

现代工程学

Modern Engineering



ART AND TECHNOLOGY PRESS INC.

(517 666 0904)

263 S KENWOOD ST 560

CASPER, WY 82601

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

Complimentary Copy



ART AND TECHNOLOGY PRESS INC.
(United States)

Editorial Board Member

Xiaoli He

Zhejiang Tongfang Engineering Management Consulting Co., Ltd.

Xiaoshi Yan

Chifeng Saige Architectural Planning and Design Co., Ltd.

Jiaming Li

North CMA Technology Co., Ltd.

Xiao Yu

Chongqing Zongheng Engineering Design Co., Ltd.

Wei Su

Cinotop Electronics Co., Ltd.

Yi Wu

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



现代工程学

Modern Engineering

第3卷 第6期 2026年6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 超高排架柱组合式钢模板整体浇筑
高效振捣施工技术 王旭, 孙鹏, 孙炳营, 李想, 李卫亚
High-efficiency Vibration-Compacted Integral Casting Construction Technology for
Ultra-high-span Frame-column Composite Steel Formwork Systems Wang Xu, Sun Peng, Sun Bingying, Li Xiang, Li Weiya
- 004 土地基压实度现场检测影响因素及优化检测方法探究 吴冰杰
An Exploration of Factors Affecting the Field Testing of Soil Foundation
Compaction Density and the Optimization of Testing Methods Wu Bingjie
- 007 建筑施工塔式起重机安全隐患分析及防控措施研究 邓国
Analysis of Safety Hazards and Research on Prevention Measures for Tower
Cranes Used in Construction Projects Deng Guo
- 010 复杂地层钻孔灌注桩钢管护筒精确定位
与钻进安装技术研究 辛举, 李想, 房玉焕, 李卫亚, 孙炳营
Research on Precise Positioning and Drilling Installation Techniques for Steel
Cores of Complex Geological Conditions: Drilled Pile Foundation Projects Xin Ju, Li Xiang, Fang Yuhuan, Li Weiya, Sun Bingying
- 014 公路工程设计中路线布设及路基设计要点研究 陈彬
Research on Key Points of Route Layout and Subgrade Design in Highway
Engineering Design Chen Bin
- 017 BIM技术在工程项目管理中的应用探讨 陈骏祺
Discussion on the Application of Bim Technology in Engineering
Project Management Chen Junqi
- 020 BIM技术在市政路桥施工中的实际应用分析 黄任荣
Analysis of the Practical Application of BIM Technology in Municipal Road
And Bridge Construction Huang Renrong
- 023 高层建筑塔式起重机双支平衡支撑
附着式安装技术研究 孙炳营, 王祥, 郭祥革, 辛举, 赵云帅
Research on the Installation Technology of Double-Supported Balanced
Supports for Tower Cranes in High-rise Buildings Sun Bingying, Wang Xiang, Guo Xiangge, Xin Ju, Zhao Yunshuai
- 026 建筑工程全过程安全标准化建设实施思路 张鹤龄
Implementation Ideas for Whole-Process Safety Standardization
Construction of Construction Engineering Zhang Heling
- 029 老旧小区消防管网提升改造技术与实践研究 徐涛
Technical and Practical Research on the Upgrading and Renovation of Fire
Protection Pipeline Systems in Old Residential Areas Xu Tao
- 032 公路改扩建新旧路面拼接裂缝病害分析及施工防裂技术 李晓美, 王雅倩
Disease Analysis and Comprehensive Anti-Crack Construction Technology of Splicing
Cracks of Old and New Pavements in Highway Reconstruction and Expansion Li Xiaomei, Wang Yaqian

035	ALC 板材轻质隔墙及饰面层一体化装配式施工技术研究 Research on the Integrated Prefabricated Construction Technology for ALC panels, Lightweight Partition Walls, and Facing Layers	仲光凯, 王乃可, 辛举, 张志兴, 孙炳营 Zhong Guangkai, Wang Naike, Xin Ju, Zhang Zhixing, Sun Bingying
039	国土空间规划与城市高质量发展研究 Research on Territorial Spatial Planning and High-Quality Urban Development	李友华 Li Youhua

机械工程 | MECHANICAL ENGINEERING

042	浅圆仓仓壁滑模施工工艺与实践 The Sliding Formwork Construction Technology and Practice of the Shallow Circular Silo Wall	于意朝, 王长雷, 魏国梁 Yu Yichao, Wang Changlei, Wei Guoliang
045	探讨工业企业生产设备管理与维护 Discussing the Management and Maintenance of Production Equipment in Industrial Enterprises	庄德麟 Zhuang Delin
048	汽车制动系统性能分析与优化研究 Performance Analysis and Optimization Research of Automobile Braking System	张照硕, 张博然, 张恩硕, 董志轩, 焦学瑞 Zhang Zhaoshuo, Zhang Boran, Zhang Enshuo, Dong Zhixuan, Jiao Xuerui
051	一种紧凑型电动大流量排水抢险车 A Compact Electric High-Flow Drainage Rescue Vehicle	钱文华, 鲁晗, 樊乾坤 Qian Wenhua, Lu Han, Fan Qiankun
055	永磁同步电机控制系统的稳定性研究 Research on the Stability of Permanent Magnet Synchronous Motor Control System	王圣超, 王炳强, 陈立 Wang Shengchao, Wang Bingqiang, Chen Li
058	浪涌保护器在防雷设计中的应用 The Application of Surge Protectors in Lightning Protection Design	夏世豪 Xia Shihao
061	装配式智能伸缩悬挑卸料平台快速安拆施工工艺与应用 Construction Technology and Application of Rapid Assembly and Disassembly for Prefabricated Intelligent Extensible Cantilever Unloading Platforms	孙鹏, 孙炳营, 张仁莹, 辛举, 张志兴 Sun Peng, Sun Bingying, Zhang Renying, Xin Ju, Zhang Zhixing
064	冷连轧小辊径工作辊轴承失效原因剖析及预防 Analysis and Prevention of Failure Causes in Small Diameter Working Rolls for Cold Rolling	马岩 Ma Yan
066	急曲线大纵坡条件下超大直径盾构隧道上层车道板一体化拼装施工 Integrated Assembly Construction of Upper-Level Lane Slabs for Ultra-Large-Diameter Shield Tunnels Under Conditions of Sharp Curves and Steep Longitudinal Slopes	强晓 Qiang Xiao

能源工程 | ENERGY ENGINEERING

070	关于变电站电气设备运行状态自动化预测方法的研究 Research on Automatic Prediction Methods for the Operating Status of Electrical Equipment in Substations	刘一平 Liu Yiping
073	电力工程 EPC 总承包项目风险管理的优化措施研究 Research on Optimization Measures for Risk Management in EPC General Contracting Projects of Power Engineering	郭亚真 Guo Yazhen
076	双重预防机制在煤矿安全管理中的实践困境 Practical Challenges of the Dual Prevention Mechanism in Coal Mine Safety Management	郭子豪 Guo Zihao
080	玻璃用石英砂磁选除铁技术及工艺参数分析 Analysis on Magnetic Separation Iron Removal Technology and Process Parameters of Quartz Sand for Glass Production	任俊杰 Ren Junjie
083	碳达峰目标下机场地面运行低碳管控技术路径分析 Analysis of Low-Carbon Management Technology Paths for Airport Ground Operations under the Carbon Peak Goal	杨金鹏 Yang Jinpeng
086	3×3MW 余热发电智控仪表与 APC 应用工艺研究 Research on Intelligent Control Instrument and APC Application Process of 3×3MW Waste Heat Power Generation	太荣山 Tai Rongshan
089	风电箱变常见电气故障诊断、检修及电网安全防护措施 Common Electrical Fault Diagnosis, Maintenance, and Grid Safety Protection Measures for Wind Power Substations	马世杰 Ma Shijie

信息工程 | INFORMATION ENGINEERING

093	桥梁桩身完整性检测中超声波透射法的应用 Application of Ultrasonic Transmission Technique in the Inspection of Bridge Pier Integrity	张庆 Zhang Qing
096	机器视觉驱动的生猪三维建模及瘦肉率智能检测研究 Research on 3D Modeling of Live Pigs and Intelligent Detection of Lean Meat Percentage Driven by Machine Vision	曲明月, 郭媛媛, 王成全, 杨佳宁, 杨淑婷 Qu Mingyue, Guo Yuanyuan, Wang Chengquan, Yang Jianing, Yang Shuting
099	瓜果搬运机器人自主导航技术研究与应用 Research and Application of Autonomous Navigation Technology for Fruit and Vegetable Handling Robots	张守兴, 李昂 Zhang Shouxing, Li Ang
102	解析道路与桥梁工程测绘技术的应用 Analyzing the Application of Surveying and Mapping Technology in Road and Bridge Engineering	张炳艺 Zhang Bingyi
105	通信传输线路外力故障定位方法与闭环运维策略——基于市政施工场景 External Force Fault Location Method and Closed-Loop Operation and Maintenance Strategy for Communication Transmission Lines —Based on Municipal Construction Scenarios	程思远 Cheng Siyuan

109	低空无人机侦测与反制一体化系统中的干扰资源动态分配策略研究 Research on Dynamic Allocation Strategy of Jamming Resources in Integrated Low-Altitude UAV Detection and Countermeasure System	孙永茂 Sun Yongmao
112	智能传感与 AI 融合的建筑结构健康监测系统应用研究 Application Research on Building Structure Health Monitoring System with Integration of Intelligent Sensing and AI	林佳森 Lin Jiasen
116	西藏防雷监管改革现状与创新策略研究 Study on the Current Status and Innovative Strategies of Lightning Protection Supervision Reform in Xizang	格桑次仁, 白觉平措 GeSang Ciren, Baijue Pingcuo
119	信息化在数字气象观测装备保障中的运用研究 Research on the Application of Informationization in the Support of Digital Meteorological Observation Equipment	吕航, 张铭益, 聂龙江 Lv Hang, Zhang Mingyi, Nie Longjiang

超高排架柱组合式钢模板整体浇筑高效振捣施工技术

王旭¹, 孙鹏², 孙炳营³, 李想³, 李卫亚³

1. 山东开放大学, 山东 济南 250000

2. 山东省工程咨询院, 山东 济南 250000

3. 中建三局第一建设工程有限责任公司, 湖北 武汉 430000

DOI:10.61369/ME.2026060031

摘 要 : 超高排架柱现浇施工中, 传统的做法经常会出现振捣不密实、钢筋偏位、工期延长等现象。本文以工程实例为依托, 对组合式钢模板整体浇筑、高效振捣的施工方法进行阐述, 提出工艺要点和质量控制方法。从实际应用来看, 利用定型定位件、分层振捣开孔、一次浇筑成型的方法可以使柱体混凝土合格率大于98%, 工期比原方案缩短约40%, 单柱综合成本减少4823元。该方法适合于工业厂房、大型仓库等工程的构件施工, 可以给同类构件施工提供借鉴。

关 键 词 : 超高排架柱; 组合式钢模板; 整体浇筑; 高效振捣; 施工技术

High-efficiency Vibration-Compacted Integral Casting Construction Technology for Ultra-high-span Frame-column Composite Steel Formwork Systems

Wang Xu¹, Sun Peng², Sun Bingying³, Li Xiang³, Li Weiya³

1. Shandong Open University, Jinan, Shandong 250000

2. Shandong Engineering Consulting Institute, Jinan, Shandong 250000

3. China Construction Third Bureau First Engineering Co., Ltd. Wuhan, Hubei 430000

Abstract : In the cast-in-place construction of ultra-high bay frame columns, traditional methods often lead to issues such as inadequate compaction, steel reinforcement displacement, and prolonged construction duration. Based on practical engineering cases, this paper elaborates on the construction method involving the integral casting of composite steel formwork combined with high-efficiency vibration techniques, and proposes key process parameters and quality control measures. From a practical application perspective, employing standardized positioning components, layered vibration at openings, and a single-stage casting approach can achieve a qualified concrete strength rate for the columns exceeding 98%, shorten the construction period by approximately 40% compared with the original plan, and reduce the comprehensive cost per column by RMB 4,823. This method is well-suited for component construction in industrial plants, large warehouses, and similar projects, and can serve as a valuable reference for the construction of comparable structural elements.

Keywords : ultra-high-span frame column; composite steel formwork; integral casting; high-efficiency vibration compaction; construction technology

引言

工业厂房、大型公共建筑中的超高排架柱承受主要的结构荷载, 施工质量好坏直接影响到结构的安全和耐久^[1]。常规施工大多采取分段支模、分次浇筑的方式, 模板刚度小容易变形, 混凝土振捣存在死角, 钢筋位置难以准确控制, 柱体易产生蜂窝、麻面、根部缺陷、轴线偏移等问题^[2]。分段施工要等到下层混凝土强度达到要求之后才开始施工, 工期长、用工和机械投入大, 整体效率低^[3]。

为了克服上述问题, 在工程中采用了组合式钢模板整体浇筑高效振捣的施工方法。该方法把定型钢筋定位件、组合钢模板体系和分层振捣做法结合起来, 达到钢筋定位准、模板装拆快、混凝土浇筑密实的目的^[4]。该方法已经获得了多项专利, 并且在工程中得到了应用, 但是现有的资料大多只对单项技术改进进行阐述, 没有给出完整的工艺和质量控制的说明^[5]。本文根据现场实践, 对本方法的原理及操作要点进行整理, 给类似工程提供借鉴。

作者简介:

王旭(1994.07.27-), 男, 汉族, 山东济南人, 山东开放大学, 硕士研究生, 中级工程师;

孙鹏(1985.07.28-), 男, 汉族, 山东商河人, 山东省工程咨询院, 本科, 中级工程师;

孙炳营(1996.01.26-), 男, 汉族, 河南新乡人, 中建三局第一建设工程有限责任公司, 本科, 工程师;

李想(1995.11.25-), 男, 汉族, 吉林吉林人, 中建三局第一建设工程有限责任公司, 本科, 工程师;

李卫亚(1996.11.03-), 男, 汉族, 江苏徐州睢宁县人, 中建三局第一建设工程有限责任公司, 本科, 工程师。

一、工程概况

本文以新增年产1万吨航空级高温合金和研发中心项目为例。项目位于锡山经济技术开发区，总建筑面积21916 m²，厂房最大跨度23.08m，基坑最深-9m，单层最大支模高度12.7m。主体结构含100根超高排架柱，截面1m×0.8m，高度10m，采用C40混凝土，抗震设防烈度7度，设计使用年限50年。施工全过程采用组合式钢模板整体浇筑、高效振捣的方法，配合定型钢筋定位卡、精密测量仪器和专用振捣机具，实行标准化作业管理。

二、核心技术原理与工艺特点

（一）技术核心原理

1. 钢筋精准定位原理

用内外两层定型定位卡具控制钢筋位置。内定位卡在钢筋笼内侧进行固定，外定位卡设置在主筋上，每隔800~1000mm设一道，起到箍筋约束和限位的作用^[6]。外定位卡四周用混凝土锥形套帽固定，紧贴模板内侧，使钢筋笼轴线与设计轴线偏差不超过2mm，保护层厚度均匀^[12]。

2. 模板稳定支撑原理

外定位卡四周设混凝土锥形套帽，紧贴模板内侧，使钢筋笼轴线与设计轴线偏差不大于2mm，保护层厚度均匀可控^[7]。模板底部设带调节丝杆的支撑框架，配合斜撑拉结固定，用水准仪与全站仪校正，使模板垂直度偏差不大于3‰，最大变形控制在0.4mm以内，满足规范要求^[8]。

3. 分层高效振捣原理

钢模板沿高度方向间距不大于5m，水平方向间距不大于60cm预留振捣孔。混凝土由下往上分段浇筑，分段振捣，逐段封闭振捣孔^[9]。振捣棒从孔位伸入混凝土内部，快插慢拔，插入下层混凝土不少于10cm，保证层间结合密实，消除柱脚等薄弱部位振捣盲区，减少外观缺陷。

（二）工艺核心特点

1. 施工效率高

组合钢模板构造简单，安装、拆除速度快，比传统的木模支设时间减少约1/3；混凝土一次浇筑完成，不需要分段间歇养护，单柱施工周期由原来的14d缩短到现在的8d，效率提高约40%^[10]。

2. 成型质量优

钢模板强度与刚度较好，可减少胀模、漏浆；钢筋定位准确，混凝土振捣充分，柱体轴线偏差不大于3mm，表面平整度偏差小于2mm，一次成型合格率高于98%^[11]。

3. 综合效益佳

单柱能节省模板费用1980元、人工费533元、窝工费2310元，共节约费用4823元；工期缩短有利于加快整个进度，降低后期维修及整改成本^[13]。

三、关键施工工艺流程与操作要点

（一）施工工艺流程

施工准备→柱基承台施工→定位卡具加工制作→柱体钢筋绑

扎→模板支撑架调平→柱体模板拼装安装→混凝土浇筑与振捣→模板拆除与混凝土养护→质量验收。

（二）关键操作要点

1. 柱基承台施工

承台施工按设计预埋8根Φ32mm、长1.2m的地脚螺栓，埋深80cm，外露40cm，用于固定模板支撑托架^[14]。承台及短柱钢筋绑扎完毕后连续浇筑混凝土，振捣时不得碰到预埋件和模板，保证基础成型质量。

2. 钢筋绑扎与定位

承台混凝土达到强度后进行柱筋绑扎，主筋用接驳器与预留钢筋连接^[15]。在短柱上方300~400mm处安装第一道外定位卡，以内部卡件为基准向上绑扎箍筋，每绑扎3~4m高度安装一段模板。模板安装前在外定位卡上固定混凝土套帽，控制保护层厚度。

3. 模板拼装与调平

模板使用前清理浮浆和锈蚀，涂刷脱模剂，拼缝处粘贴密封条防止漏浆^[16]。将两片钢模板吊装合拢，穿螺栓初步紧固，用调节丝杆校正标高与水平，再由中间向两端逐步拧紧螺栓，腰部螺栓采用双螺母防松。模板接长后安装斜撑并锚固地面，保证整体稳定^[24]。

4. 混凝土浇筑与振捣

混凝土浇筑前核算用量，保证供应连续，防止中途中断^[17]。混凝土经溜槽从顶部入模，浇筑至振捣孔上方约10cm时暂停，由下向上插入Φ50mm振捣棒振捣，每点振捣20~30s，以表面不再下沉、无明显气泡为宜^[18]。振捣后封闭该层振捣孔，向上继续浇筑到柱顶。

5. 模板拆除与养护

混凝土带模养护至设计强度75%后拆模^[19]。先拆除斜撑，挂好吊绳，松开螺栓，用千斤顶缓慢顶推使模板脱离，禁止敲击。拆模后柱面洒水湿润，喷涂养护剂，覆盖薄膜保湿，养护时间不小于7d，保证强度正常发展。

四、质量与安全控制措施

（一）质量控制标准

严格按照工程测量规范（GB 50026-2020）、混凝土结构工程施工质量验收规范（GB 50204-2015）等现行规范执行，主要控制如下指标

1. 钢筋定位，主筋间距偏差≤5mm，钢筋笼轴线偏差≤3mm；

2. 模板安装：垂直度偏差≤3‰，表面平整度偏差≤2mm，拼缝宽度≤1mm；

3. 混凝土浇筑表面无蜂窝麻面、烂根等缺陷，垂直度偏差≤5mm，截面尺寸偏差±5mm。

（二）质量保证措施

1. 材料进场验收，钢筋、钢模板、混凝土原材料进场时核对质量证明文件，按规范要求抽样复检，不合格材料不得使用；^[20]

2.过程监测管控使用水准仪、全站仪实时监测模板标高等垂直度，每安装2米模板就做一次复核；混凝土浇筑期间有专人巡查模板支撑情况，发现涨模、漏浆立即处理；

3.振捣质量管控：振捣作业配备充足照明，确保操作清晰，避免漏振、过振；每个振捣孔完成振捣后做好标识，防止重复振捣。

（三）安全保障措施

1.作业人员管理：特种作业人员持证上岗，高空作业按规定系挂安全带、佩戴安全帽等防护用品；^[21]

2.设备安全控制塔吊吊装模板时地基稳固，支腿底面加垫木；模板拆除设专人指挥，下方设警戒区，无关人员不得进入；

3.应急预案的编制工作要针对高空坠落、物体打击、模板失稳等风险情况来制订专项应急预案，并且还要配备相应的应急救援物资，还要定期开展应急演练活动。

五、应用效益分析

（一）技术效益

采用双层定位卡具+组合式钢模板的方式可以克服超高排架柱钢筋定位不准、模板不稳的技术难题^[22]。分层振捣工艺彻底消除柱体振捣盲区，提升混凝土密实度，优化柱体结构受力性能，质量通病发生率降低90%以上，整体技术水平达到行业先进标准^[23]。

（二）经济效益

100根排架柱使用该技术施工，总节省模板费19.8万元、人

工费5.33万元、窝工费23.1万元，合计节约成本48.23万元。施工周期缩短40天，加快了项目资金的周转速度，为后面工序提前进场创造条件，取得明显的间接经济效益。

（三）社会效益

该技术的应用推广使超高排架柱施工趋于标准化、规范化，促进建筑施工工艺更新换代。完善的质量控制体系和安全保障措施，给类似工程提供可以复制、可以推广的施工经验，得到业主和监理单位的高度认可，有广阔的市场前景。

六、结语

超高排架柱组合式钢模板整体浇筑高效振捣施工技术，整合钢筋定位装置、模块化钢模板与分层振捣工艺，有效解决传统施工中钢筋定位偏差、模板刚度不足、混凝土振捣不密实等问题。该技术明显提高施工效率和工程质量，综合效益明显，把技术创新和工程应用结合起来。经过工程实践证明，该技术操作简便、质量好、经济性好，适合作为工业厂房、仓库等大跨度高排架柱的施工技术。可以继续对模板材料及施工工艺进行改良，利用BIM技术以及智能监测系统，达到施工全过程数字化、智能化控制的目的，给建筑行业的高质量发展赋予更为强大的技术支持。

参考文献

[1] 王要武, 吴宇迪. 装配式建筑发展现状与趋势 [J]. 土木工程学报, 2020, 53 (S1): 30-36.

[2] 刘加平, 田倩. 超高性能混凝土的研究与应用进展 [J]. 建筑材料学报, 2019, 22 (4): 505-515.

[3] 邓黎明, 房佳彦, 高明. 超高排架柱组合式钢模板施工技术创新与应用 [J]. 施工技术, 2024, 53 (12): 89-93.

[4] 张孝存, 阿世政, 李丹阳. 长三角区域建筑业施工技术发展统计分析 [J]. 统计科学与实践, 2022 (3): 40-43.

[5] 赵军, 王清标. 精密测量技术在建筑施工中的应用研究 [J]. 施工技术, 2019, 48 (12): 105-108.

[6] 林树枝, 陈振明. 新型模板技术在工业建筑中的应用 [J]. 建筑科学, 2019, 35 (5): 123-128.

[7] 高振锋, 李慧. 建筑施工模板体系优化研究 [J]. 工程管理学报, 2018, 32 (3): 56-60.

[8] 陈立军, 周婷. 大型构件施工质量管控技术应用 [J]. 建筑经济, 2020, 41 (4): 45-49.

[9] 宋嘉玲. 混凝土高效振捣技术在建筑施工中的应用 [J]. 建筑施工, 2024, 46 (8): 1342-1344+1357.

[10] 李小阳, 张其林. 预制装配式混凝土结构连接技术研究现状 [J]. 建筑结构学报, 2021, 42 (3): 1-18.

[11] 陈明中, 李丽娟. 国外大型建筑施工技术经验及启示 [J]. 建筑经济, 2018, 39 (7): 35-39.

[12] 孙国良, 张颖. 混凝土构件安装精度控制技术 [J]. 施工技术, 2020, 49 (8): 76-79.

[13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构工程施工质量验收规范: GB 50204-2015 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.

[14] 黄延铮, 吴涛. 预制混凝土立柱施工技术 [J]. 建筑机械, 2019 (8): 86-89.

[15] 王强, 李娜. 新型建筑材料应用研究 [J]. 新型建筑材料, 2018, 45 (11): 102-105.

[16] 刘勇, 李静. 大型构件安装技术研究 [J]. 公路交通科技, 2018, 35 (8): 78-83.

[17] 李强, 赵静. 混凝土浇筑工艺优化 [J]. 建筑机械, 2020 (3): 79-82.

[18] 吴智深, 李富民. 高性能混凝土在土木工程中的应用进展 [J]. 土木工程学报, 2021, 54 (5): 1-20.

[19] 张其林, 王磊. 建筑施工设备选型研究 [J]. 建筑机械, 2018 (11): 76-80.

[20] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑施工安全检查标准: JGJ 59-2011 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.

[21] 田丽媛, 刘虎民. 建筑工程全过程管理探究 [J]. 散装水泥, 2022 (4): 8-10.

[22] 周光权, 付志玉. 建筑施工新技术应用研究 [J]. 南昌航空大学学报 (自然科学版), 2023, 37 (1): 77-85.

[23] 吕娟. 建筑施工质量控制研究 [J]. 科学技术创新, 2017 (33): 109-110.

[24] 刘晓敏, 叶金国, 张云, 等. 建筑施工技术创新机制研究 [J]. 环境保护与循环经济, 2024, 44 (2): 1-41.

土建地基压实度现场检测影响因素及优化检测方法探究

吴冰杰

湖北精兴建设工程质量检测有限公司，湖北 荆门 448000

DOI:10.61369/ME.2026060001

摘 要： 土建地基压实度现场检测是评价填筑层密实状态与施工质量的重要依据。围绕环刀法、灌砂法及压实度计算原理，分析压实工艺参数、现场环境条件和检测仪器性能对检测结果的影响。结果表明，碾压次数由3次增至5次时，现场干密度由1.62 g/cm³提高至1.75 g/cm³，7次碾压后达到1.80 g/cm³，但增幅趋缓；粉质黏土填料含水率宜控制在12%—15%；灌砂筒未经规范标定时误差可达±2%，校准后可收敛至±0.5%。据此提出检测流程前置控制、含水率修正和异常点复检等优化策略，以提升压实度评价的准确性与工程适用性。

关 键 词： 土建地基；压实度检测；灌砂法；环刀法；含水率修正

An Exploration of Factors Affecting the Field Testing of Soil Foundation Compaction Density and the Optimization of Testing Methods

Wu Bingjie

Hubei Jingxing Construction Engineering Quality Inspection Co., Ltd. Jingmen, Hubei 448000

Abstract： The on-site testing of the compaction degree of civil engineering foundations is a crucial basis for evaluating the compactness of the embankment layer and the quality of construction. By focusing on the methods of ring penetrometry, sand injection, and the principles of compaction degree calculation, this analysis examines the impact of compaction process parameters, on-site environmental conditions, and the performance of testing instruments on the results. The findings indicate that when the number of compaction cycles was increased from 3 to 5, the on-site dry density increased from 1.62 g/cm³ to 1.75 g/cm³, and reached 1.80 g/cm³ after 7 cycles, albeit with a slower rate of increase. The moisture content of fine clay-based fill materials should be kept within the range of 12% to 15%. The error of the sand injection tube without proper calibration can be as high as ±2%, but this can be reduced to ±0.5% after calibration. Based on these findings, optimization strategies such as pre-control of the testing process, moisture content correction, and re-inspection of anomalies are proposed to enhance the accuracy and applicability of compaction degree evaluation.

Keywords： civil engineering foundations; compaction testing; sand injection method; ring coring method; moisture content correction

在土建工程与市政道路建设中，地基填筑层的压实质量直接关系到结构承载能力、沉降稳定性和后期使用安全。若压实不足，土体孔隙率偏大，易引发不均匀沉降、路面开裂和水损害等问题；若检测结果失真，则可能导致施工质量判断偏差，影响后续工序控制。现场压实度检测能够将室内击实试验成果与施工现场实际状态相联系，为碾压遍数、铺土厚度、含水率调节及质量验收提供依据。然而，检测结果常受施工工艺、气候环境、取样扰动和仪器精度等因素影响，单纯依赖原始检测数值难以全面反映填筑层真实密实状态。因此，有必要结合现场检测方法与影响因素开展系统分析，并提出更具操作性的流程优化和数据处理措施，以提高地基压实质量控制的可靠性。

一、土建地基压实度现场检测的基础理论

土建地基压实度是评价填筑土体经碾压后密实状态的基础指标，通常将现场干密度同室内击实试验获得的最大干密度进行比值换算。因为地基承载力、沉降变形以及水稳定性均会受到孔隙结构变化的影响，现场检测不只是质量验收环节，还可为碾压遍

数、含水率调整以及分层填筑厚度控制提供依据。环刀法将定容金属环切入细粒土层并取出原状样，借助称量以及烘干测定湿密度和含水率，适宜黏性土、粉质土等扰动敏感材料；灌砂法则运用标准砂置换试坑体积，再结合试坑内土样质量计算现场密度，较适宜砂砾填料以及路基填筑层检测。工程应用中，压实度技术指标需同设计等级以及规范要求相衔接，市政道路和一般路基施

工常将压实度标准值控制在不低于95%的范围内，特殊承载区还需结合地基处理方案进行复核。

$$K=\frac{\rho_d}{\rho_{dmax}}\times 100\%$$

其中， K 表示压实度， ρ_d 表示现场干密度，单位为 g/cm^3 ， ρ_{dmax} 表示最大干密度，单位为 g/cm^3 。

二、土建地基压实度现场检测的关键影响因素分析

（一）压实工艺参数对检测结果的影响

压实工艺参数会将填筑土体的颗粒重排过程以及孔隙压缩程度直接传递到现场干密度检测结果中。由于市政道路地基填筑层通常按分层碾压组织施工，碾压次数不足时，土颗粒尚未形成较稳定的嵌挤结构，环刀法或灌砂法取得的现场干密度容易处于偏低水平；当碾压次数继续增加，土体内部大孔隙被逐步压缩，干密度呈现上升趋势，但过度碾压可能使细粒土出现局部剪胀以及表层扰动，检测值增长幅度会趋于减缓。碾压速度同样会影响压实能量传递，速度过快会缩短压路机振动轮对填筑层的作用时间，使深部土体难以获得充分压实；速度过慢则可能造成表层反复扰动，特别是在含水率接近最优含水率时更容易形成局部软化。铺土厚度也需结合压实机械吨位进行控制，厚度偏大时下部土层压实不足，试坑取样深度若覆盖该区域，检测结果会明显拉低^[1]。结合某市政道路地基工程的现场记录，不同碾压次数对应的干密度变化见表1，数据表明，5次碾压后干密度较3次已有明显提高，7次碾压仍有增长，但增幅有所收窄，说明碾压次数需同速度、铺土厚度以及填料含水状态协同确定。

表1 不同碾压次数对应的现场干密度值

碾压次数	现场干密度 g/cm^3
3次	1.62
5次	1.75
7次	1.80

（二）现场环境条件对检测结果的影响

现场环境条件会将土体含水状态以及取样扰动共同传递到压实度检测结果中，其中含水率属于最敏感的控制变量。最优含水率是指土体在既定击实能量下达到最大干密度时对应的含水状态，市政道路常见粉质黏土填料的适宜控制区间多集中在12%—15%。当现场含水率低于12%时，土颗粒表面水膜不足，颗粒间摩擦阻力偏大，碾压能量难以促使细颗粒充分滑移以及重新排列，环刀样或灌砂试坑计算得到的干密度容易偏低；当含水率高于15%时，孔隙水会占据可压缩空间，碾压荷载作用下容易形成弹簧土以及局部翻浆，检测值可能因表层挤密而短时偏高，也可能因取样塌边以及含水率测定误差而出现波动^[2]。

环境温度还会改变水分蒸发速率，夏季高温暴晒会使填筑层表面快速失水，造成上干下湿的含水梯度，若取样深度控制不一致，现场干密度便难以反映整层压实状态。雨天以及雨后短时间内开展检测时，雨水入渗会将表层孔隙水压力抬高，灌砂法试坑

边壁稳定性下降，标准砂置换体积容易被扰动放大。因此，现场检测需结合施工时段、降雨间隔以及表层晾晒情况进行判断，避免将环境诱发的含水率偏差误判为压实工艺不足。

（三）检测仪器性能对检测结果的影响

检测仪器性能会将量测环节中的系统误差直接放大到压实度判定之中，其中灌砂筒标定精度、称量设备灵敏度以及环刀容积误差最容易影响现场干密度计算。对于灌砂法而言，标准砂流速稳定性与筒体开关密封状态若控制不严，试坑回填砂量便会出现偏差，进而将试坑体积估算带偏；若仪器未按规程完成标定，测得压实度的误差范围通常可扩大至 $\pm 2\%$ ，而经过容积、砂密度以及流量一致性校准后的灌砂筒，误差一般可收敛至 $\pm 0.5\%$ 。在现场操作层面，试坑开挖边界不整齐、取样含有松散浮土以及称量前后未及时去除附着砂粒，都会造成数据波动。因此，检测结果并不单纯取决于土体密实程度，还取决于仪器精度、校准周期以及操作动作的规范化程度，只有将设备状态与取样流程同步纳入控制，压实度评价才更接近地基实际受力状态^[3]。

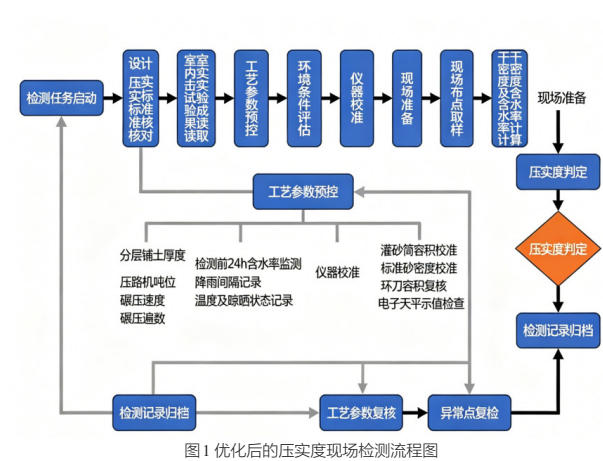
除了前面提到的情况之外，现场经常使用的烘干设备和取土工具会间接对检测结果产生干扰，烘箱温控如果失准就会导致土样含水率测定出现偏差，钢制取土铲和刮刀若磨损变形会破坏试坑原有形态与土体结构，便携式测距工具精度不足还会造成试坑深度和尺寸测算失误，各类小型辅助器具存在的老化和损坏问题常常容易被检测人员忽视，这些问题逐步累积形成综合误差进而降低压实度检测数据的真实性与可靠性，由此能够看出检测结果并非单纯取决于土体密实程度，还取决于仪器精度、校准周期以及操作动作的规范化程度，只有将设备状态与取样流程同步纳入控制压实度评价才能更接近地基实际受力状态。

三、土建地基压实度现场检测方法的优化策略

（一）基于影响因素的检测流程优化

面向土建地基填筑层压实度现场检测，流程优化应将施工控制信息前移到检测准备阶段，使检测活动不再局限于取样以及计算环节。因为压实工艺参数会直接影响现场干密度，检测前需核对设计压实标准、室内击实试验成果、分层铺土厚度、压路机吨位、碾压速度以及碾压遍数记录，将异常工况作为检测布点加密的依据。环境条件评估应围绕含水率开展连续观察，检测前24 h需监测填筑层层表以及代表性深度土样含水率，同时记录降雨间隔、晾晒时间以及现场温度变化；当含水率偏离最优含水率控制区间时，应将洒水、翻拌或晾晒处理后的复测结果纳入检测依据^[4]。

仪器校准环节需覆盖灌砂筒容积、标准砂密度、环刀容积以及电子天平示值稳定性，校准记录应同检测日期、检测人员以及样点编号建立对应关系。见图1，优化后的流程将工艺参数预控、环境条件评估以及仪器校准串联为检测前置门槛，并且将现场取样、数据复核以及异常点复检纳入闭环管理，从而减少含水率波动、试坑扰动以及设备误差对压实度判定的干扰。



（二）检测数据处理方法的优化

压实度现场检测数据在进入质量判定前，应将含水率偏离带来的密度波动纳入修正范围。由于粉质黏土填筑层对水分状态较为敏感，原始压实度若直接同设计标准进行比较，容易将上下湿、雨后入渗或暴晒失水形成的局部差异混同为碾压质量差异。数据处理环节可将室内击实试验确定的最优含水率当作基准值来使用，并且将现场实测含水率同该基准值的偏差转化为修正系数。当实测含水率高于最优含水率时，修正系数随偏差增大而降

低，用以削弱孔隙水对短时密实表象的影响；当实测含水率低于最优含水率时，修正结果可反映颗粒间摩擦阻偏大导致的压实不足风险。该方法不宜替代异常点复检，而应同样点深度、取样时段以及烘干含水率记录共同分析，使压实度评价更接近填筑层实际密实状态^[5]。在此基础上，还需对同批次检测数据开展横向比对，剔除明显偏离整体区间的异常数值，结合检测点位分布、施工时段做综合研判，避免单一数据误导质量验收。该方法不宜替代异常点复检，而应同样点深度、取样时段以及烘干含水率记录共同分析，使压实度评价更接近填筑层实际密实状态

四、结语

综上所述，土建地基压实度检测应从单一结果判定转向全过程质量控制。现场检测前需核查碾压工艺、铺土厚度、含水率状态和仪器校准情况，检测中应规范取样深度、试坑成型和称量操作，检测后还应结合含水率偏差、异常点复检和施工记录进行综合判断。通过将工艺预控、环境评估、设备校准和数据修正纳入闭环管理，可有效降低检测误差，使压实度评价更符合填筑层实际受力与稳定需求。

参考文献

[1] 张宇. 路基压实度室内试验及现场自动连续检测 [J]. 交通世界, 2025, (20): 76-78.
[2] 杨刚. 回填地基检测中的多源融合三维可视化技术 [J]. 水利技术监督, 2025, (11): 31-34.
[3] 杨碧兰. 基于现场检测的水闸软土处理效果分析与施工工艺研究 [J]. 珠江水运, 2025, (9): 128-130.
[4] 郭浩然. 建筑垃圾粒料填筑地基压实工艺及质量控制标准研究 [D]. 山东建筑大学, 2025.
[5] 谢强, 王端外, 严沁茹, 等. 回填土地基压实质量现场快速检测方法探究 [J]. 石河子科技, 2025, (5): 37-38+21.

建筑施工塔式起重机安全隐患分析及防控措施研究

邓国

宁波市建业起重设备安装有限公司, 浙江 宁波 315000

DOI:10.61369/ME.2026060004

摘 要 : 塔式起重机属于建筑施工核心机械, 高空作业流程繁琐, 安全意外事故多发且损伤程度大, 针对塔式起重机运行阶段, 各类安全隐患开展剖析, 梳理机件损坏、违规操作、外界条件干扰、管控疏漏几类风险源头, 剖析隐患形成过程与潜在伤害。依托项目真实事例制定管控举措, 夯实安全管控、规整操作步骤、夯实作业人员能力、落实机件养护手段, 削减意外出现概率, 稳固工地安全状态, 给塔式起重机安全管控供给理论依据与实操参照。

关 键 词 : 塔式起重机; 安全隐患; 风险分析; 防控措施; 施工安全

Analysis of Safety Hazards and Research on Prevention Measures for Tower Cranes Used in Construction Projects

Deng Guo

Ningbo Jianye Crane Equipment Installation Co., Ltd. Ningbo, Zhejiang 315000

Abstract : Tower cranes are core construction machinery characterized by complex high-altitude operation procedures, frequent safety incidents, and significant injury risks. This study analyzes various potential hazards during tower crane operation, identifying key risk sources—including component failures, improper operations, external environmental interference, and management deficiencies—and examines the mechanisms underlying hazard formation and associated injuries. Based on real-world project cases, practical control measures are proposed to strengthen safety management, standardize operational procedures, enhance operator competence, implement proper component maintenance practices, reduce accident incidence rates, ensure site safety compliance, and provide both theoretical foundations and practical guidelines for tower crane safety management.

Keywords : tower crane; safety hazards; risk analysis; prevention and control measures; construction safety

引言

塔式起重机多用于高层建筑与大型工程施工, 场地工况多变, 起升高度大, 操作偏差或机件故障, 极易酿成重大事故, 工地塔式起重机意外事故近年频繁出现, 人身损伤与经济损失问题突出, 事故诱因不局限机械本体, 操作人员技艺、现场管控、气象地质条件都会产生作用。高危工况下排查塔式起重机运行潜在风险, 梳理事故演变特点, 对改善工地安全管控具备现实需求, 划分风险类别追溯形成缘由能够匹配适配防护手段, 降低意外频次加快施工进度, 树立作业人员防护观念, 搭建稳定可靠的工程施工环境。

一、塔式起重机施工安全隐患识别

(一) 设备结构与部件故障隐患

塔式起重机持续承受高负荷运转, 框架构件与核心零件受载荷震动磨损及外界条件侵蚀滋生安全风险, 塔身标准节、附着架、起重臂、平衡臂连接处螺栓松脱、焊缝开裂、金属形变疲劳会大幅降低整机稳定性能^[1]。钢丝绳、吊钩滑轮制动限位构件、磨损超标、制动失灵、限位失效会引发吊具坠落、机构失控及整机倾倒, 不少工地轻视设备入场核验、日常巡检、周期检测, 潜藏故障无法提早排查, 构件损坏具备突发, 连带特性一处异常会快速扩散成整体危险, 这类问题定为塔式起重机风险排查首要方向。

(二) 安装拆卸过程安全隐患

塔式起重机拆装工序技术门槛高、危险系数高, 多数安全意外事故集中在此阶段, 组装包含地基加固、标准节抬升、附着件拼接及臂架装配多项高危工序, 工序偏差动摇整机支撑状态, 地基承载能力不足、预埋点位偏移、螺栓紧固力度不够, 设备投用后出现倾斜、摇晃及坍塌隐患。拆解阶段构件受力持续变动, 工序排布失调, 吊装配合脱节和临时加固不到位, 引发构件失衡、人员坠亡、物体砸伤, 部分施工队伍拆装人员资质不全, 技术交底简略、现场调度无序, 危险程度持续升高, 拆装风险夹杂操作技术和现场管控两类问题, 全程作业前后落实管控手段。

(三) 作业环境变化带来的隐患

塔式起重机架设高度偏高, 天气场地、周边建筑交叉施工都

会干扰设备运行，环境变动催生安全问题，大风、暴雨、雷电及大雾削弱设备稳固度和遮挡操作视线，高空吊运时风力拉扯吊物晃动，臂架受力失衡提升碰撞倾覆概率，施工场地狭小，物料堆放杂乱，贴近建筑高压线缆间距不够，压缩设备转动，吊运范围诱发碰撞触电事故。工程推进中路基操作面附着高度遮挡物持续变动，原有防护条件随之改变，现场未跟随环境改动调整施工计划防护手段，塔式起重机运行危险不断堆积，环境风险随时产生没有固定规律，跟随施工进度不间断排查处置。

二、塔式起重机事故成因分析

（一）操作人员违规作业因素

塔式起重机意外多由人员违规操作引发，塔式起重机操作具备专属技术标准，驾驶员信号指挥人员协同配合决定作业稳定，判断偏差指令错乱会直接催生吊装险情，不少作业人员防护观念淡薄，未核对重物重量、吊点、方位及周边空间便启动起吊，超载、斜拉、吊体晃动等险情随之出现^[9]。部分作业人员为追赶工期，带病、疲劳上岗，甚至酒后作业、无证操作，致使设备运行全程缺乏有效管控；加之信号传递流程不规范，进一步埋下安全隐患。指挥人员手势模糊、通讯设备出现故障，且存在多人交叉指挥的情况，严重干扰驾驶员判断。塔式起重机架设高度高，违规操作触发险情后，事态扩散速度快，物体撞击、机械损伤、高空坠落等伤害极易出现，人员违规操作属于塔式起重机事故里最直观多发的诱因。

（二）现场安全管理薄弱因素

工地管控力度不足持续放大塔式起重机运行隐患，场地多工种同步施工，塔式起重机作业范围物料堆放，通道临边工作面交错排布，缺少统一调度会出现吊运路径冲撞，人员闯入危险区域，不少项目安全权责划分模糊，设备使用拆装、租赁、总包各方管控衔接松散，隐患排查，技术交底作业审批，现场督查流于表面。安全管理制度虽条文齐全，但实际落地执行力度不足：现场安全查验台账弄虚作假，设备故障整改无法形成闭环，各类违规行为处置滞后，致使安全规章约束作用持续弱化。工期紧张时，现场管理人员时常无视恶劣天气停工规定与高危作业审批程序，允许设备在不符合安全要求的工况下带病运行。权责划分、制度落实、现场督查、整改执行多环节同步缺位叠加，形成多重管控漏洞，显著增大安全事故发生概率。

（三）维护保养不到位因素

塔式起重机属于重型机械设备，长期连续高负荷运转，设备养护水平直接决定整机运行稳定性。塔式起重机作业过程中频繁完成升降、回转、变幅动作，钢丝绳、制动器、滑轮、轴承、电气、限位等零部件会持续磨损老化；若未按规定定期检查更换，微小故障极易发展为重大安全隐患。多数施工现场仅关注设备能否正常启停运行，忽视隐蔽部位安全构件检测，螺栓松动、焊缝开裂、润滑不足、线路故障等问题难以第一时间发现。现场设备养护管理存在明显短板：养护台账记录敷衍，检修周期随意延长，专业维保人员配置不足，管理人员难以精准掌握设备真实安全工况。设备停机重启、顶升加高、暴雨大风后复工等关键节点本应开展全面细致检

查，若简化检修流程便直接投入作业，会大幅提升安全风险。养护工作缺位将使设备长期处于故障临界状态，各类潜在隐患不断累积，是引发塔式起重机安全事故不容忽视的重要诱因。

三、塔式起重机安全风险评估

（一）高危作业环节风险判定

塔式起重机安全风险评估依托作业流程展开，事故概率高、损伤程度大的施工步骤定为判别核心，组装、顶升加节、附着固定、重物吊运、多机交错运行、拆解都归为高危工序，工序开展对器械工况、人员配合、场地条件及技术把控标准严苛，塔式起重机顶升加节阶段整体受力结构产生变动，液压构件故障、标准节衔接松动及顶升步骤错乱会造成架体失衡^[9]。重物吊运环节中，重物自重、吊点布设、升降速度与回转轨迹共同决定作业稳定性。超载起吊、斜拉斜吊、吊物摆动均易造成构件碰撞、重物坠落；多台塔式起重机交叉作业时，若回转作业范围重叠，且未落实防撞管控与统一调度，将进一步加剧安全风险。

（二）隐患等级划分与排查重点

塔式起重机隐患等级需结合风险发生概率、事故伤害程度、隐患整改难度综合判定，不同等级隐患配套差异化整治措施。架体变形、地基沉降、制动部件损坏、限位装置失灵、钢丝绳严重磨损等问题风险等级最高，设备一旦失控极易造成群死群伤，需列为重点排查内容。作业人员无证上岗、指挥信号混乱、超载吊运、恶劣天气违规作业等人为主导隐患，统一纳入高风险管控清单。台账记录不全、安全警示标识缺失、零部件润滑不到位等属于一般隐患，短期内不会引发重大安全事故，但长期积累会逐步演变为重大险情。现场检查不可仅停留于设备表面外观，需全面覆盖塔式起重机主体、安装基础、安全零部件、现场操作流程、管理资料及周边施工环境。通过隐患分级明确整改优先级，可消除无差别全面巡查的弊端，有效提高隐患排查整治的精准度与实施效果。

（三）事故诱发链条分析

塔式起重机安全事故极少由单一要素瞬时触发，多重隐患叠加递进推进形成事故态势，器械细微损耗、人员违规操作、管控监督空缺及场地工况变动能够串联形成连续诱因脉络，钢丝绳磨损未及时处置叠加超载吊运指挥信号偏差，重物坠落概率快速上升，地基轻微沉降搁置不管伴随顶升加节、附着高度抬升及结构受力持续恶化，大风天气下整体架体失去稳定平衡。事故演化分为隐患生成、风险扩张、管控失效事故爆发几段，任一节点落实管控手段就能阻断事故成型，梳理诱因脉络，理清各类风险要素内在关联，摒弃只处置表层问题的处理模式，塔式起重机安全管控跳出单点检查模式转向全程风险约束，器械人员场地管控四项内容纳入统一分析体系。

四、塔式起重机隐患防控措施

（一）设备检查与维护管理措施

设备检查与养护管理是塔式起重机安全管控的核心流程，能

够在安全事故发生前排查潜在缺陷、消除风险源头。针对塔式起重机结构构件、钢丝绳、制动器、滑轮、限位装置、电气系统等全套设备，应建立定期巡检与专项检测机制，对磨损、裂纹、构件松动、润滑不足等问题逐项登记并落实整改。养护工作分为日常保养与关键节点检修，设备顶升加节、长期停用、大风降雨过后，均需开展整机全面检测^[4]。依托台账巡检记录故障，复盘养护方案搭建闭环管控模式，每轮查验留存凭证全程跟进落实，养护力度加大提升器械运转稳定，提早排查隐患缩减事故发生概率，塔式起重机全程维持安全可控运行状态。

（二）人员培训与规范操作措施

作业人员实操水准影响塔式起重机运转安稳度，搭建完整培训体系帮助人员熟知器械参数、操作条例、吊运技法及防护要点，减少违规操作失误，授课内容包含高空防护防坠手段、指挥手势及突发险情处置，搭配工地实景模拟实操事故实例讲解，让人员掌握风险分辨应对办法。规范作业管控，严格执行作业审批、荷载管控、吊运流程、回转区域划分及安全限位构件使用标准，严禁超载起吊、斜拉斜吊、违规变幅等危险操作。常态化开展安全培训，统一规范操作准则，引导作业人员树立主动防护意识，作业过程中自主排查隐患并及时处置，从源头降低安全事故发生概率。

（三）现场监督与应急处置措施

场地督查险情应对能够遏制事故扩散缩减损耗规模，督查范围覆盖场地排布塔式起重机运转区域，人员操作防护器具使用，全程作业贴合既定安全准则，督查采用动态管控模式，巡回查看实时监控调度协调排查潜藏隐患，第一时间纠正违规举动。险情应对编制处置预案，划分岗位权责、配齐防护器械、组织实操演练，突发状况下现场人员快速落实管控手段，督查预案体系联动覆盖器械人员场地全部要素，提升工地抵御风险实力，各类潜藏危险纳入管控范围，抬高塔式起重机作业整体安全标准。

五、塔式起重机安全管理闭环构建

（一）隐患排查机制完善

塔式起重机安全管理闭环依托隐患排查体系构建而成，风险辨识工作覆盖设备进场、安装验收、日常运行、顶升加节、拆卸退场全流程。隐患排查摒弃浅层粗略检查方式，围绕塔式起重机主体结构、安全零部件、地基承载力、附着连接、人员操作、现场施工环境制定详细核查清单，为现场检查工作提供明确执行依据。施工现场同步落实日间巡查、周期性专项检测、关键工序复

核三类检查机制，对塔身连接件、钢丝绳磨损状况、制动灵敏度、限位装置性能、电气系统稳定性等关键部位逐项核查^[5]。针对排查发现的问题，明确责任人员、整改时限与复查要求，杜绝隐患台账只做纸面记录、整改流于形式的问题。排查频次与检查重点随施工进度动态调整，当塔式起重机起升高度、作业半径、现场障碍物、气象环境发生变化时，同步调整检查侧重点。

（二）责任落实与动态监管

塔式起重机安全闭环管理依托清晰的权责划分与常态化实时监督实现。施工现场涉及建设、施工、监理、安拆、租赁单位及一线作业人员等多方责任主体，若各方权责边界模糊，极易形成安全管理盲区。需针对设备安装、使用、维保、检测、拆卸各工序明确岗位责任，每项安全工作落实专属责任人。采用全过程动态监督模式跟踪塔式起重机运行状态与人员操作行为，摒弃阶段性抽查的单一管控方式。管理人员结合现场实地巡查、监控设备、作业审批、交接班台账多重手段，实时掌握吊装配合、现场环境变化及设备异常等各类情况。超载斜吊无资质施工恶劣天气强行开工等举动当场叫停跟进整改进度，权责划分配合实时督查防止规章条文流于形式，管控标准融入施工全程，岗位绑定责任点位落实监督整改落地执行，塔式起重机安全风险稳定维持在可控区间。

（三）安全防控效果持续改进

塔式起重机防护能力提升借助闭环模式调整优化现有管控手段，隐患整治结束后核验整改质量器械运转状态人员操作举动，判断防护手段能否彻底消除危险，同类问题反复出现代表规章制度养护模式存有漏洞，回溯源头拆解问题成因，防护升级整合各类资料数据，查验台账故障记录违规行为险情整治结果统一归档，梳理高频问题核心短板补齐管控缺陷。授课内容巡检频次养护方案应急步骤依照工地实况灵活调整，防护手段贴合现场施工条件，安全闭环不属于固定一次性流程，在问题发掘处置成效核验体系优化之间循环运转，每一轮查验整改沉淀为管控实操经验，塔式起重机整体安全防护实力稳步上涨。

六、结语

塔式起重机安全管控维系工地整体平稳与人身安全，面对机件故障拆装风险场地工况人员操作管控疏漏各类隐患，依托风险辨识诱因研判等级评定防护执行搭建完整管控链路，器械养护人员操作场地督查同步强化，隐患查验整治形成闭环，削减事故频次稳固塔式起重机运行状态，支撑工程平稳推进。

参考文献

- [1] 常正隆. 塔式起重机倒塌原因分析及其预防措施 [J]. 大众标准化, 2025, (8): 100-102.
- [2] 司雯. 智慧工地塔式起重机司机人因失误分析与治理研究 [D]. 辽宁工程技术大学, 2024.
- [3] 丰啸. 建筑工程中塔式起重机群塔作业安全管理研究 [J]. 工程技术研究, 2024, 9 (5): 150-152.
- [4] 梁建俊. 塔式起重机安全隐患防范措施及维护保养措施 [J]. 工程机械与维修, 2024, (1): 38-40.
- [5] 路艺. 塔式起重机在建筑工程施工中的安全性分析 [J]. 工程机械与维修, 2022, (6): 29-31.

复杂地层钻孔灌注桩钢护筒精确定位 与钻进安装技术研究

辛举¹, 李想¹, 房玉焕², 李卫亚¹, 孙炳营¹

1. 中建三局第一建设工程有限责任公司, 湖北 武汉 430000

2. 山东省工程咨询院, 山东 济南 250000

DOI:10.61369/ME.2026060032

摘 要 : 为了克服复杂地层钻孔灌注桩施工过程中钢护筒安装定位误差大、地层稳定难、施工成本高、效率低等技术难题, 提出了一种钢护筒精确定位和钻进安装一体化技术。采用优化后的钢护筒结构, 增设开挖破碎装置和驱动连接系统, 采用“护筒钻进、桩孔旋挖”交替施工工艺, 用专用垂直度定位测量装置进行准确控制。采用室内试验、数值模拟和工程实践相结合的方法, 对本技术的定位精度、施工效率和经济环境效益进行系统的探究。结果表明, 钢护筒安装中心偏差小于1cm, 垂直度偏差小于1%, 比传统的施工工艺施工效率提高了30%以上; 钢护筒可以重复使用, 单个项目材料成本降低了74%以上, 全生命周期碳排放减少了28%。该技术对于复杂的松散地层、含障碍物的地层具有很好的适应性, 给类似工程提供技术上的借鉴。

关 键 词 : 复杂地层; 钻孔灌注桩; 钢护筒; 精确定位; 钻进安装; 生命周期效益

Research on Precise Positioning and Drilling Installation Techniques for Steel Cores of Complex Geological Conditions: Drilled Pile Foundation Projects

Xin Ju¹, Li Xiang¹, Fang Yuhuan², Li Weiya¹, Sun Bingying¹

1. China Construction Third Bureau First Engineering Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430000

2. Shandong Engineering Consulting Institute, Jinan, Shandong 250000

Abstract : To address technical challenges encountered during the construction of bored cast-in-place piles in complex geological formations—such as significant installation and positioning errors of steel casing, difficulties in ensuring formation stability, high construction costs, and low efficiency—this study proposes an integrated technology combining precise steel casing positioning with drilling and installation processes. This approach employs an optimized steel casing structure, incorporates additional excavation and fragmentation devices along with a driving connection system, adopts an alternating construction sequence of "casing drilling followed by rotary drilling of the pile hole," and utilizes a dedicated verticality positioning measurement device for accurate control. By integrating laboratory tests, numerical simulations, and engineering field practice, this study systematically investigates the positioning accuracy, construction efficiency, and economic and environmental benefits of this technology. The results demonstrate that the center deviation of steel casing installation does not exceed 1 cm, the verticality deviation does not exceed 1%, and the construction efficiency is increased by more than 30% compared with traditional methods; furthermore, the steel casing can be reused, reducing material costs per project by more than 74% and decreasing total lifecycle carbon emissions by 28%. This technology exhibits excellent adaptability to complex loose formations and formations containing obstacles, providing valuable technical references for similar engineering projects.

Keywords : complex geology; bored pile; steel casing; precise positioning; drilling and installation; lifecycle benefits

作者简介:

辛举 (1989.02.03-), 男, 汉族, 山东曹县人, 中建三局第一建设工程有限责任公司, 本科, 工程师;

李想 (1995.11.25-), 男, 汉族, 吉林吉林人, 中建三局第一建设工程有限责任公司, 本科, 工程师;

房玉焕 (1990.03.02-), 女, 汉族, 山东济南人, 山东省工程咨询院, 本科, 中级工程师;

李卫亚 (1996.11.03-), 男, 汉族, 江苏徐州睢宁县人, 中建三局第一建设工程有限责任公司, 本科, 工程师;

孙炳营 (1996.01.26-), 男, 汉族, 河南新乡人, 中建三局第一建设工程有限责任公司, 本科, 工程师。

引言

钻孔灌注桩属于地基处理的主要技术之一，被普遍应用于桥梁、隧道、高层建筑等工程当中^[1]。卵石地层、松散堆积地层等复杂的地质条件下，传统的钢护筒安装大多采用人工开挖埋设或者全套管跟进法，存在许多技术上的难题，例如人工开挖容易造成护筒移位倾斜，定位不准^[2]；全套管跟进法需要专用设备，施工成本高，效率低^[3]；复杂地层中护筒下放受阻，容易造成孔壁坍塌、缩径等质量事故^[4]。随着工程建设向着复杂的地质环境发展，对钢护筒安装精度、速度和经济性的要求也越来越高。

近些年来，国内国外的学者就钢护筒施工技术展开了相关的探究工作。李建军等^[5]提出了基于全站仪的护筒定位方法，提高了平面定位精度，但是没有解决垂直度控制的问题；张宏等^[6]研发了拼接式钢护筒结构，实现了材料的回收利用，但是钻进阻力大问题还没有得到解决；国外学者提出的液压驱动护筒安装技术^[7]虽然降低了劳动强度，但是设备投入成本高，不能广泛推广。目前的技术还存在着定位精度和施工效率不能兼顾、专用设备依赖性强、环境适应性差等缺点，急需开发出一种适合复杂地层的钢护筒精确定位和高效安装技术。

本文采用结构创新、工艺改进和设备集成的方法，设计出带破碎结构的节段式钢护筒及配套驱动系统，并建立测量放样、钻机就位、交替钻进、垂直度检测、混凝土浇筑、护筒回收的全过程工艺。通过数值模拟分析和工程实测，验证该技术的定位精度、地层适应性、综合效益，给复杂地层钻孔灌注桩施工提供新的技术方案。

一、技术原理与系统设计

（一）核心技术原理

本技术以三个主要部分来完成对复杂地层钢护筒的精确高效安装工作，即①结构改进，护筒底部加装合金破碎切削齿，顶部安装驱动支架，直接接收到旋挖钻机的动力；②工艺改进，采用“钢护筒钻进－桩孔旋挖”的交替施工方式，减小固壁阻力；③测控优化，使用专用垂直度定位设备实时监测、动态纠偏。能较好地解决复杂地层护筒安装定位难、阻力大、稳定性差等问题。

（二）关键系统设计

1. 钢护筒结构设计

钢护筒用 Q235 钢材，分为钻进节和标准节，壁厚 30 ~ 40mm，内径按桩径定，比设计桩径大 10cm。钻进节端头焊接合金齿，用于破碎卵石、孤石等障碍物；顶部装对接环，环向对称布置 4 道卡榫扣和 8 处销轴接口，卡榫定位加销轴双锁固定，保证拼接精度和连接强度。单节长 3 米，根据地层深度需要分段连接使用。

2. 驱动支架系统

驱动支架由下对接环、十字加筋肋和上对接槽组成，整体用 40Cr 合金钢调质加工而成，结构强度高。下对接环和钢护筒顶部的销轴相连，上对接槽锁紧旋挖钻杆，将钻进的动力传给钻进。中间十字加筋肋加强抗扭，施工中支架不变形。

3. 垂直度定位测量装置

该装置由锥形架体、水平气泡和垂直度测杆组成，架体放在护筒顶部，2 米测杆竖直插入中心孔。护筒偏斜时，用水平气泡直观判断偏差方向，配合全站仪测量垂直度。设备测角精度为 $\pm 0.1^{\circ}$ ，反应时间不大于 5 秒，单节护筒安装完成后可以立即进行垂直度检查。

（三）数值模拟验证

用 ANSYS/LS-DYNA 建立钢护筒钻进数值模型，模拟复杂地层中护筒钻进过程的受力和变形特性。模型中地层参数取卵石地层物理力学指标，重度为 22kN/m³、内摩擦角为 35°、粘聚力为 18kPa；钢护筒用壳单元模拟，合金切削齿用实体单元，网格尺寸为 0.05m。从模拟结果可知，在钢护筒钻进时最大应力集中在切削齿根部（320MPa），小于 Q235 钢材屈服强度（345MPa），护筒垂直度偏差 $\leq 0.8\%$ ，符合理论设计要求，结构设计合理。

二、施工工艺与操作要点

（一）施工工艺流程

复杂地层钻孔灌注桩钢护筒定位钻进施工，依次按九道核心工序施工，即施工准备、护筒加工、测量放样、钻机就位、交替钻进、垂直度检测、成孔清孔、桩基浇筑、护筒回收。

（二）关键操作要点

1. 施工准备

提前编制专项施工方案，确定各道工序的各项技术参数；配备 XR280D 旋挖钻机、全站仪等施工设备并调试合格；对作业班组进行现场技术交底，使施工人员熟悉护筒拼接、钻机钻进操作方法。

进场的所有原材料按照规范进行验收，混凝土用硅酸盐水泥拌合，坍落度控制在 180 ~ 220mm 之间；钢护筒壁厚误差不超过 $\pm 1\text{mm}$ ，销轴采用 40Cr 钢材，直径为 65mm。

2. 测量放样

布设二级施工测量控制网，用十字定位法标定桩基桩位，孔位偏差控制在 1cm 之内。用全站仪、经纬仪测放桩位坐标，外放 150mm 预留施工操作余量；用水准仪实测场地标高，确定护筒埋

设深度，护筒顶面高出地面0.5m。所有的测量数据都要经过双人双检的复核，保证测量点位和数据准确无误。

3. 交替钻进施工

钻机就位后调直钻杆，垂直度偏差不大于0.3%；首节钢护筒安装驱动支架，悬空试转检查设备运转是否平稳。护筒对准桩中心旋压钻进，筒顶钻到距地面0.5米处时停止钻进，拆掉驱动支架。钻机钻进到设计孔深之后接长护筒，循环开展护筒跟进、桩孔旋挖作业，穿透松散地层和地下障碍物，保证护筒嵌入稳定的持力层。每接装一节护筒就复测垂直度，偏差大于1%时立即校正调直。

4. 桩基浇筑与护筒回收

成孔后及时清孔，孔底沉渣厚度 $\leq 100\text{mm}$ ；下放钢筋笼，主筋间距偏差 $\pm 10\text{mm}$ 。安装灌注导管，导管底口离孔底30~40cm，用快速螺纹接头连接牢固。混凝土连续不间断灌注，导管埋深控制在2~4m，桩顶浇筑标高比设计值大1m。

护筒回收按照减少混凝土扰动的原则，入土 ≤ 4 节护筒，浇筑完成后一次性拔出；入土 > 4 节护筒分次拔出，每次拔筒数量不大于4节。回收工序为安装驱动支架、旋转提升护筒、分段拆分拆卸、清洗养护护筒、分类堆放备用，护筒实际回收率大于95%。

三、性能测试与工程验证

（一）室内性能测试

1. 定位精度测试

用1:5的比例缩小的缩尺试验模型来还原卵石地层的实际施工条件，做钢护筒安装定位的专项试验。实测结果表明钢护筒中心偏差最大值为0.8cm，均值为0.5cm；垂直度偏差最大值为0.9%，均值为0.6%，各项指标均满足并且优于《公路桥涵施工技术规范》（JTG/T 3650-2020）规范限值（中心偏差 $\leq 5\text{cm}$ ，垂直度偏差 $\leq 1\%$ ）。

2. 连接强度测试

对钢护筒节段拼接节点做拉伸、扭转力学性能试验，加载120kN拉伸荷载时节点无滑移，5kN·m扭矩作用下扭转角度 $\leq 3^\circ$ ，符合现场实际施工受力条件。经过20次反复拆装测试之后，连接结构强度衰减率不大于5%，说明该钢护筒具有较好的循环周转复用条件。

（二）工程应用实例

1. 工程概况

案例一为大成路快速化工程新华路至走马塘西路标段，线路全长2.29km，隧道围护结构施工钻孔灌注桩共1306根，场地内地层以松散堆积土、卵石层为主，局部有孤石。使用该种钢护筒施工技术能很好地解决传统工艺护筒下放卡住、钻孔孔壁塌陷等施工中存在的常见问题。

案例二312国道无锡凤翔路至广石路段工程FG11标段，主线

高架桥总长1309m，施工钻孔灌注桩381根（含1.2m桩304根、1.5m桩77根），桩基设计桩长48~68m，场区为粉质黏土夹卵石复合不良地层。应用本技术后可以顺利穿过复杂的地层，保证桩基成孔、成桩施工质量达标。

2. 应用效果

施工效率，案例一单桩平均施工时长为12h，比传统全套管跟进法缩短了4h，施工效率提高了25%；案例二复杂地层施工效率提高32%，项目总工期缩短15天。

施工质量两项目桩基完整性无损检测合格率均为100%，桩位偏差 $\leq 3\text{cm}$ ，垂直度偏差 $\leq 0.9\%$ ，均满足设计及规范要求。

从成本控制角度来说，案例一1306根桩基所用钢护筒的回收利用率达到了96%，节约材料成本98万元，案例二累计节省了32万元，具有较好的经济效益。

四、效益分析

（一）技术效益

施工定位精度明显提高，钢护筒中心偏差 $\leq 1\text{cm}$ ，垂直度偏差 $\leq 1\%$ ，解决了复杂地层钢护筒安装定位施工难题；适应各种地质条件，配合金破碎切削齿和交替钻进工法，可以穿透卵石、孤石、松散等复杂的地层，从根本上避免了孔壁坍塌的风险；施工工艺操作性强、改良完善到位，不需要配备专门的设备，使用常规旋挖钻机就可以完成钢护筒钻进和安装作业，摆脱了施工对专项设备的依赖。

（二）经济效益

100根 $\Phi 1.5\text{m}$ 、平均埋深10m的桩基工程中，用传统一次性钢护筒施工总费用为90万元，本项目采用节段式可回收钢护筒施工成本为15.6万元，直接减少材料费74.4万元，降低成本率为82.7%。施工效率提高约30%、减少机械租赁费和人工费等费用，取得较好的经济效益。

（三）环境效益

钢护筒循环使用，减少钢材消耗，降低钢铁冶炼加工全过程碳排放；抛弃传统的泥浆护壁施工方式，没有泥浆污染隐患，不需要另外处理废浆。经过计算可知，100根桩基施工可以减少碳排放86t，折合成标准煤30t，符合国家双碳战略的发展要求^[9]。

五、结论与展望

（一）结论

本次研发带破碎结构节段式钢护筒及配套驱动系统，适配旋挖钻机直接动力驱动，有效解决复杂地层钢护筒钻进阻力大问题，产品结构合理、拼装连接牢固稳定；配套形成护筒钻进、桩孔旋挖交替施工工法和垂直度实时监测措施，切实保证钢护筒安装施工精度，施工达标中心偏差 $\leq 1\text{cm}$ 、垂直度偏差 $\leq 1\%$

的管控标准；

该技术不需要专用设备，钢护筒可以回收再利用，施工效率提高25% ~ 32%，材料成本降低80%以上，具有明显的经济效益和技术、环境效益；

工程应用验证结果表明，该技术可以用于复杂松散堆积地层、卵石地层和含有障碍物地层的钻孔灌注桩施工，有很好的推广前景。

（二）展望

可以对钢护筒结构进行改进，采用高强轻质合金材料减小自重，开发智能化垂直度检测系统，实现偏差自动纠偏，扩大技术应用范围，研究在深海、岩溶等地层中适用性，为复杂地质条件下桩基施工提供技术支持。

参考文献

[1] 交通运输部公路科学研究院 . JTG/T 3650-2020 公路桥涵施工技术规范 [S]. 北京：人民交通出版社，2020.

[2] 刘金龙，陈永辉，王建华 . 复杂地层钻孔灌注桩护筒安装技术研究 [J]. 岩土工程学报，2021，43 (S1): 189-193.

[3] 张宏，李明，张伟 . 拼接式钢护筒在松散地层中的应用研究 [J]. 施工技术，2022，51 (8): 67-70.

[4] 中华人民共和国住房和城乡建设部 . GB 50202-2018 建筑地基基础工程施工质量验收规范 [S]. 北京：中国建筑工业出版社，2018.

[5] 李建军，王鹏，刘敏 . 基于全站仪的钢护筒精确定位技术 [J]. 测绘通报，2020 (7): 145-148.

[6] 张宏，赵刚，陈晓 . 可回收拼接式钢护筒结构设计与应用 [J]. 钢结构，2021，36 (5): 102-106.

[7] Smith J, Johnson M, Brown K. Hydraulic-driven casing installation technology for complex strata [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2019, 145 (8): 04019065.

[8] 中国建筑科学研究院 . GB/T 51366-2019 建筑碳排放计算标准 [S]. 北京：中国建筑工业出版社，2019.

公路工程设计中路线布设及路基设计要点研究

陈彬

广东省交通规划设计研究院集团股份有限公司, 广东 广州 510000

DOI:10.61369/ME.2026060007

摘 要： 文章围绕公路工程设计中的路线布设与路基设计展开研究。阐述路线布设需遵循安全、经济、环保、协调原则，明确平面、纵断面、横断面线形设计关键指标与技术要点。从填挖方、压实填料、边坡防护、排水设计、软土处理等方面，梳理路基设计核心要点，并结合山区高速公路工程案例，验证设计方案的可行性与实用性，为同类公路工程设计提供参考。

关 键 词： 公路工程；路线布设；路基设计

Research on Key Points of Route Layout and Subgrade Design in Highway Engineering Design

Chen Bin

Guangdong Provincial Transportation Planning and Design Institute Group Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510000

Abstract： This article focuses on the research of route layout and subgrade design in highway engineering design. It expounds that route layout should follow the principles of safety, economy, environmental protection, and coordination, and clarifies the key indicators and technical points of horizontal, vertical, and cross-sectional alignment design. From the aspects of excavation and filling, compaction of fill materials, slope protection, drainage design, and soft soil treatment, the core points of subgrade design are summarized. Combined with mountainous highway engineering cases, the feasibility and practicality of the design scheme are verified, providing a reference for similar highway engineering design.

Keywords： highway engineering; route layout; subgrade design

引言

公路工程设计是保障道路通行安全、提升运营效率的核心环节，路线布设与路基设计作为关键内容，直接决定工程质量、造价及长期稳定性。当前山区及复杂地质条件下，路线选线难度大、路基病害频发，对设计技术提出更高要求。为规范设计流程、规避工程风险、优化建设效益，结合公路设计规范与工程实践，系统梳理路线布设基本原则、线形设计要点及路基设计关键技术，总结典型工程应用经验，为公路工程设计提供技术支撑与实践参考。

一、路线布设基本原则

路线布设应遵循以下基本原则：

- （1）安全原则：路线布设应保证行车安全，线形指标满足规范要求，避免不良地质路段，减少事故多发路段；
- （2）经济原则：在满足技术标准的前提下，尽量缩短路线长度，减少工程数量，降低工程造价和运营成本；
- （3）环保原则：路线布设应减少对生态环境的破坏，避让重要生态敏感区，做好水土保持和景观协调；
- （4）协调原则：路线布设应与沿线城镇规划、土地利用、其他交通方式相协调，便于区域交通组织和转换。

路线方案比选是路线布设的重要环节，应对不同路线方案进

行技术经济比较，综合考虑工程造价、运营成本、环境影响、社会效益等因素，选择最优方案。方案比选的主要内容包括路线长度、工程数量、工程造价、运营费用、环境影响等。

二、平面线形设计要点

（一）直线设计

直线是平面线形的基本要素，具有方向明确、距离最短等优点，但长直线易导致驾驶员疲劳和夜间行车眩光。直线长度应符合规范要求：高速公路、一级公路长直线的长度不宜超过设计速度的20倍行程；两圆曲线间的直线最小长度，当设计速度为100km/h时应不小于600m，80km/h时应不小于480m，60km/h

时应不小于360m^[1]。

（二）圆曲线设计

圆曲线是平面线形的重要组成部分，设计时应合理选择圆曲线半径。圆曲线半径分为不设超高最小半径、一般最小半径和极限最小半径三类。以设计速度100km/h为例，不设超高最小半径为5500m，一般最小半径为700m，极限最小半径为400m。

圆曲线设计要点：（1）圆曲线半径应与设计速度相适应，在条件允许时采用较大半径；（2）圆曲线长度不宜过短，最小长度不应小于设计速度的3s行程；（3）小半径圆曲线应设置超高和加宽，超高值根据半径和设计速度确定，最大超高值一般为8%–10%；（4）圆曲线两侧应设置缓和曲线，使曲率渐变过渡。

（三）缓和曲线设计

缓和曲线是直线与圆曲线之间或两不同半径圆曲线之间的过渡曲线，一般采用回旋线形式。缓和曲线参数A值应根据圆曲线半径和设计速度确定，A值宜取R值（圆曲线半径），最小不应小于R/2。

缓和曲线最小长度应满足以下要求：（1）离心加速度变化率要求：使乘客舒适，离心加速度变化率不超过0.6m/s³；（2）超高渐变率要求：超高渐变率不宜大于1/200，最小缓和曲线长度应满足超高过渡需要；（3）线形协调要求：缓和曲线长度应与圆曲线半径相协调，使线形平顺美观^[2]。

（四）平曲线组合设计

平曲线组合设计应保证线形连续、均衡、协调。常见平曲线组合形式包括：基本型（直线–缓和曲线–圆曲线–缓和曲线–直线）、S型（两反向圆曲线相接）、卵型（大圆包小圆）、凸型（两同向圆曲线相接）、C型（两同向圆曲线通过缓和曲线相接）等。S型曲线两圆曲线半径之比不宜过大，一般不超过3；卵型曲线两圆曲线半径之比不宜大于2。

三、纵断面设计要点

（一）纵坡设计

纵坡设计应满足行车安全、排水通畅、工程经济的要求。最大纵坡应根据公路等级和地形条件确定：高速公路、一级公路最大纵坡一般为3%–5%，二级公路为5%–7%，三级公路为6%–8%，四级公路为7%–9%。山岭重丘区纵坡可适当增大，但最大纵坡不应超过规范极限值。

纵坡设计要点：（1）纵坡应平顺，起伏不宜频繁，避免锯齿形纵断面；（2）连续上坡或下坡路段，应设置缓坡段，使车辆有休息调整机会；（3）长陡坡路段应设置避险车道，保证行车安全；（4）纵坡设计应与平面线形相配合，避免小半径平曲线与陡坡重叠；（5）纵坡设计应考虑排水需要，最小纵坡不宜小于0.3%。

（二）竖曲线设计

竖曲线是纵断面变坡处的过渡曲线，分为凸形竖曲线和凹形竖曲线。竖曲线采用二次抛物线形式，设计时主要控制竖曲线半径和长度。竖曲线最小半径和最小长度应根据设计速度确定，以

设计速度100km/h为例，凸形竖曲线一般最小半径为16000m，凹形竖曲线一般最小半径为12000m，竖曲线最小长度为85m^[3]。

竖曲线设计要点：（1）竖曲线半径在条件允许时应采用较大值，提高行车舒适性；（2）凸形竖曲线半径应满足停车视距要求，凹形竖曲线半径应满足前灯照射距离要求；（3）竖曲线长度应满足安全行驶需要，一般不小于设计速度的3s行程；（4）竖曲线与平曲线组合时，应使竖曲线包含在平曲线之内，避免竖曲线在平曲线起点或终点附近断开。

四、横断面设计要点

公路横断面由行车道、路肩、中间带、边坡、边沟等部分组成。行车道宽度根据公路等级和设计速度确定：高速公路、一级公路行车道宽度一般为2×7.5m或2×7.0m，二级公路为7.0m或9.0m，三级公路为6.5m或7.0m，四级公路为6.0m。

路肩分为硬路肩和土路肩。高速公路、一级公路硬路肩宽度一般为2.5m或3.0m，土路肩宽度为0.75m；二级公路硬路肩宽度为0.75m或1.5m，土路肩宽度为0.75m。路肩具有保护路面、供临时停车、行人通行等功能。

超高设计是横断面设计的重要内容。当圆曲线半径小于不设超高最小半径时，应在圆曲线路段设置超高，使车辆在弯道行驶时获得足够的横向力。超高横坡度根据圆曲线半径和设计速度计算确定，高速公路、一级公路最大超高横坡度为8%–10%，二、三、四级公路为8%^[4]。

五、路基设计要点

（一）路基填挖方设计

路基设计应根据地形地貌、工程地质、填料性质等因素，合理确定填挖方高度和边坡形式。路堤边坡坡率应根据填料性质、边坡高度、地基条件等确定：一般路堤边坡高度不超过8m时，边坡坡率为1:1.5；边坡高度8–20m时，上部8m坡率为1:1.5，下部坡率为1:1.75。

路堑边坡坡率应根据岩土性质、地质构造、边坡高度等确定。土质路堑边坡高度不超过20m时，边坡坡率一般为1:0.75–1:1.5；岩质路堑边坡坡率根据岩石强度和结构面产状确定，一般为1:0.3–1:1.0。高边坡（高度超过20m）应进行专项设计，进行边坡稳定性分析，必要时采取加固措施。

（二）路基压实与填料选择

路基压实度是保证路基强度和稳定性的重要指标。路基压实度应根据公路等级和填挖类型确定：高速公路、一级公路路床压实度不小于96%，上路堤压实度不小于94%，下路堤压实度不小于93%；二级及以下公路路床压实度不小于95%，上路堤压实度不小于94%。

路基填料应满足强度和稳定性要求。路基填料按强度分为A、B、C、D、E五类，A类填料最优，E类填料不宜使用。路床填料应选用A、B类填料，上路堤可选用A、B、C类填料，下路

堤可选用 A、B、C、D 类填料。填料含水量应控制在最佳含水量附近，分层填筑、分层压实，每层厚度不宜超过 30cm。

（三）边坡防护设计

边坡防护是保证路基稳定的重要措施，分为工程防护和植物防护两类。工程防护包括砌石护坡、喷射混凝土、锚杆锚索、挡土墙等；植物防护包括种草、铺草皮、植树等。应根据边坡类型、高度、地质条件选择适宜的防护形式^[5]。

路堤边坡防护：（1）边坡高度小于 3m 时，可采用种草或铺草皮防护；（2）边坡高度 3–6m 时，可采用骨架防护 + 植草；（3）边坡高度 6–10m 时，可采用拱形骨架或菱形骨架防护；（4）边坡高度大于 10m 时，应设置平台，采用综合防护措施。

路堑边坡防护：（1）土质边坡高度小于 3m 时，可采用植草防护；（2）土质边坡高度 3–6m 时，可采用骨架防护 + 植草；（3）岩质边坡可采用喷射混凝土、锚杆加固、柔性防护网等措施；（4）不良地质边坡应采取专项加固措施，如抗滑桩、预应力锚索等。

（四）路基排水设计

路基排水是保证路基稳定的关键措施，包括地表排水和地下排水两部分。地表排水设施包括边沟、截水沟、排水沟、急流槽等；地下排水设施包括盲沟、渗沟、渗井等。

边沟设计要点：（1）边沟底宽和深度不宜小于 0.4m，底坡不宜小于 0.5%；（2）边沟断面形式有梯形、矩形、三角形等，根据地形和排水量确定；（3）边沟出口应与自然沟渠或排水沟衔接，避免水流冲刷路基；（4）边沟长度不宜过长，一般不超过 500m，超过时应增设排水沟或涵洞。

截水沟设计要点：（1）路堑坡顶外侧应设置截水沟，拦截山坡雨水；（2）截水沟距坡顶距离不宜小于 5m，断面尺寸根据汇水面积和降雨强度计算；（3）截水沟底坡不宜小于 0.5%，出口应引入自然沟渠或排水沟。

（五）软土路基处理

软土路基处理是公路工程常见的技术难题。软土具有含水量高、孔隙比大、压缩性高、抗剪强度低等特点，路基填筑后易产生过大沉降和滑移破坏。软土路基处理方法应根据软土厚度、性质、路基高度等选择。

常用软土路基处理方法：（1）换填法：将软土挖除，换填砂

砾、碎石等透水性材料，适用于软土厚度小于 3m 的情况；（2）排水固结法：设置塑料排水板或砂井，配合堆载预压，加速软土固结，适用于软土厚度 3–15m 的情况；（3）复合地基法：采用水泥搅拌桩、CFG 桩、预应力管桩等形成复合地基，适用于软土厚度较大、路基填筑高度较高的情况；（4）反压护道法：在路堤两侧设置反压护道，提高路堤整体稳定性。

六、工程案例分

某山区二级公路项目，全长约 2.2 公里，设计速度 60km/h，路基宽度 20m，双向四车道。项目穿越山岭重丘区，地形起伏大，地质条件复杂，路线布设和路基设计难度较大。

路线布设方案：路线布设遵循“因地制宜、安全可靠、经济合理”的原则，对沿线地形地貌、工程地质、生态环境等因素进行综合分析，确定了三个路线方案进行比选。最终推荐方案路线长度 2.2km，设中桥一座。路线布设充分利用地形条件，采用展线方式克服高差，最大纵坡控制在 5% 以内。

路基设计方案：高填方路段最大填方高度 20m，采用分级填筑，设置二级平台，边坡坡率上部 1:1.5、下部 1:1.75，采用拱形骨架植草防护。深挖方路段最大挖方高度 35m，采用分级开挖，设置多级平台，边坡坡率根据岩土性质确定，岩质边坡采用锚杆加固 + 喷射混凝土防护。软土路基路段采用换填处理，清淤后换填开山石渣。

项目建成后运营情况良好，路基稳定，行车安全，达到了预期设计目标。

七、结束语

公路工程中路线布设与路基设计是系统性工程，贯穿安全、经济、环保等多重目标。科学的路线方案比选、合理的平纵线形组合、规范的横断面控制，可有效提升行车舒适性与安全性。路基填挖、压实防护、排水及软基处理，是保障结构稳定的核心技术。结合山区公路案例，验证设计要点的实践价值，可为复杂条件下公路工程设计提供借鉴，助力提升公路建设质量与综合效益。

参考文献

- [1] 王珊珊. 公路工程设计中路线布设及路基设计要点研究 [J]. 时代汽车, 2026(6): 157–159.
- [2] 曹刘坤, 王维. 公路工程设计中路线布设及路基设计难点分析 [J]. 运输经理世界, 2024(30): 22–24.
- [3] 张立群. 公路工程设计中路线布设及路基设计研究 [J]. 运输经理世界, 2021(23): 18–20.
- [4] 温涛. 公路工程路线布设及路基设计分析 [J]. 交通世界 (中旬刊), 2020(4): 58–59.
- [5] 谭吉昕. 公路工程设计中路线布设及路基设计要点 [J]. 福建质量管理, 2020(20): 148.

BIM技术在工程项目管理中的应用探讨

陈骏祺

广东常西建设工程有限公司，广东 广州 510000

DOI:10.61369/ME.2026060008

摘 要： 建筑信息模型简称 BIM，属于新型信息技术，在工程管理中具有重要价值。项目管理涵盖进度、质量、成本、安全等多类目标，传统模式下信息传递与协同存在局限。BIM 凭借三维数字模型，整合建筑全周期数据，可有效提升可视化程度与决策科学性。将其用于进度动态管控、质量精细管理、成本精准测算与现场安全监管，实践证明，该做法可缩短工期、压缩成本、提升质量，并推动管理现代化。

关 键 词： BIM 技术；工程项目；施工管理；进度控制；成本管理；质量控制

Discussion on the Application of Bim Technology in Engineering Project Management

Chen Junqi

Guangdong Changxi Construction Engineering Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510000

Abstract： Building Information Modeling (BIM), a new information technology, holds significant value in engineering management. Project management encompasses various objectives such as progress, quality, cost, and safety. Under traditional models, there are limitations in information transfer and collaboration. Leveraging three-dimensional digital models, BIM integrates data across the entire building lifecycle, effectively enhancing visualization and decision-making rationality. Its application in dynamic progress control, precise quality management, accurate cost estimation, and on-site safety supervision has proven to shorten construction duration, reduce costs, improve quality, and promote modern management practices.

Keywords： BIM technology; engineering project; construction management; schedule control; cost management; quality control

引言

工程项目管理涵盖设计、采购、施工、验收等环节，涉及主体众多，信息往来频繁。传统管理模式下，各参与方存在信息壁垒，图纸变更传递相对滞后，施工方案常与现场脱节，容易引发工期延误、成本超支及质量安全隐患。BIM 技术以三维模型为载体，整合建筑全生命周期的几何与非几何信息，为信息共享与协同工作提供技术支撑。这项技术在进度管控、质量精细管理、成本精准核算与安全预控领域应用价值显著。

一、BIM技术的内涵与应用基础

（一）BIM技术的基本概念

建筑信息模型简称 BIM，是以三维数字技术为核心的信息化管理工具，可汇总建筑工程各类相关数据。模型除呈现建筑外形与空间布局外，还收录建材参数、构件信息、施工流程、造价数据等内容。信息共享与协同协作，是 BIM 技术的核心优势。其搭建起统一信息平台，可供所有参与方使用，覆盖项目规划、施工及运维各个阶段。相较于传统二维图纸，BIM 转变了信息呈现形式，表达形式更为立体，也让工程信息传递更直观、全面。

（二）BIM技术的主要特征

BIM 技术具备三项突出特点：协调性、可视性与模拟性。协

调性层面，工程项目涉及多支专业设计团队和施工单位，各专业交叉作业频繁。专业间的矛盾通常在施工阶段才显现，BIM 技术可在设计阶段整合各专业模型，完成碰撞检测，提前排查并解决冲突，降低施工返工概率。可视性层面，BIM 模型以三维立体形式展现建筑的结构与构造细节。施工人员能直观把握设计思路，避免因图纸理解偏差造成施工差错。模拟性层面，BIM 技术可对施工流程、紧急疏散、能耗测算等场景进行虚拟仿真，为方案优化与决策提供数据依据。以上特点共同构成 BIM 技术提升项目管理水平的技术基础^[1]。

（三）BIM在项目管理中的定位

工程项目管理需在有限的时间、成本与资源约束下，达成质量、安全等目标的最优效果。BIM 技术并不会替代管理者的决策

职能，而是作为辅助手段，为管理者提供更精准、及时、全面的信息支撑。依托 BIM 模型的信息集成与可视化呈现，管理者可实时把控项目状态，快速排查偏差并采取纠偏举措。同时，BIM 技术打破传统管理“事后处置”的模式，转向“事前预控”与“过程管控”，增强了管理的主动性与前瞻性。

二、BIM 技术在施工进度管理中的应用

（一）进度计划的编制与优化

施工进度计划的合理程度，直接决定项目能否按期交付。传统进度计划编制多依赖经验判断与手工绘图，横道图和网络计划图可体现工序间的逻辑关系，但呈现形式较为抽象，施工人员对计划很容易产生理解偏差。BIM 技术融合三维模型与时间参数，搭建 4D 施工进度模型，将各道施工工序与对应的建筑构件相关联，生成可视化的进度方案。管理人员可借助 4D 模型直观查看每个施工阶段的建筑完成状态，判断工序安排是否合理。若发现某道工序工期过紧或资源分配不均时，可在模型内进行调整优化，让进度计划更加科学可行。此外，BIM 模型的构件信息与进度计划联动，出现设计变更时，进度计划可自动同步更新，降低人工调整的工作量与出错概率。

（二）施工进度动态监控与纠偏

施工过程中，受天气变化、材料供应延迟、劳动力调配等因素影响，实际进度往往与计划进度存在偏差。传统管理模式下，进度偏差通常通过现场巡查和定期汇报发现，信息滞后性较为明显。BIM 技术结合进度管理软件，可将实际施工进度录入模型，系统自动对比实际进度与计划进度的差异，并以颜色变化等形式直观呈现滞后部位和滞后程度。管理者借助 BIM 平台可实时掌握整体工期状态，针对滞后工序分析原因，及时调整后续施工安排或资源投入。例如，当某一楼层的混凝土浇筑滞后时，BIM 模型可显示其对后续砌筑、机电安装等工序的影响范围和程度，辅助管理者制定合理的赶工措施，确保总工期目标得以实现^[2]。

（三）施工组织协调的效率提升

大型工程项目往往存在多个施工队伍同时作业的情况，工作面交接和交叉作业的协调是进度管理的难点。BIM 技术通过建立统一的施工空间模型，可清晰显示各专业在不同时间段占用的作业面，避免因工作面冲突导致的窝工现象。同时，BIM 模型与施工方案的结合可对大型设备进场、材料堆放场地等进行模拟规划，提前发现空间利用不合理之处并予以调整。项目各参与方通过 BIM 协同平台共享进度信息，减少了电话沟通和会议协调的频率，使信息传递更加高效透明。

三、BIM 技术在工程质量管控中的应用

（一）设计阶段的质量预控

工程质量的把控，从设计环节便已开始。传统设计方式中，建筑、结构、机电等专业独立出图，各专业衔接位置常出现错、漏、碰、缺等问题。这类问题大多在施工阶段才暴露出来，整改

工作既会提升项目成本，也可能威胁建筑结构安全，影响后续正常使用。BIM 技术搭建起多专业协同设计的共用载体，各岗位人员依托同一模型开展工作，相互参考资料，同步更新内容。依托软件自带的碰撞检测功能，系统能够自动识别各类构件的空间冲突，例如管线与梁柱干涉、预留孔洞和设备位置不符等问题，并出具完整检测结果。设计人员结合报告调整优化方案，在设计源头规避质量风险。同时，BIM 模型中构件参数清晰可查，也能减少图纸标注模糊、数据传递偏差造成的施工失误^[3]。

（二）施工过程的质量精细化管理

现场施工的质量管控，必须严格依照设计图纸和相关技术标准执行。BIM 技术能把设计资料完整、准确地对接至施工一线。作业人员借助移动设备查看构件三维位置与安装标准，省去反复查图、换算尺寸的流程。面对钢筋排布密集、构造节点复杂等施工难点，模型可输出三维详图与施工动画，清晰展示钢筋布局、锚固长度、保护层厚度等关键内容，让技术交底和现场指导更加直观。开展质量检查时，管理人员把现场实测数据录入平台，系统会自动和模型设计参数对比，快速找出偏差位置及误差大小。一旦数值超出规范限值，平台会及时预警，推动问题整改落实。以模型指引施工、用数据核验质量的管理方式，显著提升了质量管控的效率与精准度。

（三）质量验收与资料管理

工程竣工验收阶段，需归集整理大量技术资料与检测报告。传统模式中，资料分散在各部门与流程节点，归档工作量大，也易出现缺漏。BIM 技术把质量信息与模型构件相互绑定，每道工序的检验批数据、材料合格证明、隐蔽工程验收记录等，都能挂接在对应构件的属性中。开展验收时，相关人员可直接从模型调取所需资料，实现质量信息的快速检索与闭环追溯。竣工模型包含的质量信息完整可查，为后续运营维护提供了可靠的数据支撑^[4]。

四、BIM 技术在工程成本控制中的应用

（一）设计阶段的造价预估与限额设计

工程造价控制的关键在于设计阶段。传统造价估算主要依据历史数据和概算指标，准确度受限于工程类比和预算人员的经验水平。BIM 模型中的构件均带有尺寸、材料、体积等属性信息，造价人员可通过模型快速提取各分部分项工程的工程量，结合现行定额和市场信息价，生成较为准确的造价概算。当概算超出项目投资控制目标时，可在 BIM 模型中进行限额设计调整，例如替换材料类型、优化构件截面尺寸等，模型会同步更新工程量和造价数据，便于设计人员在满足功能和安全的条件下选择经济合理的方案。这种设计、算量、造价一体化的作业模式，改变了以往设计与造价脱节的问题，使投资控制更加主动和有效^[5]。

（二）施工阶段的成本动态管控

施工阶段的成本管控，需要实时掌握已完工程量与对应成本的发生情况。传统模式下，工程量统计与成本核算的周期较长。成本偏差往往在月末或季末结算时才暴露出来，纠偏措施的实施

效果会大打折扣。BIM技术将三维模型、进度计划与成本数据相关联，构建5D成本信息模型。随着施工进度推进，BIM系统可根据实际完成的工程量，自动核算对应的人工费、材料费与机械费，并与预算数据进行比对。管理人员通过成本对比分析，可及时找出存在超支风险的分项工程，分析超支的具体原因，比如材料价格上涨、消耗量超标、返工损失等，再制定针对性的管控措施。例如钢筋实际用量超出模型预算量时，可追溯到具体构件与施工部位，判断是设计变更所致还是施工损耗过大，进而采取相应管理手段加以纠正。

（三）设计变更的造价影响分析

工程项目在施工过程中难免发生设计变更，每一次变更都可能带来工程量和造价的变化。传统方式下，变更产生后需要重新计算工程量、套用定额、编制变更预算，响应速度较慢。BIM模型中各构件参数相互关联，当某一设计参数发生变更时，模型会自动更新受影响的工程量数据，造价人员据此快速完成变更造价测算。建设方可利用BIM技术对多个变更方案进行比选，综合评估不同方案对总造价的影响，为变更决策提供经济依据。同时，BIM平台保存了完整的变更记录和造价调整数据，便于结算阶段的造价核对，减少了因变更资料不全引发的合同纠纷。

五、BIM技术在工程安全与协同管理中的应用

（一）施工现场安全风险的预控

施工安全事故往往与管理不到位、防护措施缺失或操作不规范有关。BIM技术在安全风险预控方面具有独特优势。管理人员可利用BIM模型对塔吊、施工电梯等大型机械设备的空间位置和作业范围进行模拟分析，判断设备之间以及设备与周边建筑物的安全距离是否满足规范要求。对深基坑、高支模、外脚手架等危险性较大的分部分项工程，BIM技术可模拟施工全过程的结构受力状态和变形趋势，帮助技术人员优化专项施工方案，明确加固措施和监测重点。此外，BIM模型可标识临边洞口、高压线等危险源的位置，生成安全防护设施的布置方案，确保防护栏杆、安全网等设施合理设置，不留盲区^[6]。

（二）信息化协同管理平台的构建

工程项目管理的协同属性，要求各参与方信息互通、配合紧密。BIM技术为协同管理搭建起统一信息化平台，设计、施工、监理及建设单位均可在平台上查阅、更新项目信息。现场管理人员借助移动设备拍摄施工问题，上传BIM平台并关联模型对应部位，相关责任人能及时收到通知，跟踪处理进度。这种依托模型的信息交互模式，让问题发现、任务派发、整改反馈形成闭环，避免信息孤岛与沟通延误。材料管理层面，BIM平台可实时更新材料进场、入库及使用数据，采购人员参照模型中的材料需求计划，合理规划采购批次。这既能保障施工供料充足，又可避免过量囤积占用资金与场地。

（三）竣工交付与运维管理的信息传递

工程竣工交付后，运营维护阶段的管理工作，同样需要大量工程信息作为支撑。BIM竣工模型汇集了施工过程中产生的各类技术资料、设备参数、保修信息，可直接交由运营单位使用。运营管理人员借助模型查询设备位置、型号、供应商及维护记录，便于制定维护保养计划。设备发生故障时，可快速定位故障点位，调取对应技术资料，提升维修响应效率。从全生命周期角度来看，BIM技术实现了建设到运维的信息无缝衔接，让工程信息在各阶段持续发挥价值。

六、结束语

工程项目管理向信息化转型，是建筑业发展的必然趋势。BIM技术凭借三维可视、数据集成与多方协同等优势，在进度动态管控、质量精细化管理、成本精准核算及安全风险预控等方面，展现出显著应用效果。依托全生命周期的信息传递与共享，该技术有效弥补了传统模式下各阶段信息断层的不足，提升了决策合理性与响应速度。随着技术逐步成熟、应用环境不断完善，BIM将发挥更关键的作用，持续推动项目管理水平提升。

参考文献

- [1] 朱凤银. BIM技术在现代建筑工程项目管理中的应用探讨[J]. 装饰装修天地, 2020(7): 109.
- [2] 王震. 基于BIM技术的土木工程项目管理应用探析[J]. 居业, 2025(4): 139-141.
- [3] 赵一卓. BIM技术在建设工程项目管理中的应用与价值[J]. 建筑与装饰, 2025(23): 85-87.
- [4] 吕昱. BIM技术在现代建筑工程项目管理中的应用研究[J]. 砖瓦世界, 2021(9): 169-170.
- [5] 高枫. 建筑工程项目管理中BIM技术的融合与应用[J]. 中小企业管理与科技, 2020(36): 178-179.
- [6] 周世安. 探讨建筑工程项目管理中BIM技术的融合与应用[J]. 中华建设, 2020(35): 38-39.

BIM技术在市政路桥施工中的实际应用分析

黄任荣

广东省化州市建筑工程总公司, 广东 茂名 525000

DOI:10.61369/ME.2026060009

摘 要 : 市政路桥项目规模大、工期长、专业接口繁杂。传统管理模式在信息传递与协同管控上, 存在明显不足。BIM技术具备可视化、协同、模拟与优化等多项能力。这为市政路桥施工提供了全新的技术路径。依托三维数字模型的搭建, 施工过程可实现精细化管控。图纸会审、方案比选、场地排布、进度管控及碰撞检测等环节, 均可实现精准管控。实践表明, BIM技术可降低施工风险, 提升质量与效率。该技术在市政路桥建设领域拥有良好前景。

关 键 词 : BIM技术; 市政路桥; 施工管理; 可视化模拟; 碰撞检测

Analysis of the Practical Application of BIM Technology in Municipal Road And Bridge Construction

Huang Renrong

Guangdong Huazhou Construction Engineering Corporation, Maoming, Guangdong 525000

Abstract : Municipal road and bridge projects are characterized by large scale, long duration, and complex professional interfaces. Traditional management models exhibit significant deficiencies in information transmission and collaborative control. Building Information Modeling (BIM) technology possesses multiple capabilities such as visualization, collaboration, simulation, and optimization. This provides a new technological path for municipal road and bridge construction. Relying on the construction of three-dimensional digital models, precise control can be achieved during the construction process. Precise control can be realized in various aspects such as joint review of drawings, scheme comparison and selection, site layout, progress control, and collision detection. Practice has shown that BIM technology can reduce construction risks and enhance quality and efficiency. This technology holds promising prospects in the field of municipal road and bridge construction.

Keywords : BIM technology; municipal roads and bridges; construction management; visual simulation; collision detection

引言

市政路桥施工体量偏大、建设周期长、专业接口繁杂。传统管理方式在信息传递与协同管控方面, 存在明显短板。BIM技术依托可视化、协同、模拟与优化特性, 可为施工搭建三维数字信息集成平台。把 BIM应用到图纸会审、碰撞检测、场地布置等关键环节, 可实现施工方案精细化比选与动态调控, 为多家参建单位协同作业提供技术支持。随着城镇化建设不断深化, BIM技术在市政路桥施工领域具备可观的应用价值与推广潜力。

一、BIM技术的内涵与核心优势

(一) BIM技术的基本概念

BIM即建筑信息模型, 是依托三维数字技术的工程信息集成管理手段。它可构建涵盖几何信息、物理属性、功能特点及施工过程信息的三维数字模型, 实现项目全生命周期的信息共享与协同管控。和传统 CAD绘图模式不同, BIM模型是整合全维度工程数据的信息平台。构件绑定材料、尺寸等核心参数, 一处修改全视图同步更新, 数据一致性更优。市政路桥施工场景中, 各类设施以三维模型呈现, 为施工管理提供精准信息支撑。

(二) 可视化与协调性优势

可视化是 BIM技术最鲜明的特征之一。借助三维建模, 市政路桥工程中复杂的构造形态、空间关系与施工工序, 能以立体图形直观展现。设计人员的设计思路可清晰传递, 施工人员也能准确把握设计细节。可视化还可延伸至进度、成本等多维度数据, 为施工决策提供支撑。协调性是 BIM的另一项核心优势。市政路桥施工涉及专业众多, 专业衔接质量直接影响施工推进效率。依托 BIM技术的协同工作平台, 不同专业的设计、施工人员可在统一模型上开展作业。各专业施工方案能在同一空间内比对协调, 及时发现并化解管线碰撞、结构冲突等问题。有效规避了信息不

对称引发的施工矛盾^[1]。

（三）模拟性与优化性特征

BIM的仿真特性，在施工管理中具备独特作用。施工准备阶段，可借助BIM软件全面模拟工序、设备动线与材料运输。通过模拟推演，能提前发现方案缺陷与风险，为方案优化提供依据。此外，BIM还可针对大体积混凝土浇筑、预应力张拉等特殊工艺做专项模拟，推算最佳施工参数，保障关键工序质量。优化能力是BIM的核心价值所在。市政路桥施工的方案优化，需兼顾工期、成本、质量、安全等多项目标。传统方法多依靠经验，定量分析不足，很难实现多目标平衡。BIM依托数字化建模与仿真分析，可对不同方案开展定量对比，评估其在工期、成本、资源投入上的表现。以此辅助选出最优方案，有效推动施工过程的多目标优化。这为施工精细化管理提供了支撑。

二、BIM技术在市政路桥施工各环节的具体应用

（一）图纸会审与方案可视化交底

市政路桥项目包含大量图纸。传统图纸会审依靠经验和空间想象，效率偏低，隐蔽设计缺陷易被忽略。BIM技术扭转了这一局面。开展会审时，可通过BIM将二维图纸转为三维模型。技术人员能从任意角度查看结构细部，清晰掌握构件空间关系，快速排查图纸矛盾、遗漏及错误。同时，模型支持剖切、旋转、缩放，方便重点核查复杂节点，大幅提升审图准确性与效率。在方案交底环节，传统方式易因理解偏差造成施工差错。依托BIM的可视化交底，能把施工方案做成三维动画或虚拟仿真。施工人员可直观了解每道工序做法、质量与安全要求，交底效果提升，交底不清引发的质量问题明显减少^[2]。

（二）碰撞检测与设计优化

市政路桥构件排布密集，空间冲突问题较为常见。传统二维图纸难以完整呈现空间关系，冲突往往到施工阶段才暴露，易造成工期延误与经济损失。借助BIM技术的碰撞检测功能，可将结构、钢筋、预应力、预埋件等各专业模型整合到同一平台。软件会自动排查各构件间的空间冲突，生成对应的碰撞报告。工程人员依据检测结果，提前与设计单位沟通协调，针对冲突部位优化设计方案。通过调整钢筋走向、预应力管道位置或预埋件排布方式，确保各构件在空间上互不干涉。这种前置的问题发现与解决机制，有效避免了施工过程中的返工与延误，保障施工的连续性与经济性。该机制尤其适用于桥梁箱梁0号块这类钢筋、管道密集的高冲突部位，能有效保障施工质量^[3]。

（三）施工现场布置与动态管理

市政路桥施工多处于城区地带。场地普遍狭窄，周边环境复杂，空间资源矛盾较为突出。基于BIM技术的三维场地布置方案，可在虚拟空间中模拟排布施工现场各类要素。具体包括施工便道、材料堆放区、加工场地、机械设备停放区、临时办公用房等。通过三维可视化呈现，能直观判断场地布置合理性、物资运输便捷性与施工区域通达性。发现布置不合理之处，可及时开展调整优化。更关键的是，BIM技术支持场地布置方案的动态管

理。随着施工进度不断推进，不同阶段的场地需求存在差异。借助BIM模型可按时间维度对场地布置进行分期规划。动态展示各施工阶段场地布局的变化情况。施工管理人员可据此提前做好场地转换筹备工作。确保各阶段场地使用方案匹配实际需求，有效提升场地利用效率。

（四）施工进度动态模拟与控制

施工进度管理是市政路桥施工管理的核心环节之一。传统管理以横道图、网络计划为主要工具。进度跟进依靠现场巡查与经验判断。偏差发现普遍滞后，纠偏精准度也有所欠缺。将BIM技术与进度计划相结合，构建四维施工进度管理模型。即在三维模型基础上引入时间维度。把施工任务、模型构件、施工时间、施工工序逐一一对应关联。通过四维模型的动态模拟，可直观展现项目从开工到竣工的完整建造过程。各施工段落的先后顺序、工序衔接关系及工期节点等内容清晰明了。在进度控制环节，将实际进度录入BIM模型。系统会自动比对计划进度。偏差以可视化方式呈现。管理人员能快速定位偏差部位与程度，及时分析原因并落实纠偏措施。四维进度管理还支持进度计划的多方案比选。模拟不同施工组织方案的进度效果，从中筛选最优工期安排方案。有效提升进度计划的科学性与可行性^[4]。

（五）工程量统计与成本控制

成本控制以精准的工程量数据为基础。传统人工算量作业量大、周期偏长，容易出现人为误差。基于BIM模型的工程量统计，可依托软件的自动计算能力。快速调取模型中各构件的几何尺寸与数量信息，输出详细的工程量清单。构件绑定完整属性数据，算量精准度与效率均得到明显提升。在成本管控环节，把工程量信息与定额、单价、合同条款等数据相互绑定。搭建多维成本管控模型，实现工程造价的动态核算与分析。施工期间，出现设计变更或进度调整时，模型信息同步更新。工程量与成本数据自动重新核算，为成本管控提供实时、精准的数据支撑。除此之外，BIM技术还能辅助实现材料用量的精细化管控。经由模型提取各施工部位的材料需求计划，结合现场实际用量开展对比分析。针对超耗部位及时发出预警，有效控制材料成本。

三、BIM技术在市政路桥施工中的综合效益分析

（一）提升施工质量与安全管理水平

BIM技术在市政路桥施工中的应用，对工程质量管理产生了积极的推动作用。通过三维模型的直观展示，施工人员对设计意图的理解更加准确，按图施工的符合性明显提高。利用BIM模型进行质量验收，将实际施工情况与模型进行比对，能够快速发现施工偏差，验收效率与准确性均得到提升。隐蔽工程数据可录入模型支撑质量追溯；BIM还可模拟工序与设备路径，识别高风险环节，提前制定防护措施。将BIM模型与现场监控系统相结合，能够实时监测基坑变形、支架沉降等安全指标，超出预警阈值时自动报警，为施工安全提供了有力保障。

（二）缩短工期与降低施工成本

BIM缩短工期体现在三方面：方案虚拟优化提升工序衔接效

率，碰撞检测规避返工，四维进度模型及时纠正偏差。在成本控制方面，精准的工程量统计为招投标、材料采购、成本核算提供了可靠的数据基础，避免了工程量计算误差带来的经济损失。施工过程中，基于 BIM 模型的材料精细化管理，有效减少了材料浪费。设计变更时，模型信息的联动更新使工程量与成本变化一目了然，变更对造价的影响能够被准确评估，为成本控制决策提供了科学依据。

（三）促进施工信息化与协同管理

市政路桥施工参与单位众多，信息沟通与协同作业的效率直接影响着工程建设的整体绩效。BIM 技术为各参建单位提供了一个统一的信息共享平台，设计单位、施工单位、监理单位、材料供应商等均可在平台上获取所需的工程信息，各方围绕统一的模型开展工作，信息传递的失真与滞后问题得到有效解决。施工单位可通过 BIM 平台完成日常管理工作，数据自动归集形成完整施工档案。管理层通过平台可以实时掌握施工现场的进度、质量、安全、成本等综合信息，为决策提供了及时、准确的数据支持。BIM 技术与物联网、云计算等新一代信息技术的融合应用，进一步拓展了施工管理的数字化边界，推动了市政路桥施工管理从经验驱动向数据驱动的转型升级^[5]。

四、BIM 技术在市政路桥施工中应用的优化策略

（一）完善技术标准与数据管理机制

要推进 BIM 在市政路桥施工中的普及，离不开配套技术标准与数据管理支撑。现阶段各类软件数据互通性不足，信息传递易失真丢失，制约了协同成效。需加快出台该领域的 BIM 应用标准。统一模型搭建、信息交互与成果交付的技术要求。明确软件间的数据接口规范，保障模型在各参建方间顺畅流转。施工单位应建立 BIM 数据管理制度。规范模型搭建、审核、变更及归档流程，确保信息准确与时效。设置专职 BIM 数据岗位，负责模型维护与版本管控。此外，做好模型与现场实际的校核修正，让其真实反映工程，为施工管理提供可靠数据基础。

（二）加强专业人才培养与团队建设

市政路桥施工中 BIM 技术的落地效果，很大程度取决于应用

团队的专业素养与实操能力。现阶段既懂施工又精通 BIM 的复合型人才不足，是技术深化落地的核心制约。施工企业需制定体系化的人才培养方案，通过内部培训、外部深造、项目实操等多种途径，提升技术人员的 BIM 应用水平。培训内容需涵盖 BIM 理论、软件操作与施工管理业务，兼顾理论功底与项目实操。团队建设层面，需结合企业实际需求与项目特性，搭建结构合理、分工清晰的 BIM 技术团队。明确团队各岗位的职责与权限，建立高效的内部协作机制。鼓励技术人员在项目实践中持续积累经验，将传统施工管理经验与 BIM 技术应用相融合，形成具备企业特色的 BIM 应用方法体系。

（三）深化 BIM 技术与施工全过程的融合

市政路桥施工中的 BIM 技术应用，不能局限在单一环节或单个专业。它需要覆盖各专业领域，贯穿施工的完整流程。施工准备阶段，借助 BIM 开展图纸核查、方案比选等工作。施工推进阶段，将 BIM 融入进度、质量、安全、成本管控，实现全维度数字化管理。竣工交付阶段，基于施工过程动态更新的 BIM 模型，形成完整的竣工信息模型。该模型可为项目后期的运营维护，提供详实可靠的数据支撑。施工企业还应重视 BIM 技术与施工现场实际的深度结合。避免出现模型与现场脱节的“两张皮”问题。把 BIM 模型作为施工管理的核心工具，使其真正嵌入日常管理流程。让其贴合施工现场的实际需求，才能充分发挥 BIM 技术提升施工管理水平的应有价值。

五、结束语

BIM 在市政路桥施工中的应用，推动管理模式由经验主导转向数字化精细管控。可视化模拟提升了设计意图的传递效率。碰撞检测可有效规避施工中的空间冲突。四维进度管理与精准工程量统计，为工期与成本管控提供可靠支撑。这项技术推动施工全流程信息集成与共享，增强各参与方的协同能力。从实际应用效果来看，BIM 技术在提升施工质量、保障作业安全、优化资源配置等方面成效显著。未来需持续完善应用标准、培养复合型人才，深化 BIM 全流程融合，为市政路桥高质量发展提供支撑。

参考文献

- [1] 熊小伟. 市政路桥施工中 BIM 技术的应用分析 [J]. 模型世界, 2023(33): 172-174.
- [2] 杨威. 探讨 BIM 技术在市政路桥施工中的应用 [J]. 科技创新导报, 2022, 19(23): 164-166.
- [3] 蒋刘骏. 市政路桥施工中的现代化技术应用探讨 [C]//2025 可持续工程设计与实践经验交流论文集. 2025: 1-3.
- [4] 陈鹤. 路桥设计中 BIM 技术的实践运用分析 [J]. 建筑工程技术与设计, 2020(12): 2455.
- [5] 师光. 市政道路设计中 BIM 技术的整合运用分析 [J]. 建材发展导向 (上), 2020, 18(9): 230.

高层建筑塔式起重机双支平衡支撑附着式安装技术研究

孙炳营¹, 王祥², 郭祥革², 辛举¹, 赵云帅¹

1. 中建三局第一建设工程有限责任公司, 湖北 武汉 430000

2. 山东省工程咨询院, 山东 济南 250000

DOI:10.61369/ME.2026060029

摘 要 : 超高层建筑施工中, 我们所用的传统的吊塔附着方式很容易造成剪力墙应力集中、附着点位偏移、构件匹配度低等问题。本文针对高层建筑塔吊施工提出了一种双支平衡支撑附着式安装方法, 采用双向受力平衡、附着框架自适应调节、预埋件模块化匹配三项主要做法, 使塔吊附着结构与墙体变形保持协调一致。根据实际工程应用情况, 对受力状态、现场实施效果、综合收益进行检验。结果表明, 采用该技术后剪力墙最大应力下降 42%, 塔吊附着点位移控制在 3mm 以内, 现场施工效率提高 14%–15%, 整体投入减少 12%–14%。可以很好地解决复杂结构中塔吊附着的安全和效率问题, 具有较强的现场适用性, 可以为同类超高层项目提供参考。

关 键 词 : 超高层建筑; 塔式起重机; 双支平衡支撑; 附着技术; 施工安全; 动态补偿

Research on the Installation Technology of Double-Supported Balanced Supports for Tower Cranes in High-rise Buildings

Sun Bingying¹, Wang Xiang², Guo Xiangge², Xin Ju¹, Zhao Yunshuai¹

1. China Construction Third Bureau First Engineering Co., Ltd. Wuhan, Hubei 430000

2. Shandong Engineering Consulting Institute, Jinan, Shandong 250000

Abstract : In the construction of super-high-rise buildings, traditional tower crane attachment methods often lead to issues such as shear wall stress concentration, displacement of attachment points, and poor component compatibility. This paper proposes a dual-support balanced support attachment installation method for high-rise building tower crane construction, which employs three key approaches—two-way force equilibrium, adaptive adjustment of the attachment frame, and modular matching of embedded components—to ensure that the tower crane attachment structure remains in coordinated alignment with the wall deformation. Based on actual engineering applications, this method was evaluated regarding its load-bearing conditions, on-site implementation effectiveness, and overall benefits. The results demonstrate that, upon adopting this technology, the maximum stress in the shear walls is reduced by 42%, the displacement of the tower crane attachment point is controlled within 3 mm, on-site construction efficiency is improved by 14–15%, and the total investment is reduced by 12–14%. This method effectively addresses the safety and efficiency challenges associated with tower crane attachments in complex structural configurations, exhibits strong field applicability, and can serve as a valuable reference for similar super-high-rise projects.

Keywords : super-high-rise buildings; tower cranes; dual-support balanced system; attachment technology; construction safety; dynamic compensation

引言

随着国内城市建设不断加快, 高层和超高层建筑越来越多, 建筑结构越来越复杂, 内部空间也越来越紧凑, 施工现场大型机械设备的附着稳固性, 成为必须重视的技术要点^[1]。塔式起重机是超高层工程中最重要垂直运输机械, 塔式起重机的附着装置是否安全、稳定, 直接关系到整个工程的施工安全和建设进度^[2]。目前常用的塔吊附着方式大多依靠剪力墙进行刚性支撑, 实际应用中间题突出, 剪

作者简介:

孙炳营 (1996.01.26–), 男, 汉族, 河南新乡人, 中建三局第一建设工程有限责任公司, 本科, 工程师;

王祥 (1978.01.14–), 男, 汉族, 山东济南人, 山东省工程咨询院, 本科, 副高级工程师;

郭祥革 (1976.10.30–), 男, 汉族, 山东菏泽人, 山东省工程咨询院, 本科, 中级工程师;

辛举 (1989.02.03–), 男, 汉族, 山东曹县人, 中建三局第一建设工程有限责任公司, 本科, 工程师;

赵云帅 (2002.08.29–), 男, 汉族, 河北邢台人, 中建三局第一建设工程有限责任公司, 本科, 初级工程师。

力墙在施工阶段会出现收缩和形变，容易造成附着位置松动、偏移，增大塔吊倾覆的可能性^[3]；偏心荷载作用下，剪力墙局部应力明显偏高，容易造成混凝土开裂等结构损伤^[4]；普通预埋部件不能适应不同厚度的剪力墙，安装精度和连接可靠性都难以满足要求^[5]。以上问题长时间地影响着超高层工程的安全控制以及成本控制，必须依靠技术创新来改善。

国内许多学者和工程技术人员对塔吊附着技术做了大量的研究。李刚等^[6]用型钢桁架作为附着支撑，提高了荷载传递效果，但是没有考虑墙体变形带来的不利影响；张宏等^[7]研发了可调节式附着节点，现场安装更加灵活，但是缺少实时变形补偿功能；国外采用的预应力附着技术可以缓解应力集中问题，但是施工流程繁琐，整体成本较高。目前行业内还没有一套可以同时兼顾受力均衡、变形自适应、墙体厚度适配的完整附着技术，不能满足超高层建筑施工的实际需要。

一、技术原理与核心创新

（一）技术原理

本次研究的附着技术以“协同受力、实时适配”为思路，用三项关键构造实现塔吊和剪力墙的协调工作优化传力路径，建立塔吊、撑杆、墙体三者共同受力的体系，把单点水平受力变为墙体轴向受力，减少侧向弯矩的影响；

设置可调节支撑部件，自动补偿剪力墙收缩变形，保证附着点位置稳定；

采用组合式锚固构造，适应不同厚度剪力墙，达到可靠固定的目的。

（二）核心技术创新

1. 双向荷载平衡体系

该系统用对称布置的附加撑杆和预埋件一起工作，撑杆用 25a 工字钢和缀板焊接成格构形式，截面尺寸为 600mm×400mm，沿剪力墙两侧呈 45° 对称安装^[9]。撑杆端部用 500×400×20mm 预埋钢板与墙体锚固，形成封闭受力环，把塔吊产生的水平荷载转化为墙体轴向压力，整体安全系数不小于 2.5，明显减小应力集中，使剪力墙最大应力降低 42%。

2. 动态补偿式附着框架

附着框架由可调牛腿和双支水平斜撑组成，斜撑采用 Q355B 材质 H 型钢，截面规格为 200×200×8×12，按三角形稳定结构呈 45° 对称布置^[10]。端部采用万向铰接形式，可实现 ±30mm 的位移补偿，用 10.9 级 M24 高强螺栓与牛腿连接，可以跟随墙体变形自动调整，荷载分散效果提高 40% 以上，使塔吊附着点位移稳定控制在 3mm 以内。

3. 模块化自适应埋件系统

预埋件由 9 根 Φ25 HRB400 钢筋按 3×3 矩阵布置，水平间距 100mm、竖向间距 125mm，锚固长度不小于 500mm，通过穿孔塞焊与预埋钢板连成整体。剪力墙两侧安装 350×250×10mm 夹紧钢板，采用 150～500mm 长的 M20 螺栓紧固，配合 BIM 参数化定位，可适配不同厚度墙体，单组锚筋抗拔力不低于 120kN。

二、施工工艺流程与操作要点

（一）施工工艺流程

本技术施工按照设计、加工、安装、监测、验收闭环管理流程进行，具体步骤如下所示。

前期准备：深化图纸、技术交底、材料进场验收；

预埋件制作：锚筋排布、钢板焊接、夹板加工；

预埋件安装：现场放线、钢筋固定、混凝土浇筑；

撑杆组拼：场地整平、构件拼接、焊缝处理；

支撑系统安装：附加撑杆、双支水平撑杆依次就位；

自适应调节：位移监测、节点微调、荷载测试；

验收移交：分项验收、整体验收、资料整理归档。

（二）关键操作要点

1. 预埋件加工与安装

预埋件用 BIM 模型精确设计，定位偏差不大于 2mm^[11]。锚筋按 3×3 矩阵布置，水平间距偏差 ±2mm，竖向间距偏差 ±3mm，锚固深度不小于 500mm（20 倍钢筋直径）。预埋钢板和锚筋用穿孔塞焊，焊缝高度不小于 8mm，焊接完成后进行 UT 探伤合格后方可使用。安装时用全站仪确定轴线位置，预埋件与结构钢筋点焊固定，焊缝长度不小于 60mm；混凝土浇筑时分层下料，振捣点距离预埋件不小于 200mm，防止移位。

2. 撑杆拼装与安装

撑杆现场拼装前清理场地，铺设 10mm 厚钢板，地面平整度误差控制在 5mm/m² 以内^[12]。用激光校准仪确定安装轴线，工字钢对接偏差不大于 1mm，采用 E5015 焊条多层多道焊接，预热温度不低于 100℃，层间温度不高于 200℃，焊后余高控制在 1～3mm。剪力墙混凝土强度达到设计值的 90% 后进行撑杆安装，撑杆与牛腿用万向铰接连接，螺栓孔对位偏差不超过 1mm，最终拧紧扭矩控制在 350N·m±5%。

3. 动态补偿与智能监测

在各个撑杆的端头处安装精度为 ±0.5mm 的激光位移传感装置，实时采集位移数据并传送到现场监测平台，同时把位移预警阈值设为 ±45mm^[13]。当监测数据超过限值 3mm 时，系统就会发出声光报警并自动停止塔吊运行，然后利用液压顶升设备以 5mm 为调节步长对夹板间距进行微调，直到位移数值降到 2mm 以下的安全区间为止。现场作业人员每天对铰接部位润滑情况、螺栓拧紧力矩、夹板夹持状态进行检查，做好日常巡检、维护台账记录。

三、材料与设备选型

（一）主要材料性能

所用材料均符合国家现行规范要求，关键材料指标如下表所示。

工字钢为 25a 型，撑杆主体用，屈服强度 ≥ 355MPa；

预埋钢板：500×400×20mm Q355B 钢板，抗拉强度 470 - 630MPa；

钢筋：Φ25 HRB400，屈服强度 ≥400MPa，延伸率 ≥16%；

焊条：E5015 型，扩散氢含量 ≤5mL/100g，焊缝强度 ≥490MPa；

高强螺栓：10.9 级 M24，抗拉强度 ≥1040MPa，扭矩系数 0.11 - 0.15；

防腐涂层为环氧富锌底漆和聚氨酯面漆，干膜厚度分别不小于 80μm 和 50μm，耐盐雾不低于 1000h。

（二）主要设备配置

塔式起重机 TC7035，最大起重量 16t，用于构件吊装；
全站仪 Topcon GT-600；误差 ≤1.5mm，用于定位放线；
激光测距仪 Leica Disto S9i；精度 ±0.5mm，用于尺寸复核；
电焊机 ZX7-400；用于钢结构焊接作业；
超声波探伤仪：满足 GB11345-2013，用于焊缝检测；
液压顶升装置：调节步长 5mm，用于间距微调；
扭矩扳手：量程 0 - 500N · m，用于螺栓紧固；
激光位移传感器精度为 ±0.5mm，用作位移检测。

四、安全与环保效益

① 安全效果，施工全过程无安全事故，塔吊倾覆风险降低，高空作业防护措施落实到位，安全达标率 100%；

② 施工现场扬尘控制、降噪隔离、水循环利用等措施，扬尘排放量降低 60%，噪声符合 GB12523-2011 标准，水资源利用率提高 30%，符合绿色施工要求。

五、综合效益分析

（一）技术效益

依靠三项关键的改进，成功地解决了传统附着工艺存在的固

有缺陷，即双向受力体系可以抵消墙体所受的侧向弯矩，可调式支撑框架可以跟随结构变形而调整，组合式预埋件可以匹配不同厚度的剪力墙。经过专业机构查新验证，该成套技术具有明显的创新性，填补了国内超高层塔吊附着技术的空白，对行业技术升级起到推动作用。

（二）经济效益

采用该技术后现场施工效率提高 14% ~ 15%，塔吊占用工期相应缩短。以 300 天使用周期计算，可以多完成 4500-5000 吨材料的吊运工作，节省吊运成本约 4.5-5 万元；项目总体投入降低 12%-14%，对于造价亿元级别的项目来说，可以节约成本 1200-1400 万元，节约部分主要是结构病害处理费用减少、材料使用效率提高、工期压缩带来的管理开支降低。

（三）社会效益

该技术可以保证施工人员的安全，减少对周边环境的影响，符合可持续发展的理念^[14]。在推广应用培养专业技术人员，带动相关产业技术升级，对建筑行业高质量发展有积极作用。

六、结语

本次研发的高层建筑塔吊双支平衡支撑附着安装工艺，通过传力路径优化、变形自适应补偿、适配型锚固构造等手段，解决了超高层项目中塔吊附着容易出现的应力集中、位置偏移、构件适配不良等问题。从实际工程应用效果上看，该技术可以明显提高施工安全保证能力和现场作业效率，减少项目总体投入，在同类工程中具有较好的推广使用条件。

下一步研究可以继续对支撑构件进行轻量化优化，配合智能控制算法实现自动补偿调节，扩大该技术在复杂施工环境和特殊结构工程中的应用范围，为建筑领域绿色低碳、高质量发展提供更实用的技术支撑。

参考文献

- [1] 王建国.超高层建筑施工垂直运输设备配置与管理研究[J].建筑技术,2022,53(7):865-868.
- [2] 刘志强,陈明.塔式起重机附着系统力学性能分析与优化设计[J].建筑机械,2021,39(12):78-82.
- [3] 张磊,王丽.超高层建筑剪力墙施工期收缩变形对塔吊附着的影响研究[J].施工技术,2020,49(18):95-98.
- [4] 李明杰.塔吊附着体系引发的剪力墙应力集中问题及对策[J].工程质量,2023,41(3):67-70.
- [5] 赵刚,孙伟.可调式塔吊附着节点的研发与工程应用[J].建筑科学,2022,38(5):102-107.
- [6] 李刚,张华.基于型钢桁架的塔吊附着支撑体系设计与应用[J].工业建筑,2021,51(8):198-202.
- [7] 张宏,刘军.超高层建筑塔吊可调式附着技术研究[J].施工技术,2020,49(24):110-113.
- [8] Smith J, Johnson M. Prestressed attachment technology for tower cranes in super high-rise buildings[J]. Journal of Construction Engineering and Management, 2019, 145(6): 04019032.
- [9] 中华人民共和国住房和城乡建设部.GB 50017-2017 钢结构设计标准[S].北京:中国建筑工业出版社,2017.
- [10] 王强,李娜.三角形稳定原理在塔吊附着支撑中的应用研究[J].建筑钢结构进展,2022,24(4):89-94.
- [11] 陈明,赵伟.BIM 技术在塔吊附着预埋件定位中的应用[J].施工技术,2021,50(10):123-126.
- [12] 张强,李丽.智能监测技术在塔吊附着系统中的应用[J].工程监测,2022,6(3):45-50.
- [13] 王丽,陈明.超高层建筑施工绿色技术创新与应用[J].建筑节能,2023,51(7):156-160.
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部.GB/T 50378-2014 绿色建筑评价标准[S].北京:中国建筑工业出版社,2014.

建筑工程全过程安全标准化建设实施思路

张鹤龄

天津市东丽区工程建设交易服务中心，天津 300300

DOI:10.61369/ME.2026060023

摘 要： 建筑工程安全管理难在工序跨度长、作业面转换快、分包班组多和危险源状态变化频繁。全过程安全标准化建设把投标准备、施工策划、作业实施、检查整改与竣工移交放入同一控制序列，借助风险清单、标准条款、定型防护、数据记录和复验确认压缩现场管理差异。实施中应把标准拆到作业面 and 责任人，按危险等级配置检查频次与整改时限，并保留现场可追溯安全资料。

关 键 词： 建筑工程；全过程管理；安全标准化；施工安全；隐患整改

Implementation Ideas for Whole-Process Safety Standardization Construction of Construction Engineering

Zhang Heling

Tianjin Dongli District Engineering Construction Transaction Service Center, Tianjin 300300

Abstract： Safety management in building projects is difficult because work fronts change quickly, subcontracted crews overlap, and hazards vary by process. Whole-process safety standardization places bidding preparation, construction planning, site operation, inspection and rectification, and completion handover in one control sequence. Risk lists, standard clauses, fixed protective facilities, data records, and re-inspection confirmation reduce differences among work fronts. Implementation should translate standards into site tasks and accountable roles, assign inspection frequency and rectification deadlines by hazard level, and retain traceable safety records.

Keywords： building project; whole-process management; safety standardization; construction safety; hazard rectification

引言

建筑工程施工现场同时存在高处作业、临时用电、起重吊装、深基坑、模板支撑、交叉作业和消防动火等风险。传统安全管理多依靠项目部经验、专项检查和事故后整改，标准条款进入现场后容易停留在制度文本和资料归档，班组操作与管理要求之间形成距离。全过程安全标准化建设应把安全要求前移到策划和资源配置阶段，再贯穿作业实施、隐患处置与竣工移交，使每个工序转换点都有明确的风险识别、防护配置和检查责任。

一、建筑工程安全标准化建设价值分析

（一）压降施工现场高风险作业暴露

建筑工程的风险暴露往往发生在工序转换和作业面叠加时。基坑支护未完成即安排材料转运，主体结构外架拆改与机电预留同步推进，塔吊吊运半径覆盖人员通行区，都会使单项安全措施在复合场景中失效。安全标准化建设把危险源辨识、作业许可、防护设施、人员资质和旁站检查提前写入工序条件，班组进入作业面前就能获得同一张风险清单；高处作业面每日检查不少于1次，动火点审批有效期不超过24.00h，临边防护缺失面积超过2.00m²或入场核验证件缺失率超过0.00%时立即停止相邻作业，标准落到岗位动作后才能减少作业面差异^[1]。对危大工程、临边

洞口、临时用电和动火作业，可按红、橙、黄三级设置进入条件，红色事项未完成交底和防护验收不得开工，橙色事项增加巡查，黄色事项保留班前提醒。

（二）稳定工序转换交接安全状态

施工安全状态会随进度推进而改变，同一楼层在钢筋绑扎、模板支设、混凝土浇筑、拆模清理和砌筑插入时，对通道、照明、支撑、临边和消防的要求并不相同。全过程标准化把每次工序交接转化为可检查的安全状态，交接内容不只包含进度和质量，还包含防护设施是否恢复、临电箱是否移位登记、材料堆放是否侵占通道、消防器材是否随作业点同步调整。数字化技术下建筑工程质量安全全过程管控强调质量安全信息在施工过程中的连续记录，这种连续性用于安全管理时，可减少“上一工序留下

风险、下一工序被动承受”的断点。项目部可把交接确认控制在30min内完成，涉及外架、吊装、深基坑和有限空间的交接由安全员、施工员和班组长共同确认，普通工序由班组长自查后纳入日巡查抽核。

（三）统筹高风险区域安全资源投入

安全资源投入若平均分配，容易在低风险区域形成过量检查，在高风险作业面又缺少专人盯守。全过程安全标准化把人、机、料、法、环五类资源与危险等级绑定：专职安全员重点投入危大工程和多专业穿插区域，临边防护、卸料平台、消防器材和照明设备按楼层、洞口数量、作业人数和夜间施工条件配置，教育培训按岗位风险而非人员批次简单铺开。危大工程要点和全过程管控进入同一管理对象后，安全资源应随危险源转移，而不是固定在办公室台账。项目部可按每5000m²不少于1名专职巡查人员、每个塔吊覆盖区设置独立警戒责任、每个动火点配置2具灭火器形成底线。

二、建筑工程安全标准化建设关键技术

（一）全阶段作业面风险清单编制

风险清单应从投标踏勘开始建立，并随施工组织设计、专项方案和现场条件变化持续修订。清单不宜只列“高处坠落、物体打击、机械伤害”等事故类别，还要写明触发条件、责任岗位、检查频次和允许作业条件。投标准备阶段记录周边道路、地下管线、相邻建筑、场地狭窄和夜间施工限制；施工策划阶段分解深基坑、脚手架、模板支撑、起重吊装和临时用电；作业实施阶段把风险落实到楼层、轴线、设备编号和班组。施工全过程安全风险因素会在作业面叠加，清单应具备可分派、可检查和可关闭的属性^[2]。不同施工阶段可预设危险源识别数量、班前交底覆盖率、临边防护验收率、整改时限和复验确认率，并把阶段节点、单向连接关系和风险等级纳入同一清单口径。施工阶段安全标准化控制指标设计示例见表1。

表1 施工阶段安全标准化控制指标设计示例					
施工阶段	危险源覆盖率 (%)	班前交底覆盖率 (%)	临边防护验收率 (%)	整改时限 (h)	复验确认率 (%)
投标准备	82.00	92.00	85.00	72.00	90.00
基坑与支护	96.00	98.00	96.00	24.00	98.00
主体结构	98.00	99.00	97.00	24.00	98.50
装饰机电穿插	92.00	96.00	93.00	36.00	96.00
外立面高处作业	97.00	99.00	98.00	12.00	99.00
竣工移交	88.00	94.00	90.00	48.00	95.00

表1显示，主体结构和外立面高处作业的危险源识别覆盖率分别为98.00%和97.00%，整改时限压缩到24.00h和12.00h，说明高处、吊装和临边风险集中阶段需要更高的交底覆盖率与复验确认率；竣工移交阶段覆盖率为88.00%，但仍保留95.00%的复验确认率，防止收尾阶段资料完整而现场遗留风险。

（二）安全标准条款拆解到现场作业面

安全标准条款只有拆到作业面，才会从制度要求变成现场动

作。项目部可把法律法规、地方安全标准、企业制度和专项方案分成四类条款：准入条款控制人员证件、机械验收和方案审批；防护条款控制临边洞口、脚手架、卸料平台和消防器材；作业条款控制吊装、动火、临电和高处作业许可；记录条款控制交底、巡查、整改和复验资料。条款拆解应按投标准备、施工策划、作业实施、检查整改和竣工移交排列阶段节点，并用单向连接关系标明标准从风险清单进入专项方案、防护设施、隐患台账和安全资料的过程^[3]。以脚手架作业为例，标准不应停留在“按规范搭设”，而要落实到连墙件间距、剪刀撑布置、脚手板铺设、验收牌悬挂和拆改审批。安全标准条款的阶段拆解关系见图1。



图1 全过程安全标准化建设阶段关系

图1把投标准备、施工策划、作业实施、检查整改和竣工移交放在同一横向序列，箭头方向说明安全标准化不是单次检查，而是随阶段推进持续转移控制对象。风险等级点与各阶段子项同时出现，提示风险清单、专项方案、防护设施和复验记录应在同一阶段口径下配套管理。

（三）现场临边洞口防护设施定型配置

防护设施定型配置是安全标准化建设中最容易被现场感知的内容。临边洞口可采用统一高度、颜色、踢脚板和警示标识，电梯井口、楼梯口、预留洞口按照洞口尺寸设置不同构造，卸料平台和悬挑架使用限载牌、验收牌和使用登记牌，临时用电采用三级配电、二级漏电保护和箱门编号。定型配置还应与施工节奏匹配，外架拆改前完成替代防护，机电洞口封堵前保留警示围护，夜间施工区域提前补充照明。项目部可规定临边栏杆高度1.20m、踢脚板高度180mm、洞口盖板承载标识不少于1处、临电箱巡检间隔不超过24h。统一设施尺寸、颜色和验收牌格式后，安全员巡查不再依赖个人经验判断，班组也能快速识别不合格状态。定型防护进场前可按抽样比例检查焊缝、扣件、网片和连接件，抽查比例不低于10%，不合格批次不得进入楼层周转。

（四）施工安全作业记录数据采集方式

作业记录数据采集应服务安全判断，而不是扩大资料数量。班前交底记录应保存作业内容、危险源、控制措施、人员签认和影像；巡查记录应保存检查位置、问题描述、责任班组、整改时限和复验结果；危大工程旁站记录应保存时间、工况、监测值、异常处置和停止作业条件。建筑工程施工全过程安全风险指标及因素耦合分析提示风险因素之间会相互叠加，数据采集应保留能够判断叠加关系的字段，如作业人数、垂直交叉状态、机械运行半径和天气条件^[4]。移动端表单可把必填字段控制在15项以内，单条记录填写时间控制在3min内，照片不少于2张且包含全景和细部，定位误差控制在10m以内。

三、建筑工程安全标准化建设实施方案

（一）开工前安全策划场区定位控制

开工前安全策划要把标准化建设对象定位到项目组织和施工总平面。项目经理牵头确认安全目标、危大工程清单、分包准入条件和检查资源，技术负责人把专项方案与安全控制条件同步交底，安全负责人把巡查路线、隐患分级和整改时限写入项目安全策划。施工总平面布置应同步考虑塔吊覆盖区、材料堆场、消防通道、临电线路和车辆流线，消防通道净宽不小于4.00m，临电总箱与分箱检查间隔不超过7d，样板区验收不合格项清零后再组织班组进场。开工前还应完成标准化样板区，展示临边防护、洞口盖板、配电箱、消防器材和安全标识，班组进场后按样板对照执行。对危大工程，专项方案审批完成后再组织安全技术交底和条件验收，未形成验收记录的作业面不得进入施工计划。策划文件还应写明检查样表、作业许可流程和停工条件，样表字段宜控制在12项以内，危大工程清单开工前7d完成复查，分包进场教育合格率达到100.00%后再分配作业面。

（二）施工中作业风险分级检查方法

施工中检查应按风险等级分层组织，一般隐患在48.00h内整改，较大隐患在24.00h内复验确认，重大隐患在1h内暂停对应作业并设置警戒范围。项目日巡查覆盖临边洞口、临时用电、消防动火和文明施工，周检查覆盖危大工程、机械设备、分包履约和资料记录，专项检查面向台风暴雨、高温、夜间施工和重大节点转换。数字化模型与现场安全管理连接后，检查点可绑定到楼层、轴线、设备和作业面，纸面记录与现场位置脱节的情况会减少^[4]。检查时先判断作业面是否符合标准，符合项记录归档并转入下道工序；不符合项进入隐患分级，再判断是否属于重大风险。同类隐患在7d内出现3次时，班组交底、材料堆放和防护设施配置同步纳入专项检查；安全员每天至少抽查20%的高风险作业面。施工阶段检查与整改分支见图2。



图2 施工阶段检查与整改分支

图2把“是否符合标准”和“是否重大风险”设置为两个判断节点，蓝色线路对应符合项归档转序，橙色线路对应隐患分级处置，绿色节点标识符合条件后的工序转换。分支标签直接落在对应线路旁，说明同一检查结果不能简单归档，必须先按风险等级决定暂停、限期整改或复验确认。

（三）现场隐患分级整改处置时限

隐患整改处置时限应由风险等级和作业状态共同决定。重大隐患涉及结构坍塌、高处坠落、起重伤害、火灾爆炸和中毒窒息风险时，现场立即停止对应作业，安全负责人和技术负责人共同确认处置措施；较大隐患在24h内完成整改方案和防护恢复，一般隐患可在48h内完成整改并纳入日巡查复验。整改通知单要写明位置、问题、责任班组、完成时限、临时防护和复验条件，不能只写“加强管理”或“立即整改”。复验人员不宜由原整改人单独完成，至少由施工员或安全员确认现场状态，并保留整改前后照片。对重复出现的同类隐患，项目部应追查班组交底、材料供应、工序安排和防护设施配置是否存在缺口，必要时调整作业计划。

（四）竣工阶段安全资料筛选移交方法

竣工安全资料移交要筛选对后续使用、维修和责任判断仍有价值的记录。普通日巡查表可按月度目录保存，危大工程验收、机械设备验收、消防动火记录、临电验收、重大隐患处置、事故险情记录 and 安全教育资料应形成独立移交包，单项资料复查抽样比例不低于10%。移交文件应包含目录、时间范围、责任单位、关键风险点和整改关闭状态，电子文件命名与工程部位、日期和资料类型一致。项目部可按不少于6类资料建立移交索引，重大隐患处置记录保存期限不少于5年，电子文件缺项率控制在2.00%以内，竣工前15d完成资料抽核并形成问题清单。典型隐患、处置时限、复验结果和防护设施配置进入竣工安全总结后，可供同类项目开工策划使用^[6]。资料移交不是把台账整体打包，而是保留支撑安全状态判断的证据。

四、结语

建筑工程全过程安全标准化建设应从投标准备和施工策划阶段识别风险，把标准条款拆解到作业面、岗位责任、防护设施和记录字段，再在施工过程中按风险等级组织检查、整改和复验确认。标准化建设能够压降高风险作业暴露、稳定工序交接状态并校准安全资源投入位置；实施方案要求开工前完成策划定位，施工中执行分级检查，隐患处置按时限分流，竣工阶段保留可追溯资料。风险清单、标准条款、现场设施、数据记录和资料移交连续存在时，安全管理才不会停留在制度文本。

参考文献

- [1] 高理想. 建筑施工安全标准化实施路径与成效分析研究 [J]. 陶瓷, 2026, (3): 227-229+236.
- [2] 王琪鹏. 建筑工程施工全过程安全风险指标及因素耦合分析 [J]. 科技与创新, 2025, (20): 145-147.
- [3] 杨杰. 数字化技术下建筑工程质量安全全过程管控体系的构建 [J]. 城市开发, 2026, (9): 81-83.
- [4] 贾熙寅. 建筑工程危大工程安全监督要点及全过程管控体系研究 [J]. 中国房地产业, 2026, (12): 106-109.
- [5] 魏文学, 陈光, 谢颖. BIM技术在建筑工程施工安全管理中的应用 [J]. 四川水泥, 2025, (10): 39-41.
- [6] 徐毅. 以全过程管控为导向, 提升建筑工程施工安全风险识别与防范能力 [J]. 楼市, 2026, (4): 48-50.

老旧小区消防管网提升改造技术与实践研究

徐涛

苏州金螳螂建筑装饰股份有限公司, 浙江 杭州 310025

DOI:10.61369/ME.2026060027

摘 要 : 随着城市化进入存量更新阶段, 上世纪八九十年代建成的老旧小区消防管网普遍存在管材老化、布局失当、水压水量不足、设施破损等隐患, 消防防灾能力薄弱。这类小区人口与建筑密度高, 消防供水故障易加剧火情、阻碍救援, 带来严重生命财产损失。本文结合现行消防规范与城市更新需求, 梳理管网典型安全隐患, 确立改造原则与目标, 围绕管网检测评估、管材选用、布局优化、增压补水、配套完善提出成套改造技术方案, 分析施工难点、质量管控及长效运维机制, 并依托工程实例佐证方案可行有效, 可为老旧小区消防管网精细化标准化改造提供技术支撑, 补齐城市基层消防安全短板。

关 键 词 : 老旧小区; 消防管网; 提升改造; 消防安全; 管网运维

Technical and Practical Research on the Upgrading and Renovation of Fire Protection Pipeline Systems in Old Residential Areas

Xu Tao

Suzhou Jintanglang Building Decoration Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang 310025

Abstract : As urbanization enters the phase of existing infrastructure renewal, fire protection pipelines in old residential communities constructed during the 1980s and 1990s commonly suffer from issues such as aging pipe materials, improper layout, insufficient water pressure and flow rates, and damaged facilities, resulting in inadequate fire safety capabilities. These communities exhibit high population density and building density; failures in fire water supply can exacerbate fires and hinder rescue operations, leading to severe loss of life and property. This paper integrates current fire safety regulations with urban renewal requirements to identify typical pipeline safety hazards, establish renovation principles and objectives, and propose a comprehensive technical solution encompassing pipeline inspection and evaluation, material selection, layout optimization, pressure enhancement and water replenishment, as well as infrastructure improvement. It analyzes construction challenges, quality control measures, and long-term operation and maintenance mechanisms, demonstrating the feasibility and effectiveness of the proposed approach through practical engineering examples. The study provides technical support for the refined, standardized renovation of fire protection pipelines in old residential communities and addresses critical gaps in urban grassroots-level fire safety.

Keywords : old residential communities; fire protection pipeline networks; upgrading and renovation; fire safety; pipeline operation and maintenance

引言

城市老旧小区是城市发展进程的历史遗存, 承载着大量居民的居住生活功能。据住建部统计数据显示, 我国城镇建成20年以上的老旧小区数量庞大, 普遍存在建设标准偏低、基础设施老化、配套功能缺失等问题。在消防安全领域, 老旧小区消防管网问题最为突出, 多数小区建设时期沿用旧版消防设计规范, 管网设计流量、压力参数无法适应当前高层建筑防火、高密度居住空间防灾的需求, 且历经数十年使用, 管网长期处于潮湿、腐蚀、承压波动状态, 各类故障频发。

近年来, 全国多地老旧小区火灾事故频发, 复盘事故原因, 消防管网无水、水压不足、管道堵塞、消火栓失效是火灾扩大、救援延误的核心诱因。同时, 老旧小区普遍存在私拉乱接管线、管网被违章建筑遮挡、管道堵塞锈蚀严重、阀门失灵等问题, 进一步加剧了消防安全风险。为落实城市更新行动、推进民生安全保障工程, 各地均将老旧小区消防管网提升改造列为老旧小区改造的核心专项工程, 通过系统化改造修复消防供水功能, 全面提升老旧小区火灾抵御能力。在此背景下, 开展老旧小区消防管网提升改造技术研究, 具有重

要的现实意义与工程价值。

当前国内关于新建建筑消防管网设计、工业管网改造的研究较为成熟，但针对老旧小区存量管网的改造研究多集中于单一隐患整治，缺乏系统化、标准化的改造体系，对老旧管网水力复核、新旧管网衔接、低成本高效改造模式的研究不够深入。本文结合现行《建筑设计防火规范》《消防给水及消火栓系统技术规范》，构建“隐患排查—评估分析—精准改造—长效运维”的全流程改造体系，丰富老旧小区消防基础设施改造的理论体系，为同类民生消防改造工程提供理论支撑。

本文总结的改造技术方案可有效解决老旧小区管网老化、供水失效、布局混乱等实际问题，精准补齐老旧小区消防安全短板，提升小区初期火灾自救能力和消防救援保障能力。同时，通过优化改造工艺、严控施工质量、完善运维机制，可实现改造工程经济化、规范化、长效化，避免重复改造、资源浪费，切实保障居民生命财产安全，助力平安城市建设。

一、老旧小区消防管网现存主要问题及隐患成因

（一）管材老化腐蚀，管道破损渗漏

老旧小区消防管网多采用镀锌钢管、铸铁管等传统管材，使用寿命普遍为15-20年，而多数小区管网服役年限已超20年，远超设计使用周期。长期使用过程中，管道内壁受水体杂质、微生物腐蚀、结垢堵塞，管道外壁受土壤潮湿、酸碱腐蚀，导致管壁变薄、锈蚀穿孔、接口渗漏。部分小区管网锈蚀程度严重，管道断面大幅缩小，供水流量、压力严重衰减，火灾发生时无法满足灭火供水需求。同时，老旧管道脆性大，受地面沉降、车辆碾压、温度变化影响，极易出现爆裂漏水问题，导致管网整体停水失效。

（二）管网设计标准偏低，水力参数不达标

多数老旧小区建设时执行旧版消防规范，管网设计管径偏小、供水压力标准较低，无法适配现行规范要求。现行规范明确，住宅小区室外消防管网应形成环状供水，保证双向供水，消火栓供水压力、流量需满足初期火灾扑救需求。而老旧小区多采用枝状管网布局，无环状供水回路，管网供水稳定性极差，一旦某一段管道故障，整个片区供水瘫痪。同时，原有管网管径普遍为DN50-DN100，小于现行规范要求的最小管径，水力损耗极大，高层住户区域水压严重不足，高层火灾完全依赖外部消防救援，自救能力基本丧失。

（三）配套设施残缺失效，系统功能瘫痪

消防管网配套设施包括消火栓、阀门、水泵接合器、增压设备、消防水池等，是保障管网正常运行的关键。老旧小区普遍存在配套设施残缺、失效问题：一是室外消火栓数量不足、间距超标，部分消火栓被杂物、违建遮挡，接口锈蚀、开关卡滞，无法正常取水；二是管网控制阀门老化失灵、密封失效，无法实现分段管控，管道故障后难以精准隔离，维修需大面积停水；三是多数老旧小区无专用消防增压泵、消防水箱，依靠市政管网常压供水，高峰期市政水压不足时，消防管网同步失压；四是水泵接合器缺失、堵塞或标识不清，消防救援车辆无法快速对接补水，延误灭火时机。

（四）管网布局混乱，存在消防盲区

长期以来，老旧小区存在私自改造管线、私接管道、占用管网通道等乱象，导致消防管网布局杂乱无章。部分居民私自封

堵、改造消防管道，破坏管网原有结构；后期小区路面改造、绿化施工、违建搭建，随意碾压、掩埋消防管网，导致管道路径混乱、局部管网废弃。同时，管网未进行分区分控，高低区管网混接，水力失衡严重，部分楼栋、角落存在消防供水盲区，完全不具备火灾扑救供水条件。

（五）日常运维缺失，隐患长期累积

老旧小区多无专业消防运维团队，物业消防安全管理能力薄弱，普遍存在“重治安、轻消防”的问题。长期未开展管网冲洗、压力检测、隐患排查，管道结垢、堵塞问题持续加重；管网渗漏、阀门损坏、消火栓失效等小隐患未及时处置，逐步演变为系统性故障。同时，小区消防设施无定期检测、维保记录，设施老化失效后无人更新，最终导致消防管网整体瘫痪。

二、老旧小区消防管网提升改造总体设计

严格遵循《消防给水及消火栓系统技术规范》（GB50974-2014）、《建筑设计防火规范》（GB50016-2014）等国家现行规范要求，所有改造设计、施工、验收环节全部合规，确保改造后管网水压、流量、布局、设施配置全面达标，彻底消除消防安全隐患。结合老旧小区场地狭小、建筑密集、地下管线复杂、居民正常生活不中断的实际情况，避免一刀切改造模式。对尚可利用的原有管网、设施进行修复改造，对完全失效的系统彻底更换，优先采用微创施工、分段施工工艺，最大限度降低施工扰民、减少改造投资。

平衡改造安全性与经济性，杜绝过度改造、重复改造。在满足消防规范、保障安全的前提下，优化改造方案，选用性价比高、耐久性强、维护便捷的管材和设备，合理控制改造成本，实现以最低投入达到最优改造效果。改造与运维同步规划，在管网改造升级的同时，完善管网分区分控、设备监测、日常维保体系，构建改造、管控、运维一体化机制，保障改造后管网长期稳定运行。

三、老旧小区消防管网提升改造核心技术方案

管材改造遵循“能用则修、失效全换”的原则，分类处置原有管网。对于服役年限较短、腐蚀轻微、无大面积破损的管道，

采用高压冲洗、内壁防腐涂层修复工艺，清除管道内壁结垢、锈蚀杂物，涂刷防腐防水材料，恢复管道通水能力，延长管材使用寿命。对于严重腐蚀、破损渗漏、管径不达标、完全堵塞的老旧管道，全部更换为新型优质管材。结合老旧小区地下环境特点，优先选用球墨铸铁管、PE消防专用管：球墨铸铁管强度高、耐腐蚀、抗沉降、密封性好，适配室外埋地主干管网改造；PE消防管柔韧性强、施工便捷、造价较低，适配分支管网、入户管网改造。更换管道时严格按照规范控制管径，室外主干管网管径不小于DN150，楼栋分支管网管径不小于DN100，确保水力损耗符合标准。同时，所有新建管道全部做防腐、防渗、防冻处理，接口采用柔性连接，适应地面轻微沉降，杜绝渗漏问题。

针对老旧小区枝状管网供水稳定性差、无备用供水通道的问题，对小区整体消防管网进行布局优化，构建环状消防供水体系。结合小区道路布局、楼栋分布，梳理原有管线路径，打通断头管、废弃管，新增连通管段，使小区室外消防主干管网形成闭环状，实现双向供水。

对占地面积大、楼栋分散的大型老旧小区，采用分区环状供水模式，将小区划分为多个独立供水片区，各片区内部形成环状管网，片区之间设置连通阀门，可独立供水、也可联动供水，大幅提升管网供水稳定性。同时，优化管网坡度、走向，避免管网积水、积气导致的通水不畅；清除管网沿线违章建筑、遮挡杂物，保障管网及附属设施可正常使用、快速检修。改造后彻底消除消防供水盲区，确保小区任意点位火灾均可获得稳定供水保障。

按照消防规范标准，重新规划小区消火栓布局，补齐消火栓缺口，拆除损坏、锈蚀、无法使用的老旧消火栓，更换为标准化地上式消火栓。控制消火栓间距不大于120m，保护半径不大于150m，确保全覆盖无盲区。清理消火栓周边遮挡杂物，规范标识消火栓位置，确保火灾时可快速取水。同时，为每处消火栓配备水枪、水带等配件，保障完整可用。针对老旧小区市政水压不足、高层供水乏力的问题，配套升级增压补水系统。无专用消防水箱、消防水泵的小区，增设高位消防水箱、消防稳压泵、增压

泵组，搭建独立消防供水系统，脱离市政常压供水限制，保障火灾初期5-10分钟灭火供水稳定。地势高差大、高层楼栋集中的小区，采用高低区分压供水模式，低区利用市政管网供水，高区通过增压泵组加压供水，精准匹配不同楼层供水压力需求，避免水压不足或压力过高爆管问题。同步修复、清淤小区消防水池，确保水池容积、水质符合规范，保障应急储水能力。

四、老旧小区消防管网长效运维管理策略

老旧小区消防管网改造“三分建设、七分运维”，完善的运维管理机制是保障改造效果长效落地的关键，需构建社区、物业、监管部门三方联动的常态化运维体系。

1. 落实物业主体运维责任，将消防管网运维纳入物业常态化工作清单，明确专人负责管网巡查、设备维保、隐患处置。社区履行监督协调责任，定期督促物业开展消防设施运维检查；消防、住建部门履行行业监管责任，定期开展专项抽查，压实各方责任，杜绝管理缺位。制定标准化运维流程，实行日巡查、月维保、年检测制度。每日巡查管网外观、消火栓、阀门状态，及时清理遮挡杂物、排查显性隐患；每月开展管网冲洗、设备试运行、阀门启闭检测，清除管道结垢杂物，保障设备灵活可用；每年委托第三方机构开展管网水压、流量全面检测，对老化、损耗部件及时更换维修，实现隐患早发现、早处置。

2. 建立小区消防管网完整电子档案，记录管网布局、管径参数、改造记录、维保检测数据，实现全过程可追溯。有条件的小区可加装管网压力监测、渗漏报警智能设备，实时监控管网运行状态，异常情况自动报警，提升运维智能化水平。

3. 强化居民宣传与监督，通过社区公告、业主群、线下宣讲等方式，开展消防安全宣传，引导居民自觉保护消防管网及配套设施，杜绝私改、占用、遮挡消防设施行为。畅通居民监督举报渠道，鼓励居民主动排查上报消防隐患，形成全民参与、共同守护的消防安全管理氛围。

参考文献

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 消防给水及消火栓系统技术规范 (GB50974-2014)[S]. 北京：中国计划出版社，2014.
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑设计防火规范 (GB50016-2014)[S]. 北京：中国计划出版社，2014.
- [3] 王浩. 老旧小区消防管网隐患排查及改造技术研究 [J]. 工程技术研究，2024, 9(08): 112-114.
- [4] 李建军. 城市老旧小区消防给水系统升级改造实践 [J]. 给水排水，2023, 49(05): 98-102.
- [5] 张磊. 老旧小区居住区环状消防管网改造设计与施工管控 [J]. 消防科学与技术，2023, 42(03): 415-418.
- [6] 陈铭. 老旧小区消防设施运维管理现存问题及优化策略 [J]. 安全与消防，2024(02): 56-58.
- [7] 刘阳. 存量建筑消防管网水力复核与改造方案优化 [J]. 住宅科技，2023, 43(09): 67-70.
- [8] 刘银. 老旧小区改造中消防给水管网隐患排查与改造方案 [J]. 消防界（电子版），2025, 11（2）: 53-54.
- [9] 喻阳光，雷雨，陈宇. 城市更新改造区域集中消防给水系统设计应用与思考 [J]. 工程建设与设计，2025（14）: 78-81.
- [10] 赵阳，张恒. 老旧小区火灾防控存在的问题与对策 [J]. 今日消防，2025, 10（3）: 77-79.

公路改扩建新旧路面拼接裂缝病害分析及施工防裂技术

李晓美, 王雅倩

德州市公路事业发展中心, 山东 德州 253000

DOI:10.61369/ME.2026060028

摘 要： 面对持续增长的交通运输压力，实施公路改扩建项目工程，能够有效提升行车通行效率。而在新旧路面拼接施工中出现裂缝问题，将会直接影响行车安全性和公路耐久性，因此研究公路改扩建新旧路面拼接防裂技术具有重要作用。本文分析了裂缝病害问题、防裂技术要点，如合理选择抗裂材料、合理设计整体结构，并积极利用施工工艺，降低裂缝发生率，提高新旧路面拼接质量，推动公路改扩建工程可持续发展。

关 键 词： 公路改扩建；新旧路面；施工防裂技术

Disease Analysis and Comprehensive Anti-Crack Construction Technology of Splicing Cracks of Old and New Pavements in Highway Reconstruction and Expansion

Li Xiaomei, Wang Yaqian

Dezhou Highway Development Center, Dezhou, Shandong 253000

Abstract： Facing the increasing traffic pressure, the implementation of highway reconstruction and expansion projects can effectively improve the traffic efficiency. However, the crack problem in the splicing construction of old and new pavements will directly affect the driving safety and highway durability, so it is important to study the splicing anti-crack technology of old and new pavements in highway reconstruction and expansion. This paper analyzes the problems of crack diseases and the key points of anti-crack technology, such as reasonable selection of anti-crack materials, reasonable design of overall structure, and active use of construction technology to reduce the incidence of cracks, improve the quality of old and new pavement splicing, and promote the sustainable development of highway reconstruction and expansion projects.

Keywords： highway reconstruction and expansion; new and old pavements; anti-crack technology in splicing construction

社会经济不断发展，交通流量持续增加，现有的公路网无法满足当前交通需求。原来建设的公路因为设计标准较低，再加上长期荷载的干扰，部分路段出现了结构损坏和性能退化等问题，影响公路使用功能及交通安全性。在这一背景下，开展公路改扩建工程有利于提高通行效率，降低交通压力。实施改扩建工作，可以提高道路的承载力和通行能力，并优化布局区域交通，为社会经济发展建设奠定基础。但公路改扩建工程施工涉及复杂的施工技术和管理问题，尤其在新旧路面拼接中很容易出现裂缝问题，需采取针对性的防裂技术，推动公路建设可持续发展，延长公路使用寿命。

一、新旧路面拼接裂缝病害分析

（一）裂缝病害类型

公路改扩建新旧路面拼接部位很容易出现裂缝问题，主要包括纵向裂缝和横向裂缝。纵向裂缝和道路行驶方向是平行关系，长度和宽度的差异性较大，呈现线性分布，并在拼接缝附近集中分布。纵向裂缝的诱因包括材料性能和荷载作用以及施工工艺等^[1]。横向裂缝和道路行驶方向之间维持垂直关系，分布具有规

律性，横向裂缝具有很强的贯穿性。横向裂缝主要是因为温度变化引发收缩裂缝，尤其季节温差较大，将会提高横向裂缝发生率。通过综合分析可知，工程地质条件和交通荷载以及施工工艺等因素直接关系到裂缝发生率和严重程度。

（二）裂缝产生原因

新旧路面拼接部位裂缝诱发因素十分复杂，主要包括材料和荷载以及温度、施工工艺等因素。首先新旧路面材料特点差异将会引发裂缝问题。旧路面使用时间较长，将会逐渐改变材料的弹

作者简介：

李晓美（1997.03-），女，山东德州人，硕士，助理工程师，研究方向：工程施工经济管理与质量成本控制研究。

王雅倩（1999.11-），女，山东德州人，硕士，助理工程师，研究方向：工程建设与技术研究。

性模量和抗弯强度等性能，而新铺路面材料的强度和弹性模量较高，因为无法匹配材料性能，再加上交通荷载的影响，在拼接部位很容易集中应力，增加裂缝发生率。其次在交通荷载的反复作用下，路面裂缝病害会持续加剧。尤其在重载车辆通行的工况下，车辆荷载产生的剪切应力与拉应力显著增大，使道路拼接缝位置形成结构薄弱区域，进一步加速裂缝的产生与延展。

此外改变温度后也会影响裂缝发展，因为沥青混凝土材料具有热胀冷缩特点，改变温度之后将会增大路面内部温度应力，超过材料抗拉强度之后，将会形成横向裂缝。最后选用不合理的施工工艺，将会引发裂缝问题。如果施工单位没有合理处理拼接缝，或者压实度不符合标准，将会影响拼接部位的质量，从而产生裂缝问题。

（三）裂缝危害性

新旧路面拼接部位产生裂缝问题，将会直接影响路面的外观质量，并会影响公路的结构强度和耐久性以及行车安全性，因此突出了防裂技术的重要性。首先出现裂缝问题后路面强度持续降低，裂缝问题逐渐发展，持续破坏路面结构层，因为荷载的影响导致路面出现局部应力集中问题，严重破坏结构层。尤其在基层拓展了裂缝，会降低路面承载力。其次裂缝问题会影响公路使用寿命，水分会沿着裂缝进入到结构内部，逐渐软化基层和土基，引发坑槽和沉陷等严重病害，严重缩短公路使用寿命，同时提高了后期维修费用。此外裂缝问题会威胁行车安全性^[2]，出现裂缝问题会降低路面平整度，降低行车舒适度，增加交通事故发生率。尤其在雨天，在裂缝中会出现积水问题，降低路面抗滑性，严重威胁行车安全性。因此，需要采取科学的防裂技术，降低裂缝发生率，优化路面使用性能，保证公路运行的安全性。

二、公路改扩建新旧路面拼接施工防裂技术

（一）材料抗裂技术

1. 抗裂材料的特性

常用的抗裂材料包括土工格栅和玻纤格栅，适用于新旧路面拼接施工。土工格栅的强度较高，并具有一定的延伸率，可以对路面结构集中应力发挥分散作用，降低裂缝发生率。此外土工格栅的耐腐蚀性和抗老化性突出，适用于各种复杂的环境。玻纤格栅的模量较高，并具备较高的温度稳定性和抗拉强度，在长期使用过程中很难出现蠕变问题，增强路面防裂性能。土工格栅和玻纤格栅的界面黏结性能突出，可以紧密黏结沥青混合料和水泥基层，构建统一的复合结构，提高路面抗裂性。

2. 抗裂材料的应用

新旧路面拼接施工中，施工单位要结合工程条件合理设计抗裂材料的铺设部位和层数。在基层和面层的过渡区采用土工格栅，增强层间结合效果，对行车荷载发挥分散作用。例如在公路改扩建中，将土工格栅铺设在基层顶面，并合理控制土工格栅和旧路面拼接缝的间距，可以降低纵向裂缝的发生率^[3]。在面层内部适合利用玻纤格栅，控制铺设层数为1~2层，并结合荷载等级和地基条件确定铺设层数。保证铺设位置和层数的合理性，可以高效利用材料，优化拼接部位的密封性和防水性，保障道路的耐久性。此外在使用抗裂材料中要严格遵守施工规范，充分黏结抗裂材料和周围材料，避免因施工不合理而集中应力。

（二）结构防裂技术

1. 合理结构设计

提高结构设计的合理性，可以有效防止裂缝问题的发生。合理组合路面结构层厚度和材料，对行车荷载和温度应力发挥分散作用，降低裂缝发生率。例如在公路改扩建中合理增加基层厚度，并选用高强度水泥稳定碎石材料，保障基层承载力和抗裂性。此外要结合实际情况对面层厚度进行调整，并选用高模量的沥青混凝土材料，有利于提高路面刚度，避免因重复荷载力而引发裂缝问题。在结构设计过程中要综合考虑新旧路面材料差异性，合理设计简便过渡段，合理错开结构层的薄弱面，避免集中应力。总之选择合适的设计方法，可以延长路面使用寿命，便利地开展养护维修工作。

2. 设置应力吸收层

设置应力吸收层，可以优化防裂效果。选择应力吸收层材料时，可以选用高弹性改性沥青混合料和橡胶沥青混凝土，这类材料的应力吸收能力和抗变形能力较强，对裂缝发展具有控制作用。通常要控制应力吸收层的厚度在2~4cm范围内，并在基层和面层之间设置应力吸收层，可以对裂缝的传播发挥阻断作用^[4]。利用应力吸收层的剪切变形对基层集中的应力发挥吸收和分散作用，避免反射裂缝。在应力吸收层应用中，要对温度和时间等参数严格控制，紧密黏结上下层，优化整体防裂作用。

（三）工艺防裂技术

1. 先进的施工工艺

应用先进的施工工艺，可以提高新旧路面拼接施工的防裂性。当前在公路改扩建施工中广泛利用精细铣刨和同步摊铺技术，保障拼接部位施工质量。精细铣刨技术应用中，通过铣刨设备分层处理旧路面，保障旧路面拼接面的平整性和垂直度，避免因界面不平整而集中应力。同步摊铺技术可以同步摊铺和压实新旧路面材料，紧密黏结各层间，提高整体结构的稳定性，保证新旧路面拼接部位的压实度超过98%。

2. 工艺质量控制要点

使用先进施工工艺的过程中，需要提高质量控制力度，优化整体防裂效果。首先要严格控制温度，在摊铺和压实沥青混合料中，需要严格控制施工温度，如果温度较低或者较高将会影响材料性能，通常要控制摊铺温度在130~150℃范围内，有利于保障混合料的压实度和抗裂性。其次要控制摊铺速度，如果摊铺速度较快，不利于均匀地分布材料，提高裂缝问题发生率^[5]。如果速度较慢，将会引发材料离析等问题。在实际施工中，施工单位要结合混合料类型和设备性能调整摊铺速度，通常要控制在2~4m/min范围内。此外在施工中要做好接缝处理工作，并控制碾压次数，保证各工序的质量符合施工标准。

三、公路改扩建新旧路面拼接施工防裂技术的应用策略

（一）不同地质条件下的选择

在公路改扩建中，地质条件的不同，对新旧路面拼接施工和裂缝产生率的影响差异性较大。软土路基的压缩性较高，同时缺乏承载力，很容易引发纵向裂缝。针对软土路基，施工单位可以选用土工格栅和玻纤格栅等材料，提高路基抗裂性。此外针对软

土路基，要合理设计基层结构，例如结合实际情况增加基层厚度，或者建设水泥稳定碎石层，对荷载应力发挥分散作用，降低裂缝问题发生率。岩石路基的强度和稳定性较强，但是在拼接施工中如果改变了温度，将会引发收缩裂缝。针对岩石路基，施工单位要设置应力吸收层，并综合利用精细铣刨工艺，优化路面抗裂性。总之，在实际施工中，施工单位要结合地质条件合理选择防裂技术，以提高新旧路面拼接质量。

（二）不同交通荷载情况下的选择

交通荷载直接影响了新旧路面拼接裂缝发生率，因此在实际施工中要结合交通流量和车辆类型等合理选择防裂技术。针对交通流量较大的路段，路面承受较大的水平荷载和垂直荷载，很容易产生裂缝问题。为了应对上述问题，施工单位要铺设多层抗裂材料，例如在基层沟壑面层之间铺设土工布或者沥青止水带，提高路面的抗裂性。同时需要优化处理施工工艺，例如选用同步摊铺技术减少施工接缝数量，降低裂缝发生率。针对交通荷载较轻的路段，施工单位要合理简化防裂技术，例如在公路中下面层设置单层抗裂材料，并对基层厚度合理调整，满足公路使用需求。

（三）防裂技术的综合应用

在公路改扩建施工中利用单一的防裂技术不利于规避新旧路面拼接中的裂缝，因此要综合利用各种防裂技术。首先要合理整合材料、结构及工艺等层面，在材料方面要选择高性能抗裂材料，例如可以选用改性沥青混凝土和纤维增强混凝土，提高路面抗裂性，延长公路使用寿命。在结构层面，可以设置应力吸收层，提高基层厚度的科学性，对路面荷载应力发挥分散作用。在工艺层面，施工单位要积极选用先进的施工工艺，保障整体施工精度。其次要结合工程实际情况灵活地组合各项技术，如果路段涉及软土路基，而且交通承载力较大，要综合利用土工格栅和应力吸收层以及同步摊铺技术，优化裂缝抵御效果。最后结合实验数据等对技术组合效果进行验证，结合分析结果调整施工方案，保障整体工程的综合效益。

四、公路改扩建新旧路面拼接施工防裂质量控制和检测

（一）施工质量控制要点

为了保证新旧路面拼接施工质量，避免出现裂缝问题，施工

单位要严格控制材料和施工工艺以及施工环节的质量。首先在材料进场阶段，施工单位要严格检测抗裂材料的物理力学性能和耐久性能，保证选用的材料符合施工要求。针对基层和面层使用的水泥和沥青混合料等，施工单位要检测材料配合比，利用试验方式验证材料的强度和稳定性。其次在执行施工工艺中，施工单位检测台阶开挖和回铺以及拼接施工质量。例如施工单位在水泥基层施工中利用正向台阶形式，施工单位要结合设计规范控制台阶的宽度和高度。如果在沥青路面选用了反向台阶形式，施工单位要平顺地处理台阶坡度，否则很容易引发应力集中问题。此外在施工中应妥善处理纵向接缝，合理布设膨胀止水带和沥青止水带，优化拼接位置密封性能，避免出现渗水问题。最后在不同的施工环节，施工单位要加强温度监控和湿度监控等，尤其在摊铺和碾压沥青混合料中，保障施工温度控制效果，可以提高整体结构的压实度，避免出现裂缝隐患。

（二）质量检测方法

常用的方法包括钻芯取样和无损检测。钻芯取样指的是在路面选择圆柱体试样，对试样的厚度和密度以及抗压强度等进行分析，确定路面结构层的质量。该方法获取的实验数据具有直观性和准确性特点，但是利用这一方法会损伤路面，因此要合理选择取样位置，并控制取样数量，保证检测结果可靠性的同时尽量减少对路面的影响^[6]。而无损检测技术操作过程相对简单，有利于提高工作效率。例如利用地质雷达技术检测路面内部缺陷和裂缝，适用于检测大面积的路面。在路面动态弯沉值测量中利用落锤式弯沉仪，可以确定路面的承载力是否符合标准。

五、结束语

本文分析了公路改扩建新旧路面拼接施工防裂技术，首先分析了裂缝病害的成因，提出针对性的防裂技术，并对技术应用要点和质量控制措施进行分析，对实际工作的开展提供参考，降低裂缝发生率，提升公路使用性能，提高行车的安全性。

参考文献

[1]唐亮.公路改扩建工程新旧路面基层拼接界面施工技术分析[J].工程技术研究,2026,11(5):38-40.
[2]张耀.高速公路改扩建工程新旧路面拼接施工技术分析[J].运输经理世界,2025,(31):53-55.
[3]梅红雨.高速公路改扩建工程新旧路面拼接施工技术[J].交通世界,2025,(29):78-81.
[4]王晶.某改扩建公路项目新旧路面拼接施工技术分析[J].交通世界,2025,(22):157-159.
[5]史程远.高速公路改扩建工程新旧路面拼接施工技术控制研究——以沈阳至海口国家高速公路改扩建项目为例[J].广东建材,2024,40(3):106-109.
[6]锁渝杰.改扩建高速公路新旧路面拼接施工技术应用探析[J].产业创新研究,2024,(2):130-132.

ALC 板材轻质隔墙及饰面层一体化装配式施工技术研究

仲光凯¹, 王乃可², 辛举³, 张志兴³, 孙炳营³

1. 山东省工程咨询院, 山东 济南 250000

2. 山东开放大学, 山东 济南 250000

3. 中建三局第一建设工程有限责任公司, 湖北 武汉 430000

DOI:10.61369/ME.2026060033

摘 要 : 传统 ALC 板材隔墙施工效率低、拼接精度不足、门窗洞口易开裂及饰面层施工工序繁杂等问题, 适配装配式建筑绿色化、工业化发展需求, 提出 ALC 板材轻质隔墙及饰面层一体化装配式施工技术。通过优化施工工艺、研发专用施工装置与节点连接方案, 系统分析该技术的施工原理、操作要点, 并结合工程实例验证其质量控制效果与综合效益。结果表明, 该技术可将 ALC 板材安装效率提升 1.3 倍, 1000 m² 隔墙及饰面层施工可节约成本 5.7 万余元, 有效解决传统施工痛点, 兼顾施工精度、结构可靠性与节能环保性, 适配酒店、住宅等建筑内隔墙施工场景, 具有良好的推广应用价值。

关 键 词 : ALC 板材; 轻质隔墙; 一体化装配式施工; 节点连接; 施工效益

Research on the Integrated Prefabricated Construction Technology for ALC panels, Lightweight Partition Walls, and Facing Layers

Zhong Guangkai¹, Wang Naike², Xin Ju³, Zhang Zhixing³, Sun Bingying³

1. Shandong Engineering Consulting Institute, Jinan, Shandong 250000

2. Shandong Open University, Jinan, Shandong 250000

3. China Construction Third Bureau First Engineering Co., Ltd. Wuhan, Hubei 430000

Abstract : Traditional ALC panel partition wall construction faces challenges such as low construction efficiency, insufficient splicing precision, susceptibility of door and window openings to cracking, and complex finishing layer installation processes. To meet the demands for the greening and industrialization of prefabricated construction, this study proposes an integrated prefabricated construction technology for ALC panel lightweight partition walls and their corresponding finishing layers. By optimizing construction processes, developing specialized construction equipment and joint connection schemes, and conducting a systematic analysis of the construction principles and key operational points of this technology, this study further validates its quality control effectiveness and overall benefits through case studies from actual engineering projects. The results demonstrate that this technology can increase the installation efficiency of ALC panels by 1.3 times, reduce construction costs for 1,000 m² of partition walls and finishing layers by more than 57,000 RMB, effectively address the pain points of traditional construction methods, and balance construction precision, structural reliability, and energy-saving and environmental protection requirements. This technology is well-suited for interior partition wall construction in buildings such as hotels and residential buildings, offering significant potential for widespread application and promotion.

Keywords : ALC panels; lightweight partition walls; integrated prefabricated construction; joint connections; construction benefits

作者简介:

仲光凯 (1991.04.01-), 男, 汉族, 山东济宁人, 山东省工程咨询院、本科, 中级工程师;

王乃可 (1993.06.01-), 女, 汉族, 山东菏泽人, 山东开放大学, 硕士研究生, 中级工程师;

辛举 (1989.02.03-), 男, 汉族, 山东曹县人, 中建三局第一建设工程有限责任公司, 本科, 工程师;

张志兴 (1987.04.25-), 男, 汉族, 河北沧州人, 中建三局第一建设工程有限责任公司, 本科, 中级工程师;

孙炳营 (1996.01.26-), 男, 汉族, 河南新乡人, 中建三局第一建设工程有限责任公司, 本科, 工程师。

引言

随着我国建筑行业向工业化、绿色化转型，装配式施工技术因具备现场干作业、施工效率高、能耗低等优势，成为建筑业高质量发展的核心方向之一^[1]。蒸压加气混凝土（ALC）板材作为一种轻质高强、防火保温、环保节能的新型建材，凭借工业化生产程度高、适配装配式施工的特点，广泛应用于建筑内隔墙工程^[2]。但传统 ALC 板材隔墙施工过程中仍存在诸多技术瓶颈：板材轻质低强导致门窗洞口易开裂，需增设构造柱加固但现浇工序繁杂；现场依赖人工搬运安装，施工效率低且拼接精度难以控制；饰面层采用“挂网抹灰+刷漆”传统工艺，工序繁琐、粉尘污染严重，且隔墙裂缝易延伸至饰面层^[3]。

针对上述问题，国内外学者开展了相关技术优化研究。郗振江等^[4]通过新型复合板材制备优化装配式墙板力学性能，徐汝德等^[5]分析了一体化节点对隔墙热工性能的影响，为 ALC 板材一体化施工提供了理论参考。但现有研究多聚焦于单一施工环节优化，缺乏对隔墙与饰面层一体化施工的系统性研究，专用施工装备与节点连接技术的适配性仍需提升。

本文针对 ALC 板材施工问题，提出了一套轻质隔墙与饰面层一体化装配施工体系，通过优化专用装置、节点连接与工艺，明确了流程与标准，并结合实例验证了其可行性与效益，为同类工程提供技术参考。

一、工程概况与材料设备

（一）工程概况

以吕叔湘中学（8000 m²）和润扬大桥环龙酒店（3200 m²）项目为例，研究 ALC 板材（规格 2.74m × 0.6m × 75mm）一体化装配施工技术，要求墙体满足 25 年使用年限，兼具抗震性、整体性与平整美观的饰面。

（二）主要材料

本技术所用核心材料均符合国家相关标准，进场需完成复试验收，主要包括：① ALC 板材，密度 ≤ 600kg/m³，抗压强度 ≥ 3.5MPa，导热系数 ≤ 0.16W/(m · K)，防火等级达 A1 级；② 预制构造柱，采用 C25 混凝土预制，预留 Φ12 锚固钢筋，适配门窗洞口加固需求；③ 辅助材料，包括耐碱玻璃纤维网格布（幅宽 120mm）、专用聚合物粘结剂（粘结强度 ≥ 1.0MPa）、纤维水泥压力板（厚度 12mm）及铝合金饰面板、可调螺杆等装配式饰面层材料^[6]。

（三）主要设备

为提升施工效率与精度，配置专用施工设备及常规机具，核心设备包括：① ALC 板材专用安装辅助装置，具备夹持、电控行走、液压升降、360° 旋转及倾斜调整功能，可实现板材精准定位；② 定制钢模具，采用 3mm 厚碳素钢材焊接而成，配备可调螺栓与 L 型螺纹钢，用于预制构造柱节点混凝土浇筑；③ 测量与施工机具，包括激光扫平仪、水准仪、2m 靠尺、手持电钻、射钉枪等，保障施工测量与节点固定精度^[7]。

二、一体化装配式施工工艺原理

ALC 轻质隔墙及饰面一体化装配式施工，搭配专用机具、优

化节点加固、饰面干式装配组合施工，形成完整施工体系，解决传统隔墙施工质量问题，提质增效，核心原理分三部分。

（一）板材精准安装原理

施工使用 ALC 板材专用一体机具，可夹持、转运、升降、调位，替代人工搬运和撬棍调墙的老办法。机具夹固板材转运就位，液压校正墙体垂直，微调构件校准平整度，板材拼缝控制在 5mm 左右，安装精度高、施工速度快^[8]。

（二）预制构造柱节点加固原理

ALC 板材强度不高，接缝易开裂，隔墙端部设置预制构造柱加固。上部采用铝合金 U 型卡与结构梁板锚固，填实专用粘结剂；下部构造柱预留筋与地面植筋绑扎，定制钢模浇筑 C20 细石混凝土，节点连接牢固，有效防止墙体及门窗洞口周边开裂^[9]。

（三）饰面层装配式衔接原理

墙面铺设纤维水泥压力板做基层，用结构胶加汽钉固定，改善 ALC 板材表层疏松起砂问题。饰面龙骨采用可调螺杆固定，不用现场焊接，调平简单；铝饰面板通过挂片和龙骨拼装，全程干法施工，无抹灰扬尘，还能阻挡墙体裂缝外扩^[10]。

三、关键施工流程与操作要点

一体化隔墙施工按施工准备、测量放样、墙板安装、节点加固、基层板铺设、饰面装配依次施工，工序衔接紧凑，全程严控现场施工质量，各环节操作要点如下。

（一）施工准备

技术方面：核对施工图纸，做好技术及安全交底，细化施工方案、材料和人员安排，先做施工样板，验收合格后再大面积施工。

现场方面：清理场地，划分施工区域和材料运输路线，布置施工机械；进场材料验收合格后，ALC 板材分类竖向堆放，高度

不超 1.8 米，底部垫木做好防潮保护^[11]。

（二）测量放样

采用激光投线仪配合墨线，在地面弹出隔墙中线、边线及门窗洞口位置，做好清晰标记；对放线精度进行复核，确保偏差符合规范要求。在预制构造柱安装位置弹出植筋点位，采用 $\Phi 12$ 螺纹钢植筋，植筋深度不小于 15 倍钢筋直径，采用结构胶锚固；钻孔直径比钢筋大 4~10mm，注胶深度为孔深的 2/3，植入钢筋后确保结构胶溢出，保障植筋强度^[12]。

（三）ALC 墙板安装

ALC 墙板转运使用专用辅助夹具，夹稳后调至后仰搬运，防止磕碰破损。板材切割前弹好切割标线，用专用设备裁切，避免板体开裂。安装前清理基层，在已装墙板接缝两侧涂刷专用粘结剂，待装墙板凹槽填满半幅粘结剂；借助工装调直墙板垂直度，对位推入安装就位，保证墙板拼接平齐、缝隙粘结饱满密实。墙板安装后用三角木楔临时固定，每侧设置两块，用 2m 靠尺校核平整度，偏差部位用撬棒微调校正。

墙板就位校正后，用射钉枪配合管卡钢片固定于楼板，每处固定 2 颗射钉或 M8 锚栓。隔墙顶部与结构预留 10~15mm 缝隙，采用专用嵌缝剂填实，板缝及结构交接位置铺贴宽度不小于 120mm 的玻纤网格布；板底采用砂浆坐浆封堵，砂浆养护 7d 强度达标后，拆除临时木楔，再用同配比砂浆修补楔孔^[13]。

（四）预制构造柱安装与节点固定

隔墙安装完成后，在 ALC 板材凸榫侧面涂抹专用粘结剂，将预制构造柱对准凹槽安装，用橡皮锤敲实。上部安装 2 个铝合金 U 型卡，与上层结构梁（板）固定，U 型卡与构造柱之间填充粘结剂密实；下部将构造柱预留锚固钢筋与地面植筋用 2 股扎丝绑扎搭接，安装定制钢模具，从斜口灌注 C20 细石混凝土，边灌注边插捣密实，24h 后拆模，洒水养护^[14]。

（五）纤维水泥压力板铺设

清扫隔墙基层，弹好标高线，基层刷结构胶后，用气枪钉或自攻螺丝固定纤维水泥压力板。板材自上而下或从中间向两侧铺设，钉间距 100~150mm，钉头沉进板面。板间留 3~5mm 伸缩缝，大面积施工错缝铺设，不得留通缝，保证板面平整合规^[15]。

（六）饰面层装配施工

按现场分格线钻孔，孔深比埋设深度多 5~10mm，清孔后安装可调螺栓，激光仪调平锁紧，3m 靠尺复查平整度。铝龙骨固定在可调螺栓上，饰面板挂片间距 ≤ 400 mm，挂装板材后用金属线条收缝，龙骨加装橡胶条密封，保证施工面平整严实^[16]。

四、质量与安全环保控制

（一）质量控制

施工严格按 GB/T 15762-2020 规范执行，落实班组三检制

度。质量把控：ALC 板材完好无损坏，安装整体偏差 ≤ 5 mm，节点位置偏差 ≤ 10 mm，饰面平整度偏差 ≤ 1 mm^[17]。

（二）安全与环保控制

施工落实安全岗位责任制，配备专职安全员，特种作业人员全部持证上岗。现场用电按三级配电、两级保护设置，机具定期检修，用电防护到位；高空作业必须佩戴防护用具，杜绝安全事故^[18]。

环保施工遵照 GB/T 50905-2014 绿色施工要求。材料密闭运输降尘，垃圾集中清运、工完场清；粘结剂定点拌合，板材施工降噪，机具养护减少废气污染^[19]。

五、工程应用与效益分析

（一）工程应用效果

该技术在吕叔湘中学迁址新建项目与润扬大桥环龙酒店改造项目中成功应用，累计完成 ALC 板材隔墙施工约 11200 m²。应用结果表明，专用安装辅助装置将板材安装效率从传统 15 块/天（3 人）提升至 35 块/天（2 人），施工精度显著提升，拼缝均匀度达标率 100%；预制构造柱节点有效解决门窗洞口开裂问题，开裂发生率降至 0；装配式饰面层施工无需抹灰，现场粉尘污染大幅减少，施工周期缩短 30% 以上，验收合格率达 100%，满足设计与使用要求^[20]。

（二）综合效益分析

1. 技术效益

构建了 ALC 板材一体化装配式施工体系，突破传统施工技术瓶颈，专用装置与节点工艺的优化提升了施工精度与结构可靠性；装配式饰面层施工阻断裂缝延伸，提升了墙体耐久性；全流程干作业、工序衔接顺畅，适配装配式建筑工业化发展需求，为同类工程提供了可复制的技术方案^[21]。

2. 经济效益

以 1000 m² 隔墙及饰面层施工为例，传统施工合计投入 78773 元，其中墙体拼装 49440 元、挂网抹灰 13333 元、油漆涂刷 16000 元；采用本技术仅需 21744 元，可节省成本 57029 元，经济效益良好。同时施工用工更少，材料损耗由传统 5% 降至 2% 以下，进一步控制施工开支^[22]。

3. 社会效益

施工过程粉尘少、噪音低、VOC 排放小，符合绿色施工要求。ALC 板材装配式施工能耗低、建筑垃圾少，助力“双碳”工作推进。施工周期短，能加快项目交付，提升建筑使用效益，推广应用价值较高^[23]。

六、结语

针对传统 ALC 隔墙施工短板，采用轻质隔墙与饰面层一体化

装配式施工技术，通过专用设备、节点优化及工序整合，提升施工效率、施工质量与环保效果。实践证明，该技术造价低、施工精度高、绿色环保，可有效解决门窗洞口开裂、施工慢等问题，适用于住宅、酒店等室内隔墙工程。后续可优化专用设备尺寸，适配狭小空间施工，助力该技术在装配式建筑中广泛应用。

参考文献

- [1] 陈柄卓. 浅析低碳驱动下的建筑装饰装修工程能效提升路径 [J]. 中国建筑装饰装修, 2025(6): 99-101.
- [2] 王文涛. 基于可持续发展的建筑结构材料选择与优化设计 [J]. 中国建筑金属结构, 2025, 24(15): 37-39.
- [3] 罗智星, 于运星, 卢梅, 等. 基于保温结构一体化系统的建筑生命周期碳排放研究 [J]. 建筑科学, 2023, 39(4): 26-34.
- [4] 鄢振江. 装饰保温一体化陶瓷复合板的制备与性能分析 [J]. 佛山陶瓷, 2024, 34(8): 31-33.
- [5] 徐汝德. 一体化热桥及复合龙骨对外墙保温系统热工性能影响研究 [J]. 江西建材, 2025(4): 52-54.
- [6] 商宝剑. 建筑结构设计中绿色环保材料力学性能分析与应用设计 [J]. 艺术与设计 (电子版), 2024(5): 0043-0045.
- [7] 于敬海, 吴晓萌, 刘维, 等. 复合保温板与加气混凝土砌块墙体一体化施工力学性能研究 [J]. 天津建设科技, 2024, 34(3): 64-66.
- [8] 方佳妮. 绿色低碳时代新型墙材材料运用分析 [J]. 中文科技期刊数据库 (全文版) 工程技术, 2025(10): 101-104.
- [9] 张磊. ALC 板材隔墙装配式施工技术优化及应用 [J]. 建筑施工, 2024, 46(2): 289-291.
- [10] 李娟. 轻质隔墙与饰面层一体化施工工艺研究 [J]. 装饰装修天地, 2024(8): 123-125.
- [11] 中华人民共和国国家标准. 蒸压加气混凝土板 (GB/T 15762-2020)[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
- [12] 王浩. 装配式 ALC 隔墙施工质量控制要点分析 [J]. 江西建材, 2024(3): 89-90.
- [13] 刘敏. ALC 板材专用安装装置的研发与应用 [J]. 建筑机械, 2024, 52(7): 78-81.
- [14] 赵阳. 预制构造柱在 ALC 隔墙加固中的应用研究 [J]. 施工技术, 2024, 53(S1): 456-458.
- [15] 中华人民共和国国家标准. 建筑装饰装修工程质量验收标准 (GB 50210-2018)[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
- [16] 陈明. 装配式饰面层与 ALC 隔墙衔接工艺优化 [J]. 中国建筑装饰装修, 2024(12): 112-114.
- [17] 孙凯. ALC 板材隔墙施工常见问题及防治措施 [J]. 山西建筑, 2024, 50(5): 98-100.
- [18] 中华人民共和国行业标准. 建筑施工高处作业安全技术规范 (JGJ 80-2016)[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- [19] 中华人民共和国国家标准. 建筑工程绿色施工规范 (GB/T 50905-2014)[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
- [20] 江苏建工集团有限公司. 吕叔湘中学迁址新建项目室内装饰工程施工总结 [R]. 2024.
- [21] 中建八局第三建设有限公司. 装配式 ALC 隔墙一体化施工技术规程 [R]. 2024.
- [22] 王丽. 装配式施工与传统施工成本对比分析 [J]. 工程经济, 2024, 34(4): 34-36.
- [23] 李建. 绿色建筑背景下 ALC 板材的应用与发展 [J]. 新型建筑材料, 2024, 51(3): 156-158.

国土空间规划与城市高质量发展研究

李友华

武山县自然资源局土地整理中心，甘肃 武山 741300

DOI:10.61369/ME.2026060037

摘 要： 国土空间规划属于引领城市高质量发展的重要制度手段，在新的发展阶段下，城市发展由规模扩张转向向质量提升转变，对于空间治理的要求也越来越高。统筹生产、生活、生态空间，优化资源配置和空间结构，国土空间规划对于提高城市承载能力、促进要素自由流动、防范发展风险起到重要的作用。从规划目标、实施机制和发展成效三个方面出发，对国土空间规划怎样支持城市高质量发展进行分析，并给城市治理水平的提高提供借鉴。

关 键 词： 国土空间；城市发展；空间治理；高质量发展；资源配置

Research on Territorial Spatial Planning and High-Quality Urban Development

Li Youhua

Land Consolidation Center of Wushan County Bureau of Natural Resources, Wushan, Gansu 741300

Abstract： Territorial spatial planning is an important institutional means to lead high-quality urban development. Under the new development stage, urban development has shifted from scale expansion to quality improvement, and the requirements for spatial governance are increasingly high. By coordinating production, living and ecological spaces, and optimizing resource allocation and spatial structure, territorial spatial planning plays an important role in improving urban carrying capacity, promoting the free flow of factors, and preventing development risks. Starting from three aspects of planning objectives, implementation mechanisms and development effectiveness, this paper analyzes how territorial spatial planning supports high-quality urban development, and provides reference for improving urban governance level.

Keywords： territorial space; urban development; spatial governance; high-quality development; resource allocation

引言

随着城市化的深入发展，城市发展也面临着资源短缺、空间矛盾突出以及发展质量不断提高等一系列问题。怎样在有限的空间里达到效率的提高、功能的改善和生态的保护三者并存的目的，就成为了城市治理的重大问题。国土空间规划是统筹各类空间要素和发展边界的基础性制度，正在由原来的管控手段变成推动城市高质量发展的关键抓手。探究国土空间规划同城市高质量发展之间存在的内在联系，有利于理清空间规划对于新型城镇化进程所具有的现实意义及其操作途径。

一、国土空间规划的内涵演进与城市高质量发展的时代要求

（一）国土空间规划内涵的演进与功能拓展

国土空间规划不是单纯的一个用地安排工具，它是伴随着经济社会发展水平的变化而不断发展完善的综合性空间治理体系。早期规划重视建设用地规模控制以及功能分区，主要目的就是城市扩张和基础设施的布置。由于资源环境约束加大、发展理念发生改变，国土空间规划开始加入生态保护、风险防范以及公共服务均等化等要素，重视整个区域的空间整体规划。

（二）城市高质量发展对空间治理提出的新要求

城市高质量发展重视发展方式的改变、结构的改善和效率的提高，对于空间布局的科学性、协调性有更高的要求。依靠土地扩张来实现经济增长的方式已经无法维持下去了，城市发展更多地依靠空间结构的改善、功能的复合利用以及要素的高效配置。在这种情况下，国土空间规划要兼顾发展需要和生态、安全底线，促使产业布局、人口聚集、公共资源分配趋向于更加集约化、高效化，符合高质量发展的内在需求，促使城市治理机制不断改进。

（三）规划理念转型与发展目标协同的必然性

在新的发展阶段里，国土空间规划的主要目的同城市高质量

发展十分吻合。一方面规划确定了空间控制界限以及功能划分，给城市长久稳定的成长赋予了制度支撑，改善了发展预期的稳定性和持续性；另一方面改善了空间布局并提高了土地利用效率，从而为创新发展、协调发展和绿色发展奠定基础。规划理念由原来的单向度的增长型转变为综合效益型，即经济效益、社会效益和生态效益三者并重，逐渐建立起了以质量为先、结构合理、内涵发展的空间治理体系。

（四）制度体系完善对规划实施能力的支撑作用

国土空间规划内涵加深要依靠制度体系不断健全。建立统一的规划体系以及实施监督机制可以加强规划的权威性、可操作性，从而减少规划之间的矛盾以及执行上的偏差。将规划目标同城市发展绩效评价、资源要素配置联系起来，有利于加强规划对于实际发展的影响作用，使国土空间规划成为促进城市高质量发展的一种长久性的制度安排。

二、国土空间规划对城市空间结构优化的引导作用

（一）引导城市空间结构由扩张型向集约型转变

国土空间规划依靠确定城市开发边界、永久基本农田和生态保护红线这些刚性约束来从制度上阻止无序蔓延、低效扩张，促使城市发展由摊大饼式的增长转向内涵式的提升。传统的经济发展模式是依靠土地要素来推动经济增长，空间扩张的速度比人口、产业的承载能力提高要快得多，造成土地使用粗放、基础设施利用率低、财政负担加重等一系列问题越来越严重。

在这种情况下，国土空间规划依靠加强用地强度控制、容积率引领以及土地混合利用的规定来促使城市内部的空间布局发生改变。通过对存量建设用地再开发、低效工业用地更新、老旧片区功能重组等方式来达到土地资源在现有空间内有效利用的目的。以集约化为方向的空间结构转型有利于降低城市的运行成本，提高公共设施的服务效率，给城市高质量发展奠定更为坚实的空间基础。

（二）优化生产、生活与生态空间的协同布局

统筹生产、生活、生态空间，属于国土空间规划改善城市空间结构的主要部分。通过对于各种不同的空间进行系统的识别以及功能的划分，规划从全局角度出发来协调经济发展需要、居民生活质量以及生态环境保护这三者之间存在的矛盾，防止出现因某个方面而造成的空间失衡现象。规划中对于生产空间的安排是按照产业同空间承载力相适应的原则来进行的，促使产业向功能区集中，从而减小对周边的生活和生态环境造成的影响。

从生活空间上讲，国土空间规划重视居住空间同公共服务设施的配合安排，经由恰当掌控居住密度，健全公共交通网，改善公共服务可达性等方式来加强城市空间的宜居性质。并且建立一个完整的生态空间体系，加强生态廊道、绿地系统的整体联系，提高城市的生态稳定性。生产、生活和生态空间相融合的布局有利于形成结构合理、功能互补的城市空间格局，使城市由单一的功能为主向综合效益的提高转变。

（三）促进城市功能结构的合理分工与层级优化

城市空间结构优化不单是土地利用方式的改变，也是功能结

构和空间层次的合理安排。国土空间规划经由确定各个区域的发展定位以及功能分工来促使城市产生层次分明、分工有序的空间结构体系。中心城区注重综合服务功能和高端要素集聚，推进公共服务、创新资源、高附加值产业的合理布局；外围地区按照区位条件、资源禀赋来创建特色功能区和专业化片区，塑造出不同的发展态势。

创建起多中心、网络化空间结构之后，可以减轻中心城区的发展压力，并且改善交通拥堵以及环境承载状况。合理地安排功能分工，可以促使各个地区之间相互协作、共同发展，从而提高整个空间运行的速度。

（四）强化空间结构调整对城市长期发展的支撑作用

城市空间结构一旦形成，就会有很强的稳定性以及路径依赖的特点，会对城市的未来产生深远的影响。国土空间规划依靠前瞻性布局和长远眼光来推动空间结构的改变，防止因为眼前的利益而做出随意的开发行为，给城市可持续发展赋予制度支撑。在规划编制过程中，从人口发展趋势、产业发展变化、资源环境约束等各方面进行分析，留出一定的发展空间来应对不确定的因素，提高城市空间适应不确定性的能力。

规划用刚性控制和弹性引导相结合的方式，在保证生态安全和发展底线的前提下给功能转变以及结构调整留出调整的空间。经由不断改善城市空间布局，国土空间规划可以长久维持城市的发展走向，改进空间资源调配效能，给予城市高品质发展持久而有条理的支撑。

三、国土空间规划在提升城市治理与资源配置效率中的作用机制

（一）通过统一空间管控提升城市治理协同性

国土空间规划是以“多规合一”为依托，把原来分散的规划体系整合起来，用统一的空间管控规则来实施。这样就很好地消除了各个部门之间、各个层次之间由于目标不同而产生的矛盾以及管理上的重叠现象，防止因为规划不一致造成重复建设、资源浪费的情况发生。在统一规划之下，城市的建设、产业的发展、生态的保护以及基础设施的安排等各方面都可以依照同一个空间逻辑来进行推进，从而大幅度地改善城市治理的总体协调状况。

同时确定了空间控制边界以及用途规定之后，城市治理就由原来的“事后纠正”转变为现在的“事前指导”。规划前置对各种开发建设行为实施约束，有利于缩减治理费用，加强行政决策的可预知程度并加快执行速度，从而给城市顺畅运转赋予制度根基。

（二）以空间约束引导资源要素的合理流动

国土空间规划依靠功能分区以及用地安排来对资本、人口、产业这些要素的走向起到关键的引领效果。明确的空间定位可以减少资源调配过程中的盲目性，促使各种要素向着适合的地方有序地聚集起来，从而改善要素配置的契合程度和利用效能。以产业空间合理布局为例，促进产业链上下游之间在空间上相互配合，从而达到降低成本、提高产业竞争力的目的。

在资源环境约束越来越大的情况下，规划还会对高耗能、高

风险的用地实行严格的控制，促使资源向集约化、高效化的方向转移。以空间规则来调节要素的流动，有利于在有限的资源下达到发展效率的最大化，并且可以提高城市的运行质量。

（三）依托空间治理促进公共资源配置公平与高效

公共服务设施和基础设施的配置是否合理，是衡量一个城市治理水平高低的一个重要标准。国土空间规划把居住空间同公共服务设施结合起来考虑，促使教育、医疗、交通以及公共活动场所得合理的安排，从而减轻由于资源分配不均所造成的治理压力。用空间尺度上的均衡来布置公共服务设施，可以提高公共服务的可达性，使城市的运行更加公平稳定。

规划在设施布置上考虑人口数量以及发展趋向，不会出现因为设施过多或者过少而造成资源浪费的情况。按照空间需求来配置公共资源，可以提高投入产出比，让有限的公共资源在更大的范围内产生综合效益。

（四）通过制度化实施机制强化治理与配置成效

国土空间规划作用的发挥依靠稳定的、有效的实施机制来支撑。把规划成果纳入到项目的审批、土地供应以及建设管理等各个环节当中去，这样规划的要求就可以变成具体的治理行为，从而加强规划执行的刚性约束。

在此基础上把规划实施效果同城市治理评价、资源调配绩效联系起来，就形成了既有激励又有约束的制度环境。闭环式的运行模式使得国土空间规划不但是一个空间安排的手段，更是提高城市治理体系和治理能力、优化资源配置的一种制度保障。

四、国土空间规划支撑城市高质量发展的实施路径与保障措施

（一）完善国土空间规划编制与实施衔接机制

国土空间规划对于城市高质量发展起到的作用，主要看规划成果能不能落实到具体的建设、治理实践当中去。在实施过程中要强化规划编制同实施管理的衔接，把规划目标分解成可以执行的空间控制要求和实施清单，保证各种建设活动按照规划的要求有序开展。并且完善规划调整和动态评价制度，让规划可以随着城市发展阶段的变化而改变，防止由于刚性不够或者弹性失衡造成规划长期引导的效果受到影响。

（二）强化政策协同与多主体参与保障实施成效

城市高质量发展牵涉到经济、社会、生态等诸多方面，国土空间规划的推行要依靠诸多政策共同发力。应该促使规划同产业政策、人口政策、财政政策等互相配合，从而产生政策合力，加强规划对于资源分配以及发展方向的引领效果。另外还要建立多主体参与的机制，在规划实施的过程中让政府、市场和社会力量相互配合，用公开的信息和协商的方式提高规划执行的透明度和认同感，从而减小阻力。

（三）健全制度约束与激励并重的保障体系

有效的制度保障是国土空间规划落实的基础。从制度上讲，应该完善用途管制、开发强度控制以及责任追究等制度，加强规划的刚性约束，防止出现随意突破空间管控红线的情况发生。另一方面可以按照城市发展要求来建立相应的激励机制，促使社会资本、建设项目向规划鼓励的地方集中。约束和激励相结合可以提高规划执行的内生动力。

（四）提升规划实施的技术支撑与监督能力

随着城市发展越来越复杂，国土空间规划的实施对于技术的要求也越来越高。应该加强空间信息平台的建立，把规划、土地、建设以及生态等各种数据资源整合起来，从而提升规划执行过程中的监测与评价水平。依靠动态监测以及定期评价来发现规划执行过程中出现的偏差和风险，并且做出相应的调整。

五、结语

从总体上看，国土空间规划已经成为推动城市高质量发展的重要力量。统筹各类空间要素、优化城市空间结构、强化统一管控，使规划具备了较好的城市治理体系和治理能力。依靠空间规则来引导资源要素合理分配，从而达到资源利用最大化的目的，为城市的可持续发展打下良好的基础。随着城市发展环境的变化，国土空间规划也要不断改进其实施机制以及动态调整的能力，更好地发挥出对城市长期发展目标的引导作用，促使城市朝着更加高效、有序、现代的方向前进。

参考文献

[1] 彭金强. 国土空间规划背景下合肥市城市人居环境高质量发展评价研究 [D]. 合肥工业大学, 2024.DOI: 10.27101/d.cnki.ghfgu.2024.002089.
[2] 杜娟, 刘艳, 刘澜. 西南山地城市蓝绿空间与建成空间的整合重塑研究 [M]. 中国水利水电出版社, 2024: 06: 181.
[3] 宋荣, 胡业翠, 胡菲, 等. 国土空间规划视角下城市高质量发展路径分析——以我国“两横三纵”城市化地区为例 [J]. 中国土地科学, 2023, 37(10): 20-30.
[4] 许宁馨, 唐尧. 国土空间规划体系中的城市规划与高质量发展探讨 [J]. 住宅与房地产, 2023, (05): 4-6.
[5] 廖黎明. 优化国土空间布局完善城市交通规划以高水平规划引领经济社会高质量发展 [N]. 贵阳日报, 2021-10-19(001).DOI: 10.28295/n.cnki.ngyrb.2021.003817.

浅圆仓仓壁滑模施工工艺与实践

于意朝, 王长雷, 魏国梁

中国建筑第七工程局有限公司, 河南 郑州 450000

DOI:10.61369/ME.2026060005

摘 要： 针对大直径浅圆仓密集布置、高空连续施工、气密性要求高及交叉作业风险大等施工难点, 本文以某仓储建筑群工程为依托, 开展仓壁液压滑模施工工艺研究。详细介绍滑模整套系统构造参数, 梳理组装、滑升、拆除全流程施工工艺, 从钢筋、混凝土、施工精度、安全风险四个维度制定专项管控措施。通过采用多套滑模设备流水施工、实时精度监测纠偏、强度动态把控等技术手段, 有效解决仓壁成型偏差、渗漏、外观不均等问题, 保障工程施工质量与安全, 可为同类浅圆仓滑模施工提供参考。

关 键 词： 浅圆仓; 仓壁施工; 液压滑模; 施工工艺

The Sliding Formwork Construction Technology and Practice of the Shallow Circular Silo Wall

Yu Yichao, Wang Changlei, Wei Guoliang

China Construction Seventh Engineering Division Corp., Ltd. Zhengzhou, Henan 450000

Abstract： In response to the construction difficulties such as dense layout of large-diameter shallow round silos, continuous construction at high altitudes, high air-tightness requirements, and high risk of cross-operation, this paper conducts research on the hydraulic sliding formwork construction technology for silo walls based on a certain warehouse building complex project. It elaborates on the structural parameters of the entire sliding formwork system, summarizes the entire construction process including assembly, sliding up, and dismantling, and formulates special control measures from four dimensions: steel bars, concrete, construction accuracy, and safety risks. By adopting multiple sets of sliding formwork equipment for concurrent construction, real-time precision monitoring and correction, and dynamic control of strength, the problems of silo wall formation deviation, leakage, and uneven appearance are effectively solved, ensuring the construction quality and safety of the project. This can provide a reference for similar sliding formwork construction of shallow round silos.

Keywords： shallow round silo; silo wall construction; hydraulic sliding formwork; construction technology

引言

浅圆仓是粮食仓储工程的核心构筑物, 具有直径大、壁身高、结构整体性好、气密性要求高的特点, 传统的分段模板施工容易造成接缝多、渗漏、成型精度低等问题。液压滑模施工由于连续浇筑、无施工冷缝、成型质量好等特点, 成为浅圆仓仓壁施工的主要工艺^[1]。但是密集仓群施工存在作业空间狭小、多工序交叉、高空作业风险高等问题, 对滑模体系稳定性、施工同步性以及质量控制精度要求很高。因此, 本文结合实际工程实践, 对滑模施工工艺进行系统优化, 总结出关键控制技术, 提高浅圆仓施工的标准化程度。

一、工程概况

本文以某仓储建筑群为例, 其含多座圆形筒仓, 呈矩阵密集布置; 单仓内径25m, 仓壁厚度280mm, 滑模施工高度29.1m, 仓壁混凝土采用C35P8抗渗等级, 结构安全二级、抗震6度设防。仓基础为PHC管桩+CFG仓芯复合地基, 仓壁自基础环梁顶面到下环梁底部全部采用液压滑模一次浇筑成型。仓间净距小, 现场多工序交叉作业、高空连续施工风险大, 仓壁成品要符合氮气调储粮气密性专项标准。整体用9套独立滑模设备分成三组流

水施工, 24小时两班连续作业, 配双塔吊垂直运输、成品笼梯专用上下通道、备用发电系统保证不间断滑升。

二、滑模体系核心构造参数表

为保障浅圆仓仓壁滑模施工的稳定性与规范性, 需明确整套滑模施工体系的组成构件、规格参数及布设方案。下文详细罗列各系统核心技术参数, 为后续施工提供数据依据。

作者简介: 于意朝(1988.07-), 男, 汉族, 河南开封人, 大学本科, 高级工程师, 研究方向为工程管理与技术。

表 1：滑模施工系统组成及技术参数明细表				
系统分类	构件名称	规格参数	布置 / 数量	核心作用
模板系统	提升架	立柱 [14 槽钢，横梁双拼 [12，高 1.8m	单仓 56 幅，环向间距 1417mm	承载全套滑模荷载，固定千斤顶、围圈
	内组合钢模	P6012、P1012 定型钢模	140 块 + 备用 10 块	仓内壁成型，拼缝贴止浆海绵防漏浆
	外大模板	4mm 花纹钢板，尺寸 5260×1200mm	18 块 / 仓	仓外壁成型，刚度大减少表面凹凸
	上下围圈	10 槽钢，上下两道，间距 620mm	环向通长 320m / 仓	固定模板，传递混凝土侧压力
液压提升系统	GYD-60 千斤顶	额定顶升 60kN，有效行程 20~30mm	60 台 / 仓，配套 4 台备用	沿支承杆爬升带动整体滑升
	支承杆	Φ48.3×3.2 焊接钢管，端头缩径 Φ38	1800m / 仓，接头错开布置	竖向承重骨架，千斤顶爬升轨道
操作平台系统	液压控制台	YKT-56，工作压力 12MPa	2 台 / 仓含 1 台备用	统一分配油压，控制同步提升
	内外桁架	Φ48.3×3.0 钢管桁架，单幅宽 1.8m	内外各 56 幅	人员作业、材料堆放承载
	吊架系统	Φ12 圆钢吊杆，650mm 宽操作面	56 套 / 仓	仓壁出模收光、养护作业
	防护设施	1.5m 高钢管护栏 + 密目 / 大眼安全网	全周闭合	临边高空防坠落防护
精度测控设备	激光垂准仪、全站仪、贯入阻力仪	垂直度、半径、混凝土强度监测	各 2 台 / 施工组	实时纠偏，把控出模时机

三、核心施工工艺流程

结合前面滑模体系构造参数和设备布置标准，本章对浅圆仓仓壁滑模全过程进行梳理，分为组装、滑升、收尾拆除三个主要部分，明确各个阶段的施工要点和控制标准，保证滑升作业连续规范进行。

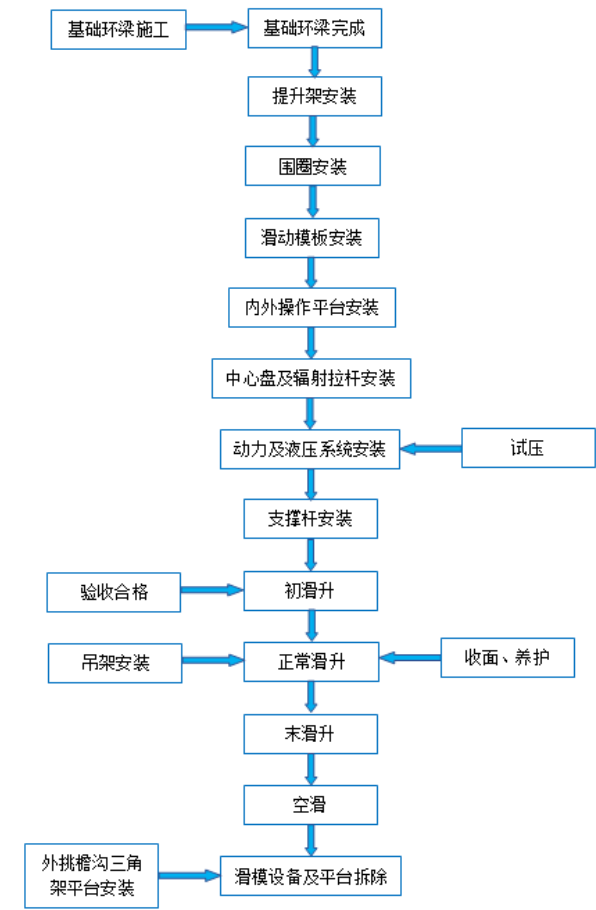


图 1：浅圆仓仓身滑模施工工艺流程图

（一）组装阶段

组装前精准放出仓中心与提升定位轴线，依次安装 56 幅门型提升架，架设 10# 槽钢上下围圈，拼装内外钢模并贴止浆海绵，模板设置 0.1% ~ 0.3% 向内收分锥度。同步搭设桁架操作平台和 Φ12 圆钢吊架，铺上等长的液压管线，长短支承杆相交处排列，同一截面试压接头不超过 25%。安装中心辐射拉杆、全套液压设备并加压试压检漏，全部逐项验收合格后才能进行混凝土浇筑和初滑作业。

（二）滑升阶段

初滑分层浇筑 500~700mm 仓壁混凝土，当混凝土强度达到 0.2MPa ~ 0.4MPa 时进行小幅试升，全面排查模架、油路隐患。正常滑升单次浇筑厚度为 300mm，沿仓圆周正反交替对称下料，防止筒身扭转；每提升 300mm 复测半径、垂直度、平台水平度。偏差超标的采用平台倾斜、环向手拉葫芦反向牵拉小幅纠偏，在纠偏作业的同时，同步推进其他工序，包括按设计要求完成钢筋的绑扎固定、及时清理附着在模板上的预埋件以确保其位置准确、对已脱模的仓壁混凝土表面进行原浆压光收面以提升外观质量，并立即覆盖保湿材料进行持续养护，防止混凝土表面出现干缩裂缝。

（三）收尾与拆除阶段

仓壁浇筑至 27.3m 设计标高停止布料，设 800mm 高度空滑，门洞处加三角钢管加固防止失稳变形。拆除前将平台上的所有物料全部清除，按照先拆吊架铺板、后拆分模架的原则进行，每个 4 幅提升架为一个吊装单元，依托塔吊分段吊至地面进行解体。五级以上大风、雨雪天气不得进行高空拆除作业，作业地面设置 10m 警戒区并安排专人值守，所有构件统一转运分类堆放，严禁高空抛掷材料配件。

四、关键施工操作控制要点

为了保证浅圆仓滑模施工质量、精度和施工安全，结合工程

重难点和滑模施工全过程，从多个施工核心方面细化操作标准，明确关键控制要点，规范现场施工细节。

（一）钢筋工程

本工程浅圆仓仓壁钢筋全部采用 HRB400E 螺纹钢，环向筋、竖向筋提前在场外钢筋加工场统一弯制匹配仓 25m 内径的圆弧构件，分类捆扎、挂牌标识，由塔吊对称吊运至滑模操作平台，防止单侧堆载造成平台偏移。滑模采用“边浇筑、边绑扎”流水作业，每浇筑 300mm 高仓壁混凝土的同时完成上层钢筋绑扎。竖向钢筋搭接长度取 40d，环向水平筋搭接长度取 50d，同一竖向截面钢筋接头数量不超过总根数的 25%，相邻接头水平错开距离不小于 1m。为了准确控制 30mm 的保护层，体系设置了双重定位措施，沿环向每 2m 焊接梯子筋骨架固定水平筋，提高架立柱内侧焊接 L 型定位筋约束竖向钢筋，防止钢筋贴模露筋。仓壁挡粮门、通风口、高低卸料洞等预留洞口主筋严禁截断，洞口四周加设附加加强筋形成补强框架；所有预埋件锚固钢筋与仓壁主筋错开布置，不得焊接主筋，只用绑扎固定，保证钢筋结构完整，满足粮仓密闭抗渗受力要求。

（二）混凝土管控

仓壁采用 C35P8 抗渗商品混凝土，提前与搅拌站定制适配滑升的专用配合比，控制混凝土缓凝时间 8h，入模坍落度控制在 180mm 到 200mm 之间，同一批次水泥、砂石、外加剂统一进料，保证仓壁外观无色差。混凝土用两台 63m 汽车泵沿仓壁圆周对称、正反交替分层布料，单次浇筑厚度严格控制在 300mm 以内，浇筑间隔不超过混凝土初凝时间。插入式振捣器振捣间距 500mm，振捣深度深入下层混凝土 50mm，不得碰触支承杆、模板和钢筋骨架，防止构件变形。使用 HG-80 贯入阻力仪实时监测出模强度，脱模标准为 0.2 ~ 0.4MPa，强度不足立即停止滑动等待硬化。混凝土出模后在原浆提浆、铁抹压光、清水刷水三道收面工序同步开展外侧吊架。滑升全过程设置循环供水系统，吊架内侧缠绕养护水管，终凝后保持保湿养护时间不小于 14 天；现场预留备用搅拌站，防止混凝土供应中断造成冷缝。若出现冷缝，施工前必须凿毛、涂刷界面粘结剂后再续浇^[2]。

（三）精度与同步控制

单仓配置激光垂准仪、全站仪两套测控设备，形成环形四个垂直观测点和四个水平观测点，每滑升 300mm 进行一轮全维度复测。水平度控制采用激光扫平仪配合限位卡统一千斤顶行程，相邻千斤顶高差 $\leq 20\text{mm}$ ，整仓全部千斤顶最大相对高差 $\leq 40\text{mm}$ ；仓壁全高总垂直度偏差 $\leq 24\text{mm}$ ，任意 3m 高度筒身扭转量

$\leq 30\text{mm}$ ，仓内径半径实测误差 $\leq 10\text{mm}$ 。多仓同步滑升执行统一指挥制度，两台对讲机全域通讯，三仓标高预警差值为 30mm，大于预警值时采用“损高助低”微调法，单独提高偏低仓千斤顶小幅度纠偏，禁止大幅度倾斜平台。仓体偏移用平台倾斜法缓慢校正，扭转问题沿环向均匀布置手拉葫芦反向牵拉纠偏，遵循小幅度、勤修正的原则，单次纠偏倾斜度不大于 1%。每天早晚用水准仪对各个仓的标高进行全检，同时记录沉降、偏移数据，形成测控台账，所有的偏差数据都及时反馈为液压操作班，随时调整滑升参数，保证 9 座浅圆仓成型尺寸、密闭精度符合储粮规范^[3]。

（四）安全与风险管控

采用 LECD 风险评价法提前识别滑模组装、连续滑升、设备拆除三大阶段重大危险源，支撑体系失稳、临边防护缺失、超限堆载、违章机械操作等都属于重大危险源，结合危险源的等级制定相应的专项防控措施^[4]。滑模内外操作平台设 1.5m 高的全封闭防护栏杆，满挂密目安全网，平台活荷载严格控制在 $2.5\text{kN}/\text{m}^2$ 以内，钢筋、机具对称均匀堆放，不得集中堆料。现场配有 200kW 柴油备用发电机，停电 10 分钟内可以启动保证液压、照明系统正常工作，平台分区域布置干粉灭火器，液压控制台、电焊作业点设独立消防设施。六级以上大风、雷雨、大雾时停止所有高空滑升作业，平台物料全部固定、断电。作业人员全部完成高空专项体检，高血压、癫痫等病症人员不得上岗，上下统一使用独立成品笼梯通道，严禁攀爬滑模支架。滑模作业区地面划定 10m 红色警戒区，设置硬质围挡与警示标识，安排专人 24 小时值守；所有高空作业人员佩戴五点式安全带，高挂低固定于专用安全绳，每班班前开展高空、液压设备操作安全交底，每日开展平台、油路、支承杆隐患巡检，发现弯曲、渗漏、防护破损立即停工整改^[5]。

五、总结

本次浅圆仓仓壁液压滑模施工通过优化模板、液压、操作平台整套体系参数，对全过程的施工工序进行规范，落实质量、安全管控措施，实现仓壁一次连续浇筑成型。施工过程中有效控制了仓体垂直度、半径偏差、结构扭转等问题，混凝土外观质量、抗渗性能、仓储气密性均满足设计和储粮专项标准。流水施工模式提高了施工效率，完善的防高空施工安全措施避免了高空作业风险。通过实践证明该工艺适合于密集型浅圆仓施工，技术成熟可靠，有较好的推广应用价值。

参考文献

- [1] 叶文宾, 姜晓斌, 张亦江. 浅圆仓超高仓顶结构支模体系施工技术 [J]. 施工技术 (中英文), 2024, 53 (2): 98-102.
- [2] 姜晓斌, 张亦江, 陈申钢, 等. 浅圆仓施工综合技术改进的研究与设计 [J]. 施工技术 (中英文), 2023, 52 (8): 108-112.
- [3] 郑伟山. 基于液压滑模技术的浅圆仓施工技术分析 [J]. 砖瓦, 2026, (4): 174-177.
- [4] 王小弟. 75m 大直径浅圆仓仓壁液压滑模施工技术 [J]. 中国建筑金属结构, 2025, 24 (4): 91-93.
- [5] 黄晓露. 仓壁液压滑模施工技术在大直径浅圆仓中的应用 [J]. 中国建筑金属结构, 2025, 24 (22): 40-42.

探讨工业企业生产设备管理与维护

庄德麟

广州鞍钢钢材加工有限公司, 广东 广州 510800

DOI:10.61369/ME.2026060012

摘 要 : 生产设备是工业企业正常运转的物质基础。设备管理水平的高低, 直接影响生产效率、产品质量与企业经济效益。现阶段, 部分工业企业设备管理与维护存在不少问题。制度落实不到位, 设备保养不及时, 人员专业能力不足, 导致设备故障频发、使用年限缩短。完善设备管理制度, 强化日常保养工作, 提升管理人员专业素养, 引入现代化管理方式。这些措施能有效提高设备综合效率, 降低企业运营成本, 为工业企业可持续发展提供可靠保障。

关 键 词 : 工业企业; 生产设备; 设备管理; 设备维护; 综合效率

Discussing the Management and Maintenance of Production Equipment in Industrial Enterprises

Zhuang Delin

Guangzhou Ansteel Steel Processing Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510800

Abstract : Production equipment serves as the material foundation for the normal operation of industrial enterprises. The level of equipment management directly impacts production efficiency, product quality, and the economic benefits of the enterprise. Currently, some industrial enterprises face numerous issues in equipment management and maintenance. Inadequate implementation of systems, delayed equipment maintenance, and insufficient professional competence of personnel have led to frequent equipment failures and shortened service life. Improving the equipment management system, strengthening routine maintenance work, enhancing the professional competence of management personnel, and introducing modern management methods are effective measures to enhance the overall efficiency of equipment, reduce operational costs, and provide reliable guarantees for the sustainable development of industrial enterprises.

Keywords : industrial enterprises; production equipment; equipment management; equipment maintenance; overall efficiency

引言

工业生产过程中, 设备资产占生产资金的比重, 通常超过三成。设备的技术状态, 直接决定生产线运行效率与交付能力。多品种小批量生产模式下, 设备频繁换产调参, 对管理灵活性提出更高要求。传统单设备分散管理的粗放方式, 已难以适配制造环境的变化。但部分企业仍沿用旧有模式, 制度、培训与保养落实存在短板, 制约综合效益。为此需梳理常见问题, 分析深层原因, 探索优化策略, 为设备管理提供参考依据。

一、工业企业生产设备管理与维护的重要意义

(一) 设备管理是企业正常生产秩序的基础保障

生产设备平稳运转, 是企业生产有序开展的基本前提。一条生产线上, 任何一台关键设备出现故障, 都可能造成整条产线停摆, 进而引发交货延误、合同违约等连锁问题。规范的设备管理, 可通过日常巡检、定期保养与状态监测, 提前排查并消除设备隐患, 将非计划停机降至最低。设备管理涵盖台账、档案、备件管理等内容, 为生产调度和维修决策提供基础数据支持, 让生产安排更加科学有序。

(二) 设备管理直接影响企业经济效益

设备管理对企业效益的影响, 体现在多个层面。从成本角度看, 科学的设备运维方案, 可延长设备使用年限。它能推迟设备更新迭代的资金投入周期, 同时减少设备故障引发的高额突发抢修费用。从效率角度看, 状态良好的设备运行更稳定高效。加工精度与产品质量更有保障, 废品率和返工率也会相应降低。设备管理还可通过规范润滑管控、运行参数优化等方式, 降低设备运行能耗, 进一步压缩生产成本。设备管理是企业实现降本增效最直接有效的途径之一^[1]。

(三) 设备管理与安全生产密切相关

生产设备的安全性能直接关系到操作人员的人身安全和企业

财产安全。老化严重、维护不到位的设备容易出现漏电、漏气、部件断裂等危险状况，可能引发火灾、爆炸、机械伤害等安全事故。规范的设备管理要求定期检查安全防护装置的完好性、制动系统的灵敏性以及各类联锁保护装置的有效性，从源头上降低安全事故发生概率。设备管理水平的提升，不仅是对生产效率的保障，更是对员工生命安全和企业稳定运营的负责。

二、工业企业生产设备管理与维护的常见问题

（一）设备管理制度执行不力

不少工业企业虽制定了正式的书面设备管理制度，但实际落地执行中常流于形式。设备操作规程、点检标准、润滑规范等文件多被闲置，现场操作与管理人员凭经验办事的情况十分普遍。尤其在部分老牌工业企业中，部分员工从业年限较长，习惯靠多年积累的个人经验操作设备，无法及时适配新型设备对操作规范的更高要求。制度执行的监督机制尚不完善，缺少定期的执行情况检查与考核评价，违规行为难以及时得到纠正。制度建设表面化与执行过程随意化相互叠加，造成设备管理工作缺乏系统性与连贯性^[2]。

（二）设备保养工作落实不到位

设备保养是预防设备故障的重要手段，却在实际生产中常被忽视。生产任务紧张时，操作人员多将精力放在完成产量指标上，日常保养的清洁、点检、润滑等环节被压缩，甚至直接省略。部分企业对设备保养的认知停留在“出问题再修”的被动层面，缺少预防性保养意识，未按设备厂商推荐的保养周期，定期开展换油、调整、部件更换等工作。针对日常、一级、二级三级保养制度，不少企业没有清晰的职责划分与操作标准，各层级保养工作存在缺位或重叠。设备长期在缺乏规范保养的状态下运行，磨损持续加剧，性能劣化不断加速，最终造成设备提前报废，企业需支付高昂的设备更新费用。

（三）设备管理人员与操作人员专业素质不足

设备管理与维护工作具有较强的专业性，要求从业人员具备机械原理、电气控制、液压传动等多方面的知识储备。但现实情况是，许多工业企业的设备管理人员和维修人员缺乏系统的专业培训，知识结构较为陈旧，难以适应设备技术快速更新的形势。一线操作人员中，部分员工仅掌握基本的开关机操作，对设备的工作原理、常见故障判断、日常维护要点了解有限，无法在设备出现异常初期做出正确判断和简单处理。在人才培养方面，企业投入的培训资源不足，内部分享和外部交流的机会较少，高素质的设备管理人才引进困难，这些问题共同构成了制约设备管理水平提升的人才瓶颈。

（四）设备老化与备件管理混乱

部分传统工业企业经营压力突出，设备更新改造资金投入不足，大量设备超期服役。老旧设备运行效率不高、能耗偏高，且故障多发，维修成本逐年攀升。与此同时，企业内部非标设备占比较高，生产厂家分散，型号规格繁杂，造成备品备件种类多、通用性差。备件管理缺少科学规划，库存结构不合理，常用备件

储备不足，非常用备件积压严重，既加大了资金占用，又常因备件短缺拉长设备停机时长。设备老化与备件管理问题相互制约，导致设备保障能力持续减弱^[3]。

（五）设备管理信息化水平偏低

仍有不少工业企业采用纸质台账、手工记录的传统模式管理设备。设备档案、维修记录、保养计划等信息分散在不同部门与人员手中，信息完整性与一致性难以保证。设备运行状态数据缺少系统采集和分析，设备故障的规律性特征难以有效识别，设备管理缺乏数据支撑。信息化手段不足，还导致设备管理决策主要依靠个人经验，难以实现从“事后维修”向“预防性维护”“预测性维护”的转变。

（六）设备全生命周期管理意识薄弱

多数企业将设备管理的重心放在设备投入使用后的运行维护阶段，对设备选型、安装调试、性能验收等前期环节重视不足。采购环节与使用环节脱节，设备选型时未能充分结合生产工艺需求和后期维护便利性，导致部分设备“先天不足”，投产后故障率高、维修困难。在设备报废处置阶段，缺乏科学的经济寿命评估，要么过早淘汰尚可使用的设备造成浪费，要么超期服役导致维修成本剧增。全生命周期管理意识的缺失，使得设备管理各阶段相互割裂，无法形成从“生”到“死”的系统化管控闭环。

三、提升工业企业生产设备管理与维护水平的有效策略

（一）健全设备管理制度体系并强化执行监督

健全的制度体系，是设备管理规范开展的基础。企业应结合自身设备配置与生产特点，制定全流程制度规范，覆盖选型购置、安装验收、操作使用、日常保养、维修检修、报废更新各环节。操作规程方面，需针对每类设备编制详细操作步骤与安全注意事项，内容具体清晰，易于理解和执行。保养制度方面，要明确不同级别保养的周期、内容、责任人和验收标准，形成完整的管理闭环。维修制度方面，需建立故障上报、维修派工、过程记录、质量验收的完整流程，确保每次维修活动有据可查。制度制定完成后，核心在于落地执行。企业应建立制度执行的监督检查机制，将执行情况纳入相关岗位的绩效考核指标，通过定期检查与随机抽查相结合的方式，保障各项制度真正落地。

（二）构建科学完善的设备保养体系

设备保养应从被动应对转向主动预防。企业可依据设备的重要程度和运行特征，实施分级保养管理。对关键工序的核心设备，实行重点保养策略，缩短点检和润滑周期，增加状态监测频次；对一般辅助设备，按照标准保养规程执行例行工作。在保养方式上，综合运用日常保养、定期保养和预知保养等多种手段。日常保养由操作人员每班执行，内容包括清洁、调整、紧固、润滑等基础工作；定期保养由专业维修人员按计划实施，涉及系统检查、换油、易损件更换等内容；预知保养则借助振动分析、油液检测、红外测温等诊断技术，根据设备的实际状态确定维修时机，避免不必要的过度修理和因维修不足导致的突发故障。保养

工作应形成标准化作业指导书和完整的记录台账，使每一项保养活动都有标准可依、有记录可查^[4]。

（三）加强设备管理人才队伍建设

提升设备管理质量的关键在于人。企业应制定分层分类的培训计划，针对不同岗位设计差异化的培训内容。对设备操作人员，重点培训所操作设备的基本结构、正确操作方法、日常保养要点和常见异常识别，使其具备规范操作和简单维护的能力。对专职维修人员，加强机械原理、电气控制、故障诊断技术等专业知识的系统学习，并通过案例教学和实操演练提升解决实际问题的能力。对设备管理人员，培训内容应涵盖设备全生命周期管理理念、设备经济技术评价方法、设备管理信息系统应用等方面，提升其统筹管理能力。培训方式不应局限于课堂讲授，可结合设备厂家现场教学、同行业参观交流、技能比武等多种形式，增强培训实效。同时，建立健全技术岗位的晋升通道和待遇保障机制，增强设备管理岗位的职业吸引力，稳定专业人才队伍^[5]。

（四）推进设备管理信息化与技术改造

信息化是提升设备管理效率的重要抓手。企业可根据自身规模和需求，逐步建立设备管理信息系统，实现设备台账电子化、维修记录数字化、保养计划自动提醒、故障统计分析可视化等功能。信息系统能够将分散的设备信息集中管理，便于随时查询和分析，为管理决策提供数据支撑。在设备技术改造方面，企业不必盲目追求全面更新，可结合经营状况有重点地推进。对于性能严重劣化且维修成本过高的老旧设备，优先安排更新换代；对于主体性能尚可但局部技术落后的设备，可通过自动化改造、安全装置升级、控制系统换代等技术手段进行局部改进。技术改造应注重提升设备的可靠性和可维护性，从源头减少后期维护的工作量和难度。

（五）优化备品备件管理策略

针对备品备件管理中存在的突出问题，企业可采取分类管理的策略。对设备运行影响大、采购周期长的关键备件，设置合理

的安全库存，并与供应商建立快速供应渠道，确保紧急情况下能够获得及时获得。对通用性较强的标准件，可适当降低库存水平，利用市场供应的便利性实现动态补给。对非标设备专用备件，应建立详细的技术图纸和参数档案，必要时寻求备件国产化替代方案，降低对特定供应商的依赖。备件管理应与设备维修计划紧密衔接，维修工作开始前提前确认备件库存情况，避免因备件不到位导致维修延误。定期对备件库存进行分析，清理长期积压的呆滞备件，优化库存结构，减少资金占用^[6]。

（六）强化设备全生命周期管理理念

企业应将设备管理视野从前端的运行维护延伸至全生命周期。在设备选型购置阶段，应由设备管理部门、生产部门和采购部门共同参与技术论证，统筹考虑设备性能、可靠性、可维修性、能耗水平及全生命周期成本，避免片面追求低价采购。在安装验收阶段，严格按技术标准进行精度检测和试运行，确保设备达到设计指标后方可移交生产。在使用阶段，建立设备运行状态和维修成本的动态档案，为后续经济寿命评估积累数据。在报废更新阶段，综合评估设备的维修经济性、能耗水平和产品质量保障能力，科学决策最佳报废时机。通过全生命周期各环节的有机衔接，实现设备资产价值的最大化利用。

四、结束语

设备管理维护贯穿全生命周期，直接影响效率、成本与安全。部分企业在管理理念、制度落地、人员能力、备件管理上仍存在短板。可从制度完善、预防保养、人才建设、信息化、备件优化入手综合改进。设备管理提升不只是技术问题，更是理念与组织能力的系统变革。需管理层持续推动，全员积极参与。模式转变不可急于求成。企业应立足实际，找准薄弱点，分步重点推进管理提升，让设备资产支撑市场竞争。

参考文献

- [1] 茹翰. 试析工业企业生产设备管理与维护[J]. 财经界, 2021(32): 62-63.
- [2] 郭子玉. 探析工业企业生产设备管理与维护[J]. 中国航班, 2021(33): 178-180.
- [3] 王安勇. 工业机械设备维护管理系统的建立与优化研究[J]. 中国金属通报, 2024(12): 228-230.
- [4] 范伟. 全面生产设备管理的设备维护及应用策略[J]. 造纸装备及材料, 2022, 51(9): 189-191.
- [5] 汪海. 工业设备维护管理系统研究与设计[J]. 河南科技, 2023, 42(8): 22-26.
- [6] 史益玮. 工业化工设备的安全运行与维护管理[J]. 工程研究与实用, 2024, 5(1).

汽车制动系统性能分析与优化研究

张照硕^{*}, 张博然, 张恩硕, 董志轩, 焦学瑞

烟台南山学院, 山东 烟台 264000

DOI:10.61369/ME.2026060013

摘 要 : 汽车制动系统直接关系到车辆制动距离、操纵稳定性和行驶安全。随着车辆速度提高和道路工况复杂化, 传统制动系统在连续制动、紧急制动等情况下容易出现温升过快、热衰减和制动力分配不合理等问题。本文以典型乘用车制动系统为对象, 分析其工作原理和主要性能指标, 重点研究制动距离、制动盘温升及前后轴制动力分配对系统性能的影响。在此基础上, 从制动盘散热结构、摩擦副参数和动态制动力分配策略等方面提出优化措施。结果表明, 优化后制动距离缩短, 制动盘最高温度降低, 车辆制动稳定性得到改善。研究可为汽车制动系统性能分析与结构优化提供一定参考。

关 键 词 : 汽车工程; 制动系统; 制动性能; 热衰减; 系统优化

Performance Analysis and Optimization Research of Automobile Braking System

Zhang Zhaoshuo^{*}, Zhang Boran, Zhang Enshuo, Dong Zhixuan, Jiao Xuerui

Yantai Nanshan University, Yantai, Shandong 264000

Abstract : The automotive braking system is directly related to the vehicle braking distance, handling stability, and driving safety. With the increase in vehicle speed and the complexity of road conditions, traditional braking systems are prone to issues such as excessive temperature rise, thermal decay, and unreasonable brake force distribution during continuous braking and emergency braking. This paper takes a typical passenger car braking system as the object of study, analyzes its working principle and main performance indicators, and focuses on the effects of braking distance, brake disc temperature rise, and front and rear axle brake force distribution on system performance. Based on this, optimization measures are proposed from the aspects of brake disc heat dissipation structure, friction pair parameters, and dynamic brake force distribution strategy. The results show that after optimization, the braking distance is shortened, the maximum temperature of the brake disc is reduced, and the vehicle braking stability is improved. This study provides a certain reference for the performance analysis and structural optimization of automotive braking systems.

Keywords : automotive engineering; braking system; braking performance; thermal decay; system optimization

引言

随着电子控制技术和电液制动技术的发展, 制动系统的研究也引起了学者们的关注。早期研究中, 学者们更多的关注传统结构参数匹配, 后逐渐延伸到执行元件的响应、压力调节精度和控制可靠性等方面。研究发现, 优化后电磁阀加载响应时间和卸载响应时间均有所缩短(吴希玲等, 2021), 执行元件的响应速度会直接影响制动压力调节精度, 也会影响制动系统运行可靠性(郭长建, 2020)。汽车制动系统不能只满足基本制动效能, 运行稳定性与控制可靠性也很重要(郝孟军等, 2022)。不同制动系统的结构和控制方式存在差异, 电子制动、气动制动等系统需要结合实际特点进行优化, 才能提高车辆在复杂工况下的安全性(朱云鹏, 2023)。

复杂的交通环境也对制动系统提出了更高要求。而电动汽车制动系统不仅要关注响应速度, 还要兼顾能量回收效率和系统稳定性。再生制动与机械制动之间的协调控制, 这关系到电动汽车综合制动性能的提升, 是制动系统优化中的重要内容(梁东明, 2025)。城市道路工况如果变得复杂, 车辆频繁启停, 高负荷制动出现次数增多。那么这类工况更容易加剧制动系统热衰退、非均匀磨损和响应性能下降。传统基于标准工况的设计方法, 在复杂城市交通环境中难以完全适应实际运行需要(付玮玮, 2026)。

从现有研究看, 制动系统优化包含了制动力分配、结构参数设计、执行元件控制和复杂工况适应性等内容。不过, 部分研究仍集中在单一部件或某一特定工况, 对制动距离、温升过程、制动力分配和车辆稳定性之间的综合关系等方面讨论不足。基于这一情况, 本文以典型乘用车制动系统为研究对象, 从整车制动力学出发, 分析制动效能、热衰减和制动稳定性, 并提出结构参数与控制策略相结合的优化措施, 以提升制动系统整体性能。

一、制动系统工作原理与性能指标

汽车制动系统属于车辆主动安全系统的重要组成部分。它的基本作用，是使行驶中的车辆能够减速、停车，并在停车后保持静止。相关研究认为，制动系统的核心功能在于保证车辆在制动过程中形成稳定减速，直接关系到行车安全和停车可靠性（郝孟军等，2022）。因此，分析制动系统性能时，不能只看车辆能否停下，还要看制动过程是否平稳、制动距离是否合理、车身姿态是否稳定。

以常见液压制动系统为例，驾驶员踩下制动踏板后，踏板力经助力装置放大，再传递到制动主缸。主缸产生液压力，液压力经制动管路传至各车轮制动器。盘式制动器工作时，制动钳推动制动片夹紧制动盘，摩擦副之间产生摩擦力矩，车辆动能随之转化为热能，车辆速度下降，直至停车。从能量转换角度看，制动过程本质上是车辆动能向热能转化的过程。车速越高，制动时需要消耗的动能越大。大量热量会在短时间内集中到制动盘和摩擦片表面。散热能力不足时，制动盘温度迅速升高，摩擦材料性能下降，制动效能也会受到影响。城市交通环境下，频繁启停和高负荷运行更容易引发热衰退、非均匀磨损和响应性能下降等问题（付玮玮，2026）。这说明，制动系统不仅要有足够的制动力输出，还要具备较好的热稳定性。

制动性能通常可从制动距离、制动减速度、热衰减性能和制动稳定性等方面评价。制动距离是最直观的安全指标，受初始车速、制动力大小、轮胎状态和路面附着系数影响。制动减速度反映车辆速度下降快慢，这是评价制动强度的重要参数。为便于后续分析，本文选取普通乘用车在中等车速下的制动工况作为基础参数，见表1。

表1 制动性能分析基础参数	
参数名称	数值
车辆质量（kg）	1500
初始车速（km/h）	80
路面附着系数	0.8
制动盘半径（m）	0.15
初始温度（℃）	25

表1 参数可代表普通乘用车在城市道路或城市快速路中的常见运行状态。80 km/h属于较典型的中等车速，路面附着系数0.8可近似对应干燥沥青路面。该工况既便于开展基础分析，也能反映制动系统在一般使用条件下的性能特征。

二、制动系统性能分析

在上述工况下，本文从制动距离、热特性和制动稳定性三方面进行分析。车辆制动距离主要取决于制动力大小和路面附着条件。制动力增大时，车辆减速度提高，制动距离相应缩短。但制动力不能无限增加。轮胎与路面之间存在附着极限，当制动力超过附着条件允许范围时，车轮会发生抱死，车辆方向稳定性下降，制动效果反而变差。

前、后轴制动力分配是影响制动性能的重要因素。刘成

（2015）认为，制动系统设计应使轴间制动力分配与整车性能形成良好匹配。梁秋鹏（2014）也通过微型客车研究表明，优化感载比例阀参数和前后轴制动力分配，有助于提高整车制动效率和方向稳定性。车辆制动时，载荷向前轴转移，前轮可利用附着力增加，后轮可利用附着力降低。若后轴制动力过大，后轮容易先抱死并引发甩尾；若前轴制动力比例过大，虽然稳定性提高，但后轴附着能力利用不足，制动效率降低。

热性能方面，连续制动会使制动盘温度不断升高。单次制动后，制动盘尚有一定时间散热；频繁制动时，热量产生速度可能高于散热速度，温度便逐渐累积。连续制动工况下制动盘温度变化见表2。

表2 连续制动工况下温度变化情况	
制动次数	制动盘温度（℃）
1	80
2	120
3	160
4	210
5	260

制动次数增加后，制动盘温度持续上升。第3次制动后温升速度加快，说明热量积累开始明显。第5次制动时温度达到260℃，已经接近热衰减敏感区间。若继续进行高强度制动，摩擦系数可能下降，制动力输出稳定性减弱，制动距离也可能增加。这与付玮玮（2026）关于复杂城市交通环境下制动系统容易发生热衰退的判断一致。

制动稳定性与制动力分配密切相关。不同分配比例下的稳定性评价见表3。

表3 不同制动力分配对稳定性的影响		
前轴比例	后轴比例	稳定性评价
60%	40%	良好
70%	30%	较好
80%	20%	稳定但效率降低

表3显示，当前轴制动力比例在60% ~ 70%之间时，系统能在制动效率和稳定性之间取得较好平衡。当前轴比例提高到80%时，车辆稳定性增强，但制动效率下降。由此可见，制动力分配不是简单提高前轴比例，而是要结合载荷转移、路面附着条件和车辆使用工况进行综合匹配。

三、制动系统优化设计

基于上述分析，传统制动系统在连续制动和复杂工况下主要存在制动盘温升快、热衰减风险高，以及固定制动力分配难以适应不同载荷和路面条件等问题。对此，本文从结构优化和控制策略两方面进行改进。

结构优化重点在于提高制动盘散热能力。制动盘是热量集中的主要部件，其材料导热性能、通风结构和散热面积都会影响温升过程。可采用导热性能较好的材料，并优化通风槽、散热筋和通风孔结构，以增强空气流动和对流换热能力，从而降低制动盘温度峰值，减缓摩擦系数下降。摩擦副接触面积和制动器有效半

径也应合理匹配，以提高制动力矩，并减少局部高温和不均匀磨损。

控制策略方面，可采用动态制动力分配方式。固定比例分配难以兼顾满载、满载、干燥路面和湿滑路面等不同工况。动态分配可根据车速、轮速变化、减速度和载荷转移情况调整前后轴制动力，在紧急制动时提高附着利用率，在低附着路面下减少车轮过早抱死风险。郭长建（2020）指出，电液制动系统执行元件的动态响应特性会影响制动压力调节精度和系统可靠性，因此电子制动或电液制动系统还应重视执行元件响应速度和压力控制精度。优化前后主要性能对比如表4所示。

表4 优化前后性能对比		
指标	优化前	优化后
制动距离（m）	38.5	34.2
最大温度（℃）	280	230
稳定性评价	一般	良好

从表4显示，优化后制动距离由38.5 m缩短至34.2 m，说明制动力利用效率提高。最大温度由280℃降低至230℃，表明散热结构改进后热衰减风险下降。稳定性评价由“一般”提升为“良好”，说明动态制动力分配对改善车辆制动姿态具有积极作用。

四、结果分析

从对比结果看，优化措施对制动效率、热稳定性和操控稳定性均有改善。制动距离缩短，说明系统在紧急制动时能够更充分利用路面附着条件。对于实际行驶而言，制动距离减少几米，可能直接影响避险结果。

热性能改善主要体现在温度峰值降低。制动盘散热能力提升后，热量不再过度集中在摩擦副表面，摩擦系数能够保持在相对稳定范围内。升温减缓也有利于降低制动片和制动盘的热损伤，延长摩擦材料使用寿命。

制动稳定性提升说明前后轴制动力匹配更加合理。优化后的分配策略能够减少后轮提前抱死和车辆跑偏的风险，使车辆在高减速度制动时保持较稳定的姿态（梁秋鹏，2014）。这一点与既有研究中关于轴间制动力分配优化提高制动效率和方向稳定性的结论基本一致的（刘成，2015）。

表5 综合性能评价

指标	优化效果
制动效率	提升
热稳定性	明显改善
操控稳定性	提高

由表5可以看出，各项指标均呈现正向改善趋势，说明本文提出的优化方法在多维度性能提升方面具有一致性效果。需要指出的是，不同优化措施之间可能存在一定协同作用，例如散热能力的提升不仅改善热性能，也间接提升制动力稳定性。因此，在实际工程应用中，应综合考虑各因素影响，以实现整体性能最优。

五、结论

本文围绕汽车制动系统性能分析与优化展开研究，重点分析了制动效率、热衰减和制动稳定性等问题。通过典型工况参数设定，对制动距离、制动盘温升和前后轴制动力分配进行了分析。结果表明，连续制动时制动盘温度随制动次数增加而持续升高，第3次制动后热量积累更加明显，系统逐渐进入热衰减敏感区间。前轴制动力占比在60%—70%范围内时，制动效率和稳定性较为均衡；当前轴比例过高时，虽然车辆姿态更稳定，但制动效率会有所下降。

针对上述问题，本文从结构和控制两方面提出优化方案。结构方面，主要通过改善制动盘材料、优化通风结构、增加散热面积和合理匹配摩擦副参数，提高制动盘散热能力和制动力矩输出能力。控制方面，引入动态制动力分配策略，根据车速、轮速变化、减速度和载荷转移情况调节前后轴制动力，使制动过程更加平稳。优化后，制动距离由38.5 m缩短至34.2 m，最大温度由280℃降低至230℃，稳定性评价由“一般”提升为“良好”。

总体来看，结构优化和控制优化具有一定协同作用。散热能力提升后，摩擦副性能更加稳定；制动力分配优化后，车辆姿态控制效果更好。本文提出的优化思路能够在一定程度上提升制动效率、热稳定性和操控安全性，对普通乘用车制动系统设计具有参考价值。后续研究还需结合实车道路试验进一步验证模型精度，并引入更完善的智能控制策略，以提高复杂工况下制动系统的可靠性。

参考文献

[1] 郭长建. 汽车电液制动系统电磁阀性能分析与优化方法研究 [D]. 广州：华南理工大学，2020.
[2] 吴希玲，徐文婷，应宇汀. 汽车制动系统的性能分析和优化 [J]. 汽车实用技术，2021(9):90-92+122.
[3] 郝孟军，梅容芳，宫涛，刘福华，刘良，周彬. 关于汽车制动系统性能分析及优化设计探讨 [J]. 时代汽车，2022(2):144-145.
[4] 朱云鹏. 汽车制动系统性能分析及优化设计探讨 [J]. 汽车测试报告，2023(6):19-21.
[5] 梁东明. 电动汽车制动系统的动态性能分析与优化 [J]. 大众汽车，2025(3):46-48.
[6] 付玮玮. 城市交通环境对汽车制动系统性能衰退的影响与优化分析 [J]. 汽车测试报告，2026(4):154-156.

一种紧凑型电动大流量排水抢险车

钱文华, 鲁哈, 樊乾坤

湖北三六一一应急装备有限公司, 湖北 武汉 430056

DOI:10.61369/ME.2026060014

摘 要 : 针对常规大型排水抢险车, 难以适应泥泞路面、空间狭窄、通过性差的排涝应用场景, 设计开发一种整车外形紧凑、越野能力强、灵活机动的大流量排水抢险车。该大流量排水抢险车通过底盘柴油机取力发电和上装独立柴油发电机组发电相结合的方式, 充分利用底盘空间, 降低整车造价。同时采用便携式电动排涝泵, 重量轻, 取放位置离地面低, 设置合理, 符合人体工程学, 救援现场搬运方便快捷, 辅助动作少, 可快速投入抽排水抢险救援作业, 具有较强的市场竞争力。

关 键 词 : 取力发电; 独立柴油发电机组; 大流量排水抢险车

A Compact Electric High-Flow Drainage Rescue Vehicle

Qian Wenhua, Lu Han, Fan Qiankun

Hubei 3611 Emergency Equipment Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430056

Abstract : In response to the difficulty of conventional large-scale drainage rescue vehicles in adapting to muddy roads, narrow spaces, and poor passability in drainage application scenarios, a compact, strong off-road capability, and flexible large flow drainage rescue vehicle is designed and developed. The high flow drainage emergency vehicle combines power generation from the chassis diesel engine with the installation of an independent diesel generator set to fully utilize the chassis space and reduce the overall vehicle cost. At the same time, a portable electric drainage pump is used, which is lightweight, has a low placement position from the ground, is set up reasonably, conforms to ergonomics, is easy and fast to transport on the rescue site, has few auxiliary actions, and can be quickly put into pumping and drainage emergency rescue operations, with strong market competitiveness.

Keywords : power generation; independent diesel generator set; high flow drainage emergency vehicle

引言

大流量排水抢险车, 又称防汛泵车, 是一种用于应急排水排涝的专用车辆。它集成了水泵、发电机组及控制系统等设备, 具有大流量排水能力, 能在暴雨、内涝等灾害发生时迅速抵达作业现场。

随着我国工业化和城镇化进程加快, 城镇人口密度增加, 洪涝灾害对城市影响日趋严重。近年来, 我国洪涝灾害频繁发生, 呈现“多点散发、极端性强、损失严重”的特点, 主要集中在北方地区和长江流域, 因局地强降雨、台风影响及华西秋雨等因素叠加, 防汛形势严峻。市场对高效排涝装备的需求迫切, 同时对装备功能需求更加多样化, 以实现不同的排水抢险场景。

排水抢险车主要按结构形式和工作原理进行分类, 常见类型包括垂直式排水抢险车和子母式排水抢险车。垂直式排水抢险车采用臂架结构与伸缩水管, 适合在地铁、地下室、下穿式立交等空间作业。子母式排水抢险车由母车与可分离的子车构成, 适合在大型车无法深入的浅滩、沼泽类地段作业^[1]。

上述常见排水抢险车, 属于大型车辆, 难以适应路面泥泞、空间狭窄、通过性差的排涝应用场景。本文介绍的一种新型大流量排水抢险车, 可有效解决上述问题。该型车采用便携式电动排涝泵, 电力驱动; 具有方便现场布置、辅助工作少等特点; 同时采用底盘取力发电和上装独立柴油发电机组发电相结合的方式, 整车外形紧凑、越野能力强、机动灵活。适用于城市道路、隧道排水、抗旱供水、临时泵站抽排水等, 能适应雨水、污水、海水等各类复杂环境要求^[2]。

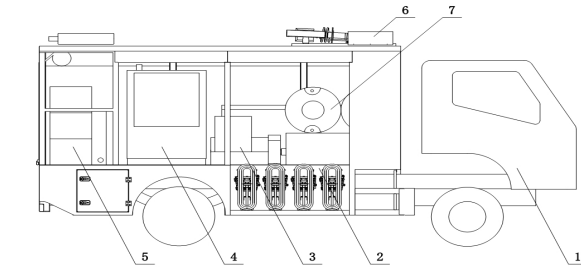
一、整体结构

新型大流量排水抢险车（公告型号 XFY5070TPS）采用东风华神特种作业车四驱底盘改装，通过底盘取力发电和上装独立柴油发电机组组合发电，驱动四台便携式电动排涝泵，可实现每小时2000立方米的抽排水作业^[3]。同时车顶配置升降照明灯，满足夜间作业的照明需求。整车主要性能参数见表1。

表1 整车主要性能参数表

序号	项目	主要参数
1	整车外形尺寸（长 × 宽 × 高）	5800 × 2250 × 2900mm
2	轴距	3100mm
3	接近角 / 离去角	33° / 27°
4	最大行驶速度	95km/h
5	整车总质量	6700kg
6	发电总功率	120kW
7	排水量	2000m³/h，扬程10m
8	水带规格	DN200

整车组成主要包括：东风华神底盘、60kW取力发电机、60kW独立柴油发电机组、4套便携式电动排涝泵、升降照明灯、DN200水带、高强度浮圈及水泵电气控制系统等^[4]。整车布置示意图见图1。



1.底盘；2.电动排涝泵；3.取力发电机；4.独立柴油发电机组；5.DN200水带；6.升降照明灯；7.高强度浮圈
图1 整车布置示意图

二、整车轴荷及行驶稳定性计算

整车最大总质量6700kg，小于底盘公告总质量7360kg，满足标准要求。前后桥轴荷分配合理，前桥轴荷与总质量的比值为33.42%，大于国家强制性标准 GB7258机动车安全运行技术条件中规定的最小值20%。整车重心高度1119.8mm，满足纵向、横向行驶稳定性要求^[5]。具体数据计算详见表2XFY5070TPS大流量排水抢险车重量分析表。

表2 XFY5070TPS大流量排水抢险车重量分析表

车型 :XFY5070TPS大流量排水抢险车			底盘：DFD5073TTL6DJ1			轴距：3100mm			
序号	名称	重量 G（kg）	质心距前桥中心距离 L1（mm）	质心距后桥中心距离 L3（mm）	质心高度 H（mm）	G*L1	G*L3	G*H	备注
1	底盘（油箱满）	2900	1270	1830	880	3683000	5307000	2552000	
2	乘员2人	130	10	3090	1680	1300	401700	218400	
3	上装框架部分	1430	2550	550	1280	3646500	786500	1830400	
4	取力发电机	380	2480	620	1340	942400	235600	509200	
5	独立柴油发电机组	680	3310	-210	1540	2250800	-142800	1047200	
6	水泵水带等部件	1180	2800	300	1140	3304000	354000	1345200	
总质量		6700			1119.8	13828000	6942000	7502400	允许总质量6700
整车质心距前桥距离 L1		$L1 = \sum G \cdot L1 / G$				2063.9			
整车质心距后桥距离 L3		$L3 = \sum G \cdot L3 / G$				1036.1			
满载重心高度 H		$H = \sum G \cdot H / G$				1119.8			
前桥轴荷		$N1 = \sum [G \cdot L3 / (L)]$				2239.4			≤ 2640
后桥轴荷		$N3 = \sum G \cdot L1 / L$				4460.6			≤ 4720
前桥轴荷 / 总质量		$N1 / G$				33.42%			
纵向行驶稳定性		$L3 / H$				0.9		$\Phi = 0.6$	> 0.6
横向行驶稳定性		$B / 2H$			$B = 1615$	0.7		$\Phi = 0.6$	> 0.6
转向侧滑允许最大速度		$V_{滑} = 3.6 \sqrt{g \cdot 0.6 \cdot R}$ 转弯半径			$R = 8.8$	25.9			
转向不翻车允许最大速度		$V_{翻} = 3.6 \sqrt{g \cdot R}$ 转弯半径 *B/2H			$R = 8.8$	28.0			

三、副车架及箱体结构

副车架：采用贯通式副车架设计技术，便于车辆维护保养。
车厢：采用一体式整体车厢，箱体结构采用高强度钢材骨架结构。厢体防火、阻燃、防雨、防尘、防锈、隔震，长期抗震结构，车辆侧面设有智能配电控制柜，厢体预留有检修门，方便人员进入厢内进行检修、保养。厢体尾部还设置有爬梯，方便上车顶检修。箱体内合理布置器材架存放水带、浮圈等，保证整车载

荷关于车辆纵向基本对称^[6]。同时在箱体右侧中间裙部设置电动泵存放空间，方便快捷，符合人机工程。

四、底盘

本车选用东风华神4 × 4越野底盘，分时四驱，前后桥分扭比1:1，型号 DFD5073TTL6DJ1，单排驾驶室。该底盘轴距短，外形尺寸紧凑，发动机功率大，越野能力强^[7]。底盘主要性能参数

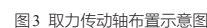
序号	项目	主要参数
1	底盘外形尺寸(长×宽×高)	5770×2070×2400mm
2	底盘自重	2900kg
3	准乘坐人数	2人
4	发动机型号	Q25A-150E60(全柴150马力)
5	发动机额定功率/转速	110(kw)/3200(r/min)
6	排放标准	GB17691-2018国Ⅵ
7	驱动方式	4×4
8	爬坡能力	>30%
9	最小转弯直径	<14m
10	取力器	夹心取力器, 速比1.73
11	轮胎型号	7.00R16LT 14PR
12	电子刹车系统	ABS制动防抱死系统
13	行车制动系型式	双回路气压制动
14	驻车制动系型式	弹簧储能断气制动
15	油箱	标配120升铁油箱



采用底盘停车取力,全功率夹心取力器,减速比1.73。当底盘发动机转速2595转/分时,取力器稳定输出1500转/分,驱动取力发电机。

在底盘取力器与取力发电机之间布置有三节传动轴,传递扭矩800Nm,其中1节双过桥传动轴、2节伸缩节传动轴。三节传动轴采用Z型布置方式,每个传动轴工作角度不大于 7° ,相连两个传动轴间的角度差不大于 1° ,同时两万向节的工作角相同,两内侧万向节又在同一平面内,输入轴和输出轴在同一平面内^[9],

取力发电机输入转速1500转/分;输出额定功率60kW,输出电压230V/400V,输出频率50Hz;配套的液晶显示模块操作简单,可提供电压、电流、频率、负载等参数。取力发电机外形示意图见图4。



柴油发电机组主要用于发电, 供便携式电动排水泵等装备使用, 满足电动排水泵满负荷运行需求, 机组运行稳定可靠。输出额定功率60kw, 输出电压220V/380V, 频率50Hz; 采用底座柴油油箱, 可满足8小时连续工作, 安装位置合理, 方便维护人员日常加油; 同时底座上设置有安装孔, 用于固定柴油发电机组, 柴油发电机组通过高强度螺栓与箱体连接^[10]。

液晶显示控制模块操作简易,可提供线电压、线电流、输出功率等电力参数,同时可提供低电压、高水温、超速、低速、欠压、过流等保护;柴油机采用散热器强制水冷,沿车体横向布置,进风、排风设计合理,散热效果好。柴油发电机组示意图见图5。



七、便携式电动排涝泵组

采用四台便携式电动排水泵，单泵流量 $500\text{m}^3/\text{h}$ ，扬程 10m ；采用 380V 供电方式，额定功率约 22kW ；泵体自带不低于 20m 电缆线，采用防水快速接头。配备一体成型高强度浮圈。电动排涝泵示意图见图6。

大流量排水管口径 $\text{DN}200\text{mm}$ ，长度 $20\text{m}/\text{根}$ ，配快接接头及抱箍，快速接头采用抱箍式结构，密封性能好，水带安装方便，重量轻，拆装快捷，水带采用有衬里消防水带，重量轻，水阻小，盘缠性能好，抗老化，使用寿命长。

骨架箱体采用创新结构设计，四台便携式电动排水泵，均放置在右侧裙箱内，支撑结构位置低，设计合理。便携式电动排水泵主体结构采用高强度铝合金材质，耐腐蚀，自重轻，约 20kg ，方便人员搬运。具体放置点详见图1整车布置示意图。

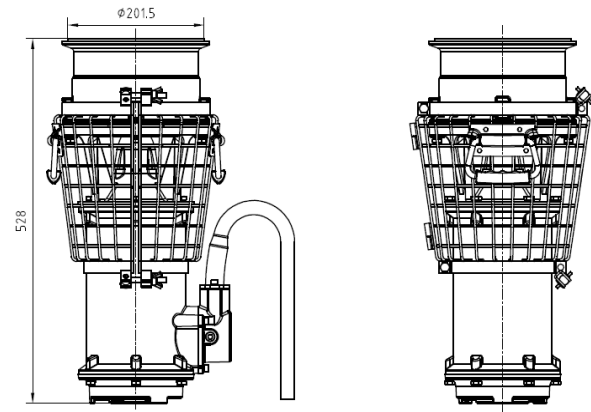


图6 电动排涝泵示意图

八、升降照明灯

车载倒伏式照明灯具有把灯具从水平状态起升到垂直状态的功能，立起后灯具通过全方位无死角旋转云台实现搜索定位照明。主控系统采用微处理器程序控制，数据及工作状态可选配全彩屏显示，具有使用方便，操作醒目，集成度高，性能可靠等特点。

点。预留 4G 数据通讯接口，可根据需要，外接通讯模块实现手机远程控制，手机APP同步控制和显示设备参数。

升降照明灯安装在车辆车厢顶部，通过高强度螺栓与车厢连接固定。升降照明灯示意图见图7。

照明系统主要参数：

产品型号：HD-QBD152150LED

工作电压：AC220V

灯具功率： $2 \times 150\text{W}$

灯具光源：LED白光

色温： 5700K

光通量： 51000Lm

灯珠品牌：欧司朗

升高高度： 1.5m

升降方式：气动

抗风等级：10级

倒伏方式：电动

旋转角度：水平 360° ，仰俯 360°

控制方式：无线遥控（遥控有效距离大于 50m ），线控

通讯方式： 485 通讯，提供通讯协议

选配：集成式面板按键控制



图7 升降照明灯示意图

九、结束语

各级政府对排水抢险设施及应急装备的持续投入，推动着大流量排水抢险车市场的快速发展。预计未来一段时间，国内排水抢险车市场仍将保持较高的增长率，具有良好的发展前景。在此，期待着更多智能化、多功能、多应用场景的高端排水抢险车产品涌现市场，为排涝抢险提供更多选择。

参考文献

- [1] 李元. 远程供水系统抗洪排涝实战运用浅谈 [J]. 城市与减灾, 2022(06): 41-44.
- [2] 周应来; 陈兴; 代莉; 唐欣怡; 李志鹏. 浅析高功率密度轻量化应急抢险排水泵设计 [J]. 中国设备工程, 2022(17): 249-250.
- [3] 张太林; 孙宏艳; 曹金牛; 杨帆. 大功率车载取力发电系统结构研究 [J]. 专用汽车, 2021(02): 77-83+88.
- [4] 罗雄彬; 谭梁; 张俊; 何辉波. 基于汽车底盘取力发电设备的设计与试验 [J]. 移动电源与车辆, 2020(04): 34-37.
- [5] 杜遥; 尹新权; 王东亮; 李永香. 车载发电取力传动系统的设计与控制策略研究 [J]. 汽车实用技术, 2018(09): 62-64+100.
- [6] 何寥; 郭建伟; 陈建有; 张宏宇; 段培勇. 特种车辆底盘液压系统散热研究 [J]. 液压气动与密封, 2017(04): 61-64.
- [7] 张红涛. 全功率取力器应用匹配技术分析 [J]. 汽车实用技术, 2016(10): 234-235.
- [8] 王继红; 汪凯. 汽车传动轴振动的仿真计算及优化 [J]. 噪声与振动控制, 2014(01): 109-112.
- [9] 李华斌. 柳工工程机械产品家族化设计应用 [J]. 工程机械, 2023(04): 135-141+14.
- [10] 袁浩; 王大龙; 马杰. 基于品牌识别的智能灌装机型研究 [J]. 设计, 2022(23): 150-153.

永磁同步电机控制系统的稳定性研究

王圣超, 王炳强, 陈立

陕西长岭电子科技有限责任公司, 陕西 宝鸡 721000

DOI:10.61369/ME.2026060024

摘 要 : 永磁同步电机具有运行损耗小、动力密度大、调速范围广等技术优势, 在工业驱动、智能装备、新能源传动等领域得到了广泛的应用, 控制系统稳定运行的状态直接影响到设备传动精度和作业连续性。电机控制系统运行过程中, 由于负载突变、参数摄动、电磁干扰、控制算法响应偏差等各种工况的出现, 容易造成转速波动、电流震荡、系统失稳等运行故障。本文以永磁同步电机矢量控制架构为基础, 从系统运行机理、稳定性影响因素、核心控制技术、仿真调试优化、稳态运维调控等技术方面进行研究, 整理出系统失稳的技术原因, 改进闭环控制策略和参数匹配方案, 建立完整的稳定性调控技术体系, 提高永磁同步电机控制系统在复杂工况下稳态运行的能力。

关 键 词 : 永磁同步电机; 控制系统; 矢量控制; 运行稳定性

Research on the Stability of Permanent Magnet Synchronous Motor Control System

Wang Shengchao, Wang Bingqiang, Chen Li

Shaanxi Changling Electronic Technology Co., Ltd., Baoji, Shaanxi 721000

Abstract : Permanent magnet synchronous motors have technical advantages such as low operating losses, high power density, and wide speed regulation range. They have been widely applied in industrial drives, intelligent equipment, and new energy transmission fields. The stable operation state of the control system directly affects the transmission accuracy and continuous operation of the equipment. During the operation of the motor control system, various conditions such as load sudden changes, parameter perturbations, electromagnetic interference, and deviation in control algorithm response are likely to cause running faults such as speed fluctuations, current oscillations, and system instability. Based on the vector control architecture of permanent magnet synchronous motors, this paper conducts research from technical aspects such as system operation mechanism, stability influencing factors, core control technologies, simulation debugging optimization, and steady-state operation regulation. It identifies the technical reasons for system instability, improves closed-loop control strategies and parameter matching schemes, establishes a complete stability regulation technology system, and enhances the steady-state operation capability of the permanent magnet synchronous motor control system under complex conditions.

Keywords : permanent magnet synchronous motor; control system; vector control; operating stability

引言

工业自动化以及精密传动技术不断革新, 永磁同步电机渐渐取代传统的异步电机, 成为高精度传动设备的主要动力源, 符合低速大扭矩、宽范围调速、高精度稳定运行的工业需求。永磁同步电机依靠多变量、强耦合、非线性的工作机理来工作, 控制系统的闭环调节精度很容易受到内外工况的干扰而产生动态震荡和稳态偏移。常规固定参数控制方式不能适应复杂的负载和多变的运行工况, 容易产生持续转速脉动、电流谐波超标的状况, 造成系统动态失稳。依靠专业控制技术改善、参数精确契合和工况动态调节, 可以有效地抑制造成系统震动的根源, 加强系统的抗干扰能力, 从而保证永磁同步电机始终处在稳定的运行状态中。

一、永磁同步电机控制系统运行技术机理

(一) 电机本体电磁运行机理

永磁同步电机依靠转子永磁体建立恒定磁场, 定子绕组通入

交变电流产生旋转磁场, 依靠磁场耦合实现连续转矩输出。电机在工作时定子电流、磁链、转矩这三者之间存在着一种动态的耦合关系, 转子的位置发生改变会致使电磁耦合状况发生变化, 从而引发非线性的动态运行特性。电机在稳态运行时电磁参数不

变，转矩输出稳定，转速变化只在极小区间内。在动态工况下，负载及电压的变化均会破坏原有的电磁平衡状态，进而引发磁链偏移与转矩波动，从而影响整个控制系统的稳定运行。上述关系构成了系统稳定性调节的基本物理依据。

（二）矢量控制架构运行逻辑

目前，永磁同步电机主要使用转子磁场定向矢量控制架构，利用坐标变换将定子交变电流分解成直轴电流和交轴电流，从而达到励磁分量和转矩分了解耦的目的。控制系统分别调节两路电流的输出幅值和响应速度来准确地控制电机励磁强度和电磁转矩，实现宽范围平滑调速。解耦控制可以削弱变量耦合造成的运行干扰，但是坐标变换误差、电流采样偏差会造成解耦不完全，引起控制回路震荡，直接影响到系统的稳态控制精度，影响电机连续工作的稳定性。

（三）控制系统闭环调控流程

永磁同步电机控制系统使用双闭环控制结构，外环是转速闭环调节回路，内环是电流闭环调节回路。转速传感器实时采集电机实际转速，和给定转速做差值比较，转速偏差经过调节器运算后得到电流给定值。电流回路实时采集三相定子电流，经坐标变换后得到电流偏差调节信号，输出脉宽调制驱动信号，控制逆变器开关状态，实现电机转速和转矩的动态修正。双层闭环响应速度快、调节精度高、参数匹配好，直接决定整个控制系统动态稳定性、稳态精度。

（四）系统稳态运行判定技术标准

永磁同步电机控制系统稳态运行有明确的技术判定标准，稳态工况下电机转速波动幅度处于非常小的范围内，没有周期性的转速脉动和突变偏移。定子三相电流波形正弦度好，谐波含量符合设备运行标准，缺少高频震荡和电流尖峰。电磁转矩输出连续平稳，无明显转矩脉动，设备无异常振动、噪声。闭环调节系统无持续超调、低频振荡、稳态误差小，动态响应速度快、恢复时间可控，可以满足各种精密传动设备稳定运行的要求^[1]。

二、永磁同步电机控制系统稳定性核心影响技术因素

（一）电气参数扰动影响

电机在长时间运行过程中，定子电阻、直轴电感、交轴电感等主要的电气参数都会因为温度上升、磁体损耗增大、工作条件变坏而产生动态变化，出现参数扰动的现象。控制系统常规调节器按额定参数进行运算控制，实际参数和额定参数不匹配会造成闭环调节增益失调，减小系统的收敛速度。参数偏移幅度不断增大，就会引发电流回路震荡、转速稳态误差变大，导致系统稳态精度降低，严重时还会出现低频持续震荡，破坏控制系统稳定运行状态。

（二）负载动态突变干扰

工业实际运行环境下，电机负载处于动态变化中，瞬时加载、瞬时卸载、负载波动冲击等都会成为造成系统动态失稳的外在原因。负载突然变化会造成电机电磁转矩的瞬间平衡被破坏，造成转速瞬间下降和上升。常规固定参数调节器动态适配能力差，难以迅速响应负载的变化来实现参数的自适应调节，在动态

调节过程中会出现超调过大、调节时间过长、多次震荡收敛的现象，导致电机电态运行不稳定，影响设备连续作业的稳定性的。

（三）信号采样与调制误差

控制系统电流采样、转速采样、脉宽调制环节都存在固有的误差和延时的偏差，会一直干扰系统的闭环调节精度。电流传感器的采样精度不足、采样延时过大都会造成反馈电流失真，从而引起电流回路调节误差。转子位置检测信号有抖动误差，会造成坐标变换准确度降低，解耦效果变差。逆变器的开关延时、死区时间都会造成输出电压的畸变，引入高频谐波干扰，造成发电机低速时出现震荡现象、高速时运行不稳定的情况，则会对系统的稳态运行质量造成一定的影响^[2]。

三、提升控制系统稳定性的核心控制技术

（一）改进型PI双闭环控制技术

在传统的PI双闭环控制的基础上加入积分分离和限幅调节算法，改善闭环调节的动态性能，提高系统的稳定性。对转速外环和电流内环分别设置积分阈值，偏差大时就取消积分作用，防止积分积累造成超调过大。当偏差收敛至稳态区间后，采用积分调节以消除系统的稳态误差。此外，增设输出限幅环节，对调节器的最大输出幅值进行限制，从而防止瞬时超调所引发的系统振荡。改进型PI控制能够有效平衡动态响应速度与稳态精度，削弱由参数扰动导致的调节偏差，适用于常规工况下的稳定控制需求。

（二）自适应参数辨识调控技术

采用在线参数辨识算法，对定子电阻、电感等电气参数的动态变化进行实时监测，从而达到控制参数自适应修正的目的。根据电机电态运行方程，利用实时采集到的电流、电压等数据，按照周期性的计算方式来逐步更新电气参数数值，准确找到参数扰动变化的规律。控制系统根据辨识得到的实际参数，动态调节PI调节器的增益和解耦运算参数，消除由于参数偏移造成的调控失配问题。该技术可以大大提高系统适应性，消除由于参数变化所引起的稳态振荡，提高系统长期运行稳定性。

（三）负载观测前馈补偿技术

搭建负载转矩观测模型，实时估计电机的负载转矩，加入前馈补偿控制环节，解决由于负载突然变化引起的动态失稳问题。利用电机的机械方程和电磁方程联立求解，准确地得到负载转矩的变化情况，从而提前预知负载变化的趋势。将负载观测值加入到转速闭环控制回路中，进行前馈补偿调节，提前修正控制输出量，抵消负载突然变化造成的转速冲击。前馈补偿和闭环反馈控制互相配合可以大大缩短动态调节时间，抑制动态超调和震荡，提高系统的负载抗干扰能力^[3]。

四、永磁同步电机控制系统稳定性仿真与调试技术

（一）系统仿真模型搭建参数配置

依靠仿真平台创建起完整的永磁同步电机控制系统模型，准确地对应实际设备的电气参数以及控制结构。录入电机额定功

率、额定转速、定子电阻、交直流电感、永磁体磁链等基本参数，搭建双闭环矢量控制仿真框架。同步搭建负载扰动模块、参数偏移模块、电磁干扰模块等，对工业实际复杂情况下的工况进行模拟。配置仿真步长和运算精度，与实物控制系统运行时序相适应，保证仿真模型和实际设备运行特性高度一致，为稳定性调试优化提供可靠的仿真载体。

（二）稳态工况仿真调试优化

进行额定工况下的稳态仿真测试，观测系统在稳态运行状态下转速、电流及转矩波形的表现。针对稳态运行时出现的轻微转速脉动及电流谐波超标等细微问题，对PI调节器的比例增益与积分系数进行精细调节，并优化积分分离阈值的参数设定。通过逐组比对参数调整后的波形收敛情况，选取最佳参数匹配组合，以消除系统的稳态误差与周期性振荡，确保在稳态工况下电机转速、电流及转矩保持稳定。

（三）动态工况仿真扰动测试

利用仿真模型对瞬时加载、瞬时卸载、连续负载波动及参数漂移等动态工况进行模拟，以测试控制系统在动态条件下的抗干扰能力。针对系统在上述工况下的转速跌落幅度、超调量、恢复时间及电流振荡次数等关键性能指标进行测试，并评估自适应调节、前馈补偿与谐波抑制等技术的实际作用。在此基础上，对控制系统开展有针对性的优化调整，以提高系统的响应速度与收敛速度，降低动态扰动引起的运行波动，从而确保系统在复杂动态工况下能够迅速恢复至稳态运行状态。

（四）实物平台参数标定校验

完成仿真优化之后进行实物平台参数标定，将仿真最优控制参数转移到实体控制系统上。建立实物测试平台，配置转速检测、电流检测、转矩检测设备，分别做空载、半载、满载工况的稳定性测试。对仿真得到的控制参数进行修正，消除由于硬件延时、采样误差、器件损耗等造成的参数偏差。逐工况校验系统稳态精度和动态响应性能，保证实物控制系统稳定指标完全满足要求，使仿真优化和实际运行准确对接^[4]。

五、永磁同步电机控制系统稳定性长效优化技术措施

（一）全工况参数自适应匹配优化

搭建全工况参数自适应调节体系，按照电机运转转速区间、

负载等级、温度状况来匹配最佳的控制参数。将低速、中速、高速运行区间和轻载、中载、重载负载区间进行划分，并且设置分区基准参数。依靠实时辨识出的电气参数和负载参数，对控制参数进行实时调整，从而达到各种工况下控制参数精准匹配的目的。彻底克服固定参数不能适应全工况运行的技术缺陷，全面提高全转速全负载区间系统的稳定性。

（二）信号采集与传输精度优化

对控制系统信号采集硬件进行升级配置，用高精度采样芯片、抗干扰传感器提高电流、转速信号的采集精度。优化信号传输线路的布置，区分强弱电线路走线，使用屏蔽线缆进行信号传输，规范接地工艺，降低工业电磁干扰。增设多级软件滤波算法，根据信号的波动特点，自适应调节滤波参数，去掉随机干扰信号、高频杂波。精准的信号数据可以保证闭环调节运算的准确性，从源头上避免由于信号误差引起的系统震荡和失稳问题。

（三）逆变器运行调制策略优化

不断改进逆变器的调制方式，根据不同的转速区间来调节调制方式，在低速区间使用细分调制算法提高低速电压输出的精度，抑制低速爬行和震荡现象。优化高速区间的开关频率设置，以达到平衡开关损耗和波形质量的目的，从而保证高速运行时的电流平滑。动态补偿开关器件的死区时间和导通压降来修正输出电压畸变的问题，减小电流谐波和转矩脉动。采用调制策略分级优化的方法，可以满足全部的全转速区间运行稳定性的调节要求^[5]。

六、结论

永磁同步电机控制系统稳定性受到电气参数扰动、负载动态扰动、信号调制误差、外部工况干扰等诸多技术因素的影响，多变量耦合的运行特性容易造成系统震荡、转速波动、稳态失稳等问题。采用改进的双环控制系统，并引入自适应参数辨识与负载前馈补偿技术，可有效提升系统的动态抗干扰能力和稳态精度。通过综合运用仿真调试与实物标定，辅以全工况自适应调节、信号精度优化以及温度老化补偿等长期技术手段，能够确保永磁同步电机控制系统在各种复杂的工业工况下稳定运行，从而为精密传动设备的自动化运行提供可靠的技术支撑。

参考文献

- [1] 曾小莉,王维庆,王海云.基于新型电压控制律的永磁同步电机滑模补偿控制[J].电力系统保护与控制,2023,51(10):153-162.
- [2] 余洋,张千慧,余宗哲,等.基于反推控制的永磁同步电机稳定性单矢量控制策略[J].电工技术学报,2024,39(14):4377-4390.
- [3] 储禹丞,张兰红,程梦坤.基于改进自适应趋近率的永磁同步电机无模型控制系统设计[J].计算机测量与控制,2024,32(5):137-143.
- [4] 刘鑫.基于滑模控制的永磁同步电机矢量控制系统研究与仿真[J].科学技术创新,2023(7):196-199.
- [5] 赵新,王海明,赵彦辉.内嵌式永磁同步电机矢量控制系统弱磁控制研究[J].电工电气,2024(7):37-42.

浪涌保护器在防雷设计中的应用

夏世豪

云南省文山壮族苗族自治州气象局, 云南 文山 663000

DOI:10.61369/ME.2026060025

摘 要： 随着社会的发展, 各类精密电子设备、智能化控制系统的集成度不断提升, 设备耐压、抗冲击能力却大幅下降, 雷电灾害引发的设备损坏、系统瘫痪等问题越发明显。浪涌保护器 (SPD) 作为低压防雷、过电压保护的重要器件, 能够快速泄放浪涌电流、限制瞬态过电压。本文根据现行防雷规范标准, 首先介绍了浪涌保护器的工作原理及主要结构, 接着深入分析了浪涌保护器在防雷分区、分级防护体系中的设计中的应用, 并指出了安装施工、选型匹配、运维管理中的常见问题, 最后给出优化措施, 为防雷设计的规范化、高质量高效实施提供参考。

关 键 词： 浪涌保护器; 防雷设计; 应用

The Application of Surge Protectors in Lightning Protection Design

Xia Shihao

The Meteorological Bureau of Wenshan Zhuang and Miao Autonomous Prefecture, Yunnan Province, Wenshan, Yunnan 663000

Abstract： With the development of society, the integration degree of various precision electronic equipment and intelligent control systems has been continuously enhanced, while the equipment's withstand voltage and shock resistance have significantly decreased. Problems such as equipment damage and system paralysis caused by lightning disasters have become increasingly prominent. Surge protectors (SPD) as important devices for low-voltage lightning protection and overvoltage protection, can quickly discharge surge currents and limit transient overvoltages. Based on the current lightning protection standards, this paper first introduces the working principle and main structure of surge protectors, then deeply analyzes the application of surge protectors in lightning protection zoning and hierarchical protection systems, and points out common problems in installation construction, selection matching, and operation and maintenance management. Finally, it provides optimization measures to provide references for the standardization, high-quality, and efficient implementation of lightning protection design.

Keywords： surge protector; lightning protection design; application

引言

雷电作为常见的大气放电现象, 单次释放能量巨大, 除直击雷造成物理破坏外, 主要通过电磁感应、静电耦合及线路传导, 在电力、通信、信号网络中产生数万伏瞬态浪涌过电压。该浪涌持续微秒级, 但冲击电流极高, 是低压设备和精密电子元件损坏的主因。据统计, 雷暴中超 90% 的电气雷击事故源于感应浪涌或操作浪涌引发的二次灾害^[1]。伴随着智慧城市、工业及智能建筑的发展应用, 智能设备低耐受度设备广泛部署, 传统接地与接闪防护已难以满足需求。浪涌保护器 (SPD) 凭借响应快、限压准、通流适配性强, 成为内部防雷与过电压防护的关键, 其和外部防雷共同构成完整防护体系^[2]。当前防雷设计应用中, 仍存在 SPD 选型不当、分级防护混乱、安装位置偏移、接地工艺不规范及运维缺失等问题, 导致防护效能下降, 甚至引发击穿短路隐患。基于此, 本文从浪涌保护器原理出发, 系统梳理 SPD 在防雷设计中应用的关键要点, 并针对防雷设计应用中常见问题提出优化措施, 从而进一步提升防雷系统整体稳定性以及可靠性。

一、浪涌保护器基本工作原理及主要结构

浪涌保护器 (SPD) 是一种非线性被动防护器件, 通常并联

安装于被保护设备前端, 跨接在相线、零线与地线之间^[3]。系统正常运行时, SPD 呈极高阻抗, 不干扰线路且无功耗; 当雷击感应、开关操作等引发瞬态过电压时, 电压骤升至触发阈值, 内部

非线性元件迅即响应，阻值陡降，形成低阻泄放通道，将冲击电流导入大地，同时将过电压钳位于设备耐受值以下。浪涌消退后，SPD自动恢复高阻待机状态，全过程响应达纳秒级，可捕捉微秒级瞬态冲击，弥补传统保护装置响应滞后的缺陷，是低压系统瞬态浪涌防护的重要器件。常规低压SPD由非线性元件、脱扣机构、散热件、外壳及接线端构成，其中非线性元件决定性能等级。常用元件包括压敏电阻、气体放电管、瞬态抑制二极管等：压敏电阻通流大、成本适中、响应较快，适用于一至三级防护^[4]；气体放电管绝缘强、残压低、无漏流，适合高频信号线路，但通流能力有限，多用于末端精细保护；瞬态抑制二极管响应最快、钳位最准，可守护芯片等精密器件，但通流极小，仅适于三级末端。脱扣装置作为安全冗余，在SPD老化击穿或持续漏电时自动切断通路，并通过视窗指示故障，防止短路起火，确保系统运行安全。

二、浪涌保护器在防雷设计中的应用

（一）雷电防护分区划分逻辑

现代防雷设计按照“分区防护、层层衰减”的原则，根据GB 50057《建筑物防雷设计规范》，将建筑物及周边区域划分为LPZ0、LPZ1、LPZ2、LPZ3四个雷电防护区域，不同区域的雷电电磁环境以及浪涌能量强度具备明显的差异，对应不同等级的浪涌保护器（SPD）防护方案。

LPZ0区属于室外无防护区，主要涵盖建筑外墙外侧、室外线路、屋顶设备区域，该区域直接暴露在雷电环境中，会承受直击雷、全强度雷电电磁脉冲冲击，浪涌能量最大，没有任何屏蔽衰减效果。LPZ1区属于建筑内部首层防护区域，即总配电房、建筑进线内侧，经过建筑外墙、屋面屏蔽结构衰减后，雷电能量有所降低，但是依旧存在高能量浪涌，需要配置一级SPD进行主力泄能。LPZ2区为楼层配电、车间内部区域，经过一级防护以及线路屏蔽后，浪涌能量大幅衰减，仅存在中低强度残余浪涌，适配二级SPD防护。LPZ3区为属于设备末端、机房关键区域，需要精细化防护，浪涌能量微弱但对精密设备危害特别大，需依托三级SPD进行精准限压防护。

防雷分区的精准划分是SPD分级设计的基础，只有结合不同区域的电磁环境匹配对应防护等级的设备，才能实现浪涌能量的逐级衰减，避免单级防护压力过大、防护失效的问题。

（二）三级分级防护设计要点

一级防护作为防雷系统的第一道防线，其根本作用在于泄放雷击产生的高能量浪涌，安装位置必须严格部署在建筑物电源总进线处及低压配电系统的起始端，并且覆盖三相火线、零线及地线。在器件选型上，应重点考核10/350 μ s波形下的直击雷放电电流参数，以满足一类、二类防雷建筑对直击雷的防护指标，同时须强化等电位连接，将SPD接地端可靠接至建筑总接地网，并尽可能缩短接地引线路径，以降低引线电感造成的残压抬升效应。在工程实践中，一类防雷建筑必须强制性配置一级SPD，而三类防雷建筑则可依据雷电风险评估结论灵活决定是否增设。

二级防护承接前级泄放后的残余能量，起到承上启下的过渡

作用，其主要功能是进一步削减一级动作后剩余的浪涌电压以及电流，并且兼顾电网操作过电压及近场感应雷的抑制需求。二级SPD一般部署于各楼层的配电箱或区域分配电柜内，且与前级SPD之间必须维持足够的线缆间距。按防雷设计规范要求，连接导线长度最好不小于5米，从而保障两级间形成清晰的能量衰减梯度。如果现场条件受限、无法满足该距离要求，则需要加装退耦器，以避免两级保护器件因动作时序紊乱而导致防护失效。二级SPD选型以8/20 μ s感应雷波形为依据，兼顾通流容量与电压保护水平，以适配大部分建筑内部配电场景。

三级防护主要是为了末端精细化保护，专门面向服务器机房、监控中心、精密测量仪器及自动化控制终端等敏感负载，安装位置直接部署在设备电源入口端及信号线路进线端口。经过前两道防护后，线路上浪涌能量虽然已大幅削减，然而残余的微小瞬态过电压依然会击穿精密电子芯片或干扰信号完整性。三级SPD凭借极低的电压保护水平以及高度精准的钳位特性，可将最终残压严格约束在设备耐受阈值以内，并且同时覆盖直流供电线路与弱电信号通道的防护盲区，有效弥补强电防护体系对弱电系统覆盖不足的问题。

（三）等电位配合设计

等电位连接与可靠接地是浪涌保护器（SPD）发挥效用的根本前提，也是防雷设计中极易被疏忽的关键环节。浪涌保护所泄放的浪涌电流最终需经由接地装置散逸至大地，假如接地电阻值偏高或等电位连接施工不规范，接地回路上将带来过高的残余电压，这不但会导致防护作用失效，还可能引致设备金属外壳带电、系统参考电位失衡，进而酿成安全事故。在防雷系统设计中，需要将所有浪涌保护器（SPD）接地端、设备外露导电部件、各类金属管道、屏蔽层以及建筑主体钢结构，全部可靠接至总等电位联结端子板，以此构建统一的接地等电位面，从而消除不同线路与设备间的电位差，杜绝浪涌侵袭时发生电位反击现象。与此同时，须严格把控接地电阻值：第一类、第二类防雷建筑物的接地电阻应小于1 Ω ，第三类防雷建筑物则不宜超过4 Ω ，以保证浪涌电流能够迅速、通畅地泄入大地。另外，浪涌保护器（SPD）的接地引下线应遵循短、直、粗的布线原则，防止出现弯折或缠绕，以减小引线电感与阻抗，最大限度降低残压损耗。

三、浪涌保护器在防雷设计中应用的常见问题

（一）选型匹配不合理

选型不合理是防雷系统设计中的常见问题，主要表现为：防护等级和风险区域不匹配，高风险区选用低通流容量的浪涌保护器（SPD）易被击穿，低风险区过度配置则增加成本；将配电浪涌保护器（SPD）误用于信号线路，易致信号异常或接口损坏；持续运行电压选取偏差，过低时电网波动引起误动作，过高则无法有效钳位浪涌，失去保护效果。合理选型需综合考量防雷等级、线路类型和设备参数，避免盲目或低价决策。

（二）安装施工工艺不规范

浪涌保护器（SPD）的实际防护效能，不但取决于产品本身

的质量，更和现场安装工艺密切相关。一旦施工操作不符合规范，即便选用优质设备，其保护功能也难以有效发挥。从防雷系统工程实践来看，常见的施工问题主要体现在以下几个方面：一是没有严格按照防雷分区要求确定浪涌保护器的安装点，导致一级、二级、三级保护级之间的电气间距不符合设计标准，级间配合失效。二是接地引线处理不当，引线过长、缠绕成圈或弯折角度太大，会显著增大线路电感，影响浪涌电流的顺畅泄放。三是接线相位混乱，导致电流路径紊乱，干扰正常泄流通道。四是等电位连接缺失，当发生雷击时易产生电位差，引发反击事故。四是未按规定加装脱扣器或熔断器等过流保护装置，一旦浪涌保护器内部损坏，无法自动切断故障回路，可能诱发短路甚至火灾风险。

（三）运维检测机制不完善

浪涌保护器（SPD）作为易损件，受雷击浪涌以及电压波动影响，性能会逐渐劣化。当前防雷工程普遍“重设计、轻维护”，竣工后缺少定期巡检与更换制度，老化 SPD 持续运行，雷雨时难以有效保护，形成隐患。同时，部分 SPD 故障指示器失效，异常状态不易察觉，使设备长期处于无防护状态，亟待完善检测以及更新流程

四、浪涌保护器在防雷设计中应用的优化措施

（一）精准选型，满足防护需求

针对具体雷电防护需求，应在防雷设计初期就完成现场雷电风险排查，并综合建筑所属防雷等级、使用环境、线路类型以及设备自身的耐压指标，来确定最合适的浪涌保护器（SPD）型号及保护级别。对于一类、二类高防雷等级建筑，必须建立三级完整防护架构^[4]；三类普通建筑则可依据风险评估结果适当简化，通常采用两级防护即可。在选型时，电力配电线路应使用专为电力系统设计的 SPD，而信号及弱电线路则需要选用插入损耗较小的信号专用 SPD，两者不可混用。此外，还需逐项校验关键电气参数，保证最大持续运行电压和电网额定电压相符，同时确保电压保护水平低于被保护设备的耐受电压，从而在源头筑牢防护屏障。

（二）规范施工，严控安装工艺标准

严格参照防雷规范与设备安装要求，高标准完成浪涌保护器（SPD）施工安装。依据防雷分区明确各级 SPD 安装位置，一级 SPD 通常在总配电进线端应用，二级 SPD 通常部署于楼层配电箱，三级 SPD 靠近设备前端安装；确保各级 SPD 线路间距不低于 5 米，间距不充分的时候需要加装退耦器优化时序^[5]。优化接地工艺，接地引线选择短、直以及粗敷设方式，杜绝盘绕弯曲，缩短泄放通路，降低线路阻抗；全域落实等电位连接，统一接地电位，消除电位反击风险。全部浪涌保护器（SPD）需要配套安装后备熔断器、脱扣保护装置，实现故障自动切断以及可视化报警，保障系统安全性。

（三）建立常态化运维检测机制

建立常态化运维体系，每年雷雨季前开展一次全面的防雷检测，重点对浪涌保护器（SPD）漏电流、残压、通流容量、接地电阻以及接线状态等参数进行检查，对于老化、衰减、失效的设备需要及时更换。日常巡检中还需要关注 SPD 故障指示窗口，一旦存在异常需要及时停机检修，排查故障原因。此外，还需要建立设备运维台账，认真记录浪涌保护器（SPD）的检修和更换记录，实现精细化管理。同时加强现场人员专业培训，提升运维人员对浪涌防护（SPD）的原理、故障判断以及日常维护的专业能力，杜绝人为因素造成的防护失效。

五、结语

综上所述，浪涌保护器是现代防雷设计中内部过电压防护的重要设备，全方位保障电气设备、精密电子系统的安全稳定运行。当前工程防雷设计中，选型不当、施工不规范、运维不完善等问题，是造成浪涌防护失效的主要因素。在后续的防雷设计以及工程应用中，应严格遵循国家规范标准，结合现场实际工况精准选型、规范施工，同时建立常态化运维检测机制，实现防雷系统的长效稳定运行，为各类电气系统的安全运行提供强有力的保障。

参考文献

- [1] 王玉珏，黄特. 浪涌保护器在低压配电系统中的选择策略与应用研究 [J]. 中国科技期刊数据库 工业 A, 2025(2): 169-172.
- [2] 张志胜. 低压配电系统浪涌保护器设计中相关问题的探讨 [J]. 电器工业, 2011(2): 51-54.
- [3] 赵元华，张彬. 电源浪涌保护器在线监测与劣化方法研究 [J]. 智能建筑电气技术, 2026, 2: 91-93, 128.
- [4] 王肃. 信号线路浪涌保护器防雷设计 [J]. 机电信息, 2017(9): 75-77
- [5] 林潇霄. 某超高层民用建筑电气系统浪涌保护器分级防护设计与施工效果研究 [J]. 江西建材, 2025(9): 220-223.
- [6] 朱成烈. 浪涌保护器在民用建筑电气设计中的选用 [J]. 城市住宅, 2021, 7(7): 191-192.

装配式智能伸缩悬挑卸料平台快速安拆施工工艺与应用

孙鹏¹, 孙炳营², 张仁莹¹, 辛举², 张志兴²

1. 山东省工程咨询院, 山东 济南 250000

2. 中建三局第一建设工程有限责任公司, 湖北 武汉 430000

DOI:10.61369/ME.2026060030

摘 要 : 根据传统悬挑卸料平台安拆效率低、高空作业风险大、安全控制难等技术难题, 提出装配式智能伸缩悬挑卸料平台创新施工工艺。根据实际工程案例, 对本工艺的核心结构体系、智能监测原理、关键施工要点进行阐述, 并分析该工艺的应用效益和质量安全控制措施。实践证明, 该工艺把模块化拼装、智能伸缩控制和实时监测技术融合起来使用之后, 可以使得卸料平台安拆时间缩短了 87.5%, 高空作业风险降低了 90% 以上, 材料周转效率提高了 60%, 单平台全生命周期综合成本节约了 2.6 万元。该工艺适合于各种高层建筑材料垂直转运作业, 给施工现场高效安全施工提供了一种可行的办法。

关 键 词 : 装配式卸料平台; 智能伸缩; 快速安拆; 施工工艺; 安全管控

Construction Technology and Application of Rapid Assembly and Disassembly for Prefabricated Intelligent Extensible Cantilever Unloading Platforms

Sun Peng¹, Sun Bingying², Zhang Renying¹, Xin Ju², Zhang Zhixing²

1. Shandong Engineering Consulting Institute, Jinan, Shandong 250000

2. China Construction Third Bureau First Engineering Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430000

Abstract : Addressing technical challenges associated with traditional cantilever unloading platforms—such as low installation efficiency, high risks associated with high-altitude work, and difficulties in safety control—this study proposes an innovative construction technology for prefabricated intelligent extensible cantilever unloading platforms. Based on actual engineering case studies, this paper elaborates on the core structural system, the principles of intelligent monitoring, and the key construction points of this technology, while also analyzing its application benefits and quality and safety control measures. Practical verification demonstrates that by integrating modular assembly, intelligent extension control, and real-time monitoring technologies, this construction method can reduce the installation time of the unloading platform by 87.5%, lower the risks associated with high-altitude work by more than 90%, improve material turnover efficiency by 60%, and save a total comprehensive cost of 26,000 RMB throughout the entire lifecycle of a single platform. This technology is well-suited for various vertical transportation operations involving building materials at high-rise sites, providing a feasible solution for achieving efficient and safe construction at construction sites.

Keywords : prefabricated unloading platform; intelligent telescopic mechanism; rapid installation and disassembly; construction technique; safety management

引言

高层建筑施工时, 悬挑卸料平台是钢管、模板等周转材料垂直转运的主要设施, 作业效率和安全性能的好坏直接关系到工程施工进度及现场管理水平^[1]。传统的悬挑卸料平台大多采取现场焊接成型、预埋钢筋锚固的施工方法, 存在安拆过程繁杂、作业时长长、高空暴露时间长等缺点。同时传统平台没有有效的载重监测和超限报警系统, 容易因为超载作业造成结构失稳的风险, 并且平台位置固定不能适应不同的楼层、不同的工况卸料的需求。

作者简介:

孙鹏 (1985.07.28-), 男, 汉族, 山东商河人, 山东省工程咨询院, 本科, 中级工程师;

孙炳营 (1996.01.26-), 男, 汉族, 河南新乡人, 中建三局第一建设工程有限责任公司, 本科, 工程师;

张仁莹 (1998.09.07-), 女, 汉族, 山东济南人, 山东省工程咨询院, 本科, 初级工程师;

辛举 (1989.02.03-), 男, 汉族, 山东曹县人, 中建三局第一建设工程有限责任公司, 本科, 工程师;

张志兴 (1987.04.25-), 男, 汉族, 河北沧州人, 中建三局第一建设工程有限责任公司, 本科, 中级工程师。

为了克服上述问题，研发出装配式智能伸缩悬挑卸料平台施工工艺，用模块化设计、智能控制技术和快速锚固体系的创新融合来实现卸料平台安拆便捷化、作业智能化、安全可控化。该工艺已经获得了多项实用新型专利授权，但是目前的研究大多集中于单一功能的改进上，对于其系统工艺整合以及工程应用的全面分析较少。因此，本文根据工程实践，对本工艺的主要原理、施工流程和质量安全管理措施进行详细的论述，为类似工程的施工提供技术上的借鉴。

一、工程概况

以某扩建业务用房项目为依托，该项目建设地址为江阴市澄江街道长江路141号，总建筑面积8763.06 m²，建筑层数12层，主体结构施工阶段需要完成大量的钢管、模板、扣件等材料的垂直转运。工程使用10台装配式智能伸缩悬挑卸料平台，平台主梁用2根16#工字钢，额定载重2t，伸缩行程3m，配套智能监测系统有荷载传感器、声光报警器、物联网传输模块等。平台周转运使用20次，包含项目主体结构施工全过程，全过程严格按照标准化施工、安全控制要求进行。

二、核心工艺原理与技术特点

（一）核心工艺原理

1. 装配式模块化结构原理

卸料平台主要由型钢轨道梁、钢支顶、移动平台、安全防护栏杆等构件组成，所有的构件都是在工厂预制生产的，现场采用高强螺栓连接成型^[4]。型钢轨道梁用2根16#工字钢，前后端用Φ14mm高强螺栓与型钢扣合配件连接，后端设4根钢支顶支撑在上层楼板上，不需要预埋锚固钢筋，简化了安装过程。移动平台底部装有四个固定轴滑轮，可以沿型钢轨道梁内侧的不等边角钢滑移轨道伸缩移动，便于将材料运送到建筑内外。

2. 智能监测控制原理

平台配有智能监测控制系统，分为控制模块和监测模块^[5]。控制模块由控制电机、钢丝拉索、触碰限位器组成，通过控制电机牵引钢丝拉索来实现移动平台的前进、后退和急停操作，触碰限位器可以防止平台超行程运行。监测模块把荷载传感器、拉力传感器、声光报警器、物联网模块集成在一起，对移动平台的荷载、钢支顶压力、钢丝绳拉力等进行实时采集，当检测到数据超限或者数据不一致的时候，立即启动声光报警并锁定平台运行功能，同时把报警信息上传到管理人员终端。

3. 快速锚固与承载增强原理

平台用钢支顶为主、斜撑和钢丝绳为辅的锚固方式，钢支顶上下端分别连接上层楼板和轨道梁，用调节螺母来控制高度和平整度。转运较重材料时，在轨道梁前端加装2道型钢斜撑和2道Φ21.5mm钢丝绳，斜撑支承在下层楼板上，钢丝绳系固在上层楼板预埋的吊环上，构成多点受力结构，提高平台的总承载能力。

（二）技术核心特点

1. 安拆效率高

工厂预制构件不需要在现场焊接、预埋，2名工人1小时可以

完成一台平台的安装，安拆时间比传统的方式缩短了87.5%。构件轻便易搬运、周转快，可提高周转率60%。

2. 作业安全性强

材料装卸可以在建筑内部完成，减少高空作业。智能系统可以对荷载进行实时监测，在出现超限报警的时候可以和视频监控结合使用，安全风险降低了90%以上。

3. 工况适配性广

平台伸缩行程3m，可根据楼层需求调整位置。增加斜撑与钢丝绳后，可以满足不同重量材料转运需求。

4. 管理便捷化

平台伸缩行程3m，可根据楼层需求调整位置。增加斜撑和钢丝绳后，可以满足各种重量的材料转运要求。

三、关键施工工艺流程与操作要点

（一）施工工艺流程

施工准备、地面拼装、安装锚固、智能系统调试、检查验收、运行控制、拆除转运

（二）关键操作要点

1. 施工准备

对作业人员做技术交底和安全培训，明确拼装、锚固、智能系统操作要点，特种作业人员持证上岗。清理吊装场地，保证场地平整稳定，划分构件堆放区、拼装区、作业区，设置警示标志。检查型钢、钢支顶、移动平台等构件的质量，核对规格尺寸，无变形、锈蚀，检查塔吊、焊接、切割设备的运行情况。

2. 地面拼装

地面安装移动平台组装件、固定轴滑轮、荷载传感器、竹胶板台面、限位报警装置。在轨道梁内侧焊接滑移轨道，将移动平台固定在轨道上，用扣合配件控制移动范围。安装防护栏杆，用螺栓固定，加装铝板和挡脚板，悬挑下方挂设安全平网。安装控制电机、定滑轮和钢丝拉索，钢支顶上装压力传感器，钢丝绳上装拉力传感器。

3. 安装锚固

用塔吊水平吊运平台到指定楼层，慢慢放下到安装位置。调整轨道梁位置，使其紧贴结构边缘处，放4根钢支顶，调节螺母使轨道梁水平稳定。如果需要提高承载力，则在上、下层楼板结构上增设钢丝绳和型钢斜撑。将传感器接入到控制装置上，打开电源，进行空载校准数据，保证传输准确。

4. 智能系统调试

对建筑内部进行静载试验，加荷到额定载重的120%来检验

报警装置的反应情况。操作平台伸缩运行，对限位器和电机的工作状态进行检查，保证数据可以实时上传、报警信息可以被正确接收。

5. 运行控制

向外转运材料时，把平台收回楼层内，装料后人员撤离，再伸出平台由塔吊吊运；向内转运时，平台伸出接收材料，再收回楼层内卸载。安排专人定时对螺栓紧固、钢丝绳磨损、传感器工作状态进行检查，管理人员通过后台及时处理超载和报警信息^[6]。

6. 拆除转运

拆除准备，清除平台上的材料和建筑垃圾，在地面设置警戒区，有专人指挥拆除工作。

部件拆除先拆防护栏杆、挡脚板等附属部件，切断智能系统电源，分离传感器模块和数据显示控制装置；拆除型钢斜撑、钢丝绳，放松钢支顶调节螺母，将塔吊吊钩挂牢并拉直吊绳，最后拆除钢支顶。

转运存放就是将拆除下来的部件吊运到地面，分类清理、检修后集中存放在指定区域，方便以后工程循环使用。

四、质量与安全控制措施

（一）质量控制标准

施工严格按照《钢结构设计标准》、《建筑施工高处作业安全技术规范》、《钢结构工程施工质量验收标准》等规范要求执行，主要控制指标为^[7]。

构件尺寸偏差 $\leq \pm 2\text{mm}$ ，焊缝无未焊透、夹渣、裂纹等缺陷，轨道梁水平度偏差 $\leq 3\text{‰}$ ，垂直度偏差 $\leq 5\text{mm}$ ，平台滑移顺畅无卡阻，传感器误差 $\leq \pm 2\%$ ，报警响应时间 $\leq 1\text{s}$ ，数据传输延迟 $\leq 3\text{s}$ 。

（二）质量保证措施

选择具有资质的工厂预制构件，加强生产过程控制，出厂检验合格后方可进场。拼装时螺栓扭矩满足设计标准，关键处用双

螺母防松，拼缝处粘贴泡沫条以防杂物落入。安装时用全站仪、水准仪监测轨道梁的水平、垂直度，每道工序结束后复核，保证精度符合要求。

（三）安全保障措施

高空作业人员佩戴安全帽、安全带，攀爬时连接防坠器，吊装和拆除下方不得有人停留^[8]。塔吊支腿垫实稳固，吊装缓慢运行，防止碰撞结构。平台设置限载标志，严禁超载、超高堆放，材料均匀布置，防止局部受力过大。

五、应用效益分析

（一）技术效益

本工艺把装配式模块化构造同智能控制技术融合起来，解决传统卸料平台安拆繁杂、安全管控不足、适应性差等难题。智能监测系统可以防止超载作业，快速安拆缩短周转时间，给后续工序创造条件，技术水平达到行业先进水平^[9]。

（二）社会效益

提高建筑材料转运的标准化、智能化，推动施工技术升级。高安全性可以降低高空作业事故的风险，保障作业人员的安全，构件可以多次周转使用，节约资源，有较好的推广价值^[10]。

六、结语

装配式智能伸缩悬挑卸料平台施工工艺把装配式结构、智能监测、快速锚固三者结合起来，有效地改善了传统卸料平台的各种弊端。该工艺操作简便、质量稳定、成本低，能大大提高施工效率和安全水平，适合于高层建筑、工业厂房等各种材料转运作业。后续可对构件材质、智能系统进行改进，用BIM技术来提高安装定位的精度，促使工艺向着数字化、智能化的方向前进。

参考文献

[1] 宋嘉玲. 装配式建筑施工关键技术研究 [J]. 建筑施工, 2024, 46 (8): 1342-1344+1357.
[2] 邓黎明, 房佳彦, 高明. 悬挑卸料平台施工技术创新与应用 [J]. 施工技术, 2024, 53 (12): 89-93.
[3] 赵军, 王清标. 装配式构件施工技术应用研究 [J]. 施工技术, 2019, 48 (12): 105-108.
[4] 林树枝, 陈振明. 新型悬挑结构施工技术在建筑工程中的应用 [J]. 建筑科学, 2019, 35 (5): 123-128.
[5] 陈立军, 周婷. 智能监测技术在建筑施工安全管控中的应用 [J]. 建筑经济, 2020, 41 (4): 45-49.
[6] 黄延铮, 吴涛. 智能控制技术在建筑施工设备中的应用 [J]. 建筑机械, 2019 (8): 86-89.
[7] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢结构设计标准: GB 50017-2017 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
[8] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑施工安全检查标准: JGJ 59-2011 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
[9] 李小阳, 张其林. 装配式卸料平台结构设计与施工研究 [J]. 建筑结构学报, 2021, 42 (3): 1-18.
[10] 陈明中, 李丽娟. 国外建筑施工安全技术经验及启示 [J]. 建筑经济, 2018, 39 (7): 35-39.

DOI:10.61369/ME.2026060036

关键词： 轴承；失效；工作辊

Keywords : bearing; failure; work roll

利用轴承拆解清洗跟踪和对比其他轴承座，分析发现针对进水通道路径，定距环（炮筒）与辊径 $\phi 193\text{mm}$ 档无密封件，机组设计中未考虑3#工作辊轧制力大，角速度高可能造成的定距环与辊径 $\phi 193\text{mm}$ 档乳化液侵入。乳化液从间隙通路可以自由进入轴承座内部。（图2.3）

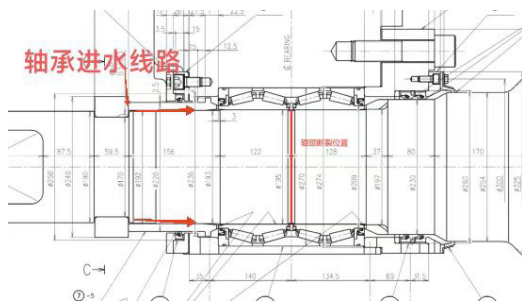


图2.3 轴承进水通道

二、轴承失效预防与改进

针对发现的问题点，制定以下防护措施：

1. 在原工作辊辊颈直径193mm档位区间开设槽体，槽体深度6.9毫米，槽体宽度11毫米。变更位置见图3.1。

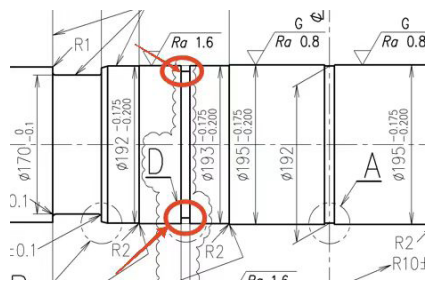


图3.1 轧辊辊颈开槽位置

2. 在槽体区域安装8毫米O型圈密封，阻断定距环与辊颈之间进水通道。变更位置见图3.1。

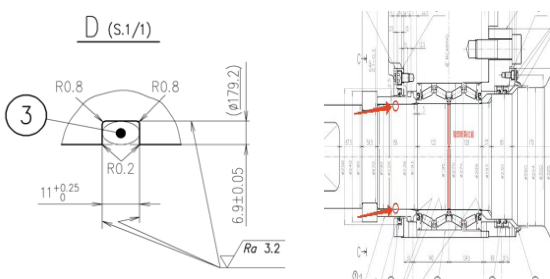


图3.2 O型圈密封安装

通过对轧辊辊颈开槽并增加O型圈密封，在定距环内壁和轧辊辊颈之间形成封闭，有效断绝乳化液进入轴承的通道，通过跟踪验证，同等清洗周期内，拆解轴承检查，润滑油脂未见被冲洗稀释情况，轴承运行稳定，无欠润滑发热现象。

未再出现因欠润滑引发F3工作辊烧轴承现象。

三、经济效益

每年可有效降低备件损失和换辊损失。

（一）备件损失

轴承一套2.028万元

工作辊一根1.7吨*2.1万/吨=3.57万元

轴承座一个2万元

每年合计降低事故备件损失：（2.028+3.57+2）*2套=15.196万元

（二）换辊损失

轧制吨位由1800吨换辊提升至2000吨换辊，降低变规格换辊次数11%，每年合计减少变规格换辊次数108次。每次换辊产生废品及停机损失3000元。

每年减少换辊损失3000*108=32.4万元

合计每年可降低成本（备件损失+换辊损失）：

15.196+32.4=47.596万元

四、结论

1720酸轧F3轧机工作辊烧轴承主要因素是轴承润滑脂被大量进入的乳化液稀释，引发欠润滑烧轴承，本措施通过开设槽体，增加O型圈断绝乳化液进入通道，保障轴承润滑脂有效性，提高轴承安全运行周期。通过上述二项改进，可有效解决在轧制过程中乳化液从定距环与辊颈之间通道进水现象，保障轴承润滑脂不被稀释，稳定轴承润滑。

参考文献

- [1] 姜学亮. 基于油液研究的冷轧轧辊轴承故障分析 [J]. 山西冶金, 2025 (02): 252-253.
- [2] 苏凌西. 冷轧机轧辊轴承的失效分析和改进措施 [J]. 冶金轴承, 2021.
- [3] 任喜来. 带钢冷轧机轧辊轴承的使用分析 [J]. 冶金轴承, 2013 (08): 45-48.
- [4] 蔡智媛, 王冰清, 彭旭东. 基于安装过程的O形圈安装结构优化分析 [J]. 中国机械工程, 2019, 30 (22): 2678-2684.
- [5] 苏孝兵, 国修路, 柴志鹏. 冷轧机轧辊轴承润滑技术分析与应用 [J]. 润滑与密封, 2015, 40 (06): 112-115.

急曲线大纵坡条件下超大直径盾构隧道上层车道板一体化拼装施工

强晓

上海黄浦江越江设施投资建设发展有限公司，上海 200002

DOI:10.61369/ME.2026060038

摘 要： 针对上海漕宝路快速路新建工程2标 ϕ 15.56m超大直径盾构隧道具有 R=500m小半径曲线、最大5%纵坡及隧道内净高受限的施工难点，传统桁车吊装工艺在安全性、效率及精度上均难以满足要求。依托该工程，通过优化施工组织设计，研发应用了基于DCY100运输车的顶升回转一体化拼装工艺。通过实施“滞后500环”的纵向流水作业节拍，开展陈太路1:1足尺试验段验证，并集成板柱接头精细化控制技术，成功解决了大吨位、大跨度预制车道板在急曲线段的空间拟合难题。现场应用表明，该工艺将单块车道板拼装时间由传统工艺的60min缩短至15min以内，轴线偏差控制在 ± 3 mm，作业人员减少50%，实现了隧道内部结构施工的安全、高效与毫米级精度，为后续类似工程提供了可复制的经验。

关 键 词： 单管双层隧道；预制拼装；车道板；流水作业

Integrated Assembly Construction of Upper-Level Lane Slabs for Ultra-Large-Diameter Shield Tunnels Under Conditions of Sharp Curves and Steep Longitudinal Slopes

Qiang Xiao

Shanghai Huangpu River Cross-River Facilities Investment, Construction and Development Co., Ltd. Shanghai 200002

Abstract： The shield tunnel with an outer diameter of ϕ 15.56 m for Bid 2 of the New Caobao Road Expressway Project in Shanghai features construction difficulties including a sharp curve with a radius of 500 m, a maximum longitudinal gradient of 5%, and limited internal clearance height. The conventional overhead travelling crane hoisting assembly method cannot meet the requirements in terms of safety, efficiency and assembly accuracy. Based on this project, the integrated jacking-rotating assembly technology adopting DCY100 transporter was developed and applied via optimizing construction organization design. By adopting a longitudinal flow construction rhythm with a 500-ring lag, a full-scale 1:1 test section at Chentai Road was carried out for verification. Combined with refined control technology for slab-column joints, the spatial fitting challenge of heavy-duty and large-span prefabricated lane slabs in sharp curve sections was successfully addressed. Field application results show that this technology reduces the assembly time of a single lane slab from 60 min by the conventional method to less than 15 min, controls the alignment deviation within ± 3 mm, and cuts the number of operators by 50%. It realizes safe, efficient and millimeter-level precision construction of internal tunnel structures, and provides replicable experience for similar subsequent projects.

Keywords： single-tube double-deck tunnel; prefabricated assembly; lane slab; flow construction

引言

随着城市地下空间开发向深层化发展，单管双层大断面盾构隧道因其节约用地、结构紧凑等优势，在上海市快速路网建设中应用日益广泛。漕宝路快速路新建工程2标盾构段为国内单管双层双向六车道隧道，其内部结构采用“板-梁-柱”支撑体系。其中，上层预制车道板作为该体系的核心承重构件，具有跨度大（11.8m）、重量大（最大59t）、安装精度要求高（轴线偏差 ≤ 5 mm）的特点。

在以往类似工程中，上层车道板多采用隧道顶部行车配合钢丝绳吊装，例如朱学银在诸光路隧道项目中采用纵向悬臂行车，为了抵抗行车倾覆在行车腿部填充混凝土^[1]。仇崧羽在上海市周家嘴路越江隧道中安装上层车道板也采用了隧道内专门的吊装机，然而在安拆

该设备占用了隧道内大量工期^[2]。

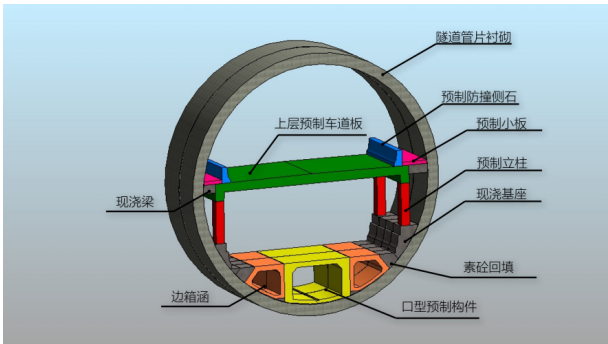
在漕宝路隧道 R=500m 的小半径曲线及 5% 的大纵坡条件下，除了以上研究者提到的不足外，行车吊装还存在其他弊端：

一是高空作业风险高，钢丝绳柔性悬挂导致构件摆动难以控制，且因为竖向重力作用，导致构件在斜坡段不可避免拼装缝隙过大；二是作业效率低下，单块车道板安装耗时长达 60min，且占用隧道顶部空间，阻断下方物流通道，进而影响其他工作面施工效率；三是精度调整困难，钢丝绳难以适应纵坡变化及曲线拟合要求。

为此，本项目开展上层车道板智能化拼装施工技术的研究与应用，旨在攻克上述难题。

一、工程难点分析

漕宝路 2 标盾构段全长约 4.2km，隧道衬砌管片内径 13.7m，分为上下两层车道，下层车道结构为：口型预制构件 + 边箱涵 + 素砼回填，上层车道结构为现浇基座 + 预制立柱 + 预制车道板。



盾构隧道内部结构断面图

上层车道板共分为 YB1~YB4 四种型号，标准段 YB1 板外形尺寸为 3930mm × 11800mm × 500mm，采用 C60 高性能混凝土，内部设置非抽芯永久内模以减轻自重，实测单块重量达 55~59t。

上层车道板施工面临以下主要难点：

空间极度受限：洞内下层车道可利用净高为 3.85 m，拼装设备连同构件的总高度需严格管控在 3.75 m 以内，传统桁车整体构架偏高，受空间边界限制，很难满足该隧道工况下的施工使用要求。

线形控制极难：隧道平面取 500m 最小曲线半径，纵向最大坡度 5%，预制车道板为直线构件，安装作业中要在三维空间内匹配隧道设计线形，拼装设备能否实现灵活的姿态调整，直接决定该类工况下施工可行性。

物流组织复杂：盾构掘进过程中管片运输、同步注浆，需和隧道后部双层车道内部结构施工同步作业，涉及口型预制构件、边箱涵、素砼填充、现浇基座、预制立柱、上层车道板、预制防撞侧石等施工内容。下层车道内浆液运输车、构件运输车与拼装设备交错通行。一旦拼装设备挤占通行通道、作业耗时增加，便会干扰盾构正常掘进，带来工期严重滞后的隐患。

精度要求苛刻：车道板依靠牛腿支座架设在预制立柱顶端，施工中应保证板底与柱顶贴合紧密，轴线安装偏差不大于 ±3mm，支承构造还需适配 5% 纵坡的安装工况。



传统桁车工艺吊装预制车道板

二、施工管理体系

为应对超大吨位车道板拼装的施工难点，项目围绕安全保障与质量控制搭建全链条管理机制，通过方案专家评审、工艺预试验夯实前期基础，作业现场落实安全管控，各工序同步执行质量验收，覆盖施工各个阶段。

（一）设备与方案双重评审

车道板在隧道内拼装时受空间约束，施工难点突出，项目设立技术攻关专班，依托隧道双头运输车进行设备升级，研发专用拼装机，实现构件转运、顶升、回转与安装姿态微调的一体化作业。

项目邀请行业专家开展专项方案评审，着重研判设备多项关键性能：3.85m 低净空环境下运行稳定性、70t 荷载工况的承载安全性能，以及 ±0.2° 调平机构的作业可靠性。经过专家组逐项审核，专业分包编制的车道板运输安装技术方案、总承包单位报送的隧道上层车道板安全专项施工方案，均顺利通过审查。



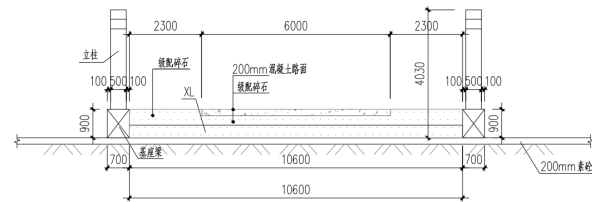
拼装机实际照片



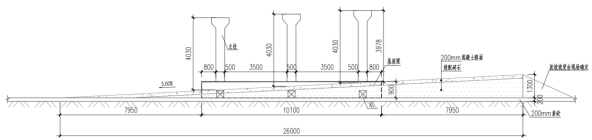
专项施工方案编制评审

（二）试验段验证

为避免直接上线施工风险，项目在试验基地搭建1:1足尺试验场。新试验场地现状为20cm厚整平的现浇素砼，现浇5%坡度的临时道路模拟隧道内坡度，临时道路长度26m，模拟隧道内5%的纵坡条件，布置6根预制立柱，模拟在最不利工况条件下安装2块车道板。



试验段横断面图



试验场地结构纵断面

试验发现与优化：

溜车风险：现场初期试作业期间，当设备带重载在5%坡道上进行就位调整，会出现微量滑移现象。项目团队针对该工况缺陷及时改进作业管控措施，明确现场操作约束，不允许重载状态下整机反复移位，构件的对位微调，全部依靠设备本体液压系统实施。

工时分解：在试验段作业过程中开展工时实测，单块车道板拼装各工序用时：构件转运到位5min，顶升回转6min，精调对位落位7min，设备撤离复位2min，全流程累计约20min。通过现场记录的作业时长可以看出，整套工序衔接有序，证明该施工工艺具备实体工程应用的可行性。

（三）安全与质量管控

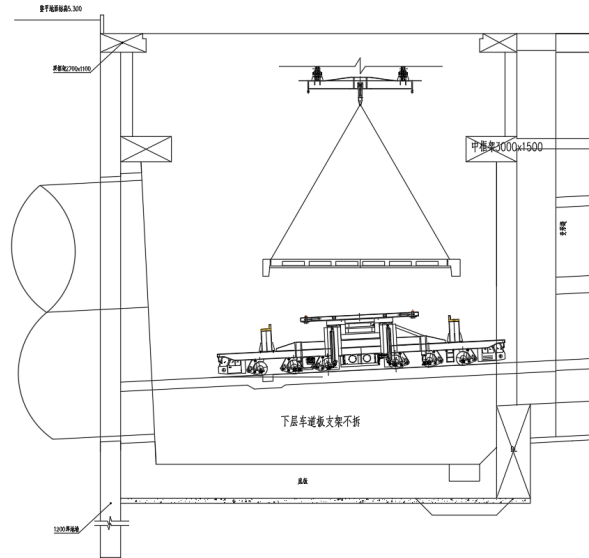
安全方面：项目制定22项DPZ70设备安全操作准则，有限空间作业优先完成通风，气体检测达标后再施工，现场配备双鼓风机、四合一气体检测仪，设备采用无线遥控，操作人员无需进入高危区域即可实施控制。

质量方面：强化前置工序质量管控。完成立柱植筋后开展拉拔检测， $\Phi 20$ 、 $\Phi 25$ 钢筋植入深度分别控制在335mm、415mm，契合设计参数；再复核立柱顶部标高，使实测偏差不大于 $\pm 2\text{mm}$ 。

三、总体施工工艺

（一）场地布置与竖向运输

合川路工作井作为竖向运输作业点位，搭设专用运输通道，采用60t行车设备，从工作井吊装孔下入，完成车道板构件的垂直吊运施工。



吊装纵断面示意图

（二）纵向流水作业节拍

通过实地研判现场施工节奏，项目组将“以环号定工序，以距离保安全”作为组织管控依据。合理设定各工序滞后环数，运行纵向流水作业方式，分隔盾构掘进与内部结构施工作业面，消除工序间的相互干扰。

纵向流水作业节拍

作业区段	对应施工内容
盾构机及车架范围	盾构掘进、管片衬砌安装、“口”型预制构件安装
车架后50环内	预制边箱涵安装、素砼回填浇筑
车架后100环内	下层基座及防撞墙浇筑
车架后300环内	预制立柱安装
车架后500环内	上层预制车道板安装

优势：DPZ70拼装机荷载大，将拼装工序滞后500环实施，可减少盾构掘进带来的地层扰动，保障地层条件稳定。拼装工位设于隧道深部，前方作业通道得以释放，掘进掌子面与后方内部结构拼装工作面实现空间错置。

（三）水平运输与顶升回转工艺

设计图纸将预制立柱灌浆强度80%设定为上层车道板安装的准入条件，施工现场适当提高安全储备，摒弃设计给定阈值，待灌浆强度实测值抵达100%后，再进行上层车道板的吊装就位作业。

DPZ70拼装机与车道板构件由DCY100型双头运输车驮运进入隧道。全程采取低速管控，平路行驶速度上限5km/h，坡道部位限速3km/h。车辆缓慢前行，车尾超出已拼装上层车道板后，方可完成停靠定位。

支腿固定: 设备完成就位, 将四角液压支腿下放支撑在地面上, 整机荷载经由支腿传递至地基, 隔离车辆悬架的弹性, 避免悬挂结构产生形变, 为后续拼装作业提供刚性支撑。

回转调向：回转驱动单元驱动平台完成 90° 转角，车道板由纵向运输形态转至横向安装方位。机构可实现 0.1° 的回转控制精度，定位过程完全自主，无需人工开展限位作业。

精调落位: 横移油缸可调行程 ± 250 mm, 纵移油缸可调行程 ± 150 mm。通过两组油缸实施毫米级位置校准, 动态调整车道板空间坐标, 使构件精准对接并落置于立柱设计安装位置。

(四) 接缝及现浇梁施工

[1] 朱学银, 李章林, 何炜. 盾构隧道内部双层装配式结构施工关键技术研究 [J]. 中国高新科技, 2019, (08): 10-11.

[2] 仇羽琛. 大直径公路隧道内主体结构全预制构件安装施工工期研究 [J]. 绿色建筑, 2021, 13(04): 111-112+122.

经济效益明显：该工艺条件下现场仅需3-4名操作人员，传统方案用工为6-8人，人员缩减比例达50%。设备前期投入压力较大，而工期压缩、人工开支与材料损耗的下降，能够为项目创造可观的综合经济价值。

检测项目	设计值	传统工艺	技术升级后	提升幅度
车道板拼装时间	/	60min	15min	↑ 75%
车道板轴线偏差	≤ 5mm	± 15mm	± 3mm	↑ 80%
安全风险	/	存在吊装风险	取消吊装作业	↓ 100%
作业人员	/	6~8人	3~4人	↓ 50%

漕宝路快速路 2 标超大直径盾构隧道，急曲线走向、大纵坡坡度与有限净空交织在一起，上层车道板很难兼顾安装精度与施工速度。项目依托顶升回转一体化拼装工艺，配合纵向流水作业的施工节拍，有效处理了这一技术痛点。从现场实施效果来看，该成套技术的安全水平、构件精度以及施工组织，均优于传统桁车作业，具备向外推广的现实条件。后续工作将围绕设备能耗、项目成本开展优化，推动预制拼装技术朝着低碳、经济的方向继续完善。

关于变电站电气设备运行状态自动化预测方法的研究

刘一平

海工（珠海）重工有限公司，广东 珠海 519000

DOI:10.61369/ME.2026060010

摘 要： 变电站电气设备的运行状态直接关系电网安全。传统人工巡检效率低且易漏检。研究提出一种基于数据驱动的自动化预测方法，通过采集设备历史运行数据，建立特征参数体系，应用机器学习算法构建预测模型。实验结果表明，该方法可有效识别设备状态变化趋势，预测准确率达到较高水平，为变电站设备维护提供决策支持。方法响应快，准确率高且稳定，便于现场部署。

关 键 词： 变电站；电气设备；运行状态

Research on Automatic Prediction Methods for the Operating Status of Electrical Equipment in Substations

Liu Yiping

COOEC (Zhuhai) Heavy Industry Co., Ltd., Zhuhai, Guangdong 519000

Abstract： The operational status of electrical equipment in substations is directly related to the safety of the power grid. Traditional manual inspection is inefficient and prone to missed inspections. This study proposes an automated prediction method based on data-driven analysis. By collecting historical operational data of equipment, establishing a feature parameter system, and applying machine learning algorithms to construct a prediction model, experimental results show that this method can effectively identify trends in equipment state changes, achieving a high level of prediction accuracy. It provides decision support for substation equipment maintenance. The method responds quickly, has high and stable accuracy, and is easy to deploy on-site.

Keywords： substation; electrical equipment; operating status

引言

变电站设备在长期高电压、大电流环境中运行，性能缓慢下降。一旦突发故障，可能造成大面积停电。当前在线监测装置虽能采集大量数据，但分析处理依赖人工，缺乏对未来状态的预判能力。研究自动化预测方法，从历史数据中挖掘设备状态演变规律，能够提前识别异常趋势，为计划检修提供时间窗口。该方法有助于降低突发故障风险，提升电网运行可靠性。

一、变电站电气设备状态监测的现状与问题

（一）设备运行状态监测的基本需求

变电站内部包含变压器、断路器、隔离开关、互感器等多种电气设备。这些设备长期处于高电压、大电流的工作环境中，设备性能会随时间缓慢下降。一旦设备出现故障，可能引发大面积停电事故。因此，掌握设备运行状态的变化规律至关重要。传统状态下，运维人员定期巡检设备，通过肉眼观察、红外测温、声音判断等方式评估设备健康水平。这种模式依赖人员经验，无法实时捕捉设备状态突变。部分设备内部故障在外部表现不明显，等到发现异常时，设备往往已经接近失效。

（二）现有状态监测方法的局限性

目前变电站普遍安装了在线监测装置，如油色谱分析仪、局放电检测仪、测温传感器等。这些装置能持续采集设备运行数

据，但数据的分析处理仍以人工为主。运维人员需要查看大量数据报表，从中判断设备是否存在异常。这种方法存在几个突出问题。第一，数据量大时，人工分析容易遗漏关键信息。第二，不同监测参数之间存在关联，人工难以同时考虑多个变量。第三，缺乏对设备未来状态变化的预判能力，只能被动响应已发生的异常。

（三）自动化预测方法引入的必要性

自动化预测方法能够从历史数据中学习设备状态变化规律，建立输入参数与设备健康状态之间的映射关系。一旦模型训练完成，系统可以自动处理新采集的数据，输出设备未来状态的概率或趋势。这种方法不依赖人工经验判断，减少了主观因素干扰。同时，自动化预测可以连续运行，及时发现状态异常变化。更重要的是，预测结果能为设备检修提供时间窗口，帮助运维人员提前准备备件和检修方案，变事后维修为预知性维修。

二、设备运行状态数据采集与特征参数构建

（一）监测数据的来源与类型

变电站电气设备运行状态数据主要来自两类渠道。一类是变电站自动化系统记录的运行参数，包括电压、电流、有功功率、无功功率、频率、温度等。另一类是专门的状态监测装置采集的数据，如变压器油中溶解气体含量、断路器分合闸线圈电流波形、局部放电脉冲幅值等。这些数据具有不同的时间特性。运行参数通常以秒级或分钟级频率采样，数据量大且连续。状态监测数据采样频率较低，可能每小时或每天记录一次。不同设备的数据采集周期也不统一，需要做时间对齐处理^[1]。

（二）数据预处理方法

原始采集数据包含噪声和异常值，不能直接用于模型训练。数据预处理主要包括三个步骤。第一步是缺失值处理。传感器故障或通信中断会产生数据缺失。对于短时间缺失，可以采用线性插值法填补；对于长时间缺失，直接删除对应时间段的数据更合适。第二步是异常值剔除。设备测量值超出正常物理范围时，可判定为异常点。例如变压器油温突然跳到几百摄氏度，明显是传感器故障。这类异常值需要识别并移除，否则会干扰模型学习。第三步是数据归一化。不同参数的量纲和数值范围差异很大，例如电压以千伏为单位，温度以摄氏度为单位。归一化将所有参数映射到相同数值区间，便于模型处理。常用方法包括最大最小归一化和 Z-score 标准化^[2]。

（三）状态特征参数的提取

设备运行状态不能直接观测，需要通过特征参数间接反映。特征参数选取直接影响预测模型的性能。选取特征参数时，需要考虑三个原则：可测量性、相关性和时效性。以变压器为例，常见的状态特征参数包括油中溶解气体含量（氢气、甲烷、乙烷、乙烯、乙炔）、油温、绕组温度、铁芯接地电流、套管介损等。以断路器为例，特征参数包括分合闸线圈电流峰值、动作时间、触头行程、主回路电阻等。单一特征参数往往不足以判断设备状态。多个特征参数组合后，可以形成更全面的状态描述。特征组合需要避免参数之间的高度相关性，否则会造成信息冗余。可以采用主成分分析法或相关系数矩阵进行特征降维，筛选出最具代表性的特征子集。

三、基于数据驱动的设备状态预测模型

（一）预测模型的整体框架

设备状态预测模型的核心任务是根据当前和历史状态特征参数，推算未来一段时间内设备状态的变化趋势。模型的整体框架包含输入层、处理层和输出层三个部分。输入层负责接收经过预处理的状态特征参数序列。处理层运行预测算法，对输入数据进行计算分析。输出层给出预测结果，包括设备健康指数、故障概率或剩余使用寿命等指标。模型运行需要两个阶段。第一阶段是训练阶段，使用历史数据训练模型参数，使模型能够拟合输入与

输出之间的映射关系。第二阶段是预测阶段，将新采集的数据输入训练好的模型，得到预测结果。模型训练完成后，可以定期使用新数据对模型进行更新，以适应设备老化引起的性能变化^[3]。

（二）常用预测算法的比较

目前可用于设备状态预测的算法有多种类型，各有优缺点。时间序列分析法适用于具有明显趋势性和周期性的数据。例如变压器油温随负荷变化呈现日周期规律，可以用自回归移动平均模型（ARIMA）进行预测。这类方法计算简单，但对非线性关系的拟合能力有限。神经网络具有较强的非线性映射能力。多层感知机网络可以处理多个输入特征与输出状态之间的复杂关系。反向传播算法用于网络训练，通过调整连接权重使预测误差最小化。神经网络的缺点是训练时间长，且需要大量样本数据。支持向量机在小样本情况下表现较好。通过核函数将低维数据映射到高维空间，在高维空间中寻找最优分类超平面。支持向量机适合处理高维特征数据，但核函数选择依赖经验。随机森林是一种集成学习方法，通过构建多个决策树并综合投票结果做出预测。该方法对噪声数据不敏感，能处理缺失值，且不易过拟合。随机森林还能输出特征重要性排序，帮助筛选关键参数^[4]。

综合比较各种算法，随机森林在变电站设备状态预测中应用效果较好。因为设备状态数据通常包含噪声和缺失值，随机森林对这些问题有较好的容忍度。

（三）模型训练与参数优化

模型训练是将历史数据输入算法，使算法学习输入与输出之间规律的过程。训练数据需要包含设备从正常到异常的全过程记录，这样模型才能学会识别状态变化的早期特征。

训练集和测试集的划分比例通常为7比3。使用训练集训练模型参数，使用测试集验证模型的泛化能力。如果模型在训练集上表现良好但在测试集上表现差，说明发生了过拟合。过拟合的解决办法包括增加训练数据量、减少模型复杂度、引入正则化项。模型参数优化采用交叉验证方法。将训练数据分成k份，每次取其中一份作为验证集，其余k-1份作为训练集，重复k次后取平均性能作为评价指标。网格搜索法可以遍历参数组合，找到性能最优的参数配置。以随机森林为例，需要优化的主要参数包括决策树数量、最大深度、节点分裂所需的最小样本数等。决策树数量越多，模型稳定性越好，但计算时间也越长。通常取100到500棵决策树即可获得较好的性能。

（四）预测效果的评价指标

预测模型的性能可通过量化指标评判。二分类场景常用准确率、精确率、召回率与 F1 值四类指标。准确率代表预测正确样本的占比，精确率、召回率分别对应异常样本的判定情况，F1 值结合二者综合体现模型能力。回归分析多采用 MAE 与 RMSE，两项指标依据预测值和真实值的差值计算，其中 RMSE 对误差波动更为敏感。设备状态预测需考量漏报与误报问题。漏报易引发设备故障，误报会增加检修负担，实际应用中需结合业务需求选用指标、设置权重^[5]。

四、预测方法的实现与效果验证

（一）数据来源与实验设置

实验数据来自某地区变电站两年内的运行记录。数据涵盖三台主变压器和六台断路器的监测信息。变压器数据包括油色谱分析结果、油面温度、绕组温度、负荷电流等。断路器数据包括分合闸线圈电流波形特征值、动作次数、触头磨损量等。数据采集间隔不一致。负荷电流每5分钟记录一次，油色谱分析每8小时采样一次，断路器动作数据仅在操作时产生。处理时将所有数据按小时对齐，缺失值采用前向填充法处理。实验采用 Python 语言编写预测程序。主要使用 scikit-learn 机器学习库中的随机森林算法。计算机配置为普通工作站，单次模型训练耗时约两分钟。

（二）模型训练结果

将预处理后的数据按7比3划分为训练集和测试集。训练集包含约12000条样本，测试集包含约5000条样本。设备状态标签由专业运维人员根据实际检修记录标注，分为正常、注意、异常三个等级。经过网格搜索优化，随机森林模型的最佳参数为：决策树数量200棵，最大深度15层，节点分裂所需最小样本数5个。模型在训练集上的准确率达到96.2%，在测试集上的准确率为93.7%，两者差距较小，说明模型没有明显过拟合。特征重要性分析显示，对变压器状态预测贡献最大的前三个特征依次是油中乙炔含量、负荷变化率和油面温度。对断路器状态预测贡献最大的前三个特征依次是分闸线圈电流峰值、动作次数和主回路电阻。这些特征与设备故障机理相符，验证了模型学习的合理性。

（三）与人工预测方法的对比

为验证自动化预测方法的有效性，将模型预测结果与三名经验丰富的运维人员独立判断结果进行对比。选择过去一年发生过故障或检修的50台次设备作为测试案例，要求人员根据同样的事前监测数据给出状态预测，模型也基于相同数据进行预测。结果显示，模型对设备异常状态的召回率达到89%，平均精确率为

87%。三名运维人员的平均召回率为76%，平均精确率为81%。模型在两项指标上均优于人工判断。进一步分析发现，模型在识别早期微弱异常信号方面表现突出。例如某台变压器油中乙炔含量缓慢上升的案例，人工判断时认为数值仍在标准范围内，未引起注意，而模型根据历史趋势预测出乙炔含量将持续升高。三个月后该变压器确实出现放电故障，模型提前给出了预警。

（四）方法的应用价值讨论

自动化预测方法能够在不增加硬件投入的情况下提升变电站状态感知能力。监测系统已经采集了大量数据，这些数据的价值尚未被充分利用。预测模型相当于数据分析工具，将原始数据转化为决策信息。该方法可以直接嵌入现有变电站监控系统。监控系统每收到新数据，自动调用预测模型进行计算，更新设备状态评估结果。当预测结果显示设备状态趋向异常时，系统发出预警通知，提醒运维人员关注。从经济效益角度分析，提前发现设备异常可以避免突发故障造成的停电损失。以一台110kV变压器为例，突发故障更换费用约80万元，停电损失可能超过200万元。如果提前三个月预测到故障趋势，安排计划性检修，费用可降低一半以上。自动化预测方法的投入主要是软件开发和模型维护成本，长期收益明显。

五、结束语

基于上述研究，可以得出如下结论：以数据驱动为核心、融合机器学习算法的设备状态预测方法，有效克服了传统人工巡检的不足。该方法能够及时识别状态变化趋势，预测准确率高，为变电站安全运行提供可靠决策支持。现场部署简便，响应速度快，具有良好的推广价值。未来可进一步融合多源监测数据，优化特征提取与模型泛化能力，推动变电站运维向智能化、精准化方向升级。持续完善预测体系，将为电网安全稳定运行提供更坚实的技术保障。

参考文献

- [1] 晏云明. 变电站电气设备运行状态自动化预测方法[J]. 模型世界, 2024(22): 81-83.
- [2] 王军华, 李富强, 胡晓华, 等. 变电站电气设备运行状态自动化预测方法[J]. 自动化与仪表, 2023, 38(11): 17-20, 93.
- [3] 陈钢. 变电站电气设备的状态检修和状态监测技术现状及其发展趋势[J]. 贵州电力技术, 2005, 8(1): 15-17.
- [4] 张杰. 变电站电气设备状态检修优化对策研究[J]. 电脑采购, 2024(52): 78-80.
- [5] 侯东方, 徐天, 王俊. 220kV及以下变电站设备状态的监测与预测应用[J]. 大众用电, 2023, 38(9): 40-41.

电力工程 EPC 总承包项目风险管理的优化措施研究

郭亚真

中国电力工程顾问集团西北电力设计院有限公司, 陕西 西安 710075

DOI:10.61369/ME.2026060019

摘 要： 电力工程 EPC 总承包项目涵盖设计、采购等多个环节，建设周期较长，参与单位较多，各阶段联系紧密，单一环节风险隐患极易传导并拖慢整体施工进度。伴随电网建设规模不断扩大，新型电力系统建设持续推进，项目管理要求不断提高，风险管理已经成为电力工程建设的重要内容。基于此，本文系统阐释电力 EPC 总承包项目实施风险管理的现实必要性，梳理项目全周期各类风险因素，并匹配制定专项优化管控对策，以期提升项目资源统筹配置效能，为有序推进电力工程项目提供保障。

关 键 词： 电力工程；EPC 总承包项目；风险管理；优化管控对策

Research on Optimization Measures for Risk Management in EPC General Contracting Projects of Power Engineering

Guo Yazhen

Northwest Electric Power Design Institute Co., Ltd. of China Power Engineering Consulting Group, Xi'an, Shaanxi 710075

Abstract： Power engineering EPC (Engineering, Procurement, and Construction) projects involve multiple stages including design and procurement, feature long construction cycles, involve numerous participating entities, and require close coordination across phases. Risks in any single stage can easily propagate and delay the overall project schedule. With the continuous expansion of power grid development and ongoing advancement of new power system construction, project management requirements are rising steadily, making risk management a critical component of power engineering projects. Based on this context, this paper systematically discusses the practical necessity of implementing risk management in EPC projects, identifies various risk factors throughout the project lifecycle, and proposes targeted optimization and control strategies to enhance resource allocation efficiency and ensure the orderly progress of power engineering projects.

Keywords： power engineering; EPC general contracting project; risk management; optimization control countermeasures

引言

《电力建设工程施工安全监督管理办法》对电力工程总承包模式下安全管理作出约束要求，结合安全生产相关法律法规，明确了 EPC 总承包项目承担项目全过程安全主题责任，对项目安全管理划定刚性底线。当前电力 EPC 项目建设外部环境不确定性强，普遍存在施工安全隐患、合同管控薄弱等各类风险，而现阶段多数企业风险管理体系较为粗放，多以事后处置为主，缺乏全周期的防控机制，难以适配电力工程高质量建设要求。因此，电力行业需要建立动态风险管理体系，采用标准化管控手段，保障项目平稳落地。

一、电力工程 EPC 总承包项目风险管理的必要性

新型电力系统建设进程中，电网改造及新能源并网工程整体建设规模持续扩大，施工技术不断更新，EPC 总承包模式整合项目设计、物资采购等全部建设环节，契合电力工程多专业协同的建设特点。而且，电力工程整体建设投入资金规模大、专业技

术要求严格、建设周期跨度较长，行业监管规则具备较强约束效力。项目完整建设过程包含电气系统设计、电力设备采购等多项核心工作内容，各施工环节相互关联，如此便增加了项目整体管控的不确定程度。《建设项目工程总承包管理规范》明确总承包企业终身质量管控责任，行业主管部门持续完善工程成本、施工进度管控标准，推动电力建设行业形成常态化风险防控工作体

作者简介：郭亚真，男，汉族，甘肃正宁人，职称：高级工程师，学历：大学本科，主要研究方向：长期深耕电力工程总承包领域，主要研究方向为电力建设 EPC 总承包项目全过程安全管控、施工现场风险辨识与隐患治理、工程总承包安全体系搭建等，拥有丰富的电力基建总承包安全管理实操经验。

系。国内电力行业市场化改革稳步推进，各类输变电及新能源工程项目的建设条件趋于复杂，设备材料供应波动、建材市场价格调整等多重因素，影响工程项目正常建设进度^[1]。成熟完善的风险管理工作体系覆盖项目全建设周期，采用风险排查、等级划分等常规工作方式，落实各施工环节管控标准，规范各专业施工流程，可以有效消除电力工程建设过程中的各类隐性管理问题。

二、电力工程 EPC 总承包项目风险分析

（一）管理风险

电力工程 EPC 总承包项目推进过程中，多数总承包企业沿用传统基建管理模式，开展新型电力项目建设，原有管理体系难以适配电力专项工程的专业管控标准，再加上企业内部管理架构权责划分不够清晰，未能精细划分管理层级与各专业职能部门的工作范围，导致项目整体管控过程容易出现职能交叉或管理缺位的情况^[2]。同时，现行管理制度更新速度滞后于行业发展节奏，针对新能源并网、特高压配套设施建设的专项管理细则存在漏洞，致使通用管理条例无法适配电力工程调试检测、并网报备等专属工作环节。而且，项目整体管理模式偏向静态固化，动态管控机制缺失让项目运行难以应对建设期间的组织调整、流程偏差等各类变化。EPC 项目各业务板块协同管理水平存在短板，各个工作板块的沟通渠道不够畅通，跨专业信息传递存在偏差，直接影响项目整体管理工作的推进效率。

（二）自然风险

电力工程 EPC 总承包项目多数施工内容依托户外场地开展，输变电线路铺设、升压站土建作业等核心施工内容长期处于露天环境，气候状态以及地质条件动态变动可构成电力建设过程中典型的自然风险来源。电力基建项目作业覆盖范围广泛，施工周期跨越多个气候阶段，大气环境持续变动会直接影响户外土建作业、电气设备安装及架空线路铺设的施工标准。与此同时，极端天气条件会破坏高空电力作业的平稳状态，改变施工现场原有地形条件，降低电力设备吊装的作业标准，干扰钢结构拼接、母线安置等精细施工环节^[3]。而且，区域气候的阶段性变化会影响混凝土固化、基坑基础成型等土建工序的施工质量，诱发基础沉降、结构变形等工程本体问题，降低电力构筑物的结构稳固程度。另外，复杂地质状况限制输电塔基的施工效果，岩土结构变动改变基坑开挖的施工条件，由此增加了基础施工出现偏差的可能性，造成工序衔接不畅，引发现场施工节奏紊乱，增加质量管控的工作难度。

（三）合同风险

电力基建项目技术内容复杂，建设周期跨度较大，施工阶段极易产生各类工程变动，常规通用合同模板难以贴合输变电及新能源建设项目的实际履约要求，加上部分合同文本表述施工技术标准不够清晰，针对施工阶段常见的设计变更、现场增量施工等情况缺少清晰权责说明，造成各参建主体工作衔接混乱，降低总承包统一管理的实施效果，诱发结算争议问题。同时，项目实施阶段的工程变更相关合同约定存在不足，电网技术标准更新引发的工程调整，缺少规范的审批流程，提升了造价管控的不稳定因

素。而且，合同内部的违约约束内容不够完善，未能明确界定工期偏移、工程质量不达标等问题的处罚细则，难以形成有效的履约约束效果^[4]。

（四）技术风险

新型电力系统升级行业背景下，智能变电设备应用、柔性输电架构搭建等新型技术普及，传统技术管理模式无法适配现代电力工程的建设技术标准。工程设计环节出现的技术判断偏差形成主要技术风险，勘测数据核对存在误差的技术问题，致使后续施工工艺无法贴合设计核心要求。电力设备整合匹配环节存在技术管控漏洞，不同生产厂家的主设备存在参数差异，会导致设备接口协议与系统运行参数的核对工作出现疏漏，造成机组并网适配性不足的问题。与此同时，现场施工的技术执行质量存在波动，高压线缆铺设、设备耐压检测等精细施工内容，对操作规范具备严格要求，若技术执行出现偏差，会压缩工程整体安全空间。另外，工程调试阶段存在技术管控短板，未按标准要求执行站并网性能核验、故障仿真测试等关键技术环节，留存隐蔽性技术缺陷。

三、电力工程 EPC 总承包项目风险管理的优化措施

（一）明晰项目责任分工，提升协同管理水平

电力行业需要贴合输变电线路施工、升压站建设等不同电力工程的建设特点，搭建适配项目全生命周期的分层权责管理架构，明晰各部门的岗位职能边界，梳理其专属工作内容，消除岗位职能交叉重叠的管理漏洞。而且，电力行业应该对照项目前期勘测、图纸设计的完整建设流程，编制贴合现场实际的岗位权责明细清单，落实各岗位的具体工作职责，让每一项风险管控工作对应固定的管理岗位。

基于分层分级的权责架构，电力行业要落实风险归口管理模式，对照电力工程安全风险分级标准，把施工现场高空作业、高压试验等常见风险类型，精准划分至对应专业管理岗位，实现各类风险专人管控。同时，电力行业需健全项目内部交叉监督机制，针对电力项目极易出现衔接问题的关键环节，设置固定协同管理岗位，要求其负责跨部门工作对接，核对设计图纸匹配现场施工条件的程度，跟进设备到货进度，复核施工工序质量是否满足调试标准，及时疏通各专业之间的信息堵点，如此可减少信息不对称引发的施工偏差。

除此之外，电力行业可以搭建配套的岗位绩效考核体系，把日常风险排查质量、跨部门协作效果等实操指标纳入考核范围，依据工作属性调整考核权重，以常态化考核约束倒逼各岗位履职落地，强化全员协同管控意识，由此能有效改善传统电力 EPC 项目管理模式中职责混乱、履职松懈的普遍问题，持续提高项目全流程风险管理的稳定水平，有序推进电力工程建设各环节。

（二）加强现场风险防范，做好应急处置工作

电力工程 EPC 总承包项目施工区域处于露天野外环境，施工场地条件随天气、地形持续变动，而且野外作业的固有属性让气象变化、场地形变等因素极易滋生各类安全隐患。基于此，电力行业需结合常规输变电工程的现场建设特点，建立覆盖作业全时

段的现场巡检制度，在关键位置设置固定巡检点位，重点巡检场土地质稳定情况、积水堆积等，及时排查土体松动、基坑变形等隐性风险，提前识别各类现场风险。

电力行业要严格对照电力施工现场风险分级管控规范，为作业工序开展风险定级分类，针对输电线路高空架设、主变设备耐压试验等高危作业，单独划分独立作业区间，设置硬质隔离围挡，严禁无关人员进入作业区域。与此同时，电力行业应该按照四季气候特征，调整现场管控举措，在雨季重点做好基坑积水抽排、边坡土体加固工作，防止雨水浸泡引发边坡滑移问题。大风高温时段，电力行业需严控高空作业与吊装作业的开展频次，避免出现高空坠落、设备摆动碰撞等安全问题，并在低温霜冻阶段重点落实设备保温工作，以此适配不同季节的现场施工条件。

另外，电力行业需要结合电力施工现场常见险情类型，搭建专属应急处置体系，依照极端天气灾害、场地地质异变等高频突发事件，编制贴合项目现场工况的专项应急处置预案，明晰不同险情的处置流程，并按施工现场作业规模配齐标准化应急物资及抢修设备。还可常态化组织贴合现场施工内容的应急演练，基于季节高发风险，开展边坡抢险、高空救援等实景演练，强化现场作业人员的险情识别能力。

（三）规范合同履约管理，减少合同纠纷风险

现阶段多数电力项目沿用通用合同模板开展签约工作，通用条款无法适配输电变电工的专属工况，普遍存在权责划分不清、调价规则模糊的问题，逐步滋生各类履约矛盾。电力行业应该搭建标准化合同管控模式，覆盖合同编制审核、现场履约执行各个环节，从制度层面压缩合同风险的滋生空间，结合电力工程施工周期长的建设特点，针对性调整各类合同文本内容，剔除通用性强、针对性弱的无效条款，有效补充贴合电力施工现场的内容。

而且，电力行业需要细化合同内部核心实操条款，明晰工程量清单核算规则、钢材电缆等主材价格波动调整方式，为输电线路架设、升压站一次二次设备安装等电力专属工序，确定统一计价方式，彻底消除条款表述模糊造成的参建主体权责争议。与此同时，电力行业应该落实合同签约前的多层审核机制，组建审核小组，逐项核对合同文本的技术适配条件，及时修正文本漏洞，保证所有签约内容贴合项目实际建设需求。电力行业还要落实全过程履约对标管理模式，把合同约定的内容，拆解对应到各施工阶段，以实时对应实现现场施工行为。

除此之外，电力行业要规范电力工程变更签证的办理流程，

落实变更立项、现场工况核查等标准化流程，要求所有工程改动内容留存完整纸质资料，杜绝口头指令施工引发的结算偏差。再者，电力行业需细化分包单位与设备供应商的合同履约标准，明晰施工质量控制标准，压实各参建主体的履约责任，定期排查现场履约现状，及时发现工期进度偏差问题，提前做好整改纠偏工作。

（四）严格施工技术管理，保证工程建设质量

电力行业完善覆盖项目全建设周期的技术管控体系，严格依照现行电力施工规范，能够从源头规避技术隐患，稳固工程施工质量，稳定运行电力设备。项目设计阶段，电力行业需要落实精细化技术管控举措，加大施工现场基础勘测数据的核对力度，核查施工场地土层结构、地形高差等基础指标，保证所有勘测数据贴合现场真实工况，为方案设计提供数据支撑。而且，电力行业可以结合属地电网最新并网接入要求，调整设备参数配置，规避设计参数偏差，并建立常态化设计图纸多级复核机制，开展多层技术核验，排查图纸存在的参数冲突问题，以保证最终设计成果适配现场施工条件。

项目施工阶段，电力行业需要细化各专业实操技术标准，统一高压电力电缆敷设、设备基础钢筋预埋等核心工序的标准化操作流程，把控硬性工艺指标，控制施工偏差在行业允许区间内，以免出现粗放施工引发的结构性质量问题。而且，还要落实分级现场技术交底机制，针对不同施工班组，分阶段明晰各工序的施工工艺，让一线施工操作贴合技术规范。

项目调试阶段，电力行业应该细化系统技术管控流程，规范单台设备性能试验流程，严格执行专项调试内容，全面排查设备隐性故障。另外，电力行业需持续跟进电力行业技术规范，及时调整项目内部技术管控细则，补齐新型电力设备的技术储备缺口，消除技术标准滞后造成的管控漏洞，提高电力工程建设质量。

四、结束语

综上所述，电力工程 EPC 建设模式是当前电力基建项目推进的主流方式，项目建设全过程始终伴随多种类型风险，各类风险因素直接影响工程施工秩序。电力行业持续完善项目风险管理体系，能有效规范电力工程建设流程，为新能源及输变电类电力项目平稳落地提供基础保障。面向未来，电力行业需要常态化优化风险防控机制，细化现场管控标准，充分发挥 EPC 总承包模式的集成优势。

参考文献

[1] 贾宝玲. 电力工程 EPC 总承包项目安全管理 [J]. 大众标准化, 2026, (3): 72-74.
[2] 闫耀进, 王小萌, 张振宇. 电力工程 EPC 总承包项目风险管理的优化措施 [J]. 电站系统工程, 2024, 40 (3): 81-82.
[3] 张庆伟. 基于电力工程 EPC 总承包项目风险管理研究 [J]. 电气技术与经济, 2023, (2): 186-188.
[4] 肖子辰. 电力工程公司 EPC 总承包项目风险管理的优化研究 [J]. 中国管理信息化, 2022, 25 (24): 102-104.

双重预防机制在煤矿安全管理中的实践困境

郭子豪

华北科技学院, 河北 廊坊 065201

DOI:10.61369/ME.2026060020

摘 要： 为提高机制落地质量，研究以某高产高效井工煤矿为例，围绕采煤、掘进、机电、运输、通防五个专业，采用现场跟踪、岗位访谈、数据溯源、台账核对等方法，对2023至2024年度机制运行情况进行梳理。结果显示，目标矿井存在风险辨识动态适配不足、隐患排查治理层级协同断层、数字化支撑能力薄弱三类突出问题。针对上述问题，研究提出全场景动态风险分级管控体系、多层次协同隐患闭环治理机制、数字化平台驱动落地路径。试运行结果显示，重大风险管控有效率提升27.3%，一般隐患整改闭环周期缩短31.5%，提高风险识别及时性、隐患整改连续性、管理决策准确性，为相近地质条件、相近生产组织模式的井工煤矿提供参考。

关 键 词： 双重预防机制；煤矿安全管理；风险分级管控；隐患排查治理

Practical Challenges of the Dual Prevention Mechanism in Coal Mine Safety Management

Guo Zihao

North China Institute of Science and Technology, Langfang, Hebei 065201

Abstract： To improve the implementation quality of the mechanism, this study takes a high-yield and high-efficiency underground coal mine as an example, focusing on five specialties: coal mining, tunneling, electromechanical, transportation, and ventilation and fire prevention. By using methods such as on-site tracking, on-the-job interviews, data traceability, and ledger verification, the operation of the mechanism from 2023 to 2024 was reviewed. The results show that the target mine has three prominent problems: insufficient dynamic adaptation of risk identification, disconnection in the coordination of hierarchical hidden danger investigation and governance, and weak digital support capabilities. In response to these issues, the study proposes a full-scenario dynamic risk classification control system, a multi-level collaborative hidden danger closed-loop governance mechanism, and a digital platform-driven implementation path. The trial operation results show that the effective rate of major risk control has increased by 27.3%, the closed-loop period for general hidden dangers has been shortened by 31.5%, improving the timeliness of risk identification, the continuity of hidden danger rectification, and the accuracy of management decisions, providing a reference for underground coal mines with similar geological conditions and production organization models.

Keywords： dual prevention mechanism; coal mine safety management; risk classification control; hidden danger investigation and governance

引言

随着我国经济高质量发展，煤炭作为国家能源安全的重要保障，其安全生产始终是重中之重。在当前能源结构调整的关键时期，必须以更高标准、更严要求切实抓好煤矿安全生产，坚决防范重特大事故，为经济社会发展提供稳定可靠的能源支撑^[1]。煤炭作为能源供应体系中的基础，井工煤矿开采深度持续增加，采场条件、设备状态、人员作业行为、灾害因素在同一生产空间内交织运行，安全管理难度随生产节奏加快而上升。双重预防机制以风险分级管控、隐患排查治理为主要内容，前端依靠风险辨识把危险因素纳入管控清单，后端依靠隐患治理把已经暴露的问题闭环处置^[2]。该机制在煤矿领域推广多年，制度框架已经较为完整，矿井普遍建立了风险清单、隐患台账、责任分工、检查制度等基础内容，现场执行中仍会受到生产变化、部门协作、人员能力、信息传递等因素影响。现有研究多从制度建设、责任划分、评价方法、管理模式等角度讨论双重预防机制，能够为矿井安全治理提供理论依据，面对具体矿井的日常运行，部分研究对机制执行过程中的堵点关注不足。基于此，研究选取某高产高效井工煤矿作为例，基于12个月现场跟踪资料及机制运行台

账，围绕风险管控、隐患治理、数字支撑展开分析，梳理问题来源，提出优化路径，通过试运行数据检验效果，使方案能够贴近矿井日常管理，便于同类矿井借鉴使用。

一、研究区概况

研究矿井位于陕西省榆林市境内，属于国有重点煤炭生产矿井，核定年生产能力1200万吨，主采3号煤层，煤层平均厚度6.2m，主要采用综采放顶煤开采工艺。矿井地质构造整体简单，局部存在断层、陷落柱发育区，工作面推进过程中会遇到顶板破碎带，个别区域存在弱冲击地压倾向。瓦斯涌出量随采掘接续、通风状态、地质变化出现波动，通防管理、顶板管理、机电设备管理均需要保持连续监测。目标矿井于2021年启动双重预防机制建设，完成基础制度编制、首轮全面风险辨识、隐患排查责任划分，建立覆盖主要生产专业的四级风险管控体系，形成矿级、科区级、班组级、岗位级隐患排查层级。随着开采深度增加，采掘接续调整更加频繁，原有静态清单逐步暴露出更新慢、颗粒度粗、现场适配不足的问题。

二、双重预防机制在煤矿安全管理中的实践困境

（一）风险辨识评估的动态适配能力不足

目标矿井风险辨识以年初集中辨识为主，工作面初采、末采、回撤、过构造带等特殊节点会开展专项辨识，日常生产过程中的动态补充不足。井下作业场景变化快，顶板条件、瓦斯状态、设备负荷、人员配置会随班次变化产生差异，风险清单长时间未更新，现场管控措施就容易停留在原有条件下。2024年度风险统计显示，全矿共辨识重大风险8项、较大风险32项、一般风险125项、低风险162项，采煤、通防专业重大风险数量相对集中，反映了年初基础风险分布情况，无法充分呈现工作面推进过程中的局部变化。部分区域在初始辨识时等级偏低，后续因顶板破碎、设备老化、通风参数波动出现风险上升，台账更新却滞后于现场变化。目标矿井2024年度各专业风险分级统计如表1所示。

表1 目标矿井2024年度各专业风险分级统计					
专业类别	重大风险 / 项	较大风险 / 项	一般风险 / 项	低风险 / 项	合计 / 项
采煤	3	8	22	31	64
掘进	2	7	25	38	72
机电	1	5	31	42	79
运输	0	3	28	35	66
通防	2	9	19	16	46
合计	8	32	125	162	327

风险管控措施存在颗粒度不足的问题，部分措施只写明“加强检查”“严格落实制度”“按规定执行”，缺少岗位动作、检查频次、判定标准、异常处置步骤。一线岗位掌握风险名称，未必能够准确判断风险出现前的征兆，也难以在作业前完成有效预判。不同专业在风险等级判定时主要依赖管理经验，量化指标使

用不足，导致同类风险在不同区域、不同专业之间存在尺度差异^{〔3〕}。隐蔽性风险纳入不足也影响管控效果，设备老化引起的性能衰减、长时间作业造成的注意力下降、重复性操作产生的习惯性违章，难以通过年度集中辨识充分发现。风险管控效果核验也偏重措施是否填写、记录是否完整，对措施执行后的实际效果评价不足，风险等级是否下降、隐患是否减少、岗位行为是否改善，缺少稳定的数据支撑。

（二）隐患排查治理的层级协同存在断层

矿井设置矿级、科区级、班组级、岗位级四级隐患排查治理体系，制度文件明确了排查频次及管理要求，但现场执行中仍存在边界交叉、责任衰减、闭环不稳的问题。矿级排查重在重大问题督办，科区级负责组织整改，班组级承担现场跟踪，岗位级负责班中发现及即时处置。实际运行时，部分隐患涉及多个专业，责任划分不够细，派单后容易出现等待协调、重复沟通、整改延误。表2数据显示，矿级月度排查完成率达到98%，整改闭环率为92%；岗位级班中排查完成率为73%，整改闭环率为68%。不同层级岗位隐患排查完成率、整改闭环率对比如表2所示。

表2 不同层级岗位隐患排查完成率、整改闭环率对比			
排查层级	排查周期	排查完成率	整改闭环率
矿级	月度	98%	92%
科区级	周度	91%	85%
班组级	日度	82%	76%
岗位级	班中	73%	68%

隐患整改中存在责任传导衰减，科区级对班组级整改进度跟踪不够连续，低风险隐患容易长期挂账；班组完成现场处理后，验收标准不够具体，整改效果主要依靠经验判断，同类隐患反复出现。激励约束机制对基层主动排查的带动不足，排查出重大隐蔽性隐患后，奖励标准不够明确，员工主动发现问题的积极性受到影响；漏查漏报产生后果时，追责边界又不够清晰，容易形成“只完成规定检查，不主动深查根因”的执行状态。

（三）机制运行的数字化支撑能力薄弱

目标矿井双重预防机制运行仍以纸质台账、电子表格为主要载体，风险数据、隐患数据分散在不同科室，管理人员查询完整信息需要跨部门收集，统计周期长，数据口径不统一。风险管控过程缺少即时提醒，部分管控任务到期后依靠人工通知，责任人员因轮班、请假、现场事务多，容易错过关键节点。隐患整改审批仍有线下签字环节，审批人员不在岗时流程停滞，整改申请、方案审核、材料领取、验收销号之间衔接不够顺畅。数据分析主要依靠人工汇总，统计工作量大，错误率难以完全控制。风险集中区域、隐患高发时段、重复问题类型、整改超期原因等信息，需要通过人工筛选才能得到，难以形成及时预警。井下网络覆盖也限制数字化工具应用，偏远作业地点信号不稳定，移动终端上报不畅，数据无法实时传输，数字化基础薄弱直接影响双重预防

机制从记录型管理向过程型管控转变。

三、双重预防机制在煤矿安全管理中的实践应用

（一）全场景动态风险分级管控体系构建

目标矿井将风险辨识调整为全面辨识、专项辨识、动态辨识三级联动模式。年初开展覆盖全专业、全岗位的全面辨识，形成基础风险数据库；工作面初采、过构造带、设备大型检修、系统调整等节点，由专业科室牵头开展专项辨识，形成专项管控方案；日常生产期间，由当班岗位人员结合现场状态开展动态辨识，把新增风险及时纳入台账。从现场状态采集到风险数据库更新的闭环流程如图1所示。

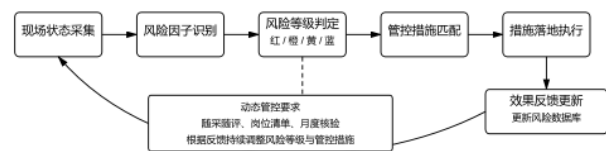


图1 煤矿动态风险辨识及分级管控实施流程

风险等级判定采用优化风险矩阵法，以事故发生可能性、后果严重程度作为两个核心维度，将风险划分为红、橙、黄、蓝四个等级。每一等级对应责任主体、管控标准、检查频次、处置要求。采煤工作面推进过程中实行随采随评，每推进10米开展一次局部风险核验，遇到构造变化、顶板破碎、瓦斯异常、设备异常时立即补充辨识，动态调整风险等级及管控措施。

岗位风险管控清单进一步细化到具体动作，清单内容包括岗位风险名称、触发条件、检查方法、正常标准、异常处置、报告路径。班前会结合当班作业地点讲解重点风险，班中由岗位人员按清单检查，班后将异常情况录入台账^[4]。月度评估时，安全管理部门对重大风险、较大风险管控效果进行量化核验，重点查看隐患发生频次、措施执行质量、现场参数变化，使风险管控形成闭环。

（二）多层次协同隐患闭环治理机制优化

矿井对四级隐患治理职责重新细化。矿级负责重大隐患挂牌督办、治理方案审批、资源统筹；科区级负责较大隐患组织整改、过程监督、跨专业协调；班组级负责一般隐患现场处置、整改跟踪、结果反馈；岗位级负责零星隐患即时整改、异常上报、班中确认。每一层级都明确排查重点、办理时限、反馈要求，减少责任重叠及监管空白，如图2所示。

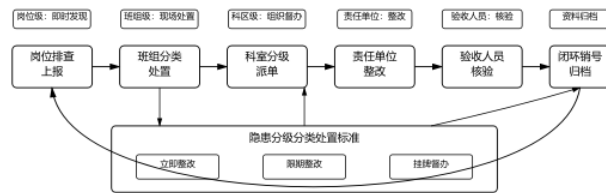


图2 多层次协同隐患闭环治理运行路径

隐患分级分类处置标准同步完善，危害小、现场能够处理的问题纳入立即整改；需要材料、停机、检修配合的问题纳入限期整改；涉及重大风险、系统性缺陷、跨专业协同的问题纳入挂牌

督办。隐患所属主要专业科室作为牵头部门，负责组织相关专业踏勘现场、确定方案、明确分工、跟踪进度。整改完成后，由验收人员按照标准核验，验收内容包括问题是否消除、措施是否有效、现场是否具备持续稳定条件。矿井围绕典型隐患、重复隐患、隐蔽隐患开展专项培训，使用现场照片、事故案例、设备参数异常记录讲解识别方法。隐患奖励标准明确到类别、等级、贡献程度，鼓励岗位人员主动上报真实问题；漏查漏报责任根据岗位职责、排查记录、现场证据进行认定，推动隐患排查从被动完成任务转向主动发现问题。

（三）数字化平台驱动的双重预防机制落地

矿井搭建双重预防机制数字化管控平台，将风险辨识、管控跟踪、隐患上报、整改督办、验收销号、统计分析纳入统一系统。平台通过移动终端、井下网络、后台数据库连接现场及管理端，使风险隐患信息能够在发现后及时进入流程，减少纸质流转造成的延迟。

平台三层架构如图3所示。

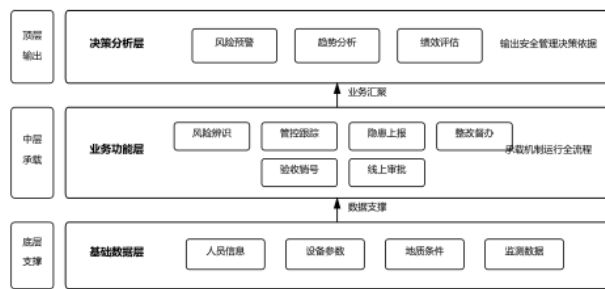


图3 双重预防机制数字化管控平台功能架构

井下一线岗位配备防爆型移动智能终端，现场发现隐患后可直接上传位置、类别、照片、文字说明，系统根据专业类别及隐患等级推送至责任人员。风险管控模块设置节点提醒，到达检查时间自动推送任务，超期未处理时逐级提醒。隐患整改模块实现线上审批，整改申请、方案审核、进度反馈、验收销号均在平台中留痕，便于追踪责任链条。

平台接入瓦斯监测、人员定位、设备状态监测数据，系统根据设定阈值发出预警，瓦斯浓度接近预警值、设备温度持续升高、人员进入限制区域时，平台自动提示相关岗位进行处置。统计分析模块按专业、区域、时间、类型生成风险隐患分布结果，管理人员可以据此判断薄弱环节，调整检查重点、培训内容、资源配置。

井下网络盲区通过增设无线基站逐步解决，偏远作业地点数据传输稳定性得到提升，平台设置权限分级、日志追踪、数据备份、传输加密，确保风险隐患数据安全。数字化平台投入后，机制运行从人工记录为主转向过程管控为主，管理人员能够更快掌握风险变化，基层岗位也能更便捷地完成上报、整改、反馈。

四、结论

研究以某高产高效井工煤矿为例，对2023至2024年度双重预防机制运行情况进行梳理，发现风险辨识动态适配不足、隐患治

理层级协同断层、数字化支撑能力薄弱是影响机制落地效果的主要问题。基于此，研究构建三级联动风险辨识体系、四级协同隐患闭环治理路径、三层数字化平台架构。试运行结果显示，重大风险管控有效率提升27.3%，一般隐患整改闭环周期缩短31.5%。结果说明，动态风险管控能够提高风险识别及时性，协同隐患治

理能够压实整改责任，数字化平台能够提升流程效率及决策准确性，该优化路径贴近井工煤矿生产场景，适用于地质条件相近、生产组织相近的矿井。

参考文献

[1] 甄昆昆. 基于双重预防机制的煤矿安全智能集成管理系统设计与应用 [J]. 内蒙古煤炭经济, 2025, (12): 100–102.
[2] 任小云, 李勇. 新时代煤矿综合安全管理研究 [J]. 煤炭新视界, 2026, (1): 81–83.
[3] 申小明. 煤矿智能化安全管理信息系统建设研究 [J]. 西部探矿工程, 2025, 37(2): 192–195.
[4] 陈磊. 基于双重预防的煤矿安全管理岗位责任制研究 [J]. 煤炭科技, 2025, 46(2): 116–121+126.

玻璃用石英砂磁选除铁技术及工艺参数分析

任俊杰

四川南联环资科技股份有限公司, 四川 江油 621700

DOI:10.61369/ME.2026060022

摘 要 : 玻璃产品的透光率、色泽及气泡度等理化指标与原料石英砂中铁杂质含量密切相关。相比酸洗、浮选等除杂方式,磁选法具有工艺流程简单、运行成本低、无二次污染等优势,已成为玻璃用石英砂除铁提纯的常用技术手段之一。本文从磁选除铁的基本原理出发,围绕磁场强度、给矿粒度、给矿浓度及磁介质结构等关键工艺参数对除铁效果的影响进行分析,并结合某企业的实际生产参数,提出设备选型与运行维护的注意事项。实践表明,通过上述参数的协同控制,可将石英砂中三氧化二铁含量由最大0.20%降至0.08%以下,满足了玻璃原料的除铁要求,可为同类企业优化石英砂提纯工艺提供参考。

关 键 词 : 石英砂; 磁选; 除铁; 玻璃原料; 工艺参数

Analysis on Magnetic Separation Iron Removal Technology and Process Parameters of Quartz Sand for Glass Production

Ren Junjie

Sichuan Nanlian Huanzi Technology Co., Ltd., Jiangyou, Sichuan 621700

Abstract : The physical and chemical indicators such as transmittance, color, and bubble density of glass products are closely related to the iron impurity content in the raw material quartz sand. Compared with acid washing, flotation and other impurity removal methods, magnetic separation method has the advantages of simple process flow, low operating cost, and no secondary pollution, and has become one of the commonly used technical means for iron removal and purification of quartz sand for glass. Starting from the basic principle of magnetic separation for iron removal, this article analyzes the influence of key process parameters such as magnetic field strength, feed particle size, feed concentration, and magnetic medium structure on the iron removal effect. Combined with the actual production parameters of a certain enterprise, precautions for equipment selection and operation maintenance are proposed. Practice has shown that through the coordinated control of the above parameters, the content of ferric oxide in quartz sand can be reduced from a maximum of 0.20% to below 0.08%, meeting the requirements for iron removal in glass raw materials. This can provide reference for similar enterprises to optimize quartz sand purification processes.

Keywords : quartz sand; magnetic separation; iron removal; glass raw material; process parameters

引言

玻璃制品的透光率、颜色均匀性及气泡度等关键理化指标,很大程度上取决于原料石英砂的纯度,其中铁杂质含量的影响尤为突出。石英砂中的铁杂质主要以两种形式存在:一是与石英颗粒共生或包裹在颗粒内部的含铁矿物,如赤铁矿、褐铁矿、黑云母等;二是附着在颗粒表面的磁铁矿微粒和金属磨损屑。前者难以通过单一手段彻底脱除,后者则相对容易通过表面处理去除。铁杂质含量过高,会使玻璃产品呈现绿色或黄绿色色调,透光率下降,同时增加熔制过程中气泡的产生几率,直接影响产品等级和市场竞争力。近年来,随着平板玻璃、光伏玻璃等下游产品对原料品质要求的不断提高,石英砂生产企业普遍面临除铁提纯工艺升级的现实压力。

目前石英砂除铁提纯的主要技术路线包括酸洗法、浮选法和磁选法。酸洗法除铁效果较为彻底,但存在废酸处理难度大、设备腐蚀严重、生产成本较高等问题^[1];浮选法对药剂选择和操作条件要求较高,工艺控制相对复杂,且药剂残留可能对下游玻璃熔制带来额外影响^[2]。相比之下,磁选法凭借工艺流程简单、无需添加化学药剂、运行成本低、不产生二次污染等优势,逐渐成为石英砂粗选和精选阶段应用较广的除铁手段。本文结合生产实践,围绕磁选除铁的技术原理及关键工艺参数展开分析,为玻璃用石英砂提纯工艺的优化提供参考。

一、磁选除铁的技术原理

石英砂中常见的含铁矿物多属弱磁性或顺磁性矿物，其磁化率远低于典型的强磁性矿物，常规低强度磁选设备难以实现有效分离，因此玻璃用石英砂除铁普遍采用高梯度强磁选设备。

高梯度磁选的基本原理是利用磁场梯度在磁介质周围产生的局部高强磁场，对物料中的弱磁性矿物颗粒产生足够的磁力，使其被介质捕获并与非磁性的石英颗粒分离。生产中常用的设备类型包括湿式高梯度磁选机、干式对辊强磁选机^[3]以及立环脉动高梯度磁选机^[4]等。其中湿式设备适用于中细粒级物料的精选，除铁效果较好，但需配套脱水及废水处理工序，投资和占地相对较大；干式设备省去了脱水环节，工艺流程更为紧凑，更适合对水资源和场地条件有限的企业，但在处理细粒级、含水量偏高的物料时分选效率会有所下降。立环脉动高梯度磁选机通过介质的周期性脉动改善了矿浆的松散效果，对细粒弱磁性矿物具有较好的捕获能力，近年来在非金属矿提纯领域应用逐渐增多。不同类型设备在磁场强度、介质结构、处理能力等方面各有特点，企业应结合原料粒度组成、目标除铁率及现场条件综合选择，避免盲目追求设备的先进性而忽视与自身原料特性的匹配。

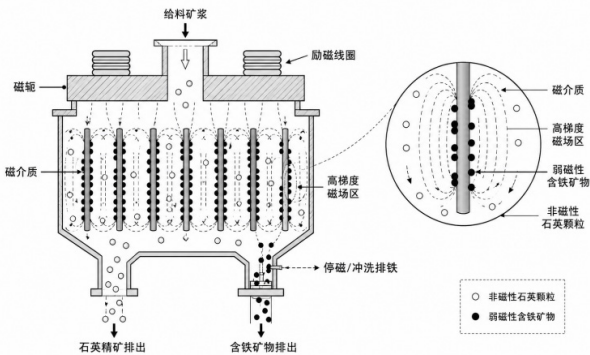


图1 高梯度磁选除铁原理示意图

二、影响磁选效果的关键工艺参数

磁选除铁效果并非仅由设备类型决定，工艺参数的合理设定同样关键，需要在生产中不断摸索调整。

(1) 磁场强度。磁场强度决定弱磁性矿物能否被有效捕获。强度不足则细粒铁矿物难以捕获，除铁率偏低；强度过高则易夹杂非磁性颗粒，造成精矿损失、能耗上升。应结合原料磁化率特性，通过分级试验确定适宜区间，而非一味追求高场强。以某企业为例，原矿破碎工序多选用4000GS铁氧体永磁除铁器或5000GS电磁除铁器，半成品除铁则一级选用8000-10000GS强磁板式永磁除铁器，二级选用不低于10000GS的立环脉动高梯度强磁磁选机。

(2) 给矿粒度。粒度过粗，铁矿物解离不充分，难以从石英颗粒中分离；粒度过细，则介质易堵塞、磨矿能耗上升。需结合原料嵌布特性，通过筛分试验确定合理粒度范围^[5]。各工序除

铁给矿粒度参考参数，粗碎给矿粒度不大于15cm，细碎不大于5cm；磨矿给矿粒度控制在20目（1.0mm）以下，200目以下微细粉占比不超过5%。

(3) 给矿浓度。浓度过高，矿浆黏度增大、颗粒相互干扰加剧，捕获效率下降；浓度过低，则处理量降低、废水处理压力增加，需通过现场取样与小型试验确定适宜区间，各工序给矿浓度参考参数。破碎工序给矿厚度控制在50mm以内；磨矿工序中，板式除铁器给矿浓度为20%-25%，立环磁选机为15%-25%。

(4) 磁介质结构。磁介质结构越细密，磁场梯度越大、捕获能力越强，但堵塞风险和维护工作量也随之上升，应结合原料粒度与处理量选择介质规格并建立定期冲洗制度。玻璃用石英砂弱磁性杂质脱除多选用0.2-0.8mm不锈钢毛，背景场强可达12000GS以上。

(5) 分选级数。单级磁选往往难以达标，生产中多采用两级或多级串联，但级数增加意味着设备投资与能耗上升，应结合质量要求与成本核算确定合理级数，而非片面追求更低的铁含量。某企业采用前置8000-10000GS板式除铁器、后置不低于10000GS立环磁选机的两级配置，配合上述参数协同控制，可将石英砂中三氧化二铁含量由最大0.20%降至0.08%以下。

磁选对石英颗粒内部结构性铁基本无能为力，仍需配合酸洗进一步处理，具体流程如图2所示。

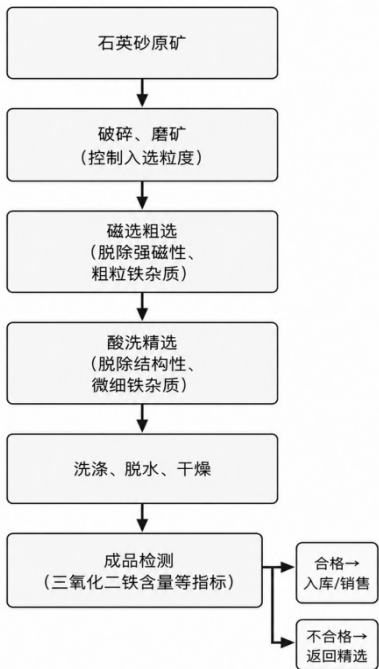


图2 磁选粗选+酸洗精选组合除铁工艺流程图

三、生产实践中的注意事项

在实际生产运行中，磁选除铁工艺还应关注以下几个方面：
磁介质在长期使用后会因铁磁性颗粒附着而导致捕获能力下

降,需按生产计划定期冲洗清理;磁极和励磁线圈也存在老化问题,应建立定期检测和更换机制,避免因磁场强度衰减而影响除铁效果,同时需关注设备运行温度,防止长时间高负荷运行导致线圈过热。与此同时,高梯度强磁选设备能耗相对较高,企业应结合实际产量需求,避免设备长期处于低负荷或超负荷运行状态,以控制单位产品的能耗成本,并可根据订单情况灵活调整开机级数,减少不必要的空耗。

对于铁含量较高的原料,宜采用磁选粗选与酸洗精选相结合的组合工艺路线,通过磁选降低进入酸洗工序的原料含铁量,从而减少酸耗和废酸处理量,兼顾除铁效果与生产成本,并有利于降低酸洗环节的安全与环保压力。此外,还应建立定期取样检测制度,跟踪磁选前后石英砂中三氧化二铁含量的变化情况,及时发现工艺参数漂移或设备性能衰减问题,以保证成品质量的稳定性;对于磁场强度、给矿浓度等关键工艺参数,宜建立台账记录,便于追溯和持续改进。

此外,磁选工艺参数的调整对操作经验依赖程度较高,企业应加强一线操作人员的技术培训,使其能够根据原料波动及时判

断并调整工艺参数,减少因操作不当造成的除铁效果波动。

四、结论

磁选法作为玻璃用石英砂除铁提纯的重要技术手段之一,具有工艺简单、运行成本较低、无二次污染等优势。生产实践中,除铁效果不仅取决于设备类型的选择,磁场强度、给矿粒度、给矿浓度、磁介质结构及分选级数等工艺参数的合理匹配同样至关重要,任何一项参数设置不当都可能造成除铁率下降或成品率损失。由于磁选对石英颗粒内部结构性铁杂质的脱除能力有限,企业在实际生产中宜将磁选与酸洗等工艺合理组合,形成粗选与精选相结合的除铁路线,在保证产品质量的同时兼顾生产成本。后续可进一步结合具体原料的矿物组成特征,开展工艺参数的系统性优化研究,为玻璃用石英砂提纯工艺的持续改进提供支撑。本文所引用的生产数据来自单一企业的实践案例,不同企业因原料特性、设备条件存在差异,具体参数仍需结合自身实际情况加以调整。

参考文献

[1] 李峰,陈飞鹏,乔成芳,等.超声辅助酸洗去除洛南石英砂中铁杂质[J].当代化工,2025,54(11):2575-2578+2585.DOI:10.13840/j.cnki.cn21-1457/tq.2025.11.035.
[2] 贺欣欣,邹旦,温云祥,等.某石英砂浮选降铁工艺及机理研究[J].四川化工,2024,27(1):9-12+19.
[3] 周鑫.干式磁选机在非金属矿磁选中的应用——干式对辊强磁选机[J].中国设备工程,2021,(1):253-254.
[4] 陈剑,曾招科.大型高效 SLon 立环高梯度磁选机在非金属矿提纯中的应用[J].现代矿业,2021,37(4):133-137.
[5] 朱国志,李勇,郑胜彪.按石英砂粒度进行分类磁选的磁选机及其除铁试验研究[J].长春工程学院学报(自然科学版),2024,25(2):29-32.

碳达峰目标下机场地面运行低碳管控技术路径分析

杨金鹏

首都机场集团有限公司北京大兴国际机场, 北京 100000

DOI:10.61369/ME.2026060026

摘 要 : 双碳战略背景下, 民航机场地面滑行、车辆运行、能源消耗、污染物排放是航空领域碳减排的关键短板, 地面运行碳排放占机场总排放占比超60%, 低碳管控迫在眉睫。本文立足碳达峰目标要求, 系统梳理机场地面运行低碳管控技术路径, 涵盖滑行优化、车辆电动化、桥载(地井)替代、除冰废液治理、智能调光、碳排监测六大核心技术, 结合具体运行分析技术应用成效, 为民航机场绿色低碳、智慧化、标准化运行提供技术支撑。

关 键 词 : 碳达峰; 机场地面运行; 低碳管控; 滑行优化; 车辆电动化; APU替代; 碳排监测

Analysis of Low-Carbon Management Technology Paths for Airport Ground Operations under the Carbon Peak Goal

Yang Jinpeng

Capital Airport Group Co., Ltd. Beijing Daxing International Airport, Beijing 100000

Abstract : Under the backdrop of the dual-carbon strategy, the ground taxiing, vehicle operation, energy consumption, and pollutant emissions of civil aviation airports are the key bottlenecks for carbon reduction in the aviation sector. Ground operation carbon emissions account for over 60% of the airport's total emissions. Low-carbon management is urgently needed. This paper, based on the requirements of the carbon peak goal, systematically reviews the low-carbon management technology paths for airport ground operations, covering six core technologies such as taxiing optimization, vehicle electrification, bridge-mounted (ground well) substitution, deicing waste liquid treatment, intelligent dimming, and carbon emission monitoring. Combined with specific operational analysis of technology application effects, it provides technical support for the green, low-carbon, and intelligent operation of civil aviation airports.

Keywords : carbon peak; airport ground operations; low-carbon management; taxiing optimization; vehicle electrification; APU substitution; carbon emission monitoring

民航业是交通运输高耗能、高排放的领域, 也是双碳目标实施的关键控制产业。在民航运输吞吐量不断恢复的情况下, 机场内航空器地面滑行、地勤车辆耗油、飞行区照明能源损耗和除冰废液的直接排放的现象日益突出, 而传统的运行方式耗能多、排放量大、控制薄弱。通过运用智能化、精细化和绿色化的技术手段来重塑地面运营体系, 能够精确地降低无效的能源消耗和碳排放, 从而构建一个全过程的低碳管理体系, 这也是实现机场碳达峰和推动绿色空港建设的关键因素。

一、碳达峰目标下机场地面运行低碳管控目标

在国家碳达峰战略的大环境下, 民航绿色转型被列入交通运输行业攻坚的重点对象, 而以机场地面运行为核心情景的航空碳排放是民航实现减碳提质发展的重要突破口^[1]。根据民航业的监测数据, 在机场地面运行存在航空器双发滑行时间较长、燃油地勤车辆的高频运行, APU的超时工作, 照明的全天候打开以及除冰废液的直接排放等问题。传统机场地面运行管控模式偏向于经验化, 标准化的技术管控体系和动态监测手段欠缺, 导致航空煤油和电力的大量消耗, 碳排放管控缺乏准确性, 治理效率较低。目前民航局已明确要求枢纽机场和干线机场每年降低碳排放强度, 提高能源使用效率, 全面实现机场地面运行的绿色化、智能化和

低碳化改造。基于这一背景, 落地专业化的碳减排管控技术, 建设全过程的地面减排体系是机场实现碳减排指标和可持续绿色运行所必须走的道路。

二、碳达峰目标下机场地面运行低碳管控技术路径

(一) 航空器滑行优化和单发滑行

机场航空器的地面滑行是导致燃油消耗和碳排放增加的关键环节, 在常规大型客机进行双发滑行的情况下, 每小时的航空煤油消耗量可以达到600至800千克, 在单次滑行中的平均燃油损失大约是45千克, 这导致了大量的二氧化碳和氮氧化物的排放, 航空器滑行优化和单发滑行是减少地面无效能耗最核心的技术途

径^[2]。在机场场面监视雷达、多点定位系统和智能滑行调度算法的支持下,对机场跑道、滑行道和停机位上航空器滑行顺序和路径进行重建,避免航空器长时间等待、迂回滑行、拥堵滞留的低效运行状态。在确保民航安全运行的标准下,对于波音737、空客A320等主要的单通道客机,实施低风速、平稳道面、无特殊天气条件下的单发滑行模式,该模式可以直接减少大约50%的滑行燃油使用量。通过运用塔台智能调度系统来优化离场排序,成功地减少了航空器在地面的等待时间,将地面滑行的平均时间从传统的12至15分钟缩短到了8分钟以内。通过运行流程优化和智能调度可以实现规模化减排,并适配枢纽机场和干线机场高频航班的运行场景,可不断消减航空器地面运行基础碳排放。

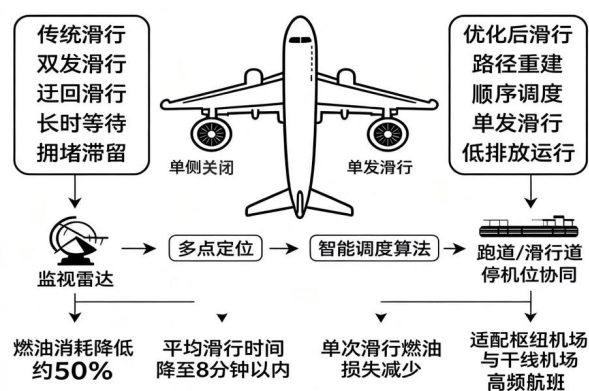


图1: 航空器滑行优化和单发滑行

(二) 地勤车辆电动化和智能调度

传统的机场地勤保障车辆主要是燃油车辆,包括摆渡车、牵引车、加油车、清扫车等车辆,而传统燃油地勤车辆的百公里油耗通常在15至25升之间,每一辆车的年平均碳排放量可以达到8至12吨,引入地勤车辆电动化替换和智能调度技术是机场地面交通最重要的途径,全方位地推动燃油地勤车辆的替换工作,通过使用电动牵引车、电动摆渡车和电动清扫车等车辆来取代传统的燃油车辆。电动地勤车辆的运行能耗仅为燃油车辆的大约30%,并且实现了运行过程中尾气的零排放^[3]。同时构建机场地勤车辆智能调度与管控系统,在GPS定位、物联网感知和大数据调度算法的支持下,按航班起降顺序和机位分配的调度、保障需求实现车辆任务的智能匹配,减少车辆空驶、往返折返和怠速等候的无效耗能。该系统能够显著降低机场地勤车辆的空驶率,从传统的28%减少到10%以下,缩短了无效运行的时间。将车辆电动化替换和智能化调度系统有机结合,可以全方位减少机场地面交通能源消耗、建设绿色地勤保障体系、不断降低机场碳排放总规模。

(三) 桥载(地井)电源空调代替APU运行

航空器在停机位停靠过程中,常规的运行方式主要是靠机载APU辅助动力装置提供电源和气源,以保持机舱内的空调、照明和机载设备处于正常状态,根据民航的实际测量数据,民航客机APU每小时的油耗在180至250千克之间,每小时大约会排放550千克的二氧化碳,这也是机场机坪碳排放的主要原因。利用桥载(地井)电源空调设备代替机载APU进行作业是机场机坪碳排

放控制的一项核心成熟技术^[4]。桥载(地井)电源装置具有电压平稳、能耗可控和零尾气排放等技术优点,装置额定输出电压可稳定为115V/400Hz,与民航客机机载设备供电标准适配,能够在航空器停靠过程中全程代替APU,完成对航空器的供电和供气保障。通过建立标准化的运行管控规章,规定航空器在靠桥30秒内停用APU,在整个停靠过程中启用桥载(地井)电源空调,并在航班启动前一分钟关闭外接电源以最大程度地压缩APU的运行时长。航空器在单次靠桥时可以缩短APU的运行时间40至60分钟,可以节省超过120千克的航空煤油,并减少大约370千克的二氧化碳排放。桥载(地井)电源空调代替APU运行减排效果明显,为机场地面减排提供了一种核心技术手段。

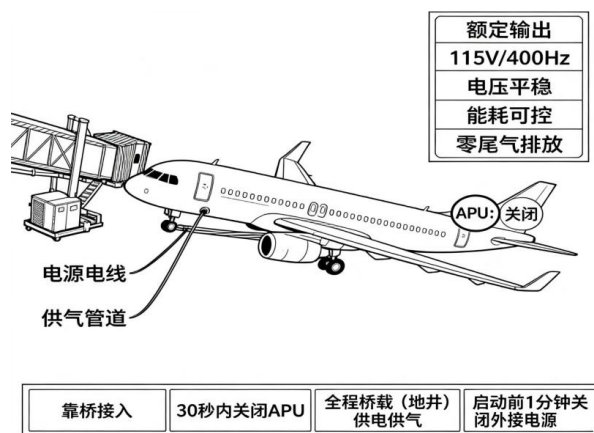


图2: 桥载(地井)电源空调代替APU运行

(四) 除冰废液回收

在冬季的低温雨雪天气,机场航空器除冰和跑道除冰过程中产生的除冰废液较多,而传统乙二醇类除冰液用量较大,废液直接排放的污染较重,与此同时,也出现了除冰液消耗大、资源浪费严重、间接碳排放偏高等诸多问题^[5]。在常规的大型机场,单次雨雪天气下的除冰液消耗量可以达到3至5吨,直接排放废液不仅会破坏环境,还会增加物资生产和运输过程中的间接碳排放。除冰废液循环利用技术,通过源头控制、中端回收、末端净化循环等全流程技术体系,达到对除冰废液的控制目的。使用低污染和高配比的新型复合型除冰液,优化除冰喷洒的压力和角度,精确地控制喷洒的用量,从而实现除冰液单次用量的20%至30%的减少。作业区域内设置有专门的除冰废液收集沟槽、集液池和过滤储存设备等,集中回收航空器除冰和跑道除冰后的废液,避免废液的直排扩散。回收的废液在经历沉淀、过滤、提纯和浓度调整等一系列净化过程后,可以再次用于除冰操作,其循环再利用率可以超过45%。该项技术有效地减少了除冰液的消耗量,减少了化工物料在生产和运输过程中产生的间接碳排放量,达到了减污降碳的协同增效效果。通过压缩除冰液购置规模,降低化工生产、长途运输等环节化石能源消耗和污染物排放,实现绿色、低碳除冰运营模式。

(五) 飞行区照明智能调光

机场跑道、滑行道和停机坪的照明系统在机场固定能耗中占有较大比例,而传统照明系统在不考虑昼夜天气变化的情况下均为全天候恒功率启闭方式,航班流量发生变化,照明设备都维持

在额定功率下工作，造成能源浪费。飞行区照明智能调光技术是以光敏传感器、气象感知设备、航班流量监测终端和智能配电控制系统等为支撑，对照明设备进行动态和精细化的调节。该系统能够根据昼夜光照强度、阴雨雾霾天气状况能见度以及实时航班起降流量等信息自动调整跑道灯、滑行道灯和机位高杆灯亮度及开启次数，在白天强光时段降低30%至50%照明功率，夜间低流量时段自动关停闲置区域照明。同时该系统故障自动监测、定时启停和分区管控等功能消除了无效照明的能耗。通过飞行区照明智能调光管理，机场飞行区的照明系统能够实现整体节电率在25%至35%之间，减少了机场的电力消耗和间接碳排放，使得飞行区的照明设施能够实现低碳智能运行。该系统配置的故障告警模块能够对灯具损坏、线路异常和调控失灵进行实时反馈，降低了人工巡检频次和运维能耗。飞行区照明智能调光能够稳定保持节电并减少因电力消耗而产生的碳排放，帮助机场实现能耗管控指标。

（六）碳排放实时监控平台

传统的机场碳排放管控主要依靠人工统计核算方式，存在数据更新落后、核算精度不高等问题，不能准确捕获地面运行各个环节的碳排放实时数据，很难做到精细化的碳排放管控，机场地面碳排放实时监测平台建设是碳排放动态管控和精准治理的数字化核心技术。该平台集成能耗采集、航班数据、设备运行数据、碳排放核算等技术，实现了航空器滑行能耗，APU运行时长，地勤车辆能耗，机场电力消耗和除冰物资消耗进行全维度统计，实现了实时能耗及排放数据的自动获取。该平台能够对机场的直接碳排放、间接碳排放等数据进行实时核算，并产生可视化的碳排放热力图、能耗分析报表和减排成效展示等。该平台能够对高耗能、高排放环节进行准确定位，使碳排放由事后统计向提前预警、事前控制治理转变。通过数字化监测赋能为优化机场碳达峰管控方案提供精准数据支持，整体推进机场碳达峰管控科学化和精准化。

三、碳达峰目标下机场地面运行低碳管控技术成效

通过采用航空器滑行优化和桥载（地井）电源空调替代APU等航空器地面低碳管理技术，机场航空器的地面无效燃油消耗得到了显著的控制，从而实现了显著的节油和减排效果。采用航空器单发滑行模式，可以直接减少地面滑行所需的50%的燃油，并与智能滑行调度相结合，从而缩短了地面的等待时间，使得单次航班的平均节油效果可以达到40至60千克。在全面推行桥载电源取代APU运行模式之后，航空器停靠期间的燃油消耗得到有效控制，单次航班能够节省超过120千克燃油。经过多种低碳管控技术的综合应用，机场航空器在地面运行的油耗得到了持续的优化，使得整体地面航油的消耗量能够同比减少22%至28%。航油消耗大幅度下降直接降低了碳排放和大气污染物，有效地解决了航空器滑行和停放时效率低、能耗大等难题。在核心环节上对机场地面运行进行节能降碳处理，显著减少了机场地面运行的碳排放。

四、结语

综合来看，依靠滑行优化、电动车辆替代、桥载（地井）电源空调、废液回收、智能调光和碳排放监测等技术路径可以实现对机场地面运行能耗和排放的全方面覆盖，从而形成系统化的管控体系。低碳管控技术的落地能够有效地降低机场地面运行的消耗，不断地消减机场碳排放的强度，达到节能、减污、降碳和增效的多重收益。今后需要不断推动技术规模化普及、参数标准化管控和数据常态化监测等工作，以全面巩固机场双碳建设的技术基础。

参考文献

- [1] 房鑫.多元利益主体视角下郑州机场碳中和发展对策研究[D].大连理工大学:2025.
- [2] 沈璐,张于磊,王妍.双碳目标背景下绿色低碳机场建设的困境与思考[J].民航管理,2025(07):32-35.
- [3] 银瑞鸿,李杨.机场智慧能源管控系统设计[J].建筑电气,2021,40(11):40-44.
- [4] 李少伟,张永明,张鹏飞,于杰生.高性能模块空间绿色低碳管控平台建设——以上海虹桥国际机场T1航站楼某项目为例[J].绿色建筑,2025,17(02):151-155.
- [5] 肖汉飞,余泓颖.人工智能驱动机场能源系统智慧化转型研究[J].民航管理,2025(12):88-93.

3×3MW 余热发电智控仪表与 APC 应用工艺研究

太荣山

云南天安化工有限公司, 云南 昆明 650000

DOI:10.61369/ME.2026060034

摘 要 : 针对云南天安化工 3×3MW 背压余热发电机组存在蒸汽计量失真、仪表故障率高、单回路 PID 多变量耦合、机组非计划停机频发、蒸汽梯级利用率低等问题, 搭建 “现场感知 – 过程控制 – APC 优化 – 经营管理” 四层一体化智控平台, 配套部署中控 APC–Suite 多变量预测控制系统 (MPC), 完成防腐智能仪表分区选型、关键测点双冗余、光纤冗余通信改造。现场运行结果表明: 蒸汽计量误差由 10%~15% 降至 2% 以内, 仪表年故障率下降 85.7%, 机组年非停机次数由 11 次降至 1 次; APC 长期投运率 ≥ 95%, 机组发电出力提升 3.2%, 年减少放空蒸汽 1.2 万 t, 年节约标准煤 4672 t, 项目静态投资回收期仅 1.65 a。该成套改造方案可为磷复、煤化工余热发电智能化升级提供工程借鉴。

关 键 词 : 余热余压发电; 智能仪表; 测点冗余; APC; 节能增效

Research on Intelligent Control Instrument and APC Application Process of 3 × 3MW Waste Heat Power Generation

Tai Rongshan

Yunnan Tian'an Chemical Co., Ltd. Kunming, Yunnan 650000

Abstract : Aiming at the problems of steam metering distortion, high instrument failure rate, single loop PID multivariable coupling, frequent unplanned unit shutdown, and low steam cascade utilization of Yunnan Tian'an chemical 3 × 3MW back pressure waste heat generator unit, a four-layer integrated intelligent control platform of "field perception – process control – APC optimization – business management" was built, and the Central Control APC suite multivariable predictive control system (MPC) was deployed to complete the selection of anti-corrosion intelligent instruments, the transformation of dual redundancy of key measurement points, and optical fiber redundant communication. The field operation results show that: the steam metering error is reduced from 10% to 15% to less than 2%, the annual failure rate of the instrument is reduced by 85.7%, and the annual non shutdown times of the unit is reduced from 11 to 1; The long-term operation rate of APC is ≥ 95%, the power generation output of the unit is increased by 3.2%, the annual venting steam is reduced by 12000 T, the annual standard coal is saved by 4672 T, and the static investment payback period of the project is only 1.65 a. the complete set of transformation scheme can provide engineering reference for the intelligent upgrading of phosphorus recovery and coal chemical waste heat power generation.

Keywords : waste heat and pressure power generation; intelligent instrument; redundancy of measuring points; APC; energy saving and efficiency increase

引言

硫磺制酸生产副产大量高温中压蒸汽, 蕴藏丰富余热势能, 传统工艺直接减温减压供给磷酸浓缩, 梯级能源价值完全浪费。原有 3×3MW 配套测控系统存在明显短板: 老式孔板流量计无实时温压补偿, 计量偏差大; 普通仪表不耐酸性腐蚀、机组振动, 故障频发; 关键测点无冗余设计, 仪表故障易触发机组联锁停机; 常规独立 PID 无法消解蒸汽压力、机组负荷、供热参数强耦合, 负荷波动依赖人工频繁调阀, 蒸汽放空、厂用电损耗突出, 余热发电潜力难以充分释放。

本文依托厂区余热余压 EPC 技改项目, 从智能仪表硬件、冗余监测架构、冗余通信网络、MPC 先进控制四个维度构建一体化智控平台, 重点分析 APC 投用后的工艺改善效果, 量化测算项目经济与环保收益。

一、项目概况与原系统缺陷

（一）工程概况

本项目为节能 EPC 改造，总投资 3735 万元，其中 APC 软硬件投入 480 万元，建设周期 12 个月。3 台 3 MW 背压机组 2021 年 5 月完成并网，配套高低压蒸汽管网、DCS 集散系统、双光纤环网、工业防火墙与 APC 服务器。装置设计总进汽量 240 t/h，单机额定功率 3150 kW，年有效运行时长 21600 h，基础工况年发电量 5184 万 kWh，厂用电率稳定控制在 8% 以内。

（二）改造前核心问题

1) 测控仪表性能不足：孔板流量计缺少在线温压补偿，0.6 MPa 饱和蒸汽工况计量偏差 10%~15%；仪表无防腐、抗震专用结构，年均故障 42 次；多数仪表仅支持就地显示，无 HART/Modbus 数字化接口，各工段形成数据孤岛；油压、轴振、主蒸汽流量等关键测点单点布置，年均引发 11 次机组非计划停机。2) 常规 PID 调控局限性：进汽压力、机组转速、低压供热参数相互耦合，固定 PID 参数无法适配硫酸、磷酸装置负荷频繁波动，人工干预易加剧工况震荡，大量控制回路频繁退出自动模式，蒸汽放空与辅机空载耗电问题显著。

二、四层一体化智控仪表平台总体设计

本次技改搭建四层协同智控架构，覆盖集汽箱、汽轮机、润滑油站、减温减压、磷酸浓缩五大热能单元，以标准化智能仪表为 APC 提供高精度、高实时性数据源。

（一）现场感知层：分区仪表 + 双冗余测点

1. 差异化智能仪表选型

全部仪表防护等级 IP65、防爆等级 Ex ia II CT4，支持 HART/Modbus 双协议、1 s 高频数据采集，适配 APC 实时运算需求：主蒸汽管网选用 316L 衬四氟智能涡街流量计，集成一体化温压补偿模块，流量测量精度 $\pm 0.5\%$ ，配套冗余温压变送器；汽轮机本体配套磁电式振动变送器、一体化 PT100 测温元件，实时监测轴振、轴瓦温度；润滑油系统油压、压差、液位全部采用双冗余变送器；低压供热管网、电气系统配置高精度差压流量计与 Modbus 智能电度表，同步采集供热流量、机组发电量、功率因数。

2. 三重冗余监测架构

选取润滑油压、机组轴振、主蒸汽流量、汽轮机排汽压力四类安全核心参数，采用双仪表、双铠装线缆、双卡件独立监测架构，两路信号同步上传 DCS 与 APC。系统内置故障判别逻辑：双表测量偏差 $\leq 5\%$ 取平均值；偏差 $> 5\%$ 自动标记故障并远程告警；两路信号同时失效时 APC 无扰切回基础 PID 调节。可靠性计算：单台仪表年可靠度 $\lambda(R=e^{-\lambda t}) \approx 0.9048$ ，双冗余系统可靠度 $\lambda(R_s=2R-R^2 \approx 0.9909)$ ，仪表年故障率降低 91%。

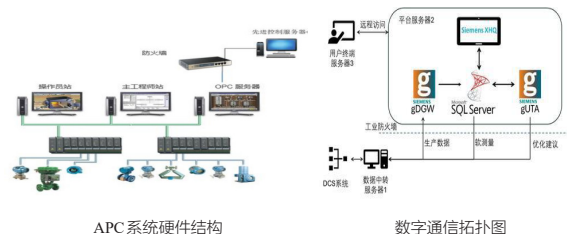
（二）过程控制层：冗余 DCS 与光纤环网

余热电站配置带冗余电源、冗余主控的 DCS 子站，完成信号预处理、单回路 PID、设备联锁运算；余热子站与全厂总控采用

一主一备千兆光纤环网，主链路故障毫秒级切换。DCS 部署 OPC 服务器，通过 OPC DA 协议完成 DCS 与 APC 双向数据交互。

（三）APC 优化层：MPC 控制系统软硬件

APC 采用 DELL R760xs 冗余服务器，配置工业防火墙隔离生产网，搭载中控 APC-Suite10.6 软件，核心为 MPC 多变量预测控制，配套数据预处理、软测量、前馈补偿、PID 自整定、无扰切换功能模块。



1. MPC 控制核心逻辑

MPC 遵循“模型预测、滚动优化、反馈校正”闭环逻辑，区别于 PID 事后纠偏。本项目预测时域 20 min、控制时域 5 min，每分钟滚动求解全局最优操作量，分级划分安全、供热、发电变量约束，自动消解多参数耦合干扰。

2. 核心功能模块说明

1) 数据预处理：冗余校验、信号滤波、坏点剔除，净化 APC 输入数据；2) MPC 解耦控制器：分汽缸压力设最高安全优先级，限制阀门单次调节幅度，协同汽轮机调门、减温水阀小幅微调；3) 软测量模型：在线推算机组汽耗、蒸汽腐蚀浓度、磷酸浓缩指标，弥补离线化验滞后缺陷；4) 负荷前馈补偿：提前 5~10 min 预判产汽、用汽负荷波动，提前调整机组出力，减少蒸汽放空；5) 三级安全联锁：轻微偏移 APC 预警微调、中度异常切换备用辅机、重大故障 DCS 硬停机，APC 同步闭锁输出；6) 自适应校正：分高、中、低负荷三套工艺模型，定期自动整定 PID，保障基础回路自控率高于 95%。

（四）经营管理层

APC 实时数据同步对接企业 MIS/ERP 能耗平台，自动归档发电量、蒸汽消耗、设备故障台账，支撑全厂能耗统计、生产调度与设备运维考核。

三、APC 投用后工艺优化成效

依托冗余智能仪表稳定数据源，MPC 先进控制从计量精度、工况稳定性、余热回收、自动化运维四个维度实现全流程优化。

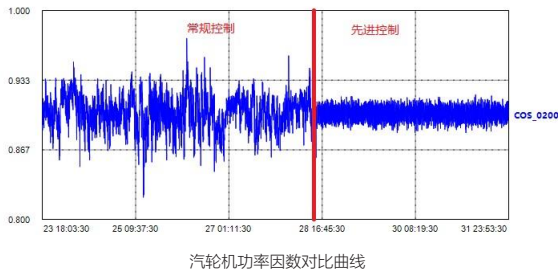
（一）蒸汽计量精准管控

搭建一体化温压补偿计量模型： $\lambda(Q_m=Q_v \times \rho(T,P))$ 式中： $\lambda(Q_m)$ 为标准蒸汽质量流量，t/h； $\lambda(Q_v)$ 为工况体积流量； $\lambda(\rho(T,P))$ 为实时温压下蒸汽密度。系统以 1 s 周期动态换算标准流量，计量误差由 10%~15% 降至 2% 以内；APC 依托精准数据实时测算机组汽耗，稳定锁定 33.238 kg/kWh 最优经济区间，为节能优化提供可靠数据底座。

（二）热力工况波动显著收窄

APC 投用前主蒸汽压力持续剧烈震荡，投用后参数标准差下

降 30% 以上；功率因数曲线大幅收敛，机组长期稳定运行在发电出力上限，有效降低无功热能损耗。



MPC 多执行机构协同微调，彻底解决“调压扰动供热、调负荷波动管网”耦合振荡，蒸汽系统运行平稳性大幅提升。

（三）蒸汽梯级利用率提升

负荷前馈机制提前预判工况波动，年减少放空蒸汽 1.2 万 t，高品质中压蒸汽全部用于发电与磷酸供热；三级主动联锁将机组年非计划停机由 11 次降至 1 次，避免停机阶段蒸汽直接减温减压放空，最大化回收余热势能。

（四）自动化运维改善

APC 投运后关键回路自控率稳定超 95%，人工操作频次下降 30%；月度人工巡检时长由 120 h 缩减至 30 h，仪表年故障由 42 次降至 6 次；软测量实时在线推算工艺指标，省去离线化验等待，保障磷酸装置连续稳定用汽。

表 1 改造前后核心运行指标对比

对比指标	改造前	改造后	优化幅度
蒸汽流量计量偏差	10%~15%	≤2%	精度提升 87%
仪表年均故障 / 次	42	6	故障率下降 85.7%
机组年非计划停机 / 次	11	1	停机频次下降 90.9%
月度人工巡检时长 / h	120	30	人力消耗减少 75%
工艺参数波动幅度	剧烈震荡	标准差下降 30%+	系统稳定性大幅提升

四、技改综合经济效益分析

（一）基础发电与节煤收益

装置基础年发电量 5184 万 kWh，工业电价 0.38 元 /kWh，基础发电年收入 1969.92 万元；APC 使机组出力提升 3.2%，辅机年节电 120 万 kWh，节电收益 45.6 万元；全年节约标准煤 4672 t，大幅削减 CO₂、SO₂排放，满足企业能耗双控考核要求。

参考文献

[1] GB 50131-2014 自动化仪表工程施工及质量验收规范 [S]. 北京：中国计划出版社，2014.

[2] 崔靖涵，刘向杰，孔小兵. 汽轮机系统的模糊经济模型预测控制 [J]. 控制理论与应用，2018, 35(3): 308-316.

[3] 席永胜. 一种基于决策树的智能流量仪表选型方法 [J]. 石油化工自动化，2025, 61(5): 42-45.

[4] 徐巍，刘文超，钟飞. 测控系统软件的可靠性分析 [J]. 计算机与现代化，2005, (2): 6-9.

[5] 毕晓云. 先进过程控制技术在大型硫磺制酸装置中的应用 [J]. 硫酸工业，2025, (2): 58-61.

[6] 郭伟，王汉杰，夏友亮，等. 多变量 FOPID-MAC 在机炉协调控制中的应用 [J]. 动表，2015, 36(8): 69-73+77.

[7] 王晓光. APC 系统在化工装置中的应用 [J]. 化工管理，2021, (29): 152-153+155.

[8] 丁伟，李蒙，谭显东，等. 负荷管理节能效益量化研究 [J]. 华东电力，2007, (6): 59-63.

[9] 曾琦. 电力工程中基于物联网技术的智能仪表网络化管理系统应用研究 [J]. 仪器仪表用户，2024, 31(9): 16-17+20.

[10] 韩洁. 基于 PLC 的仪器仪表控制系统在化工机电工程中的应用 [J]. 石化技术，2026, 33(6): 228-229+232.

（二）APC 年度增量收益

表 2 APC 系统年度增量经济效益

表格		
收益项目	年增量收益 / 万元	效益说明
发电增量收益	63.04	机组出力提升新增发电量
减少蒸汽放空收益	144.00	回收放空蒸汽用于生产发电
硫酸降耗收益	20.16	蒸汽稳定降低产品单耗
人工运维节约	16.00	现场值守人员优化
增量合计	288.80	多维度节能叠加收益

（三）投资回报测算

项目总投资 3735 万元，基础发电收益与 APC 增量收益叠加，年综合总收益 2258.72 万元，静态投资回收期仅 1.65 a。间接效益包括仪表备件、检修人工成本下降，同时保障两套 30 万吨磷酸装置连续稳产，稳定主产品营收。

五、现存优化方向

1) 理论仿真体系不完善：仪表零点漂移、高精度温压补偿缺少系统性仿真验证；2) 故障管控体系不完整：未建立标准化软硬件故障数据库，故障溯源与长效防控流程有待梳理；3) 成套技术文档标准化不足，不利于行业快速复制推广。后续将补充算法仿真试验、搭建故障知识库、统一技术资料规范，开发全自动模型辨识功能，逐步实现装置全流程自适应无人优化。

六、结论

针对磷复肥硫磺制酸余热发电机组高温腐蚀、高频振动、多参数强耦合、蒸汽梯级利用率低等共性难题，本文构建“防腐智能仪表 + 双冗余测点 + 光纤冗余通信 + MPC 先进控制”四层一体化智控平台，打通硬件感知、基础调控、智能优化、能耗统计完整闭环。

工艺层面，APC-MPC 突破传统单回路 PID 调控局限，有效消解多变量耦合干扰，蒸汽计量精度、机组运行稳定性、装置自动化水平全面提升，蒸汽放空损耗大幅减少，余热梯级利用效率显著提高；经济环保层面，项目年综合收益超 2200 万元，静态投资回收期不足 2 年，年节约标煤 4672 t，兼具经济效益与低碳环保价值。整套仪表选型、冗余架构、APC 控制方案通用性强，可为磷复肥、煤化工同类余热发电智能化改造提供成熟工程实践参考。

风电箱变常见电气故障诊断、检修及电网安全防护措施

马世杰

新疆龙源新能源有限公司, 新疆 乌鲁木齐 830000

DOI:10.61369/ME.2026060035

摘 要 : 在“双碳”目标全面推进的背景下,我国陆上及海上风电装机容量持续攀升,箱式变压器(简称风电箱变)作为风电机组与集电线路、公共电网衔接的核心变电设备,承担着风机低压交流电升压、电能汇集、配电保护及并网隔离的关键功能。风电箱变长期运行于野外风沙、高温高湿、盐雾腐蚀、雷电频发等恶劣工况,设备绝缘老化、开关器件损坏、回路短路等电气故障高发,不仅会造成单台风机停机弃风、发电量损失,严重时还会引发集电线路跳闸、电网电压波动甚至区域性电网故障,威胁风电并网系统稳定运行。本文结合陆上平原、沿海滩涂两类典型风电场运维经验,系统梳理风电箱变高压侧、变压器本体、低压侧、二次测控回路四大类常见电气故障,阐述故障在线诊断与离线试验诊断技术,制定标准化检修工艺流程,同时针对性提出风电并网场景下的电网安全防护策略,为风电场箱变全生命周期运维管理、降低设备故障率、保障风电安全并网提供理论参考与实操依据。

关 键 词 : 风电箱变; 电气故障; 故障诊断; 设备检修; 电网安全防护; 风电并网

Common Electrical Fault Diagnosis, Maintenance, and Grid Safety Protection Measures for Wind Power Substations

Ma Shijie

Xinjiang Longyuan New Energy Co., Ltd., Urumqi, Xinjiang 830000

Abstract : Against the backdrop of comprehensive advancement towards the "dual carbon" goals, China's onshore and offshore wind power installed capacity continues to rise steadily. As core substation equipment connecting wind turbines to collector lines and the public power grid, box-type transformers (referred to as wind power box transformers) perform critical functions including voltage boosting for low-voltage AC power from turbines, energy collection, distribution protection, and grid integration isolation. These transformers operate under harsh conditions such as sandstorms, high temperatures, humidity, salt spray corrosion, and frequent lightning strikes, leading to frequent electrical faults like insulation degradation, switch component failures, and circuit short circuits. Such issues not only cause turbine downtime and power generation losses but may also trigger collector line tripping, grid voltage fluctuations, or even regional power grid failures, jeopardizing the stability of wind power grid integration systems. Drawing on operational experience from both onshore plain and coastal tidal flat wind farms, this paper systematically identifies four major categories of common electrical faults in wind power box transformers—high-voltage side, transformer body, low-voltage side, and secondary measurement/control circuits. It elaborates on online fault diagnosis and offline test-based diagnostic techniques, establishes standardized maintenance procedures, and proposes targeted grid safety protection strategies for wind power grid integration scenarios, providing theoretical references and practical guidelines for full-life-cycle operation and maintenance management of wind farm transformers, fault rate reduction, and secure grid integration of wind power.

Keywords : wind power transformer; electrical fault; fault diagnosis; equipment maintenance; grid safety protection; wind power grid integration

引言

风电属于波动性极强的新能源发电形式,风机出力受风速、风向实时影响,导致箱变长期处于负荷频繁波动、电压电流动态变化的运行状态,相较于传统变电站变压器,风电箱变运行工况更为苛刻。目前国内风电场主流配置美式箱变、欧式箱变两种机型,额定参数多为0.69kV/35kV,单台箱变对应一台或两台风机,分散布置于风场全域,设备巡检难度大、故障隐蔽性强。运维数据显示箱变故障占

风电电气故障 38.2%，高发故障含绝缘、开关、二次保护失效、过电压四类。多数中小风场仍靠人工定期巡检、故障后抢修，缺少前置精准诊断；且应对功率波动的并网防护体系不足，易出现谐波、电压越限、保护误动等问题。本文结合现场运维，剖析箱变故障机理，优化检修方案、完善并网防护，提升设备可靠度与电网适配能力。

一、风电箱变结构及运行工况特点

（一）基本结构与工作原理

风电箱变集成高压开关室、变压器室、低压配电室、二次测控保护室于一体化封闭箱体，无需建设独立配电室，具备占地面积小、安装便捷、模块化集成度高的优势。工作流程为：风电机组发电机输出 0.69kV 低压交流电，经低压柜进线至升压变压器，升压至 35kV 高压交流电后，通过高压环网柜接入风电场集电线路，最终输送至风电场升压站并入公共电网。同时箱变内置测控装置、继电保护模块、温湿度控制模块，实现设备运行参数实时监测、故障自动跳闸、箱体环境自动调控功能^[1]。

（二）恶劣运行工况带来的故障诱因

环境腐蚀诱因：沿海风电场盐雾、内陆风电场风沙与昼夜温差，加速箱体密封件老化、绝缘材料劣化，引发绝缘闪络、柜体凝露短路；

负荷波动诱因：风速随机变化导致变压器负荷骤升骤降，绕组频繁热胀冷缩，加剧绕组绝缘开裂、引线松动；

雷电过电压诱因：野外空旷区域雷电活动频繁，直击雷与感应雷易侵入箱变高低压回路，击穿绝缘器件；

运维局限诱因：箱变分散布置，人工巡检频次有限，微小潜伏性故障无法及时发现，逐步发展为恶性电气故障。

二、风电箱变常见电气故障及故障机理分析

结合现场故障台账，将风电箱变电气故障分为变压器本体故障、高压侧电气故障、低压侧电气故障、二次测控与保护回路故障四大类，各类故障表现、产生机理如下。

（一）变压器本体电气故障

1. 绕组匝间 / 层间短路故障

该故障为箱变最高发本体故障，诱因包括长期负荷波动导致绕组绝缘疲劳老化、雷电过电压击穿局部绝缘、变压器油受潮污染降低绝缘强度。故障初期无明显外部征兆，仅出现轻微油温升高、三相电流不平衡；故障发展后会产生局部电弧，变压器油裂解产生乙炔、氢气等特征气体，最终引发绕组烧毁、箱变紧急跳闸。

2. 铁芯多点接地故障

变压器铁芯正常仅允许单点接地，若铁芯硅钢片绝缘破损、金属杂物搭接铁芯与箱体，会形成多点接地回路，产生持续性涡流损耗，导致铁芯过热、油温异常升高，加速绝缘油老化，长期运行会诱发绕组绝缘热击穿。

3. 分接开关接触不良故障

有载 / 无载分接开关长期运行后触头氧化、弹簧压力不足，会

造成接触电阻增大，负荷电流通过时产生发热烧蚀，引发局部放电、电压偏移，严重时出现开关触头烧熔，导致变压器三相电压失衡，影响风机正常并网发电。

（二）高压侧电气故障

1. 高压环网柜开关故障

高压负荷开关、接地开关机械卡涩、操作机构储能不足，会出现开关拒分、拒合问题；开关触头磨损、氧化会引发接触过热、局部放电。同时风沙、凝露导致高压柜内绝缘件表面污秽，易发生沿面闪络短路，造成集电线路越级跳闸。

2. 高压电缆终端头故障

电缆终端头制作工艺不达标、密封失效进水，是高压侧频发故障。进水后终端头绝缘强度下降，产生内部局部放电，逐步发展为单相接地短路、相间短路，是风电场箱变起火事故的主要诱因之一。

（三）低压侧电气故障

1. 低压母线短路与接触过热

低压侧连接风机进线，柜体凝露、小动物短路、母线绝缘老化，易引发低压相间短路；母线螺栓松动、搭接面氧化，会导致母线发热变色，轻则低压回路电压压降过大，重则烧毁低压配电柜。

2. 低压电容补偿装置故障

为补偿风机无功功率，箱变低压侧配置并联电容器组，电容长期受谐波电压冲击易出现鼓包、击穿、渗漏油故障，不仅失去无功补偿作用，还会放大电网谐波，恶化并网电能质量。

（四）二次测控与保护回路故障

二次回路是箱变安全运行的“大脑”，常见故障包括：电流 / 电压互感器精度漂移、二次回路开路；继电保护装置定值漂移、元件老化导致保护拒动或误动；测控装置对时异常、通信中断，无法上传现场运行数据至后台监控系统；温湿度控制器、加热器失灵，箱体凝露无法自动消除，进一步加剧一次设备绝缘故障。该类故障隐蔽性极强，往往一次设备无异常，但保护系统失效，失去故障应急屏障。

三、风电箱变电气故障诊断技术

结合风电运维场景，采用在线实时监测诊断 + 离线预防性试验诊断相结合的分层诊断模式，实现潜伏性故障早期预警、显性故障精准定位^[2]。

（一）在线非停电诊断技术

油色谱在线监测：针对油浸式风电箱变，实时监测绝缘油中氢气、甲烷、乙炔等故障特征气体含量，根据气体组分比值判断

故障类型：乙炔含量超标判定为电弧放电故障，氢气含量突增判定为局部放电或铁芯过热故障，无需停电即可预判绕组、铁芯潜伏性缺陷。

局部放电在线检测：采用超高频局部放电传感器，实时采集柜内绝缘件、开关设备放电信号，识别绝缘闪络、触头放电缺陷，适配野外无人值守风电场远程监测需求。

电参量与环境在线监测：后台监控系统实时采集三相电压、电流、油温、柜体温湿度数据，通过三相电流不平衡度、油温变化曲线，快速识别绕组短路、负荷异常故障；依托温湿度数据预判柜体凝露风险。

（二）离线停电预防性试验诊断技术

在线监测发现异常后，利用风机停机窗口期开展停电试验，精准定位故障点位，核心试验项目及判定标准如下：

绝缘电阻与吸收比测试：测量绕组对地、绕组相间绝缘电阻，环境温度25℃时，高压绕组绝缘电阻低于1000M Ω 判定为绝缘受潮；吸收比小于1.3、极化指数低于1.5，确认绝缘介质老化受潮。

绕组直流电阻测试：三相绕组直流电阻相间不平衡度超过2%，判定绕组引线松动、匝间短路或焊接接头缺陷。

变比测试：变压器变比偏差超过 $\pm 0.5\%$ ，判定分接开关档位错位或触头接触不良。

回路电阻测试：高压开关、低压母线回路电阻超标，直接定位触头接触不良、螺栓松动故障。

（三）故障诊断流程优化

建立“监控告警→在线数据分析→停电试验复核→故障点位定位”标准化诊断流程，摒弃传统盲目拆机检修模式，缩短故障排查时长。现场运维数据表明，该分层诊断方式可将故障排查时间缩短60%以上，有效减少风机停机时长^[3]。

四、风电箱变标准化检修工艺与故障处理方案

按照故障严重程度，分为一般缺陷检修、重大故障抢修两类，制定适配风电场野外作业的标准化检修方案，同时落实检修安全管控措施。

（一）变压器本体故障检修

绕组短路故障检修：轻微匝间短路需返厂开展绕组干燥、绝缘补强处理；严重绕组烧毁直接更换变压器绕组，检修后完成耐压试验、直流电阻测试，合格后方可复电。

铁芯多点接地故障检修：停电后清理铁芯表面金属杂物，排查接地引线搭接点位，拆除多余接地点，修复硅钢片破损绝缘层，复测铁芯接地电流至合格范围。

分接开关故障检修：拆解开关触头进行打磨除锈，调整弹簧压紧力，档位多次切换后复测回路电阻；触头严重烧蚀直接更换分接开关，校准电压变比。

（二）高低压一次设备故障检修

高压开关与电缆终端头检修：开关操作机构卡涩开展机械润滑、储能机构调试；终端头进水受潮直接重新制作电缆终端头，做好双层密封防水处理，沿海风电场额外增加防盐雾涂层。

低压母线与电容装置检修：紧固母线连接螺栓，打磨氧化搭接面并涂抹电力复合脂；更换鼓包、击穿的电容器，同时检测回路谐波含量，匹配适配的无源滤波装置抑制谐波。

（三）二次回路故障检修

针对保护误动/拒动问题，重新校核继电保护定值，匹配风电负荷波动特性优化过流、速断、零序保护参数；修复开路的互感器二次回路，落实二次回路两点接地防护；统一全站箱变测控装置时钟，保障故障录波数据同步，提升故障溯源准确性；维修或更换失效的温湿度控制器、加热器，实现箱体凝露自动防控。

（四）检修通用安全管控要求

野外箱变检修必须严格执行停电、验电、接地、装设遮拦与警示牌安全措施；检修前后完整留存试验数据、故障录波波形；完成检修后开展带负荷试运行，观测三相电流、油温、局部放电参数无异常，方可正式并入集电线路。

五、风电箱变并网运行电网安全防护措施

风电箱变作为并网接口设备，其故障不仅影响自身设备安全，还会向电网传递谐波、电压波动、无功失衡、过电压等扰动，结合风电并网导则要求，从过电压防护、继电保护优化、电能质量治理、并网协同控制、运维体系升级五方面制定电网安全防护措施^[4]。

（一）多级过电压防护，抵御雷电与操作过电压

一级防护：箱变高压进线侧装设氧化锌避雷器，抑制直击雷与线路感应过电压；

二级防护：低压母线侧加装低压浪涌保护器，阻断过电压向风机发电机组反向传导；

三级防护：二次测控电源端口加装信号防雷模块，避免过电压击穿精密二次元器件；同时定期检测避雷器泄漏电流，及时更换老化失效防雷器件。

（二）适配风电波动特性，优化继电保护定值

传统电网变压器保护定值适配稳定负荷，无法匹配风电频繁波动负荷，易出现保护误动。结合风机出力特性，采用自适应继电保护策略：增设风电专用负荷波动闭锁逻辑，规避风速骤变导致的瞬时过电流误跳闸；优化零序保护、距离保护定值，区分箱变内部故障与电网侧扰动，避免集电线路大范围越级跳闸；完善故障录波与电网联动功能，故障发生后第一时间隔离故障箱变，缩小电网故障影响范围。

（三）综合治理并网电能质量，降低电网扰动

无功功率补偿优化：根据风机实时无功出力，动态调节低压侧电容器组投切容量，解决风电间歇性无功波动问题，将并网电压偏差控制在 $\pm 5\%$ 额定电压范围内；

谐波抑制治理：在低压侧加装有源电力滤波器（APF），抵消风机变流器产生的3、5、7次特征谐波，保证并网电流谐波总畸变率低于5%，满足国家风电并网电能质量标准^[5]。

（四）源网协同监控，实现并网风险前置预警

搭建箱变-风机-升压站一体化监控平台，打通设备运行数

据与电网调度数据通信链路。实时上传箱变电压、电流、故障信号至电网调度端，电网调度可根据全网负荷状态，提前下发风机出力调节指令，规避风电大发时段电网电压越限、线路过载问题；同时实现电网侧故障与箱变保护联动，电网异常时箱变快速解列，保障设备与电网双向安全。

（五）差异化环境防护，从源头降低故障并网风险

针对不同风场环境开展差异化防护：沿海风电场箱变柜体喷涂加厚防盐雾涂层，提升密封等级；内陆风沙风电场加装通风防尘滤网；高温区域强化箱体散热系统，低温区域升级加热除湿装置。从设备运行环境层面减少绝缘故障、短路故障发生概率，从源头降低箱变故障对电网的冲击。

六、结论与展望

风电箱变故障本质是恶劣野外工况、风电负荷波动、运维管

控不足三者共同作用的结果，绕组绝缘故障、开关设备缺陷、二次保护失灵、过电压损坏是当前风电箱变最核心的电气故障类型。本文提出的在线监测+离线试验分层诊断模式，可实现潜伏性故障早期预警；标准化分级检修工艺适配风电场野外停机检修场景，能够高效消除设备缺陷；配套的多级过电压防护、自适应继电保护、电能质量治理、源网协同监控措施，可有效阻隔箱变故障向公共电网扩散，提升新能源并网系统稳定性^[6]。

随着风电智能化、无人值守场站建设推进，后续风电箱变将全面搭载物联网感知、人工智能故障诊断模块，可实现故障自主研判、自愈控制、电网扰动主动抑制。未来风电运维工作需进一步结合大数据与 AI 技术，构建箱变全生命周期健康管理模型，实现从“故障后检修”向“状态检修、预测性维护”转型，持续提升风电设备运行可靠性，助力新能源电力系统安全、高效、稳定运行。

参考文献

[1] 胡卫, 翁洪杰. 沿海风电场 10kV 集电线路短路引起箱变着火故障分析 [J]. 浙江电力, 2026, 45(01): 78-83.
[2] 李刚. 风力发电 690V 转 35kV 箱式变压器的维护与故障诊断技术研究 [J]. 电工技术, 2025(14): 189-191.
[3] 王健. 风电场箱式变压器日常维护策略与实践研究 [J]. 设备管理与维修, 2025(12): 132-134.
[4] 张磊. 风电场集电线路典型故障原因分析及处理措施研究 [J]. 中国设备工程, 2020(22): 236-237.
[5] 卢鑫鑫, 纪代颖. 考虑电缆故障情况下风电场电气内部故障诊断方法 [J]. 电气自动化, 2024, 46(2): 72-75.
[6] 国家能源局. GB/T19963-2011 风电场接入电力系统技术规定 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.

桥梁桩身完整性检测中超声波透射法的应用

张庆

湖北精兴建设工程质量检测有限公司, 湖北 荆门 448000

DOI:10.61369/ME.2026060002

摘 要 : 超声波透射法依据声时、声速、振幅及波形变化, 反映桥梁钻孔灌注桩内部混凝土的连续性与密实性。本文分析该方法的理论基础、检测准备、现场操作、数据处理及工程应用效果。结果表明: 完整桩声速保持在4200 m/s左右, 振幅衰减率约5%; 存在夹泥及局部离析的 Z2 桩声速均值降至3800 m/s, 振幅衰减率达25%, 经注浆处理后声速升至4050 m/s, 振幅衰减率降至11%, 完整性等级由Ⅲ类调整为Ⅱ类。该方法对深层缺陷定位与加固效果评价具有较高应用价值。

关 键 词 : 超声波透射法; 桥梁桩身; 完整性检测; 声速; 缺陷识别

Application of Ultrasonic Transmission Technique in the Inspection of Bridge Pier Integrity

Zhang Qing

Hubei Jingxing Construction Engineering Quality Inspection Co., Ltd. Jingmen, Hubei 448000

Abstract : The ultrasonic transmission method relies on changes in acoustic time, velocity, amplitude, and waveform to reflect the continuity and compactness of the concrete within the drilled and grouted piles of bridges. This paper analyzes the theoretical basis, preparation for testing, field operations, data processing, and the engineering application effects of this method. The results show that the average velocity of intact piles remains around 4,200 m/s, with an amplitude attenuation rate of approximately 5%. The average velocity of Z2 piles with mud entrapment and localized segregation drops to 3,800 m/s, with a significant amplitude attenuation rate of 25%. After grouting treatment, the velocity increases to 4,050 m/s, and the amplitude attenuation rate decreases to 11%. The integrity grade is adjusted from Class III to Class II. This method has high application value for the localization of deep-seated defects and evaluation of reinforcement effects.

Keywords : ultrasonic transmission method; bridge pile shaft; integrity inspection; sound velocity; defect identification

引言

桥梁桩基础承担上部结构荷载传递与地基稳定控制功能, 其施工质量直接关系桥梁运营安全。钻孔灌注桩施工受地层条件、泥浆护壁、混凝土灌注连续性、钢筋笼安装质量等因素影响, 桩身内部可能出现夹泥、离析、缩径、断桩等隐蔽缺陷。此类缺陷难以通过外观检查发现, 若未能及时识别, 可能削弱桩基承载性能并增加后期病害风险。因此, 建立可靠的桩身完整性检测方法具有重要工程意义。超声波透射法依托预埋声测管采集声学参数, 能够沿深度方向连续反映混凝土介质状态, 在缺陷定位、范围判别和质量复核方面具有较强针对性。分析其检测流程与应用效果, 可为桥梁桩基质量控制提供技术参考。

一、超声波透射法检测桥梁桩身完整性的理论依据

超声波透射法将预埋声测管之间的混凝土作为弹性波传播介质, 其判读基础来自声波在相对均匀介质中的近似直线传播特性以及能量随传播距离增加而逐渐衰减的规律。鉴于桥梁钻孔灌注桩内部混凝土应具有连续密实的结构状态, 发射换能器激发的超

声脉冲在接收端形成较稳定的首波到达时间、振幅以及频率响应; 当桩身存在断桩、夹泥、缩径等缺陷时, 声波传播路径会发生绕射、散射及局部反射, 介质等效弹性模量降低, 声时增大, 声速下降, 振幅衰减加剧, 主频向低频方向偏移。由此可将声学参数的异常变化作为识别桩身完整性变化的物理依据^[1]。

$$v = \frac{S}{t}$$

其中, v 表示声波传播速度, 单位为 m/s , S 表示发射换能器与接收换能器之间的测距, 单位为 m , t 表示声波首波从发射端传播至接收端所需时间, 单位为 s 。结合弹性波理论来看, 声速与混凝土密度以及弹性参数存在内在关联, 声速越稳定, 通常说明检测剖面内介质连续性越好; 若同一深度区间出现声速突降、振幅明显降低以及波形畸变同步出现的情况, 则可推导该区间存在结构离散或局部缺陷的可能性较高。

二、桥梁桩身超声波透射法检测的实施流程

(一) 检测前的准备工作

鉴于桥梁钻孔灌注桩内部空间不可见, 检测前准备需将声测管布设、仪器状态核查及现场条件整理纳入同一技术链条。声测管作为超声脉冲传播的耦合通道, 其数量宜结合桩径确定: 桩径不大于 800 mm 时可布设 2 根, 桩径为 800 mm 至 1600 mm 时宜布设 3 根, 桩径大于 1600 mm 时宜布设 4 根以上, 并沿钢筋笼内侧等角度固定, 使各检测剖面覆盖桩身主要截面。管材通常选用内径不小于 40 mm 的钢管或专用声测管, 接头应保持顺直密封, 管底封闭, 管口高出桩顶一定高度, 避免灌注及后续施工将泥浆、砂粒带入管内。某桥梁桩基工程中, 直径 1.5 m 的桩身布置 3 根直径 50 mm 声测管, 相邻管间距控制为 1.2 m , 该方案能够兼顾剖面覆盖范围与换能器下放稳定性^[2]。

仪器准备需围绕检测数据可比性进行核查。检测人员应对超声检测仪主机的采样间隔、增益、触发方式及零声时进行参数标定, 并借助标准试块或清水中固定距离测量来校验发射换能器与接收换能器的灵敏度。若同组换能器首波识别不稳定或幅值响应偏差较大, 应立即更换或重新配对。现场预处理还需对桩顶浮浆和松散混凝土进行修整, 使管口位置清晰可辨; 声测管内则借助清水冲洗、通球检查及反复抽排来处理沉渣和杂质, 保持管内充满清水。此类准备能够减少耦合不良、管道堵塞及仪器漂移对声时和波幅判读造成的干扰。

(二) 现场检测的操作步骤

现场检测需将声测管成孔质量、换能器运动控制及声学信号采集放在同一操作链条中进行控制。检测人员在管内水位稳定后, 将发射换能器与接收换能器分别下放至同一检测深度, 并借助深度标记电缆开展同步升降, 使两只换能器在相邻声测管内保持水平对应, 减少斜测距对声时判读的影响。结合桥梁钻孔灌注桩检测的分辨率需求, 测点间距宜控制为 10 cm/点 , 遇到波形突变、声时异常延长或波幅突然降低的深度段, 可将测点间距适当加密, 以便对异常区间边界进行细化识别。仪器参数设置应保持前后一致^[3]。某桥梁桩基检测中, 现场将采样频率设为 2 MHz , 发射电压设为 500 V , 增益依据首波清晰度进行小幅调整, 避免人为放大造成不同剖面数据缺乏可比性。换能器下放前可在探头表面涂覆甘油, 将甘油作为辅助耦合介质, 同时轻缓摆动电缆并反

复提放短距离, 促使探头周边附着气泡上浮排出。采集过程中需同步记录桩号、管号组合、测点深度及异常波形位置, 现场波形保存后立即核对首波识别线, 避免漏采及错位记录影响后续完整性判读。

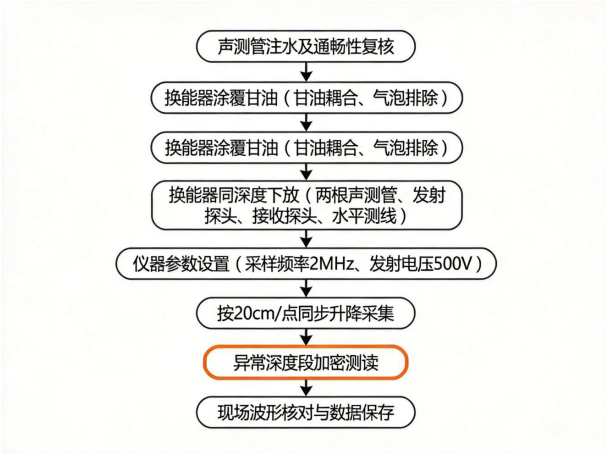


图1 桥梁桩身超声波透射法现场检测流程图

(三) 检测数据的初步处理

现场采集完成后, 检测数据需围绕波形可读性及参数一致性开展初步整理。鉴于桩身混凝土内部声波信号易受管壁摩擦、气泡残留及电磁干扰影响, 原始波形可选用小波变换法进行噪声滤波。小波变换法将非平稳声波信号分解到不同尺度上进行识别, 能够在保留首波突变特征的同时削弱高频随机噪声。处理时宜依据现场波形主频范围选取适宜小波基, 并将分解后的低能量噪声分量进行抑制, 避免首波位置因过度平滑而产生偏移^[4]。

完成滤波后, 应将每一测点的声时、测距及波幅峰值纳入同一数据序列进行校核, 并逐点计算声速与相对振幅。声速计算需要扣除仪器零声时及电缆延迟带来的系统误差, 振幅则宜在统一增益条件下进行归一化整理, 使不同剖面之间具有可比性。异常点识别可将声速低于 3800 m/s 作为初判阈值, 同时结合相邻测点变化幅度进行复核。若单个测点声速偏低但波幅及波形连续性未同步异常, 需重点排查耦合不良或首波拾取偏差; 若连续深度段出现声速下降、振幅衰减及波形展宽, 则该区间更可能对应混凝土离析、夹泥或局部缩径。

以某桥梁桩基检测数据整理为例, 数据处理人员将 3 根声测管形成的 3 个检测剖面分别绘制为深度方向声速曲线, 并对曲线突降位置进行交叉比对。当 2 个以上剖面在相近深度出现低于 3800 m/s 的连续异常带时, 可据此定位潜在缺陷区域, 为后续缺陷性质判读及复测布点提供依据。

三、超声波透射法在桥梁桩身完整性检测中的应用效果分析

(一) 工程案例中的检测结果验证

某跨河桥桩基工程选取 3 根试验桩 Z1 至 Z3 开展超声波透射法检测, 桩径均为 1.5 m , 声测管按三管等角度布设, 测点间距控制为 20 cm 。现场将声速平均值、振幅衰减率及波形连续性作为综合

判读依据。振幅衰减率用于表征声波能量在混凝土介质中传播后的损失程度，数值越高通常意味着界面散射及能量耗散越明显。检测统计结果见表1。

表1 某桥梁桩身超声波透射法检测结果统计表

桩号	声速平均值	振幅衰减率	缺陷类型	完整性等级
Z1	4200 m/s	5%	未见明显缺陷	I类
Z2	3800 m/s	25%	夹泥以及局部离析	III类
Z3	4100 m/s	8%	轻微离析	II类

从表1可见，Z1桩声速稳定且振幅衰减较小，波形首波清晰，桩身混凝土连续性较好；Z3桩在局部深度段存在轻微波幅降低，但声速仍保持在较高水平，判定为II类完整性。Z2桩声速平均值降至3800 m/s，振幅衰减率达到25%，异常深度段波形展宽明显，说明该区间混凝土密实性不足。施工单位针对Z2桩异常段开展低压水泥浆注浆加固处理，复检后声速平均值提高至4050 m/s，振幅衰减率降至11%，异常波形连续性得到改善，完整性等级调整为II类。

（二）检测结果与其他方法的对比评估

从桥梁桩身完整性评价的适配性来看，超声波透射法、低应变反射波法及静载试验所反映的工程信息各不相同。低应变反射波法依靠桩顶激励后反射信号推断桩身完整性，操作便捷，但深部缺陷信号易受桩周土阻尼、桩长及截面变化影响。以Z2桩异常段判读为例，超声波透射法借助3个声测剖面的声速曲线及波幅衰减变化，将夹泥及局部离析区间控制在设计桩顶以下约12.4 m至12.8 m，缺陷定位误差约为±10 cm；低应变反射波法对同一区

间仅能识别为中下部阻抗异常，定位误差约为±30 cm，边界识别能力相对不足^[5]。

静载试验更侧重承载性能评价，能够反映桩土共同作用下的竖向承载响应，却难以直接给出缺陷形态与深度范围。Z2桩注浆处理前，超声波透射法判定为III类桩，静载加载至6200 kN时沉降增长偏快，承载储备不足的评价倾向与完整性判读基本一致；注浆后复检声速平均值提高至4050 m/s，振幅衰减率降至11%，静载曲线也表现为沉降趋缓，说明超声波参数变化能够为加固效果判断提供较直接依据。综合来看，超声波透射法对深层缺陷及局部离析具有较强识别能力，适宜用于桥梁钻孔灌注桩质量控制；但该方法依赖预埋声测管，若管体堵塞、偏斜或耦合水状态不佳，检测剖面覆盖及参数可靠性会受到限制。

四、结语

超声波透射法在桥梁桩身完整性检测中能够形成较连续的深度方向声学信息，对夹泥、离析及局部缩径等隐蔽缺陷具有较好的识别能力。实际应用中，应重点控制声测管布设质量、管内清洁度、换能器同步升降和参数统一性，并结合声速、振幅、主频及波形特征进行综合判读。对异常区段还应通过加密测点、剖面对比和必要复检提高结论可靠性。该方法可作为桥梁钻孔灌注桩施工质量评价和缺陷处治效果验证的重要手段。

参考文献

[1] 周佳豪. 超声波透射法在大直径灌注桩桩身完整性检测中的应用研究 [J]. 现代工程科技, 2025, 4 (15): 129–132.
[2] 袁宝. 基于低应变反射波和超声波透射法的公路基桩完整性检测技术研究与应用 [J]. 科技创新与应用, 2025, 15 (20): 181–184.
[3] 毛强. 桥梁桩身完整性检测中超声波透射法的应用 [J]. 汽车周刊, 2025, (8): 70–72.
[4] 花兵. 超声波透射法在桥梁基桩完整性检测中的应用研究 [J]. 运输经理世界, 2025, (15): 80–82.
[5] 李洪远. 大直径灌注桩桩身完整性检测中超声波透射法的应用分析 [J]. 中国住宅设施, 2024, (5): 128–130.

机器视觉驱动的生猪三维建模及瘦肉率智能检测研究

曲明月, 郭媛媛, 王成全, 杨佳宁, 杨淑婷

黑龙江东方学院, 黑龙江 哈尔滨 150000

DOI:10.61369/ME.2026060003

摘 要 : 为实现对生猪瘦肉率的无损快速准确测量, 本文基于机器视觉技术展开生猪三维建模与瘦肉率智能化检测机理研究。综合应用三维视觉感知、点云数据优化与深度学习特征提取等方法, 解决生猪柔性体形变及养殖场景复杂性等问题, 提出生猪躯体三维重建算法, 挖掘生猪体表三维形状与瘦肉分布之间的映射联系, 构建了生猪瘦肉率端到端智能检测体系。本文克服二维视觉检测缺乏维度信息、特征稀少等不足, 并解决了普遍三维模型建立对生猪柔性躯干及其养殖场景适用性不足等问题。研究成果能够实现对生猪活体无损检测, 并可促进良种选育和精细化养殖管理, 为实现生猪养殖业的智能化和精准化提供助力。

关 键 词 : 机器视觉; 生猪三维建模; 点云处理; 瘦肉率; 智能检测

Research on 3D Modeling of Live Pigs and Intelligent Detection of Lean Meat Percentage Driven by Machine Vision

Qu Mingyue, Guo Yuanyuan, Wang Chengquan, Yang Jianing, Yang Shuting

Heilongjiang Oriental University, Harbin, Heilongjiang 150000

Abstract : To achieve non-destructive, rapid, and accurate measurement of lean meat percentage in live pigs, this paper explores the research on 3D modeling and intelligent detection mechanism of lean meat percentage based on machine vision technology. By comprehensively applying methods such as 3D visual perception, point cloud data optimization, and deep learning feature extraction, the paper addresses issues such as flexible body deformation of live pigs and the complexity of breeding scenarios. It proposes a 3D reconstruction algorithm for the pig's body, explores the mapping relationship between the 3D shape of the pig's body surface and lean meat distribution, and constructs an end-to-end intelligent detection system for lean meat percentage of live pigs. This paper overcomes the deficiencies of 2D visual detection, such as lack of dimensional information and sparse features, and addresses the issues of insufficient applicability of general 3D models to the flexible body of live pigs and their breeding scenarios. The research results enable non-destructive detection of live pigs and can promote the selection of superior breeds and refined breeding management, providing assistance for the intelligent and precise development of the pig breeding industry.

Keywords : machine vision; 3D modeling of live pigs; point cloud processing; lean meat percentage; intelligent detection

引言

生猪养殖是我国畜牧产业的主要构成, 在保障肉制品供应、带动农业经济增长等方面扮演着极为重要的角色。随着集约化、标准化养殖进程的推进, 对生猪品质控制精度的要求逐渐变高, 对生猪瘦肉率检测准确性及效率的要求也越来越严格。它不仅关系到良种选育、饲养调节, 而且还涉及商品猪分级等工作, 直接关系到整个生产系统的效率。随着机器视觉技术和人工智能的发展, 使畜禽活体无损检测有了新的研究方向。对于一般的物体来说都可以使用通用的三维建模方法去建模, 然而对于生猪的柔性躯体, 这些方法都不适用, 并且由于生猪的躯体在养殖现场存在一定的形变和复杂的背景等问题的存在, 采用常规建模方式所得到的模型效果很差。为此本文针对生猪进行了基于机器视觉的三维建模方法和处理点云数据的方案优化, 挖掘生猪三维体态与瘦肉率之间的内在联系, 进而实现基于该原理构建智能无损检测系统的设想。通过此方案解决已有技术存在的问题并为今后生猪养殖朝着智能化、集约化的趋势发展提供一定的借鉴。

项目信息: 本文系2024年度黑龙江省省属本科高校基本科研项目“基于多视角三维建模与机器视觉的生猪瘦肉率动态评估系统研究”。

作者简介: 曲明月(1999.02-), 女, 汉族, 内蒙古呼伦贝尔人, 工学硕士, 黑龙江东方学院信息工程学院助教, 研究方向: 机器视觉图像处理。

一、生猪瘦肉率传统检测技术缺陷分析

（一）人工感官检验的局限性

人工感官检测法是在基层养殖领域应用最广泛的瘦肉率检测方法，该方法是通过养殖场技术人员对生猪的躯体外形进行观看观察，并对手触摸生猪躯体肥瘦情况进行判断，再结合以往的养殖经验得出其猪的瘦肉率等级。这种检测方法不需任何的专业设备，操作比较简单方便，然而该检测方法的整体体系并不科学合理，不同的人有着不同的从业经历以及判定标准，针对同一只生猪所做出的评判也会有所不同，这就造成了人为性过强的现象，导致无法形成一个相对统一的品质评定^[1]。同时人工感官检测方式也只能对生猪的品质进行大体上的粗略分层，而不能对数值指标作出精确地检测，在选种和良种过程中，精准的质量检测就显得尤为重要，这样就不便于准确地选取品种的优良。长期的人工检测还会使人的身体疲惫度比较高，效率比较低，无法满足大规模养殖中大批量的同时检测的需求，因此也大大影响了生猪品质的检测与控制效率。

（二）屠宰检验的局限性

屠宰后胴体检测为现阶段最准确的传统检测方式，将屠宰后的生猪胴体进行分割测量、称重得出瘦肉在胴体中的比例数值作为其瘦肉率的值。这种实体测量计算方式消除了人为因素的影响，但是也存在难以弥补的应用不足之处，首先，其是破坏性操作，在检测之后的样本猪肉不能够进入市场出售，也不能做进一步的良种繁殖利用，仅限品质抽检之用，且难以实现对在养殖过程中进行活体生猪选育筛选^[2]。其次，操作比较麻烦，检测流程需经过宰杀、脱毛处理、分割、称重及计算等步骤环节，耗费时间长、人力成本大，其检测结果具有明显的滞后效果，难以针对实时检测养殖饲喂控制调整提供指导。再者由于批量的宰杀检验势必会消耗大量资源，增加饲养检测成本，违背降低现代化养殖户养殖成本，提高效益的原则。

（三）视觉检测技术存在的不足

近几年来视觉检测技术逐步应用到畜禽的品质检测领域，现有工作都是基于二维机器视觉进行检测研究，采集生猪正视图、侧视图等二维图像信息，利用长宽比、背部轮廓线、腹部松弛度等平面特征建立了瘦肉率的检测模型。但二维图像本身存在维度缺陷无法体现生猪躯体的立体结构特征，丢失了与瘦肉分布密切相关的躯体厚度、背部隆起弧度以及躯干立体饱满度等重要特征，特征表达单一导致模型泛化性能差^[3]。另外，二维视觉极易受拍摄角度、光照强度和生猪姿态等因素影响，在不同猪只姿态图像中差异较大稳定性欠佳。而目前少量的三维视觉研究均采用通用建模算法并未针对生猪具有柔性躯体易于形变且其形态不固定的特点进行相应的改进，面对复杂的现场环境干扰因素，模型重建精度较差噪声干扰明显无法满足精准检测的需要。

二、机器视觉生猪三维建模技术体系构建

（一）三维视觉图像采集系统设计

准确的图像数据采集为三维建模和瘦肉率检测奠定了基础，结合活体生猪的特性，本文选用结构光三维视觉设备构建了适合养殖通道条件下的无损图像采集装置。相比传统双目视觉相机而

言，三维结构光视觉采集系统可将光栅结构光主动投射于待测猪躯体表面且不会受到环境自然光的影响，能够精准捕捉待测物体表面的微细轮廓形状特征信息适用于现场光照变化、轻微粉尘影响等较复杂的实际场景^[4]。在实际采集的过程中考虑了活动猪特性，在较低的速度范围内设计了猪的通行轨道，并对通行过程进行了匀速控制以保证被测物体在测量过程中平顺运动而不会造成由于活体躁动、姿态剧烈变化带来的测量影响；同时采取多视角同步采集的形式从被测对象背部、两侧肩部等多个位置点对待测猪只进行同步的三坐标图像数据采集，从而充分地覆盖住猪的身体躯干部位，有效解决了单视图采集时所遇到的遮挡、遗漏现象，保障了采集到数据的完整与详尽为点云处理重建三维模型提供高质量的原始数据。

（二）生猪躯体点云数据预处理

三维视觉设备捕获的数据为生猪躯体的无序点云，包含大量的粉尘噪声、地面杂物、生猪轻微肢体晃动噪声以及视觉系统采集误差等背景噪声点和异常值，直接利用该类原始点云进行建模容易形成粗糙表面轮廓结构，并影响基于模型提取特征的准确性。为此针对生猪躯体的特性设计一套合理的点云预处理流程对原始点云数据进行净化与优化，首先采用直通滤波的方式过滤空间无关背景点云，将有效躯体点云分离并从点云数据中将地面、围栏环境信息过滤，定位生猪目标检测区域，其次采用统计滤波的方式去除离散孤立噪声值，将由于生猪活体小幅度晃动以及光线扰动带来的漂浮式点云剔除平滑躯体轮廓，最后采取点云降采样手段，在保持躯体基本的形状及立体感的同时精简冗余无效点云降低运算量并提高重建效率，在确保猪体三维特征不失真的情况下减少不必要的算法资源浪费。

（三）柔性躯体三维重建模型优化

猪只柔性活体躯体姿态多变且柔软易变形，基于刚性物体的通用三维建模算法不适用于生猪活体体型特征，容易导致重建轮廓线扭曲，曲面连接不光滑及模型细节丢失等问题。针对预处理后纯净点云数据，对适配于生猪柔性躯体的三维重构算法进行了改进，实现高保真生猪活体躯体的重建。采用点云配准方法对多视点云数据进行精确拼接，统一线、二、三等多维度采集空间坐标体系，在一定程度上解决了多视采集拼接产生的错位误差问题。根据猪只柔性牲畜身躯结构，使用曲面重构方法来补全与拟合稀疏点云，恢复重建了猪只身躯边缘区域及背部和腰肋等部位的主要缺失细节特征，建立了连接顺畅、光滑完整地表达猪肉动物躯体三维形态。针对头部、四肢部分等非关键检测区域做了轻量化处理，并主要保存身躯、背部富含瘦肉区段等地三维细节信息。在保证精确性地基础上提高了模型运算效率以满足实时检测的需求。

三、基于三维特征的瘦肉率智能检测模型构建

（一）瘦肉率关键三维特征提取

生猪瘦肉主要分布于猪背、腰肋及后躯部，三维躯体结构与其瘦肉含量和分布具有极其紧密的联系，不同于二维特征。三维

立体特征可完整表征生猪躯体肥瘦的本质区别，本文充分利用重建的生猪模型深度挖掘与之高度相关的特征参数，摆脱单一平面轮廓信息提取的桎梏，将重点放于立体特征上。本文着重从生猪躯干的立体厚度大小、背部曲面隆起度以及腰腹部丰满情况等与生猪瘦肉率高度关联的基本特征着手，并辅以躯体纵横立体比例关系以及躯干表面面积比体积、光滑性、对称性和平整性等一系列立体结构属性的辅助性特征，形成一个多方位多层次的全面描述瘦肉率特征集合。三维特征比起二维特征可以有效地将生猪由于脂肪层与瘦肉层的不同而带来的形态上的差别细致地区别开来，避免了平面检测不能分辨的一些细节，为准确检测瘦肉率提供了较好的特征基础。

（二）深度学习检测模型建立

为建立精确的三维特征与瘦肉率映射关系，本文利用深度学习算法搭建端到端检测模型，避免传统人工挑选和线性拟合的检测模式。以提取出生猪多源三维体态信息作为输入数据，运用神经网络对特征数据进行深入融合、优化，并挖掘各个三维特征在检测中的影响因子，降低无效因子影响，突出重要肥瘦特征表达能力。模型针对生猪体态差异特点进行了改进，实现自动适应不同体态及各个生长阶段的生猪体态信息变化规律，在提升泛化能力和稳定性方面表现卓越。同时简化了推理结构，提高运算逻辑速度，减少硬件依赖程度。提高了精度的同时加快了速度，满足规模化养殖实时大批量的检测需求。

（三）提高模型适应性和稳定性

面对复杂的养殖场景，随机的活体动物姿态和不同的生长状况对模型检测的适应性以及检测的稳定性都具有较高的要求。本文通过采集多场景、多个生长阶段生猪的数据样本进行训练迭代学习，其中包括各种不同光照环境和养殖环境、各种不同的体态、姿态的生猪三维样本数据，提高了模型对于复杂现场场景的适应能力。为解决由于站立、小幅度走动等不同姿态带来的三维特征差异性问题引入特征自适应校正机制，可以自动矫正因姿态带来的检测结果的影响，实现同一个生猪不同的姿态检测的一致性。提高对模型的抗干扰能力弱化环境细微噪声、躯体的小幅度形变对于结果的影响，解决了传统视觉检测模型稳定性差、场景适应能力不足的行业痛点问题。

四、研究应用价值与产业意义

本文研究的机器视觉生猪三维建模与瘦肉率智能检测系统完全打破了原有检测方式的技术束缚，实现了生猪活体、无损、高效、准确地检测，具有极强的实用性和可推广性。在养殖生产上通过该项技术不需要对样本进行屠宰，并且不需人工判定，在生猪生长的整个周期都能对其品质进行动态监控，可以根据生猪实时检测到的瘦肉率情况科学调整饲料配比、环境和管理措施，从而实现精细管理提高生猪的品质和经济收益；在良种选育方面通过对生猪精准的活体瘦肉率检测结果快速选出优良种猪并淘汰品质低下的种猪，提高生猪优良品种选育效率以及准确性，促进生猪的品种改良及培育优良品种。

在产业技术方面，破解了二维视觉检测、三维建模的产业技术难题，完善了畜禽活体三维智能检测技术链体系，为畜牧养殖智能化检测提供了全新的技术手段。促使生猪养殖业从经验化粗放式管控到数据化精准化智能化管控转型，减少人工检测消耗的人力物力资源，提升生猪养殖产业的标准化现代化水平，为整个畜牧业智能检测的产业升级提供强大的技术支撑。

五、结语

为解决传统生猪瘦肉率检测效率低下、精度不高等检测难题，结合损伤性与适配性等问题，在本文中主要以机器视觉技术作为核心展开对生猪三维建模技术研究并实现对生猪的瘦肉率智能检测工作。通过研究优化三维图像采集、点云数据处理以及柔性躯体的三维重建全过程中的关键技术有效解决了在复杂的养殖环境下对生猪活体进行三维重建精度不高这一系列问题，并通过利用多角度下的三维生猪体态特征及基于深度学习的模型实现了准确的猪瘦肉率智能化检测解决了二维视觉检测存在的缺陷。在本论文当中研究了完整的科学技术体系，且适用性比较强可以运用到生猪的精细养殖、良种培育以及肉制品分级等多种情形，这样可以推动养猪业发展朝着更加智能化方向前行。

参考文献

- [1] 朱永泉. 基于多目标检测的生猪姿态识别和跟踪研究 [D]. 山东农业大学, 2025.
- [2] 刘志涛. 圈养场景下生猪的检测追踪与行为分析研究与应用 [D]. 桂林电子科技大学, 2025.
- [3] 王顺利. 深度学习驱动的生猪姿态智能感知与语义生成技术研究 [D]. 山东农业大学, 2024.
- [4] 蔡文涛, 李子圣, 韩建宁, 杨凯. 计算机视觉技术在生猪健康监测中的应用研究进展 [J]. 黑龙江畜牧兽医, 2023, (24): 22-30.

瓜果搬运机器人自主导航技术研究与应用

张守兴, 李昂

海口经济学院, 海南 海口 571127

DOI:10.61369/ME.2026060006

摘 要 : 为有效提升瓜果搬运效率、精度, 本次研究中对瓜果搬运机器人自主导航技术进行研究, 将自主导航技术应用到瓜果搬运机器人中, 能够提升瓜果生产效率、降低劳动成本、提高搬运精度。瓜果搬运机器人自主导航技术主要包括基于多传感器一致性表述的多层次地图构建技术、基于多元感知数据的自主场景理解技术、搬运机器人基于学习的长期自主导航技术。本次研究在校园场景、种植场景应用瓜果搬运机器人自主导航技术, 以此进一步验证瓜果搬运机器人应用自主导航技术的可行性。

关 键 词 : 瓜果搬运机器人; 自主导航技术; 精度

Research and Application of Autonomous Navigation Technology for Fruit and Vegetable Handling Robots

Zhang Shouxing, Li Ang

Haikou University of Economics, Haikou, Hainan 571127

Abstract : To effectively improve the handling efficiency and accuracy of fruits and vegetables, this paper conducts a research on the autonomous navigation technology of fruit and vegetable handling robots. Applying autonomous navigation technology to such robots can boost fruit and vegetable production efficiency, cut labor costs and enhance handling precision. The autonomous navigation technology for fruit and vegetable handling robots mainly covers three parts: multi-layer map construction technology based on consistent representation of multiple sensors, autonomous scene understanding technology based on multi-source perception data, and learning-based long-term autonomous navigation technology for handling robots. In this research, the above autonomous navigation technology is deployed in campus and planting scenarios to further verify its feasibility when applied to fruit and vegetable handling robots.

Keywords : fruit and vegetable handling robot; autonomous navigation technology; precision

引言

智能化、自动化技术在农业生产中的应用, 为农业生产效率的提升创造条件。搬运作为农业瓜果生产过程中的重要环节, 其效果与瓜果生产效率存在直接关系, 传统的人工搬运瓜果的方式效率低下, 难以满足瓜果高效生产的需求。瓜果搬运机器人配合自主导航技术, 实现高效、精准搬运, 不仅大幅提升瓜果搬运的效率、降低人力成本, 还推动农业瓜果生产向智能化、现代化的方向发展, 对于提升瓜果生产效率具有重要意义。

一、瓜果搬运机器人自主导航技术的功能

(一) 提升生产效率

传统瓜果搬运方式以人工为主, 不仅效率低下, 还具有较大的劳动强度。瓜果搬运机器人在自主导航技术的支持下, 能够按照预设或实时规划路径在复杂环境中进行搬运作业, 使搬运时间大幅缩短^[1]。例如人工搬运瓜果效率为100kg/h, 而一台搬运机器人在自主导航技术支持下瓜果搬运效率为500kg/h, 使整体效

率提升4倍。大规模果园使用搬运机器人可实现连续工作, 在自主导航技术的支持下能够快速将采摘瓜果搬运到指定地点, 使瓜果搬运效率得到有效提升。

(二) 降低劳动成本

人工搬运瓜果不仅效率低下、劳动强度大, 还会产生较高的劳动成本, 使用瓜果搬运机器人不仅能实现高效搬运, 还能降低劳动成本。瓜果搬运机器人可连续工作, 减少对大量人工的依赖性^[2]。采用瓜果搬运机器人后, 果园人力成本得到有效降低, 在

减轻果园经营者经济负担的同时，还在一定程度上缓解了现阶段农业劳动力短缺的问题。瓜果采摘高峰期人工成本会大幅上升，而瓜果搬运机器人工作性能稳定，能够有效保证瓜果生产顺利进行，避免因劳动成本上升造成人力不足从而导致瓜果生产损失。

（三）提高搬运精度

瓜果搬运机器人在自主导航技术的支持下实现精准定位、搬运，大幅度降低因人工失误造成瓜果损坏风险。自主导航技术支持机器人精准路径规划、障碍物识别，使机器人在复杂环境中能够安全、稳定运行，有效保障瓜果搬运过程中的质量、完整性。果园中使用瓜果搬运机器人在自主导航技术的支持下，可精确避开树木、沟渠等障碍物，同时准确抓取、放置瓜果，避免瓜果在搬运过程中发生碰撞、挤压，使瓜果的品质得到保障^[9]。

二、瓜果搬运机器人自主导航系统设计

（一）环境感知

瓜果搬运机器人只有在精准感知周边环境的基础上，机器人才能按照果农发出的指令从事各项操作。环境感知层在瓜果搬运机器人的自主导航系统中占据核心地位，依靠物联网传感设备与激光雷达的瓜果转运机器人既能够感知周边环境的实时变化，还可以在紧急情况下启用智能避障装置，避免机器人发生比较严重的结构损坏。搭载自动摄影测量装置与激光雷达的瓜果搬运机器人还能自动识别障碍物、墙壁、货架等物体，在即将触碰这些物体表面时迅速转向。激光雷达探测仪器辅助下的瓜果搬运机器人还具备智能识别物体轮廓的功能，果农可以利用手机 APP 终端跟踪了解搬运机器人的移动路径，这样做可以避免机器人受到严重磕碰而导致损坏，在提升瓜果自动化转运效率的同时改善了机器人所在的作业环境。

（二）实时定位

瓜果搬运机器人在果园的作业空间中，需借助 GPS 实时定位系统感知附近障碍物，因此瓜果搬运机器人的自主导航系统不能缺少实时定位设备。例如，SLAM 算法支撑下的瓜果搬运机器人实时定位传感器能够提取地物的轮廓特征，并通过自动计算得出最优的瓜果转运路径。实时定位装置还可以帮助瓜果搬运机器人修正原有的行走路径，确保机器人始终处于正确的移动路径。基于物联网原理的实时定位装置一旦监测到瓜果转运机器人存在异常位移，则会立即发出报警提示音，通过发出尖锐鸣叫声提醒果农采取应急处置措施。因此，实时定位设备（通常为 GPS 智能定位仪器）应当视为瓜果搬运机器人自动导引系统的核心构成。

（三）路径规划

瓜果搬运机器人的自主导航系统除了具备自动规划路径、智能避障、实时定位等基本功能之外，该系统还可以结合果农提出的瓜果转运要求灵活规划路径。智能机器人在采摘或转运瓜果的过程中，经常会遇到瓜果突然掉落、行人在果树下方行走等突发情况。为避免瓜果转运中突发意外事故，配备自主导航与避障设备的智能机器人就会结合实际情况调整原有的瓜果运输路线，在尽可能缩短瓜果转运时间的基础上确保机器人实现平稳行走。为

达到“柔性”转运瓜果的目的，安装自主导航系统的机器人还会启动人工智能算法，从而在众多的瓜果转运路线中选取最适宜的一类路线。通过采取以上的机器人自主导航设计方案，能够明显节约瓜果转运成本并提升瓜果搬运效率。

三、瓜果搬运机器人自主导航技术的应用要点

（一）基于多传感器一致性表述的多层次地图构建技术

室外场景中搬运机器人感知数据具有多样性，为实现数据一致性表征，框架设计建立在多传感器联合标定、数据关联的基础上。采用拓扑地图模型开展全局环境表述，将拓扑节点场景拓展为多层次地图。采用点云加空间八叉树栅格模型作为数据层，尽管占用存储空间 5GB，但是能够丰富数据，为避障、路径规划提供支持，1000m² 瓜果搬运场景中，机器人避障成功率达到 95%。

基于多元融合数据特征提取的几何表述模型构建特征层，用于位姿估计、目标识别，在不同光照条件下进行的 100 次实验中，瓜果搬运机器人位姿估计误差均值为 0.2m；采用语义地图表述模型形成语义层，对 200 个场景语义分割准确率为 90%。在实际应用中多层次地图构建技术能够根据不同任务需求，对不同层次的地图信息进行快速切换、关联，以此为瓜果搬运机器人自主导航提供支持^[4]。

（二）基于多元感知数据的自主场景理解技术

传感器性能差异导致点云分布不平衡，使用投影变换算法将三维点云转化为图像。采用全卷积神经网络和基于卷积神经网络全连接条件随机场两种深度学习模型开展室外景物识别，全卷积神经网络融合多反卷积层与中间卷积层结果，采用 SoftMax 层分类对 500 张图像测试中对瓜果类物体识别准确率达到 85%。基于卷积神经网络全连接条件随机场模型挖掘深层特征，考虑像素语义关系，相同测试条件下对复杂背景下瓜果类物体识别准确率超过全卷积神经网络。两种模型互补能够使搬运机器人更加精准地识别不同场景下的瓜果、障碍物，为机器人自主决策提供可靠依据。

（三）搬运机器人基于学习的长期自主导航技术

（1）长期鲁棒重定位

长期鲁棒重定位可进一步分为拓扑节点层面全局定位、子地图内的局部精确定位。弱 GPS 环境下全局定位依赖场景识别，利用拓扑结构实现鲁棒全局重定位。局部精确定位利用三维激光扫描并借助背景信息实现场景配准，100 次实验中利用 NDT 技术求解位姿误差均值为 0.15m，并利用语义分割结果对配准精度进行优化。当瓜果搬运机器人长期运行条件的过程中，存在环境变化、信号干扰等问题，在长期鲁棒重定位技术的支持下，瓜果搬运机器人能够快速、准确确定自身位置，以此保证搬运导航的准确性^[5]。

（2）基于强化学习的智能运动规划

在端-端方式学习导航的支持下，输入连续 10 帧 RGB 图像，由机器人第一视角 RGB 图像表示目标位置。对于稀疏奖励问题提出基于内在激励的奖励函数学习法，在 200 次实验中机器人探

索未知区域比例显著提高，避免机器人徘徊在已经过的区域。基于强化学习的智能运动规划使机器人能够根据不同环境、任务需求，自主规划最佳路径，使瓜果搬运机器人的适应性、灵活性得到提升。

四、瓜果搬运机器人自主导航技术的应用场景

（一）校园场景应用

在海口经济学院校园的教学区、生活区等场景使用自主研发的配备三维激光雷达、可见光视觉、红外视觉、IMU等多种传感器，并搭载车载计算机的搬运机器人进行实验验证。将多元异构感知数据融合、三维环境建模与重构、大范围复杂三维场景多层次地图构建与维护算法的有效性、鲁棒性作为验证重点。表1所示为校园场景应用瓜果搬运机器人自主导航技术相关数据。通过对表1数据进行分析发现，校园场景实验中搬运机器人在教学区、生活区不同地形和环境下，均能精准检测障碍物，并构建高精度三维环境地图。通过融合多元异构感知数据，机器人能够更全面地了解周围环境，使导航的安全性、可靠性得到提高。构建多层次地图、维护算法能够以环境变化为依据及时更新地图信息，以此保证机器人正常运行。GPS技术原理下的自动导引机器人可以精准穿行于致密的树丛，并可以在复杂而崎岖的垄沟当中快速通过。智能机器人可以替代果农完成难度较大的“采摘被树冠或树枝遮挡果实”等操作，利用激光雷达实施自动定位的智能瓜果采摘机器人还具备自动避障的功能，通过灵活躲避田间或树丛内的障碍物避免破坏机器人的结构完整。

表1 校园场景应用瓜果搬运机器人自主导航技术相关数据		
测试项目	测试区域	具体数据
障碍物检测准确率	教学区2000m ² 区域	98%
三维环境建模与重构误差	教学区2000m ² 区域	平均0.3m
多层次地图构建时间	生活区1500m ² 区域	平均每平方米构建时间为2min
地图维护频率	生活区1500m ² 区域	每4h维护一次

2. 种植园场景应用

本次研究选取海南省琼海市共计10个多样化瓜果种植园区作为测试环境，对搬运机器人长期自主导航、复杂动态场景下自主场景理解算法的有效性、可靠性进行测试。表2所示为种植园场景应用相关测试数据。通过对表2数据进行分析发现，种植园场景应用中，搬运机器人在丘陵地形、平原地形、不同种植密度下等不同果园环境中，均能够实现长期自主导航。机器人能够准

确地识别出复杂动态场景下的瓜果类物体，当存在枝叶遮挡的情况下，机器人能够保持较高的识别准确率。当搬运过程中遇到动态障碍物时，机器人能够迅速做出反应并避障，平均避障时间为3s，有效降低碰撞事故发生风险。路径规划平均耗时较短，能够在短时间内快速、准确地规划最佳路径，使搬运效率得到有效提升。传统的瓜果采摘作业模式易受地表崎岖、自然气候变化等因素影响，不利于瓜果采摘的作业效率提升。但是在瓜果搬运机器人的自主导引技术原理下，智能机器人能够取代原有的手工劳动模式，还可以精准识别瓜果所在的位置与高度。复杂气候与地形环境下的自动采摘机器人不仅具备精准定位的功能，其还可以充当瓜果采摘过程中的搬运工：每当瓜果装满容器，智能机器人就会沿着预定路径将其搬运至背阴、避光的仓库内，或者直接将采摘下来的瓜果移动至货物集散点。自动导引机器人在完成以上各项操作后，还能自动返回采摘工人的身旁，重复实施瓜果转运作业。

表2 种植园场景应用相关测试数据		
测试项目	测试园区数量	具体数据
长期自主导航成功率	10个	92%
复杂动态场景下瓜果类物体识别准确率	10个	88%
平均搬运速度	10个（不同园区均值）	搬运400kg/h
应对动态障碍物平均避障时间	10个（不同园区均值）	3s
路径规划平均耗时	10个（不同园区均值）	5min

五、结束语

为瓜果搬运机器人应用自主导航技术，在现代农业生产中展现突出优势，具体表现为能够提升生产效率、降低成本、保障瓜果搬运精准度。自动导引机器人具备智能码垛的功能，这类机器人对采摘完成后的瓜果可以自动转运至指定的仓库地点，还能在瓜果采摘、运输与码垛模式之间实现灵活切换。在物联网控制中心的统一驱动下，智能码垛机器人能够与瓜果采摘机器人展开密切的配合，分别由两种机器人负责完成瓜果装卸、码垛、传送等方面任务。在视觉定位平台的支撑下，自动导引机器人在采摘、转运与存储瓜果全过程中的作业精度可达到毫米级，该模式显著提升了瓜果搬运作业的精准度，在确保瓜果外观完整、质量达标的基础上减轻果农的成本负担。为进一步发挥瓜果搬运机器自主导航技术的作用，在未来的研究中应当持续创新并完善技术、拓展应用场景，以此为农业生产创造更大的价值。

参考文献

[1]杨雪. 移动机器人导航技术的研究进展 [J]. 机器人产业, 2025(02):106-111.
[2]程鹏. 激光导航搬运机器人在煤炭采样中的应用 [J]. 煤炭加工与综合利用, 2025(02):95-99.
[3]赵斌, 马帅, 王浩. 基于深度学习的果园机器人场景识别与自主导航 [J]. 机器人, 2023, 45 (03):328-337.
[4]吴子岳, 徐立章, 王臻. 果蔬搬运机器人长期自主定位导航误差补偿方法 [J]. 农业装备与车辆工程, 2024, 62(02):45-50.
[5]李建桥, 许述财, 邹猛. 复杂农田环境下移动机器人多元感知数据处理方法 [J]. 农业工程学报, 2024, 40(07):168-176.

解析道路与桥梁工程测绘技术的应用

张炳艺

广东翔飞公路工程监理有限公司, 广东 广州 510000

DOI:10.61369/ME.2026060011

摘 要：道路与桥梁工程领域，测量测绘贯穿规划、施工、养护各阶段，是质量安全的重要保障。水准高程测量与全站仪坐标定位，是基础作业方式。GPS 静态观测、RTK 动态定位、数字化制图及遥感等新技术的应用，提升了外业效率与数据精准度。规划阶段侧重控制复测与地形图绘制，施工阶段聚焦中线放样、高程传递与桩位校验，运营阶段依托形变监测发出预警。工程实践表明，合理选用测量方法，严格落实复核制度，质量可控。

关 键 词：道路与桥梁；工程测量；测绘技术；全站仪；GPS

Analyzing the Application of Surveying and Mapping Technology in Road and Bridge Engineering

Zhang Bingyi

Guangdong Xiangfei Highway Engineering Supervision Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510000

Abstract： In the field of road and bridge engineering, surveying and mapping run through all stages of planning, construction, and maintenance, serving as an important guarantee for quality and safety. Level elevation surveying and total station coordinate positioning are basic operation methods. The application of new technologies such as GPS static observation, RTK dynamic positioning, digital mapping, and remote sensing has improved field work efficiency and data accuracy. The planning stage focuses on control re-measurement and topographic map drawing, the construction stage focuses on centerline setting-out, elevation transfer, and pile position verification, and the operation stage relies on deformation monitoring to issue early warnings. Engineering practice has shown that by reasonably selecting surveying methods and strictly implementing the review system, quality can be controlled.

Keywords： roads and bridges; engineering survey; surveying and mapping technology; total station; GPS

引言

道桥工程体量逐步增大，场地地形繁杂，通视条件不佳，测绘作业限制多。测绘技术是勘察设计的基础，也是施工质控的关键，关乎定位精准度与结构匹配度。线性工程贯通精度标准高，桥隧构筑物对空间定位依赖强。规划阶段需输出精准地形与控制成果，施工阶段放样校验，运营阶段形变监测。全站仪、水准仪、GPS 推广优化了作业模式，提高了精度效率。梳理各阶段应用重点，有助于规范流程，提升成果可靠性。

一、道路与桥梁工程测绘的基础方法与仪器应用

（一）水准仪高程测量的原理与操作

水准测量依靠水平视线测算两点间高差。已知点和待测点分别立尺，水准仪架在两点中间，读取后视与前视读数，读数差值即为高差。已知点高程与高差相加，可得待测点高程。水准仪由望远镜、管水准器、基座与脚螺旋构成。作业前先架好三脚架，调平管水准气泡，调焦使十字丝清晰。测点较远或高差较大时，设转点分段施测，累加各段高差。该方法简便稳妥，适用于路基加密、桥面高程及沉降观测。

水准测量应用在桥梁挠度与拱度观测中时，要在桥头或墩台

基础处设置永久水准点，选择夜间温度稳定、无车辆荷载的时段进行观测，通过测量桥跨中路面与墩顶桥面的高差变化得到挠度数据。为保证成果质量，作业过程须严格遵守操作规程，水准仪使用前需经检定合格，相邻水准点之间须做闭合检测，观测数据经平差处理后方可作为成果使用。

（二）全站仪的功能配置与测量方法

全站仪是集成电子测距、电子测角与数据处理功能的多功能测量仪器。它可单次完成距离、高差、水平角及垂直角测量，读数自动记录存储，能避免人工读数产生的误差。作业前需完成仪器参数设置。输入棱镜常数可校正测距数值，结合环境温度与气压，能修正大气折光带来的影响。仪器高与棱镜高需准确录入，

保障高程计算结果准确。全站仪设有精测、跟踪、粗测三种测距模式。照准目标棱镜后，选定对应模式启动测距，就能得到斜距、平距与高差数据。

开展高程测量时，全站仪有三种作业方式。经典方式是在已知高程点架设仪器，待测点高程为已知高程加仪器高、再减去棱镜高。对边测量可在任意点位设站，无需输入测站高程与仪器高。只需保持棱镜高度一致，测出两点间的三角高差，前后视读数的差值就是高差值。后方交会法需在未知点设站，测量两个及以上已知点后算出测站坐标，再通过三角高程推算待测点高程。针对精度要求高的关键部位，可将全站仪三角高程测量与水准测量相互核验，保障测量成果可靠。

（三）测绘仪器的精度控制与检校要求

测绘仪器的精度，直接决定测量成果的质量。水准仪 i 角误差、全站仪视准轴误差与指标差，都需通过定期检校消除。水准测量作业前，需校验圆水准器与管水准器，保证气泡居中止时视准轴保持严格水平。全站仪使用前，需完成补偿器零点误差、垂直指标差与水平视准误差的检校，并按规定周期送至检定单位完成计量确认。作业期间若仪器受到振动，或是经过长途运输，需重新完成检校后方可继续使用。

二、规划设计阶段的测绘技术应用

（一）控制测量体系的建立与复测

规划设计阶段的首要任务是建立覆盖全线的高精度控制测量体系。控制测量分为平面控制和高程控制两个系统。平面控制通常采用 GPS 静态相对定位方法布设 C 级网，沿线路每隔一定距离埋设标石，观测时长和卫星截止角须满足规范要求。D 级控制网则采用全站仪导线测量方式加密，以二级或三级测距精度分段施测，角度观测采用方向观测法进行 4 个测回，距离观测施行往返测量各 4 个测回。高程控制采用四等水准测量，沿线路布设水准点并执行闭合检测。控制点复测是核查交桩成果完整性的关键环节，测量人员须根据交桩清单逐一核对点位标志，对损坏或位移的点位须报告设计方并协商补设方案。

（二）地形测绘与中桩放样技术

地形测量为路线选线和桥位比选提供基础数据，测绘比例尺根据设计阶段确定。初步设计阶段采用 1:2000 比例尺地形图，方案比选阶段局部区域需测制 1:500 或 1:1000 大比例尺图件。测绘内容包括地物类别、地貌形态、水系分布和居民点位置。中桩放样则是将设计图纸上的路线位置实地标定。直线上中桩间距宜控制在 50m 以内，平曲线上因需精确反映线形变化，中桩间距应加密至 20m 以内。当地形平坦且曲线半径大于 800m 时，中桩间距可放宽至 40m；曲线半径介于 300m 至 600m 且缓和曲线长度介于 30m 至 50m 时，中桩间距应为 10m；曲线半径小于 300m 且缓和曲线长度小于 30m 时，中桩间距须小于 5m。

（三）桥涵与隧道工点的专项测量

桥梁选址测绘工作，除基础地形绘图作业外，额外开展河床地形测绘与水文数据采集。浅水河段，依靠全站仪极坐标定位，

人员手持测尺实测水体深度。宽阔干流区域，使用测绘船只搭载 GNSS 设备、测深仪器同步采集，整理河床断面相关数据。隧道测绘先搭建洞外控制网与洞内导线网，借助竖井、斜井把地面坐标引至地下区域，保障双向掘进的对接精准度。桥梁、涵洞水准观测点位，选在地基稳固区域布设，定时开展联合复测，规避地基沉降造成误差持续叠加。涵洞测绘重点核对进出口高程与规划纵坡是否匹配，防止完工后出现积水、排水受阻问题。

三、施工阶段的测绘技术应用

（一）路基开挖与填筑中的测量控制

路基工程施工前，测量人员须进行现场地原始地形复测，获取挖填方范围的准确地面高程。挖方段开工前，依据设计高程和边坡坡度计算开口线位置并实地放样。每开挖一个台阶深度，应恢复一次中线和边线，检查开挖轮廓是否偏移。开挖接近路床顶面 1m 范围时，须将高程点与高级水准点联测，严格控制路床设计高程的符合性。填方段施工采取分层填筑、分层检测的方式，每填筑一层即恢复中线与边线，测定压实层高程。当填筑高度达到路床顶以下 1.5m 时，依据纵断面和横断面设计数据进行加密控制。路床顶面完成后，须精确放样路基中心线和两侧边线，全面检测宽度、中线偏位、高程和横坡，各项指标合格后方可进入路面结构层施工。

（二）桥梁下部结构与墩台定位测量

桥梁下部结构测量以桩基和墩台定位为核心。测量前须依据设计图纸核对墩台坐标、支承高程和结构尺寸，确认无误后方可施测。桩基放样采用全站仪极坐标法，从控制点直接测设桩位中心，各桩位测设后须进行相邻桩距校核。承台开挖完成后，在基坑底部测设墩身十字中心线，作为模板安装和钢筋定位的依据。墩柱施工中，采用全站仪三维坐标法实时检查模板垂直度和顶部中心偏位，每节段浇筑前须对中线和标高进行复核。高墩施工时因摆动影响照准精度，宜选择无风或风速较小的时段进行观测，并采用强制对中装置减小仪器对中误差。

（三）桥面铺装与附属设施的高程放样

桥面铺装正式施工前，要在桥梁两侧护栏底座布设高程控制点。使用水准仪逐跨放样，划定铺装层标高控制标线。梁体徐变变形、预应力张拉作业都会改变梁体拱度，铺装层厚度要依据现场实测桥面高程实时调整，保证桥面纵坡、横坡契合设计指标。伸缩缝安装前，需核验预留槽口宽度、接缝两侧高差以及缝体中心线偏移值。伸缩缝安装完毕后，还要检测缝面的表面平整度。防撞护栏施工期间，通过加密高程测点，保障护栏顶面线形流畅顺直。施工中每 5 米检测一处断面，核对断面平面位置与顶面高程，确保实际线形与设计值的偏差处于规范允许范围内。

（四）施工过程测量复核制度的执行

施工阶段的测量复核制度，是保障施工精度的核心手段。每层土方填筑完毕、每道工序交接前后，均需开展测量自检。导线点与高程控制点每三个月开展一次全面复测，核查点位的稳定状态。若点位位移或沉降超出限值，须从高级控制点引测恢复。每

项分部工程完工后，测量人员须联合监理方开展验收测量，共同核对中线偏位、高程偏差与结构尺寸。复核中发现超差情况，须及时上报技术负责人并分析成因，整改后重新测量直至合格。

四、运行管理阶段与新型测绘技术的发展

（一）桥梁变形监测的内容与观测方法

桥梁投入运营后，在恒载、活载和环境因素共同作用下会产生变形。变形观测包括墩台沉降与水平位移、梁体挠度、墩台及梁体裂缝、桥墩周围河床冲刷等项目。沉降观测采用几何水准法，在墩台设置永久观测点，按固定周期进行高程测量。水平位移观测可采用视准线法或小角度法，观测桥墩顶部相对于底部的偏移量。对于跨径较大的柔性桥梁，宜采用 GNSS 动态监测技术获取连续位移数据。每期观测结束后，采用最小二乘法进行平差计算，将本次平差结果与首次观测值对比，判定位移量是否超过预警值。

（二）高边坡稳定性监测与数据判读

道路工程高边坡受地质构造和降雨入渗影响，存在蠕变和滑移风险。监测点布设在边坡坡口线以外 2m 处，向坡体内埋设深度超过 20m 的位移监测桩，同时安装测斜管和锚索测力计。观测从坡顶最高位置开始，按断面逐点检测地表水平位移、深层土体侧向变形和锚固力变化。边坡竣工后 1.5 年内属重点监测期，每 30 天进行 1 次固定桩位移观测。数据判读时，将当期位移速率与前期成果比较，若出现速率陡增或累计位移超限，须加密观测频次并发出预警。

（三）GPS 与 RTK 技术在变形监测中的应用

GPS 静态相对定位技术可实现毫米级精度，适用于桥梁控制网复测和长周期变形监测。在桥址区建立由多个监测点组成的 GPS 监测网，与基准点同步观测，通过载波相位差分处理获取各点三维坐标变化量。RTK 实时动态定位则用于短期施工监测和日常巡查中的快速位移检查，其水平精度可达厘米级，作业效率远高于传统方法。对于大型跨江跨海桥梁，可在主梁和塔顶安装

GPS 接收机，实现 24 小时连续监测，数据自动传输至控制中心进行分析处理。

（四）数字化测绘与遥感技术的发展趋势

数字化测图技术改变了传统手工绘图模式，野外采集的坐标数据直接传输至计算机，通过 CASS 等数字成图软件编辑处理，自动生成符合规范的地形图。数字摄影测量利用航空影像或卫星影像构建立体模型，可在室内完成大面积地形数据的采集，大幅减少外业工作量。遥感技术具有多光谱、多时相的优势，用于识别沿线地质隐患和水文变化，为工程选线和灾害防治提供宏观依据。信息化测绘体系融合了现代测绘基准、空间信息获取与网络化服务功能，推动测绘服务从被动供给转向主动支撑，正逐步成为道路与桥梁工程勘测设计的新型技术平台。

（五）测绘新技术综合应用的前景分析

从整体发展来看，道路与桥梁工程测绘技术正朝着数字化、自动化和智能化方向演进。多种技术的集成应用，如 GPS 与 GIS 结合构建工程信息数据库、遥感影像与数字高程模型联合用于路线优化选线，显著提升了勘测效率。全站仪与电子水准仪的普及使作业流程趋于标准化，减少了人为因素的影响。这些技术进一步降低了测绘作业的劳动强度，提高了成果质量的稳定性。测绘新技术在工程全寿命周期中的支撑作用日益突出，未来随着硬件设备精度提升和软件算法优化，道路与桥梁工程测绘的作业能力和服务水平将进一步提升。

五、结束语

道路与桥梁工程测绘贯穿建设全过程，是质量安全的基本依托。水准高程测量控制填筑与铺装精度，全站仪坐标法保障墩台与桩基定位。规划设计阶段严格控制网与中桩放样，施工建设阶段落实分层测量与工序复核，运营管理阶段依靠变形监测掌握结构状态。GPS 静态观测、RTK 动态定位及数字化成图显著提升外业效率。合理选用测量手段，规范操作，强化检核，保证成果的可靠。测绘技术向智能化演进，支撑作用日益增强。

参考文献

- [1] 唐超. 道路与桥梁工程测绘技术的应用解析[J]. 工程建设与设计, 2022(2): 162-164.
- [2] 田祥宝. 现代测绘技术在道路与桥梁工程的应用解析[J]. 电脑爱好者(校园版), 2020(23): 157-158.
- [3] 李宗友, 乔俊峰. 道路与桥梁工程测绘技术的应用解析[J]. 越野世界, 2025, 20(6): 211-213.
- [4] 师方廷. 道路与桥梁工程测绘技术的应用解析[J]. 空中美语, 2021(10): 4551-4552.
- [5] 周洪艳. 数字化测绘技术在工程测量中的应用[J]. 建筑与预算, 2025(12): 67-69.
- [6] 赵传奇. 测绘技术在道路桥梁工程中的应用[J]. 越野世界, 2024, 19(16): 179-180.
- [7] 程彬. 道路与桥梁工程测绘技术的应用解析[J]. 汽车博览, 2022(21): 157-159.

通信传输线路外力故障定位方法与闭环运维策略

—— 基于市政施工场景

程思远

山西通信通达微波技术有限公司, 山西 太原 030032

DOI:10.61369/ME.2026060015

摘 要 : 城市更新、道路改造、雨污分流等市政工程持续推进,施工机械开挖、路基碾压、管线交叉作业造成的外力破坏,已成为城区通信光缆中断的首要诱因。根据联通县域线路三年运维台账统计,市政施工引发的线路故障占全年故障总量 62.7%,频繁造成 5G 承载网、政企专线及公众宽带大面积中断,直接影响政务、民生通信稳定并增加运维赔付压力。基层通信运维长期采用被动抢修模式,存在故障定位慢、排查盲目、抢修流程不规范、隐患治理不彻底等问题,难以适应市政多点交叉施工的复杂场景。本文结合山西晋中灵石联通一线外线维修工作实际,系统分析市政施工光缆故障类型及成因,针对传统运维短板,依托 OTDR 检测技术与动态台账管理,构建故障快速定位方法,建立集隐患预判、精准定位、分级抢修、质量复核、溯源追责、长效防控于一体的闭环维修体系。通过灵石县新建街雨污分流改造工程 2025 年 4 月—10 月半年试点应用,该策略可将故障平均定位时长压缩 75%,整体修复时长缩短 44.8%,重复故障发生率下降 66.2%。研究成果可有效提升县域通信线路运维质效,为基层运营商管线防护与政企协同运维提供实践参考。

关 键 词 : 市政施工;外力破坏;通信传输线路;OTDR 故障定位;闭环维修;光缆运维

External Force Fault Location Method and Closed-Loop Operation and Maintenance Strategy for Communication Transmission Lines—Based on Municipal Construction Scenarios

Cheng Siyuan

Shanxi Communication Access Microwave Technology Co., Ltd., Taiyuan, Shanxi 030032

Abstract : Municipal projects such as urban renewal, road reconstruction, and rainwater and sewage diversion continue to advance. External force damage caused by construction machinery excavation, subgrade compaction, and pipeline crossing operations has become the primary cause of communication cable interruptions in urban areas. According to the three-year operation and maintenance ledger statistics of China Unicom's county-level lines, line failures caused by municipal construction account for 62.7% of the total annual failures, frequently resulting in large-scale interruptions of 5G bearer networks, government and enterprise private lines, and public broadband, directly affecting the stability of government and people's livelihood communications and increasing the pressure on operation and maintenance compensation. The long-term passive repair mode adopted by grassroots communication operation and maintenance faces issues such as slow fault localization, blind troubleshooting, irregular repair processes, and incomplete hidden danger treatment, making it difficult to adapt to the complex scenarios of municipal multi-point cross construction. This paper combines the actual work of front-line external line maintenance for Lingshi Unicom in Jinzhong, Shanxi Province, systematically analyzes the types and causes of cable failures in municipal construction, and addresses the shortcomings of traditional operation and maintenance. Relying on OTDR detection technology and dynamic ledger management, it constructs a rapid fault localization method and establishes a closed-loop maintenance system integrating hidden danger prediction, precise localization, hierarchical repair, quality review, traceability and accountability, and long-term prevention and control. Through a half-year pilot application from April to October 2025 in the rainwater and sewage diversion reconstruction project of Xinjian Street in Lingshi County, this strategy can compress the average fault localization time by 75%, shorten the overall repair time by 44.8%, and reduce the recurrence rate of failures by 66.2%. The research results can effectively improve the quality and efficiency of county-level communication line operation and maintenance, providing practical references for grassroots operators in pipeline protection and collaborative operation and maintenance between government and enterprises.

Keywords : municipal construction; external force damage; communication transmission lines; OTDR fault location; closed-loop maintenance; optical cable operation and maintenance

引言

城镇化建设过程中，市政基础设施改造工程常态化开展，县域城区通信光缆多沿道路、绿化带及综合管网敷设，与施工区域高度重叠，极易受到机械作业破坏。相较于线路老化、自然灾害等故障，市政外力破坏具有突发性强、破坏力度大、影响范围广的特点，是造成县域城市通信网络不稳定的核心人为因素。

县域传输光缆作为 5G 回传、政务专网、家庭宽带业务的基础载体，线路中断将直接导致大面积业务掉线，严重影响通信服务质量与运营商运维口碑。2025 年 4 月至 10 月，山西省晋中市灵石县新建街全线开展雨污分流道路施工改造，沿线主干光缆、管道光缆、架空光缆集中暴露在施工风险区域，同类外力故障集中爆发。当前县域基层运维班组仍依赖人工经验巡线排查故障，技术手段单一、流程体系不完善，同时政企施工信息互通不足、现场监护缺位、隐患整改流于形式，造成同类故障反复发生。

现有研究多侧重 OTDR 技术原理或宏观管线保护政策，较少结合县域一线抢修场景、雨污分流道路改造专项工程构建可落地的全流程闭环运维体系。本文基于灵石联通外线运维实际工作，从故障成因、运维短板、技术优化、体系建设、现场验证五个维度开展研究，形成一套适配县城市政雨污分流道路改造施工场景的标准化维修管控方案。

一、市政施工外力破坏线路故障类型及成因

（一）故障主要类型

结合 2025 年灵石县新建街雨污分流改造工程沿线外线故障抢修台账，市政施工引发的光缆损伤可划分为四类，各类故障处置难度、隐蔽程度差异显著：

第一类，机械开挖硬性断纤故障。为市政施工最严重故障，挖掘机盲目开挖沟槽、路基清表作业直接切断主干光缆、管道光缆，集中出现在新建街雨污管网开槽、基坑开挖现场，故障表象明显、告警触发迅速，但修复工程量、中断影响范围最广。

第二类，管道挤压隐性损伤。路基回填、路面碾压、管线顶管施工过程中，外力挤压导致塑料管道变形、光缆受压扭曲，出现单芯衰耗骤升、间歇性断连问题，无明显外观破损，仅表现为网络卡顿、丢包，依靠人工巡线完全无法识别，定位难度最高。

第三类，架空光缆刚蹭破损。道路拓宽、路面破除、大型建材吊装作业中，机械臂、脚手架刚蹭新建街沿线架空吊线与光缆，造成外护套开裂、纤芯微损伤，长期风吹震动后逐步发展为断线故障，属于滞后型隐患。

第四类，施工遗留次生隐患。沟槽开挖修复后未按照规范回填、未恢复光缆防护套管、未补设警示标识，裸露光缆长期受车辆震动、雨水侵蚀，数月后发生二次故障，是新建街同一路段重复故障的主要来源。

（二）故障成因分析

一是政企协同机制不完善。灵石县新建街雨污分流改造项目前期管线勘察不全面，施工单位未提前对接灵石联通获取光缆路由、埋深、接头信息，施工方案缺少管线专项保护措施，现场开挖作业人员不掌握地下通信管线分布情况。

二是现场施工管理不规范。施工单位重进度、轻安全，未落实“先探后挖、人工试挖”规范，依靠大型机械大面积野蛮开挖，新建街全线施工点位缺少通信管线警示防护与运维旁站监护。

三是运维前置防控不足。传统月度巡检模式无法匹配新建街

连续 7 个月高频次开挖施工节奏，缺少专项施工动态台账，高危开挖路段缺少提前布防与全程监护，隐患预判能力薄弱。

四是故障排查技术单一。基层运维过度依赖人工徒步巡线，未充分利用 OTDR 精细化测试手段，挤压类隐性故障排查效率低、耗时长，错过最佳修复窗口。

二、现有线路抢修运维工作短板

（一）故障定位效率偏低

传统故障排查以人工巡查为主，依托运维人员经验判断故障区间，新建街改造路段管线交错、路由复杂，人工排查盲目性大。尤其针对挤压衰耗类隐性故障，人工排查基本无法识别，平均定位时长普遍超过一小时，严重拖慢整体抢修进度。

（二）抢修流程缺少标准化

班组抢修无统一作业规范，资源调配、熔接作业、现场防护、隐患恢复流程不统一。主干光缆断裂重大故障存在设备、人员调配滞后问题，普通配线故障存在资源浪费、抢修不彻底等问题，维修质量参差不齐，返工情况频发。

（三）重现场抢修、轻事后管控，未形成闭环链条

多数基层运维的工作重心集中在“尽快恢复通信”，抢修完成、网络通断正常即视为处置结束，普遍忽略三大后续环节：一是没有留存完整故障检测数据、现场影像证据；二是未对违规施工单位开展责任认定与追责；三是未针对新建街事故点位更新防护方案、纳入重点巡检台账。最终导致新建街同一施工路段反复出现同类故障，运维投入陷入重复消耗。

（四）长效防控机制缺失，源头治理力度薄弱

短期抢修只能解决单点线路故障，无法从根源规避重复破坏。灵石联通与住建、城管、施工项目部缺少常态化沟通渠道，施工计划提前报备、联合现场交底、竣工联合验收机制不健全；新建街施工高发区域依旧沿用常规巡检频次，没有针对性提升巡检密度、优化硬件防护，长期运维风险持续累积。

三、市政施工故障快速定位技术优化方案

以 OTDR 检测技术为核心，联动光缆静态台账、市政施工动态台账，构建“机房端精准测距—台账交叉研判—现场分段核查”三级定位模式，从技术层面解决排查盲目性问题。

（一）OTDR 双向精细化测试

故障告警触发后，第一时间在就近机房对故障光缆两端分别开展双向 OTDR 测试，摒弃单一单向测距模式。一方面通过反射峰、损耗台阶精准测算断点、挤压损伤与机房的直线距离；另一方面通过波形细节区分故障类型：尖锐反射峰对应完全断纤，平缓损耗台阶对应光缆挤压、接头受损，微弱波动对应外护套蹭微损伤。结合光缆百米桩、接头盒记录，快速锁定 100m 以内故障区间，将模糊片区定位转化为精准里程定位。

（二）双台账交叉研判

完善两套动态更新台账：一是县城城区光缆静态台账，完整收录每一条光缆路由走向、埋深、管道编号、接头盒位置、架空杆路坐标；二是市政施工动态台账，安排专人每日对接灵石县住建、城管、街道办、新建街雨污分流项目部，汇总在建项目施工范围、开工工期、开挖方式、机械类型。故障发生后，将故障发生时间、OTDR 测算里程与施工台账交叉比对，优先锁定正在开展机械开挖的新建街施工点位，大幅缩减现场排查范围。

（三）分段分区现场核查

按照“由远及近、先高后低”原则，将锁定区间划分为若干小段，安排抢修人员分组核查。优先排查大型机械作业面、沟槽开挖段、管线交叉路口，快速排除无故障段落，最终确认精确故障点位；针对隐蔽管道损伤，辅以管道探测仪、地下管线探测设备复核，避免遗漏隐性故障。

四、六维闭环维修体系构建

针对灵石县新建街雨污分流改造施工故障特点，构建覆盖全流程的闭环运维体系，实现从被动抢修向主动防控转变。

（一）前置隐患预判

建立市政施工项目全周期摸排机制，新项目开工 3 个工作日内完成现场踏勘，核对施工范围与光缆路由重叠区域。针对一般施工点位布设警示桩、反光警示带、防护挡板；针对新建街全线大型开挖、路基破除等高风险工程，安排运维人员全程旁站监护，实时制止盲目开挖行为；提前梳理沿线老旧裸露光缆，在施工窗口期完成套管加固、局部路由迁改，从硬件层面提升抗破坏能力。

（二）故障精准定位

固化 OTDR 双向测试、台账比对、分段核查的标准化流程，纳入班组日常作业规范，杜绝人工盲巡，全面提升故障定位效率与准确率。

（三）分级标准化抢修

按照故障影响范围、业务等级划分三级抢修预案：

一级故障（主干光缆断裂、片区大面积断网、涉及政企应急

通信）：立即启动 24 小时应急抢修预案，半小时内集结抢修班组、全套熔接设备、备用光缆，优先保障政务、医疗、公安专线临时恢复，2 小时内完成主干应急熔接。

二级故障（配线光缆破损、小区、沿街商户断网）：30 分钟内人员到场，当日完成熔接修复、线路加固与全面测试。

三级故障（光缆微损、衰耗异常、仅存在故障隐患）：当日完成隐患整改，建立专项台账，连续三周跟踪复测。

统一编制《市政外力故障现场抢修作业规范》，规范现场安全防护、熔接指标、套管恢复、现场清理全流程。

（四）多层次质量验收

改变仅以通断为标准的验收模式，修复后通过 OTDR 复测衰耗指标、核查防护设施恢复情况、持续监测网络稳定性，留存影像及测试资料，建立可追溯故障档案。新建街所有故障修复点位全部单独归档，便于后期复查。

（五）违规溯源追责

对于人为违规施工造成的光缆故障，第一时间固定现场照片、视频、OTDR 检测记录等证据，对接新建街施工项目部、灵石县市政主管部门开展责任认定，依据《电信条例》《通信基础设施建设与保护条例》要求施工单位承担抢修费用、线路赔偿；组织施工方管理人员开展管线保护交底培训，明确违规开挖处罚标准，形成警示效应，杜绝同一施工班组重复违规。

（六）长效协同防控

建立灵石联通与县市政部门月度沟通机制，实现县域各类道路改造、雨污分流工程施工计划提前报备。按月复盘新建街故障数据，优化高危路段防护方案，对施工密集区域加密巡检频次，实现隐患常态化管控。

五、试点应用效果分析

本文体系于 2025 年 4 月—10 月在灵石县新建街雨污分流改造施工片区试点应用，以全线多条施工密集主干光缆开展实践验证，运维指标提升显著：

一是故障定位效率大幅提升，平均定位时长由 78 分钟缩短至 19 分钟，定位准确率提升至 98.7%；

二是整体抢修效率明显优化，平均修复时长下降 44.8%，重大故障应急处置能力显著增强；

三是重复故障有效治理，新建街同点位重复故障率由 31.5% 降至 10.6%，降幅达 66.2%；

四是运维成本持续下降，无效巡线、返工维修、故障赔付成本显著降低，县域运维精细化水平全面提升。

六、结论

市政施工外力破坏是当前县域通信线路运维的核心难题，传统人工抢修模式效率低、管控弱、隐患反复多发。本文结合灵石联通 2025 年新建街雨污分流改造一线运维实践，系统梳理故障成因与运维短板，建立基于 OTDR 精准检测的快速定位方法，构

建集预判、定位、抢修、验收、追责、防控为一体的闭环维修体系。经灵石县半年试点验证，该方案可显著提升故障处置效率、降低重复故障概率、优化运维质量，落地性强、投入成本低，适合山西省内各地市、县域联通基层运维班组推广应用。

未来可结合分布式光纤监测、无人机巡检、大数据预警等智能化手段，进一步提升外力故障预判能力，深化政企数字化协同，推动县域通信线路运维向智能化、精细化闭环管理方向升级。

参考文献

[1] 张健 .通信光缆线路外力故障排查与应急抢修策略 [J]. 通信技术, 2022,55 (08):102–107.

[2] 李宏伟 .城市市政施工对通信管线的破坏防控及运维管理 [J]. 工程技术研究, 2023,8 (12):189–191.

[3] 王磊 .基于 OTDR 技术的光缆故障快速定位方法优化研究 [J]. 数字通信世界, 2022 (09):56–58.

[4] 陈峰 .通信传输线路闭环运维管理体系构建与实践 [J]. 通信电源技术, 2023,40 (05):145–147.

[5] 李新美 .通信固网接入层光缆线路故障定位与维护策略 [J]. 工程技术研究, 2025,7 (12):137–139.

[6] 田振兴, 周亚单, 周建 .管道光缆施工损伤智能化防护与政企协同机制构建 [J]. 管道保护, 2026 (02):45–51.

[7] 孙中胜 .通信光缆线路常见外力故障及全周期维护探讨 [J]. 信息通信, 2019 (09):186–187.

[8] 王道明 .城市地下管线保护技术与市政施工协同管控研究 [J]. 工程管理前沿, 2025 (08):78–83.

[9] 赵宏波, 赵子岩, 丁健 .基于双向 OTDR 测试的长距离城区光缆线路故障精准测量 [J]. 光通信研究, 2011 (01):63–64.

[10] 国务院办公厅 .关于加强城市地下管线建设管理的指导意见 [国办发〔2014〕27号][Z].2014.

低空无人机侦测与反制一体化系统中的干扰资源动态分配策略研究

孙永茂

中国电子科技集团公司第十三研究所, 河北 石家庄 050051

DOI:10.61369/ME.2026060016

摘 要 : 低空无人机侦测与反制一体化系统, 是一条集成多种先进技术的综合性防御系统, 旨在探测、识别、跟踪并有效处置非法入侵、具有潜在威胁的无人机, 以保护特定空域及地面目标的安全。而干扰资源的动态分配, 则是无人机侦测反制系统效能提升、作用发挥的关键, 既需要依托侦测反制的技术原理以及动态多变的外部环境进行资源调整, 又需要结合无人机技术类型、附带损害风险及处置选择困境等进行技术优化, 从而让干扰资源动态分配方案更具实效性。文章结合低空无人机侦测与反制一体化系统中干扰资源动态分配的原理、问题, 提出科学合理的应对策略。

关 键 词 : 低空无人机; 侦测与反制一体化系统; 干扰资源; 动态分配; 策略

Research on Dynamic Allocation Strategy of Jamming Resources in Integrated Low-Altitude UAV Detection and Countermeasure System

Sun Yongmao

The 13th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Shijiazhuang, Hebei 050051

Abstract : The integrated low-altitude UAV detection and countermeasure system is a comprehensive defense system integrating multiple advanced technologies, aiming to detect, identify, track and effectively deal with illegally intruding and potentially threatening UAVs, so as to protect the security of specific airspace and ground targets. The dynamic allocation of jamming resources is the key to improving the effectiveness and performance of the UAV detection and countermeasure system. It not only needs to adjust resources based on the technical principles of detection and countermeasure as well as the dynamically changing external environment, but also needs to carry out technical optimization in combination with UAV technology types, collateral damage risks and disposal selection dilemmas, so as to make the dynamic allocation scheme of jamming resources more effective. This paper proposes scientific and reasonable countermeasures based on the principles and problems of dynamic allocation of jamming resources in the integrated low-altitude UAV detection and countermeasure system.

Keywords : low-altitude UAV; integrated detection and countermeasure system; jamming resources; dynamic allocation; strategy

引言

近些年, 无人机产业蓬勃发展, 广泛应用于物流配送、农林植保、地理测绘等多个场景中, 发挥出巨大的价值。随着无人机市场规模的攀升, 无人机产业作为低空经济的重要组成部分, 极大地推动了低空经济的发展^[1]。然而, 无人机技术的快速普及与应用也带来了一系列挑战。部分未经授权的无人机频繁闯入机场净空区、军事管理区等敏感区域, 严重威胁航空、公共及国家安全。制定低空无人机侦测反制一体化系统并优化干扰资源的动态分配策略, 有利于提升低空无人机侦测与反制效果, 提高低空安全防护质量, 为我国社会经济、治理及科技发展提供必要的支撑。

一、低空无人机侦测与反制一体化系统中干扰资源动态分配基础

(一) 侦测与反制系统搭建及信息交互逻辑

现阶段落地投入应用的低空无人机侦测反制一体化系统, 大

多搭建起涵盖目标捕获探测、多元数据处理、目标威胁评估、干扰资源调度决策、反制指令执行及干扰压制成效回传的作业运行机制, 以实现干扰资源的动态分配及有效调控。目标侦测端集成X波段脉冲多普勒雷达、宽带射频侦测阵列及光电跟踪伺服转台等传感硬件, 实时采集低空空域飞行目标的原始数据^[2]。多元数

作者信息: 孙永茂 (1989-), 男, 汉族, 河北石家庄人, 工程师, 主要研究方向: 微波射频电路。

据处理模块则依托卡尔曼滤波算法实现多传感器数据的时空配准校正，再借助联合概率数据关联算法实现多目标航迹匹配运算，同步滤除环境杂波带来的目标点迹。威胁评估模块则针对无人机威胁程度，针对性抵消观测数据中的随机噪声干扰。干扰资源调度决策模块，则依托智能优化求解算法实现干扰通道、发射功率等级、干扰波形的自适应匹配配置。执行单元接收调度模块的控制指令，向外输出射频压制、导航信号欺骗等反制信号。此外，效果反馈模块能够根据反制状态，自主启动新一轮的资源重配流程，实现对目标的再次反制。

（二）干扰资源类别划分及工程部署约束条件

结合低空侦测反制一体化系统的布设工况，我们可以按照电磁信号的作用机理，将干扰划分为全球卫星导航系统类干扰、GNSS导航欺骗类干扰、无人机遥控上行通信链路压制、航拍图像下行传输链路压制、飞行器飞控通信协议劫持干扰等。但无论哪种干扰资源，均遵循以下约束条件。首先是频谱合规管控。设备对外发射电磁信号的工作频段，不得侵占民航测距仪 DME 频段、机场塔台 VHF 甚高频指挥调度频段及民用移动通信频段范围。其次，硬件发射能力。单台干扰设备的射频通道相互独立，难以实现跨目标复用，整机对外发射总功率存在上限，运行过程中不允许超出额定阈值^[3]。最后，空间电磁兼容约束。多台设备同步工作时，设备间必须达到规范规定的电磁兼容指标，高灵敏度侦测传感器还需配备波束零陷抑制方案，防止设备自扰带来的侦测功能失效现象。此外是系统时延响应。从系统完成目标识别确认，到干扰配置参数下发至射频发射终端，全流程总处理延迟不得超过 300ms 限值。

（三）动态干扰资源分配的基础数学建模

围绕干扰资源动态分配这一目标搭建标准化优化模型。即选取任意运行时刻 t ，将所有威胁无人机整合为目标集合 $T=\{T_1, T_2, \dots, T_i\}$ 。系统可调用的干扰资源构成集合 $R=\{R_1, R_2, \dots, R_j\}$ 。设备干扰波形组成波形集合 $S=\{s_1, s_2, \dots, s_k\}$ 。设置二元决策变量 $x_{ijk} \in \{0, 1\}$ ，变量取值为 1 时，代表将第 j 台干扰设备的第 k 路射频通道分配至第 i 个入侵目标；变量取值为 0 时，则代表该路射频通道不会针对目标发射干扰信号^[4]。同时，模型选取三项核心指标构建优化求解目标函数，即提升对低空无人机的干扰压制效果，降低干扰信号对周边电磁设备的附带干扰，减少反制设备连续运行产生的能耗。此外，模型约束条件完整覆盖射频通道独占使用规则、设备发射功率上限及频谱合规使用规范等限制条件，能够帮助人们构建出多维度、多约束的 NP-hard 组合优化数学模型，为后续算法迭代、资源调度策略设计提供支撑。

二、低空无人机侦测与反制一体化系统中干扰资源动态分配问题

（一）多约束协同优化引发计算规模爆炸，求解实时性难以达标

各类干扰设备动态分配调度的数学模型，本质归属于二维匹配类组合优化范畴。系统可选可行调度方案总数会随来袭目标

数量、可用干扰通道规模同步上升，整体增长趋势呈指数级放大^[5]。当目标数目 I 不低于 8 时，同步启动的干扰单元数量 J 达到 4 及以上时，该优化模型完整解空间体量将突破 10^4 量级。依靠传统穷举算法以及通用线性规划求解工具运算速度优先，难以满足毫秒级决策的硬性要求。与此同时，模型叠加单通道资源独占、空域隔离管控、频段禁用区间等约束条件后，原本连通的可行解集会被切分为大量互不连通、零散分布的离散子空间。当前广泛应用的通用智能寻优算法并未结合低空防御作战的约束条件实现针对性改造，算法迭代寻优环节经常出现收敛速度缓慢、最优解搜寻偏离有效可行域等短板，难以满足实践场景对决策响应延迟的要求。

（二）多维度目标威胁量化划分边界模糊、评估体系存在固有偏差

实现干扰资源差异化分配的基础，是精准区分各无人机目标的威胁程度。传统威胁评估仅依靠探测环节采集目标的飞行距离、移动速度等表层参数完成等级划分，并未纳入载荷任务载荷类型、行动情景及飞行器抗干扰承受能力等影响因素。多数评估指标难以借助探测传感器直接输出精准量化数据，数据采集过程持续伴随随机观测噪声及设备测量偏差。传统层次分析法采用规定权重打分机制，其遵循的误差浮动范围较小，极易出现目标危险等级误判的现象。而威胁分级出现偏差会导致干扰资源分配失衡，即高风险目标分配的干扰信道、发射功率储备不足，低风险无人机反而占用大量稀缺电子对抗资源，进而导致低空无人机侦测反制成效不高。

（三）静态单向资源调配缺少闭环修正机制，动态对抗中压制效果衰减

主流干扰资源分配策略均属于静态单向规划框架，尚未构建基于反馈修正调度参数的调控逻辑。现阶段，量产工业无人机、FPV 突击无人机普遍集成调频扩频通信、惯性导航、视觉自主规避等抗干扰模块，若全程沿用固定干扰波形、恒定发射功率参数开展反制，电磁干扰效果会明显下降。在多次目标连续突防、单目标威胁程度剧变、多类电磁对抗场景同步耦合的复杂条件下，现有的调度策略缺少分级处置逻辑及资源动态重组机制，容易出现多条调度指令相互冲突、干扰功率无效损耗、目标拦截失效等问题，严重影响侦测反制一体化系统的价值彰显及功能发挥。

三、低空无人机侦测与反制一体化系统中干扰资源动态分配策略

（一）融合模糊贝叶斯修正机制的多维度威胁量化评估模型

当前主流威胁度计算模型难以处理空域中各类不确定扰动因素，模型自身的容错能力与抗干扰性能存在短板。为此，我们需要构建一套融合多维度特征参数的模糊贝叶斯威胁量化评估分析框架。研究筛选五项能直观体现来袭目标危险程度的评价指标，分别为目标距离防护区域的直线间距、目标径向逼近速率、瞬时飞行海拔、无人机机型类别及机身挂载的外挂负荷等。随后针对

各项指标构建统一标准化特征映射函数，依托层次分析法完成各指标初始权重的赋值，同步配套一致性检验环节，避免权重分配失衡导致评估结果出现偏差。对于载荷类型、入侵意图等难以依靠传感器识别、量化的模糊特征，需采用模糊推理算法完成指标模糊化转换，再借助贝叶斯概率迭代更新思路，动态调整各维度的威胁权重，从而缓解传感器测量误差、目标特征信息缺失等外部干扰给评估结果带来的数值偏移。模型最终输出归一化威胁量化数值（ ω_i ），数值取值范围固定为 [0,1]，结合区间范围划定三级风险判定标准。即当 $\omega_i > 0.7$ 时判定为高威胁目标；当 $0.3 \leq \omega_i \leq 0.7$ 时，判定目标为中等威胁；当 $\omega_i < 0.3$ 时，统一归类为低威胁目标，而该分级结果可直接作为干扰资源分配优先级的判定依据，提高侦测反制一体化系统的应用效能。

（二）引入电磁兼容约束条件的自适应并行遗传算法

如果将传统并行遗传算法应用于低空无人机侦测反制一体化系统中，会出现电磁约束匹配度不足、最优解求解精度偏低、迭代收敛速度缓慢等现实问题。为此，我们以标准并行遗传算法为基础，结合低空反制场景设计可自适应调整约束条件的遗传运算方案，实现多重电磁限制条件下最优干预分配方案的快速求解。首先，自定义染色体编码结构并增设约束前置初始化规则。构建由目标编号、干扰通道序列号、干扰工作模式、实时发射功率档位四项参数组成的染色体编码结构。种群初始化环节直接嵌入频谱禁用频段、设备最大发射功率、通道独占使用规范等硬性约束。其次，对遗传算子进行自适应重构优化。设计能跟随迭代轮次、种群内违规个体占比自动调整的交叉、变异概率参数。迭代前期适当放大两项参数取值，拓宽全局侦测覆盖范围。迭代后期下调参数数值，聚焦局部空间完成精细化寻优。新增电磁兼容约束修正算子，针对迭代过程中出现频谱重叠挤占、发射功率超限、多设备通道抢占冲突的个体完成参数修正，相较于传统仅通过惩罚系数约束违规个体的处理方式，能有效提升最优分配方案在种群中的生成比例。最后搭建环形孤岛并行进化架构。选用环形拓扑搭建孤岛并行进化系统，各子种群独立完成迭代运算，按照固定周期交换种群内部最优个体，同时兼顾全局大范围侦测与局部巡游两类需求。搭配精英个体留存策略，避免迭代过程中已

获得的最优分配方案丢失，算法性能衰退，确保全迭代周期内算法运行稳定。

（三）基于动态权重势博弈的分布式协同资源分配模型

集中式资源调度算法运行过程高度依赖中心控制节点，中心设备一旦出现单点故障，调度体系便会陷入瘫痪。多节点间海量数据交互极易造成通信信道拥堵。为此，我们需要搭建分布式势博弈协同调度框架，适配多台干扰发射设备阵列协同作业的调度需求。一方面将单台干扰发射设备作为博弈参与主体，重新设计改进型势函数，函数内部嵌入可动态更新的目标威胁权重、电磁附带损伤惩罚项、干扰硬件资源占用约束三类变量，摒弃传统博弈模型势函数权重恒定不变的设计思路。完整数学推导结果证明，本文优化后的势函数具备最佳响应收敛性，算法迭代流程能稳定收敛至纯策略纳什均衡状态，解决原有博弈模型收敛曲线震荡、威胁优先级匹配效果不佳等缺陷。另一方面，整体调度流程无需中心节点统一下发控制指令。各干扰设备仅依靠自身采集数据、周边设备资源占用状态、当前干扰压制效果反馈三类信息，持续迭代优化调度策略。整体流程仅需完成 10-15 轮轻量化广播交互迭代，多台设备便可形成全域协同调度统一方案，有效降低设备间数据传输时延，从底层架构维度，规避单点失效引发调度体系崩溃的风险。此外，配套设计自适应空域零陷调控机制。针对民航通信频段、公共移动通信网络等需重点防护的传输方位，自适应生成波束零深不低于 30dB 的信号抑制区域，从信号发射层减少干扰设备引发的额外电磁附带损伤。

四、结语

“黑飞”无人机是影响公共安全、国家安全以及社会治理的新挑战，低空无人机侦测与反制一体化系统的建设能有效应对动态场景下、多技术形态的无人机“黑飞”困境，及时响应、快速反制、有效降低无人机黑飞所带来的各类风险，而在干扰资源的动态配置下，又能充分应对各类环境挑战，提高无人机反制效能。随着时代发展，相信越来越多技术将融入无人机侦测反制一体化系统中，成为干扰资源动态分配的有力支撑。

参考文献

- [1] 金海佳，袁伟杰，伍军. GNSS 拒止下低空无人机导航与资源分配优化 [J]. 中兴通讯技术, 2026, 32 (2): 36-42.
- [2] 易晓俊，杜翠凤，张欢. 面向低空无人机通信感知场景的基站动态波束赋形方法研究 [J]. 广东通信技术, 2026, 46 (3): 50-56.
- [3] 夏昊，林粤伟，颜军，等. 通信感知一体化低空无人机关键技术研究综述 [J]. 电讯技术, 2025, 65 (6): 838-847.
- [4] 赵川斌，张腾宇，冯源，等. 面向低空无人机的通感一体化关键技术及原型验证研究 [J]. 物联网学报, 2025, 9 (2): 27-38.
- [5] 王明波. 低空无人机组网的 5G 通信算法优化 [J]. 中国宽带, 2023, 19 (11): 115-117.

智能传感与 AI 融合的建筑结构健康监测系统应用研究

林佳森

广东省电信规划设计院有限公司，广东 广州 510630

DOI:10.61369/ME.2026060017

摘 要： 针对传统建筑结构健康监测存在数据采集精度低、噪声干扰大、损伤识别滞后、风险预判能力不足等问题，本文构建一种智能传感与人工智能（AI）深度融合的建筑结构健康监测系统。系统依托多类型智能传感网络实现建筑结构应变、振动、沉降、温湿度等多源状态参数的实时采集，结合 CNN-LSTM 混合深度学习算法完成传感数据降噪、特征提取、结构损伤识别、定位与趋势预测，突破传统监测技术依赖人工研判、被动运维的局限。通过搭建“感知—传输—分析—预警—运维”一体化监测架构，实现建筑结构健康状态的动态评估、早期风险预警与智能化运维决策。

关 键 词： 智能传感；人工智能；建筑结构；健康监测；损伤识别；全生命周期运维

Application Research on Building Structure Health Monitoring System with Integration of Intelligent Sensing and AI

Lin Jiasen

Guangdong Planning and Designing Institute of Telecommunications Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510630

Abstract： Aiming at the problems of low data acquisition accuracy, large noise interference, delayed damage identification and insufficient risk prediction ability in traditional building structure health monitoring, this paper constructs a building structure health monitoring system with deep integration of intelligent sensing and artificial intelligence (AI). The system relies on multi-type intelligent sensing networks to realize real-time acquisition of multi-source state parameters such as strain, vibration, settlement, temperature and humidity of building structures, and combines the CNN-LSTM hybrid deep learning algorithm to complete sensing data denoising, feature extraction, structural damage identification, localization and trend prediction, breaking through the limitations of traditional monitoring technology that rely on manual judgment and passive operation and maintenance. By building an integrated monitoring architecture of "perception-transmission-analysis-warning-operation and maintenance", dynamic assessment of building structure health status, early risk warning and intelligent operation and maintenance decision-making are realized.

Keywords： intelligent sensing; artificial intelligence; building structure; health monitoring; damage identification; life-cycle operation and maintenance

引言

随着我国城镇化建设的持续推进，超高层建筑、大跨度场馆、异形复杂建筑等工程大量投用，同时存量建筑逐步进入老龄化服役阶段，结构开裂、构件老化、不均匀沉降等安全隐患频发，建筑结构安全运维压力持续增大。传统建筑结构健康监测多采用人工定期巡检、单点机械式传感监测模式，存在监测数据碎片化、采样频率低、抗干扰能力弱等缺陷，难以捕捉结构瞬时异常状态与细微损伤演化规律，且数据分析依赖人工经验，主观性强、滞后性明显，无法满足现代建筑智能化、精细化、主动式安全运维的需求。智能传感技术与人工智能技术的快速发展，为建筑结构健康监测（Structural Health Monitoring, SHM）的智能化升级提供了全新路径。智能传感网络可实现建筑结构多维度、全天候、高精度数据采集，突破传统监测的空间与时间局限；AI 深度学习算法具备强大的时序数据特征挖掘、非线性拟合与故障识别能力，可有效破解多源传感数据耦合干扰、损伤特征隐匿、劣化趋势难预判等技术难题。

一、传统建筑结构健康监测局限性分析

局限性如下：

传统建筑结构健康监测体系以人工巡检、离线检测和单点传感监测为核心，在现代复杂建筑运维场景中存在显著短板，具体

一是数据采集维度单一、精度不足。传统监测多采用单点应变计、沉降仪等机械式传感器，仅能实现单点、低频数据采集，无法全面覆盖建筑主体结构、关键节点的受力与变形状态，且易

受环境温湿度、振动噪声干扰，数据失真率较高，难以反映结构真实服役状态。

二是数据处理智能化程度低。传统监测数据依赖人工统计、拟合分析，仅能完成简单数据比对，无法挖掘海量时序数据中隐匿的结构损伤特征与劣化规律，对早期微损伤、隐性损伤的识别能力极差，极易出现漏检、误检问题。

三是监测模式被动滞后。传统监测以定期巡检、事后故障排查为主，缺乏实时监测、动态研判和提前预警能力，无法实现结构损伤演化趋势的预判，难以提前规避结构安全风险，运维成本高、安全保障能力弱。

二、智能传感与 AI 融合的监测系统总体架构

（一）感知采集层

人工智能 (AI) 的迅速发展为建筑环境与能源应用工程 (建环) 专业带来了新的机遇。智能传感技术是实现建筑环境与能耗智能管理的重要技术,是建环专业跨学科融合的重要切入点。^[1]感知采集层是系统的数据基础,采用多类型智能传感器组网方案,根据建筑结构受力特征与关键监测点位,针对性部署高精度传感设备,实现多维度参数全天候实时采集。主要部署传感器包括:光纤应变传感器、高精度振动传感器、激光沉降传感器、温湿度传感器、倾角传感器等,分别采集结构应变、振动频率、竖向沉降、环境参数、构件倾角等核心状态数据。

相较于传统机械式传感器,智能传感器具备精度高、响应快、抗干扰能力强、功耗低等优势,可适配建筑复杂工况,实现分布式、全覆盖组网,有效解决传统监测数据碎片化、精度不足的问题,为后续 AI 智能分析提供海量、高质量时序数据支撑。智能传感技术在绿色建筑施工中显著提升了能耗管理效率。数据显示,与传统建筑相比,采用智能传感系统的实验建筑在施工期间平均日耗电量降低了 18.7%,从原来的 550kWh 降至 447kWh。^[2]

（二）数据传输层

将感知层采集到的数据通过 无线或有线方式传输到数据处理平台。该层依赖于各种通信技术,包括 Wi-Fi、Zig Bee、NB-IoT、LoRa、5G 等,是物联网信息传输的桥梁。^[3]数据传输层采用“无线物联网+边缘传输”模式,整合 LoRa 无线通信、5G 传输、边缘计算网关技术,构建稳定、高效的数据传输通道。各传感节点采集的实时数据经边缘网关完成初步降噪、筛选、压缩处理,剔除异常干扰数据,再通过 5G 无线网络上传至云端数据平台,既降低云端数据运算压力,又保障数据传输的实时性与稳定性,有效避免数据延迟、丢失等问题,满足建筑结构实时监测的需求。同时,系统搭建标准化数据接口,实现多源异构传感数据的统一归集与格式标准化处理。在数据感知层面,绿色材料的结构适配性成为关键,其表面微观结构与力学性能需满足智能传感器、自动化设备的安装要求,保证各类感知元件能够精准嵌入并

稳定运行,为建筑信息系统采集环境数据提供物理支撑。^[4]

（三）智能分析层

智能传感技术通过多模态数据采集网络与闭环控制 逻辑重构绿色建筑施工管理模式,环境监测模块实现温 湿度梯度与粉尘噪声的毫米级空间分辨率调控。^[5]智能分析层是系统的核心核心功能模块,依托 AI 深度学习算法实现监测数据的深度挖掘与智能研判。本文构建 CNN-LSTM 混合深度学习模型,融合卷积神经网络 (CNN) 的空间特征提取能力与长短期记忆网络 (LSTM) 的时序特征分析能力。智能传感技术在施工安全与质量管控里起着关键作用,意义重大于施工安全和质量管控领域。^[6]其中,CNN 模块负责对多源传感数据进行空间维度特征提取、数据降噪、异常特征筛选,精准捕捉结构局部损伤对应的参数突变特征;LSTM 模块负责分析监测数据的时序演化规律,挖掘结构性能劣化的动态趋势,实现结构损伤定位、损伤程度评级、劣化趋势预测。同时,搭建结构健康评估指标体系,结合建筑设计规范与服役标准,自动判定结构健康等级,实现从“数据采集”到“状态研判”的智能化转化。

（四）预警应用层

随着物联网技术的迅速发展,建筑物的对智能化的要求越来越高,智能传感器在建筑工程中的合理设计、布置日益重要。^[7]预警应用层面向工程运维实际需求,集成数据可视化、分级预警、智能决策、数据追溯等功能。系统将 AI 分析后的结构健康数据以动态曲线、云图、报表等形式可视化展示,直观呈现建筑结构整体与局部健康状态;设置多级风险预警阈值,当监测参数超出安全范围或 AI 模型识别到潜在损伤风险时,自动触发声光预警、短信推送、平台弹窗预警;同时结合损伤类型、位置与程度,智能生成运维整改建议,形成“监测-分析-预警-运维”的闭环管理体系,为建筑运维人员提供精准、高效的决策支撑。

三、系统核心关键技术

（一）多源智能传感组网与数据融合技术

自动化与智能化施工技术是一种基于自动化设备和智能化算法的关键数字化技术,用于提高绿色建筑减排施工过程的效率、质量和安全性。^[8]针对建筑结构监测多参数、多点位、强干扰的特点,本文采用分布式智能传感组网方案,根据建筑结构力学特性,在主梁、柱体、楼板、支座等关键受力构件布设传感节点,实现结构关键部位全覆盖监测。针对温湿度、环境振动等外界干扰因素导致的传感数据噪声问题,采用多源数据融合算法,对应变、振动、沉降、环境参数进行关联耦合分析,剔除环境干扰噪声,修正监测数据误差,大幅提升数据精准度。相较于单一传感监测模式,多源传感融合技术可全面反映建筑结构的真实服役状态,为 AI 模型训练与精准研判提供可靠数据支撑。集成式智能传感技术是将传感元件、测量电路和各种补偿元件等集成在一块芯

片上，通过信息共享、协同感知和数据融合，实现对建筑结构多维状态实时监测与智能分析的一种技术体系。^[9]

（二）CNN-LSTM混合 AI 智能识别模型

传统数据分析算法难以处理海量、非线性、时序性强的建筑监测数据，对早期微损伤识别精度低。本文构建的 CNN-LSTM 混合模型，兼顾空间特征提取与时序趋势分析双重优势。CNN 通过卷积层、池化层完成传感数据的空间特征提取，筛选结构损伤对应的异常数据特征，实现损伤精准定位；施工安全监测领域广泛应用了智能检测技术，实时感知的对象包括应力、位移和环境参数等，是潜在风险识别的关键。^[10]LSTM 通过记忆单元捕捉监测数据的长期时序变化规律，规避传统算法梯度消失问题，精准预测结构性性能劣化趋势。通过实测样本数据训练、模型迭代优化，该模型可有效识别结构开裂、沉降超标、振动异常、构件变形等各类损伤问题，相较于单一 CNN、LSTM 模型，损伤识别准确率提升 10% 以上，预判精度显著提高。

（三）多级智能预警与全生命周期溯源技术

系统依据《建筑结构荷载规范》《混凝土结构耐久性设计标准》等行业规范，结合建筑结构设计参数与服役年限，设置正常、关注、预警、危险四级风险阈值，实现结构健康状态分级研判。针对不同等级风险，匹配差异化预警方式与运维方案，保障风险处置的及时性与针对性。同时，系统搭建建筑结构健康数据库，全程留存监测数据、损伤记录、预警信息、运维记录等全生命周期数据，支持数据溯源、趋势复盘、状态对比，为建筑结构耐久性分析、老化规律研究、后期改造加固提供数据支撑。

四、工程应用与结果分析

（一）工程概况

为验证本文系统的实用性与可靠性，选取某高层商住建筑作为工程应用对象。该建筑总高度 98.6m，地上 32 层，地下 2 层，为钢筋混凝土框架-剪力墙结构，投入使用 8 年，存在局部构件老化、长期荷载作用下的性能劣化风险，传统人工巡检难以精准排查隐性安全隐患。本次监测在建筑主梁、剪力墙、楼板、基础支座等关键部位布设智能传感节点 42 个，涵盖应变、振动、沉降、倾角、温湿度五大监测模块，实现建筑主体结构全覆盖实时监测。

（二）监测结果与分析

系统连续 6 个月不间断实时监测，累计采集有效监测数据超 260 万条，通过 CNN-LSTM 混合模型完成数据智能分析与损伤识别，监测结果如下：

1) 数据稳定性与精度优异。多源智能传感组网可有效规避环境干扰，数据有效率达 98.7%，相较于传统传感监测数据失真率降低 65%，能够精准捕捉结构微小变形与应力波动，满足精细化监测需求。

2) 损伤识别精准度高。系统成功识别出 3 处结构微裂缝、2 处局部应力集中区域，损伤位置、损伤程度与后期人工复核结果完全匹配，整体损伤识别准确率达 96.3%，可精准识别传统巡检难以发现的早期隐性损伤，有效弥补传统监测的短板。

3) 风险预警响应高效。针对监测过程中出现的局部应力异常、微小沉降波动等潜在风险，系统提前 2~7 天完成风险预判并触发预警，相较传统事后排查模式，预警响应效率提升 80% 以上，为运维整改预留充足时间。

4) 状态研判全面可靠。通过长期时序数据分析，系统精准研判建筑结构整体健康状态，明确结构局部劣化规律，生成针对性运维加固建议，实现从“被动维修”向“主动预判、精准运维”的转变，大幅降低建筑运维成本与安全风险。

（三）系统应用优势

相较于传统建筑结构健康监测体系，本文智能传感与 AI 融合的监测系统具备显著优势：一是实现全天候、自动化、全覆盖监测，摆脱人工巡检的时空限制；二是依托 AI 深度学习算法实现数据智能化分析，规避人工研判的主观性与滞后性；三是多源数据融合与混合模型大幅提升损伤识别与风险预判精度；四是形成全流程闭环运维体系，适配建筑结构全生命周期健康管理需求，智能化、精细化水平显著提升。

五、现存问题与展望

（一）现存问题

本次研究与工程应用过程中，发现系统仍存在部分优化空间：一是复杂极端环境（强台风、极端高低温）下，部分传感设备稳定性略有下降，数据抗干扰能力需进一步优化；二是针对异形复杂建筑、大跨度空间结构的专属 AI 模型算法适配性不足，需进一步优化模型参数；三是系统暂未完全实现与 BIM、数字孪生技术的深度融合，三维可视化运维场景有待完善。

（二）未来展望

后续研究将聚焦三大优化方向：其一，优化智能传感设备的环境适配性，研发高抗干扰、自校准的智能传感模块，提升极端工况下的监测稳定性；其二，基于多类型建筑样本数据迭代优化 AI 算法模型，构建适配不同结构形式的专属识别模型，提升系统通用性；其三，融合 BIM 数字孪生技术，搭建建筑结构三维可视化监测平台，实现结构损伤立体定位、健康状态三维展示、运维场景虚拟仿真，进一步提升建筑结构健康监测的智能化、可视化、数字化水平。同时，推动系统与智慧城市运维体系融合，实现建筑群整体安全态势的统筹监测与智能管控。

六、结束语

本文构建的智能传感与 AI 融合的建筑结构健康监测系统，通

过四层分层架构实现监测数据采集、传输、分析、预警、运维的全流程智能化闭环，依托多源智能传感融合技术保障数据采集精度与全面性，借助 CNN-LSTM 混合深度学习模型实现结构损伤精准识别与劣化趋势预判，有效解决了传统建筑健康监测智能化程度低、损伤识别滞后、风险预判能力不足、运维模式被动等技术痛点。

工程应用实践表明，该系统监测稳定性强、识别精度高、响应速度快，可精准捕捉建筑结构早期隐性损伤与潜在安全风险，大幅提升建筑结构安全运维的精细化、智能化水平，有效降低建筑服役安全风险与运维成本。

参考文献

[1] 张丰, 李孟洁, 贾洪愿, 等. AI 赋能建环专业跨学科融合: “建筑智能传感技术”课程的创新设计与实践探索 [C]// 昆明理工大学建筑工程学院. (西南地区) 建环工程教育创新协作平台 2025 年人才培养研讨会论文集. 中国建筑工业出版社, 2025: 60-62. DOI: 10.26914/c.cnkihy.2025.065767.

[2] 刘互鸣. 智能传感技术在绿色建筑施工中的应用 [J]. 绿色建造与智能建筑, 2025, (6): 35-37.

[3] 王晓樱. 物联网智能传感技术在智能化商业建筑设计中的应用 [J]. 城市建筑空间, 2025, 32(S2): 133-135.

[4] 王坤. 绿色建筑材料在智能建筑中的应用分析 [J]. 绿色建造与智能建筑, 2026, (3): 36-39.

[5] 岳小波. 绿色建筑施工智能传感技术应用分析 [J]. 建设科技, 2025, (7): 42-45. DOI: 10.16116/j.cnki.jskj.2025.07.009.

[6] 孙福泽. 智能化施工技术在建筑项目中的应用实践 [C]// 广西大学广西县域经济发展研究院. 2025 年第五届工程技术数智赋能县域经济城乡融合发展学术交流会议论文集 [出版者不详], 2025: 51-52. DOI: 10.26914/c.cnkihy.2025.109182.

[7] 任海峰, 徐继威, 吕游. 智能传感技术在建筑工程中的应用 [J]. 电子技术与软件工程, 2014, (4): 123. DOI: 10.20109/j.cnki.ets.2014.04.087.

[8] 张晓宇. 基于数字化技术的绿色建筑减排施工创新研究 [J]. 佛山陶瓷, 2023, 33(11): 67-69.

[9] 马得礼. 基于集成式智能传感技术的建筑工程结构检测方法 [J]. 中国新技术新产品, 2026, (11): 104-106. DOI: 10.13612/j.cnki.cntp.2026.11.029.

[10] 陈丹, 王儒芳, 张浩. 装配式建筑施工中的智能传感技术应用研究 [J]. 佛山陶瓷, 2025, 35(1): 89-91.

西藏防雷监管改革现状与创新策略研究

格桑次仁¹, 白觉平措^{2*}

1. 西藏自治区气象服务中心, 西藏 拉萨 850000

2. 西藏自治区气象台, 西藏 拉萨 850000

DOI:10.61369/ME.2026060018

摘 要 : 防雷安全监管是气象防灾减灾、保障公共安全和生产经营安全的核心工作。近年来, 随着国家防雷行政审批制度改革审核和防雷减灾相关办法及条例的修订实施, 西藏防雷监管体系不断优化, 简政放权、审管分离、数字化监管等改革举措落地推进。因此, 本文结合西藏防雷监管工作实际, 全面梳理西藏防雷监管改革现状, 探讨防雷监管等方面存在的问题, 最后提出了几点针对性强的创新策略, 以期完善西藏高原特色防雷监管体系, 提升区域雷电灾害防御能力, 促进地方安全生产和防灾减灾工作顺利开展。

关 键 词 : 防雷监管; 现状; 创新策略; 西藏

Study on the Current Status and Innovative Strategies of Lightning Protection Supervision Reform in Xizang

Gesang Ciren¹, Baijue Pingcuo^{2*}

1. Xizang Autonomous Region Meteorological Service Center, Lasa, Xizang 850000

2. Xizang Autonomous Region Meteorological Station, Lasa, Xizang 850000

Abstract : Lightning protection safety supervision is the core work in meteorological disaster prevention and mitigation, ensuring public safety and production safety. In recent years, with the reform and review of national lightning protection administrative approval system and the revision and implementation of relevant measures and regulations on lightning protection and disaster reduction, the lightning protection supervision system in Xizang has been continuously optimized. Reform measures such as streamlining administration and delegating power, separation of review and management, and digital supervision have been implemented and advanced. Therefore, this paper, based on the actual situation of lightning protection supervision in Xizang, comprehensively reviews the current situation of lightning protection supervision reform in Xizang, discusses the existing problems in lightning protection supervision, and finally proposes several targeted innovative strategies, with the aim of improving the characteristic lightning protection supervision system in the Xizang Plateau, enhancing the regional lightning disaster prevention capabilities, and promoting the smooth progress of local safety production and disaster prevention and mitigation work.

Keywords : lightning protection supervision; current situation; innovative strategies; Xizang

引言

雷电灾害是我国高发、频发的主要气象灾害之一, 具有突发性强、破坏力大、影响范围广的显著特征, 对城乡建(构)筑物、交通电力、通信能源、文旅设施等基础设施会产生不同程度的破坏, 还会威胁人民群众生命财产安全^[1-4]。西藏自治区地处青藏高原腹地, 平均海拔高、大气对流活动旺盛、复杂天气系统频发, 是我国雷电灾害高发区之一, 独特的高原气候和地理环境, 使得区域雷电活动规律复杂、防雷安全风险隐患突出, 相较于内地其他地区的防雷减灾与安全监管工作, 其的防雷难度大、任务重、专业性强。防雷安全是高原气象安全治理和生产监管的重要组成部分, 也是筑牢西藏防灾减灾防线、保障区域经济社会稳定发展及守护高原群众生命财产安全的关键^[5-6]。

近年来, 国家持续深化气象领域“放管服”改革, 全面推进防雷监管体制机制革新, 使得防雷安全管理从传统重审批、轻监管模式逐渐朝着重监管、优服务、强效能的现代化治理模式转变。西藏自治区紧跟国家改革部署, 对本地防雷监管体系持续优化升级, 有效破解了以往监管方面的行业难题, 显著提升了区域防雷安全治理法治化、规范化水平^[7-8]。因此, 全面研究西藏防雷监管改革现状与创新策略, 以提升区域雷电灾害综合防御能力和安全监管效能。

作者简介: 格桑次仁(1988.02-), 男, 藏族, 阿里札达, 本科学历, 工程师, 研究方向: 气象服务(防雷及服务)。

通讯作者: 白觉平措(1991.03-), 男, 藏族, 西藏拉萨, 本科学历, 工程师, 从事研究方向: 天气预报。

一、雷电灾害的危害

（一）威胁群众生命安全

西藏农牧区地域广阔，人群居住分散，群众户外劳作、虫草采挖、游牧出行频次较高，再加上高原狂野、山顶、河谷等区域缺少遮挡物，很容易成为雷击高位区域。高原雷电以直击雷为主，由于电压高、电流强，瞬时破坏力大，一旦人体被雷电击中后致死和致残概率极高。与此同时，西藏基层地区的医疗资源较为薄弱，当偏远地区遭受雷击事故后，应急救援响应慢、救治难度大，会使人员伤亡风险增加。而每年夏季是雷电灾害高发期，西藏多地会有户外人员雷击受伤事件，对高原群众生命财产安全的威胁极大。

（二）损毁基础设施与生产设备

近年来，西藏基础设施建设速度加快，高原各地均遍布电力、通信、交通、文旅、油气等基础设施，由于高原设施普遍存在海拔高、裸露多、接地条件差等特点，使得防雷抗灾能力偏弱。雷电制剂或感应雷击很容易对输电线路、通信基站、油气储罐、景区设施等设备产生不同程度的损坏，进而造成电力中断、通信瘫痪、交通停运、生产停滞等方面的问题。特别是西藏偏远地区通信基站稀疏、电力线路绵长，当遭遇雷击后，修复周期长且投入成本高，对区域生产生活的开展极为不利，对高原能源、通信、交通保障体系造成极大冲击。

（三）诱发次生安全事故与生态风险

西藏草原、山林面积广阔，气候较为干燥，当草木、灌木被雷电击中后，极易引发草原火灾、山林火情，进而损毁大面积植被，破坏高原脆弱的生态环境。与此同时，若是油库、气库、化学品仓库等易燃易爆场防雷装置失效，雷击极易引发爆炸、火灾等重大安全事故，有很大的安全生产隐患存在。另外，雷击引起的电力、通信中断，还会对气象监测、地质灾害预警和应急指挥系统正常运行产生影响，降低了区域防灾减灾应急处置能力，进而形成灾害连锁反应。

二、西藏防雷监管改革现状

（一）制度体系逐步完善

为规范全域防雷减灾工作，西藏自治区结合高原独特气象特征，出台《西藏自治区防雷减灾条例》，成为指导全区防雷监管工作的核心法规依据。同时，自治区气象部门联合住建、应急管理、交通等部门出台多项配套实施细则，针对高原建筑工程、道路交通、水利设施、光伏电站等重点领域，明确防雷装置设计审核、竣工验收、定期检测的监管流程与技术标准，彻底扭转了以往西藏防雷监管无细化依据、执法标准模糊的局面，为监管工作规范化、法治化开展提供了坚实制度保障。

（二）初步建成雷电监测预警体系

近年来，西藏气象部门持续加大防雷监测基础设施投入，初步建成覆盖全域的雷电监测预警体系，目前全区已布设32个闪电定位仪和4个大气电场仪，实现雷电监测数据全域共享共用，精准

捕捉地闪、大气电场变化等关键气象信息，有效提升了雷电活动动态监测能力。针对那曲等雷暴高发、虫草采挖雷击风险突出的区域，当地气象部门专项布设3套大气电场仪，实现分钟级雷电预警，为户外作业群众提供精准避险依据。在预警信息传播层面，构建藏汉双语电视播报、手机短信、微信公众号、乡镇电子显示屏等多元传播渠道，打通雷电预警信息发布落地通道，有效提升了预警信息覆盖面。

（三）持续加大防雷科普知识宣传

近年来，西藏气象部门不断加强防雷科普宣传工作，开展了气象科普“进农村、进牧区、进学校、进机关、进社区、进军营、进寺庙”等气象科普“七进”活动，向社会公众广泛宣传普及气象防灾减灾知识，增强社会公众的防雷减灾意识，提高避险自救能力。特别是针对汛期虫草采挖季节雷击伤亡事故高发的特点，从2014年开始，每年组织防雷工作人员到那曲、山南等虫草采挖现场，向农牧民群众面对面宣讲防雷科普知识。同时，还组织专家编印了图文并茂的藏语版《防雷避险自救互救手册》和《防雷科普挂图》等防雷科普宣传资料，赠送给虫草采挖人员，受到了农牧民群众的欢迎。

三、西藏防雷监管工作存在的问题

（一）专业人才短缺

人才短缺问题严重制约西藏防雷监管改革的顺利开展，西藏基层县级气象部门人员编制紧张的问题较为严重，大部分县域缺少专职防雷监管和检测技术人员，现有工作人员以兼职为主，缺少系统性的高原防雷技术、监管执法和隐患排查专业培训，对高原雷电特性、防雷装置检测规范、最新政策法规掌握的不够扎实，很难同精细化监管需求相符。与此同时，高原工作环境较为艰苦、薪资待遇优势不足，很难吸引和留住高端防雷技术、监管执法人才，导致人才断层问题较为严重。除此之外，基层部门常态化监管经费、设备保障不足，使得防雷检测设备经常会出现设备老化或短缺的问题，造成偏远县区很难将现场精准监测工作做好，只有以上级部门的不定期巡查为主，日常监管大都流于形式，很难确保常态化、全覆盖防雷监管工作顺利开展。

（二）防雷监管不规范

自防雷市场全面开放以来，西藏本地防雷检测、运行维护服务市场快速发展，但因市场监管体系还没有同步完善，使得行业乱象问题经常出现。主要表现在以下几方面：一是市场主体资质参差不齐，一些外来和本地防雷服务机构中存在设备老旧、检测流程不规范、服务人员无专业资质等方面的问题，为了压缩成本会对检测流程进行简化或者是出具虚假检测报告，直接对市场秩序产生了严重干扰。二是市场监管力度不足，气象部门对市场化防雷服务机构的日常监管、信用评价、违规惩戒机制不完善，缺少常态化的抽查和考核机制，针对违规企业的惩处力度不足，违法成本偏低。三是服务供需匹配度不足，由于偏远县区、牧区防雷服务资源不足，优质防雷机构大都在西藏核心城市集中，偏远区域防雷检测、设施运行维护、隐患整改服务较为滞后，一

些基层防雷机构长期缺少专业防雷养护知识，增大了防雷安全隐患。

（三）监管数字化滞后，技术支撑不足

由于西藏属于高原地区，当地特殊的地理环境造成防雷监测和监管数字化建设进度缓慢，同现代化防雷治理需求相符。一是监管数字化平台建设滞后。当前，西藏还没有搭建起完善的防雷安全监管信息化平台，对防雷设施备案、检测数据、隐患台账等数据的管理较为分散，很难开展全过程的动态监管、全程溯源、智能研判等工作，再加上传统人工巡查、纸质台账管理模式效率偏低，无法应对现有的防雷监管现状。二是技术适配性不足。现有防雷技术标准、检测设备大都适配内地平原地区，因西藏地区的海拔高、辐射强，针对特殊气候环境的专用防雷技术和设备储备不足，老旧设施防雷改造及时方案不甚完善，使得部分防雷设施适配性不足、防护效果差、使用寿命短。

四、西藏防雷监管改革创新策略

（一）强化基层队伍建设

对于西藏基层人才短缺方面的问题，需尽快构建起完善的人才建设体系。对人才引进政策适当加大倾斜力度，针对高原防雷监管、技术检测岗位出台专项招录、薪资、职称激励政策，以吸引专业技术人才深深扎根基层。同时围绕高原雷电特性、防雷技术标准、监管执法流程、数字化平台操作、隐患排查要点等内容开展常态化的专项培训工作，以增强基层工作人员的专业能力。还可以构建起市区气象专家对口帮扶县域机制，派遣优秀专家定期进入到基层部门开展技术指导、现场教学、隐患排查工作，提升基层人员的专业技术水平。还可以加大基层监管部门经费和设备的投入力度，配齐智能化检测设备和移动巡查终端设备，确保偏远地区常态化监管工作有序开展，以筑牢基层监管防线。

（二）规范市场监管秩序

始终坚持放管结合、优化服务，对市场化防雷监管体系不断进行完善，规范行业发展秩序。一是对市场准入和退出机制不断完善，严格审核防雷服务机构的资质，对从业人员的职业标准不

断细化，对无资质和违规经营的市场主体进行取缔，以净化防雷市场环境。二是强化常态化市场监管，完善防雷服务企业信用评价体系，抽查考核被检测企业的防雷检测流程、报告质量、服务水平，同时将违规企业尽快纳入到失信名单，通过联合惩戒的方式增强防雷市场主体的违法成本。三是优化基层服务供给，引导优质防雷服务机构不断朝着偏远县区、牧区服务网点进行延伸，借助于政府购买服务、统筹调配资源等方式，以有效解决偏远区域防雷服务短缺的问题，确保防雷服务在西藏境内实现全域覆盖。与此同时，对行业服务标准进行规范，督促企业落实主体责任，以增强市场化防雷服务的专业化和规范化水平。

（三）加快数字化建设，强化技术研发

一是完善防雷安全监管信息化平台。对市场主体备案、设施检测、隐患排查、执法监管等数据资源进行整合，以实现防雷监管的动态监测、智能研判、全程溯源等工作，以替代传统人工粗放管理模式，增强防雷监管效率。三是强化高原技术研发。气象部门与相关科研结构进行联合，以积极开展高海拔地区雷电灾害机理、防雷设施适配技术研发工作，以制定高原专用防雷技术标准和改造方案，积极推广耐低温、抗高辐射的适配防雷设施，增强高原防雷设施防护效能。

五、结论

综上，防雷监管改革是提升西藏高原雷电灾害防御能力、保障公共安全和安全生产的重要举措。在国家“放管服”改革和地方性法规修订的双重作用下，西藏防雷监管体系不断完善，监管模式持续优化，但因高原特殊自然条件、人才技术短板等因素的影响，仍旧存在基层监管力量薄弱、防雷服务市场不规范、监管数字化水平滞后，技术支撑不足等方面的问题。未来，西藏防雷监管改革需立足高原地域特色，通过强化基层队伍建设、规范市场监管秩序、推进数字化建设等多重举措，以破解监管痛点和难点，全面提升区域雷电灾害综合治理能力，为西藏经济社会高质量发展、群众生命财产安全提供坚实的气象安全保障。

参考文献

[1] 范泽和, 杨诗捷. 雷电灾害的危害程度和防雷安全监管工作的重要性分析 [J]. 农业灾害研究, 2020, 10(7): 69-70
[2] 周铮. 浅析桐梓县气象防雷安全监管工作及发展对策 [J]. 探索科学, 2021(9): 94-95.
[3] 王光波, 武宁, 吴华斌. 新形势下提升防雷安全监管能力的探讨 [J]. 农业灾害研究, 2020, 10(7): 51-52.56.
[4] 贾晓江. 提高基层气象部门防雷安全监管能力探讨 [J]. 中文科技期刊数据库 (全文版) 自然科学, 2021(9): 104.
[5] 俸志武. 基层气象部门防雷安全监管能力的提升路径探索 [J]. 中文科技期刊数据库 (全文版) 自然科学, 2021(8): 142-143.
[6] 马思睿, 刘家祥, 田雨润. 基层气象部门防雷安全监管工作分析——以延边朝鲜族自治州为例 [J]. 黑龙江科学, 2022, 13(2): 162-164
[7] 徐海波. 应用大数据加强防雷安全监管研究 [J]. 中国科技期刊数据库工 A, 2023(4): 151-154
[8] 丁旻, 李迪, 杨晶. 新形势下防雷安全监管标准体系构建实践与思考 [J]. 中国标准化, 2019(17): 161-164.

信息化在数字气象观测装备保障中的运用研究

吕航, 张铭益, 聂龙江

黑河气象局, 黑龙江 黑河 164300

DOI:10.61369/ME.2026060021

摘 要 : 数字气象观测装备是保障气象数据精准、气象业务高效运行的主要硬件。传统保障模式已难以适应智能化以及网络化的发展需求。信息化技术的应用, 为数字气象观测装备全生命周期保障提供了新思路。本文根据当前气象观测装备保障工作现状, 重点探究了物联网、大数据等信息技术在数字观测装备运行监测、故障处理、台账管理、智能运维等环节的具体运用, 并且分析了现阶段信息化技术应用中存在的主要问题, 最后提出几点优化措施, 为提升气象观测装备保障水平、推动现代气象业务发展提供支持。

关 键 词 : 信息化; 数字气象观测装备; 保障; 运用

Research on the Application of Informationization in the Support of Digital Meteorological Observation Equipment

Lv Hang, Zhang Mingyi, Nie Longjiang

Heihe Meteorological Bureau, Heihe, Heilongjiang 164300

Abstract : Digital meteorological observation equipment is the main hardware for ensuring the accuracy of meteorological data and the efficient operation of meteorological services. The traditional guarantee mode has been unable to meet the development demands of intelligence and networking. The application of information technology provides new ideas for the full life cycle guarantee of digital meteorological observation equipment. Based on the current status of meteorological observation equipment guarantee work, this paper focuses on the specific application of information technologies such as the Internet of Things and big data in the operation monitoring, fault handling, ledger management, and intelligent operation and maintenance of digital observation equipment, and analyzes the main problems existing in the application of current information technology. Finally, it proposes several optimization measures to support the improvement of meteorological observation equipment guarantee level and the promotion of modern meteorological services.

Keywords : informationization; digital meteorological observation equipment; guarantee; utilization

引言

随着我国气象现代化建设迅猛发展, 新型自动气象站、气象雷达、卫星等各类数字化观测装备逐渐得到普及应用, 为短临天气预报、极端灾害性天气预警、农业气象服务等重要气象业务提供了重要数据依据^[1]。数字气象观测装备长时间处于野外露天、大风、高寒、高湿等复杂环境下运行, 特别容易出现设备故障问题, 一旦保障工作不到位, 势必会造成观测数据缺失、失真, 进而带来气象预报偏差、预警失效等风险。当前, 信息化已成为数字气象观测装备保障体系升级的主要支撑。本文根据数字气象观测装备保障实际情况, 深入分析了信息化技术在装备保障各环节的具体运用, 剖析现阶段存在的主要问题, 并提出优化措施, 旨在完善现代气象装备保障体系、提高现代气象业务服务水平。

一、信息化在数字气象观测装备保障中的具体运用

(一) 应用物联网技术对气象观测装备实时状态进行监测

依托物联网技术可以对数字气象观测装备进行实时状态监测, 这也是数字气象保障的重要基础。通过在各类观测设备上安

装状态感知以及通信模块, 能够构建覆盖全域的装备感知网络, 实现数字气象观测设备运行状态的动态、精准、全天候监测。物联网技术的应用可以做到24小时不间断在线监控, 覆盖气象观测设备运行参数、数据传输状态、硬件工况以及环境指标等内容。在具体应用中, 自动气象站、气象雷达等终端上的感知模块, 可

以对工作电压、电流、运行温度、信号信噪比、数据上传成功率、传感器精度等运行情况进行实时监测，全部数据通过5G、Wi-Fi或专线网络实时传回气象保障平台，由平台进行解析、比对以及筛查。假如气象观测设备参数超出阈值、数据中断或者传感器异常，系统会自动触发声光报警、短信提醒或平台弹窗，及时通知运维人员，从而大幅提升故障维修效率。

（二）应用大数据技术对智能故障进行预判以及预防性运维

通过大数据技术的应用，气象观测装备保障正由“被动处置”转向“主动预判”。气象观测装备保障平台能够长期积累设备运行、历史故障、维修记录、校准数据及环境情况等海量信息，凭借数据挖掘以及机器学习算法对气象观测装备故障规律、老化周期以及性能漂移特征进行分析，建立健康评估以及故障预测模型。一方面，通过对同类气象观测设备在不同气候区域以及运行时长下的故障概率进行分析，能够精准预判潜在风险。例如，针对北方高寒区域，能够识别低温启动异常以及线路冻损隐患。针对南方高湿多雨区域，可以对传感器受潮失灵、线路氧化等故障进行提前预测；运维人员结合这些情况开展防冻、防潮及线路检修等预防性工作，从源头上降低故障率。另一方面，持续监测传感器数据偏差趋势，判断性能衰减状况，提前安排校准、零部件更换或设备更新，避免因精度漂移造成数据失真。此外，大数据系统对历史故障案例进行归类分析，梳理最优处置方案，构成智能运维知识库，为基层人员给予技术支持。

（三）依托信息化平台实现气象装备台账的精细化管理

针对数字气象观测装备种类多、数量大以及分布散的特点，传统纸质或零散电子表格的管理方式常出现信息更新慢、台账缺失、数据混乱以及无法追溯等问题，不易满足规范化要求。通过搭建信息化装备综合管理平台，实现了所有观测装备从采购入库、安装调试、日常运维、校准检定、故障维修、零部件更换到报废退役的全生命周期数字化台账管理。相比传统方式，信息化台账能实时更新、随时调用、精准检索，运维人员可按设备编号、站点或类型快速查询全部信息，为年检、资产盘点等提供数据支撑。平台还可以自动统计设备运行年限、校准到期时间、故障频率，生成年检、校准以及更新计划，减少人工统计，提高气象观测装备台账规范性和效率。此外，平台与气象业务、资产管理系统进行对接，打通装备、运维和观测数据，避免信息孤岛，提升气象观测装备集约化管理水平。

（四）气象装备远程智能运维以及应急保障

我国很多气象观测站点处在山区、海岛、荒漠等偏远地区，交通不便，人工现场运维成本较高、响应慢。一旦碰上暴雨、暴雪、台风等极端灾害性天气时，现场检修不易开展，应急保障难度特别大。凭借信息化远程运维技术能够有效破解这一难题，形成远程处置为主以及现场兜底为辅的保障模式。通过远程运维系统，技术人员可以网络远程登录气象装备后台，对气象观测装备运行参数以及数据传输状态进行实时查看，完成参数调试、程序升级、故障复位以及数据校准等操作。大部分轻微故障以及软件问题无需到现场便能够远程解决，大幅提高气象装备应急响应效率。在极端天气下，应急保障系统能在

短时间内迅速调取全域装备运行状态，精准定位故障点，结合应急预案智能调配就近的技术人员以及应急物资，实现快速响应以及精准处置^[2]。此外，系统可以持续记录各类应急保障案例，不断优化处置流程，增强极端灾害性天气下的气象观测装备保障能力。

二、信息化在数字气象装备保障运用中存在的主要问题

（一）智能分析技术应用不够深入

当前，大部分气象装备保障平台依旧停留在数据采集、实时监控以及基础预警等基础信息化层面，大数据、人工智能等技术的融合应用还不够深入。平台上积累的大量设备运行、故障及环境数据大部分为事后查询所用，缺乏充分挖掘，难以为数字气象装备运维决策提供有效支撑^[3]。数字气象观测装备健康评估、故障精准预判、智能优化等高端功能较少，运维大都依靠人工经验，预防性维护精度不够，智能化优势没有得到充分发挥。此外，部分平台的数据分析模型通用性较差，无法很好地满足不同区域以及突发状况下的装备情况。

（二）基层装备保障人员信息化专业能力有待增强

数字气象观测装备的信息化保障涉及到气象技术、网络通信、大数据分析平台操作等很多领域，对运维保障人员的素质要求较高。然而，当前基层装备保障人员大多数为传统技术出身，长期从事人工巡检以及设备维修，对信息化平台操作、数据解读、智能运维、远程调试等新型技能掌握不够。部分人员仅仅可以完成基本的平台查看和故障上报，难以利用信息化数据分析设备隐患、优化运维方案，碰上复杂系统故障或数据异常时缺乏独立处理能力。此外，常态化信息化技能培训不够，培训内容和实际工作相脱节，影响保障人员能力的提升，难以满足数字气象观测装备保障的需求。

（三）信息化保障管理制度不够完善

随着信息化保障方式的发展，以往的气象装备运维管理制度已不能很好地满足新型工作需求，但是现阶段各级气象部门还没有形成健全的信息化装备保障管理制度体系。在日常气象观测装备保障工作中，仍旧存在信息化运维流程不规范、数据更新不及时、台账管理不严谨、预警处置流程不清晰等问题，影响气象观测装备保障工作高效、高质量开展。

（四）设备网络安全防护体系存在不足

当前，部分基层气象站点的设备网络安全防护能力不足，难以应对日益严峻的网络威胁。气象观测装备对于网络传输和云端平台依赖性很强，各类数据均凭借网络交互，一旦网络安全防护缺失，将直接危及气象观测装备以及业务安全。而现阶段不少站点缺少专业的防火墙、数据加密以及入侵检测等设备，老旧系统存在安全漏洞，容易遭受网络攻击、数据篡改或病毒入侵^[4]。此外，有些气象观测装备运维保障人员安全意识不强，存在违规操作、密码泄露、设备后台随意接入等问题，这大大增加了数据泄露风险，影响了气象观测装备稳定运行以及观测数据的可靠性。

三、提高信息化在数字气象装备保障中运用效果的优化措施

（一）强化智能分析技术的应用，提高智能运维精准性

借助海量运维数据，进一步推动大数据和人工智能技术的深度融合应用，优化数字气象观测装备健康状态评估、故障预测及剩余寿命估算等算法模型。针对不同地区的气候条件、运行环境以及设备特征，构建差异化的分析模型，提升气象观测装备故障预判以及风险预警的准确率^[1]。同时，要建立健全智能运维知识库，认真梳理气象观测装备故障处理案例、技术标准以及作业流程，实现气象观测装备故障自动诊断及处置方案的智能推送。此外，借助大数据技术识别出气象观测装备运维保障薄弱环节、常见故障点及物资消耗规律，并且优化预防性维护计划以及物资储备策略，推动气象观测装备保障从信息化监测转向智能化决策，尽可能发挥其应用价值。

（二）加大人才培养力度，增强基层信息化保障能力

为了提升基层人员气象观测装备信息化保障能力，要建立常态化、专业化培训机制，根据基层实际开展分层分类培训，着重强化信息化平台操作、数据解读、智能故障分析、远程运维、网络安全等实际操作技能，减少理论化内容，提升人员培训实效。此外，时常组织市级技术骨干运维保障专业人才深入一线，强化气象观测装备现场运维保障指导以及实操教学，切实解决基层气象装备保障难题。鼓励运维保障人员积极参加技能竞赛以及技术交流，搭建人才成长平台，培养既懂气象观测装备又掌握信息化技术的复合型人才。此外，完善人才引进机制，优先吸纳信息化、大数据以及网络工程等专业人才，优化人才队伍结构，为数字气象观测装备信息化运维保障工作提供强有力的人才支撑。

（三）建立健全装备保障制度体系，规范信息化保障工作流程

根据数字气象观测装备信息化特点，修订配套制度与规范，构建标准化的观测装备保障体系。明确气象观测装备信息化监测预警、应急处置、数据归档、台账管理、物资调配以及检定校准等各个环节的流程、职责以及时限，防止推诿、漏办、滞后。此

外，建立量化考核机制，将数字气象观测设备在线率、故障处置及时率、数据准确率、预防性运维完成率、物资管理规范度等纳入绩效考核，强化考核结果运用，督促工作人员严格落实其岗位职责^[6]。再者，需要建立常态化督查机制，定期排查相关问题，持续优化信息化保障工作流程，推动数字气象观测装备保障工作标准化、常态化运行。

（四）优化网络安全防护体系，提升信息化保障的安全稳定性

为筑牢安全防线，应优化气象观测装备信息化网络安全体系，构建多层次防护。为运维平台以及野外站点配备防火墙、入侵检测、数据加密等设备，定期开展漏洞检测、系统升级以及病毒查杀，及时修补安全漏洞。建立数字气象观测装备数据安全管理制度，规范数据采集、传输、存储和以及使用流程，防止数据篡改、泄露或丢失。此外，强化气象观测装备保障人员网络安全意识培训，严禁违规接入以及操作。此外，制定气象观测装备信息化网络安全应急处置预案，针对网络攻击、数据异常以及系统瘫痪等情况明确处置步骤，并且时常组织应急演练，全面提升数字气象观测装备信息化保障的安全稳定性。

四、结语

信息化技术的应用可以实现气象观测装备全生命周期的智能化以及高效化运维保障。但是我国现阶段在数字气象观测装备的信息化保障方面仍然面临智能技术应用不够深入、基层保障人才不足、管理制度不健全、网络安全存在短板等问题，这些均影响了信息化在数字气象观测装备保障中的运用效果。为此，气象部门还应立足业务高质量发展，加快大数据和以及人工智能技术的应用，加大基层装备保障人才力度，完善气象观测装备保障管理制度，优化网络安全防护体系。通过促进信息技术和气象观测装备保障的融合，实现从人工粗放运维保障朝数字智能运维的全面转变，为精准预报、防灾减灾以及气象服务提质增效提供强有力的保障。

参考文献

- [1] 李洋. 信息化在数字气象观测装备保障中的应用分析 [J]. 海峡科技与产业, 2023(9): 38-40.
- [2] 赵小增, 张科忠, 马陇伟, 等. 极端天气下信息化技术在气象观测装备保障中的应用研究 [J]. 中文科技期刊数据库 (全文版) 自然科学, 2024(11): 59-62.
- [3] 黄巍. 气象观测装备保障工作存在的问题及优化措施 [J]. 南方农机, 2022(23): 89-91.
- [4] 贾硕, 叶正谦, 魏或阳, 等. 气象观测装备保障工作存在的问题及应对措施 [J]. 农业开发与装备, 2024(7): 128-130.
- [5] 杜志国, 王长爽, 张秀艳, 等. 做好气象观测装备保障工作的有效方法研究 [J]. 数码设计, 2021(4): 24-24.
- [6] 王柯翔. 信息化在数字气象技术装备保障中的应用 [J]. 葡萄酒, 2022(10): 55-56.

