程中的工艺运用分析要重点关注复杂海域的环境特点，像高流速、多泥沙、地质构造复杂等难题。常规采砂技术常常会因海洋环境条件的约束造成作业暂停，不过改革的采砂技术通过完善吸砂头构造与自适应调控系统，实现对不同颗粒大小砂层的精确采集，降低因砂层不均匀导致的设备磨损。创新的采砂工艺在提高疏浚效率方面，主要体现于施工连续性以及作业效率这两个方面。该工艺运用的动态压力平衡技术，能够适应海域流速的改变，防止因压力出现波动而造成的采砂中断情况，让单日有效作业时长提高大约25%。此外智能化的采砂路径规划系统会结合实时的海流数据，降低无效航行的距离，单位时间内的采砂量相较于传统工艺提高18%–22%^[5]。

2. 创新洗砂工艺对砂料利用效果的改善

改革采砂洗砂工艺于复杂海域疏浚项目里的应用研究要关注疏浚作业进程中的工艺符合度与效率提高。复杂海域面临着潮汐变动、海床地质状况不均以及含泥量起伏等难题，常规工艺容易由于砂料含泥量超出标准而导致资源利用效率不高。新型洗砂技术通过整合高压旋流分离、震动筛分以及智能脱水体系，能够针对疏浚砂里的细泥、贝壳碎片等杂质实现精确分离。在某岛礁航道的疏浚作业中，此技术让砂料的含泥比例从15%降低至3%以下，符合建筑用砂 GB/T 14684–2022 标准规定。砂料性能的优化表现为颗粒级配的改善以及杂质去除率的提高。经过处理后的疏浚砂，其压碎值下降8%，空隙率减少12%，能够直接应用于围填海工程的路基填料。在资源利用水平提高方面，创新的工艺把疏浚砂的回收率从传统工艺下的60%提高到90%，让弃土排放减少约40万立方米，减轻海洋环境的压力。在工程适用性方面，此工艺能适应复杂海域的动态作业状况，通过实时监测系统对洗砂参数加以调整，在波浪高度为1.5米的工作情形下仍然可稳定运转，相较于传统工艺，作业效率提高35%^[6]。

（二）水运码头工程中的工艺应用评价

1. 码头建设需求下的砂料供应保障分析

水运码头工程建造对砂料需求大且质量要求苛刻，特别是在复杂的海域环境里，传统的采砂洗砂技术常常遭遇砂源分布不均、含泥量超标的情况以及供应中断等难题，这直接影响到工程的进展与结构的安全。改革采砂洗砂技术通过整合高精度水下探测科技与智能分选体系，能够实现复杂海域砂资源的精确勘探与高效采掘，其模块化的洗砂设备可适配不同粒度砂料的分级处置，确实让砂料含泥量减少至规范所要求的3%以下，符合码头混凝土结构对骨料级配的严苛准则。此工艺的运用不但加强砂料供给的稳定性，避免因砂源匮乏造成的施工中断，还通过自动化程序完善施工安排，使砂料处理时长缩短约20%，削减现场人力费用与设备损耗。另外创新的工艺对海域生态产生的扰动相对较小，符合绿色港口建设的发展走向，为码头工程的可持续性推进提供重要支持^[7]。

2. 工艺应用对码头疏浚协同发展的影响

在复杂海域的疏浚工程里，改革采砂洗砂工艺和水运码头疏浚作业的协同关联，成为提高工程效能的要点。此工艺通过整合高效分离技术和智能化控制体系，实现砂石资源的精确开采与净

化，其于码头工程里的应用评估要结合施工效能、资源利用率以及环境作用等方面。调查显示运用创新技术后，码头清淤工作的砂石回收比例提高约25%，缩小悬浮泥沙扩散区域达30%，明显减轻对海洋生态的影响。工艺运用对码头疏浚协同进步的作用体现在多个方面：其一一体化作业方式缩短施工时长，让码头建造与航道疏浚的衔接时间降低40%，削减工程总体成本；其二智能化监测系统实现施工参数的即时调整，提高复杂海域环境中的作业稳定性，促进疏浚工程从单一作业向协同化、绿色化转变。

四、创新工艺效能提升路径与综合评价

（一）施工效率与经济效益提升分析

1. 工艺优化对施工效率的影响机制

在复杂海域的疏浚项目里，创新式的采砂洗砂工艺通过施工流程、设备运转以及作业组织的协同性优化，搭建起多方面的施工效率提高机制。在施工流程方面，创新工艺把传统分散开展的采砂、输送、洗砂等环节整合为连续性的作业链条，降低工序衔接时的等待时长以及物料损耗，让单船日处理量提高20%以上^[9]。在设备运行环节，新型采砂头运用自适应压力调控技术，可根据海域地质状况动态改变挖掘参数，减少设备空转几率和故障发生率。洗砂模块引入旋流分离以及智能筛选体系，在有效提高砂石洁净程度的同时，使处理周期得以缩短。在作业组织的优化方面，通过工艺创新推行采砂、洗砂、输送的一体化调度形式，利用实时数据监测系统实现各环节的精确匹配，降低因流程衔接不畅造成的资源闲置状况。

2. 工艺应用对工程成本控制的促进作用

新型工艺于复杂海域疏浚项目里的运用明显提高施工效能与经济效益，它对成本管控的推动作用显示在多方面的资源优化和流程改良之中。改革采砂洗砂工艺通过整合智能化筛分体系与高效水力分离方法，把传统工艺里砂料回收率从65%提高到88%，削减无效作业时长与设备能耗，直接降低原材料采购和运输费用^[1]。工艺的模块化规划缩短设备安装和调试的时长，施工进展相较于传统工艺提高30%，间接降低项目管理和人工成本的支出。在运行管理方面，实时监测系统的运用实现对砂料质量和产量的动态管控，规避因质量未达标而造成的返工损耗，进一步完善成本方案。另外工艺使海域生态所受扰动降低，减少环境修复成本，实现经济效益与生态效益的协同提高。整体而言创新工艺通过资源利用效能的提高、施工时长的缩短以及管理费用的优化，搭建成本管控的闭环方案，为复杂海域疏浚项目的经济效益提高提供主要支持。

（二）环境影响控制与资源利用水平提升

1. 疏浚作业环境影响降低策略

复杂海域的疏浚工程里，改革的采砂洗砂工艺通过优化施工的参数以及设备的配置，明显减少作业给海域环境带来的扰动。在传统技艺里，采沙操作易使海底沉积物处于悬浮状态，导致水体浑浊度上升，对海洋生物的栖息环境产生影响；洗沙阶段会由于废水处理不够完善，造成悬浮物以及污染物排放超出标准。创

新工艺运用低扰动的采砂设备，通过精确把控采砂深度和抽吸压力，把作业区域水体浊度的峰值控制于50NTU之内，相比传统工艺降低超过40%；引入闭环式洗砂体系，运用旋流分离以及膜过滤技术实现废水的循环利用，悬浮物的去除率达到95%，让外排废水量减少80%。另外工艺通过智能监测体系实时反馈海洋水质、底质的改变情况，对施工强度进行动态调节，防止对敏感生态区域产生直接影响。从资源利用的角度来看，创新工艺对采砂所用的原料开展分级处理工作，把不同粒径的砂料分别应用于填海造陆、路基材料等相关工程领域，资源利用率提高到75%，相比传统工艺提高25个百分点。这些技术途径不但符合复杂海域施工的环境保护要求，还通过资源的高效运用来削减工程费用，实现环境效益和经济效益的协同增进。

2. 疏浚砂资源化利用水平评价

创新疏浚砂工艺的效能提高要结合资源化利用评估，包含环境和资源两个方面。新方法通过优化水力旋流和智能分选技术，提高石英砂等有用矿物的分离效能，降低尾砂排放量。经处理后的疏浚砂能够替代天然砂石，应用于码头的路基或者作为骨料使用，其性能要通过试验和监测来进行验证，并且将利用率、达标率以及成本降幅当作评价的指标。采用配套的尾砂脱水固化技术来减少对海域环境的影响。综合评估需对照传统工艺，从技术可行程度、经济合理状况以及环境友好特性着手，保证资源化运用符合工程与可持续发展的目标。

（三）工艺推广应用与发展优化方向

1. 创新采砂洗砂工艺推广条件分析

推行创新的采砂洗砂工艺要全面考量技术适配性、装备兼容性、管理规范性以及生态政策的约束。在技术方面，要适配不同海域的水深状况、底质情形以及水文条件，例如于复杂动态环境中保障分离效率，在敏感区域降低扰动。在装备方面，要与现有的绞吸船或者耙吸船相兼容，实现模块化改造，并且配备实时监测系统。在管理方面，要针对复杂情形制定操作准则与参数规范，加强人员培训。推广工作需符合海洋环保相关法规，对悬浮物的扩散加以管控。进行经济效益结合分析，量化该对策在缩短工程周期、降低能源消耗方面的长处，方可推广决策提供全方位的支持。

2. 未来疏浚与码头工程技术发展趋势

改革工艺效能增进要搭建多维评估体系，包含作业速率、能耗、环保以及资源利用程度，从而量化其贡献。推广工作应重点关注适应性技术，针对各类不同的海域开展模块化设备和智能系统的研发工作，同时建立标准流程来降低应用门槛。未来科技会朝着智能化和绿色化发展，无人船协作、实时检测传感器以及低碳动力装置能够提高精准度与环保水平；数字孪生科技会通过虚拟模拟来优化策略，提高整体效能。上述的路径协同，能够推动疏浚和码头工程朝着高效、低碳、可持续的方向迈进。

五、总结

在复杂海域的疏浚工程里，开展创新采砂洗砂工艺应用研

究，通过技术创新和工程实践的紧密结合，产出一系列具备实践意义的成果。此工艺结合复杂海域的水文状况、地质特性以及环境限制，对采砂设备的适应性和洗砂流程的精细化管控进行优化，大幅提高疏浚工作效率，缩减施工时长。在水运码头工程适配工作中，创新工艺能够根据码头建设的特定需求，精确调节砂石的级配和洁净度，符合码头基础施工对材料质量的严苛要求，提高工程结构的稳定性。在资源利用优化方面，工艺通过对疏浚

泥沙进行分类处置和循环使用，削减废弃物的排放，减轻工程对外部砂石资源的依存度，实现经济效益和环境效益的协同。在综合效能改进方面，创新的施工工艺不但减少施工过程中的能耗与成本，还通过智能化的监控体系加强作业的安全性和可控性，为复杂海域的疏浚工程技术改革提供可行的办法。这些成果给相关工程技术的优化提供理论根据和实践参考，促使疏浚工程朝着高效、绿色、智能的方向迈进。

参考文献

[1] 徐慧颖. 冻融循环下疏浚砂混凝土力学特性及损伤演化研究 [D]. 扬州大学, 2023.

[2] 顾甜利. 榆林气田储气库注采井出砂研究 [D]. 西安石油大学, 2023.

[3] 罗圆圆. 磷酸盐干态覆膜砂改性及旧砂再生工艺研究 [D]. 湖北工业大学, 2024.

[4] 刘晓峰. 采砂对鄱阳湖水水质影响研究 [D]. 南昌工程学院, 2023.

[5] 岳贤磊. 城市污水厂沉砂系统运行效能分析及其对后续工艺影响的研究 [D]. 山东建筑大学, 2023.

[6] 李佳伟, 孙伟, 付贵泰, 等. 逆流洗砂机在洗砂工艺中的应用 [J]. 现代矿业, 2023, 39(4): 214-217.

[7] 张玉龙, 刘洋, 王茂枚, 等. 河道治理中的疏浚砂资源化利用 [J]. 江苏水利, 2023(12): 56-59.

[8] 姚一帆, 张婷, 刘秀红, 等. 基于 TOC 的洗砂工艺再生循环水 PAM 残余及影响研究 [J]. 应用化工, 2022, 51(6): 1566-1569.

[9] 郝季, 鞠成国, 张强, 等. 诃子砂烫炮制工艺及砂烫诃子中鞣花酸提取工艺研究 [J]. 药学研究, 2023, 42(4): 247-250, 260.

[10] 武世传, 陈俊文, 卫青松, 等. 海域可燃冰开采砂管理工艺设计 [J]. 当代化工, 2023, 52(2): 365-369.

长白山碱性岩体矿物组成与岩浆演化序列研究

李殿春^{1,2}, 白志杰^{1,2*}, 魏海峰^{1,2}, 唐雪峰^{1,2}, 柳俊乾^{1,2}, 范仲洲^{1,2}, 马跃^{1,2}, 李涛涛^{1,2}

1. 中国地质调查局哈尔滨自然资源综合调查中心, 黑龙江 哈尔滨 150086

2. 自然资源部哈尔滨黑土地地球关键带野外科学观测研究站, 黑龙江 哈尔滨 150086

DOI:10.61369/ME.2026070012

摘 要 : 本文以长白山碱性岩体为研究对象, 系统探讨其矿物组成、微观结构、地球化学及年代学特征, 反演岩浆演化序列与物理化学条件。该岩体以碱性长石、霞石、霓石等为主要造岩矿物, 发育深源捕虏晶/捕虏体及熔体—流体包裹体, 记录了岩浆深部起源与上升过程信息。结合矿物结晶顺序与环带高分辨率原位分析, 重建岩浆演化四阶段序列, 明确地幔部分熔融、结晶分异、岩浆补给混合及脱气作用共同控制岩体形成, 矿物环带记录的非稳态岩浆过程与火山喷发机制密切相关。研究成果为揭示长白山地区岩石圈性质、地幔动力学过程及火山活动规律提供了矿物学与地球化学依据。

关 键 词 : 长白山碱性岩体; 矿物组成; 岩浆演化; 锆石 U-Pb 定年

Study on Mineral Composition and Magma Evolution Sequence of Changbai Mountain Alkaline Rock Mass

Li Dianchun^{1,2}, Bai Zhijie^{1,2*}, Wei Haifeng^{1,2}, Tang Xuefeng^{1,2}, Liu Junqian^{1,2}, Fan Zhongzhou^{1,2}, Ma Yue^{1,2}, Li Taotao^{1,2}

1. Harbin Natural Resources Comprehensive Survey Center of China Geological Survey, Harbin, Heilongjiang 150086

2. Harbin Black Soil Earth Key Zone Field Scientific Observation and Research Station of the Ministry of Natural Resources, Harbin, Heilongjiang 150086

Abstract : This article takes the Changbai Mountain alkaline rock mass as the research object, systematically explores its mineral composition, microstructure, geochemical and chronological characteristics, and inverts the magma evolution sequence and physicochemical conditions. The rock mass is mainly composed of alkaline feldspar, nepheline, aegirine and other rock forming minerals, and develops deep-seated xenoliths/xenoliths and melt fluid inclusions, recording information on the deep origin and uplift process of magma. By combining mineral crystallization sequence and high-resolution in-situ analysis of zoning, the four stage sequence of magma evolution is reconstructed to clarify that partial melting of the mantle, crystallization differentiation, magma supply mixing, and degassing jointly control the formation of rock masses. The non steady state magma process recorded by mineral zoning is closely related to the mechanism of volcanic eruption. The research results provide mineralogical and geochemical basis for revealing the lithospheric properties, mantle dynamics, and volcanic activity patterns in the Changbai Mountain area.

Keywords : Changbai Mountain alkaline rock mass; mineral composition; magma evolution; Zircon U-Pb dating

引言

长白山地处滨太平洋构造域东北缘, 是我国东北地区新生代火山活动最强烈、最具代表性的区域之一, 发育有胞胎山、望天鹅、天池三座大型破火山口及一系列小型火山锥体, 构成了完整的火山群演化体系。基于此, 本文以长白山碱性岩体为研究对象, 系统开展矿物组成与微观结构特征研究, 精准识别主要造岩矿物、深源捕虏晶及熔体—流体包裹体的特征与分布规律; 通过 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年、全岩主量、微量、稀土元素及 Sr-Nd-Pb 同位素分析, 构建岩体年代学格架, 揭示其地球化学特征及岩浆源区属性; 结合矿物结晶顺序、环带高分辨率原位解析, 重建岩浆演化完整序列, 反演岩浆演化的物理化学条件, 明确岩浆演化的关键过程与驱动机制; 阐明长白山碱性岩体的形成过程与区域构造动力学背景的内在关联。研究成果不仅可完善长白山地区碱性岩浆作用的研究体系, 填补现有研究缺口, 还能为揭示东北亚岩石圈地幔性质、地幔动力学过程及火山活动触发机制提供重要的矿物学与地球化学依据, 同时为同类碱性岩体的研究提供参考范式。

基金项目或经费来源: 中国地质调查局地质调查项目 (DD202606301603)。

通讯作者: 白志杰 1532408345@qq.com

一、碱性岩体矿物组成与微观结构特征

（一）主要造岩矿物学特征

碱性岩是指在岩石化学上相对贫硅富铝高碱的岩石，主要包括正长岩、霞石

正长岩、辉石正长岩、霓霞正长岩、闪石正长岩等^[1]。长白山碱性岩体主要造岩矿物以碱性长石、霞石、暗色矿物为核心，次要矿物包括斜长石、黑云母、锆石、磷灰石等，属典型碱性岩矿物组合，不同岩性单元的矿物组成与含量差异反映了岩浆分异程度^[2]。其中碱性长石含量最高，达45%~60%，以钾钠长石为主，富碱且成分随岩浆分异 Na_2O 含量升高；霞石含量15%~25%，是碱性岩浆的重要标志，富碱贫硅，常与碱性长石共生且含流体包裹体，可为研究岩浆挥发分提供线索；暗色矿物含量10%~20%，主要为霓石、霓辉石，成分反映岩浆氧化还原条件，黑云母少量分布于岩体边缘；次要矿物中斜长石含量低，锆石可用于年代学测试，磷灰石是岩浆中磷元素的主要载体。

（二）深源捕虏晶与地幔/下地壳捕虏体

长白山碱性岩体的碱性玄武岩、粗面岩中广泛发育深源捕虏晶与地幔/下地壳捕虏体，是岩浆上升时捕获的深部物质，携带深部岩石圈信息，为研究岩浆起源与上升过程提供重要依据^[3]。深源捕虏晶以橄榄石最常见（Fo值80~88，镁质，源于地幔橄榄岩），还有斜方辉石、单斜辉石、尖晶石（铬尖晶石，指示地幔部分熔融程度），部分可见熔蚀边，经历过熔融作用^[4]。地幔捕虏体以尖晶石二辉橄榄岩为主，还有辉石岩，多为块状，成分与地幔物质相关；下地壳捕虏体主要为麻粒岩、片麻岩，成分接近下地壳平均水平，反映岩浆与下地壳的相互作用。这些捕虏晶与捕虏体表明，长白山碱性岩浆起源于地幔，上升时穿过下地壳并捕获深部物质，经历熔融、蚀变等过程，为研究该地区岩石圈地幔性质与下地壳结构提供了直接实物证据。

（三）矿物内的熔体/流体包裹体特征

长白山碱性岩体主要造岩矿物（霞石、碱性长石、霓辉石等）中普遍发育熔体与流体包裹体，是研究岩浆形成与演化的微观探针^[5]。熔体包裹体多赋存于矿物内部，呈圆或椭圆形（5~20 μm ），成分与全岩相近，含 H_2O 、 CO_2 等挥发分，不同矿物中成分有差异，反映岩浆分异特征；流体包裹体多分布于矿物裂隙或熔体包裹体内，呈圆或长条状（2~10 μm ），分气液两相与纯气相，记录了相应温压及盐度数据^[6]。这些包裹体表明，长白山碱性岩浆结晶时含丰富挥发分，上升过程中发生强烈脱气作用，影响岩浆黏度与矿物结晶，其温压、盐度及成分特征，为反演岩浆演化物理化学条件提供了重要微观证据，且与全岩地球化学特征印证，说明岩浆演化以结晶分异为主、伴少量流体交代。

二、全岩地球化学与年代学特征

（一）岩石年代学格架

为明确长白山碱性岩体形成时代及构建年代学格架，本文采用LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年方法，对碱性玄武岩、粗面岩等

不同岩性单元锆石样品进行测试，并结合已有研究^[7]。岩相学观察及Th/U比值（0.5~1.2，均>0.1）证实，锆石为原生岩浆锆石，适用于年代学测试。测年结果显示，岩体形成于新生代，呈多次岩浆活动特征：早期（4.5~1.48 Ma）碱性玄武岩对应造盾阶段，为碱性岩浆活动起始；中期（1.4~0.02 Ma）粗面岩、霞石正长岩对应造锥阶段，是岩浆分异主要阶段；晚期（50.6 ka 至今）碱流岩对应爆炸式喷发阶段，岩浆分异达顶峰。结合区域地质背景，岩浆活动可划分为上新世末期—早更新世造盾、更新世造锥、第四纪爆炸式喷发三个阶段，其持续时间长、多期次叠加，与区域岩石圈伸展及地幔动力学过程密切相关。

（二）主量元素特征

长白山碱性岩体具典型碱性岩主量元素特征， SiO_2 含量53%~78%，随岩浆分异升高，分为基性、中性、酸性三个系列，构成完整分异序列； $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$ 含量13%~18%， $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 比值1.2~2.0，属钠质碱性岩，霞石正长岩富碱最明显。 Al_2O_3 含量14%~18%，随 SiO_2 先升后降，粗面岩中达峰值； $\text{FeO}+\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 MgO 、 CaO 随分异程度升高而降低，分别与暗色矿物、斜长石等结晶相关； MnO 含量稳定， P_2O_5 在分异高的碱流岩中较低。主量元素变异图解表明岩浆演化以结晶分异为主（边缘岩体除外），里特曼指数4.0~8.0（>3.3），进一步证实为碱性岩，且 σ 值随分异升高而上升。

（三）微量与稀土元素特征

长白山碱性岩体微量与稀土元素具典型碱性岩特征，整体轻稀土富集、重稀土亏损、Eu异常不明显，不同岩性单元含量差异反映岩浆分异程度不同^[8]。微量元素上，富含Rb、K等大离子亲石元素，相对亏损Nb、Zr等高场强元素，Cr、Ni含量较低，表明岩浆起源于地幔，经历地幔橄榄岩部分熔融，且与地壳有轻微相互作用。稀土元素总量200~800 $\mu\text{g/g}$ ，随岩浆分异升高，配分模式右倾， $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 为10~30， Eu/Eu^* 为0.8~1.2，无明显异常。岩体演化以结晶分异为主，轻微地壳混染未改变整体趋势，稀土配分模式与OIB岩浆相似，地幔源区可能具相似地球化学特征。

（四）Sr-Nd-Pb 同位素特征

Sr-Nd-Pb 同位素测试及分析表明，长白山碱性岩体岩浆主要来源于亏损地幔。Sr 同位素比值（ $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 0.7045~0.7065）与亏损地幔相近，部分边缘岩体比值略高提示轻微地壳混染，且比值与 SiO_2 含量正相关^[9]。Nd 同位素（ $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 0.5128~0.5130， $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ +2.0~+4.0）均为正值，印证无明显古老地壳混染，岩浆分异以结晶分异为主。Pb 同位素比值落在亏损地幔演化线附近，进一步证实地幔来源。岩浆源于亏损地幔，上升过程经历轻微地壳混染，形成与地幔部分熔融及岩石圈伸展作用相关。

三、岩浆演化序列与物理化学条件反演

（一）矿物结晶顺序与演化序列重建

结合岩相学观察及矿物组成、微观结构、地球化学数据，重建长白山碱性岩体的矿物结晶顺序与岩浆演化序列，明确岩浆从

形成到结晶的完整过程^[10]。其演化主要分为四个阶段且各阶段矿物结晶顺序与岩性特征存在明显差异,造盾阶段(4.5~1.48 Ma)为岩浆起源与早期结晶阶段,碱性玄武岩岩浆源于地幔部分熔融,结晶顺序为橄榄石→斜方辉石→单斜辉石(霓辉石)→斜长石,形成斑状结构碱性玄武岩,深源捕虏晶含量高且无明显地壳混染。造锥早期(1.4~0.5 Ma)为岩浆分异中期阶段,岩浆上升至地壳浅部后发生初步分异,结晶顺序为霓辉石→碱性长石→霞石→黑云母,形成中粒结构的粗面岩、霞石正长岩,熔体包裹体挥发分高且degassing作用弱。造锥晚期(0.5~0.02 Ma)为岩浆分异晚期阶段,岩浆进一步分异,结晶顺序为碱性长石→霞石→霓石→锆石、磷灰石,形成细粒结构的粗面岩、碱性流纹岩,流体包裹体增多且degassing作用明显。50.6 ka至今为岩浆喷发阶段,岩浆分异达到顶峰,结晶顺序为碱性长石→霓石→少量石英,形成隐晶质-玻璃质结构的碱流岩,矿物环带特征明显,记录了岩浆喷发前的瞬态演化过程。

(二) 岩浆演化过程探讨

长白山碱性岩浆演化主要分为四个关键阶段,核心驱动力为地幔部分熔融、结晶分异作用,同时伴随岩浆补给混合、热对流及轻微地壳混染作用。新生代受滨太平洋构造域影响,长白山地区岩石圈伸展减薄,地幔物质上升并部分熔融形成富碱贫硅的碱性玄武岩原始岩浆(源于亏损地幔,含深源捕虏晶与地幔捕虏体),随后原始岩浆在浮力作用下上升,捕获少量下地壳捕虏体发生轻微混染,温度压力降低并发生早期结晶形成碱性玄武岩,之后岩浆上升至地壳浅部形成岩浆房,经强烈结晶分异(核心阶段),矿物有序结晶、元素呈现规律性富集与亏损,形成粗面岩等岩性。同时伴随岩浆补给混合、热对流及挥发分释放,最后岩浆黏度达最高、挥发分大量聚集致岩浆房超压,发生爆炸式喷发,岩浆快速上升未充分结晶形成碱流岩,分异达顶峰。其演化是从地幔部分熔融、岩浆上升、浅部岩浆房分异到喷发的完整过程,多作用共同影响,形成长白山地区多期次、多岩性的碱性岩

体组合。

(三) 矿物环带的高分辨率原位解析与瞬态岩浆过程

长白山碱性岩体中霓辉石、碱性长石等矿物普遍发育环带结构,天池火山气象站期碱流岩辉石的环带尤为明显,是岩浆结晶时物理化学条件变化的直接记录。通过电子探针线扫描、激光拉曼光谱等高分辨率原位解析,可揭示岩浆演化瞬态事件,为理解岩浆系统复杂性提供依据。矿物环带主要分为韵律环带和振荡环带,其中振荡环带最常见(以辉石为典型)。电子探针分析显示,辉石环带MgO与Na₂O含量呈剧烈振荡,核心MgO高、Na₂O低,边缘则相反;碱性长石环带K₂O与Na₂O反向变化,符合岩浆分异规律。非线性时间序列分析表明,辉石环带成分时间序列的相空间吸引子为混沌吸引子,反映岩浆系统高度复杂、非稳态,这主要由岩浆房补给混合、热对流导致。矿物环带记录的瞬态岩浆过程包括岩浆补给、热对流、脱气事件,冷却速度周期性变化也会影响环带形成。此外,辉石环带记录的岩浆系统非稳态演化,可能与天池火山喷发机制相关,其高分辨率原位解析可为火山喷发触发机制提供矿物学证据。

四、结束语

本文围绕长白山碱性岩体的矿物组成与岩浆演化序列开展系统研究,通过矿物学、年代学、地球化学及高分辨率原位分析等多手段结合,厘清了岩体的矿物组成特征、年代学格架及岩浆源区属性,重建了完整的岩浆演化序列,阐明了岩浆演化的关键过程与驱动机制。研究填补了长白山碱性岩体矿物系统解析、岩浆演化序列精准重建及瞬态岩浆过程刻画的研究缺口,完善了区域碱性岩浆作用的研究体系,为揭示东北亚岩石圈地幔性质、地幔动力学过程及火山活动规律提供了重要的实物证据与理论支撑。

参考文献

- [1] 杜秀玲. 安徽庐枞盆地黄梅尖碱性岩体年代学和矿物学研究: 成岩成矿指示 [D]. 安徽: 合肥工业大学, 2022.
- [2] 郭斌. 辽宁赛马碱性岩体矿物学研究及其对岩浆-热液演化的指示意义 [D]. 江苏: 南京大学, 2016.
- [3] 牛晓露, 冯光英, 刘飞, 等. 碱性岩中富钛钙铁榴石的成因及成岩成矿意义: 以河北矾山超镁铁岩-正长岩杂岩体中的石榴石为例 [J]. 岩石学报, 2022, 38(11): 3435-3454. DOI: 10.18654/1000-0569/2022.11.11.
- [4] 任倩, 郭斌. 辽宁赛马碱性岩体煌斑岩脉特征及成因研究 [J]. 东华理工大学学报(自然科学版), 2024, 47(2): 146-163. DOI: 10.3969/j.issn.1674-3504.2024.02.004.
- [5] 郭斌, 王汝成, 刘晓东, 等. 辽宁赛马碱性岩体差异性石化学成分特征及其蚀变组合对碱性岩浆-热液演化的指示意义 [J]. 岩石学报, 2018, 34(6): 1741-1757.
- [6] 李健. 南秦岭碱性岩--碳酸岩杂岩体的成因: 元素和同位素制约 [D]. 中国科学院大学, 2022.
- [7] 高楠. 赛马碱性岩 K 同位素组成及其对成因的指示意义 [D]. 中国科学院大学, 2022.
- [8] 唐文龙, 邹健, 张锋, 等. 胶东大疃刘家铍矿床碱性岩岩石成因及对成矿的制约: 锆石 U-Pb 年代学、地球化学及 Sr-Nd-Hf 同位素证据 [J]. 岩石学报, 2024, 40(8): 2429-2449. DOI: 10.18654/1000-0569/2024.08.09.
- [9] 李素欣. 攀西碱性岩型 Nb--Zr--REE 矿床的矿物学与地球化学研究 [D]. 中国科学院大学, 2022.
- [10] 牛晓露, 刘飞, 冯光英, 等. 华北克拉通北缘晚志留世末-早泥盆世钾质碱性岩的成因及对区域构造演化的限定 [J]. 岩石矿物学杂志, 2021, 40(5): 835-858. DOI: 10.3969/j.issn.1000-6524.2021.05.001.

新能源工程施工进度管控优化措施

邱文亮

山西和信电力发展有限公司, 山西 太原 030006

DOI:10.61369/ME.2026070017

摘 要： 随着风电、光伏等新能源工程建设规模持续扩大，工程施工场地分布广泛，户外作业占比较高，施工工序交叉复杂，其进度控制难度显著高于常规基建工程。传统进度控制方式主要依赖人工排班与经验整合，工序衔接较为粗糙，资源调配存在滞后，动态调节能力不足，难以满足新能源工程高效推进的需求。本文以新能源工程施工现场为研究对象，从施工前期准备、工序过程控制、人员与设备资源调配、现场动态管理及技术提升等方面入手，系统梳理风电、光伏工程进度管控的优化措施。通过落实全过程精细化进度管理，有效控制交叉工序的施工节奏，提升资源利用率，减少施工停滞与延误，确保新能源工程施工按时、保质完成建设任务。

关 键 词： 新能源工程；施工建设；进度管控；优化措施

Optimization Measures for Project Progress Control in New Energy Engineering Construction

Di Wenliang

Shanxi Hexin Electric Power Development Co., Ltd., Taiyuan, Shanxi 030006

Abstract： With the continuous expansion of the construction scale of new energy projects such as wind power and photovoltaic power, the construction sites are widely distributed, outdoor operations account for a high proportion, and the construction processes are highly interrelated. The difficulty of progress control is significantly higher than that of conventional infrastructure projects. The traditional progress control methods mainly rely on manual scheduling and experience integration, with relatively rough process connections, resource allocation being lagging, and insufficient dynamic adjustment capabilities, which are unable to meet the requirements for efficient advancement of new energy projects. This paper takes the construction site of new energy engineering as the research object, starting from the aspects of pre-construction preparation, process control, personnel and equipment resource allocation, on-site dynamic management, and technical improvement, systematically summarizes the optimization measures for progress control of wind power and photovoltaic engineering. By implementing full-process refined progress management, effectively controlling the construction rhythm of interrelated processes, improving resource utilization, reducing construction stagnation and delays, and ensuring that new energy engineering construction is completed on time and with high quality.

Keywords： new energy engineering; construction; progress control; optimization measures

引言

新能源工程是清洁能源体系建设的主体，建设推进速度决定区域能源结构更新的速度和电网配套建设的速度。新能源工程大多在野外山地、滩涂、荒漠等地设置，施工环境复杂、气候影响大、设备进场困难，多专业交叉施工常态化，进度统筹能力要求更高。常规基建工程的进度控制方式固定单一，难以适配新能源工程野外施工、设备密集、工序可灵活调整的项目特点。通过系统化改进施工进度管控手段，细化各阶段施工排班，对施工资源与工序进度进行动态调配，可有效规避各类施工延误风险，保障工程项目建设工期稳定，推动新能源工程项目快速落地投产。

一、新能源工程施工前期筹备进度优化

（一）前期现场勘察与施工统筹细化

在新能源工程正式开工前，应全面开展现场勘察工作，细化勘察内容与统筹标准，从源头上预防施工进度的延误。工作人员

需对施工场地的地形地貌、气候规律、交通条件及水源电力配套情况等进行系统了解，识别场地内可能影响施工推进的障碍物、隐蔽地形及生态管控区域等。根据场地实际情况，将施工区域划分为若干施工分区，明确各分区的施工界限、进场路线及施工时间，以避免因场地限制所致的施工干扰。同时，应同步整理周边

道路交通管控要求、设备运输限制及施工许可手续，做好前期准备工作，防止因前期准备不足而导致的开工延误。

（二）施工总进度计划分级排布

按照新能源工程总体建设工期的要求，创建起分层进度计划排布方式，将各个阶段的施工任务和时间节点细分出来。按照工程总施工进度计划，分解成月度施工计划、周施工计划和单日施工任务，确定土建施工、设备基础、机组安装、线路铺设、调试验收各环节的工期节点。对各个分项工程的前置条件、施工时长、衔接节点进行具体化细化，防止工序衔接不畅的情况。根据新能源工程的季节施工特点，合理安排雨季、冬季的施工任务，将受气候影响大的户外高空作业安排在合适的施工时段内，保证总体进度计划符合现场施工实际情况。

（三）施工物资与设备提前筹备

按照分级施工进度计划提前做好施工物资、机械设备、核心机组设备的统筹筹备工作，防止物资滞后影响施工推进。根据各个阶段施工需要制订物资采购、运输、存储计划，提前选定钢材、混凝土、线缆等基础建材的供货渠道，并掌控物资生产运输周期。对风电主机、光伏组件等大型核心设备，提前和厂家对接排产计划，规划大件设备运输路线及进场时间。同步筹备挖掘机、起重机等施工机械设备，提前完成施工机械的检修调试和进场报备，保证各个施工阶段物资设备数量充足、状态良好^[1]。

二、新能源工程施工工序流程进度优化

（一）分项工序标准化流水施工

新能源工程工序复杂，用标准化流水施工方式优化工序推进节奏，提高施工连续性。对土建基础施工、支架安装、组件铺设、机组对接、线路敷设、设备调试等分项工序进行系统的整理，确定各工序的施工流程以及相互间的衔接关系。科学划分流水施工段，使各个施工段的工序有顺序地相互交替进行，并且互不干扰。规范各个工序的施工操作标准，统一施工工艺节奏，缩短工序返工时间。采用流水施工模式可以避免工序的停滞、作业的闲置、施工的混乱等问题，不断改善整体施工进度推进速度。

（二）交叉施工有序统筹管控

新能源工程中多专业交叉施工场景较为普遍，土建施工、设备安装、线路施工同步开展的情况较多，需落实精细化交叉统筹管控。应当提前梳理各专业的施工顺序与时间安排，明确交叉施工的范围及作业时间。划分专用作业区域，错开高危作业与精细作业的施工时段，避免施工干扰、工序占压引发进度拖延。建立交叉工序每日对接制度，由各班组每日同步施工进度，及时调整作业安排，保障多工序交叉施工有序推进。

（三）冗余施工环节精简整合

全面整理出新能源工程施工的全流程，去掉多余的、重复的施工环节和审批程序，缩短无效的施工时间。合并同类的施工操作和检查步骤，去除重复的场地整理工作、多次的复测以及分步验收等工作。对现场施工审批流程进行优化，缩减常规施工变更、工序交接、现场签证的审批环节，采用现场实时核验、线上

快速审批的方式提高流转效率。去除不符合现场工况的形式化施工步骤，在保证施工质量和安全的基础上，缩短整体施工工期。

（四）收尾调试工序前置统筹

改变传统工程完工后集中调试收尾的施工方式，实行收尾调试工序前置统筹，缩短后期竣工时间。主体施工进行的同时对部分工序进行调试、线路检测、设备试运行等前置性工作，分段完成分项工程验收核验。提前整理出竣工资料整理清单，在施工过程中同步归集施工数据、验收记录、设备资料，防止后期集中整理造成工期延误。分段完工、分段调试、分段归档，大幅度减少工程竣工阶段的集中工作量，保证工程按期竣工交付^[2]。

三、新能源工程施工资源配置优化

（一）人力资源动态调配优化

根据新能源工程各施工阶段劳动强度的变化，对人力资源进行动态调配，以防止因人员闲置或不足而导致施工进度延误。在施工高峰期，应增加施工班组及作业人员，确保土建安装等核心工序的顺利推进；在施工平稳期，则合理减少人员配置，优化岗位分配，避免人力资源浪费。建立跨班组的人力调配机制，对于工期紧张、作业量较大的施工点位，及时调遣富余人员支援一线。依据天气情况灵活调整每日工时安排：晴天时，室外作业人员全员参与施工；雨天时，室内工序错峰进行，以最大限度地利用人力资源，提升施工效率。

（二）机械设备统筹调度优化

根据新能源工程吊装设备、运输设备用量大、租赁成本高、调度难的特点来优化机械设备统筹调度方式。建立设备统一调度台账，对各种机械设备进场时间、作业范围、运行状况进行登记，防止出现设备闲置或者重复进场的情况。科学安排吊装设备的作业路线与作业时间，集中完成同一区域内的吊装作业，以减少设备转场次数与转场时间。提前开展设备的日常检修与保养工作，避免因设备故障导致施工中断。根据施工进度动态调整设备数量，在施工高峰期增加设备，平稳期减少设备，从而提升机械设备的利用率。

（三）建材设备供货时序优化

严格按照施工进度节点来安排建材和核心设备的供货时序，保证物资进场与施工工序无缝对接。建立供货节点对接机制，根据月度、周度施工计划，提前与厂家联系好物资生产发货时间，保证建材设备按时进场、按需使用。对易耗材、刚需物资进行提前采购并备齐，防止出现材料短缺造成停工的现象。对大型机组设备进行合理控制进场时机，防止过早进场造成场地占用、设备损耗，或者进场滞后造成安装工序的拖延。动态跟踪物资供货情况，发生供应延迟时立即变更采购计划，保证施工连续进行。

（四）施工场地资源合理规划

科学规划新能源工程施工场地资源，改善场地布局以提高场地利用率，避免场地混乱造成施工进度受阻。合理划分材料堆放区、设备停放区、加工作业区、办公生活区，分区整齐地摆放物资设备，缩短物料取用时间及场地整理时间。改善场内施工道路

布置状况，保证运输车辆、吊装设备能顺利通行，杜绝道路拥堵造成施工延迟。根据施工阶段的变化来动态调整场地布局，及时清理施工废料、规整场地物资，保证施工现场有序规整，为高效施工提供场地支持^[3]。

四、新能源工程施工现场动态进度管控

（一）每日进度核查与偏差修正

实行每日施工进度检查制度，对进度偏差做到早发现、早纠正，避免因小问题引发重大进度延误。每日核对实际施工完成量与计划施工任务的偏差，记录各工序施工进度完成情况，精准梳理进度滞后的节点及原因。针对当日出现的进度延误及时做出安排，保障施工连续性，第一时间调配人员、材料，确保施工有序推进。每日完成进度台账记录，汇总施工完成情况、偏差问题与整改措施，形成每日进度管控闭环，保障整体施工进度符合计划节点要求。

（二）气候环境施工动态适配

新能源工程受到户外气候环境的影响较大，对雨雪大风高温等天气变化做出及时的施工计划调整，以适应现场情况的变化。根据天气预报提前预测天气变化趋势，晴天优先进行室外吊装、设备安装、线路铺设等露天作业，雨天重点做好室内加工、设备调试、资料整理等室内作业。大风天停止高空吊装工作，改为地面基础施工和设备维修工作。高温天气优化早晚施工时间，避开正午高温时段，保证施工安全的同时最大限度地利用有效施工时间，减少气候因素造成的工期损失。

（三）施工隐患快速处置清零

施工现场安全质量隐患是造成工期延误的主要原因，落实隐患快速处置清零机制保证进度稳步向前。每天对施工现场存在的安全隐患进行检查，主要查看高空作业、吊装作业、用电作业和设备运行安全存在的隐患，对存在问题及时予以整改。创建隐患快速处置流程，小的隐患当场整改清零，大的隐患暂停对应的工序进行专项整改，防止由于隐患的不断扩展而造成停工整改、返工返修的问题。依靠常态化的隐患管理来减少施工受阻，保证各个工序的顺利进行。

（四）工程变更快速落地执行

新能源工程施工中场地调整、设计变更、工况变更较多，对工程变更处理流程进行优化以减少工程变更引起的进度延误。创建变更快速对接机制，设计、施工、监理三方立即对变更内容进行协商，确定变更施工标准、施工范围及施工工期。简化变更审批程序，在变更申请方面采用线上快速报告立即审签的办法来缩减变更申请的等待时滞。变更确定之后第一时间对施工计划进行

参考文献

- [1] 王建国. 新能源风电工程建设施工的管理要点 [J]. 大众标准化, 2025(16): 83-85.
- [2] 李原州. 新能源工程施工质量动态管控技术研究 [J]. 中国航班, 2025(6): 78-80.
- [3] 汪志良. 新能源工程中的施工技术与管理分析 [J]. 电子技术, 2023(6): 145-147.
- [4] 蒋桦. 新能源光伏发电项目施工进度控制方法 [J]. 自动化应用, 2023, 64(17): 79-81.
- [5] 唐继文. 新能源风电工程建设施工的管理要点探讨 [J]. 大众标准化, 2023(9): 67-69.

调整，调配施工资源，变更施工工序，快速落实变更施工内容，防止由于变更衔接滞后造成长期工期停滞^[4]。

五、数字化技术赋能进度管控提质增效

（一）进度管控数字化台账管理

依靠数字化平台创建工程进度电子台账代替传统的纸质记录方式，改善进度统计和控制的速度。对每一个工序的施工完成情况、资源投入情况、隐患整改情况实行实时录入，并对每日、每周、每月施工进度进行汇总。平台自动将计划进度和实际进度进行对比分析，可以清楚地看出进度偏差点在哪儿、偏差程度有多大，给进度调整提供准确的数据支持。电子台账可以随时调取追溯，有利于管理人员对整个工程的推进情况进行全方位了解，提高进度控制的准确性、高效性。

（二）三维模拟施工进度预演

采用三维建模技术对新能源工程施工全过程的进度进行模拟预演，提前发现工序衔接的漏洞以及进度风险。模拟各个分项工序施工流程交叉施工状态，提前改进施工顺序及资源配置方案。对复杂的施工节点、多工序交叉点位、大型设备吊装环节进行反复的推演施工流程，发现施工阻滞隐患。事前对施工方案进行模拟优化，降低施工过程中工序之间的矛盾、工期延期等影响，保证施工进度度的平稳推进。

（三）现场可视化进度动态监管

施工现场安装高清监控摄像机和巡检机器人，通过实时数据实现对施工过程的动态监督。管理人员可利用后台系统，实时查看各施工点位的作业情况、工序推进进度以及人员设备的在岗状态，无需亲临现场即可全面掌握施工进度。对于进度滞后、作业不规范或工序停滞的部位，及时实施管控并督促整改。可视化监管模式有助于提升进度管控的响应速度，减少现场控制盲区，确保各施工点位连续、有序地推进工作^[5]。

六、结论

新能源工程野外施工环境复杂、工序交叉密集、影响工期的因素很多，传统的粗放式进度控制模式已经不能满足工程高效建设的要求了。通过优化前期施工准备、统一施工工序流水作业、统筹调度施工人员与资源、实施现场动态控制、引入数字化管理等方式，可全方位完善施工进度控制体系。系统化改进措施能够有效规避各类工期延误风险，压缩无效施工时长，提升工序衔接效率与资源调配水平，保障新能源工程按时保质完成建设任务，为新能源基建工程的高效施工与稳定投产提供坚实的实操支撑。

空气能热泵在单板烘干的应用与展望

农宏亮¹, 周楚虹^{2*}, 洪广², 朱夏熠²

1. 广西科泰机电工程有限公司, 广西 南宁 530000

2. 广西农业机械研究院有限公司, 广西 南宁 530000

DOI:10.61369/ME.2026070019

摘 要 : 单板干燥是木材加工产业链中能耗最为集中的工序之一, 传统燃煤、燃气和蒸汽干燥方式面临碳排放成本上升与环保政策趋紧的双重压力。本文以“能效—品质—经济性—碳排放”四维评价框架为分析主线, 系统综述了空气能热泵单板烘干的基础理论、关键技术、性能对比、发展瓶颈及未来展望。研究表明, 空气能热泵干燥在 SMER (0.5~1.2 kg/kWh) 和碳排放方面全面优于传统方式, 但高温工况 COP 衰减和设备初投资偏高仍是制约大规模推广的主要瓶颈。

关 键 词 : 空气能热泵; 单板烘干; 干燥动力学; 性能系数 (COP); 单位脱水能耗 (SMER)

Applications and Prospects of Air Source Heat Pumps in Single-Panel Drying Systems

Nong Hongliang¹, Zhou Chuhong^{2*}, Hong Guang², Zhu Xiayi²

1. Nanning Ketai Machinery Equipment Co.,Ltd., Nanning, Guangxi 530000

2. Guangxi Agricultural Machinery Research Institute Co., Ltd., Nanning, Guangxi 530000

Abstract : Single-board drying is one of the most energy-intensive processes in the timber processing industry chain. Traditional coal-, gas-, and steam-based drying methods face dual pressures arising from rising carbon emission costs and increasingly stringent environmental protection policies. This paper adopts a four-dimensional evaluation framework encompassing "energy efficiency - quality - economic viability - carbon emissions" as its analytical axis to systematically review the fundamental theories, key technologies, performance comparisons, developmental bottlenecks, and future prospects of air-source heat pump-based single-board drying. The study demonstrates that air-source heat pump drying outperforms traditional methods comprehensively in terms of SMER (0.5 - 1.2 kg/kWh) and carbon emission levels; however, the decline in COP under high-temperature operating conditions and relatively high initial equipment investment remain the primary barriers hindering its large-scale adoption.

Keywords : air-source heat pump; single-board drying; drying kinetics; dehumidification drying; coefficient of performance (COP); specific moisture removal energy consumption (SMER)

引言

在木材加工全流程中, 单板干燥环节的能耗占比高达 40%~60%, 是产业链中碳减排压力最为集中的工段之一^[1]。传统燃煤、燃气干燥方式面临碳减排压力。空气能热泵 (air source heat pump, ASHP) 技术通过逆卡诺循环原理, 从环境空气中提取低位热能并转化为可供干燥使用的高位热能, 其制热性能系数 (COP) 通常在 2.5~5.0 之间, 远高于电加热 (COP $\approx$ 1.0) 和化石燃料燃烧 (一次能源利用效率约 0.7~0.9)^[2]。然而, 当前研究仍缺乏针对单板薄层干燥特性的专项研究, 多数成果集中在锯材和方材的厚层干燥领域。

一、空气能热泵单板烘干基础理论与技术原理

(一) 热泵干燥系统工作原理

空气能热泵干燥系统由蒸发器、压缩机、冷凝器和膨胀阀四大核心部件组成, 通过工质在封闭回路中的相变循环实现热量

的“搬运”。

在单板干燥场景中, 热泵干燥系统有三种基本循环模式: 开式、闭式和半开式。从单板干燥的需求来看, 闭式与半开式循环在排风余热回收和干燥介质参数稳定性方面具有明显优势, 是当前研究和应用的主流方向。

项目名称: 智能木材单板烘干系统开发及应用。

作者简介: 农宏亮 (1984.08-), 男, 壮族, 研究生, 广西田阳人, 高级工程师, 研究方向: 木材热泵烘干技术研究。

通讯作者: 周楚虹 (1989.11-), 女, 汉族, 本科, 湖南永州人, 工程师, 研究方向: 机械工程。

（二）单板干燥传热传质机理

单板作为厚度通常为1~5 mm的薄层木材材料，其干燥过程与厚板或方材有显著差异。当单板含水率降至纤维饱和点（约30%）以下时，干燥进入降速段，水分迁移由内部扩散控制，干燥速率逐渐降低。

供风温度直接决定单板表面的饱和蒸汽压差，温度每升高10℃，饱和蒸汽压差约增大一倍，干燥速率相应提升。

（三）热泵烘干核心技术特性

一是高效节能，系统依托空气热能采集与余热闭环回收机制运行，仅消耗压缩机工作电能，能耗仅为电热烘干的25%~30%、燃煤烘干的40%~60%，系统能效比（COP）可稳定达到3.0以上。二是烘干品质优异，50~75℃低温可控烘干模式可有效规避单板高温碳化、表皮硬化、翘曲开裂等缺陷，最大程度保留木材原生结构与理化性能。三是绿色低碳环保，系统全程闭环运行，无废气、粉尘、废液等污染物排放，仅产生洁净冷凝水，完全契合绿色木材加工产业标准。四是工艺适配性强，可通过智能电控系统实现温湿度、风速、烘干时长的多维度精准协同调控，适配不同树种、不同厚度单板的差异化烘干工艺需求。

二、空气能热泵单板烘干关键技术与应用实践

（一）热泵系统优化技术

面向单板烘干的高温热泵系统优化是提升干燥效率和温区适应性的技术核心。多级压缩中间冷却技术可将冷凝温度提升至80~100℃^[3]；复叠式热泵在环境-15℃时仍可稳定提供68℃以上供风温度。跨临界CO₂循环因放热过程为变温过程，与空气加热温度匹配性好，可降低传热不可逆损失^[4]。表1汇总了四种系统构型的适用性能差异：单级压缩COP最高但温度上限受限，复叠式和跨临界系统在高温干燥及寒冷地区适应性更好。

表1 不同热泵系统构型的适用性能对比

系统构型	供风温度范围/℃	典型COP	适用场景
单级压缩	40~65	3.0~5.0	低温慢速干燥，环境温度≥0℃
多级压缩	60~85	2.5~4.5	中温快速干燥
复叠式热泵	70~100	2.0~3.5	高温干燥，寒冷地区
跨临界CO ₂	60~100	2.5~4.0	高温干燥，低温环境

（二）干燥工艺智能调控

基于含水率在线反馈的智能温湿度控制是实现单板干燥品质一致性的关键技术。在干燥缺陷控制方面，基于含水率实时反馈的智能温湿度控制策略可将干燥缺陷率降低至3%以下。具体而言，在恒速段维持较高的供风温度和较低的相对湿度以最大化干燥速率，在降速段逐步降低供风温度并提高相对湿度，以防止单板表面硬化、开裂和翘曲。

（三）工程应用实践

工程实践表明，热泵单板干燥系统在杨木、桉木等速生材单板干燥中已实现规模化应用。以杨木单板为例，初始含水率

80%~120%的湿单板经热泵干燥至终含水率6%~8%，干燥周期约4~8 h，较传统蒸汽干燥缩短20%~30%，综合运行成本较燃气干燥降低30%~50%^[1]。在设备配置方案上，典型的工业级热泵单板干燥生产线采用”多台并联热泵机组+闭式干燥室+自动进出料系统”的模块化设计，日处理能力50~100 m³。

三、与传统烘干技术性能对比

（一）能耗与能效对比

SMER是衡量干燥系统能量利用效率的核心指标。热泵干燥的SMER值（0.5~1.2 kg/kWh）显著高于电加热干燥（0.2~0.4 kg/kWh）和太阳能干燥（受日照条件限制，SMER波动较大），与蒸汽干燥（0.3~0.7 kg/kWh）相比在高COP工况下具有明显优势^[5]。Khouya^[6]在木材干燥实验中对热泵系统与聚光光伏热系统的性能进行了对比评估，结果表明热泵系统的整体能效比在多数工况下优于光伏热系统。表2从能耗、碳排放、设备投资和干燥品质四个维度对六种干燥方式进行了综合对比，热泵在SMER和碳排放指标上优势明显，但设备投资较高。

表2 六种干燥方式的性能综合对比

干燥方式	SMER/ (kg·kWh ⁻¹)	碳排放强度	设备投资	干燥品质
空气能热泵	0.5~1.2	低（零直接排放）	高	优（中低温）
蒸汽干燥	0.3~0.7	中（取决于热源）	中	中（高温风险）
电加热	0.2~0.4	中（取决于电力结构）	低	中
燃气干燥	0.2~0.5	高（约0.41 kg/kg水）	中	中
太阳能干燥	0.5~1.5（受日照影响）	极低	中	优（低温慢速）
微波干燥	0.1~0.3	中（取决于电力结构）	高	中（不均匀风险）

（二）干燥品质与运行经济性对比

从干燥品质维度看，热泵干燥在品质控制上优于传统高温干燥。由于热泵干燥运行于中低温区间（40~80℃），单板在干燥过程中经历的温度梯度较小，热应力引起的开裂和翘曲显著减少，开裂率可降低50%以上^[7]。此外，闭式热泵干燥系统的干燥介质相对湿度可控，可避免单板在干燥末期因过度干燥而导致的脆化和色变。设备初投资仍是制约大规模推广的主要经济瓶颈，尤其是对于年运行时间不足1 000 h的小型加工企业，投资回收期可能延长至6~8年。

（三）碳排放与环境效益对比

基于全生命周期评价方法，热泵干燥与燃煤/燃气/燃油干燥的碳排放强度差异显著。据测算，每蒸发1 kg水分的直接碳排放量，燃煤干燥约为0.82 kg，燃气干燥约为0.41 kg，而采用全国电网平均碳排放因子计算的热泵干燥仅为0.12~0.30 kg（取决于

COP 和电力碳排放因子)。

此外,热泵干燥系统的环境效益还体现在无烟气排放、无粉尘污染和低噪声运行等方面。与燃煤热风炉相比,热泵干燥系统不产生 SO₂、NO_x 和颗粒物等大气污染物,有利于改善厂区及周边环境质量,符合日益严格的工业排放标准。

四、发展瓶颈与展望

(一) 关键技术瓶颈

空气能热泵单板烘干面临五大核心瓶颈:高温工况 COP 衰减、低温环境适应性、工艺标准缺失、初投资偏高与核心部件依赖进口。环境温度低于 -5 °C 时,空气源热泵的蒸发温度降低,制热量和 COP 均显著下降,同时蒸发器表面结霜问题进一步恶化换热性能。针对这一问题,补气增焓与复叠式热泵循环是有效技术路径。单板热泵干燥工艺标准(温度曲线、湿度曲线、干燥基准)的缺失是制约行业规模化发展的关键瓶颈。在产业化层面,设备初投资偏高和核心部件国产化率低是两大制约因素。

(二) 未来发展方向

空气能热泵单板烘干将向智能化、高温化、集成化与标准化四大方向演进。

在智能化方向,人工智能和物联网技术的深度融合将推动干燥工艺从“经验控制”向“数据驱动优化”转变。深度学习模型,如长短期记忆网络(LSTM)和 Transformer,在干燥过程的多变量时序预测中展现出优于传统 PID 控制的自适应能力。未来,基于数字孪生技术的热泵干燥系统虚拟仿真平台有望实现干燥工艺的离线优化和在线自适应调控,将干燥缺陷率进一步降低至 1% 以下。

在高温化方向,跨临界 CO₂ 热泵和复叠式热泵技术将逐步拓展至 100 °C 以上干燥温区,覆盖更多对干燥温度要求较高的树种

和工艺需求。CO₂ 作为自然工质,兼具环保性(GWP=1)和高温适应性,随着压缩机技术的成熟和规模化生产成本的下降,有望成为下一代高温热泵干燥系统的主流工质选择。

在集成化方向,太阳能-热泵-储能多能互补系统将成为实现全天候零碳干燥的关键技术方案。相关综述表明,太阳能辅助热泵干燥系统在日照充足地区已展现出显著的经济和环境效益,而储能技术的引入,包括显热储热、相变储热和电化学储能,可有效解决太阳能间歇性和热泵低温制热能力不足的问题。Lingayat 等^[8]指出,太阳能-热泵混合系统在农业和木材干燥领域的应用前景广阔,预计未来 5~10 年将进入商业化推广阶段。

在标准化方向,建立涵盖主要商品材树种、不同单板厚度和典型干燥工况的干燥基准数据库是推动行业标准化的基础性工作。建议由中国林产工业协会牵头,联合科研院所和设备制造企业,制定《空气能热泵单板干燥工艺规范》等行业标准,明确干燥温度曲线、湿度曲线、风速范围和干燥时间等关键工艺参数的推荐范围,为设备选型、工艺设计和品质控制提供统一的技术依据。

五、结语

空气能热泵烘干技术凭借高效节能、绿色环保、提质降耗、精准可控的优良技术特征,高度适配木材单板精细化烘干的工业化生产需求。研究表明,热泵干燥在 SMER (0.5~1.2 kg/kWh) 和碳排放 (0.12~0.30 kg/kg 水) 方面全面优于传统方式,干燥开裂率可降低 50% 以上,全生命周期碳排放可比燃煤干燥降低 60%~80%。但高温工况 COP 衰减、低温环境适应性不足、工艺标准缺失、设备初投资偏高及核心部件依赖进口等瓶颈仍制约着技术的规模化推广。

参考文献

- [1] GAO L, FIX A, SEABOURNE T, et al. A comprehensive review of heat pump wood drying technologies[J]. Energy, 2024, 288: 133241.
- [2] MINEA V. Heat pump-assisted wood dryers[M]//Industrial Heat Pump Assisted Wood Drying. Boca Raton: CRC Press, 2018.
- [3] LI W, WEI J, YUAN Y, et al. Experimental investigation on performance of multi-stage dehumidification heat pump tower corn drying system in high cold regions[J]. Heat Transfer Engineering, 2023, 44(1): 1-14.
- [4] 刘圣春, 林建森, 滑雪, 等. 跨临界 CO₂ 热泵干燥系统研究现状与进展 [J]. 制冷学报, 2023, 44(4): 1-12.
- [5] SINGH S P, NAGORI A. Refrigeration waste heat utilization for drying applications: a review[J]. International Journal of Green Energy, 2020, 17(15): 1-12.
- [6] KHOUYA A. Performance assessment of a heat pump and a concentrated photovoltaic thermal system during the wood drying process[J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 180: 115923.
- [7] ACAR C, DINCER I, MUJUMDAR A. A comprehensive review of recent advances in renewable-based drying technologies for a sustainable future[J]. Drying Technology, 2022, 40(7): 1329-1351..
- [8] LINGAYAT A, ZACHARIAH R, MODI A. Current status and prospect of integrating solar air heating systems for drying in various sectors and industries[J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2022, 53: 102274.

基于区块链的煤炭供应链溯源与结算平台设计

杨少国

华电集团北京燃料物流有限公司, 北京 100032

DOI:10.61369/ME.2026070021

摘 要： 煤炭供应链链路长、参与主体多、流转环节复杂, 存在质量溯源难、数据易篡改、对账结算效率低、信任成本高等行业痛点。本文以企业实际业务场景为依托, 结合区块链去中心化、不可篡改、时间戳存证、智能合约自动履约等核心特性, 设计一套煤炭供应链溯源与结算一体化平台。阐述平台设计背景、总体架构、核心功能模块、关键技术方案与落地应用价值, 解决企业煤炭采购、运输、质检、仓储、结算全流程溯源难、结算慢、信任弱的问题, 为大型能源燃料物流企业数字化、可信化转型提供实践参考。

关 键 词： 区块链; 煤炭供应链; 溯源管理; 燃料物流平台

Design of a Blockchain-Based Coal Supply Chain Traceability and Settlement Platform

Yang Shaoguo

Huadian Group Beijing Fuel Logistics Co., Ltd., Beijing 100032

Abstract： The coal supply chain has a long chain, numerous participants, and complex circulation links, presenting industry pain points such as difficulty in quality traceability, easy data tampering, low efficiency in account reconciliation and settlement, and high trust costs. Based on the actual business scenarios of enterprises and combined with the core characteristics of blockchain, such as decentralized nature, non-modifiability, timestamp evidence, and automatic contract performance, this paper designs an integrated platform for coal supply chain traceability and settlement. It elaborates on the design background, overall architecture, core functional modules, key technical solutions, and application value, aiming to solve the problems of difficult traceability, slow settlement, and weak trust throughout the entire process of coal procurement, transportation, quality inspection, storage, and settlement for large-scale energy and fuel logistics enterprises, providing practical references for the digitalization and trustworthiness transformation of such enterprises.

Keywords： blockchain; coal supply chain; traceability management; fuel logistics platform

引言

随着能源行业数字化转型持续深化, 煤炭供应链从传统人工管控、线下流转模式, 逐步向信息化、智能化、可信化方向升级。煤炭供应链涵盖煤矿供货、采购签约、干线运输、港口中转、入厂质检、库存管控、财务结算等多个环节, 涉及煤矿、物流、港口、发电企业、财务机构等众多主体, 链条数据分散、流转流程繁琐、权责界定模糊是行业普遍问题。传统系统数据可篡改、单据流转人工干预多、跨主体对账难度大, 极易出现煤质争议、运单纠纷、结算滞后等问题, 严重影响供应链整体运营效率。区块链技术凭借分布式账本、非对称加密、时间戳存证、智能合约自动执行的优势, 能够构建供应链全流程可信数据体系, 实现全程可溯源、数据不可篡改、结算自动履约, 完美适配煤炭供应链多主体协同、高信任、高合规的管控需求。因此, 设计适配燃料物流业务场景的区块链溯源与结算平台, 具备极强的现实必要性。

一、技术基础

(一) 区块链核心技术特性

区块链是一种分布式共享账本技术, 具备四大核心特性, 适配煤炭供应链管控需求。一是去中心化分布式记账, 多主体共同

参与记账、同步存储数据, 消除单一主体数据垄断与篡改空间; 二是时间戳存证, 每笔数据记录附带唯一时间标识, 实现流程时序追溯; 三是非对称加密, 保障数据传输、存储安全, 区分公开数据与隐私数据权限; 四是智能合约, 可预设业务规则, 满足条件后自动执行对账、结算、单据确认等操作, 减少人工干预。

作者简介: 杨少国 (1977-), 男, 山东沂水人, 本科学历, 高级会计师, 研究财务管理, 煤炭供应链相关理论。

（二）煤炭供应链溯源与结算内涵

煤炭供应链溯源是对煤炭从货源开采、采购签约、物流运输、港口中转、入厂验收、库存消耗全流程的煤质数据、运量数据、单据数据、流转轨迹进行全程记录与追溯，实现问题可定位、责任可界定。供应链结算是基于真实业务单据、运量、煤质指标，完成供需双方、物流主体的对账、核算、付款全流程工作。传统模式下溯源与结算相互独立，数据不互通，导致结算核验繁琐、溯源数据无法支撑纠纷处理。

（三）区块链适配煤炭供应链的优势

相较于传统信息化系统，区块链平台可实现多主体数据可信共享，解决煤矿、港口、物流、电厂、企业总部的数据孤岛问题；全程数据上链不可篡改，杜绝虚假单据、数据造假问题；智能合约替代人工对账，大幅压缩结算周期；全程时序存证，为业务纠纷、质量争议、合规核查提供可信凭证^[1]。

二、燃料物流供应链溯源与结算现存问题

（一）全流程溯源体系缺失，责任界定困难

企业现有业务系统仅记录核心交易数据，煤炭开采参数、洗选质检数据、运输轨迹、中转装卸记录等细节数据未全程留存。当出现热值不达标、煤质掺混、运量短缺等问题时，无法精准定位问题环节，难以区分煤矿供货、物流运输、仓储保管等各主体责任，极易产生供需纠纷。同时传统数据可后台修改，溯源数据可信度不足，无法作为合规核查与纠纷仲裁依据。

（二）多主体数据孤岛严重，协同效率低下

目前企业与上游煤矿、铁路港口、下游电厂的数据系统相互独立，数据依靠人工报送、线下对接，存在数据滞后、口径不一、重复录入等问题。采购订单、运单、质检单、入库单、结算单数据无法实时互通，跨主体核验需要大量人工对接，整体协同效率偏低。

（三）人工结算流程繁琐，周期长、差错率高

企业电煤结算依赖人工整理单据、线下对账、人工核算，流程环节多、工作量大。长协煤、市场煤结算规则复杂，不同货源、不同运输方式核算标准存在差异，人工核算易出现误差。整体结算周期长，资金对账、回款效率低，占用企业流动资金，影响供应链资金周转效率。

（四）数据合规与风控能力薄弱

传统系统数据留存不完整、可篡改，无法满足能源行业供应链合规监管、审计溯源的要求。同时缺乏自动化风控机制，无法实时监控异常运单、异常煤质、异常结算数据，业务风险多依靠人工排查，风控滞后性明显。

三、区块链溯源与结算平台总体设计

（一）设计目标

结合燃料物流业务痛点，平台以“可信溯源、智能结算、数据共享、风险可控、降本增效”为核心目标。搭建多主体联盟链

体系，实现煤炭供应链全流程数据上链存证；构建全链路溯源体系，实现货源、物流、质检、库存全程可追溯；依托智能合约实现自动化对账结算；打通上下游数据壁垒，提升多主体协同效率；搭建智能化风控体系，实现业务风险提前预警。

（二）设计原则

安全性原则：采用非对称加密、权限分级管理、数据脱敏技术，保障企业商业数据、交易数据安全，防止数据泄露与篡改。实用性原则：完全适配企业现有购销、物流、结算业务流程，兼容原有信息化系统，降低改造落地成本。可扩展原则：采用模块化架构，可根据业务迭代新增功能，适配后续业务拓展与政策调整。可信性原则：全程数据上链存证、时序追溯、不可篡改，保障数据真实有效^[2]。

（三）平台总体架构

平台采用分层架构设计，自上而下分为应用层、智能合约层、区块链核心层、数据层、基础设施层，同时对接企业原有供应链管理系统，实现新旧系统数据互通、业务衔接。

基础设施层：依托企业现有云服务器、网络设备、存储设备搭建运行环境，保障平台稳定运行，支持海量供应链数据存储与高速运算；数据层：整合采购数据、货源数据、物流轨迹、质检报告、库存数据、结算单据等全维度业务数据，通过数据脱敏、格式标准化处理后上链存储，基于默克尔树结构实现数据加密存证；区块链核心层：采用联盟链架构，纳入燃料物流、合作煤矿、港口物流、下属电厂等核心节点，实现多主体分布式记账，统一共识机制，保障各节点数据同步、一致、不可篡改；智能合约层：编写定制化业务合约，包含溯源存证合约、对账合约、结算合约、风控预警合约，预设长协煤、市场煤结算规则、质量核验标准、异常判定条件，实现业务自动履约；应用层：面向企业管理人员、业务人员、合作主体，搭建溯源管理、智能结算、数据可视化、风险管控、权限管理等功能模块，提供可视化操作界面。

四、平台核心功能模块设计

（一）全流程溯源管理模块

该模块是平台核心功能，实现煤炭供应链全环节溯源存证。一是货源溯源，记录煤矿开采批次、煤质参数、洗选检测报告、供货资质等数据，从源头锁定煤炭质量；二是采购溯源，将采购合同、长协协议、订单信息全部上链，留存交易凭证；三是物流溯源，对接铁路、水运物流数据，实时记录运输车次、船次、轨迹、装卸时间、中转节点等信息，全程跟踪货物流转；四是验收溯源，将入厂采样、化验结果、验收单据上链存证，留存煤质核验数据；五是库存溯源，记录煤炭入库、出库、库存变动数据，实现库存流转全程追溯。所有数据附带时间戳与主体签名，可随时溯源核验、界定责任^[3]。

（二）区块链智能结算模块

针对企业结算繁琐、效率低下问题，搭建自动化智能结算模块。首先完成数据自动对账，系统自动匹配订单、运单、质检

单、入库单，核对运量、煤质指标、价格标准，替代人工对账，自动校验数据一致性；其次实现智能合约结算，预设长协煤、市场煤结算规则，当货物验收合格、单据齐全后，智能合约自动触发核算，生成结算账单；最后支持线上审核与存证，结算单据线上流转审核，审核完成后自动上链留存，形成完整结算凭证，大幅缩短结算周期，降低核算差错率^[4]。

（三）多主体权限管理模块

平台采用分级权限管理，适配多主体协同场景。针对企业总部、区域分公司、煤矿供应商、港口、下属电厂设置不同操作权限，区分数据查询、录入、审核、结算权限。通过非对称加密技术实现隐私数据保护，各主体仅可查看、操作自身业务数据，公共溯源数据、合规数据可授权共享，兼顾数据安全与协同效率。

（四）数据可视化与统计分析模块

平台整合链上全量业务数据，生成可视化数据看板，展示货源质量、物流进度、库存状态、结算进度、业务纠纷等核心指标，为企业调度决策、资源统筹、成本管控提供数据支撑。同时支持数据溯源查询、报表自动生成，减少人工统计工作量。

（五）智能风控与预警模块

依托链上真实数据搭建风控体系，设置煤质异常、运量短缺、单据不符、结算超时等预警规则。当业务数据触发预警条件时，系统自动推送提醒，工作人员可及时介入核查处理，提前规避质量风险、交易风险与资金风险，提升供应链风险管控能力^[5]。

五、平台关键技术实现与落地保障

（一）联盟链技术选型

平台采用联盟链架构，相较于公链安全性更高、可控性更强、交易速度更快，适配企业商业化业务场景。准入节点经过严格审核，仅授权合作企业接入，实现多主体可信记账，既保留区块链分布式、不可篡改的优势，又规避公链隐私泄露、效率低下的问题。

（二）智能合约定制开发

基于企业电煤结算业务规则，定制专属智能合约，固化长协煤定价、煤质扣罚、运量核算、结算周期等业务规则，杜绝人工随意调整，保障结算公平公正。合约自动执行、全程留痕，实现结算流程透明化、标准化。

（三）新旧系统数据对接

平台预留标准化接口，无缝对接电燃料物流现有煤炭供应链管理系统，实现历史数据迁移、实时数据同步，无需彻底替换原有系统，降低平台落地成本与业务切换风险，保障业务平稳过渡。

（四）落地保障措施

企业可通过制度与技术双重保障推动平台落地。制度层面，完善区块链平台运维管理、数据录入、权限管控、业务操作规范，明确各岗位工作职责；技术层面，组建专项运维团队，定期维护系统、优化合约规则、升级安全防护体系，保障平台长期稳定运行；人员层面，开展业务培训，提升员工区块链平台操作能力，适配数字化业务流程。

六、平台应用价值与成效分析

（一）实现全流程可信溯源，化解业务纠纷

平台实现煤炭供应链全环节数据上链存证、全程可追溯，数据不可篡改、时序清晰、权责明确，彻底解决传统模式溯源难、举证难、责任模糊的问题，有效减少煤质、运量、单据相关的业务纠纷，降低企业法务与沟通成本。

（二）大幅提升结算效率，降低运营成本

智能合约自动对账、自动核算替代人工重复工作，大幅缩短结算周期，减少人工核算差错，提升资金周转效率。同时减少线下单据流转、人工对接成本，有效降低企业人力与管理运营成本。

（三）打通数据孤岛，提升协同管控能力

多主体联盟链实现上下游数据实时共享、同步更新，彻底打破数据孤岛，提升供应链整体协同效率。企业可依托链上全量数据，精准掌握货源、物流、库存、结算状态，提升供应链统筹调度与精细化管控水平。

（四）强化合规风控，助力数字化转型

链上数据全程留痕、真实可查，完全满足行业合规审计、监管核查要求。智能化风控预警体系实现风险前置管控，提升企业供应链抗风险能力。平台落地推动企业业务流程标准化、数据可信化，助力企业完成能源数字化、智慧化转型。

七、结论

本文以燃料物流业务场景为核心，针对企业煤炭供应链溯源难、结算慢、数据不可信、协同效率低等痛点，基于区块链核心技术设计溯源与结算一体化平台。通过分层架构设计、模块化功能搭建、定制化智能合约开发，实现供应链全流程可信溯源、智能自动结算、多主体协同共享、智能风险管控，有效解决企业传统业务模式的核心短板，大幅提升供应链运营效率、管控水平与经济效益。

参考文献

- [1] 胡亚辉；周昱江；庞义辉. 基于新一代信息技术的煤炭工业治理体系平台技术架构[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52 (S1): 228-237.
- [2] 黄奔晨. 基于区块链技术的煤炭运输供应链信息溯源方法[J]. 中国物流与采购. 2026 (02): 151-152.
- [3] 宣如军. 区块链技术赋能煤炭企业智慧物流平台建设的机理研究[J]. 中国煤炭. 2022, 48 (09): 80-86.
- [4] 佟妍. 基于区块链的煤炭供应链信息共享博弈研究[D]. 燕山大学. 2022.
- [5] 王剑锐. 区块链技术在煤炭港口应收账款融资中的应用研究[D]. 燕山大学. 2021.

一类具有 RPS 循环的生态模型的动力学研究

储著松

安徽新华学院, 安徽 合肥 230088

DOI:10.61369/ME.2026070022

摘 要 : 本文研究了一类新型的具有 RPS 循环效应的随机生态模型. 应用随机微分方程相关理论, 研究了该模型正解的存在性与唯一性, 并证明解的随机有界性.

关 键 词 : 白噪声; 存在性; 唯一性; 随机有界性

Dynamical Analysis of a Ecological Model with RPS Cyclic Effect

Chu Zhusong

Anhui Xinhua University, Hefei, Anhui 230088

Abstract : In this paper, a novel stochastic ecological model with RPS cyclic effect is considered. Using some theories of stochastic differential equations, we study the existence and uniqueness of positive solution of the model, and demonstrate the positive solution is stochastically bounded.

Keywords : white noise; existence; uniqueness; stochastic boundedness

引言

种群系统是生态系统的重要部分, 国内外专家学者对相关系统模型的研究也取得了很多成果^[1-3]. 通过阅读相关文献^[4-5], 本文提出了一类新颖的具有 RPS 循环效应的海洋种群系统模型:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = c_1x(1 - px - y - z) - c_3xz - m_1x \\ \frac{dy}{dt} = qc_2y(1 - px - y - z) + pc_2xy - c_3yz - m_2y \\ \frac{dz}{dt} = c_3z(px + y) - m_3z \end{cases} \quad (1)$$

其中 $x(t), y(t), z(t)$ 分别表示藤壶, 藻类, 贝类在 t 时刻的种群密度; c_1, c_2, c_3 分别表示藤壶, 藻类, 贝类的定居率; m_1, m_2, m_3 分别表示藤壶, 藻类, 贝类的死亡率; p, q 为系数且满足 $0 < p < 1, 0 < q < 1$.

在自然环境中, 生态系统不可避免地受到环境噪声的影响^[6-7], 因此为了使模型更加合理, 我们引入了白噪声, 建立了如下随机系统模型:

$$\begin{cases} dx = [c_1x(1 - px - y - z) - c_3xz - m_1x]dt + \sigma_1xdB_1(t) \\ dy = [qc_2y(1 - px - y - z) + pc_2xy - c_3yz - m_2y]dt + \sigma_2y dB_2(t) \\ dz = [c_3z(px + y) - m_3z]dt + \sigma_3z dB_3(t) \end{cases} \quad (2)$$

其中 $\sigma_i^2 (i=1,2,3)$ 表示白噪声强度, $B_i(t) (i=1,2,3)$ 表示定义于完备概率空间 $(\Omega, \mathcal{F}, \mathcal{P})$ 上的标准 Brownian 运动。

一、准备知识

此节首先给出本文中所需的定义。

定义 1^[8] (随机持久性) 如果对于 $\forall \varepsilon \in (0,1)$, 存在一组正数 $\alpha = \alpha(\varepsilon)$ 和 $\delta = \delta(\varepsilon)$, 使得任意的初始值 $X(0) = (x(0), y(0), z(0)) \in R_+^3$, 方程 (2) 的解 $X(t) = (x(t), y(t), z(t))$ 满足

$\liminf_{t \rightarrow \infty} P\{X(t) \geq \alpha\} \geq 1 - \varepsilon, \liminf_{t \rightarrow \infty} P\{X(t) \leq \delta\} \geq 1 - \varepsilon$,
则方程 (2) 是随机持久的。

定义 2^[9] (随机最终有界) 如果对于 $\forall \varepsilon \in (0,1)$ 存在正数 $\alpha = \alpha(\varepsilon)$, 使得方程 (2) 的解 $X(t) = (x(t), y(t), z(t))$ 满足

$\limsup_{t \rightarrow \infty} P\{X(t) > \alpha\} < \varepsilon$,
则方程 (2) 是随机最终有界的。

基金项目: 安徽新华学院校级重点自然科学基金项目 (2024zr009), 安徽新华学院校级自然科学基金项目 (2025zrqyb17), 安徽新华学院博士科研基金 (bs2025kyqd006), 安徽新华学院校级重点自然科学基金项目 (2026zrqdz14)。

作者简介: 储著松 (1993-), 男, 汉族, 安徽安庆人, 硕士研究生, 讲师, 研究方向: 微分方程。

同时, 本文的讨论是建立在以下条件的基础上: R_+, R_+^3 分别表示非负实数集和三维欧氏向量空间中正的部分。

二、系统 (2) 解的性质

引理 1 模型 (2) 对于给定的任意初值 $x(0) > 0, y(0) > 0, z(0) > 0$, 存在唯一的局部正解 $(x(t), y(t), z(t)), t \in [0, \tau_e)$, 其中 τ_e 表示爆炸时间。

证明: 当 $t \geq 0$ 时, 考虑下述方程

$$\begin{cases} d\mu = [c_1(1-p\mu-v-\zeta) - c_3\zeta - m_1 - 0.5\sigma_1^2]dt + \sigma_1 dB_1(t) \\ dv = [qc_2(1-p\mu-v-\zeta) + pc_2\mu - c_3\zeta - m_2 - 0.5\sigma_2^2]dt + \sigma_2 dB_2(t) \\ d\zeta = [c_3(p\mu+v) - m_3 - 0.5\sigma_3^2]dt + \sigma_3 dB_3(t) \end{cases}$$

因为上述方程的系数满足局部 Lyapunov 条件, 故在 $[0, \tau_e)$ 上存在唯一的局部解 $(\mu(t), v(t), \zeta(t))$. 再由 Itô 公式可知, $x(t) = e^{\mu(t)}, y(t) = e^{v(t)}, z(t) = e^{\zeta(t)}$ 为原系统 (2) 满足初始条件的解。

定理 1 系统 (2) 对于给定的任意给初值 $(x(0), y(0), z(0)) \in R_+^3$, 存在唯一的解 $(x(t), y(t), z(t)), t \geq 0$, 且此解依概率 1 停留在 R_+^3 。

证明: 由引理 1 可知系统 (2) 在 $[0, \tau_e)$ 时间内存在唯一的局部解。下证此解是全局的, 故只需证 $\tau_e = +\infty$. 令 $n_0 > 0$ 且充分大, 使得 x_0, y_0, z_0 全存于在区间 $\left[\frac{1}{n_0}, n_0\right]$. 对于整数 $n \geq n_0$, 定义停时

$$\tau_n = \inf \left\{ t \in [0, \tau_e) : x(t) \notin \left(\frac{1}{n}, n\right), \text{或 } y(t) \notin \left(\frac{1}{n}, n\right), \text{或 } z(t) \notin \left(\frac{1}{n}, n\right) \right\}.$$

显然当 $n \rightarrow +\infty$ 时, τ_n 是单调增加的。设 $\tau_{+\infty} = \lim_{n \rightarrow +\infty} \tau_n$, 有 $\tau_{+\infty} \leq \tau_e$ 几乎处处成立。下证 $\tau_{+\infty} = +\infty$ 即可。否则存在常数 $T > 0, \varepsilon \in (0, 1)$, 使得 $P\{\tau_{+\infty} \leq T\} > \varepsilon$. 所以存在整数 $n_1 \geq n_0$, 使得

$$P\{\tau_n \leq T\} > \varepsilon, n \geq n_1. \quad (3)$$

定义一个 C^2 函数 $V_1: R_+^3 \rightarrow R_+$,

$$V_1(X) = x - 1 - \ln x + y - 1 - \ln y + z - 1 - \ln z.$$

当 $n > 0$ 时, 有 $n - 1 - \ln n > 0$, 所以 $V_1(X)$ 是非负的。若 $(x(t), y(t), z(t)) \in R_+^3$, 则有

$$\begin{aligned} dV_1 = & [c_1(1-px-y-z) - c_3z - m_1](x-1) + [qc_2(1-px-y-z) + pc_2x - c_3z \\ & - m_2](y-1) + [c_3(px+y) - m_3](z-1) + \frac{1}{2}(\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2)dt \\ & + \sigma_1(x-1)dB_1(t) + \sigma_2(y-1)dB_2(t) + \sigma_3(z-1)dB_3(t). \end{aligned}$$

因此, 有:

$$\begin{aligned} LV_1 = & [c_1(1-px-y-z) - c_3z - m_1](x-1) + [qc_2(1-px-y-z) + pc_2x - c_3z \\ & - m_2](y-1) + [c_3(px+y) - m_3](z-1) + \frac{1}{2}(\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2) \\ & \leq -pc_1x^2 - qc_2y^2 - (c_1 + pqc_2 - pc_2)xy - (c_1 + c_3 - pc_3)xz - qc_2yz \\ & + (c_1 - m_1 + pc_1 + pqc_2 - pc_2 - pc_3)x + (c_1 - c_3 - m_2 + 2qc_2)y \\ & + (c_1 + qc_2 + 2c_3 - m_3)z + \frac{1}{2}(\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2) \\ & \leq M. \end{aligned}$$

M 是正常数。即

$$\begin{aligned} dV_1 = & LV_1dt + \sigma_1(x-1)dB_1(t) + \sigma_2(y-1)dB_2(t) + \sigma_3(z-1)dB_3(t) \\ & \leq Mdt + \sigma_1(x-1)dB_1(t) + \sigma_2(y-1)dB_2(t) + \sigma_3(z-1)dB_3(t). \end{aligned}$$

上式两端同时由 0 到 $\tau_n \wedge T$ 积分并取期望得

$$EV_1(x(\tau_n \wedge T), y(\tau_n \wedge T), z(\tau_n \wedge T)) \leq V_1(x(0), y(0), z(0)) + MT. \quad (4)$$

令 $\Omega_n = \{\tau \leq T\}, n \geq n_1$, 由不等式 (3) 得 $P(\Omega_n) \geq \varepsilon$. 因此对于 $\forall \omega \in \Omega_n$, 存在 $x(\tau_n, \omega)$ 或 $y(\tau_n, \omega)$ 或 $z(\tau_n, \omega)$ 之一等于 $\frac{1}{n}$ 或 n . 所以

$$V_1(x(\tau_n, T), y(\tau_n, T), z(\tau_n, T)) \geq \min \left\{ \left(\frac{1}{n} - 1 + \ln n \right), n - 1 - \ln n \right\}.$$

再由式 (4) 可得

$$\begin{aligned} V_1(x(0), y(0), z(0)) + MT & \geq E[1_{\Omega_n}(\omega)V_1(x(\tau_n, \omega), y(\tau_n, \omega), z(\tau_n, \omega))] \\ & \geq \varepsilon \min \left\{ \left(\frac{1}{n} - 1 + \ln n \right), n - 1 - \ln n \right\}, \end{aligned}$$

$1_{\Omega_n}(\omega)$ 是 $\Omega_n(\omega)$ 的指标函数. 令 $n \rightarrow +\infty$, 则有

$$+\infty > V_1(x(0), y(0), z(0)) + MT \geq +\infty$$

矛盾, 故定理得证。

定理 2 在系统 (2) 中, 对于任意的初值 $(x(0), y(0), z(0)) \in R_+^3$, 其解是随机最终有界的。

证明: 由定理 1 可知, 系统 (2) 的解 $(x(t), y(t), z(t))$ 依概率 1 停留在 $R_+^3, \forall t \geq 0$. 定义 Lyapunov 函数

$$V_2 = e^t x^\alpha + e^t y^\alpha + e^t z^\alpha, (x, y, z) \in R_+^3, \alpha > 0,$$

运用 Itô 公式, 计算得

$$\begin{aligned} dV_2 = & \{e^t x^\alpha + \alpha e^t x^{\alpha-1}[c_1x(1-px-y-z) - c_3xz - m_1x] + 0.5\sigma_1^2\alpha(\alpha-1)e^t x^{\alpha-2}\}dt \\ & + \{\alpha e^t x^{\alpha-1}dB_1(t) + \{e^t y^\alpha + \alpha e^t y^{\alpha-1}[qc_2y(1-px-y-z) + pc_2xy - c_3yz - m_2y] \\ & + 0.5\sigma_2^2\alpha(\alpha-1)e^t y^{\alpha-2}\}dt + \sigma_2\alpha e^t y^{\alpha-1}dB_2(t) + \{e^t z^\alpha + \alpha e^t z^{\alpha-1}[c_3z(px+y) \\ & - m_3z] + 0.5\sigma_3^2\alpha(\alpha-1)e^t z^{\alpha-2}\}dt + \sigma_3\alpha e^t z^{\alpha-1}dB_3(t) \\ & \leq e^t \{(1+c_1\alpha-m_1)x^\alpha - pc_1\alpha x^{\alpha+1} + (pc_2+pc_3-pqc_2)x^2 + 0.5\sigma_1^2\alpha(\alpha-1)x^\alpha \\ & + (1+qc_2\alpha-m_2\alpha)y^\alpha - qc_2\alpha y^{\alpha+1} + c_3y^2 + (pc_2-pqc_2)y^{2\alpha} + 0.5\sigma_2^2\alpha(\alpha-1)y^\alpha \\ & + (1-m_3\alpha)z^\alpha + (pc_3+c_3)z^{2\alpha} + 0.5\sigma_3^2\alpha(\alpha-1)z^\alpha\}dt + \sigma_1\alpha e^t x^{\alpha-1}dB_1(t) \\ & + \sigma_2\alpha e^t y^{\alpha-1}dB_2(t) + \sigma_3\alpha e^t z^{\alpha-1}dB_3(t) \\ & \leq K e^t dt + \sigma_1\alpha e^t x^{\alpha-1}dB_1(t) + \sigma_2\alpha e^t y^{\alpha-1}dB_2(t) + \sigma_3\alpha e^t z^{\alpha-1}dB_3(t), \end{aligned}$$

K 是一个正常数。因此

$$e^t E(x^\alpha + y^\alpha + z^\alpha) - E(x^\alpha(0) + y^\alpha(0) + z^\alpha(0)) \leq K e^t,$$

于是

$$\limsup_{t \rightarrow +\infty} E(x^\alpha + y^\alpha + z^\alpha) < +\infty,$$

又 $\forall X(t) = (x(t), y(t), z(t)) \in$ 因为 $|X(t)|^\alpha \leq 3^{\frac{\alpha}{3}}(x^\alpha(t) + y^\alpha(t) + z^\alpha(t))$, 所以

$$\limsup_{t \rightarrow +\infty} E|X(t)|^\alpha < +\infty.$$

再利用 Chebyshev 不等式, 定理 2 得证。

三、结语

在生态种群模型中，考虑环境噪声因素的影响，给出了新的

随机种群模型，分析了该模型全局正解的存在性与唯一性，同时证明正解的随机有界性，对于研究和维持生态系统平衡具有重要意义。

参考文献

[1] 陈兰荪, 孟新柱, 焦建军. 生物动力学 [M]. 北京: 科学出版社, 2009.

[2] 马知恩. 种群生态学的数学建模与研究 [M]. 合肥: 安徽教育出版社, 1996.

[3] ZHANG Z F, DING T R, HUANG W Z, et al. Qualitative theory of differential equations[M]. Providence: American Mathematical Society, 1991.

[4] 刘娟, 吴延敏. 一类具有饱和恢复率的随机 SIR 传染病模型的持久性 [J]. 廊坊师范学院学报 (自然科学版), 2024, 24(3): 5-8.

[5] 艾晓辉, 邓文波, 李鹏喆. 一类随机 Amensalism 种群模型的动力学行为 [J]. 哈尔滨理工大学学报, 2022, 27(3): 140-146.

[6] LIU X Q, ZHONG S M, TIAN B D, et al. Asymptotic properties of a stochastic predator-prey model with Crowley-Martin functional response[J]. J Appl Math Comput, 2016, 43(1): 479-490.

[7] LI Z X, MU Y, XIANG H L, et al. Mean persistence and extinction for a novel stochastic turbidostat model[J]. Nonlinear Dyn, 2019, 97: 185-202.

[8] LI X Y, MAO X R. Population dynamical behavior of non-autonomous Lotka-Volterra competitive system with random perturbation[J]. Discrete Contin Dyn Syst Ser A, 2009, 24(2): 523-593.

绿色低碳理念下工程项目资源管控模式探究

梁丹

山西潞安化工集团，山西 长治 046000

DOI:10.61369/ME.2026070025

摘 要：绿色低碳观念持续融入至工程建设的整个过程中，这给项目资源配置、能源利用、现场管理等方面提出了更为严苛的要求。传统的资源管控大多把成本、进度、消耗控制当作核心内容，这样一来很容易忽略材料损耗、能源浪费、施工活动所造成的环境影响。要建立面向全生命周期的资源管控模式，就需要把低碳目标融入到计划编制、采购供应、施工组织、绩效评价等环节之中，借助材料精细管理、能源动态监测、设备协同调度、数字化追踪等手段，提高资源使用效率，促使工程项目达成经济效益、管理效益、环境效益协同提高的目的。

关 键 词：绿色低碳；工程项目；资源管控；精细化管理；数字化

An Exploration of Resource Management and Control Models for Engineering Projects under the Green and Low-Carbon Concept

Liang Dan

Shanxi Lu'an Chemical Industry Group, Changzhi, Shanxi 046000

Abstract： The integration of green and low-carbon principles into every stage of engineering project implementation has imposed more stringent requirements on areas such as project resource allocation, energy utilization, and on-site management. Traditional resource management approaches often focus primarily on controlling costs, schedules, and consumption; as a result, they frequently overlook material waste, energy waste, and the environmental impacts arising from construction activities. To establish a comprehensive lifecycle-based resource management model, it is essential to incorporate low-carbon objectives into all phases—including project planning, procurement and supply chain management, construction organization, and performance evaluation. By leveraging tools such as detailed material management, dynamic energy monitoring, coordinated equipment scheduling, and digital tracking, organizations can enhance resource utilization efficiency and help engineering projects achieve the synergistic improvement of economic, managerial, and environmental benefits.

Keywords： green and low-carbon; engineering projects; resource management and control; precision management; digitalization

引言

工程建设活动所涉及的资源投入规模颇为巨大，像材料、能源、机械设备、施工用水等方面，均与项目成本、碳排放存在着紧密的关联。在传统的项目管理模式当中，资源控制常常侧重于采购价格、库存数量、进度保障这些方面，然而对于资源投入之后的利用效率、损耗流向、环境影响的关注度有所欠缺。随着绿色建造理念的不断深入发展，项目资源管理有必要从以往的“保障供应”朝着“高效利用”方向进行转变。借助于对资源计划、供应组织、现场使用、数据反馈机制的优化，能够降低无效消耗，进而为工程项目的低碳化、精细化管理给予现实方面的支持。

一、绿色低碳理念对工程项目资源管控的基本要求

（一）由单一成本控制转向综合效益控制

在绿色低碳这一背景状况下，针对工程项目资源的管控工作，绝不能仅仅将采购成本、材料结余当作评价的依据，而需要

全面综合地考量诸多方面内容，像是资源投入的情况、利用效率的高低、施工过程当中产生的损耗、能源的消耗情形、对于环境所造成的影响等。有一些项目，尽管通过以较低价格进行采购以此降低了前期所投入的成本，然而材料品质若是不稳定的话，极有可能造成返工现象的出现，还会使得损耗、维护成本有所增

加，最终实际获得的综合效益反而呈现出下降的趋势。所以，对于资源管理而言，需要从整个生命周期的视角去认真审视采购、运输、储存、使用、回收这些过程，把材料单耗、能源单耗、设备利用率、废弃物产生量等这类指标纳入到评价模式当中，从而使得成本控制与低碳目标能够达成统一的状态。只有把资源使用效率而非仅仅是单纯的投入价格作为核心的判断依据，才能够防止出现因局部节约而引发整体浪费的情况^[1]。

（二）由粗放供应转向全过程精细管控

工程项目施工阶段众多，专业交叉情况比较频繁，不同工序对于材料、机械、能源的需求存在显著差别。传统粗放式管理常常会出现材料提前进入场地、设备长时间处于闲置状态、临时用电过量、水资源出现无序消耗等一系列问题。绿色低碳理念倡导资源配置要与施工进度、作业面条件、工序节奏维持动态匹配状态。项目部需要在施工组织设计阶段就清晰明确各阶段的资源需求，把采购计划、进场计划、库存限额、消耗控制相互进行衔接，并且在施工过程当中依据工程量的变化及时做出修正。通过减少过量储备、重复搬运、无效待机等情况，能够提高资源周转效率，对于控制现场碳排放也具有积极意义。

（三）由结果核算转向过程监测与及时纠偏

传统资源管理常常是在月度结算或者阶段盘点之后，才察觉到出现了异常情况。而一旦问题形成，造成的损耗就很难再追回来了。绿色低碳管理更加注重过程监测，会把资源异常识别的工作提前到施工现场进行。项目能够根据预算用量、实际完成的工程量，建立材料单耗基准，针对钢筋、混凝土、模板还有周转材料进行动态比较，对于施工用电、用水、机械油耗设定阶段控制值，要是实际数据显著偏离基准，就要及时去查找原因。经由将事后统计转变为实时监测，能够更早发现工艺不合理、管理不到位还有设备低效运行等问题，从而把资源浪费控制在刚刚发生的初期阶段。

二、当前工程项目资源管控中存在的主要问题

（一）资源计划与施工实际衔接不够紧密

有些工程项目在编制资源计划时，仍旧比较依赖凭借经验来进行估算，材料需求计划和施工进度、设计变更、现场条件之间，缺少动态的联动关系。要是工程量出现调整或者工序有所推迟，采购计划却没有同步作出修正，就容易致使材料过早到达现场，出现库存积压、二次搬运的情况。部分设备调度方面也存在类似的问题，机械进场的时间和实际作业面不相匹配，进而造成停机待工、能源空耗。资源计划跟实际需求相脱节，不但会占用资金和场地，还会增加材料损坏、设备闲置、现场组织的难度，使得绿色低碳管理的效果被削弱^[2]。

（二）现场资源消耗缺少精细化控制

施工现场是资源损耗最为集中出现的环节，然而部分项目对于班组、工序、作业面的细化控制仍有所欠缺。在钢筋下料、混凝土浇筑、模板周转、临时设施使用的过程当中，倘若缺少限额领料、余料回收、过程核算，很容易造成较高的损耗。施工用

水、用电方面也常常存在责任边界不清楚的状况，照明设备长时间开启、机械空转、临时水管跑冒滴漏等这类现象很难被及时察觉。要是资源管理仅仅停留在总量统计的方面，那么便难以精确识别浪费的来源，而且也不利于将管理责任落实到具体的岗位上。

（三）资源数据分散影响决策效率

有些工程项目里面，材料、设备、能源、成本的数据，分别被不同部门把控着。采购部门着重于到货的数量，施工部门在意使用的进度，财务部门关注付款的金额，而设备管理人员负责记录台班还有维修状况。因为数据的口径、记录方式不一致，同一资源没办法构成完整的使用链条。管理人员常常得借助人工汇总表去核对，效率比较低，还容易出现数据滞后、统计偏差的情况。缺少统一的数据支持后，项目很难精准判定某类材料的损耗是不是异常、某台设备的利用率是不是偏低，也没法进行针对性的低碳优化工作。

三、绿色低碳导向下工程项目资源管控模式构建

（一）建立需求预测与限额配置机制

项目资源管控要依据施工计划、实际工程量来建立需求预测机制，把进度计划、施工图预算还有现场完成量相互联系起来。材料采购需依照近期需求、合理库存、供应周期滚动编制，防止一次性大量采购。对于钢筋、混凝土、砌体材料等主要资源，能够依据定额消耗、施工损耗和现场条件设定限额领用标准，并且细化到楼栋、区域或者班组。设备配置同样要结合施工强度、作业面变化安排进退场时间，降低低负荷运行。把资源供给控制在合理范围，能够压缩无效库存、闲置投入，让资源配置更接近实际施工需求^[3]。

（二）强化材料、能源与设备协同管理

在工程施工进程里，材料、能源、机械设备存在着比较紧密的关联性。若其中任何一项单项资源配置不够合理，便极有可能引发其他资源的额外消耗情况。项目部需要依据施工流水状况、作业面的划分、关键工序的安排，全面统筹编制材料进场计划、设备使用计划、能源供应计划，以此促使各类资源在时间维度、空间维度上都能够保持协调一致。就拿混凝土浇筑这一情况来说，要是运输车辆、泵送设备、现场人员之间的衔接不够顺畅，就容易出现车辆等待的现象、设备空转的状况、混凝土性能下降等一系列问题，这不但会增加能源消耗，而且还有可能造成材料的浪费。像大型吊装、土方运输等作业同样应当合理地匹配机械数量、作业时段，防止出现设备闲置、集中拥堵的现象。对于那些连续运行的机械设备而言，应当强化维护保养工作、工况检查力度，及时去处理高油耗、低效率等异常状态。借助资源协同配置的方式，能够减少因为工序脱节所造成的等待、搬运、空耗等问题，进而让材料利用、设备运行、能源消耗在统一的施工组织当中达成整体优化的目标。

（三）构建资源消耗动态监测体系

项目能够建立一个动态监测模式，该模式覆盖材料、能源、

设备、用水等方面。通过此模式，将资源的实际消耗情况与计划指标进行持续对比。在材料管理范畴，记录领用量、实际使用量、余料回收量，进而形成工序单耗数据。能源管理方面，针对施工区、生活区、重点设备实施分类计量，以此来识别高耗能区域。设备管理可借助台班、开机时间、有效作业时间、油耗数据对利用效率予以评价。对于连续偏高的消耗指标，需及时剖析是由施工工艺、人员操作还是设备状态所导致，并采取相应的针对性措施。依据监测结果对施工组织进行反向调整，能够形成资源管理的改进闭环^[4]。

四、绿色低碳资源管控模式的优化实施路径

（一）完善资源管理责任与考核机制

绿色低碳资源管控能否成功落实，重点在于将节约要求转变为明确的岗位责任。项目部需要依据组织架构、施工流程，清晰界定项目经理、施工员、材料员、设备员、班组长在采购、领用、调配、回收还有消耗控制方面的职责，防止出现责任交叉或者管理空缺。考核指标也应当体现资源利用质量，可以把材料损耗率、设备利用率、单位工程能耗、周转材料回收率等纳入阶段评价，并且与施工难度、工程量变化、现场条件相结合去分析，避免仅仅以结果奖惩来替代过程管理。对于因为工艺改进、合理排产、材料套裁或者设备协同调度而产生显著节约成效的班组，能够通过绩效激励、经验推广等办法来强化正向引导。当责任、考核与激励形成联动之后，资源控制才能够从材料部门的单点管理转变为项目全员共同参与。

（二）推进数字化平台支撑资源追踪

绿色低碳资源管理离不开稳定且连续的数据作为支撑，如果仅仅依靠纸质台账、人工汇总，很难及时把实际消耗的情况准确反映出来。项目能够依托数字化管理平台，把材料采购、进场验收、仓储、领退料、设备台班、施工用水用电还有进度数据关联起来，建立起资源从进场开始到使用、回收整个过程的记录。二维码、物联网计量装置、移动端采集工具能够被用来识别材料流

向、设备运行时长、能耗变化，进而减少重复填报、信息滞后的状况。平台还应当按照预算用量、实际工程量、历史消耗形成单耗对比，对库存异常、材料超领、设备低效运行还有能耗波动给出提示。数字化建设的价值并非在于单纯增加系统数量，而是在于形成统一并且可追溯的数据链，这样管理人员能够依据真实消耗及时去调整采购、库存、施工安排，从而提高资源决策的准确性^[5]。

（三）加强绿色施工技术与资源管理协同

资源管控无法脱离施工技术单独进行，工艺选择、施工组织、设备配置等方面都会对材料及能源消耗产生直接影响。在项目施工方案编制阶段，需同步对资源使用效率进行评估，要把装配式构件、定型化临时设施、可周转材料、节能设备等举措纳入资源计划。对于钢筋工程而言，可借助翻样优化、集中下料的方式来减少边角余料，模板工程结合构件尺寸进行优化配置并且提高周转频次，混凝土施工要加强浇筑量测算、余料调剂，以此降低超订与弃料情况的发生。施工用水可采用沉淀回收、循环利用等办法来减少新水消耗，临时照明和机械设备则依据作业时段实行分区启停，防止长时间空载运行。技术方案实施之后，还应通过实际消耗数据进行验证，针对节约效果不显著的环节及时予以修正，让绿色技术与资源管理形成相互反馈的闭环，将低碳要求落实到具体工序、施工组织当中。

五、结语

绿色低碳理念促使工程项目资源管理从粗放控制朝着全过程精细化转变。项目管理要依据需求预测、限额配置、动态监测、责任落实来重新建立资源管控模式，并且借助数字化平台提高数据透明度、异常识别能力。把绿色施工技术与材料、能源、设备管理协同进行，能够有效减少资源浪费、无效消耗。通过建立计划、使用、监测、评价、改进相互衔接的管理闭环，可提高工程项目资源利用效率，为绿色建造、项目高质量实施给予有力支撑。

参考文献

- [1] 于志昊.BIM 技术驱动的工程项目管控创新机制及流程再造研究[D].天津理工大学,2018.
- [2] 张良.基于流程的市政工程项目管控机制研究[D].山东大学,2012.
- [3] 彭飞.基于系统理论的重大电力工程项目管控研究[D].广东工业大学,2023.
- [4] 吴航.基于流程牵引理论的大型工程项目管控体系构建及仿真研究[D].绍兴文理学院,2018.
- [5] 殷爱国.应用 GE4R 管控体系管控工程项目风险研究[D].吉林大学,2013.

电力系统高压电气设备故障自动化监测方法研究

尤华熠, 尤婷

衢州学院 电气与信息工程学院, 浙江 衢州 324000

DOI:10.61369/ME.2026070029

摘 要 : 高压电气设备是电力系统输配电过程中的主要部分, 它的运行状况直接关系到整个电力系统的安全供电状况。传统的人工巡检和定期检查模式有滞后性、主观性强、漏检率高、误检率高等诸多弊端, 不能满足智能电网日常化、精度化、全天候的运维要求。本文以高压电气设备常见的故障机理为出发点, 全面梳理主流自动化监测技术的主要原理及应用特点, 对目前监测方法在实际工程中存在哪些问题进行了研究, 并从多源数据融合、特征优化提取、智能算法迭代、监测体系完善等方面提出了针对性改进措施, 搭建起可以适应复杂电网工况的高压设备故障自动化监测体系, 给提高电力设备故障预判准确率、降低设备运维风险、保障电力系统安全稳定运行提供理论依据。

关 键 词 : 电力系统; 高压电气设备; 故障监测; 自动化技术; 智能运维

Research on Automated Monitoring Methods for High Voltage Electrical Equipment Faults in Power Systems

You Huayi, You Ting

School of Electrical and Information Engineering, Quzhou University, Quzhou, Zhejiang 324000

Abstract : High voltage electrical equipment is the main part of the power system transmission and distribution process, and its operation directly affects the safe power supply status of the entire power system. The traditional manual inspection and regular inspection modes have many drawbacks such as lag, strong subjectivity, high missed detection rate, and high false detection rate, which cannot meet the daily, accurate, and all-weather operation and maintenance requirements of smart grids. This article takes the common fault mechanisms of high-voltage electrical equipment as the starting point, comprehensively sorts out the main principles and application characteristics of mainstream automation monitoring technology, studies the problems of current monitoring methods in practical engineering, and proposes targeted improvement measures from the aspects of multi-source data fusion, feature optimization extraction, intelligent algorithm iteration, and monitoring system improvement. It builds a high-voltage equipment fault automation monitoring system that can adapt to complex power grid conditions, providing theoretical basis for improving the accuracy of power equipment fault prediction, reducing equipment operation and maintenance risks, and ensuring the safe and stable operation of power systems.

Keywords : power system; high voltage electrical equipment; fault monitoring; automation technology; intelligent operations

引言

随着电力电网网架结构不断完善、用电负荷稳步增长, 高压电气设备长期在复杂工况下运行, 受到环境侵蚀、绝缘老化、机械磨损、电压波动等多种因素影响, 容易出现各种隐性故障和突发性故障。高压设备故障会造成设备本体损坏, 并且会引起区域停电、电网震荡等安全事故, 给社会生产生活的正常进行造成严重影响。自动化故障监测技术依靠传感知、信号处理、智能分析等先进的技术, 可以对高压电气设备运行状态进行全天候的动态监测, 冲破传统运维模式的技术壁垒, 成了电力设备智能化运维的发展方向。目前各类自动监测技术都被应用到高压设备的运维中, 但是单一的监测技术存在监测维度单一、抗干扰能力差、故障识别精度低的问题, 在复杂工况下适配性较差。因此, 本文对高压电气设备故障自动化监测的主要技术和使用过程中出现的难题开展研究, 探讨精细化、智能化的故障监测改进办法, 把电力系统的运维方式由被动检修转变为预先预测和主动预判。

作者简介:

尤华熠 (2004.08-), 男, 布依族, 贵州省黔南州人, 本科学历, 研究方向: 自适应控制系统。

尤婷 (1980.06-), 女, 汉族, 浙江省衢州市人, 博士研究生, 研究方向: 结构健康监测, 自适应控制系统, 计算机监测与控制技术。

一、高压电气设备常见故障类型和故障机理

高压电气设备变压器、高压断路器、隔离开关、高压互感器、输电线路等都是主要的设备，不同种类设备结构特性不同、运行工况也各不相同，故障表现形式和故障机理也各不相同，准确地整理出故障特征是构建自动化监测体系的前提。

（一）绝缘类故障

绝缘故障是高压电气设备最常见的基础性故障，绝缘介质长期处于高压电场、温湿度变化、污秽侵蚀等影响之下，逐渐出现绝缘老化、破损、击穿等现象。绝缘性能下降过程中会产生持续性的局部放电现象，逐步破坏绝缘结构，最终引发设备短路、跳闸等严重故障^[1]。该类故障具有很强的隐蔽性，在前期没有任何明显的外部表现，不能依靠一般的巡视检查发现，属于自动监测中必须捕捉的隐形故障。

（二）机械类故障

机械故障多发生于高压断路器、隔离开关等操作型设备，设备频繁分合闸操作会造成传动机构磨损、部件松动、卡滞、弹簧疲劳等问题。机械故障会直接造成设备操作失灵、分合闸不到位、动作延时异常等现象，大大降低了设备动作的可靠性，在电网故障应急处置的时候容易引起事故扩大化。机械故障的发展是渐进的，设备运行过程中振动、声响的变化就是故障识别的主要特征^[2]。

（三）热异常故障

高压设备接头、触点、绕组等部位接触不良或者负荷过载时，会出现局部发热异常问题，长期高温运行会加快设备绝缘老化、金属部件氧化，逐渐引起烧蚀、断路等故障。热异常故障贯穿设备全运行周期，受负荷波动、环境温度、接触状态影响较大，故障发展速度快，是引发突发性设备事故的重要诱因^[3]。

（四）介质性能衰减故障

以油浸式变压器为代表的充油高压设备，在长期运行中绝缘油、气体介质会因为性能衰减而产生各种活性产物，使得绝缘、散热、灭弧性能大幅下降，逐渐引起设备内部故障。该类故障属于设备内部隐性故障，不能通过外观巡检来识别，要依靠介质状态的实时监测来进行故障预判^[4]。

二、高压电气设备主流自动化监测方法分析

目前电力系统高压设备自动化监测技术已经形成多维、多种的体系，不同的监测方法对应的故障类型、监测原理和应用场景有明显的区别，各自有不同的优点和技术缺陷。

（一）局部放电监测技术

局部放电监测是高压设备绝缘故障的主要自动化监测手段，它主要是捕捉到由设备绝缘缺陷所产生的放电信号，并用信号分析来判断绝缘老化和破损程度。可以对设备绝缘状态进行实时在线监测，在不需要停电的情况下就可以精确地发现早期隐性绝缘故障，有效地避免绝缘击穿类突发事件^[5]。实际应用中由于局部放电信号能量小、传播路径复杂、现场电磁干扰大而影响了信号采

集精度，会出现虚假信号和信号缺失的问题，单纯依靠局部放电监测不能实现故障的准确定位，只能完成绝缘异常的初步判定。

（二）红外热成像监测技术

红外热成像技术依靠红外感知设备获取高压设备表面温度分布信息，根据温度异常区域识别设备热故障，具有非接触、无损伤、实时成像的技术优点，适用于所有高压外露设备的热异常监测。该技术可以直观地显示设备温度分布情况，快速发现接头过热、绕组发热等明显的故障，适合大范围设备巡检场景。但是该技术受环境温度、光照、设备污秽覆盖影响较大，不能发现设备内部隐性热故障，只能对表层故障进行监测，监测深度有明显限制^[6]。

（三）振动和声纹监测技术

振动和声纹监测主要是对高压设备的机械故障进行自动化监测，用传感器来采集设备运行过程中的振动波形、运行声响等特征信号，依靠信号时频域变化规律来判断设备传动机构、触头、弹簧等部件的运行状态。当设备机械部件出现磨损、松动、卡滞故障的时候，振动频率、声纹特征会明显偏移，可以实现机械故障的早期识别。该技术对传感器布设精度、信号降噪能力要求较高，现场复杂工况产生的振动与噪声干扰，很容易造成故障特征信号被覆盖，小幅度机械缺陷的识别精度较低。

（四）介质状态在线监测技术

介质状态监测主要应用在油浸式高压变压器、高压充气设备上，通过对绝缘油、绝缘气体的组分和性能参数进行实时采集，分析介质劣化程度，间接判断设备内部运行状态。该技术可以准确反映设备内部隐性故障的发展趋势，是设备内部故障监测的主要手段。但是该技术监测参数单一，只能判定介质性能异常，不能直接定位故障点位和故障类型，需要结合其他监测数据进行综合诊断。

三、当前高压设备故障自动化监测的主要问题

（一）单一监测技术维度局限，故障识别片面化

目前多数电力运维场景还使用单一监测技术对设备故障进行监测，各种技术只能覆盖单个故障维度，不能全面反映设备整体运行状态。绝缘监测不能识别机械故障，热成像监测不能判定内部介质劣化问题，单一监测模式容易出现故障漏判、误判，不能适应复杂工况下综合故障诊断的需求，不能实现设备故障的全方位精准预判。

（二）信号抗干扰能力弱，特征提取精度不足

高压变电站属于强电磁干扰环境，设备监测过程中采集的各种信号容易受到电磁辐射、环境噪声、负荷波动的影响，使得原始监测信号中含有大量的无效噪声分量。现有的监测系统信号预处理能力有限，不能有效分离干扰信号和有效的故障特征信号，微弱的早期故障特征无法被有效提取出来，从而造成早期隐性故障识别精度较低，故障预警滞后。

（三）数据融合程度低，智能分析能力弱

现阶段各类监测设备独立运行、数据独立存储，绝缘、热成

像、振动、介质监测等多源数据没有形成统一的数据交互体系，数据孤岛问题严重。监测系统大多依靠固定阈值来判断故障，缺少对设备运行时序特征、多参数关联特征的深度分析能力，不能区分设备正常工况波动和真实故障异常，智能化诊断水平不高，不能满足精细化运维需求。

（四）监测运维体系不完善，适配性不足

不同的高压设备故障演化规律、监测需求各不相同，但是目前的监测系统大多采用通用化的布设方案，没有根据设备特点定制化的监测策略。此外，监测设备长期运行后校准和维护不到位，会造成传感器精度偏移、监测数据失真等现象的发生，进而影响到整个系统的稳定性，降低其整体的可靠性。

四、高压电气设备故障自动化监测优化方法

（一）建立多源数据融合监测体系

冲破单一监测技术的维数局限，把局部放电、红外热成像、振动声纹、介质状态四种主要监测数据加以整合，形成一个多元化的数据融合自动化监控平台。根据各种高压设备的不同故障特征，选择不同的监测组合方案，变压器的主要监测内容是介质状态和局部放电监测，高压断路器的主要监测内容是振动声纹和红外测温，实现对设备故障的全方位、多维度监测。用数据层、特征层、决策层三种层次来把所有的监测数据进行互相补全，避免只用一种监测数据造成的结果偏差大或者不能准确地检测出所有可能出现的问题。

（二）改善信号降噪、特征提取技术

在强电磁干扰的条件下，信号失真问题出现，因此要对监测信号预处理算法进行改进，采用自适应滤波方法把环境干扰噪声去掉，保留原始故障特征信号。结合高压设备故障信号时频域的特点，改进特征提取机制，着重研究故障演化过程中重要特征的变化，剔除无效冗余特征，提高早期微弱故障特征的提取能力。依靠准确的信号处理、特征筛选手段来消除早期隐形故障难以辨别现象，提升监控系统检测微小故障的能力。

（三）使用智能算法来提高故障诊断的准确率

传统的高压设备故障监测大多依靠固定的阈值来判断，判断方法较为粗略，不能适应设备复杂多变的运行工况，容易把正常

的负荷波动、环境工况变化误判为设备故障，也会漏掉阈值范围内的渐进性故障。为了解决这个问题，必须彻底抛弃单个阈值判定模式，使用深度学习、模式识别等现代化智能算法，构建基于设备全生命周期时序数据的智能化故障诊断模型。借助电力运维所积累下来的大量设备正常运转数据、故障样本数据、工况变动数据，不断地训练和改善故障特征样本库，创建出设备运行特性、故障类型、故障严重程度同故障演化趋向之间精确对应的映射关系。用智能算法对各种监测参数的协同异常规律进行深度挖掘，准确地区分出设备正常工况的波动和真实故障的异常，从而实现高压设备故障的自动分类、精准定位以及趋势预判，从根本上降低故障误检率和漏检率，提高设备故障监测的智能化水平。

（四）建立差异化的精准监测运维体系

高压设备运行工况、结构特点、故障机理不同，自动化监测方案也不同，传感器布置的位置、数据采集的频率、监测参数的组合也各不相同，从而达到精准化的监测。建立常态化的监测设备运维校准机制，定期完成传感器精度校验、系统程序优化、数据链路检修等工作，保证监测设备长期稳定运行。根据设备运行时间、负荷等级来划分监测优先级，加强对于老旧设备、高负荷设备的监测力度，合理地配置监测资源。

五、结论

高压电气设备故障自动化监测是智能电网运维体系的重要支撑，也是防止电网安全事故、提高供电可靠性的关键技术手段。目前主流的自动化监测技术各有优势，但是单一的技术存在监测维度小、抗干扰能力差、智能分析不够等问题，不能满足复杂电网精细化运维的需求。创建多源数据融合监测系统，优化信号处理和特征提取技术，加入智能诊断算法，建立差异化运维系统，可以有效地解决目前监测工作中存在的主要问题，实现由被动排查到主动预判、由单一监测到全方位精准监测的转变。未来要继续利用物联网、人工智能技术来改进监测模型、数据融合方法，并且不断提升高压电气设备故障自动监测精确度、及时性以及智能化的程度，在此基础上为电力系统安全稳定地运行打下良好的技术基础。

参考文献

[1] 周毅忠. 电气自动化设备安全监测与故障诊断技术分析 [J]. 电力设备管理, 2025, (22): 26-28.
[2] 汤雪飞, 许兆荣. 传感器技术在国电南瑞电气自动化系统故障监测中的应用 [J]. 云南电力技术, 2025, 53 (5): 69-73.
[3] 付宝友. 电力系统电气设备故障自动化智能监测技术探析 [J]. 电力设备管理, 2025, (18): 102-104.
[4] 魏雪娇. 基于云计算的电气工程自动化监测系统研究 [J]. 电气技术与经济, 2025, (8): 171-174.
[5] 朱统方. 高效能冶金电气自动化技术对生产效率提升的影响 [J]. 冶金管理, 2025, (7): 81-83.
[6] 王凯, 孙义杰. 电力系统电气设备故障自动化智能监测技术 [J]. 现代计算机, 2023, 29 (22): 35-37+82.

风机变流器故障引发电网电能质量扰动的综合治理与检修技术

史豪杰

新疆龙源新能源有限公司, 新疆 乌鲁木齐 830000

DOI:10.61369/ME.2026070030

摘 要 : 随着风电并网规模持续扩大, 风电变流器作为风电机组与电网衔接的核心电力电子设备, 其稳定运行直接决定电网电能质量与风电并网安全性。变流器长期处于变风速、变负荷、高低温交替的复杂工况下, 极易出现功率模块损坏、直流侧电压异常、控制策略失准、传感器故障等问题, 进而引发电网谐波畸变、电压波动与闪变、三相不平衡、电压骤升骤降等电能质量扰动问题, 严重威胁区域电网稳定运行与电力设备安全。本文系统分析风电变流器典型故障类型、故障诱发电网电能质量扰动的机理, 针对性提出源头防控、过程抑制、末端治理的综合治理方案, 同时优化适配现场场景的精细化检修技术, 结合工程故障案例验证技术方案的可行性与实用性, 为风电场电能质量管控、变流器故障运维检修提供技术参考。

关 键 词 : 风电变流器; 设备故障; 电能质量扰动; 综合治理; 检修技术

Comprehensive Management and Maintenance Technology for Power Grid Power Quality Disturbances Induced by Fan Converter Failures

Shi Haojie

Xinjiang Longyuan New Energy Co., Ltd., Urumuqi, Xinjiang 830000

Abstract : As the scale of wind power integration into the grid continues to expand, wind power converters—serving as the core power electronic devices that bridge wind turbines to the grid—play a pivotal role in ensuring the stable operation of the grid's power quality and the safety of wind power integration. These converters operate under complex, long-term conditions—including varying wind speeds, fluctuating loads, and alternating high-and low-temperature environments—which can easily lead to issues such as power module failure, DC-side voltage anomalies, improper control strategy implementation, or sensor malfunction. Such failures can subsequently induce power quality disturbances—such as grid harmonic distortion, voltage fluctuations and flicker, three-phase imbalance, or sudden voltage surges or drops—thereby posing a serious threat to the stable operation of regional power grids and the safety of electrical equipment. This paper systematically analyzes the typical fault types encountered in wind power converters and the mechanisms by which these faults trigger power quality disturbances in the grid. It proposes a comprehensive management approach encompassing root-cause prevention and control, process-based mitigation, and end-point remediation, while also optimizing and adapting refined maintenance techniques to specific field conditions. Through the analysis of real-world engineering fault cases, the paper verifies the feasibility and practicality of these technical solutions, providing a valuable technical reference for power quality management and converter fault diagnosis and maintenance in wind farms.

Keywords : wind power converter; equipment fault; power quality disturbance; comprehensive mitigation; maintenance technology

引言

新能源风电是我国新型电力系统建设的核心清洁能源, 凭借资源储量丰富、低碳环保、技术成熟等优势, 并网装机容量逐年攀升。风电变流器承担着电能变换、功率调节、并网适配的核心功能, 是风电并网系统的关键枢纽设备。相较于传统火电设备, 风电变流器属于高频工作的电力电子装置, 耐受工况冲击能力较弱, 长期运行中受风速随机波动、电网电压扰动、环境温湿度变化、设备老化等多重

因素影响，故障发生率居高不下。

变流器单次微小故障即可引发链式电能质量扰动，不仅会导致风电机组出力波动、发电效率下降，还会造成电网谐波超标、电压稳定性劣化，严重时引发机组脱网、区域电网振荡等安全事故。当前多数风电场存在重发电、轻运维的问题，对变流器故障诱发的电能质量扰动机理认知不足，治理手段单一、检修流程粗放，故障排查效率低、重复故障率高，难以满足新型电力系统对风电并网电能质量的高标准要求^[1]。因此，深入研究变流器典型故障特征、电能质量扰动规律，构建系统化综合治理体系与标准化检修技术体系，对提升风电场运维水平、保障电网安全稳定运行具有重要工程意义。

一、风电变流器典型故障类型及成因

风电变流器分为机侧变流器与网侧变流器，核心组成包括功率 IGBT 模块、直流母线电容、电压电流传感器、驱动电路、控制系统及制动单元等，各部件故障特征与诱发因素存在明显差异，结合现场运维数据，典型故障可分为四大类。

一是功率模块开路与击穿故障。IGBT 功率模块是变流器电能变换的核心部件，长期高频开关工作会产生大量损耗热量，若散热风扇卡顿、散热风道积尘、散热硅脂老化，会导致模块温度过高，引发绝缘老化、芯片击穿。同时，电网瞬时过电压、负荷骤变产生的冲击电流，会造成模块开路损坏，直接导致变流器输出电流畸变，是引发谐波扰动的核心诱因。

二是直流母线电压异常故障。该故障分为过压与欠压两类，高发于风速骤变、电网电压波动工况。过压故障多由制动电阻老化、阻值偏移、制动单元拒动导致，额定工况下直流母线电压为 1100V，故障状态下电压可突破 1200V，触发设备保护停机。欠压故障主要因直流电容老化、容值衰减、传感器信号异常导致，电容长期充放电老化会造成电压储能能力下降，而霍尔传感器掉线、输出信号偏差会引发控制系统误判，触发欠压保护闭锁。

三是传感器与驱动电路故障。电压、电流传感器负责采集运行数据，为控制系统调节策略提供依据，传感器零点漂移、信号失真、线路接触不良，会导致采集数据偏差，造成变流器调制策略失准，输出功率失衡^[2]。驱动电路老化、光耦损坏、供电异常，会导致 IGBT 模块触发信号缺失，出现单相或多相工作异常，引发三相电流不平衡问题。

四是控制系统与并网参数异常故障。变流器控制程序紊乱、参数匹配失调、通讯中断，会导致有功、无功功率调节失效，无法实时跟踪电网负荷变化。风电场多机组并网工况下，各机组控保参数不统一、出力差异化波动，会叠加形成大范围电能质量扰动，加剧电网电压波动与功率振荡。

二、变流器故障诱发电网电能质量扰动机理

风电变流器各类故障并非单纯造成设备停机，而是通过电能变换过程传导扰动，从机组侧扩散至区域电网，诱发多重电能质量问题，各类扰动的形成机理具有明确关联性。

谐波畸变是变流器故障最常见的扰动形式。正常工况下，变流器通过 PWM 调制实现正弦电能输出，谐波含量可控。当 IGBT 模块开路、驱动信号异常时，变流器开关逻辑紊乱，输出电流波

形畸变，产生 3 次、5 次、7 次高频谐波。谐波注入电网后，会增加线路与变压器损耗，造成电力设备发热老化，干扰继电保护装置正常工作，严重时引发保护误动、电网谐振故障。同时，故障状态下变流器高频开关损耗剧增，会衍生高频电磁扰动，进一步恶化电网电能质量。

电压波动与闪变主要由变流器功率调节失效导致。风速随机波动会造成风电机组原始出力不稳定，正常运行时变流器可通过功率闭环调节平抑出力波动。当控制系统故障、直流电压异常时，功率调节功能失效，机组有功、无功功率大幅震荡，直接引发并网点电压幅值周期性波动，超出国标允许范围^[3]。电压频繁波动会造成电网灯具频闪、精密用电设备运行异常，影响区域用电稳定性。

三相电压、电流不平衡问题多由变流器单相故障引发。变流器单路 IGBT 损坏、单相传感器故障、单组驱动电路失效，会导致三相输出电流幅值不一致，电网三相负荷失衡。三相不平衡会造成发电机、变压器负序电流增大，设备发热损耗加剧，同时会影响电网零序保护动作，降低电网运行稳定性。

电压骤升骤降故障高发于电网扰动与变流器保护联动过程。当电网瞬时电压跌落时，变流器若故障导致低电压穿越能力失效，会快速闭锁停机，机组瞬间脱网引发电网电压骤降；而直流母线过压故障触发保护动作时，变流器功率突变，易造成并网点电压骤升，短时间内的电压剧烈波动会冲击电网敏感设备，引发大范围电能质量异常。

三、电能质量扰动综合治理技术方案

针对变流器故障引发的电能质量扰动问题，摒弃传统单一末端治理模式，构建“源头防控－过程抑制－末端补偿”的全维度综合治理体系，从故障预防、扰动抑制、电网补偿三个层面解决电能质量超标问题。

源头防控是从根本减少故障与扰动发生的核心手段。首先优化变流器运行控制策略，升级 PWM 调制算法，引入无功前馈直流电压补偿技术，有效抑制无功功率波动引发的直流电压振荡，实测可将电压动态超调量降低 80% 以上，大幅减少电压异常故障频次。其次统一风电场机组并网控保参数，消除新旧机组、不同工况机组的出力差异化波动，避免扰动叠加效应。同时搭建实时状态监测系统，对变流器直流母线电压、模块温度、输出电流、传感器信号进行全天候采集，通过大数据分析预判设备老化趋势，提前排查潜在故障，实现故障前置防控。

过程抑制聚焦故障发生后的扰动实时管控，阻断扰动扩散。针对变流器故障衍生的高频谐波，在机组控制程序中内置有源滤波子程序，依托机组自身变流器实现谐波就地抵消，减少谐波向电网注入^[4]。针对功率波动问题，优化变流器功率闭环调节逻辑，增设功率缓冲模块，当风速骤变、负荷波动时，通过储能缓冲平抑瞬时功率震荡，保障输出功率平稳。针对单相故障引发的三相不平衡问题，设计容错控制策略，当检测到单路模块异常时，快速调整剩余正常模块的调制参数，实现降额稳定运行，避免三相失衡扰动持续扩散。

末端补偿用于抵消残余电能质量扰动，保障并网指标达标。在风电场并网点分级配置无功补偿装置、有源电力滤波器（APF）与动态电压恢复器（DVR）。APF 可实时检测电网谐波、不平衡分量，动态输出补偿电流，精准抵消系统扰动；DVR 可快速响应电压骤升骤降、电压偏差问题，实时补偿电网电压幅值，提升电网电压稳定性。同时依托 STATCOM 装置实现无功功率动态调节，适配变流器故障工况下的无功缺额，全面优化电网电能质量指标。

四、精细化故障检修技术体系

结合变流器故障特征与扰动机理，制定标准化、精细化检修流程，明确故障排查、维修、校验全流程技术要点，提升检修效率，降低故障复发率。

首先建立分级故障排查机制。依托 SCADA 监测数据与现场故障现象，实现故障快速定位。若监测到谐波超标、电流波形畸变，优先排查 IGBT 功率模块、驱动电路，检测模块导通性能、驱动信号完整性；若出现直流电压过压、欠压故障，重点检测制动电阻阻值、直流电容容值、霍尔传感器工作状态，排查线路接触不良、元件老化问题；若出现功率调节失效、并网异常，重点核查控制系统程序、通讯链路、并网参数匹配性。相较于传统盲目排查模式，分级排查可将故障定位效率提升 60% 以上。

其次规范核心部件检修工艺。功率模块检修需严格执行断电放电流程，直流电容断电后预留充足放电时间，避免高压触电风险，对开路、击穿的模块整体更换，同步检测配套驱动电路、缓冲电路，排除隐性故障^[5]。制动系统检修需定期检测制动电阻阻值，及时更换阻值偏移、老化失效的电阻，升级控制程序增设电压缓冲逻辑，杜绝母线过压故障。传感器检修需进行零点校准、精度校验，修复松动、断线线路，更换信号失真、漂移超标的传感器，保障数据采集精准度。

最后完善检修后调试与预防性维护。故障维修完成后，需开展空载调试、带载调试、并网试验，检测变流器输出波形、电压稳定性、谐波含量、功率调节精度，确保各项指标符合并网标准。建立周期性预防性维护机制，定期清理散热风道灰尘、更换老化散热硅脂，校验控制参数、更新程序版本，定期检测电容、电阻、模块等易损元件性能，提前更换老化部件，从运维层面降低故障发生率。同时建立故障台账，记录故障类型、成因、处置方案，形成运维数据闭环，持续优化检修策略^[6]。

五、工程案例应用分析

某陆上平原风电场装机容量 200MW，采用直驱式风电机组，运行期间多次出现并网谐波超标、电压小幅波动问题，频发机组告警现象，影响电网电能质量。经现场排查，故障核心原因为部分机组变流器制动电阻老化、阻值大幅偏移，直流母线电压波动超标，同时控制程序无电压缓冲逻辑，工况波动下易引发调制失准，衍生谐波与电压扰动，且场内机组控保参数不统一，扰动叠加加剧电能质量问题。

本次采用本文提出的综合治理与检修技术开展整改：一是更换全部老化制动电阻，升级变流器控制程序，增设电压缓冲与无功前馈补偿逻辑，优化 PWM 调制策略；二是统一全场机组并网控保参数，消除机组出力差异化扰动；三是在并网点配置 APF 有源滤波装置与小型 DVR 电压补偿装置，实现末端扰动补偿；四是完成变流器全机组校验调试，建立常态化预防性运维机制。

整改完成后持续监测 3 个月，风电场并网点电能质量指标显著优化，谐波畸变率控制在 3% 以内，符合国家并网标准，电压波动与闪变指标大幅下降，无电压骤升骤降、三相不平衡异常问题，变流器故障复发率降至零，机组运行稳定性、并网安全性显著提升，验证了本文技术方案的实用性与有效性。

六、结论

风电变流器故障是诱发风电并网电能质量扰动的核心诱因，功率模块损坏、直流电压异常、传感器故障、控制策略失准等各类故障，会分别引发谐波畸变、电压波动、三相不平衡、电压骤变等电能质量问题，各类故障与扰动存在明确的耦合关联。本文构建的“源头防控 - 过程抑制 - 末端补偿”全维度综合治理体系，可从根本上减少故障发生、阻断扰动扩散、补偿残余扰动，有效优化电网电能质量。配套的分级排查、标准化检修、预防性维护技术体系，能够精准高效完成变流器故障处置，降低故障复发率。

工程实践表明，该套技术方案适配风电场复杂运行工况，可有效解决变流器故障引发的电能质量问题，提升风电并网稳定性与设备运维水平。后续可结合人工智能故障诊断技术，进一步优化变流器状态预判与扰动抑制策略，适配高比例风电并网的新型电力系统运行需求。

参考文献

- [1] 王德胜, 颜湘武, 刘辉, 等. 基于动态无功支撑的全功率变流风电机组高电压穿越改进控制 [J]. 中国电机工程学报, 2022(003): 42.
- [2] 沈湜, 赵晋斌, 潘超, 等. 海上风电变流器故障定位与重构运行策略 [J]. 电力电子技术, 2025, 59(9): 75-80.
- [3] 罗炜, 史尤杰, 余雪莹, 等. 风电机组变流器对海上风电场可靠性的影响 [J]. 南方电网技术, 2021(011): 15.
- [4] 傅晓军, 吴豪, 刘畅. 某型风机变流器 IGBT 模块故障的应急处理方法探讨 [J]. 现代工业和信息化, 2020(12): 152-154.
- [5] 张梦阳, 刘毅力, 朱晓龙, 等. 基于自抗扰技术的直驱风机高电压穿越控制策略 [J]. 分布式能源, 2023, 8(5): 1-9.
- [6] 沈阳武, 王世伟, 张斌, 等. 双馈风力发电变流器谐波建模与特性分析 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2020, 32(9): 8.

大型火电机组差动保护误动原因分析及防范措施

温士又

贵州织金平远清洁能源有限责任公司, 贵州 毕节 552100

DOI:10.61369/ME.2026070034

摘 要 : 大型火电机组差动保护作为发电机及主变设备的主保护, 承担着快速切除机组内部故障的核心任务, 保护动作的稳定性直接关系到机组并网安全与电网供电质量。当前, 多数火电机组已参与深度调峰运行, 机组启停频繁、负荷波动幅度大, 复杂的暂态运行工况极易引发差动保护的非正常动作。保护误动不仅会造成机组非计划停运, 推高机组运维成本, 还会干扰区域电网的负荷平衡。本文结合火电机组实际运行工况, 系统梳理差动保护误动的各类诱发因素, 分析运行工况、设备性能、回路配置、整定逻辑等多个维度存在的问题, 并结合现场运行实际提出针对性防范优化措施, 可有效降低火电机组继电保护系统的误动概率, 提升火电机组继电保护系统的运行可靠性与稳定性。

关 键 词 : 大型火电机组; 差动保护; 保护误动; 继电保护

Analysis of Causes of Differential Protection Malfunction in Large Thermal Power Units and Preventive Measures

Wen Shiyu

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

Abstract : As the main protection for generators and main transformers, the differential protection of large thermal power units undertakes the core task of quickly cutting off faults within the unit. The stability of the protection action directly affects the grid connection safety and power supply quality of the unit. Currently, most thermal power units have participated in deep load shedding operation, with frequent unit startups and shutdowns and large fluctuations in load. The complex transient operating conditions are prone to cause abnormal actions of the differential protection. Protection malfunction not only leads to unplanned unit shutdowns, increases unit operation and maintenance costs, but also interferes with the load balance of the regional power grid. This paper, based on the actual operation conditions of thermal power units, systematically sorts out various inducing factors of differential protection malfunction, analyzes problems existing in multiple dimensions such as operating conditions, equipment performance, circuit configuration, and setting logic, and proposes targeted preventive and optimization measures based on actual on-site operation, which can effectively reduce the probability of protection malfunction in the relay protection system of thermal power units and improve the operational reliability and stability of the relay protection system of thermal power units.

Keywords : large thermal power units; differential protection; protection malfunction; relay protection

引言

新型电力系统建设过程中, 新能源机组并网规模不断增大, 传统大型火电机组逐渐承担起电网调峰调频的任务, 机组运行方式也由原来的稳态连续运行变为频繁启停、宽负荷波动的动态运行模式。机组启停过程中暂态电流、负荷快速变化的参数波动、电网侧谐波扰动都会对差动保护判别逻辑造成干扰。差动保护依靠两侧电流差值来判定故障, 判别阈值灵敏, 很容易受到各种暂态信号的影响而产生误判。由于保护误动导致机组跳闸造成的大规模损失以及电网安全问题凸显。对差动保护误动机理进行深入剖析, 构建起全方位的防范体系, 对于保证火电机组的安全稳定运行有着十分重要的实践价值。

一、大型火电机组差动保护运行原理与常见误动工况

(一) 差动保护基本工作原理

大型火电机组发电机与主变压器的差动保护均依托基尔霍夫电流定律实现故障判断。保护装置同步采集设备两端的电流信

号, 并计算电流矢量差值。在机组正常运行或设备外部故障工况下, 设备两端电流数值接近、相位一致, 差值电流处于极小范围内, 保护装置处于闭锁状态, 不触发动作。当设备内部发生短路故障时, 两端电流的平衡被打破, 差值电流持续增大并超出整定值, 保护装置即刻动作跳闸, 迅速切断故障设备, 避免故障范围

扩大造成设备损坏。

（二）机组启停暂态误动工况

机组启停阶段属于差动保护误动的高发时段，该阶段电气参数处在动态过渡时期。主变压器送电瞬间铁芯很容易发生饱和，产生幅值大、波形畸变的励磁涌流。涌流只出现在变压器的一侧回路中，不能形成电流平衡，会产生大量的假差动电流。发电机并网、解列时，由于励磁系统快速增减磁，会造成持续的暂态电流扰动。该类信号不是故障电流，但是会超过保护的判断阈值，造成无故障误动，是现场最常见的一种误动作情况。

（三）机组变负荷运行误动工况

机组深度调峰、大幅度变负荷过程中，有功功率与无功功率均快速变化，发电机输出电流会产生持续波动。负荷骤升骤降会引发电流波形瞬时畸变，导致设备两端电流采样出现瞬时失衡，产生短时差动电流。低负荷稳态运行时，系统信噪比会急剧下降，微小电气扰动即可改变电流平衡状态。常规保护整定方案无法适配宽负荷运行特性，难以有效规避负荷变化产生的干扰，容易引发灵敏性误动^[1]。

（四）电网与厂用电扰动误动工况

电网侧瞬时波动以及厂用电系统设备投切，都会间接造成差动保护误动。电网电压跌落、频率波动、邻近线路故障冲击，都会使并网线路将这些影响传送到发变组系统中，引起设备两侧电流瞬间变化。厂用电系统大型辅机启停、变频设备运行过程中产生的高频谐波，会对电流采样精度造成干扰，进而导致差动电流数值异常增大。该类外部扰动具有突发性，保护装置无法提前预判，极易引发误判动作。

二、大型火电机组差动保护误动核心原因分析

（一）励磁涌流干扰判别逻辑

励磁涌流是机组启动、停机过程中差动保护误动的主要原因。变压器铁芯磁通量不能瞬间变化，空载合闸时产生的涌流幅值可以达到额定电流的几倍。涌流波形有明显的间断角，谐波含量高，但是有些特殊工况下涌流波形接近故障电流波形。常规谐波制动和间断角判别的逻辑会存在识别盲区，不能完全分辨出涌流和真实的故障信号。保护装置为了保证故障灵敏度，制动裕度设置过小，造成启停阶段保护误动作。

（二）电流互感器采样特性失配

电流互感器采样性能不一致，是造成稳态工况下差动保护误动的主要原因。差动保护依托设备两端互感器的同步采样数据实现故障判断，若两端互感器的型号、饱和特性、精度等级存在差异，在相同一次电流作用下，二次输出电流会产生偏差。当互感器在高负荷下出现轻度饱和时，采样误差会进一步增大。经长期运行后，互感器铁芯会发生老化，参数也会出现漂移，导致两端采样差值不断累积，进而产生稳定的虚假差动电流，该电流逐渐超过保护动作定值后，最终引发保护误动。

（三）二次回路运行状态异常

二次回路隐性缺陷会造成电流采样失衡，引发保护误动。二

次接线端子松动、氧化锈蚀会导致回路接触电阻不稳定，造成二次电流出现瞬时波动。电缆绝缘老化与水分侵蚀，都会改变电流的矢量特征，进而导致两端电流相位出现偏移。不同长度的二次电缆会形成差异化的回路阻抗，进一步增大采样偏差。此类缺陷无明显故障特征，常规巡检难以发现，若长期存在会持续产生虚假差动信号，最终造成保护重复性误动。

（四）保护定值与制动参数不合理

保护定值与制动参数整定存在较大误差，会大幅降低保护装置的抗干扰能力。绝大多数机组的保护定值均以额定稳态工况为基准整定，未考虑调峰运行与频繁启停工况对保护定值的影响，定值裕度偏小。比率制动系数、谐波制动系数设置不合理，无法有效闭锁暂态扰动信号。部分机组上下级保护定值配合不当，动作阈值与时限存在交叉重叠。参数匹配失衡会导致保护装置无法正确区分正常扰动与真实故障，轻微的电气波动即可触发保护误动作^[2]。

三、差动保护误动典型现场故障案例分析

（一）机组并网主变差动保护误动案例

660MW 火电机组多次在并网瞬间出现主变差动保护误动，不能正常启动。从故障录波数据可知，保护动作时刻没有短路故障特征，电流波形有明显的涌流特征，谐波含量比正常高。现场排查发现，保护装置谐波制动系数设置偏大，对于低频涌流分量的制动作用不大。变压器长时间停运会产生剩磁，使铁芯饱和程度加重，涌流幅值一直超标。由于多种因素造成保护装置把涌流当成故障电流，触发跳闸动作，制动参数优化后故障彻底消失。

（二）深度调峰发电机差动保护误动案例

在1000MW 机组进行深度调峰的时候，经常会出现差动保护瞬时误动的情况。故障时段机组负荷迅速改变，电流波形略微有点失真。现场试验检测出发电机两端电流互感器的饱和程度不一样，存在较大的差异。低负荷时采样误差比例增大很多，两端电流差值大于保护动作阈值。原有的保护定值不能适应低负荷运行工况，灵敏度过高造成扰动误动。根据以上数据分析可知，在调整保护定值、更换参数匹配的互感器后，机组调峰工况运行过程中未再发生保护误动情况。

（三）二次回路缺陷引发重复性误动案例

600MW 机组厂变差动保护无规律地频繁误动，没有明显的工况关联特征。经分段测试二次回路参数可知，部分接线端子氧化锈蚀，回路接触电阻一直有波动。二次电缆局部绝缘老化产生微小漏电，使两端电流矢量一直偏移。常规试验不能发现这些隐性的缺陷，造成保护反复误动^[3]。对二次回路进行全方位的整治、紧固端子、更换老化电缆之后，回路采样的平衡得到恢复，保护运行状态稳定。

四、抑制差动保护误动的针对性防范技术措施

（一）优化涌流识别与制动逻辑

对保护装置涌流判别算法进行针对性优化，改进谐波制动和

间断角判别的逻辑。根据机组实际涌流波形特点，对谐波制动系数进行精细化整定，提高对励磁涌流的识别闭锁能力。增加新的暂态时序识别机制，对机组启停瞬间出现的短时间畸变电流做延时判定，将故障电流和暂态涌流分开。优化比率制动特性，增大制动区间，在保持故障动作灵敏度的基础上，消除启停工况扰动对制动的影响，彻底解决由于涌流引起的误动问题。

（二）统一电流互感器采样性能

全面检查发变组系统两侧电流互感器设备状态，更换老化的、失准的或者特性不匹配的互感器。统一互感器型号、精度等级和负载参数，使两端设备的采样响应特性一致。进行互感器伏安特性、比误差、角误差专项试验，严格控制采样误差。根据高低负荷不同工况对采样校核进行修正，得到正确的采样偏差参数。采用硬件统一适配，从源头上消除由于采样失衡造成的虚假差动电流。

（三）全面整治优化二次采样回路

开展二次回路全覆盖专项整治，消除各类隐蔽缺陷。逐段紧固全部接线端子，更换氧化锈蚀端子与老化导线，保障回路接触电阻稳定。对二次回路开展全面绝缘电阻试验，更换受潮或损坏的电缆，防范漏电引发的安全风险。统一二次电缆的敷设规格与长度，实现回路阻抗均衡，消除电流相位偏移。规范布线方式，采用动力电缆与控制电缆分层布置方案降低现场电磁干扰，保障采样信号的稳定性与准确性。

（四）精细化优化保护定值参数

摒弃传统的单个稳态整定方式，按照机组的全部工况运行特性来重新计算定值。考虑机组启停、深度调峰、负荷波动等各种工况，提高保护定值裕度。对发电机和主变保护制动参数做差异化的整定，细化动作阈值和延时。建立上下级保护阶梯式时限配合系统，防止越级跳闸和误判。定值优化完成之后进行全工况模拟试验，保证故障工况可靠动作，正常工况有效闭锁^[4]。

（五）升级保护装置软硬件设备

对老型号的保护装置做迭代升级，更换性能衰减的采样和运算模块。更新保护核心算法，加入多参量融合判别模式，用稳态电流、暂态波形、谐波分量综合来判断故障状态。改善装置硬件的电磁屏蔽效果，符合现场各种复杂电磁场的要求。提高数据采样频率和运算速度，增强微弱故障信号和扰动信号的分辨能力，全面提升保护装置在复杂工况下的运行稳定性。

五、差动保护长效稳定运行的运维管理措施

（一）建立全工况精细化校验机制

改进继电保护定期试验制度，扩大试验项目和覆盖范围。除常规的传动试验之外，还要增加涌流模拟、负荷波动模拟、电磁干扰模拟等全工况试验。每季度做二次回路参数核查，每半年做互感器特性校核。机组启停、设备改造、系统方式调整之后，马上展开专项校验，及时纠正参数偏离和逻辑缺陷，实现隐患早发现、提早整治。

（二）规范机组变工况运行操作

建立机组启停、调峰的操作标准，缓慢控制励磁升降和负荷调节的速度。防止负荷突然增大或减小，防止励磁大幅度变化，减小暂态电流扰动的强度。在保护误动易发的时段增设专项参数监视工作，差动电流、谐波含量以及设备运行情况等全部都纳入到实时监测之中。通过改善运行操作来减小电气参数的波动幅度，从运行角度降低保护误动作产生的条件。

（三）完善故障录波数据分析复盘

建立保护异常事件专项复盘机制，对所有保护告警、瞬时异常、误动事件开展深入剖析。调取录波数据精准定位诱因，对涌流干扰、采样误差、回路缺陷、定值问题等故障进行分类统计。建立故障台账总结误动规律，针对不同场景提出差异化优化方案。通过数据复盘预判隐患，推动保护运维从事后处置向事前预防转变^[5]。

六、结论

大型火电机组差动保护误动，主要由机组启停、变负荷运行、电网扰动等工况引发，励磁涌流干扰、互感器采样失配、二次回路异常、定值参数不合理、装置软硬件滞后、运维疏漏均为主要诱因。各类隐患相互叠加，极易造成保护频繁误动，影响机组安全稳定运行。通过改进保护制动逻辑、提升设备采样一致性、整治二次回路、开展定值精细化整定以及升级软硬件设备，可有效防范差动保护误动发生。配套精细化校验、规范运行操作、数据复盘分析、人员技能提升的长效运维体系，能够持续提升差动保护动作可靠性，为大型火电机组安全经济运行提供有力支撑。

参考文献

[1] 秦正林, 陈学印. 新能源并网场景下火电机组发变组低频保护动态特性分析及改进研究 [J]. 自动化应用, 2025, 66(19): 57-59.
[2] 古栖铭. 火电机组热工保护可靠性研究 [J]. 自动化应用, 2023, 64(18): 101-102.
[3] 秦贵林, 侯均明. 基于无线传感网络的火电厂发电机继电保护状态自动监测方法 [J]. 自动化应用, 2024, 65(12): 77-78.
[4] 罗丽佳. 火电机组厂用6 kV电动机FC回路保护整定计算分析 [J]. 山西电力, 2025(6): 68-72.
[5] 康敏. 火电厂大型发电机继电保护整定设计与故障分析 [J]. 电气技术与经济, 2023(9): 325-327.

某600MW 机组锅炉水冷壁泄漏原因分析及防范措施

殷政万

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/ME.2026070035

摘 要： 600MW 超临界燃煤机组锅炉水冷壁是炉膛的核心受热部件，长期处于高温烟气冲刷、介质压力冲击和复杂的应力作用下，泄漏故障是机组运行过程中高发的承压设备缺陷。水冷壁泄漏会引起炉膛负压波动、烟气参数突然变化、机组被迫低负荷运行甚至停机，严重的还会造成锅炉非计划停运，直接威胁到火电机组的安全稳定和经济运行。本文以某投运多年的600MW 超临界机组为研究对象，结合机组实际运行工况和检修案例，对水冷壁磨损、腐蚀、热疲劳、焊接缺陷、运行调节不当等各方面的泄漏原因进行梳理，总结出故障排查和应急处理的方法，针对不同的运行情况制定出常态化的运行控制、检修改进、设备改造的预防措施，有效地降低水冷壁泄漏故障的发生率，保证机组长期稳定运行。

关 键 词： 600MW 机组；锅炉；水冷壁；泄漏故障

Analysis of Leakage Causes of Water-Cooled Tubes in A 600MW Unit Boiler and Preventive Measures

Yin Zhengwan

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

Abstract： The water-cooled tubes of a 600MW supercritical coal-fired unit boiler are the core heat-absorbing components of the furnace. They are constantly exposed to high-temperature flue gas scouring, medium pressure impact, and complex stress effects. Leakage faults are common defects of pressure-bearing equipment during the operation of the unit. Leakage of water-cooled tubes can cause fluctuations in furnace negative pressure, sudden changes in flue gas parameters, forced low-load operation of the unit, even shutdown, and in severe cases, non-planned shutdown of the boiler, directly threatening the safety, stability and economic operation of thermal power units. This paper takes a 600MW supercritical unit that has been in operation for many years as the research object, combines the actual operating conditions of the unit and maintenance cases, and sorts out the leakage causes of water-cooled tubes from various aspects such as wear, corrosion, thermal fatigue, welding defects, and improper operation adjustment. It summarizes the methods for fault detection and emergency handling, and formulates regular operation control, maintenance improvement, and equipment renovation preventive measures for different operating conditions to effectively reduce the occurrence rate of water-cooled tube leakage faults and ensure the long-term stable operation of the unit.

Keywords： 600MW unit; boiler; water-cooled tube; leakage fault

引言

国内600MW 超临界火电机组占电网主力供电份额，大部分机组担负着深度调峰、频繁启停、变负荷运行的任务，锅炉受热面运行工况逐渐恶化。水冷壁直接接触炉膛高温火焰和烟气，内部流过高压高温汽水介质，内外温差和应力变化频繁，长时间运行容易产生管壁损伤、裂纹、减薄等缺陷，逐渐发展成泄漏故障。水冷壁泄漏故障隐蔽性较强，初期故障特征不明显，隐患不断累积会逐渐扩大缺陷范围，造成机组降负荷、停炉抢修等问题。根据现场实际情况准确找出泄漏故障的原因，采取全方位的防范措施，可以从根本上减少泄漏故障的发生，提高机组设备的可靠性以及发电的经济性。

一、600MW 机组锅炉水冷壁概述及泄漏故障表现

（一）水冷壁结构与运行工况

该600MW 机组配套超临界参数锅炉，炉膛四周有膜式水冷

壁结构，用大量的无缝钢管和鳍片焊接成一个密闭的炉膛换热壁面。水冷壁管内流过超临界汽水混合物，吸收炉膛燃料燃烧放出的辐射热，完成水加热、汽化和升温的过程，是锅炉的主要换热部件。机组正常运行时，水冷壁管壁一直处在高温高压环境下，

外接一千摄氏度以上的高温烟气，内受高压介质冲击，同时锅炉启停、负荷变化造成的交变应力也常常出现，使设备长时间处于复杂严峻的运行状况之中，很容易产生各种损伤缺陷。

（二）水冷壁泄漏典型故障表现

水冷壁轻微泄漏时，机组运行参数会有一些细微的异常变化，炉膛负压有微小的波动，排烟温度有局部的下降，锅炉给水量和蒸汽流量差值略有增大，现场炉膛内有轻微的异响。泄漏缺陷不断扩大时，管壁破损喷水量变大，炉膛负压剧烈波动，烟气温度分布严重失调，局部区域烟温明显下降，锅炉排烟湿度也大幅度上升。严重泄漏时会出现炉膛异响增大、引风机出力不断超出限值、机组负荷被迫降低等情况，如果不能及时处理，会造成管壁冲刷损坏范围变大，引起大面积水冷壁失效，从而导致锅炉紧急停炉^[1]。

二、某600MW 机组水冷壁泄漏主要故障类型

（一）管壁磨损减薄泄漏

管壁磨损减薄属于该机组水冷壁最常出现的泄漏情况，大多发生在炉膛燃烧区、吹灰覆盖区和烟气冲刷死角。燃料燃烧产生的飞灰、炭颗粒被高温烟气高速冲刷到管壁上，长时间的微切削作用使管壁逐渐变薄。燃用劣质煤、煤质不稳定时，飞灰含量增加，磨损速度加快。另外，吹灰频次过高、蒸汽压力超标的高压蒸汽直接冲刷管壁，使管壁厚度不断减小，承压能力下降，最后导致管壁破损泄漏。

（二）高温腐蚀泄漏

高温腐蚀泄漏多发生在炉膛下部水冷壁上，属于渐进性损伤故障。燃料中的硫、灰分在炉膛高温还原性气氛中燃烧生成硫化物，附着在管壁上，并且和金属基体发生反应造成管壁腐蚀。配风不均、局部缺氧都会使还原性气氛更加严重，腐蚀速度加快。长期腐蚀引起的坑蚀、剥落、壁厚不均等缺陷会使得管壁的有效承压厚度变小，在介质压力的作用下会产生腐蚀穿孔泄漏。

（三）热疲劳裂纹泄漏

热疲劳裂纹泄漏是由于机组工况经常变化所造成的，在水冷壁弯头、集箱连接段等应力集中处容易出现。机组频繁启动和停止、深度调峰、负荷突然变化，管壁温度急剧变化，金属不断受热膨胀又遇冷收缩形成交变热应力。应力长期循环就会产生细微裂纹，裂纹不断扩展直到穿透管壁而发生泄漏。该机组长时间做调峰工作，负荷忽大忽小，冷热交替，热应力不断累积，因此容易产生此类问题。

（四）焊接缺陷引发泄漏

焊接缺陷主要出现在水冷壁对接焊缝、鳍片、管口焊接处。安装检修时形成的未焊透、夹渣、气孔等隐性缺陷，在运行介质的压力和热应力的作用下会越来越大。部分焊缝工艺不合理，残余应力没有释放出来，在运行过程中容易出现开裂。由于启停、负荷变化引起的振动使缺陷扩展速度加快，最后造成焊缝开裂而泄漏。该种故障的隐蔽性大，常规巡检很难提前发现。

（五）结垢过热爆管泄漏

结垢过热爆管是由于汽水品质不合格造成的。给水、炉水控制不严，水中含有的盐类杂质在管内壁沉积形成水垢。水垢导热性能差，阻碍换热，使管壁局部温度升高，金属过热蠕变，强度下降。长期过热造成鼓包、裂纹、壁厚减薄，造成爆管泄漏。该类故障多为突然发生的单点故障，发展速度快，容易造成机组非计划停运^[2]。

三、600MW 机组水冷壁泄漏核心成因分析

（一）燃料管控与燃烧调整不当

入炉煤质不稳定、掺烧控制不严格都会加重水冷壁的磨损和腐蚀。机组为了控制成本频繁掺烧劣质、高硫高灰煤，燃烧产生大量的飞灰，加大烟气冲刷，加快管壁磨损。高硫燃料产生腐蚀性的硫化物，炉膛局部缺氧形成还原性气氛，高温腐蚀速率也会增大。另外配风调整滞后，一二次风配比不合理，火焰中心偏移、烟气偏流，造成水冷壁局部超温冲刷，多种因素一起导致泄漏。

（二）机组运行工况频繁波动

由于电网调峰的影响，机组的工况经常发生改变，冷热交替造成的交变热应力会破坏水冷壁。启停阶段升降温速率控制不好，管壁温度急剧变化，金属热胀冷缩产生的应力容易产生裂纹。深度调峰时负荷高低不断变化，燃烧工况也经常改变，管壁温度忽高忽低，热疲劳损伤慢慢增加。长期不稳定运行会扩大微小裂纹，最后导致管壁泄漏。

（三）吹灰系统运维操作不规范

吹灰作业控制不好，就会造成水冷壁的损坏。当吹灰次数超过规定、蒸汽压力过大或者吹扫时间过长时，高压蒸汽会对管壁造成冲刷作用，破坏管壁表面的氧化层以及金属基体，进而使得管壁迅速变薄。部分吹灰器的喷嘴偏移、卡涩，定点冲刷一个部位，造成局部严重磨损。吹灰设备缺陷没有得到及时的处理，作业流程执行不到位，长时间的作用下逐渐造成水冷壁局部泄漏。

（四）汽水品质与化学监督不到位

汽水品质控制不好容易造成内壁结垢过热泄漏。给水处理环节管控不严，杂质、溶氧、盐分超标；炉水化验次数不足，水质异常不能及时调整，杂质在管内壁形成水垢。水垢破坏换热效果，使管壁局部超温，加快金属蠕变老化。水质不合格还会引起内壁电化学腐蚀，双重损害加大水冷壁泄漏危险^[3]。

四、水冷壁泄漏故障排查与应急处置方法

（一）故障初期预判排查

机组运行时，依靠实时运行参数的变化来开展故障初期的预判，准确找到泄漏隐患。重点对炉膛负压、排烟温度、给水量、蒸汽流量、引风机电流等进行监测，发现参数出现异常波动并排除其他设备故障后，初步判断为水冷壁泄漏。采用就地听音、炉膛观察、烟气湿度检测等方法对泄漏大致区域进行排查，

区分出轻微渗漏和严重泄漏。对故障发生时段的机组负荷、煤质参数、运行工况进行及时记录，为准确找到故障原因并加以分析奠定基础，防止出现漏判或者误判的情况发生。

（二）停机后精准定位检测

机组停炉冷却后全面细致的进行检查，找出泄漏处和缺陷处。采用目视检查、管壁测厚、无损探伤、水压试验等方法对水冷壁管壁磨损、腐蚀、裂纹、鼓包、焊缝缺陷等问题进行全方位的检查。重点检测炉膛燃烧区、吹灰冲刷区、应力集中区管壁厚度，检测焊缝完整性及致密性^[4]。采用分段排查、分区检测的方式，准确找到泄漏的故障点，统计出缺陷的数量以及损伤的程度，确定出检修整改的范围，防止出现漏检情况的发生。

（三）泄漏故障应急处置流程

发现水冷壁漏点后按程序进行应急处理，控制故障范围。轻微泄漏时保持机组稳定低负荷运行，控制炉膛温度和燃烧工况，防止缺陷迅速发展，做好停机检修的准备。当泄漏量不断增大、参数异常变坏时，立即执行机组降负荷操作，防止高负荷运行加重管壁损伤。当故障严重危及设备安全时，立即申请紧急停炉，停止引风机高速运转，排出炉膛潮湿烟气，防止水汽对其他设备造成侵蚀，同时开展故障查找和检修改进工作。

五、600MW 机组水冷壁泄漏长效防范措施

（一）严控入炉煤质优化燃烧调整

建立入炉煤质标准化管控体系，严格控制燃料品质，合理安排煤种掺烧方案。严格控制入炉煤的硫分、灰分和水分含量，防止高腐蚀、高磨损劣质煤大量进入炉膛，减少烟气腐蚀和飞灰冲刷强度。改善锅炉燃烧调节手段，准确调节一、二次风参数，均匀分布炉膛温度场和流场，消除局部缺氧、火焰偏移、烟气偏流等现象，削弱炉膛还原性气氛。根据机组负荷的变化来调节燃烧参数，保证燃料充分燃烧，从源头上减少高温腐蚀和飞灰磨损，稳定水冷壁的运行工况。

（二）规范机组变工况运行管控

完善机组启停、调峰运行的控制标准，严格控制参数变化速度，减小热疲劳应力损伤。制定出标准的启停操作程序，对升温升压、降温降压的速度进行严格的控制，避免因温度变化过快而造成管壁温度产生大的交变应力。优化深度调峰运行策略，控制负荷升降幅度和变化速度，防止出现负荷大幅度、快速的波动。延长机组稳态运行时间，降低冷热交替次数，减小金属热应力积累。定期对机组工况波动数据进行记录分析，找出温度应力变化的规律，有针对性地对运行方式进行优化，减缓管壁疲劳裂纹的

产生和发展。

（三）优化吹灰系统运维管控

制订统一的定期吹灰作业标准，改进吹灰参数和作业程序，防止由于吹灰引起管壁的损伤。按照锅炉积灰结焦的规律来确定合理的吹灰次数和时间，防止出现过度吹灰、无效吹灰的情况。严格控制吹灰蒸汽的压力和温度，保证参数的稳定性，防止高压蒸汽对管壁造成损害。制定吹灰设备专项巡检制度，定时对吹灰器喷嘴角度及运行情况进行检查，及时修理卡涩、偏移、故障的设备，防止出现局部定点冲刷的现象。经过精细化的吹灰控制，在保证清灰效果的前提下，尽可能地保护水冷壁管壁不被破坏。

（四）强化汽水品质化学监督

建立全方位的汽水品质控制体系，做好常态化的化学监督工作，防止管内壁结垢腐蚀。对给水预处理、除氧、加药系统的运行参数进行优化，严格控制给水溶氧、硬度、pH 值等主要指标，使给水质量符合要求。加密炉水取样化验频次，定时采集炉水，检测炉水盐分、杂质含量，当水质出现异常时立即调整加药参数及排污强度。按照行业规范定期进行锅炉化学清洗，清除管壁内壁的老旧水垢，恢复管壁的换热性能。完善水质台账管理，对水质变化的规律进行跟踪，做到水质问题早发现、早处理。

（五）提升检修质量强化隐患治理

细化水冷壁专项检修标准，提高检修精细化程度，消除所有的隐性设备隐患。机组大修时，全覆盖做管壁测厚、无损探伤、焊缝检测工作，准确找出磨损、腐蚀、裂纹等隐性故障，建立起缺陷台账并实行闭环管理。规范水冷壁焊接工艺标准，控制焊接流程和参数，焊后严格进行无损检测和水压试验，杜绝焊接缺陷留存在系统中。定期对水冷壁的鳍片、刚性梁、紧固结构进行检查，及时处理松动、变形、应力集中的问题，减小管壁的振动和应力损伤，提高设备的运行可靠性^[5]。

六、结论

600MW 机组锅炉水冷壁泄漏故障可分为磨损减薄、高温腐蚀、热疲劳裂纹、焊接缺陷、结垢过热五类，燃料管控不当、燃烧调整偏差、工况频繁波动、吹灰操作不规范、汽水品质超标、检修管控缺失是故障产生的主要原因，各类隐患相互叠加，会严重影响锅炉的安全稳定运行。对故障作出准确预判、定位检测与检修处置，可快速消除泄漏问题。通过严格管控煤质与燃烧工况、规范机组运行与吹灰操作、强化化学监督、优化检修工艺，能够多维度防控水冷壁泄漏故障，减少设备缺陷发生，延长受热面设备使用寿命，保障600MW火电机组安全、经济、稳定运行。

参考文献

- [1] 徐春. 600 MW 超临界机组锅炉屏式过热器泄漏原因与解决办法 [J]. 电站系统工程, 2025, 41(2):33-35.
- [2] 王坤. 火电机组锅炉水冷壁管泄漏原因 [J]. 理化检验 (物理分册), 2024, 60(1):73-77.
- [3] 付敏睿, 程翔, 李勇, 等. 某660 MW 煤电机组锅炉水冷壁失效原因分析 [J]. 电工技术, 2025(23):287-289.
- [4] 谢道隼, 袁荣正, 刘杰, 等. 660MW 超超临界机组锅炉水冷壁管爆漏失效的微观分析 [J]. 电力设备管理, 2023(2):196-198.
- [5] 辛昊阳, 付海宇. 600 MW 超临界机组锅炉水冷壁防磨防爆研究 [J]. 电力系统装备, 2023(1):55-57.

基于故障录波的火电厂电气故障诊断方法研究

张荣平

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/ME.2026070036

摘 要： 随着火电机组容量的不断提高和电网并网标准的不断收紧，电厂电气系统结构越来越复杂，各种短路故障、设备异常、回路扰动发生的概率也越来越高。故障录波系统可以采集到电气故障发生全过程的波形数据、参数变化和时序信息，是电气故障溯源分析和精准诊断的主要载体。传统的人工故障诊断方法速度慢、精度不高，无法满足复杂故障的快速定位和精确分析的要求。本文主要针对故障录波数据应用逻辑进行梳理，对火电厂常见的电气故障类型进行分析，研究基于录波数据的精细化诊断方法，分析目前诊断工作中存在的技术问题，提出改善数据处理、研判流程、诊断体系的方法，提高火电厂电气故障诊断的准确性以及处置速度，保证机组和电网的安全稳定运行。

关 键 词： 火电厂；故障录波；电气故障；故障诊断

Research on Electrical Fault Diagnosis Method for Thermal Power Plants Based on Fault Recording

Zhang Rongping

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

Abstract： With the continuous increase in the capacity of thermal power units and the tightening of grid integration standards, the structure of the electrical system in power plants has become increasingly complex, and the probability of various short-circuit faults, equipment abnormalities, and circuit disturbances has also increased. The fault recording system can collect waveform data, parameter changes, and timing information of the entire process of electrical faults, and is the main carrier for electrical fault traceability analysis and precise diagnosis. The traditional manual fault diagnosis method is slow and has low accuracy, which cannot meet the requirements of rapid location and precise analysis of complex faults. This paper mainly sorts out the application logic of fault recording data, analyzes the common electrical fault types in thermal power plants, studies the refined diagnosis method based on recording data, analyzes the technical problems existing in the current diagnosis work, and proposes methods to improve data processing, judgment process, and diagnosis system to improve the accuracy and handling speed of electrical fault diagnosis in thermal power plants, and ensure the safe and stable operation of the units and the grid.

Keywords： thermal power plant; fault recording; electrical fault; fault diagnosis

引言

火电厂电气设备长期处在高负荷、连续化、变工况运行状态，线路老化、设备磨损、工况波动、外力干扰等都会造成电气故障的发生。电气故障具有突发性强、传播速度快、影响范围广等特点，如果处理不当，很容易造成设备损坏、机组跳闸、电网波动等安全事故。故障录波装置可以24小时不间断地对系统电压电流波形、开关动作顺序、保护运行状况等进行全方位的记录，并且保存着从故障发生前到故障发生后全过程的数据。依靠故障录波数据进行故障诊断，可以做到准确找到故障、找出原因、判定责任、预测隐患。深入研究录波数据的诊断应用方法，改善故障分析处理流程，对于提高火电厂电气运维水平，防止重复故障发生，保证系统安全运行有着十分重要的意义。

一、火电厂故障录波系统运行机制与数据特征

（一）故障录波系统组成结构

火电厂故障录波系统是由前端采集装置、数据传输模块、后台分析平台、存储设备这四个部分组成的，各个模块之间互相配

合来完成数据采集上传、存储和分析。前端采集装置布置在配电室、机组出线、升压站等关键点位，对三相电压、三相电流、零序参数、开关量信号进行实时采集。数据传输模块依靠电厂专用通信网络将采集的数据安全地传送到后台。后台分析平台可对数据实施展示、回放、计算、标记，给运维人员提供可视化的分析

支撑。存储设备长期保存录波数据，用作历史故障溯源比对，为故障规律研究提供数据支撑。

（二）故障录波启动逻辑

故障录波系统可根据电气参数的异常情况自动触发录波，在正常工作状态下处于静默监测状态。触发条件分为模拟量越限与开关量变位两类：电压电流突变、频率偏移、谐波异常、零序参数异常均可触发录波；保护动作、断路器分合、回路信号变位也会触发记录。系统可保存故障发生瞬间的各类参数，完整记录故障发生前、故障发生后及故障切除后的全流程数据，实现对故障完整发展过程的记录。

（三）录波数据核心特征

故障录波数据时序完整、精度高、真实性强，是开展电气故障诊断的可靠依据。故障录波以微秒为单位开展采样，可捕捉瞬时、间歇、突发故障的细微参数变化，弥补普通监测系统精度不足的缺陷。波形与参数按照时间轴顺序排列，可完整呈现故障从萌芽到系统恢复的全过程。相关数据可自动生成，不受人为因素干扰，能够真实反映现场实际工况，不会出现人工操作引发的偏差与遗漏，可为故障诊断提供可靠支撑^[1]。

二、火电厂常见电气故障及录波波形特征

（一）线路短路故障

线路短路属于火电厂的高发电气故障，可分为三相短路、两相短路、单相接地短路，各种故障的录波波形特征差别较大。三相短路时，三相电流突然增大，三相电压同时快速下降，波形突变明显，故障期间电气参数变化平稳，切除后电气参数很快恢复到正常水平。两相短路只影响两相的电流和电压，非故障相的参数保持不变，波形对称性变坏。单相接地短路表现为故障相电压归零、电流骤增，零序电压和零序电流明显增大，非故障两相运行工况正常，可以通过录波参数快速判断短路类型。

（二）电气设备过载故障

发电机、变压器、高压电机等主要设备长时间处于超负荷工作状态，容易造成持续的过载故障，录波波形为平缓渐变，没有瞬时突变。故障发生时三相电流缓慢上升，电压略有下降，波形没有畸变，电流渐渐超过额定限值，录波一直越限。过载故障隐蔽性较强、人工识别难度大，依靠录波时序数据可以准确发现长期过载隐患，防止由于设备过热、绝缘老化加快造成的安全隐患。

（三）系统谐波扰动故障

火电厂大量变频、整流设备运行，容易引起系统谐波扰动，造成波形畸变、电能质量下降。谐波故障会造成电压电流的正弦波形出现毛刺、偏移、畸变等异常。录波数据可以准确地量出每次谐波的次数和幅值，找出超标的地方。轻度谐波扰动不会引起保护动作，设备没有明显的异常，但是长期的干扰会导致设备发热、绝缘老化、计量失准，可以通过录波畸变特征来判断故障、准确找到扰动源。

（四）开关与保护误动故障

断路器误分、保护装置误动、信号异常变位属于典型的二次

电气故障，可以利用录波时序数据来准确地进行追溯。这类故障发生时，系统电压、电流等模拟量波形没有异常，只有开关量通道出现瞬时变位信号。录波可以完整地记录保护启动、继电器动作、断路器分合的精确时序，采用时序比对可以区分出设备真实的故障和装置误动^[2]。此类故障大多是由瞬时干扰、设备故障、逻辑缺陷造成的，并且不会出现一次设备参数的异常情况，只需要通过录波数据就可以完成故障的研判以及原因的判定。

三、基于故障录波的核心电气故障诊断方法

（一）波形比对诊断法

波形比对诊断法属于故障诊断的基础手段，操作简单、适用范围较广，能迅速识别出故障的大致种类。运维人员调取故障时段的原始录波波形，与标准正常工况波形、典型故障波形做全方位对比，主要从波形形态、幅值大小、畸变程度、对称状态等几个方面进行对比。通过波形差异可以快速区分出短路故障、过载故障、谐波故障、扰动故障等基本类型，大致确定故障范围。同时还可以对比同设备历史故障波形，判断本次故障是否为新的隐患或者重复性的故障，给故障原因分析提供直观的依据，适用于各种常规电气故障的快速初步诊断。

（二）参数量化计算诊断法

参数量化计算诊断法依靠录波原始数据展开精确运算，达成故障精细化判定，改善诊断精确度。通过录波系统自带的运算功能，准确地求得故障瞬间的电流电压峰值、故障持续时间、阻抗参数、谐波畸变率、零序分量占比等量化指标。将计算结果同设备额定参数、行业标准阈值、系统保护定值相比较，准确地判定出故障的严重程度以及故障的性质。利用阻抗参数可以准确找到短路故障的部位，用谐波参数可以量化的得到电能质量的缺陷等级，使故障诊断由定性判断变为定量分析，大大提高故障诊断的专业性和准确性。

（三）时序逻辑推演诊断法

时序逻辑推演诊断法依靠录波数据的全部时序链来整理出故障的发展过程和动作逻辑，准确地判定出故障的起因以及责任方。录波数据可以完整地记录故障发生、保护动作、开关动作、故障切除、系统恢复的全过程时序信息。运维人员根据时间轴整理各个节点的动作顺序，看保护装置动作是否准确，断路器分合是否合理，故障发展是否符合常规逻辑。当出现保护拒动、越级跳闸、动作时序错乱等问题时，可以依靠时序比对迅速找出逻辑上的缺陷和设备上的隐患，准确地将设备故障、保护缺陷、系统干扰这些不同的原因区分开来，从而解决复杂故障无法溯源的问题^[3]。

四、当前故障录波诊断技术应用存在的问题

（一）录波数据利用率偏低

目前，大多数火电厂只对机组跳闸、重大故障进行录波数据分析，忽略了轻微扰动、参数波动、波形畸变等常态化的数据。大量隐性故障、早期隐患相关数据长期处于闲置状态，未开展常

态化数据分析与隐患预测工作。运维人员仅侧重故障处置，未从数据趋势分析、隐患排查维度开展研判，无法挖掘录波数据的潜在价值，也无法实现故障处置从事后响应向事前预防的转变。

（二）人工诊断效率与精度不足

目前，电厂故障诊断大多依靠人工读图、计算、比较来完成，整体分析效率低。复杂的故障数据维度多、波形繁杂，人工筛查容易出现漏检、误判，并且很大程度上依靠运维人员的专业经验。人员判定标准不一样，同类故障分析结果差别很大，缺少诊断规范性。对于瞬时、间歇、复合型故障，人工很难发现细微的波形变化，容易造成故障定性不准、溯源不清的现象。

（三）录波设备与系统存在缺陷

部分老旧电厂的录波装置老化、采样精度低，造成数据采集的完整性、准确性不能得到保证。全厂录波点位覆盖不全，分支回路、二次设备和辅助系统存在采集盲区，故障发生后容易造成数据缺失，不能完整地再现故障过程。后台系统功能简单，只能进行简单的波形查询展示，并没有智能研判、参数计算、趋势分析等智能诊断的功能，智能化水平低，难以满足精细化故障诊断的要求^[4]。

五、基于故障录波的电气故障诊断体系优化策略

（一）深化录波数据常态化应用

创建录波数据常态化分析机制，冲破只对重大故障进行分析的数据束缚，全方位发掘数据的应用价值。每天定时查看系统录波数据，对轻微的波形畸变、参数越限、瞬时扰动等隐性异常进行筛查，及时发现设备的早期隐患。每月、每季度对录波数据进行汇总分析，找出设备故障发生规律、参数变化趋势、隐患高发部位，形成数据分析报告。依靠长时间的数据积累来预估设备的老化趋向、系统的薄弱之处，有针对性地实施预控检修，从而达到故障提前预知、提前处理的目的，充分发挥录波数据的预警效能^[4]。

（二）推进智能诊断技术升级应用

升级改造故障录波后台智能分析系统，增加自动化、智能化诊断模块，减轻人工分析工作量，提高诊断准确性。具有自动故障识别、波形智能比对、参数自动计算、故障类型判定等主要功能，可以自己完成基础故障的判断。录入各种典型的故障波形数据库，实现对实时波形和样本波形的智能匹配，快速得出故障类型、故障点位、故障成因的参考结论。根据复杂的故障建立智能分析模型，用大数据算法实现多维度的数据联动分析，有效地解

决了人工诊断效率低、误差大、标准不统一等问题。

（三）完善录波设备全覆盖建设

对全厂电气系统进行全方位的检查和整改，优先更换老旧低效的录波采集装置，提高数据采样的频率和精度，保证微小参数变化可以被记录下来。补充分支回路、二次设备、辅助系统录波采集点位，消除数据采集盲区，保证任何位置发生电气故障都可以完整地保存波形数据。改善设备通信传输链路，消除数据延迟、丢失、错乱等状况，保证录波数据及时上送并完整保存，为故障准确诊断提供全方位可靠的数据支撑。

（四）构建标准化故障诊断流程

制定统一的录波故障诊断标准化作业流程，对故障分析步骤、判定标准、记录要求进行规范。对故障核实、波形调取、参数计算、类型判定、溯源分析、隐患预判、台账记录等全过程的操作进行明确，统一各类故障的研判标准和分析程度。常规故障要定性定量分析，复杂故障要开展多源数据联动研判，准确找到故障原因和设备隐患。建立故障分析复核制度，专人对分析结果进行审核，防止出现研判偏差，保证故障诊断工作标准化、规范化、专业化开展^[5]。

（五）强化运维人员专业技能培训

对运维人员进行录波故障诊断专项技能培训，提高运维人员的波形分析、数据计算、故障判断能力。组织人员学习各种电气故障的波形特征、诊断方法、参数计算逻辑，掌握智能录波系统操作技能。开展典型故障案例复盘培训，用真实的波形案例讲解故障研判思路和难点处理办法，积累实战分析经验，打造专业化的录波故障分析运维队伍。

六、结论

故障录波系统可以保存下火电厂电气故障全过程的波形和参数数据，是电气故障准确诊断、追因分析、隐患预估的关键技术手段。线路短路、设备过载、谐波扰动、保护误动等常见的电气故障都有各自的录波波形和参数特征，利用波形比对、参数计算、时序推演、多源联动的方法可以达到精细的故障诊断。目前，录波数据利用率低、人工诊断精度不高、设备系统不完善、流程不规范等问题，导致诊断工作难以充分发挥作用。通过深化数据应用、升级智能技术、优化设备配置、规范诊断流程、强化人员能力，可全方位优化电气故障诊断体系，提升电气故障的处置效率与预判能力，为火电厂电气系统的安全稳定运行提供有力保障。

参考文献

- [1] 闫承山，刘德坤，钱叶牛，等．基于暂态录波型故障指示器的配电网故障事前管控应用研究[J]．电力设备管理，2022(2):48-50．
- [2] 范召典，孟庆超，张军，等．基于故障录波图的电力系统故障特征分析[J]．光源与照明，2023(1):234-236．
- [3] 李伟，付小伟，冯波，等．基于故障录波数据的变电站故障分析系统研究[J]．电气技术与经济，2024(4):148-150．
- [4] 刘超．浅析火电厂电气设备常见故障及处理建议[J]．现代工业经济和信息化，2022，12(9):232-233．
- [5] 李鹤．火电厂电气运行常见故障排除及安全管理策略[J]．电力设备管理，2024(20):101-103．

水电工程运行常见问题及解决对策研究

杨聪颖

中国葛洲坝集团第二工程有限公司，四川 成都 610091

DOI:10.61369/ME.2026070032

摘 要： 以一座运行18年的中小型引水式水电站为研究对象，基于2019—2023年运行台账、缺陷记录和检修资料，分析设备老化、运行管理及环境因素引发的运行问题，并提出针对性改进措施。结果表明，转轮气蚀、定子绝缘老化、继电保护元器件衰减和压力明管锈蚀分别发生16次、7次、9次和11次，其中定子绝缘故障单次平均弃水电量达21.8万 kW · h。通过实施抗磨蚀处理、绝缘在线监测、保护装置更新、管道防腐、管理闭环优化及环境风险防护，2024年环境类异常由实施前的年均15次降至7次，降低53.3%，发电效益保障率由94.6%提升至97.1%。研究表明，技术升级、责任落实与环境协同治理能够有效提高老旧水电站运行可靠性和综合效益。

关 键 词： 引水式水电站；设备老化；运行管理；环境风险；技术改造

Research on Common Problems and Solutions in the Operation of Hydroelectric Engineering

Yang Congying

China Gezhouba Group Second Engineering Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610091

Abstract： Taking a small and medium-sized water diversion hydropower station that has been in operation for 18 years as the research object, based on the operation ledger, defect records, and maintenance data from 2019 to 2023, this paper analyzes the operational problems caused by equipment aging, operation management, and environmental factors, and proposes targeted improvement measures. The results showed that there were 16, 7, 9, and 11 occurrences of rotor cavitation, stator insulation aging, relay protection component attenuation, and pressure tube corrosion, respectively. The average amount of abandoned water per stator insulation fault was 218000 kW · h. By implementing anti-abrasion treatment, insulation online monitoring, protection device updates, pipeline anti-corrosion, management closed-loop optimization, and environmental risk protection, the number of environmental anomalies will decrease from an average of 15 per year before implementation to 7 per year in 2024, a reduction of 53.3%, and the power generation benefit guarantee rate will increase from 94.6% to 97.1%. Research has shown that technological upgrades, responsibility implementation, and coordinated environmental governance can effectively improve the operational reliability and comprehensive benefits of old hydropower stations.

Keywords： water diversion hydropower station; equipment aging; operation management; environmental risks; technical transformation

中小型水电站是区域清洁能源供应和电网调节体系的重要组成部分，其运行可靠性直接关系流域水能资源利用效率、电力供应稳定性及生态保护成效。部分投运年限较长的引水式水电站已进入设备性能衰减和故障集中暴露阶段，水轮机过流部件磨损、发电机绝缘劣化、保护装置性能下降及压力输水设施锈蚀等问题相互叠加，传统定期检修和经验型值守模式难以及时识别隐蔽缺陷。同时，山区流域的高含沙洪水、松散边坡、低温冻融和生态流量约束进一步增加了运行控制难度。现有研究多聚焦单类设备改造或局部风险治理，对设备、管理和环境因素之间的关联关注不足。为此，本文以连续投运18年的引水式水电站为对象，系统识别其主要运行问题，分析故障频次、停机损失及管理薄弱环节，并实施转轮抗磨蚀处理、绝缘在线监测、继电保护更新、压力明管防腐、全生命周期责任管理和环境风险防护，结合运行指标评价干预效果，为同类型老旧水电站改造决策和精细化运维提供参考。

一、水电站工程概况

本文选取一座已连续投运18年的中小型引水式水电站作为研究对象。电站装设3台单机容量16 MW 的混流式水轮发电机

组，总装机容量为3×16 MW，设计多年平均发电量为1.92亿 kW · h。工程枢纽由挡水坝、引水隧洞、压力前池、发电厂房以及升压站构成，引水系统承担径流汇集与水能输送任务，所发电能经110 kV 升压站接入区域电网^[1]。现有运维团队共28人，其中

运行值守人员15人，机械以及电气检修人员8人，生产管理及安全技术人员5人，实行少人值守、集中检修的组织方式。2019—2023年运行台账显示，电站累计发电量为9.18亿kW·h，年均发电量为1.84亿kW·h，平均设备可用率为97.2%，年利用小时数约3830h。受来水偏枯、设备检修以及汛期含沙量波动影响，各年度发电量处于1.71亿至1.96亿kW·h之间，整体运行保持稳定，但设备老化故障以及环境风险已逐渐显现。

二、水电站运行常见问题分析

（一）设备老化引发的运行故障问题

研究电站投运已达18年，机电设备以及压力输水设施逐步进入老化故障集中显现阶段。调取2019—2023年缺陷记录、故障处置单以及检修报告后发现，水轮机转轮气蚀磨损最为频繁。气蚀是过流表面受到空泡溃灭冲击而产生材料剥蚀的现象，主要集中于叶片出水边以及下环区域^[2]。受表面麻坑扩大和叶型偏差影响，机组在额定水头附近的出力效率持续下降，近5年共处置16次，单次平均弃水电量为8.6万kW·h，平均抢修时间达到17.4h。

表1 某水电站2019—2023年设备老化类故障分类统计表

故障类别	核心影响对象	2019年频次 / 次	2020年频次 / 次	2021年频次 / 次	2022年频次 / 次	2023年频次 / 次	5年合计 / 次	单次平均弃水电量 / 万kW·h	平均抢修时长 / h	危害程度
水轮机转轮气蚀磨损	转轮叶片、下环以及机组出力效率	2	3	3	4	4	16	8.6	17.4	较高
发电机定子绝缘老化	定子线棒、绝缘系统以及机组安全	1	1	1	2	2	7	21.8	39.6	高
继电保护元件衰减	保护测量、动作出口以及故障隔离	1	1	2	2	3	9	5.4	11.8	较高
压力明管锈蚀渗漏	管壁、焊缝以及压力输水系统	1	2	2	3	3	11	12.7	25.3	高

（二）运行管理体系不完善问题

结合该电站现行运行管理制度、岗位责任清单以及2019—2023年巡检资料来看，管理制度虽然覆盖运行值守、设备维护以及安全监督等业务，但制度条款未能随在线监测系统投运同步调整。现有运维团队共32人，其中50岁以上人员占46.9%，机械检修经验较为丰富，而能够独立完成振摆监测、局部放电监测以及数据趋势研判的人员仅有7人^[4]。人员技能档案仍以传统检修项目作为主要考核内容，新增监测设备操作尚未纳入年度能力评价，导致异常信号识别依赖设备厂家远程协助，延长了缺陷确认时间。

巡检记录反映，厂房机电设备以及升压站电气设备已形成按班检查机制，但压力前池排水廊道、引水隧洞进入孔、压力明管支墩背侧等隐蔽部位主要依靠汛前专项检查，常态巡检频次不足。2023年抽查的186份记录中，27份存在测点数据缺项，19份仅填写设备正常，未记录渗水量、锈蚀面积以及裂缝宽度等可比参数。此类记录难以支撑缺陷发展趋势判断，也容易把边坡位移、管道渗漏等早期征兆滞留在现场^[5]。

定子绝缘老化对发电机组安全运行的影响更具隐蔽性。检修记录显示，线棒端部防晕层破损、槽口松动以及绝缘电阻下降等缺陷共出现7次，潮湿工况下局部放电电量增大，可能把单点绝缘缺陷扩展为定子接地故障。此类故障发生频次虽低，单次平均弃水电量却达到21.8万kW·h，抢修时间为39.6h。同期，投运年限超过15年的继电保护装置出现采样漂移、出口继电器接点氧化以及电源模块性能衰减，5年累计发生9次异常。元器件灵敏度降低会把保护动作偏差传递至主设备控制环节，形成误动或拒动隐患，单次处置平均需要11.8h^[3]。

压力明管老化主要表现为外壁涂层粉化、焊缝邻近区域点蚀以及支墩积水处局部锈蚀，2019—2023年累计发现11次渗漏类缺陷。其单次平均弃水电量为12.7万kW·h，平均抢修时间达到25.3h。结合表1可知，转轮气蚀具有发生频次高、影响逐年累积的特性，定子绝缘缺陷对应的停机损失和抢修周期更大，压力明管锈蚀则直接关联输水安全。继电保护异常虽然造成的即时弃水量相对较低，但会削弱故障隔离能力。因而，老化风险已从单一部件性能衰减转向水力机械、电气保护以及输水设施之间的关联影响。

设备定检方面，岗位清单按照运行、机械以及电气专业划分责任，却未把跨专业设备落实到具体责任人。调速器油压装置、励磁冷却回路以及闸门控制电源均存在多个班组共同检查而缺少牵头人的现象，缺陷登记、停机消缺以及验收销号之间容易发生责任脱节^[6]。应急预案则偏重原则性程序，近3年演练集中于防洪撤离以及消防处置，未开展机组甩负荷、继电保护拒动、压力管道突发渗漏等场景化演练。值班人员面对复合故障时需要临时确认汇报路径以及操作权限，容易扩大停机范围，并且会放大设备老化、汛期高含沙水流以及低温冻损等风险对连续发电的影响。

（三）环境因素导致的运行隐患问题

案例电站所在的西南山地流域具有汛期降雨集中、河道比降较大以及来水过程变化迅速等水文特性。每年5月至10月，上游强降雨容易把坡面细颗粒物以及河床推移质带入取水口，来水含沙量随洪峰明显增加。泥沙进入引水系统后，会对水轮机转轮、导叶以及蜗壳等过流部件形成冲蚀和磨粒磨损，细颗粒还可能进入密封间隙，加快止漏环损耗^[7]。该隐患在连续暴雨以及洪水消退阶段较为集中，可能造成机组效率下降、振动增大以及检修周期

缩短，潜在影响等级判定为较高。

从库区工程地质条件来看，右岸局部分布由碎石、粉质黏土以及风化岩屑构成的松散堆积体，结构密实度偏低，坡脚又受到库水位涨落作用。极端降雨期间，雨水入渗会把坡体含水率推高，使其抗剪强度下降；若同期出现库水位快速回落，坡体渗透压力难以及时消散，可能诱发局部滑移。滑落物进入引水渠后，易造成渠段过流断面收缩，严重时还会引起堵塞以及停机，风险易发时段集中于主汛期后半段，潜在影响等级为高。

案例流域冬季昼夜温差较大，12月至次年2月的寒潮过程会使背阴区外露管路、阀门以及户外变电设备承受低温冻融作用。管内静水结冰膨胀可能把接头密封面撑开，端子箱凝露结冰则会削弱二次回路绝缘性能，故障影响虽多局限于单套设备，但具有突发性，潜在影响等级为中等^[8]。与此同时，生态流量下泄监管已由定期核查转向连续监测，电站原有按峰谷电价集中调峰的运行方式，容易在停机或低负荷时段形成下泄流量波动。该矛盾全年存在，在枯水期更为突出，既可能限制可调出力，也会增加生态考核风险，其潜在影响等级为较高。

三、水电站运行问题解决对策及效果评估

（一）设备老化问题的技术升级对策

鉴于设备缺陷频次以及停机损失差异，技术改造宜纳入年度检修计划分阶段开展。针对转轮叶片出水边以及下环气蚀区域，可选用超音速火焰喷涂工艺，把碳化钨基抗磨蚀涂层覆盖于修磨后的过流表面，单台投资控制在35万至45万元。施工期间需校核叶型尺寸、涂层厚度以及动平衡状态，避免局部增重引起振动。

定子绝缘改造应结合停机试验定位缺陷线棒，对防晕层破损以及槽口松动部位开展局部绝缘补强，不宜直接更换整套定子绕组。同时布置局部放电在线监测装置，持续采集绝缘内部微弱放电信号，3台机组预计投入60万至80万元。安装时需加强传感器屏蔽以及接地处理，降低电磁干扰对趋势研判的影响^[9]。

继电保护装置可按故障频次分批替换，优先更新主变以及发电机保护屏，选用国产数字式保护装置并完成定值复核、回路核对以及整组传动试验，投资约90万元，计划在2个枯水期内完成。压力明管则结合年度停水检修清除外壁锈层，涂覆环氧富锌底漆以及耐候面漆，内壁增设牺牲阳极阴极保护系统，借助阳极优先腐蚀来减缓管壁损耗，预计投入70万至100万元。施工中应重点检测焊缝厚度、支墩积水以及绝缘接头状态，并把隐蔽部位纳入后续定期测厚范围。

（二）运行管理体系的完善对策

鉴于在线监测设备投运后岗位能力评价仍偏重传统检修项目，电站应把师带徒协作以及专项技能培训纳入年度计划，由机械、电气骨干带领青年人员完成振摆监测、局部放电监测以及数据趋势研判训练，每半年组织1次智能化运维设备操作考核，并把考核结果用于岗位授权。巡检流程需按照设备风险等级明确检查频次、点位、项目以及记录字段，把压力前池排水廊道、引水隧洞进人孔以及压力明管支墩背侧纳入常态清单，现场统一记录

渗水量、锈蚀面积以及裂缝宽度，异常数据应于当天完成复核与流转。

围绕核心设备建立全生命周期责任台账，把投运参数、缺陷记录、检修周期、备件更换以及验收销号归集至同一设备编码，明确机组、调速器以及闸门控制电源的运维责任人，由责任人牵头落实定检定修以及跨专业会签。结合机组甩负荷、继电保护拒动以及压力管道突发渗漏等工况编制场景化预案，每季度开展1次实操演练，核验汇报路径、操作权限以及物资调用时限。闭环式运行管理流程见图1，其以风险排查为入口，依次衔接问题处置、效果复盘以及流程优化，并把复盘结论回写培训、巡检和检修标准，使现场问题能够转化为制度修订依据。

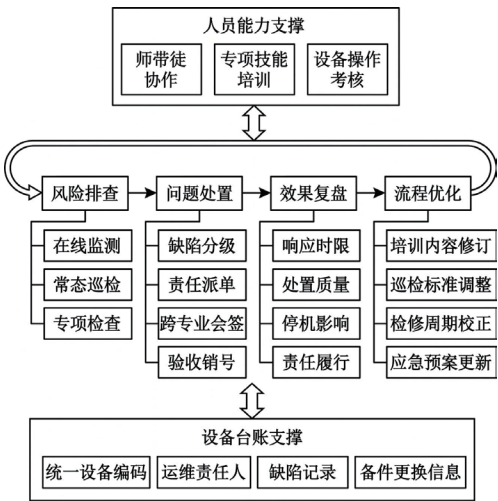


图1 水电站闭环式运行管理流程架构图

（三）环境因素影响的缓解对策及效果评估

针对汛期泥沙冲刷，可把低水位拉沙纳入洪水调度，即在洪峰前后降低取水水位并启用排沙孔，使富含沙水流优先下泄，同时依据含沙量调整机组负荷。右岸松散堆积体宜设置格构锚杆以及坡顶截水沟、坡脚排水沟，借助位移监测点识别滑移征兆。背阴区外露管路可敷设保温层以及自限温伴热带，户外端子箱配置加热除湿装置。调峰计划则需把生态流量约束纳入负荷分配模型，在枯水期预留稳定下泄流量，减少频繁启停引起的流量波动^[10]。

环境隐患管控成效可运用故障发生率降低率进行衡量，其计算公式为：

$$R_f = \frac{N_b - N_a}{N_b} \times 100\%$$

其中， R_f 表示故障发生率降低率，单位为百分比， N_b 表示措施实施前的年均故障次数，单位为次每年， N_a 表示措施实施后的年均故障次数，单位为次每年。

以2021—2023年均值为实施前基准，并与2024年运行台账进行比较，相关指标见表2。环境类异常由年均15次降至7次，综合降低率为53.3%，风险管控等级由较高降为中等；发电效益保障率由94.6%提高至97.1%，增幅保持在合理范围，说明调度优化以及工程防护能够减轻环境扰动，但汛期泥沙以及边坡稳定仍需持续监测。

表2 环境隐患缓解对策实施前后运行风险指标对比表

隐患类型	核心评价指标	实施前指标值	实施后指标值	改善幅度	实施前管控评价	实施后管控评价
汛期高含沙水流	过机高含沙异常次数	4 次每年	3 次每年	降低 25.0%	较高风险	中等风险
库区松散边坡	位移超限以及渠段落石次数	2 次每年	1 次每年	降低 50.0%	高风险	中等风险
冬季低温冻融	管路以及户外设备冻损次数	3 次每年	1 次每年	降低 66.7%	中等风险	低风险
生态流量波动	下泄流量不达标次数	6 次每年	2 次每年	降低 66.7%	较高风险	低风险
环境隐患综合影响	环境类异常总次数	15 次每年	7 次每年	降低 53.3%	较高风险	中等风险
发电效益保障水平	发电效益保障率	94.6%	97.1%	提高 2.5 个百分点	一般保障	较高保障

结语

老旧引水式水电站的稳定运行不能仅依赖故障后的检修处置，而应形成设备状态识别、管理责任落实与流域风险防控相互衔接的治理体系。针对不同缺陷的发生频次、损失程度和安全后果分配改造资源，可避免整机更换造成的投资浪费，并提高检修计划的针对性。设备全生命周期台账、量化巡检记录、跨专业责

任人和场景化演练能够缩短异常确认及处置时间，使现场经验转化为可追溯的管理标准。泥沙、边坡、冻融及生态流量风险具有明显的季节性和动态性，后续仍需持续积累在线监测数据，完善风险阈值和负荷调度模型，同时加强关键部件状态评价及改造后性能复核。通过技术、管理和环境措施的持续协同，可进一步降低非计划停机风险，延长设备服役周期，并兼顾发电效益、输水安全与生态责任。

参考文献

[1] 温玉婷. 水泵运行常见问题与解决对策 [J]. 河北水利, 2024, (12): 42-43.

[2] 杨金莎. 水利水电设备运行管理方法探究 [J]. 中国设备工程, 2025, (22): 56-58.

[3] 石强强. 工业循环水常见问题及解决方案 [J]. 安徽化工, 2025, 51(05): 138-140.

[4] 陈长奔, 葛耀凯, 吴寿敬, 邵慧双, 许诚豪, 章辉. 阀门自动化应用中的常见问题及解决措施 [J]. 电工技术, 2024, (S2): 7-9.

[5] 何福泰. 电气自动化在水利水电工程中的应用浅谈 [J]. 中国设备工程, 2024, (24): 236-238.

[6] 杨国平, 黄紫倩. 政府投资项目工程决算审计常见问题及其对策研究 [J]. 会计师, 2025, (11): 65-67.

[7] 冯全勇. 涡街流量计使用过程中的常见问题处理及日常维护保养 [J]. 中国有色金属, 2024, (S2): 164-165.

[8] 张院乐, 曹向阳. 油气储运安全管理的常见问题及解决策略 [J]. 石化技术, 2024, 31(12): 290-292.

[9] 谭龙斌, 刘春林, 王涛. 大中型水利工程移民安置资金使用管理常见问题处理研究 [J]. 水利水电技术 (中英文), 2025, 56(S2): 86-90.

[10] 王文秀. 水电工程概算执行与造价管控技术分析 [J]. 财富时代, 2024, (12): 24-25.