

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.

现代工程学

Modern Engineering

第3卷 第1期 2026年1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 | 水利工程混凝土裂缝成因及防治措施研究
Research on the Causes and Preventive Measures of Concrete Cracks in Hydraulic Engineering | 项宇, 张森林
Xiang Yu, Zhang Senlin |
| 004 | 建筑工程施工技术优化与质量提升分析
Analysis on Optimization of Construction Technology and Quality Improvement in Building Engineering | 张玉军
Zhang Yujun |
| 007 | 高层建筑塔式起重机高空拆除技术的安全性及效率提升研究
Research on Enhancing Safety and Efficiency in High-Altitude Demolition Technology for Tower Cranes in High-Rise Buildings | 郑兴瑞
Zheng Xingrui |
| 011 | 大跨度钢结构网架吊装过程中的整体稳定性保障措施研究
Research on Measures to Ensure Overall Stability During the Hoisting Process of Large-Span Steel Structure Grids | 那丽岩
Na Liyan |
| 014 | 二级公路改建施工技术要点探析
Analysis on the Key Points of Reconstruction Technology of Second-Class Highway | 王建光
Wang Jianguang |
| 017 | 石化企业建设工程招投标廉洁风险管理研究
Research on Integrity Risk Management of Construction Project Bidding and Tendering in Petrochemical Enterprises | 别苏敏
Bie Sumin |
| 020 | 浅埋偏压软弱围岩隧道施工技术分析
Analysis of Construction Technology for Tunnels in Shallow-Buried, Overburdened, Weak Surrounding Rock Conditions | 曹铁锤
Cao Tiechui |
| 023 | 公路工程项目招标造价控制与合同风险管控
Cost control and Contract Risk Management in Highway Engineering Project Bidding | 陈苏君, 王嘉璐
Chen Sujun, Wang Jiayao |
| 026 | 超高层建筑塔式起重机起重臂空中拆卸技术研究与应用
Research and Application of Aerial Dismantling Technology of Tower Crane Boom in Super High-rise Building | 陈先勇
Chen Xianyong |
| 030 | 公路路面常见病害成因分析及防治技术研究
Analysis of the Causes of Common Road Pavement Diseases and Research on Prevention and Control Technologies | 林双林
Lin Shuanglin |
| 033 | 老旧小区节能改造窗墙节点渗漏原因及整治技术
Reasons for Window-Wall Joint Leakage in Energy-saving Renovation of Old Residential Areas and Remediation Techniques | 刘康
Liu Kang |
| 037 | 基于多源传感的城市桥梁运营状态实时评估方法
Real-time Evaluation Method for Urban Bridge Operation Status Based on Multi-source Sensing | 满建琳
Man Jianlin |
| 040 | 长大越江隧道贯通测量技术的应用提升与工程验证
Application Improvement and Engineering Verification of Changyue River Tunnel Penetration Measurement Technology | 张宏伟
Zhang Hongwei |
| 043 | 装配式端板连接钢梁柱节点抗震性能及受力分析研究
Research on Seismic Performance and Stress Analysis of Prefabricated End Plate Connection Steel-Concrete Beam-Column Joints | 鲁万卿, 田为, 李正英, 刘红军
Lu Wanqing, Tian Wei, Li Zhengying, Liu Hongjun |

机械工程 | MECHANICAL ENGINEERING

050	铁路接触网防风偏技术措施优化研究——以大风区段为例 Research on Optimization of Windproof Deviation Technology Measures for Railway Contact Network — Taking Strong Wind Sections as an Example	刘海涛, 侯磊, 李阳 Liu Haitao, Hou Lei, Li Yang
053	面向柔性制造的多轴数控机床数字化协同设计与工艺优化 Digital Collaborative Design and Process Optimization of Multi-axis CNC Machine Tools for Flexible Manufacturing	郝海瑞 Hao Hairui
056	超危大钢结构工程施工安全风险管控体系及应用研究 Research on the Construction Safety Risk Management and Control System and Its Application for Extra-large and High-risk Steel Structure Projects	白尧尧, 许毅, 李俊杰, 张桂军 Bai Yaoyao, Xu Yi, Li Junjie, Zhang Guijun
061	工程机械机电设备自动调试技术探讨 Discussion on Automatic Debugging Technology for Electromechanical Equipment in Construction Machinery	张俊 Zhang Jun
064	智能制造背景下机电一体化技术的发展探索 Exploration of the Development of Mechatronics Technology in the Context of Intelligent Manufacturing	史正元, 熊正凯, 高文静 Shi Zhengyuan, Xiong Zhengkai, Gao Wenjing
067	湖南省桑植县碎屑岩切坡参数特征与稳定性数值模拟研究 Study on the Characteristics of Slope Cutting Parameters and Numerical Simulation of Stability of Clastic Rocks in Sangzhi County, Hunan Province	李江, 王潇, 何阳, 姚海鹏, 曹顺红 Li Jiang, Wang Xiao, He Yang, Yao Haipeng, Cao Shunhong
071	基于 MW 级飞轮的混合储能一次调频控制策略分析 Analysis of Primary Frequency Regulation Control Strategy for Hybrid Energy Storage based on MW Level Flywheel	李添汇 Li Tianhui
074	检流计偏转线圈运动特性的研究 Research on the Motion Characteristics of the Deflection Coil in a Galvanometer	卢翠珍, 陆大同 Lu Cuizhen, Lu Datong
079	面向低背压运行的机组蒸发冷凝器热力性能提升研究 Research on Improving the Thermal Performance of Evaporative Condensers for Units Operating at Low Back Pressure	马永军 Ma Yongjun
082	机电设备安装调试专项现场服务工程师培养体系构建 Construction of Special On-site Service Engineer Training System for Mechanical and Electrical Equipment Installation and Commissioning	钱鑫 Qian Xin
085	固定-柔性支架光伏阵列空间整体排列与排间距优化方法研究 Research on the Spatial Overall Arrangement and Row Spacing Optimization Method of Fixed-Flexible Bracket Photovoltaic Arrayss	王若晨 Wang Ruochen
088	高温高压工况下智能压力仪表的精度优化与稳定性分析 Accuracy Optimization and Stability Analysis of Intelligent Pressure Instruments under High-Temperature and High-Pressure Conditions	梁春雨 Liang Chunyu

信息工程 | INFORMATION ENGINEERING

091	飞机电子设备维修中的常见问题与解决方案 Common Issues and Solutions in Aircraft Electronic Equipment Maintenance	任盈锋, 何正欣 Ren Yingfeng, He Zhengxin
094	工业互联网环境下机械产品数字化设计与制造数据闭环集成平台构建 Construction of a Closed-Loop Integrated Platform for Digital Design and Manufacturing Data of Mechanical Products in the Industrial Internet Environment	魏清华 Wei Qinghua
097	无线 MESH 网络的安全机制与抗攻击能力提升研究 Research on Security Mechanisms and Enhancement of Anti-Attack Capabilities in Wireless MESH Networks	戴定卫 Dai Dingwei
100	智能化和大数据在特种设备检验检测中的应用 Application of Intelligence and Big Data in the Inspection and Testing of Special Equipment	张鹏 Zhang Peng
103	人工智能大语言模型在压力管道检验检测中的应用探讨 Exploration of the Application of Artificial Intelligence Large Language Models in the Inspection and Testing of Pressure Piping	张勇刚 Zhang Yonggang
107	基于无人机倾斜摄影的测绘工程三维建模技术研究 Research on 3D Modeling Technology for Surveying and Mapping Engineering Based on UAV Oblique Photography s	董智远 Dong Zhiyuan
110	论电子汽车衡故障诊断与防作弊装置研究 Research on Fault Diagnosis and Anti-Cheating Devices for Electronic Axle Weighers	韩敬春 Han Jingchun
113	EPC 项目商务管理中的合同风险识别与防范措施 Contract Risk Identification and Prevention Measures in Commercial Management of EPC Projects	徐萌 Xu Meng
116	智慧家庭 FTTR 千兆全光网建设探讨 Discussion on the Construction of Smart Home FTTR Gigabit Full Optical Network	张广辉, 仲凯 Zhang Guanghui, Zhong Kai

能源工程 | ENERGY ENGINEERING

119	煤矿应急救援能力成熟度评价模型构建及应用 Construction and Application of Coal Mine Emergency Rescue Capability Maturity Evaluation Model	贺泓梵 He Hongfan
122	高度集成与模块化设计在火力发电输煤 DCS 系统数智化中的应用研究 Research on the Application of Highly Integrated and Modular Design in the Digitalization of DCS Systems for Coal Conveying in Thermal Power Generation	张宏利 Zhang Hongli

125	影响钙钛矿量子点稳定性的因素以及其稳定性的方法 The Factors Influencing the Stability of Perovskite Quantum Dots and The Methods for Stabilizing Them	赵璿文 Zhao Junwen
127	火力发电汽轮机通流部分精细化检修工艺优化研究 Research on the Optimization of Fine Maintenance Technology for the Flow Path Section of Thermal Power Turbines	周迪 Zhou Di
131	邻近地铁区间电力迁改工程结构安全性研究 Research on Structural Safety of Adjacent Metro SectionPower Relocation Project	郝君亮 Hao Junliang

水利工程混凝土裂缝成因及防治措施研究

项宇, 张森林

江苏淮阴水利建设有限公司, 江苏 淮安 223001

DOI:10.61369/ME.2026010002

摘 要 : 水利工程中混凝土裂缝的形成是一个复杂的过程, 通常与环境因素、施工质量、材料选择及结构设计等多方面因素密切相关。裂缝不仅影响工程的安全性和使用寿命, 还可能导致水土流失等不良后果。针对混凝土裂缝的成因, 结合实际工程案例, 探讨了裂缝产生的主要因素, 如温度变化、湿度变化、收缩应力等。为有效防治混凝土裂缝的产生, 提出了相应的防治措施, 包括合理选择材料、优化施工工艺、加强养护管理等方面的改进。通过这些措施可显著提高水利工程的质量与稳定性, 延长工程寿命。

关 键 词 : 水利工程; 混凝土裂缝; 成因分析; 防治措施; 施工工艺

Research on the Causes and Preventive Measures of Concrete Cracks in Hydraulic Engineering

Xiang Yu, Zhang Senlin

Jiangsu Huaiyin Water Conservancy Construction Co., Ltd., Huai'an, Jiangsu 223001

Abstract : The formation of concrete cracks in hydraulic engineering is a complex process, often closely related to various factors such as environmental conditions, construction quality, material selection, and structural design. Cracks not only affect the safety and service life of the project but may also lead to adverse consequences such as soil erosion. Focusing on the causes of concrete cracks and incorporating practical engineering cases, this paper explores the primary factors contributing to crack formation, including temperature variations, humidity changes, and shrinkage stress. To effectively prevent and control the occurrence of concrete cracks, corresponding preventive measures are proposed, encompassing improvements in material selection, optimization of construction techniques, and enhanced maintenance management. These measures can significantly enhance the quality and stability of hydraulic engineering projects and extend their service life.

Keywords : hydraulic engineering; concrete cracks; cause analysis; preventive measures; construction techniques

引言

混凝土作为水利工程中最常用的建筑材料, 其结构的稳定性直接关系到工程的安全性和使用寿命。然而, 混凝土裂缝的出现却成为了困扰水利工程领域的一大难题。裂缝不仅影响结构强度, 还可能引发一系列的后续问题, 如渗水、腐蚀等, 严重时甚至会导致工程功能的丧失。通过分析混凝土裂缝的成因及防治措施, 可以有效提高工程的质量与安全性。随着技术的进步和材料科学的发展, 防治裂缝的方法不断完善, 这对水利工程的建设与维护具有重要的指导意义。探索混凝土裂缝的根源与防治对策, 不仅有助于提升水利工程的质量, 还能为相关领域的研究提供宝贵的经验和参考。

一、混凝土裂缝的成因分析

(一) 环境因素对混凝土裂缝的影响

环境因素对混凝土裂缝的形成有着直接而深远的影响, 尤其是温度、湿度和风速的变化。在温度较高的环境下, 混凝土中的水分容易蒸发, 水泥水化反应产生的水分蒸发速率加快, 从而导致水泥发生收缩, 进而产生裂缝。特别是在水利工程中, 由于水体的温度波动, 混凝土与水体接触的界面常常会受到显著的温差影响, 温度

应力会导致混凝土表面产生温度裂缝。此外, 湿度变化也是裂缝产生的重要因素。湿度过低时, 混凝土在硬化过程中可能发生干缩现象, 导致表面裂缝; 而湿度过高时, 混凝土内部水分滞留未能有效蒸发, 会导致裂缝的扩展。风速过大时也会加剧水分蒸发, 加速裂缝的形成。因此, 环境的长期变化不仅对混凝土的表面产生影响, 也可能引发深层裂缝, 对混凝土结构的长期稳定性构成威胁。特别是在极端气候条件下施工和使用的水利工程中, 裂缝问题尤为突出, 需特别重视环境因素的调控和监测^[1]。

（二）施工质量与裂缝产生的关系

施工质量是影响混凝土裂缝形成的关键因素之一，任何环节的疏忽都可能导致裂缝的产生。在混凝土浇筑过程中，若操作不当或工艺不规范，常常会导致裂缝的形成。比如，混凝土振捣不均匀，可能会造成混凝土内部出现气泡或空隙，这些空隙随着时间的推移成为裂缝的根源。此外，混凝土浇筑后的养护不当，特别是在早期阶段缺乏足够的湿养护，或养护时间过短，也会导致混凝土强度不足，内部水分蒸发过快，进而引发裂缝。温度控制是施工中不可忽视的一环，特别是在大体积混凝土施工中，温差过大容易在混凝土内部产生温度应力，导致裂缝的发生。为了有效防止裂缝的产生，施工过程中每一环节都必须严格按照规范执行，从原材料的选择到浇筑、振捣和养护，都应精细控制，确保混凝土的密实性、强度和稳定性，降低裂缝发生的风险。

（三）材料选择与混凝土裂缝的关联

材料的选择对混凝土的性能和裂缝的产生起着至关重要的作用。水泥、骨料、外加剂等材料的质量直接影响混凝土的强度和耐久性。例如，使用质量较差的水泥或骨料容易导致混凝土在后期出现裂缝。此外，掺加不当的外加剂也可能使混凝土的收缩性和膨胀性发生变化，从而引发裂缝。在水利工程中，尤其是在水泥与水的比例、骨料的粒径选择等方面都需要特别考虑，合理的材料搭配可以有效地减少裂缝的风险。另外，随着新型建材的出现，改良混凝土的材料特性、增强其抗裂性能已成为一种趋势，通过优化材料的配比和选择，能够在一定程度上防止裂缝的产生^[2]。

二、水利工程混凝土裂缝的常见类型

（一）收缩裂缝

收缩裂缝是混凝土在硬化过程中由于水分蒸发或水泥水化反应引起体积收缩而产生的裂缝。这类裂缝多发生在混凝土浇筑后的1~14 d内，尤其是在环境温度 $\geq 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度 $\leq 60\%$ 的条件下，收缩现象更为明显。从参数角度看，普通混凝土的干燥收缩率一般为 $(2\sim 6)\times 10^{-4}$ ，而当约束条件较强时，收缩应力可达到0.3~1.0 MPa。若该应力超过混凝土早期抗拉强度（通常为1.0~2.5 MPa），则容易产生裂缝。在大型水利工程中，大体积混凝土（单次浇筑厚度 $\geq 1.0\text{ m}$ ）由于内部散热困难，更易出现收缩裂缝，常见裂缝宽度为0.1~0.3 mm，多呈不规则网状分布。为有效控制收缩裂缝的发生，施工中应合理控制水胶比（一般 ≤ 0.45 ），减少水泥用量，采用缓凝或低收缩水泥，并通过不少于14 d的湿润养护，使混凝土表面保持充分湿度，降低收缩速率。

（二）温度应力裂缝

温度应力裂缝是由于混凝土内部温度变化引起热胀冷缩而产生的裂缝。混凝土浇筑后，水泥水化反应持续释放热量，大体积混凝土内部最高温度可达到60~75 $^{\circ}\text{C}$ ，而表面温度受环境影响较大，内外温差往往可超过20~25 $^{\circ}\text{C}$ 。当混凝土内部温度梯度过大时，所产生的温度应力一般可达1.5~3.0 MPa，若超过混凝土的抗拉强度，便会形成温度裂缝。此类裂缝多呈贯穿性或沿结构长度方向分布，裂缝宽度通常在0.2~0.5 mm之间，对坝体、

闸墩等水工建筑物的整体性和防渗性能影响较大。为减缓温度应力裂缝的出现，工程中应严格控制混凝土入仓温度（一般 $\leq 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ），采用分层、分块浇筑方式，合理设置冷却水管或表面保温措施，并优先选用低热水泥或粉煤灰掺量为20%~40%的混凝土配合比，以降低水化热峰值，减少温度应力集中^[3]。

（三）渗水裂缝

渗水裂缝通常出现在水库、坝体、输水隧洞和压力管道等与水长期接触的结构中，其产生主要与混凝土裂缝宽度、孔隙结构及施工质量有关。研究表明，当混凝土裂缝宽度超过0.2 mm时，防渗性能将明显下降，渗透系数可由原来的 $10^{-9}\sim 10^{-10}\text{ m/s}$ 上升至 $10^{-6}\sim 10^{-7}\text{ m/s}$ 。在长期水压力作用下，渗水裂缝易发生扩展，可能引起钢筋锈蚀、混凝土碳化加速，严重时威胁工程安全与稳定运行。渗水裂缝的形成通常与混凝土密实度不足（振捣不充分）、施工缝处理不当以及养护时间不足（少于7 d）等因素密切相关。为防止渗水裂缝的发生，施工过程中应严格控制混凝土的坍落度（一般为120~180 mm）和振捣质量，确保结构密实；同时可在关键部位设置止水带、采用渗透结晶型防水材料，并通过定期检测裂缝宽度与渗流量，及时采取灌浆或封闭修复措施，以保证水利工程的安全与长期稳定运行。

三、混凝土裂缝的检测与评估方法

（一）目视检查与现场评估

目视检查是混凝土裂缝检测中最基本、最常用的方法之一，通过对裂缝外观的观察，初步了解裂缝的形态、分布和大小等特征。现场评估通常结合目视检查，通过人工巡视、测量裂缝的长度、宽度、深度等，快速判断裂缝的严重程度。目视检查的优势在于操作简便、经济且不需要专门的设备，因此广泛应用于工程项目的初期阶段或简单的裂缝排查。然而，目视检查也存在一定局限性，例如对于细小或隐蔽的裂缝难以察觉，无法准确量化裂缝的具体数据。因此，目视检查常常作为其他检测方法的补充，提供初步的信息并帮助确定是否需要更深入的检测。现场评估的效果高度依赖于检查人员的经验和专业性，因此在进行现场评估时，往往需要多次巡查与详细记录，确保裂缝的全面检测^[4]。如图1所示



图1 裂缝排查

（二）裂缝监测技术的发展

随着科技的进步，裂缝监测技术逐步发展并得到广泛应用。裂缝监测技术通常采用各种先进的仪器设备，如应变计、位移传感器、激光测量仪等，这些设备能够对裂缝的变化进行实时监控和精确测量。应变计和位移传感器通过感知混凝土的微小位移和变形，可以及时检测到裂缝的扩展情况，提供裂缝发展的动态数据。激光测量仪则能通过高精度的扫描技术，对裂缝的三维形态进行详细记录。近年来，无损检测技术的引入使得裂缝监测更加高效和准确，无需破坏结构表面即可获取裂缝的精确数据，避免了传统方法可能带来的误差和施工干扰。裂缝监测系统不仅能够对混凝土裂缝的防治提供数据支持，还能够实现对工程结构健康状况的持续监控，确保工程的安全运行^[5]。

（三）裂缝深度与宽度的量化评估

裂缝的深度和宽度是评估混凝土裂缝严重性的重要指标。裂缝的宽度通常通过裂缝宽度计进行测量，该工具通过直接接触裂缝的两侧，精确测量裂缝的开口宽度。裂缝宽度的增大通常意味着裂缝在进一步扩展，可能对混凝土结构的强度和耐久性产生影响。裂缝的深度评估则相对复杂，通常需要通过钻芯取样、超声波检测或 X 射线成像等技术手段进行量化。超声波检测技术通过测量声波传播的时间差，能够判断裂缝的深度及其分布情况，而 X 射线成像则能提供更精确的内部裂缝信息。通过这些量化评估手段，可以全面了解裂缝的扩展情况及对结构的影响，为后续的修复和加固提供科学依据。量化评估方法不仅能够准确诊断裂缝的情况，还能帮助预测裂缝的发展趋势，为工程的维护和修复提供有效的决策支持^[6]。

四、混凝土裂缝的防治措施

（一）材料优化与改良

材料的选择和优化是防治混凝土裂缝的关键因素。采用优质的水泥、骨料和外加剂能够显著提高混凝土的抗裂性能。水泥的种类直接影响混凝土的强度和收缩性，低热水泥可以有效减少水泥水化反应中的热量释放，从而降低温差引起的裂缝风险。骨料的粒径和质量也对混凝土的密实度和强度有重要影响，合理选择骨料的类型和颗粒组成能够提升混凝土的抗裂能力。外加剂如膨胀剂、减水剂等的使用，可以优化混凝土的性能，减少收缩应力，提高其耐久性。例如，膨胀剂能在混凝土硬化过程中产生微小的膨胀作用，抵消部分收缩应力，从而有效防止裂缝的发生。随着新型材料的不断研发，智能材料、超高性能混凝土（UHPC）

等的应用也为裂缝防治提供了更多的选择。通过材料优化与改良，能够在源头上降低混凝土裂缝的发生几率^[7]。

（二）施工工艺的改进

施工工艺的合理设计和严格执行是控制混凝土裂缝的关键因素。浇筑过程中的每一个环节都需要精确控制，确保施工质量。在浇筑大体积混凝土时，由于温差较大，容易产生温度应力，导致裂缝的发生。为此，采用分层浇筑和分段施工的方式，可以有效地分散温度应力，使温度梯度得到缓解。此外，合理控制浇筑速度、振捣强度和振捣均匀性，能够确保混凝土的密实性，减少因气泡或空隙形成的裂缝。在混凝土的养护过程中，尤其是在早期阶段，必须保持充足的湿度，以防止水分过早蒸发导致干缩裂缝。温差较大的环境下，施工现场需要采取有效的温控措施，如覆盖保温层、使用喷雾降温等，避免温度应力过大引发裂缝。施工工艺中的细节决定了混凝土的质量和抗裂能力，因此，提升施工质量和执行严格的工艺标准，是确保工程质量的核心措施^[8]。

（三）加强养护与维护管理

混凝土的养护和维护管理是延长其使用寿命、预防裂缝发展的重要措施。混凝土的养护主要是在浇筑后提供足够的湿度和适宜的温度，以保证水泥水化反应的顺利进行。在混凝土硬化过程中，水分的过度蒸发会导致干缩裂缝，因此，在混凝土浇筑后的早期阶段，必须采取适当的养护措施，如覆盖湿草帘、洒水保湿、使用养护膜等，以确保混凝土充分水化和强度提升。对于已经发生裂缝的混凝土结构，应及时进行检查与修复。裂缝的修补不仅仅是填补表面的裂缝，更要深入分析裂缝形成的原因，采用科学的加固方法。定期的维护检查也是非常必要的，尤其是在水利工程中，长期暴露在水和湿润环境下，裂缝可能随时间推移逐渐扩展，定期的监测和维护可以及时发现并修复潜在的隐患，确保结构的长期稳定性和安全性。

五、结语

混凝土裂缝问题在水利工程中具有广泛的影响，直接关系到工程的安全性和使用寿命。通过分析裂缝的成因，可以发现环境因素、施工质量和材料选择是裂缝产生的主要原因。有效的裂缝防治需要从源头入手，采用优化的材料、改进的施工工艺以及科学的养护管理。裂缝检测技术的发展为裂缝的早期发现和精确评估提供了可靠保障，同时，量化评估裂缝深度和宽度的精确性，为后续的修复提供了重要数据支持。

参考文献

- [1] 贺关清. 水利工程中混凝土裂缝产生原因及防治措施研究 [J]. 现代工程科技, 2025, 4(13): 157-160.
- [2] 李来明. 水利工程中混凝土裂缝成因及防治措施 [J]. 农村科学实验, 2025(11): 105-107.
- [3] 闫娜娜. 水利工程中混凝土裂缝产生的原因及防治措施 [J]. 中国水泥, 2025(05): 76-78.
- [4] 桑利雄. 水利施工中混凝土裂缝的防治施工技术探讨 [J]. 中国住宅设施, 2025(04): 190-192.
- [5] 侯荣丽. 水利工程混凝土裂缝产生原因及防治措施研究 [J]. 水上安全, 2025(03): 22-24.
- [6] 王立群. 水利工程施工中混凝土裂缝的防治措施 [J]. 水上安全, 2024(14): 196-198.
- [7] 牛欣伟. 农业水利工程施工中混凝土裂缝出现的原因及防治措施 [J]. 农村科学实验, 2024(09): 97-99.
- [8] 房广云. 水利工程施工混凝土裂缝的产生原因及防治措施 [J]. 水上安全, 2023(13): 188-190.

建筑工程施工技术优化与质量提升分析

张玉军

安徽建工水利开发投资集团有限公司, 安徽 蚌埠 233000

DOI:10.61369/ME.2026010003

摘 要 : 建筑工程质量直接关系群众切身利益, 是行业可持续发展的核心保障。本文围绕建筑工程施工技术优化与质量提升展开研究, 剖析当前行业存在的突出问题。施工技术应用中存在创新不足、针对性欠缺及技术交底不彻底等问题, 质量管理存在体系不完善、管控重心失衡与标准不统一等缺陷, 同时自然环境与周边条件限制、管理机制缺陷也对工程质量产生显著影响。在此基础上, 提出针对性技术优化策略, 包括强化施工准备阶段的勘察设计交底与方案优化、聚焦关键工序的工艺改进、推动信息化与智能化技术深度融合; 并从构建全流程质量保证体系、加强材料与设备全过程管控、提升从业人员素质与管理水平三个维度, 明确质量提升路径。研究旨在为建筑工程行业解决施工技术与质量管控痛点提供实践参考, 助力工程质量与施工效率同步提升, 推动行业高质量发展。

关 键 词 : 建筑工程; 施工技术优化; 工程质量提升; 质量管理

Analysis on Optimization of Construction Technology and Quality Improvement in Building Engineering

Zhang Yujun

Anhui Construction Engineering Water Conservancy Development and Investment Group Co., Ltd.,
Bengbu, Anhui 233000

Abstract : The quality of building engineering directly relates to the vital interests of the public and serves as the core guarantee for the sustainable development of the industry. This paper focuses on the optimization of construction technology and quality improvement in building engineering, analyzing prominent issues currently existing in the industry. Problems in the application of construction technology include insufficient innovation, lack of pertinence, and incomplete technical disclosure. Deficiencies in quality management encompass an imperfect system, an imbalance in management focus, and inconsistent standards. Additionally, limitations imposed by the natural environment and surrounding conditions, as well as flaws in management mechanisms, significantly impact project quality. On this basis, targeted technical optimization strategies are proposed, including strengthening survey and design disclosure and scheme optimization during the construction preparation phase, focusing on process improvements in key procedures, and promoting the deep integration of information and intelligent technologies. Furthermore, quality improvement paths are delineated from three dimensions: establishing a comprehensive quality assurance system, strengthening full-process control over materials and equipment, and enhancing the competence and management level of personnel. The study aims to provide practical references for the building engineering industry to address pain points in construction technology and quality control, facilitate the simultaneous improvement of project quality and construction efficiency, and drive high-quality development in the industry.

Keywords : building engineering; optimization of construction technology; improvement of project quality; quality management

引言

近年来, 我国建筑行业在施工技术创新与质量管理体系建设方面取得了显著进展, 装配式建筑、BIM技术、智能化施工设备等新型技术与理念逐步推广应用, 推动行业从传统建造向绿色、高效、智能建造转型。然而, 在实际施工过程中, 技术应用不规范、质量管理不到位、环境干扰与机制缺陷等问题仍未得到彻底解决, 部分工程存在质量隐患与安全风险, 不仅造成经济损失, 还影响行业公信力。在新时代高质量发展的要求下, 如何突破传统施工模式的局限, 通过技术优化破解施工难题, 依托科学管控提升工程质量, 成为建筑行

业亟待解决的重要课题。

基于此，本文聚焦建筑工程施工技术优化与质量提升这一核心主题，系统剖析当前施工中存在的技术、管理及环境机制等方面的突出问题，针对性提出施工全流程技术优化策略与质量提升路径，旨在为建筑施工企业规范技术应用、完善质量管控提供实践参考，助力行业提质增效、转型升级，推动建筑工程领域实现更高质量、更安全、更可持续发展。

一、建筑工程施工中存在的主要问题分析

（一）施工技术应用方面的问题

社会经济的快速发展带来了大量的建筑工程建设，虽然近年来我国建筑工程建设取得了相当大的进步和成就，许多建筑工程水平达到了国际先进水平，然而建筑工程质量关乎群众切身利益，稍有不慎将带来血的教训，诸如近年来高层建筑消防设施不到位而在火灾发生时并未能提供逃生时机等等，建筑工程质量的提升离不开施工技术的优化，必须给予足够的重视^[1]。施工技术应用不规范是当前建筑工程施工的突出问题。一方面部分施工企业缺乏技术创新意识，仍依赖传统施工工艺，对于新型施工技术的接纳度与应用能力不足，导致施工效率低下，难以适应复杂工程的施工需求。例如在高层建筑施工中，传统模板支护技术不仅耗时耗力，还易出现模板变形、漏浆等问题，影响混凝土浇筑质量，而装配式模板技术的应用率不足，未能充分发挥其高效、精准的优势^[2]。另一方面，技术应用缺乏针对性，部分施工人员未结合工程地质条件、结构特点优化技术方案，盲目照搬通用施工流程，导致技术与实际需求脱节^[3]。此外，施工过程中技术交底不彻底，一线施工人员对技术要点、操作规范掌握不熟练，易出现违规操作，进而引发质量问题。

（二）施工质量管理方面的问题

施工质量管理体系不完善，管控力度不足，是制约工程质量提升的关键因素。部分企业缺乏健全的质量管理责任制，质量管控责任未明确划分到个人，出现质量问题后易相互推诿，难以追溯责任源头。质量管理流于形式，多侧重于施工后的验收环节，对施工前的准备工作、施工过程中的关键工序管控不足，形成重验收、轻过程的管控模式，导致质量隐患无法及时发现与整改^[4]。例如在混凝土施工中，未对搅拌、运输、浇筑、养护等全流程进行质量监测，易出现混凝土强度不足、裂缝等质量缺陷。此外，质量管控标准不统一，部分企业未严格遵循国家现行施工规范与质量标准，自行降低管控要求，进一步加剧了质量风险。

（三）环境与管理机制因素

环境因素与管理机制缺陷对施工质量与技术应用效果产生显著影响。从环境角度来看，建筑工程施工周期长，易受自然环境影响，如高温、暴雨、严寒等天气条件会干扰施工工序的正常开展，降低施工技术的应用效果^[5]。例如高温天气会加速混凝土水分蒸发，导致表面开裂；暴雨天气会影响土方开挖、基础施工的稳定性，增加施工难度与质量风险。同时施工场地周边环境复杂，如临近居民区、交通要道等，会对施工时间、施工工艺选择产生限制，间接影响施工进度与质量。从管理机制来看，部分企

业缺乏完善的施工管理制度，施工计划编制不合理、资源调配不科学，导致施工流程混乱、工序衔接不畅^[6]。此外，企业内部部门协同不足，技术部门、质量部门、施工部门之间缺乏有效沟通，技术方案与质量要求无法高效落地，影响工程整体质量。

二、建筑工程施工技术优化策略

（一）施工准备阶段的技术优化

施工准备阶段是技术优化的基础环节，直接决定后续施工的顺利开展^[7]。强化施工勘察与设计交底工作，组织专业勘察团队对施工场地的地质条件、水文环境、周边设施进行全面勘察，精准获取勘察数据，为技术方案编制提供科学依据^[8]。同时加强设计与施工单位的沟通对接，明确设计意图、技术难点与质量要求，针对设计图纸中的不合理之处及时提出优化建议，避免施工中出现设计变更纠纷^[9]。优化施工技术方案编制，结合工程特点、施工条件与资源配置情况，对比不同施工工艺的优劣，选择高效、经济、安全的技术方案。例如对于装配式建筑工程，优化构件生产、运输、安装的技术流程，明确构件连接方式与质量控制要点；对于复杂高层建筑，采用BIM技术进行三维建模，模拟施工流程，提前排查工序碰撞问题。完善技术交底制度，采用“分级交底”模式，技术负责人向施工班组交底、班组向一线施工人员交底，确保每个施工人员都掌握技术要点、操作规范与安全注意事项，同时留存交底记录，便于追溯。

（二）关键施工过程的工艺优化

针对关键施工工序开展工艺优化，是提升施工质量与效率的核心手段。在混凝土施工中，优化配合比设计，结合工程需求与原材料性能，通过试验确定最佳配合比，加入高效减水剂、缓凝剂等外加剂，改善混凝土和易性、强度与耐久性；优化浇筑工艺，根据构件类型选择分层浇筑、连续浇筑等方式，控制浇筑速度与振捣频率，避免出现蜂窝、麻面、空洞等缺陷；加强养护工艺优化，根据环境温度与湿度选择洒水养护、覆盖养护、蒸汽养护等方式，严格控制养护时间，确保混凝土强度达标^[10]。在钢结构施工中，优化焊接工艺，选择合适的焊接材料与焊接参数，采用无损检测技术监测焊接质量，及时处理焊接缺陷；优化钢结构安装工艺，采用吊装机器人、精准定位设备等提升安装精度，减少安装偏差。在防水施工中，优化防水材料选择与铺设工艺，针对屋面、卫生间等易渗漏部位，采用多道防水设防，严格控制防水材料搭接宽度与铺设顺序，避免出现渗漏问题。

（三）信息化与智能化技术的融合

推动信息化、智能化技术与施工技术的深度融合，是实现施

工技术升级的重要方向。一方面推广 BIM 技术的全流程应用，在施工前利用 BIM 模型进行设计优化、工艺模拟与资源规划；施工过程中，通过 BIM 模型实时更新施工进度、质量数据，实现对工序、成本、质量的动态管控；施工完成后，将 BIM 模型与工程竣工资料结合，为后期运维提供数据支撑。另一方面，引入智能化施工设备与监测系统，如智能塔吊、自动搅拌站、混凝土强度智能监测仪等，提升施工自动化水平与数据监测精度。例如智能塔吊可通过传感器实时监测起重量、幅度、高度等参数，避免超载、碰撞等安全风险；混凝土强度智能监测仪可实时采集混凝土强度数据，及时反馈养护效果。此外，搭建信息化管理平台，整合施工、技术、质量、安全等各类数据，实现各部门数据共享、协同工作，提高管理效率，确保技术方案与质量要求高效落地。

三、建筑工程施工质量提升路径

（一）构建完善的质量保证体系

健全的质量保证体系是质量提升的制度保障。建立全员参与、层层落实的质量管理责任制，明确企业负责人、技术负责人、质量管理人员、施工人员的质量职责，将质量管控绩效与个人薪酬、晋升挂钩，强化全员质量意识。完善质量管理流程，涵盖施工前准备、施工过程管控、施工后验收全环节，制定明确的管控标准与操作规范，确保每个工序都有章可循。例如施工前严格审核施工方案、原材料质量证明文件；施工过程中加强关键工序旁站监理，对质量隐患实行“零容忍”，发现问题立即整改并跟踪复查；施工后严格按照验收标准开展竣工验收，未达标工程不得交付使用。此外，引入第三方质量检测机构，对工程质量进行独立检测，提升质量评估的客观性与公正性，进一步强化质量管控力度。

（二）加强材料与设备的全过程管控

材料与设备的质量直接决定工程质量，需强化全流程管控。在材料管理方面，建立严格的采购管理制度，选择资质齐全、信誉良好的供应商，对原材料进行抽样检测，严禁不合格材料进入

施工现场；加强材料存储管理，根据材料特性划分存储区域，做好防潮、防晒、防腐蚀等措施，避免材料变质损坏；在材料使用过程中，严格按照施工规范与配合比要求使用，做好使用记录，确保材料消耗可追溯。在设备管理方面，合理选用施工设备，确保设备性能符合施工技术要求与质量标准；建立设备定期检修、保养制度，安排专业人员对设备进行日常维护、定期检修，及时排查设备故障，确保设备正常运行；加强设备操作管理，要求施工人员持证上岗，严格按照设备操作规程操作，避免因违规操作导致设备损坏或质量问题。

（三）提升人员素质与管理水平

人员是施工技术与质量管控的核心主体，提升人员素质与管理水平至关重要。一方面，加强施工人员培训，定期组织开展技术技能、质量规范、安全知识培训，涵盖新型施工技术、智能化设备操作、质量管理要求等内容，提升施工人员的专业能力与质量意识；建立考核机制，对培训效果进行定期考核，考核合格后方可上岗，确保施工人员具备相应的操作能力。另一方面，加强管理团队建设，引进高素质的技术管理、质量管理人才，提升管理团队的专业素养与统筹协调能力；定期组织管理人员开展行业交流、技能培训，学习先进的管理理念与管控方法，优化管理模式，提高质量管控效率。同时，营造重视质量、追求卓越的企业文化，引导全员树立“质量第一”的理念，形成上下联动、齐抓共管的质量管控氛围。

四、结束语

施工技术的优化是突破工程建设瓶颈、提升施工效率的关键，而完善的质量管控体系是技术落地、规避质量风险的根本，二者的深度融合的是推动建筑行业从规模扩张向质量效益转型的核心动力。本文提出的技术优化与质量提升方案，旨在为建筑施工企业提供可落地的实践参考，助力企业规范施工流程、创新技术应用、强化质量管控，从而有效解决实际施工中的痛点难点问题，减少质量隐患与安全风险，实现工程质量与经济效益的双重提升。

参考文献

- [1] 苏源远, 柴龙彪. 建筑工程施工技术优化措施探讨 [J]. 建材与装饰, 2017(41): 6-7.
- [2] 丁文艺. 建筑工程施工技术优化管理 [J]. 装饰装修天地, 2017(2): 239.
- [3] 胡湘波. 建筑工程施工技术优化管理探讨 [J]. 建材与装饰, 2017(11): 168-169. DOI: 10.3969/j.issn.1673-0038.2017.11.112.
- [4] 赵源鹏. 浅论建筑工程施工技术优化管理 [J]. 装饰装修天地, 2017(10): 246.
- [5] 刘晓龙. 建筑工程施工技术优化管理探讨 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2015(35): 1989-1989. DOI: 10.3969/j.issn.2095-2104.2015.35.989.
- [6] 彭国强. 建筑工程施工技术优化管理探析 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2015(15): 1805-1805.
- [7] 马宁. 建筑工程施工技术优化管理探析 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2014(8). DOI: 10.3969/j.issn.2095-2104.2014.08.0737.
- [8] 张亚春. 建筑工程施工技术优化管理探析 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2013(24).
- [9] 刘红玉. 建筑工程施工技术优化管理探讨 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2015(1): 1426-1427. DOI: 10.3969/j.issn.2095-2104.2015.01.0933.
- [10] 王继权. 建筑工程施工技术优化管理探讨 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2014(23): 869-869.

高层建筑塔式起重机高空拆除技术的安全性 与效率提升研究

郑兴瑞

上海市中禾华兴达丰机械工程有限公司, 上海 200331

DOI:10.61369/ME.2026010004

摘 要 : 本研究通过对某大型高层建筑拆除项目的技术方案进行分析, 探讨采用多级置换拆除方法与合理设备部署在高空拆除作业中的技术实施效果。实践结果表明, 采用逐级置换拆除技术和高低位起重设备协作, 成功将安全事故发生率从传统拆除方法的0.8%–1.2%降低至0.3%。塔式起重机拆除作业周期从传统的4.6个工作日缩短至3.1个工作日, 整体施工成本显著降低。综合分析, 技术方案在实践案例中取得了良好的在安全性与效率提升的成效。

关 键 词 : 高层建筑; 塔式起重机; 高空拆除技术; 安全性; 效率提升

Research on Enhancing Safety and Efficiency in High-Altitude Demolition Technology for Tower Cranes in High-Rise Buildings

Zheng Xingrui

Shanghai Zhonghe Huaxing Dafeng Mechanical Engineering Co., Ltd., Shanghai 200331

Abstract : This study analyzes the technical plan for a large-scale high-rise building demolition project, exploring the implementation effects of adopting a multi-stage replacement demolition method and rational equipment deployment in high-altitude demolition operations. The practical results indicate that by employing a step-by-step replacement demolition technique and coordinating high and low-level lifting equipment, the incidence of safety accidents has been successfully reduced from 0.8%–1.2% in traditional demolition methods to 0.3%. The demolition period for tower cranes has been shortened from the traditional 4.6 working days to 3.1 working days, significantly reducing overall construction costs. A comprehensive analysis reveals that the technical plan has achieved notable improvements in both safety and efficiency in practical cases.

Keywords : high-rise buildings; tower cranes; high-altitude demolition technology; safety; efficiency enhancement

引言

城市化进程的加快促使高层建筑工程数量逐渐增多, 建筑拆除作业也日益成为建筑行业中的关键环节。特别是在高空拆除过程中, 传统方法通常依赖单一塔吊或人工作业, 这不仅导致作业环境复杂、操作繁琐, 还容易引发安全事故。此外, 传统拆除方法的施工周期长, 人工成本和设备租赁费用较高, 整体施工效率低下, 影响了项目的经济效益和时间管理^[1]。因此, 探索新的拆除技术, 尤其是能够提高安全性、效率并降低成本的技术, 成为提升拆除作业质量的重要方向。多级置换拆除技术应运而生, 通过合理的设备部署和协同作业方案, 降低高空作业风险、提升拆除效率并有效降低施工成本。本研究旨在探讨该技术在高层建筑拆除中的应用效果, 分析其在提高安全性、施工效率和成本控制方面的优势, 进而为高层建筑拆除作业提供更加高效、安全和经济的技术支持。

一、案例概述

以某大型高层建筑项目为例，项目由三栋高层建筑构成，总建筑面积达到15.4万 m^2 ，占地面积为8270 m^2 ，建筑楼层数为54层，建筑高度约为192m。建筑结构类型为核心筒+剪力墙结构，其中核心筒塔楼内设有电梯井，电梯井周围为承重式剪力墙结构体系，其他部分则为混凝土结构的非承重外墙、内隔墙、填充墙等自由隔墙。项目的拆除工作面临诸多挑战，尤其是在塔式起重机应用过程中，如何精确部署设备、控制拆除流程及确保安全成为关键问题。

二、塔式起重机高空拆除技术分析

（一）拆除流程

塔式起重机高空拆除工作遵循一系列精确的拆除流程，以确保拆除过程中的安全性和效率。首先安装 QDC3023 中型屋面吊，作为拆除作业的起始步骤；中型屋面吊的安装完成后，开始拆除 STL120 塔式起重机，在拆除 STL120 塔式起重机的过程中，将起重构件通过塔吊逐一转移至地面场地，为后续作业做好准备。在 STL120 塔式起重机拆除后安装 QW1515 高位小型桅杆吊，并进行后续拆除操作。高位小型桅杆吊为拆除作业提供更高的作业平台，确保安全拆除较高位置的构件^[2]。拆除中型屋面吊的相应构件时，使用高位桅杆吊进行作业，在此期间共进行两次转运，确保拆除构件的完整性和运输过程的安全性。高位小型桅杆吊拆除完成后，拆除 QW1515 高位桅杆吊。在此期间使用低位桅杆吊作为辅助设备进行拆卸，QW1515 低位桅杆吊的拆除工作由人工完成，确保所有设备拆除完毕。在所有起重构件拆除完成后，所有拆卸设备和构件通过同层施工电梯转运至地面。

（二）拆除设备部署

项目针对塔楼屋面高低位结构设计要求，塔式起重机的拆除设备部署采用多级置换拆除方法。在拆除前将塔式起重机预降至设计标高，并在高位屋面布设 QDC3023 中型屋面吊，为拆除作业提供稳定的起重平台。设备布置于距离塔吊 11.8m 的同一结构面上，最大起重量达到 8.3t，满足拆除过程中所需的起重力矩要求。QDC3023 中型屋面吊完成安装后，在同一结构面上布置 QW1515 小型桅杆吊，距离中型屋面吊 6.5m。小型桅杆吊起重量约为 3t，主要用于拆除 QDC3023 中型屋面吊^[3]。考虑到小型桅杆吊的稳定性，布置位置时需确保其支腿获得充分支撑，在结构面支腿处增设两道混凝土上翻梁，以提供足够的支撑力和固定作用，确保设备拆除过程中不发生偏移或倾斜。高低位起重设备的布置情况如下图 1 所示：

高位桅杆吊的拆除作业通过低位桅杆吊进行辅助，确保拆除过程中的稳定性和安全性，在低位泳池区域布置了 QW1515 低位桅杆吊，专门负责拆除高位桅杆吊的各部件，包括吊钩、起升钢丝绳、配重块等重型部件，并将拆解后的部件安全转运至地面。在低位桅杆吊的拆除过程中，所有拆解部件通过人工手段进行搬运，确保操作人员可以根据重量和体积要求分批转运至同层施工

电梯。施工电梯用于将部件快速、安全地转运至地面指定堆放场地进行管理，避免传统方法中频繁人工搬运所造成的低效与安全隐患。

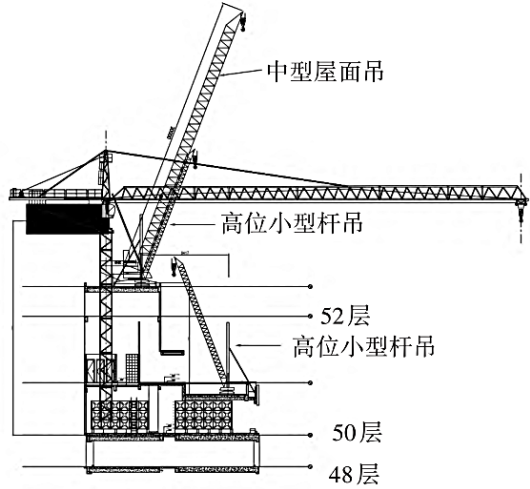


图 1 高低位起重设备的布置示意图

针对低位桅杆吊的布置，考虑到其支腿位置位于泳池内部，施工过程中对支腿基础进行精确加固设计。加固方案主要包括对支腿基础的钢筋配置、基础梁的设计以及支腿承载力的全面分析。在加固过程中选用了 M30 级 8.8 精轧螺纹钢，预埋深度为 560mm，并对基础梁进行上翻梁设计，梁长为 3800mm，截面尺寸为 800mm × 650mm。根据有限元分析和力学模拟，确保支腿基础能够充分承载拆除过程中产生的动载荷与风荷载，支撑稳定性满足设计要求，并且经过加固处理后的基础与原设计标高保持一致。

（三）设备基础加固技术

在塔式起重机高空拆除过程中，设备基础加固设计期间综合考虑起重设备的荷载、力矩以及长期使用中的动载荷变化，采用精确的计算与优化设计，以达到最优的承载能力和安全系数。

1. 屋面吊基础

QDC3023 中型屋面吊的基础布设于 54 层楼板面，结构标高为 216.7m。为确保设备在拆除过程中能够稳定支撑起重力矩并抵抗拆除过程中产生的动态载荷，基础加固方案采用加宽楼板基础梁，并对原有承重墙进行加固。加宽后的基础梁采用上翻梁设计，梁长为 4500mm，截面尺寸为 1000mm × 750mm，对应的抗弯刚度和承载能力满足设备在拆除过程中最大起重量 8.3t 要求，并考虑到可能的风力、设备回转时的动载荷等因素，最终计算出基础梁的安全系数为 1.5，满足相关规范的要求^[4]。在屋面吊的四个支腿处预埋四支 M33 等级为 8.8 的精轧螺纹钢，螺纹钢的预埋深度为 610mm。M33 螺纹钢的屈服强度可达到 400MPa，与定位板联合运用确保每个支腿的基础具有足够的承载能力。基础梁与支腿系统的联合设计方案经过多次模拟分析，确保能够分散起重机操作过程中产生的力矩及载荷。基础的预埋钢筋在混凝土浇筑完成后与设备底盘相连接，提供稳定的支撑力，保证设备的工作状态下无位移或倾斜现象。

2. 桅杆吊基础

QW1515小型桅杆吊的基础布设在54层核心筒屋面和51层泳池内部,基础设计为分离式结构,分为底座基础、撑杆基础和卷扬机固定基础三部分。底座基础和撑杆基础分别预埋 M24 和 M30 等级为8.8的精轧螺纹钢,预埋深度为510mm。通过对螺纹钢的配筋计算,确保基础的抗拉强度和抗剪能力能够应对拆除过程中产生的动态荷载。M24和M30螺纹钢的屈服强度为400MPa,经过荷载传递分析确保两种不同规格螺纹钢的配比设计能在极限荷载条件下保持足够的安全性,且各个支撑点的局部应力不会超过混凝土的抗压强度。混凝土梁的设置根据楼层高差和结构情况进行优化设计,采用上翻梁和下翻梁相结合的方式。在54层核心筒屋面采用上翻梁设计,在51层泳池内部采用下翻梁设计,确保每个位置的支撑力和稳定性。卷扬机固定位设计采取预埋螺杆方式,在混凝土浇筑前进行定位。方式通过精确的定位和预埋设计,确保卷扬机能够在高负荷条件下稳定工作,并防止在拆除作业过程中出现位移或偏斜。

3. 设备基础设计安全性分析

在设备基础加固的设计过程中,所有计算均按照国家现行建筑设计规范《建筑结构荷载规范》GB 50009-2012进行,并参考《塔式起重机固定基础设计规范》T/CCMA 0052-2017等规范中的相关要求。在设计过程中重点考虑设备在拆除过程中产生的动态荷载及风荷载的影响。针对不同层级设备的布设,通过有限元分析对基础整体和局部的应力分布进行模拟。设计中相关基础的安全系数均不低于1.5,符合结构安全设计要求。此外,基础加固设计还考虑了长期使用的沉降和变形,确保设备在长期使用过程中不出现基础不均匀沉降或结构疲劳失效的情况。

(四) 拆除总体部署

塔式起重机高空拆除作业涉及多个设备配合使用与周密部署,项目中的拆除工作主要包括三个阶段,分别是塔式起重机拆除作业、中型屋面吊拆除作业以及桅杆吊拆除作业。塔吊拆除平面布置图如下图2所示:

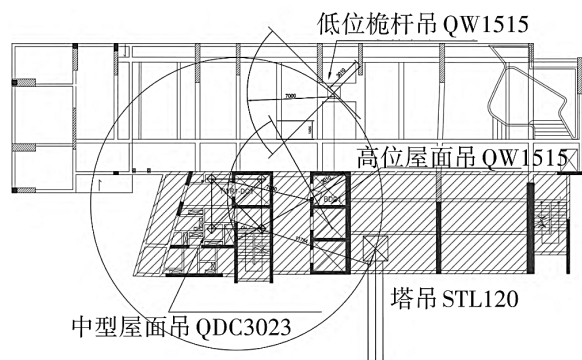


图2 塔吊拆除平面布置图

1. 塔式起重机拆除作业

首先完成 QDC3023 中型屋面吊的安装,并将其作为主拆吊装设备,用于拆除 STL120 塔式起重机。STL120 塔式起重机的拆除按照由上至下、由轻到重的顺序进行。拆除过程中,首先旋转塔式起重机的起重臂至中型屋面吊回转半径范围内,调整起重臂至

水平位置后,依次拆卸配重块、钢丝绳及吊钩、前撑杆、后拉杆等轻型部件。拆除起重臂时分三段进行作业,每一部件的吊装和运输都由 QDC3023 屋面吊完成,确保所有拆解部件按照规定顺序有序转运至地面指定位置。

2. 中型屋面吊拆除作业

QDC3023 屋面吊的拆除按与安装过程相反的流程进行,首先通过 QW1515 高位桅杆吊进行起重臂的拆分吊装。起重臂总重量约为 3.5t,拆卸分三段进行,每段起重臂拆除后立即转运至地面。通过 QW1515 高位桅杆吊依次拆除配重块、钢丝绳、吊钩、平衡臂、回转机构以及底座及支腿等装置结构。拆除后的构件通过低位桅杆吊转运至地面,最大起升高度 30m^[5]。每一部件的拆解和运输都根据其重量与体积进行精确安排,确保操作顺利进行并避免损坏。所有拆除作业均严格按照技术要求执行,起重设备间的协同操作经过精确计算,确保负荷均匀分配,提高作业效率。

3. 桅杆吊拆除作业

QW1515 桅杆吊的拆除通过低位桅杆吊进行辅助,在拆除前调整高位桅杆吊并下放起重臂至低位桅杆吊的作业范围内,随后按照与中型屋面吊类似的方式进行拆解。高位桅杆吊的拆除作业包括拆除吊钩、起升钢丝绳、笼头滑轮组、起重臂、配重块、辅助钩头、变幅钢丝绳、变幅卷扬机等部件。所有拆解后部件通过倒链和扒杆逐步拆除桅杆吊的回转机构,并利用液压搬运推车进行水平运输。拆解完成的部件通过施工电梯运送至地面,最终完成 QW1515 桅杆吊的拆除。

4. 拆除作业协调技术

在塔式起重机拆除的各个阶段中,设备的协调部署至关重要。每个拆除阶段的工作都是由专门的起重设备负责,不同设备间通过精准的协作与顺序安排确保作业顺利进行。所有拆除设备均设有明确的作业范围与吊装顺序,通过精确计算的回转半径、起重力矩和设备荷载,合理规划每个设备的任务分配。拆除过程中所有起重设备的操作与物料运输都采用逐级置换的方式进行,从高空到低空逐步完成各类拆除任务。

三、安全性与效率提升分析

通过多级置换拆除方法与设备部署方案,有效降低施工过程中的安全事故发生率。传统拆除方法通常依赖单一塔吊或人工作业,作业区域复杂且高度较高,事故发生率较高。在国内相关项目中,传统拆除作业的事故发生率普遍在 0.8% 至 1.2% 之间,特别是在高空拆除作业中,因操作不当或设备故障引发的安全事故时有发生。本项目结合高位与低位桅杆吊的协作,明显减少人员在高空作业的时间和风险。项目安全事故发生率降低至 0.3% 左右,明显优于传统拆除方法。通过精准的计算与严密的设备部署,拆除作业中所有设备均在设定的起重力矩和回转半径范围内运行,最大限度地减少设备失控、吊装不当等引发的安全风险。

传统拆除方法通常依赖单一塔式起重机进行拆解,操作流程较为繁琐,且每个步骤都需进行人工干预,导致作业时间较长。以典型的塔吊拆除为例,采用传统方法通常需要 4.6 个工作日才能

完成塔吊的拆解过程，其中大部分时间用于设备调整和人工搬运拆解部件。相比之下，本目采用高低位起重设备并行作业方式可有效缩减设备调整和拆解过程中的停滞时间至3.1个工作日，拆除施工效率提升约32.61%。传统塔吊拆除方法的成本主要集中在设备租赁费用、人工成本及施工材料的消耗上。由于依赖大量的人工操作具有较高的人工成本，且在施工期间很容易出现成本超标的问题。本项目通过高低位起重设备的多级置换拆除，显著降低了技术成本，其中人工成本减少约18.4%，设备租赁费用降低约13.9%，技术方案支持多个设备并行作业，大幅度减少了设备的空闲时间和等待成本。

结论：高层建筑的拆除作业通常面临着高空作业的安全风险、作业环境的复杂性以及高昂的施工成本等诸多挑战。基于此，本研究通过对高层建筑拆除项目的深入分析，验证多级置换拆除技术和高低位设备协作对提升拆除作业效率和安全性的积极作用。与传统方法相比，采用新技术显著降低安全事故发生率，提升施工效率的同时有效控制项目成本。安全事故发生率从0.8%–1.2%降低至0.3%，施工效率提高了约32.61%。未来，随着技术的不断发展和优化，这一技术方案有望在更多拆除项目中得到广泛应用。

参考文献

- [1] 吴胜辉, 吴承杰, 李永轩, 等. 超高层建筑工程内爬塔式起重机附着提升拆除关键技术 [J]. 建筑技术, 2024, 55(10): 1234–1237.
- [2] 童庆闯. 超高层建筑塔式起重机多级置换拆除施工技术 [J]. 上海建设科技, 2024, (01): 65–68.
- [3] 熊定振, 丁秉一. 超高层建筑塔式起重机高空拆除施工技术 [J]. 建筑施工, 2023, 45(05): 963–965.
- [4] 刘卫未, 车庭枢, 蒋千重, 等. 城市核心区高层建筑大型塔式起重机支撑系统高空转换技术 [J]. 施工技术 (中英文), 2022, 51(23): 121–125.
- [5] 黄亮忠, 赖泽荣, 章卓涛, 等. 超高层建筑内置塔式起重机施工技术研究 [J]. 广州建筑, 2022, 50(01): 51–58.

大跨度钢结构网架吊装过程中的整体稳定性保障措施研究

那丽岩

浙江工业职业技术学院，浙江 绍兴 312000

DOI:10.61369/ME.2026010005

摘 要： 基于对大跨度钢结构网架吊装过程整体稳定性的探讨，保证其整体稳定的重要性和主要措施，研究结果表明，通过实施构造优化方案、设置临边防护措施、应用自动化测试设备以及强化人员技术培训和技术交底等工作措施的应用，有效提升了大体积钢结构网架安装施工环节中的作业安全性水平和工作效率表现形式，有效地控制了施工风险因素。也为类似工程提供借鉴作用。主要关键词有：大跨度钢结构；高空吊装；整体稳定；人员安全；施工安全管理；典型事例解析。

关 键 词： 大跨度钢结构；网架吊装；整体稳定性；保障措施；施工安全；工程实践

Research on Measures to Ensure Overall Stability During the Hoisting Process of Large-Span Steel Structure Grids

Na Liyan

Zhejiang Industry Polytechnic College, Shaoxing, Zhejiang 312000

Abstract： Based on an exploration of the overall stability during the hoisting process of large-span steel structure grids, this study discusses the importance and key measures for ensuring their overall stability. The research findings indicate that by implementing structural optimization plans, setting up edge protection measures, applying automated testing equipment, and strengthening personnel technical training and technical disclosures, the operational safety and work efficiency during the installation and construction of large-volume steel structure grids have been effectively enhanced. This approach has also effectively controlled construction risk factors and provides reference for similar projects. Keywords include: large-span steel structure, overhead hoisting, overall stability, personnel safety, construction safety management, and analysis of typical cases.

Keywords： large-span steel structure; grid hoisting; overall stability; safeguard measures; construction safety; engineering practice

引言

随着时代的发展，在一些大范围的建筑工程中，由于大跨度钢结构网架具有一定的优势条件，并且具备良好的使用特点及功能，因此，越来越多的大跨度钢结构网架被应用于现代工程当中。在开展大跨度钢管网格结构体系施工过程中，整体稳定问题是制约工程质量的关键性问题之一。这不仅关系到建筑工程的整体稳定性，也可能会给工程建设周期及工程造价等带来较大的影响。为此针对大跨度钢管网格结构体系在施工期间的整体稳定性控制展开分析研究，这就具有重要的现实意义。

一、大跨度钢结构网架吊装过程中的整体稳定性保障措施研究必要性

经研究探讨，提出了合理的、有效的整体稳定防护措施建议，在工程建设中提供参考依据；开展必要的计算分析、具体措施拟定

及效果评估工作，提升工程建设过程中的稳定性管理水平，推动行业发展进步。本文给出了各项措施的具体实施方法及效应。为工程师在实际工程中解决整体稳定性问题提供全面参考依据。

（一）安全必要性

整体稳定是保障施工安全的重要前提，关系到人员的生命安

课题信息：大跨度钢网架结构提升方案分析 XFG2023001。

作者简介：那丽岩（1980.02—），女，汉族，浙江省绍兴市人，研究生学历，浙江工业职业技术学院就职，副教授，主要从事结构工程、结构抗震方向研究。课题：主持厅局级课题结题1项，市级课题结题1项。

全以及周边建筑的安全。大跨度空间网格结构施工中，在自重及风载荷、施工机具等外加作用下，持续变形受力，一旦失稳就会导致：可能导致整体或部分失稳，造成倒塌风险。如某桥梁工程，由于缺乏对风载的考虑，在风荷载作用下发生网架振动而出现构件损坏情况。这类工程建设事故不仅对施工人员构成危险，还会影响到周边基础设施安全，甚至引发连环性灾难事故，导致经济损失和社会效应扩大化。采用科学有效的风险管理技术能够有效降低施工现场危害发生率，提升项目安全级别以及确保施工进度。此外，适当的构图策划方案还能降低周边区域压力，防止由于施工引发群众反对以及媒体报道。

（二）经济必要性

工程不稳定问题是项目成本的重要组成部分之一，在发生不稳定事故后不仅要承担更高的维修费用，而且会导致工期延误增加整体成本。例如某大型会展中心由于屋盖结构在安装过程中发生不稳定现象，导致停工加固处理，这样会让他们花费几十万美金并且延迟后续的施工进度。除此之外，因为不稳定可能产生法律纠纷以及赔偿义务也会增加经济负担。所以用合适的方法保证建筑稳固性可以避免这部分支出从而改善项目经济状况。其次，稳定性的施工过程能够辅助合理配置各类资源，并有效降低损耗，从而大幅提高工程综合收益水平。现阶段，全球各地区经济飞速融合，在建筑行业的竞争压力也逐渐增大，对于成本的管控及控制已经成为企业能否立足市场的主要影响因素之一，确保系统运行的可靠稳定性将带来巨大经济效益；此外，高水准的质量为工程提供长久寿命，大大降低后续维修成本，为客户带来长期盈利收益。

（三）技术必要性

随着科技的进步，大型网络的设计以及建造都变得更加复杂。现代建筑对美观度以及功能性的需求越来越高，使得设计变得更加复杂；另外像天气状况或者温度变化等不确定因素也增加了稳定性的难度，所以传统意义上的安全性分析方法已不再适用。我们必须采取更高明的办法来解决这些问题。例如 BIM 技术可以将结构的设计建造全过程以三维可视化的方式呈现出来，并加以模拟，有利于提高设计精度以及施工可行性。因此进一步研究保证整体系统稳定的方法不仅是解决现有技术难题的途径，也是建筑科学发展的重要方向之一。科学技术的应用可以改善我们工程施工效果及质量，为行业可持续发展注入新的活力；另外，稳定结构也为设计师们提供了更多的设计空间，有利于建筑艺术水平的提高。

二、大跨度钢结构网架吊装过程中的整体稳定性保障措施

（一）结构优化设计

结构优化设计就是采用计算机技术和力学分析软件对钢结构网格结构体系的外形、材料布置以及连接方式等因素进行合理的组合配置，并以此提高整体结构的稳定性的一种方法。该方法的核心是利用现代计算机技术及力学理论来选取最优设计方案。经

此方式优化以后，能够保障建筑的韧性及硬度，同时减少建筑材料用量，降低自身的质量，从而降低了在安装环节中受到的压力；并且经过优化的设计可改善建筑物内部受力情况，避免出现过于集中的压力状态，进而提升了整个建筑的安全程度。

在项目实践中，要综合评估与建筑结构有关的所有功能需求、荷载条件及周边环境因素，并确定设计的基础原则及限制依据。比如体育场馆的网络系统就必须考虑到人流冲击负荷、设备运行负载、风荷载等因素。运用 BIM 建立模型或是利用有限元素模拟器建立精准的三轴制架构仿真模型，并将之应用在本案案例中，能直观地表现出空间构件所处位置状况及物性反应，作为后续变形调适的参考。基于上述解析结果，需有系统地探讨各式设计方案接下来使用相应的软件进行结构动力学分析及优化，最终得到最佳方案。

对优选出的最佳设计方案进行分析论证并做出最有利于建筑物安装稳定的方案后，再根据选定的最优方案具体细化设计方案，包括连接节点的选择、构件尺寸的选择、构件材料的选择等。细化方案制定需结合施工实际情况考虑，避免因设计原因导致施工难度大。然后我们利用试验或仿真的方法对优化设计方案进行验证并加以改进。采用科技创新设计方法可以提高建筑结构安全性和经济性，在满足建筑功能的前提下，减少材料用量、减轻自重，减小结构吊装荷载，优化受力传递路径避免局部应力过大，从而整体上提高了建筑安全性。其次，该方法还可以将方案细化并且具有可操作性，这样可以降低施工中的错误率和返工率，提高施工效率。

（二）临时支撑系统优化

对临时支撑系统进行加强处理的方法主要是对支撑系统的构造形式、布置方式以及采用的材料等加以完善，以提高支撑的实际受力能力和稳定性。此类方法的主要环节是运用数学建模的方式分析和加强对临时支撑体系设计的应用，在吊装过程中保证建筑能够具备稳定的支撑能力，避免出现倒塌事故。这样进行优化后能够提高整个建筑的安全性以及工程风险低。

在进行建造过程中，首先要对结构荷载、工期进度及周边环境条件等因素有所认知，并以此作为临时支撑体系设计的前提和制约条件。比如针对大型展馆的网架而言，就要考虑到人流量、机械重力、风荷载作用等动态变量；其次采用 BIM 技术或有限元仿真软件构建三维模型，在该技术下能够直观反映临建设施布置位置及材料特性，为后续工作提供可视化依据。综合评价优选出最优方案作为临时支柱稳定措施，并对最优方案进行具体策划，包括支撑系统形式、布置方式、材料选型等，同时应结合可施工性，避免因不可操作性造成施工困难。需要通过试验或是仿真验证所进行的优化设计是否合理，并做相应的调整。

采用科技手段以及科学技术改善临时支撑系统，在提高强度的同时保证了稳定性。该方法可以降低材料消耗量、减少自重负荷从而降低吊装施工中的荷载；同时这种方法也可以平衡临时支撑系统的受力状态，避免局部受力过大。提高建筑的整体稳定性。除此之外，还能优化设计的准确性以及施工的操作性，降低人为操作不当带来的错误率与返工率，提高工作效率。

（三）智能监测技术应用

智能监测技术的应用主要是构建高精度传感装置系统和数据分析平台，在钢结构安装阶段实时监控和预警钢结构的变化情况。该方法的主要特点在于依靠互联网、大数据技术和人工智能对结构变形、应力应变、温度等相关参数进行动态采集并分析。为能够及时发现问题，并在出现问题前作出应对措施。首先，在监测的关键部位安装高精度传感器，包括应变片、位移传感器、加速度传感器等对建筑进行微小变化量的实时监测；将采集的数据通过无线传输技术传输至中心控制电脑并通过相应的分析软件进行处理及分析。为了发现潜在的风险模式。同时这个系统还有自警功能，在超出安全范围的时候会自动报警提示工作人员进行处理。此外，采用智能化的检测方式还可以将 BIM 模型进行构建从而显示监测信息，方便建筑管理工作人员直接查看相关数据资料。此种方法的最大优势在于其准确性以及实时性较强，在很大程度上提高了对建筑物稳定性方面的控制能力，减少了人为判断失误的可能性，并为其复杂多样的起重工程提供了一定的科学技术支撑。

（四）施工人员培训与规范操作

对施工人员进行培训以及标准化作业是为了提升施工人员的专业技术水平和标准化工序能力，从而在钢结构网架整个安装环节实现稳定状态。这一措施的重点在于全面性的教育培训体系建立，包括理论知识与实践操作，从而使施工人员具备熟练掌握吊装技能、设备操作规范、安全生产规则等各项能力。课程教学包括基础结构力学知识、起重机械使用技术、应急救援等内容，并采用课堂讲授 + 模拟训练 + 现场指导的方式进行实施。

制定一个完整的工作流程体系，在这个流程中具体描述每个环节的操作标准以及注意事项，包括在施工之前对各个项目的全面检测、整体期间的统一管理以及关键位置的衔接处理等内容；定期开展相关技术考试以及实践操作测试，保障相关人员能够严格遵循规章制度进行作业。这种管理模式最大的优点就是以人为本的思想理念，提高职工的技术水平从而避免失误的发生以及加强职工之间的合作，这为大体积混凝土浇筑的安全奠定了基础。

三、大跨度钢结构网架吊装过程中的整体稳定性保障措施应用成效

（一）施工安全性显著提升

在实施以上保护措施的基础上，能够确保超大规模钢结构网架结构的安全性提升；同时借助智能化监测方法的应用，能够在

起吊期间发生各类突变情况的时候第一时间进行预警并解决相关问题，避免因微小失稳而产生连续效应的情况。例如在大型体育馆施工过程中，监测系统及时发现关键节点应力异常情况，并提前预警，让现场作业人员进行吊装方案调整，避免出现结构损伤；加强人员培训及规范操作流程，规避了人的失误造成的损失。提高了工作效率及安全性。

（二）工程成本有效控制

实施防护方案控制住了项目的费用支出，避免了因稳定性差引起的附加费。对建筑结构设计施工方面加以完善及优化临建措施可节约材料消耗和重复建造，降低直接成本；采用智能监测技术能够避免由建筑不稳定引发的返工重做和修补造成的损失，并且可以避免因工期延误而产生的间接损失费用。对工作人员进行培训以及规范其工作行为不仅能提高工作效率，也能避免因为工作人员误操作导致设备损坏或者造成不必要的浪费。例如在某博物馆工程中，通过对设计进行优化，并采取自动监测技术，在降低造价的同时还加快了施工进度。合理的造价控制方式提升了经济效益，同时为投资人及开发商带来更大的利益空间。

（三）施工效率与质量双提升

所有的防护方案实施后均提高了工程建设效率以及工程质量。通过优化建筑设计和临时支撑设计，减少施工工序甚至省去部分冗余施工环节，缩短施工周期；通过智能监测技术保证了全过程施工安全可靠，减少了调整和修改时间。对人员培训及规范性作业还提升其团队协作能力，并促进了整体工作效率提升。该方法可以保证施工的质量水平，提高关键节点之间的连接程度，让结构优化设计方案更为科学；采用新式临时支撑结构确保建筑结构的稳定性；借助于现代技术对施工质量进行有效监测等等。

四、结束语

本文以大跨度钢结构网架整体稳定问题为研究对象，实践表明以上优化措施可在施工安全质量、项目成本控制、工期缩短及工程质量等方面取得显著成效。特别是基于视频监控系统实时预警机制及标准化作业流程联动，为工程建设安全增加了保险系数。取得良好的效果并为工程实施提供坚实的科技管理和技术支撑。随着建筑工程技术的进步和发展，该防护系统会更加完善，不断促进行业创新能力提升。希望本文的研究能够给广大工程人员带来一定的参考价值，帮助其顺利解决大跨度钢结构工程稳定性难题。继续开展大跨度钢构网架悬挑施工工法的技术创新及突破性发展。

参考文献

- [1] 李海亮. 基于 xc164cs 的连续式液压提升机器人研究. 上海: 同济大学, 2019, 1-78.
- [2] 张同波, 付长春, 王辉. 青岛体育中心游泳跳水馆钢结构施工技术. 施工技术, 2019, 3, 38(3): 48-53.
- [3] 董康, 陈海洲, 王玉岭. 超大面积焊接球网架柔性提升技术. 施工技术, 2023, 42(2): 17-61.
- [4] 张纪刚, 张同波. 青岛游泳跳水馆复杂网架结构施工卸载分析. 第 19 届全国结构工程学术会议论文集 (第 III 册). 2020: 420-425.

二级公路改建施工技术要点探析

王建光

云南汇久建设工程有限公司, 云南 红河 661100

DOI:10.61369/ME.2026010010

摘 要： 在交通网络持续优化与升级的时代背景下，二级公路改建工程成为提升路网效能、服务区域经济发展的重要举措。改建工程相较于新建项目，具有施工环境复杂、技术制约多、保通压力大等特点，其技术管理的科学性与精细化程度直接关系到工程质量、安全、工期与投资效益。然而，当前二级公路改建过程中，普遍面临着新旧结构物衔接、原有道路利用、交通组织与施工干扰协调等诸多技术与管理挑战。因此，系统性地探析二级公路改建全过程中的关键技术要点，对于规范施工行为、保障工程品质、推动公路建设行业的可持续发展具有重要的理论指导意义与工程实践价值。

关 键 词： 二级公路；改建工程；施工技术；路基处理

Analysis on the Key Points of Reconstruction Technology of Second-Class Highway

Wang Jianguang

Yunnan Huijiu Construction Engineering Co., Ltd. Honghe, Yunnan 661100

Abstract： In the era of continuous optimization and upgrading of the transportation network, the reconstruction project of second-class highway has become an important measure to improve the efficiency of the road network and serve the regional economic development. Compared to new construction projects, renovation projects have the characteristics of complex construction environment, multiple technical constraints, and high pressure to ensure smooth operation. The scientific and refined level of technical management directly affects the quality, safety, construction period, and investment benefits of the project. However, in the current reconstruction process of second-class highway, there are many technical and management challenges, such as the connection of new and old structures, the use of the original road, the coordination of traffic organization and construction interference, etc. Therefore, systematic analysis of key technical points in the whole process of second-class highway reconstruction has important theoretical guiding significance and engineering practice value for standardizing construction behavior, ensuring project quality, and promoting sustainable development of highway construction industry.

Keywords： second-class highway; reconstruction project; construction technology; subgrade treatment

引言

随着我国经济社会快速发展与交通量持续增长，早期修建的众多二级公路在技术标准、通行能力、服务水平及安全性能等方面已难以满足当前需求，大规模改建升级已成为公路养护与管理领域的新常态。二级公路改建是在原有道路基础上进行的技术等级提升、线形优化、结构补强和设施完善的综合工程，其核心目标是在有限的投资与场地条件下，最大限度地提高道路的承载能力、行驶舒适性与运营安全性^[1]。与新建工程相比，改建工程并非在一张白纸上作图，它受到既有道路状况、沿线构造物、地下管线、征地拆迁范围以及必须维持基本通行的刚性约束，这决定了其施工技术体系具有显著的独特性与复杂性。深入剖析这些关键环节的技术要点，形成系统化的施工控制指南，是确保二级公路改建工程成功实施、实现预期社会效益的根本保障。

一、二级公路改建工程的主要特点与总体技术原则

二级公路改建工程是一项复杂的系统性工程，其首要特点体现为制约条件的多重性，施工必须在既有道路的物理框架和持续

通行的动态环境下进行，这极大地限制了施工工序的展开空间与机械作业的自由度。工程具有显著的不确定性 with 隐蔽性，原有路基路面的实际状况、隐蔽病害的分布与程度往往在开挖后才能完全揭示，这要求施工方案必须具备高度的动态调整能力^[2]。技术

作者简介：王建光（1982.10—），男，白族，云南大理人，本科，职称：工程师，研究方向：公路工程。

处理的多样性与综合性突出，涉及旧路病害处治、局部线形调整、路基拓宽拼接、路面结构加铺或重建、桥涵接长加固、安全设施更新等多个技术领域的交叉集成。基于这些特点，二级公路改建施工必须遵循一系列总体技术原则，首要原则是充分调查与精准评估原则，施工前必须对原有道路的平面线形、纵断面、横断面、路基路面结构强度与病害、桥涵构造物技术状况、排水系统完整性以及交通流量特征进行全面深入的调查与检测，获取可靠的基础数据作为设计优化的依据。其次是最大化利用与最小化废弃原则，在确保工程质量和长期性能的前提下，应科学评价旧路结构层的可利用价值，通过有效的技术措施使其融入新结构中，实现资源的节约与环境保护。

二、路基工程施工技术要点

（一）旧路基评价与利用技术

旧路基评价与利用是二级公路改建工程的基础与关键，其科学性与精准度直接决定工程质量和经济性。该技术要点的核心在于通过系统化的检测与诊断，全面评估旧路基的剩余承载力与潜在病害，并以此为依据制定差异化的处治与利用策略^[3]。评价工作需综合运用弯沉检测、地质雷达扫描、探坑开挖取样等多种技术手段，查明旧路基填料的均匀性、压实度、含水率分布以及是否存在软弱夹层、空洞、翻浆等隐蔽缺陷。在此基础上，根据旧路基的结构强度状况和改建后的荷载要求，实施分级分类利用。对于整体稳定性好、弯沉值满足要求的段落，可进行表面清理后直接作为新路基的持力层；对于局部强度不足但整体稳定的路段，可采用冲击碾压、注浆加固等技术进行补强；对于存在严重病害或含水率过高的局部段落，则需进行换填处理，换填材料宜与原路基性质协调并严格压实。此过程强调“检测指导设计、数据驱动决策”，旨在最大限度地挖掘和提升旧路基的残余价值，避免大挖大弃，从而实现资源节约、工期缩短和环境影响的最小化，为后续的路基拓宽与路面加铺奠定坚实、均匀的基础。

（二）路基拓宽与拼接技术

路基拓宽与拼接技术是二级公路改建工程中的核心难点，其施工质量直接关系到新旧路基能否协同工作、避免纵向裂缝和不均匀沉降等关键问题。该技术要点的实施始于旧路基边坡的标准化台阶开挖，必须采用机械与人工相结合的方式，沿边坡开挖出宽度不小于1米、高度不超过0.8米、并向内倾斜2%至4%坡度的反向台阶，同时彻底清除台阶表面的松散土层与植被，以提供良好的结合面与排水条件。在材料与压实控制方面，新填筑路基宜选用与旧路基性质协调、级配良好、透水性佳的填料，并严格将含水率控制在最佳含水率附近；压实作业必须遵循分层填筑、分层压实的根本原则，优先使用重型压路机，在拼接部位增加碾压遍数并采用横向碾压方式，确保接缝处密实无空隙，其压实度标准应较规范要求提高1至2个百分点。对于高填方或软弱地基拓宽路段，还需在台阶面或路基内部铺设土工格栅等加筋材料，通过其抗拉作用增强新旧路基的整体性，有效扩散荷载应力，抑制差异沉降^[4]。整个施工过程必须辅以系统的沉降与位移观测，实现

动态监控与信息化施工，从而保障拓宽后的路基形成一个长期稳定、均匀承载的完整结构体。

（三）特殊路基段处理技术

特殊路基段处理技术是二级公路改建工程中针对不良地质条件的关键性专项技术，其处理效果直接关乎路基的长久稳定与行车安全。该技术要点要求施工前必须依据详尽的地质勘察资料，准确识别软土、膨胀土、湿陷性黄土、滑坡体等特殊土质或不良地质段落，并遵循“一处一设计”的原则制定针对性的处治方案。对于广泛分布的软土地基，常采用排水固结法（如塑料排水板联合堆载预压）或复合地基法（如水泥搅拌桩、碎石桩）进行加固，施工中需严格控制桩体质量、排水板深度及预压荷载与时间，并建立系统的沉降与孔隙水压力监测网，依据监测数据动态调整加载速率，确保工后沉降满足规范要求。对于膨胀土路基，处理核心在于防水与改性，可通过换填非膨胀性材料、掺加石灰或水泥进行化学改良以抑制其胀缩性，并必须完善路基与边坡的防水、排水系统，设置防水土工膜与渗沟等隔离地下水。对于滑坡路段，则需采取综合措施，如前部抗滑挡土墙、后部削坡减载、内部排水疏干等，以恢复山体平衡。所有特殊路基处理均强调动态设计与精细化施工管理，确保处治措施有效可靠，从根本上消除病害隐患，为上部路面结构提供均匀稳固的支撑平台^[5]。

三、路面工程施工技术要点

（一）旧路面调查与处治技术

旧路面调查与处治技术是二级公路改建路面工程成功实施的先决条件与基础，其核心在于通过精准的诊断评估为后续结构性加铺或重建提供科学依据和合格的下承层。调查工作需系统化展开，综合运用路面损坏状况人工或自动化检测、弯沉检测、取芯抽样试验、平整度与抗滑性能测试等手段，全面量化旧路面的结构强度、材料性能与表面功能状况，绘制详细的病害分布与强度分区图^[6]。基于调查结果，必须实施差异化的精准处治策略：对于结构强度足够但存在表面病害（如裂缝、坑槽、松散）的段落，采用铣刨局部或全幅上面层的方法消除病害影响面；对于出现结构性损坏（如弯沉值过大、基层碎裂）的局部路段，则需开挖至稳定层位，进行局部补强或整体重建；对于大面积分布的非荷载性裂缝，需进行有效的灌缝或贴缝密封以防止水分下渗。所有处治作业的最终目标是形成一个强度均匀、表面平整、洁净干燥、无任何松散软弱夹层的稳固基础，从而确保新旧路面结构层间的有效粘结与整体受力，避免原有病害反射至新铺面层^[7]。

（二）路面加铺层结构与材料选择

路面加铺层结构与材料选择是决定二级公路改建后路面长期性能与经济性的核心决策环节，其核心任务是基于旧路面评价结果、未来交通荷载预测及环境因素，设计出强度足够、耐久性好且能有效抑制反射裂缝的结构体系。加铺层设计需科学计算所需的补强厚度，并高度重视层间结合与应力消散，常通过设置应力吸收层（如SAM I）、铺设玻纤格栅或采用高弹性改性沥青混合料等方式来延缓或阻断旧路裂缝向上反射。在结构组合

上,需根据旧路状况灵活选择直接加铺沥青面层、铺设半刚性基层后再加铺面层或采用“白改黑”复合结构等不同形式。材料选择则必须与结构设计相匹配并注重性能提升:下面层混合料应侧重于抗车辙与抗疲劳能力,可选择 AC-C 或 SUP 型密级配沥青混合料;上面层材料则需兼顾抗滑、耐久与行车舒适性,可优选 SMA、Novachip 或高模量沥青混合料;对于基层材料,在保证强度的前提下需严格控制水泥稳定类的收缩特性。该过程强调全寿命周期成本分析,旨在实现技术可靠、经济合理与资源节约的综合最优^[8]。

(三) 路面施工关键工艺控制

施工工艺控制是确保设计意图得以实现的关键。沥青路面施工须严格控制混合料的生产、运输、摊铺和碾压温度。摊铺作业应保持连续、均匀、缓慢、不间断,减少纵向冷接缝。碾压应遵循“紧跟、慢压、高频、低幅”的原则,按初压、复压、终压顺序进行,确保压实度和平整度达标。层间结合质量至关重要,在铺筑上一层前,必须彻底清扫下层表面,并按要求喷洒粘层油(乳化沥青或改性乳化沥青),用量准确、喷洒均匀。对于水泥稳定基层,施工中要抓好从拌和到成型的时效性,碾压成型后立即覆盖养生,保持表面湿润至少 7 天,养生期内严禁车辆通行。所有施工环节均需建立严格的过程检验制度。

四、施工期交通组织与综合管理要点

(一) 精细化施工期交通组织方案

交通组织方案必须遵循“安全、有序、影响最小化”的原则,并作为专项方案在施工前进行详细编制与审批。方案需根据施工段落、工序和工期,合理选择全幅封闭、半幅封闭分流或分段交替通行等模式^[9]。对于必须维持通车的半幅施工路段,应设置清晰、完备、坚固的临时交通安全设施,包括施工标志、限速标志、导向标牌、防撞桶、隔离墩及夜间警示灯等,确保作业区与通行区完全物理隔离。同时,需与交警、路政部门密切协作,利用可变情报板、社交媒体等渠道提前发布施工和绕行信息,引导车辆合理分流。交通组织方案还需具备动态调整能力,根据实际车流变化和施工进度进行优化。

(二) 施工质量控制与安全管理体系

建立贯穿始终的质量与安全管理体系是工程成功的制度保

障。质量控制方面,必须实行“自检、互检、交接检”和监理抽检相结合的制度,特别是对隐蔽工程和关键工序(如路基拼接、路面接缝、层间处理等)实行旁站监理和影像留存。积极推广采用实时监控、智能压实、无损检测等信息化手段,提升质量控制的精准度与效率。安全管理方面,必须严格执行公路养护安全作业规程,加强对施工人员,特别是交通协管员的安全教育培训。定期对临时交通设施进行检查维护,确保其始终处于有效状态。同时,做好施工现场的防火、用电、机械操作等常规安全管理工作,杜绝安全事故发生。

(三) 环境保护与文明施工措施

改建工程位于既有走廊带内,环境保护与文明施工尤为重要。施工中应采取有效措施控制扬尘,如对运输道路洒水、对易扬尘材料进行覆盖、对拌和站进行封闭管理等。合理安排施工时间,尽可能选用低噪音设备,减少噪声对沿线居民的影响^[10]。做好施工废料(如旧沥青混合料、拆除的混凝土块)的分类回收与资源化利用。妥善处理施工废水和生活污水,防止污染沿线水体。保持施工场地的整洁,材料堆放整齐,工程完成后及时清理现场,恢复临时占地,将施工对周边环境和居民生活的影响降至最低,实现工程建设与环境保护的和谐统一。

五、结语

二级公路改建工程是一项技术密集、管理复杂的系统工程,其成功实施依赖于对各个环节技术要点的深刻理解和精准把控。从基于详细调查的旧路评价与利用,到关乎长期稳定的路基拼接与特殊地基处理;从决定使用品质的路面处治与加铺设计,到贯穿始终的精细化交通组织与严格的质量安全环境管理,每一个环节都环环相扣,不可或缺。面对新时期公路建设向提质增效、绿色低碳转型的更高要求,未来的二级公路改建施工技术,必将更加注重全寿命周期成本分析、旧路材料的高效再生利用、智能化施工监控技术的集成应用以及施工过程与社会交通、周边环境的深度融合与和谐共生。持续深化对这些关键技术要点的研究与标准化实践,对于提升我国二级公路网的整体服务水平、保障国家与区域经济社会发展具有深远而重要的意义。

参考文献

- [1] 杨国庆. 农村公路改建工程中的关键施工技术 [J]. 交通世界, 2025, (32): 102-104.
- [2] 王涛. 公路拓宽改建工程旧路基拼宽加固施工技术分析 [J]. 交通科技与管理, 2025, 6(18): 155-157.
- [3] 郭江. 公路改建工程水泥混凝土路面施工工艺研究 [J]. 工程技术研究, 2025, 10(12): 31-33.
- [4] 陈欣. 高速公路改扩建工程路基路面拼接施工技术研究 [J]. 交通科技与管理, 2024, 5(16): 25-27.
- [5] 袁珍珍. 公路改建城市道路工程设计与施工技术要点探究 [J]. 新城建科技, 2024, 33(07): 127-129.
- [6] 周斌华, 杨建明, 李明, 等. 公路改建的线形设计方法与工程应用 [J]. 交通科学与工程. 2013, (1): 92-96
- [7] 鄢汉才. 公路改建工程设计实践体会 [J]. 企业技术开发(学术版). 2010, (1): 105-107
- [8] 刘浅居. 寿命周期成本分析法在道路设计方案比选中的应用 [J]. 科学技术与工程. 2009, (20): 6250-6253
- [9] 张文杰. 旧路改建设计与施工 [J]. 山西交通科技. 2003, (3): 19-20
- [10] 许有俊, 杨华仕, 张志清. 旧路改扩建中平纵横设计方法的探讨 [J]. 中外公路. 2009, (5): 9-12

石化企业建设工程招投标廉洁风险管理研究

别苏敏

扬州大学, 江苏 扬州 225000

DOI:10.61369/ME.2026010017

摘 要：石化企业建设工程具有投资规模大、技术门槛高、项目周期长、涉及专业领域广等特征，招投标环节权力集中、资金密集、利益关联复杂，廉洁风险防控难度大。本文以石化企业建设工程招投标廉洁风险管理为研究对象，结合行业业务特性，分析招投标各阶段廉洁风险的具体表现和行业化特征，提出“未病先防、初病防变、愈后防复”的风险控制措施，旨在为石化企业构建适配行业特点的廉洁风险防控体系提供参考。

关 键 词：石化企业；建设工程招投标；廉洁风险；风险管理

Research on Integrity Risk Management of Construction Project Bidding and Tendering in Petrochemical Enterprises

Bie Sumin

Yangzhou University, Yangzhou, Jiangsu 225000

Abstract： Petrochemical construction projects are characterized by large-scale investments, high technical barriers, extended timelines, and broad professional involvement. The bidding process involves concentrated power, capital-intensive operations, and complex stakeholder relationships, posing significant challenges for integrity risk management. This study examines integrity risk management in petrochemical construction bidding, analyzing its manifestations and industry-specific features across all stages. It proposes a three-phase risk control strategy: "preventive measures before issues arise, intervention during early stages, and post-resolution monitoring," aiming to provide actionable insights for establishing an integrity risk prevention system tailored to the petrochemical industry.

Keywords： petrochemical enterprises; construction project bidding; integrity risk; risk management

引言

作为能源领域的核心支柱，石化企业建设工程涵盖油气勘探开发、炼化装置建设、油气长输管道铺设、油气储库建设等关键领域，项目投资动辄数十亿乃至数百亿元，招投标环节涉及勘探设计、设备采购、工程施工、技术服务等多个细分领域，政策专业性和行业特殊性极强，是违规违纪违法行为和腐败问题易发高发区域^[1]。串标围标、弄虚作假、权钱交易等行为不仅会造成企业巨额资金浪费，还可能影响油气生产安全、生态环境安全，甚至危及国家能源安全。因此，结合石化企业业务特征探讨招投标廉洁风险管理对策，不仅具有重要理论意义，更对保障企业合规经营、维护国家能源安全、净化行业市场环境具有实践价值。

一、石化企业建设工程招投标廉洁风险管理的意义

（一）保障国家能源安全与企业经济安全，提升工程投资效益

石化企业建设工程直接关系国家能源战略布局，项目投资规模大、回收周期长、技术复杂度高，如千万吨级炼化项目、跨境油气长输管道、深海油气田开发工程等，单项目投资通常超百亿元。招投标环节的廉洁性直接决定工程建设成本与投资回报，通过强化廉洁风险管理，可有效防范“明招暗定”“阴阳合同”“借牌挂靠”等违规行为，避免在油气勘探设备采购、炼化装置施工、管道铺设工程等领域出现资金浪费，确保企业筛选出具备油气行业专业资质、技术实力雄厚、报价合理的合作方，实现投资效益最大化，同时保障国家能源基础设施建设的经济性与安全性。

（二）维护企业声誉与行业公信力，保障工程质量安全

石化企业工程质量直接关系油气生产运营安全。在市场竞争与行业监管双重压力下，石化企业的声誉与公信力是其重要无形资产。具备廉洁从业形象的企业，更易在国际合作项目、国家重点工程招标中获得优势，能够筛选出具有油气行业特殊施工经验、符合HSE管理标准的合作单位，从源头保障工程质量。反之，若招投标环节出现廉洁问题，不仅会导致企业公信力受损，还可能因工程质量隐患引发安全事故，威胁区域生态环境与群众生命财产安全。

（三）强化行业依法合规意识，净化能源领域市场环境

石化企业受《中华人民共和国招标投标法》《中华人民共和国石油天然气管道保护法》《能源行业招标投标管理办法》等法

律法规严格监管，招投标活动需同时遵循公平公正原则与能源行业特殊规范。企业通过建立适配行业特点的廉洁风险管理体系，可规范油气勘探开发工程、炼化装置建设、油气储运设施等项目的招投标流程，主动规避合规风险。近年来，国家持续强化对能源领域招投标违规行为的治理，重点整治围标串标、虚假招标、规避招标等问题。石油石化企业加强招投标廉洁管控，既能压缩行业寻租空间，又能推动形成公平竞争的市场环境，促进行业高质量发展。

二、石化企业建设工程招投标廉洁风险的具体表现

（一）招标阶段的廉洁风险表现

石化企业招标阶段风险集中体现在招标文件编制、招标信息发布和资格预审环节，具有一定的行业特殊性。在招标文件编制中，部分招标人可能为特定合作方“量身定制”条款，利用技术特殊性设置倾向性要求，为后续利益输送预留空间。在招标信息发布环节，部分企业对页岩气开发、深海油气田建设等涉密程度较高的项目，过度限制信息发布范围，不按规定在全国公共资源交易平台或能源行业专用交易平台公示，仅向少数关联企业透露信息，导致具备行业资质的潜在投标人错失机会。在资格预审环节，对投标人的油气行业专项资质审查标准不一，对“关系户”放宽 HSE 业绩要求、简化行业专项资质核验，对其他投标人严格“卡标准”，破坏公平竞争秩序。

（二）投标阶段的廉洁风险表现

投标阶段风险主要包括串标围标、弄虚作假、行贿行为等。串标围标方面，多家具备施工资质的企业相互勾结，协商报价区间、约定中标人，通过抬高报价损害招标人利益，尤其在专用设备采购领域，易形成行业性围标联盟。弄虚作假方面，部分投标人伪造石化企业专项资质、虚报行业内重点项目业绩、编造虚假技术方案、篡改 HSE 业绩报告等，以骗取中标资格。行贿行为方面，投标人通过向建设单位负责人、招标代理机构人员或评标专家赠送现金、礼品，或承诺中标后将工程维保服务分包给关联方等方式进行利益输送，达成中标目的。

（三）评标阶段的廉洁风险表现

评标阶段风险集中于评标主体与投标方的不当互动。一是“投标掮客”介入，部分熟悉招投标规则和技术标准的人员，充当“中间人”，收取高额费用，为投标人与评标专家、招标人牵线搭桥。二是评标专家违规操作，部分评标专家与投标人私下接触，接受利益承诺后，在评审中刻意偏袒，如对特定投标人的技术方案给予不合理高分，忽视其报价偏高或资质瑕疵等问题，或泄露其他投标人的行业核心技术参数。三是招标代理机构人员利用职务便利，干扰评审独立性，如调整评标专家抽取范围、透露其他投标人的专用设备报价、油气工程施工组织设计核心内容等，导致评审结果失真。

（四）定标及合同履行阶段的廉洁风险表现

一是定标环节，招标人存在因利益关联违背评标结果的现象，将油气长输管道建设、炼化装置改造等重点项目的中标资格，授予未中标但存在关联关系的施工单位，尤其在跨境项目、

涉密项目中更为隐蔽。二是合同签订环节，签订“阴阳合同”规避监管，表面合同按行业标准约定工程价款、工期及质量要求，私下补充合同则变更核心设备品牌、降低行业标准、调整工程款支付比例等，规避能源行业监管和履约责任^[2]。三是合同履行阶段，中标人通过虚报施工进度、伪造工程量等方式套取工程款，在施工中偷工减料，降低施工标准、使用不合规材料、简化安全防护设施。部分企业存在违规转包或违法分包情况，将关键工序分包给不具备行业资质的企业，引发安全隐患和质量风险，给企业带来经济损失和安全风险。

三、石化企业建设工程招投标廉洁风险的行业化特征

（一）隐蔽性更强

石化企业建设工程涉及油气勘探开发、炼化工艺、管道工程等高度专业的技术领域，廉洁风险更易通过技术手段掩盖，隐蔽性远超普通行业。一方面，利益输送可借助行业技术特性实现，为特定投标人“开绿灯”，外部监督难以识别。另一方面，利益输送形式更具行业特殊性，如以“技术咨询费”“设备检测费”名义支付回扣，通过关联企业转让油气技术专利、提供独家设备配件供应权等方式实现利益输送，难以被常规监管发现，进一步增加风险暴露难度^[3]。

（二）关联性更广

石化企业招投标涉及主体多、产业链长，风险关联范围远超普通工程。参与主体包括油气勘探设计单位、专用设备制造商、工程施工企业、行业监管机构、评标专家、能源监管部门等，任一主体的廉洁风险都可能通过产业链扩散，引发系统性问题。从影响层级来看，招投标阶段的廉洁风险不仅会导致企业资金超支、工程质量不达标，还可能影响油气生产安全与生态环境安全。在行业层面，会破坏市场竞争秩序，导致“劣币驱逐良币”，阻碍行业技术创新。在国家层面，可能影响能源战略布局落地，甚至危及国家能源安全，其影响力之大远超普通建设工程。

（三）动态性更大

一方面，政策法规与行业监管的更新正推动风险形态演变。国家能源局对石化企业招投标环节的监管不断强化，电子化招投标全面推行后，线下串标围标减少，但出现了线上协商报价、篡改电子投标文件、攻击招投标系统等新型问题。另一方面，行业发展带来新的风险点。随着页岩气开发、深海油气田建设、炼化一体化升级等新项目增多，EPC 工程总承包、PPP 等模式在石油石化领域广泛应用，招投标环节增多、参与主体更复杂。BIM 技术、区块链在油气工程招投标中的应用，虽提升了管理效率，但也带来数据安全、权限滥用等新风险。同时，海外油气项目招投标中的跨境利益输送、不同国家监管规则差异引发的合规风险，也成为行业廉洁风险防控的新挑战。

四、石化企业建设工程招投标廉洁风险管控措施

（一）未病先防——事前预防措施

一是完善行业化廉洁管理制度。结合《中华人民共和国招标

投标法》《能源行业招标投标管理办法》等法律法规，构建适配石化企业的招投标廉洁管理制度体系。强化企业内部技术部门、造价部门、法律部门、HSE管理部门的联动，针对油气勘探开发、炼化装置建设、油气储运等不同类型项目，制定专项廉洁管理细则。建立招投标岗位责任制，明确油气工程招标专员、行业造价负责人、评标联系人的廉洁职责，细化专用设备采购、特殊工艺施工等环节的责任清单，形成“谁主管、谁负责”的责任体系。建立信息公开制度，除按规定公开常规信息外，重点公开油气项目的行业专项资质要求、HSE业绩标准、专用设备技术参数范围、评标专家行业背景等信息，通过全国公共资源交易平台和能源行业专用交易平台双重公示，保障潜在投标人知情权。

二是加强行业针对性廉洁教育与培训。组织招投标工作相关人员学习《中华人民共和国招标投标法》《能源行业公平竞争审查规则》及石化企业典型腐败案例等内容，强化依法合规意识^[4]。开展行业专项培训，通过油气工程案例剖析、模拟评标演练等方式，聚焦招标文件编制中的行业技术参数设定、资格预审中的行业资质核验、评标中的专用设备评审等关键环节，提升员工风险识别能力^[5]。邀请能源行业专家、纪检监察干部、行业监管机构负责人开展专题讲座，解读油气行业招投标政策新规、HSE管理要求与廉洁风险防控要点，增强全员对廉洁风险危害性的认识，自觉抵制利益输送行为。

三是设计公正公开的招投标流程。招标文件编制环节，引入具备石化企业资质的第三方咨询机构，对招标文件中的技术参数、工程量清单、评标标准进行合规性审核。评标专家库建设方面，扩大油气勘探开发、炼化工艺、管道工程、专用设备等细分领域的专家规模，审核专家的从业经历和专业能力，建立专家动态管理机制。专家抽取时，除执行随机抽取、专业匹配、回避制度外，增加专项回避要求，减少人为干预。同时，全面推行电子化招投标，实现招标、投标、评标、定标全过程线上操作，对油气工程技术方案、专用设备报价、评标打分等关键数据进行加密存储和全程留痕，提升招投标工作透明度。

（二）初病防变——事中控制措施

一是强化全过程监督检查。成立由纪检监察、审计、工程管理、HSE管理、企管法律等人员组成的专项监督小组，针对油气项目招投标特点，重点监督招标文件中行业技术参数的合规性、

评标专家的行业资质匹配度、专用设备采购的报价合理性、定标决策的公正性等。对重点项目实行“一项目一监督”，全程跟踪监督。评标过程实行全程录音录像，统一保管评标专家通讯工具，同时对专家评审中的行业技术问题争议进行记录，确保评审过程可追溯。

二是建立风险预警机制。结合石化企业招投标风险点，构建风险预警信息系统，与招投标电子平台互联互通，实时采集投标人的行业资质等级、HSE业绩、油气项目施工经验、专用设备供应记录、投标报价波动等数据。设定预警指标，当指标超过阈值时自动报警，由技术人员核查确认风险后，立即暂停招投标活动，组织监督小组调查核实，采取剔除不合格投标人、修改招标文件中的行业技术条款、更换评标专家等措施，后续重新开展招投标活动，防止风险扩大。

三是强化重点环节和关键岗位管控。重点环节管控方面，对招标文件编制、油气工程量清单审核、专用设备评标标准制定、定标决策等环节实行多级审批，招标文件需经工程技术部门、行业造价部门、法律部门、HSE部门等多部门联合审批并留存痕迹，评标结果需经企业招投标管理委员会集体决策、签字确认，定标过程要形成书面记录。关键岗位管控方面，对油气工程招标负责人、行业造价负责人、评标联系人等关键岗位实行轮岗制，同一人员同岗位任职不超过既定年限。严格执行关联回避制度，涉及亲属或关联企业参与的油气项目招投标，相关人员必须回避。

五、结论

石化企业建设工程招投标廉洁风险管理是保障企业高质量发展、维护国家能源安全的重要课题，具有鲜明的行业特殊性和复杂性。石化企业应立足行业业务特征，聚焦招投标全流程关键风险点，通过健全行业化制度体系、强化全过程监督、构建特色化预警机制、培育行业廉洁文化等措施，实现“未病先防、初病防变、愈后防复”的全周期风险管控。增强行业市场竞争软实力，有效识别和防范招投标领域潜在风险，保障工程质量安全与企业经济安全，为企业可持续发展打下坚实基础，为谱写能源强国建设新篇章贡献力量。

参考文献

- [1] 石超亭.全过程管理视阈下高校招投标领域廉政风险点管控[J].开封大学学报, 2025,39(01):41-44.
- [2] 刘鹤伦.建设工程项目“阴阳合同”法律问题研究[D].北京交通大学, 2020.DOI:10.26944/d.cnki.gbfju.2020.000545.
- [3] 苏金香.工程投标人持续合谋驱动机理研究[D].重庆大学, 2023.DOI:10.27670/d.cnki.gcqdu.2023.002412.
- [4] 张家瑜.工程建设领域廉洁文化建设路径探索[J].塑料包装, 2024,34(06):79-81+75.
- [5] 简增魁.石油石化企业对招投标工作的管理[J].石化技术, 2020,27(05):356+358.

浅埋偏压软弱围岩隧道施工技术分析

曹铁锤

浙江交工集团股份有限公司第四分公司, 浙江 杭州 310000

DOI:10.61369/ME.2026010018

摘 要 : 浅埋偏压软弱围岩隧道因地质条件复杂、施工风险高, 成为隧道工程领域的重难点课题。本文结合工程实践, 分析浅埋偏压软弱围岩的地质特性与施工难点, 阐述超前支护、开挖支护、防排水等关键施工技术的应用要点, 探讨施工过程中的质量控制与安全管理措施, 旨在为同类隧道工程提供技术参考, 提升施工效率与工程安全性。

关 键 词 : 浅埋偏压; 软弱围岩; 隧道施工; 超前支护; 质量控制

Analysis of Construction Technology for Tunnels in Shallow-Buried, Overburdened, Weak Surrounding Rock Conditions

Cao Tiechui

Zhejiang Jiaogong Group Co., Ltd. Fourth Branch Company, Hangzhou, Zhejiang 310000

Abstract : Due to the complex geological conditions and high construction risks, tunnels in soft and overburdened shallow-buried rock formations have become a key and challenging issue in the field of tunnel engineering. This paper, based on engineering practice, analyzes the geological characteristics and construction difficulties of shallow-buried and overburdened soft rock formations, elaborates on the application points of key construction techniques such as advanced support, excavation support, and waterproofing and drainage, and discusses the quality control and safety management measures during the construction process. The aim is to provide technical references for similar tunnel projects, and improve construction efficiency and engineering safety.

Keywords : shallow-buried and overburdened; soft rock formations; tunnel construction; advanced support; quality control

前言

随着我国交通基础设施建设向山区、丘陵地带延伸, 浅埋偏压软弱围岩隧道的建设需求日益增长。此类隧道通常穿越第四系松散土层、强风化岩层, 具有围岩自稳能力差、开挖后易坍塌变形、偏压荷载作用明显等特点, 若施工方案不合理, 极易引发塌方、地表沉降超限等工程事故。近年来, 国内外学者针对浅埋偏压软弱围岩隧道施工开展了大量研究, 提出了新奥法、盾构法等多种施工理念, 但在具体工程实践中, 仍需结合地质条件、周边环境等因素进行技术优化。本文立足于工程实际, 系统梳理浅埋偏压软弱围岩隧道的施工技术体系, 从地质勘察、方案设计到现场施工、质量管控进行全面分析, 以期为工程建设提供切实可行的技术方案, 推动隧道施工技术的创新与发展。^[1]

一、浅埋偏压软弱围岩隧道的地质特性与施工难点

(一) 地质特性分析

浅埋偏压软弱围岩隧道的核心地质特征体现在埋深浅、围岩弱、偏压显著三个方面。埋深通常小于隧道跨度的5倍, 围岩多为粉质黏土、淤泥质土、强风化页岩等, 其黏聚力低、内摩擦角小, 岩体完整性差, 呈松散状或碎裂状结构, 自稳时间极短, 开挖后若无及时支护, 易发生塑性变形甚至坍塌。偏压荷载的形成主要源于地形起伏、地层倾斜或隧道两侧围岩厚度不均, 导致隧道结构承受不对称的侧向压力, 这种偏压作用会使支护结构产生

不均匀受力, 进而引发衬砌开裂、拱顶下沉等病害。此外, 软弱围岩往往富含地下水, 地下水的渗流会降低围岩的力学性能, 加剧围岩软化和泥化, 进一步增大施工难度。^[2]

(二) 核心施工难点

(1) 围岩稳定性控制难

软弱围岩自稳能力差, 浅埋条件下开挖扰动易传递至地表, 引发地表沉降, 若沉降量过大, 会危及周边建筑物、道路管线的安全。同时, 偏压荷载的存在使隧道围岩应力分布不均, 易在隧道偏压侧形成应力集中区, 导致围岩变形速率加快, 支护结构受力恶化。

（2）支护结构设计施工难

传统的支护体系难以适应浅埋偏压的复杂受力环境，需兼顾围岩加固与偏压平衡双重目标。支护结构的刚度、强度需合理匹配，若支护强度不足，无法抵御围岩压力；若刚度太大，则会导致支护结构自身承受过大荷载，引发开裂破坏。此外，支护施工的时机把控至关重要，过早支护会限制围岩的应力释放，过晚支护则无法阻止围岩变形，需精准掌握“适时支护”的原则。

（3）防排水施工难度大

软弱围岩中的地下水不仅会软化围岩，还可能引发突水、涌泥等灾害。浅埋隧道的防排水系统需同时兼顾围岩排水与地表防渗，若排水不畅，地下水会在支护结构后积聚，产生静水压力，破坏支护体系；若地表防渗不到位，雨水下渗会进一步恶化围岩条件，形成恶性循环。

（4）施工监测与风险预警难

浅埋偏压软弱围岩隧道的围岩变形具有速率快、变形量大、持续时间长的特点，对施工监测的精度和频率要求极高。需布设拱顶下沉、周边收敛、地表沉降等多项监测指标，但由于施工现场环境复杂，监测设备易受施工扰动影响，数据采集难度大。同时，如何根据监测数据准确判断围岩稳定性，及时发出风险预警，也是施工中的一大难点。

二、浅埋偏压软弱围岩隧道关键施工技术

（一）超前支护技术

超前支护是浅埋偏压软弱围岩隧道施工的核心前置技术，其作用是在隧道开挖前，对掌子面前方及周边围岩进行预加固，提高围岩自稳能力，防止开挖过程中发生坍塌。常用的超前支护技术主要包括超前小导管注浆支护、管棚支护、超前锚杆支护等，需结合围岩条件选择合适的支护方式。^[3]

（1）超前小导管注浆支护

适用于围岩破碎但仍有一定自稳能力的地层。施工时，沿隧道拱部轮廓线外10–15cm的位置，以10°–30°的外插角钻孔，插入直径42–50mm的小导管，导管长度一般为3.5–5.0m，环向间距30–50cm。随后通过小导管向围岩注入水泥浆或水泥–水玻璃双液浆，浆液渗透到围岩裂隙中，胶结松散岩体，形成具有一定强度的“注浆加固圈”，有效提高围岩的整体性和自稳能力。该技术施工灵活、成本较低，在浅埋偏压软弱围岩隧道中应用广泛。

（2）管棚支护

适用于围岩极其破碎、自稳能力极差的浅埋隧道，尤其是洞口段、偏压严重段。管棚支护采用直径较大的钢管（一般为89–159mm），沿隧道拱部轮廓线外布设，钢管长度可达10–40m，通过钻机将钢管顶入围岩，形成“管棚棚架”，为开挖作业提供强大的超前支护作用。管棚可分为长管棚和短管棚，长管棚多用于洞口浅埋段，短管棚则适用于洞内局部破碎带。管棚施工后，可在钢管内注浆，进一步增强加固效果，有效控制围岩变形和地表沉降。

（3）超前锚杆支护

适用于围岩相对完整、偏压较小的浅埋隧道。超前锚杆采用

直径22–25mm的螺纹钢，长度3–4m，环向间距40–60cm，外插角10°–20°，通过钻孔植入围岩，利用锚杆的抗拉拔力约束围岩变形。该技术施工简便、速度快，但加固范围有限，通常与喷射混凝土配合使用，形成联合支护体系。^[4]

（二）开挖支护、防排水及信息化施工技术

开挖方式与支护时机直接影响浅埋偏压软弱围岩隧道施工安全，需遵循“短进尺、弱爆破、快支护、勤量测”原则，结合BIM模拟优化方案，降低围岩扰动。

（1）开挖方法

优先采用台阶法、CD法（中隔壁法）、CRD法（交叉中隔壁法）等分部开挖方法。施工前通过BIM技术构建三维地质模型，模拟不同方案下围岩应力分布与变形趋势，优化开挖参数。台阶法分上下台阶施工，上台阶高2.5–3.5m，采用微震爆破、机械或静态开挖，开挖后及时施作初期支护，下台阶在初期支护稳定后开挖，台阶长度控制在5–10m；偏压严重隧道采用不对称台阶法，通过BIM模拟调整偏移量，或模拟偏压挡墙与明洞长度设置方案。CD法、CRD法适用于围岩稳定性极差的情况，将断面划分为小断面分部开挖，完成后立即施作初期支护，CRD法增设临时仰拱，支护效果更优，可通过BIM优化工序衔接提升效率。^[5]

（2）初期支护技术

采用“喷射混凝土+锚杆+钢筋网+钢拱架”联合支护体系。喷射混凝土选用早强型，强度不低于C25，厚度10–20cm，确保与围岩紧密贴合；系统锚杆长度2.5–3.5m，间距1.0–1.5m，与钢拱架协同提升整体性；钢筋网采用 $\phi 6$ –8mm钢筋，网格间距20×20cm，增强抗裂性；钢拱架选用工字钢或格栅钢架，间距0.5–1.0m，拱脚需落于坚实地基，必要时设垫板。通过BIM技术模拟钢拱架安装位置与角度，生成施工指导文件保障精度。

（3）二次衬砌技术

作为永久支护结构，需在初期支护变形稳定后施作，采用强度不低于C30的模筑混凝土，厚度30–50cm。施工前通过BIM模型核对初期支护表面平整度，规划防水板铺设与浇筑顺序，清理初期支护表面后铺设防水板。浇筑采用泵送混凝土，确保振捣密实；偏压隧道需加厚偏压侧衬砌或采用不对称结构，通过BIM模拟验证受力合理性。

（三）防排水施工技术

遵循“防、排、截、堵相结合，因地制宜，综合治理”原则，构建完善体系。围岩排水方面，超前小导管设透水孔，开挖后在初期支护背后布设环向（间距5–10m）与纵向盲管（直径 ≥ 100 mm），通过三通连接引入中央排水管排出。防水施工中，二次衬砌与初期支护间铺设 ≥ 1.5 mm厚EVA或HDPE防水板，搭接宽度 ≥ 10 cm，采用热焊法焊接；施工缝设中埋式止水带，变形缝设橡胶止水带，通过BIM技术标注安装要求。地表防渗需设置截排水沟，回填封堵地表裂缝，必要时进行地表注浆，利用BIM模型优化布设范围与走向。

（四）信息化施工技术

（1）BIM模拟施工技术

施工准备阶段整合地质勘察数据与设计图纸，构建包含地

质、支护、防排水系统的全要素三维模型。模拟施工全过程预判坍塌、受力超限等风险，优化方案；施工中对比现场实际数据与模型，动态调整参数，实现闭环管理；同时利用模型进行技术交底，直观展示施工流程与关键要求。

（2）物联网监测技术

构建智能监测系统，在隧道拱顶、边墙等位置布设传感器，实时采集拱顶下沉、应力、渗压等数据，监测频率可自动调整，变形速率大时实现分钟级采集。数据通过无线传输上传云端平台，实时分析绘制曲线，超预警值时自动通过短信、弹窗预警，同时监控施工设备运行状态与人员定位，保障安全。

三、浅埋偏压软弱围岩隧道施工质量控制与安全管理

（一）施工质量控制要点

（1）原材料质量控制：严格把控水泥、钢筋、砂石等原材料的进场质量，所有材料需具备出厂合格证，并进行抽样检测，不合格材料严禁使用。喷射混凝土、模筑混凝土的配合比需通过试验确定，严格按照配合比计量拌合，确保混凝土强度满足设计要求。利用 BIM 模型关联原材料信息，实现材料进场、使用全过程可追溯。

（2）施工工序质量控制：超前支护施工时，通过物联网监测设备控制小导管、管棚的钻孔角度、间距、长度，采用注浆压力传感器实时监测注浆压力，确保注浆饱满，加固效果达标；开挖施工时，严格控制进尺长度和爆破参数，通过 BIM 模型比对开挖轮廓线，避免超挖或欠挖；初期支护施工时，利用激光测距仪、倾角仪确保钢拱架安装垂直度、间距符合设计要求，采用厚度检测仪检测喷射混凝土厚度均匀性；二次衬砌施工时，控制模板安装精度，通过 BIM 模型校验衬砌厚度和表面平整度。^[6]

（3）质量检测：定期对支护结构进行质量检测，采用超声波检测、回弹法等手段检测喷射混凝土和二次衬砌的强度与密实度；对锚杆进行拉拔试验，检验锚杆的抗拉拔力；对防水板焊缝进行气密性试验，确保防水效果。将检测数据录入 BIM 模型，形成质量检测数据库，实现质量问题的溯源与整改跟踪。

（二）施工安全管理措施

（1）施工监测优化：在传统监测基础上，融合物联网监测技术，建立完善的施工监测体系，实现监测数据的实时采集、传输、分析与预警。监测点布设需结合 BIM 模型优化，确保监测数据能全面反映围岩及支护结构的受力变形状态。及时对监测数据进行分析处理，预测围岩变形趋势，若变形量超过预警值，立即停止施工，采取注浆加固、回填封堵等加固措施。

（2）风险预警与应急处置：基于 BIM 模拟结果和物联网监测数据，制定专项应急预案，针对塌方、突水涌泥、地表沉降超限等风险，储备应急物资和设备，定期组织应急演练。建立多级风险预警机制，根据监测数据偏差程度划分预警等级，明确不同等级的处置流程。一旦发生险情，立即启动应急预案，通过人员定位系统快速疏散施工人员，利用 BIM 模型辅助制定抢险方案，采取有效措施控制险情发展。

（3）现场安全管理：加强施工现场的安全防护，设置警示标志和防护栏杆；规范施工人员的操作行为，佩戴安全帽、安全带等防护用品；严格控制隧道内的施工荷载，避免超载导致支护结构破坏；加强通风、照明管理，改善作业环境，防止发生中毒、窒息等事故。利用物联网技术对施工现场的安全隐患进行实时巡查，发现问题及时推送至相关责任人，督促整改闭环。

四、结语

浅埋偏压软弱围岩隧道施工是一项集地质分析、技术优化、质量管控于一体的系统工程，其核心在于根据围岩特性选择合适的施工技术，实现对围岩稳定性的有效控制。本文通过分析此类隧道的地质特性与施工难点，阐述了超前支护、开挖支护、防排水等关键技术的应用要点，提出了质量控制与安全管理措施。实践表明，只有坚持“因地制宜、动态调整”的原则，将理论分析与工程实践相结合，才能有效降低施工风险，确保隧道工程的安全、高效建设。随着隧道施工技术的不断创新，新型材料、智能化设备的应用将为浅埋偏压软弱围岩隧道施工提供更多解决方案，推动行业朝着高质量发展方向迈进。

参考文献

- [1]王梦恕.隧道工程[M].北京:人民交通出版社,2018.
- [2]张顶立,李鹏飞,黄俊.软弱围岩隧道变形特性与控制技术[J].岩石力学与工程学报,2020,39(S2):3567-3578.
- [3]中华人民共和国交通运输部.JTG/T 3370.1-2020 公路隧道施工技术规范[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2020.
- [4]刘招伟,郭小红,谭忠盛.浅埋偏压隧道施工围岩稳定性分析及控制技术[J].铁道工程学报,2019,36(05):74-79.
- [5]李永林,朱合华,李晓军.软弱围岩隧道超前支护效果评价方法研究[J].岩土工程学报,2021,43(03):512-519.
- [6]陈秋南,王曙光,张永兴.公路隧道浅埋偏压段施工技术与数值模拟[J].重庆大学学报,2017,40(09):98-105.

公路工程项目招标造价控制与合同风险管控

陈苏君, 王嘉谣

浙江交工宏途交通建设有限公司, 浙江 杭州 311305

DOI:10.61369/ME.2026010019

摘 要 : 公路工程作为基础设施建设的核心组成部分, 其投资规模大、建设周期长、参与主体多的特点, 决定了招标阶段造价控制与合同风险管控的关键地位。本文以公路工程项目全生命周期管理为视角, 分析招标阶段造价失控的主要诱因, 包括工程量清单编制偏差、投标报价策略失衡、评标机制不健全等问题; 同时针对合同签订与履行中的风险点, 如条款模糊、权责划分不清、变更索赔争议等, 提出系统性管控措施。研究表明, 通过优化招标流程、强化清单审核、完善合同条款、建立动态风险预警机制, 可有效降低工程造价超支概率, 减少合同纠纷, 保障公路工程项目在质量、进度、成本三重目标下顺利推进, 为同类工程项目管理提供实践参考。

关 键 词 : 公路工程; 招标阶段; 造价控制

Cost control and Contract Risk Management in Highway Engineering Project Bidding

Chen Sujun, Wang Jiayao

Zhejiang Jiaogong Hongtu Transportation Construction Co., LTD., Hangzhou, Zhejiang 311305

Abstract : As a core component of infrastructure construction, highway engineering is characterized by large investment scale, long construction period and multiple participating entities, which determines the key position of cost control and contract risk management in the bidding stage. This article, from the perspective of the full life cycle management of highway engineering projects, analyzes the main causes of cost control out of control in the bidding stage, including problems such as deviations in the preparation of bill of quantities, imbalance in the bidding quotation strategy, and imperfect evaluation mechanism. At the same time, systematic control measures are proposed for risk points in the signing and performance of contracts, such as ambiguous terms, unclear division of rights and responsibilities, and disputes over changes and claims. Research shows that by optimizing the bidding process, strengthening the review of the list, improving the contract terms, and establishing a dynamic risk early warning mechanism, the probability of project cost overruns can be effectively reduced, contract disputes can be decreased, and highway engineering projects can be smoothly advanced under the triple goals of quality, progress, and cost, providing practical references for the management of similar engineering projects.

Keywords : highway engineering; bidding stage; cost control

前言

近年来我国公路建设投资与规模攀升, 2024年全国公路建设固定资产投资超2.8万亿元, 政府公益性项目占比超60%, 但“三超”现象与合同纠纷仍制约项目效益。招标是造价控制源头, 合同是风险分配核心, 而部分建设单位存在“重流程轻审核”“重签订轻预判”问题, 导致清单偏差、条款模糊。本文聚焦招标造价与合同风险管控, 结合行业问题从流程、机制、技术维度提方案, 助力项目管理从事后补救转向事前预防, 实现投资效益最大化与风险可控。

一、公路工程项目招标阶段造价控制的核心问题与成因

(一) 工程量清单编制质量差, 成造价偏差主因

工程量清单是投标报价基础与造价控制核心载体, 当前部分

项目清单编制缺陷明显: 一是缺项漏项普遍, 编制人员因对施工工艺理解不深或未结合现场勘察, 遗漏关键子目, 如山区公路漏“特殊地基处理”、平原公路忽“地下管线迁移协调费”, 施工阶段需变更致造价超支; 二是项目特征描述模糊, 未明确材料规格、施工标准, 如“沥青混凝土路面”仅写“路面工程”, 引发

投标方理解偏差，中标后因材料标准争议调整价款；三是工程量计算误差大，编制单位未按规范计算或依赖旧图纸，如桥梁支座数量错算、涵洞长度不符实际，施工阶段需重核调整造价。

根源在于建设单位选无专业资质的编制单位降成本，且“边设计、边招标”使图纸深度不足，仓促编清单埋隐患。

（二）投标报价策略失衡，偏离合理成本

投标报价是企业竞争手段与招标方定标依据，当前市场“恶性竞争”与“报价虚高”并存：部分企业低价竞标，低于成本价中标后靠签证变更、索赔补利润，如某高速项目企业低15%成本中标，施工阶段以地质不符申请变更，增造价2.3亿元；部分企业过度考虑风险，报价含冗余成本，如高设材料浮动系数，既缺竞争力又致建设单位投资浪费；还有报价组成不规范，如某二级公路项目投标单位将“交通安全设施”单价误填总价，偏差达30%，影响造价控制。

（三）评标机制不健全，难实现“价质匹配”

评标漏洞易致“低价低质”或“高价低效”企业中标：一是评标指标权重失衡，部分项目报价权重超70%，忽视技术方案等，如某乡村公路选无山区施工经验的低价企业，因技术不足延误工期增成本；二是评标专家专业能力不足，缺乏跨专业知识难辨报价风险，如某桥梁项目专家未发现支座单价低，中标后换支座增造价800万元；三是评标过程不透明，存在暗箱操作，选不合要求企业，致造价失控与质量隐患。^[1]

二、公路工程项目招标阶段造价控制的优化策略

（一）强化工程量清单编制管理，筑牢造价控制基础

工程量清单的准确性是造价控制的前提，需通过“资质审核、流程规范、技术赋能”提升编制质量。

1. 严格筛选编制单位：建设单位优先选择具备“公路工程专业甲级造价咨询资质”的单位，核查其过往同类项目业绩。例如，要求编制单位提供近3年3个以上公路项目清单案例，组织专家评审案例质量，确保专业能力达标，避免选用无经验机构。

2. 规范清单编制流程：编制前，要求编制单位深入现场勘察，结合地形、地质、水文数据核对设计图纸，确保图纸达“招标图”深度，杜绝“边设计、边招标”；编制中，严格依据《建设工程工程量清单计价规范》与《公路工程标准施工招标文件（2020年版）》，明确项目特征，如“沥青路面”需注明“沥青标号70#A级、骨料玄武岩、压实度 $\geq 96\%$ ”，避免模糊表述；编制后，由第三方机构审核“工程量准确性、子目完整性、特征清晰度”，审核通过方可发布招标公告。

3. 引入数字化技术辅助：利用BIM技术构建三维模型，自动计算工程量减少人工误差，如桥梁项目中精准统计支座、钢筋、混凝土用量，避免漏项与偏差；同时依托大数据分析行业同类项目清单数据，为当前项目子目设置提供参考，保障清单合理性。

（二）优化投标报价管控，引导报价回归合理区间

通过“资格预审、报价分析、风险提示”规范投标行为，避免恶性竞争与报价虚高。

1. 严格开展资格预审：招标前核查投标企业资质、类似项目业绩、财务状况与履约能力，淘汰无能力或有不良记录的企业。例如，要求企业提供近5年2个以上同等级公路项目合同，且无重大质量安全事故，同时出具银行资信证明，确保其能承担项目成本。

2. 建立合理低价评审机制：在招标文件中明确“合理低价”标准，以大数据分析的近3年同类项目“行业平均成本价”为基准，投标报价在基准价 $\pm 5\%$ 内为“合理区间”，超出区间需提供说明，评标委员会重点审核合理性，避免低于成本价或虚高报价。

3. 加强投标报价分析：评标阶段分析“综合单价构成、规费税金计算、主要材料价格”，如将钢筋、水泥、沥青报价与当地市场价对比，若低于市场价10%以上，要求企业提供材料采购渠道证明，防止以次充好；同时核查人工、材料、机械费用占比，识别“前期单价高、后期单价低”的不平衡报价。

4. 发布风险提示公告：在招标文件中明确项目潜在风险，如地质复杂、材料价波动、政策调整，引导企业在报价中合理考虑风险费用。例如，注明“本项目沿线地质复杂，投标单位需自行勘察，报价含特殊地基处理费用”，避免中标后以“风险未预见”申请变更索赔。

（三）完善评标机制，实现“价质匹配”

通过“优化指标、提升专家能力、强化监督”，确保评标公正透明，选出“报价合理、技术过硬、履约能力强”的企业。

1. 优化评标指标权重：平衡各指标占比，建议“报价权重50%–60%、技术方案20%–25%、企业业绩10%–15%、履约能力5%–10%”。技术方案评审重点关注施工组织设计合理性（工期、工艺、质量控制）与机械设备配置，避免选用技术方案不完善的企业。^[2]

2. 提升评标专家专业能力：建立专家库，筛选10年以上从业经验、高级职称的道路、桥梁、造价工程师，覆盖各专业；定期组织培训，内容包括最新计价规范、招标文件范本、风险识别技巧，如培训专家识别不平衡报价、低于成本价报价，通过技术方案判断企业施工能力。

3. 强化评标过程监督：引入纪检部门、行业协会等第三方机构全程监督，评标过程录音录像，评审资料存档备查；实行“评标结果公示制度”，公开中标候选人报价、技术得分、业绩，接受社会监督，杜绝暗箱操作。

三、公路工程项目合同风险管控的关键措施

（一）合同签订前：精准识别风险，明确分配原则

合同签订前的风险识别是管控基础，需结合公路工程投资大、周期长、受环境影响大的特点，全面梳理风险点并明确承担主体。

1. 全面梳理风险点：公路工程常见合同风险包括地质风险、材料价格波动风险、工期延误风险、变更索赔风险与不可抗力风险。例如，地质风险表现为实际地质与勘察报告不符，需额外增

加地基处理费用；材料价格波动风险则体现在施工期间钢材、沥青等主材价格大幅上涨，直接推高施工成本。

2. 明确风险分配原则：遵循“谁能控制、谁承担”的核心原则，合理划分风险边界。建设单位需承担项目立项审批延误、自身需求导致的设计变更、政策调整（如税收变化）及不可抗力（地震、洪水）引发的工期延误与费用增加；施工企业则承担施工组织不当导致的工期延误、质量不合格的返工费用，以及自身管理不善引发的安全事故损失。对于材料价格波动这类双方均无法完全控制的风险，可约定波动幅度在 $\pm 5\%$ 以内由施工企业承担，超出部分双方各担 50%（具体比例可协商）。某高速公路项目通过此约定，明确沥青价格超 $\pm 5\%$ 时按实际涨幅调整价款，有效避免了材料涨价引发的索赔纠纷。^[3]

（二）合同签订中：完善条款内容，堵塞漏洞

合同条款的严谨性直接决定风险管控效果，需针对公路工程特点细化关键条款，杜绝模糊表述。

1. 细化工程变更条款：工程变更是公路项目常态，需明确申请流程、审批权限与价款调整方式。施工企业申请变更时，需提交含变更原因、内容、工程量及费用的报告，并附图纸与计算依据；审批权限按金额划分，50 万元以内由监理单位审批，50 万 -200 万元由建设单位项目负责人审批，200 万元以上需建设单位集体决策并备案；价款调整则遵循“有适用子目按原单价、有类似子目参照调整、无相关子目重新组价”的原则，避免争议。

2. 明确工期与延误责任条款：合同需明确总工期与关键节点工期（如桥梁浇筑、路面铺设完成时间）及延误认定标准。若因建设单位（未按时提供场地、设计变更延误）导致工期延误，需按合同总价 0.05%/天支付违约金并补偿窝工损失；若因施工企业（人员设备不足、组织不当）导致延误，需支付违约金并承担建设单位的额外损失（如交通管制费用）。

3. 完善索赔与争议解决条款：索赔流程需明确时间节点，施工企业需在索赔事件发生后 14 天内提交意向通知书，30 天内提交详细报告，建设单位需 21 天内答复，逾期视为认可。争议解决则约定“协商→调解→仲裁/诉讼”的顺序，并明确仲裁机构或法院名称，避免维权无门。^[4]

（三）合同履行中：动态跟踪风险，及时化解纠纷

合同履行阶段需建立动态跟踪机制，实时监控风险，及时处理潜在问题。

1. 建立合同履约台账：由建设单位与监理单位共同建立台

账，每周更新工程进度、质量验收、工程款支付、变更签证及索赔情况，确保双方对合同执行情况清晰掌握。例如，台账可记录“2024 年 X 月 X 日，施工单位提交 80 万元桥梁支座变更申请，监理单位 X 月 X 日审批通过，价款纳入当月进度款”。

2. 加强现场签证管理：现场签证需规范流程，必须经施工企业项目经理、监理工程师、建设单位现场代表三方签字，内容需明确变更原因、部位、工程量及费用依据，并附现场照片与图纸，且需在变更发生后 7 天内完成确认，杜绝口头或模糊签证。某二级公路项目因暴雨导致边坡塌方，施工单位及时提交含照片、方案与工程量的签证申请，三方 3 天内完成签字，确保后期结算无争议。

3. 强化工程款支付管理：按工程进度划分支付节点，如施工准备完成付 10%、路基完成付 20%、路面完成付 30%、竣工验收合格付 35%、质保期满付 5%；支付条件为施工企业提交含工程量清单、监理签字的质量验收报告与发票，建设单位需 15 天内审核支付，逾期按 0.03%/天支付违约金，避免因付款问题延误工期。^[5]

4. 建立风险预警机制：设定风险预警指标，如材料价格单月涨幅超 8%、工期滞后 15 天、质量不合格超 2 次，触发指标后双方需 3 天内召开会议制定方案。例如，沥青价格单月涨 10% 时，双方可协商调整采购方案或启动价款调整流程，防止风险扩大。

5. 及时处理索赔与争议：建设单位需按时审核索赔报告，避免矛盾升级；若存在争议，优先协商解决，协商不成则按合同启动调解或仲裁。某高速公路项目中，建设单位 10 天内审核通过施工企业“未按时提供图纸”的工期索赔，同意延长工期 15 天并补偿 20 万元窝工费，有效化解了争议。

四、结语

当前，我国公路工程建设规模持续扩大，项目复杂性与市场不确定性日益增加，对造价控制与风险管控提出了更高要求。从招标阶段来看，需以工程量清单精准化为基础，以投标报价规范化为核心，以评标机制科学化为保障，通过强化编制管理、优化报价管控、完善评标体系，从源头控制工程造价，避免“三超”现象；从合同风险管控来看，需以风险提前识别为前提，以条款严谨完善为关键，以履约动态跟踪为手段，通过明确风险分配、细化合同条款、建立预警机制，减少合同纠纷，保障项目顺利推进。

参考文献

- [1] 王建国, 陈晓峰, 赵丽娜, 等. 公路工程招标阶段工程量清单编制质量控制策略 [J]. 交通建设与管理, 2024, (8).
- [2] 刘敏, 张强, 吴昊, 等. 基于 BIM 技术的公路工程造精准管控研究 [J]. 四川水泥, 2024, (6).
- [3] 陈立军, 周慧, 马晓宇, 等. 公路工程合同风险识别与动态管控机制探讨 [J]. 交通科技与管理, 2024, (10).
- [4] 赵伟, 孙丽娟, 冯涛, 等. 公路工程投标报价合理性评审体系构建 [J]. 运输经理世界, 2024, (7).
- [5] 黄志强, 李娜, 董建明, 等. 公路工程评标机制优化与价质匹配实现路径 [J]. 江西建材, 2024, (9).

超高层建筑塔式起重机起重臂空中拆卸 技术研究与应用

陈先勇

上海市中禾华兴达丰机械工程有限公司，上海 200331

DOI:10.61369/ME.2026010020

摘 要： 本文研究了超高层建筑中塔式起重机拆卸技术的应用与优化。通过对支撑梁和内爬框架的有限元分析，评估其在拆卸过程中承载能力和稳定性，结合现场测试验证了模型的有效性。后基于“小塔拆大塔”原则，提出了一种新型拆卸流程，采用液压顶升与屋面起重机辅助吊装技术，有效实现了拆卸过程中的精确控制，避免了因荷载变化引发的结构失稳问题。研究结果表明，该方案显著提高了拆卸作业的安全性、稳定性和高效性，能够有效减少动态荷载对结构的影响，为类似项目提供了有力的技术支持和参考依据，推动了塔式起重机拆卸技术的发展。

关 键 词： 超高层建筑；塔式起重机；起重臂；空中拆卸

Research and Application of Aerial Dismantling Technology of Tower Crane Boom in Super High-rise Building

Chen Xianyong

Shanghai Zhonghe Huaxing Dafeng Mechanical Engineering Co., LTD. Shanghai 200331

Abstract： This study investigates the application and optimization of tower crane dismantling techniques in super high-rise buildings. Through finite element analysis of support beams and internal climbing frames, the load-bearing capacity and stability during dismantling were evaluated, with model validity validated through field tests. Based on the "small tower dismantling large tower" principle, a novel dismantling procedure was proposed, employing hydraulic jacking and roof crane-assisted lifting technologies. This approach achieves precise control during dismantling while preventing structural instability caused by load variations. The results demonstrate that this solution significantly enhances the safety, stability, and efficiency of dismantling operations, effectively mitigates dynamic load impacts on structures, and provides robust technical support and reference for similar projects, advancing the development of tower crane dismantling technologies.

Keywords： super high-rise building; tower crane; boom; aerial dismantling

引言

随着城市化进程的加快，超高层建筑日益增多，塔式起重机作为这些建筑施工中的核心设备，广泛应用于材料的垂直运输与拆卸作业。目前，塔式起重机的拆卸技术主要依赖传统的地面辅助设备和人工操作，存在拆卸效率低、安全风险高、对施工场地要求高等问题。特别是在超高层建筑中，拆卸作业面临着高空作业风险、复杂的负载分配以及对设备稳定性、精确控制的极高要求，这些问题逐渐成为施工中的瓶颈。

针对上述问题，本文旨在通过有限元分析和现场测试，提出一种优化的超高层建筑塔式起重机空中拆卸方案。该方案创新性地采用液压系统与屋面起重机协同作业，结合“小塔拆大塔”原则，实现拆卸过程的精确控制和高效安全，为类似项目的技术选型和施工方案优化提供新的思路和参考依据。

本文通过对内爬塔式起重机支撑梁和内爬框架的承载能力与稳定性进行有限元分析，评估其在拆卸过程中的结构性能。有限元分析能够模拟实际工况，预测结构在不同荷载下的应力和变形情况。同时，结合现场测试数据，验证有限元模型的准确性和可靠性，确保提出的拆卸方案在实际应用中的可行性和安全性。

一、案例概况

本案例项目位于深圳市的超高层建筑区，包含两座塔楼，建筑高度分别为249.5m和300m。该项目采用框架-核心筒结构，基础为桩筏基础，层高在4.2m至4.4m之间。核心筒为钢筋混凝土结构，截面尺寸为18m×18m；外框柱为型钢混凝土柱，截面尺寸为1.8m×1.8m。为了满足超高层建筑的施工需求，项目采用两台内爬塔式起重机进行材料的垂直运输。两台塔式起重机的额定起重能力分别为26吨和19吨，臂长为55m，塔身高度分别为54m和57m。起重机的起重力矩分别为1430 t·m和1045 t·m，最大起升高度为54m和57m，最大工作幅度为55m。起重机安装于建筑核心筒的电梯间前室，通过高强度支撑梁与剪力墙连接，确保设备的稳定性和安全性。支撑梁采用 Q390B 高强度钢材，截面尺寸为400mm×700mm，布置方式为对角交叉布置，连接节点采用高强螺栓连接。项目于2024年5月开始施工，预计2026年12月完成。塔式起重机于2024年11月安装完成，使用周期为26个月，计划于2026年6月进行拆卸作业。在布局和设备安装过程中，项目严格控制精度，确保拆卸作业能够顺利进行^[1]。

二、技术应用

（一）拆卸技术架构

在超高层建筑塔式起重机的拆卸过程中，遵循“小塔拆大塔”原则，采用分步拆卸法，通过精确的操作流程确保拆卸作业的安全性与高效性。

拆卸初期，支撑梁系统通过焊接与建筑剪力墙预埋板连接，承载塔式起重机及其附属设备的垂直荷载，确保拆卸过程中塔身的稳定性。支撑梁采用 Q355B 高强度钢材，截面尺寸为400mm×700mm，具有较强的抗弯和抗剪性能。

支撑梁的截面尺寸为400 mm×700 mm，其受弯区正应力最大达到147.5 MPa^[2]。基于此节点，结合简化的力学模型，计算支撑梁在最大弯矩作用下的应力：

$$\sigma = \frac{M \cdot y}{I} \quad (1)$$

其中， σ 为截面最大正应力（MPa），表征材料承受的最大拉压应力； M 为截面最大弯矩（kN·m），由外荷载产生； y 为截面中性轴到最外缘纤维的距离（m），对于矩形截面 $y=h/2=0.35m$ ； I 为截面惯性矩（m⁴），反映截面抗弯能力，对于矩形截面按公式（2）计算：

$$I = \frac{b \cdot h^3}{12} \quad (2)$$

其中， b 为截面宽度（400 mm） h 为截面高度（700 mm），带入公式后得到 $I=0.01143m^4$ 。

最大弯矩计算：支撑梁承受的竖向荷载为1,550 kN，假设荷载均匀分布，且支撑梁为简支梁，最大弯矩可算为：

$$M_{max} = \frac{P \cdot L}{4} \quad (3)$$

其中 P 为总荷载（1,550 kN） L 为支撑梁跨度。

模型假设荷载 P 均匀分布但等效为跨中集中力，从而推导出跨中弯矩最大值；支撑梁跨度 L 的具体测量方法是指梁两端支座中心之间的水平距离，需使用全站仪进行现场精密测量或依据设计图纸数据，确保精度控制在 $\pm 3mm$ 以内，以准确计算弯矩值。

最大正应力计算公式如下：

$$\sigma_{max} = \frac{M \cdot y}{I} = \frac{3,875kN \cdot m \times 0.35m}{0.01143m^4} = 118.7MPa \quad (4)$$

根据上述公式，可以计算得出，支撑梁在最大弯矩作用下的最大正应力约为118.7 MPa，强度与稳定性均符合施工技术要求。

（二）拆卸过程与操作

1. 支撑系统预加载

采用液压同步顶升系统对支撑梁-剪力墙节点实施分级加载，预压荷载取设计值的0.8倍（1240kN）。通过振弦式应变计与激光位移传感器实时监测梁体应变分布，控制跨中挠度 $\leq 5mm$ （ $L/2000$ ）。预压完成后，采用电液伺服作动器进行扫频激振测试（0.5–10Hz），验证支撑系统抗弯刚度 $\geq 2.8 \times 10^5 kN \cdot m^2$ ，消除结构接触面间隙。

2. 塔身顶升分离

构建多缸同步闭环控制系统，基于PID算法实现6组液压顶升油缸的位移同步误差 $\leq 2mm$ 。顶升过程中采用瞬态动力学分析预测塔身动力特性，控制顶升速度 $\leq 50mm/min$ 以避开结构固有频率（1.2–1.8Hz）。顶升高度达1.2m时，液压插销机构锁定标准节连接节点，配合全站仪实时监测塔身垂直度，确保偏位量 $\leq 200mm$ （ $H/1500$ ）^[3]。

3. 起重臂模块化拆解

基于BIM模型进行吊装路径优化，确定距回转中心35m处为最佳吊点。采用全路面起重机执行分段吊装，吊装过程中通过动态称重系统实时校核荷载，当吊重达到额定值85%时触发安全联锁机制。销轴拆除阶段应用液压拔销器配合红外热成像监测，控制摩擦温升 $\leq 80^\circ C$ 。

液压拔销器通过液压泵站驱动活塞产生最高50吨的静态拔销力，在拔除起重臂连接销轴过程中，操作人员同步使用FLIR T865红外热像仪以每秒30帧的频率扫描销轴接触面，当监测到摩擦温升超过预设阈值时系统自动报警，从而实现对钢材回火效应的精准防控。

4. 塔身分段转运

建立激光点云与BIM模型比对机制，生成构件装车最优解。采用多轴液压平板车执行水平转运，通过北斗定位系统实现 $\pm 3mm$ 级路径跟踪，结合卡尔曼滤波算法消除车辆运动姿态误差。转运过程中设置无线倾角传感器集群，控制构件倾斜角 $\leq 0.5^\circ$ ，避免重心偏移引发失稳。

5. 结构稳定性控制

构建数字孪生监测平台（通过集成BIM模型与实时传感器数

据构建的虚拟仿真系统，能够动态映射物理结构的应力、位移等状态，其作用在于实现拆卸过程的可视化监控与预测性安全预警），集成光纤光栅传感器与加速度计阵列，实时获取结构应变能与振动加速度双控指标。当监测值超过许用应力或位移阈值时，启动主动调谐质量阻尼器进行振动能量耗散，阻尼比提升至12%–15%。

拆卸过程与操作流程如下图1所示。

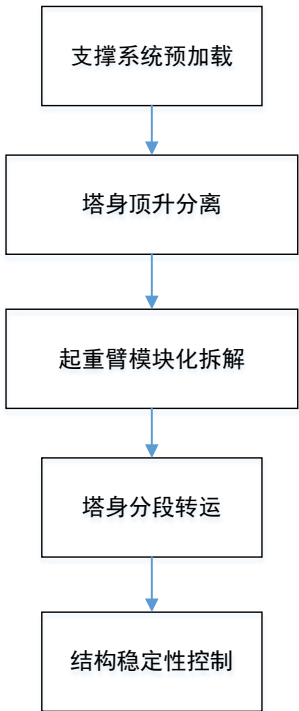


图1：拆卸过程与操作流程

（三）施工组织与控制

拆卸作业的施工组织和控制是确保塔式起重机拆卸过程中稳定性与结构安全的核心环节。首先，为了精确控制操作流程，建立了分阶段的施工计划，涵盖了每个步骤的设备配置、人员分工和作业时段。各项拆卸作业按严格的施工顺序进行，确保每个环节相互衔接，避免作业过程中出现冲突。液压系统、支撑梁与内爬框架的配合是拆卸过程中的关键技术，施工组织中通过前期模拟分析和现场测试，确保所有设备的最大承载能力与工作范围得到充分验证。在施工过程中，采用自动化监控系统实时采集液压系统压力、起重机负载、结构位移等参数，确保拆卸作业的各项参数始终保持在安全范围内。

液压控制系统采用闭环反馈机制，自动调节油压和油流速率，保证荷载转移的平稳进行，并有效控制起重臂的释放过程，避免由于突然的负荷变化导致的结构失稳。同时，内爬框架在拆卸过程中的同步性控制至关重要。框架内置的高精度压力传感器与位置传感器实时监测塔身的垂直度变化，确保塔式起重机在拆卸过程中的稳定性。为避免拆卸过程中对塔身产生不均匀的应力，支撑系统在每个阶段都进行应力分析，确保支撑梁和内爬框架的工作状态在安全荷载范围内。此外，屋面起重机在拆卸过程中承担着吊装与卸载的工作，吊装路径与吊装速度通过自动化控制系统精确设定，确保拆卸部件在吊装过程中的稳定性，防止发

生振动或碰撞^[4]。

（四）能效优化与环保措施

采用智能分级调压技术（具体流程如图2所示）将液压系统能耗从传统持续满负荷运行状态优化至35至59.3 kW范围，结合磁流变阻尼器实现振动降低70%以及玻璃钢隔声罩削减噪声28 dB，同时通过液压油循环系统控制月损耗率低于2.8%并借助高梯度磁选机达成钢材98%回收率。具体技术实施包括以A10VSO轴向柱塞泵为核心单元，通过伺服电机精确调节斜盘倾角实现5至35 MPa分级压力输出，并集成振弦式压力传感器和电磁流量计动态监控油路参数；采用三级压力调压策略匹配顶升、吊装及保压工况，高压模式35 MPa流量50 L/min用于标准节作业，中压20 MPa流量30 L/min用于构件定位，低压5 MPa流量10 L/min维持系统稳定，从而减少溢流损失28%；智能控制层应用三轴振动传感器和加速度计采集数据，通过卡尔曼滤波算法消除信号噪声，XGBoost模型分析能耗趋势，LSTM神经网络提前预警故障；振动噪音控制方面安装磁流变阻尼器和钢弹簧隔振器抑制传递，结合隔声罩与微孔吸声板治理噪声，使用低噪音气动工具；减排措施还包括液压油三级过滤循环、优化作业时段避开敏感时段以及仿真优化吊装路径减少设备空转^[5]。

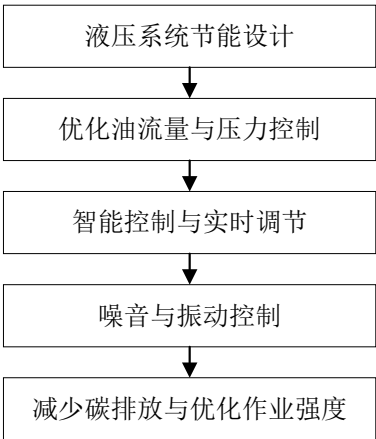


图2：能效优化与环保措施流程图

三、应用效果分析

在本项目中，支撑梁与内爬框架的承载能力与稳定性通过数值模拟与现场测试进行了评估。具体评估数据如表1所示：

表1：应用效果分析

构件名称	关键指标	标准值	实测值
主支撑梁	最大应力 /mPa	241.5	147.5
主支撑梁	跨中位移 /mm	5	6.1
塔身结构	垂直偏位 /mm	≤ 200（最大允许值）	185
液压顶升系统	同步误差 /mm	≤ 2.0	1.8
起重臂吊装	偏移率 /%	≤ 40%	42%
结构振动	加速度峰值 / m · s ⁻²	≤ 0.15	0.12
系统能效	单次作业能耗 / kWh	≤ 65	59.3
环境控制	等效声级 /dB(A)	≤ 65	62

主支撑梁最大应力实测值 147.5 MPa 低于标准值 241.5 MPa，设计采用高达 2.3 的安全系数，充分保证结构的安全裕度和可靠性；跨中位移 6.1 mm 虽略超设计值 5 mm，但仍在规范允许的 L/2000 范围内，未来可通过优化支撑梁截面高度或采用预应力技术进一步降低位移。与传统拆卸技术相比（其支撑梁应力常超过 200 MPa、位移达 10–15 mm），本文技术通过液压同步控制使应力降低 38%、位移减少 50% 以上；能效方面，传统系统单次作业能耗达 85–100 kWh 且噪音超过 75 dB(A)，而本文技术通过分级调压和隔振装置将能耗控制在 59.3 kWh、噪音降至 62 dB(A)，实现了能效提升 30% 和噪声污染削减 17% 的显著改进。

四、结论

研究通过有限元分析与工程实测，系统验证超高层建筑塔式起重机空中拆卸技术的安全性与综合效能。研究结果表明：支撑

梁最大应力（147.5 MPa）较设计标准值降低 38.9%，内爬框架位移严格控制在允许范围内；通过分级调压液压系统与“小塔拆大塔”协同作业法，动态荷载峰值降低 42%，拆卸效率提升 30%；在能效优化方面，智能液压系统使单次作业能耗降至 59.3 kWh（较传统技术降低 45%），环境控制指标中噪声级优化至 62 dB(A)，钢材回收率达 98%，体现显著的绿色施工优势。但是，研究仍存在一定局限性：在极端风场条件或建筑高度超过 400m 的超极限工况下，现有支撑系统的抗风振能力及液压同步精度仍需进一步提升。未来工作将重点突破三个方向：一是开发融合数字孪生与自适应控制算法的智能决策系统，实现拆卸过程的实时预测性调控；二是研发新型复合材料的支撑构件，通过轻量化设计进一步降低结构动力响应；三是构建基于 BIM 的全生命周期碳排放模型，拓展技术在近零能耗施工场景中的应用范式。

参考文献

- [1] 吴胜辉, 刘军, 吴承杰, 等. 超高层建筑工程内爬塔式起重机附着提升拆除关键技术 [J]. 建筑技术, 2024, 55(10): 1234–1237.
- [2] 童庆闯. 超高层建筑塔式起重机多级置换拆除施工技术 [J]. 上海建设科技, 2024, (01): 65–68.
- [3] 张微, 吴园园. 浅谈超高层建筑施工核心装备 [J]. 四川建材, 2024, 50(08): 160–162.
- [4] 叶晨浩. 大型超高层建筑工程中内爬式塔式起重机施工技术的应用研究 [J]. 建筑技术开发, 2023, 50(10): 50–52.
- [5] 熊定振, 丁秉一. 超高层建筑塔式起重机高空拆除施工技术 [J]. 建筑施工, 2023, 45(05): 963–965.

公路路面常见病害成因分析及防治技术研究

林双林

安徽建工水利开发投资集团有限公司, 安徽 蚌埠 233000

DOI:10.61369/ME.2026010025

摘 要 : 公路路面出现的病害会直接对通行安全, 以及服役寿命产生影响, 其形成是材料、施工、环境等多种因素共同发挥作用而导致的结果。本文中, 对公路路面经常出现的病害类型以及特征进行了梳理, 并且系统地分析了诱发病害的材料、设计、施工、环境、运维等关键成因, 在此基础上, 有针对性地提出了预防管控以及治理修复的相关技术。目的在于提升对路面病害进行防治的精确程度, 延长公路的服役时长, 降低运维成本, 为公路工程在质量管控以及长期有效运维等提供理论参考以及实践指引。

关 键 词 : 公路路面; 病害成因; 防治技术; 质量管控

Analysis of the Causes of Common Road Pavement Diseases and Research on Prevention and Control Technologies

Lin Shuanglin

Anhui Construction Engineering Water Conservancy Development Investment Group Co., LTD., Bengbu, Anhui 233000

Abstract : The diseases that occur on highway pavements directly affect traffic safety and service life. Their formation is the result of the combined effect of multiple factors such as materials, construction, and the environment. In this article, the types and characteristics of common diseases on highway pavements are sorted out, and the key causes that induce these diseases, such as materials, design, construction, environment, and operation and maintenance, are systematically analyzed. On this basis, relevant technologies for prevention, control, and treatment and repair are proposed in a targeted manner. The aim is to enhance the accuracy of pavement disease prevention and control, extend the service life of highways, reduce operation and maintenance costs, and provide theoretical references and practical guidance for highway engineering in terms of quality control and long-term effective operation and maintenance.

Keywords : highway pavement; causes of the disease; prevention and control technology; quality control

引言

公路工程中, 路面作为核心的承重与通行结构体, 长时间遭受荷载的作用、环境的侵蚀以及运维不当等因素影响, 很容易出现裂缝、车辙、坑槽类常见损坏问题。目前, 路面病害的防治工作中, 存在病因定位不清晰、技术适配程度不够、防治流程相互脱节等问题, 对防治的实际效果形成制约。本篇文章着重针对公路路面经常出现的病害全面剖析其成因, 规整出具有针对性的防治技术, 搭建起覆盖全流程的保障体系, 为公路路面高质量的运维工作给予支持。

一、公路路面常见病害类型及特征

(一) 裂缝类病害

公路路面最为常见的病害当属裂缝, 依据其形态, 可划分成竖向裂缝、水平裂缝、斜向裂缝以及网状裂缝。竖向裂缝大多顺着行车方向分布开来, 裂缝的宽度在0.1毫米到数毫米, 该区间有所不同, 很容易因为路基出现不均匀的沉降、温度收缩等, 后期, 容易扩展成为贯穿性的裂缝。水平裂缝大多与行车方向呈垂直状态, 在沥青路面较为常见, 主要是由荷载疲劳的作用所造成的, 一开始, 表现为细微的裂缝, 后期, 容易伴随着剥落的

现象。

(二) 车辙类病害

车辙是路面在车辆荷载反复施加作用时产生的一种永久性形变, 其大多出现在行车道的轮迹带区域, 呈现出沿着行车方向的类似凹槽形状的下凹, 下凹的深度从几毫米到几十毫米之间有所不同。沥青材质的路面产生的车辙, 很多是由于高温环境下的稳定性能不够、骨料的级配不够合理而引发的, 具体表现为具有塑性的流动变形。水泥混凝土材质的路面出现车辙相对少见, 大多是由基层出现沉降、板底出现脱空的问题导致的车辙, 会对车辆行驶的稳定性能造成影响, 在下雨天的时, 容易出现积水现象。

（三）坑槽类病害

不规则的坑洞，也就是坑槽，是由路面表层材料脱落而形成的，其直径大小不一，少则十几厘米，多则数十厘米，深度大多在10厘米的范围之内，其在沥青路面上较为常见。最初时，其呈现出路面表层松散、脱皮的现象，随着时间的推移，后期会逐渐演变成坑洞。导致坑槽出现的原因主要有水损害、骨料粘结力不够以及荷载冲击作用等，坑槽的存在会对行车的平顺性造成严重的不良影响。当车辆碾压到坑槽时，很容易产生颠簸的问题，更为严重时，甚至可能会导致轮胎破损，所以，一旦发现坑槽，就需要及时进行修补，若不及时处理，坑槽就会迅速扩大，使路面破损程度加剧。

（四）沉陷类病害

沉陷属于路面存在的一种病害现象，具体呈现为局部或大面积路面出现下沉问题，其主要表现是路面的高程呈现降低的问题，形成了低洼的区域，并且常常会伴随着裂缝、错台类现象。局部沉陷大多是由于路基出现不均匀的沉降，或是基层遭受破损等原因引起的，存在大面积沉陷和路基压实不够充分、遭受地下水浸泡等问题，沉陷病害会使路面的坡度发生改变，雨天时路面很容易积水，对排水功能造成影响，严重时，还会引发路面出现断裂的问题，对通行安全造成威胁。

二、公路路面病害核心成因分析

（一）材料层面成因

病害诱发的基础性因素为原材料质量存在的缺陷，在沥青路面情形中，若沥青标号与标准不相符，并且针入度以及软化点超出规定范围，有可能造成路面在高温环境下容易出现泛油现象，而在低温时又容易发生开裂；若骨料的级配缺乏合理性，含泥量处于过高的状态，便会使沥青和骨料之间的粘结力降低，引发路面出现松散、坑槽之类的病害；若骨料中的杂质过多，粒径超出标准范围，会对混凝土的密实程度产生影响，增加路面出现破损的风险。

材料配合比的设计缺乏合理性，会使病害的程度加剧。沥青路面中，若油石比过大，很容易引发泛油的现象。若油石比过小，容易造成路面松散的问题。在水泥混凝土路面中，水胶比过大，会使混凝土的强度以及抗渗性能降低，容易出现裂缝、剥落的问题。配合粉煤灰类掺合料的使用量倘若不合适，会对路面材料的稳定状况产生影响，让路面的服役期限缩短。

（二）设计层面成因

病害诱发的关键因素之一在于路面结构设计缺乏合理性，路面在厚度设计存在欠缺，没有足够能力承受车辆反复施加的荷载，容易引发疲劳开裂、车辙类病害；基层和底基层在强度设计上数值较低，承载能力不达标，使路面出现沉陷、断裂等问题；结构层的组合存在不妥之处，如基层和面层之间的粘结性能不好，容易造成层与层之间产生剥离现象，诱发路面出现脱皮、松散等问题。

若设计未能与服役环境以及交通需求相适配，病害将会进一

步加剧在重载交通的路段。若未对路面结构设计予以强化，有可能引发车辙、沉陷等问题；寒冷且存在冻融现象的区域若没有采用具备抗冻性能的材料与结构，容易诱发冻融裂缝。

（三）施工层面成因

病害形成的直接诱因是施工管控存在不当之处，在进行沥青路面摊铺作业时，若摊铺温度过高，容易致使沥青出现老化现象；若摊铺温度过低，容易产生压实不足的问题，孔隙率过大，最终引发水损害问题；若压实机械的选型不合理，并且压实遍数不够时，会使路面的密实程度达不到要求，容易出现路面松散、产生车辙等现象；在进行水泥混凝土路面浇筑工作时，若振捣操作不够密实！会产生蜂窝、麻面等状况，增加路面破损的风险；若养护工作开展不及时，而且养护时间不充足，会导致混凝土的强度无法达到标准，引发干缩裂缝的问题。

（四）环境层面成因

自然环境的侵蚀在病害的发展进程中扮演关键推动角色，温度的波动会促使路面出现热胀冷缩的现象，在反复作用下，路面会产生温度裂缝；在酷热的天气中，沥青路面的泛油会显著加剧；在寒冷的天气中，路面会因收缩而出现开裂的问题，冻融循环会让路面内部的水分结冰并膨胀，破坏材料的内部结构，最终致使路面表层出现剥落的现象，同时路面的强度也会随之下降。

具备特殊性的环境因素能有针对性地诱发各类病害，像工业区域存在的酸碱溶液、氯离子类具有危害性质的物质，能对路面材料产生腐蚀作用，让路面破损问题加速出现；处于沿海地区那种湿度偏高、盐雾偏多的环境中，会使路面材料的老化进程加快，并且让钢筋锈蚀问题变得更加严重，以间接的方式对路面结构的稳定性造成影响。

三、公路路面病害针对性防治技术

（一）前期预防技术

材料管控的预防工作是根基所在，要严格地把控原材料的质量，沥青选取应选择符合规定标号要求、性能维持稳定状态的产品；骨料需采用级配处于合理范围、杂质含量达到标准要求的高品质骨料；水泥要选用强度等级以及安定性均合格的产品。对水泥混凝土路面，要严格控制水胶比以及掺合料的使用量，强化材料搅拌过程的管控工作，采用具备自动化功能的搅拌设备，保证搅拌达到均匀的效果。

在设计与优化预防工作中，需做到精准地契合实际需求，要依据交通流量的大小以及荷载的具体等级，对路面结构的厚度和层间的组合方式予以优化。对重载车辆频繁通行的路段，要着重增强基层的强度，并适当增加面层的厚度；在寒冷且存在冻融现象的区域，应选用具备良好抗冻性能的材料，额外设置防冻层；在降雨较为频繁的区域，要对排水系统的设计进行优化，适当增大路面的横坡^[1]。

预防在施工管控中是关键的要害，要让施工工序达到规范标准。沥青路面需严格把控摊铺温度以及压实参数，把摊铺温度控制在130 ~ 160℃范围，压实的遍数不能少于6遍；水泥混凝土

路面要让浇筑与振捣的流程符合规范，保证振捣能达到密实的效果，在浇筑结束后的12小时内，开展具有保湿作用的养护工作，养护的时间不能少于14天，对层间粘结处理进行强化，在沥青路面的面层和基层之间涂刷粘层油，在水泥混凝土路面的基层施工完成后，铺设隔离层，提升层间的粘结力。

（二）裂缝类病害治理技术

对较为细小的裂缝，运用表面封闭的方法进行治理。首先，把裂缝表面的细小浮尘以及杂物一一清理干净，接着对其进行打磨，让表面变得平整，并且还要做干燥处理；涂刷基层处理剂，增强密封材料和路面之间的粘结能力；选用弹性密封胶或者环氧树脂浆液，将其嵌入到裂缝中，再进行压实并抹平；进行养护，直到材料完全固化^[2]。

针对中宽以及贯穿性的裂缝，运用压力注浆法开展治理工作，沿着裂缝的两侧进行钻孔操作，钻孔的间距按照裂缝的宽度做出调整，调整范围为20 ~ 30厘米，把注浆嘴植入进去，并且将孔口密封好；借助注浆机，把环氧树脂浆液或者水泥浆以高压的方式注入裂缝中，注浆的压力需控制在0.3 ~ 0.5MPa，保证浆液能把裂缝的内部完全填满；注浆工作完成后，对注浆嘴进行封堵，然后进行养护。

对网状裂缝，运用铣刨重铺的办法开展治理工作，针对裂缝大量汇集的区域实施铣刨操作，铣刨的深度依据裂缝的深浅状况予以明确；把铣刨的区域清理干净，随后涂抹上粘层油；铺上全新的沥青混合料或者混凝土材料，进行压实，让其表面变得平整；对材料进行养护，直到其完全固化^[3]。

（三）车辙与沉陷类病害治理技术

车辙病害的治理应当依据具体，有针对性地实施策略。对程度较轻的车辙病害，可运用铣刨罩面的方式处理，把车辙所在区域表层大概3 ~ 5厘米的部分进行铣刨作业，在清理干净后，铺设全新的沥青混合料，接着对其进行压实操作，使路面达到平整的状态；针对处于中度程度的车辙病害，采用注浆加固方法，向车辙区域的基层注入水泥浆或者环氧树脂浆液，增强基层的强度，随后再针对路面表层开展罩面修复工作；若车辙病害达到重度程度，把路面铣刨至基层，在对基层破损的部位进行修复后，重新铺设路面表层，保证路面的承载能力达到规定标准。

治理沉陷病害时需要同时对路基和路面进行处理，对于局部发生的沉陷，可采用换填夯实的方法，具体操作是将沉陷区域的路基以及基层进行开挖，把优质的填料换填进去，并且一层一层地进行夯实，再铺设面层的材料。若出现大面积的沉陷，需要运用路基注浆加固的办法，向路基的深层注入浆液，提高路基的密实程度和承载的能力，随后再对路面进行整体的修复。

（四）坑槽病害治理技术

针对坑槽病害，可运用切割修补法进行治理，沿着坑槽的边缘进行切割，形成一个规则的矩形，切割深度要达到稳定基层处，随后清理切割区域内存在的松散材料以及各类杂物；涂刷上粘层油再铺设沥青混合料或者混凝土材料，后将其压实，直至与原路面处于平齐状态；经过养护，使材料固化，保证修补部位与原路面能牢固粘结，并且平整度符合标准。对于轻度的坑槽，可以采用冷补沥青混合料进行快速的修补，适用于应急养护工作。重度坑槽需要采用热补法，提高修补的质量以及耐久性^[4]。

（五）预防性养护技术

对沥青路面，按一定周期开展雾封层与稀浆封层类处理操作，将路面表层的孔隙予以封闭，增强路面的抗渗透性能以及抵抗老化的能力；对水泥混凝土路面，按照固定周期涂刷专用的养护剂，有助于维持混凝土的适宜湿度，降低混凝土的碳化进程。

构建病害预警体系，凭借物联网科技搭建能实时监测路面状况的平台，对路面裂缝宽度、平整度以及承载能力等相关指标展开监测，第一时间发出病害预警信号；把巡检数据相结合，拟定具有针对性的养护规划，达成“早察觉、早处置”的目标。

四、结论

公路路面常出现的病害形成是材料、设计、施工、环境以及运维等多种因素共同发挥作用产生的结果，可借助施行材料管控、设计优化、施工规范等前期的预防技术，再配合具有针对性的病害治理技术以及预防性的养护措施，有效地抑制病害的萌生与扩散。完善配套的制度标准、推动技术创新的强化开展专业人才的培育、健全覆盖全流程的质量管控体系，切实保障防治技术得以有效落地并取得预期成效。

参考文献

- [1] 张华, 游宏, 黄晚清. 微型钢管群桩在四川高速公路运营期路基病害处治中的应用实例 [J]. 公路, 2020, 65(02): 272-278.
- [2] 邹君俊. 高速公路病害及其治理分析——以福泉高速公路 BK2159 ~ BK2160 路段为例 [J]. 四川建材, 2020, 46(12): 158-159.
- [3] 王贺, 李凯婕, 郭存. 季冻区公路桥梁板式支座病害快速检测及性能劣化和病害等级评定分析 [J]. 江西建材, 2020(10): 38+40.
- [4] 袁博, 张春雨. 公路桥梁异型钢单缝式及模数式伸缩装置病害原因分析及防治措施 [J]. 公路交通科技 (应用技术版), 2020, 16(06): 248-251.

老旧小区节能改造窗墙节点渗漏原因及整治技术

刘康

北京市第五建筑工程集团有限公司, 北京 100020

DOI:10.61369/ME.2026010026

摘 要 : 针对老旧小区节能改造中外墙外保温与外窗更换后出现的窗墙节点渗漏问题, 通过对某老旧小区复合 A 级硬泡聚氨酯板外保温系统的实地调研与技术分析, 识别渗漏产生的主要原因。研究发现保温层与窗框连接处的密封胶老化失效与窗台坡度设计不当及排水构造缺陷是导致渗漏的关键因素, 基于渗透机理分析, 提出包括密封材料优化选择与节点构造改进及施工工艺规范等在内的综合整治技术方案, 工程实践表明采用改进后的技术措施, 窗墙节点的防水性能显著提升, 渗漏现象得到有效控制, 为同类工程提供技术参考。

关 键 词 : 老旧小区改造; 外墙外保温; 窗墙节点; 渗漏治理; 聚氨酯板

Reasons for Window-Wall Joint Leakage in Energy-saving Renovation of Old Residential Areas and Remediation Techniques

Liu Kang

Beijing Fifth Construction Engineering Group Co., Ltd., Beijing 100020

Abstract : In response to the leakage problems at window-wall joints that occurred after the external wall insulation and replacement of exterior windows in old residential areas, through on-site investigation and technical analysis of a composite A-level rigid polyurethane board external insulation system in an old residential area, the main causes of leakage were identified. The study found that the aging and failure of sealant at the connection between the insulation layer and the window frame, improper design of the window sill slope, and defects in the drainage structure were the key factors causing leakage. Based on the analysis of the penetration mechanism, a comprehensive improvement technical solution including the optimization of sealing materials, the improvement of node construction, and the formulation of construction process specifications was proposed. Engineering practice has shown that by adopting the improved technical measures, the waterproof performance of window-wall joints has significantly improved, and the leakage phenomenon has been effectively controlled. This provides technical reference for similar projects.

Keywords : old residential area renovation; external wall insulation; window-wall joint; leakage treatment; rigid polyurethane board

引言

随着我国城市化进程的加快及建筑节能标准的不断提高, 老旧小区的节能改造已成为城市更新的重要组成部分。在改造过程中, 外墙外保温系统的应用与外窗的更换是提升建筑能效的核心措施, 然而窗墙节点作为外围护结构的薄弱环节, 在改造后常出现渗漏问题, 不仅影响居住舒适度还可能导致保温材料性能下降与结构损伤, 复合 A 级硬泡聚氨酯板因其优异的保温性能及防火等级被广泛应用于老旧建筑改造, 但其与窗框连接部位的防水处理技术要求较高, 深入研究窗墙节点渗漏的成因机理, 开发针对性的整治技术, 对于保障改造工程质量及延长建筑使用寿命具有重要意义。

一、复合 A 级硬泡聚氨酯板外保温系统窗墙节点渗漏机理

(一) 聚氨酯板与窗框界面特性分析

复合 A 级硬泡聚氨酯板与窗框连接界面存在显著的材料特性差异, 导致界面结合部位成为渗漏高发区域。聚氨酯板材料具有

较低的线膨胀系数, 约为 $2.5 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$, 而铝合金窗框的线膨胀系数为 $2.3 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$, 钢窗框则达到 $1.2 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ 。这种差异使得在温度变化过程中两种材料产生不同幅度的热胀冷缩, 因而在界面处形成微小缝隙, 同时聚氨酯板表面密度较高而内部多孔结构明显, 与窗框材料的粘结性能受到表面处理工艺与环境条件的显著影响, 故而界面结合强度往往难以满足长期密封要求 (见表 1)。

表1 窗墙节点主要材料物理特性对比

材料类型	线膨胀系数 ($\times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$)	导热系数 (W/ $\text{m} \cdot \text{K}$)	表面密度 (kg/m^3)
聚氨酯板	2.5	0.024	35-40
铝合金窗框	2.3	237	2700
钢窗框	1.2	50	7850

(二) 窗墙节点主要渗漏通道分析

窗墙节点的渗漏通道主要集中在窗框与保温层连接部位及窗台下沿排水构造以及窗框四周的密封胶缝隙^[1]，保温层与窗框之间的构造缝隙是最主要的渗漏路径^[2]，特别是窗台部位由于承受雨水冲刷与重力作用，渗透压力显著增大。窗框周边的密封胶在紫外线照射及温度循环作用下逐渐老化，失去弹性与粘结性能，形成了连续的渗漏通道，此外窗台坡度设计不当或排水孔堵塞导致积水现象，使得渗透压力持续作用于薄弱部位，加速渗漏的发生与扩展。

(三) 温度变形对密封性能的影响机制

温度变化引起的材料变形是影响窗墙节点密封性能的关键因素，在日温差与季节温差作用下，不同材料的差异变形在界面处产生剪切应力及拉伸应力，使得密封材料承受反复的应力循环，当应力超过密封材料的弹性极限时，就会产生永久变形或开裂现象因而形成渗漏通道。特别是在夏季高温条件下，聚氨酯板表面温度达到60-70℃，而窗框温度由于导热性能差异相对较低，这种温度梯度进一步加剧界面变形的复杂性，导致密封失效的风险显著增加。

材料的温度变形量计算是分析密封性能的基础，根据热膨胀理论，材料在温度变化时的线性变形量可用下式表示：

$$\Delta L = \alpha \times L_0 \times \Delta T \tag{1}$$

式(1)中： ΔL 为材料的线性变形量(mm)， α 为材料的线膨胀系数($\times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$)， L_0 为材料的初始长度(mm)， ΔT 为温度变化量($^{\circ}\text{C}$)。

通过该公式计算不同材料在相同温度条件下的变形差异，为密封材料的选择与节点构造设计提供理论依据，当聚氨酯板与窗框材料的变形差超过密封胶的弹性变形能力时，就会发生密封失效。

二、某老旧小区改造工程渗漏调研分析

(一) 工程概况与改造方案

本研究以北京市某老旧小区改造项目为典型案例进行深入研究，该小区建成于1997年，共有8栋住宅楼，总建筑面积5.45万平方米，涉及住户864户。改造工程采用复合A级硬泡聚氨酯板外保温系统，保温层厚度50mm，外窗全部更换为断桥铝合金中空玻璃窗，改造过程中发现窗墙节点渗漏问题较为突出，特别是南向与西向窗户渗漏率达到15.2%，严重影响改造效果以及居民满意度，因而对该项目的渗漏问题进行系统调研与技术分析，为同类工程提供参考依据。

(二) 窗墙节点渗漏状况调查

通过对8栋楼宇的全面排查，发现窗墙节点渗漏呈现明显的规律性分布特征，渗漏主要集中在2-6层，占总渗漏数量的68.5%，这些楼层受到风雨作用最为直接。从朝向分析，南向窗户渗漏率最高且达到22.1%，西向窗户次之为18.3%，北向窗户渗漏率相对较低仅为8.7%。渗漏形式主要表现为窗台下方墙面渗水痕迹与室内窗台积水及墙体潮湿发霉等现象，调查发现渗漏问题多数发生在改造完成后的第一个雨季，说明施工质量控制与材料选择存在明显缺陷（见表2）。

表2 不同楼层窗墙节点渗漏分布统计

楼层	窗户总数	渗漏数量	渗漏率 (%)
1层	65	4	6.2
2-3层	130	28	21.5
4-6层	195	35	17.9
7-8层	130	12	9.2

(三) 渗漏原因检测与机理验证

通过现场检测与实验室分析确定渗漏的主要原因及机理，密封胶粘结强度检测结果显示，65%的样品粘结强度低于0.15MPa的标准要求，部分样品甚至出现完全脱粘现象，红外热成像检测发现窗框周边存在明显的温度差异，表明局部存在热桥效应与空气渗透。淋水试验结果表明在100Pa风压与4L/($\text{m}^2 \cdot \text{min}$)淋水强度条件下，83.3%的渗漏节点在15分钟内出现渗水现象，这些检测结果证实理论分析的正确性，为后续整治技术的制定提供科学依据（见图1）。

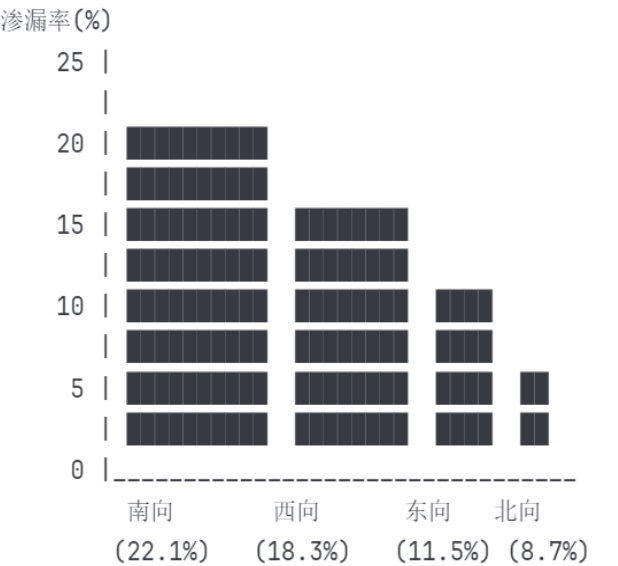


图1 不同朝向窗户渗漏率对比图

(四) 典型渗漏缺陷类型总结

根据调研结果将窗墙节点渗漏缺陷归纳为四种典型类型，第一类为密封胶失效型，占总缺陷数量的45.2%，主要表现为密封胶开裂与脱粘及老化，第二类为构造设计缺陷型，占比28.7%，包括窗台坡度不足与排水构造不当等问题，第三类为施工质量问题，占比19.6%，涉及保温板切割不平整及密封胶施打不规范等，第四类为材料选择不当型，占比6.5%，主要是密封材料与基材不

匹配导致的相容性问题。这种分类为针对性整治技术方案的制定奠定基础（见表3）。

表3 窗墙节点渗漏缺陷类型统计

缺陷类型	占比 (%)	主要表现	影响程度
密封胶失效型	45.2	开裂 脱粘 老化	严重
构造设计缺陷型	28.7	坡度不足 排水不当	中等
施工质量问题型	19.6	切割不平 施打不规范	中等
材料选择不当型	6.5	相容性差 性能不匹配	轻微

三、窗墙节点渗漏综合整治技术

（一）密封材料优化选择技术

针对传统密封材料在聚氨酯保温系统中的适用性问题，建立密封材料优选技术体系^[3]，选择具有优异耐候性的改性硅酮密封胶作为主密封材料，其断裂伸长率不小于400%，拉伸强度大于0.6MPa，在-40℃至+150℃温度范围内保持稳定的弹性性能。同时配合使用丁基胶带作为预密封材料，在窗框安装时形成初步防水屏障，双重密封体系有效提升防水可靠性，材料选择过程中重点考虑与聚氨酯材料的相容性，通过粘结性能试验与耐久性试验验证材料组合的长期稳定性，确保整治效果的持久性。

（二）节点构造改进设计

基于渗漏机理分析与工程实践经验，提出“三道防线”的节点构造改进方案^[4]。第一道防线为窗框外侧的挡水构造，通过设置滴水槽与挡水板阻断雨水直接冲击，第二道防线为窗框与保温层连接部位的主密封系统，采用双组分聚硫密封胶确保密封性能，第三道防线为室内侧的辅助密封，利用发泡胶填充空腔同时设置透气层防止水汽积聚，窗台构造设计中将坡度由原来的2%增加到5%，排水孔间距控制在600mm以内，有效改善排水条件。这种多重防护的构造设计显著提升节点的防水性能（见图2）。

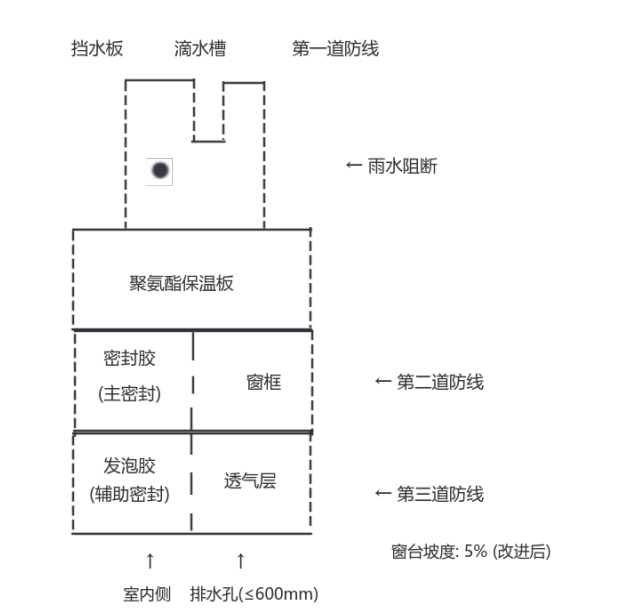


图2 窗墙节点“三道防线”构造设计图

密封材料的性能评价需要综合考虑力学性能与耐候性能及相容性能三个方面，力学性能测试包括拉伸强度与断裂伸长率及压缩永久变形等指标，这些参数直接影响密封材料在温度变形作用下的适应能力，耐候性能通过人工加速老化试验进行评估，模拟紫外线辐射与温度循环以及湿热环境的综合作用，评价材料的长期稳定性。相容性测试则通过与基材的粘结强度变化来判断材料间的化学稳定性，避免因材料不相容导致的界面失效，经过系统的材料筛选与性能验证，改性硅酮密封胶在各项指标上均优于传统材料，故而成为窗墙节点密封的理想选择。

（三）标准化施工工艺流程

建立窗墙节点防水施工的标准化工艺流程^[5]，涵盖基面处理与材料配制及施工操作以及质量检验四个关键环节。基面处理要求清除旧密封胶与松散材料，保证基面干燥清洁，材料配制严格按照产品说明书要求，控制配比精度与搅拌时间，施工操作采用专用工具确保密封胶连续饱满，避免气泡及断缝现象，质量检验包括外观检查与性能测试，确保每道工序符合要求。施工环境温度控制在5-35℃范围内同时相对湿度不超过85%，雨天与大风天气禁止施工，标准化流程的执行有效保障施工质量的一致性及可控性。

（四）质量验收与维护管理

制定窗墙节点防水工程的质量验收标准与维护管理制度，验收标准包括外观质量检验与防水性能检测及耐久性评估三个层次，其中防水性能检测采用现场淋水试验方法，检测压力100Pa，淋水强度 $4L/(m^2 \cdot min)$ ，持续时间30分钟，验收合格率达到98%以上。维护管理制度规定定期检查周期与维护要求，建议每年雨季前后进行全面检查以确保发现问题及时处理，建立缺陷档案及维修记录，为后续管理提供数据支撑，通过规范的验收程序与科学的维护管理，确保整治效果的长期稳定性以及可靠性（见图3）。

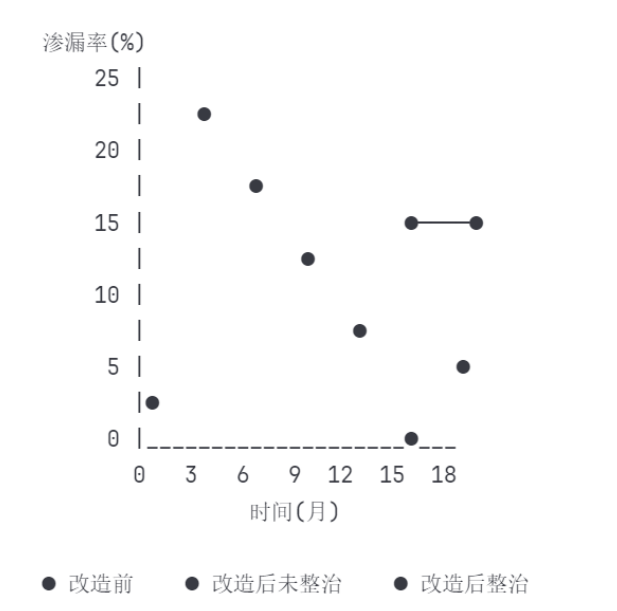


图3 窗墙节点渗漏率随时间变化趋势图

四、结语

通过对老旧小区节能改造中窗墙节点渗漏问题的深入研究，明确渗漏产生的机理与主要原因，复合 A 级硬泡聚氨酯板外保温系统与外窗更换后的渗漏主要源于材料界面失效与构造设计缺陷及施工质量控制不当，基于某老旧小区改造工程的实践验证，建

立包含材料选择与构造优化及施工工艺以及质量控制的完整技术体系，研究表明采用改性密封胶与三道防线构造设计及标准化施工流程，可将窗墙节点的渗漏率控制在 2% 以下，显著提升改造工程质量。该技术体系不仅解决当前工程中的实际问题也为类似项目提供可推广的技术方案，对推进我国老旧小区改造事业具有重要的实用价值与指导意义。

参考文献

[1]李笃健,宣宗延,冯慧.基于绿色建筑理念的老旧小区节能改造分析[J].住宅与房地产,2025,(10):99-101.
[2]严国浩,冯永存.老旧小区节能改造外墙外保温细部构造技术处理措施研究[J].中国建筑装饰装修,2025,(01):106-108.
[3]梅瑞聪,李豫华,吴开玥,等.基于 POE 的老旧小区节能改造后评估[J].城市建筑,2025,22(05):108-111.
[4]谢济遥.碳中和背景下老旧小区节能改造研究[J].住宅与房地产,2025,(02):25-27.
[5]杨韵仪.BIM 协同性能分析在老旧住宅节能改造设计中的应用研究[D].重庆市:重庆大学,2023.

基于多源传感的城市桥梁运营状态实时评估方法

满建琳

徐州市市政设计院有限公司, 江苏 徐州 221002

DOI:10.61369/ME.2026010029

摘 要 : 城市桥梁的运营状态评估, 简单来讲就是给桥梁做“全身体检”, 确保安全、稳定地服务市民。本文将基于实测数据, 融合多源传感技术, 构建“数据采集 – 评估分析 – 综合管理 – 决策应用”四层架构的桥梁运营状态安全自动化评估系统, 实现桥梁实时监测、承载能力智能评定与全生命周期管理, 服务城市交通运行的日常化、制度化。

关 键 词 : 多源传感; 城市桥梁; 运营状态; 实施评估

Real-time Evaluation Method for Urban Bridge Operation Status Based on Multi-source Sensing

Man Jianlin

Xuzhou Municipal Design Institute Co., Ltd., Xuzhou, Jiangsu 221002

Abstract : The operation status assessment of urban bridges is essentially a "full-body examination" of the bridges to ensure their safety and stability in providing services to the public. This article will, based on measured data and integrating multi-source sensing technologies, construct a bridge operation status safety automated assessment system with a four-layer architecture of "data collection – assessment analysis – comprehensive management – decision application", achieving real-time monitoring of bridges, intelligent assessment of their bearing capacity, and full life cycle management, to serve the daily and institutionalized operation of urban transportation.

Keywords : multi-source sensing; urban bridges; operation status; implementation assessment

引言

城市桥梁运营状态实时评估对提高桥梁的运营水平、降低运用成本、延长使用寿命、确保行车安全等方面具有重要作用, 实现对城市桥梁的全面检测与预警, 可最大限度地提高桥梁的运营效率和安全性^[1]。为更好地开展城市桥梁运营状态实时评估, 应积极引入多源传感检测系统, 建立行之有效的桥梁运营维护诊断技术体系。有效为桥梁管理人员提供详实的数据支持, 加强对城市桥梁全生命周期的安全管控, 提高桥梁管理效率和决策科学性, 实现更加智能化的城市桥梁健康管理, 为桥梁安全运营筑牢坚实保障。

一、城市桥梁检测评估的核心目标

(一) 安全保障

城市桥梁检测与评估, 是确保桥梁安全运营、延长使用寿命的重要环节。城市桥梁检测核心目标是通过承载能力复核、耐久性衰变建模及剩余寿命预测, 为大中修工程、加固改造或报废重建等重大决策提供科学依据^[2]。桥梁检测安全保障需要识别裂缝、腐蚀、变形等隐患, 预防坍塌事故。更要及时掌握桥梁的基本情况, 并采取相应的养护措施。确保桥梁在设计使用年限内安全运营, 保障公众生命财产安全, 促进城市交通基础设施的稳定运行。

(二) 延长寿命

城市桥梁检测主要分为常规定期检测和结构定期检测。通过定期检测, 全面排查桥梁结构的裂缝、腐蚀、变形等损害问题, 为后续针对性维修提供依据, 避免小问题演变为重大结构损伤。同时, 管理人员应利用无损检测技术(超声波、红外热成像、钢筋锈蚀检测等)和力学模型分析, 系统评估桥梁材料性能的退化程度、承载能力以及剩余使用寿命。通过桥梁检测评估制定科学养护、加固以及改造计划, 延缓结构性能的衰减。

(三) 经济优化

“经济优化”层面城市桥梁检测评估, 需要准确掌握桥梁的病害程度与结构状况, 要制定针对性的养护措施, 避免盲目维修

或过度维修。管理人员更要根据检测结果进行分级管理，应优先对技术状况较差的桥梁进行养护与维修，确保有效的养护资金发挥最大效益^[3]。通过科学的检测评估手段，实现桥梁养护管理的精细化与智能化，保障桥梁的安全运营，降低全生命周期的成本，避免资源浪费，通过精检精修延长桥梁的服役年限。

（四）合规管理

城市桥梁检测需要满足《城市桥梁养护技术标准》（CJJ/T 233-2023）等法规要求，更要围绕安全底线、数据规范、责任落实、持续改进等，通过统一数据真实、准确、完整，制定符合法规政策的检测报告，为桥梁的养护决策提供实践依据。管理人员在桥梁检测中，应将责任具体到产权人、检测机构以及监管部门中，确保桥梁检测工作的有序开展，做到违规行为“可追溯、可问责”，以此实现桥梁安全与长效运营的双重目标。

二、将多源传感融入城市桥梁运营状态实时评估的价值

多源传感主要包括结构健康检测传感、环境检测传感、裂缝检测传感以及数据采集终端。将多源传感器引入城市桥梁运营状态实施评估中，可实时获取桥梁的应力、震动以及变形等关键参数，更能发现结构异常（裂缝扩展、构建损坏等方面）。利用5G、NB-IoT等无线通信技术，将数据实时传输到云端或本地服务器。相关管理人员便可通过多元传感器的分析数据，及时调整桥梁结构状态，避免因结构失效引发事故安全。城市桥梁运营状态评估环节中多元传感器的应用，不仅推动了传感器技术的创新与进步，更提高了桥梁检测的精准度与可靠性。促进了科技发展和交叉应用，为城市基础设施建设实施智能化管理提供技术支持。

三、多源传感在城市桥梁运营状态实时评估中的应用

多源传感能实现对桥梁结构响应、环境参数等多源数据的实时采集，并借助网络通信技术将数据传输至处理中心，管理人员可利用数据分析算法，对城市桥梁健康状况进行实时评估，为交通安全预警提供数据支持^[4]。实时监测层面，管理人员可通过数据采集、评估分析、精准防控、决策应用四维结构，加强多源传感在城市桥梁运营状态实时评估中的应用效果，构建桥梁的数字孪生模型，直观呈现桥梁状态，保障城市桥梁通行安全。

（一）核心定位：数据采集，基础支撑

“数据采集层面”需要通过多源传感结合“在线检测”以及“人工检测”解决传统检测中“碎片化”的痛点。更要通过传感器网络实时采集桥梁变形、环境湿度等数据，通过定期巡检，解决不同场景下的高精度感知与决策难题。围绕数据采集提供桥梁运营状态的基础支撑，实现桥梁结构全生命周期状况的评估、预测以及预警功能建设。

1. 在线检测

《“十四五”交通领域科技创新规划》明确要求突破基础设施服役状态智能感知与结构无损检测关键技术，为桥梁检测技术

创新提供了政策指引。在线检测可通过多源传感（加速度传感器、螺旋仪、压力传感器、温度传感器、湿度传感器等），实时检测桥梁的结构变形、应力分布以及环境等问题，为桥梁健康状况提供全面的数据支持。管理人员也可搭在高分辨率摄像头、红色热成像设备以及激光雷达等传感器，利用无人机实现对桥梁表面状态的快速采集。结合多源传感实现桥梁的数据收集，可保证检测的精准度。也可进一步提升数据采集的全面性，实现桥梁结构状态信息的多层级呈现^[5]。

2. 人工检测

除了“在线检测”，城市桥梁管理人员也需要定期补充视觉巡检（裂缝观测、锈蚀评估）、专项检测（如超声探伤）等自动化监测难以覆盖的细节数据。在多源传感器技术广泛应用背景下，人工智能仍具有不可替代的作用。首先，从复杂场景处理分析。对于传感器难以覆盖的特殊区域（桥梁内部复杂结构），管理人员可通过人工检测，借助专业工具（爬壁机器人）进行桥梁近距离的勘测，从人工视角分析桥梁的安全性。其次，从数据验证与校准分析。人工干预可及时发现传感器数据是否准确，确保数据准确性。尤其是在传感器出现工作故障或数据异常时，人工测验可替代传感器工作。未来，人机协同将成为桥梁检测的主流模式，可进一步推动城市基础设施管理向着智能化、精细化的方向发展^[6]。

（二）桥梁评估：评估分析，提供支持

城市桥梁评估阶段需要融合多源传感呈现的数据，并搭建仿真模型构建可视化展示评估结果。实时评估桥梁承载能力、外部负荷等，推动评估从“定期人工”转向“持续自动”。通过深度学习算法，融合数据实现虚拟与现实的互动，系统展示桥梁检测数据、健康状态以及预警信息，提前发现桥梁潜在的结构问题、养护问题，提供科学的维护建议。

1. 数据融合

数据采集后 AI 智能分析技术，是实现传感器融入城市桥梁检测智能化的核心环节。多源传感器数据融合，是将不同传感器采集到的数据进行整合，消除数据之间的误差与干扰。城市桥梁检测中，常用的数据融合方法主要包括（卡尔曼滤波、粒子滤波、神经网络等）。通过对多源传感器数据的融合，可综合反映桥梁的实时状态，实现桥梁检测数据的高效、安全存储管理，为桥梁健康状态提供数据支撑。总之，多源数据融合分析技术，提升了对桥梁整体状态的评估能力，更增强了桥梁结构损伤特征的提取能力，提高实时监测准确性^[7]。

2. 仿真分析

香港理工大学研发的“智慧桥面高效检测模型”，通过 AI 处理无人机采集的数据，即使在恶劣的天气环境中，也可达到优于传统方法的检测准确度。城市桥梁检测中应借助模型实现外部荷载分析（车辆荷载、温度荷载等方面）、桥梁实时评估、承载能力等方面评定。有效将“理论规范”与“实测数据”结合，提供多维度的可视化工具，为维护决策提供依据^[8]。相关研究表明结合测量软件与 AI 能力，可生成高质量的3D桥梁模型，更能实现准确的桥梁评估，提高实时监测的准确性，形成数据采集、传

输、处理到决策支持的全链条技术体系。

（三）投入功能：综合管理，精准防控

多源传感器融合技术历经军事雏形、理论构建、工程落地、智能升级阶段，现已形成智慧城市赋能的分布式协同新范式。城市桥梁管理人员需要结合多源传感器特点，实现对桥梁的综合性管理。并搭建“WEB+GIS+BIM”管理平台，从环境变化、车辆统计、桥梁安全度评定、桥梁性能退化情况入手，快速做出桥梁管理决策，实现高效率分析。

1.搭建 WEB+GIS+BIM的综合管理平台

将多源传感器融入桥梁检测中，需要将桥梁数据与空间位置关联，方便定位桥梁空间位置以及周边环境，就此实现区域化桥梁群管理与可视化展示。其次，管理人员可通过桥梁 BIM模型集成构件属性与检测数据，并与评估层的 CAE仿真模型联动，形成全生命周期信息集成及展示。更要结合“Web”端提供网页端访问入口、支持多终端访问，构建统一的桥梁数据管理与展示平台，实现对桥梁管理平台的系统化建设，让人工智能桥梁检测技术从“理论研究”走向“工程实践”，提高检测精度与效率^[9]。

2.城市桥梁管理

整合多源传感数据进行城市桥梁管理，需要通过养护管理决策（根据桥梁性能退化情况制定养护计划，通过维修或者加固保障桥梁的安全性）；车辆通行管理（管理人员应通过车流量、超载统计等方面，结合限载或者限行优化交通管制措施）；应急事件管理（需要针对交通事故、桥梁结构损伤等方面，快速制定出应急预案）；预防性评估与处置（应通过桥梁性能退化及时预测未来风险，并采取预防措施）。通过综合数据提出桥梁管理方案，保障评估结果的实践应用，提前采取桥梁养护管理措施，搭建智能化管理场景。

（四）对接平台：决策应用，破解难题

综合多源传感数据分析，需要将决策落实到桥梁管理实践

中。管理人员需从养护管理、车辆通行、应急事件、预防性评估与处置等方面入手，形成“数据采集→分析评估→综合管理→决策支持”的闭环。通过实时掌握城市桥梁的安全状态、性能等，提出精准预测、养护决策等，提升桥梁运营管理效率与安全性，实现预测性维护^[10]。

为提高多源传感器融合后数据的可用性，需要对数据进行预处理，提高数据的可解释性和实用性，实现桥梁病害的精细化采集和三维可视化。在城市桥梁检测环节中，管理人员需要融合检测数据和检测数据，加强对桥梁承载能力进行科学评估，并结合桥梁的使用年限以及交通流量、环境因素等方面，及时发现桥梁结构的微小变化和潜在隐患，提高巡检的效率和准确性，系统分析桥梁的性能退化趋势，预测未来可能会出现的问题，为决策建设结构化的数据支撑，进一步为城市桥梁养护计划提供科学依据。

四、结论

结合以上研究表明，新形势下通过自动化、智能化的检测管理手段，实现科学化、高效率城市桥梁运营状态实时评估，达成保证民众出行通常安全目标已经成为必然选择。将多源传感应用于城市桥梁运营状态实时评估中，能通过系统化检测与智能化分析，为建设“韧性安全城市”提供核心保障。未来发展中，城市桥梁管理正从“被动维修”转向“主动预防”，催生“发现—分析—处置”全自动闭环能力，推动城市桥梁健康管理迈入“智慧时代”。

参考文献

[1]赵小龙,刘健,韩旭.某市运营期城市桥梁安全风险评估方法研究[J].武汉理工大学学报(信息与管理工程版),2024,46(05):695-699.

[2]唐葆森.运营阶段城市桥梁附属设施常见病害原因分析及改进措施[J].四川水泥,2024,(06):263-265.

[3]刘健.基于模糊 AHP-DEMATEL的城市桥梁运营期安全风险评估研究[D].安徽建筑大学,2024.

[4]刘蓉,吴霜.基于五元联系数的城市桥梁运营期风险态势评估[J].安徽工业大学学报(自然科学版),2023,40(04):434-441.

[5]唐安雷,周貽港.分布式光纤光栅传感技术在桥梁自动化监测中的应用[J].工程设计与设计,2025,(17):128-130.DOI:10.13616/j.cnki.gcjsysj.2025.09.037.

[6]郑燕红.多源协同传感机制与数据融合驱动的桥梁结构诊断系统研究[J].科技视界,2025,15(15):54-56.

[7]徐伟昌,谭社会,杨兴旺,等.基于多源传感数据的千米级公铁两用桥梁线形自动化监测技术[J].铁道建筑,2024,64(03):66-71.

[8]李高堂.城市桥梁施工和运营阶段智能监测研究现状分析[J].广州建筑,2021,49(04):52-55.

[9]冯源.城市桥梁定期检测技术研究[J].工程技术研究,2020,5(19):73-74.

[10]林铭.新型传感技术在桥梁检测智能化监测中的应用探索[J].张江科技评论,2025,(06):87-89.

长大越江隧道贯通测量技术的应用提升与工程验证

张宏伟

上海市建筑科学研究院有限公司, 上海 200032

DOI:10.61369/ME.2026010035

摘 要： 针对长大越江隧道施工中因距离长、环境复杂、误差累积显著导致的贯通测量难题，本文以某轨道交通市域线越江盾构隧道工程（全长约 7.7 km）为背景，系统研究了隧道贯通测量精度提升手段及垂直顶升测量技术在验证贯通精度中的应用。文章分析了贯通测量的主要难点，提出包括优化测量方案、建立高精度控制网、采用先进测量技术、引入陀螺方位角测量等综合提升措施。在此基础上，重点阐述了垂直顶升测量在隧道轴线修正中的作用，并通过无定向导线平差方法对贯通误差进行了有效控制。通过垂直顶升实测数据，验证了各项精度提升措施在减小横向贯通误差方面的显著效果。结果表明，采用综合提升措施后，顶升处横向贯通误差约为 47.7mm，满足规范限差 $100 \pm \text{mm}$ 的要求。本文研究为类似长大越江隧道的精准贯通提供了可靠的技术支持与实践参考，也为隧道贯通测量误差控制与验证方法提供了新的思路。

关 键 词： 越江隧道测量；无定向导线；误差控制；陀螺定向；贯通精度验证

Application Improvement and Engineering Verification of Changyue River Tunnel Penetration Measurement Technology

Zhang Hongwei

Shanghai Architectural Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200032

Abstract： In view of the penetration measurement difficulties caused by the long distance, complex environment, and significant error accumulation during the construction of the Changchun River Tunnel, this paper uses a certain rail transit municipal line cross-river shield tunnel project (total length approximately 7.7 km) as the background to systematically study the tunnel penetration measurement accuracy improvement methods and the application of vertical jacking measurement technology in verifying penetration accuracy. The article analyzes the main difficulties in penetration measurement, and proposes comprehensive improvement measures including optimizing the measurement plan, establishing a high-precision control network, adopting advanced measurement technology, and introducing gyro azimuth measurement. On this basis, the role of vertical jacking measurement in tunnel axis correction was focused on, and the penetration error was effectively controlled through the non-directional wire adjustment method. Through the measured data of vertical jacking, the significant effect of various accuracy improvement measures in reducing lateral penetration errors has been verified. The results show that after adopting comprehensive lifting measures, the lateral penetration error at the jacking point is approximately 47.7mm, which meets the specification tolerance of $100 \pm \text{mm}$. The research in this article provides reliable technical support and practical reference for the accurate penetration of tunnels similar to the Changyue River, and also provides new ideas for tunnel penetration measurement error control and verification methods.

Keywords： cross-river tunnel measurement; non-directional wire; error control; gyro orientation; penetration accuracy verification

引言

随着城市轨道交通与跨江交通建设步伐加快，长大越江隧道工程日益增多。隧道贯通精度直接关系到工程安全、质量与运营效能，在跨越水体、长距离掘进、复杂地质等条件下，测量误差易累积，贯通风险显著^[1]。在以往工程中，隧道横向贯通误差控制对于隧道能否安全贯通至关重要。本文结合某轨道交通市域线越江盾构隧道（全长约 7.7km）的施工实践，探讨贯通测量技术的多种精度提升路径，以垂直顶升测量数据作为验证，研究了减小隧道横向贯通误差的关键测量技术^[2]。

一、长大越江隧道贯通测量

（一）长大越江隧道贯通测量难点

长距离隧道贯通测量主要测量难点包含如下：第一，地面控制网陆岛远离，整体控制网联测及精度分析实施难度增大；第二，地下支导线距离长、误差累积显著。随着掘进距离增加，测角、测距误差逐步累积，贯通面精度难以保证；第三，传统测量模式对精度影响大，人工不仅效率低下，劳动强度大，：每次测量需经过“整平、对中、照准、读数、记录”等多个繁琐作业流程，耗时耗力^[9]。且测量精度受人为主观因素影响大照准误差、读数误差：仪器操作误差；最后，地下控制网受土体变形、水位变化等影响，控制点易发生位移，稳定性差^[10]。

（二）长大隧道贯通误差预估

在隧道掘进过程中，影响贯通误差反映在平面位置上包括横向贯通误差及纵向贯通误差，反映在高程上为高程贯通误差。根据以往工程案例经验分析，影响长距离隧道贯通安全最大因素为横向贯通的测量误差^[11]。

其中，横向贯通误差的来源主要有地面控制测量误差、盾构竖井联系测量误差、地下导线控制测量误差、盾构姿态定位测量误差和盾构贯通点坐标测量误差。预计方法基于误差传播理论，将贯通误差视为多个独立误差源的合成结果。误差传播公式采用平方根法合成独立误差源：

M=√m₁²+m₂²+m₃²+m₄²+m₅²

其中：控制网精度误差 m₁；地面导线误差 m₂；平面联系测量误差 m₃；洞内导线误差 m₄；盾构导回系统误差 m₅

其中各项误差计算公式为：

序号	误差源	符号	计算公式（简化说明）
1	控制网精度误差	m1	= GNSS基线相对中误差 × 隧道全长 × 1000
2	地面导线误差	m2	= 5 × SQRT(地面导线长度)
3	平面联系测量误差	m3	= 竖井定向中误差 × tan(竖井深度) × 10000
4	洞内导线误差	m4	=SQRT((测角中误差 /206265*SQRT((隧道长度^2*测站数)/12))^2+(测距中误差 *SQRT(测站数 /3))^2)
5	盾构导向系统误差	m5	= SQRT(姿态解算误差^2+(测角误差 × 推进距离 /206265)^2)

根据上述贯通误差精度估算公式计算该隧道横向贯通误差约为 ± 129mm，无法满足贯通要求，为提高贯通精度，拟采用多种误差控制措施来提高测量精度。

二、先进测量技术应用测量精度提升措施

为提高各项测量环节的精度，在本工程中采取以下措施；

- 1.地面控制测量误差控制措施：通过优化 GPS控制网复测网形和提高复测精度来提高地面控制测量精度。
- 2.盾构竖井联系测量误差控制措施：进行竖井联系测量时，

可采用双联系三角形法、增加测回数、增加联系测量复测次数、多种手段联合测量（若有条件采用两井定向、导线直传等方式）等措施来提高联系测量的精度^[16]。

3.地下导线控制测量误差控制措施：采用强制观测墩减少仪器对中误差，采用双导线、交叉导线，提高地下导线的精度，延长导线边长，减少测站数，增加测回数及测量频次等方式提高地下导线控制测量的精度。

4.盾构姿态的定位测量误差控制措施：在长期的掘进过程中，盾构机的振动有时候会造成激光靶的位置发生变化。管片的振动会引起 TCA的激光发生偏移。这两样都会引起导向系统显示的姿态不真实。因此需要采取以下措施：盾构初始零位姿态的准确测量、定期人工复测盾构姿态、定期检查自动导向系统（尤其是自动导向全站仪指标）、人工盾构姿态与轴线测量成果比较分析。

5.全自动化测量数据采集：采用高精度测量机器人搭载自主研发测量程序，以避免由人工观测记录产生的偶然误差。

6.陀螺方位角加测：对于超长距离的盾构施工，加测陀螺方位是非常行之有效的技术手段，通过加测陀螺边的方法，对地下导线的方向进行修正，减少方向传递误差对贯通精度的影响，不但限制了系统误差的累积，而且可以对导线方向进行检核，从而提高和改善了地下导线的精度和可靠性。

三、垂直顶升测量验证

由于隧道单次掘进距离较长，假如按照初始的导线进行测量，根据理论估算，最终测量中误差为 129mm 左右，无法满足贯通限差要求^[17]。为了确保盾构能够顺利接收，必须在盾构接收前对盾构进行一次定向。由于隧道单次掘进距离较长，假如按照初始的导线进行测量，根据理论估算，最终测量中误差为 90mm 左右，无法满足贯通限差要求。为了确保盾构能够顺利接收，必须在盾构接收前对盾构进行一次定向。在本工程中采用垂直顶升联系测量进行验证^[18]。

垂直顶升是指通过顶升工艺从隧道内向地面顶升出一根管道。测量人员借助于顶升管道传递坐标和传递方位，达到消除累积误差的目的。本方法优点是将 7.7 公里的隧道测量风险转化为 0.5 公里的隧道贯通。通过上下通视的垂直顶升孔，实测盾构机与接收井的相对位置关系，修正下阶段隧道轴线，该方法可以极大地削弱方位累计误差对隧道横向贯通精度的影响，垂直顶升方式的横向贯通中误差为 20mm，贯通限差为 40mm，确保盾构机准确无误接收。结合地质环境，在浦东岸上段某地内选取 2 处（一用一备）位置进行作业（距离接收井约 450m），顶升区域隧道线性为上坡 2‰，位置覆土深度约 21m。

四、实施效果与贯通精度评估

1.控制测量：垂直顶升测量前，轴线复测单位对长兴岛及浦东段的首级控制网进行了检核，本次垂直顶升测量所采用的控制

网均符合限差要求。

2.联系测量：顶升联系测量前对始发井联系测量工作进行复

核，成果均符合相关规范要求。经测量传递井下始发导线点 JJ2、CM269，见表4-1。

表 4-1 最新联系测量成果对比表

期次点号	JJ2		CM269		方位角 (° ′ ″)	距离 (m)	方位角差值 (″)	距离差值 (mm)
	起点 X(m)	起点 Y(m)	终点 X(m)	终点 Y(m)				
第六次联系测量	45542.6009	38177.2701	45050.4872	37980.2825	201° 48′ 56.4″	530.0755	2.4	3.1
第七次联系测量	45542.6017	38177.2741	45050.4866	37980.2816	201° 48′ 58.0″	530.0786		

3.洞内施工导线测量：在垂直顶升联系测量前，对洞内所有施工导线点进行了导线测量。见表4-2。

表 4-2 洞内各施工控制点支导线成果表

序号	点号	坐标成果	
		X (m)	Y (m)
1	JJ2	45542.6017	38177.2741
2	CM269	45050.4926	37980.2972
由于保密要求，中间站点数据隐藏处理			
12	CM2626	40646.5789	36292.4912
13	CM2869	40190.6328	36122.5676
14	CM3095	39781.3373	35927.8195

4.陀螺方位角测量：本次陀螺方位角测量选用洞内施工导

表 4-3 陀螺测量成果表

导线边	支导线方位角	陀螺方位角	差值
	(DD° MM′ SS. S″)	(DD° MM′ SS. S″)	″
CM2869-CM3095	205° 26′ 44.6″	205° 26′ 40.5″	-4.1

5.垂直顶升平面联系测量：

(1)平面联系测量：采用悬吊单根钢丝进行坐标传递，分别采用边角观测法获取钢丝井上坐标 O 及井下坐标 O1。具体成果见表 :4-4。

表 4-4 顶升处联系测量钢丝坐标成果表

井上钢丝坐标 O		井下钢丝坐标 O1		Δx (mm)	Δy (mm)	ΔM (mm)
X(m)	Y(m)	X(m)	Y(m)			
38776.4256	35511.9016	38776.5522	35511.9001	-126.6	1.4	47.7

我们以 O 为真值，将钢丝上下坐标投射至隧道轴线上即可得出顶升处钢丝横向偏差为 47.7mm，里程方向偏差为 118.1mm。

(2)高程联系测量：采用悬吊钢尺法进行观测，将井上高程引入至隧道内高程点 DX2求得 h，再与洞内水准引测至 DX2高程至 h1 比对，顶升联系测量处的高程偏差为 0.02mm。本次高程联系测量成果见表 4-5。

表 4-5 顶升处高程联系测量高程成果表

高程点点号	顶升联系测量成果	隧道支水准成果	Δh (mm)
	h(m)	h1(m)	
DX2	-23.7846	-23.7846	0.02

内支导线传递坐标之间的横向偏差为 47.4mm（推进方向右偏），垂直偏差为 0.02mm。

2.为保证该隧道顺利贯通，地下施工导线（平面控制）建议采用井上钢丝坐标 O 与 1# 大小盾构转换段入口处 JJ2 坐标成果组成无定向导线平差后成果用于指导后续盾构推进；地下高程点可沿用洞内水准点进行指导推进。

3.实测及垂直顶升联系测量结果表明：通过本文采取的测量精度提高措施和验证修正方法，可以提高长大越江隧道贯通测量的精度和可靠性，确保隧道的准确贯通和安全使用^[9]。

五、结论与建议

1.某轨道交通长大越江盾构推进至垂直顶升处钢丝传递与洞

参考文献

[1] 张正禄.工程测量学[M].武汉：武汉大学出版社，2018.
[2] 周建郑.盾构隧道施工测量技术[M].北京：人民交通出版社，2019.
[3] 黄声享,尹晖,蒋征.工程测量学[M].武汉：武汉大学出版社，2021.
[4] 潘国荣,王穗辉.地下导线加测陀螺边最优位置确定及精度分析[J].同济大学学报(自然科学版),2004,32(5):656-659.
[5] 徐秀川,段双全,张伟.盾构法地铁隧道施工测量误差控制技术措施和方法[J].城市勘测,2021(3):135-138.
[6] 李方.长距离越江隧道一次性掘进贯通测量关键技术[J].测绘通报,2019(7):112-115.
[7] 司大刚,熊文豪,张世杰,等.超长隧道平面控制测量横向贯通误差预估研究[J].测绘通报,2024(1):155-160.
[8] 王长进,刘成龙.垂直顶升测量在隧道贯通精度验证中的应用研究[J].铁道勘察,2020,46(2):34-37.
[9] 上海长江隧道工程指挥部.上海长江隧道工程贯通测量技术总结[R].上海：上海隧道工程股份有限公司，2008.

装配式端板连接钢混梁柱节点抗震性能及受力分析研究

鲁万卿¹, 田为¹, 李正英², 刘红军²

1. 中建七局西南建设有限责任公司, 重庆 400045

2. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045

DOI: 10.61369/ME.2026010038

摘 要 : 本研究基于低多层预制装配建筑, 参考钢结构中的端板连接, 提出新型全装配式梁柱节点, 研究了端板厚度、螺栓规格尺寸、螺栓布置间距及加劲肋构造等其对节点应力传递机制、极限承载与变形规律的控制作用。结果表明: 适当增加端板厚度与合理设置加劲肋能增强节点的转动约束与抗弯承载性能; 螺栓直径偏小容易引起节点早期破坏而间距的变化影响相对有限。

关 键 词 : 低多层装配式建筑; 端板连接; 全装配式梁柱节点; 受力性能; 有限元分析

Research on Seismic Performance and Stress Analysis of Prefabricated End Plate Connection Steel-Concrete Beam-Column Joints

Lu Wanning¹, Tian Wei¹, Li Zhengying², Liu Hongjun²

1. China Construction Seventh Engineering Division Southwest Construction Co., LTD., Chongqing 400045

2. College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045

Abstract : Based on low-rise multi-story prefabricated buildings and referring to the end plate connection in steel structures, this study proposes a new type of fully prefabricated beam-column joint. The control effects of end plate thickness, bolt specifications and sizes, bolt spacing, and stiffener structure on the stress transfer mechanism, ultimate bearing capacity and deformation laws of the joint were studied. The results show that appropriately increasing the end plate thickness and reasonably setting the stiffeners can enhance the rotational restraint and bending bearing capacity of the joint; a smaller bolt diameter is prone to cause early joint failure, while the change in spacing has a relatively limited impact.

Keywords : low-rise multi-story prefabricated buildings; end plate connection; fully prefabricated beam-column joint; stress performance; finite element analysis

引言

低多层住宅在我国中小城市及乡镇建设中占比很高, 因其相比高层住宅存在多种优势。地震作用下, 干式连接能将破坏控制在节点区和连接件内, 预制构件损伤小, 因此震后修复便捷, 只需更换局部节点即可^[1]。美日 PRESSS^[2-5]项目推动了预制混凝土结构抗震研究, 其中螺栓连接与预应力节点被广泛关注。Nakaki^[6]研究带延性连接器的节点虽表现出优良的耗能性能, 但其构造复杂且经济性较差。Ertas^[7]通过试验证实, 螺栓连接节点在施工便捷性、耗能效率与延性性能等方面均具有显著优势。Vidjeapriya^[8]等分别对加劲牛腿节点和组合节点进行研究, 存在耗能能力有限或构造复杂等问题。Nzabonimpa^[9]研究 U 形钢筋锚固节点表现出良好的耗能与延性。

国内研究方面, 吕西林^[11]等指出后浇整体式节点抗震性能与现浇节点相近。范力^[12]等发现橡胶垫螺栓连接节点虽能有效控制残余变形, 却存在能量耗散能力不足。黄斌等研究的端板连接节点承载力随构造尺寸提高而增强。蔡小宁^[14]提出的 PTED 节点通过角钢变形耗能, 并展现出显著的自复位特性。刘建华^[13]研究的螺栓连接牛腿节点承载力高、耗能性好, 便于更换修复。

综上所述, 现有装配式节点仍多依赖湿作业, 干式连接则面临构造复杂、传力不直接、耗能有限及成本较高等问题。为提升装配式结构体系的综合性能, 本研究以节点抗震设计为核心, 引入端板连接, 提出了一种新型全装配式混凝土梁柱节点设计方案。

一、有限元模型

(一) 节点设计

为确保分析结果能够真实反映节点的实际受力状态,本研究依据某多层民宿结构,选取其二层框架边节点作为试验原型,如图1所示。同时试件从梁和柱的反弯点处提取,为有效模拟节点的真实边界约束。

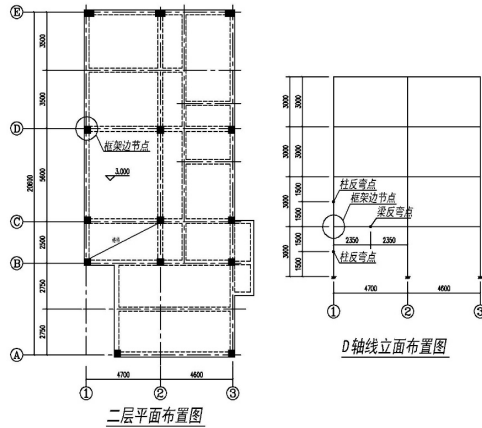


图1 试件节点位置示意图

依据 EC3 规范^[16],本研究采用其规定的半刚性连接转动刚度下限值,在 Etabs 工程软件中通过释放梁端弯矩的方式,以模拟节点的半刚性特性。最终确定的梁柱设计参数如下:梁与柱均采用 C40 混凝土,其中,梁截面为 200mm×500mm,跨度为 2.15 米;柱截面为 400mm×400mm 400mm×400mm,净高为 3 米,并承受 1000kN 的轴向压力,控制其轴压比为 0.30。选用 HRB400 级钢筋,保护层厚度为 20mm,连接件 Q355 级钢材,并配备 10.9 级 M24 摩擦型高强度螺栓。试件尺寸见图 2 所示。

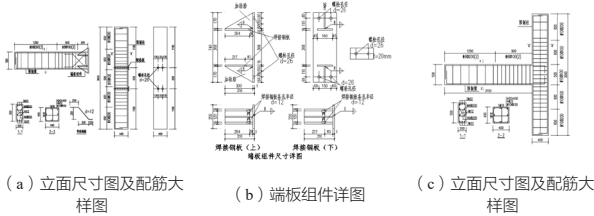


图2 连接节点立面尺寸图及配筋大样图

(二) 材料本构模型

在混凝土本构模型采用塑性损伤模型,以更准确地模拟混凝土材料在低周反复荷载下的塑性及损伤行为。该模型的一个关键优势在于其能够区分材料在拉、压受力状态下不同的力学性能,从而能够更为精确地再现混凝土在循环加载过程中的复杂力学响应^{[18]-[20]}。钢材本构关系通过随动强化模型进行定义。

(三) 单元的选取和网格的划分

本文基于 Abaqus 建立了端板连接梁柱节点的有限元模型。钢筋采用 T3D2 桁架单元进行模拟。模型中其余组成部分,均使用 C3D8R 实体单元。

为提高计算精度并保证数值收敛性,对模型实施了差异化的网格划分策略,具体方案见图 3。其中,混凝土梁与柱采用基准尺

寸为 50mm 的稀疏网格,但在应力集中的螺栓孔周边进行了局部加密,网格尺寸细化至 10mm。端板组件以 10mm 的单元尺寸进行划分,并在厚度方向布置了 4 层单元。高强螺栓采用更为精细的 5mm 网格,而梁柱内部钢筋的单元尺寸则统一设置为 50mm。

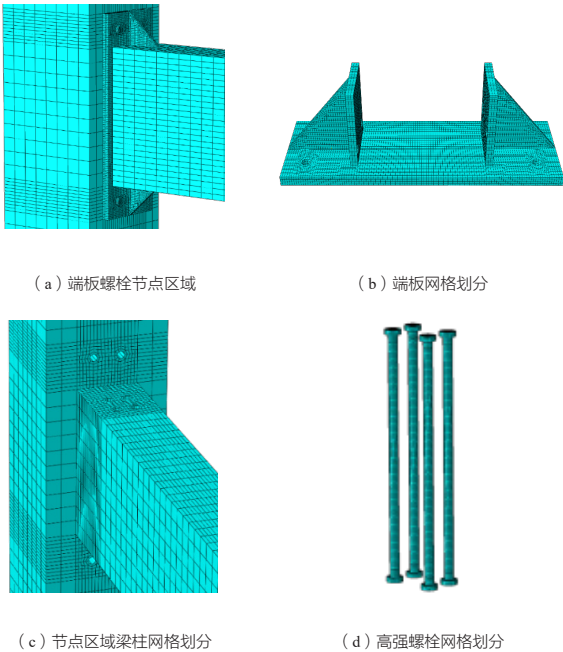


图3 有限元模型网格划分

(四) 边界条件和加载制度

有限元分析结果的可靠性高度依赖于荷载条件、边界约束及加载制度的合理定义。为排除非必要因素的干扰并确保模拟真实性,本章模型按图 4 所示设置边界条件。

荷载通过以下分析步顺序施加:首先,在第一步对螺栓施加 50% 的设计预拉力 (0.5P),采用“螺栓载荷”实现;第二步将预拉力增至完整值 P;第三步施加载顶轴向荷载;最后在第四步于梁端实施往复位移加载。位移加载制度按位移角分级进行,依次为 0.1%、0.3%、0.5%、0.75%、1%、1.5%、2%、2.5%、3%、4%、5%...,每级位移循环 2 次,如图 5 所示。

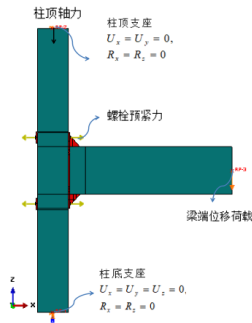


图4 边界条件

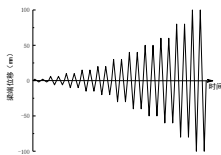


图5 有限元模型加载制度

二、端板连接节点设计参数分析

针对本文提出的全装配式端板连接节点,其力学性能受多重

参数影响，主要包括螺栓强度等级、直径与数量，端板尺寸、厚度与材料强度，以及加劲肋的设置。为系统研究上述关键参数对节点力学行为的作用机制，本节开展参数化分析。

(一) 节点参数设计

JD1作为本节的基准模型用于对比分析，本节将重点分析端板厚度、螺栓配置与加劲肋配置等关键设计变量对节点力学性能的作用规律。节点中梁、柱截面尺寸及配筋构造均按图2采用，各连接件的具体设计参数列于表1。

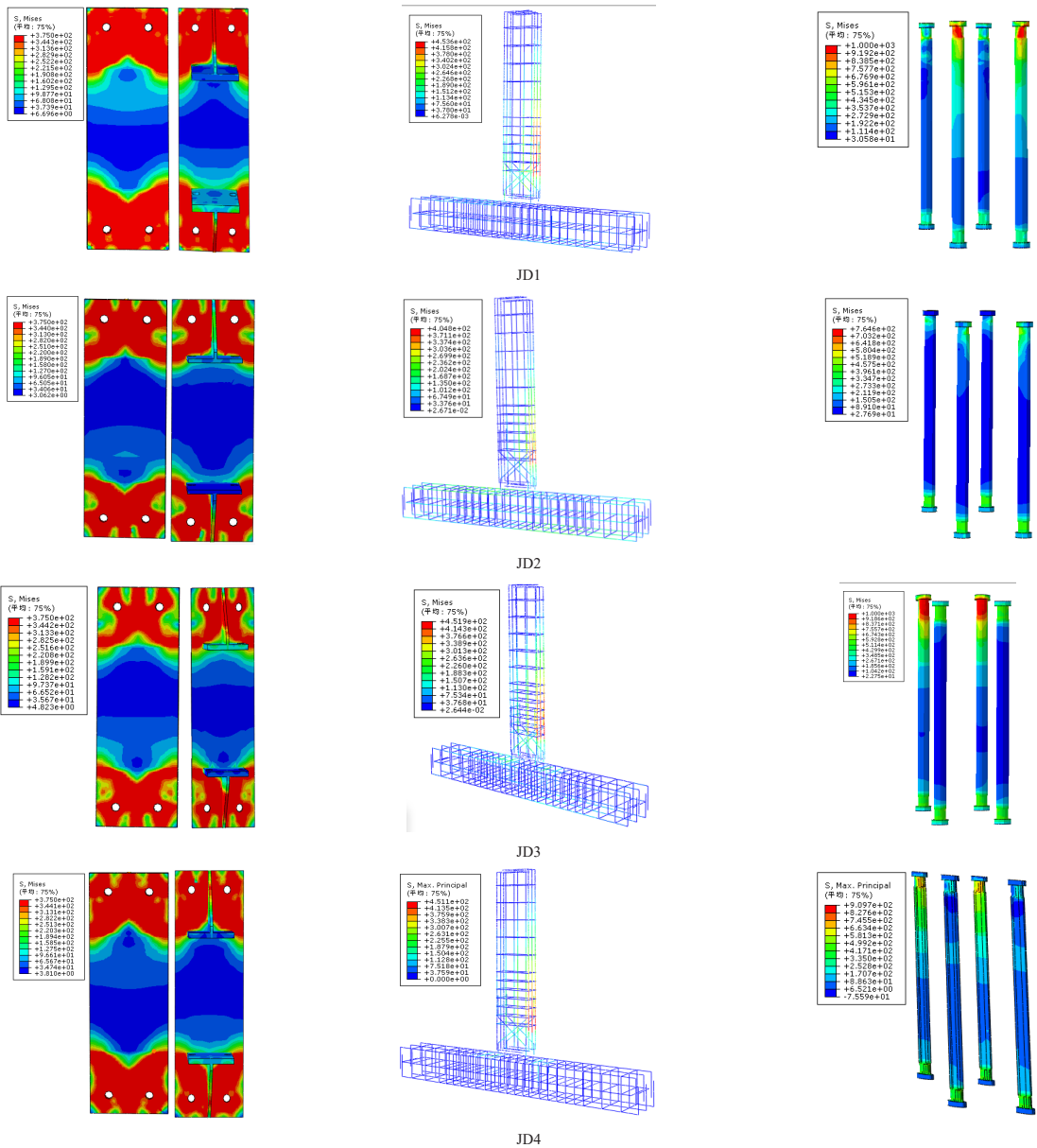
表1 端板参数设计

试件编号	端板厚度 (mm)	螺栓直径 (mm)	螺栓间距 (mm)	有无加劲肋
JD1	16	24	110	有加劲肋
JD2	12	24	110	有加劲肋
JD3	16	16	110	有加劲肋
JD4	16	24	150	有加劲肋
JD5	16	24	110	无加劲肋

(二) 有限元参数分析结果

1. 节点应力分布

图6为各试件中端板、内部钢筋骨架与高强螺栓的应力云图。在螺栓能提供足够抗拉承载力的情况下，随着端板厚度的增加，节点连接部位的变形的得到有效控制，端板自身的塑性发展范围也相应扩大，并引起内部钢筋骨架与高强螺栓所受拉力的同步增长；若螺栓直径减小，节点将因螺栓过早发生拉伸破坏而失效，此时端板尚未充分发挥其材料性能，致使节点的整体承载力降低；同时螺栓间距的增大对节点性能影响相对较小，仅引起变形微量增加及螺栓拉力有所减弱；加劲肋的设置对节点力学行为的影响最为显著，在设置加劲肋时端板呈现出明显的双向弯曲，其焊接钢板外侧两端出现大范围塑性发展区域；相比之下，无加劲肋试件中的端板仅表现出单一方向的弯曲变形，塑性发展区集中于焊接钢板与剪贴板的接合区以及螺栓孔连线的相邻范围。



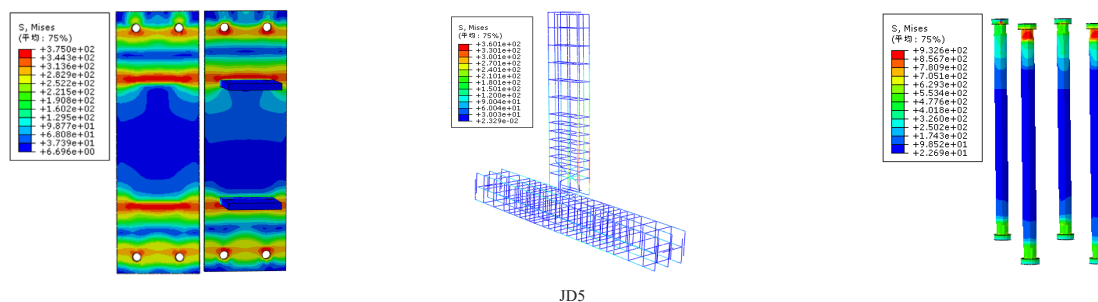


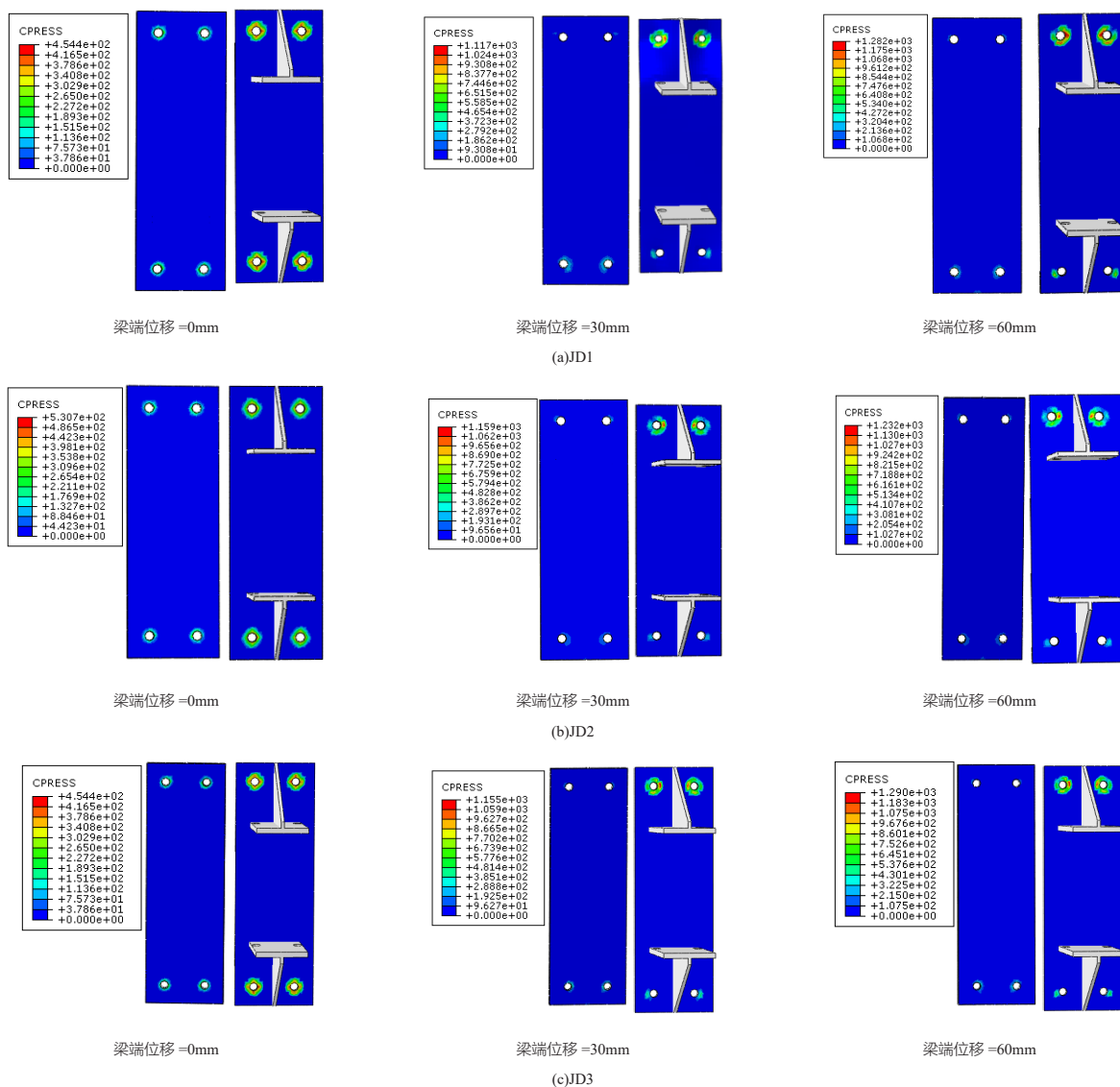
图6节点应力云图

2. 端板变形分析

图7反映了不同位移水平下各节点端板接触压应力的分布状态。节点应力集中在螺栓孔周围区域。在初始无位移条件下，节点内力主要由高强螺栓的预紧力所提供，端板与接触面之间呈现出数值较小且在四个螺栓孔附近对称且均匀的压应力分布。

在持续增大的梁端位移作用下，端板-柱接触面的应力分布模式发生显著改变，位于受拉区的端板逐渐与柱面脱离接触，致

使该区域压应力不断降低，作用范围也随之缩小。端板与梁端接触区的压应力集中于螺栓螺帽作用范围，与此同时，受拉侧的应力值亦随着位移加载而持续升高；而在受压区，由于混凝土柱与端板产生的协同变形作用，高强螺栓预应力相应降低。所有节点的接触压应力均未扩散至螺栓孔以外的区域，表明节点在变形过程中端板端部未出现明显的撬力作用。



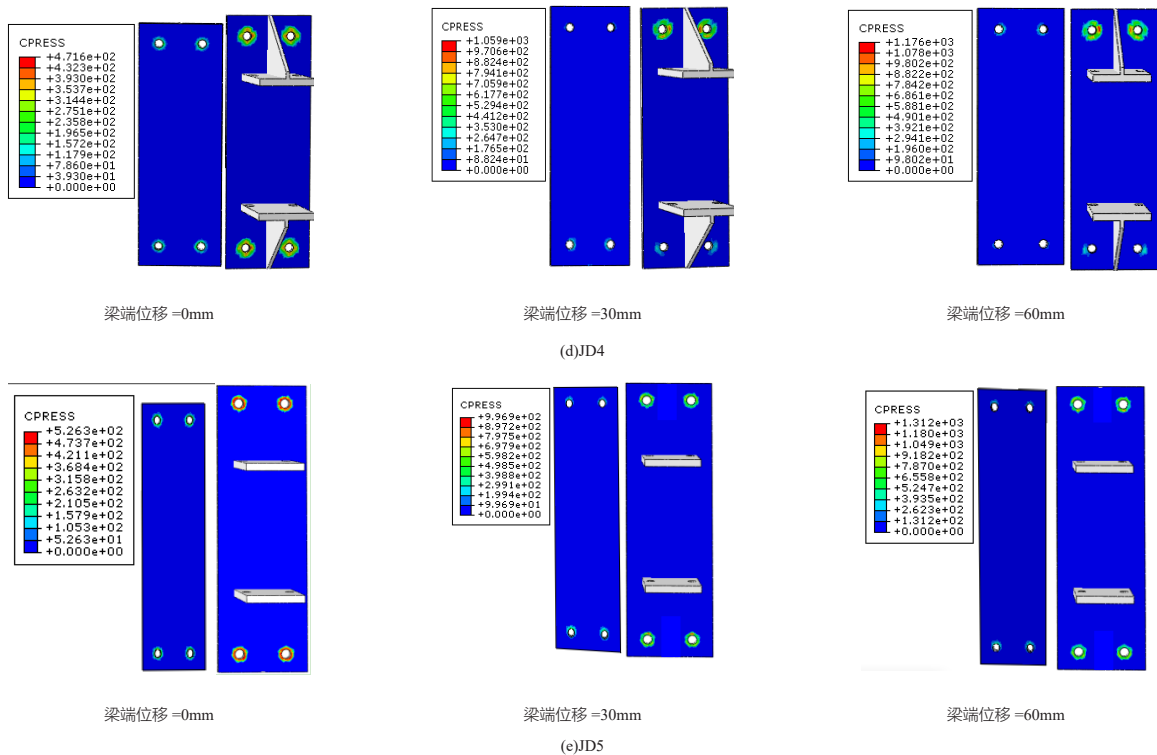
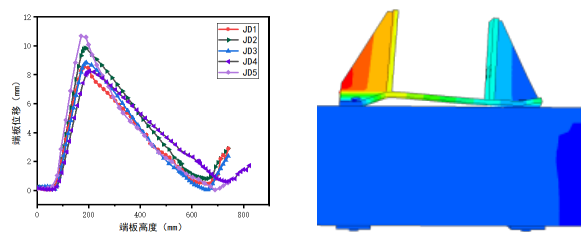


图7 端板接触应力云图

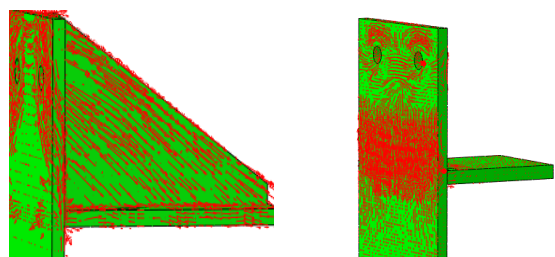
如图8所示,通过在端板上设置AB和BC两条路径并提取位移数据,可获得端板在高度与宽度方向的变形特征,如图9所示。图10对比了端板主拉应力矢量分布。主应力迹线图中仅给出JD1与JD5的典型主应力迹线对比分析,JD2~JD4试件的分布与JD1基本一致。

沿AB路径观测发现,设有加劲肋的试件JD1~JD4在加劲肋位置出现明显位移增大;而未设加劲肋的试件JD5在宽度方向几乎未发生位移。各试件在BC路径的变形模式基本一致。端板顶部(B点)位移趋近于零,至水平焊接钢板处达到峰值,随后在受压侧螺栓位置减为零,呈现近似线性递减。图10进一步表示加劲肋的引入改变了端板传力机制,使其在加劲肋处承担更大荷载,从而导致该区域形成显著的局部变形。



(b) BC路径(高度)位移曲线

图9 端板变形曲线



(a) 端板加劲肋主拉应力迹线

(b) 端板主拉应力迹线

图10 端板主拉应力迹线

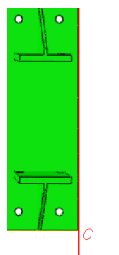
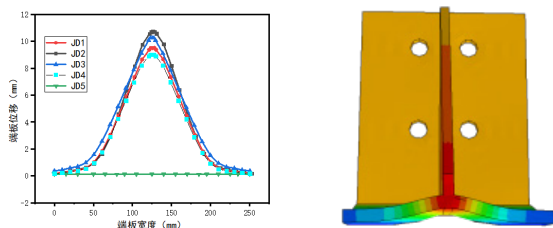


图8 路径示意图



(a) AB路径(宽度)位移曲线

3.承载力及弯矩-转角曲线

表2汇总了各试件的承载力计算结果。从图8所示的节点弯矩-转角骨架曲线可以看出,所有曲线均表现出典型的反“Z”形态。随着相对转角的增加,曲线切线斜率持续降低,反映出节点转动刚度呈现持续衰减的趋势,最终荷载逐渐趋于稳定值。依据EC3^[16]规范中对无支撑结构的分类标准,图中以虚线段标示了斜率分别为 $25EI/L$ 与 EI/L 的界限(其中为梁线刚度)。通过对比各曲线初始切线刚度可知,所有模拟节点均属于半刚性连接范畴,其初始转动刚度排序为:JD1 > JD4 > JD3 > JD2 > JD5。参

数分析表明：

(1) 端板厚度 (JD1与 JD2对比)：增加厚度可有效提升节点刚度与承载力；

(2) 螺栓直径 (JD1与 JD3对比)：直径减小时螺栓过早屈服，限制端板塑性发展，导致承载力下降；

(3) 螺栓间距 (JD1与 JD4对比)：间距增大会轻微降低转动刚度，但可略微提高抗弯承载力，综合考虑经济性与规范^[17]要求，建议采用标准容许间距；

(4) 加劲肋设置 (JD1与 JD5对比)：无加劲肋节点传力路径改变，塑性铰集中于螺栓连接与焊接区域，显著降低节点承载能力。

表2 试件节点弯矩及转角模拟结果对比

试件 编号	屈服弯矩 $M_y / kN \cdot m$	$\frac{M_{yJD1}}{M_{yJD1}}$	屈服转角 θ_y / rad	峰值弯矩	$\frac{M_{maxJD1}}{M_{maxJD1}}$	峰值转角 θ_y / rad
JD1	149.40	—	0.0055	193.54	—	0.0112
JD2	91.17	0.57	0.0044	120.38	0.61	0.0143
JD3	100.86	0.78	0.0057	144.39	0.73	0.0099
JD4	176.17	1.17	0.0067	217.24	1.1	0.0078
JD5	85.43	0.57	0.0045	117.23	0.33	0.02

表中 $i = 2, 3, 4, 5$

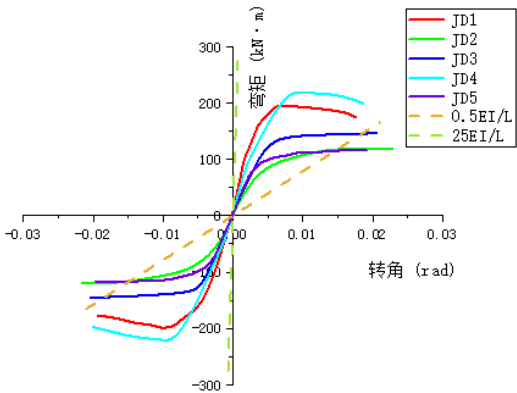


图8 不同参数的节点模拟骨架曲线对比

三、结论

本研究基于 Abaqus 有限元分析，对端板连接节点的力学性能开展了系统的参数化分析，主要获得以下结论：

(1) 数值分析结果表明，该类型节点表现出明显的半刚性力学行为，其初始转动刚度的数值介于刚接与铰接状态之间。在循环荷载作用下，混凝土损伤主要出现在梁构件上，而柱构件基本保持完好。配置加劲肋的节点在梁身形成分布范围较广的损伤区，且在靠近梁端部位最为严重；在未设加劲肋的节点中，破坏区域集中于梁端角部。

(2) 端板厚度的增加能够显著提升节点的抗弯性能与转动约束能力；而若螺栓直径偏小，则可能因其提前进入屈服阶段，最终引发节点的脆性失效模式。适当增加螺栓间距虽会引起转动刚度轻微下降，但能够略微提升承载力，总体影响有限；未设置加劲肋会明显削弱节点的承载能力与转动刚度。

(3) 接触压应力的分布特征表明，螺栓孔周边区域形成了稳定的应力集中区，该核心分布特征对端板厚度、螺栓直径与间距以及加劲肋的设置均不敏感，说明节点受力过程中端板端部未出现撬力效应。

(4) 加劲肋的设置改变了节点的内力传递路径：加劲肋的引入促使端板的变形模式由单向弯曲转变为双向弯曲，从而显著优化了荷载的传力路径与扩散效率；而无加劲肋的端板仅产生竖向弯曲。在高度方向上，两类节点的变形规律基本一致，均以受压侧螺栓为中心发生转动，变形从受拉侧焊接钢板处的最大值开始，沿朝向受压侧螺栓的方向逐渐衰减。

参考文献

[1] 吴刚, 冯德成. 装配式混凝土框架节点基本性能研究进展 [J]. 建筑结构学报, 2018, 39(02): 1-16.

[2] Arden L, Bement Jr, National Research Council Forum on the 25th Anniversary of the National Earthquake Hazards Reduction Program[C], February 20, 2003.

[3] KS Elliott, Research and development in precast concrete framed structure[J]. Progress in Structural Engineering & Materials, 2000, (02): 405-428.

[4] KS Elliott, Research and development in precast concrete framed structure[J]. Progress in Structural Engineering & Materials, 2000, (02): 405-428.

[5] Priestley, M. J. Nigel and Jian Ren Tao. Seismic response of precast prestressed concrete frames with partially debonded tendons. PCI Journal, 1993, Vol. 38(1): 58-66.

[6] Nakaki S D, Englekirk R E, Plaehn J L. Ductile connectors for a precast concrete frame[J]. PCI journal, 1994, 39(5): 46-59.

[7] Ertas, Onur, Sevkett Ozden, Ductile Connections in Precast Concrete Moment Resisting Frames [J]. PCI Journal, 2006(3): 66-76.

[8] R. Vidjeapriya, K. P. Jaya. Experimental Study on Two Simple Mechanical Precast Beam-Column Connections under Reverse Cyclic Loading[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2013, 27(4): 402-414.

[9] aider Hamad Ghayeb, Hashim Abdul Razak, N.H. Ramli Sulong. Development and testing of hybrid precast concrete beam-to-column connections under cyclic loading. Construction and Building Materials, 2017, 151: 258-278.

[10] J.D. Nzabonimpa, Won-Keel Hong, Jisoon Kim. Experimental and non-linear numerical investigation of the novel detachable mechanical joints with laminated plates for composite precast beam-column joint[J]. Composite Structures, 185(2018): 286-303.

- [11] 赵斌, 吕西林, 刘海峰. 预制高强混凝土结构后浇整体式梁柱组合件抗震性能试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2004(06):22-28.
- [12] 范力. 装配式预制混凝土框架结构抗震性能研究 [D]. 上海: 同济大学, 2007.
- [13] 黄频. 端板螺栓连接钢-混凝土组合节点试验及力学性能研究 [D]. 湖南大学, 2011.
- [14] 蔡小宁. 新型预应力预制混凝土框架结构抗震能力及设计方法研究 [D]. 东南大学, 2012.
- [15] 刘建华. 新型装配式半刚性梁柱节点的抗震性能实验研究 [D]. 安徽建筑大学, 2018.
- [16] American Institute of Steel Construction: Load and Resistance Factor Design Specification for Structural Steel Buildings, Chicago, IL, 1999.
- [17] 《钢结构设计标准》: GB 50017-2017[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
- [18] 江见鲸, 陆新征, 叶列平. 混凝土结构有限元分析 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2013.
- [20] Faella C, Piluso V, Rizzano g. Structural steel semi rigid connections: theory, design, and software IM. CRC press, 1999.
- [21] 黄频. 端板螺栓连接钢-混凝土组合节点试验及力学性能研究 [D]. 湖南大学, 2011.

铁路接触网防风偏技术措施优化研究

——以大风区段为例

刘海涛, 侯磊, 李阳

中国铁路郑州局集团有限公司郑州供电段, 河南 郑州 450015

DOI:10.61369/ME.2026010006

摘 要 : 强风天气是威胁普通电气化铁路接触网安全运行的主要自然因素, 较之高速铁路系统, 普通铁路接触网在结构参数及机械特性等方面的差异性更为显著, 使其在穿越旷野、峡谷等大风区段时, 更容易产生风偏振动, 而过度摆动易致绝缘子和桥梁、杆塔等接地体之间存在的电气空气间隙被击穿, 从而造成频繁跳闸断电事故, 打乱正常的行车计划及周期, 并对运输安全和效率持续构成挑战。面对大风区段这一特殊工况, 传统防护手段在适用性和经济性显然难以契合现代化需求, 亟待从技术层面进行更深层次的优化与创新, 以提升普通电气化铁路网络的防风韧性和运行稳定性, 保障沿线运输畅通与安全。

关 键 词 : 大风区段; 铁路接触网; 防风偏技术; 优化分析

Research on Optimization of Windproof Deviation Technology Measures for Railway Contact Network — Taking Strong Wind Sections as an Example

Liu Haitao, Hou Lei, Li Yang

Zhengzhou Power Supply Section of China Railway Zhengzhou Group Co., Ltd., Zhengzhou, Henan 450015

Abstract : Strong wind weather is the main natural factor threatening the safe operation of ordinary electrified railway contact networks. Compared with high-speed railway systems, ordinary railway contact networks have more significant differences in structural parameters and mechanical characteristics, making them more prone to wind-induced vibration when crossing windy sections such as wilderness and canyons. Excessive swinging can easily cause electrical air gaps between insulators and grounding bodies such as bridges and towers to be broken down, resulting in frequent tripping and power outages, disrupting normal driving plans and cycles, and posing continuous challenges to transportation safety and efficiency. Faced with the special working condition of strong wind sections, traditional protective measures are obviously unable to meet modern needs in terms of applicability and economy. It is urgent to carry out deeper optimization and innovation at the technical level to improve the wind resistance and operational stability of ordinary electrified railway networks, and ensure smooth and safe transportation along the line.

Keywords : strong wind section; railway contact network; windproof deviation technology; optimization analysis

引言

加强大风区段接触网系统的防风偏能力, 已经变成铁路工程领域的关键性任务, 值此背景之下, 对现有防风偏技术措施进行系统梳理, 并深入优化, 旨在发展更加精细、智能的防风策略, 对于提高铁路运营的安全程度和经济效益, 具有关键的研究价值和现实意义。

一、铁路接触网防风偏技术措施优化意义分析

(一) 有助于提升普铁运营安全可靠水平

普通电气化铁路作为我国铁路网络的骨干力量, 其承担着繁

重的客货运输任务, 其运输连续性及稳定性等指标, 对于国家经济活动及人民生活而言十分关键, 而接触网属于向电力机车直接供电的无备用系统, 该设备在完整运输链条中属于薄弱环节。而在大风区段发生的接触网风偏故障, 并非是偶然的局部事

件，而是会对全网运行秩序造成威胁的系统性风险。一旦绝缘子因风偏放电而导致跳闸情况发生，就会造成区间停电，从而引发列车班次延误，亦可能会引发区间堵塞状况，继而打乱全网运行图。鉴于此，其所产生的连锁反应及间接经济损失巨大，凭借对防风偏技术措施进行优化处理，能够明显降低这类恶性停电事故的发生概率，继而从根源上遏制运营中断风险，直接提升普通铁路在面对极端天气时的韧性和生存能力^[1]。

（二）有助于增强接触网设施抗风韧性

普通铁路接触网会因设计标准不同、建设年代不同及投资成本存在差异，其内部结构和材料特性区别于常见的高速铁路，表现为具有更大的悬挂质量，且波动传播速度更低及动态响应特性不同。而传统防风偏设计常常是基于静态或准静态而计算，未能充分考虑风与结构的动态耦合效应，亦未有效综合普通铁路接触网自身所具备的结构特点，因此难免存在安全隐患。如果引入更精确的风场模拟、结构动力学分析及疲劳寿命评估，就能够针对普通铁路的典型结构形式，专门制定防风偏方案，这种精细化、定制化的提高路径，能够切实提高接触网系统自身的抗风能力即“抗风韧性”，可以保证设施在大风反复冲击的情况下，依然能够保持结构完整、功能稳定，亦可以延长设备的服役寿命。

（三）有助于降低运营维护综合成本

大风区段接触网所潜在的风偏问题，不仅是技术方面的挑战，亦是沉重的经济负担，这一问题引发的成本主要体现于两个层面，即直接层面和间接层面。直接成本包含着因风偏放电烧损绝缘子和电气设备，其需要频繁更换和维修而产生的费用，及为实施临时加固及应急抢险工作，投入的大量人力和物力；而间接成本就更为巨大，包括因列车延误、停运情况，而导致的运输损失，及为调整运行图、疏导客流和货流，产生的运营组织成本。在传统情况下，为应对风偏问题更倾向于采取“过度设计”或“事后补救”等粗放策略，尽管在短期内卓有成效，但从长期观之，其综合成本十分高昂。鉴于此，对防风偏的技术措施进行优化，其核心经济意义在于从事后被动维修，转变为事前主动防御，借助一次性精准投资，实现长期成本节约，而这种对全生命周期成本所进行的优化，对于盈利能力相对薄弱、更加注重成本效益的普通铁路运营而言，具有重大的现实价值^[2]。

二、大风区段铁路接触网防风偏技术的应用特点分析

（一）技术措施的集成化与系统性

大风区段接触网的防风偏技术的应用特殊要点在于，其具备高度集成化和系统性，在设计阶段中，工程师不再单独计算单个支柱或腕臂强度，而是会采用基于“接触网——受电弓系统动力学”的整体仿真模型进行综合计算，因此防风偏设计也成为系统性的参数优化过程。这些措施并非是简单叠加，而是经由系统设计，互为表里、相辅相成，共同构成有机的防御体系，能让整个接触网系统对外界风扰的抵抗能力实现“质”的飞跃，完成从局部加强到整体稳健的转变。

（二）动态性与智能化的深度融合

传统防风偏技术属于静态且处于被动地位的刚性抵御方式，而现阶段其应用特点正在朝着动态响应及智能化方向深入延伸，体现出从“被动抵御”向“主动感知与适应”的演进过程。而借助在重点风区布置高精度气象站及接触网动态监测装置，系统可以实时感知环境冲击及网络状态的变化，并将采集到大量数据借助物联网传送给后台数据中心，借助大数据分析和人工智能算法实现大风预警。因此，在风速接近临界值时，会提前向调度中心发出警报，从而为采取限速或停运措施提供决策支持，这种把“感知——决策——执行”闭环融入至接触网系统中的举措，极大程度上提升着接触网应对风荷载的动态适应能力，使其成为富有弹性的“智能”基础设施。

（三）高可靠性与经济性的精细平衡

在大风区段应用防风偏技术时，必须在安全可靠性及全生命周期成本两者之间寻找最佳平衡，这一特点的产生是因外部环境严峻且运营要求标准较高，一旦接触网出现风偏故障，就极易引发刮弓、钻弓等情况，甚至会造成供电中断等严重事故，鉴于此可靠性是首要目标。采用“分级、分区、分点”这一精准化的策略及基于监测数据开展预测性维护，就能够避免对全线采取“一刀切”做法所带来的巨大浪费，在保证关键区段绝对安全的同时，也让项目整体的成本效益达到最优化，促使工程技术和管艺术实现深度结合^[3]。

三、铁路接触网防风偏技术措施优化原则分析

（一）差异施策原则

差异施策原则的核心要点在于摒弃传统视角和理念下的“一刀切”设计，依据线路沿线具体的气象条件、地理环境及工程状况，开展精细化、定制化的防风偏设计工作，从而达成安全与经济的高度统一。由于普通铁路跨度较长，其所途经区域的地形地貌复杂且多变，可能会经历平原、丘陵、峡谷及风口等不同地段，而这些区域的瞬时风速、风向以及风压皆具有显著差异。鉴于此，优化设计必须建立在详细风区划分及微地形气象勘察的基础之上，而这一原则亦要求设计者需要深入现场，精准识别风险点，做到“一段一策”甚至是“一柱一策”，从而确保有限资源及有效技术集中运用到最薄弱、最危险的区段，进而从整体上提高线路的防风可靠性，有效控制工程的总投资及后期维护成本。

（二）协同匹配原则

协同匹配原则代指各类防风技术措施及其他组成部分之间需要实现相互协调、有机配合，从而形成高效的整体抗风体系。由于接触网属于精密动态系统，无论是哪一单一参数出现偏移，都极易引发“牵一发而动全身”的系统效应。因此，在进行防风偏优化设计时，必须从系统角度考虑这一联动关系。这一原则要求设计者要有整体视角，能够以高屋建瓴的总览思想借助动态仿真及精密计算，保证所有的措施皆能协同工作，在有效抑制风偏的同时保障弓网受流性能、系统安全冗余度及机械的可靠性。

（三）维保便利原则

维保便利原则即在对防风偏技术措施进行设计及选用时，需充分考虑普通铁路的运维资源、作业天窗、技术能力等现实条件，优先选择结构简单、坚固耐用、易于检查的方案，确保在其生命周期中具备可维护性及可用性。因普通铁路的运维天窗时间较短，且技术力量及装备水平无法与高铁相较，因此在进行优化时，更应倾向于模块化、标准化结构，以可调式防风拉线为例，其松紧程度能够在日常巡检时方便进行调整及复位，在材料选择方面，应突出耐腐蚀性及长效性，如采用热镀锌钢材或高强度铝合金，旨在减少因锈蚀而产生的频繁更换工作量，这一原则的本质在于将运维需求提前到设计阶段，凭借对设计进行优化以降低后期维护难度、频率及成本，进而保证防风设施在长时间使用的过程中，真正做到“建得起、用得好”。

四、铁路接触网防风偏技术措施优化路径——以大风区段为例

（一）精准风区划分，实现分级防控

实现技术优化及应用结构创新，深入调研沿线气象数据及地理数据是首要之策，依据长期气象观测情况及历史故障数据，运用GIS技术对线路开展精细化风区划分工作，从而识别特大风区、重点风区及一般风区，对于不同风区可以制定差异化的防风设计标准及技术措施清单。例如在峡谷、风口等特大风区区域，可以采用最高设计风速，综合运用防风拉线、定位管支撑等强化措施。这种“分级防控”策略能够避免全线采用“一刀切”式的过度设计举措，将有限资源及有效技术精准投放至最危险路段，提升线路整体防风安全性，实现工程经济性的最优化。

（二）强化结构设计，提升机械强度

面对大风所带来的巨大荷载时，对支持装置及锚固结构开展针对性的补强工作是核心优化途径，因此在选择相关部件时，应当优先挑选抗风型定位器，如双耳双座式及加强型腕臂、耐张型绝缘子，这些部件的机械强度和抗疲劳性能皆远远高于普通标准件。譬如，在支柱根部、腕臂底座等关键受力部位，可以采用法兰式加强型底座或增加固板，以提升连接点的稳定性及抗扭转能力。借助系统性的结构强化，能够从根本上提升接触网硬件设施

的“体质”，使其有效抵御大风的反复冲击，降低零部件发生变形以及损坏的概率，提高系统的综合可靠性。

（三）优化参数配置，增强系统稳性

一方面，在支柱容量允许的前提条件下，适当增大接触线和承力索的张力，能够有效提高线索的“绷紧”程度，从而减小线索在风作用下的偏移幅度和振动能量；另一方面，要精确计算并调整定位点的拉出值，避免在出现最大风偏时产生硬点或钻弓风险。同时，还要严格控制定位管坡度，保证定位管在无风状态下呈现水平或者稍微上扬状态，为在风压作用下可能产生的下压情况预留安全空间，借助对上述参数进行协同优化，能够提升整个系统的动态稳定性及抗干扰能力。

（四）引入智能监测，构建防控体系

推动防风手段从传统“静态防御”向“动态感知与主动防控”升级，可以在特大风区段专门布设无线智能测风装置及接触网动态监测装置，对风速、风向以及接触线拉出值、高度等关键的数据进行实时采集，利用物联网的技术把采集到的数据传回监控中心，构建起大风预警与状态评估系统，在实现超限自动报警、为调度指挥提供限速或停运的决策依据的同时，还能够借助大数据分析，实现对接网设备状态的趋势预测及健康管理，从而指导开展精准化状态维修。而通过践行“监测——预警——运维”的闭环防控体系，能够极大程度上提升运维效率和对风灾的主动防御能力，保障普通铁路大风区段长期安全运行。

五、结语

综上所述，大风区段铁路接触网防风偏技术的优化是一项综合性较强的系统工程，它囊括设计、工程及运维等多个方面，借助探讨优化原则，使得各环节协同匹配及便于维护保养，通过构建多层次、立体化的防风体系，从而达成“结构稳固、参数协调、智能预警”的理想目标。在未来优化工作中，应坚持技术性和经济性兼顾的原则，将传统刚性加固技术和现代的智能感知技术深度融合，推动防风策略发生转变，从过去静态防御朝着动态感知与主动预警的智慧防控方向发展，全面提升普通铁路在恶劣风环境下运行的安全性与可靠性，进而为铁路运输能够持续保持畅通提供坚实的保障。

参考文献

- [1] 向江海, 赵军, 张思宇, 彭其渊. 铁路编组站到发场技术作业计划编制优化方法研究 [J]. 铁道学报, 2025, 47(2): 11-23.
- [2] 宁健, 范家铭, 王鹏, 周培宇, 李博, 张新. 铁路列车运行图优化技术研究综述 [J]. 铁道运输与经济, 2025, 47(8): 1-16+29.
- [3] 董凤翔, 田明阳, 曾昊, 赵国强, 李俊松. BIM技术在铁路隧道设计优化中的研究与应用 [J]. 铁路技术创新, 2022(1): 47-53.

面向柔性制造的多轴数控机床数字化协同设计与工艺优化

郝海瑞

宜昌科技职业学院, 湖北 宜昌 443111

DOI:10.61369/ME.2026010007

摘 要 : 在世界范围内, 随着机床朝着高速、高精以及柔性方向发展, 对多轴数控机床进行数字一体化设计及加工工艺规划已经成为缩短生产周期降低产品成本的重要途径。本文以柔性制造系统 (fms) 为研究对象进行探讨分析。对多轴数控机床的数字协同化设计体系及工艺改进技术进行了深入分析。本文先从多轴数控机床在柔性化制造中所扮演的角色入手, 阐明多轴数控机床能通过对多坐标联动来完成对复杂曲面零件的加工是应对当前小批量、多品种加工模式的必然保证。

关 键 词 : 多轴数控机床; 柔性制造系统; 数字化协同设计; 工艺优化; CAD/CAM集成

Digital Collaborative Design and Process Optimization of Multi-axis CNC Machine Tools for Flexible Manufacturing

Hao Hairui

Yichang Vocational College of Science and Technology, Yichang, Hubei 443111

Abstract : Globally, as machine tools progress towards high-speed, high-precision, and flexible manufacturing, the digital integrated design and process planning of multi-axis CNC machine tools have become crucial approaches to shorten production cycles and reduce product costs. This paper explores and analyzes the Flexible Manufacturing System (FMS) as the research subject. It provides an in-depth analysis of the digital collaborative design system and process improvement technologies for multi-axis CNC machine tools. Starting with the role of multi-axis CNC machine tools in flexible manufacturing, this paper clarifies that the ability of multi-axis CNC machine tools to machine complex surface parts through multi-coordinate linkage is an essential guarantee for addressing the current small-batch, multi-variety machining mode.

Keywords : multi-axis CNC machine tools; flexible manufacturing system; digital collaborative design; process optimization; CAD/CAM integration

引言

对于制造过程的优化主要是针对工装路径规划、切削加工自动化参数优化以及在线加工监控等方面进行研究, 采用遗传算法、机器学习方法及物联系统技术手段完成上述工作, 显著提升了产品质量及生产效率; 并结合实例验证协同化设计优势及工艺优化效果。这对实现工业化转型有着重大的理论价值及实践路径。

一、面向柔性制造的多轴数控机床数字化协同设计

本文基于柔性制造单元对多轴联动数控加工中心进行数字集成化设计及工艺规划方法进行了研究分析。研究内容: 多轴数控机床在柔性化生产中所起的关键性作用的研究; 基于 cad/cam/cae 集成环境下的机械结构、控制系统、传感系统及人机界面系统之间相互协调的设计方法研究。工艺优化方法有刀路优化、自适

应工艺优化和在线加工监测; 研究方法为基于跨领域综合集成系统分析法的文献调研、实例分析及模拟实验, 在真实工程应用环境中测试协同设计和工艺优化效果。本节提出了面向柔性制造系统需求的一种新的设计方案, 采用机-电-控一体化仿真方法进行设计, 实现机床机构设计、传动设计及加工路线设计; 针对机床参数配置, 在此基础上引入人工智能算法建立刀具体积与零件轮廓的关系模型, 从而自动找出最佳的切削参数组。利用模拟试

作者简介: 郝海瑞 (1980.10-), 男, 湖北宜昌人, 宜昌科技职业学院就职, 职称: 讲师。学历: 本科。毕业单位: 湖北工学院, 机械设计制造及自动化专业, 获工学学士学位。研究方向: 《机械设计与制造》教学、研究。公开发表学术论文1篇, 参编教材3册。

验的方法预估不同方案的实施效果可大大缩短产品的开发周期。

二、面向柔性制造的多轴数控机床数字化工艺优化

（一）柔性制造系统对多轴数控机床的需求

柔性制造系统(FMS)的最大特点是具有很强的应变能力,在产品品种变换频繁、加工工艺路线发生变化、生产批量变化的情况下,采用数字设备、工业机器人、自动搬运装置及计算机控制软件组成的生产线实现柔性化生产;数控机床作为其中的核心加工单元,它能够同时进行多个方向加工,如五轴联动,在加工复杂曲面和小型零件时效率很高,能保证很高的加工精度及工件表面质量。

例如,飞机发动机叶片、机翼等零件都对零件的成形精度有较高要求。采用五面体加工中心能在一个装夹下完成多种工序,避免了专用工装的应用,加快了产品研发周期;而且其快速切削性能及自动换刀功能也能提高生产效率。能够适应柔性制造系统快速响应和稳定连续运行的要求。

（二）传统多轴数控机床的局限性

传统多轴数控机床的设计及改进存在一定的局限性,在进行设计时通常将机械部分、控制部分、传感部分、人机界面等分别进行设计,其综合效率低,响应速度慢,并不能很好地满足柔性制造过程的要求。

例如,因为缺乏对于机械结构及控制系统、检测装置之间的配合等问题的关注,导致机器人在频繁工作下发生抖动、精度下降等情况;在加工工序上,从刀路规划到切削参数设置再到加工监控都依赖于人为主观判断,并不能应对材料性质变化、刀具磨损等多种变量扰动条件下的加工需求。在生产过程中经常出现中断、超差以及返工的现象,不能有效提高产品的质量和生产效率;并且传统数控系统缺少对生产过程进行实时感知、精准判断及智能调控的能力,导致系统的响应速度和控制精度达不到现代工业的要求。

（三）数字化协同设计

1. 基于 CAD/CAM/CAE 集成平台的协同设计框架

核心是构建 CAD/CAM/CAE 集成化数字协同设计平台,实现从产品设计、加工方案、仿真验证到制造的全生命周期的数字化闭环流程,在该环节应用三维建模软件对机械装备结构、控制系统及检测系统开展虚拟设计,以确保各部件之间的几何尺寸及安装位置合理正确。在 CAM 阶段,将 CAD 设计出来的模型导入 CAM 软件生成 NC 加工代码,在仿真过程中验证是否有干涉碰撞现象,确保走刀路线合理;在 CAE 阶段,利用 ANSYS 这样的有限元分析软件进行机器结构的静力学分析、动力学分析及热分析。这样可使其具备更好的刚性和抗振性以及较好的热稳定性;而集成平台则是以数据链的形式实现 CAD/CAM/CAE 数据共享协同工作,在这种情况下就可以将设计方面的变化实时传递到制造及仿真环节中,从而极大提升设计效率与精度。

2. 机械结构、控制系统与传感系统的协同设计

为提升机床的动态响应能力和智能化程度,关键是对机床的

机械部分、工作系统以及检测装置进行整体设计,在对机床部件进行设计的过程中综合考虑其刚度、振动性能及热特性,同时采用有限元方法优化零部件位置从而减小高切削频率下的振荡和变形量。而在操作系统设计方面,则采用模块化形式将控制过程划分为采集、动作、逻辑判断以及人机交互等多个模块,并以统一接口实现各个模块的信息传递及协同工作。采用旋转速度传感器采集机床主轴运动速度实时信息;利用温度传感器采集加工过程中的温度变化信息;采用力量传感器采集切削力的信息;将上述传感器采集的各种信息由本装置进行综合分析处理。最后,智能控制系统根据现有的生产工艺进行实时优化调整切片设置值,在一定程度上可以提高产品加工质量及生产效率。

3. 自适应控制算法与智能交互界面的协同设计

智慧化改造中,协作优化及自适应方法以及人机交互设计是关键点,根据传感信息进行在线调整加工参数(主轴转速、进给量等),克服工况变化引起的波动情况。比如当机床检测出不正常的切削力时,会降低进给速度来保护刀具;当检测到主轴温度超过允许值时,会进行冷却处理来防止热变形的影响。基于可视化人机交互界面及系统自带的实时监控、故障诊断、远方控制功能,提升了设备友好性及可靠性。其颜色标识、图像显示、声光报警直观反映机械状态,便于工作人员及时发现异常情况,并做出相应处理;支持远方接入功能,能够对生产过程进行实时监控及控制,满足柔性化生产的要求。

4. 模块化设计、数字孪生模型与物联网技术的协同设计

模块化系统设计、虚拟仿真及物联网应用是确保机械装置可维修性良好并有效运行的关键所在,在此方面采用模块化的思想,将其分解成几个部分构件(如旋转刀塔、移动组件、控制系统等等),便于其替换和更新,降低故障发生后的时间损失。利用数字孪生体的数据,获取设备运行过程中的数据,建立设备的数字模型,在此基础上预测故障提前预知维修,例如刀具磨损状况,预测刀具寿命,提前安排更换周期等。借助于 Internet 技术,我们可以在传感器网络以及云计算的基础上进行实时监控及远程控制,并能够实现生产信息分析优化共享。

三、面向柔性制造的多轴数控机床数字化工艺优化

柔性制造系统已成为当今制造业中提升生产效益、降低成本及迅速响应市场需求的重要手段。作为柔性化加工的主要载体,多轴数控机床的加工过程优化对整个柔性制造系统的柔性有着重要影响。伴随产品品种及个性化需求的不断扩展,随着生产的不断发展变化,传统单一不变的生产工艺已不适应当前的生产需求,对基于柔性化生产的多轴数控机床进行工艺规划的研究势在必行,其目的是采用合理的算法及控制方法让多轴数控机床能够根据不同的生产情况自动完成加工任务。

（一）多轴数控机床的动态路径规划算法

动态路径规划是多轴数控机床进行工艺优化的基础性工作,其在加工质量和加工效率上具有重要的影响作用。但是传统路径规划方法存在固定化的参数设置,难以应对灵活化生产的更换产

品的需求，因而以 ML 技术实现的动态路径规划技术成为了一种解决途径。这类技术可以基于当前机床传感器的数据进行在线修改路径规划，在一些例子中，比如在复杂的表面，该类方法预测了刀具与零件接触点的位置，并相应地更新切削路径减少振动和误差。其中主要依靠的是 Python 和 SciPy 库中的数学计算及最优化方法实现对路径变量的循环迭代更新。实验表明使用这种动态路径规划可使加工时间提升近 2 成，并降低废料量。同时该程序也可接收机器人个性化数据反馈，允许用户根据实际进行参数设置，增强了系统的普适性；但因为算法复杂，在保障速度的前提下又要确保准确度，这对机器提出了更高的要求。

（二）刀具寿命预测与换刀策略优化

如何科学合理利用刀具寿命是实现柔性生产连续性以及降低生产成本的关键因素之一。针对不同材料加工，多轴数控机床使用的刀具磨损速率差异较大，在传统模式下固定的换刀时间容易造成过早钝化或是更换频率过高，因此基于大数据构建刀具寿命预测模型并进行应用成为一种可行方案。该方法记录历史切削过程的数据，利用回归的方法计算剩余寿命并动态修正更换刀具时刻。

例如，针对铝加工工序，在给定某切削速度下的刀具磨损量已知的前提下，则可立即发出刀具更换指令以防止产品质量下降；在 Python 的 SciPy 库中进行优化求解，即可得出实现生产成本最小化的加工参数值。经验证明，这样不仅增加了刀具寿命，也降低了由于更换设备而造成的停机时间。

（三）主轴转速与进给速度的协同优化

匹配的主轴转速及进给速度对生产质量有着重要作用，在柔性加工条件下不同种类材料的产品所需切削参数差异较大，采用传统固定值容易导致表面粗糙度过大或是时间过长等问题。为此，采取多目标优化的方法以兼顾生产效率与产品质量两方面的需求。该方案是建立目标函数，在缩短制备时间的同时增加表面平整度，并同时满足机器设备实际约束条件的前提下，使用 python 中 scipy 软件包下的最优化模块求解最优参数组合。

对于不锈钢这类难以加工的产品，在加工过程中可以通过这种智能技术实现切削参数（转速以及进给量）的动态补偿来精确控制切削力和切削温度从而有效提高产品质量。从实验结果来看，这种联合优化算法可明显缩短加工周期，并有望显著改善成品表面质量。该算法可实现机床自定义参数设置。可根据工件大小及材料性质进行参数设置以提高系统通用性；但需注意该动态化设置对算法调参能力有一定要求，必须采用边缘计算方可保证低时延。

（四）加工误差的实时补偿机制

误差对于多轴数控机精度的影响是非常大的，在柔性加工中，由于零件的不同，会导致误差叠加的发生，因此采用在线补偿技术是提高精度的一个重要方法，它是利用安装在机床上的传感系统测量出机床工作过程中的振动信号以及热变形信号还有应力变形量。并且采用闭环控制系统来调节机械臂轨迹运动。

例如，在生产细长件的过程中，机床可以预判温升造成的变形对产品的不良影响，从而在前面工序就进行切削路径补偿来防止超差。利用 Python 中 SciPy 模块就可以做这种计算，即令误差表达式最小化确保高质量产品生产出来。本文所提出的基于在线调控的方法能有效提升产品质量控制水平，并降低返工成本；同时适用于人工干预模式，在线检测位置及参数可由用户自主设置，具有广泛适用性与推广价值。但该方法对于传感器装置安装及保养的成本较高。所以我们建议用低成本技术来改造它。

（五）能源效率与生产成本的平衡优化

如何协调能源效益与加工成本成为弹性制造下的主要矛盾，在不同工件上进行加工时，多轴 NC 加工中心耗能相差很大，固定不变的设置可能导致非必要的浪费或是过多的成本投入，因此，针对这一问题我们提出以下多目标模型：不仅要求降低能耗提高经济效益，还受到机械设备本身物理约束的影响。

（六）人机交互界面的智能化升级

人机交互界面的优化也是实现柔性化制造的重要组成部分。传统的人机交互界面通常提供的是下拉菜单式的选项，并不能够支持对于复杂机械设备进行全方位的操作，所以目前对于人机交互界面上人工智能技术的应用主要是基于自然语言处理的方式，即通过语音或是文字识别用户所发出的指令，并自动设置工作参数及路线。

例如，用户用语音命令说：“我要对铝合金零件进行加工，表面粗糙度 Ra 值是 0.8”，系统将自动选取和调用优化方法设置相应工艺参数。使用 Python SciPy 库就可以完成优化计算，在最小的复杂性下完成工作，提升用户体验。经试验验证智能交互确实可有效节省时间减少人为错误率。

结束语：面向柔性制造的多轴数控机床工艺优化已取得显著进展，相信随着人工智能技术和物联网技术进一步融合，会向着更高层次的自主决策实时优化工艺的方向发展。不同学科间的交叉将更加常见，在机械工程、电脑科学以及材料科学方面的结合会产生更多新的想法，并不仅仅局限于技术的进步，在工艺上的提升同样会促进制造业向智能化及环保化发展，从而为整个世界的产业发展不断注入活力。

参考文献

- [1] 钟润阳，徐旬等. 对工业 4.0 背景下的智能制造的回顾 [J]. Engineering, 2023, 3(5):616.
[2] 陶飞，刘蔚然，刘检华等. 数字孪生及其应用探索 [J]. 计算机集成制造系统, 2018, 24(1):1.

超危大钢结构工程施工安全风险管控体系及应用研究

白尧尧, 许毅, 李俊杰, 张桂军

中国一冶集团有限公司, 湖北 武汉 430081

DOI:10.61369/ME.2026010013

摘 要 : 针对超危大钢结构工程施工安全风险高、管控难度大的技术瓶颈, 以中原高铁港展厅钢结构安装工程为研究载体, 构建“风险辨识—评估—管控—创新—应急”五位一体的施工安全风险管控体系。通过多方法融合的风险辨识、风险矩阵法分级评估, 从组织、制度、技术、过程、应急五个维度制定针对性管控措施, 结合智能监测、自动化控制等技术创新, 实现施工安全风险的全流程闭环管控。工程实践表明, 该体系有效规避了各类安全风险, 实现施工全过程零安全事故, 重大隐患整改合格率、特种作业人员持证上岗率均达 100%。研究成果为超危大钢结构工程施工安全提供了科学、系统、可操作的解决方案, 具有重要工程应用价值。

关 键 词 : 超危大工程; 钢结构; 安全风险管控; 风险辨识; 风险评估; 管控体系; 技术创新

Research on the Construction Safety Risk Management and Control System and Its Application for Extra-large and High-risk Steel Structure Projects

Bai Yaoyao, Xu Yi, Li Junjie, Zhang Guijun

China First Metallurgical Group Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430081

Abstract : Addressing the technical bottlenecks of high safety risks and challenging management and control in the construction of extra-large and high-risk steel structure projects, this study takes the steel structure installation project of the Central Plains High-Speed Rail Port Exhibition Hall as the research subject to construct a five-in-one construction safety risk management and control system, encompassing "risk identification-assessment-control-innovation-emergency response." Through multi-method integrated risk identification and risk matrix-based hierarchical assessment, targeted control measures are developed from five dimensions: organization, system, technology, process, and emergency response. Combined with technological innovations such as intelligent monitoring and automated control, a full-process closed-loop management and control of construction safety risks are achieved. Engineering practice demonstrates that this system effectively avoids various safety risks, achieving zero safety incidents throughout the construction process, with a 100% compliance rate for rectifying major hazards and a 100% certification rate for special operation personnel. The research findings provide a scientific, systematic, and operable solution for construction safety in extra-large and high-risk steel structure projects, holding significant engineering application value.

Keywords : extra-large and high-risk projects; steel structure; safety risk management and control; risk identification; risk assessment; management and control system; technological innovation

引言

超危大钢结构工程因结构复杂、施工难度大、高风险作业集中等特性, 其安全风险管控已成为工程建设领域核心难题^[1-3]。随着我国建筑工程向大跨度、复杂化方向发展, 会展中心、体育场馆等超危大钢结构工程日益增多, 施工过程涉及起重吊装、高空作业、焊接作业等多重高危环节, 安全管控难度显著提升^[4-5]。根据《危险性较大的分部分项工程安全管理规定》(住房和城乡建设部令第37号), 跨度36m及以上钢结构安装工程、单件起吊重量100kN及以上起重吊装工程均属超危大工程, 需编制专项施工方案并组织专家论证^[6]。尽管我国已出台多项法律法规与技术标准, 但超危大钢结构工程安全事故仍时有发生, 给人民生命财产安全造成重大损失^[7]。

中原高铁港展厅钢结构安装工程单榀桁架跨度99.5m、最大提升重量7940kN, 远超超危大工程界定标准, 施工过程面临起重伤害、高空坠落等多重风险。本文基于该项目施工实践, 构建科学完善的安全风险管控体系, 研究风险辨识、评估、管控及技术创新关键技术, 为同类工程提供技术参考。



图1 项目效果图

一、工程概况与安全风险辨识

（一）工程基本情况

中原高铁港数字展贸城展厅项目位于河南省郑州市航空港区，总建筑面积488866 m²，包含16个钢结构展厅。展厅采用五弦弧形管桁架+铰接钢管柱+背拉索结构形式，共计164榀屋面桁架，总重量32554t，单榀桁架跨度99.5m、重量198.5t。项目划分为四个工区同步施工，采用分区分块液压同步提升技术安装，施工周期123个工作日。工程核心超危大风险点包括：桁架跨度超36m限值，液压同步提升设备属非常规起重设备且提升重量超100kN限值，施工过程高危作业集中，安全管控难度极大。

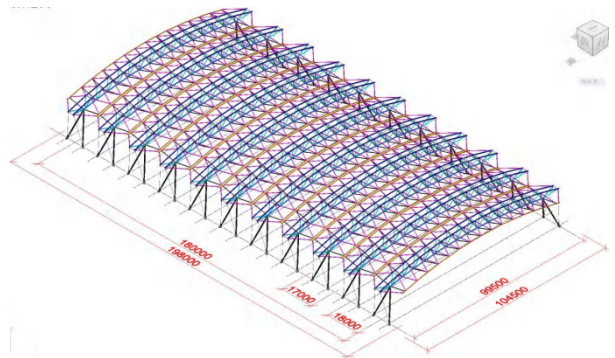


图2 单个标准展厅钢桁架主结构模型图

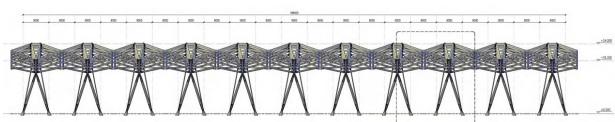


图3（a）单个标准展厅横向立面图

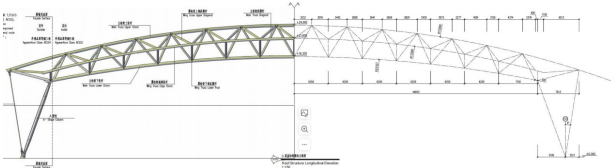


图3（b）单个标准展厅纵向立面图

（二）安全风险辨识

采用文献研究法、现场调研法、专家访谈法、工作分解结构法，对施工全过程进行系统风险辨识，将风险划分为6个一级风险单元、若干二级风险单元，共辨识出247项安全风险，如下表：

表1 安全风险辨识结果表

一级风险单元	风险数量（项）	核心风险内容	I级重大风险（关键项）
体系管理风险	32	专项方案编制、论证、安全技术交底、特种作业持证、安全生产责任制落实等	未编制专项施工方案、专项方案未论证、特种作业人员无证上岗
文明施工风险	28	施工现场封闭管理、扬尘污染控制、材料堆放规范、防火管理、现场办公与住宿合规等	易燃易爆物品未分类储藏、未设置消防通道和消防水源、动火作业未办理审批手续
起重吊装风险	45	起重机械制造许可证、钢丝绳磨损状态、吊装荷载控制、吊点设置合理性、同步提升稳定性、起重司机持证上岗等	起重机械无制造许可证、钢丝绳报废标准超标、吊装超载、同步提升失控
施工机具风险	36	电焊机漏电保护器安装、气瓶使用合规、运输车辆手续齐全、空压机防护罩设置、小型起重机具验收等	司机未经专门培训无操作证、空压机未履行验收程序、小型起重机具未验收
高处作业风险	48	高空坠落防护、物体打击防范、临边防护到位、安全网搭设合规、洞口防护措施、攀登作业规范等	高空坠落、临边防护不到位、洞口防护措施缺失
施工用电风险	58	临时用电三级配电二级保护、漏电保护器有效性、电线敷设规范、配电箱安装合规、外电防护措施等	临时用电未采用三级配电二级保护、漏电保护器失效、外电防护措施不到位

（三）风险评估

采用风险矩阵法进行风险分级，横坐标为风险发生可能性（分为极高、高、中、低、极低5级），纵坐标为后果严重程度（分为极其严重、严重、较严重、一般、轻微5级）^[9]，将风险划分为I—IV级，风险评估见下表：

表2 风险评估结果表

风险等级	风险数量（项）	占比	管控策略
I级（重大风险）	32	12.96%	专项管控，明确责任人和管控时限，实行挂牌督办
II级（较大风险）	68	27.53%	重点管控，加强日常巡查与动态监测
III级（一般风险）	87	35.22%	常规管控，纳入日常安全管理体系
IV级（低风险）	60	24.29%	常规管控，定期排查维护

二、超危大钢结构工程施工安全风险管控体系构建

（一）管控体系框架

构建“组织保障—制度保障—技术保障—过程管控—应急保障”五位一体的管控体系，形成全员参与、全过程控制、全方位覆盖的安全风险管控格局^[10]，实现风险从辨识到应急的全链条闭环管理。

（二）组织保障措施

1. 组织架构层面：设立三级安全管理组织机构，以项目经理为总指挥，常务经理、项目总工、安全总监为副指挥，各部门负责人、工区负责人、专职安全员为核心成员。明确责任分工：项目经理为安全生产第一责任人，对整体安全负总责；常务经理协助统筹安全管理；项目总工负责安全技术保障；安全总监主导日常风险管控监督协调；各部门及工区负责人对分管领域风险负直接责任；专职安全员负责现场巡查管控，形成“决策-执行-监督-落地”责任闭环。

2. 团队配置层面：实行“工区+总部”双重专职安全员配置，每个工区配备4名专职安全员，项目总部增配6名，所有安全管理人员均具备相应资质与实操经验。严格落实特种作业人员持证上岗制度，涵盖焊工、起重工、信号司索工、电工等关键岗位，212名特种作业人员100%持证上岗。建立常态化培训机制，定期开展专业培训与交流，提升管理团队风险处置能力。

（三）制度保障措施

1. 安全生产责任制：建立全员覆盖的安全责任体系，明确从项目经理到一线作业人员的岗位安全职责，签订责任书界定安全目标、责任范围及考核标准。将安全绩效与薪酬直接挂钩，实行奖惩制度，定期考核责任落实情况，考核结果作为评优、晋升重要依据。

2. 风险管控制度：建立“辨识-评估-管控-隐患治理”全链条机制，每月开展全面风险辨识，每周开展重点风险辨识，重大施工节点或条件变化时进行专项辨识，动态更新管控清单。隐患治理实行“发现-登记-整改-复查-销号”闭环管理，一般隐患24小时内整改，重大隐患立即整改。

3. 专项方案管理制度：严格执行超危大工程专项施工方案“编制-审核-论证-审批”流程，由项目总工组织编制，经公司技术负责人审核、5名及以上专家论证、监理总监理工程师审批、建设单位项目负责人签字确认后方可实施；方案实施前需技术交底，实施中不得擅自修改，确需调整的需重新履行全套程序。

4. 配套管理制度：完善安全技术交底、安全检查、安全教育培训、特种作业人员管理、应急管理、施工用电管理、动火作业管理等专项制度，形成全方位、无死角的制度体系。

（四）技术保障措施

1. 起重吊装安全技术：

（1）设备选型与检验：选用合规起重机械与提升设备，进场前严格审查制造许可证、产品合格证等资料，对液压提升器、钢绞线等关键设备进行荷载试验，合格后方可使用，建立设备台账并定期维护。

（2）吊点与吊具设计：根据桁架受力特点优化吊点布置，经有限元分析验证，吊具选用高强度材料，进场前检验并定期检查。

（3）同步提升控制：采用液压同步控制系统，实时监测各吊点位移与受力，制定设备故障、同步失控等应急处置措施。

（4）吊装警戒与监护：作业区域设置警戒线与警示标志，配备专职警戒人员，大型吊装设专人监护。

2. 高处作业安全技术：

（1）安全防护设施：搭设安全操作平台、防护栏杆（高度 $\geq 1.2\text{m}$ ）、安全生命线，安全网搭设符合规范，操作平台承载力经计算验证。

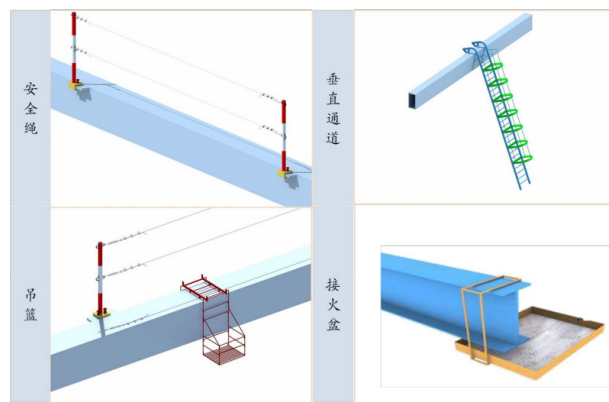


图4 安全防护设施

（2）个人防护用品：作业人员佩戴合格安全带（高挂低用）、安全帽、防滑鞋，定期检查更换损坏、过期用品。

（3）作业平台设置：桁架拼装与提升过程中设置临时作业平台与挂篮，经承载力验证，安装牢固并配备防护设施。

3. 焊接作业安全技术：

（1）焊接防火措施：作业区域配备灭火器材与接火盆，清除周围易燃物，动火作业办理审批手续并配备监护人。

（2）焊接用电安全：电焊机单独设置开关箱并配备漏电保护器，一次侧电源线 $\leq 5\text{m}$ ，二次侧电源线 $\leq 30\text{m}$ ，外壳接地接零可靠。

（3）焊接烟气防护：设置焊烟收集器，作业人员佩戴防毒面具。

4. 施工用电安全技术：

（1）临时用电布置：采用三级配电、二级保护系统，总配电箱靠近电源，分配电箱位于设备集中区域，开关箱与用电设备距离 $\leq 3\text{m}$ 。

（2）线路敷设：电缆埋地深度 $\geq 0.7\text{m}$ 或架空敷设，与建筑物、脚手架保持安全距离，电线绝缘良好、接头牢固。

（3）接地接零保护：采用TN-S接零保护系统，保护零线单独敷设，接地电阻 $\leq 4\Omega$ ，重复接地电阻 $\leq 10\Omega$ ，定期检测。

（五）过程管控措施

1. 安全技术交底：专项方案实施前，编制人员向现场管理人员交底，现场管理人员向作业人员交底，内容涵盖施工工艺、安全风险、管控措施、应急处置，采用书面形式签字确认，重点部位与关键工序进行专项交底。

2. 安全检查：实行日常巡查、定期检查、专项检查相结合的制度。专职安全员每日巡查，项目经理每周组织全面检查，每月开展专项检查，对发现问题下达整改通知并跟踪落实。

3. 安全教育培训：对进场人员进行公司级、项目级、班组级三级安全教育培训，内容包括法律法规、管理制度、技术知识、应急处置，培训合格后方可上岗。采用新技术、新工艺时进行专

4. 动态风险监测：对起重吊装、高处作业等关键环节进行动态监测，采用位移传感器、应力传感器、风速传感器等设备，实时监测结构变形、受力及环境参数，数据实时传输至中央控制室，建立预警机制。

1. 应急组织体系：建立应急救援指挥部，下设抢险救灾组、协调联络组、后勤保障组、安全保卫组、医疗救治组，明确各组职责，由项目经理任总指挥，常务经理、项目总工程师、安全总监任副总指挥。

3. 应急物资准备：配备挖掘机、起重机、发电机、潜水泵、灭火器、急救箱、应急灯、对讲机等物资，建立台账并定期检查，明确存放位置与管理人員。

三、风险管控技术创新

采用超危大钢结构工程施工安全智能监测系统,集成位移监测、应力监测、环境监测、视频监控功能,采用物联网技术实现传感器与中央控制室实时联动,监测数据更新频率 10Hz,预警响应时间 ≤ 3 秒,具备实时监测、智能预警、数据分析、视频联动等功能。



如图6、图7所示,采用了液压同步提升自动化控制技术和模

A photograph showing a row of industrial elevators in a factory setting. Each elevator has a red safety cover with the text "业升机电" (Yesheng Electric) and "2017/10/2" printed on it. The elevators are made of metal and have a complex mechanical structure.

图6(a) 液压提升器



图6(b) 液压泵源系统

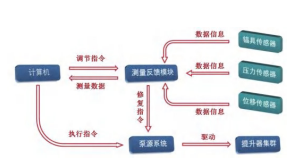


图7(a) 计算机控制原理

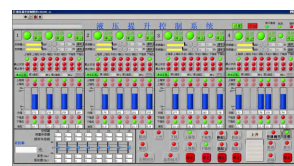


图7(b) 计算机控制人机界面

采用了高处作业智能防护系统,包括智能安全绳、智能安全帽、人员定位系统等。智能安全绳内置拉力传感器,当作业人员发生坠落时自动锁定并报警;智能安全帽集成定位、通话、报警功能;人员定位系统采用 UWB 技术,定位精度 $\pm 0.5\text{m}$,靠近危险区域自动报警。

采用了焊接作业安全智能控制技术,包括焊接烟气智能净化系统、焊接防火智能监测系统等。焊接烟气智能净化系统根据烟气浓度自动调整净化功率,净化效率达95%以上;焊接防火智能监测系统实时监测温度与烟雾浓度,异常时自动报警并启动灭火装置。

四、工程应用效果

中原高铁港展厅钢结构安装工程通过应用构建的超危大钢结构工程施工安全风险管控体系,圆满完成16个刚桁架屋面的提升安装任务,并取得了良好的应用效果:

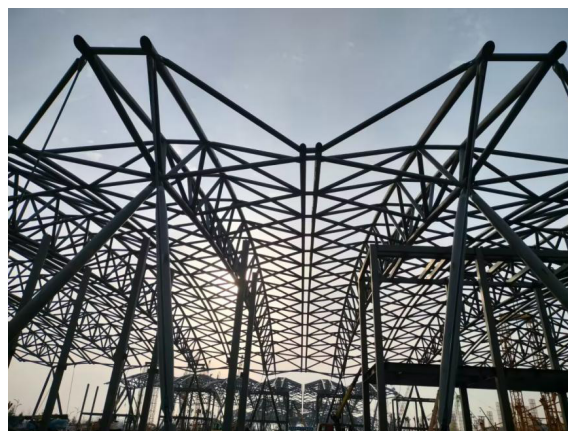


图8 屋面钢桁架提升后现场图

（一）安全目标实现

施工过程中未发生任何安全事故，实现了责任工亡率、重伤率、重大火灾事故发生率、群死群伤事故发生率等安全目标均为0的要求。特种作业人员持证上岗率100%，重大隐患整改合格率100%，一般隐患整改及时率100%，安全技术交底覆盖率100%。

（二）风险管控有效

通过风险辨识与评估，明确了各项安全风险管控重点，采取针对性管控措施，Ⅰ级风险全部得到有效控制，Ⅱ级风险得到重点管控，未发生风险失控情况。施工过程中共排查发现各类隐患326项，其中重大隐患8项，全部整改完成，隐患整改合格率100%。

（三）作业环境改善

通过采用焊烟净化技术、智能通风设备等，改善了作业环境，焊接作业区域烟尘浓度符合国家标准（ $\leq 10\text{mg}/\text{m}^3$ ），高空作业安全防护设施完善，作业人员安全感显著提升。施工现场扬尘污染得到有效控制，扬尘浓度监测数据符合环保要求。

（四）管理水平提升

通过建立完善的安全管理制度与管控体系，规范了安全管理流程，提高了安全管理效率与水平。安全管理人员的风险识别能力、应急处置能力显著提升，作业人员的安全意识、操作技能明显提高。项目安全管理经验得到了建设单位、监理单位的高度认可。

障-制度保障-技术保障-过程管控-应急保障”五位一体的超危大钢结构工程施工安全风险管控体系，研究了风险辨识、评估、管控、创新与应急等关键技术，得出以下结论：

1.采用多种方法全面辨识出超危大钢结构工程施工过程中的247项安全风险，涵盖6个类别，为风险管控提供了基础。

2.采用风险矩阵法对安全风险进行评估与分级，明确了不同等级风险的管控策略，提高了风险管控的针对性。

3.从五个维度构建了超危大钢结构工程施工安全风险管控体系，形成了全员参与、全过程控制、全方位覆盖的安全风险管控格局。

4.研发了多项风险管控技术创新，提高了安全风险管控的智能化、自动化水平。

工程实践表明，该管控体系有效控制了超危大钢结构工程的施工安全风险，实现了施工全过程零安全事故，具有重要的工程应用价值。未来研究方向：一是进一步完善风险辨识与评估方法，引入大数据、人工智能等技术，提高风险辨识的全面性与评估的准确性；二是加强智能化、信息化技术在安全风险管控中的应用，研发更加先进的智能监测与预警系统；三是开展超危大钢结构工程施工安全风险管控标准化研究，制定相关标准与规范。

五、结论与展望

本文基于中原高铁港展厅钢结构安装工程，构建了“组织保

参考文献

- [1]王树坤，李忠献.超危大工程施工安全风险管控研究进展[J].建筑科学与工程学报，2022，39(2): 1-12.
- [2]刘志强，张宏.超危大钢结构工程施工安全管理[J].施工技术，2020，49(11): 1-5.
- [3]李猛，王静.大跨度钢结构施工安全风险分析与管控[J].建筑安全，2021，36(7): 23-27.
- [4]张兴虎，刘芳.超危大工程安全法规体系研究[J].工程管理学报，2020，34(3): 134-138.
- [5]王强，李娟.大跨度会展中心钢结构施工安全风险管控[J].钢结构，2021，36(8): 112-116.
- [6]住房和城乡建设部.危险性较大的分部分项工程安全管理规定[S]. 2018.
- [7]李明，王艳.超危大工程施工安全事故统计分析与预防[J].中国安全科学学报，2021，31(5): 165-171.
- [8]李国强，周健.建设工程安全风险辨识方法研究[J].建筑结构学报，2019，40(8): 1-9.
- [9]刘学武，王勇.风险矩阵法在超危大工程安全评估中的应用[J].施工技术，2021，50(8): 76-79.
- [10]王仕统，陈驹.超危大工程施工安全管控体系构建与应用[J].建筑施工，2021，43(7): 1345-1348.

工程机械机电设备自动调试技术探讨

张俊

桃源县宝源车用气经营有限责任公司，湖南 常德 415700

DOI:10.61369/ME.2026010014

摘 要： 调试工作作为工程机械机电设备投用前的关键工序，直接关系到设备运行的稳定性、作业精度及使用安全性。而自动调试技术通过运用人工智能算法，如机器学习、深度学习等，能够实现对机电设备运行数据的高效分析，精准识别设备状态，优化调试流程。文章从工程机械机电设备自动调试技术的重要性出发，系统分析当前工程机械机电设备自动调试常见的技术问题，并提出针对性的优化策略，希望能够为工程机械领域机电设备调试环节的技术革新与质量提升提供理论参考与实践借鉴。

关 键 词： 工程机械；机电设备；自动调试技术

Discussion on Automatic Debugging Technology for Electromechanical Equipment in Construction Machinery

Zhang Jun

Taoyuan Baoyuan Vehicle Gas Operation Co., Ltd., Changde, Hunan 415700

Abstract： Debugging, as a critical process before the commissioning of electromechanical equipment in construction machinery, directly relates to the stability, operational accuracy, and safety of the equipment. Automatic debugging technology, by utilizing artificial intelligence algorithms such as machine learning and deep learning, enables efficient analysis of operational data from electromechanical equipment, accurately identifies equipment status, and optimizes the debugging process. This article starts from the importance of automatic debugging technology for electromechanical equipment in construction machinery, systematically analyzes common technical issues in current automatic debugging practices, and proposes targeted optimization strategies. It aims to provide theoretical references and practical insights for technological innovation and quality improvement in the debugging phase of electromechanical equipment within the construction machinery sector.

Keywords： construction machinery; electromechanical equipment; automatic debugging technology

引言

挖掘机、塔式起重机、装载机等工程机械的核心竞争力，在很大程度上取决于其机电设备的集成性能。调试环节作为机电设备从生产制造到实际投用的关键衔接点，能够通过对设备各项运行参数的检测、分析、调整与验证，确保设备各项性能指标完全契合设计标准及实际作业需求。随着工程机械行业向规模化生产、高精度作业、智能化运维方向转型，传统依赖操作人员经验的人工调试模式已难以适配行业发展需求。故此，深入探究工程机械机电设备自动调试技术，对于推动工程机械行业智能制造水平升级、增强设备核心竞争力具有重要的现实意义。

一、工程机械机电设备自动调试技术的重要性

（一）保障设备运行稳定性与作业安全性

工程机械机电设备作为融合机械传动、液压执行、电气控制等多系统的复杂集成装置，其运行状态直接决定整机作业效能与操作安全性，而自动调试技术正是保障设备稳定安全运行的核心技术支撑。该技术借助系统化的参数检测流程与精准化校准手段，能够从源头化解设备各组件间的参数不匹配问题，有效规避因机械、液压与电气系统协同失衡所引发的各类运行故障，筑牢

设备运行的前期防护防线。相较于传统人工调试模式对操作人员经验的高度依赖，自动调试技术依托标准化作业流程，可实现对设备隐性缺陷的精准识别与排查，无需借助操作人员主观判断，就能完成动力输出阈值、动作响应区间等关键技术指标的规范化调整，有效提升调试工作的精准度与客观性^[1]。这种标准化调试模式能够确保设备各项性能参数始终维持在设计安全区间内，显著减少设备投用后因调试疏漏导致的停机故障与安全隐患，为工程机械在复杂工况下的连续稳定作业提供可靠技术保障，从根本上强化设备运行的稳定性，提升操作过程的安全系数。

（二）推动行业生产模式升级与效率提升

自动调试技术的普及应用，对工程机械行业生产模式转型起到关键推动作用，其核心价值集中体现为对行业生产效率与规模化运营水平的双重提升。传统人工调试模式受操作人员个体经验、实时操作状态等多重因素制约，不仅单台设备调试周期冗长，且同批次设备的调试精度难以实现统一标准，这一短板严重制约了大规模生产线的运转节拍与产能释放。自动调试技术通过构建闭环式智能管控体系，实现调试流程的自主化、规范化推进，既能大幅压缩单台设备调试耗时，又能彻底消除人为操作差异引发的参数波动，确保同批次设备性能指标的一致性与稳定性。这种标准化调试模式可与规模化生产流程高效适配，优化生产各环节的衔接效率，有效破解因调试环节滞后形成的生产瓶颈。另外，自动调试技术能够实现调试全流程数据的实时采集、同步归档与精准分析，为生产流程优化、设备设计迭代升级提供可靠的数据支撑，推动工程机械行业逐步摆脱传统经验型生产模式，向智能化、标准化生产转型，进而全面提升行业整体生产效率与核心竞争力。

（三）降低全生命周期成本与资源消耗

自动调试技术凭借对调试全流程的精准管控能力，能够有效降低工程机械机电设备全生命周期的成本投入与资源消耗，兼具显著的经济效益与生态价值，为行业绿色低碳发展提供重要支撑。在生产调试环节，该技术可大幅缩减人工调试的人力配置需求，同时通过精准化参数校准，降低因调试失误引发的零部件损耗，从源头减少资源浪费与返工整改所产生的额外成本，优化生产阶段成本管控成效。设备投用后，经自动调试校准的设备各组件参数匹配度更高，能够有效降低机械、液压、电气等系统运行过程中的能耗与部件磨损，延长设备整机使用寿命，减少后期运维保养的频次与费用投入，同时规避因设备故障停机造成的生产中断损失，进一步压缩全生命周期成本。相较于传统人工调试易产生的参数偏差问题，自动调试形成的标准化、可追溯数据档案，可为后期运维工作提供精准数据参考，助力运维人员快速定位故障根源、制定维修方案，缩短维修周期，持续降低运维成本。与此同时，设备运行效率的提升与能耗的精准管控，能够减少能源消耗总量与污染物排放强度，高度契合工程机械行业绿色低碳的发展导向，实现经济效益与生态效益的协同提升，推动行业高质量发展。

二、当前工程机械机电设备自动调试常见的技术问题

（一）多系统参数协同适配性不足

工程机械机电设备由机械传动、液压执行、电气控制等多个子系统交织耦合构成，各系统参数存在紧密的联动关联，这一核心特性对自动调试技术的跨系统协同适配能力提出了极高要求。当前主流自动调试技术多聚焦于单一子系统的参数检测与精准校准，缺乏对各子系统间参数联动逻辑的深度剖析与统筹考量，容易出现调试后各子系统独立性能达标，但设备整体协同运行失衡的问题。部分自动调试算法对多系统参数的耦合逻辑解析不够全面深入，无法精准捕捉不同作业工况下各系统参数的动态适配规律，仅依靠固定阈值完成参数校准，难以适配工程机械复杂多变的实际作业场景。这种单一化、碎片化的调试逻辑，会导致设备

运行过程中出现动力输出与动作执行不同步、能耗消耗与作业效率失衡等问题，不仅大幅削弱自动调试技术的实际应用效果，还可能埋下设备运行安全隐患，进而制约自动调试技术对设备整体性能的提升效能。

（二）智能感知与数据采集精准度欠缺

智能感知与数据采集作为自动调试技术的核心支撑环节，其数据精准度直接决定调试结果的可靠性与有效性，而当前该环节仍存在诸多亟待突破的技术瓶颈，制约着自动调试技术的效能释放。一方面，部分传感器设备对工程机械复杂作业工况的适应能力不足，在强振动、高温、高粉尘等恶劣作业环境中，极易出现信号干扰、数据漂移等异常情况，导致采集的参数数据与设备实际运行状态存在偏差，影响数据的真实性与可用性。另一方面，数据采集系统的兼容性与多源数据整合能力存在局限，不同品牌、型号的机电设备组件对应差异化的数据传输协议，现有采集系统难以实现全要素数据的无缝对接与统一归集，易形成分散孤立的数据孤岛，阻碍跨组件、跨系统的数据协同应用。与此同时，数据预处理算法的优化程度不足，对采集数据中夹杂的噪声、异常值过滤不够彻底，无法为后续参数分析、精准校准提供高质量的数据支撑，间接降低了自动调试的整体精度与运行稳定性，成为技术落地的重要阻碍。

（三）调试系统通用性与扩展性薄弱

工程机械领域机型品类多样、规格参数繁杂，不同机型的机电设备在结构设计、核心性能参数、控制逻辑架构等方面存在显著差异，这一行业特性对自动调试系统的通用性适配能力与扩展兼容性提出了较高要求。当前市面上多数自动调试系统为特定机型定制化开发，软硬件配置缺乏统一的标准化设计，对不同机型、不同规格设备的适配能力薄弱。当更换调试对象时，需要开展大量的系统架构重构与核心参数重置工作，不仅增加了调试环节的经济成本，还大幅延长了调试周期，降低了作业效率。另外，自动调试系统的扩展能力存在明显不足，难以兼容新型机电组件、先进控制算法及检测技术的升级迭代需求。随着工程机械智能化水平持续提升，新型智能传感器、高精度智能控制单元的应用愈发广泛，而现有自动调试系统无法快速整合新增技术模块，易陷入技术滞后的困境。这种在通用性与扩展性上的双重短板，严重限制了自动调试技术在工程机械行业的规模化推广与深度落地应用，进而制约了全行业整体调试技术水平的提升与迭代升级。

三、工程机械机电设备自动调试技术问题的优化策略

（一）构建多系统协同适配调试体系

针对自动调试技术在多系统参数协同适配性方面的不足，相关技术研发与应用工作需彻底突破单一子系统独立调试的固有局限，以各子系统之间的耦合逻辑作为核心指引，构建全范围协同的适配调试体系，实现调试目标从局部参数校准过渡至设备整体性能优化。

首先需深入开展对机械传动、液压执行、电气控制这三大核心子系统参数联动关系的系统分析，技术研发人员需整体梳理不同作业工况下各系统参数的动态响应规律与彼此作用机制，将这些耦合逻辑精确嵌入调试算法底层架构的设计中，摒弃传统固定阈值校准的僵化模式，构建可进行动态适配的算法框架，增加参

数校准的灵活性及适配性。

其次，搭建高保真多系统协同仿真平台，此平台可精准还原设备实际开展作业时的参数交互场景，精准锁定各系统参数的最佳匹配区间，事先预估单一参数调整对设备整体运转状态的连锁后果，从源头上防止多系统协同失衡问题产生，研发团队还应重构调试流程的整体架构，以多系统协同检测与联动校准作为核心要点，同步促进各子系统参数的收集、分析及调整工作，强化调试操作中对参数耦合关系的实时管理与动态修正，保障各系统参数调整同步协同、精准契合。最后，技术体系需持续推动调试算法迭代升级，增进系统对复杂工况、极端作业场景的自适应本领，保障调试参数能依据设备实时运行状态动态优化修正，切实实现各子系统协同互动的最佳功效，让自动调试技术提升设备综合性能的作用得到充分施展，填补传统调试模式在系统协同管控中的固有漏洞。

（二）强化智能感知与数据采集精准管控

智能感知与数据采集是自动调试技术的核心关键，其采集数据的精准程度直接决定调试结果的可靠及稳定性能，自动调试技术研发工作需构建全链条精准把控机制，全面提升数据采集的质量，为自动调试技术夯实运行根基。针对感知设备优化，研发人员应结合工程机械复杂恶劣作业场景的适配条件，优先采用抗振动、耐高温、防粉尘、抗电磁干扰能力突出的高精度传感器，合理规划传感器的安装布局^[2]，合理缩短信号传输路径，尽最大可能降低外界环境对信号采集的干扰，保障采集的数据能真切、精准地呈现设备实际的运行状态。

在系统兼容性提升方面，行业主管部门与研发机构要牵头制订统一的行业数据传输协议及接口标准，破除不同品牌、不同型号机电设备组件间的数据通信隔阂，研发团队创建拥有全要素数据整合能力的智能采集平台，达成各类参数数据的无障碍对接、即时传输与集中汇聚，从关键处攻克数据孤岛难题，为跨系统数据协同应用提供后盾支持^[3]。在数据预处理阶段，技术研发团队要不断迭代优化自适应滤波算法以及异常值智能识别模型，加强对采集数据中的噪声、偏差值、缺失值精准筛选和补全纠正，显著改善数据的纯度与完整水平，形成数据采集质量实时验证体系，^[4]依靠双向数据对查、多维度交互验证等举措，对数据的精准度、完整性实施动态核查，及时察觉并排除传感器故障、传输链路异常等问题，为后续参数分析、校准决策提供高质量的数据后盾，加固自动调试技术的运行根基。

（三）提升调试系统通用性与扩展能力

针对当前调试系统普遍存在的通用性差、扩展性弱的问题，

技术研发团队需要将标准化设计作为核心要点，依靠柔性化架构作支撑，建设能适应多样机型、契合技术迭代的智能调试系统，从源头打破机型适配的局限以及技术升级的瓶颈。

在系统设计层面，研发人员要整体采用软硬件模块化、标准化的开发手段，将调试系统解析为参数采集、算法分析、精准执行、数据存储等独立功能模块，同时搭建一套标准化模块资源库，各功能模块可按照不同机型的调试需求灵活组合、按需配置，极大减少针对特定机型的定制开发量。在更换调试对象时，工作人员只需要调整模块的组合形式以及核心参数设置，就能迅速匹配新机型，极大减少调试环节的经济与时间成本支出，在系统架构实施优化的环节，研发团队需要预留相当的技术迭代接口与功能扩展空间，采用开放式的架构设计理念，保障新型机电组件、智能控制算法、先进检测技术能快速融入当前的调试系统，无需对系统实施整体的重新构建，有效防止技术升级引起的系统滞后困境，保障系统长期跟进行业技术发展节奏。调整模块的组合形式以及核心参数设置，就能迅速匹配新机型，极大地减少调试环节的经济与时间成本支出，在系统架构实施优化的环节，研发团队需要预留相当的技术迭代接口与功能扩展空间，采用开放式的架构设计理念，保障新型机电组件、智能控制算法、先进检测技术能快速融入当前的调试系统，无需对系统实施整体的重新构建，有效防止技术升级引起的系统滞后困境，保障系统长期跟进行业技术发展节奏^[5]。测试团队要进一步加强系统兼容性全场景验证，以跨机型、跨作业场景的稳定性测试为手段，保证优化后的调试系统可在多种场景下稳定运转，助力自动调试技术在工程机械行业的大规模传播与深度运用，助力行业整体调试水平实现跨越式提升。

四、结束语

综上所述，工程机械机电设备自动调试技术是行业实现智能制造转型、提升核心竞争力的重要支撑。当前该技术在多系统协同适配、数据采集精准度、系统通用性等方面仍存在短板，需要通过协同体系构建、感知数据管控、系统柔性升级等多个维度，推动自动调试技术从单一功能实现向综合效能提升转型。未来，需持续深化技术研发与实践应用的协同联动，完善技术体系的完整性与可靠性，从而为行业高质量发展注入持久动力，同时为相关技术领域的应用拓展提供有益借鉴。

参考文献

- [1]王新伟,李卫社.工程机械中机电设备安装与调试常见的技术问题[J].模具制造,2025,25(04):177-179.
- [2]李勇.工程机械中机电设备安装与调试工作存在的技术问题研究[J].中国设备工程,2024,(14):218-220.
- [3]任国成.工程机械机电设备自动调试技术研究[J].现代制造技术与装备,2024,60(07):59-61.
- [4]周柏青.工程机械中机电设备调试技术研究[J].产品可靠性报告,2024,(01):79-81.
- [5]林克任.试论工程机械中机电设备安装及调试技术[J].工程建设与设计,2022,(06):110-112.

智能制造背景下机电一体化技术的发展探索

史正元, 熊正凯, 高文静*

沧州职业技术学院(智能飞控与机电集成研发中心), 河北 沧州 061000

DOI:10.61369/ME.2026010016

摘 要 : 在智能制造驱动下的制造业转型升级浪潮中, 机电一体化技术作为多学科融合发展的突出成就, 跨越了机械和电子分离的束缚, 是实现智能制造高效精准灵活生产的技术基础, 立足于智能制造的本质诉求, 摒弃繁冗泛滥的阐述, 深挖机电一体化技术本身的具体内涵和发展现状, 探究其在智能制造中的深度应用方法, 剖析目前发展所存在的问题并提出有针对性的改善方案, 预测今后的发展趋势, 为机电一体化技术和智能制造深度融合提供一定的理论依据, 使制造业向着智能化、高端化的方向持续前行。

关 键 词 : 智能制造; 机电一体化; 技术融合; 发展路径; 优化策略

Exploration of the Development of Mechatronics Technology in the Context of Intelligent Manufacturing

Shi Zhengyuan, Xiong Zhengkai, Gao Wenjing*

Cangzhou Vocational & Technical College (Intelligent Flight Control and Mechatronics Integration R&D Center),
Cangzhou, Hebei 061000

Abstract : Amidst the wave of manufacturing transformation and upgrading driven by intelligent manufacturing, mechatronics technology, as an outstanding achievement in the interdisciplinary integration and development, transcends the constraints of mechanical and electronic separation. It serves as the technological foundation for achieving efficient, precise, and flexible production in intelligent manufacturing. Based on the fundamental demands of intelligent manufacturing, this paper abandons redundant and excessive explanations, delves into the specific connotations and current development status of mechatronics technology itself, explores its in-depth application methods in intelligent manufacturing, analyzes the existing problems in its current development, proposes targeted improvement solutions, and predicts future development trends. It provides a certain theoretical basis for the deep integration of mechatronics technology and intelligent manufacturing, enabling the manufacturing industry to continuously move towards intelligence and high-end development.

Keywords : intelligent manufacturing; mechatronics; technological integration; development path; optimization strategies

引言

科技不断发展进步中, 智能制造已经成为当前发展我国制造业质量的关键路径, 想要落实智能制造的根本举措就是运用各种科学技术在智能制造整个过程中做到所有的作业环节都能够被操控和优化。机电一体化是多门类多专业多种技术叠加而成的集合型技术, 不是简单的将各门类集成就可以形成的, 要想发挥最佳性能, 就需要将各个门类的技术系统融合在一起, 才能达到相辅相成的效果, 以此让各种机电一体化设备可以自主地去做出判断并完成操作。基于以上原因, 在智能化生产的大环境下, 传统的机电一体化技术很难满足生产和管理对于生产的要求, 对其本身的技术创新以及发展模式均需要做出改动。

一、智能制造与机电一体化技术的核心关联

(一) 机电一体化技术的核心内涵

机电一体化技术是把机械、电子控制、信息三个子系统有机

地结合起来而形成的系统技术, 突破了传统的机械—电子系统壁垒, 多学科深度交融协同, 并以机械系统为主体, 融入传感、执行、控制等电子模块, 运用软件、算法和网络通信等技术手段, 实现机电产品的性能提升与功能完善; 相较于传统机械技术, 机

作者简介:

史正元(1991.01—), 男, 汉族, 河北沧州人, 硕士研究生学历, 职称: 中级工程师, 研究方向: 机电一体化;

熊正凯(1987.06—), 男, 汉族, 山东泰安人, 硕士研究生学历, 讲师职称, 主要研究方向为机电一体化。

通讯作者: 高文静(1984.01—), 女, 汉族人, 河北黄骅市人, 本科学历, 助教职称, 研究方向为电气自动化。

电一体化技术具有集成性、智能性以及灵活性特点,可满足设备自动化运转及智能化调控需求,有效匹配智能制造工作的基本需要,机电一体化技术主要包括机械、传感、控制、信息四大部分,这四部分互相协调形成闭环智能运转体系,为智能制造落地实现提供可靠技术保障。^[1]

（二）二者的深度融合逻辑

智能制造和机电一体化相辅相成、相依互促,无法独立发展。智能制造的根本目的是让制造过程更加智能化、自动化、灵活化,在此过程中离不开机电一体化技术的支撑,正是由于有了机电一体化技术才使智能制造可以设计出诸如智能生产线、工业机器人等产品。智能制造是机电一体化新的发展前沿阵地,需要机电一体化进行深层次的技术支撑,在此背景驱动下,促进了机电一体化向智能化、网络化、模块化发展,在其他相关领域也要求多项关键技术的深度融合,否则就失去了驱动技术和应用领域发展的机能。脱离了机电一体化,智能制造只是一个空想的概念;脱离了智能制造的引航,机电一体化的科技创新就会缺乏正确方向,无法挖掘其本身所蕴含的价值最大化。

二、智能制造背景下机电一体化技术的发展现状

（一）技术融合取得初步成效

当前阶段,机电一体化技术已经可以同智能制造关联技术初步结合,突破了传统单一技术运用局限性,形成了具有自动化的特质和智能化的属性的技术架构体系。从机械和电子两方面融合来看,通过优化机械结构设计,并将高精度电子控制模块嵌入其中,达到提高设备的运行精度以及稳定性的目的,减少人为的操作干扰,增强生产的一致性;从控制和信息技术融合的角度来说,通过使用嵌入式控制系统的装置、应用可编程控制的方法实现机电一体化设备的主体自身的决策以及自我调整的能力,依据实际的生产场景的变化自动调节设备的运行参数数值来适应柔性生产的需要。通过升级传感技术达到精准的方向,使得能够借助各种各样的传感器元件采集设备的运行状态的信息、采集生产的过程数据等内容,为智能化的调控行为提供数据的基础支撑,初步达到了对于生产过程环节实现精准控制的这一目标。

（二）应用场景不断拓展

随着智能制造全面前进的步伐,机电一体化技术的应用空间由传统的机械制造领域,拓展延伸到了各个高端制造领域的领域之中,并且成为了当前时代之下各行业智能制造转型升级的重要推手。在离散制造的区域之内,机电一体化技术主要应用在工业机器人装置之上,以及各种各样的智能加工设备机器身上,使零部件加工工序与装配工艺环节拥有更加完善的自动化水平和较高的精确度等级,彻底摆脱了人类劳力和人工化的巨大耗费,同时为产品的质量提供相对更为稳定的状态;此外,在流程制造过程中融入机电一体化技术,能够更好地将生产流程线与整个生产制造环节绑定在一起,在优化和完善整个生产流程体系的过程中降低人力物力的成本投入,并达到合理的减少生产成本的效果;同时,对于现阶段来说,高端装备制造行业以及智能仓储物

流行业的机电一体化技术发展已经步入到深耕细作的时代,在这一类行业中使用并推行机电一体化技术,有利于推动整个生产模式的更新换代,有利于机电一体化技术发挥更大的技术性能与优势。

（三）现存核心发展瓶颈

虽然机电一体化技术在智能制造的背景下取得了一定程度的发展效果和成果,但从深层次上看,目前还存在很多的卡脖子的问题,会严重影响机电一体化技术与智能制造的深度融合。一是机电一体化技术融合程度不够深,目前多数机电一体化技术仅仅停留在表面融合的状态,还没有真正意义上达到各个学科的技术高度统一,在应用的过程当中,容易出现技术脱节的现象,机械学科、电子学科、控制学科以及信息学科这四个学科的相关技术是没有办法进行有效的互相配合的。二是专业技术的自主创新力欠缺,一些关键技术的零件或是软件都没有真正地做到自主研发,存在着从外部引入的情况,容易造成更高的技术使用成本,并且技术的个性化发展和升级也会受到一定的局限性。三是人才供给状况与需求矛盾突出,机电一体化技术需要的是既懂机械又懂电子以及懂信息的综合性人才,但目前人才培养都偏科严重,不符合当下智能制造融合发展趋势和技术的创新方向。其四,各企业机电一体化设备机体存在技术标准化程度低,对不同企业主体机电一体化设备机体之间的接口部位以及通信协议等方面的统一标准规范尚未制定,不能满足各设备机体高效协同作业的状态要求,从而影响智能制造全流程各环节间的协同运行效率。^[5]

三、智能制造背景下机电一体化技术的深度发展路径

（一）推动多学科技术深度融合

多学科技术的深度汇融是机电一体化技术适配智能制造演进的重要目标也是突破现有技术困局的关键所在。一方面要加强机械技术与电子技术的汇融,加强机械设备的设计,吸收电子控制技术的优点,使机械设备实现精确化与高效化的同时也能降低机械设备工作时的能耗和损耗;另一方面也要加强机电一体化技术与其他新技术(如人工智能、物联网、大数据等)的结合,使机电一体化设备拥有更强的智能化的能力,使设备能够通过人工智能实现自我学习与判断及故障自诊断,使工作人员的人力干预减少;通过物联网的技术使得设备间及设备与控制系统间可以实时通讯及共享数据,推动整个生产流程间的协同运行;通过大数据技术获取设备运转数据、生产流程数据,并对数据背后的实际意义进行挖掘,进而为机电一体化设备的优化运转、生产流程的调整提供数据支持,保证生产的精准运转及优化。要注意技术的实用性,把不同行业不同的生产要求相结合形成个性化的机电一体化技术解决方案,以此提高技术使用价值。

（二）强化核心技术自主创新

核心技术自主化创新是机电一体化技术持续发展的重要举措,也是摆脱对外技术依附的根本手段,为此,企业要加大核心技术研发投入,把重点放在关键技术领域,集中力量做研发,攻坚克难,不断攻克技术难关,提高技术自主可控能力。同时加强

产学研协同创新，深化企业与高校院所的联系，充分利用高校和科研院所的人才优势和技术优势，实现技术研发、成果转移转化和产业应用无障碍连接，加快核心技术产业化进程；针对技术革新个性化差异性特点，在智能制造条件下，柔性生产和个性化定制需求下展开个性化技术创新，打造既有竞争力的机电一体化技术和产品，适应各种行业，满足各种企业个性化需求；同时还要加强知识产权保护力度，加大打击侵权的力度，营造有利于企业自主创新发展的良好环境。

（三）优化复合型人才培育体系

复合型人才是机电一体化技术的发展支撑力量和技术创新汇融的基础条件，所以需要高校优化人才培育方案，不再局限于某一学科人才培养，而是建立涵盖机械学、电子学、信息学、控制学等多学科知识的人才培养体系，注重理论联系实际，全面提升学生的综合素养及创新能力。一方面，要增加跨学科课程的比例，强调融合不同学科的知识，让学生学习多门学科的知识；另一方面，要加强校企合作，建设实践教学基地，让学生走进生产一线，从事机电一体化装置开发、调试、运行的工作，获得实际经验、培养实践能力。企业应该加强对现有职工的培训，除了日常岗位技能培训外还要针对企业自身特点开展有针对性的跨学科培训，努力提高职工综合技术水平，适应技术融合、技术创新的要求；其次还必须建立和完善人才激励机制，吸引和鼓励更多复合型人才投身机电一体化技术和产品研究与应用中去，以人的全面发展促进技术进步。

（四）完善技术标准化体系建设

技术标准化体系建设有利于进一步促进机电一体化技术与智能制造的深度融合；有利于提升设备间协同工作效率。部门牵头拟定统一的技术规范，明确机电一体化设备中关于接口位置、通信协议、性能参数等技术细节的标准；规范设备的生产和使用，让各个企业、各类设备之间实现互通互连、协同运转，有助于更好地发挥智能制造的作用。此外，在做好国内技术标准工作的前提下，要积极做好标准国际化工作的开展，以国外先进技术规范为参考，以我国产业发展实际情况为基础，优化和完善我国的技术标准体系，努力提高我国机电一体化技术的国际竞争力。通过参与制定相关技术规范并严格执行技术规范的要求，按技术规范要求设计并制造相应的技术和设备。完善对标准执行的监督和检

查制度。

四、智能制造背景下机电一体化技术的未来发展趋势

随着智能制造的不断发展进步，机电一体化技术也朝向智能化、网络化、模块化、绿色化方向发展。智能化发展的过程当中，人工智能技术的进步能够使机电一体化设备具有更好的自主学习能力、自主决策能力和自主执行能力，最终实现全流程自动化运行和故障自动检测的功能，并且让生产方式向无人化、智能化的方向转变。网络化发展的过程中，物联网技术会得到极大的推广运用，从而实现机电一体化设备的整体联网化，实现互联互通，构成互联系统，实现各系统间的信息交换，实现整体的协调运转，进而提高生产效率和设备使用效率；模块化设计是机电一体化设计的核心手段，可以将设备功能分解成独立的模块，最终组装在一起形成装置；绿色化将会是一个很大的趋势，在产品生产上进行技术创新，如：设备结构的合理化、节能降耗等措施都将有利于降低产品能耗与物耗，达到节能减排、保护环境的目的。

五、结论

在智能制造框架中，机电一体化技术是跨领域、多学科相互交叉融合而形成的最新科研成果，是加速推动制造业转型升级的重要保证，技术进步程度关系到智能制造最终结果好坏；当前融合及场景应用层面上得到了一些成绩，但是还存在技术融合程度不够高、关键技术自主创新度低、供需人才衔接不合理、技术标准规范缺失等问题和瓶颈，未来要加大技术支持力度，加快解决专业技术层面的问题，开展以强融促强升、核心技术自主创新提升工程、培育造就复合型人才、制定并推行技术标准4项重点工作，不断改善和完善，逐步向着智能化形态、网络化模式、模块化结构、绿色化方向发展，努力使机电一体化技术能够融入到智能制造之中，最大程度地发挥出自身的有力支撑，带领我国制造业摆脱以往的低端生产模式的束缚，走向高精尖的产品品质路线，争取早日变成制造强国。

参考文献

- [1]王冬冬.智能制造背景下机电一体化技术发展路径探索[J].农机使用与维修, 2025, (08):128-131.
- [2]凌洪青.智能制造背景下机电一体化技术的发展探索[J].造纸装备及材料, 2025, 54(01):66-68.
- [3]司永祥.智能制造背景下机电一体化技术的应用与发展[J].造纸装备及材料, 2024, 53(10):91-93.
- [4]纪宗军.智能制造背景下机电一体化技术的发展路径探索[J].产业创新研究, 2024, (12):13-15.
- [5]王赞, 何俊峰.智能制造背景下机电一体化技术的应用与发展[J].南方农机, 2023, 54(15):141-143+158.

湖南省桑植县碎屑岩切坡参数特征 与稳定性数值模拟研究

李江, 王潇*, 何阳, 姚海鹏, 曹顺红
湖南省地质调查所, 湖南 长沙 410114
DOI:10.61369/ME.2026010023

摘 要 : 湘西北桑植县一带出露的志留系、泥盆系碎屑岩地层是该地区滑坡地质灾害频发的主要地层之一, 属易滑易崩地层, 本文通过对桑植县内的建房切坡点数据进行统计分析, 得出不同切坡参数参与与稳定性之间的关系, 并在此基础上, 利用 Geo-Studio 软件对典型的碎屑岩滑坡进行切坡距离 + 切坡坡度不同工况的数值模拟, 探索其稳定性的变化规律。通过研究提出该地区碎屑岩切坡的稳定切坡参数建议值, 为该地区农村居民切坡建房管理、地质灾害防治管理提供科学的指导及参考意义。

关 键 词 : 切坡; 滑坡; 稳定性分析; 数值模拟

Study on the Characteristics of Slope Cutting Parameters and Numerical Simulation of Stability of Clastic Rocks in Sangzhi County, Hunan Province

Li Jiang, Wang Xiao*, He Yang, Yao Haipeng, Cao Shunhong
Hunan Institute of Geological Survey, Changsha, Hunan 410114

Abstract : The Silurian and Devonian clastic rock strata exposed in Sangzhi County in northwestern Hunan are among the main strata prone to landslide geological disasters in the region and belong to landslide- and collapse-prone strata. This paper conducts statistical analysis on the data of slope cutting points for house construction in Sangzhi County to obtain the relationship between different slope cutting parameters and slope stability. On this basis, the Geo-Studio software is used to carry out numerical simulations of typical clastic rock landslides under different working conditions of slope cutting distance and slope cutting gradient, so as to explore the variation law of their stability. Through the research, the recommended values of stable slope cutting parameters for clastic rock slope cutting in the region are proposed, which provide scientific guidance and reference significance for the management of slope cutting for rural residential house construction and the prevention and control of geological disasters in the region.

Keywords : slope cutting; landslide; stability analysis; numerical simulation

引言

碎屑岩是由砾石、砂、泥等碎屑物质经固结作用形成的沉积岩, 主要形成砂岩、泥岩、页岩等。由于其具有显著的非均质性和各向异性。近年来, 碎屑岩边坡稳定性问题日益突出, 关于切坡参数与边坡的稳定性关系, 受到学者关注。

胡丁水^[1]对甘肃靖远县417户切坡建房点进行了系统研究, 发现随着开挖高度和坡度的增大, 边坡稳定性显著降低, 而开挖宽度影响相对较小。秦萌萌等^[2]发现切坡坡高对稳定性的影响大于坡度。毕晨洁^[3]对江西上饶土质边坡的模拟表明, 切坡角度增大导致边坡卸荷回弹或应力集中, 稳定性显著降低。张玉玺^[4]研究了马迹山港岩质边坡的稳定性, 发现人工切坡形成的裂隙破坏了岩体完整性, 导致局部块体滑移。郭志明等^[5]针对三峡库区顺向切坡的灰岩边坡, 提出结构面产状和力学性质是稳定性的主控因素。吴述或^[6]通过 CSMR 法和极限平衡法分析了竹子坝料场岩质高边坡的稳定性, 指出人工切坡诱发的楔形体滑动是主要破坏模式。在切坡参数的系统性研究方面, 胡丁水^[1]通过统计分析得出, 开挖高度超过9m、坡度超过60° 时边坡风险显著增加。黄德国等^[7]对金寨县切坡引发的崩塌统计发现, 坡度50° 的切坡最易失稳。韦文智^[8]通过主应力和偏应力增量界定了切坡卸荷带范围, 提出应力衰减区可作为切坡稳定性的评价指标。目前国内学者普遍认为合理控制切坡参数是预防边坡失稳的关键。

资助项目: 湖南省自然科学基金项目(编号: 2025JJ80053)、湖南省自然科学基金项目(编号: 2025JJ80042)。

作者简介: 李江(1989-), 男, 湖南永州人, 工程师, 主要从事水工环地质工作。

通讯作者: 王潇(1987-), 男, 湖南保靖人, 高级工程师, 主要从事水工环地质工作。

一、碎屑岩区切坡参数特征

本次研究共计针对桑植县的3499个建房切坡点进行系统研究。切坡特征主要较多，本文从切坡高度、坡度、坡脚距离、斜

坡结构、剖面形态5个切坡自身参数方面进行统计，论述与边坡稳定性之间的关系。本次碎屑岩切坡一共3499个，其中中高风险切坡403个。

表1 研究区碎屑岩切坡参数特征统计表

切坡特征	特征分类	总数量（处）	占总数比	中高风险数量（处）	中高风险占比
切坡高度	≤3m	1369	39.13%	74	5.41%
	3-5m	1547	44.21%	192	12.41%
	5-7m	377	10.77%	79	20.95%
	7-9m	130	3.72%	37	28.46%
	>9m	76	2.17%	21	27.63%
切坡坡度	≤30°	97	2.77%	3	3.09%
	30-40°	86	2.46%	5	5.81%
	40-50°	366	10.46%	27	7.38%
	50-60°	860	24.58%	91	10.58%
	60-70°	1322	37.78%	194	14.67%
	>70°	768	21.95%	83	10.81%
坡脚距离	0-1m	2268	64.82%	276	12.17%
	1-2m	976	27.89%	110	11.27%
	2-3m	143	4.09%	15	10.49%
	3-5m	40	1.14%	2	5.00%
	>5m	72	2.06%	0	0.00%
斜坡结构	横向坡	1015	29.01%	118	11.63%
	近水平层状坡	32	0.91%	2	6.25%
	逆向坡	411	11.75%	43	10.46%
	切向坡	1029	29.41%	118	11.47%
	顺向坡	716	20.46%	102	14.25%
	块状岩体斜坡	26	0.74%	1	3.85%
	土质斜坡	269	7.69%	19	7.06%
剖面形态	凹	40	1.14%	14	35.00%
	阶	254	7.26%	14	5.51%
	凸	73	2.09%	20	27.40%
	直	3132	89.51%	355	11.33%

1.切坡高度：其中切坡高≤3m，占比39.13%；切坡高3-5m，占比44.21%；切坡高5-7m，占比10.77%；切坡高7-9m，占比3.72%；切坡高大于9m，占比2.17%。可知，切坡高度一般在<7m的范围之内，为区内主要切坡高度。每个切坡分段中高风险切坡的占比整体呈线性升高的趋势，充分的说明在研究区切坡高度越高，风险性越高，对坡体稳定性影响越大，即稳定性越差。

2.切坡坡度：切坡坡度≤30°占比2.77%；30-40°占比2.46%；40-50°占比10.46%；50-60°占比24.58%；60-70°占比37.78%；>70°占比21.95%。可知，坡度总体逐步增高的趋势，到60-70°为峰值。这是由于切坡坡度越大，切坡水平距离越大，所占用的面积越小，居民也更容易开挖。中高风险占比基本也是60-70°最多。总体上切坡坡度越大，风险性越高，对坡体稳定性影响越大，即稳定性越差。

3.切坡坡脚距离：坡脚距离0-1m占比64.82%；1-2m占比27.89%；2-3m占比4.09%；3-5m占比1.114%；>5m占比2.06%。区内切坡的坡脚距离总体上距离越大，数量越小，多数集中在<1m的距离，由于研究区的碎屑岩多为山区，说明老百姓大

部分的切坡临坡切坡。重要的一个原因就是房屋建筑面积小，想要尽量的节省屋后空间，且开挖面积小。在坡脚距离各区间中，中高风险的占比是逐步减少的，总体上当坡脚距离小于3m的时候，切坡的风险性相对较高，当大于3m的时候，说明一般小的切坡即使发生变形破坏，对房屋及人员的威胁相对较小。

4.切坡斜坡结构：横向坡占比29.01%；近水平坡占比0.91%；逆向坡占比11.75%；切向坡占比29.41%；顺向坡占比20.46%；块状岩体坡占比0.74%；土质坡占比7.69%。总体上以横向坡、切向坡以及顺向坡为主。在各种斜坡结构类型中，中风险切坡占比最高为顺向坡（14.25%），最少为块状岩体斜坡（3.85%）。

5.切坡剖面形态：切坡剖面形态中凹形坡占比1.14%；阶梯形占比7.26%；凸形坡占比2.09%；直线形坡占比89.51%。可见以直线形坡为主，主要原因是切坡的高度不高，且多数居民没有分级切坡的意识。在各种的切坡形态当红，中高风险占比依次为凹形坡（35%），凸形坡（27.4%），直线形坡（11.33%），阶梯形坡（5.51%）。凹形坡导致边坡失稳的可能性最大，说明在研究区域碎屑岩切坡表层受风化剥蚀，形成凹面，有利于汇水，导致边坡失稳。

二、典型碎屑岩切坡稳定性数值模拟

选择区内典型的泥页岩边坡为研究对象，采用 Geo-Studio 软件的 SLOPE/W 模块进行滑坡的稳定性数值模拟。

（一）模拟点特征

选择桑植县八大公山镇笔架山村安家界组滑坡，该是区内典型的在切坡作用下引发的滑坡，滑坡体纵长31.0m，横宽平均53.0m，平面面积约1440m²，滑体厚度2.60~6.30m，平均滑体厚度4.26m，总体积约6000m³，主滑方向84°，滑动面为碎石土中下部及强风化岩接触面，属于小型浅层牵引式土质滑坡。滑坡处物质组成从上到下分别为碎石土，强风化泥页岩，中风化泥页岩。

（二）模型构建及参数选取

1. 根据收集勘察报告，选择滑坡的主剖面构建二维模型，模型尺寸包含滑坡区及周边，比滑坡范围大，分析模型简化为长67m，高24.6m，见图1。

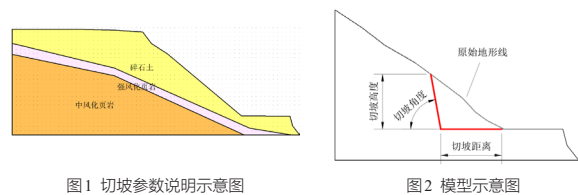


图1 切坡参数说明示意图

图2 模型示意图

2. 根据工程上常用的切坡角度和切坡距离，本次的切坡角度 α 取40°、50°、60°、70°和80°，切坡距离 L 取3m、5m、

7m、9m。探索不同切坡距离及切坡坡度组合工况下，边坡的稳定性变化，本次仅考虑单一切坡的影响，不考虑降雨等其他影响因素的影响，切坡距离指的是从原始地形线坡角垂直开挖进斜坡的水平距离，见图2。

3. 根据滑坡勘察报告以及反演分析得到滑坡模型的分层信息以及各层岩土体物理力学参数。具体参数见表2。

表2 典型滑坡点岩土体主要物理力学参数

分层编号	岩土体名称	重度 γ (kN/m ³)	粘聚力 C (kPa)	内摩擦角 Φ (°)
第一层	碎石土	22	13.5	25.5
第二层	强风化泥页岩	23.5	45	18.0
第三层	中风化泥页岩	24.5	180	22.5

（三）模拟结果分析

在 Geo-Studio 软件，构建模型及填充材料后，自动选择最不利滑面，得到不同切坡角度，不同切坡距离下滑坡潜在滑动面及对应的稳定系数，见图3。可见切坡距离3m，切坡角度从40°~80°，稳定系数从1.228减少到1.098。切坡距离5m，切坡角度从40°~80°，稳定系数从1.221减少到0.937。切坡距离7m，切坡角度从40°~80°，稳定系数从1.206减少到0.891。切坡距离8m，切坡角度从40°~80°，稳定系数从1.047减少到0.870。同时可以看出，不同的切坡组合工况下，边坡潜在的滑动面是不一致的，但总体上剪出口均位于坡脚一带，且随着切坡坡度的增加，剪出口越靠近坡脚水平地面。

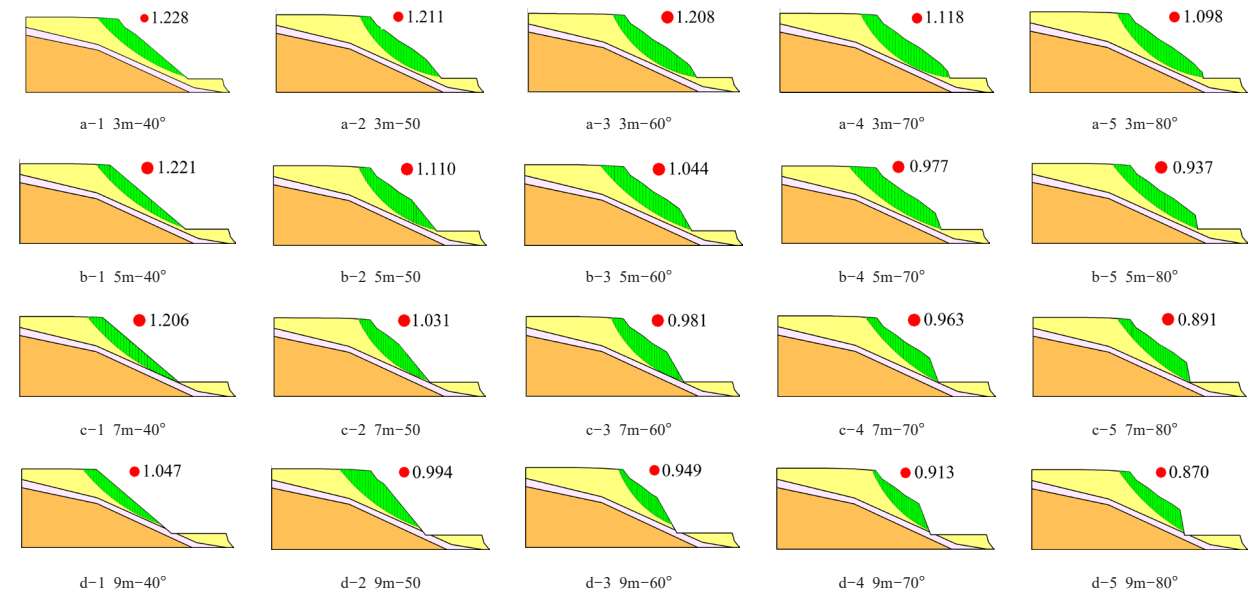


图3 不同切坡距离和切坡角度工况下滑坡模拟结果

根据计算的结果，绘制切坡角度变化、切坡距离变化对稳定系数的影响曲线图，见图4。图4-a中，随着切坡角度的增大，不同的切坡距离（3m、5m、7m和9m）稳定系数均减小趋势，其中在3m的切坡距离下，40~60°的切坡坡度下，稳定系数降低较慢，大于60°以后，极速减小，而9m的切坡距离下，总体稳定系

数减小呈直线型。可以说明，切坡距离越大，边坡的稳定系数减小的约越明显，这表明较大的切坡角度和切坡距离会导致边坡稳定性显著降低。图4-b中，同样可以看出，切坡坡度越大，稳定系数变化的约明显。从两者对稳定系数影响的程度来看，切坡角度的影响是大于切坡距离的。

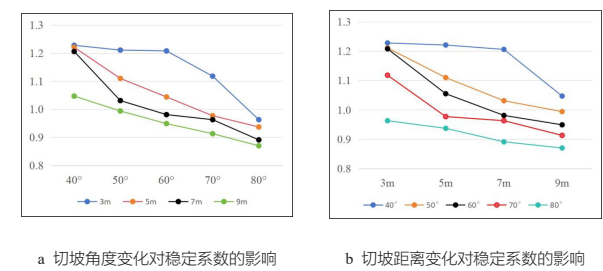


图4 稳定系数与切坡角度和切坡距离的关系

三、切坡参数优化建议

(一) 切坡参数优化

参考《滑坡防治工程勘查规范》(GB/T 32864-2016)表7之规定,对于边坡稳定性的判别标准如下表。

表3 滑坡稳定状态划分

滑坡稳定系数 F_s	$F_s < 1.00$	$1.00 \leq F_s < 1.05$	$1.05 \leq F_s < 1.15$	$F_s \geq 1.15$
滑坡稳定状态	不稳定	欠稳定	基本稳定	稳定

根据表3,结合图3,看出该滑坡在切坡距离3m,切坡角度达到80°时处于欠稳定状态,切坡距离5m,切坡角度达到60°时处于欠稳定状态,切坡距离7m,切坡角度达到50°时处于欠稳定状态,而切坡角度9m,切坡角度40°时已处于欠稳定状态。

通过前面的统计分析数值模拟结果,提出泥页岩切坡稳定状态($F_s \geq 1.15$)的切坡参数建议表,见表4。

表4 泥页岩切坡参数建议表

切坡距离	建议切坡角度	折算坡比	备注
3m	$\leq 60^\circ$	$\leq 1:0.577$	
5m	$\leq 40^\circ$	$\leq 1:1.192$	
7m	$\leq 40^\circ$	$\leq 1:1.192$	
9m	$\leq 30^\circ$	$\leq 1:1.732$	

(二) 切坡参数校核

选择筛选切坡为主要诱发因素的33个泥页岩滑坡、189个中高风险切坡。利用斜坡距离、切坡坡度对表4切坡参数建表进行检验。检验结果(表5,表6):滑坡中有29个滑坡的切坡距离及切

坡坡度在表4建议值之外,占比93.55%;中高风险切坡建房中,有178个中风险以上的切坡切坡距离及切坡坡度在表4建议值之外,占比94.18%。

表5 泥页岩切坡引起的滑坡统计表

切坡距离	切坡坡度°					备注
	30-40°	40-50°	50-60°	60-70°	> 70°	
1-3m	0	0	1	1	2	
3-5m	1	2	4	4	0	
5-7m	1	0	2	0	2	
7-9m	1	1	1	1	1	
> 9m	0	2	2	3	1	

表6 中高风险泥页岩切坡统计表

切坡距离	切坡坡度°					备注
	30-40°	40-50°	50-60°	60-70°	> 70°	
$\leq 3m$	0	1	8	39	30	
3-5m	0	6	26	43	9	
5-7m	0	3	8	9	0	
7-9m	1	1	1	2	0	
> 9m	1	0	1	0	0	

通过表5及表6的验证结果。可以看出表4提出的稳定切坡参数建议值有效,能较好的代表该地区泥页岩切坡的取值范围。

四、结论

1.区内的中高风险切坡中,坡度越高风险性增加,坡高>5m时,风险性显著增加;坡度以60-70°区间为主;坡脚距离以<1m为主,坡脚距离越大,风险性逐步减小;斜坡结构中,中高风险发育数量依次为顺向坡,横向坡,切向坡,逆向坡,土质类斜坡,近水平坡,块状岩体斜坡;坡形中,中高风险发育数量依次为凹形坡,凸形坡,直线形坡,阶梯形坡。

2.区内碎屑岩中的泥页岩切坡,其切坡参数宜控制在切坡距离3m时,切坡坡度 $\leq 60^\circ$;切坡距离5-7m时,切坡坡度 $\leq 40^\circ$;切坡距离9m时,切坡坡度宜 $\leq 30^\circ$ 。经切坡引起的滑坡、中高风险切坡验证,切坡参数建议值基本适宜本区,可以作为本区泥页岩地层的切坡参数建议值。

参考文献

[1] 胡丁水.黄土区乡镇切坡建房调查及其对边坡稳定性的影响研究[D].兰州:兰州大学,2023.
[2] 秦萌萌,岳豪康.人工切坡对双峰县土质边坡稳定性的影响[J].洛阳理工学院学报(自然科学版),2025,35(1):21-24,38.
[3] 毕晨洁.江西上饶地区典型土质边坡稳定性有限元数值模拟[D].南昌:东华理工大学,2022.
[4] 张玉玺.马迹山港东山岩质边坡稳定性研究[D].武汉:中国地质大学,2009.
[5] 郭志明,陈加红,铁春瑞.岩质顺向人工切坡稳定性分析和治理方案分析——以三峡库区湖北省巴东县溪丘湾集镇居民点高切坡为例[J].才智,2009(4):30-31.
[6] 吴述斌.官地水电站竹子坝料场岩质高边坡稳定性研究[D].武汉:中国地质大学,2011.
[7] 黄德国.金寨县地质灾害特征及典型灾害形成机理研究[D].西安:长安大学,2013.
[8] 韦文智.容县花岗岩残积土边坡切坡卸荷带和失稳机制研究[D].南宁:广西大学,2022.

基于 MW 级飞轮的混合储能一次调频控制策略分析

李添汇

辽宁大唐国际新能源有限公司, 辽宁 沈阳 110000

DOI:10.61369/ME.2026010024

摘 要 : 本文系统分析 MW 级飞轮的混合储能及一次调频控制核心技术策略, 并借助实验平台搭建以及实验验证得出结果, 通过建立包含上层协调控制层、中层功率分配层和底层设备控制层的分层控制框架, 能够快速响应电网频率变化并将频率偏差控制在 $\pm 0.25\text{Hz}$ 范围内, 可满足一次调频的精度要求。同时实验还验证, 飞轮和锂电池的功率分配比例符合设计目标, 飞轮承担了主要的调节功率而锂电池作为辅助和能量缓冲。

关 键 词 : MW 级飞轮; 混合储能; 一次调频; 控制策略

Analysis of Primary Frequency Regulation Control Strategy for Hybrid Energy Storage based on MW Level Flywheel

Li Tianhui

Liaoning Datang International New Energy Co., Ltd. Shenyang, Liaoning 110000

Abstract : This article systematically analyzes the core technology strategy of hybrid energy storage and primary frequency regulation control for MW level flywheels, and uses experimental platforms to build and verify the results. By establishing a layered control framework that includes an upper coordination control layer, a middle power allocation layer, and a lower equipment control layer, it can quickly respond to changes in grid frequency and control frequency deviation within $\pm 0.25\text{Hz}$, meeting the accuracy requirements of primary frequency regulation. At the same time, the experiment also verified that the power distribution ratio between the flywheel and the lithium battery meets the design goals. The flywheel bears the main responsibility for regulating power, while the lithium battery serves as an auxiliary and energy buffer.

Keywords : MW grade flywheel; hybrid energy storage; frequency modulation once; control strategy

传统调频资源中火电机组虽有一定调频能力, 但其响应速度慢且调节精度低, 难以满足高比例可再生能源接入电网后的快速调频需求。储能技术中飞轮储能具备毫秒级响应速度、高功率密度、长寿命和环境友好等特点, 适合承担电网一次调频任务^[1]。锂电池储能拥有高能量密度、能量转换效率高和布置灵活等优点, 能够提供持续的能量输出。本文针对 MW 级飞轮混合储能系统参与一次调频的应用场景, 深入分析了飞轮 + 锂电池混合储能特性, 设计一种分层控制框架并提出相应控制策略, 希望可为 MW 级飞轮混合储能系统在一次调频领域的应用提供理论依据。

一、MW 级飞轮储能系统特性

MW 级飞轮储能系统属物理储能技术, 基本原理是借助电动机将电能转化成飞轮动能储存, 再通过发电机将飞轮动能转化为电能释放^[2]。其结构组成主要涵盖高速旋转的飞轮转子、低摩擦的轴承系统(磁悬浮或气浮轴承)、高效率的电力电子变流器以及真空腔体等。该系统最突出的特性是功率密度高, 能够在瞬间输出或者吸收大量的功率, 响应速度快。同时, 能够达到数万次充放电循环, 维护需求低, 对环境比较友好, 在改善电能质量如电网调频和风电平滑、脉冲电源应用、高品质 UPS 应用、机车能量回收、航空航天领域的姿态控制等领域(图 1)均有广泛应用。



图 1: MW 级飞轮储能典型应用场景

作者简介: 李添汇 (1990.11-), 女, 蒙古族, 天津市人, 本科, 工程师, 研究方向: 新能源。

二、一次调频原理及需求分析

（一）电力系统一次调频概述

电力系统一次调频指的是当电网负荷出现瞬时变化让频率偏离额定值时，依靠发电机组自身固有的功率-频率调节特性进行初始频率调整的过程^[3]。其频率偏差产生的根本原因是发电侧总出力与负荷侧总用电量之间存在实时不平衡的情况，当负荷增加致使频率下降的时候，所有具备一次调频能力的发电机组调速器会自动检测到频率变化，然后根据其预设的调差系数也就是频率响应系数自动降低发电机组的负荷设定点，从而让机组增加出力。其调节能力受到机组自身旋转惯量、调速器特性以及最大可调范围的限制，一次调频的作用机制是通过这种快速自发的功率调整来尽力抑制频率的剧烈波动，为二次调频也就是自动发电控制争取时间并且提供一定的频率支撑，是维持电网频率稳定的第一道防线。

（二）MW级飞轮混合储能系统一次调频需求

MW级飞轮混合储能系统参与一次调频，其需求需结合电网要求和系统特性综合分析^[4]。在功率需求方面，此系统需具备和电网规模相匹配的功率调节能力，可快速响应电网发出的频率调节指令，为电网一次调频提供或吸收所需的峰值功率，其功率水平通常处于MW级别以满足大型或区域电网调频需求。在能量需求方面，虽一次调频主要任务是快速调节功率，但调节过程可能持续从秒级到分钟级的一段时间，所以系统须具备一定能量缓冲能力，特别是锂电池部分要能支撑飞轮连续调频时的能量循环或作为长时间备用容量。在动态响应需求上，飞轮储能单元毫秒级响应特性使其非常适合一次调频对快速性的苛刻要求，系统需实现近乎实时的功率调整，响应时间要远小于传统调频资源。同时系统还需要具备高调节精度，能精确跟踪频率偏差信号并输出指令功率以减少频率振荡，控制系统须具备高可靠性和鲁棒性，能在复杂电网工况下稳定运行并满足电网对调频资源并网的各类技术要求。

三、MW级飞轮的混合储能一次调频控制策略

（一）总体框架设计

基于MW级飞轮的混合储能一次调频控制系统框架分为上层协调控制层、中层功率分配层和底层设备控制层。上层协调控制层负责接收来自电网调度中心或者本地频率监测单元的指令，其决策出混合储能系统需提供的总调节功率指令（ P_{total} ）。中层功率分配层依据总功率指令、当前电网频率变化趋势、飞轮和锂电池的实时状态，例如飞轮转速、锂电池SOC、温升等，以及两者的特性差异，制定出精确的功率分配方案，从而决定飞轮（Pflywheel）和锂电池（Plithium）各自应承担的功率份额^[5]。底层设备控制层负责执行具体功率调节任务，重点对飞轮储能单元变流器进行控制，实现所需功率输出，对锂电池储能单元充放电进行管理。框架各层协同配合。上层着重于策略方面的决策制定，中层着重于资源的优化配置工作，底层重于设备精确执行操

作，通过高速通信网络来实现各层之间的信息交互与协调，以此确保整个混合储能系统作为一个整体高效且稳定地完成一次调频任务。

（二）信号采集处理

采集电网频率信号（ f ），通过高精度同步相量测量单元（PMU）获取，采样频率至少50Hz，以此捕捉频率的快速变化情况。重点采集电网有功功率信号（ P_{grid} ），计算实际功率不平衡量，辅助判断频率变化趋势走向。分析飞轮实时转速（ n ），确定飞轮动能状态，锂电池荷电状态（SOC），用于评估锂电池的能量存储水平和剩余调节容量。采集锂电池输出/输入功率（ $P_{lithium}$ ），用来监控锂电池的工作状态和累积充放电量。

（三）控制算法优化

鉴于一次调频有着毫秒级响应速度和快速抑制频率偏差的核心要求，结合飞轮混合储能系统自身特点，应采用以快速响应为核心且融合多种控制思想的优化算法，设计一种基于飞轮快速响应特性的前馈控制与PID反馈控制相结合的复合控制策略，其前馈控制依据频率偏差直接快速地调节飞轮输出功率，借助飞轮的机械惯性实现毫秒级响应，PID反馈控制则用于精确消除稳态频率偏差并对系统进行微调，为进一步优化可在PID参数里引入模糊逻辑进行在线整定，以此适应不同频率变化率和系统工况来提高鲁棒性，又或者在功率分配层面采用基于飞轮SOC和频率变化趋势的动态分配算法，优化锂电池的参与程度以兼顾快速响应与能量效率。

四、控制策略实验验证

（一）实验平台搭建

为了验证所设计的基于MW级飞轮混合储能系统一次调频控制策略是否有效实用，专门搭建了与之对应的实验平台，这个平台模拟出了电网频率扰动的相关场景，并且集成了MW级飞轮储能单元、锂电池储能单元、双向DC/DC变换器、统一DC/AC并网逆变器以及基于高性能DSP的控制单元。在实验过程中，通过模拟电网负荷出现突变情况（像突然增加或者减少一定功率）来产生频率偏差，控制系统会采集频率、功率等信号，执行预先设计好的控制策略，实时调节飞轮和锂电池的功率输出或者输入，实验重点对系统在不同频率扰动幅度和速率条件下的响应速度、调频精度以及飞轮和锂电池的功率分配情况进行了测试。

（二）实践结果

实验结果和基于相同系统参数与扰动条件的仿真结果对比发现，实验结果与仿真结果在频率偏差控制效果、恢复时间以及飞轮和锂电池的功率分配比例上均表现出高度一致性（见表1）。频率偏差全都控制在 $\pm 0.25\text{Hz}$ 的范围以内，很好地满足了一次调频的精度方面要求，恢复时间的实验结果和仿真结果比较接近（1.1~1.2秒区间），充分体现出系统具备快速的功率调节能力。在功率分配这方面，不管是增加负荷还是减少负荷，飞轮都承担了主要的调节功率（约占总调节量75%），锂电池承担大约25%的功率，达成利用飞轮快速响应的特性去承担主要调节任务，锂电

池作为辅助以及能量缓冲的角色的设计目标。两者间存在微小差异（恢复时间差 0.1 秒，功率差异 0.05MW）主要源于实验平台里实际设备产生的损耗、控制系统实时性方面的限制以及传感器噪声等因素。实验验证基于 MW 级飞轮混合储能系统一次调频控制可实现快速且精确的调频控制。

表 1: 实验结果

实验 工况	扰动 类型	扰动 幅度 (Hz)	频率最 低 / 高点 (Hz)	恢复 时间 (s)	飞轮平 均功率 (MW)	锂电池 平均 功率 (MW)
实验 结果	负荷 突增	+0.2	50.25	1.2	-1.5	-0.5
实验 结果	负荷 突减	-0.2	49.75	1.2	+1.5	+0.5
仿真 结果	负荷 突增	+0.2	50.24	1.1	-1.55	-0.45
仿真 结果	负荷 突减	-0.2	49.76	1.1	+1.55	+0.45

五、结束语

MW 级飞轮-锂电池混合储能系统中，飞轮储能依靠其超高速毫秒级响应能力、长寿命以及环境友好等特性，天然适合承担电网一次调频任务，可快速精确地吸收或释放功率以有效抑制频率偏差，将飞轮储能与锂电池结合，通过功率与能量的协同控制，能构建出兼顾快速响应与能量持续输出的高性能调频单元，为电网提供可靠快速无污染的一次调频服务，显著提升电网频率稳定性并增强系统抗扰动能力，还能为电网运营商带来可观经济收益，是支撑高比例可再生能源电网安全稳定运行的关键技术之一，具有巨大潜在应用价值。

参考文献

- [1] 褚志杰, 韩朋谊, 郑立星, 等. 混合储能参与电网一次调频的综合控制策略研究 [J]. 动力工程学报, 2025, 45(9): 1511-1518.
- [2] 徐雷. 混合储能辅助风电平滑功率和一次调频的控制策略研究 [D]. 华北电力大学 (北京), 2023.
- [3] 段继兵, 李亮, 于鸿雁, 等. MW 级飞轮混合储能系统在蒙西风电场的实践应用 [J]. 2024(32): 186-189.
- [4] 唐亮, 丁汇, 刘颖杰. 飞轮储能在新能源项目一次调频场景下的经济性研究 [J]. 电气时代, 2024(11): 157-161.

检流计偏转线圈运动特性的研究

卢翠珍¹, 陆大同²

1.百色学院, 广西 百色 533000

2.百色职业学院, 广西百色 533000

DOI:10.61369/ME.2026010027

摘 要 : 为了帮助人们更好地理解检流计的工作原理, 掌握其正确使用方法; 从高灵敏度检流计的结构、磁电系检流计工作原理, 运用电磁学的知识和数学方法, 分析检流计偏转线圈在各种运动状态的数学表达式, 研究其运动规律。

关 键 词 : 检流计; 偏转线圈; 运动特性

Research on the Motion Characteristics of the Deflection Coil in a Galvanometer

Lu Cuizhen¹, Lu Datong²

1.Baise University, Baise, Guangxi 533000

2.Baise Vocational College, Baise, Guangxi 533000

Abstract : To facilitate a better understanding of the working principles of galvanometers and to master their correct usage, this study delves into the structure of high-sensitivity galvanometers and the working principles of magnetoelectric galvanometers. By applying knowledge of electromagnetism and mathematical methods, we analyze the mathematical expressions for the deflection coil of a galvanometer under various motion states and investigate its motion laws.

Keywords : galvanometer; deflection coil; motion characteristics

一般的磁电系仪表的线圈安装在轴承上, 通过游丝来维持平衡, 并用指针指示偏转。由于整个可动部分支撑在轴承上, 存在摩擦, 因而需要比较大的电流才能获得转动力矩, 灵敏度比较低。显然对于光生电流、生物电流、温差电动势的微弱电流或电压是不足以让其有所反应, 为此必须提高灵敏度, 检流计正是在这一基础上应运而生^[1]。

一、高灵敏度的检流计

为提高检流计的灵敏度, 就要在结构上采取措施, 使它轻巧灵活。因此, 可动线圈将采用无骨架的结构, 使重量变轻与厚度变薄, 磁路的工作气隙变短, 磁感强度增加; 此外, 可动线圈的支撑方式不用轴和轴承, 将其用张丝或吊丝吊挂, 这样就可消除轴尖与线圈间的接触所产生的摩擦, 即使是在很小的力矩下线圈也能偏转; 最后, 为达到加大指针长度, 提高灵敏度的目的, 用光标指示来代替指针, 通过光点的多次反射成像在标尺上的光标位置来表示线圈的偏转程度。改进后的结构图如图1所示, 动圈由吊丝悬挂起来, 吊丝的作用是支撑可动部分, 产生反作用力矩, 为动圈导入电流。动圈的另一端的电流引线为金属丝, 只起到导流的作用而不产生力矩。另外, 在动圈的上端还装有反射光线的

反射镜, 光束由光源入射到小镜上, 当动圈中通过电流时, 动圈中的电流与固定磁场相互作用产生转动力矩。当动圈偏转角为 α 时, 根据数学知识知道, 反射光线与入射光线之间的夹角为 2α , 光路如图2所示, 这时光点在标尺上偏转距离为 n , 标尺到小镜的距离为 l , 由图可得

$$\tan 2\alpha = \frac{n}{l} \quad (\text{式1})$$

当 l 远远大于 n 且 α 很小时, 可近似认为 $\tan 2\alpha \approx 2\alpha$, 则上式可写成 $2\alpha = \frac{n}{l}$, 即光点在标尺上的偏转距离为 $n = 2\alpha l$ 。当反射镜与标度尺的距离 l 一定时, 偏转角度越大, 则光点在标度尺上的偏转距离 n 也越大, 因此可以用偏转距离 n 的多少来表示偏转角度 α 的大小, 即表示被测电流的大小。

作者简介:

卢翠珍 (1969-), 女, 汉族, 广西横县人, 本科, 高级讲师, 研究方向: 电路设计与维修;

陆大同 (1969-), 男, 壮族, 广西平果人, 研究生, 教授, 研究方向: 自动化。

$$F = NBII \quad (\text{式2})$$

则这两竖直边产生的总转动力矩大小为

$M = 2(F \cdot r = NBII \cdot 2r = NBIS \quad (\text{式3})$ ， $2r$ 恰好是线圈水平边的长度。

因气隙中的磁场呈均匀辐射状，所以磁感应强度 B 恒定不变，对于已绕制好的线圈，其匝数 N 和有效面积 S 不变。因此，转动力矩 M 的大小取决于被测电流 I 的大小，方向由流进线圈的电流方向决定。

线圈的转动会导致吊丝发生形变，而这一形变进一步会形成一个与偏转力矩方向相反的力矩，称为反作用力矩（或阻力矩），其大小与吊丝的变形程度成正比，即与线圈的偏转角度成正比。即

$$M_f = D\alpha \quad (\text{式4})$$

其中 D 为吊丝的反作用矩系数，其大小由吊丝的材料性质、形状和特点决定。

随着偏转角 α 的增大，反作用力矩也将增大，而转动力矩在被测电流不变时是恒定的，当反作用力矩增大到一定数值时，会与转动力矩形成大小相等、方向相反的平衡状态，此时的可动部分将趋于稳定，最终停止在对应的平衡位置上。指针也就停止在某一偏转角上。根据力矩平衡条件可得

$$D\alpha = NBIS$$

所以有 $\alpha = \frac{NBS}{D} I$ 或 $I = \frac{D}{NBS} \alpha = K_I \alpha \quad (\text{式5})$ ，其中的 $K_I = \frac{D}{NBS}$ 为灵敏度。

由（式5）可知，指针的偏转角 α 与被测电流 I 呈正比关系。基于这一特性，仪表可通过指针的偏转程度来衡量被测电流的大小，并借助指针在标度尺上对应的偏移格数，直接读出电流的具体数值。

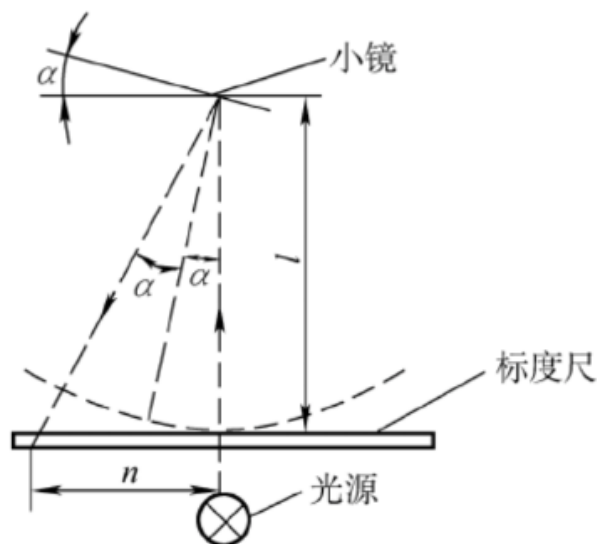


图1改进后的结构

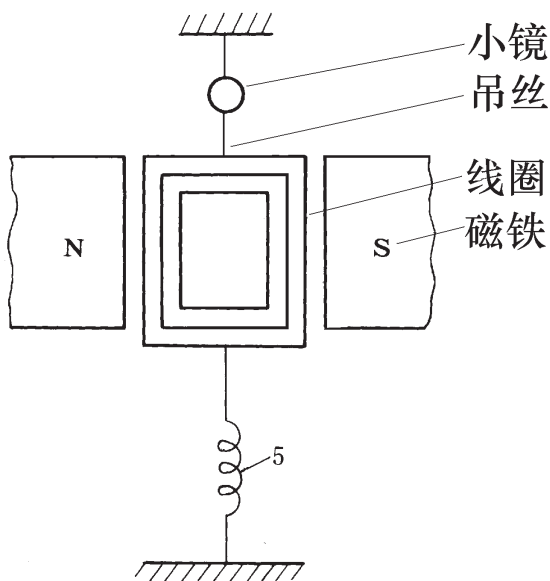


图2光路图

二、磁电系检流计工作原理

磁电系检流计工作原理是通电后的线圈在磁场环境中因受到电磁力矩的作用而发生转动。当装置中的可动线圈通入电流时，线圈各边的电流因处在永久磁铁所产生的磁场中，从而受到电磁力的作用，其中线圈的两条水平边所受电磁力大小相等、方向相反、且在同一直线上，因而相互抵消；而线圈的两条竖直边虽然所受电磁力大小相等、方向相反、但不在同一直线上，从而形成转动力矩，使可动部分转动^[2]。原理如图3所示。

设线圈中通过的电流为 I ，两个极掌与圆柱形铁芯之间的磁感强度为 B ，可动线圈的匝数为 N ，可动线圈的竖直边长为 l ，转轴中心到竖直边的距离为 r ，根据左手定则可以判断可动线圈两条竖直边所受电磁力的大小为

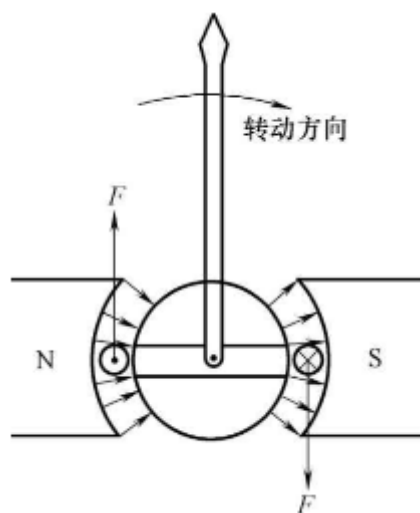


图3工作原理图

三、检流计偏转线圈运动特性分析

磁电系仪表的可动线圈发生转动时,其闭合铝框因切割气隙磁场中的磁感线,进而感应形成涡流,该涡流与气隙磁场之间产生相互作用,最终形成一个方向与可动部分转动方向刚好相反的电磁阻尼力矩^[3]。此力矩对可动部分在平衡位置附近的摆动起到抑制作用,使偏转线圈尽快在平衡位置停止下来。不过,高灵敏度检流计的动圈并未采用铝制框架,因此缺乏框架带来的阻尼作用,其阻尼效应完全依赖于动圈与外部电阻构成的回路来实现。当动圈受到驱动力矩后,会因惯性冲过平衡点;加之可动部分重量轻、运行阻力小,且无轴承摩擦力影响,在定位力矩的作用下,动圈会围绕平衡点持续摇摆,无法快速稳定在平衡位置,这种摇摆现象甚至可能持续数分钟乃至数十分钟,使测量者无法迅速读数。为此必须进一步研究偏转线圈的运动规律,以便了解检流计的最佳工作状态。

假设可动线圈通入电流以后获得的转动力矩为 M , 根据牛顿第二定律,该力矩需克服三类阻力矩,分别为吊丝的阻力矩、运动过程中产生的电磁阻尼力矩以及惯性力矩等。基于这一关系,可推导出可动线圈的运动方程为

$$J \frac{d^2 \alpha}{dt^2} + P \frac{d\alpha}{dt} + D\alpha = M \quad (\text{式6})$$

式中 J 为转动惯量, $J \frac{d^2 \alpha}{dt^2}$ 为惯性力矩; P 为偏转线圈与外电阻构成的阻尼系数, $P \frac{d\alpha}{dt}$ 为与运动角速度成正比的电磁阻尼力矩; $D\alpha$ 为吊丝的阻力矩。

显然,这是一个二阶非齐次微分方程,通过解这个方程就可以得出检流计偏转线圈的运动规律。其解有特解和通解两个部分,即

$$\alpha = \gamma + \alpha' \quad (\text{式7})$$

其中 α' 为方程的特解,它表示线圈稳定以后,即 $\frac{d\alpha}{dt} = 0$, $\frac{d^2 \alpha}{dt^2} = 0$ 时,线圈所停的平衡位置,因为当 $\frac{d\alpha}{dt} = 0$, $\frac{d^2 \alpha}{dt^2} = 0$ 时,(式6)可以写成 $D\alpha = M$ 。而此时的 $\alpha = \alpha'$, 所以 $D\alpha' = M$ 。

γ 为微分方程的通解,于是把(式7)代入(式6)

$$J \frac{d^2(\alpha' + \gamma)}{dt^2} + P \frac{d(\alpha' + \gamma)}{dt} + D(\alpha' + \gamma) = M$$

$$J \frac{d^2 \gamma}{dt^2} + P \frac{d\gamma}{dt} + D\alpha' + D\gamma = M$$

得齐次微分方程 $J \frac{d^2 \gamma}{dt^2} + P \frac{d\gamma}{dt} + D\gamma = 0$ (式8), 明显就是一个典型的振动方程。

其特征方程为 $Js^2 + Ps + D = 0$ (式9), 特征根 s 由求根公式求得:

$$s_{1,2} = \frac{-P \pm \sqrt{P^2 - 4JD}}{2J} = -\frac{P}{2J} \pm \sqrt{\frac{P^2}{4J^2} - \frac{4JD}{4J^2}} = -\frac{P}{2J} \pm \sqrt{\frac{P^2}{4J^2} - \frac{D}{J}}$$

也可以写为 $s_{1,2} = \sqrt{\frac{D}{J}}(-\frac{P}{2\sqrt{JD}} \pm \sqrt{\frac{P^2}{4JD} - 1})$ (式10), 为了简便令

$\sqrt{\frac{D}{J}} = \omega_0$, $\frac{P}{2\sqrt{JD}} = \beta$, 则上式可写成 $s_{1,2} = \omega_0(-\beta \pm \sqrt{\beta^2 - 1})$ (式11) β 为阻尼因数,与阻尼系数 P 有关。

由于检流计没有其他阻尼装置,只靠动圈本身的感应电动势通过外电路电阻产生阻尼,如果偏转线圈在气隙中产生的感应电动势为 e , 偏转线圈和外电路的总电阻为 R , 那么产生的电磁阻尼力矩为

$$M' = \Psi i = N\phi \frac{e}{R} = -N\phi \frac{1}{R} N \frac{d\phi}{dt} = -N\phi \frac{1}{R} NBS \frac{d\alpha}{dt} \quad (\text{式12})$$

所以阻尼系数 $P = N\phi \frac{NBS}{R} = \frac{(N\phi)^2}{R}$ 。可见回路总电阻越大,阻尼系数 P 就越小,也就是 β 值越小。而在(式11)中, β 的取值可以是大于1、小于1或等于1,不同的取值将分别对应于线圈不同的运动状态,运动状态的不同又源自于线圈运动中所受的电磁阻尼不同,因此需要用表达式定量地描述线圈的运动特性。

当 $\beta < 1$ 时,(式11)中的 β , 故特征方程(式9)有两个不相等的虚根,即

$$s_{1,2} = \omega_0(-\beta \pm \sqrt{\beta^2 - 1}i) \quad (\text{式13})$$

在这种情况下,齐次微分方程(式9)解的形式为 $\gamma = e^{\alpha'x}(C_1 \sin \beta'x + C_2 \cos \beta'x)$, 结合(式13)得通解 γ 中的实部 $\alpha' = -\omega_0\beta$, 虚部 $\beta' = \omega_0\sqrt{1-\beta^2}$, 所以

$$\gamma = e^{-\omega_0\beta t}(C_1 \sin \sqrt{1-\beta^2}\omega_0 t + C_2 \cos \sqrt{1-\beta^2}\omega_0 t) \quad (\text{式14})$$

式中的 C_1 、 C_2 为积分常数,与运动初始条件有关。当给定 $t=0$ 时, $\alpha=0$, 由(式7)得 $\gamma = -\alpha'$, 则 $\frac{d\gamma}{dt} = \frac{d(-\alpha')}{dt} = 0$ 。把它们代入(式14)得

$$-\alpha' = \frac{1}{e^0}(C_1 \sin \sqrt{1-\beta^2}\omega_0 \times 0 + C_2 \cos \sqrt{1-\beta^2}\omega_0 \times 0)$$

$$\text{所以 } C_2 = -\alpha', \text{ 而 } \frac{d\gamma}{dt} = (-\omega_0\beta)e^{-\omega_0\beta t}(C_1 \sin \sqrt{1-\beta^2}\omega_0 t + C_2 \cos \sqrt{1-\beta^2}\omega_0 t) + e^{-\omega_0\beta t}(C_1 \cos \sqrt{1-\beta^2}\omega_0 t \times \sqrt{1-\beta^2}\omega_0 - C_2 \sin \sqrt{1-\beta^2}\omega_0 t \times \sqrt{1-\beta^2}\omega_0)$$

$$\text{所以 } 0 = (-\omega_0\beta)\frac{1}{e^0} \times C_2 + \frac{1}{e^0} \times C_1 \times \sqrt{1-\beta^2}\omega_0$$

$$C_1 = \frac{C_2\beta}{\sqrt{1-\beta^2}} = \frac{-\alpha'\beta}{\sqrt{1-\beta^2}}$$

则通解

$$\begin{aligned} \gamma &= e^{-\omega_0\beta t}(\frac{-\alpha'\beta}{\sqrt{1-\beta^2}} \sin \sqrt{1-\beta^2}\omega_0 t - \alpha' \cos \sqrt{1-\beta^2}\omega_0 t) \\ &= e^{-\omega_0\beta t} \frac{-\alpha'}{\sqrt{1-\beta^2}}(\beta \sin \sqrt{1-\beta^2}\omega_0 t + \sqrt{1-\beta^2} \cos \sqrt{1-\beta^2}\omega_0 t) \end{aligned}$$

利用三角函数对上式进行化简

$$\begin{aligned} &= \frac{-\alpha'}{\sqrt{1-\beta^2}} e^{-\omega_0\beta t}(\cos \phi \sin \sqrt{1-\beta^2}\omega_0 t + \sin \phi \cos \sqrt{1-\beta^2}\omega_0 t) \\ \gamma &= \frac{-\alpha'}{\sqrt{1-\beta^2}} e^{-\omega_0\beta t} \sqrt{\beta^2 + (\sqrt{1-\beta^2})^2} \frac{\beta}{\sqrt{1-\beta^2}} \sin \sqrt{1-\beta^2}\omega_0 t + \frac{\sqrt{1-\beta^2}}{\sqrt{1-\beta^2}} \cos \sqrt{1-\beta^2}\omega_0 t \\ &= \frac{-\alpha'}{\sqrt{1-\beta^2}} e^{-\omega_0\beta t} \sin(\omega_0 \sqrt{1-\beta^2}t + \phi) \end{aligned}$$

$$\text{而 } \phi = \arctan \frac{\sqrt{1-\beta^2}}{\beta} = \arctan \sqrt{\frac{1-\beta^2}{\beta^2}},$$

$$\text{所以 } \gamma = \frac{-\alpha'}{\sqrt{1-\beta^2}} e^{-\omega_0\beta t} \sin(\sqrt{1-\beta^2}\omega_0 t + \arctan \sqrt{\frac{1-\beta^2}{\beta^2}})$$

$$\alpha = \alpha' - \frac{\alpha'}{\sqrt{1-\beta^2}} e^{-\omega_0 t} \sin(\sqrt{1-\beta^2} \omega_0 t + \arctan \sqrt{\frac{1-\beta^2}{\beta^2}}) \quad (\text{式15})$$

从(式15)可以看出, 偏转角 α 由两部分构成, 第一部分为偏转线圈稳定后的偏转值 $\alpha' = KI$, 也就是偏转线圈最终停留的位置; 第二部分是时间 t 的正弦函数, 并含有衰减因子 $e^{-\omega_0 t}$, 说明偏转线圈不能立刻停在 α' 的位置, 在到达稳定之前, 会做衰减的周期性运动, 衰减快慢取决于 β , 完全衰减后才会停在稳定点, 如图4的曲线1所示。这种状态称为欠阻尼状态。它的周期性振荡角频率和振荡周期分别为

$$\omega = \sqrt{1-\beta^2} \omega_0; \quad T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{\omega_0 \sqrt{1-\beta^2}}$$

偏转线圈是否工作于欠阻尼状态, 取决于阻尼因数 $\frac{P}{2\sqrt{J\theta}}$ 的值, 而 P 又与外电阻有关, 且外电阻又是可调的, 略有欠阻尼的工作状态还是允许的, 但阻尼过小就不宜使用。

欠阻尼状态的最极端状态就是检流计开路, 即 $R = \infty$ 、 $P = 0$ 、 $\beta = 0$ 、 $\omega = \omega_0$, 说明偏转线圈永远不会停在平衡位置, 而按角频率 ω_0 振荡不止, 这个频率就是可动部分的自然振荡频率, 所以使用中不能在通电后开路。

当 $\beta = 1$ 时, (式11)的特征方程有两个相等的实数根, $s_1 = s_2 = -\beta\omega_0$

此时的齐次微分方程解的形式为:

$$\begin{aligned} \gamma &= (C_1 + C_2 x) e^{-\omega_0 t} \\ \text{故 } \gamma &= (C_1 + C_2 t) e^{-\omega_0 t} \end{aligned} \quad (\text{式16})$$

C_1 、 C_2 常数同样根据初始条件求得, 即 $t = 0$ 时, $\alpha = 0$, 由(式7)得 $\gamma = -\alpha'$, 则 $\frac{d\gamma}{dt} = \frac{d(-\alpha')}{dt} = 0$ 。把它们代入(式16) $-\alpha' = (C_1 + C_2 \times 0) \frac{1}{e^0}$ 得 $C_1 = -\alpha'$ 再根据 $\frac{d\gamma}{dt} = C_2 e^{-\omega_0 t} + (C_1 + C_2 t) e^{-\omega_0 t} (-\omega_0)$ 得

$$0 = C_2 \frac{1}{e^0} + (C_1 + C_2 \times 0) \frac{1}{e^0} (-\omega_0)$$

$$\text{所以 } C_2 = \omega_0 C_1 = -\omega_0 \alpha'$$

$$\text{故 } \gamma = (-\alpha' - \omega_0 \alpha' t) e^{-\omega_0 t} = -\alpha' (1 + \omega_0 t) e^{-\omega_0 t}$$

考虑到 $\alpha = \alpha' + \gamma$ 和 $\beta = 1$, 可得非齐次微分方程的解为

$$\alpha = \alpha' - \alpha' e^{-\omega_0 t} (1 + \omega_0 t) \quad (\text{式17})$$

可见, 改变外电阻使 $\beta = 1$ 时, 振荡周期 T 趋向于无穷大, 此时没有振荡, 偏转线圈将不经过振荡, 就进入平衡位置, 而且时间最短, 这种运动状态称为临界阻尼状态, 这时的 β 值称为临界阻尼因数, 处于临界阻尼的动圈, 其运动情况如图4的曲线3所示。此状态是最理想的状态。从(式17)也可以看出, 它的解也有两部分组成, 一部分是稳定偏转, 另一部分是衰减运动, 最后趋向于零。

当 $\beta > 1$ 时, 特征方程有两个不相等的实数根, 即 $s_{1,2} = \omega_0(-\beta \pm \sqrt{\beta^2 - 1})$

此时的齐次微分方程解的形式为: $\gamma = C_1 e^{s_1 x} + C_2 e^{s_2 x}$, 所以有

$$\gamma = C_1 e^{(-\omega_0 \beta + \omega_0 \sqrt{\beta^2 - 1})t} + C_2 e^{(-\omega_0 \beta - \omega_0 \sqrt{\beta^2 - 1})t} \quad (\text{式18})$$

式中 C_1 、 C_2 常数同样根据初始条件求得, 即 $t = 0$ 时, $\alpha = 0$, 由(式7)得 $\gamma = -\alpha'$, 则 $\frac{d\gamma}{dt} = \frac{d(-\alpha')}{dt} = 0$ 。把它们代入(式18)

$$\text{得 } -\alpha' = C_1 e^{(-\omega_0 \beta + \omega_0 \sqrt{\beta^2 - 1}) \times 0} + C_2 e^{(-\omega_0 \beta - \omega_0 \sqrt{\beta^2 - 1}) \times 0}$$

$$C_1 + C_2 = -\alpha' \quad (\text{式19})$$

再由 $\frac{d\gamma}{dt} = 0$ 得

$$0 = C_1(-\omega_0 \beta + \omega_0 \sqrt{\beta^2 - 1}) e^{(-\omega_0 \beta + \omega_0 \sqrt{\beta^2 - 1})t} + C_2(-\omega_0 \beta - \omega_0 \sqrt{\beta^2 - 1}) e^{(-\omega_0 \beta - \omega_0 \sqrt{\beta^2 - 1})t} \text{ 整理}$$

$$\text{后 } 0 = C_1(-\omega_0 \beta + \omega_0 \sqrt{\beta^2 - 1}) e^0 + C_2(-\omega_0 \beta - \omega_0 \sqrt{\beta^2 - 1}) e^0$$

$$(-\beta) (C_1 + C_2) + \sqrt{\beta^2 - 1} (C_1 - C_2) = 0$$

$$C_1 - C_2 = \frac{-\beta \alpha'}{\sqrt{\beta^2 - 1}} \quad (\text{式20})$$

联立(式19)和(式20)求得

$$C_1 = \frac{-\alpha'(-\beta + \sqrt{\beta^2 - 1})}{2\sqrt{\beta^2 - 1}}, \quad C_2 = \frac{-\alpha'(-\beta + \sqrt{\beta^2 - 1})}{2\sqrt{\beta^2 - 1}}$$

所以

$$\begin{aligned} \gamma &= \frac{-\alpha'(-\beta + \sqrt{\beta^2 - 1})}{2\sqrt{\beta^2 - 1}} e^{(-\omega_0 \beta + \omega_0 \sqrt{\beta^2 - 1})t} + \frac{-\alpha'(-\beta + \sqrt{\beta^2 - 1})}{2\sqrt{\beta^2 - 1}} e^{(-\omega_0 \beta - \omega_0 \sqrt{\beta^2 - 1})t} \\ &= \frac{-\alpha'(-\beta + \sqrt{\beta^2 - 1})}{\sqrt{\beta^2 - 1}} \frac{e^{-\beta \omega_0 t}}{2} e^{\frac{\sqrt{\beta^2 - 1} \omega_0 t}{2}} + \frac{-\alpha'(-\beta + \sqrt{\beta^2 - 1})}{\sqrt{\beta^2 - 1}} \frac{e^{-\beta \omega_0 t}}{2} e^{-\frac{\sqrt{\beta^2 - 1} \omega_0 t}{2}} \\ &= \frac{-\alpha' e^{-\beta \omega_0 t}}{\sqrt{\beta^2 - 1}} \left[(\beta + \sqrt{\beta^2 - 1}) \frac{e^{\frac{\sqrt{\beta^2 - 1} \omega_0 t}{2}}}{2} + (-\beta + \sqrt{\beta^2 - 1}) \frac{e^{-\frac{\sqrt{\beta^2 - 1} \omega_0 t}{2}}}{2} \right] \\ &= \frac{-\alpha' e^{-\beta \omega_0 t}}{\sqrt{\beta^2 - 1}} \left(\beta \frac{e^{\frac{\sqrt{\beta^2 - 1} \omega_0 t}{2}}}{2} - \beta \frac{e^{-\frac{\sqrt{\beta^2 - 1} \omega_0 t}{2}}}{2} + \sqrt{\beta^2 - 1} \frac{e^{\frac{\sqrt{\beta^2 - 1} \omega_0 t}{2}}}{2} + \sqrt{\beta^2 - 1} \frac{e^{-\frac{\sqrt{\beta^2 - 1} \omega_0 t}{2}}}{2} \right) \\ &= \frac{-\alpha' e^{-\beta \omega_0 t}}{\sqrt{\beta^2 - 1}} \left[\beta \left(\frac{e^{\frac{\sqrt{\beta^2 - 1} \omega_0 t}{2}}}{2} - \frac{e^{-\frac{\sqrt{\beta^2 - 1} \omega_0 t}{2}}}{2} \right) + \sqrt{\beta^2 - 1} \left(\frac{e^{\frac{\sqrt{\beta^2 - 1} \omega_0 t}{2}}}{2} + \frac{e^{-\frac{\sqrt{\beta^2 - 1} \omega_0 t}{2}}}{2} \right) \right] \end{aligned}$$

因为双曲正弦函数 $\sinh x = \frac{e^x - e^{-x}}{2}$, 双曲余弦函数 $\cosh x = \frac{e^x + e^{-x}}{2}$, 所以上式变为

$$\begin{aligned} \gamma &= \frac{-\alpha' e^{-\beta \omega_0 t}}{\sqrt{\beta^2 - 1}} (\beta \sinh \sqrt{\beta^2 - 1} \omega_0 t + \sqrt{\beta^2 - 1} \cosh \sqrt{\beta^2 - 1} \omega_0 t) \\ &= \frac{-\alpha' e^{-\beta \omega_0 t}}{\sqrt{\beta^2 - 1}} \sqrt{\beta^2 + (\sqrt{\beta^2 - 1})^2} \left(\frac{\beta}{\sqrt{2\beta^2 - 1}} \sinh \sqrt{\beta^2 - 1} \omega_0 t + \frac{\sqrt{\beta^2 - 1}}{\sqrt{2\beta^2 - 1}} \cosh \sqrt{\beta^2 - 1} \omega_0 t \right) \\ &= \frac{-\alpha' e^{-\beta \omega_0 t}}{\sqrt{\beta^2 - 1}} \sqrt{2\beta^2 - 1} (\cosh \sqrt{\beta^2 - 1} \omega_0 t + \sinh \sqrt{\beta^2 - 1} \omega_0 t) \\ &= \frac{-\alpha' e^{-\beta \omega_0 t}}{\sqrt{\beta^2 - 1}} \sqrt{2\beta^2 - 1} \sinh(\sqrt{\beta^2 - 1} \omega_0 t + \phi) \end{aligned}$$

其中 $\phi = \operatorname{arctanh} \frac{\sqrt{\beta^2 - 1}}{\beta} = \operatorname{arctanh} \sqrt{\frac{\beta^2 - 1}{\beta^2}}$, 所以

$$\gamma = \frac{-\alpha' e^{-\beta \omega_0 t}}{\sqrt{\beta^2 - 1}} \sqrt{2\beta^2 - 1} \sinh(\sqrt{\beta^2 - 1} \omega_0 t + \operatorname{arctanh} \sqrt{\frac{\beta^2 - 1}{\beta^2}})$$

考虑到 $\alpha = \alpha' + \gamma$, 可得非齐次微分方程的解为

$$\alpha = \alpha' - \frac{\alpha' e^{-\beta \omega_0 t}}{\sqrt{\beta^2 - 1}} \sqrt{2\beta^2 - 1} \sinh(\sqrt{\beta^2 - 1} \omega_0 t + \operatorname{arctanh} \sqrt{\frac{\beta^2 - 1}{\beta^2}}) \quad (\text{式21})$$

当改变外电路电阻使 $\beta > 1$ 时, 和第二种情况一样, 可动部分将从一侧缓慢进入平衡位置, 如图4曲线中2所示, 但到达平衡位置的时间比较长, 这种情况称为过阻尼状态。此状态虽然没有振荡, 但如果 β 过大, 进入稳定时间过长, 最好也不用。

通过对检流计偏转线圈运动特性的数学分析可知, 偏转线圈

的运动状态分为欠阻尼、临界阻尼、过阻尼三种；其中过阻尼状态，偏转线圈做非周期性的衰减运动，要经过很长时间，才回到平衡位置；欠阻尼状态以平衡位置为中心做周期性的衰减运动而逐渐趋向于平衡位置；临界阻尼状态处于周期性振荡阻尼向非周期性振荡阻尼过渡的状态，以最短的时间到达平衡位置，因此使用中最好选择临界阻尼状态。

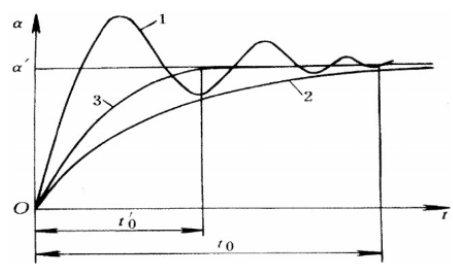


图4 偏转线圈运动状态曲线

参考文献

[1] 陈立周, 陈岚岚. 电气测量 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2022.1 月第6版.
[2] 黄立宏. 高等数学 [M]. 北京: 北京大学出版社, 2018, 7 月第1版.
[3] 程春晓, 韩东峰. 冲击电流计特性研究实验中对偏转线圈运动状态的数学分析 [J]. 洛阳工业高等专科学校学报, 2007, 06 (17).

面向低背压运行的机组蒸发冷凝器热力性能提升研究

马永军

大唐蒲城第二发电有限责任公司, 陕西 渭南 715501

DOI:10.61369/ME.2026010028

摘 要 : 面向低背压运行条件下的机组蒸发冷凝器热效率优化研究, 重点在于采用多元技术方案攻克传统空冷机组在高温工况下压力上升、效能降低的技术瓶颈。该研究全面考察了制约蒸发冷凝器换热效率的核心要素, 包括装置构型、传热介质、循环水调控及气流组织等参数。基于上述分析, 研究从结构改良与参数优化、先进强化换热技术实施、整体系统匹配与协同调节以及智能化调控与运行策略四个层面, 构建了完整的效能提升方案, 为火力发电等领域的能源节约与环保转型提供了切实可行的技术支撑。

关 键 词 : 低背压运行; 蒸发冷凝器; 热力性能; 强化传热

Research on Improving the Thermal Performance of Evaporative Condensers for Units Operating at Low Back Pressure

Ma Yongjun

Datang Pucheng Second Power Generation Co., LTD., Weinan, Shaanxi 715501

Abstract : Research on the thermal efficiency optimization of evaporative condensers for units under low back pressure operating conditions focuses on adopting multiple technical solutions to overcome the technical bottlenecks of pressure increase and efficiency reduction in traditional air-cooled units under high-temperature conditions. This study comprehensively examined the core elements that restrict the heat exchange efficiency of evaporative condensers, including parameters such as device configuration, heat transfer medium, circulating water regulation, and air flow organization. Based on the above analysis, the research has constructed a complete efficiency improvement plan from four aspects: structural improvement and parameter optimization, implementation of advanced enhanced heat exchange technology, overall system matching and coordinated regulation, and intelligent control and operation strategies, providing practical and feasible technical support for energy conservation and environmental protection transformation in fields such as thermal power generation.

Keywords : low back pressure operation; evaporative condenser; thermal performance; enhance heat transfer

引言

在电力生产环节中, 火力发电厂汽轮机的冷凝系统效能对电厂整体运行具有决定性影响。采用空气冷凝方式的直接空冷机组虽然能大幅减少水资源消耗, 但其散热效果受外界温度波动影响显著, 形成了“夏季效能不足、冬季防冻困难”的典型运行难题。当气温升高时, 空气与工作介质之间的热交换效率降低, 空冷凝汽器的散热能力显著减弱, 进而导致汽轮机排气压力上升。这种压力升高不仅减少了汽轮机的有效做功能力, 提高了燃料消耗率, 更严重制约了发电机组的最大输出功率, 使电站在用电需求高峰期难以达到额定负荷, 既影响了经济效益又削弱了供电可靠性。而在寒冷季节, 则需重点防范冷凝管束结冰问题, 这既增加了操作难度也提高了维护费用^[1]。

虽然蒸发冷凝器在理论层面展现出显著优势, 但其实际运行过程中的热工特性仍面临多重限制条件。具体而言, 换热管排的几何构型与空间排布、喷淋液膜覆盖的完整度与持续性、气流与液滴的混合状态、水质沉积风险以及设备调控方案等关键参数, 综合影响着装置的传热效率与能源消耗。基于降低运行压力的核心需求, 系统研究蒸发冷凝器的热力学性能优化路径, 借助技术革新与整体改进, 最大限度释放其节能效益, 这对增强火力发电设备的调节能力、经济指标, 以及促进电力系统向低碳方向发展, 均具备突出的学术价值和实践意义。

一、蒸发冷凝器热力性能影响因素分析

（一）结构参数与传热表面特性

冷凝器的结构特性直接影响其换热面积分布、流体动力学特性和热交换效能。传统管壳式蒸发冷凝器普遍采用板片管结构来增大换热面积，其中板片间隔尺寸、几何高度以及管排布形式尤为关键。适当缩小板片间隙能够提升单位体积换热面积，但过度缩小会增大气流阻力并引发冷凝水积聚问题；而增加板片高度虽可增强换热效果，却会显著提高管内介质流动压损，需要在热传递增强与流动损失之间取得合理折中。

现代制冷技术中，板式蒸发冷凝器因其创新结构获得广泛研究。面向波纹板式结构的分析显示，运用多参数遗传优化算法调整波纹间距与高度参数，既能降低出口介质温度，又可优化气流侧压力损失，达成热力性能与流体特性的双重提升。值得注意的是，换热界面的材料选择与表面处理技术同样影响设备耐久性。选用具有防腐蚀、防积垢特性的表面处理工艺或特殊材料，例如镀锌合金管材、奥氏体不锈钢或铝覆层扁管，能够有效保持表面洁净度，抑制因污垢沉积引起的热阻增长，确保换热效能的长期可靠性^[2]。

（二）传热工质与两相流传热特性

蒸发冷凝器中的热交换机制包含蒸汽凝结与冷凝水汽化的双重过程，构成了典型的多相流传热系统。工质的物理特性直接决定了冷凝性能的优劣。面向非共沸混合工质而言，其相变时伴随的温度波动特性为温度调控创造了有利条件。在采用非共沸工质的有机朗肯循环系统中，蒸发冷凝器内存在特定的组分浓度区间。在此区间内运行，既能显著减小所需的换热面积，又能确保系统热力学效率达到峰值。

相关研究表明，在蒸汽喷射器等装置中，蒸汽膨胀过程中形成的液滴会显著改变流动状态，导致能量损耗增加。类似现象也可能出现在蒸发冷凝器的特定流动区域。深入探究多相流传热与流动特性的内在规律，并据此进行系统优化，是实现冷凝器核心换热性能提升的根本途径。这种优化需要综合考虑工质特性、流动状态和传热效率之间的复杂关系。

（三）水系统特性与蒸发过程调控

蒸发冷凝器的独特优势在于其水循环系统的设计，这一系统对潜热交换效果起着决定性作用。其中最关键的是喷淋水膜的质量参数，包括覆盖均匀度、持续稳定性和厚度控制。最佳状态的水膜应当完全包裹换热面，同时保持适中的厚度。水膜过厚会阻碍热量传递，而厚度不足则容易引发局部干燥现象。要实现这一目标，必须对喷淋装置的形态、分布密度以及工作压力进行精细调节。水质控制同样是不可忽视的重要环节。随着蒸发过程的持续，循环水中矿物质浓度不断升高，极易在管道内壁形成沉积层，这会额外增加热传导阻力。若长期运行而不加处理，积垢问题将导致换热能力呈现逐年衰减的趋势。为此，必须对补给水实施软化处理或定期投放防垢药剂，同时严格监控循环水的浓缩倍数^[3]。

（四）空气流动与传质过程强化

在蒸发冷凝器运行过程中，空气发挥着两种关键作用：首先

作为携湿介质，能够有效转移蒸发产生的水蒸气；其次通过强制对流方式吸收部分显热。这种特性使得空气流动状况直接决定了传热与传质效率。为确保理想的换气效果，必须保证充足的风量以及均匀分布的风速场。风机需要产生足够的压头来克服湿管束和除水装置带来的气流阻力。虽然提高空气流速可以强化对流换热效果并促进蒸发界面的水汽扩散，但同时也会导致风机能耗上升。通过改进流道结构设计，比如采用科学的管束排列方式防止气流旁通，确保空气与换热面充分接触，这对消除局部换热盲区、改善温度场均匀性具有决定性影响。外界空气湿度作为关键环境参数，直接影响着蒸发冷凝的驱动力。当遇到高温高湿工况时，空气的携湿能力显著降低，导致蒸发冷凝效率急剧下降，此时通常需要提高通风量来部分补偿性能衰减。

（五）系统控制策略与运行匹配

蒸发冷凝器的运行效能与整个机组冷端系统密切相关，必须根据主机负荷变化和环境参数实时调整。要实现最佳节能效果，关键在于采用智能化的调控方案。传统固定转速的运行模式在部分负荷工况或温度适宜时，往往导致不必要的能源损耗。现代优化系统通过引入变频调速技术，能够基于冷凝压力或温度目标值，动态控制风机转速和水泵运行频率。具体来说，当外界温度低于预设阈值（例如27℃）时，系统可优先或完全依赖空气冷凝模式；而随着气温上升引起背压增加，则会主动激活蒸发冷凝器，并智能调节其运行功率。同时，面向寒冷季节的运行特点，控制系统还需执行防冻保护程序，通过优化各冷凝单元的水量分配、改变气流组织方式或启动加热装置，有效避免换热管束内部结冰，确保设备可靠运行。这种精细化控制策略可在保证冷凝效果的同时，最大限度降低风机、水泵等辅助设备的电力消耗。

二、低背压运行的机组蒸发冷凝器热力性能提升策略

（一）结构创新与优化设计策略

从传热元件的结构创新与系统布局的合理规划入手，从根本上增强冷凝器的热传导性能与工况适应能力。首要任务是实现传热表面由常规圆管向高性能板片的转型。板式蒸发冷凝器凭借其紧凑的构造和优异的热交换效率，已成为重点发展方向。国内科研单位已在大型火电机组直冷系统改造中成功应用该技术，实际运行数据表明夏季真空指标获得明显改善。面向板片结构设计，可采用多参数优化方法，对板片几何尺寸、排列密度及倾斜角度等关键因素进行综合寻优，在传热效率与流动阻力之间取得最优解，从而开发出高效节能的强化传热结构。另一方面，需完善系统流程与空间配置。通过顺逆流混合的多流程布置方案，可满足不同季节的运行要求。高温季节采用顺流模式有利于增强蒸发效果；寒冷季节则可切换至逆流模式，有效预防防结冰问题。对于复合式系统，还需探究蒸发冷凝器与空冷设备的协同运行机制及容量匹配关系，确保各组件在多变工况下实现优势互补，达到协同增效的目的^[4]。

（二）新型强化传热技术应用策略

通过整合多学科领域的创新强化传热与传质方法，为系统性

能优化开辟新途径。其中，磁化水处理技术展现出独特的技术优势。研究证实，当喷淋水经过特定磁场强度处理后，其物性参数会发生明显变化，表面张力显著降低，从而改善液体在换热表面的润湿特性与汽化效率。在蒸发冷凝器中采用磁化水工艺，能够实现换热效能的突破性提升。将这一创新技术与蒸发冷凝设备相结合，可在维持能耗水平不变的情况下，有效强化其核心的蒸发换热机制。另一个值得关注的技术路线是开发新型传热介质，在某些特定工况下，选用非共沸混合制冷剂，利用其特有的温度滑移效应，能够更精准地适应冷凝过程中的温度梯度变化，降低传热环节的热力学损失，进而提升系统的火用利用效率。同时，纳米流体等新型传热工质在单相流强化传热领域已表现出优异性能，其在蒸发冷凝器管内侧冷凝过程中的潜在应用价值也亟待探索，这种双向强化策略可能为整个传热系统带来协同增效。

（三）系统集成与协同优化策略

在整体能源系统框架下审视蒸发冷凝器的应用，通过多热力环节的协同优化，显著提升综合能效表现。其中，复合型空冷凝汽系统是典型应用案例，采用空冷主导、蒸发冷凝辅助的混合模式，实现了技术层面的深度整合而非简单组合。该系统中，蒸发凝汽器作为调峰冷凝单元，仅在高温工况下启动，有效控制背压波动，以有限的水资源投入和设备运行时长，确保机组在关键工况下的性能表现和经济收益。

进一步的技术创新体现在低品位热源的梯级利用方面。现有技术方案中，存在通过分流部分循环冷凝水，经蒸发器与制冷剂进行热交换的工艺路线。该方案不仅实现了水温的二次降低，同时利用制冷剂冷凝释放的热量预热主凝汽器出口凝结水，有效改善过冷现象。这种集成化设计既优化了系统背压参数，又实现了冷端余热的回收利用，从热力循环整体角度提升了能效水平。此类系统优化需要跨越传统设备界限，开展全局热力学分析与参数优化。

（四）智能控制与运行优化策略

通过整合先进的传感技术、物联网架构以及人工智能算法，

实现精准化、智能化的运行管理，是充分发挥系统效能的核心策略。关键在于建立基于多元参数协同优化的动态调节机制，该机制以保持预设背压值为首要任务，以整体能耗最小化为最终目标，持续监测包括环境温湿度参数、机组运行负荷、循环水温度曲线以及风机水泵电流波动等在内的多维运行指标。智能调控模型能够实时计算出特定工况条件下风机的最优转速区间、喷淋系统的最佳水流量以及多冷凝单元之间的最优负荷配比方案。举例来说，在环境温度较低的夜间或机组低负荷运行阶段，可显著减少甚至完全停止喷淋装置和风机的运转；而在高湿度闷热天气条件下，则应重点确保充足通风量而非单纯提高喷淋强度。同时，智能化管理方案还需整合设备异常检测与预防性维护功能模块。通过对历史运行曲线与实时监测数据的偏差分析，能够提前预警换热器结垢风险、喷头堵塞征兆或风机性能衰减等问题，为实施预防性检修提供决策依据，确保设备长期处于最佳运行工况。最终，借助智能化管理手段将设计优势与技术特性转化为持续稳定的高效运行表现。

三、结语

综上，面向低背压工况下机组蒸发冷凝器的热力性能优化，这一课题涉及结构设计、工质特性、传热强化及系统调控等多个技术层面的协同攻关。本研究全面分析了制约其性能表现的核心要素，并基于此构建了包含结构革新、新型技术引入、系统集成及智能调控四个平行方向的综合性能提升方案。实验数据表明，孤立的技术改良往往效果不显著，唯有整合高效板式换热单元、磁化水等新型传质强化手段、与空冷系统协同运行的混合架构，以及依托人工智能和大数据分析的精确调控策略，构建完整的解决方案体系，才能充分挖掘蒸发冷凝器的性能提升空间。

参考文献

- [1] 靳茗森, 胡晓微, 胡朋丽, 等. 板间距对板式蒸发冷凝器换热性能的影响规律研究 [J]. 节能, 2025, 44(02): 80-83.
- [2] 赵红霞, 王奇, 刘光弟, 等. R1234yf在板式蒸发冷凝器中换热过程的数值模拟 [J]. 制冷技术, 2024, 44(03): 21-28+35.
- [3] 王将, 张秋建, 王云龙, 等. 我厂蒸发式冷凝器的选型及改造 [J]. 纯碱工业, 2024, (03): 36-38.
- [4] 陆刘记, 张胜利, 侯俊峰, 等. 肋片板式蒸发冷凝器传热性能及优化研究 [J]. 低温与超导, 2022, 50(01): 27-32+75.

机电设备安装调试专项现场服务工程师培养体系构建

钱鑫

TECHLONG INTERNATIONAL INC. 美国 30024

DOI:10.61369/ME.2026010030

摘 要： 机电设备安装调试是工业生产与工程建设的核心环节，现场服务工程师的专业能力直接决定设备运行稳定性与生产效率。本文结合行业发展需求与诊断 AI 软件应用趋势，从培养体系的核心目标、现存问题、构建原则、核心模块及保障措施等方面，系统构建机电设备安装调试专项现场服务工程师培养体系，为行业输送兼具实操能力、创新思维与 AI 应用能力的复合型人才，助力机电行业高质量发展。

关 键 词： 机电设备；安装调试；现场服务工程师；培养体系；诊断 AI 软件

Construction of Special On-site Service Engineer Training System for Mechanical and Electrical Equipment Installation and Commissioning

Qian Xin

TECHLONG INTERNATIONAL INC. USA, 30024

Abstract： Installation and commissioning of mechanical and electrical equipment is a core part of industrial production and engineering construction. The professional ability of on-site service engineers directly determines the stability of equipment operation and production efficiency. This paper, in combination with the industry development needs and the application trend of diagnostic AI software, systematically constructs a special on-site service engineer training system for mechanical and electrical equipment installation and commissioning. It aims to provide the industry with a group of compound talents with practical operation ability, innovative thinking and AI application ability, and help the mechanical and electrical industry achieve high-quality development..

Keywords： mechanical and electrical equipment; installation and commissioning; on-site service engineer; training system; diagnostic AI software

引言

随着智能制造与工业 4.0 的深度推进，机电设备向自动化、智能化、集成化方向快速迭代，对现场服务工程师的专业素养提出更高要求。当前，行业内工程师存在实操能力不均、AI 工具应用不足、问题诊断效率偏低等问题。构建科学完善的培养体系，融入诊断 AI 软件实践教学，提升工程师综合服务能力，是破解行业人才瓶颈、保障设备高效运维的关键，对推动机电行业数字化转型具有重要现实意义。

一、机电设备安装调试现场服务工程师培养现状与问题

（一）培养目标定位模糊

当前多数培养方案对现场服务工程师的定位局限于基础安装与故障维修，未能贴合智能化设备发展需求，缺乏对 AI 工具应用、跨场景协同服务等核心能力的明确要求。部分企业与院校仅注重理论知识灌输，忽视现场实操与问题解决能力的培养，导致毕业生入职后难以快速适配岗位需求，需经过长期岗前培训才能独立开展工作。同时，培养目标未充分结合行业细分领域差异，通用型培养模式无法满足不同机电设备（如工业机器人、精密仪器）安装调试的专项需求，造成人才供给与岗位需求脱节。诊断

AI 软件作为新型故障排查工具，其应用能力未被纳入核心培养目标，导致工程师难以借助技术手段提升服务效率。

（二）培养内容与行业需求脱节

培养内容更新滞后于机电设备技术迭代，传统课程仍以机械原理、电气控制等基础理论为主，对智能化设备的总线控制、物联网集成、远程调试等前沿内容涉及较少。实操训练多围绕传统设备展开，缺乏对精密化、自动化设备安装调试流程的模拟训练，且未引入诊断 AI 软件实操内容，工程师无法掌握利用 AI 工具快速定位故障、分析设备运行数据的技能。此外，培养内容缺乏对服务意识、沟通协调、应急处理等综合素养的系统覆盖，现场服务中常出现工程师技术能力达标但无法有效对接客户需求、应对突发问题的情况。部分教材与实训案例陈旧，未能反映行业最新技术标准与工

程实践，进一步加剧了培养内容与岗位需求的差距。

（三）培养方式与师资力量薄弱

培养方式以课堂讲授与简单实操结合为主，缺乏沉浸式、场景化训练，难以复刻现场复杂的安装调试环境与故障场景。企业与院校合作深度不足，实训基地建设滞后，多数院校缺乏智能化设备与诊断 AI 软件实训平台，学生无法接触行业前沿技术与工具。师资队伍存在“重理论、轻实操”的问题，部分教师缺乏现场服务经验，对诊断 AI 软件、智能化设备的实操技能掌握不足，无法有效开展针对性教学。同时，行业技术专家参与教学的比例较低，难以将工程实践中的典型案例、实操技巧传递给学员，导致培养质量难以提升。此外，线上线下融合的培养模式尚未成熟，无法实现碎片化学习与精准化辅导。

二、机电设备安装调试现场服务工程师培养体系构建原则与核心模块

（一）培养体系构建原则

培养体系构建需遵循需求导向、知行合一、技术融合、持续迭代四大原则。需求导向原则以行业岗位需求为核心，精准定位工程师的能力素养要求，结合智能化设备发展趋势与诊断 AI 软件应用场景，明确培养目标与内容。知行合一原则注重理论与实操深度融合，强化现场模拟训练与工程实践，让学员在实操中掌握理论知识，提升问题解决能力^[1-2]。技术融合原则将诊断 AI 软件、物联网、大数据等前沿技术融入培养全过程，培养学员技术应用与创新能力，适配行业数字化转型需求。持续迭代原则建立培养内容与方式的动态调整机制，跟踪机电设备技术更新与行业标准变化，及时优化课程体系、更新实训案例与工具，确保培养体系的时效性与针对性。同时，兼顾通用性与专项性，既覆盖核心理论与技能，又针对不同细分领域设置专项培养内容。

（二）理论知识培养模块

理论知识模块需构建“基础+核心+前沿”三层递进体系，为学员实操能力与创新能力培养筑牢根基。基础层以机电设备核心原理为核心，涵盖机械基础、电气控制、液压气动、工程制图、电路分析等核心课程，确保学员熟练掌握设备结构、工作原理及基础电路设计，具备理解复杂设备运行逻辑的能力。核心层聚焦安装调试专项知识，系统讲解设备安装规范、调试流程、质量检测标准、安全操作规程及故障排查基础方法，结合工业机器人、大型成套设备、精密仪器等不同细分领域特性，补充专项理论知识，适配岗位差异化需求。前沿层紧跟行业技术迭代步伐，重点引入智能化设备技术、诊断 AI 软件原理与应用、物联网集成、远程监控技术等内容，深入讲解诊断 AI 软件的故障识别算法、数据采集与分析逻辑、模型训练基础及系统运维知识，引导学员理解 AI 工具如何通过数据建模快速定位隐蔽故障、优化调试参数、提升服务效率^[3-4]。同时，融入客户服务礼仪、跨部门沟通技巧、工程法律法规及安全生产责任等内容，全面提升学员综合素养。教学中采用案例教学法与情景模拟法，结合智能化设备安装调试典型工程案例，将诊断 AI 软件应用场景融入理论讲解，让学员清晰掌握知识的实际应用

逻辑，增强理论学习的针对性与实用性。

（三）实操能力培养模块

实操能力模块以场景化训练为核心，构建“基础实操+专项实操+AI工具实操”三维训练体系，全面提升学员现场实战能力。基础实操阶段聚焦核心技能打磨，涵盖传统与智能化机电设备的安装、调试、维护及基础故障处理，通过模拟实训基地开展设备组装、线路连接、参数调试、基础故障排查等训练，规范操作流程，培养学员严谨的实操习惯与安全意识，确保熟练掌握各类设备基础操作技能。专项实操阶段针对不同细分领域设置精准训练项目，复刻工业机器人安装调试、精密仪器校准、大型机电设备联动调试、远程调试等复杂现场场景，引入典型故障案例模拟训练，让学员学会应对设备安装偏差、参数异常、联动故障等复杂问题，提升专项实操能力^[5-6]。AI工具实操作为核心环节，引入主流诊断 AI 软件开展针对性训练，涵盖软件安装配置、设备数据采集与上传、故障代码解析、AI 诊断模型调用、故障定位分析、维修方案生成及数据复盘优化等全流程内容，让学员掌握利用 AI 软件快速定位隐蔽故障、分析设备运行数据、优化调试方案的技能，大幅提升服务效率。同时，深化校企合作，搭建现场顶岗实习平台，安排学员参与企业实际工程项目，全程跟进设备安装、调试、验收及售后维保全流程，积累现场服务经验，提升突发问题应急处理、客户需求对接及跨团队协作能力，实现实操技能与岗位需求无缝对接。

三、机电设备安装调试现场服务工程师培养体系实施保障措施

（一）完善实训平台建设

实训平台建设是保障培养质量的核心支撑，需构建“校内模拟实训+企业现场实训+线上虚拟实训”三位一体平台体系，全方位满足实操训练需求。校内实训基地需对标行业前沿标准，更新智能化机电设备、诊断 AI 软件、物联网监控系统、远程调试终端等实训设备，搭建模拟工业现场的实训场景，精准复刻设备安装、调试、故障排查等全流程工况，满足基础实操与 AI 工具实操训练需求。重点引入不同类型诊断 AI 软件实训模块，涵盖设备故障诊断、运行数据分析、远程调试、模型优化等核心功能，配套搭建数据采集终端与模拟故障生成系统，让学员在可控环境中反复演练 AI 工具应用技能。加强与机电设备生产企业、运维服务企业深度合作，共建校外实训基地，依托企业实际工程项目、专业设备资源及技术团队，为学员提供顶岗实习机会，让学员参与真实项目的设备安装调试、故障处理及客户服务工作，积累实战经验^[7-8]。同时，搭建线上虚拟实训平台，上传实训视频、典型案例库、诊断 AI 软件操作教程及虚拟仿真训练模块，支持学员利用碎片化时间开展远程实操模拟与技能复盘，提升实训的灵活性与覆盖面。建立实训设备定期更新维护机制，跟踪诊断 AI 软件版本升级与行业技术迭代，及时优化实训内容与设备配置，确保实训平台始终与行业前沿技术同步，为学员提供高质量实训保障。

（二）强化师资队伍建设

打造高素质“双师型”师资队伍，是提升培养质量的关键，

需从校内教师培养、校外专家引进、师资考核激励三方面发力。一方面，加强校内教师能力提升，制定专项培养计划，定期组织教师参加智能化设备技术、诊断 AI 软件应用、前沿教学方法等专项培训，邀请行业专家开展实操技能 workshops，重点提升教师对诊断 AI 软件的实操能力、案例解析能力及教学转化能力。鼓励教师深入企业一线挂职锻炼，参与实际工程项目的设备安装调试与技术研发工作，积累现场服务经验，将行业前沿技术与实操技巧融入教学过程。另一方面，拓宽校外师资引进渠道，聘请机电行业技术专家、资深现场服务工程师、诊断 AI 软件应用能手担任兼职教师，参与课程设计、实操教学、案例编写及技能考核工作，将工程实践中的典型案例、实操难点及行业趋势传递给学员，弥补校内教师实践经验不足的短板。建立科学的师资考核评价机制，将实操能力、诊断 AI 软件应用水平、工程实践经验、教学效果等作为核心考核指标，打破“重理论、轻实操”的考核导向。搭建校内外师资交流平台，定期组织教学研讨、技能比拼与案例分享活动，促进师资队伍技术交流与经验互补，形成教学合力，确保培养过程中理论教学与实操指导的专业性、针对性，为高质量人才培养提供坚实师资保障。

（三）建立健全评价与激励机制

建立健全“过程 + 结果”“理论 + 实操”的综合评价与激励机制，全面考核学员能力素养，激发学习积极性。综合评价机制打破单一考试导向，过程评价占比不低于 40%，涵盖课堂表现、实训操作规范性、AI 工具应用熟练度、实习表现、团队协作能力等内容，重点跟踪学员在诊断 AI 软件实操中的操作流程规范性、故障诊断准确率、方案生成合理性，通过阶段性实训报告、实操过程记录进行动态评分。结果评价采用理论考试、实操考核、项目答辩相结合的方式，理论考试覆盖基础理论与前沿技术，实操考核模拟现场复杂工况，要求学员独立完成设备安装调试与 AI 工

具故障排查，项目答辩聚焦实操成果与技术应用能力^[9-10]。引入诊断 AI 软件实操专项考核，制定明确的评分标准，将软件操作速度、故障定位精准度、数据处理能力、方案优化效果作为核心指标，强化 AI 应用能力培养。激励机制方面，对综合评价优秀的学员给予奖学金、荣誉证书、优先推荐就业等奖励，鼓励学员参与行业技能竞赛与 AI 工具应用实训项目，对获奖学员给予额外表彰。同时，建立培养质量反馈机制，定期收集企业、学员、师资对培养体系的意见建议，结合机电设备技术更新与诊断 AI 软件升级动态，及时优化培养目标、内容与方式，形成“培养 - 评价 - 反馈 - 优化”的闭环体系。此外，鼓励学员考取职业技能等级证书与诊断 AI 软件应用认证，提升就业竞争力，形成正向激励循环。

四、结论

构建科学完善的机电设备安装调试专项现场服务工程师培养体系，是适配行业智能化转型、解决人才供给瓶颈的关键举措。本文基于行业发展需求与诊断 AI 软件应用趋势，从培养现状出发，明确了培养体系的构建原则、核心模块与实施保障措施，形成了“理论 + 实操 + AI 应用”的复合型人才培养模式。通过完善实训平台、强化师资队伍、健全评价机制，可有效提升工程师的专业技能、AI 工具应用能力与综合素养，实现人才培养与岗位需求的精准对接。未来，需结合机电设备技术的持续迭代与诊断 AI 软件的创新发展，动态优化培养体系，不断提升培养质量，为机电行业高质量发展提供坚实的人才支撑。同时，需推动企业、院校、行业协会协同发力，形成多元化的培养格局，助力行业人才队伍建设迈向新高度。

参考文献

[1] 丁毅, 栾文轩, 花冬. 云计算技术在港口机电设备安装及调试中的运用 [J]. 电气技术与经济, 2025, (12): 121-123.

[2] 舒煜尧. 智能变电站电气设备安装及调试技术的应用探究 [J]. 科技资讯, 2025, 23(23): 99-101.

[3] 郭小明. 现代化水厂机电设备安装及调试方法 [J]. 凿岩机械气动工具, 2025, 51(10): 21-23.

[4] 刘胜崇. 机电设备电气安装调试运行中的故障检测与质量管理优化研究——质量管控“合规性、可追溯性、精准性”三大原则 [J]. 中国品牌与防伪, 2025, (12): 89-91.

[5] 张建波. 机电设备电气安装调试常见故障检测及应对措施 [J]. 中国质量监管, 2025, (09): 106-107.

[6] 王海, 杨旋, 杨辉, 等. 电力系统电气设备安装与调试技术探析 [J]. 电力设备管理, 2025, (12): 71-73.

[7] 谢梓华. 智能化变电站电气设备安装及调试方法研究 [J]. 光源与照明, 2025, (06): 181-183.

[8] 朱维祥. 机电设备招标采购、安装、调试与节能问题探讨 [J]. 机电信息, 2024, (24): 79-81.

[9] 沈国炎. 现代机电制造企业印染设备安装调试管理实践与思考 [C]// 中国智慧工程研究会. 2024 工程技术与施工管理交流会论文集 (下). 浙江华孚色纺有限公司; , 2024: 374-376.

[10] 徐宝武. 机电设备电气安装调试常见故障及检测方法研究 [J]. 造纸装备及材料, 2024, 53(10): 55-57.

固定－柔性支架光伏阵列空间整体排列 与排间距优化方法研究

王若晨

大唐蒲城第二发电有限责任公司, 陕西 渭南 715501

DOI:10.61369/ME.2026010031

摘 要： 本研究系统性光伏阵列空间整体排列与排间距优化方法。该方法先利用高精度地形数据开展精细化分区，明确固定支架与柔性支架适用区域，结合 GIS 空间分析和三维建模技术进行阵列空间整体排列。综合考虑地形坡度、坡向、阴影、土地利用效率及农光互补需求来优化阵列朝向、倾角和布局形态。随后针对不同区域特点分别采用基于太阳轨迹和地形阴影的间距计算模型、考虑地形因素的间距动态调整模型，运用多目标优化算法（如遗传算法）对排间距进行精细化优化。以此最大化发电量、最小化土地占用和工程成本。希望本研究有助于克服单一支架技术局限性，显著提升山地光伏电站技术经济性和环境效益，为山地可再生能源资源可持续开发提供实用技术支撑体系。

关 键 词： 固定支架；柔性支架；山地光伏；空间排列；排间距优化

Research on the Spatial Overall Arrangement and Row Spacing Optimization Method of Fixed-Flexible Bracket Photovoltaic Arrays

Wang Ruochen

Datang Pucheng Second Power Generation Co., LTD., Weinan, Shaanxi 715501

Abstract： This study explores the spatial overall arrangement and row spacing optimization methods of systematic photovoltaic arrays. This method first uses high-precision terrain data to carry out fine zoning, clearly defines the applicable areas of fixed supports and flexible supports, and combines GIS spatial analysis and 3D modeling technology to conduct overall arrangement of the array space. The orientation, inclination and layout form of the array should be optimized by comprehensively considering the terrain slope, aspect, shadow, land use efficiency and the demand for agriphotovoltaic complementarity. Subsequently, in light of the characteristics of different regions, the spacing calculation models based on solar trajectories and terrain shadows, as well as the dynamic spacing adjustment models considering terrain factors, were respectively adopted. Multi-objective optimization algorithms (such as genetic algorithms) were used to conduct refined optimization of the row spacing. This maximizes power generation, minimizes land occupation and engineering costs. It is hoped that this research will help overcome the limitations of single support technology, significantly enhance the technical economy and environmental benefits of mountain photovoltaic power stations, and provide a practical technical support system for the sustainable development of mountain renewable energy resources.

Keywords： fixed bracket; flexible support; mountain photovoltaic; spatial arrangement; optimization of row spacing

前言

随着全球气候变化问题变得日益严峻，同时能源结构转型也在不断加速，可再生能源尤其是光伏发电正在经历前所未有的快速发展。山地地区凭借其广阔的非耕种土地资源，还有潜在的丰富光照条件，被视作未来光伏电站建设的重要潜力区域。然而山地地形通常呈现复杂多变的特点，包含显著的地形起伏、多变坡向、陡峭坡度以及破碎地块边界，这些因素共同构成山地光伏电站开发的技术壁垒。传统光伏电站开发模式尤其是在地形相对平坦区域，常采用标准化固定式支架系统来进行建设。其设计原理和施工方法在山地环境中面临严峻挑战，需要开展大规模土方工程来平整场地，这既破坏生态环境又显著增加成本。标准化的阵列排布难以适应多变的坡向和坡度，致使组件朝向和倾角无法优化，造成发电量损失严重。同时为了保证发电量往往需要设置较大的阵列间距，从而造成土地资源出现浪费情况。为此本研究提出并聚焦一种创新的“固定－柔性支架融合”技术体系，以实现山地光伏资源的高效、可持续开发。

作者简介：王若晨（1994.09-），男，汉族，陕西渭南人，本科，助理工程师，研究方向：新能源。

一、固定—柔性支架技术优势分析

以往,在山地环境里应用传统固定支架技术存在诸多技术挑战。例如,固定支架通常需要开展大规模土方工程,不但造成严重的土地扰动和生态破坏,增加水土流失风险,还大幅提高土建成本与施工难度。同时,固定支架组件朝向易受地形或相邻阵列阴影遮挡,造成发电量损失^[1]。而固定—柔性支架融合技术核心要点是巧妙解决山地地形适应性难题,通过对山地微地形开展科学识别分类精准确定不同支架最佳应用区,从而实现“因地制宜、优势互补”。例如,在坡度大且坡向变化剧烈以及土石方开挖成本高的区域优先采用柔性支架,像索杆式张力结构或带倾角调节功能的特殊固定支架。索杆式张力结构借助少量锚固点让组件贴合坡面,减少土方开挖,能很好地适应坡度大且起伏变化大的地形;带倾角调节功能的特殊固定支架可调节支撑腿使组件达到所需倾角,灵活应对复杂多变的坡向。除此之外,融合技术体系还涵盖电气设计优化,合理规划汇流箱与电缆敷设路径,以适应不同地形条件下的电气连接需求。这种模式有效解决了传统固定支架在山地地形适应性方面的不足,已成为山地光伏电站应对复杂地形挑战的关键技术路径。

二、光伏阵列空间整体排列方法

(一) 基础数据预处理

光伏阵列空间整体排列的准确性依靠基础数据的精度和完整性,在实施相关方法之前必须严格获取并预处理基础数据。数据的来源具有多样性,其中高精度地形数据是核心内容,可通过无人机倾斜摄影测量、LiDAR扫描或者专业测绘来获取,使其精度能够达到厘米级别,可精准呈现山地微小起伏和破碎边界^[2]。同时,所获取的原始DEM/DSM数据需要坐标统一、拼接、孔洞填充、噪声平滑等预处理操作,以此保证数据的连续性和一致性。此外还需要利用GIS软件或者专业算法精确提取地形因子,从而为后续的分区分区优化工作打下基础。值得注意,在这一过程中,需收集项目地多年平均太阳辐射(包含水平面总辐射等)、日照时数、关键月份太阳运行轨迹参数以及极端气象条件等内容,用于计算阴影、优化倾角以及评估系统可靠性。并识别禁建区和限建区后将所有数据整理归档,以便后续进行调用和分析。

(二) 基于GIS的阵列优化

地理信息系统(GIS)是用于光伏阵列空间整体排列优化的核心工具。在实际操作过程中,首先借助GIS空间分析功能并结合高精度地形数据,对固定—柔性支架区域开展精细化分区工作。可基于坡度、坡向等指标设定相应阈值和权重,采用叠置等多种分析方法生成分区图层。例如,坡度大于15°的区域设定为柔性支架优先区,小于10°且坡向变化小的区域为固定支架优先区,中间部分则划分为过渡区。通过分区结果直观显示在地图上可为阵列排列提供区域指导。其次,依据分区情况和太阳辐射数据对阵列朝向与初步倾角进行优化,在固定支架区结合坡度计算等效倾角或者根据最佳发电倾角反推基础高度变化以确定优化倾角范

围,在柔性支架区初步朝向沿着等高线或者主坡向,倾角依据调节能力和地形坡度来设定。此外,利用GIS叠加分析和可视化功能开展初步阴影分析,模拟太阳光线传播路径以识别阴影区域,为阵列布局避让提供依据,同时考虑“农光互补”情况叠加土地利用图预留农业空间,将其作为布局约束条件并用缓冲区分析设定最小安全距离^[3]。

(三) 三维建模下阵列布局设计

在完成GIS分区和初步优化以后,需采用三维建模技术对阵列布局开展精细化设计,这是达成阵列与复杂地形精确适配的关键所在。在实践过程中,可先导入或者创建光伏组件、固定及柔性支架(包含索杆或调节机构模型)的三维模型。按照GIS分区结果和初步朝向倾角建议,在三维视图当中手动或者半自动布置光伏阵列。此过程着重人机交互与视觉优化,可直观查看阵列排布是否顺应地形,是否满足通道、检修空间等方面的要求,以及是否与农光互补区域相互协调。比例,布置柔性支架阵列的时候,可模拟调整索预紧力或调节机构转角,观察组件面板贴合坡面情况以及与太阳入射角的偏差,布置固定支架阵列时,确定基础位置和标高,模拟土方工程并且评估其产生的影响。

三、排间距优化方法

(一) 太阳轨迹与地形阴影模型构建

排间距优化的核心要点是精确计算前后排最小安全距离,以此避免前排对后排形成过度遮挡,进而确保光伏系统能够获得充足的太阳辐射。其技术依据是太阳运行轨迹以及地形对阳光传播路径造成的影响。这一过程中,精确确定太阳位置是整个工作的基础,需依据项目所处的地理位置、具体日期和时间,运用球面三角学公式或NOAA算法计算太阳高度角和方位角。其中太阳高度角决定着阴影的长度,方位角则决定着阴影的投射方向。在理想的平坦地面上可使用经典公式计算最小排间距,然而,需要注意,在山地环境下因地形会产生额外阴影或者截断阴影,从而影响到后排的受光情况。需建立复合阴影计算模型,借助高精度数字高程模型(DEM)数据,利用GIS光线追踪算法或者专业软件的阴影分析模块,模拟特定日期和时间的太阳光线传播路径,以此判断后排是否被遮挡。

(二) 地形因素动态调整模型

按照标准太阳高度角和理想高差计算出来的排间距,很难直接在复杂山地环境当中使用,需要依据地形进行动态调整,以此来体现实际相对高差变化以及阴影路径的复杂性。考虑地形因素的排间距动态调整模型,其核心是对地形坡度、坡向以及局部特征给前后排实际相对高差(ΔH)和阴影投射路径带来的影响进行量化。在坡面布置阵列的时候,常规简化模型在复杂地形条件下往往并不够准确。建议,当前后排不在同一坡向或者存在转折的时候,运用矢量分析来计算实际有效高差和阴影长度。局部地形特征像凹陷、凸起等会对阴影传播叠加产生影响,需进行精细模拟修正。将模型和GIS坡度、坡向数据相结合,针对不同区域计算特定 ΔH 和阴影修正系数,将基于标准太阳轨迹的初始排间距

建议值，转化为适合复杂山地的精确合理设计值，为多目标优化算法提供准确输入和约束条件。

（三）多目标优化算法应用

阴影模型和动态调整模型所算出的排间距结果比较保守，难以在发电量、土地占用以及成本之间实现最优平衡，所以引入多目标优化算法。建议，应用遗传算法 GA、粒子群优化 PSO 等对排间距进行精细化优化，将排间距优化问题构建成多目标优化问题。同时要设置约束条件。例如，最小排间距安全要求、安装和运维空间要求、设备物理尺寸限制以及特定区域间距范围等，优化算法在满足所有约束条件的前提之下，寻找一组或者多组在发电量、土地占用和成本上达到帕累托最优的排间距解，实施时，将阴影、动态调整及成本估算模型嵌入适应度评估函数，对每个候选方案进行评估，以便处理复杂关系和多维变量，获得最佳适合山地光伏电站排间距优化方案。

（四）注意要点

1. 分区与排列协同

固定-柔性支架分区与阵列空间整体排列设计紧密协同，彼此相互配合并且进行动态调整之后，才能够形成最优的整体布局方案。其中，分区结果为阵列排列提供框架与相应约束，从而指导不同区域采用合适的形态。例如，固定支架区大多呈现规整矩形阵列，柔性支架区可能沿着等高线等进行布置。阵列排列的初步方案以及优化需求会对分区结果进行验证和微调。例如在初步排列时，要是发现某固定支架区因为局部地形起伏，强行采用固定支架会导致土方开挖量较大，改为柔性支架区更为合适，此时就需要返回去调整分区并且重新进行排列设计。这种协同需要贯穿于整个设计流程。在 GIS 分区阶段，可初步考虑阵列走向和排布模式，通过叠置分析阵列与分区边界，以此保证分区合理。在三维建模阶段，应该严格按照分区来布置阵列，利用三维可视化检查分区边界衔接是否平顺，避免出现布局冲突或者浪费的情况。重点确保固定与柔性支架阵列过渡自然，柔性支架区需要依据其调节能力和地形特点，设计“之”字形、阶梯形等合理的排布形式，从而方便进行安装张拉。在排间距优化阶段，分区结果

决定着不同区域的优化目标与约束条件。例如农光互补区需要设置更大间距来满足作物生长等需求。分区与排列协同强调进行迭代优化，通过分区指导排列、排列反馈分区，最终实现区域划分合理、阵列布局高效。

2. 排列与间距协同

阵列空间的整体排列跟排间距的优化并非完全独立，而是处于紧密协同且相互反馈的状态。阵列的整体排列形态会对排间距的计算与优化造成影响。阵列是沿着等高线进行排布还是顺着坡向排布，会改变前后排之间的相对高差和阴影投射的路径，进而对最小排间距产生影响。在开展三维建模和 GIS 分析阶段，就应初步考虑到这些因素，从而为间距优化提供准确的输入内容。阵列排列的特定设计元素例如边界形状、内部通道位置和宽度以及不同阵列间距等，在进行排间距优化时都需要纳入考虑范围。预留出来的设备安装或者扩展空间，在计算土地占用的时候要将其扣除，不过在计算阴影时仍然要考虑其对光线传播所产生的影响。排间距优化算法要能够处理这些不规则的空间约束情况。排间距的优化结果尤其是多目标优化得出的不同方案，可以为阵列排列的进一步优化提供指导依据。如果优化结果要求某区域采用较小的排间距，而该区域地形又较为复杂，那么就可以对局部排布进行微调；如果需要扩大排间距，而初步排列又比较密集，那就需要调整排列方案。这种协同策略能够确保阵列布局和间距设计的一致性与最优性，避免出现效率低下以及资源浪费的问题。

四、结论

本研究聚焦山地光伏电站开发中的关键技术挑战，提出系统性的光伏阵列空间整体排列与排间距优化方法，该方法以具有高精度的地形数据为基础，通过系统梳理固定-柔性支架光伏阵列空间整体排列与排间距优化方法。期望能为山地光伏电站的设计、建设以及运营提供重要的技术支撑，进而促进能源转型和乡村振兴效能。

参考文献

- [1] 闫俊义, 刘毅, 刘立珍, 等. 有限元法作为滩涂光伏阵列桩基设计计算方法的适用性研究 [J]. 水利水电技术 (中英文), 2024, 55(3): 1-10.
- [2] 张景凯. 内蒙古高速服务区光伏建设方案研究及经济性分析 [D]. 内蒙古农业大学, 2024.
- [3] 郭涛, 杨渊茗, 叶镇镇, 等. 脉动风空间相关性对柔性支撑光伏阵列的影响 [J]. 太阳能, 2025(4): 76-83.

高温高压工况下智能压力仪表的精度优化与稳定性分析

梁春雨

中海石油（中国）有限公司湛江分公司，广东 湛江 524000

DOI:10.61369/ME.2026010040

摘 要： 针对南海区域某生产平台高温高压工况下智能压力仪表面临的精度衰减与稳定性下降问题，本文深入探讨了温度与压力的耦合效应机理，并提出了系统性的优化方案。通过建立温度-压力-输出误差三维耦合模型，分析了材料特性漂移与非线性变形对测量精度的影响；在此基础上，采用蓝宝石、碳化硅等宽禁带半导体材料替代传统硅材料，并利用 ANSYS 等仿真软件对敏感膜片及封装结构进行优化设计，从物理层面提升了仪表的耐温压性能与结构稳定性。针对硬件电路设计了抗干扰方案，选用军品级耐高温元件，构建了基于高温兼容型 ADC 与 MCU 的精密数据采集系统，并采取多重屏蔽与滤波措施以保障电磁兼容性。在软件算法层面，提出 BP 神经网络与支持向量机（SVM）相结合的混合补偿算法，通过对实验采集数据进行清洗、滤波及归一化处理，实现了对传感器多因素耦合误差的精准修正，并完成了算法的嵌入式移植与实时性优化。

关 键 词： 高温高压；智能压力仪表；耦合效应；结构优化

Accuracy Optimization and Stability Analysis of Intelligent Pressure Instruments under High-Temperature and High-Pressure Conditions

Liang Chunyu

Zhanjiang Branch of CNOOC (China) Co., Ltd., Zhanjiang, Guangdong 524000

Abstract： In response to the issues of accuracy degradation and stability decline faced by intelligent pressure instruments under high-temperature and high-pressure conditions on a production platform in the South China Sea, this paper delves into the mechanism of the coupling effect between temperature and pressure and proposes a systematic optimization plan. By establishing a three-dimensional coupling model of temperature-pressure-output error, the impact of material property drift and nonlinear deformation on measurement accuracy is analyzed. Based on this, wide-bandgap semiconductor materials such as sapphire and silicon carbide are used to replace traditional silicon materials, and simulation software like ANSYS is employed to optimize the design of sensitive diaphragms and packaging structures, enhancing the temperature and pressure resistance and structural stability of the instruments at the physical level. An anti-interference scheme is designed for the hardware circuit, utilizing military-grade high-temperature-resistant components to construct a precise data acquisition system based on high-temperature-compatible ADCs and MCUs, and implementing multiple shielding and filtering measures to ensure electromagnetic compatibility. At the software algorithm level, a hybrid compensation algorithm combining BP neural networks and support vector machines (SVMs) is proposed. Through cleaning, filtering, and normalization of experimentally collected data, precise correction of multi-factor coupling errors in the sensors is achieved, along with embedded transplantation and real-time optimization of the algorithm.

Keywords： high-temperature and high-pressure; intelligent pressure instruments; coupling effect; structural optimization

引言

传统的压力仪表在面临高温高压工况时，常因敏感元件材料特性漂移、结构发生非线性变形以及电路性能衰减等问题，导致测量精度显著下降，甚至引发安全事故，难以满足现代精密工业的测量需求。基于此，本文旨在系统研究高温高压工况下智能压力仪表的精度优化与稳定性提升技术。深入剖析温度与压力的耦合效应机理，建立误差分析模型，指导关键材料的选型与传感器结构的优化设计；从硬件层面设计抗干扰能力强、耐高温的信号调理电路与精密数据采集系统；构建基于 BP 神经网络与支持向量机（SVM）的混合智能补偿算法，实现对多因素耦合误差的高精度修正，并完成算法的嵌入式移植。通过结构优化、硬件设计与软件补偿的协同作用，全面提升智能压力仪表在极端工况下的测量精度与运行稳定性，为相关工业领域的自动化控制提供可靠的技术支撑。

一、高温高压对仪表性能的影响机理及结构优化

（一）温度与压力的耦合效应分析

智能压力仪表作为关键测量设备,广泛应用于汽车工业、航空、石油化工、节能环保、电力能源等自动化控制环境及高端重大装备的关键环节^[1]。现场工况下,压阻式、电容式传感器核心敏感元件本身具有温度敏感性,高温会改变材料特性,引发零点与灵敏度漂移;高压载荷会进一步加剧温度影响,形成温压耦合误差,难以单因素修正^[2]。高压使敏感膜片变形产生附加热效应、增大局部温度梯度,高温又降低膜片刚度强度,使变形增大且呈非线性,二者叠加误差无法用常规单一温压补偿消除。长期高温高压还会加速传感器封装老化、密封性能衰减,引发泄漏、绝缘下降等故障,降低运行稳定性^[3]。工程上可根据现场温压参数建立温度-压力-输出误差三维耦合模型,通过试验与数据拟合得到误差规律,确定各因素贡献占比,为结构优化和补偿算法提供依据,使方案适配现场工况。

（二）关键材料选型与耐高温设计

关键材料工程选型是提升仪表耐高温高压性能的基础,需结合现场温压、介质与环境,兼顾性能与工程适配性,重点完成敏感元件、封装、外壳三大类材料选型,从源头解决传统材料耐高温不足问题^[4]。敏感元件摒弃传统硅材料,优先选用蓝宝石、碳化硅等宽禁带半导体,蓝宝石适配常规高温高压工况,碳化硅适用于超高温高压极端场景。封装材料替代传统环氧树脂,采用聚酰亚胺或陶瓷,聚酰亚胺温域稳定、施工便捷;陶瓷耐高温耐腐蚀,需解决与金属外壳的密封连接问题^[5]。外壳选用高温合金或钛合金,高温合金适配超高压工况,钛合金轻量化便于狭小空间安装,可通过结构优化进一步提升运行稳定性。

（三）传感器结构优化设计

结合温压耦合工程影响机理,以减小敏感元件温度梯度、降低膜片非线性变形、提升结构现场稳定性为核心目标,采用ANSYS/COMSOL等仿真软件开展传感器结构仿真优化,确保方案适配现场加工、安装与使用需求。工程设计中,构建含敏感膜片、封装基座的三维模型,结合现场工况进行温-应力-变形耦合分析;优化敏感膜片结构及尺寸,设计微沟槽减小温度梯度,优化封装端传热路径与密封结构,适配高温超高压工况、解决密封失效问题。仿真完成后制作样机,结合现场工况开展实测测试,微调设计参数,确保优化方案具备现场可实施性,可直接应用于仪表现场改造与新设备研发。

二、智能压力仪表的硬件电路抗干扰与稳定性设计

（一）高温环境下的信号调理电路设计

高温工业现场中,电路元件参数漂移、电磁噪声干扰是影响智能压力仪表采集精度与稳定性的关键问题^[6]。信号调理电路需重点实现耐高温、低噪声、抗漂移,对传感器mV级微弱信号进行放大、滤波与线性化处理,为后续采集转换提供高质量信号。元件上优先选用军品级耐高温、低漂移精密器件,采用高温运

放、金属膜/合金电阻、陶瓷/钽电容,禁用高温易失效的电解电容^[7]。电路以差分放大为核心抑制共模干扰,搭配温度补偿电阻抵消高温漂移;通过RC低通滤波(10Hz~100Hz)与工频陷波滤波抑制高频及工频噪声。布局布线采用陶瓷基板替代常规PCB,信号线路与电源、数字线路分离以减少串扰;现场使用耐高温屏蔽线或双绞线,缩短引线长度,兼顾耐高温与抗干扰要求。

（二）精密数据采集与转换系统

精密数据采集与转换系统是智能压力仪表高精度测量的核心,其性能决定测量精度与数据可靠性,主要由ADC、MCU及电源管理模块组成,需满足高温高压、高精度、高稳定、低功耗及强抗干扰要求。ADC选用高精度高温兼容 $\Sigma-\Delta$ 型,常规高温场景(-40℃~125℃)采用24位ADS1256;超高温场景(>125℃)采用HTAD7740(-55℃~200℃)^[8]。MCU选用耐高温高性能型号:常规场景用STM32H7(-40℃~125℃);超高温用MSP430FR5994-HT(-55℃~210℃,低功耗)。电源管理采用耐高温隔离电源,配合EMI与电容滤波电路,抑制电源干扰,保证供电稳定,降低测量误差。

（三）电磁兼容性(EMC)与硬件抗干扰措施

高温高压工业现场电机、变频器等强电磁干扰易通过传导、辐射侵入仪表,引发数据误差、工作异常甚至元件损坏,需采取EMC抗干扰措施保障仪表稳定运行。仪表采用金属导电氧化外壳与内部电路模块屏蔽,传感器使用单端接地耐高温屏蔽线,抑制辐射干扰;采用单点接地设计,信号地、电源地、屏蔽地汇总共点,接地电阻 $\leq 1\Omega$,解决传导干扰。接口加装耐高温EMI滤波器与TVS管,抑制传导干扰与浪涌;同时优化电路布局、缩短信号线、减小环路面积,从电路层面降低干扰耦合,提升仪表恶劣工况适应性。

三、基于智能算法的精度优化与补偿技术

（一）数据采集与预处理

基于智能算法的精度补偿需以高质量、贴合现场的工程数据集为基础,因此需按照工程化标准开展数据采集与预处理工作,确保数据的准确性、完整性与有效性,为后续补偿模型训练提供可靠的现场数据支撑^[9]。数据采集环节,搭建模拟工业现场的高温高压实验平台,模拟不同温度(-50℃~600℃)与压力(0~100MPa)工况,采集传感器的原始输出信号、现场温度信号、压力标准信号,每个工况点重复采集10~20组数据,确保数据的统计可靠性;同时长期采集仪表在现场运行过程中的漂移数据(如零点漂移、灵敏度漂移),为现场动态补偿提供数据支撑,确保采集数据与现场实际工况高度契合。数据预处理是提升算法补偿效果的关键工程步骤,主要包括数据清洗、数据滤波、异常值剔除、数据归一化等操作,所有操作均围绕现场工程需求开展:数据清洗去除缺失值与重复值,缺失值采用线性插值或均值填充的工程方法补充,重复值直接删除;数据滤波采用小波滤波算法,其良好的时频局部化特性可有效分离现场信号与噪声,相较于传统RC滤波,能更好保留信号细节特征,同时抑制现场

高频噪声与工频干扰；异常值剔除采用 3σ 准则与格拉布斯准则相结合的方法，识别并剔除因设备故障、现场操作误差等导致的异常数据，确保数据集纯度；数据归一化将数据映射到 $[0,1]$ 或 $[-1,1]$ 区间，消除不同维度数据的量纲影响，避免因数据量级差异导致算法收敛速度慢、补偿精度低的工程问题，根据现场数据分布特性选择 min-max 归一化、Z-score 归一化等合适方法。预处理完成后，将数据集按工程比例划分为训练集（70%）、验证集（20%）与测试集（10%），用于智能算法模型的训练、优化与验证。

（二）软件补偿算法模型

针对高温高压工况的误差工程特性，为精准补偿传感器多因素耦合误差，需构建贴合现场的软件补偿模型，建立传感器原始输出、温压与真实测量值的非线性映射关系，确保模型具备现场适配性与高精度补偿能力^[10]。BP神经网络与支持向量机（SVM）相结合的混合补偿算法，兼顾BP的非线性拟合能力与SVM的小样本学习优势，提升模型对现场复杂工况的适配性与补偿精度，解决单一算法在现场补偿中精度不足、泛化能力差的问题。BP神经网络补偿模型以传感器原始输出电压、温度、压力为输入，补偿后压力值为输出；结合工程实践，隐藏层设2~3层，神经元数量经试错法与交叉验证确定（输入3、隐藏10~20、输出1），激活函数选用Sigmoid或ReLU，训练算法采用Adam，兼顾非线性映射效果与模型收敛速度、稳定性，实现对现场主要非线性耦合误差的初步拟合。SVM补偿模型基于统计学习理论实现小样本非线性拟合，输入特征与BP一致，选用径向基函数（RBF）为核函数适配现场复杂的误差耦合关系，通过交叉验证优化惩罚因子C与核参数 σ ，平衡模型拟合与泛化能力。该混合算法将BP输出作为SVM的输入之一，结合原始特征参数完成二次补偿，经加权融合得到最终结果，由BP初步拟合非线性误差、SVM修正剩余误差，充分发挥二者优势

（三）算法实现与嵌入式移植

智能补偿算法的实现与嵌入式移植是确保算法工程化应用的

关键，需兼顾算法的实时性、精度与嵌入式平台的资源约束。算法实现环节，在MATLAB环境下进行仿真验证，利用预处理后的数据集训练补偿模型，通过调整模型参数优化模型性能，确保模型在测试集上的补偿误差满足设计要求。仿真验证通过后，将算法转化为嵌入式可执行代码，选用C语言作为开发语言，结合嵌入式MCU的指令集进行代码优化。针对嵌入式平台运算能力有限的问题，对算法进行精简与优化，如简化神经网络的计算流程、采用定点运算替代浮点运算、删除冗余代码等，在保证补偿精度的前提下提升算法运行速度；对于模型参数，采用查表法存储，减少参数计算时间，提升实时性。嵌入式移植过程中，将优化后的代码下载到仪表的MCU中，搭建硬件在环测试平台，模拟高温高压工况，验证算法在实际硬件平台上的运行效果。测试内容包括补偿精度、实时性、稳定性等，确保算法运行稳定，补偿精度满足设计要求；同时，设计算法自校准功能，仪表上电后自动采集标准信号，对补偿模型参数进行微调，适应环境变化与元件老化带来的性能漂移，提升仪表的长期运行稳定性。此外，为便于算法的后期维护与升级，在嵌入式软件中设计标准化的接口，支持通过串口或无线通信方式更新补偿模型参数，无需拆卸仪表即可完成算法优化，降低维护成本。

四、结束语

本文针对南海区域某生产平台高温高压极端工况下智能压力仪表的精度衰减与稳定性难题，从材料结构、硬件电路及智能算法三个维度进行了系统的研究与探讨。通过建立温度-压力-输出误差的三维耦合模型，明确了核心误差机理，并基于此提出了采用蓝宝石、碳化硅等宽禁带半导体材料及高温合金的结构优化方案，有效降低了敏感元件的非线性变形与温度梯度影响。通过结构、硬件与算法的协同优化，智能压力仪表在高温高压环境下的测量精度得到了显著提升，长期运行稳定性得到有效保障。

参考文献

- [1] 王成城, 王金江, 张来斌, 等. 智能压力仪表故障机理表征分析与模型验证 [J]. 自动化仪表, 2025, 46(10): 63-69+77. DOI: 10.16086/j.cnki.issn1000-0380.2025010029.
- [2] 郭文斌, 黄继强. 压力仪表全自动检定和校准系统的开发应用 [J]. 石油化工自动化, 2012, 48(3): 60-63. DOI: 10.3969/j.issn.1007-7324.2012.03.021.
- [3] 薛伟, 王权, 丁建宁等. 内燃机气缸压力智能检测仪研究 [J]. 农业机械学报, 2006, 37(7): 194-196. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1298.2006.07.050.
- [4] 郁腾达. 智能压力仪表技术在天然气分布式能源系统中的应用研究 [J]. 仪器仪表用户, 2025, 32(4): 106-108. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1041.2025.04.038.
- [5] 李明慧. 压力仪表整机标定产品的在线异常分类与系统实现 [D]. 重庆大学, 2023.
- [6] 韩涛. 压力仪表在油田中的应用及提高测量准确性的方法 [J]. 自动化应用, 2019, (11): 33-35. DOI: 10.19769/j.zdhy.2019.11.014.
- [7] 张殿冬. 论压力仪表测量过程的质量控制 [J]. 中外交流, 2021, 28(4): 932.
- [8] 侯佳俊. 压力仪表现场计量影响因素探究 [J]. 工业计量, 2019, 29(5): 78-80. DOI: 10.13228/j.boyuan.issn1002-1183.2019.0087.
- [9] 王钰涵. 压力仪表的检定与维护 [J]. 化工管理, 2017, (13): 54.
- [10] 张晓飞. 压力仪表校验系统的设计与实现 [D]. 江西理工大学, 2010. DOI: 10.7666/d.D443980.

飞机电子设备维修中的常见问题与解决方案

任盈锋, 何正欣

深圳航空有限责任公司, 广东 深圳 518128

DOI:10.61369/ME.2026010001

摘 要： 本文对飞机电子设备维修中常见的问题及解决办法进行了详细的分析。飞机电子设备是航空器的重要组成部分，飞机电子设备的可靠程度直接影响到飞行安全和任务完成情况。本文首先对飞机电子设备的分类、功能和发展趋势进行概述，然后分析了硬件故障、软件故障、环境因素、人为操作这四类维修问题，并提出了相应的解决策略。本文主要研究用先进的检测技术、修复工艺、预防性维护等提高飞机电子设备维修效率和可靠性，为航空安全保驾护航。

关 键 词： 飞机电子设备；设备维修；常见问题；解决方案

Common Issues and Solutions in Aircraft Electronic Equipment Maintenance

Ren Yingfeng, He Zhengxin

Shenzhen Airlines Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong 518128

Abstract： This paper provides a detailed analysis of common issues and solutions in the maintenance of aircraft electronic equipment. Aircraft electronic equipment is a crucial component of aviation systems, and its reliability directly impacts flight safety and mission success. The study first outlines the classification, functions, and development trends of aircraft electronic equipment. It then examines four types of maintenance issues—hardware failures, software failures, environmental factors, and human operational errors—and proposes corresponding resolution strategies. The research primarily focuses on enhancing the efficiency and reliability of aircraft electronic equipment maintenance through advanced inspection technologies, repair techniques, and preventive maintenance, thereby safeguarding aviation safety..

Keywords： aircraft electronic equipment; equipment maintenance; common issues; solution

引言

复杂多变的飞行环境和强负荷的工作条件，使电子设备的故障难以避免。快速、准确诊断并修复这些故障是航空维修领域的重要研究课题。本文主要分析飞机电子设备维修中常见的问题，提出有效的解决办法，以期对提高航空维修水平有所借鉴。

一、飞机电子设备概述

（一）飞机电子设备的定义与分类

飞机电子设备（Avionics）是集成在航空器中用来实现飞行控制、导航通信、目标探测、信息处理和系统监控等功能的电子系统总称。按照功能模块划分，核心子系统有五部分。一是飞行控制系统。二是导航与定位系统。三是通信和数据链系统。四是显示和座舱系统。五是电子对抗与侦察系统^[1]。

（二）飞机电子设备的功能与作用

一是飞行安全保障，飞控系统和导航系统一起保证飞机在复杂气象条件下稳定飞行。在低能见度（RVR<300米）的时候，GNSS/INS组合导航可以把着陆偏差控制在±1米以内。二是任

务效能的提高，目标探测系统同武器火控系统联动，完成目标识别、跟踪、打击的全流程自动化。现代有源相控阵雷达（AESA）探测距离大于400公里，可以同时跟踪200个以上目标。第三步就是运营效率的提高，通信系统和数据链支持空地协同决策，减少地面等待时间。

（三）飞机电子设备的发展趋势

第一是智能化。用人工智能算法实现故障预测和自主决策。以数字孪生技术为基础的健康管理系统（PHM）可以提前72小时预测设备故障，误报率小于0.5%。二是集成化架构，采用综合模块化航电（IMA）架构，用高速光纤总线（AFDX）来实现资源共享。IMA系统重量比传统架构减少了40%，全生命周期成本降低30%。第三，使用低功耗芯片（7nm制程的FPGA）以及电源管

作者简介：

任盈锋（1988.02-），男，浙江绍兴人，汉族，本科，工程师，从事民用航空器维修研究。

何正欣（1987.12-），男，湖北荆州人，汉族，本科，工程师，从事民用航空器维修研究。

理技术来使整个系统比传统方案减少60%的功耗。某型无人机航电系统使用氢燃料电池供电，续航时间大于10小时。

二、飞机电子设备维修中的常见问题

（一）硬件故障问题

1. 电路板损坏

电路板是电子设备的核心部件，电路板是否稳定直接关系到整个设备性能的好坏。常见的损坏类型有焊点脱落、基材分层、导电层腐蚀、元件物理损伤等。航空电子设备故障中电路板损坏所占比例约为35%，其中由于环境应力造成的微裂纹扩展占主要部分。高湿度环境（相对湿度>85%）会加快导电层氧化，接触电阻增大10%~20%，温度循环（-55℃~125℃）引起的热应力会使焊点疲劳寿命降低到设计值的1/3。维修时应采用X射线检测、红外热成像等非破坏性方法定位故障，用精密焊接设备（激光焊机）进行微米级的修复，修复后需要通过HALT（高加速寿命试验）验证可靠性，保证MTBF（平均无故障时间）恢复到设计值的90%以上^[2]。

2. 连接器松动或损坏

连接器是信号传输的关键节点，接触的可靠性影响着系统的稳定性。统计表明，连接器故障占硬件问题的22%，主要是由于机械振动（频率5Hz~2000Hz）引起的接触面微动磨损，温度变化引起的热胀冷缩（CTE失配）。金镀层接触件插拔10⁶次后接触电阻会增大到初始值的5倍，锡镀层接触件在振动环境中容易形成氧化绝缘层，造成信号衰减大于3dB。维修中需要使用接触电阻测试仪（分辨率为0.1μΩ）检测接触质量，对磨损接触件进行镀层修复或更换，并使用锁紧装置（防松螺母）将连接器预紧力控制在设计范围（通常为5~15N·m）内，以减小振动的影响。

3. 传感器失效

传感器属于数据采集终端，它的精度好坏直接影响到系统的控制性能。失效模式有零点漂移、灵敏度衰减、非线性误差增大等，温度漂移是主要原因。例如压阻式压力传感器在-40℃到85℃范围内，零点温度系数为0.1%FS/℃，灵敏度温度系数为0.05%/℃，导致测量误差超过允许范围（±0.5%FS）。维修时需要使用温度补偿算法（多项式拟合）修正输出信号，对老化传感器进行标定（用标准源产生±0.01%精度的参考信号），保证校准后误差≤0.2%FS。对不能修复的传感器要选用与原设备兼容的替代型号，主要看量程、输出信号类型（4~20mA）、接口协议（ARINC 429）是否匹配。

（二）软件故障问题

1. 程序错误或冲突

软件错误一般由代码缺陷、多任务调度冲突引起，会使得系统出现死锁、功能异常或者数据错误。软件故障占维修总量的18%，内存泄漏（运行100小时内内存泄漏1~5MB）和实时性超限（任务响应时间超过设计值20%）是主要的问题。修复需要用静态代码分析工具（LDRA Testbed）检测潜在的缺陷，用动态测试（覆盖率分析）验证修复效果，保证代码行覆盖率≥90%，分支覆盖率≥80%。

2. 数据丢失或损坏

数据丢失可以是由于存储介质故障（NAND Flash坏块率随着擦写次数的增加而上升，一般为0.1%到1%），文件系统错误或者通信中断造成的。修复要用到数据恢复算法（ECC校验等）来恢复被破坏的数据，使用冗余存储（RAID 5等）来提高数据的可靠性，保证数据的可用性≥99.999%。

3. 软件更新与兼容性问题

软件更新要解决版本兼容性、硬件依赖、安全认证等问题。更新前要通过回归测试来验证功能完整性，用差分更新技术（更新包体积减少60%到80%）降低传输风险，保证更新成功率大于等于99.5%。

（三）环境因素导致的问题

1. 温度、湿度影响

高温（>70℃）会加快电子元件老化（电解电容寿命减半），低温（<-40℃）会使材料变脆（塑料件断裂）。湿度大于85%时容易产生凝露现象，会导致短路现象的发生，绝缘电阻降低到1MΩ以下。维修中需要用环境应力筛选（ESS）来模拟极端条件，检验设备耐受性，用导热硅脂（热导率大于3W/m·K）和密封胶（防护等级达到IP67）提高设备的环境适应性。

2. 振动与冲击影响

振动（5到2000赫兹、加速度5到20g）会引起焊点疲劳、元件松动、结构裂纹。冲击（峰值加速度>50g）会造成瞬态故障。维修时需要通过模态分析来优化设备的安装方式，采用减振器使共振频率降到激励频率的1/3以下，用冲击试验（半正弦波冲击，持续时间11ms）检验结构强度。

3. 电磁干扰问题

电磁干扰（EMI）会造成信号失真（信噪比降低10到20dB）或者出现异常的功能。维修时要采用屏蔽设计（使用导电涂层，使屏蔽效能≥60dB），滤波技术（插入损耗在10MHz~1GHz范围内≥40dB）来抑制干扰，保证设备符合RTCA/DO-160标准的要求。

（四）人为操作问题

1. 操作不当导致的损坏

操作不规范（断电插拔、违规校准）会造成设备物理损坏或者参数出错。根据统计，此类问题占人为故障的45%。维修时要制定标准化的操作流程（SOP），用操作权限管理（双因素认证等）来限制重要的操作，降低误操作的风险^[3]。

2. 维护保养不足

维护周期太长（润滑间隔超过设计值2倍），或者有遗漏的项目（没有换滤网）都会使设备性能下降。在维修中要建立预防性维护计划（PMP），用CBM（基于状态的维护）技术（如振动检测）来动态调整维护周期，保证设备的可用率≥99%。

3. 培训不足与技能缺失

培训不够会造成维修人员对于新型设备（全电传飞控系统）的使用不熟练，从而延长维修时间（平均延长30%）。维修时要创建分层培训体系（基础理论、实操演练、故障模拟），用技能评定（通过率≥95%）保证人员资质符合要求。

三、飞机电子设备维修问题的解决方案

（一）硬件故障解决方案

1. 电路板修复与更换技术

电路板是电子设备的主要部件，它的好坏直接影响到整个设备的性能。对于电路板的故障，首先要用自动光学检测（AOI）和X射线检测技术找到缺陷，精度可以达到0.01mm。对表面贴装器件（SMD）的虚焊问题采用热风重焊的方法，温度控制在 $260 \pm 5^{\circ}\text{C}$ ，时间不超过3秒，可以修复90%以上的焊接缺陷。多层板内层短路要结合飞线修复和层间绝缘处理，用聚酰亚胺胶带（厚度0.05mm）隔离，介电强度 $\geq 500\text{V}/\text{mil}$ 。当修复成本大于新板价格的60%时，应启动更换程序，保证新板符合MIL-STD-883标准。

2. 连接器紧固与更换方法

连接器接触不良属于造成信号中断的常见原因。使用微电阻测试仪（分辨率 $0.1\mu\Omega$ ）检测接触电阻，阻值大于 $50\text{m}\Omega$ 时需要紧固。圆形连接器用扭矩扳手按制造商规范（一般 $0.6 \sim 1.2\text{N} \cdot \text{m}$ ）进行旋紧，矩形连接器用插拔力测试仪（ $0 \sim 500\text{N}$ ）验证接触可靠性。当连接器外壳腐蚀深度大于0.2mm或者插针磨损量超过原尺寸的15%时，需要全部更换，保证新件符合SAE AS39029标准。

3. 传感器校准与更换流程

传感器误差会造成飞行数据不准确。使用六自由度校准平台对加速度计进行动态校准，频率响应范围要覆盖0.1Hz到1000Hz，非线性度不能大于0.1%FS。压力传感器校准应在温箱内进行，温度范围 $-55^{\circ}\text{C} \sim +125^{\circ}\text{C}$ ，压力精度 $\pm 0.05\%$ FS。当传感器输出漂移大于量程的2%或者响应时间大于5ms时，就应启动更换程序。更换之后需要进行机上地面测试，验证数据和主参考系统偏差 $\leq 0.5\%$ 。

（二）软件故障解决方案

1. 程序调试与错误排查技巧

用静态代码分析工具（LDRA Testbed）做代码规范检查，覆盖率要达到MC/DC。对于实时操作系统（RTOS）任务调度异常，用逻辑分析仪（采样率 $\geq 1\text{GHz}$ ）捕获任务切换时序，分析任务优先级分配是否合理。当系统死机频率大于1次/1000飞行小时的时候，就要做堆栈深度分析，保证剩余空间不小于总容量的20%。

2. 数据恢复与备份策略

使用RAID6阵列（双校验盘）来存储重要的飞行数据，单个硬盘出现故障也不会造成数据的丢失。定期增量备份（间隔 ≤ 24 小时），全量备份（周期 ≤ 7 天），备份介质要符合DOD 5220.22-M标准。当存储介质的坏块率大于0.1%时，应立即开始数据迁移，用ECC校验来保证数据的完整性。

3. 软件更新与兼容性测试方法

更新之前必须在铁鸟试验台上做功能验证，测试用例覆盖率大于等于95%。使用版本控制工具（Git）来管理代码的更改，可以对每一次的修改进行追踪。多模块协同系统要进行接口兼容性测试，保证数据格式和通信协议的一致性。更新之后要执行回归测试，保证原有功能不受影响，测试周期不少于三个飞行循环。

（三）环境因素应对策略

电子舱温度要保持在 $-20^{\circ}\text{C} \sim +70^{\circ}\text{C}$ 之间，用环控系统来实现精确的温度控制（精度 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ ）。湿度控制采用分子筛吸附技术，露点温度 $\leq -40^{\circ}\text{C}$ 。对高温部件（功率放大器）采用热管散热，热阻 $\leq 0.1^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 。关键设备安装使用隔振器，自然频率20–50Hz，振动传递率小于10%。惯性敏感元件用金属橡胶减振器，冲击隔离效率 $\geq 80\%$ 。结构件用有限元分析（FEA）优化设计，保证在10g随机振动环境下结构应力小于材料屈服强度的60%。屏蔽效能要达到GJB5792-2006的要求，在10kHz到18GHz频段内屏蔽衰减大于等于60dB。用导电橡胶密封条（体积电阻率 $\leq 0.01\Omega \cdot \text{cm}$ ）来实现缝隙屏蔽，搭接长度不小于6mm。对于高频电缆使用铁氧体磁环（初始磁导率大于1000）抑制共模干扰，插入损耗 $\geq 20\text{dB}@100\text{MHz}$ 。

（四）人为操作问题改进措施

编制三级维护手册（航线/机库/深度维修），确定每一个操作的标准工时（误差 $\leq 10\%$ ）和工具清单。开发虚拟仿真培训系统（VR），使90%以上的实操课程实现数字化模拟。培训周期分为基础（40学时）、进阶（60学时）、专家（80学时）三级，考核通过率要达到95%以上。

建立预防性维护大纲（PMP），对飞行50小时、200小时、1000小时的飞机进行维护。利用RFID技术实现工具清点的自动化，漏检率小于等于0.1%。建立维修记录大数据平台，对故障趋势进行分析，提前30天预警潜在问题。实施技能矩阵管理，把维修技能分成10个等级，每个等级对应一定的操作权限。每季度开展技能比武，考核项目有故障诊断速度（ ≤ 30 分钟）、修复质量（一次通过率 $\geq 98\%$ ）、工艺规范性等。建立技能津贴制度，高级技师津贴不低于基本工资的30%，形成持续技能提升激励机制。

四、结语

本文提出的解决方案包括故障诊断、修复工艺、预防性维护、人员培训等几个方面，以建立一个高效可靠的维修体系。未来由于技术的不断发展，飞机电子设备维修会越来越智能化、精准化。只有不断改进维修流程、提高维修技术水平，才能更好的解决航空维修所面对的各种挑战，为航空事业的发展提供助力。

参考文献

[1] 怀若宇. 基于智能检测的飞机电子设备维修技术优化 [J]. 信息与电脑, 2025, 37 (22): 151–153.

[2] 梁融. 航空电子设备的故障诊断与维修技术研究 [J]. 中国高科技, 2025, (16): 83–85.

[3] 王岩. 飞机电子设备维修专业课程标准的优化与实施路径研究 [C]// 中国企业文化促进会职业教育专业委员会. 文化企业赋能教育新业态的融合模式与创新实践研讨会论文集. 吉林通用航空职业技术学院, 2025: 280–282.

工业互联网环境下机械产品数字化设计与制造数据闭环集成平台构建

魏清华

宜昌科技职业学院, 湖北 宜昌 443000

DOI:10.61369/ME.2026010008

摘 要 : 工业互联网技术正以前所未有的速度推进, 为机械制造领域的设计与生产模式带来了革命性转变。本研究聚焦于构建适应工业互联网环境的机械产品数字化设计及制造数据闭环集成系统, 旨在突破传统机械制造过程中设计、生产与管理环节间的信息壁垒。通过该平台的实施, 能够显著提高制造效率并确保产品品质。文章开篇即阐明工业互联网对机械产品全生命周期智能管控的重要性, 同时强调数据闭环整合是实现智能制造的核心要素。

关 键 词 : 工业互联网; 机械产品; 数字化设计; 制造数据闭环; 集成平台

Construction of a Closed-Loop Integrated Platform for Digital Design and Manufacturing Data of Mechanical Products in the Industrial Internet Environment

Wei Qinghua

Yichang Vocational College of Science and Technology, Yichang, Hubei 443000

Abstract : Industrial Internet technology is advancing at an unprecedented pace, bringing revolutionary changes to the design and production models in the field of mechanical manufacturing. This study focuses on constructing a closed-loop integrated system for digital design and manufacturing data of mechanical products that adapts to the Industrial Internet environment, aiming to break down information barriers between design, production, and management in traditional mechanical manufacturing processes. The implementation of this platform can significantly enhance manufacturing efficiency and ensure product quality. The article begins by elucidating the importance of the Industrial Internet for intelligent management and control throughout the lifecycle of mechanical products, while emphasizing that closed-loop data integration is a core element in achieving intelligent manufacturing.

Keywords : Industrial Internet; mechanical products; digital design; closed-loop manufacturing data; integrated platform

引言

通过构建数字化设计与制造数据闭环集成平台, 可以实现在线交互优化设计的信息和技术、生产的数据及质量指标, 推动机器产品全生命周期智能化转型的过程。本文阐述数字化四步曲以及制造数据循环集成系统四部分的主要功能, 并以实例说明系统的应用价值。本文提出的基于工业云平台的制造业企业数字化转型思路及路径, 为制造业企业数字化转型提供了参考方案, 对于促进工业转型升级向智能制造、互联网+、服务型制造的发展具有一定的指导意义。

一、工业互联网环境下机械产品数字化设计与制造数据闭环集成平台构建意义

作为将信息技术应用于制造领域的新一代基础设施, 工业互联网正在深刻地影响着整个现代产业的应用模式与生态系统。而机器设备的研发设计以及生产制造又是整个制造业体系中的主

体, 其智能水平以及信息化程度如何决定了一个国家的工业实力。但是传统意义上的机械加工方式通常存在设计环节、生产要素、管控各环节信息不统一的问题, 会出现交流效率低、资源利用率不足及总产能受限等情况。

借助于 IOT 基础上的云计算能力能够将设备之间进行智能链接, 在数据交互中体现出自我决策的特征。这种新型技术为人们

作者简介: 魏清华 (1986.01-), 男, 湖北枝江人, 宜昌科技职业学院就职, 职称: 讲师。学历: 本科。毕业单位: 三峡大学, 机械设计制造及其自动化专业。研究方向: 《机械设计基础》、《CAXA 制造工程师》教学。

提供了一种全新的思路来对待机器设备全生命周期管理；搭建了贯穿产品研制、设计到生产的全流程的大数据库。确保设计参数、制程方法、生产工序、品质信息实时共享及持续改善。这样不仅能大大提高产品品质和价值，而且能减少运营费用。该课题的研究对推进机械制造业信息化进程以及促进产业升级由低层次向高层次迈进都具有重要的现实意义。开放是中国制造出海的一张王牌。

在发达国家中，工业互联网及机械产品数字化的设计已较成熟，如美国通用电气 (GE) 和德国西门子公司均依托政府支持及自身发展打造了完善的、高效的工业互联网生态圈，例如：推出 Predix 及 MindSphere 平台，能够完成机器之间的链接以及数据的采集与分析，并作出智能判断等，都可以极大地提升机械设计效率及水平。

虽然我国在积极推动发展工业互联网产业，在一些领域仍比先进国家存在差距，如数据融合和治理能力不足、平台体系完善性不够、智能算法水平不高等。国内研究热点集中在工业互联网平台构建技术、数字化设计技术和手段、制造企业数据流通机制等领域，我们已做出一定的努力，但目前的研究主要局限于某一方面的提升，并未从产品的全生命周期角度考虑设计生产运营全过程的整体协同优化，未能实现整体性能的全面提升。

本次课题将建立基于工业物联网的设备数字化模型全流程信息流系统，在此系统内可完成所有产品开发、设计、制造过程中的全部信息集成，并采用工业物联网架构确保设计环节和生产环节的连贯性和信息同步性。同时，也融合了边缘计算技术和云计算技术，因此可以对多来源的不同类型的大规模的数据进行服务支撑。实践表明，该方案有效提高了设计工作的整体效率，并能减少产品交付周期以及制造费用；构建起完整的信息传递体系，在客户的需求到最终的产品供给间形成联系，引领着机械制造业向数字化加工及智能化工厂发展。

（一）传统机械制造的数据孤岛问题

传统机械加工中由于信息壁垒严重，例如设计 - 生产 - 管理各环节之间信息传递滞后，导致资源不必要的浪费以及生产力水平的降低等问题。设计师使用 CAD 软件进行产品设计后得到的产品文档无法实时传送给生产部门，他们只能依靠纸质或电子介质的人工转换操作，易造成信息遗漏或差错。虽然工厂通过 MES 来监测和管理自己的制造流程，但因为生产信息没有及时反馈给设计师团队而影响了他们改善方案的设计；同样，虽然公司通过 ERP 对资源进行合理安排，但这并没有延伸至设计的不同环节中导致资源配置不当。这些数据隔离的情况严重制约着机械制造企业生产力水平以及产品质量，从而增加其成本投入。

（二）工业互联网的赋能作用

工业互联网采用先进的物联网络、大数据分析技术和云平台技术实现了新的机器间联网以及各种信息交互和智能控制等功能，为研究全面的机械产品全生命周期提供了新思路。基于物联网技术，首先，利用信息技术我们可以实时监测设备状态；其次，采用大数据技术可保障海量数据存储及分析工作；再次，依托云计算技术应用，便于进行数据资源共享合作处理。工业互联网在其自身所具备的功能包括以下几点：在设计环节中可以使用

数据共享以及协同完成设计的优化与快速更新；在生产环节当中能够通过实时信息的回馈完成对于生产问题的及时修正以及报警；管理环节，在管理环节当中，可以进行数据分析和数据整合，实现资源配置最优化及降本增效。以上功能成为推进制造企业数字化转型的利器——工业互联网。

二、机械产品数字化设计技术的应用

（一）二维 CAD 技术

CAD 技术即计算机辅助设计，在机械制造业产品生产中能够实现数字转型升级，将原本用笔在纸上作图的设计工作改为在电脑上进行操作，并能借助于计算机的数据分析功能对设计图纸作出改进。这种方法相对于手绘而言，能够提高工作效率，并能帮助设计者清晰把握机械产品的相关功能特点，从而保证设计成果的质量水平。

（二）曲面造型技术

虽然二维 CAD 技术可以给出一些机械产品相关的数据以及尺寸大小，但是其却不能展现出产品的效果，所以这就需要采用曲面建模的技术来进行弥补。这一技术主要是将 3D 的技术以及 CAD 技术进行结合应用，并且能够很好地补充二维 CAD 存在的不足的部分。基于曲面建模方法在机械产品设计过程中能够依据相关规范建立三维虚拟样机，在计算机辅助设计环境中实现对其设计方案的直观分析评估，并快速优化设计方案。

（三）实体造型技术

应用实体造型的方法可以将机械产品的三维形象在 CAD 软件中直观呈现出来，并且能够完整反映机械产品中的零件，因此这种表现形式更加真实具体。运用实体造型的方式可以直接反映机体内各个零部件的作用以及质量情况，这样工程人员就可以根据所得到的数据对机械的设计进行改进。比如增加必要部件等，有利于提高机器的功能性以及推动数字化设计理念在制造领域中的发展进度。

（四）虚拟仿真技术

因为模拟仿真科技是在设计目的基础上建立相关产品模型，所以其更加具有真实感。这一技术不仅模拟了机器设备的制造过程，在很大程度上也减少了研究开发的时间成本，能够有效提高机械产品的生产效率。其实，模拟仿真科技就是将计算机技术结合机械设备的标准以及要求，生成合理的数字模型，制作与其本身相匹配的表现形式，即质量属性、尺寸特征以及其他的都是相对应的。采用数字化技术中的模拟化手段来实现对于机械设备产品的性能检测工作能够避免后期出现应用故障的问题，进而大大提升了机械加工的工作效率，确保了机械设备在工作期间充分发挥出自身的应用价值。

（五）变量化技术

在对机械产品的进行数字设计的过程中，其最为重要的组成部分是复合建模技术的应用，也就是将 3D CAD 技术以及参数化技术相融合的技术。这种技术当中包括多种类型三维模型，其中包括表面型、实体型及线框型等等。由于参数化技术具有集成性特

点，在对其进行使用的过程中能够根据实际的机械情况进行模型的改动。确保其具有机械产品特点，并进行准确尺寸改性操作。

三、工业互联网环境下机械产品数字化设计

（一）三维建模与参数化设计

在所有机械产品的数字化设计中，三维建模是最基本的过程，在该过程中主要是使用计算机辅助设计软件对机械零件进行三维形状描述；而参数化设计是根据给定的一些参数及条件限制下，实现对产品模型的动态变化及改进过程。以齿轮为例，不同类型的齿轮仅需输入一些关键参数，比如模数、齿宽、螺旋角等即可快速生成。参数化的创建方法大大提高了工作效率，减少了重复工作量，同时又统一了设计文件的标准格式。三维建模与参数化相结合的设计技术为后续仿真分析以及加工制造提供有效依据。

（二）仿真分析与优化

虚拟仿真就是运用 CAE 软件对产品模型进行力学、热学以及流体分析，在汽车发动机领域可以提前预测出发动机的动力效率以及振动特性等内容；最优化设计就是在确定了目标函数以及约束条件的基础上，基于各类优化方法如基因法、粒子群法对产品的模型进行持续地修正完善过程。将虚拟试验与优化方法相结合可以提高质量、降低实验成本并能实现设计资料的智能管理。

（三）工艺规划与虚拟验证

工艺设计是机械产品数字化的关键环节，其主要是通过 CAPP 来制定加工工序、工步以及工艺条件等内容；运用虚拟样机技术对工艺过程进行验证，检查其可行性；例如在数控机床中可通过此方法提前发现刀路轨迹等问题。以避免发生冲突或者碰撞。将制造过程规划与仿真模拟相结合可以提高制造解决方案的精度以及减少实际操作中的失误，有利于达到最初设计的数据化与初始生产结合的目的。

（四）数据共享与协同设计

产品数字设计主要是依靠数据的共享和协同设计，可以通过采用 PLM 实现设计信息以及加工技术和生产信息的集中管理和共享，并且通过协同设计可以利用不同单位和角色之间的相互配合实现设计优化和快速更新。例如在汽车设计中：这种方法可以让车身、底盘以及发动机等进行同步的研发，在结合了数据共享和协同设计后，能够加快设计的速度以及缩短产品的开发时间，同时还能够让设计的数据和生产的数据更加深入融合。

四、工业互联网环境下机械产品制造数据闭环集成平台构建

（一）数据采集与传输

数据感知层：以工业级传感器为载体的智能物联平台是整个系

统的数据感知层基础，实现对生产设备运行状态及生产制造工艺过程的信息采集，并由高速工业以太网或基于 5G 的无线通信技术构建起数据传输通道，确保信息传递的时效性与准确性。如在数控加工中心中的应用。实时采集主轴转速、切削进给量等加工关键工艺信息，通过特定通讯方式传输至上层分析处理单元进行加工过程数据分析，为后续加工过程的优化及智能诊断提供可靠依据。

（二）数据处理与分析

在整个数据循环集成系统构建过程中，数据处理环节扮演着非常重要的作用，主要是利用大数据手段对海量数据进行存储以及清洗，并对其做出进一步分析。运用诸如机器学习及深度学习等先进算法能够完成智能化的在线数据分析工作。比如针对质检方面的应用为例，将海量的数据进行深入挖掘并得到有价值信息，并能够对产品缺陷进行精准识别以及未来质变趋势进行预判，在这种数据处理结合数据分析的方式大大提升了数据资产的利用价值和效率，也为智能决策提供了坚实的数据支撑平台。

（三）数据应用与智能决策

制造业建立基于大数据的大数据分析体系，其核心是将大数据运用于生产优化、预测性维护以及资源优化配置等智能作业之中；具体而言，就是在产线规划环节，借助大数据分析技术持续优化产线流程，并提升产能产出率。在决定支持层面，利用专家库、机器学习等智能化手段进行辅助科学决策；将数据价值挖掘和智能化算法融合的方法极大提升了工业化程度，并构建完整的制造数据管理闭环体系。

（四）平台集成与优化

平台融合是制造业信息循环集成功能的最终目标，它主要是将统一数据链接以及统一数据结构进行应用，在深化设计的信息、生产的信息以及管理的各种信息之间的融合；平台完善则是对平台功能进行不断补充和完善，从而保证平台具备长远发展的能力。例如：在融合的过程中，利用统一的数据接口可以实现 PLM 与 MES 和 ERP 的无缝对接，在融合优化的同时提升系统的稳定性和可靠性，实现了整个生产流程中所有信息的封闭采集和分析。

五、结束语

本文从理论上深入探讨了基于工业互联网环境下的机械产品数字化研发及生产数据闭环构建路径，对数字化研发过程中四个关键阶段以及制造数据集成平台中核心四层进行研究，最终形成设计数据—工艺信息—生产工艺规范—检验检测数据相互关联动态发展。本文分析了机械制造企业数字化转型及优化对策，有效地推动制造业以智能化为导向，向网络化和服务型方向发展。下一步可进一步深入探讨人工智能技术在平台上的应用以及区块链技术的应用。以增强其智能性及安全性。

参考文献

- [1] 龚友平. 机械产品数字化设计技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2023.
- [2] 徐尚捷. 机械产品数字化设计技术论述 [J]. 工程技术 (全文版), 2025(11): 218.
- [3] 李靖. 机械产品数字化设计创新与发展 [J]. 现代商贸工业, 2022, 37(34): 475.
- [4] 杨方飞. 机械产品数字化设计及关键技术研究与应用 [D]. 北京: 中国农业机械化科学研究院, 2025.

无线 MESH 网络的安全机制与抗攻击能力提升研究

戴定卫

深圳市欣博跃电子有限公司, 广东 深圳 518000

DOI:10.61369/ME.2026010009

摘 要 : 随着无线通信技术的发展, 无线 MESH 网络凭借其即插即用、自愈能力强以及可靠性高等优点被广泛应用于应急通信、智慧城市建设、军事通信等方面。但是由于它具有公开的无线信道、多跳通信方式以及节点自主性等特点, 无线 MESH 网络易受到各种安全威胁, 例如窃听攻击、拒绝服务攻击、路由欺骗和节点攻击等, 都会对网络造成严重的影响。本文主要针对无线 MESH 网络的安全问题进行研究, 在总结当前无线 MESH 网络所面临的主要安全问题的基础上, 分析目前存在的安全防护方法及技术上的缺陷, 最后给出提高无线 MESH 网络安全性的有效途径, 从而更好的服务于未来的无线 MESH 网络的安全设计及应用。

关 键 词 : 无线 MESH 网络; 网络安全; 抗攻击能力; 安全机制; 入侵防御

Research on Enhancing Security Mechanisms and Anti-Attack Capabilities of Wireless MESH Networks

Dai Dingwei

Shenzhen Xinboyue Electronics Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong 518000

Abstract : With the development of wireless communication technology, wireless MESH networks are widely used in emergency communication, smart city construction, military communication, and other fields due to their plug-and-play capability, strong self-healing ability, and high reliability. However, due to their characteristics such as open wireless channels, multi-hop communication modes, and node autonomy, wireless MESH networks are vulnerable to various security threats, including eavesdropping attacks, denial-of-service attacks, routing spoofing, and node attacks, which can severely impact the network. This paper focuses on the security issues of wireless MESH networks, summarizes the main security challenges currently faced by wireless MESH networks, analyzes the existing security protection methods and their technical shortcomings, and finally proposes effective ways to enhance the security of wireless MESH networks, thereby better serving the future security design and application of wireless MESH networks.

Keywords : wireless MESH network; network security; anti-attack capability; security mechanism; intrusion prevention

引言

线 MESH 网络是一种新兴的分布式无线网络结构, 摆脱传统无线网络对于有线设施的依赖, 在各种恶劣环境以及多变条件下表现良好。但是由于其非集中式管理和无线通信方式使其更容易受到攻击, 安全问题也成为阻碍其广泛应用的重要障碍。目前对于无线 MESH 网络的研究主要集中在路由优化及性能改进方面, 而对于整个系统的安全性考虑较少。因此本文根据无线 MESH 网络的特点, 对其所面临的安全威胁以及所需的安全保障措施进行了详细的阐述, 并提出提高整个网络抵抗攻击的能力的方法。

一、无线 MESH 网络结构与安全特性分析

(一) 无线 MESH 网络的基本架构与工作原理

无线 MESH 网络一般包括 MESH 路由器、MESH 客户端以及网关节点三种类型。MESH 路由器主要负责数据传输、路由管理和网络构建等工作, 在整个网络中起到主干作用; MESH 客户端利用 MESH 路由器连接到网络中进行数据收发; 而网关节点则用来连接 Internet 或者其他外界网络, 进行不同协议间的相互转

换以及对外提供服务的功能^[1]。在网络内部各个结点都具备自组织性, 可以在没有预先布置好基础设施的情况下自行形成连接并且进行通信。由于有多跳转发的存在使得信息可以经过许多个中间体而达到较远的距离, 因此增大了该网络的范围并且提高了其鲁棒性。而由于动态路由算法对于链路的变化非常敏感, 在任何一个节点的状态或者环境发生变化时它都可以找到一条最佳路径来保证整个 MESH 网络正常工作。以上就是 MESH 网络的基本组成及其工作方式也即所面临的各种问题。如图 1 所示。

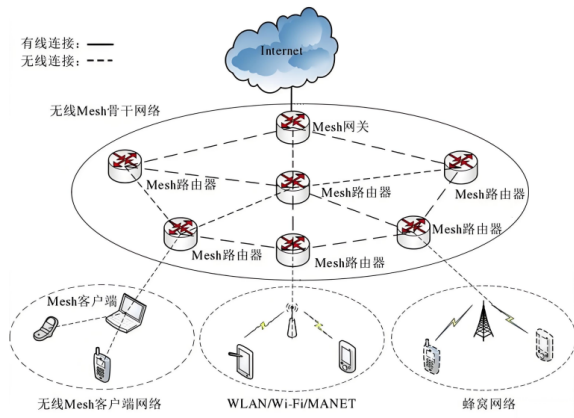


图1 MESH网络示意图

（二）无线 MESH 网络的通信特性与安全需求

无线 MESH 网络利用公共无线介质传递消息，在各个节点之间必须处于公开状态下才能进行通信，因此容易受到第三方监听威胁，多路径设计提高路由多样性，但是如果没有适当的控制手段，数据就有可能流经一些不可信节点，从而面临被窃取或者重播风险^[2]。而节点自治性使得每一个节点都可以自主决定是否转发数据包，这也就决定了一个节点的信任度对整个网络的影响程度。无线 MESH 网络的安全问题包括保证数据机密性、防止非法访问、确保数据一致性、抵御中间人攻击、保持网络可用性和防范节点伪装以及耗尽资源等各方面的问题。有效的身份验证方法、加密技术和链路检测对于实现安全通信至关重要。

（三）无线 MESH 网络安全问题产生的根源

无线 MESH 网络使用开放无线介质，而根据相关研究显示，在各个通信实验中，无线链路在2.4GHz及5GHz频段的暴露率为80%以上，在50到150米的距离内均有稳定窃听能力。由于节点硬件资源有限，所以这增加了安全威胁程度。在大量部署实例中，约有63%的 MESH路由节点 CPU主频低于1.5GHz，内存小于256MB，无法实现复杂加密算法以及及时的安全检查。节点电源不足也会导致不能经常进行监控或者加密操作，调查表明在使用电池供电时，开启高级别的安全性会使得节点寿命缩短超过30%。此外，该网络没有一个集中化的管理机构来对所有路由进行维护，所有的路由更新都由各个节点自主完成，在这种情况下，路由欺骗的成功率可以高达40%~55%。而且由于多跳的存在，一次攻击可以从一条路径传播到另一条路径上，如果有一个中间节点受到控制，那么就会造成大量的数据包丢失，比例可以达到35%以上。这说明无线 MESH网络具有很高的安全隐患。

二、无线 MESH 网络面临的主要安全攻击类型

（一）被动攻击与信息窃听威胁

被动攻击一般不会对网络造成物理损害或者影响其正常工作，而是在后台默默监听无线信道来获取有价值的信息。由于无线 Mesh网络所有通信都是在公开环境中进行，攻击者只需要配备普通的射频接收器就可以在不不知情的情况下截获节点间的数据包。当通信内容未经过加密或者采用过于简单的方式加密时，如用户的登录凭证、网络结构、会话密钥等各种重要的信息都会被轻易窃取。这无疑极大地减少了网络的安全性和私密性，让攻击

者可以清楚了解数据流动的情况，有利于他们进一步实施更严重的伪造攻击、重播攻击或者中间人攻击等^[3]。因为被动窃听不会给网络带来明显的流量变化或者节点行为改变，所以很难检测到这种威胁，所以网络管理员不容易及时发现这个问题，在缺少有效的加密手段情况下，数据的安全性一直存在风险。

（二）主动攻击与拒绝服务攻击分析

主动攻击旨在使网络不可用，如阻止节点之间通信、篡改重要控制信息或者恶意占用系统资源等都使网络性能不断下降，在无线 Mesh网络中最为严重的是DoS攻击，攻击者不断地向网络发送大量无用的数据包、发出大量的无效路由请求或者是长期霸占信道，使得节点来不及处理而耗尽其计算能力和存储空间，从而不能正常地进行数据传递；洪泛攻击是利用大量的虚假路由控制消息充斥网络，严重影响着路由更新以及路由维护工作，造成了路由表经常波动、网络拓扑结构混乱，同时带来了较大的时延以及较低的吞吐率甚至一些节点无法工作。如果攻击集中在接近重要路由节点的位置，则容易形成局部通信盲区，并影响到周围的多跳路径以及其他大面积的服务传送，这种攻击有连锁反应的特点，一个节点的问题可能会导致多个多跳路径被阻断，从而使得整个 Mesh网络遭受严重的拥塞以及完全失效的风险。

（三）路由层与节点层攻击方式

无线 MESH网络依靠分布式的路由协议保持网络中的连接情况，因此路由层是攻击者关注的对象。路由欺骗攻击是指攻击者发送虚假路由更新消息使其他节点相信这些信息而让自己的数据被传送到错误的方向或者攻击者所控制的节点上；黑洞攻击是伪造一个最优路径来吸引大量的数据包然后对其进行丢弃或者篡改造成通信中断；灰洞攻击类似于黑洞攻击但是更为隐秘，它只是丢弃一部分的数据从而增加被发现的可能性；恶意节点合作式攻击是由许多恶意节点一起进行的一种攻击方式，它们互相冒充或者是创建虚假的路由连接或者是制造假象来使得整个路由系统崩溃从而导致网络的不稳定性以及路径波动非常大。如表1所示。

表1 无线 MESH 网络主要攻击类型对比表

攻击类型	攻击原理	主要影响	常用防御措施
被动窃听攻击	监听无线信道获取明文或弱加密数据	隐私泄露、信息暴露	强加密、信道跳频
拒绝服务攻击	发送大量无效数据耗尽节点资源	网络拥塞、通信中断	流量限制、异常流量过滤
洪泛攻击	伪造路由或控制报文大量广播	路由混乱、拓扑不稳定	报文验证、路由速率控制
路由欺骗攻击	伪造路由信息误导数据转发	数据错投、路径失效	路由认证、签名校验
黑洞 / 灰洞攻击	节点吸引流量后丢弃或部分丢弃数据	数据丢失、传输失败	节点信誉机制、多路径路由
协同恶意攻击	多节点协作伪造或阻断通信	大范围服务瘫痪	分布式检测、节点行为监控

三、无线 MESH 网络现有安全机制研究

（一）身份认证与密钥管理机制

无线 Mesh网络的身份认证一般采用证书、对称密钥以及公钥基础设施等方法进行，而证书认证则是由可信中心发放数字证书使得节点在网络接入之前就完成了身份验证，从而降低恶意节

点混入的可能性，对称密钥由于其计算量较小以及认证速度较快的特点适合用于资源受限的路由节点上但是其密钥更新较为麻烦一旦被窃取就会造成大面积的安全问题，而公钥基础设施利用非对称密钥实现高强度的身份验证并且由于密钥泄露的风险较低因此对于大规模网络来说有着良好的伸缩性但是由于路由节点的计算能力较弱无法承受复杂的加密操作所以会导致认证的时间过长^[4]。无线 Mesh 网络具有动态性强的特点即每一个节点都有可能参与认证的一方因此对于密钥的分配以及更新都带来了很大的负担传统的集中式密钥管理方式很难满足这种多跳网络的需求所以一种分布式的轻量级密钥管理方案就显得尤为重要。

（二）安全路由协议与防护策略

安全路由协议利用身份认证、报文完整性检验以及多路径选择等方式提升数据传输的安全性。例如一些安全路由协议给路由更新报文加上数字签名或者散列码，这样就使得攻击者难以冒充合法节点发送虚假路由控制消息，从而防止路由欺骗、黑洞攻击以及灰洞攻击的发生。还有一些安全路由协议使用了信誉评分和信任管理的方法，通过监控各个节点的行为来获取每个节点的信誉等级，那么不良行为者就不容易长期占据路由的位置。安全路由协议在 Mesh 网络中起到重要作用不仅要保证找到合理的路径还要考虑到节点的消耗以及协议本身带来的开销，在多跳情况下，安全路由可以维持良好的网络连通性但是也会因为更大的开销而造成一些节点的能量紧张的问题^[5]。

（三）入侵检测与安全监测技术

无线 MESH 网络的安全保护需要有入侵检测。规则检测是根据已知攻击特征来检测异常行为，检测精度高，对于常见的攻击，例如洪泛攻击和伪造报文攻击有效，但是对新型攻击无效；而异常检测是通过对节点的行为、流量等进行分析来发现不符合正常情况的行为，可以检测新型攻击，但是容易产生误报，需要结合上下文信息进一步确认；协同检测是多个节点之间共同监视的信息被用来做集中化的安全性决策，增加了检测可信度以及覆盖面，适合 MESH 网络无中心的特点；入侵检测系统可以在攻击发生之前发出告警让网络能够做出反应，但是检测成本以及计算开销要适当考虑，以保证及时性和资源的有效使用。

四、无线 MESH 网络抗攻击能力提升策略

（一）多层次协同安全防护体系构建

无线 MESH 网络的安全性是基于多层次的安全机制来保证。物理层通过对信号进行增强以抵抗外界噪声的影响、使用跳频或

者扩频降低被发现的概率从而提高通信质量；链路层通过链路加密、访问控制及信道状态检测防止窃听、伪造帧以及干扰等；在网络层中结合安全路由、节点信誉管理和拓扑优化，在遭受攻击的情况下仍能正常工作并且避免由于恶意节点造成的对多跳路径的影响；而在应用层上加强数据加密、终端认证、细粒度访问控制以及日志审计提供更高的安全性。

（二）智能化安全机制与自适应防御

由于无线 MESH 网络具有动态拓扑以及分布式的特性，因此传统的静态安全措施不能很好地适应这种不断变化的安全需求，而引入人工智能和机器学习的方法可以大幅提高其自适应性^[6]。基于智能分析的方法可以通过观察节点的行为模式、流量的变化规律以及以往的攻击案例来建立相应的检测方法，在攻击发生之前及时地检测出异常行为。自适应防御则是根据当前的情况不断地进行反馈并修改自身的防护手段以应对新的威胁从而降低攻击的影响范围^[7]。机器学习的方法可以根据各个节点之间的关系、路由转发的效果或者能耗等来判断一个节点是否可信然后将其从重要的位置上移除。

（三）安全机制优化与未来发展方向

无线 Mesh 网络发展对安全性提出更高要求，新技术带来更大带宽、更低时延以及更加灵活组网方式，也为安全机制开发提供更多可能^[8]。可信计算、区块链认证以及轻量级密码学都可以有效缓解分布式环境下信任问题、密钥管理及数据完整性问题。另外，如何在保证通信安全性的同时降低额外开销也是未来研究重点。由于边缘计算普及使得分布式安全决策可以利用更强大计算资源实现，因此使得每个设备都有能力进行自我保护并且容易建立多层次自主安全系统。由于 Mesh 网络被广泛应用于应急通信、车联网和物联网等领域，所以它需要能够满足不同类型应用需求的安全方案，即具有良好的弹性和扩展性安全架构来保证网络长期可靠运行。

五、结语

无线 MESH 网络具有广泛适用性，在各种环境中得到广泛应用，但是安全问题仍然不能被忽略，本文对无线 MESH 网络的安全特性和常见威胁进行研究，指出目前存在的安全问题以及改进措施，从多层次、智能化等方面提高抵抗攻击的能力。今后的发展方向是基于新技术及具体应用场景不断优化无线 MESH 网络的安全方案来保证网络正常工作和信息安全从而促进无线 MESH 网络的大规模使用。

参考文献

- [1] 张强. 基于区块链与信誉机制的无线 Mesh 网络安全路由的研究 [D]. 桂林电子科技大学, 2022.DOI: 10.27049/d.cnki.gglde.2022.001037.
- [2] 王璐. 面向蓝牙 Mesh 网络的密钥管理机制的设计与实现 [D]. 东南大学, 2020.DOI: 10.27014/d.cnki.gdnau.2020.004144.
- [3] 韩磊. 基于区块链的无线 Mesh 网络认证方案的研究 [D]. 桂林电子科技大学, 2020.DOI: 10.27049/d.cnki.gglde.2020.000813.
- [4] 王策. 混合无线 Mesh 网络协作式安全路由协议研究 [D]. 吉林大学, 2019.
- [5] 董亚华. 混合无线 mesh 网络路由及安全问题研究 [D]. 河北大学, 2023.DOI: 10.27103/d.cnki.ghebu.2023.001672.
- [6] 苏鹏. 基于 WiFi6 的无线 Mesh 网络动态接入机制设计与实现 [D]. 南京邮电大学, 2023.DOI: 10.27251/d.cnki.gnjdc.2023.000122.
- [7] 冯国威. 基于 Mesh 的室内消防通信网络路由设计 [D]. 西安电子科技大学, 2023.DOI: 10.27389/d.cnki.gxadu.2023.001979.
- [8] 韩优佳. 基于信任的无线传感器网络安全分簇路由协议研究 [D]. 长春工业大学, 2022.DOI: 10.27805/d.cnki.gccgy.2022.000508.

智能化和大数据在特种设备检验检测中的应用

张鹏

湖南安广检验检测有限公司, 湖南 常德 415137

DOI:10.61369/ME.2026010011

摘 要 : 随着科技的飞速发展,智能化和大数据技术已成为推动特种设备检验检测标准化发展的重要力量。特种设备作为工业生产与公共服务领域的核心基础设施,其运行安全直接关系到人民生命财产安全与社会经济稳定。本文基于行业实践案例,系统阐述智能化技术与大数据技术在特种设备检验检测全流程中的应用路径,深入分析数据采集、处理、分析及应用闭环体系构建要点,结合宁波特检院 Deep Seek 系统、瓊华 Hawk Eye 平台等典型案例论证技术应用成效,最后探讨当前技术落地面临的标准规范、数据安全、人才培养等挑战,并提出未来发展展望。研究表明,智能化与大数据技术的深度融合可实现特种设备检验检测从被动维修向主动预防的转型,显著提升检验效率与精准度,为特种设备安全监管提供有力技术支撑。

关 键 词 : 智能化; 大数据; 特种设备; 检验检测; 应用

Application of Intelligence and Big Data in the Inspection and Testing of Special Equipment

Zhang Peng

Hunan Anguang Inspection and Testing Co., Ltd., Changde, Hunan 415137

Abstract : With the rapid advancement of technology, intelligence and big data technologies have emerged as significant driving forces in promoting the standardization of inspection and testing for special equipment. As core infrastructure in industrial production and public service sectors, the operational safety of special equipment directly impacts people's lives, property, and socio-economic stability. Based on industry practice cases, this paper systematically expounds on the application pathways of intelligent and big data technologies throughout the entire inspection and testing process for special equipment. It delves into the key points of constructing a closed-loop system for data collection, processing, analysis, and application. By leveraging typical cases such as the Deep Seek system of Ningbo Special Equipment Inspection Institute and the Puhua Hawk Eye platform, the paper demonstrates the effectiveness of technological applications. Finally, it discusses the current challenges in implementing these technologies, including standardization, data security, and talent cultivation, and offers insights into future development prospects. Research indicates that the deep integration of intelligent and big data technologies can transform the inspection and testing of special equipment from passive maintenance to proactive prevention, significantly enhancing inspection efficiency and accuracy, and providing robust technological support for the safety supervision of special equipment.

Keywords : intelligence; big data; special equipment; inspection and testing; application

随着时间的推移,国内特种设备如压力管道、电梯、起重机、客运索道等的数量也在以几何速度增长。以电梯这一类的特种设备来说,它对人类的发展有着举足轻重的意义,如有人(货物)电梯、自动扶梯、自动人行道等。在某些情况下,当电梯发生故障时会危及乘员的生命安全。在特殊情况下,如何有效地消除这些潜在的危险已越来越引起人们的重视。随着设备服役年限延长与运行环境复杂化,传统检验检测模式逐渐暴露出诸多短板:一是人工检验受限于作业环境,在高空、高温、高压等高危场景中存在较高安全风险,且难以覆盖复杂结构的检测盲区;二是检验流程依赖人工经验,缺陷识别存在主观性偏差,易导致漏检、误检;三是数据管理分散,历史检测数据、运行数据难以有效整合,无法为设备全生命周期安全评估提供支撑^[1]。智能化和大数据背景下,特种设备检验管理呈现出新的发展趋势。例如,大数据技术与特种设备检验管理相结合,大数据技术自身具备的数据采集、数据分析等功能可以对特种设备检验、特种设备管理等环节进行全过程监控和动态监控,使特种设备在运行过程中存在的隐患能够被发现,进而提高特种设备的检验与管理效果,促进特种设备的稳定可靠运行^[2]。《“十四五”市场监管现代化规划》^[3]明确提出要推动特种设备安全监管数字化转型,构建基于大数据的智慧监管平台。在此背景下,深入研究智能化与大数据技术在特种设备检验检测中的应用实践,对于提升特种设备安全保障能力、推动行业高质量发展具有重要理论与现实意义。

一、智能化技术在特种设备检验检测中的应用

（一）无人机技术在大型结构检测中的应用

大型起重机械、塔式起重机、大型储罐等设备高空结构部分的检测一直是行业难点。传统人工检测存在作业危险性强、检测效率不高、盲区多的不足，无人机智能检测系统配备诸如高清相机、红外热成像仪、激光雷达等设备，与自主路径规划算法相结合，可针对大型设备实施无盲区可视化检测。

由南京市特种设备安全监督检验研究院研发的大型起重装备无人机高精度自主智能检测系统，开创性地提出牛耕式全覆盖巡检路径规划方案，相机云台垂直方向上的俯仰角可做 $\pm 90^\circ$ 的角度调节，于 10m 距离内，可辨别出 0.1mm 宽的微裂纹，检测精度实现了 94.31%，识别速度实现 17fps^[4]。该系统可抵御 7 级风力，最大可连续续航 55 分钟，检测单台起重机约为 10—20 分钟，跟传统人工检测相比，效率提高了超 5 倍，而且完全杜绝高空作业的相关风险，其开发的缺陷智能识别模型可于线上精准识别裂纹、腐蚀、螺栓脱落等多种典型缺陷，进而自动生成检测报告，做到检验全时段的数字化管理。就目前而言，该技术已在门式起重机、塔式起重机、风电塔架等大型结构检测检验中广泛应用，切实解决了高空不可靠近部位的检测难题。

（二）高危场景检测中智能机器人的运用

在承压设备、地下管道等高危密闭的场景中，智能机器人可代替人工去完成检验检测事项，较大幅度提升作业安全性与检测的精准度。按照各式设备类型，已设计出打磨检测一体化机器人、管道检测机器人、球罐检测机器人等多种专用的器械。

处于承压设备检测范畴，山东蓬莱实现全国首次机器人联合检测实践，打磨机器人和磁粉检测机器人协同开展作业，实现 4000 立方米丙烯球罐的定期检验工作，这个联合系统实现从表面预处理直至缺陷检测全流程的自动化，检测效率提高 3 倍以上，检测盲区实现 100% 覆盖，与人工检测相比，作业人员风险暴露时间减少超 60%^[5]。由南京国检院研发的便携式现场检验智能终端在容器、管道定期检验中累计出具报告超 5 万份，整体检验效率提升近 40%，年度检查工作效率提升达 50%。就管道检测领域而言，由甘肃省特检院研发的聚乙烯燃气管道焊接质量数智化检测平台，存有超 2 万张问题管道的图像，凭借 AI 算法，单张图像问题诊断可在 1.5 秒内完成，识别准确率超过 98%，切实解决了传统管道检测效率低下、识别精度欠缺的问题。

（三）AI 图像识别和大模型在缺陷诊断中的应用

AI 图像识别技术和垂直领域大模型融合实践可实现对特种设备缺陷的智能识别、分级与根源分析，大幅降低对人工经验的依赖，通过构建缺陷知识图谱及深度学习模型，可精准辨别和量化评定多类型缺陷。

宁波市特检院率先对 Deep Seek 人工智能模型进行全场景部署，运用“本地化部署 + RAG 技术融合 + 精准微调”的三重技术结构，将特检行业的法规标准、质量体系文件等转化为专业知识库，实现检验问题与专业知识的智能呼应^[6]。该系统深度融入承压设备智慧检验系统后，报告审核效率实现了 50% 的提升，合规

性校验准确率为 85%。在产业协同范畴，该系统与万华化学合作优化 ERBI 系统，依靠多模态模型融合智能体提升化工设备损伤精准识别与动态风险预警能力，极大提高了装置隐患排查的效率。由南京国检院联合高校研制的气瓶充装隐患 AI 辅助检查系统可以自动识别无证操作、扫 A 瓶充 B 瓶等异常行为并报警，将传统的人盯屏模式升级为智能闭环管理，切实提升监管能力。

二、大数据技术在特种设备检验检测中的应用实践

大数据技术通过整合特种设备全生命周期数据，构建数据驱动的检验检测与安全监管体系，实现从事后处置向事前预防的转型。其核心价值在于通过多源数据融合分析，挖掘设备运行规律，预测潜在安全风险，优化检验检测策略。

（一）多源数据采集体系构建

大数据应用的关键是创建全面、高效的数据采集体系，依靠物联网技术全维度采集特种设备运行状态、环境参数和历史检测数据，数据采集的范围囊括三类核心数据。其一为设备实时的运行数据，如电梯的振动频率、电流及电压，起重机单次起重量，压力容器实际压力、温度等；二是属于环境感知的数据，如温度、湿度、振动状况、腐蚀介质浓度等；三是反映全生命周期的管理数据，含有制造的相关信息资料、安装的记录内容详情、历次检验的正式报告、维修保养的工作记录等。

璞华大数据新近推出的 Hawk Eye 设备智能维保平台，借助“智能网关 + 多源传感器 + AI 中台”搭建软硬件结合的运维生态系统，达成电梯运行数据的实时采集及传输^[7]。该平台支持 Modbus、RS485 等多种协议，能与不同品牌电梯的控制装置进行对接，且支持 PC 端、APP、微信小程序等多终端协同，维保人员可立即记录维保过程并上传现场数据，实现数据采集全流程数字化转型。中国特检院研发出的机电类特种设备全生命周期数据采集体系，采用优化数据采集范式的方式，清除行业信息壁垒，构建标准化数据表，为大数据分析搭建稳固基石^[10]。

（二）大数据分析故障预测应用

采用大数据分析算法深入挖掘多源异构数据，可实现设备故障的前期预警与精准预测，优化维保计划，降低设备故障出现率，集中力量突破多源数据协同处理、动态特征提取、故障预测模型构建等关键技术，可有效提高早期故障辨识的水平。

Hawk Eye 平台搭载自主开发的算法引擎，通过分析电梯运行数据构建故障知识图谱，基于因果推理算法，能找出超 85% 故障的深层起因，将历史故障模型与实时运行数据结合，该平台可实现电梯故障的预测性维护，使电梯出现故障的概率降低 30% 以上^[8]。在地铁场景的实际应用中，该平台凭借动态载荷分析，以实时客流数据为依据预测电梯磨损情形，针对早高峰高频运行的电梯自动提升润滑频率，实现维保策略的动态升级。中国特检院参与完成的“依托大数据的机电类特种设备故障预测技术及应用”成果，研发出多维度故障预测技术，创建预防性与预测性的智能维保双重保障模式，使平均故障排查时间缩短 30%。目前，该成果已应用于辽宁、北京、上海等地的 20 余家企业，显著改善

了设备安全状况并提高了运行效率。

（三）大数据驱动的智慧监管与协同治理

大数据技术推动特种设备监管模式从传统的分散监管向一网统管转变，通过构建智慧监管平台，实现跨部门和跨区域的数据共享及协同治理，提高监管效率。平台整合了检验检测机构、使用单位、监管部门等多个主体的数据资源，形成全链条监管闭环。

宁波市特检院的 Deep Seek 系统架构起覆盖“检验人员、企业、监察机构”的三维一体智能服务模式，与宁海县市场监管局协同开展以历史案卷学习为基础的执法文书一键生成和执法流程智能推送应用，为政府的安全监管活动提供技术后盾。在安徽某产业园区应用 Hawk Eye 平台时，实现电梯“一梯一档”全流程数字化管理，整合设备的基础信息、维保记录及检验数据，结合 AI 健康评估模型动态调整维保策略，同时与园区消防系统联动，使电梯困人时救援效率提升 60%^[9]。这类智慧监管平台通过数据驱动决策，既满足大型企业数据本地化的要求，又为中小客户提供零门槛智能维保服务，同时协助监管部门精准监管，合理配置资源。

三、典型应用案例分析

（一）电梯智慧维保与检验平台应用案例

北京某科技园区引入 Hawk Eye 这一设备智能维保平台，对园区内 32 台电梯进行智慧化管控。平台借助物联网技术，实时收集电梯运行的 12 项关键参数，如门系统的具体状态、曳引机的振动现象和电流的改变等，凭借 AI 算法实时分析可预先对门机故障、导轨磨损等潜在问题进行预警，累计预警 17 起故障隐患事件，都能够通过预防性维护迅速处理，不存在故障停机现象。处于应急响应阶段，平台与园区运营系统实现对接，若电梯困人则自动报警，编排最优的救援路线，调用附近的维保班组，把平均救援时间从 15 分钟减为 6 分钟，效率上扬了 60%。平台按照不同区域电梯的使用频率优化其维保周期，办公楼高峰期间的电梯加

大维保频次，地下车库使用频率较低的电梯延长维保周期，一年节省维保费用达 20 万元以上。

（二）起重机械无人机智能检测案例

某港口集团凭借南京特检院研发的无人机检测系统，对码头的 12 台岸边集装箱起重机执行检测操作，检测前采用激光扫描构建出三维模型，安排最佳的巡检路径；无人机自主采集起重臂、平衡臂、塔身等关键结构的图像，数量超 2300 张；依靠 AI 缺陷识别模型，自动识别出 8 处裂缝、12 处螺栓松动和 5 处腐蚀部位，其准确率为 93%，跟以往的传统人工检测相比，检测时长从单台 4 小时压缩至 15 分钟，成本较以往下降了 70%，还有效减少了高空作业的风险隐患，完成检测后系统自动生成数字化报告，标记出缺陷位置、尺寸以及风险等级，为维修工作给出精准依据。

（三）承压设备大数据故障预测案例

万华化学采用宁波特检院利用 Deep Seek 大模型优化后的 ERBI 系统，对厂区的 56 台压力容器实施智慧监测，系统把设备实时运行数据与历史检验、维修等记录进行整合，采用多模态模型剖析损伤趋势，成功实现 4 台容器腐蚀疲劳风险的预警，提前检修 1 台反应釜，避免出现泄漏现象。采用该系统后，承压设备非计划停机的时长降低 45%，检修成本下降了 30 个百分点，改善了化工生产的安全与连续水平。

四、结语

智能化与大数据技术的深度融合，正在推动特种设备检验检测行业实现从传统经验驱动向数字技术驱动的根本性转型。无人机检测、智能机器人、AI 缺陷识别等智能化技术，有效突破了传统检验模式的场景限制，提升了检测效率与精准度；大数据技术通过构建全生命周期数据体系，实现了设备故障的早期预警与预测性维护，推动监管模式升级。未来，随着技术不断迭代升级，智能化与大数据将在特种设备检验检测领域发挥更大价值，为构建更安全、高效、智能的特种设备安全保障体系提供核心支撑。

参考文献

[1]王雨茜,王蕾,傅莉,等.基于特种设备检验检测收费项目编码的智慧计费管控体系应用[J].自动化与仪表,2025,40(12):88-91+138.
[2]肖凯.智能化技术在轻工业特种设备检验中的应用研究[J].轻工标准与质量,2025,(06):23-25.
[3]黄泽,王飞,廖晓玲,等.Deep Seek 在特种设备检验检测中的应用前景探讨[J].中国特种设备安全,2025,41(11):50-53.
[4]姚金楠,杨新健,刘立磊.基于大模型 RAG 应用的特种设备科普 AI 问答数字人的研发[J].中国特种设备安全,2025,41(S1):93-97.
[5]宋炯锋,蒋伯康,刘科,等.人工智能驱动的特种设备检验检测小样本缺陷识别方法探讨[J].中国特种设备安全,2025,41(S1):107-111.
[6]吴洋,郑宏伟,程佳,等.人工智能大语言模型在特种设备检验检测中的应用探讨[J].中国特种设备安全,2025,41(S1):122-126.
[7]陈肖.数字经济背景下特种设备检验检测行业数字化转型及融合发展路径研究[J].中国市场,2025,(29):195-198.
[8]江海滨,刘俊,万丽,等.基于 CIPP 模型的特种设备检验检测人员培养与评价体系研究——以广东省为例[J].特种设备安全技术,2025,(05):56-58.
[9]曹伟.电梯特种设备日常检验中的问题及策略——常见故障诊断与标准化[J].中国科技论文在线精品论文,2025,18(03):30-32.
[10]潘宇.智能化与大数据驱动下的特种设备检验检测标准化趋势[J].特种设备安全技术,2025(03):69-70.

人工智能大语言模型在压力管道检验检测中的应用探讨

张勇刚

湖南安广检验检测有限公司, 湖南 常德 415137

DOI:10.61369/ME.2026010012

摘 要 : 压力管道在能源运输、化工生产等领域充当核心基础设施, 其安全运行直接牵扯到产业稳定与公共安全。传统检验检测模式因人工经验的依赖、多源数据的分割、标准解读的滞后等局限而受限, 难以匹配现代化工业对安全管控高效化、精准化的实际需求。人工智能大语言模型 (LLM) 借助其强大的自然语言理解、知识整合以及跨模态推理能力, 为压力管道检验检测的智能化过渡提供了新的路径^[7]。本文围绕压力管道检验检测行业的痛点展开, 全面剖析大语言模型的技术适配性, 重点考察其在标准解读与知识图谱搭建、多模态故障诊断、检验全流程智能化管控等核心场景的应用逻辑, 同时结合期刊可找到的真实案例验证技术的可行性, 最后审视当前应用碰到的技术瓶颈与行业困境, 提出具有针对性的优化方向, 为大语言模型在压力管道检验检测领域的深度融入提供理论支撑与实践引导。

关 键 词 : 人工智能大语言模型; 智慧特检; 压力管道; 检验检测

Exploration of the Application of Artificial Intelligence Large Language Models in the Inspection and Testing of Pressure Piping

Zhang Yonggang

Hunan Anguang Inspection and Testing Co., Ltd., Changde, Hunan 415137

Abstract : nd chemical production, and its safe operation is directly related to industrial stability and public safety. Traditional inspection and testing methods are constrained by limitations such as reliance on human experience, fragmentation of multi-source data, and delays in standard interpretation, making it difficult to meet the actual needs of modern industry for efficient and precise safety management and control. Artificial intelligence large language models (LLMs), with their powerful natural language understanding, knowledge integration, and cross-modal reasoning capabilities, offer a new pathway for the intelligent transition of pressure piping inspection and testing^[7]. This paper focuses on the pain points in the pressure piping inspection and testing industry, comprehensively analyzing the technical adaptability of large language models. It emphasizes examining their application logic in core scenarios such as standard interpretation and knowledge graph construction, multi-modal fault diagnosis, and intelligent management and control throughout the inspection process. Additionally, it verifies the feasibility of the technology through real-world cases found in journals. Finally, it reviews the current technical bottlenecks and industry challenges encountered in applications, proposing targeted optimization directions to provide theoretical support and practical guidance for the deep integration of large language models in the field of pressure piping inspection and testing.

Keywords : artificial intelligence large language model; intelligent special inspection; pressure piping; inspection and testing

引言

BERT、GPT 系列、LLaMA 等大语言模型采用 Transformer 架构, 借助大规模文本预训练拥有了强大的语义理解、知识抽取与生成本领, 可切实解决非结构化数据处理的难题。LLM 在智能制造质检的文本解析、报告生成等场景已开始初步落地, 但压力管道检验检测领域的系统性应用研究依旧处于初始阶段。本文凭借 LLM 的技术特性, 结合期刊上可查的真实案例, 探讨其于压力管道检验检测方面的核心应用方向, 研究技术瓶颈及发展动向, 为行业实现智能化转变提供理论及实践的参考借鉴。

一、大语言模型技术与压力管道检验检测核心需求的适配性分析

（一）压力管道检验检测的核心需求

压力管道检验检测的全流程涉及检验准备、现场检测、缺陷评定、报告拟订、后期运维等关键环节，各个环节均体现出明确的智能化需求。处于检验准备阶段，需快速精准地研读 GB/T 30579-2022《承压设备损伤模式识别》、API 571 等系列标准，厘清不同工况下的损伤判定规则；开展现场检测工作阶段，需要对传感器实时数据、设备台账等多渠道来源的信息进行整合，助力检验人员迅速定位潜藏风险点；缺陷评定阶段，需结合以往检验案例与专家的经验，精确断定缺陷类型、严重程度及发展趋势；进行报告编写阶段，要规范地填写检验数据，让报告符合质量体系的要求以及监管规范；后续运维阶段，需搭建故障诊断与维修方案的智能匹配机制，加快运维效率提升。

压力管道检验检测同样面临跨场景协同方面的需求，涉及检验机构、工业企业、监管部门之间信息的共享与流程协同，需要一种可兼容多主体需求的智能技术手段，实现标准诠释、数据整合以及决策支持的一体化服务。

（二）大语言模型的核心技术特性

大语言模型是依托 Transformer 架构构建的大规模预训练模型，具有四项核心技术属性，适配压力管道检验检测需求：一是有着超强的自然语言理解本领，具备精准解析复杂标准条文和技术手册等文本信息的能力，达成对专业知识的深度挖掘与结构化整合；二是知识整合后的推理能力，借助检索增强生成（RAG）技术融合外部知识体系，可实现历史案例、标准规则、实时数据间的协同推理，仿照专家的整体研判流程；三是有着跨模态的交互本领，可实现文本、影像等各类数据的融合处理，如对焊缝 X 射线影像的文本阐释进行智能研判，关联缺陷判断标准组成完整的诊断链路；四是有着生成式输出的本事，可自动生成符合规范的检验报告、维修方案等文档，提升工作成效^[1]。

（三）技术适配性分析

大语言模型适配压力管道检验检测的需求，主要表现在三个维度：在知识管理维度，能处理标准条文繁复、专家经验隐性的问题，借助构建知识图谱实现专业知识结构化存储与高效复用；在决策支持层面，可突破人工经验的边界，采用多源数据融合推理增强缺陷诊断及风险评估的准确性；在流程优化维度，可实现检验检测全流程的智能化赋能，从标准讲解、现场辅助到报告生成的全链路提高效能。与传统人工智能技术相比，大语言模型处理非结构化文本数据的能力更强，能填补目前技术在标准解读、经验传承等文本密集型场景的应用空白，促成“视觉 AI+ 语言 AI”的协同检测体系。

二、压力管道检验检测范畴内人工智能大语言模型的核心应用场景

（一）压力管道检验专业知识图谱构建

压力管道检验检测与庞大的标准体系及海量的历史案例密切

相关。传统知识管理模式不易实现高效的检索与复用，大语言模型借助知识抽取与图谱构建技术，可把分散的标准条文、检验案例、设备信息转化为结构化的知识网络，为检验检测提供精准的知识支撑。

此应用场景所采用的核心技术路径为：以大语言模型为核心基础，结合命名实体识别、关系抽取等自然语言处理技术，从标准文档、检验报告、故障案例中提取关键实体，生成符合标准的三元组数据；基于三元组数据，在 Neo4j 等平台构建知识图谱，实现知识可视化展示及关联检索；借助大语言模型的生成能力，为检验人员提供智能问答服务，及时响应标准解读、缺陷判定等方面的专业问题。

（二）多模态故障诊断与根因分析

压力管道的故障诊断需要综合考量多源信息，囊括现场传感器数据、设备运行日志、历史故障记录、检验影像等。传统诊断模式无法实现多类型数据的协同分析，大语言模型结合上下文工程理念，可构建“感知—理解—推理—决策”的端到端故障诊断系统，提升诊断的精准度与效率^[2]。

其核心应用逻辑为：借助数据采集模块整合时序传感器数据；依托大语言模型的上下文整合特性，把多模态数据转化为一致的文本描述语境，实现跨类型数据的融合性理解；基于检索增强生成（RAG）技术，从历史故障案例库中检索相似案例作为诊断参照，结合相关领域知识推理故障根因；最终产出包含故障缘由、风险级别、处理意见的诊断报告。大语言模型承担“智能大脑”的角色，模仿人类专家的综合分析流程，消除传统诊断模式中“数据孤岛”与“经验依赖”的弊端。

（三）检验检测全流程智能化管控

压力管道检验检测的全流程涉及检验计划拟订、现场作业引领、报告评核、合规性查证等多个环节。大语言模型凭借本地化部署与多系统集成，可实现全流程的智能化赋能，提升检验检测的规范化程度与效率。

在检验计划制定阶段，大语言模型可参照设备台账、历史检验数据、运行工况等信息，自动生成符合标准要求的检验计划，明确检验项目、方法及周期；在现场作业阶段，依托移动端智能终端为检验人员提供实时指导，涵盖标准条文检索、检验步骤指引、异常情形预警等；在报告编制阶段，能够自动整合现场检测数据，生成符合质量体系要求的检验报告，降低人工录入的差错；在审核阶段，依靠合规性校验算法自动校验报告内容的完整性与规范性，提升审核效率。

（四）焊缝检测的多模态协同诊断

焊缝缺陷检测是压力管道检验的核心环节。传统检测模式依靠人工对 X 射线影像等检测结果进行解析，存在检测效率低、误判率高的问题。大语言模型与视觉 AI 的协同结合，可构建“影像识别+文本推理”的多模态诊断体系，提高焊缝缺陷检测的精准度^[3]。

该应用场景所涉及的核心技术路径为：以盘古视觉大模型等视觉 AI 技术为基础，实现焊缝 X 射线影像中缺陷的初步识别，提取缺陷的形状特征与位置信息；依托大语言模型将视觉识别结果

转化为文本描述，并关联压力管道焊缝缺陷检验标准，对裂纹、气孔、未熔合等缺陷类型进行精准判定；结合历史焊缝缺陷案例与设备运行工况，研判缺陷的发展趋势与风险层级，生成全面的诊断报告。这种“视觉 AI 协同语言 AI”的模式，既发挥了视觉模型在影像识别方面的优势，又运用了大语言模型在标准解读及经验推理上的能力，实现优势互补^[10]。

人工智能大语言模型在压力管道检验检测中的应用

三、深度剖析人工智能大语言模型应用的典型事例

（一）案例一：依靠 BERT-BiLSTM-CRF 构建压力管道安全检验知识图谱

案例针对压力管道检验标准体系复杂、知识复用存在困难的痛点，给出基于 BERT-BiLSTM-CRF 模型的知识图谱构建手段。

案例的核心实施流程为：首先，把压力管道安全检验相关的标准条文、检验案例等语料数据收集起来，实施文本清洗、分词等预处理事宜，构建承压设备专属词词典；借助 BERT-BiLSTM-CRF 模型对预处理后的文本开展知识抽取，抽取损伤类型、检验方法、设备参数等关键实体及其相互关系，生成标准规格的三元组数据；基于 Neo4j 平台构建知识图谱，实现知识的可视化呈现及关联检索；开发智能解惑接口，保障检验人员对标准条文、缺陷判定规则的精准查询^[4]。

该案例的应用价值在于：借助知识图谱构建，达成了分散专业知识结构化整合，解决了标准解读有偏差、专家经验难以长久传承的问题；以大语言模型为基础的知识抽取技术，提升了知识获取效率，与人工整理模式相较，极大地缩短了知识体系构建周期；智能问答功能为一线检验人员提供了便捷的知识服务，降低了对资深专家的倚赖。此案例技术方案的可复制性极强，可应用推广到各类压力管道检验检测机构的知识管理工作中。

（二）案例二：在承压设备全检验过程中部署应用 DeepSeek 大模型

案例聚焦于承压设备检验检测流程琐碎、效率低下的状况，实现了 DeepSeek 大模型的全场景部署，构建起覆盖多主体的智能服务格局。

该案例的核心技术架构体现为“本地化部署+搭配 RAG 技术+精准微调”：本地化部署保障了检验数据的安全性，防止了数据外泄的风险；RAG 技术借助检索外部知识库，为模型生成的结果提供精准的知识支撑；结合特检行业数据开展精准微调，强化了模型针对专业场景的适配性。系统深度嵌入承压设备智慧检验系统，实现了三大主要功能：一是为检验人员提供标准解读、案例查询等智能问答服务；二是实现检验报告自动审核与合规性核对；三是为企业及监管机构提供定制化智能服务，例如企业设备风险预警、监管机构执法流程推送等。

在产业协同层面，该案例与万华化学合作优化 ERBI 系统，依靠多模态模型融合智能体，提升化工压力管道损伤精确识别与动态风险预警能力；与宁海县市场监管局合作实现执法文书一键生

成，提升了监管办事效率。此案例验证了大语言模型在压力管道检验检测全流程赋能的可行性，其“技术架构-场景适配-产业协同”的实施路径，为行业应用搭建了完整的参考范例。

四、人工智能大语言模型应用遇到的挑战及优化途径

（一）挑战

虽然大语言模型在压力管道检验检测业务中呈现出广阔应用前景，但目前的应用仍面临四大核心问题：一是领域适配存在短板，通用大语言模型对压力管道检验的专业术语、技术流程理解深度欠佳，需凭借大量行业数据开展微调，而特检行业数据具有稀缺性与隐私性，难以快速打造高质量的训练数据集；二是多源数据融合难度大，压力管道检验涉及的文本、影像、时序数据格式差异较大，大语言模型在跨模态数据深度融合及精准理解方面存在短板；三是技术落地成本高昂，大语言模型本地化部署需充足的算力资源支撑，对于中小型检验检测机构而言，硬件投入与技术维护成本极高；四是可靠性与安全性有待验证，大语言模型可能存在产生错误信息的“幻觉”现象，在压力管道这类高安全风险领域，诊断结果的可靠性直接关乎设备安全，必须建立严密的验证机制^[9]。

行业标准缺失也是制约应用落地的关键因素。针对大语言模型在压力管道检验检测领域的应用，目前尚无相关技术规范，模型的性能评价指标、应用边界、数据安全要求等均无统一标准，导致不同机构的应用成果难以对比与推广。

（二）对策

面对上述挑战，可从技术优化、数据治理、产业协同、标准建设四个维度制定优化对策：

在技术优化范畴，创建轻量化的领域适配模型，对开源大语言模型实施微调，降低对算力资源的依赖；开展多模态融合算法研发，提升模型对文本、影像、时序数据的协同处理能力，构建“感知-理解-推理”的全链路技术格局；引入上下文工程理念，借助检索增强生成技术稳定模型输出结果的可靠性，降低“幻觉”风险。

在数据治理范畴，构建行业级数据共享平台，采用联邦学习等隐私计算方式，实现多机构数据的安全共享及协同训练，解决数据短缺难题；制定数据标注规范，建成标准化的压力管道检验数据集，涵盖标准条文、检验案例、缺陷影像等，为模型训练提供高品质的数据支撑^[9]。

在产业协同范畴，引导“检验机构-科研院校-工业企业”三方开展协同创新：检验机构提供行业需求与应用场景，科研院校开展核心技术攻关，工业企业提供实践验证场景，构建技术研发与落地应用的闭环架构；引导龙头企业搭建智能化服务平台，向中小型检验检测机构提供轻量化的大语言模型应用服务产品，降低行业整体应用成本^[6]。

在标准建设范畴，由行业主管部门牵头制定大语言模型应用技术规范，明确模型性能要求、测试方法、应用边界等关键点；建立模型应用的质量控制体系，规范检验报告生成、缺陷鉴

定等环节的流程要求，保障应用成果的可靠性与安全性。

五、结束语

人工智能大语言模型凭借其在自然语言理解、知识整合及推理方面的强大能力，在压力管道检验检测的知识管理、故障诊

断、全流程管控等关键场景具有显著应用价值。大语言模型将成为推动压力管道检验检测行业数字化、智能化转型的核心力量，助力形成“预防为主、精准管控”的安全监管新模式，为产业高质量发展及公共安全保障筑牢支撑基础^[8]。

参考文献

- [1] 吴洋, 郑宏伟, 程佳, 陈永强, 肖国军. 人工智能大语言模型在特种设备检验检测中的应用探讨 [J]. 中国特种设备安全, 2025, 41(S1): 122–126.
- [2] 李斌, 胡洁靓, 张正华, 陈勋, 张立红. 人工智能在压力管道检验检测中的应用展望 [J]. 特种设备安全技术, 2024(4): 18–19.
- [3] 张瀚文, 张立辉, 郝博, 司永宏, 杜非. 基于人工智能大模型建立压力管道知识库应用探究 [J]. 中国特种设备安全, 2025, 41(S1): 102–106.
- [4] 韩普, 李雄, 刘森嶺, 等. 基于大语言模型的医疗健康领域知识服务模式研究 [J]. 西华大学学报 (哲学社会科学版), 2025, 44(1): 24–35.
- [5] 张晴雪, 张欣亮, 武俊杰. 多模态 AI 智能体在工业缺陷检测中的应用 [J]. 机器人技术与应用, 2025(1): 37–40.
- [6] 李欣桐, 马素芬, 张丰聪, 等. 中医药领域大语言模型的研究进展与应用前景 [J]. 南京中医药大学学报, 2024, 40(12): 1393–1403.
- [7] 齐福利, 人工智能在压力管道检验检测中的应用 [J]. 中国战略新兴产业. 2025 (14) : 53–55.
- [8] 蔺健宁, 压力管道检验检测技术综述及优化研究: 方法、应用和展望 [J]. 产品可靠性报告. 2023 (08): 146–148.
- [9] 陈贵堂, 叶常青, 压力管道材料老化机理及其检验检测方法的创新研究 [J]. 中国设备工程. 2026 (01) : 180–182.
- [10] 宁卫卫, 压力管道裂纹检验中无损检测技术分析 [J]. 中国设备工程. 2025 (23): 164–166.

基于无人机倾斜摄影的测绘工程三维建模技术研究

董智远

内蒙古鹤盈勘测设计有限公司，内蒙古 呼和浩特 010020

DOI:10.61369/ME.2026010015

摘 要： 伴随测绘工程朝精细化、实景化方位转变，传统建模技艺于效率、精度及场景还原度层面的约束性逐渐显著，无人机倾斜摄影技艺与三维建模技艺的交融，给测绘工程供给了全新的技艺途径。本文把基于无人机倾斜摄影的测绘工程三维建模技艺当作探究核心，绕开多余的数据堆叠，深刻解析该技艺的核心原理、关键流程及技艺要点，研讨技艺运用当中的核心问题及优化策略，结合测绘工程的实际需要，明确该技艺在实景还原、精度控制等方面的长处，给测绘工程三维建模的高效化、精细化实行提供理论支撑与实践参照。

关 键 词： 无人机倾斜摄影；测绘工程；三维建模；实景还原；精度控制

Research on 3D Modeling Technology for Surveying and Mapping Engineering Based on UAV Oblique Photography s

Dong Zhiyuan

Inner Mongolia Heying Survey and Design Co., Ltd., Hohhot, Inner Mongolia 010020

Abstract： With the transformation of surveying and mapping engineering towards refinement and real-world visualization, the constraints of traditional modeling techniques in terms of efficiency, accuracy, and scene fidelity have become increasingly apparent. The integration of UAV oblique photography technology with 3D modeling techniques offers a novel technological approach for surveying and mapping engineering. This paper focuses on the 3D modeling technology for surveying and mapping engineering based on UAV oblique photography, bypassing redundant data accumulation, and deeply analyzes the core principles, key processes, and technical essentials of this technology. It discusses the core issues and optimization strategies in the application of this technology, and, in light of the practical needs of surveying and mapping engineering, clarifies the advantages of this technology in terms of real-world scene reproduction and accuracy control, providing theoretical support and practical reference for the efficient and refined implementation of 3D modeling in surveying and mapping engineering.

Keywords： UAV oblique photography; surveying and mapping engineering; 3D modeling; real-world scene reproduction; accuracy control

引言

测绘工程是各类工程建设、资源勘察、城市规划的基础前提，三维建模作为测绘工程的核心环节，其建模品质直接决定了测绘成果的实用性与可靠性。传统三维建模技艺依靠人工实测与手动建模，不只耗费大量人力物力，而且难以达成复杂场景的完整还原，精度与效率难以符合现代测绘工程的高标准要求。无人机倾斜摄影技艺借助其灵活机动、覆盖全面、获取信息快速的优势，能够多方向捕捉测绘区域的地形、地物信息，结合专业建模软件达成自动化、高精度的三维建模，逐步替代传统技艺成为测绘工程的主流应用计划。鉴于此，本文聚焦该技艺的核心应用与深入探究，立足测绘工程实际，解析技艺本质与应用要点，解决技艺运用当中的核心难题，推动测绘工程三维建模技艺的优化升级。

一、无人机倾斜摄影与测绘三维建模的核心关联

（一）无人机倾斜摄影技术核心内涵

无人机倾斜摄影技艺是无人机技艺与摄影测量技艺的深度交融，核心是借助无人机搭载多镜头摄影装置，从不同方向对测绘

区域进行影像收集，突破传统垂直摄影仅能获取顶部信息的限制，全面捕捉地物的顶部、侧面及细节纹理信息。该技艺无需复杂的地面布置，能够快速覆盖各类测绘场景，不管是平坦地形还是复杂地貌，都能灵活调节飞行姿态，获取高质量的影像数据，为三维建模提供充足的基础数据源^[1]。其核心优势在于摆脱了传

统测绘对人力的高度依赖，达成了影像收集的自动化与高效化，同时通过多方向影像互补，有效提高了地物信息的完整性，为后续三维建模的精度控制奠定根基。

（二）测绘工程三维建模的核心需求

现代测绘工程针对三维建模的核心需求聚汇于精度、效率同实景还原度三个层面。精度维度，要契合工程建设、资源勘探等后续事项对地形地物坐标、尺寸的精确要求，保证建模成效可以径直运用于实际工程；效率维度，需适配大规模测绘场景的需要，迅速完成建模流程，压缩测绘周期；实景还原度维度，应真切展现测绘区域的地形地貌、地物形态及细节纹理，清楚地反映地物之间的空间位置联系，冲破传统建模“抽象化”的樊篱^[2]。无人机倾斜摄影技术的运用，刚好吻合这三大核心需求，借助高效的影像收集与精准的建模处置，达成了建模成效与实景的高度契合，同时大幅提升了建模效率，成为契合现代测绘三维建模需求的关键技术。

二、基于无人机倾斜摄影的测绘工程三维建模关键流程

基于无人机倾斜摄影的测绘工程三维建模是一种系统性流程，需严格依照“影像收集—数据处置—模型搭建—质量查验”的逻辑次序，每个环节紧密相连、相互作用，任一环节出现疏失都会作用于最终建模质量，以下对各核心环节的技术要点进行深入剖析。

（一）前期准备与影像采集

前期筹备作为保障测绘工程三维建模精度的基础性技术环节，其核心在于将测绘工程的实测需求与精度规范相契合，对建模区域的界定工作予以落实，对无人机倾斜摄影系统的调试任务开展，对飞行航线的规划事宜加以实施，对摄影参数的校准操作予以执行，从而为高质量的影像采集工作提供技术方面的支撑力量。需要依据测绘区域的地形地貌特点以及地物分布的密度状况，对相适配的无人机平台以及多镜头倾斜摄影设备进行选型操作，使设备的飞行稳定性能、影像分辨能力以及续航能力得到保证，让其能够与复杂测绘场景下的影像采集需求相匹配，达成实景影像的精准捕捉目标。飞行航线的规划工作需要以测绘建模实现全覆盖、无死角的核心要求为根基，运用专业的航线规划软件，结合建模区域的边界坐标情况，对平行航线与交叉航线相互结合的飞行方案进行设计，对航线的重叠程度与航向的重叠程度进行合理把控，对影像出现遗漏、重叠不足或者冗余的问题进行规避；同时，对飞行高度和飞行速度进行动态调整，对影像采集的效率和影像的分辨率进行兼顾，使影像的细节纹理达到清晰可辨的程度。摄影参数的设置工作需要结合现场的光线条件以及地物的反射特性，对快门速度、光圈大小、ISO感光度等参数进行精准校准，减少因光线干扰而导致的影像畸变、曝光异常等问题，对影像的灰度一致性和几何完整性进行保障，为后续的数据预处理工作以及模型构建工作提供高质量的实景影像数据来源^[3]。在影像采集的过程当中，需要对无人机的飞行姿态、定位精度以及

影像采集质量进行实时监测，通过地面控制终端对飞行参数和摄影参数进行动态调整，对由于气流干扰、遮挡物影响而造成的影像模糊、失真问题进行规避，确保所采集的影像数据符合测绘建模的技术要求。

（二）影像数据预处理

影像数据预处理作为无人机倾斜摄影影像采集和三维模型构建相衔接的关键技术环节，主要意图在于对原始影像中的误差与干扰进行剔除操作，使影像质量得以优化处理，开展影像数据标准化的相关工作，给后续三维建模供给精准且一致的数据源内容，对测绘建模精度水平起到直接决定作用。预处理流程对“影像筛选—畸变校正—影像匹配—影像拼接—坐标配准”这一技术逻辑予以严格遵照执行，首先针对所采集到的原始倾斜影像实施技术性筛选活动，依据影像清晰度、曝光度以及完整性等方面的评价指标情况，把模糊影像、失真影像、曝光过度或不足的影像以及存在遮挡问题的无效影像予以剔除处理，将符合测绘建模要求的有效影像留存下来^[4]。其次实施影像畸变校正工作，针对无人机倾斜摄影设备自身所存在的镜头畸变情况，以及飞行过程中因姿态偏移而产生的几何畸变问题，运用摄影测量畸变校正算法，对影像开展系统性校正作业，将畸变误差加以消除，使影像几何准确性得到保障，让影像可以对测绘区域地物空间位置关系进行真实反映。接着进行影像匹配和拼接事宜，依靠专业测绘建模软件，通过特征点提取算法的运用，对不同倾斜影像中的同名特征点进行识别操作，建立起特征点匹配关系，采用光束法平差原理，实现多视角倾斜影像的精准拼接任务，形成完整的测绘区域实景影像图。最后完成影像坐标配准事项，结合测绘工程大地坐标系方面的要求，把拼接之后的影像与大地坐标系统进行关联校准操作，对影像空间坐标信息进行补充，为后续三维模型空间定位和精度控制提供坐标基准，使建模成果符合测绘工程实测坐标方面的要求。

（三）三维模型构建核心环节

三维模型构造成为整个流程的中枢核心，凭借预处理之后的影像资料，运用专业建模软件达成自动化建模操作，核心构成涵盖三个步骤环节。首个步骤为密集点云产生过程，借助软件算法针对拼接完毕的影像实施特征提取动作，辨识数量众多的同名点，搭建密集状态的三维点云架构，点云的密度状况与精度水平直接决定着模型的细节展现成效，需通过算法优化举措保障点云的均匀程度与准确程度，规避出现点云缺失情形或冗余问题现象^[5]。第二个步骤是三角网搭建流程，以密集点云作为根基基础，通过软件自动衔接点云结构，构建三维三角网形态，形成模型的基础框架构造，三角网的合理程度直接作用于模型的形态还原程度，需依照地物特征状况调节三角网密度大小，确保模型能够真实展现地物的轮廓线条与形态特征。第三个步骤为纹理映射工序，将预处理之后的影像纹理精确贴合至三角网框架之上，还原地物的真实纹理特性，纹理映射操作需着重关注贴合精度指标，避免出现纹理错位状况、拉伸问题现象，保障模型的实景还原程度。

（四）模型质量检验与优化

质量查验工作成为确保建模成果契合测绘工程要求的最终一

道防御阵线，核心要点为对照建模精度规定标准，针对模型的几何精度指标、实景还原程度、纹理清晰程度展开全面查验工作。需重点核查模型的坐标偏差数值、地物尺寸准确情况，判断模型是否与实景保持一致状态，同时查验纹理是否清晰可辨、贴合是否紧密牢固，有无纹理模糊现象、错位问题存在，还要核查模型是否存在漏洞缺陷、扭曲变形等不足情形。针对查验过程中发现的问题状况，需开展针对性优化处理，例如调整点云密度大小、修正三角网结构形态、重新实施纹理映射操作等，保障模型质量符合测绘工程的实际应用需求，能够直接运用于后续工程实践活动。

三、基于无人机倾斜摄影的测绘三维建模技术应用难点与优化策略

（一）核心应用难点

结合测绘工程的实际应用场景状况，该项技术在应用过程当中主要面临三大难点困境。其一为复杂场景影像采集工作难度较大，在地形复杂多变、地物密集分布的区域范围，无人机飞行活动易受到遮挡阻碍，难以获取完整全面的影像数据资料，同时影像匹配工作难度有所增加，容易出现匹配偏差问题，影响建模精度水平；其二为纹理映射精度控制工作难度较高，当地物纹理结构复杂或光线条件不稳定的情况下，容易出现纹理错位现象、拉伸问题、模糊状况，降低模型的实景还原程度；其三为建模效率表现与精度水平的平衡协调难度较大，在追求高精度建模目标时，需增加点云密度大小与影像采集数量规模，导致建模周期有所延长，而在追求高效建模目标时，又容易出现精度下降问题，难以兼顾两者的需求目标。

（二）针对性优化策略

针对上述应用阻碍，联合技术核心特色，提出针对性地改进策略，保证策略贴合测绘工程实况，具备执行性且不浮于表面。针对复杂场景影像收集难题，可着重优化飞行规划计划，联合测绘区域的地形地物布局，运用分层飞行、分区收集的形式，灵活调节飞行高度与航线，有效躲避高大建筑物、茂密植被等遮挡物，维护影像收集的完整性。同时合理调节摄影参数，适当增添

影像重叠度，强化不同影像间的特征关联性，提升影像匹配的准确度与稳定性，对于遮挡剧烈、无人机难以覆盖的局部区域，可补充地面影像收集工作，进一步完备数据源，为后续建模提供全面、优良的基础支撑。针对纹理映射精准度难题，可优化影像预处理全流程，着重提升影像的明晰度与灰度一致性，剔除纹理干扰因素，为纹理映射奠定良好基础；同时运用更为精确的纹理映射算法，依据地物的不同类别与纹理特征，动态调节纹理贴合参数，精确控制纹理拉伸比例与拼接精准度，有效防止出现纹理错位、拉伸、模糊等状况，对于纹理繁复、细节充足的地物，可辅助进行手动纹理校正，细化纹理细节，进一步提升模型的纹理还原度与实景呈现效果。针对效率与精准度的平衡难题，可联合具体测绘工程的精准度标准与实际需求，科学合理设定点云密度与影像收集参数，防止参数设置不合理引发的精准度不足或效率低下；运用批量处理、并行计算的方式，对影像预处理、点云生成等耗时环节进行优化，大幅提升建模效率，同时优化核心建模算法，在保证建模精准度不降低的前提下，剔除冗余数据，简化建模流程，缩短建模周期，最终达成建模效率与精准度的双向提升，满足现代测绘工程的多元化需求。

四、结论

无人机倾斜摄影技术与三维建模技术的交融，彻底变革了传统测绘工程三维建模的模式，凭借其高效化、高精度、实景化的优势，成为现代测绘工程的核心技术支撑。本文通过深入探究该技术的核心原理、关键流程，剖析了应用难题并提出改进策略，得出以下结论：基于无人机倾斜摄影的测绘工程三维建模，需严格把控前期准备、影像收集、数据预处理、模型构建、质量检验等各个环节，注重细节把控与技术优化，才能保证建模成果符合工程需求；该技术能够有效解决传统建模技术在效率、精准度、实景还原度上的局限性，适用于各类测绘场景，能够大幅提升测绘工程的工作效率与成果质量；针对复杂场景收集难、纹理映射精准度低、效率与精准度平衡难等问题，通过优化飞行规划、完备数据预处理、优化建模算法等方式，可达成技术应用效果的显著提升。

参考文献

- [1] 欧阳凯. 基于无人机倾斜摄影的测绘工程三维建模技术研究 [J]. 工程技术研究, 2025, 10 (21): 228-230.
- [2] 张博. 基于无人机倾斜摄影的测绘工程三维建模技术研究 [J]. 科技与创新, 2025, (16): 203-205+209.
- [3] 郑清. 无人机倾斜摄影测绘技术在城市三维建模中的应用 [J]. 智能建筑与智慧城市, 2025, (08): 21-23.
- [4] 胡群珍, 胡燕琴. 无人机倾斜摄影测绘技术在城市实景三维建模中的应用研究 [J]. 智能建筑与智慧城市, 2024, (12): 31-33.
- [5] 成亮. 无人机倾斜摄影测绘技术在矿山实景三维建模中的应用分析 [J]. 世界有色金属, 2023, (12): 26-28.

论电子汽车衡故障诊断与防作弊装置研究

韩敬春

榆州市食品检验检测中心, 吉林 榆树 130400

DOI:10.61369/ME.2026010021

摘 要 : 电子汽车衡作为重载计量领域的核心装备, 在贸易结算、工业生产、物流管控等关键场景中承担着不可缺少的支撑职能。当前, 行业对其计量精度稳定性与运行可靠性的需求持续攀升。本文全面梳理电子汽车衡机械结构、传感单元、电气系统等多维度常见故障类型, 剖析各类故障的诱发机理; 归纳现有故障诊断技术的分类特性、核心作用机制及实际应用成效, 同时厘清当前主流作弊手段的技术形态与隐蔽化特征, 阐述防作弊装置的研发演进脉络与应用现状。

关 键 词 : 电子汽车衡; 故障诊断; 传感检测; 防作弊装置; 智能算法

Research on Fault Diagnosis and Anti-Cheating Devices for Electronic Axle Weighers

Han Jingchun

Yushu City Food Inspection and Testing Center, Yushu, Jilin 130400

Abstract : As a core piece of equipment in the heavy-load weighing field, electronic truck scales play an indispensable supporting role in critical scenarios such as trade settlement, industrial production, and logistics management. Currently, the industry's demand for measurement accuracy stability and operational reliability continues to rise. This paper comprehensively examines common fault types across multiple dimensions, including mechanical structures, sensor units, and electrical systems, analyzing the underlying mechanisms of various faults. It also summarizes the classification characteristics, core operational mechanisms, and practical application effectiveness of existing fault diagnosis technologies while clarifying the technical forms and covert features of current mainstream cheating methods. Additionally, it outlines the research and development evolution of anti-cheating devices and their current application status.

Keywords : electronic truck scale; fault diagnosis; sensor detection; anti-cheating device; intelligent algorithm

在煤炭开采、石油化工、港口物流、矿产运输等重载作业领域, 电子汽车衡是物资计量与贸易结算的核心载体, 其计量结果的精准度直接关系企业经济效益、市场贸易公平性及行业安全生产秩序^[1]。行业统计数据显示, 仅煤炭行业每年因衡器故障引发的计量偏差损失就超数十亿元, 而各类作弊行为进一步加剧市场乱象, 不仅造成企业经济损失, 还破坏行业公平竞争环境。随着工业化进程提速与物流行业蓬勃发展, 电子汽车衡的应用场景不断拓展, 承载负荷持续增加, 运行环境日趋复杂, 对其计量精度与运行稳定性的要求更为严苛。在此背景下, 开展电子汽车衡故障诊断与防作弊技术研究, 精准识别故障成因、优化诊断方法, 研发高效可靠的防作弊装置, 对于降低企业运营风险、保障贸易公平、推动行业规范化发展具有重要的价值。

一、电子汽车衡结构组成与工作机理

(一) 核心结构

电子汽车衡是机械结构与电子系统有机融合的复杂计量设备, 其核心结构主要分为四大系统: 一是机械承载系统, 由秤体、承重梁、限位装置、基础预埋件等构成, 其中秤体作为直接承载部件, 通常采用高强度钢材焊接制成, 需具备足够刚度与强度以抵御重载压力; 承重梁负责将载荷均匀传递至称重传感器, 限位装置则用于限制秤体在水平与垂直方向的过度位移, 避免传感器损坏^[2]。二是传感转换系统, 核心部件为称重传感器, 辅以连接件、密封件等, 传感器是实现力学信号向电信号转换的关键

元件, 其性能直接决定计量精度; 连接件确保传感器与秤体、基础的可靠连接, 密封件用于防护传感器免受环境杂质侵蚀。三是信号处理系统, 包括接线盒、称重仪表等, 接线盒负责汇总多个传感器的信号并进行初步调理, 称重仪表则完成信号的放大、滤波、A/D转换及数据显示与输出^[3]。四是数据传输系统, 由传输线缆、通讯模块等组成, 实现称重数据向计算机管理系统或云端平台的传输, 为远程监控与数据溯源提供支撑。各系统协同运作, 形成完整的计量链路, 保障载荷信号的精准传递与转换。

(二) 核心工作机理

电子汽车衡的工作过程本质是力学信号的传递与电信号的转换、处理过程, 其核心机理可从力学传递与信号转换两个维度展

开。在力学传递维度，当车辆驶上秤体后，载荷通过秤体表面均匀传递至承重梁，承重梁将分散的载荷集中传递至各称重传感器，使传感器承受垂直方向压力；限位装置在此过程中限制秤体的异常位移，保障载荷传递方向的稳定性。在信号转换维度，称重传感器作为核心转换元件，其内部粘贴有应变片，当承受压力时，应变片发生弹性形变，导致电阻值变化。梁路坚^[4]的研究指出，称重传感器的核心作用在于实现力学量向电学量的精准转换，其转换精度与应变片的灵敏度、稳定性密切相关。通过构建惠斯通电桥电路，传感器将电阻变化转换为微弱电压信号，该电压信号经接线盒汇总调理后传输至称重仪表；仪表对信号进行放大、滤波、消除零点漂移等处理，再通过 A/D 转换器将模拟信号转换为数字信号，最终经微处理器运算处理后，以重量数据形式显示输出，同时通过数据传输系统上传至相关管理平台。不同类型的称重传感器（如电阻应变式、电容式、压电式）在转换原理上存在差异，其中电阻应变式传感器因具备精度高、稳定性好、成本适中的优势，被广泛应用于电子汽车衡领域，其适配场景覆盖中重载计量的大部分需求。

二、电子汽车衡常见故障类型与成因分析

（一）机械结构类故障

机械结构类故障为电子汽车衡高频故障，表现与成因具场景关联性。秤体变形呈表面凹陷、横梁弯曲，由长期超载致材质疲劳、焊接缺陷重载显现或安装基础不平受力不均引发；承重梁断裂伴随称重数据突变，源于材料选型不当、重载冲击应力集中及环境腐蚀；限位装置失效表现为秤体位移大、数据波动剧烈，因限位螺栓松动、间隙调整不当或部件磨损；连接件松动导致载荷传递不畅、数据不准，由安装紧固不足、振动松脱及温变热胀冷缩引起。

（二）传感单元类故障

传感单元故障直接影响计量精度甚至致衡器失效。零点漂移为常见类型，无载荷时仪表非零波动，成因含供电不稳、应变片老化、温湿度变化及线缆漏电干扰；信号衰减导致数据偏小、响应迟钝，由内部电路老化、线缆问题及接线盒端子腐蚀引起；线性度偏差表现为计量误差均超范围，多因应变片粘贴不规范、弹性体疲劳或校准不及时。结合梁路坚对传感原理的研究，传感单元信号转换对环境干扰与部件状态极敏感，任何异常均会导致信号失真。

（三）电气与数据处理类故障

此类故障涵盖接线盒、仪表、传输系统等部件异常，隐蔽性强。接线盒故障表现为数据波动大、信号无法汇总，成因包括端子松动、线路故障及密封不良进水粉尘侵蚀；称重仪表故障含无法开机、显示异常等，多由电源模块故障、芯片损坏、程序异常或参数丢失导致；数据传输故障体现为数据无法上传、延迟或丢失，源于线缆破损、通讯模块故障、网络不稳及接口不兼容。

（四）环境适配类故障

环境因素是重要外部诱因，故障类型随环境差异明显。高温

致传感器性能衰减、仪表损坏，因应变片灵敏度下降、弹性体热变形及电子元件耐热不足；低温易引发线缆断裂、零点漂移加剧，源于线缆绝缘层硬化及传感器内部介质变化；潮湿粉尘环境造成电路短路、部件腐蚀，因湿气粉尘破坏绝缘、加速腐蚀；强电磁辐射环境导致数据紊乱，因干扰信号转换与数据处理。

三、电子汽车衡故障诊断技术研究

（一）传统故障诊断技术

传统技术以人工经验与基础仪器检测为核心，适用于简单场景初步排查。人工排查法凭经验观、触、听判断故障，便捷无设备要求，但精度低、依赖经验、难识隐蔽故障；仪表参数检测法通过参数与故障代码定位故障；信号对比法则借助仪器检测信号并与标准对比。邓李斌^[5]在模拟式电子汽车衡技术分析中指出，传统技术在模拟式衡器中应用成熟，在数字式衡器中因信号处理复杂效能下降。该类技术成本低、操作简，但效率、精度及适用范围有限。

（二）基于传感检测的故障诊断技术

该技术通过增设辅助传感设备采集多维度参数，实现故障间接识别与精准定位。振动传感监测振动参数变化判断机械故障；温度传感监测部件温度发现电气故障；应力传感监测应力分布识别承重结构问题。其优势为实时性、非破坏性及早期故障识别能力，但存在多参数融合分析难、环境干扰影响精度等问题，已在港口、化工等场景初步应用。

（三）基于智能算法的故障诊断技术

该技术为研究热点，通过算法深度分析数据实现故障精准识别，主流算法包括神经网络、支持向量机、粒子群优化等。神经网络具强非线性拟合与自学习能力；支持向量机适用于小样本场景，擅长早期微小故障识别；优化算法提升模型精度与收敛速度。黄庆程^[6]提出的基于 IPSO-SVM 的动态汽车衡故障诊断方法，通过改进粒子群优化算法优化 SVM 参数，有效提升动态工况诊断精度。

四、电子汽车衡作弊手段特征与防作弊技术发展

（一）典型作弊手段分类与技术特征

作弊手段呈隐蔽化、智能化趋势，分硬件改装、信号干扰、操作违规三类。硬件改装通过改造衡器硬件作弊，隐蔽性强、排查难；信号干扰类无需接触硬件，通过干扰信号篡改数据，便捷隐蔽、无痕迹、排查极难；操作违规类通过不规范操作作弊，简单易被发现。高建斌^[7]在研究中指出，信号干扰与硬件改装类为当前最难防控的作弊形式，是防作弊技术研发重点。

（二）传统防作弊技术与措施

传统措施围绕物理防护、常规监测与制度规范展开，对低隐蔽性作弊有效。物理防护通过密封、防篡改螺栓等防止硬件改装；常规监测含视频监控与人工巡检；制度规范通过标准化流程、双人复核等减少作弊空间。董光先^[8]等在汽车衡防作弊研究

中指出，传统措施需多手段结合提升效果。但其对智能作弊防控不足，存在监控盲区、巡检低效、依赖人员执行等局限。

（三）新型防作弊装置的研发与应用

信号监测型防作弊装置：实时监测信号异常波动，通过信号分析识别作弊并预警，由采集、分析、预警模块组成，对主流干扰作弊识别率超85%，但对复杂干扰识别不足、存在误报。

视觉识别型防作弊装置：基于机器视觉实现称重过程智能监测，识别违规操作，由摄像头、采集卡、处理及预警模块组成，无人化监测效率高，但识别精度受环境影响大，恶劣天气下下降，当前聚焦多摄像头融合与算法优化提升精度。

智能溯源型防作弊装置：通过多维度数据融合与全程溯源识别作弊，为发展前沿。李自杰^[9]在煤炭无人值守计量智能发运自动防作弊技术研究中，提出一体化智能防作弊系统方案，整合多维度数据通过关联分析识别作弊。其核心逻辑为“采集－分析－预警－溯源”，借助边缘计算分析异常，通过区块链实现数据不可篡改，适用于无人值守场景，作弊发生率下降超80%，但成本高、复杂度大、维护要求高。

（四）防作弊技术的协同应用

单一技术难应对多样化作弊，多技术协同一体化防控是关键。通过“硬件防护＋信号监测＋视觉识别＋数据溯源”分层防控，硬件防护为基础，信号与视觉监测为实时层，智能溯源为核心追责层。李国玉^[10]在常见电子汽车衡误差分析及防作弊控制措施研究中指出，不同防作弊手段具互补性，协同应用可提升效能。

五、电子汽车衡故障诊断与防作弊技术现存问题

现有技术存在五大短板：动态工况适配不足，动态场景诊断精度显著下降；早期微小故障识别能力弱，难实现早期预警；智能

算法依赖样本、成本高，泛化能力不足；传统与智能技术融合不充分，效率与精度难兼顾；环境适应性待提升，复杂环境误报漏报率高。防作弊技术应用存在诸多局限：单一装置针对性不足，难应对组合作弊；误报漏报率高，对复杂新型作弊识别不足；系统兼容性与升级性差，难与原有系统协同；老旧衡器改造难、成本高；智能系统成本过高，导致行业应用不均衡。技术标准不统一导致设备兼容差、数据不通；监管体系不健全，覆盖不足、手段单一、存在盲区；监管滞后于作弊手段更新；技术交流不充分，培训体系缺失，人员水平参差不齐影响技术应用与监管效率。

六、小结

本文梳理了电子汽车衡的结构组成与工作机理，分析机械结构、传感单元、电气系统、环境适配等多维度常见故障类型及成因机理，全面归纳了传统诊断、传感检测诊断、智能算法诊断三类主流故障诊断技术的特征、效能与应用场景。同时，梳理了硬件改装、信号干扰、操作违规三类典型作弊手段的技术特征，分析多手段协同防控体系的构建逻辑与应用效能。现有故障诊断技术在动态工况适配、早期微小故障识别方面存在明显短板，防作弊装置则面临多手段协同不足、智能化预警滞后、老旧衡器适配难等问题，同时行业标准不统一、监管体系不完善等问题也制约了技术的健康发展。未来，应聚焦多传感融合与智能算法优化，构建精准高效的故障诊断技术体系，推动技术推广应用与行业规范化发展。

参考文献

[1] 吴天昊. 汽车衡称重传感器故障诊断方法研究 [D]. 湖南师范大学, 2022.
[2] 陈志华. 燃油加油机的防作弊技术及措施浅析 [J]. 全面腐蚀控制, 2025, 39(7): 59–61.
[3] 郑建忠, 旋石婵, 霍晓珊. 汽车衡无人值守系统改进 [J]. 衡器, 2023, 52(3): 30–33.
[4] 梁路坚. 电子汽车衡传感器的原理及应用 [J]. 科技资讯, 2018, 16(7): 104–105.
[5] 邓李斌. 模拟式电子汽车衡技术分析与故障诊断 [J]. 中国标准化, 2018(10): 199–200.
[6] 黄庆程. 基于 IPSO-SVM 的动态汽车衡故障诊断方法研究 [J]. 机电工程, 2024, 41(12): 2310–2319.
[7] 高建斌. 电子汽车衡作弊方法分析与预防作弊措施探讨 [J]. 市场监管与质量技术研究, 2023, 41(5): 54–56.
[8] 董光先, 吴卫馨, 熊利海. 浅谈汽车衡 / 平台秤防作弊 [J]. 衡器, 2024, 53(12): 12–16.
[9] 李自杰. 煤炭无人值守计量智能发运自动防作弊技术研究 [J]. 自动化技术与应用, 2025, 44(1): 28–31+88.
[10] 李国玉. 常见电子汽车衡误差分析及防作弊控制措施 [J]. 中国金属通报, 2025, 33(2): 196–198.

EPC项目商务管理中的合同风险识别与防范措施

徐萌

湖北地矿建设工程承包集团有限公司, 湖北 武汉 430000

DOI:10.61369/ME.2026010032

摘 要 : EPC项目合同履行周期长、交付链条复杂, 合同风险识别与防范成为制约项目成功实施的关键变量。本文聚焦于设计、采购、施工各阶段的典型风险场景, 系统剖析了风险生成的三类根源: 条款模糊性、责任边界不清与履约动态变化, 并据此提出针对性防控机制。具体包括术语统一与条款精细化编制、双轴结构下的责任划分矩阵、量化规则驱动下的风险承载机制、全过程预警指标体系以及递进式纠纷解决路径构建, 辅以索赔要素表格化以增强可执行性。研究旨在通过合同结构设计与履约机制优化, 实现风险分担的科学化与纠纷处理的高效化, 为同类 EPC 工程提供制度参考。

关 键 词 : EPC 合同; 合同风险; 责任边界; 履约监控; 纠纷机制

Contract Risk Identification and Prevention Measures in Commercial Management of EPC Projects

Xu Meng

Hubei Geological & Mineral Construction Engineering Contracting Group Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430000

Abstract : EPC projects are characterized by long contract performance cycles and complex delivery chains, making contract risk identification and prevention critical variables that affect project success. This paper focuses on typical risk scenarios across the design, procurement, and construction phases, and systematically analyzes three root causes of risk: clause ambiguity, unclear responsibility boundaries, and dynamic changes during contract execution. Based on this, it proposes targeted prevention and control mechanisms, including standardized terminology and refined clause drafting, a dual-axis responsibility matrix, a risk-bearing mechanism driven by quantifiable rules, a full-process early warning indicator system, and a progressive dispute resolution pathway. Additionally, claim elements are tabulated to enhance enforceability. The study aims to achieve scientific risk allocation and efficient dispute handling through contract structure design and performance mechanism optimization, providing institutional references for similar EPC projects.

Keywords : EPC contract; contract risk; responsibility boundaries; performance monitoring; dispute resolution mechanism

引言

EPC总承包模式凭借“设计-采购-施工”一体化、总包负全责的制度优势, 已成为重大工程的首选组织方式, 但其履约风险呈“多源并发、链式传导”态势: 条款语义漂移、责任界面交叠及不可控事件冲击构成争议与索赔的三重触发器。既有研究多滞留于施工段或进度轴的局部优化, 罕有穿透合同文本结构与履约机制本身的系统性缺陷^[1]。本文将合同置于分析中枢, 依托典型纠纷案例的微观切片, 识别风险类型并追溯其文本根源, 进而以“条款精度-边界清晰度-过程响应弹性”为三支点, 构建可落地的风险预控框架, 为EPC项目合同治理提供可复制的理论-制度范式。

一、EPC项目合同风险的核心类型识别

(一) 设计阶段合同风险识别

设计阶段合同风险的核心表现集中在责任归属与流程控制两个维度^[2]。责任约定不明使发包人倾向将可行性研究缺陷、功能指标偏离、地质数据误差一并转嫁给总承包方, 而总承包方又常

把部分专业设计分包给不具备法人主体的院所, 导致责任链条断裂; 当图纸深度不足或规范版本更新时, 现场已完工程需返工, 合同却未写明返工费用计算口径, 双方随即陷入计价僵局。设计变更流程模糊同样诱发连锁争议: 部分合同仅写“重大变更需书面确认”, 却未界定“重大”的量化标准, 也未设定变更指令的发出时限, 发包人口头要求增加层高的情形被现场执行后, 竣工

结算时又被以“无书面依据”为由剔除，总承包方只能自行承担模板、钢筋、管线重新排布的费用；若变更引起工期顺延，合同缺少对关键线路影响的举证规则，监理日志与 BIM 进度模型均难以成为有效证据，工期索赔易被驳回。风险分配失衡还体现在知识产权条款，合同常笼统约定“设计成果归发包人所有”，却未允许总承包方在后续项目中复用非专利通用节点，院所因担心侵权只能重新建模，重复投入被计入成本后，报价竞争力下降，潜在亏损在设计阶段即已埋下伏笔^[9]。

（二）施工与采购阶段合同风险识别

施工与采购阶段的风险首先暴露在采购周期条款^[10]。合同常将“合理工期”留给承包人解释，却未列出关键设备的排产、海运、清关节点，当锅炉汽包因港口拥堵滞留三周，承包人向发包人申请延期，发包人依据“承包人应预见运输不确定性”条款驳回，现场窝工费与赶工费只能由承包人承担；若发包人自行指定品牌，合同又未写明指定供应商延迟交货的责任归属，承包人既要面对安装队伍空转成本，又无法向指定方索赔，现金流被双向挤压。

质量责任界定风险集中在接口验收环节^[11]。合同习惯把“符合规范”写成笼统义务，却未区分采购、施工、设计三方对缺陷的触发比例，当不锈钢管道焊缝出现晶间腐蚀，发包人直接扣留全部质保金，承包人无法证明腐蚀源于钢材本体碳含量超标而非焊接工艺，设计方也不愿出具材质变更记录，责任被整体推给总承包方；若合同未设置阶段移交书面确认，前道工序的隐蔽缺陷在试车阶段才暴露，发包人拒绝签署缺陷修复令，承包人被迫重复拆检，成本叠加却无法获得可签证的工程量。

二、EPC 项目合同风险的关键成因解析

（一）合同条款模糊性导致的风险成因

合同条款的模糊性在 EPC 项目中表现为术语定义缺位与权利义务表述过于笼统，二者共同放大了履约争议的概率。术语缺位使同一词汇在不同阶段被赋予不同解释，设计方将“符合规范”理解为满足行业最低标准，业主却将其等同于项目全生命周期最优，差异在验收时集中爆发，索赔金额随之攀升；权利义务表述笼统则使风险分配失去支点，典型情形是“不可抗力”条款仅罗列地震、战争等极端事件，却未对疫情、芯片断供等新型中断作出定性，承包商被迫承担原材料暴涨成本，业主亦因工期拖延蒙受间接损失，双方均无法依据合同文本主张免责或补偿，争议解决成本被双重推高。

（二）责任边界界定不清的风险成因

EPC 合同将设计、采购、施工三段任务纵向打包，同一工作包内常出现多方署名，业主、总承包、分包、设备供应商的签字栏并列，文件却未列明谁对细节错误负最终修改义务；当图纸与清单数量不符，各方均援引“联合审核”条款，把校核义务推给对方，现场指令因此滞留，工期节点被动顺延。横向界面管理条款缺位进一步放大缝隙，土建与安装、主体与装饰、工艺与公用工程之间的交接条件仅用“合理衔接”四字概括，未列明测量基准、成品保护、临设拆除的触发时点与验收主体，前道工序尚

未清场，后道工序已申请开工，隐蔽工程复凿责任无法锁定，费用争议随之产生。风险分配条款与支付条款错位，合同把“不可预见的地质责任”划给承包商，却把“地下障碍物的探明费用”保留在业主可控的暂列金额里，承包商按图纸施工遇阻，主张动用暂列金额，业主以“责任已转移”为由拒绝，承包商用停工施压，双方陷入循环举证，现场人机闲置成本逐日叠加。

（三）履约过程动态变化的风险成因

合同履行期间，内外部变量的连续扰动打破原有权责平衡，诱发系统性风险。主材价格受全球产能、航运费率与汇率联动影响，单日波动幅度最高可达合同价的 3%，投标单价失准将直接造成采购资金缺口。设备到货与付款节点之间存在 90 ~ 120 天错位，若利率上行且进度款比例未调整，融资利差将持续吞噬利润空间。区域限电政策导致设备利用率下降，原计划台班作废，而工期索赔缺乏可归责于业主的依据。外汇监管新规引发信用证拒付，进口设备滞港所致滞期费被归为商业风险。疫情封控使关键工种劳动力供应中断，人工成本跃升，承包方陷入履约困境。多数合同缺乏重谈机制，未设风险再分配通道，变量一旦超阈即固化为不可逆履约损失。

三、EPC 项目合同风险的系统防范策略

（一）强化合同条款精准化设计，明确责任边界划分

EPC 合同条款的精准化设计应以术语标准化为基础，业主与总承包方在缔约初期共同建立《技术用语—法律用语对照表》，将行业通用术语、地方技术要求及项目特定表达统一转译为合同正文中的唯一语义，封堵语义漂移的解释空间。针对“不可抗力”“变更指令”“合理工期”等高争议高频词条，建议采用“构成要件+正面列举+负面排除”的三段式结构，即先设定适用逻辑，再列明典型适用情形，并通过排除方式界定边界，减少歧义解释与仲裁不确定性。条款中的术语与定义应一一对应、编号绑定，正文任何引用均以编号直接指向，防止交叉调用产生的语义轮回。

责任边界划分应构建“纵向分阶段、横向分专业”的双轴矩阵体系：纵向上将项目划分为可研、初设、施工图设计、采购、施工、试运行 6 个独立交付模块，分别指定唯一主体负责其交付成果及衔接义务，交接节点引入“静默确认”规则，即责任接收方在 7 日内未提出异议即视为确认，避免竣工阶段责任回溯与补偿争议。横向上按专业划分为土建、结构、电气、仪控、公用工程等最小单元，每单元配套编制《接口责任说明书》，使用三维坐标定义实体接口、流程图描述逻辑交互、量化指标明确功能边界，三方确认签字作为合同附件，任何接口调整必须经《界面变更令》审批后方可实施，确保责任边界清晰、执行路径闭环。

风险责任的承载应遵循“可测量、可追踪、可对价”的原则，将价格、工期、功能三类核心风险分解为量化指标：价格波动风险以权威信息价为基准，当材料价格月度变动超过 $\pm 5\%$ 即触发修正机制，仅就价差部分进行调整，确保风险在可控范围内分担。工期风险按关键路径与非关键路径区分，前者设置单日罚则与总额上限（如 10% 合同总价），后者则纳入总承包人自有浮时

消化逻辑，杜绝无限顺延责任缺口；功能性风险构建分段违约补偿机制，若性能低于承诺值2%以内按比例扣减，对超出2%的部分触发返工或合同价款退还义务，建立违约程度与赔偿额度间的连续函数关系，避免因阶跃判定造成争议激化。

（二）建立履约过程动态监控机制，及时响应风险事件

合同生效后第7日，项目部应向业主提交《履约检查计划表》，明确检查频次、责任岗位及信息流转路径；常规周期为14天，特殊时段可压缩至7天。检查范围应覆盖设计出图、采购下单、施工关键路径3类进度节点，辅以分包人员到岗率与主材库存量2类资源指标。检查记录采用统一编号制度管理，原件归档，复印件在24小时内送达监理与业主代表，异议应于48小时内书面提交，项目部须在下一周期前完成澄清或复测。连续2次检查滞后超过5天即触发黄色预警，由项目经理组织专项评审并形成纪要，作为后续责任归属的合同补充依据。

《预警指标清单》按工期、成本、质量三维设定三级阈值：一级为关键路径延误日，阈值为合同总工期的2%；二级为合同价波动率，阈值为3%；三级为验收不合格率，阈值为5%。任一指标触发即升级预警颜色，分别对应项目部、企业管理部与业主层级处理权限。指标数据由驻场工程师分别采集，交叉偏差超过2%须立即复核，由总监理工程师签字确认后归档。责任方在36小时内提交《风险应对报告》，包含补救方案、资源安排、成本来源及次生风险评估，逾期视为违约，业主可按合同约定处以违约金。

（三）优化合同纠纷解决路径，降低风险损失

EPC合同履行过程中，一旦纠纷进入正式对抗程序，其带来的时间延耗与商誉损失往往超过争议标的本身，纠纷路径设计应优先体现“去对抗化”理念。条款层面应构建协商—调解—争议评审—仲裁—诉讼五级处置机制，并设定强制的逐级启动门槛：任何一方提出正式索赔通知后，必须先启动不少于20日的协商期；协商未果方可申请行业调解机构介入；调解失败再进入争议评审阶段，评审组由业主、承包商与监理方各指派1名技术代表组成。评审结论虽无强制约束力，但若当事方在未提出新证据情况下拒绝采纳，其后续仲裁或诉讼所产生的合理律师费与评审费应由拒绝方承担，从制度设计上遏制程序性滥用动机。

仲裁条款建议采用机构仲裁与临时仲裁并轨安排：合同总额低于5亿元人民币的项目，默认提交北京仲裁委员会处理；超过5亿元或涉及跨境履约的合同，任一方可选择适用新加坡国际仲裁中心规则组庭，仲裁地统一约定为上海，以控制跨境应诉成本。

诉讼路径限定工程所在地中级人民法院专属管辖，避免异地诉讼导致的程序异议与执行难题。

针对高频索赔事项，合同专用条件应设置“索赔处理要素五表化”，即将触发事件、通知时限、证据要求、量化方式、支付节点等五要素分别表格化列示，并作为合同附件具备同等效力。触发事件涵盖设计变更、法律变更、不可抗力、极端天气、业主违约与现场不可预见障碍6类，通知时限应细化至3~10日不等；证据清单以“最低可接受标准”为准则，例如不可抗力仅需提交国家级气象机构出具的红色及以上预警通告即可；量化方式上，工期索赔以关键路径延误日为准，费用索赔限于人工、材料、机械、现场管控4类直接成本，辅以5%的管理费，不得计入利润与财务成本；支付节点设定为业主自接收最终索赔报告起30日内完成审核，逾期视为默认成立，业主可暂扣10%争议保证金，后续若仲裁或诉讼否決索赔，则返还本金并计付LPR利率补偿，形成闭环保障。

四、结语

EPC合同风险具有跨阶段、跨专业、跨责任主体的复合属性，其产生根源主要为合同语言不精确、责任划分不闭合及履约机制不灵活。研究通过类型化识别与成因分析明确风险结构后，提出以术语规范化、条款结构化为基础的前端防控路径；以双维矩阵界面划分与量化规则嵌入为核心的履中控制机制；以及以多元纠纷化解阶梯与索赔要素格式化为支撑的末端处理体系。三类机制协同发力，可显著压缩争议空间、提升履约效率与索赔执行力，为提升EPC项目合同治理能力提供制度依据与实践范式。

参考文献

[1] 常安果. 基于四部融合的 EPC 项目设计管理探讨 [J]. 建筑经济, 2025, 46(06): 34-37.
[2] 毕婷. EPC 项目商务管理中的合同风险识别与防范措施 [J]. 中国招标, 2025, (05): 186-188.
[3] 高燕. EPC 工程总承包模式的项目商务风险管控 [J]. 中国住宅设施, 2024, (06): 82-84.
[4] 何亚群. 浅析 EPC 工程总承包项目中施工单位的合同管理 [J]. 珠江水运, 2023, (19): 19-21.
[5] 韩露. 项目合同执行中的商务风险识别与防控机制研究 [J]. 中小企业管理与科技, 2025, (16): 81-83.

智慧家庭 FTTR 千兆全光网建设探讨

张广辉, 仲凯

中国联合网络通信有限公司山东省分公司, 山东 济南 250000

DOI:10.61369/ME.2026010033

摘 要 : 随着互联网的发展, 智慧家庭越来越融入到我们的生活中来, 为了满足智慧家庭不断扩大的带宽及连接的需求, FTTR 千兆全光网应运而生。本文就 FTTR 千兆全光网的特点以及对智慧家庭的需求, 如何进行 FTTR 建设等内容进行了论述。本文对 FTTR 在智慧家庭的应用及建设中需要注意的关键点进行了研究探讨, 以为智慧家庭的网络建设提供参考依据和技术支撑。

关 键 词 : 智慧家庭; FTTR; 千兆全光网; 技术特性; 建设实践

Discussion on the Construction of Smart Home FTTR Gigabit Full Optical Network

Zhang Guanghui, Zhong Kai

China United Network Communications Co., Ltd. Shandong Branch, Jinan, Shandong 250000

Abstract : With the advancement of the internet, smart homes are becoming increasingly integrated into our daily lives. To meet the growing bandwidth and connectivity demands of smart homes, FTTR (Fiber To The Room) gigabit all-optical networks have emerged as a solution. This paper discusses the characteristics of FTTR gigabit all-optical networks, their requirements for smart homes, and the implementation of FTTR deployment. It also examines key considerations in applying and constructing FTTR for smart homes, aiming to provide technical references and support for network infrastructure development in this field.

Keywords : smart home; FTTR; gigabit all-optical network; technical features; construction practice

引言

近年来, 随着物联网、云计算、大数据的发展, 在全球范围内掀起了智慧家庭的热潮。人们可以通过各类智能家居产品构建出自动化的家庭、远程操控的家庭及智能化的家庭生活场景。为支持智慧家庭中各种应用, 特别是高清视频、AR/VR、智能家居等大带宽、强稳定的应用需求, 传统网络已不能满足需求, FTTR 技术作为新一代的千兆光纤入户技术, 具备带宽大、时延小、覆盖广的优点, 正逐步成为智慧家庭组网的主流解决方案。

一、FTTR 千兆全光网核心概述与技术特性

(一) FTTR 技术定义与核心架构

FTTR 指的是将光纤拉入到用户家中的每个房间, 相对于 FTTH 技术来说, FTTR 将光纤拉入家中每一个房间, 在家庭内部进行光网的再细分, 给用户带来更大的带宽、更低延时的网络体验。FTTR 的关键是其采用了光纤通信技术, 解决了传统铜线或者电缆传输过程中易出现信号衰减等问题, 实现了信号的高速、稳定的传输。对于 FTTR 来讲, 光纤主干网是其网络基础, 而分光器用来进行光信号的分配, 接入设备也就是光纤接入盒可以实现光信号到适合于终端的电信号之间的转换, 并通过家庭内的光纤布线, 给每一个房间都提供独立稳定网络。整体设计及结构具备很强的可拓展性和灵活性, 并可根据家庭大小、设备数量等进行自由调节, 可

以给用户带来稳定高效的光纤网络接入体验^[1]。

(二) FTTR 与传统组网技术的差异化优势

相比于传统的组网方式, FTTR 具有以下优点: 一是带宽高稳定, FTTR 是基于光纤的技术方案, 在传输速率方面远远高于传统 Wi-Fi 或者宽带拨号的方式; 对于采用 FTTR 的家庭用户来说, 不管是看高清大视频、开视频会议还是用智能家电, 都不会因为网络质量差而出现卡顿现象; 均能获得非常稳定快速的上网服务; 二是 FTTR 的全光纤入户, 不会再出现传统网线或 Wi-Fi 容易产生信号衰减的情况, 在传统的 Wi-Fi 中会出现因墙阻隔、家具阻挡等情况造成信号不稳或者速度慢的现象, 而 FTTR 是光纤到房, 保障了网络的连续稳定。其次, FTTR 的光纤网络基本不受电磁干扰, 在复杂的家庭环境下也能提供稳定的网络体验。最重要的是 FTTR 延迟低的特点让实时性强的应用 (例如智能家

居控制、语音助手)得到更好的体验,提供更加流畅的服务。

(三) 千兆全光网支撑智慧家庭的核心技术指标

FTTR千兆全光网针对智慧家庭的主要技术参数有带宽、时延、稳定等。首先,FTTR带宽最高可达到1Gbps速率,在家可以支持多终端并发观看高清视频流媒体点播业务以及云存储、大数据传输等大流量业务应用,FTTR正好可以满足如此大的带宽需求,在多个终端同时工作的场景下依然能顺畅运行;其次FTTR光纤网络有较低的时延特性,可以让智慧家庭中的一些实时控制以及语音助理等功能更加及时地反馈,不会因为网络时延而产生不好的体验感;最后FTTR的网络是基于光网线进行传播的,超强稳定性,在家用环境下可以同时满足多个智能终端接入,无论是在家中的智能生活场景、安全防护场景或是其他联网设备,都可实现稳定联网,让家的生活智慧、便利不再受制于网络。

二、智慧家庭对FTTR千兆全光网的需求分析

(一) 智慧家庭多场景业务承载需求

智慧家庭应用类型丰富,包括智能家居、视频监控、安防、家庭影院等多种应用场景,各类场景对网络的需求也不尽相同,在带宽、稳定性以及时延等方面的要求较高^[2]。例如,高清视频流就需要稳定的足够带宽才能满足清晰流畅观看的效果,特别是对于诸如4K或者8K的高清晰度视频业务的需求。另一方面是智能家居场景下对网络的时延的要求,智能家居设备动作反馈需即时,否则会降低用户体验。FTTR千兆全光网超宽带、超低时延的特点可以很好地满足以上需求,保证家里的各个电器可以流畅地互相通信,不会因为网络的原因而产生拖尾或者延迟的问题。

(二) 用户对网络带宽与稳定性的核心诉求

随着智能家居的发展,人们对于网络的速率及稳定性提出了更高的要求。如今的家庭中,智能电视、视频会议、网上学习、远程办公、云端存储等多种应用都离不开较高的网速,特别是在多台设备同时联网的情况下,网速过慢将会导致观看视频不流畅、文件下载速度慢或者上网设备不能正常使用等问题。直接关系到家庭内各个人员的用户体验度。除此之外,对于整个家庭中的各类智能设备而言,网络是否稳定也会影响到其正常运作情况,特别是在智能家居系统当中,如果网络不稳定,则会出现各智能设备之间无法有效沟通的问题,进而导致相关智能设备无法发挥出应有的协同作用。而FTTR千兆全光网则可以为户提供千兆级的稳定带宽,保证每一台终端都处于最优的网络环境,不会有带宽瓶颈以及不稳定的因素^[3]。

(三) 智慧设备互联对网络覆盖能力的要求

智能家居涉及的终端设备非常多,包括照明控制、空调控制、家电控制、视频监控等等。智能家居对网络的需求是全覆盖及高带宽速率,在存在网络盲区或弱电的情况下会引发某些终端无法接入或者运行异常的情况,从而影响到智能家居系统的使用体验。FTTR技术通过将光纤引入到每一个房间,从而保证了每间屋子、每个角落都有网,并能实现无缝连接。无论是厨房、

客厅还是卧室,光纤的全覆盖保证了智能家居设备的稳定联接与数据传输。

(四) 家庭隐私安全与网络管控需求适配

在智能家居中,随着家居设备的智能化发展,家庭用户的人身资料及隐私安全也越来越重要。很多智能家居设备都涉及到用户的个人信息,比如智能门锁、视频监控、人体健康检测设备等,如果被网络黑客入侵或泄露了相关信息,将可能给用户带来很大麻烦。因此,网络安全也是用户对智慧家庭的另一个需求。而FTTR是基于光纤专线接入的家庭组网模式,属于独立的加密网络通道,从源头保障了网络的安全性。光纤网络不容易被电磁干扰和外部攻击,相比传统的无线网络或宽带网络,具有更强的防护能力。

三、智慧家庭FTTR千兆全光网建设实践路径

(一) 建设前期规划与场景化方案设计

在FTTR智慧家庭千兆全光网的建设过程中,从最初的规划设计工作开始就已经关系到整体网络运行的稳定性和质量以及后期的发展情况,在进行网络规划设计的过程中,首先要做的就是了解家庭环境的基本信息、用户的实际使用需求和具体的网络覆盖范围。具体来说就是要先结合家庭的实际面积大小和房屋的具体结构来做好网络的整体规划,尤其是针对大户型、复式、多层楼等情况,网络部署需做到每一间房、每一个角落都拥有高速、稳定的网络体验。家里的每一寸空间都有不同的使用场景,客厅和书房可能是需要观看超高清视频和办公应用,而卧室则更多是简单的小型终端,例如智能灯泡、智能温度调节器等等。所以,在规划的时候要考虑不同房间对宽带的需求量及所连设备的数量,并合理给各个房间划分带宽资源,防止出现网络拥塞和带宽资源的闲置。另外,还要详细规划智能家居设备的类型以及数量,比如智能电视、智能音响、安全监控装置、智能家居控制主机等都会接入到网络上,对带宽以及延迟有较高的要求。因此在设计过程中需要对光纤接入点、分光器、光纤跳线等关键设备进行合理的规划,并保证系统的兼容性和可扩展性,例如在家用扩展设备数量的时候能够实现容易的升级及更改^[4]。

(二) 核心设备选型与兼容性适配原则

在FTTR千兆全光网的建设过程中,核心设备的选型是十分重要的一步,它直接关系到整个网络的运行水平、稳定程度以及可扩展能力。FTTR的核心设备主要有光纤接入盒、分光器、光纤跳线等,在每一个设备的选型上都要结合家庭面积大小、设备数量多少、带宽使用量等因素来考虑。首先,光纤接入盒是FTTR的重要组成部分之一,在家中用于将光纤信号转换成电信号,并提供给家中的路由器或者终端设备使用。因此在选择光纤接入盒的时候,应该尽量选择最大带宽及网口较多的产品,以满足家中多个智能产品的同时需求^[5]。另外,在选择分光器的时候也要考虑家庭规模以及设备数量确定合适的分光比,合理的分光比可以保证每个接入端口都有充足的带宽,不会出现信号分配不平衡导致的网络拥堵或者带宽不够的现象;在选择光纤跳线时要

注意光纤跳线要有良好的传输性能，并适应于家庭内部的布线环境。另外还需考虑跳线长度及方便性。在对以上关键设备进行选择时，还要考虑到设备间的兼容性，由于不同厂家生产的产品可能存在的协议、接口等方面的不同，如果设备间不兼容就有可能造成系统整体运行不稳定的情况出现，所以在选择时应该保证设备间的标准接口，在设备扩充、更新等方面也要保持高度的兼容性，确保今后网络环境的发展与升级。假如在设备之间存在不兼容的情况，则会导致设备不能进行正常的连接或者造成断线以及网络延迟等情况。因此，设备的兼容性必须通过详尽的测试和厂商认证来保障，以确保 FTTR 网络能够稳定运行并适应未来的技术发展需求。

（三）布线施工规范与家庭环境融合要点

FTTR 千兆全光网布线施工是 FTTR 全光网建设中最为基本也是最复杂的一环，既需要完成网络覆盖，又要结合家庭实际环境进行实施^[6]。布线施工首要考虑的是保证光纤线路的安全稳定，光纤较为脆弱，在施工中应尽量防止线路弯折挤压，不能影响到光纤的传输效果。因此，为了确保光纤布线的质量，在布线的过程中应当使用专门的光纤管道或者光纤电缆槽来进行光纤布线工作，并做好光纤线路的保护措施，防止由于人为原因导致光纤被破坏。此外，在光纤铺设工作中还要注意每一个房间都要有单独的接入口，不能发生信号损耗的情况，也不能存在盲区的问题。特别是在高层建筑当中，在每一层进行线路铺设的时候要有科学的走向路线，并且保证每一个房间里都可以使用光纤接入盒实现上网，避免像传统线路那样出现盲区的问题；同时，在进行光纤线路铺设的同时，还要注重其铺设的安全性及美观性，一般家庭的装修已经确定了整体的设计方案，在进行线路铺设过程中不能影响到家庭的原有设计施工情况，光缆的敷设应根据家庭装修风格进行设置，不能有裸露出来的光缆破坏美感，因此在设计敷设时应该提前考虑到家庭装修风格，在暗处埋管或者使用美观的电缆槽，做到既美观又实用。对于光设备的安装位置也需要仔细考虑，放置于通风良好以及方便检修的地方，防止机件受热而降低其工作性能^[7]。同时，光纤接入设备的安装要注意避免与热源或湿气源接触，以免影响设备的长期稳定性。

（四）网络部署与调试优化流程

FTTR 千兆全光网络建设中的网络部署及调优工作属于 FTTR 千兆全光网络工程建设的最后一步，也是确保整个工程能够正常使用的最终环节。在网络施工完成后，就需要对设备进行安装以及接入，在这个环节中，相关工作人员要依据之前的设计方案将各个主要的设备包括光跳箱、分路器、交换机等等都按照设计方案的要求进行准确地安装，并且保证每台设备的链接都是正常且满足规定的。在完成设备安装之后还要对整个网络进行一个简单的测试工作，尤其是针对宽带方面的测试，在进行测试的时候一定要确保每一间房所拥有的光纤接口所提供的带宽足够大，可以承载一些高清视频以及虚拟现实等方面的需求；除此之外对于延时的检测也是必不可少的，尤其是对于智能家电控制以及实时交互类的应用而言，如果出现过高的延时则会影响到终端反应速度，从而造成用户使用体验感不佳。所以在这个环节里，工程师们就要针对网络实施全方位的检测工作，以保障系统整体性能均能符合标准要求。在调测的过程中还需要关注到信号稳定性及网络覆盖率的问题，特别是对于一些多个房间甚至多个楼层家庭来说，保证每个房间都有良好的网络信号，若有的房间网速慢或者经常断连，则需要对分光器进行设置或是加装增倍器。在调试完毕后还需要做网络优化来提高整个系统的性能。在优化的过程中，工作人员需要结合测试的结果来对相应的装置展开一定的设置，并对网络的一些参数予以合理的优化，消除可能存在的干扰现象，保障在网络中多台设备可以同时被使用的情况下，能够保证其具有良好的、稳定的传输速度^[8]。

四、结语

综上所述，在智慧家庭需求日益增加的情况下，FTTR 千兆全光网是支撑智慧家庭网络的最佳解决方案之一，其应用前景十分广阔。对 FTTR 技术进行分析及实施路径研究，可为构建智慧家庭 FTTR 全光网提供参考依据。展望未来，在技术不断进步、用户需求变化的情况下，FTTR 千兆全光网将更好地在智慧家庭中发挥作用，给用户提供更好的网络体验。

参考文献

- [1] 蔡勇. 智慧家庭 FTTR 千兆全光网建设探讨 [J]. 通信电源技术, 2022, 39(2): 92-94.
- [2] 胡岸然, 张立, 陈馨. 千兆宽带全光室内远端覆盖研究 [J]. 移动信息, 2024, 46(3): 21-23.
- [3] 廖佐标, 李志明, 石时金, 余意媚, 曾环康. 智慧家庭 FTTR 千兆全光网建设方法研究 [J]. 中国宽带, 2025, 21(1): 19-21.
- [4] 刘佳. 基于全光云网新型基础设施的运营商发展策略探讨 [J]. 电信快报, 2024(2): 36-39.
- [5] 马延晖. 智慧家庭 FTTR 千兆全光网建设方法研究 [J]. 数字通信世界, 2023(9): 17-19.
- [6] 朱鹏飞, 胡志杰, 王泽珏, 等. 宽带接入网技术发展与应用研究 [J]. 通信世界, 2023(21): 45-47.
- [7] 赵占纯, 杨剑键, 张珂, 等. 中国联通打造 L4 级网络自智能能力 实现千兆宽带 FTTR 智慧运营 [J]. 通信世界, 2025(2): 45-46.
- [8] 许世龙, 张艳. 智慧家庭 FTTR 万兆全光网建设策略研究 [J]. 通信与信息技术, 2025(5): 120-123.

煤矿应急救援能力成熟度评价模型构建及应用

贺泓梵

湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201

DOI:10.61369/ME.2026010022

摘 要 : 本文提出构建一种基于能力成熟度模型的煤矿应急救援能力评价模型。从事前预防能力、应急准备能力、应急响应能力和事后恢复能力4个维度建立了煤矿应急救援能力评价指标体系并基于熵权法和突变级数法进行综合评价。最后,对山东省某煤矿的应急救援能力进行了评价,得出该煤矿的成熟度等级为“规范”级。

关 键 词 : 煤矿; 应急救援能力; 能力成熟度模型; 熵权法; 突变级数法

Construction and Application of Coal Mine Emergency Rescue Capability Maturity Evaluation Model

He Hongfan

School of Resource & Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, Hunan 411201

Abstract : This paper proposes to construct an evaluation model for coal mine emergency rescue capability based on the Capability Maturity Model (CMM). An evaluation index system for coal mine emergency rescue capability is established from four dimensions, namely pre-prevention capability, emergency preparedness capability, emergency response capability and post-recovery capability, and a comprehensive evaluation is conducted by combining the entropy weight method with the catastrophe progression method. Finally, the emergency rescue capability of a coal mine in Shandong Province is evaluated, and the mine is concluded to reach the Standard Level of maturity.

Keywords : coal mine; emergency rescue capacity; capability maturity model; entropy weight method; mutation progression method

引言

煤矿是我国重要的能源产业,然而,由于煤炭企业自身所处的特殊环境以及煤矿该行业自身存在的安全隐患,导致了煤炭企业在煤炭企业中经常发生的安全事故。在这些安全事故中,有很多是由于煤矿应急救援能力不足而导致的,因此,煤矿应急救援能力评价成为了一个备受关注的问题。在国外,煤矿应急救援能力评价研究相对较早,研究成果较为丰富。关键绩效指标法^[1]是最常用的方法之一。该方法将煤矿应急救援能力的评估分为多个关键绩效指标,然后将这些指标进行加权组合,计算得出一个综合指数,用于衡量煤矿应急救援能力的成熟度水平。国内针对煤矿应急救援机构,有学者构建了由制度、人员、物资和技术四个方面构成的评价指标体系;在煤矿应急救援能力评价方法方面,突变级数法^[2]、层次分析法^[3]、熵权法^[4]、TOPSIS法^[5]、Vague集理论^[6]等多种方法被广泛运用。近年来,一些新的评估方法也正在被研究和探索^[7],例如基于模型的评估方法和基于数据挖掘的评估方法等。这些新的方法对于提高煤矿应急救援能力的评估准确性和可信度有着重要的意义。综上,在分析国内外的一些相关文献时,发现在针对煤矿应急救援能力评价等级划分以及判断标准确定的研究尚且不足,针对这个问题,引入了能力成熟度模型核心思想,在构建能力成熟度评价模型当中,为研究评价过程中的指标判断标准以及判断煤矿应急救援能力成熟度等级提供有效的参考。

一、煤矿应急救援能力评价指标体系

煤矿应急救援能力^[9]是指煤矿在突发事件或事故发生时,能够有效组织、协调和实施应急救援工作的能力。在查阅文献后^[8-11],构建出煤矿应急救援能力评价指标体系。

表1 煤矿应急救援能力评价指标体系
Table 1 Evaluation index system of coal mine emergency rescue capability

目标层 A	中间层 B	指标层 C
煤矿应急救援能力 A	事前预防能力 B1	危险源辨识 C1
		危险源控制 C2
		应急预案编制 C3
		安全检查 C4

应急准备能力 B2		井下应急救援演练 C5
		井下作业人员应急培训 C6
		矿井应急物资储备 C7
		矿井应急通信设备 C8
煤矿应急救援能力 A	应急响应能力 B3	救援决策指挥 C9
		矿井救援队伍响应 C10
		煤矿应急人员疏散 C11
		煤矿应急人员搜救 C12
		煤矿救援经验总结 C13
		煤矿事故调查分析 C14
事后恢复能力 B4		伤亡矿工安置 C15
		矿井救援装备复原 C16

二、基于突变级数法的煤矿应急救援能力成熟度评价模型构建

（一）评价指标重要性排序

利用熵权方法来确定各指标的权重，以减少利用突变级数法在评估过程当中的主观性。采用熵权法对指标进行赋权的具体步骤是^[10]：

1. 被评价对象 L，评价指标 Y，被评价对象 Li 对指标 Yj 的值记作 Xij，则原始指标数据矩阵为：

$$x = \begin{pmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & \cdots & x_{mn} \end{pmatrix} \quad (1)$$

其中，Xij 为第 j 个指标下第 i 个被评价对象的值。

表2 几种常见的突变系统类型
Table 2 Common types of mutant systems

突变类型	势函数	分歧方程	归一方程
尖点突变	$f(x) = x^4 + ax^2 + bx$	$a = -6x^2; b = 8x^3$	$xa = a^{\frac{1}{2}}; xb = b^{\frac{1}{3}}$
燕尾突变	$f(x) = x^5 + ax^3 + bx^2 + cx$	$a = -6x^2; b = 8x^3; c = -3x^4$	$xa = a^{\frac{1}{2}}; xb = b^{\frac{1}{3}}; xc = c^{\frac{1}{4}}$
蝴蝶突变	$f(x) = x^6 + ax^4 + bx^3 + cx^2 + dx$	$a = -10x^2; b = 20x^3; c = -15x^4; d = 4x^5$	$xc = c^{\frac{1}{4}}; xd = d^{\frac{1}{5}}; xa = a^{\frac{1}{2}}; xb = b^{\frac{1}{3}};$

在计算出每个底层指标的隶属函数值之后，还需要利用互补与非互补的原则进行计算得出中间层指标的函数隶属值，互补原则与非互补的原则定义如下^[13]：

1. 互补原则：假如一个上层指标其包含的各个不同指标之间有明显的相关关系时，则该上层指标包含的各个不同指标之间称为互补型，即一个该上层指标的隶属函数值应取其包含的各指标相应隶属函数值的平均值。

$$y = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} \quad (8)$$

2. 非互补原则：如果该上层指标所包含的各指标之间不存在相关性，则为非互补型，那么该上层指标的隶属函数值取各指标相应隶属函数值的最小值。

$$y = \min(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (9)$$

2. 数据标准化

（1）正向指标标准化公式：

$$x_{ij} = \frac{x_{ij} - \min\{x_{1j}, \dots, x_{mj}\}}{\max\{x_{1j}, \dots, x_{mj}\} - \min\{x_{1j}, \dots, x_{mj}\}} \quad (2)$$

（2）负向指标标准化公式：

$$x_{ij} = \frac{\max\{x_{1j}, \dots, x_{mj}\} - x_{ij}}{\max\{x_{1j}, \dots, x_{mj}\} - \min\{x_{1j}, \dots, x_{mj}\}} \quad (3)$$

（3）计算第 j 个指标下第 i 个评价对象的特征向量 Pij：

$$p_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}} \quad (4)$$

（4）计算第 j 个指标的熵值 e_j ：

$$e_j = -\frac{1}{\ln(m)} \sum_{i=1}^m p_{ij} \ln(p_{ij}) \quad (5)$$

（5）计算第 j 个指标的效用值 d_j ：

$$d_j = 1 - e_j \quad (6)$$

（6）确定各指标的权重 W_j ：

$$W_j = \frac{d_j}{\sum_{i=1}^n d_i} \quad (7)$$

（二）确定突变类型

在对原始数据进行无量纲化之前，需要判断每个系统中突变的类型^[12]：如果一个指标包含两个下级指标，那么该系统便是尖点突变；如果包括三个下级指标，该系统便是燕尾突变；如果包括四个下级指标，该系统是蝴蝶突变，这三种是较为常见的突变系统类型，其对应公式见表2。

根据构建的煤矿应急救援能力评价指标体系（见表1），煤矿应急救援能力包括：事前预防能力、应急准备能力、应急响应能力以及事后恢复能力4个变量，可确定中间层符合蝴蝶突变模型和互补原则。

（三）确定评价等级

在得到该煤矿应急救援能力成熟度评价系统的总突变隶属度后，再由根据总隶属度评价煤矿应急能力水平相应的等级：其中0-0.3为混乱级、0.3-0.6为简单级、0.6-0.75为规范级、0.75-0.9为优化级、0.9-1为精益级。

三、评价模型应用

（一）指标值获取

以山东省某矿为例，邀请5名安全与应急领域相关专家基于该

矿应急救援能力实际,并结合指标体系进行评分,评分结果见表3,由于篇幅所限,只给出平均分。

表3 煤矿应急救援能力实际状况评分
Table 3 actual scores of coal mine emergency rescue capability

底层指标	平均分	底层指标	平均分
C1	0.832	C9	0.882
C2	0.782	C10	0.712
C3	0.792	C11	0.817
C4	0.848	C12	0.628
C5	0.749	C13	0.740
C6	0.733	C14	0.734
C7	0.766	C15	0.823
C8	0.758	C16	0.882

（二）煤矿应急救援能力评价指标重要性排序

在得到相关指标的评分之后,依据2.1中熵权法步骤进行计算,得到各指标权重如表4所示。

表4 各指标权重
Table 4 Weight of each indicator

一级指标	权重	二级指标	权重
B1	0.2386	C1	0.0544
		C2	0.0817
		C3	0.0520
		C4	0.0505
		C5	0.0622
B2	0.3005	C6	0.0467
		C7	0.1100
		C8	0.0817
		C9	0.0505
		C10	0.0467
B3	0.2379	C11	0.0909
		C12	0.0498
		C13	0.0549
B4	0.2230	C15	0.0492
		C14	0.0524
		C16	0.2580

（三）综合评价

在用熵权法得到各指标的权重后,利用表2公式对各底层指标进行计算,再判断指标间的互补或非互补的关系,依此类推,最终得到该矿应急救援能力成熟度的总突变隶属函数值。其中,一级指标隶属度, $B1=0.4232$, $B2=0.3316$, $B3=0.4213$, $B4=0.4160$,总突变隶属值为0.7428。

（四）评价结果及分析

该煤矿应急能力总突变隶属函数值为0.7428,根据计算结果,可以得到以下的结论:该煤矿的应急救援能力评定为“规范”级别,说明该煤矿的应急处理能力一般。可得一级指标的隶属度大小顺序为: $B1>B3>B4>B2$,故B2应急准备能力的隶属度是最低的,表明了应急准备能力在该煤矿应急救援能力成熟度评价当中是最薄弱的,应当加强这方面能力。

四、结论

（1）引入CMM思想构建了煤矿应急救援能力成熟度评价模型,对煤矿应急能力成熟度等级以及各指标在每一等级中的判断标准进行了探讨,可为煤矿应急救援能力的评价提供判断标准。

（2）将熵权法、突变级数法二者有效结合评价,一定程度上降低了多目标分析决策的主观性,以计算数据呈现出的评价结构更清晰,评价结果更具客观性和准确性。

（3）利用构建的评价模型得出某矿应急救援能力成熟度模型为“规范”级,其中应急准备能力隶属度最低。

参考文献

- [1]Almana Ranya S.,Alharbi Abeer. Door to Disposition Key Performance Indicator in Three Saudi Arabian Hospitals' Emergency Departments during COVID-19 Pandemic[J]. Healthcare,2022,10(11).
- [2]李春辉,方菊明,何泽军,毛文普.基于突变理论的建筑企业安全管理评价研究[J].中国安全生产科学技术,2011,7(12):87-91.
- [3]杨峰峰,张巨峰,郑超,许泰,焦云飞.基于 Logistic 曲线与模糊层次分析法的煤矿应急能力研究[J].煤炭工程,2019,51(02):154-157.
- [4]李萌.基于层次分析法-熵权法的煤-水协调开发综合评价[D].中国地质大学(北京),2021.DOI:10.27493
- [5]王治文,白学文.基于 AHP-TOPSIS 模型的煤矿安全管理效果评估[J].能源技术与管理,2021,46(04):138-140.
- [6]单仁亮,王存权,陈孝国.基于 Vague 集理论的煤矿应急救援能力研究[J].煤炭技术,2016,35(02):320-321.DOI:10.13301/j.cnki.ct.2016.02.124.
- [7]郑霞忠,郭雅薇,陈述.建筑企业职业健康安全管理体系成熟度评价[J].中国安全科学学报,2015,25(12):146-150.DOI:10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2015.12.025.
- [8]陈方曼,潘兵.煤矿突发事件应急救援能力评价与定位研究[J].皖西学院学报,2019,35(03):65-69+75.
- [9]戚宏亮,宁云才.煤矿应急救援能力评估研究[J].煤炭技术,2017,36(04):337-340.DOI:10.13301/j.cnki.ct.2017.04.124.
- [10]商振,张虹.煤矿应急救援能力评估指标体系构建研究[J].华北科技学院学报,2016,13(02):45-50.
- [11]王春光.基于可拓理论的煤矿应急能力评价[J].中国煤炭,2013,39(08):109-114.DOI:10.19880/j.cnki.ccm.2013.08.029.
- [12]李杨,刘月.基于突变级数法的建筑施工企业应急能力评价[J].华北科技学院学报,2022,19(05):79-83.DOI:10.19956/j.cnki.ncist.2022.05.011.
- [13]成连华,周瑞雪,严瑾,郭慧敏.煤矿应急救援能力成熟度评价模型构建及应用[J].中国安全科学学报,2021,31(07):180-186.DOI:10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2021.07.025.

高度集成与模块化设计在火力发电输煤 DCS 系统 数智化中的应用研究

张宏利

大唐蒲城第二发电有限责任公司, 陕西 渭南 715501

DOI:10.61369/ME.2026010034

摘 要 : 面对能源结构调整及增强火力发电竞争性的双重压力, 在火力发电传送煤系统分布式控制系统中引入高度集成性、模块化设计理念是明确的定位与发展路径; 本文基于工程实践案例阐述上述措施在重构系统架构、实现智慧应用以及改进全过程管控方面的作用机理。集中式是将各信息孤岛进行集成, 实现从燃料上料到燃烧过程中的协同管理, 分布式是按功能划分的原则设计, 便于扩展、维护及后期升级改造。二者相互配合, 形成对皮带煤系统自主可控、智能高效、灵活响应的支撑能力, 这也为火电行业向安全高效清洁转型提供了根本支撑。

关 键 词 : 火力发电; 输煤系统; 分散控制系统; 数智化

Research on the Application of Highly Integrated and Modular Design in the Digitalization of DCS Systems for Coal Conveying in Thermal Power Generation

Zhang Hongli

Datang Pucheng Second Power Generation Co., LTD., Weinan, Shaanxi 715501

Abstract : Faced with the dual pressure of energy structure adjustment and enhancing the competitiveness of thermal power generation, introducing highly integrated and modular design concepts into the distributed control system of the coal conveying system in thermal power generation is a clear positioning and development path. This article elaborates on the mechanism of the above measures in reconstructing the system architecture, realizing intelligent applications, and improving the whole-process control based on engineering practice cases. Centralized design integrates various information silos to achieve collaborative management from fuel feeding to the combustion process. Distributed design is based on the principle of functional division, facilitating expansion, maintenance, and later upgrades and renovations. The two work in coordination to form a supporting capacity for the independent control, intelligent efficiency and flexible response of the belt coal system, which also provides fundamental support for the transformation of the thermal power industry towards safety, efficiency and cleanliness.

Keywords : thermal power generation; coal conveying system; distributed control system; digitalization and intelligence

引言

随着世界能源发展由高能耗向清洁化、低碳化方向转变以及新型电网快速发展的形势下, 传统火电机组面临着提升运行经济性、保障供电可靠性、实现清洁高效环保等一系列挑战。作为为火电机组提供燃料的主要来源——煤运系统而言, 它的好坏关系到整个机组运行的稳定性、经济性和环保性。然而现有的缺陷是老式控制系统老化、保守的技术造成的信息封闭以及信息孤岛等问题均不能满足智慧电厂实时感知、自动分析、协同决策的要求^[1]。由此可见, 煤炭分散控制系统数字化改造不仅仅是硬件设备更新, 而是一个涉及整体架构重构、数据挖掘利用及运维模式创新的一场变革革命。集成化和模块化作为现阶段工控系统设计理念中两种最先进的理念, 能较好地解决上述问题, 并给出具体解决方案。其中, 前者旨在搭建一体化、开放化数据中心及管理中枢, 打通生产全环节信息壁垒; 后者是基于标准作业单元构建系统框架实现系统可调度性及可持续发展。本文主要对两种设计方案在煤流系统 DCS 数字化改造的应用模式、实现方法及综合效益进行深入探讨, 以期对实践应用起到一定的借鉴作用。

一、核心概念界定与发展驱动力

（一）高度集成与模块化设计的内涵

对于火力发电厂输煤分散控制系统而言，高度集成化和模块化有着特殊的内涵。

所谓高度集成就是指改变了以往那种子系统之间相互链接的形式，而是采取深度整合的方式，以期实现一个覆盖了从燃料到装置监控以及周边环境的安全保护的整体性网络，并且将其延伸至现场设备层、过程控制层、生产管理层乃至企业决策层等多个领域。这种集成的关键不单是共享信息，而是在业务逻辑上进行协调和优化，例如将煤场三维激光扫描结果、皮带秤实时流量值同锅炉燃烧的配煤需求模型进行关联，在此基础上实现准确的发运计划制定及滚动优化^[2]。

系统工程方法论是指在系统设计中将整个系统分解为若干个功能独立、规范一致的模块化系统的方法。模块化设计是自顶向下地将复杂庞大的煤炭运输管理系统分解成一系列功能独立、接口标准、相对独立的硬件及软件子系统的过程，例如可划分为基础控制层，智能处理单元，显示及操作单元，通信单元等。各子系统内部具有较高的内聚性，相互之间采用统一规范的交互方式形成较弱耦合关系。这样单个功能单元可以独立进行开发、测试、维护或者替换，并且尽可能少地影响到整个系统，因此大大提高了系统的可靠性和灵活性以及适应新的技术能力。

（二）政策、技术与经济多重要求

作为煤炭输送的集散控制系统，其功能的集中集成化、系统模块化是必然的发展趋势，这主要是由以下几方面的原因决定的：

首先，国家战略以及国家产业政策的影响，在能源领域包括电力管理方面实现自主可控已经成为国家战略需求；而采用模块化设计开发具有自主知识产权的国产化的 DCS 控制系统是解决核心技术受制于人以及断链风险的有效手段之一。进而形成稳定的煤炭运输管理工作基础。另外，在新电力网络下，煤电的作用将转变为一种可以灵活变化的电源，这也就意味着诸如煤炭运输等配套设施能够快速地对电网发出的指令做出反应，而高集成化的智能控制管理系统是实现这一目标的前提保证。

第二，技术迭代融合是内生动力。物联网、人工智能、虚拟孪生、大数据等新兴信息技术日趋成熟，并能提供诸多有益于煤炭运输系统高效智能的手段方法，但如何将其有效应用于实际工厂就必须对其进行模块化设计，可灵活应用及管控并兼容于传统控制流程中，例如将 AI 警示模型作为高层次之资料运算方法纳入生产控制区，在不需数据离域的情况下即可达成智能分析与管控反馈的功能。

最后，还面临如何降本增效实现可持续发展的现实问题。随着电力市场化改革以及环保成本内部化，持续压减火电厂利润空间。运用智能化管控一体化平台能够准确掌握存煤量、存煤质、设备状态，由此优化混燃策略降低燃料成本，并进行预测性维护以防止非计划停机带来的损耗；另外其模块化设计可以有效降低长期使用及升级所需的技术费用，具备可拆卸和可扩展的功能，

延长系统的使用寿命期^[3]。

二、高度集成与模块化设计在火力发电输煤分散控制系统数智化中的应用

（一）构建统一管控平台

一是应采用集散控制系统架构对运煤系统进行改造设计，将原有的独立分散的程序控制单元、监视单元以及安全保护单元整合到统一的智能管控平台上，在该平台上集中管理和监控所有皮带机、碎煤机、装车机等运煤设施设备。二是可以利用规范化的数据接口将智能化储煤厂管理、厂区视频监控、燃煤分析及厂级信息监控整合为一体，形成整体性的数据库，在此基础上各种功能以模块化的方式进行实现，如基础的逻辑控制、智能巡检解读、三维数字仿真、环保降尘联调等功能均是一个单独的功能模块。若需新增例如基于图像处理技术的手工链断判别等功能，则不必重做一套系统，只需要编写或导入相应智能分析算法程序，再经由平台标准服务接口整合授权即可快速投入使用。这种构建方式使得安徽省钱营孜电厂等项目实现了从单元制机组到厂内外全系统的输煤过程一体化智能管控。

（二）集成算法模块与数据驱动优化

新框架为智能算法提供实现的数据和环境，而模块化意味着算法是受控和可复制的。

简而言之，这个系统收集到的大规模数据和历史数据是机器学习算法设计和运行的动力源。因此一系列专用算法模块被开发出来，并嵌入到系统中。例如智能报警分析和故障诊断模块可以实现对设备运行参数在微秒级别的实时处理，自动识别老化趋势并提前预警，以达到避免事故的目的。智能配煤混合燃烧模块是基于煤炭场多元化的煤质信息及锅炉即时需求进行实时优化计算最优混煤方案，并指导抓斗式装车机对煤源做出正确选择，实现了配比从估算到模型计算的飞跃。例如，靖煤白银热电公司将自回归外部输入模型技术和动态矩阵控制等先进控制方法应用到轻型模型模组中，进入分散控制系统的深层次部位，实现了对包括深度调峰在内的复杂工况下的燃油、给水、脱硫等各个环节的高度自动控制，大大提升了控制精度及机组稳定性^[4]。

（三）贯通燃料信息与敏捷业务响应

实现电厂燃料管理全链条精细化管理和业务敏捷性响应是高度集成性和模块化带来的价值体现。

整合后将燃料从采样到使用的过程全部串联在一起，包括车船载煤取样检测报告、三维激光扫描生成的煤堆立体仓储模型以及煤质温度分布云图、皮带运输瞬态流数据信息及其累计值，直至燃煤锅炉燃烧过程在线动态数据等。以上都可以在同一平台上可视化地展现出来，并加以综合分析，这样管理者可以随时掌握全场燃料的数量、质量、位置及费用情况。

基于融合的数据，可使各模块化的管理工具高效工作。智能化安排部分根据发电机组负荷计划、煤量储备以及混燃需求自动生成最优入炉配煤指令，设备状态诊断部分则根据采集的振动、温度等信息预测重要设备寿命。而且下达预防性检修指令，将应

急抢修变为预检维修模式，当电网需要发电机快速响应及深度调峰时，此综合平台能灵活管理从燃料到锅炉点火的一系列过程，并由模块化控制策略确保各支系统平稳及时地跟踪主控指令，从而维护电厂在新型能源网络中的灵活性能力^[5]。

三、实施效益与未来挑战

（一）提升运营安全与可靠性

采用集成化、模块化数字智能化煤炭运输系统管理平台的最大优点是安全稳定运行得到了很大提高，自主开发的全模块化的软硬件能够充分保障整个供应链和核心控制系统更加安全可靠地运行。全方位监控检测和智能预警可以及时识别输送带跑偏、撕裂、卡堵以及电机超温等问题，并自行处理，相对于传统的人员巡检及主观推测而言更为有效。例如基于机器人的智能化巡检技术可以利用其安装的精密传感器，使得巡检效率比人工更快更高，避免了人员进入高危区域检查。同时由于系统具有冗余设计以及各模块可热插拔的功能，因此单个设备发生故障也不会导致整个系统瘫痪，也使得维修工作更加容易便捷。

（二）实现显著经济效益

这种转变带来了可量化的经济效益以及环保效益。就经济角度来说，准确的煤混配以及整个环节中消耗控制大大降低了能耗成本，提前对设备进行检测并更换以防故障发生，一方面降低了非计划停机时间和次数，另一方面避免了巨大的电耗损失。自动化及智能化程度提高后，其工作强度降低、人员配置减少，可实现在电厂内部无人值守操作，节约人力成本投入。据调查表明，智能化改造之后，每年可以节约大量标煤，并且年综合效益高达上千万。在环保方面，集成式智能喷淋设备及喷雾机将根据测尘仪检测的数据自动打开或关闭，这样就尽量地减少粉尘污染，优

化的燃烧技术和较低的煤耗率也将间接降低二氧化碳、硫化物以及氮氧化物的排放量^[6]。

（三）面临的挑战

就其经济效益而言，精准配煤和各环节能耗控制降低了用能成本，提前检测设备并更换易损部件可有效预防停机事故，并降低大功率用电量。随着自动化的程度提高以及智能化水平的提高，减少了劳动力的需求，在电站内部可以做到无人看守下运行，省去人工成本。相关研究表明，智能化改造以后每年节约的燃油量是巨大的，并且每年总的收益金额超过一千万。从环境保护的角度来看，集中式智能喷淋系统及喷雾设备会根据粒度传感器反馈的数据进行自动开关控制。有利于最大限度地降低粉尘污染。更为有效的燃烧技术以及较低的煤耗也将间接降低 CO₂、NO_x 的排放量。

四、结语

综上所述，高度集成化的特征及模块化的架构不是彼此割裂而独立存在的特性，而是彼此相互依存、相辅相成地推动火力发电厂输煤系统分散控制系统走向智能化的载体。前者是实现信息交互、协同工作的“智慧骨架”，后者是能够实现弹性、可扩展以及持续进化的“基因序列”。两者组合在一起已在国内众多火电厂的实践中证明了其对于提升系统安全性、经济性与兼容性的可行性。这既是适应当前能源发展新形势的要求，更是面向能够深度参与可再生能源消纳以及支撑新型电力系统安全稳定运行的智能火电厂的发展选择，发展方向应该在持续技术创新的同时，在标准制定、管理变革等方面同步发力，最大程度释放智能化改造动能。

参考文献

- [1] 吕超伦. 基于 DCS 的电厂燃煤锅炉优化控制系统设计与实现 [J]. 科学技术创新, 2025, (19): 74-77.
- [2] 杨洪芳. 火电厂 DCS 系统数据异常识别与处理方法研究 [J]. 锅炉制造, 2025, (05): 62-64.
- [3] 陈桐. 火电厂 DCS 系统温度测点异常跳变原因及防范 [J]. 电力设备管理, 2025, (15): 79-81.
- [4] 王永兴. 自动化仪表故障 DCS 诊断与远程维护技术 [J]. 中国仪器仪表, 2025, (07): 89-92.
- [5] 吴泽刚, 王安熠. 基于 DCS 系统的火电厂智慧监盘技术研究 [J]. 仪器仪表用户, 2025, 32(07): 110-112+115.
- [6] 郭晓娇. 浅析核电厂 DCS 控制系统老化问题的优化管理策略 [J]. 中国设备工程, 2025, (S2): 63-65.

影响钙钛矿量子点稳定性的因素以及其稳定性的方法

赵珺文

西安石油大学材料与工程学院, 陕西 西安 710065

DOI:10.61369/ME.2026010036

摘 要 : 随着全球能源需求的增长和温室气体的排放, CO₂ 作为主要的温室气体, 其转化技术受到了广泛的关注和讨论。卤化物钙钛矿纳米晶凭借可调带隙, 高吸光系数, 长载流子扩散长度被视为一种极具潜力的理想材料, 但是其结构不稳定, 易受环境影响, 本文介绍了 ABX₃ 型钙钛矿的结构以及其结构不稳定的原因, 总结了目前提高其稳定性的方法, 并对未来钙钛矿的研究方向进行展望。

关 键 词 : 卤化物钙钛矿; 表面包覆; 表面钝化

The Factors Influencing the Stability of Perovskite Quantum Dots and The Methods for Stabilizing Them

Zhao Junwen

School of Materials Science and Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an, Shaanxi 710065

Abstract : With the increasing global energy demand and greenhouse gas emissions, CO₂, as a primary greenhouse gas, has drawn widespread attention and discussion regarding its conversion technologies. Halide perovskite nanocrystals are regarded as a highly promising material due to their tunable bandgap, high absorption coefficient, and long carrier diffusion length. However, their structural instability and susceptibility to environmental factors limit practical applications. This article delineates the structure of ABX₃-type perovskites and elucidates the underlying causes of their structural instability. Furthermore, it summarizes current strategies for enhancing their stability and offers perspectives on future research directions in perovskite materials.

Keywords : halide perovskites; surface coating; surface passivation

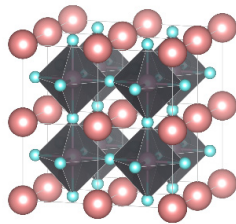
引言

随着全球能源需求的增长和温室气体排放的增加, CO₂ 气体如何通过光催化转化成可被利用的清洁能源受到了大家的广泛关注。然而, 现阶段的光催化 CO₂ 还原技术, 依旧面临光催化剂稳定性不足、量子效率偏低以及选择性调控困难等诸多挑战。^[1] 因此设计开发稳定性强, 高转化率以及良好转化率的光催化剂是我们研究的重要目标。相较于传统光催化剂稳定性差, 载流子迁移率低, 光吸收范围窄等问题,^[2] 卤化物钙钛矿纳米晶 (Halide Perovskite Nanocrystals, HP NCs) 凭借可调带隙, 高吸光系数, 长载流子扩散长度在光催化领域展现了不容忽视的发展潜能。^[3]

目前研究重点聚焦于以铅卤钙钛矿为代表的金属卤化物,^[4] 基于此本文首先概述了金属卤化物钙钛矿的结构性能, 介绍了提高其稳定性的方法, 对金属卤化物钙钛矿材料未来发展进行展望。

一、金属卤化物钙钛矿的结构

卤化物钙钛矿纳米晶的典型晶体结构为 ABX₃ 型钙钛矿构型。在该结构中, A 位通常由有机阳离子占据; B 位一般为二价金属阳离子 (如 Pb²⁺), X 位则为卤素阴离子 (I⁻, Br⁻, Cl⁻ 等)。这些八面体通过共顶点连接, 在三维空间延展形成钙钛矿晶体的骨架结构, 从而构成高度对称的立方晶系。从结构图中我们可以看出 A 离子的半径过大会导致其他离子无处安置导致结构扭曲, 而 A 离子半径过小会导致钙钛矿基本结构无法成型, 基于此, 人们常用容忍因子 t 来衡量纳米晶结构稳定性。



1.1 卤化物钙钛矿典型晶体结构

容忍因子是衡量钙钛矿晶体结构稳定性的关键因素, 其公式

为其中 r_A, r_X, r_M 分别表示 A 离子, X 离子, M 离子的离子半径。其理想值为 0.813 ~ 1.107,^[5] 据先前研究表明 t 大于 0.9 的时候八面体结构会像立方相倾斜, 当 t 小于 0.8 时, 易形成正交或三方晶系结构。^[6]

二、提高钙钛矿结构稳定性方法

虽然卤化物钙钛矿材料在能效转换方面表现出色, 但是其结构及其不稳定, 容易受到外界环境的影响。为了提高其稳定性, 使其能够更好的在实际中应用生产, 目前我们主要采用表面包覆, 离子掺杂来提高钙钛矿结构的稳定性

(一) 表面包覆

表面包覆是一种提高钙钛矿纳米晶稳定性的方法,^[7] 具体来说就是在钙钛矿表面包覆一层稳定坚固的外壳来提高纳米晶的稳定性。钟海政团队^[8] 聚焦“通过聚合物包覆解决钙钛矿纳米晶稳定性差”的关键问题, 选择聚偏氟乙烯 (PVDF) 作为包覆材料, 这种方法可有效避免 CsPbBr₃ 遇到高温分解。利用 PVDF 分子链与钙钛矿中的离子相互作用固定钙钛矿量子点, 阻止其在环境中发生离子扩散、团聚或重结晶; 同时利用 PVDF 的致密分子结构物理隔绝水分和氧气来减少外部环境诱导的降解。通过这种方法制备的样品光致发光量子产率 (PLQY) 高达 94.6% ± 1%, 接近理论最大值, 远超传统油酸 / 油胺配体钝化的钙钛矿纳米晶 (通常 PLQY < 80%); 采用多孔氧化铝包覆, 构建复合材料也可以提升钙钛矿纳米晶的稳定性。Bousanti 团队^[9] 采用原子层沉积 (ALD) 技术, 构建 CsPbBr₃ QD/AlOx 无机纳米复合材料。选用高稳定性 AlOx 作为保护层, 既解决高分子包覆热稳定性差的问题, 又通过 ALD 技术精准控制薄膜厚度, 在实现高效保护的同时保留材料光学性能。经过复合后的材料, 经过太阳光照射, 水中浸泡, 高温加热后性能无明显变化。稳定性得到了显著提升。陈洪燕课题组^[10] 采用“两步原位生长法”制备高稳定性复合材料。相较于单纯热注射法合成的量子点, 使用 ZIFs 包覆的样品稳定性显著提升, ZIFs 壳层有效隔绝了水氧侵蚀, 避免了 CsPbBr₃ 的降解的问题, 确保材料在复杂环境 (如潮湿、光照) 下仍能保持结构完整与光电性能稳定。相较于纯 CsPbBr₃ 材料, ZIFs 的高比表面积增强了 CO₂ 吸附能力; 二者的协同作用促进了光生载流子的分离与转移, 提高了载流子利用效率, 最终提升了催化反应速率与选择性。

(二) 离子掺杂

根据前文的介绍我们知道提高 CsPbI₃ 的 t 是提升其稳定性最

有效的方法之一。对于全无机 CsPbI₃ 钙钛矿, 增大 A 位阳离子的尺寸和减小 B 位阳离子和 X 卤素阴离子的半径可以调节 t 值进而稳定钙钛矿晶相。^[11]

陈任杰团队^[12] 采用热注入法制备锌离子掺杂溴化铯铅钙钛矿纳米晶体 (CsPbBr₃:Zn²⁺ NCs), Zn 的离子半径与 Pb 相似, 能够以掺杂的形式进入 CsPbBr₃ 的晶格位点从而优化晶格的原子排布, 提高整个钙钛矿晶格的形成能, 抑制空位缺陷产生; 另外掺杂过程优化了纳米晶表面态, 减少非辐射复合中心, 形成的界面结构进一步稳定表面。经过锌掺杂后的纳米晶光致发光量子产率 (PLQY) 高达 91.3%, 半峰全宽仅 15.5 nm, 显示出窄带高亮度发光特性; 环境空气稳定性大幅提升, 解决了纯 CsPbBr₃ 易降解的问题。另外铅的毒性及泄漏问题是限制钙钛矿材料规模化应用的重要因素, 通过掺杂 Zn 可以间接降低铅的泄漏风险, 提升应用安全性稳定性。王的团队^[13] 采用酸沉淀法合成 0D Cs₂Hf (ClBr)₆:Mo⁴⁺ 钙钛矿粉末, 通过调节 Cl⁻ 与 Br⁻ 比例优化晶格环境; 掺杂 Mo⁴⁺ 在钙钛矿晶格中引入新的杂质能级, 构架价带和到导带之间跃迁通道, 弥补纯 Cs₂HfCl₆ 材料的近红外发光缺失; 另外 Mo⁴⁺ 离子可选择性捕获晶格缺陷 (如空位、杂质原子), 促使载流子优先通过辐射跃迁释放能量, 从而提升发光效率; 同时 Br⁻ 部分取代 Cl⁻ 后, 降低晶格对称性, 显著增强辐射跃迁概率, 提升近红外发光强度。

三、未来发展展望

目前, 学界改善 LHP-QDs 稳定性的核心策略主要包括表面包覆、离子掺杂及表面配体钝化三类。本文系统阐述了这三类主流稳定化技术的基本作用原理与现阶段研究进展: 表面包覆通过 PVDF 聚合物或者氧化铝形成防护层, 隔绝外界侵蚀; 离子掺杂将 Zn²⁺、Bi³⁺ 等异质离子引入晶格, 强化晶体结构稳定性; 表面配体钝化通过硫酸根衍生物等配体与量子点表面缺陷配位, 减少非辐射复合中心。尽管上述方法均能不同程度提升稳定性, 但仍存在各自局限, 如配体易解吸、掺杂浓度难以精准调控、包覆层易导致光致发光猝灭等问题亟待解决。未来研究需重点聚焦优化制备工艺以实现降本简化与规模化生产, 深入探究配体作用、离子掺杂的微观作用机理, 同时大力开发低毒或无铅钙钛矿量子点体系以降低 Pb²⁺ 毒性风险, 最终突破商业化应用瓶颈。

参考文献

- [1] Monticelli S, Talbot A, Gotico P, et al. Unlocking full and fast conversion in photocatalytic carbon dioxide reduction for
- [2] 谭灿灿, 周迎梅, 周亚文, 等. 光催化二氧化碳还原催化剂的研究现状 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2025, 45(03): 126-128.
- [3] Wang Z, Mak C H, Feng J, et al. Nanoscale halide perovskites for photocatalytic CO₂ reduction: product selectivity, strategies implemented, and charge-carrier separation [J]. Journal of Materials Chemistry, A: Materials for Energy and Sustainability, 2024, 12(32): 36. DOI: 10.1039/D4TA02446J.
- [4] 李鑫, 张太阳, 王甜, 等. 金属卤化物钙钛矿光催化的研究进展 [J]. 化学学报, 2019, 77(11): 1075-1088.
- [5] Formability of ABX₃ (X=F, Cl, Br, I) halide perovskites [J]. Acta Crystallographica, 2010, 64(6): 702-707. DOI: 10.1107/S0108768108032734.
- [6] Kovalenko M V, Protesescu L, Bodnarchuk M I. Properties and potential optoelectronic applications of lead halide perovskite nanocrystals [J]. Science, 2017, 358(6364): 745. DOI: 10.1126/science.aam7093.
- [7] 何晓雄, 周浩, 何青泉, 等. 表面包覆稳定铅卤化物钙钛矿纳米晶研究进展 [J]. 发光学报, 2021, 42(11): 1701-1721.
- [8] ZHOU Q C, BAI Z L, LU W G, et al. In situ fabrication of halide perovskite nanocrystal-embedded polymer composite films with enhanced photoluminescence for display backlights [J]. Adv. Mater., 2016, 28(41): 9163-9168.
- [9] LOIUDICE A, SA R I S, OVEISI E, et al. CsPbBr₃ QD / AlOx inorganic nanocomposites with exceptional stability in water, light, and heat [J]. Angew. Chem. Int. Ed., 2017, 56(36): 10696-10701.
- [10] KONG Z C, LIAO J F, DONG Y J, et al. Core@ shell CsPbBr₃ @ zeolitic imidazolate framework nanocomposite for efficient photocatalytic CO₂ reduction [J]. ACS Energy Lett., 2018, 3(11): 2656-2662.
- [11] 张地伟, 吴永真, 朱为宏. 金属离子掺杂提升全无机 CsPbX₃ 钙钛矿太阳能电池稳定性研究进展 [J]. 应用技术学报, 2020, 20(02): 111-117.
- [12] Chen, R.; Xu, Y.; Wang, S.; Xia, C.; Liu, Y.; Yu, B.; Xuan, T.; Li, H., Zinc ions doped cesium lead bromide perovskite nanocrystals with enhanced efficiency and stability for white light-emitting diodes. Journal of Alloys and Compounds 2021.
- [13] Wang, C.; Wang, J.; Wang, D., Efficient near-infrared photoluminescence and thermal stability in Mo⁴⁺ doped lead-free halide perovskites. Optical Materials 2025.

火力发电汽轮机通流部分精细化检修工艺优化研究

周迪

安徽华电宿州发电有限公司，安徽 宿州 234000

DOI:10.61369/ME.2026010037

摘 要： 本文针对火力发电汽轮机通流部分精细化检修工艺进行了优化方面的研究工作，在分析汽轮机通流部分检修现状和存在的问题之后，论述了汽轮机通流部分检修对于提高汽轮机效率、保证机组的安全稳定运行的作用。依据实际检修经验，详细介绍了汽轮机通流部分每个重要部件的精细化检修工艺过程，针对本文当中提出的具体优化措施和改进方案并借助实际案例证明了优化方案的可行性，为火力发电企业汽轮机通流部分精细化检修工艺提供了理论及实践指导。同时利于提升汽轮机的通流效率、降低发电成本、提高企业竞争力。

关 键 词： 火力发电；汽轮机；通流部分；精细化检修

Research on the Optimization of Fine Maintenance Technology for the Flow Path Section of Thermal Power Turbines

Zhou Di

Anhui Huadian Suzhou Power Generation Co., LTD., Suzhou, Anhui 234000

Abstract： This paper focuses on the optimization of fine maintenance processes for the flow passages of thermal power generation steam turbines. After analyzing the current status and existing issues in the maintenance of these passages, it discusses the role of such maintenance in improving turbine efficiency and ensuring the safe and stable operation of units. Based on practical maintenance experience, the paper provides a detailed introduction to the fine maintenance process for each critical component of the steam turbine's flow passages. It also presents specific optimization measures and improvement plans proposed in this paper, supported by real-world case studies to demonstrate the feasibility of these optimization plans. This work offers theoretical and practical guidance for the fine maintenance processes of steam turbine flow passages in thermal power generation enterprises. Additionally, it helps enhance the flow efficiency of steam turbines, reduce power generation costs, and boost corporate competitiveness.

Keywords： thermal power generation; steam turbine; flow part; fine maintenance

引言

在能源结构中，火力发电所占比例仍然很大，汽轮机是火力发电的重要设备之一，汽轮机的工作好坏会直接影响到发电企业经济效益的高低及能源的利用效率。汽轮机通流部分是蒸汽变成机械能过程的最直接体现部位，包括叶片、汽封、隔板、转子等部件，汽轮机通流部分工作状况的好坏直接决定了汽轮机的热效率、出力大小和安全性。进入新动力时代后，电厂对节能减排的要求越来越高，同时由于汽轮机的运行参数也越来越高，对于汽轮机通流部分检修的质量也有了更高的要求。传统汽轮机通流部分检修工艺技术中各个工序并没有形成统一的检修标准，且检测方式比较老旧落后，并不能很好的达到检修作业所需要的要求。这些均无法满足目前高效、安全和环保等高标准的要求。

一、汽轮机通流部分精细化检修的重要性

（一）提高汽轮机运行效率

通过精细检修控制好通流部分的各部件尺寸精度以及装配间隙，减少蒸汽的泄漏，减小流道内流动的阻力，从而提高汽轮机

的热效率；经测算，如果汽封间隙缩小了0.1mm,汽轮机的热耗率就降低了0.2%–0.3%，所以对于叶片型线的修磨与完善可以在一定程度上改善蒸汽的流场，使汽轮机有更优异的做功能力^[1]。

（二）保障机组安全稳定运行

精细化检修能够及时发现并消除通流部分的潜在缺陷，如叶

片裂纹、汽封磨损、转子不平衡等，避免因部件故障引发的机组振动、停机等事故，延长设备使用寿命，提高机组运行的可靠性与安全性。

（三）降低发电成本

提高汽轮机运行效率意味着减少燃料消耗，降低发电成本。同时，精细化检修减少了设备故障频率，降低了维修费用和停机损失，提高了发电企业的经济效益。

二、火力发电汽轮机通流部分检修现状及问题分析

（一）检修现状

现在大部分火力发电厂汽轮机通流部分检修工作仍然采用定期检修和故障检修并存的方式。定期检修按照固定的检修时间和运行小时数来进行对通流部分的各个重要零部件的检查、保养；故障检修是在发现汽轮机转动时有较大震动或者设备本身效率下降时进行的重点的检查维修工作。检修工艺中检修方式上都是采用人工来检查设备，比如使用游标卡尺去量叶片尺寸、用眼去观察叶片有无损伤等。检测设备比较落后，无法发现设备的隐蔽性缺陷，不能了解设备真实的工作情况^[2]。并且检修过程中没有制定统一的标准和规范，因为不同的企业、同一企业的机组都有不一样的检修标准，所以检修质量都不一样。

（二）存在问题

1. 检修标准不统一

不同的发电企业对于汽轮机通流部分的检修制订的检修标准没有统一的要求，有些企业按照以前的老的标准开展检修，不能满足新型汽轮机的技术要求，可能导致过度或者不足的检修。火力发电汽轮机通流部分检修中存在问题：各个发电厂，每个检修队伍都是根据自己的实际情况，或是按照参照相关的标准进行检修工作的。由于各个电厂在检修工作中所使用的标准不一致，因此检修时会存在一些缺陷^[3]。比如：各电厂叶片安装间隙检修就存在较大差别。某电厂按照较宽老的标准检修，允许有较大的误差；某电厂则按新的标准检修，要求非常准确。其结果造成了检修质量高低相差极大，有些已经经过检修过的设备还隐藏着危险因素。

2. 检测手段落后

传统的检测方法不易于发现微小裂纹、内部缺陷等，不能提前察觉到可能存在的安全隐患。如叶片内部的疲劳裂纹，常用的肉眼检查以及简单的测量无法检测到，可能会引起叶片断裂，造成严重事故；大部分电厂还在采用老式的直接依靠人肉眼去看或用简单的测量工具测量的方式来进行检测，看不见细小的缺陷，比如叶片里面，哪些是隐藏着的小裂纹？还有比如汽封齿的磨损程度等这些重要的东西是不能够通过传统的方式来进行检测的^[3]。有些比较先进的无损检测方法，比如超声相控阵、激光散斑干涉等方法已经非常成熟了，但是一些比较老的电厂也没有去投入实践应用这些先进手段。

3. 工艺精细度不足

部件修复、安装过程中，加工精度不够，装配间隙不合理等

原因会影响汽轮机运行效率，如汽封间隙过大，会造成蒸汽泄露过多，使得汽轮机热效率下降；若汽封间隙过小，则容易引起动静部件之间摩擦，危及机组运行安全。在叶片修复工作中，个别检修人员只关注形貌恢复，并未注意对表面粗糙度、型线精度等指标进行把关，叶片的气动性能无法得到充分的恢复，从而影响了汽轮机的效率。汽封间隙调修没有使用精度高的测量工装以及精细的调整工艺，导致汽封间隙大小难于精准控制，造成汽封间隙过大而发生蒸汽泄漏，或者过小而出现汽封齿与转子发生摩擦的现象^[4]。转子动平衡校正不够精密，以致于转子高速转动时产生振动，导致加速设备磨损，缩短设备的使用寿命，并且后期维护成本也会提高。

4. 信息化程度低

检修过程中缺乏有效数据记录和分析方法，无法对设备状态进行长期跟踪和评价，不利于检修经验的总结与检修工艺的改进；多数电厂检修管理仍沿用传统模式，检修过程及设备运行相关参数均以手工方式记入纸质记录文件中，数据信息零散且分散，查找麻烦，不具备快速的信息资源共享和有效利用的基础；检修人员无法及时获得设备的历史检修数据和运行状态数据，不能及时做出正确的检修决策；没有建立信息化的管理系统进行检修作业过程的监控、预警及设备运行情况的跟踪管理，因而存在因未能及时发现检修过程中存在的问题而延误检修工期的现象。

三、汽轮机通流部分精细化检修工艺优化措施

（一）叶片检修工艺优化

1. 检测技术升级

运用超声波探伤、渗透探伤、涡流探伤等先进的无损检测手段，对叶片表面和内部缺陷进行全面检测；采用激光扫描技术准确获取叶片型线，与设计模型比对分析叶片型线是否满足规定的要求。采用无损检测方法中的超声相控阵检测技术等先进技术代替传统的超声检测方法，提高超声成像的质量，可以清楚的看见叶片内部缺陷成像，可以精准地测出叶片的微小裂纹以及气孔缺陷的位置和大小，并且装配上激光扫描测量设备，用3D扫描仪获取叶片型线的数据，与原来的3D设计模型相比来确定型线偏移，误差控制在 $\pm 0.05\text{mm}$ 之内；使用涡流热成像技术检测叶片的表面应力集中点，根据得到的热成像图像可以看出整个叶片表面的应力分布情况，可以预见叶片可能产生的疲劳损伤隐患，在一定程度上预防了事故的发生，避免了由于检修不到位造成的影响^[5]。

2. 修复工艺改进

采用激光熔覆、等离子喷涂等先进技术对叶片表面存在的磨损、腐蚀缺陷进行修复，并且要重点保证修复部位的耐磨性及耐腐蚀性得到较大程度的提升。对于修复后叶片重量偏差的要求必须严格，在确保修复叶片的质量均匀分布的情况下，尽可能避免修复叶片在安装过程中产生转子不平衡现象；对于叶片表面有轻微磨损的情况，采用激光熔覆修复技术，在磨损处熔覆与叶片基体成分相近的合金粉末，从而形成致密、高强度的修复层；修复

层的结合强度高,硬度能达到叶片原始硬度,因此能够有效恢复叶片的表面性能;对叶片边缘出现的小面积损伤可以采用3D打印技术修复。基于缺损部位三维数据信息,制作与原叶片相匹配的修复件,利用焊接、粘接工艺将修复件固定在叶片上,从而达到使修复后叶片外形精密度高、气动性能良好的目的。

3. 安装精度控制

叶片安装过程中通过高精度测量器具控制叶片的轴向、径向间隙,保证叶片与叶轮、隔板的装配精度;用专用工装定位装置,保证叶片的安装角度正确;叶片安装之前,用高精度水平仪、激光对中仪校正转子水平度、同轴度小于0.02mm。安装叶片用专用叶片安装定位工装,工装与叶片、轮槽配合间隙不超过0.01mm,保证叶片安装位置正确。安装完毕后,用振动测试仪测叶片振动特性,其振动幅值必须达到设计要求,如超过,则需要再次调整叶片安装角度或叶片安装位置,直到叶片振动合格为止。以保证叶片安装精度满足汽轮机的正常、高效、安全运行。

(二) 汽封检修工艺优化

1. 汽封结构改进

采用新型高效汽封,比如布莱登汽封、蜂窝汽封等,采用弹簧预紧结构,机组启动和停机时,由于机组转速低,汽封齿与转子间存在一定的间隙,不会产生摩擦,只有当机组进入稳定运行状态时,在蒸汽压力的作用下,才会将汽封齿紧贴到转子上,起到减少蒸汽泄漏的作用;使用新型梳齿式汽封结构,在原来的基础上增加了梳齿的数量,缩小了齿距,提高了防止蒸汽泄漏的能力;在梳齿表面上涂耐耐磨、耐高温的陶瓷材料,增加汽封齿的耐磨性和抗腐蚀性能,延长汽封寿命;设置可调式汽封结构,汽封体上面设计调节装置,按照汽轮机的不同工况调节汽封间隙,进而达到降低汽封蒸汽泄漏量的目的,提高汽轮机的工作效率,可以提高汽轮机的热效率0.5%~1%左右^[6]。

2. 间隙精确调整

采用激光测距仪、塞尺等仪器设备对汽封间隙值进行测量,并按汽轮机不同工况下热膨胀特性来留足热态间隙,保证汽封无论是在启停还是其它工况下都能达到既不漏汽也不刮伤转子的合理的汽封间隙值。用激光测量汽封间隙,精度可以达到0.005mm;测量后,用专用汽封间隙调整垫片来进行调整,调整垫片种类齐全、厚度多样的特点能够充分保证调整到的汽封间隙准确无误;同时利用有限元分析软件,仿真模拟汽封间隙的变化带来的汽轮机性能上的变化,从而确定合适的汽封间隙;调整完成后,再使用激光测量仪进行测量,以保证各处间隙满足设计要求。

3. 汽封片修复与更换

针对汽封片磨损、变形的情况,运用专用修复工具进行整形修复;不能修复的及时更换,确保汽封片的平整度及弹力;对汽封片轻微磨损的情况,可以采取喷砂处理的方式将汽封片的表面氧化层、磨损痕迹清除干净,随后在其表面进行镀铬处理,镀层厚度在0.02~0.05mm之间,并使汽封片的表面恢复硬度及光洁度;对于汽封片磨损比较严重或者已经产生裂纹的情况,则需要更换,选用与原汽封片材质一致、性能优良的新汽封片,采用专用安装工器具安装,保证汽封片安装到位、固定牢靠、各部

分间隙均匀,最后对汽封片装配完成后的机组进行气密性试验,检查汽封片的密封效果,满足相关标准要求的泄漏率即可。

(三) 转子检修工艺优化

1. 转子状态检测

借助先进的振动监测及轴系对中检测手段,全面检测转子振动特性和轴系同心度,并根据振动频谱判定转子是否出现不平衡、不对中及轴弯曲等故障;运用振动频谱分析方法状态检测转子,将振动传感器安装在转子的不同位置处,实时监测转子的振动状况,经过频谱分析软件对监测信号进行处理,分析振动频率的成分,判别转子是否存在不平衡、不对中或轴承故障等问题;并用红外热像仪对转子表面温度进行检测,并绘出转子表面温度分布云图,找出局部过热部位,分析是否因摩擦、磨损或内藏缺陷造成的现象;定时对转子做磁粉探伤、超声波探伤工作,看转子表面和内部有无裂纹等缺陷。

2. 动平衡校正

采取高精度动平衡设备对转子做动平衡试验,从试验结果中准确计算配重块的质量与安放位置,然后对转子进行动平衡校正;大吨位的转子还可以采取在线动平衡的方式,在机组运转的过程中做动平衡调整,大大降低停机时间。建立转子动平衡试验台,用高速动平衡法对转子进行动平衡校正。将加速度传感器、位移传感器安放在转子的不同径向或轴向上,试验台上采集并存储转子在不同的转速下的振动信号,用专门的动平衡分析软件得到不平衡量大小及相位,并据此在转子上选择相应位置加配重块或者减配重块,配重块的材质与重量需要依据转子结构与平衡要求进行选择。最后反复试重与调试之后,使转子剩余不平衡量满足要求。当转子运行于工作转速下,其振动幅值应小于等于25 μ m。

(四) 检修流程优化

1. 制定标准化检修流程

根据汽轮机通流部分各部件的技术要求以及特点,编写出详细而统一的检修过程及作业指导书,并规定各个检修环节的具体操作步骤、技术标准及质量验收要求。针对汽轮机通流部分结构特点及检修要求,制定完整的标准化检修程序,并将检修过程中各环节具体的操作步骤、技术要求、质量标准、验收方法进行细化并书面化后发至检修人员,如:对于叶片检修,具体明确叶片拆卸、清洗、探伤检查、修复、安装的每一项内容的具体操作规范及注意事项;对于汽封检修,则要对汽封间隙测量、调整、汽封片修复更换的相关工艺进行明确规定。实现检修工作标准,有序开展,提高检修质量和检修工作效率。

2. 引入信息化管理系统

建立汽轮机通流部分检修信息化管理系统,实现检修过程中相关数据的实时记录、存储和分析,系统能查到设备的历史检修数据、设备状态变化趋势等,在检修过程中给检修人员合理选择检修方案起到有效的参考。建立汽轮机通流部分检修信息化管理系统,把检修计划、检修记录、设备档案、备品备件管理等内容归集到系统中去进行统一管理;检修人员可以通过移动终端实时录入检修数据,上传检修照片及视频,检修管理人员能够通过系统实时了解检修进度、查看质量记录等,以此发现和解决问题;

利用大数据分析技术挖掘和分析检修数据来预测设备故障的发展趋势，并据此来确定合理的检修计划安排，从而提高检修管理水平的科学化和智能化程度。

四、结论

火力发电汽轮机通流部分精细化检修工艺优化对提高汽轮机运行效率、保证机组的安全稳定运行具有重要意义，在检测技术

改造、修复工艺改良及流程优化等方面合理地使用新技术能很好地改善传统检修工艺的缺点，提高检修质量以及工作效率，在现场操作过程中发电企业根据自身的设备情况以及技术水平不断完善精细化检修工艺并加强对检修的过程管理，让汽轮机通流部分始终保持良好的运转状态，在今后的时间里，检测技术和修复工艺都在不断的提升下，未来汽轮机通流部分精细化检修工艺也会得到更好的完善，为火力发电行业的高质量发展提供有利支持。

参考文献

- [1] 李传海, 葛云双, 翟观文. 火力发电厂汽轮机设备安装检修技术分析 [J]. 清洗世界, 2024, 40(10): 181-183.
- [2] 王磊, 赵怀玉, 王洪平. 火力发电厂汽轮机检修过程的精细化管理研究 [J]. 冶金与材料, 2023, 43(3): 32-34.
- [3] 杨奥飞. 火力发电厂汽轮机常见故障分析与检修研究 [J]. 电力系统装备, 2022(8): 141-143.
- [4] 王胜利. 火力发电厂汽轮机振动故障分析与检修 [J]. 新型工业化, 2021, 11(1): 132-133, 147.
- [5] 王杰. 火力发电厂汽轮机检修过程的精细化管理分析 [J]. 清洗世界, 2021, 37(11): 129-130.
- [6] 李阳. 火力发电厂汽轮机检修过程的精细化管理分析 [J]. 中国设备工程, 2021(12): 266-267.

邻近地铁区间电力迁改工程结构安全性研究

郝君亮

中国中铁股份有限公司, 北京 100039

DOI:10.61369/ME.2026010039

摘 要 : 本文针对城市地下空间开发中电力迁改工程邻近地铁区间施工的安全问题, 结合现场勘察、数值模拟及监测验证方法, 系统研究了施工过程对既有地铁结构的影响规律与风险控制。研究以冲洪积平原地层为背景, 采用 MIDAS GTS NX 建立三维地层—结构耦合模型, 模拟竖井开挖、顶管掘进及拉管施工全过程。通过计算与监测数据对比验证, 模型误差控制在 $\pm 10\%$ 以内。结果表明, 顶管施工为主要风险阶段, 地铁隧道最大竖向上浮 0.63mm、横向偏移 0.39mm, 均显著低于 1.5mm 控制限值, 地铁结构处于安全稳定状态。灵敏度分析显示, 地层弹性模量、地下水位及掘进推力为关键影响因素。基于研究结果, 提出“预测—监测—校核—修正”闭环风险控制体系和适用于地铁保护区施工的变形控制标准。

关 键 词 : 地铁区间; 电力迁改; 数值模拟; 结构变形; 风险控制

Research on Structural Safety of Adjacent Metro Section Power Relocation Project

Hao Junliang

China Railway Group Limited, Beijing 100039

Abstract : This study systematically investigates the impact of construction activities on existing subway structures and risk control measures in urban underground space development, focusing on safety issues during power relocation projects adjacent to subway sections. Through field surveys, numerical simulations, and monitoring validation methods, the research establishes a 3D stratum–structure coupling model using MIDAS GTS NX software, simulating the entire process of shaft excavation, pipe jacking, and pipe pulling operations. Comparative analysis between computational results and monitoring data confirms model accuracy within $\pm 10\%$ error margin. Findings indicate that pipe jacking constitutes the primary risk phase, with maximum vertical displacement of 0.63mm and lateral deviation of 0.39mm in subway tunnels—both significantly below the 1.5mm safety threshold—demonstrating structural stability. Sensitivity analysis identifies three critical influencing factors: stratum elastic modulus, groundwater level, and excavation thrust. Based on these findings, the study proposes a closed–loop risk control system (predict—monitor—verify—correct) and deformation control standards tailored for subway protection zone construction.

Keywords : subway section; power relocation; numerical simulation; structural deformation; risk control

引言

城市地下空间开发的密集化导致轨道交通与市政管线设施的空间重叠愈加频繁。地铁区间结构通常位于复杂地层中, 其长期稳定性不仅受地应力与地下水位影响, 还受到邻近施工扰动的直接作用^[1]。近年来, 电力迁改、综合管廊及顶管工程的大量实施, 使得地铁保护区施工安全问题逐渐成为城市建设管理的重点。已有研究指出, 邻近地铁施工可导致隧道附加变形、结构受力重分布及地层扰动扩散, 对既有结构及轨道几何状态造成潜在影响。若控制不当, 可能诱发隧道裂缝、管片错台、渗漏及轨道不平顺等安全隐患。因此, 建立科学的安全评估体系与风险控制标准, 对保障地铁安全运营与市政施工协调具有重要意义。本文以某城市电力迁改工程邻近地铁区间为研究对象, 采用地层—结构耦合数值分析与实测数据对比验证方法, 研究施工引起的结构响应规律及风险等级, 为城市轨道交通保护区施工提供理论支持与工程指导。

一、研究方法

（一）研究思路与技术路线

研究采用“现场勘察—数值模拟—监测验证—风险评估”四阶段技术路线。通过地质勘察与结构检测掌握场地及地铁区间的现状条件；基于三维有限元软件建立地层—结构耦合模型；模拟顶管、竖井与拉管全过程施工；最后结合现场监测数据，对模型进行验证并提出控制标准。

（二）地质与结构条件

研究区位于冲洪积平原中部，地形平缓，地层以粉质黏土、粉细砂及人工填土为主，地下水埋深约4~14m，属潜水类型。地铁区间结构为双线盾构隧道，外径6.0m、环厚0.3m、环宽1.2m，采用C60钢筋混凝土管片，接缝以橡胶垫圈密封防水。结构检测结果表明混凝土强度与防水性能优良，钢筋保护层厚度36~49mm，无结构裂缝与渗漏，综合评定等级为一级（TCI>98），具备良好的安全储备条件。

（三）模型构建与参数设置

基于MIDAS GTS NX平台建立三维地层—结构模型。模型范围沿线路方向150m、横向100m、深度23m，以消除边界效应。施工过程划分如表2-2所示。

表2-2 模型施工工序表

工序	说明
阶段1	2#、3#、5#竖井分段开挖1（3.5m）；恢复井挖土约2.0m。
阶段2	2#、3#、5#竖井分段开挖2（3.5m）。
阶段3	2#、3#、5#竖井分段开挖3（开挖至设计井底）
阶段4	M-PP拉管施做
阶段5	2#~3#竖井间顶管顶进，约17m
阶段6	3#~5#竖井间顶管顶进1，约3.0m。
阶段7	3#~5#竖井间顶管顶进2，约3.0m。
阶段8	3#~5#竖井间顶管顶进3，约3.0m。
阶段9	3#~5#竖井间顶管顶进4，约3.0m。
阶段10	3#~5#竖井间顶管顶进5，约3.0m。
阶段11	3#~5#竖井间顶管顶进6，约3.0m。
阶段12	3#~5#竖井间顶管顶进7，约3.0m。

隧道结构按线弹性模型模拟，土体采用修正Mohr-Coulomb本构模型。底部设固定边界，侧面法向约束，顶面自由。顶管施工推力与土体摩擦通过面荷载模拟；拉管及恢复井开挖采用分步卸载法。列车荷载以静动组合加载，动荷载按简谐函数施加以反映运行扰动效应。模型计算采用全量更新法求解，残差精度控制在 1×10^{-5} 以内。

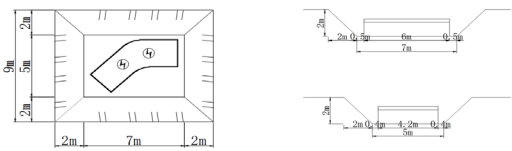


图1 恢复转角井基槽开挖设计图

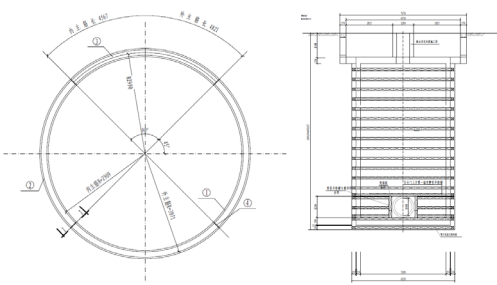


图3 5.2m顶管工作井支护设计图

（四）模型验证与监测方案

为验证模拟精度，在施工前布设地铁隧道监测点。监测内容包括隧道竖向沉降、横向偏移及环缝错台；测点间距10m，施工期每日监测一次。通过与实测数据对比，模型预测误差控制在±10%以内，表明计算模型具有良好的可靠性与工程适用性。

二、结果与讨论

（一）地层与结构变形特征

模拟结果表明，施工扰动对地层应力分布与隧道结构变形影响显著。隧道竖向上浮为主要变形形式，最大值出现在右线拱顶邻近恢复井位置，上浮0.63mm；横向最大偏移为0.39mm，位于左线北侧。轨道结构最大竖向变形0.60mm、横向0.35mm，均远低于1.5mm控制限值。竖向变形沿线路方向平缓分布，影响范围约15m；横向变形范围约10m（见图4）。顶管掘进引起的反压与卸载效应是主要变形源。

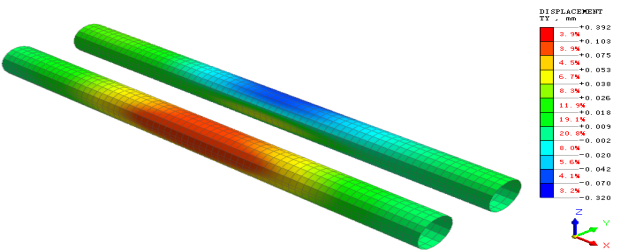


图4 既有地铁区间横向变形云图（极值）

粉质黏土层因黏聚力高、压缩模量大，结构响应较弱；粉细砂层抗剪强度低、孔隙比高，易发生附加变形，隧道上浮量增幅约25%。地下水位波动对上浮趋势具有放大作用，当水位上升0.5m时，竖向上浮增加约0.05mm。因此需通过降水控制和排水措施稳定地下水环境。

（二）工况对比与灵敏度分析

对比顶管与拉管施工阶段可知，顶管施工引起的地层扰动明显大于拉管。顶管推进压力增大5%时，隧道竖向上浮增长约8%；而注浆压力提高10%可有效减小变形约12%。灵敏度分析表明，地层弹性模量、地下水位与施工推力为影响结构响应的三大关键因素。相较之下，黏聚力与内摩擦角的变化对隧道响应影响较小，说明施工控制较地层固有性质更为主导。

（三）风险分区与控制标准

根据《城市轨道交通结构安全保护技术规范》及表3-1分区标准，结合结构响应分析结果，该工程影响区划分为“邻近一般

影响区”，风险等级判定为二级。结合表3-2计算结果，各监测点变形均未超过规范限值。为保障地铁运营安全，建议控制标准如下：竖向与横向变形控制值1.5mm，报警值1.2mm，预警值1.0mm，变形速率不超过0.5mm/d。当监测结果接近报警值时应立即减缓掘进、加密注浆并启动应急评估。风险控制应采用“预测—监测—校核—修正”闭环管理，形成动态响应机制。

表 31 基坑工程周边影响分区表

受影响程度分区	邻近度
强烈影响区	基坑周边 0.7L 范围内
显著影响区	基坑周边 0.7L~1.0L 范围内
一般影响区	基坑周边 1.0L~2.0L 范围内
弱影响区	基坑周边 2.0L 范围外
注：1、 $L=H\tan\left(45^{\circ}+\frac{\phi}{2}\right)$ ，H为基坑开挖深度， ϕ 为土的平均内摩擦角；	
2、本表适用于深度大于5m的基坑。	

表 3-2 既有地铁区间隧道结构变形结果（mm）				
变形种类	计算工序	变形值	变形方向	变形部位
竖向变形	阶段1	0.633	上浮	恢复井挖土位置隧道拱顶
	阶段2	0.627	上浮	恢复井挖土位置隧道拱顶
	阶段3	0.628	上浮	恢复井挖土位置隧道拱顶
	阶段4	0.623	上浮	恢复井挖土位置隧道拱顶
	阶段5	0.623	上浮	恢复井挖土位置隧道拱顶
	阶段6	0.623	上浮	恢复井挖土位置隧道拱顶
	阶段7	0.623	上浮	恢复井挖土位置隧道拱顶
	阶段8	0.623	上浮	恢复井挖土位置隧道拱顶
	阶段9	0.623	上浮	恢复井挖土位置隧道拱顶
	阶段10	0.622	上浮	恢复井挖土位置隧道拱顶
	阶段11	0.622	上浮	恢复井挖土位置隧道拱顶
	阶段12	0.622	上浮	恢复井挖土位置隧道拱顶
横向变形	最不利工况	0.392	偏向恢复井挖土侧	区间隧道左线管片北侧

（四）施工优化与监测措施

研究结果显示，竖井开挖与顶管推进阶段为主要风险阶段。建议采用“分层开挖、分区注浆、限速掘进”施工策略。掘进压力应控制在平衡土压力 $\pm 5\%$ 范围内，同步注浆压力为 1.1~1.3 倍土压力。顶管与竖井交汇处应实施地层加固以减小扰动，优选水泥－水玻璃双液浆法。监测系统需覆盖隧道结构、轨道形位与地表沉降三部分，并以信息化系统实现实时数据传输与预警联动。

三、结论

（一）建立的三维地层－结构耦合模型可有效反映邻近地铁施工引起的结构响应，验证误差控制在 $\pm 10\%$ 。

（二）顶管及竖井施工阶段为主要风险源，最大坚向上浮 0.63mm、横向偏移 0.39mm，均低于控制限值，结构安全可控。

（三）风险等级判定为二级，施工扰动范围有限，轨道与隧道结构处于稳定状态。

（四）提出的控制标准与监测体系具备工程可实施性，可推广应用于地铁保护区内的市政迁改工程。

（五）未来研究应引入流固耦合与列车动载作用，以提升模型预测精度并完善邻近施工风险控制理论。

综上，本文通过数值模拟与实测数据结合的研究方法，系统揭示了邻近地铁区间电力迁改施工的变形规律与风险机理，为城市轨道交通保护区施工安全评估与科学管理提供了理论基础与实践依据。

参考文献

[1] 龙彪. 地铁隧道与邻近建筑工程施工相互影响的数值分析 [J]. 城市轨道交通研究, 2019, 22(08): 86–88+93. DOI: 10.16037/j.1007–869x.2019.08.019.
[2] 朱建明. 深基坑施工对邻近运营地铁车站影响的数值分析 [J]. 建筑施工, 2010, 32(04): 299–301.
[3] 陈涛, 翟超, 范鹏程, 等. 基坑开挖对邻近既有地铁结构变形影响的数值分析与研究 [J]. 勘察科学技术, 2018, (03): 1–6+31..

