

工程研究前沿

Frontiers of Engineering Research

Volume 2 · Issue 6 · June 2025 3060-9054(Print) 3060-9062(Online)

工程研究前沿

Frontiers of Engineering Research

Volume 2 · Issue 6 · June 2025 3060-9054(Print) 3060-9062(online)

Nanyang Academy of Sciences Pte. Ltd.
Tel.: +65 62233839

E-mail: contact@nassg.org

Add.: 12 Eu Tong Sen Street #07-169 Singapore 059819



中文刊名：工程研究前沿

ISSN: 3060-9054 (纸质) 3060-9062 (网络)

出版语言：华文

期刊网址：<http://journals.nassg.org/index.php/foer-cn>

出版社名称：新加坡南洋科学院

Serial Title: Frontiers of Engineering Research

ISSN: 3060-9054 (Print) 3060-9062 (Online)

Language: Chinese

URL: <http://journals.nassg.org/index.php/foer-cn>

Publisher: Nan Yang Academy of Sciences Pte. Ltd.

《工程研究前沿》征稿函

Database Inclusion



Google Scholar



Crossref



China National Knowledge Infrastructure

版权声明/Copyright

南洋科学院出版的电子版和纸质版等文章和其他辅助材料，除另作说明外，作者有权依据Creative Commons国际署名—非商业使用4.0版权对于引用、评价及其他方面的要求，对文章进行公开使用、改编和处理。读者在分享及采用本刊文章时，必须注明原文作者及出处，并标注对本刊文章所进行的修改。关于本刊文章版权的最终解释权归南洋科学院所有。

All articles and any accompanying materials published by NASS Publishing on any media (e.g. online, print etc.), unless otherwise indicated, are licensed by the respective author(s) for public use, adaptation and distribution but subjected to appropriate citation, crediting of the original source and other requirements in accordance with the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) license. In terms of sharing and using the article(s) of this journal, user(s) must mark the author(s) information and attribution, as well as modification of the article(s). NASS Publishing reserves the final interpretation of the copyright of the article(s) in this journal.

Nanyang Academy of Sciences Pte. Ltd.
12 Eu Tong Sen Street #07-169 Singapore 059819

Email: info@nassg.org

Tel: +65-65881289

Website: <http://www.nassg.org>



期刊概况：

中文刊名：工程研究前沿

ISSN: 3060-9054 (Print) 3060-9062 (Online)

出版语言：华文刊

期刊网址：<http://journals.nassg.org/index.php/foer-cn>

出版社名称：新加坡南洋科学院

出版格式要求：

- 稿件格式：Microsoft Word
- 稿件长度：字符数（计空格）4500以上；图表核算200字符
- 测量单位：国际单位
- 论文出版格式：Adobe PDF
- 参考文献：温哥华体例

出刊及存档：

- 电子版出刊（公司期刊网页上）
- 纸质版出刊
- 出版社进行期刊存档
- 新加坡图书馆存档
- 谷歌学术（Google Scholar）等数据库收录
- 文章能够在数据库进行网上检索

作者权益：

- 期刊为 OA 期刊，但作者拥有文章的版权；
- 所发表文章能够被分享、再次使用并免费归档；
- 以开放获取为指导方针，期刊将成为极具影响力的国际期刊；
- 为作者提供即时审稿服务，即在确保文字质量最优的前提下，在最短时间内完成审稿流程。

评审过程：

编辑部和主编根据期刊的收录范围，组织编委团队中同领域的专家评审员对文章进行评审，并选取专业的高质量稿件进行编辑、校对、排版、刊登，提供高效、快捷、专业的出版平台。

工程研究前沿

Frontiers of Engineering Research

Volume 2 Issue 6 June 2025
ISSN 3060-9054 (Print) 3060-9062 (Online)

主 编

虞 斌

Bin Yu

编 委

王振波 zhenbo Wang

赵希强 Xiqiang Zhao

刘永军 Yongjun Liu

张新儒 Xinru Zhang

- | | | |
|----|---|---|
| 1 | 老旧小区市政基础设施改造工程造价控制难点与对策
/ 王际敬 | / 包慧 |
| 4 | 洁净环境空气微生物动态监测与污染源追溯方法研究
/ 吴正家 廖赋 凌涛 | 32 汽车吊支腿荷载计算理论研究与应用
/ 王生 |
| 7 | 智能控制在电除尘器节能提效中的应用研究
/ 严建成 邵罡 黄建伟 李进 | 35 云南省滇东北煤矿隐蔽致灾水害调查及防治探讨
/ 钱权 |
| 10 | 乡村振兴背景下全域土地综合整治与耕地保护协同推进路径研究
/ 曲宝彬 | 39 软土地基的岩土工程勘察研究
/ 蒋扩 |
| 13 | 平原水库围坝变形监测及稳定性预警模型构建
/ 马延青 王瑞樟 李维汉 陈昶昊 王振宇 | 42 一种水泥界面与原混凝土结构融合为一体的物理卯固技术
/ 董志武 |
| 16 | 探讨新时期建筑工程项目施工现场智慧管理措施
/ 梁子琦 | 45 水利工程防渗处理中的灌浆施工技术
/ 邵方敬 |
| 19 | 基于深度学习的台区馈线负荷预测解决方案
/ 韩蹇 | 48 初探一种高效快捷的医疗建筑模式——停车楼+门诊楼+住院楼三楼并列组合
/ 林峰 |
| 23 | 商用连续式便利袋封口机结构设计及优化研究
/ 边永宏 邱梦雨 梁炯墙 | 52 现代生态产业园理论与规划设计原则探讨
/ 杨洋 宋玢 郝志远 |
| 26 | 页岩气田无人值守返排液泵橇设计
/ 刘权 徐红果 刘文松 汤棠 刘书文 | 55 “双碳”目标下绿色建筑室内装饰施工材料优化策略
/ 廖晓明 |
| 29 | 园林工程施工中的成本控制与绿色材料应用分析 | |

- 1 Difficulties and countermeasures of cost control in municipal infrastructure reconstruction of old residential areas
/ Jijing Wang
- 4 Research on Dynamic Monitoring of Air Microorganisms in Clean Environment and Traceability of Pollution Sources
/ Zhengjia Wu Fu Liao Tao Ling
- 7 Research on the Application of Intelligent Control in Energy Saving and Efficiency Improvement of Electrostatic Precipitators
/ Jiancheng Yan Gang Shao Jianwei Huang Jin Li
- 10 Research on the Collaborative Promotion Path of Comprehensive Land Consolidation and Farmland Protection in the Context of Rural Revitalization
/ Baobin Qu
- 13 Construction of deformation monitoring and stability warning model for plain reservoir dam
/ Yanqing Ma Ruizhang Wang Weihan Li Changhao Chen Zhenyu Wang
- 16 Explore the smart management measures of construction projects in the new period
/ Ziqi Liang
- 19 A deep learning based solution for feeder load forecasting in transformer districts
/ Qian Han
- 23 Research on Structural Design and Optimization of Commercial Continuous Convenience Bag Sealing Machine
/ Yonghong Bian Mengyu Qiu Tongqiang Liang
- 26 Unmanned Flowback Fluid Pump Skid Design for Shale Gas Fields
/ Quan Liu Hongguo Xu Wensong Liu Tang Tang Shuwen Liu
- 29 Cost Control and Analysis of Green Material Application in Landscape Engineering Construction
/ Hui Bao
- 32 Theoretical study and engineering application of load calculation of car suspension legs
/ Sheng Wang
- 35 Investigation and discussion on hidden water disaster caused by coal mine in Northeast Yunnan Province
/ Quan Qian
- 39 Geotechnical Engineering Investigation of Soft Soil Foundations
/ Kuo Jiang
- 42 A physical bonding technology in which the cement interface is integrated with the original concrete structure
/ Zhiwu Dong
- 45 Grouting construction technology in water conservancy project waterproofing treatment
/ Fangjing Shao
- 48 Pioneering an efficient and streamlined medical architecture model: a parking building, outpatient building, and inpatient building are vertically aligned on the third floor
/ Feng Lin
- 52 Planning and architectural design of high tech Industrial Park
/ Yang Yang Bin Song Zhiyuan Hao
- 55 Optimization strategy of interior decoration construction materials under the “double carbon” target
/ Xiaoming Liao

Difficulties and countermeasures of cost control in municipal infrastructure reconstruction of old residential areas

Jijing Wang

Shanghai Baoye Group Co., Ltd., Shanghai, 201900, China

Abstract

In recent years, with the acceleration of urbanization, the renovation of municipal infrastructure in old residential areas has become a crucial driver for urban renewal and livelihood improvement. These renovations not only involve multiple municipal aspects such as pipelines, roads, electrical systems, and landscaping, but also directly impact residents' quality of life and the overall shaping of urban image. However, during implementation, issues like cost overruns, investment waste, and inefficient fund utilization have become prevalent. This article systematically examines the challenges in cost control for municipal infrastructure renovation projects in old neighborhoods, delves into influencing factors, and proposes specific countermeasures across project planning, design optimization, bidding management, construction processes, and post-construction management. Through case comparisons and alignment with current policy directions and market trends, it emphasizes the importance of comprehensive cost management throughout the process. The study further suggests a cost control approach centered on informatization, standardization, and professionalization, providing practical references for urban old neighborhood renovation projects.

Keywords

old residential areas; municipal infrastructure; renovation projects; cost control; difficulties; countermeasures

老旧小区市政基础设施改造工程造价控制难点与对策

王际敬

上海宝冶集团有限公司, 中国 · 上海 201900

摘要

近年来,随着城市化进程的加快,老旧小区市政基础设施改造工程成为城市更新与民生改善的重要抓手。老旧小区改造不仅涉及管网、道路、电气、绿化等多项市政内容,还直接关系到居民生活质量提升和城市整体形象的塑造。然而在实际推进过程中,工程造价失控、投资浪费、资金利用低效等现象屡见不鲜。文章系统梳理了老旧小区市政基础设施改造工程的造价控制难点,深入剖析影响因素,从项目策划、设计优化、招投标管理、施工过程、后期管理等环节提出具体对策。通过典型案例对比,结合当前政策导向与市场发展趋势,强调全过程精细化造价管理的重要性,并提出以信息化、标准化、专业化为核心的造价控制路径,为城市老旧小区改造提供实践借鉴。

关键词

老旧小区; 市政基础设施; 改造工程; 造价控制; 难点; 对策

1 引言

老旧小区市政基础设施改造工程作为城市更新的重要组成部分,直接关系到民生福祉和城市形象提升。随着我国城镇化率不断攀升,大量建于 20 世纪八 90 年代的小区面临着管网老化、道路破损、环境脏乱、电气设施落后等一系列问题,已无法满足现代城市居民的居住和生活需求。推动老旧小区市政基础设施改造,既是落实国家“宜居城市”战略、提升群众获得感与幸福感的实际需要,也是完善城市功能、

激活城市发展内生动力的重要举措。

然而,由于老旧小区改造的项目体量大、涉及面广、建设周期长,项目推进过程中经常面临规划不科学、需求多元化、投资资金短缺、造价失控等难题。与新建工程相比,老旧小区改造往往需要兼顾原有设施兼容性、居民个性化诉求以及多部门协调,造价控制更加复杂。部分项目在前期策划、设计、招标、采购、施工及后期管理等环节缺乏系统化、科学化的造价控制措施,导致预算超支、资源浪费、效益不彰等现象频现。如何科学、有效地管控老旧小区市政基础设施改造工程造价,已成为行业亟须破解的重要课题。

本文将系统分析老旧小区市政基础设施改造工程造价控制的主要难点,结合实践案例和政策导向,提出针对性解

【作者简介】王际敬(1987-),男,中国山东聊城人,本科,工程师,从事市政工程研究。

决对策，为后续相关工程的造价管理提供理论支撑和操作参考。

2 老旧小区市政基础设施改造工程造价现状分析

2.1 老旧小区市政基础设施改造的基本特征

老旧小区市政基础设施改造工程普遍具备建设规模大、涉及专业多、工艺流程复杂等显著特征。改造内容涵盖给排水管网、燃气管道、道路与广场、照明及电力、绿化景观、垃圾分类等多元化项目，改造对象既包括地上建筑也包括地下管线。项目常常穿插于居民日常生活，施工环境复杂，对周边居民影响较大，需统筹兼顾各方诉求。与此同时，老旧小区原有资料不完整、基础数据缺失、隐蔽工程多，改造时常需根据现场实际灵活调整，易产生设计变更与费用追加。

2.2 工程造价失控的普遍现象

由于老旧小区市政基础设施改造的特殊性，工程造价控制难度明显高于一般市政工程。部分项目在前期预算编制不精准、材料价格波动、设计方案多次变更等多重因素叠加下，实际造价往往大幅超出预算。施工过程中，隐蔽工程发现问题后临时变更导致工程量和费用激增，部分项目还因协调难度大、工期延误等原因产生额外成本。此外，部分项目缺乏有效的全过程造价管控机制，导致结算审核把关不严，投资效益不高。

2.3 影响造价控制的关键因素

老旧小区市政基础设施改造工程的造价控制受到多种因素的综合影响。项目策划阶段目标设定的科学性直接关系到后续投资方向与资源配置；设计阶段的方案比选决定了工程技术路径与经济性。招投标及合同管理的规范性影响工程价格的合理性与后续履约保障，施工现场的管控则决定了工程进度和质量。材料采购中的价格波动、居民意见的协调、政府政策及资金投入的稳定性，均会对造价产生直接影响。此外，后期维护环节的有效衔接也影响项目全生命周期的成本。各环节任何一处疏漏都可能导致整体造价失控。

3 老旧小区市政基础设施改造工程造价控制难点分析

3.1 前期策划与基础资料缺失

老旧小区多为20世纪建设，原始竣工图纸、管网分布、结构隐患等资料普遍不完整甚至遗失，致使前期工程量核实、施工难度评估难以准确。部分改造项目在前期调研、需求梳理及功能定位方面重视不足，导致后续设计变更频繁、工程量反复核算，从而为造价失控埋下隐患。此外，项目策划阶段若对资金测算不科学，或未充分考虑政策资金分配、居民实际支付能力与政府补助力度，也容易造成预算与实际投入严重脱节。

3.2 设计方案变更与技术难题

老旧小区市政改造工程常常面临结构加固、地下管线

迁移以及功能提升等多方面的复杂任务。由于部分原有设施与当前设计标准不兼容，设计人员在初期往往难以全面掌握现场真实情况，导致设计方案需频繁调整。实际施工过程中，隐蔽工程在开挖后容易暴露出预料之外的问题，必须临时修正，这不仅带来技术难题，也造成设计变更和追加工程量，进而推高造价。此外，随着设计标准的动态更新和政策导向的调整，工程方案可能需要不断优化和扩充功能，这些因素都会使项目造价控制面临更大压力。

3.3 招投标与合同管理薄弱

在老旧小区市政基础设施改造实践中，招投标环节普遍存在专业化与市场化不足的问题。一些项目未能建立科学完善的评标机制，导致投标报价严重偏离实际市场水平，难以真实反映工程造价。部分招标单位过度追求进度或盲目压低造价，倾向采用“最低价中标”策略，忽视了技术能力与后续履约保障，结果往往引发一系列履约问题。与此同时，合同管理也较为薄弱，相关合同条款对设计变更、工期调整、材料价格波动等缺乏明确约定，致使后续项目推进过程中纠纷频发。部分承包方利用合同漏洞，通过变更签证等方式频繁追加工程量，导致造价审核依据不足，实际结算大幅超出初步预算。上述问题不仅加剧了造价失控的风险，也影响了资金的合理配置与工程质量的有效管控 [1]。

4 老旧小区市政基础设施改造工程造价控制的重点环节

4.1 全过程精细化管理的重要性

老旧小区改造工程造价控制须贯穿项目全生命周期，从立项策划、勘察设计、招投标、施工组织到后期运维，每一环节都需建立科学、系统的造价管理体系。前期通过需求调研、功能定位与投资测算，为项目定下合理造价目标。设计阶段加强方案比选与经济性论证，选用适合老旧小区实际的改造技术与材料。招投标环节严格把关，推行合理低价中标与全过程咨询，规范合同管理，明确变更、索赔、奖惩等条款。施工阶段重视现场管理和进度控制，及时发现问题，动态调整资源配置。项目竣工后还需关注后期维护及绩效评价，提升项目整体投资效益。

4.2 设计与方案优化

科学的设计方案是工程造价控制的基础。老旧小区改造应倡导“因地制宜、经济适用”原则，优先选用成熟可靠、施工便捷的技术路径，兼顾经济性与可持续性。多方案对比，择优选定，减少后期变更可能。应结合实际需求，合理确定管网布局、道路宽度、绿化景观、公共空间等具体标准，兼顾既有结构安全与新功能提升。采用信息化工具（如BIM技术）辅助设计，提高设计精度和协同效率，为后续施工和造价控制奠定基础 [2]。

4.3 招标采购及合同履约管理

健全的招标采购体系和严格的合同履约管理，是控制

工程造价的关键环节。推行全过程造价咨询服务,引入第三方审计,确保招标文件、工程量清单和控制价的科学合理。招标过程需公开透明,防止恶性低价竞争,合同条款需对变更、调价、工期索赔等作出明确约定。采购环节应加强材料设备的价格监控,择优选用性价比高、符合标准的产品,防止因材料质量不达标导致返工和费用追加。

5 老旧小区市政基础设施改造工程造价控制的对策建议

5.1 完善前期策划与投资决策机制

前期策划与科学的投资决策是老旧小区市政基础设施改造工程造价有效控制的根本保障。实践中,应建立多部门协同调研机制,全面采集小区现有管网、道路、电气等基础设施的详实资料,同时深入挖掘居民多样化的实际需求,补齐历史数据缺失、需求定位模糊等短板。策划阶段应充分发挥居民参与、专家论证与政府主导的多元协同优势,明确改造目标与优先级,科学划定项目范围与投资重点。投资测算上要结合财政投入、社会资本、居民自筹等多元渠道进行系统规划,合理平衡资金结构,增强项目财务可持续性,防止因资金短缺或资源错配引发后续造价失控与项目推进受阻[3]。

5.2 推进设计标准化与技术创新

标准化设计与技术创新是提升老旧小区改造工程造价可控性的关键。制定系统、细致的标准化设计导则,能够规范不同类型小区在市政管网布局、道路宽度、绿化配置等方面的基本要求,有效减少因个性化设计造成的随意变更和重复投入。应积极引入 BIM、GIS 等数字化手段,强化设计全过程的协同与精细化管理,提高工程量核算和成本预估的准确性。技术层面,大力推广成熟工艺和装配式施工体系,降低现场施工难度与不确定性;同时鼓励绿色建材和新型节能技术的应用,提升工程的环境友好性和全生命周期经济性,实现技术进步与造价优化的有机统一[4]。

5.3 强化招投标及合同管理

科学、透明的招投标管理和完善的合同体系是保障造价受控的重要支撑。工程招标应坚持合理低价中标与综合评标并重,兼顾价格与技术、管理、信用等多元因素,防止单纯压价导致低质低效。合同文件应系统涵盖设计变更、工期调整、材料涨价等可能风险,并明确变更流程和结算依据,减少合同纠纷和造价争议。

5.4 加强施工现场管理与过程监督

施工环节的过程管控是防止造价随意追加的核心环节。项目应建立严密的动态监控机制,借助工程量清单管理、施

工日志、现场变更审批等手段,确保所有工程变更均有依据、流程透明,杜绝无序增项。要提升施工单位的技术能力与管理素养,实行标准化、制度化施工操作,降低因现场管理混乱引起的返工和资源浪费。通过信息化平台实时监控项目进度、用料、设备、人力等数据,实现多维度同步考核,及时发现异常并动态调整,有效保障工程造价目标的实现。

5.5 健全后期维护与绩效评价体系

老旧小区市政基础设施改造的后期维护与绩效评价直接关系到项目全生命周期的投资效益。应在项目交付前明确后续设施维护的责任主体、资金来源和实施机制,制定定期巡检、检修和快速响应机制,防止因运维缺失带来的二次改造和资金浪费。通过量化分析项目综合成效,及时总结经验与不足,不断优化造价管理模式,提升今后老旧小区改造的整体管理水平和投资回报[5]。

6 结语

老旧小区市政基础设施改造工程是提升城市功能、改善民生的重要举措,其造价控制关系到项目投资效益、政府财政负担和居民获得感。面对工程实施过程中的多重难点与挑战,必须坚持系统思维和全过程管理理念,完善前期策划、优化设计方案、规范招投标与合同管理、强化现场管控、健全后期维护等全链条造价控制体系。要积极推动信息化、标准化和专业化建设,提升各参与方的协同能力与管理水平,形成政府主导、多元参与、精细高效的工程造价管控新格局。未来,随着政策保障、技术创新及社会参与度的不断提升,老旧小区市政基础设施改造工程必将实现造价科学可控、投资高效利用和民生福祉持续提升的目标,为城市可持续发展和居民幸福生活提供坚实支撑。

参考文献

- [1] 郭雯丽.老旧小区市政基础设施改造方案设计与实践[C]//重庆市大数据和人工智能产业协会,重庆建筑编辑部,重庆市建筑协会.智慧建筑与智能经济建设学术研讨会论文集(二).重庆市鸿庄建设开发有限公司;2025:358-361.
- [2] 梁美清.老旧小区改造项目的建设方案与改建方法分析——以济宁市任城区医学院宿舍老旧小区改造项目为例[J].住宅产业,2022,(08):50-53.
- [3] 孟允,胡金华,张亚东.基于城镇老旧小区改造的要点分析与智能化集成技术的应用研究[J].建设科技,2023,(14):18-20+28.
- [4] 周诚,严飞,何寰,等.基于城市更新单元的市政基础设施规划研究[J].市政技术,2024,42(08):254-261.
- [5] 张智超,陈江娜,董淑秋.城市双修背景下解决市政基础设施问题的思路研究[J].市政技术,2021,39(09):195-198+204.

Research on Dynamic Monitoring of Air Microorganisms in Clean Environment and Traceability of Pollution Sources

Zhengjia Wu Fu Liao Tao Ling

Hubei Pulin Standard Technical Service Co., Ltd., Wuhan, Hubei, 430000, China

Abstract

A clean environment is crucial for key fields such as pharmaceutical manufacturing and food production, and microbial contamination in the air is one of the core factors affecting its cleanliness. This article aims to systematically explore the dynamic monitoring technology and pollution source tracing methods of microorganisms in clean air environments. The article first elaborates on the necessity of dynamic monitoring and analyzes in detail the principles and application characteristics of mainstream monitoring technologies such as active and passive sampling; Secondly, the methodology of pollution source tracing based on microbial species identification, concentration gradient analysis, and air flow field simulation was emphasized; Finally, prospects were proposed for building a comprehensive management system that integrates real-time monitoring, data analysis, and intelligent warning. Research has shown that implementing systematic dynamic monitoring combined with effective traceability methods is a key strategy for accurately assessing the level of microbial control in clean environments, identifying pollution risks in a timely manner, and implementing source control, which is of great significance for ensuring product quality and production safety.

Keywords

clean environment; Airborne microorganisms; Dynamic monitoring; Pollution source tracing; Bioaerosols

洁净环境空气微生物动态监测与污染源追溯方法研究

吴正家 廖赋 凌涛

湖北省普林标准技术服务有限公司, 中国·湖北 武汉 430000

摘要

洁净环境对于医药制造、食品生产等关键领域至关重要, 空气中的微生物污染是影响其洁净度的核心因素之一。本文旨在系统探讨洁净环境空气中微生物的动态监测技术与污染源追溯方法。文章首先阐述了动态监测的必要性, 并详细分析了主动与被动采样等主流监测技术的原理与应用特点; 其次, 重点论述了基于微生物种类鉴定、浓度梯度分析与空气流场模拟相结合的污染源追溯方法学; 最后, 对构建集成了实时监测、数据分析与智能预警的综合管理体系提出了展望。研究表明, 实施系统性的动态监测并结合有效的追溯手段, 是精准评估洁净环境微生物控制水平、及时识别污染风险并实施源头控制的关键策略, 对保障产品质量与生产安全具有重大意义。

关键词

洁净环境; 空气微生物; 动态监测; 污染源追溯; 生物气溶胶

1 引言

伴随现代工业和医疗技术的迅猛进步, 生产与操作环境的洁净度标准愈发严格。洁净室及相关受控区域利用高效空气过滤系统等方法, 把空气中悬浮粒子控制到极低程度, 微生物作为有活性的特殊颗粒, 其出现不仅可能造成产品污染, 更可能直接引发感染, 进而导致生产失败, 引发巨大经济损失与潜在安全危机。以往微生物监测多依靠静态的沉降菌法, 此方法虽操作简便, 却有滞后、捕获效率差且难以体现动态活动下实际污染状况的弊端。实施连续且动态的空气

微生物监测, 且在检测到超标情况时能迅速、精准地追踪到污染源头, 已成为洁净环境微生物控制领域急需深入探究的关键课题。本文会围绕动态监测方法、污染源追溯技术以及综合管理体系构建这三方面展开系统论述, 以给提升洁净环境微生物控制水平提供理论依据和方法指引。

2 空气微生物动态监测技术

动态监测意味着在不严重影响洁净环境正常生产操作的基础上, 开展连续或频繁间断的微生物采样与分析, 进而实时或近乎实时地展现空气中微生物的污染状况及其变化态势。

2.1 主动空气采样技术

主动采样作为环境微生物动态监测的主要可靠技术方法, 运行原理是借助内置抽气泵, 按照恒定且已知的流速主

【作者简介】吴正家(1988-), 男, 中国湖北武汉人, 本科, 工程师, 从事质量检测研究。

动吸入特定体积的待测空气，让气流中的微生物颗粒因惯性撞击并留在固体培养基平板或液体收集介质中。在各类采样器中，按撞击原理设计的裂隙式和离心式采样器应用极为普遍，它们不但采集效率极高，可高效捕捉不同粒径的微生物气溶胶，而且拥有出色的定量分析能力，可直接算出单位体积空气中活菌数量，为后续分析奠定稳定基础。

该方法的突出优点是能精准测定并算出空气中微生物的浓度，一般用 CFU/m³（每立方米菌落形成单位）作单位，还能马上把采集到微生物的平板移到培养箱里进行孵育和鉴定。这不但大幅缩短了检测所需时间，而且为实时衡量洁净室、医院手术室、食品车间等关键环境的微生物含量和污染状况提供了直接、有效的数据依据。由于具有极高的可靠性和标准化特点，主动撞击采样法被 ISO 14698 等诸多国际标准列为核心推荐方法，是当前环境微生物监测领域普遍认可的金标准。

2.2 被动空气采样技术

沉降菌法是一种凭借空气微生物自然沉降特性的传统监测方法，该方法把装有固体培养基的培养皿在监测点位放置一段时间，让空气中的微生物颗粒因自身重力缓慢沉降并附着到培养基表面。它的最大优点是操作极为简便，无需电力或抽气设备，而且成本很低，可用于大范围布点筛查^[1]。该方法的采集效率与结果可靠性受多种因素所限：微生物颗粒粒径直接影响沉降速率，空气湍流或通风情况会对沉降过程造成干扰，而且暴露时间的长短会明显影响菌落计数，故而难以精确且可重复地对空气微生物浓度进行定量分析。

由于它非定量的特点以及捕集效率不高，在系统的动态空气监测体系中，被动采样一般不单独用作定量评价方法，而是作为主动采样技术的有益补充。它的主要用途是评估特定关键区域（例如操作台面、洁净工作区附近）潜在的微生物沉降风险，显示的是在一定时间内表面可能积聚的生物污染水平，并非空气中原本的微生物浓度。在实际运用时，被动采样更多用于监测趋势、开展环境卫生审查以及初步识别风险点，需将其结果与主动采样数据进行综合评判，共同搭建起全面的环境微生物监测网络。

2.3 在线监测与快速检测技术

为突破传统培养法耗时久（一般需 48 - 72 小时孵育）这一固有弊端，近年基于光学和分子技术的快速空气微生物监测方法快速进步^[2]。在线实时监测系统借助激光诱导荧光（LIF）或粒子计数等物理原理，能在数秒内识别并统计空气中有生物活性的气溶胶颗粒，达成名副其实的连续在线监测与即时污染预警。此类设备尤其契合洁净环境、生物安全实验室和高风险生产区域的需求，极大增强了过程控制的及时性与风险应对能力。

通过 ATP 生物发光技术与 qPCR（定量聚合酶链式反应）等分子生物学方法的快速检测技术，持续拓展了空气微生物监测的范围。ATP 法可在几分钟内体现可培养与不可培养微

生物的总生物量，而 qPCR 技术借助扩增特异性基因片段，能在数小时内开展病原菌的定性和定量分析，大大促进了污染事件的应急调查与溯源工作。现阶段这些高新技术依旧面临着定量结果与传统培养法存在系统性差异、设备和试剂费用贵、操作复杂程度高等挑战，故而多应用于补充性快速筛查与研究场景，还未完全替代传统方法的标准地位。

3 微生物污染源追溯方法

若动态监测察觉到微生物污染水平出现异常，或是检测出特定致病菌、指示菌，快速且准确地追溯污染源是实施有效干预的必要前提，污染源追溯属于多维度、系统性的分析流程。

3.1 微生物种类鉴定与同源性分析

精准鉴定监测样本中分离出的微生物菌落，是追溯污染源的首个环节，也是搭建完整证据链的根基。传统方法主要凭借观察菌落的形态学特征，这些基础方法至今仍有参考意义。现代分子生物学技术显著增强了鉴定的分辨率与精确性，比如通过对 16S rRNA（针对细菌）或 ITS（针对真菌）区域进行测序，可在几小时内实现属甚至种水平的分类鉴定；如脉冲场凝胶电泳（PFGE）和全基因组测序（WGS）这类高分辨分型技术，能进一步提供菌株层面的基因特征信息，为后续深入对比打好根基。

明确菌株种类身份后，溯源工作的重点是对不同点位（例如不同车间、设备表面或空气样本）所分离出的菌株进行同源性分析^[3]。对菌株基因型进行比对，如开展基于 WGS 或 PFGE 条带模式的聚类分析，若多个位置的菌株基因型高度相似，表明这些微生物源自同一克隆群体，是存在共同的污染源。这种基因层面的高度同源性可突破空间限制，构建不同样本间的微观联系，为污染溯源提供极具说服力的分子证据，以此精准指引干预方法的落实，阻断污染传播路径。

3.2 浓度梯度与时空分布分析

把各采样点的微生物浓度数据和地理位置信息关联起来，绘制空间分布图，是识别与追溯污染源的关键可视化方法。离污染源越近的位置，空气中所捕获的微生物浓度往往越高，在图中往往呈现为显著的“热点”区域，剖析不同位置在不同时间段（如不同班次、不同日期）的浓度起伏，可进一步推导污染物的扩散动态和主导传播走向。若部分区域一直呈现异常高浓度值，抑或其浓度峰值总是先于周边区域显现，那么该区域很可能就是污染核心排放点，可当作溯源调查中的首要怀疑对象。

时空分布分析不仅可静态展现污染的空间聚集特性，还能动态剖析污染的迁移规律。对连续多期的监测数据进行叠加对比，可精准描绘出污染物随气流、人员活动或物料流动的扩散走向与影响范围，由此初步界定污染源的可能分布地带。尽管此方法，不能直接判定污染物的具体种属或者基

因型，但它能以较低成本迅速锁定关键嫌疑区域，极大缩减后续分子溯源或现场核查的目标范围，提升调查效率，是环境微生物监测与污染源中必不可少的宏观分析方法。

3.3 环境审计与气流模拟技术

从多维角度锁定污染源根本原因，追溯工作必须与系统、细致的环境现场审计紧密关联。审计范围需全方位涵盖可能引发微生物污染的所有环节，如排查设备与设施有无泄漏风险（如高效过滤器边框密封是否完好、生物安全柜或发酵罐内部正压能否有效保持），评判人员操作是否遵循无菌规范，审查物料传递与废弃物进出流程有无交叉污染隐患，以及核实卫生清洁与消毒程序的实际执行效果，这些实地检查常常能直接找出污染源的藏匿地点，或找出造成微生物滋生与扩散的关键控制点问题。

利用计算流体力学（CFD）技术对洁净环境中的气流场做数值模拟，可从理论角度提高溯源的科学性与精确性。CFD模型可依据空间实际几何构造、送回风布局以及压差设定，以可视化方式模拟室内颗粒物（包括微生物气溶胶）的运动轨迹、滞留区域和扩散规律^[4]。对比模拟出的粒子分布和实际监测所得的浓度“热点”，可反向推导污染物最可能的释放位置及传播路径，进而为现场审计结论提供有力数据支撑与方向引导，实现经验判断与模型推演相融合的精准溯源。

4 综合监测与追溯管理体系的构建

有效的微生物控制不能仅依靠单一技术，而是要一套把技术、流程与管理充分融合的体系化方法。

4.1 监测网络的科学布点设计

结合洁净室等级、气流类型、设备布局 and 关键工艺特性，科学地规划动态监测点的位置与数量，恰当设置采样频率。监测网络应覆盖灌装区域、开放式产品接触点、人员活动密集区等风险较高的位置，并且包含有代表性的背景环境，达成空间与时间的全面覆盖，如实反映洁净环境当下状态，为污染控制提供精准数据依据。

4.2 数据集成与智能预警平台

创建一体化的信息化平台，汇聚来自不同源头的监测数据，包含主动与被动微生物采样、悬浮粒子、温湿度、压

差等各类参数。运用大数据分析构建环境基线模型并设定动态阈值，达成多参数趋势剖析、异常自动预警与可视化看板呈现^[5]。该平台作为监测与追溯的“中枢系统”，可实时识别环境异常，快速开启溯源调查程序，增强响应效能与决策的科学性。

4.3 标准化操作规程与应急响应机制

构建并严格落实动态监测标准作业程序（SOP）与污染事件应急响应流程，确定追溯启动条件、责任分配、调查流程（如补充采样、环境审计、微生物鉴定）以及纠偏方法执行与验证的规范。运用标准化与流程化的管理模式，保障污染事件出现时可迅速反应、系统排查、有效管控并实现闭环式管理，持续增强洁净环境保障效能。

5 总结

洁净环境下对空气微生物的控制是个动态且持续的进程。本研究全面阐述了以主动采样为核心的动态监测技术体系，突出了它在获取实时、定量数据上的核心意义。整合微生物鉴定、浓度分布分析和气流模拟等多维度数据的污染源追溯方式，是精确锁定污染源头、开展靶向干预的科学依据。借助搭建一个融合科学布点、智能预警和标准化流程的综合管理体系，可充分发挥技术与管理优势，达成对洁净环境微生物污染风险的预先警示、快速应对以及根源性治理，为高风险行业安全生产和产品质量筑牢可靠防线。后续研究能进一步聚焦开发速度更快、精度更高的在线监测技术和智能化程度更高的溯源算法模型。

参考文献

- [1] 忻运,王杰,魏佳鸣.洁净室污染控制方法的研究[J].中国医药工业杂志, 2024, 55(5):731-735.
- [2] 卓泽铭,杨贤飞,谷荀,等.微生物洁净空气量试验方法探索研究[J].日用电器, 2024(5):85-90.
- [3] 易欣,张少航,葛龙,等.好氧微生物抑制煤自燃机理研究现状及展望[J].洁净煤技术, 2023, 29(2):198-205.
- [4] 李颖,路凯旋,赖根生,等.基于磁珠和超滤的污水中新冠病毒的富集方法研究[J].环境与健康杂志, 2024, 41(5):440-444.
- [5] 贾睿琦,姚晨,赵庆林,等.医药工业洁净室(区)环境监测问题及改进方法[J].中文科技期刊数据库(引文版)医药卫生, 2023(5):4.

Research on the Application of Intelligent Control in Energy Saving and Efficiency Improvement of Electrostatic Precipitators

Jiancheng Yan Gang Shao Jianwei Huang Jin Li

Zhejiang Energy Lanxi Power Generation Co., Ltd., Jinhua, Zhejiang, 321110, China

Abstract

In response to the issues of 'high energy consumption and significant efficiency fluctuations' under the traditional fixed control mode of industrial electrostatic precipitators, this paper systematically investigates the application pathways of fuzzy PID control, neural network predictive control, and deep learning optimization control, leveraging the adaptive and precise regulation advantages of intelligent control technology. By constructing an industrial-grade experimental platform, a comparative analysis of different intelligent control strategies on power supply parameters, ash cleaning rhythm, and airflow field distribution is performed. The results indicate that the electrostatic precipitator using deep learning optimization control reduces unit energy consumption by 24.3%-28.7% compared to traditional control, maintains a dust removal efficiency stable at over 99.6%, and shortens the response delay to load fluctuations to less than 0.5 seconds. This research provides technical reference for the intelligent upgrading of industrial flue gas purification equipment and aids enterprises in achieving the dual goals of environmental compliance and energy saving.

Keywords

intelligent control; electrostatic precipitator; energy saving and efficiency improvement; deep learning; fuzzy PID

智能控制在电除尘器节能提效中的应用研究

严建成 邵罡 黄建伟 李进

浙能兰溪发电责任有限公司, 中国·浙江 金华 321110

摘要

针对工业电除尘器传统固定控制模式下“能耗高、效率波动大”的问题,本文结合智能控制技术的自适应、精准调控优势,系统研究模糊PID控制、神经网络预测控制、深度学习优化控制在电除尘器运行中的应用路径。通过搭建工业级实验平台,对比分析不同智能控制策略对供电参数、清灰节奏、气流场分布的调控效果,结果表明:采用深度学习优化控制的电除尘器,单位能耗较传统控制降低24.3%-28.7%,除尘效率稳定维持在99.6%以上,且对负载波动的响应延迟缩短至0.5s以内。该研究为工业烟气净化设备的智能化升级提供技术参考,助力企业实现环保达标与节能降耗的双重目标。

关键词

智能控制; 电除尘器; 节能提效; 深度学习; 模糊PID

1 引言

电除尘器作为电力、钢铁、水泥等行业烟气除尘的核心设备,其运行性能直接关系到企业污染物排放达标率与能源消耗成本。当前,我国工业电除尘器普遍采用“固定电压-定时清灰”的传统控制模式,难以适配生产过程中烟气量、粉尘浓度、粒径分布等负载参数的动态变化——当负载激增时,易出现除尘效率骤降、排放超标的问题;当负载平稳时,又因过度供电、频繁清灰造成能源浪费。据《中国工业环保

发展报告(2024)》统计,传统控制模式下的电除尘器平均能耗比理论最优值高30%-35%,且约20%的设备存在效率波动超1%的问题。智能控制技术凭借其非线性调控、多参数协同优化、动态自适应等特性,为解决电除尘器能效失衡问题提供了新路径。近年来,模糊控制、神经网络、深度学习等技术逐步在工业设备控制中应用,但针对电除尘器负载特性与智能控制算法的适配性研究仍较薄弱。本文围绕电除尘器“节能”与“提效”双目标,设计三类智能控制方案并开展工业验证,旨在为电除尘器智能化改造提供切实可行的技术方案。

【作者简介】严建成(1975-),男,中国浙江金华人,本科,高级工程师,从事火电厂烟气除灰脱硫系统优化及粉煤灰综合利用研究。

2 电除尘器传统控制模式的局限性

2.1 供电控制的局限性

传统电除尘器采用固定电压供电模式,供电参数(电压、电流)仅根据设备设计工况(通常为额定负载下的粉尘浓度 $100\text{-}150\text{g}/\text{m}^3$ 、粒径 $d_{50}=20\mu\text{m}$)设定,无法随实时负载动态调整,在负载波动场景下易出现“过供”或“欠供”问题:

高负载欠供问题:当工业生产负荷提升(如燃煤机组从70%升至100%),烟气中粉尘浓度从 $50\text{g}/\text{m}^3$ 骤升至 $200\text{g}/\text{m}^3$ 时,极板积灰速率从 $0.5\text{mm}/\text{h}$ 加快至 $1.8\text{mm}/\text{h}$,2小时内积灰厚度即可达 3.6mm 。固定 35kV 供电电压无法补偿积灰导致的电场强度衰减(从 $3.2\text{kV}/\text{cm}$ 降至 $2.5\text{kV}/\text{cm}$),粉尘荷电效率下降18%-22%,最终除尘效率从设计值99.5%降至98.2%以下,部分工况甚至低于97%,不符合GB 13223-2011《火电厂大气污染物排放标准》中粉尘排放浓度 $\leq 20\text{mg}/\text{m}^3$ 的要求。低负载过供问题:当生产负荷降低(如机组夜间调峰至50%),粉尘浓度从 $100\text{g}/\text{m}^3$ 降至 $30\text{g}/\text{m}^3$ 时,固定电压仍维持 35kV 高值,此时电场内粉尘粒子稀疏,荷电粒子碰撞概率降低,多余电能无法转化为除尘效率提升,反而导致单位能耗从 $0.8\text{kW}\cdot\text{h}/1000\text{m}^3$ 升至 $1.05\text{kW}\cdot\text{h}/1000\text{m}^3$,能耗浪费达25%。以某300MW机组为例,年运行7000小时,仅低负载工况下的无效能耗就达 $(1.05\text{-}0.8)\times 1.2\times 10^5\times 10^3\times 7000=21$ 万 $\text{kW}\cdot\text{h}$,折合标准煤约70吨。电压调节滞后性:传统供电系统依赖人工巡检调整,当负载参数(如烟气温从 180°C 升至 240°C)变化时,气体击穿电压下降,需降低供电电压避免电场击穿,但人工发现并调整的滞后时间通常超过1小时,期间易出现频繁闪络,不仅影响除尘效率,还会缩短高压硅整流变压器的使用寿命(闪络次数超50次/小时,设备寿命缩短30%)。

2.2 清灰控制的局限性

传统清灰采用“一刀切”的定时控制模式(如固定8小时/次),未结合粉尘浓度、粒径分布等负载参数对积灰速率的影响,导致清灰时机与实际积灰需求严重不匹配,存在“清灰不足”或“过度清灰”两类问题:高负载清灰不足:在高负载工况(如钢铁烧结机满负荷运行,粉尘浓度 $180\text{g}/\text{m}^3$ 、 $d_{50}=8\mu\text{m}$)下,细粉尘易吸附在极板表面形成致密灰层,积灰速率达 $0.6\text{mm}/\text{h}$,8小时积灰厚度可达 5mm 。此时电场击穿电压从 60kV 下降30%至 42kV ,为维持除尘效率,需将供电电压从 35kV 强行提升至 45kV ,导致供电能耗增加30%,同时灰层过厚易引发“反电晕”现象,进一步降低荷电效率,形成“能耗升高-效率下降”的恶性循环。某钢厂案例显示,此类工况下传统定时清灰模式会导致出口粉尘浓度超 $30\text{mg}/\text{m}^3$,每月需额外支付环保罚款约5万元。低负载过度清灰:在低负载工况(如电厂锅炉低负荷运行,粉尘浓度 $40\text{g}/\text{m}^3$ 、 $d_{50}=35\mu\text{m}$)下,粗粉尘易脱落,积灰速率仅 $0.125\text{mm}/\text{h}$,8小时积灰厚度仅 1mm ,远未达到影响电场性能的临界厚度(3mm)。此时定时清灰会导致极板频繁振动(电磁脉冲阀单次动作冲击力达 0.8MPa),极板变形

概率增加,使用寿命缩短15%-20%(从设计10年降至8-8.5年);同时压缩空气消耗量达 $0.3\text{m}^3/\text{次}$,过度清灰导致压缩空气浪费达40%,以某机组4个电场、每日3次清灰计算,年浪费压缩空气约 $4\times 3\times 0.3\times 365=1314\text{m}^3$,折合电费约2.6万元。清灰方式单一性:传统清灰仅采用单一的电磁脉冲或机械振打方式,未根据粉尘黏性调整清灰强度。如处理高黏性粉尘(如垃圾焚烧烟气中的飞灰)时,定时振打无法彻底清除黏附灰层,灰层逐渐增厚;而处理低黏性粉尘时,强振打会导致大量二次扬尘,瞬时效率下降5%-8%。

2.3 系统协同性的局限性

传统电除尘器的供电控制、清灰控制、气流调节系统各自独立运行,由不同控制柜分别控制,缺乏数据交互与协同决策机制,导致各子系统动作冲突或响应不同步,严重影响整体能效与稳定性:清灰与供电的协同缺失:清灰过程中(尤其是机械振打清灰),极板振动会导致表面积灰脱落,产生瞬时二次扬尘(扬尘浓度可达正常工况的3-5倍),此时若供电参数未同步调整(如提高电压增强荷电能力),除尘效率会出现1.5%-2%的瞬时下降,持续时间约5-10分钟。某电厂监测数据显示,每日3次清灰导致的瞬时效率不达标累计时长超30分钟,日均除尘效率被拉低0.3%-0.5%。气流调节与电场控制的协同缺失:当烟气流量波动(如机组负荷变化导致气流速度从 $1.0\text{m}/\text{s}$ 升至 $1.3\text{m}/\text{s}$)时,传统控制仅通过调节烟道挡板改变流速,无法联动调整电场分区参数(如前区电场提高电压、后区电场延长停留时间)。流速升高会导致粉尘在电场内停留时间从8s缩短至6.2s,荷电不充分,局部除尘效率偏差超2.5%,出口粉尘浓度出现波动,难以稳定达标。数据孤岛导致决策滞后:供电、清灰、气流调节系统的运行数据分别存储在各自的本地控制器中,未实现集中采集与分析。当出现异常工况(如粉尘浓度骤升+气流速度波动)时,操作人员需逐一查看各系统数据,判断故障原因的时间超过30分钟,无法及时采取协同调控措施,导致设备长期处于低效运行状态,平均能效比现代协同控制系统低12%-15%。

缺乏负载预测性调控:传统控制仅能被动响应已发生的负载变化,无法基于历史数据(如每日9-11点生产负荷高峰导致负载升高)进行预测性调控。在负载变化前未提前调整供电与清灰参数,导致设备在负载波动初期出现1-2小时的能效低谷,进一步增加了整体能耗与排放风险。

3 智能控制在电除尘器中的应用方案设计

3.1 模糊PID复合供电控制方案

针对传统PID控制对非线性负载适应性差的问题,融合模糊控制的非线性决策优势,设计模糊PID复合控制方案:

1. 参数监测层:通过激光粉尘浓度仪、粒径分析仪实时采集负载参数(粉尘浓度 C 、中位粒径 d_{50} 、气流速度 v),采样频率1次/s;
2. 模糊决策层:建立负载参数与PID参数(比例系数 K_p 、积分系数 K_i 、微分系数 K_d)的模糊规则库,例如:

当 $C > 150 \text{g/m}^3$ 、 $d_{50} < 10 \mu\text{m}$ 时,判定为“高负载难处理”工况,输出 $K_p=1.2$ 、 $K_i=0.8$ 、 $K_d=0.5$,增强PID调节灵敏度;当 $C < 50 \text{g/m}^3$ 、 $d_{50} > 30 \mu\text{m}$ 时,判定为“低负载易处理”工况,输出 $K_p=0.8$ 、 $K_i=1.2$ 、 $K_d=0.3$,降低调节强度以节能;3. 执行控制层:根据模糊决策输出的PID参数,实时调整供电电压(范围25-40kV)与电流(范围0.8-1.5A),确保电场强度维持在2.8-3.2kV/cm的能效最优区间。

3.2 神经网络预测清灰控制方案

针对定时清灰无法匹配积灰速率的问题,采用BP神经网络构建积灰厚度预测模型,实现动态清灰控制:1. 样本采集:采集不同负载工况下(C : 30-200 g/m^3 , d_{50} : 5-50 μm , v : 0.8-1.5 m/s)的积灰厚度数据,共获取5000组样本,分为训练集(80%)与测试集(20%);2. 模型构建:以 C 、 d_{50} 、 v 、运行时间 t 为输入层,积灰厚度 h 为输出层,构建3层BP神经网络(输入层4神经元,隐藏层12神经元,输出层1神经元),训练后模型预测误差 $< 5\%$;3. 清灰决策:设定积灰厚度阈值(3mm为临界值),当模型预测 $h \geq 3\text{mm}$ 时,触发清灰指令;同时根据 h 值调整清灰强度($h=3-4\text{mm}$ 时,压缩空气压力0.6MPa; $h > 4\text{mm}$ 时,压力0.7MPa)。

3.3 深度学习系统协同控制方案

针对系统协同性不足的问题,采用CNN-LSTM(卷积神经网络-长短期记忆网络)融合模型,实现多参数协同优化:1. 数据融合层:采集负载参数(C 、 d_{50} 、 v 、烟气温度 T)、设备运行参数(供电 U/I 、积灰厚度 h 、清灰状态)、能效指标(除尘效率 η 、单位能耗 P),构建多维数据集;2. 模型训练层:利用CNN提取负载参数与能效指标的空间关联特征,通过LSTM学习参数变化的时间序列规律,建立“负载-运行参数-能效”的映射模型,模型拟合度 $R^2 > 0.98$;3. 协同决策层:根据模型输出,同步优化供电参数、清灰周期、气流调节阀开度,例如:清灰前10s,自动将供电电压提高5%,抵消二次扬尘影响;气流速度升高0.2 m/s 时,自动将后段电场电压提高8%,维持整体除尘效率。

4 工业验证与效果分析

4.1 验证条件与方案

选取某2×600MW燃煤机组配套的电除尘器(处理烟气流速 $2.4 \times 10^5 \text{m}^3/\text{h}$,设计效率99.5%)为验证对象,设置4组对照实验,每组运行周期15天:

对照组:传统固定控制模式;

实验组1:模糊PID复合供电控制;

实验组2:神经网络预测清灰控制;

实验组3:深度学习系统协同控制。

4.2 验证结果分析

4.2.1 能耗优化效果

对照组:平均单位能耗 $0.92 \text{kW} \cdot \text{h}/1000 \text{m}^3$;

实验组1:能耗降至 $0.75 \text{kW} \cdot \text{h}/1000 \text{m}^3$,降幅18.5%;

实验组2:能耗降至 $0.72 \text{kW} \cdot \text{h}/1000 \text{m}^3$,降幅21.7%;

实验组3:能耗降至 $0.66 \text{kW} \cdot \text{h}/1000 \text{m}^3$,降幅28.3%。

4.2.2 效率提升效果

对照组:除尘效率波动范围98.1%-99.5%,平均98.8%;

实验组1:效率波动范围99.2%-99.6%,平均99.4%;

实验组2:效率波动范围99.3%-99.7%,平均99.5%;

实验组3:效率波动范围99.5%-99.8%,平均99.7%。

4.2.3 响应性能效果

对照组:负载波动后,效率恢复至99.5%以上需30s;

实验组1:恢复时间缩短至10s;实验组2:恢复时间缩短至8s;

实验组3:恢复时间缩短至0.5s,实现负载波动的实时响应。

4.3 经济与环境效益

经济效益:按机组年运行7000小时、电价0.65元/ $\text{kW} \cdot \text{h}$ 计算,实验组3年节约电费约 $7000 \times (0.92 - 0.66) \times 240 \times 0.65 = 288240$ 元,智能控制系统投资回收期约1.2年;环境效益:实验组3年减少粉尘排放量约 $7000 \times 2.4 \times 10^5 \times (99.7\% - 98.8\%) \times 10^{-6} = 1425.6$ 吨,远低于《火电厂大气污染物排放标准》(GB 13223-2011)要求。

5 结论与展望

本文通过分析电除尘器传统控制模式的局限性,设计并验证了三类智能控制方案,主要结论如下:1. 模糊PID复合供电控制可有效适配负载非线性变化,较传统控制降低能耗18.5%,效率提升0.6个百分点;2. 神经网络预测清灰控制通过精准预测积灰厚度,解决“过度清灰”与“清灰不足”问题,能耗降幅达21.7%,极板寿命延长15%;3. 深度学习系统协同控制实现多参数联动优化,能耗降幅最高(28.3%),效率稳定性最优(波动 $< 0.3\%$),是当前电除尘器智能化改造的最优方案。

未来研究可进一步拓展两方面内容:一是融合数字孪生技术,构建电除尘器全生命周期数字模型,实现预测性维护与动态优化;二是探索多设备协同控制,将电除尘器与脱硫、脱硝设备纳入统一智能控制系统,实现全流程烟气处理的能效最优。

参考文献

- [1] 中国环境保护产业协会. 中国工业环保发展报告(2024)[M]. 北京:中国环境出版集团,2024.
- [2] 刘强,张敏,王浩. 模糊PID控制在电除尘器供电系统中的应用[J]. 电力自动化设备,2023,43(6):189-195.
- [3] 陈明,李雪,赵阳. 基于BP神经网络的电除尘器清灰优化控制[J]. 环境工程学报,2022,16(10):3345-3352.
- [4] GB 13223-2011,火电厂大气污染物排放标准[S]. 北京:中国标准出版社,2011.
- [5] Li W, Zhang Y, Chen H. Deep Learning-Based Collaborative Control for Energy Saving and Efficiency Improvement of Electrostatic Precipitators[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2023, 19(8): 8976-8985.

Research on the Collaborative Promotion Path of Comprehensive Land Consolidation and Farmland Protection in the Context of Rural Revitalization

Baobin Qu

Lanshan District Natural Resources Development Service Center, Linyi, Shandong, 276000, China

Abstract

Against the backdrop of the comprehensive promotion of rural revitalization strategy, the scientific allocation and efficient utilization of land resources have become an important foundation for agricultural and rural modernization and food security. As a key measure to coordinate urban and rural development, optimize spatial patterns, and enhance land use efficiency, comprehensive land consolidation can help break the fragmentation and singularity drawbacks of traditional consolidation, promote intensive use of land resources, and improve the ecological environment. The protection of arable land is the bottom line for national food security and sustainable development. However, against the backdrop of increasing competition for urban and rural land use and ecological pressure, traditional remediation and administrative measures alone are no longer sufficient to address issues such as farmland loss and declining quality. This article reviews the theoretical and policy evolution of comprehensive land consolidation and farmland protection, analyzes practical obstacles, proposes collaborative paths such as spatial pattern optimization, mechanism innovation, interest linkage, and technological empowerment, and summarizes experience through case studies, aiming to provide reference for sustainable management of land resources in rural revitalization.

Keywords

rural revitalization; Comprehensive land consolidation across the entire region; Farmland protection; Collaborative promotion; spatial pattern

乡村振兴背景下全域土地综合整治与耕地保护协同推进路径研究

曲宝彬

临沂市兰山区自然资源开发服务中心, 中国·山东 临沂 276000

摘要

在乡村振兴战略全面推进背景下, 土地资源的科学配置与高效利用成为农业农村现代化和粮食安全的重要基础。全域土地综合整治作为统筹城乡发展、优化空间格局和提升土地利用效益的关键举措, 有助于打破传统整治的碎片化与单一化弊端, 推动土地资源集约利用和生态环境改善。耕地保护则是国家粮食安全与可持续发展的底线。然而, 当前在城乡用地竞争和生态压力加大的背景下, 单靠传统整治与行政手段已难以应对耕地流失和质量下降等问题。本文梳理了全域土地整治与耕地保护的理论与政策演进, 分析现实障碍, 提出空间格局优化、机制创新、利益联动、科技赋能等协同路径, 并结合案例总结经验, 旨在为乡村振兴中的土地资源可持续管理提供参考。

关键词

乡村振兴; 全域土地综合整治; 耕地保护; 协同推进; 空间格局

1 引言

实施乡村振兴战略, 是新时代“三农”工作的总抓手, 是实现农业农村现代化和促进城乡融合发展的关键路径。土地资源作为农业生产和农村发展的物质基础, 其配置效率与生态安全水平直接影响乡村振兴战略目标的实现。近年来,

随着人口城镇化进程加快、产业结构调整 and 生态环境保护压力加大, 农村地区土地利用粗放、耕地流失与质量下降、空间错配和生态退化等问题日益突出。为破解这些难题, 国家提出推进全域土地综合整治, 通过系统规划、空间重构和多目标协同, 提升土地利用效率和农村生态环境, 促进农业高质量发展和农村人居环境改善。同时, 耕地保护作为国家粮食安全和生态屏障的核心战略始终被高度重视, 其数量、质量和生态功能的提升已成为土地整治工作的重要目标和刚性约束。

【作者简介】曲宝彬(1975-), 男, 中国山东临沂人, 本科, 高级工程师, 从事自然资源工程研究。

2 全域土地综合整治与耕地保护的理论与政策演进

2.1 全域土地综合整治的理论内涵与发展方向

全域土地综合整治,是指以行政区或流域为基本单元,针对耕地、建设用地、生态用地等多类型土地,采用系统规划、空间优化、资源整合与工程治理等多元手段,推动土地资源的整体优化配置和功能提升。与传统“项目化、碎片化”整治模式相比,全域土地整治更强调顶层设计、系统协同和多目标整合,其目标不仅包括耕地数量补充和质量提升,还涵盖村庄布局优化、生态空间修复、农村产业升级与人居环境改善。全域整治注重“量一质一生态一功能”协同优化,将农田整理、土地复垦、村庄整治、生态修复等工程一体化推进,实现从“单一项目改造”向“全要素、全流程、全空间治理”转型。理论上,这一模式有助于打破空间利用碎片化、资源配置低效和治理单一化等弊端,为农村空间形态重塑和土地要素高效流动提供制度与机制基础。

2.2 我国耕地保护政策演变及现实意义

耕地保护政策经历了由“数量管控”到“质量提升”再到“生态安全”并重的演变过程。早期以控制耕地总量、防止非农化占用为核心,推行“占补平衡”政策,确保耕地面积不减少。进入新世纪后,政策重心逐步转向耕地质量提升与高标准农田建设,通过土地整治、田块调整、设施升级等措施提升耕地产能和生态功能。近年来,随着国家粮食安全和生态文明战略深入推进,耕地保护进一步强调质量、数量和生态“三位一体”,实施耕地用途管制、永久基本农田划定、田长制管理等新举措,实现从“守住红线”到“提升质量”“优化功能”的多维升级。耕地保护不仅关乎粮食生产,更是维护农村社会稳定、促进农业可持续发展的重要保障,具有显著的社会、经济和生态意义。

2.3 全域土地整治与耕地保护的耦合机制与协同基础

全域土地整治与耕地保护在目标、内容与路径上高度耦合。一方面,土地整治通过地块整合、农田基础设施建设和生态修复,为耕地数量补充、质量提升和功能完善提供空间与条件。另一方面,耕地保护对土地整治设定红线与约束,防止“边整治边流失”的逆向行为,保障整治成果的持续性和有效性。两者协同推进有助于实现“增量与存量”并举、“开发与保护”平衡、“空间与生态”兼顾。协同基础在于将耕地保护目标、指标和约束要求嵌入土地整治全过程,构建规划、设计、实施、监管和评估全链条的联动机制,推动多目标协同与多部门协作。

3 协同推进全域土地整治与耕地保护的现实障碍分析

3.1 空间规划体系的冲突与衔接障碍

现实中,不同空间规划体系之间存在目标冲突和制度壁垒。全域土地整治涉及耕地、建设用地、生态用地等多类

空间的重组,与国土空间规划、“三区三线”、永久基本农田和生态保护红线等政策的融合度不足。部分地区缺乏基于多规合一的顶层设计,导致项目间空间冲突、用途不清、边界模糊,影响整体布局效益。空间治理碎片化问题突出,难以有效统筹存量用地优化与增量空间扩展,导致耕地补充与保护难以同步推进。

3.2 多元利益主体的矛盾与参与积极性不足

土地整治与耕地保护工作涵盖政府、农村集体、农户、企业等多元主体,各方在资源分配、收益获取和权责划分等方面的利益诉求复杂,极易引发矛盾和分歧。在实际操作中,部分整治项目仍以政府主导为主,农户往往处于被动参与地位,项目收益分配机制不合理、利益激励措施滞后,影响了基层群众的积极性。此外,社会资本参与土地整治与耕地保护的力度不足,主要受限于产权分配不明晰、生态补偿机制不健全和投资回报不确定等因素。由于项目收益、产权归属和补偿机制等制度体系不完善,农户和农村集体对土地整治和耕地保护的主动性不高,难以形成多元主体共建共治、长效管护的良性格局。为此,亟须完善利益联动与分配机制,强化多元激励和保障,提升全社会参与积极性,推动协同治理模式的深入落地。

3.3 政策衔接与技术支撑体系建设滞后

当前,全域土地整治与耕地保护的体系仍存在一定的空白、重叠和衔接不畅等问题,缺乏全国统一的标准、科学的评价体系和有效的监管机制,导致政策实施过程中存在模糊地带和管理盲区。在项目立项、实施、验收等关键环节,操作性不强,政策落实面临较大实际障碍。同时,现代信息技术在土地管理中的应用普及度有限,遥感监测、GIS空间分析、数字化管理平台等技术尚未广泛应用于整治与保护的全过程,致使土地整治项目难以实现精细化管理,耕地保护动态监测能力不足。这不仅影响了管理决策的科学性,也制约了土地资源高效利用与耕地保护红线的刚性落实。因此,亟须完善政策顶层设计,健全技术支撑体系,推动管理方式向智能化、精准化转型。

4 协同推进全域土地整治与耕地保护的途径创新

4.1 统筹空间格局优化与高标准农田建设

协同推进的首要路径是优化空间布局,提升耕地数量、质量与生态效益的协同。应坚持“多规合一”原则,强化国土空间规划对土地整治的顶层统筹,科学划定耕地保护红线,严控非农建设占用。结合土地整治项目,实施耕地集中连片整理、地块整合与基础设施提升,推进高标准农田建设工程,实现灌排、田间道路、农田防护等配套设施的升级。通过空间格局优化,将零散耕地整合为连片优质农田,提高土地利用率和耕地质量。同时,应将生态修复纳入土地整治全过程,通过生态廊道、绿色基底、生态缓冲带等建设,增

强农业空间的生态功能和环境承载力，推动生产空间与生态空间协同发展。

4.2 创新政策机制，完善多元协同治理体系

有效的政策机制和治理体系是协同推进的制度保障。应健全土地整治与耕地保护衔接政策，完善生态补偿、利益分配和激励约束机制，强化财政支持、金融创新和技术服务保障。积极推广“田长制”、村集体经济合作社、农村土地股份合作社等新型治理模式，明确耕地保护责任和利益归属，调动农户与集体积极性。建立跨部门、跨区域的协调机制，打破行政壁垒，推动农业农村、自然资源、生态环境等多部门协同治理。加强村庄、农田与生态空间一体化管理，构建“政府引导、市场参与、农户受益、社会监督”的多元共治格局，实现土地整治项目与耕地保护目标的同步落实和协同提升。

4.3 科技赋能与数字化管理创新

现代信息技术为协同推进提供了强大支撑。应大力推动遥感监测、无人机测绘、地理信息系统（GIS）、大数据建模等信息技术在土地整治与耕地保护中的全流程应用，实现对土地利用变化、耕地质量提升、生态修复效果的动态监测和科学评估。建设数字化土地管理平台，实现项目规划、设计、施工、监管和绩效评估等全流程的信息共享和智能管理。利用数据分析和智能决策工具，及时发现空间利用冲突、耕地补充与流失动态，辅助科学制定优化方案。鼓励开展智慧农业、精准耕作等新技术应用，推动土地资源利用效率提升和耕地保护管理现代化。

5 典型案例分析与经验启示

5.1 浙江“全域土地整治+永久基本农田保护”一体化模式

浙江省在全域土地综合整治实践中，创新性提出“全域土地整治+永久基本农田保护”一体化推进模式，通过多规融合、农田连片整理、生态修复与产业发展协同，提升耕地数量、质量和生态功能。该模式以县域为单元，强化空间格局整体优化，推行耕地补充指标统筹配置、生态补偿与利益联动机制，实现空间重构与治理效益最大化。实践表明，该模式有效破解了空间碎片化、利益分散与项目割裂难题，形成可复制推广的经验。

5.2 江苏“田长制”与智慧农业平台结合

江苏省推广“田长制”责任管理，强化耕地保护责任落实到人，建立田块精细化、智能化管理新模式。通过智慧农业管理平台，集成遥感监测、地块动态监管、环境数据实时采集等技术，实现耕地利用动态监控、质量提升和资源高

效配置。政策与技术深度融合，推动耕地保护与土地整治协同效率显著提升。该经验表明，创新管理机制和数字化手段相结合，有助于强化责任落实与科学决策，为耕地保护提供可持续保障。

5.3 河南“项目整合+利益联动”机制创新

河南省在推进全域土地综合整治过程中，积极探索“项目整合+利益联动”创新机制，将土地整理、村庄整治、生态修复等多类型项目有机融合，形成协同推进的“项目组合拳”。通过完善收益分配体系和生态补偿政策，引导项目收益在村集体、农户、社会资本等多元主体间合理分配，激发各方参与的积极性。同时，注重社会资本引入和利益联动，提升市场化运作水平，推动资源高效整合与项目集成实施。这一机制创新，有效破解了以往项目各自为战、动力不足、成果分散等难题，实现了从“单一治理”向“多元共建共治共享”的转变。河南省的实践经验为全域土地整治与耕地保护协同推进提供了可复制、可推广的路径，对提升土地资源利用效率和农村生态环境具有重要参考价值。

6 结语

全域土地综合整治与耕地保护的协同推进，是新时代乡村振兴和国土资源可持续管理的核心内容。面对空间规划、利益协调、政策衔接与技术支撑等多重挑战，需以系统思维、创新机制和科技赋能为引领，持续推进空间格局优化、政策机制完善、多元治理和数字化管理的深度融合。实践表明，只有把耕地保护目标嵌入土地整治全过程，实现数量、质量和生态功能的同步提升，才能筑牢乡村振兴的土地基础。未来应进一步完善顶层设计，强化多规融合、部门协作与利益联动，提升治理效能和管理智能化水平，促进土地资源高效利用和生态安全稳定。通过制度创新与典型经验推广，不断推动土地整治与耕地保护的协同发展，为实现乡村振兴、粮食安全与生态文明建设作出更大贡献。

参考文献

- [1] 刘发雄.不同村庄类型的全域土地综合整治与保障措施研究[J].新型城镇化,2025,(08):65-68.
- [2] 吴妍.全域土地综合整治实践与优化路径研究——以安达市任民镇为例[J].黑龙江国土资源,2025,23(08):91-96.
- [3] 杨培源.全域土地综合整治对耕地保护的实践与思考：以福建省泉州市为例[J].山西农经,2025,(13):123-125.
- [4] 姚双双,荀文会,程光大,等.市级耕地保护专项规划编制逻辑与内容体系研究——以沈阳市为例[J/OL].中国国土资源经济, 1-15[2025-09-07].
- [5] 王圣泽.农业现代化背景下土地利用与耕地保护对策研究[J].新农村,2025,(22):34-36.

Construction of deformation monitoring and stability warning model for plain reservoir dam

Yanqing Ma¹ Ruizhang Wang¹ Weihan Li¹ Changhao Chen² Zhenyu Wang²

1. China Construction Eighth Bureau Second Construction Co., Ltd., Jinan, Shandong, 251400, China

2. Construction Eighth Bureau Southwest Construction Engineering Co., Ltd., Jinan, Shandong, 251400, China

Abstract

This study begins by investigating the deformation mechanisms of cofferdam structures, establishing a multi-source monitoring system that integrates surface, internal, seepage, and environmental quantity measurements. The paper details automated data acquisition and preprocessing workflows. For deformation analysis, we propose a pattern recognition method utilizing spatiotemporal distribution features and correlation analysis. Stability evaluation combines limit equilibrium methods with finite element numerical simulations for quantitative assessment. A comprehensive framework comprising four layers—data acquisition, analysis, modeling, and early warning—is designed. The paper elaborates on a multi-level early-warning indicator system, threshold determination methodologies, and core algorithms including statistical analysis, machine learning, and hybrid warning systems. These innovations aim to deliver real-time, accurate, and practical stability monitoring for cofferdam safety, providing scientific decision-making support for plain reservoir management.

Keywords

plain reservoir; dam deformation; stability analysis

平原水库围坝变形监测及稳定性预警模型构建

马延青¹ 王瑞樟¹ 李维汉¹ 陈昶昊² 王振宇²

1. 中建八局第二建设有限公司, 中国·山东 济南 251400

2. 中建八局西南建设工程有限公司, 中国·四川 成都 610041

摘要

研究首先从围坝变形机理出发, 建立了集表面、内部、渗流及环境量监测于一体的多源立体化监测体系, 并阐述了数据自动化采集与预处理流程; 进而, 在变形分析层面, 提出了基于时空分布特征与相关性分析的规律分析方法, 在稳定性评价层面, 综合运用极限平衡法与有限元数值模拟进行了定量评价; 最终, 设计了包含数据层、分析层、模型层与预警层的总体框架, 详细阐述了多层级预警指标体系、阈值设定方法以及统计、机器学习与混合预警等核心算法, 旨在实现围坝稳定性的实时、准确与实用性预警, 为平原水库的安全管理提供科学决策支持。

关键词

平原水库; 围坝变形; 稳定性分析

1 引言

平原水库作为重要的水利基础设施, 其围坝的长期安全与稳定运行直接关系到下游人民生命财产安全和区域经济的可持续发展。相较于山区水库, 平原水库围坝多建于软基之上, 其变形机理更为复杂, 受地质条件、水位骤降、渗流控制及施工质量等因素影响显著, 传统单一监测手段与经验判断已难以满足现代工程安全管理的要求。因此, 构建一套集先进监测技术、科学分析理论与智能预警模型于一体的综合体系, 实现对围坝变形行为的精准捕捉、稳定性状态的

客观评价以及潜在风险的超前预警, 已成为当前水利工程安全领域亟待解决的关键课题。本文旨在系统研究平原水库围坝变形监测、数据分析、稳定性评价与预警模型构建的理论与方法, 以形成一套科学、实用的技术方案, 提升水库安全管理的主动性与智能化水平。

2 平原水库围坝变形监测体系构建

2.1 围坝变形机理与监测需求分析

平原水库围坝变形监测体系的科学构建源于对围坝变形内在机理的认识以及由此产生的精准监测需要, 围坝变形不是单一的形变, 主要包括软基固结、坝体自重连续作用产生的竖向变形、库水推力、土压力引起的水平位移以及不均匀沉降或材料抗拉强度不足产生的裂缝等不同类型的形变,

【作者简介】马延青(1992-), 男, 中国山东济南人, 本科, 助理工程师, 从事水利工程研究。

各种形变综合反应坝体的结构状况；影响稳定的因素非常复杂，地质条件决定着起始变形量大小；库水位骤降的反向透水力容易导致上坡失稳；渗流的作用时间久可能导致坝体内部被掏空或出现管涌；施工质量不好可能留下坝体内不均匀变形的隐患等。因此，从机理出发进行监测内容系统的覆盖面广于表面、内部分析；根据机理分析，测点要注重重点加强和依据布设等要求进行测点布设，利用测点所采集的信息进行综合分析，把整体控制和局部细测结合在一起，在准确掌握反映围坝实际工作状态安全性的基础上，为评价围坝的稳定性及作出预警提供可靠依据^[1]。

2.2 多源立体化监测技术方案设计

依据围坝变形机理认识和多源立体化监测技术方案，综合应用多种手段和技术从整体上把握围坝的状态。该方案综合应用了表面变形监测技术：GNSS 实时连续自动监测测点的绝对坐标位置，测量机器人精准监测测网的角度、距离，InSAR 对大面积的地表毫米级的变形趋势有可观测性，3D 激光扫描能够迅速获取坝体表面的高精度点云数据，描述坝体的整体形变趋势；探明坝体内的情况可以布设内部变形监测技术：使用测斜仪监测坝体深层水平位移；采用沉降仪监测坝体与坝基不同层面的沉降情况；通过应变计了解结构内应力应变状态，见图 1；渗流渗压监测技术是必需的，通过埋设渗压计测定坝体与坝基内孔隙水压力分布，用量水堰测定渗流量变化来判断渗流是否稳定；同时还需要进行环境监测，通过持续监测库水位、降雨量及地下水位情况给变形提供重要的外荷载信息。最后，将各源头数据交叉校验，互为补充，形成一个从宏观到微观、从表层到内部、从力学响应到水力驱动的立体化监测网，为建立稳定性预警模型提供科学全面的基础数据保障。



(图 1: 沉降仪观测分层沉降)

2.3 监测数据的自动化采集与预处理

通过多源监测数据的集成与传输方案，将分布在各监测点位的 GNSS 接收机、渗压计、测斜仪等智能传感器接入数据采集单元，并利用有线或无线通信网络组成物联网，实现数据的自动采集与远程实时传输至中央数据库，解决数据源的异构性和孤立性问题。原始数据不可避免地包含误

差，因此需进行严格的预处理，包括采用统计识别或模型算法进行粗差剔除，对测量机器人等网式观测数据进行平差处理以优化估值和精度评定，并对不同量纲和量级的物理量进行标准化方法处理，消除单位差异，为多源数据融合分析奠定基础。在此基础上，将清理后的数据按时间顺序组织，构建长期、等间隔的监测数据时间序列，并对其进行特征分析，如计算趋势项、周期项和残差项，识别变形与环境因素的响应规律与滞后效应，从而提取出反映坝体真实状态的特征信息，为后续的稳定性分析与预警模型提供高质量、结构化且富含规律的数据基础^[2]。

3 围坝变形分析与稳定性评价理论

3.1 基于监测数据的围坝变形规律分析方法

根据高精度的监测资料，通过把离散的监测数据转换成一定时空条件下坝体整体结构状态的信息，围绕着监测数据重点分析围坝变形的空间时程分布特性，采用等值线图的方法给出坝体表面各测点位移的空间分布图，确定位移异常区；通过对坝轴线或坝横断面上的测点变形量和变形梯度的空间分布用剖面图表示出来，反映结构内部响应；通过以关键测点为对象的过程线图描述其在不同时间段内变形值的发展变化趋势，并刻画变形的大小、速率及稳定性情况。再根据以上分析进一步探究其变形和因素的相关性，在这里应用数理统计法定量研究变形量和库水位、时效等主要因素间的相互作用以及数学关系，例如建立变形—水位关系模型来探讨坝体对水力荷载的弹性响应，或者建立变形—时效关系模型以期将由土体蠕变、固结等因素引起的不可恢复的塑性变形部分从整体变形量中分离出来。

3.2 围坝稳定性定量评价方法

围坝稳定性的定量评价是预警模型建立的理论依据，方法上既要满足工程应用要求又要确保结果准确性，组成从宏观整体到微观机理多层次评价系统；基于极限平衡法的坝坡稳定性计算方法是一种工程应用最广的经典方法，在理论上，采用预设圆弧、复合等滑动面形式，利用静力平衡原理分析坝坡滑体滑面上抗滑力矩与滑动力矩，得出相应安全系数的大小，该法最大的优点是简单直观、计算方便快捷，适用于工程初步设计、常用工况下常规校核及快速评估场景；但由于它的计算前提都是一些假定条件，实际上并未考虑坝体内部的应力应变和复杂的边界条件。对于这一缺陷可以通过渗流—应力耦合的有限元数值模拟方法加以解决，即通过建立能真实反应土体本构关系的数值模型，模拟库水位升降时坝体内的渗流场与应力场的变化过程，能精确计算出坝体与地基的位移和应力场分布情况以及潜在塑性区产生的和发展过程，从机理层面对稳定性进行更深层次的认识。因此，为了使不同的成果获得直接对比效果，不论采用何种方式计算，最后计算所得的安全系数均应同对应规范中不同的建筑物等级或者工程情况下的评价标准相对照。严谨的量化对比

工作是把计算所得的结果转变为工程稳定性的判断的重要的中间步骤，并能之后的预警模型中各种等级的风险阈值提供科学的依据和规范的基础^[3]。

4 围坝稳定性预警模型构建

4.1 预警模型总体框架设计

建设围坝稳定性预警模型应有整体框架，以此模型实现稳定性的实时性、准确性以及实用性的基本目标和准则，并且基于上述分析可将该模型的逻辑结构分为4个层次：数据层，作为模型的基础，集成模型中用到的所有多源监测和环境量数据；分析层，进行实时的数据处理与时空特征分析来发现变形的趋势；模型层是模型的关键部分，利用经过训练好的算法对模型的状态进行判别、预测；最终预警层根据模型的输出值以及事先设置好的阈值进行对比判断得到预警结果并自动生成不同的等级预警信息发布，即各层模型需要依次完成自己的功能后才可以上报下一层次模型，具有从原始数据到预警决策的连续性和科学性，并在模型的基础上可以针对具体指标做出相应架构规划^[4]。

4.2 预警指标体系与阈值设定

围坝稳定性预警模型是否有效，要看能否建立起一套较为科学合理的多级预警指标体系，并且要确定好每级预警指标的阈值，以体现单点指标、整体指标、变化率指标、趋势指标等方面的预警指标特性。预警阈值的判定方法有根据行业规范的标准来判定、由理论计算得出限值、从历史监测数据中找到正常值范围并结合实际通过专家经验来进行修正等手段来确定。再把预警状态分正常、蓝色预警、黄色预警、橙色预警、红色预警这几个等级，表明坝体的风险是按照从正常到比较危险的过程来进行分级预警，并能够及时地作出正确的应对措施。

4.3 核心预警算法模型

预警模型本质就是算法，它决定着预警预测精度与可靠性。目前核心算法有三种，分别是：统计预测模型，统计学上用一定的数学方法确定变形量与各种影响因素之间的数量

关系，对于存在稳定规律的可预测的事件比较适用；机器学习预测模型是大数据时代流行的技术，可以从海量监测数据中发现较难辨别的复杂非线性特征和时序相关性，而LSTM可以较好的实现对于时间序列长时滞的捕捉；将表征物理机理的数据驱动模型与反映物理机理的机理模型进行有机结合，以期达到发挥机理与数据各自优点，进而弥补彼此缺陷的目的，可进一步提高模型的泛化能力及解释性，实现预警模型本质的内涵式发展。针对不同模型，可以按照明确的模型比选、性能评估指标等标准展开对比，然后选择最合适的优化算法应用于该工程预警中，保证模型是最优模型^[5]。

5 结语

综上所述，通过构建“监测体系-分析理论-预警模型”的完整技术链条，不仅详细阐述了从多源数据采集、处理到变形规律挖掘和稳定性定量评价的全过程，更创新性地设计了一套分层递进、指标多元、算法智能的稳定性预警模型框架。该研究将现代监测技术、数值模拟方法与数据驱动算法深度融合，实现了对围坝稳定性从静态评估到动态预测的跨越，为工程安全管理提供了从“事后分析”转向“事前预警”的理论依据与实践路径。未来，随着物联网、大数据和人工智能技术的不断发展，该模型框架有望通过引入数字孪生等技术进一步深化，实现更精准的仿真预测与智慧化管理。

参考文献

- [1] 李明.百色水库银屯副坝变形监测工作基点复建方案设计[J].广西水利水电,2025,(03):68-70+79.
- [2] 吴中波,木合甫力·阿不都热依木,元鹏鹏.高海拔恶劣场景的水库大坝安全监测系统研究[J].城市建设理论研究(电子版),2025,(27):198-200.
- [3] 褚夫玉,张心怡,康建荣,等.InSAR在水利工程变形监测中的应用研究进展[J].水利水电快报,2025,46(09):85-91.
- [4] 钟益斌,陈意良,陈有琰,等.基于涪城一号雷达卫星和视觉测量技术的土石坝变形监测应用研究[J].测绘通报,2025,(S1):151-154.
- [5] 闫晓亮.某水库大坝变形监测系统改造升级方案的比选[J].山西水利科技,2025,(03):74-76.

Explore the smart management measures of construction projects in the new period

Ziqi Liang

Xi'an Aerospace Test Technology Institute, Xi'an, Shaanxi, 710000, China

Abstract

In recent years, China's rapid economic development has driven substantial growth in the construction industry. The continuous annual increase in both the quantity and scale of construction projects serves as a clear indicator of this progress. Effective on-site management during project execution is crucial, directly impacting both schedule adherence and quality assurance. With the advancement of information technology, smart management solutions can now be implemented in construction site operations, significantly enhancing operational efficiency and quality control. This paper explores intelligent management strategies for modern construction sites, offering actionable insights to support industry practices in this evolving era.

Keywords

construction project; construction site; intelligent management measures

探讨新时期建筑工程项目施工现场智慧管理措施

梁子琦

西安航天动力试验技术研究所, 中国·陕西 西安 710000

摘要

近年来,随着我国经济的快速发展,建筑行业得到了大力发展,建筑工程项目的数量逐年增多、建筑工程项目的规模逐年扩大就是很好地体现。在建筑工程项目的施工过程中,做好施工现场的管理工作至关重要,直接关系到建筑工程项目的进度及质量。在信息化技术大力发展的今天,可以将信息化技术应用于建筑工程项目施工现场管理中,通过智慧管理措施的应用,提升管理效率及质量。在此基础上,文章针对新时期建筑公测好难过项目施工现场的智慧管理措施进行了探讨,旨在为相关工作提供一定的参考。

关键词

建筑工程项目; 施工现场; 智慧管理措施

1 引言

我国的国民经济体系中,建筑行业一直居于重要的位置,这是因为建筑行业在带动人员就业、促进其他行业发展等方面发挥着至关重要的作用。我国经济迅速发展的当下,建筑行业的重要性得到了进一步凸显。在建筑工程项目中,施工现场的管理一直是一个难点,因为施工现场的施工人员、施工设备、施工材料众多,对其进行有序安排具有较大的难度。另一方面,在施工现场,施工人员往往都需要进行露天高空作业,所以存在着较多的安全隐患。为了提升建筑工程项目施工现场的管理水平,可以积极采用智慧管理措施。

2 施工现场智慧管理的必要性与价值

2.1 提升项目管理效率的内在需求

从提升项目管理效率的内在需求来看,传统管理模式依赖人工记录与层层上报,容易造成信息滞后与沟通壁垒。而智慧管理系统通过物联网、BIM 等信息技术,能够实时采集现场数据,自动生成进度报告和资源调配方案,项目团队可以迅速掌握施工动态,大幅减少人为判断失误和重复劳动。这种技术赋能不仅加快了决策速度,也让管理人员从繁琐事务中脱身,真正聚焦于核心环节,从而整体提升工程建设的精细化管理水平。

2.2 保障施工安全质量的必然要求

施工现场往往风险因素复杂,传统检查方式难以及时发现所有隐患。通过部署智能监控设备和传感器系统,管理人员能够对高空作业、基坑支护等关键环节进行全天候监测,一旦发现异常数据或违规行为,平台立即触发预警并推送至相关责任人。与此同时,借助 AI 图像识别等技术,系

【作者简介】梁子琦(1994-),男,中国山东郓城人,本科,工程师,从事土建工程及管理研究。

统可自动识别施工工艺是否符合规范，有效避免因人为疏忽导致的质量缺陷。这种动态化、全程化的管控方式，显著降低了安全事故发生概率，为工程品质筑起一道坚实的“数字防线”。

2.3 实现绿色低碳建造的重要途径

建筑业长期以来面临能耗高、污染重的挑战，而智慧工地系统能对水、电、建材等资源消耗进行精准计量与智能调控。例如，通过环境监测模块实时采集扬尘、噪音等数据，系统可自动启动降尘设备，优化施工时间安排以减少对周边环境的影响。在材料管理方面，智慧平台能够基于施工进度精确计算物料需求，减少浪费与二次运输带来的碳排放。可以说，智慧管理将绿色施工理念转化为可量化、可控制的具体行动，为行业绿色转型提供了扎实的技术支撑。

3 新时期建筑工程项目施工现场智慧管理措施

3.1 建筑工程项目施工现场的人员智慧管理措施

人员管理是建筑工程项目施工现场管理中的重要内容。建造工程项目施工现场的施工人员众多，如一线施工人员、一线管理人员、其他类人员等。以一线施工人员为例，具体又包括土建工、钢筋工、模板工等。管理好众多工种不同的施工人员，往往具有很大的难度。在进行人员管理时，可以积极采用智慧管理措施，从而降低人员管理的难度。在管理过程中，可以采用通过人脸识别技术、指纹识别技术、虹膜识别技术等的应用，实现对施工人员的实名考勤。在这个过程中，确保每一位进入施工现场的人员都能够有精准的身份记录，以便于对人员进行管理和追溯。进入施工现场的人员的考勤数据会实时上传至相应的管理平台，以便于管理人员随时了解现场人员的出勤情况，在这个过程中，能够有效提高考勤管理的效率和精准性。另外，可以通过物联网技术的应用，对施工现场的人员进行实时定位，在此基础上了解人员在工地中的实时分布。当施工现场发生了紧急情况时，就可以快速地锁定相关人员所处的位置，进而迅速地开展救援活动。与此同时，还能够现场人员的工作区域进行实时监控，以防相关人员进入到危险区域中，在这个过程中减少了安全事件的发生。建筑工程智慧管理趋势图如表 1 所示。



表 1 建筑工程智慧管理趋势图

3.2 建筑工程项目施工现场的材料智慧管理措施

在新时期的背景之下，建筑材料的管理方式正经历着

较为深刻的智慧化变革。以往传统的管理方法主要依靠人工进行记录以及巡查，其效率相对较低并且容易出现差错，故而需要引入全新的技术手段以应对这一挑战。智慧管理的核心要点在于达成材料从采购开始，历经进场、使用直至废弃的全生命周期的透明化管控。项目团队可借助物联网技术，为每一批如钢筋、预拌混凝土等关键建材赋予独一无二的电子身份证。这些标识记载了材料的规格、批次以及生产来源等关键信息，管理人员借助手持终端进行扫描便可迅速完成入库登记以及质量追溯，如此一来极大地提升了信息记录的准确性以及效率。在材料存储环节，智慧管理同样体现出巨大的优势。可以在仓库或者堆放区安装智能货架以及重量传感器，这些设备可对关键物资的库存数量进行实时监测。当某种材料的库存量低于预先设定的安全阈值时，系统会自动生成预警信息并触发补货流程，这种动态监控有效地避免了因材料短缺而致使的工期延误。对于周转性材料如模板和脚手架而言，智慧化管理也可发挥关键作用。借助加装 RFID 芯片，项目方可精准掌握其位置、数量以及流转状态，减少了不必要的丢失和损耗，降低了工程成本。

3.3 建筑工程项目施工现场的设备智慧管理措施

设备管理是建筑工程项目施工现场管理的一项重要内容。在建筑工程项目的施工现场，往往会用到很多大型的、不同规格的机械设备，对这些设备进行有效管理具有一定的难度。一旦管理不善，就有可能导致安全事故的发生。在建筑工程项目施工现场的设备管理中，可以积极采用智慧管理措施，以降低设备管理的难度。管理人员可以在设备上安装传感器，从而对设备的运行状态进行实时监测，如运行时的温度、压力、转速等。管理人员对所获得的数据进行分析，就能够及时发现设备故障隐患，从而及时对设备进行维护保养。在这个过程中，就能够有效避免因为设备故障而导致的停工损失。在施工现场，常常存在一些大型的设备，如塔吊。对于这类设备，需要进行重点监测，如监测塔吊的高度、幅度、起重量等，有效防止违规操作的出现，如超载、超限等，切实确保施工现场中大型设备的安全运行。另外，管理人员可以通过远程监控中心对施工现场中的一些关键设备进行远程控制，如进行启停、调速等操作，在这个过程中不断提升现场关键设备的管理效率。建筑信息模型如图 1 所示。

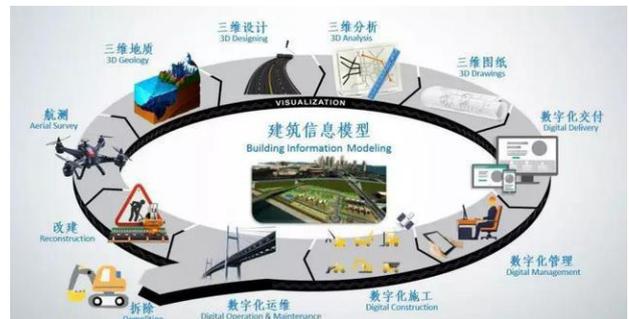


图 1 建筑信息模型

3.4 建筑工程项目施工现场的安全智慧管理措施

安全管理是建筑工程项目施工现场管理的一项重要内容。建筑工程项目现场的施工人员众多、施工设备众多，施工操作又往往是在露天高空进行，所以很容易发生安全事故。一旦发生安全事故，就会出现人员伤亡，就会出现财产损失，并对施工企业的信誉造成严重影响。因此，做好施工现场的安全管理工作至关重要。在建筑工程项目施工现场的安全管理中，可以积极采用智慧管理措施，以提升施工现场的安全管理水平。管理人员可以在施工现场安装传感器和监测设备，对施工现场的危险源进行有效识别和实时监测，如深基坑、高边坡、临时用电设施等。在这个过程中，需要实施监测危险源的状态参数，如位移、沉降、漏电电流等。当危险源的状态参数超过了预警值后，系统就会给出相应地提醒，管理人员就会及时采取措施进行处理。另外，管理人员可以通过手机、平板电脑等移动终端设备的应用，对施工现场的安全进行检查、对施工现场的隐患进行排查，如管理人员可以将检查和排查过程中发现的问题进行拍照，然后上传至相应的管理平台，管理平台会对上传的情况进行分析和统计，进而生成相应的图表，便于管理人员及时采取措施进行整改。

3.5 建筑工程项目施工现场的环境与进度智慧管理措施

施工现场的环境管理与进度管理存在紧密联系，二者共同构成项目顺利推进的关键保障，智慧化管理模式借助分布于工地各处的传感设备网络，达成了对扬尘、噪声、温湿度等环境指标的全天监测。这些监测数据会实时传输至中央管理平台，一旦某监测点的PM2.5数值超出环保标准，系统便会即刻向管理者发出警报，还可以自动启动现场的降尘喷淋装置。这种主动式环境管理帮助施工单位履行社会责任，以及效规避因环保问题引发的停工风险，为进度管理营造稳定外部条件。在进度管理方面，智慧化工地颇具潜力，

借助无人机定期航拍获取现场高清正射影像，结合BIM模型进行比对分析，管理者可直观且精确地把握实际施工进度与计划的偏差。智慧工地平台能自动汇聚整合多个子系统的工作数据，如混凝土浇筑量、塔吊运行日志及劳务人员考勤记录等。平台对这些海量数据开展智能分析，可自动生成形象直观的进度报告，甚至预测未来可能出现的进度瓶颈。这使项目管理团队从被动应对转变为主动决策，依据这些数据洞察及时调整资源分配与施工方案，保证整个项目始终按预定轨道高效平稳推进。

4 结语

综上所述，做好建筑工程项目施工现场管理工作至关重要。在管理的过程中，可以积极采用智慧管理措施，以提升施工现场的管理效率和质量，进而促进施工项目的开展。

参考文献

- [1] 刘颖. 基于DEMATEL-ISM模型的智慧建筑项目现场管理方法探究[J]. 兰州工业学院学报, 2024, 31 (05): 55-59.
- [2] 褚志超, 刘辉, 王丹. 基于SHEL-COWA-灰色定权聚类法的智慧工地施工现场安全评价[J]. 四川水泥, 2024, (04): 156-159.
- [3] 韩浏. 智慧工地系统在建筑施工现场管理中的应用探讨——以X项目为例[J]. 房地产世界, 2024, (01): 67-69.
- [4] 吴晓伟, 田俊, 谢沛琪, 郑泽洲, 何梓健, 韦锦松, 江粤佳. 智慧工地施工管理平台教学与应用研究——基于iworks以A大学人才公寓项目为例[J]. 科技风, 2023, (18): 67-69.
- [5] 浙江省智慧工地应用白皮书. 数字技术助力项目现场智慧化管理——龙港市职业中等专业学校建设工程应用案例[J]. 中国建设信息化, 2023, (12): 44-47.
- [6] 刘强. 基于“BIM+智慧工地”综合管理平台在EPC项目的建设及应用研究[J]. 建筑工人, 2023, 44 (06): 4-8.
- [7] 李欣洳, 胡亚婕, 刘馨, 谢丹凤. 基于数字孪生技术下的智慧工地架构应用研究——以瑾晖实验小学项目为例[J]. 福建建筑, 2023, (03): 127-130.

A deep learning based solution for feeder load forecasting in transformer districts

Qian Han

State Grid Xiaogan Power Supply Company, Xiaogan, Hubei, 432000, China

Abstract

With the intensifying power supply pressure and the transition from “source follows load” to “source-grid-load-storage interaction” in new-type power systems, enhancing load forecasting capabilities has become crucial. In Xiaogan region, where distributed photovoltaic integration in transformer districts and varying load characteristics across industrial, commercial, and agricultural sectors create bidirectional power flow in transmission lines, traditional substation-level forecasting proves inadequate, leading to significant grid security challenges. This necessitates precise feeder load forecasting solutions for transformer districts. The solution development addresses three core requirements: facilitating bidirectional source-load interaction, resolving complex load characteristics, and mitigating grid risks. Its objectives include improving load monitoring accuracy and supporting power supply reliability. Key implementation challenges involve data integration (incompatible multi-system data), model construction (complex relationships beyond traditional frameworks), and load forecasting (photovoltaic-induced load reversal). By integrating feeder data with deep learning, this framework establishes a “source-load-network” coupling mechanism to overcome forecasting difficulties and ensure grid stability.

Keywords

feeder load forecasting in transformer districts; deep learning; new power system; source-grid-load-storage interaction; distributed photovoltaic; data integration; load characteristics; power supply security

基于深度学习的台区馈线负荷预测解决方案

韩骞

国网孝感供电公司, 中国·湖北 孝感 432000

摘要

供电压力加剧与新型电力系统建设下,“源随荷动”向“源网荷储互动”转变,核心是提升负荷预测能力。孝感地区因台区分布式光伏接入、工农商负荷特性差异,馈线潮流双向流动,传统变电站层级预测难满足需求,保供压力大,需精准台区馈线负荷预测方案。方案建设有三重必要性,以应对“源荷双向互动”、解决负荷特性复杂化、防控电网风险;目标为提升负荷监测能力与支撑电力保供。建设面临数据整合(多系统数据不兼容)、模型构建(传统模型难捕复杂关系)、负荷预测(光伏致负荷逆转)三大难点。方案拟引入台区馈线数据与深度学习,建“源荷-网络”耦合框架,破解预测难题,保障电网稳定。

关键词

台区馈线负荷预测;深度学习;新型电力系统;源网荷储互动;分布式光伏;数据整合;负荷特性;电力保供

1 背景

在供电压力越来越大、电网调节手段急需丰富的情况下,需推动传统的“源随荷动”调度模式向“源网荷储互动”模式转变,其核心在于提升负荷侧的预测与管理能力,充分发挥负荷侧在科学制定发用电计划、合理安排运行方式、精准评估需求响应、有效拓展电网调节资源、及时研判负荷损失、代理购电预测等方面的作用。

孝感地区作为湖北省重要工业和能源消费区域,用电

侧的保供压力日益增大,对精准负荷预测的需求愈发迫切。在新型电力系统中,负荷特性发生显著变化:台区层级分布式光伏、储能装置等分布式电源的大量接入,使传统以“用电终端”为主的负荷节点转变为具备“源荷双向互动”能力的基层单元,台区内用户在光伏大发时段不仅可能零购电,甚至通过馈线向电网反向供电,导致馈线潮流呈现双向流动特性,同时,随着经济发展和居民生活水平提高,孝感地区负荷构成更加多样化,其中工业、商业和居民在台区维度的分布较为明显,详情如下:

1 台区内的工业性质的用户,由于受生产班次、设备启停影响,负荷曲线呈现明显周期性;

1 台区内商业性质的用户,受营业时间、促销活动驱动,

【作者简介】韩骞(1983-),男,中国湖北孝感人,本科,工程师,从事工程技术专业研究。

午间及晚间负荷峰谷差突出；

1台区内的居民用户，则与气象条件（如气温、湿度）强相关，空调负荷占比攀升导致夏冬季节日负荷出现显著波动。

这些不同特性的用户，通过馈线层级的潮流叠加，进一步放大了配电网运行的复杂性，而传统基于变电站层级的负荷预测方法，因缺乏台区-馈线级精细化数据支撑，难以捕捉分布式能源接入后的局部负荷异常波动，如某馈线因多个光伏台区同时反送出现电压越限风险，无法满足新型电力系统在规划、运行、调度和控制方面的需求。

此外从电力保供角度来看，孝感地区在迎峰度夏、度冬等关键时期，电力供需矛盾较为突出。准确的负荷预测能够帮助调度部门提前制定合理的发电计划和电网运行方案，确保电力供应的安全稳定。例如，在高温天气期间，居民空调负荷大幅增加，通过精准的负荷预测，可以提前调配发电机组，避免出现电力缺口导致的停电事故。

因此需在预测模型中引入台区、馈线负荷数据，实现基于配电网物理特性的“源荷-网络”耦合预测。

2 必要性

2.1 台区底层支撑需求

传统“源随荷动”调度模式依赖电源侧单向调节，难以应对分布式能源大规模接入后的复杂场景。孝感地区分布式光伏在台区层级的广泛部署，使负荷节点从“纯用电单元”转变为“源荷双向互动单元”，用户在光伏大发时段，通过馈线反向供电，导致馈线潮流方向动态变化、配电网运行状态从“可测可控”转向“双向耦合”。若缺乏精准的负荷预测，调度部门将无法实时掌握台区中馈线级的能量流动平衡，如光伏反送对馈线电压的影响、负荷突增对台区的冲击，进而导致“源网荷储”协同调度失效，无法实现“发-输-配-用”各环节的动态平衡。

2.2 用电负荷特性复杂化

针对之前典型母线的负荷分析，得出孝感地区负荷结构的多样化与分布式能源的特殊性，以下为负荷特性的三大特征：

用电边界模糊：台区内光伏用户的“自发自用+余电上网”模式，导致用户负荷曲线不再是单纯的用电需求，而是“用电负荷-光伏出力”的净负荷叠加，传统仅针对用电侧的预测模型无法反映这种双向能量交互；

差异显性化：台区内工业用户受生产周期影响呈现“工作日高负荷、节假日骤降”的周期性；商业用户因营业时间和促销活动出现午间/晚间双高峰；居民用电负荷与气温季节强弱相关，例如夏、冬季节负荷用电占比较高，导致负荷波动随气温高低而有所变化。若预测颗粒度停留在母线层级，将掩盖馈线、台区级的局部负荷异常，如某工业馈线因个别企业加班导致短时过载；

影响因素多元化：气象变化（如高低温气候）、经济政策（如电价调整）、用电行为变化等多维度变量交织，传统基于历史数据的统计模型难以捕捉非线性关联，需结合馈线、台区，实时数据构建更精准的预测框架。

2.3 电力保供下的风险防控

负荷高峰应对：由于居民在高温天气下空调负荷骤增，导致该台区下的变压器过载跳闸；工业密集型馈线因生产负荷与降温负荷叠加，存在馈线容量不足风险。通过台区负荷预测可提前识别过载隐患，支撑调度部门制定差异化的负荷控制策略，如对高风险台区优先实施需求响应；

新能源消纳平衡：光伏出力受天气影响具有间歇性，如突发阴雨导致光伏出力骤降，若未开展负荷预测，会导致台区从“净供电”突然转为“净用电”，引发馈线潮流剧烈波动，甚至造成局部电力缺口。通过预测模型实时修正光伏出力变化对负荷的影响，是保障电网稳定的必要手段。

3 建设目标

3.1 提升负荷监测能力

3.1.1 跨部门数据融合

整合营销、采集、调度、气象数据，实现数据的集中管理和共享。例如，将调度系统中的电网运行数据以及外部的气象数据进行整合，形成完整的负荷数据集。

3.1.2 负荷特性分析

对负荷的日特性、周特性、月特性以及季节特性进行深入分析，挖掘负荷变化的规律和趋势，为负荷预测和电网运行优化提供依据。例如，通过分析主站中负荷的日变化特性，发现早晚高峰时段的负荷规律，为配电网的容量规划和电压调整提供参考。

3.1.3 预测机制

通过对气象数据进行整合，精准区分晴、阴、突变多云等各类不同的天气场景，进而实现对主变、母/馈线、台区的短期负荷预测，以此来支撑不同调度场景的实际需求。

3.2 支撑电力保供

在迎峰度夏、度冬等关键时期，为调度部门提供准确的负荷预测数据和负荷分析报告，帮助制定合理的有序用电方案和发电计划，确保电力供应的安全稳定。例如，根据负荷预测结果，提前安排发电机组的启停和出力调整，合理分配电力资源。

4 建设难点

4.1 数据整合难题

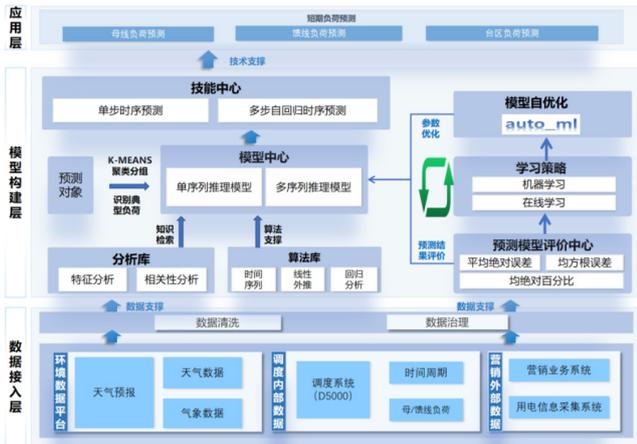
由于营销、采集、调度和气象等不同业务部门系统的数据格式多样、标准不一，整合时存在数据兼容性问题。例如，营销系统数据以档案数据为中心，调度系统围绕电网设备记录数据，两者数据结构差异大，需要梳理后才可进行融合。同时，不同数据源的时间戳精度不同，在关联数据时易出现时间对应偏差，从而影响数据的准确性和完整性。

4.2 模型构建挑战

负荷特性复杂多变，受新能源接入、气象条件等多种因素影响，传统预测模型难以精准捕捉这些复杂关系。而且，在模型训练过程中，容易出现过拟合或欠拟合现象。当预测模型过于复杂，对训练数据拟合过度时，在新数据上的泛化能力就会变差；若模型简单，又无法充分学习数据特征，导致预测精度不高。

5 解决方案

5.1 总体架构



总体架构

总体架构通过分层设计，数据从接入层向上流动，经处理后进入模型构建层，通过分析、算法、模型训练与优化，最终在应用层输出预测结果，实现了数据处理、模型构建到应用的流程闭环，以下为详细描述：

5.1.1 数据接入层

环境数据平台：天气预报、天气数据、气象数据，用于支撑负荷与环境因素的关联分析。

调度内部数据：调度系统（D5000）、时间周期、母/馈线负荷（提供电力系统运行数据）。

营销外部数据：营销业务系统、用电信息采集系统，获取用户用电行为数据。

数据处理：通过数据清洗和数据治理，为上层提供高质量数据支撑。

5.1.2 模型构建层

分析库：进行特征分析，提取数据特征和相关性分析，识别变量间关联，辅助模型构建。

算法库：提供基础算法（时间序列、线性外推、回归分析），为模型中心和技能中心提供算法支撑。

模型中心：构建单序列（单一变量）和多序列（多变量）推理模型。通过 K-MEANS 聚类分组，识别典型负荷（预测对象），结合知识检索优化模型。

技能中心：提供单步时序预测（短期单时间点预测）和多步自回归时序预测（多时间点序列预测），直接支撑应

用层。

模型自优化：采用 automl 技术，结合机器学习和在线学习策略，参数优化提升模型性能。通过预测模型评价中心（平均绝对误差、均方根误差、均绝对百分比）反馈预测结果，形成闭环优化。

5.1.3 应用层

短期负荷预测：基于模型构建层的技术支撑，实现母线负荷预测、馈线负荷预测、台区负荷预测，覆盖湖北孝感供电公司不同层级的负荷预测需求。

5.2 核心功能规划

5.2.1 负荷监测功能

第一，实时数据采集与展示。数据覆盖范围：实时采集变电站、母线、馈线及台区等电网各节点的负荷数据。展示形式：以曲线及表格形式动态呈现负荷数据的变化趋势，便于运维人员直观掌握负荷波动情况。

第二，异常负荷告警。阈值设置：根据电网运行要求和历史数据，为各节点负荷设置合理的阈值。自动警报：当负荷超过设定阈值时，系统发出警报，及时提醒工作人员采取相应措施，如调整调度方案、排查设备故障等。

5.2.2 负荷预测功能

第一，异常负荷预警。迎峰度夏/度冬负荷高峰预警：针对馈线范围内各台区中的工商业用户、居民用户的空调负荷与气温强相关特性，通过气象数据（如高温预警）提前预测负荷峰值，当母线或馈线的负荷预测值某段时间范围内，接近阈值时触发预警信号，支撑调度部门提前调配发电机组、优化电网运行方式，避免停电事故。

新能源消纳异常预警：光伏出力受天气影响突发波动（如阴雨导致出力骤降）时，系统计算馈线从“净供电”转为“净用电”的负荷突变概率，触发馈线潮流波动预警，提示调度人员调整电网潮流分布，平衡电力供需。

设备过载风险预警：通过馈线内台区负荷预测，识别变压器过载隐患（如历史数据显示某台区夏季负荷增长率超 15%），提前预警并纳入电网改造计划，或通过需求侧管理降低峰值负荷。

第二，负荷预测报告。依据调度所提供模板，结合整合后的营销、采集、调度、气象等多源数据进行预测，生成包含母线、馈线、台区负荷预测数据的报告，内容包括预测值、预测误差分析、负荷变化趋势等，支持多种格式的报告输出，如文档、图表等，便于不同部门和人员使用，满足电网调度、电力规划等多场景需求。

6 结语

基于深度学习的台区馈线负荷预测方案，精准切中孝感地区新型电力系统建设中的负荷预测痛点，既破解了分布式光伏接入、负荷特性复杂等带来的难题，也为电力保供提供了关键支撑。随着方案落地，将有效提升负荷预测精度，

助力“源网荷储互动”模式落地，为电网安全稳定运行与区域能源高效利用筑牢基础。

参考文献

- [1] 李家明,宋杨呈祥,石磊,等.源网荷储互动下的电网调度策略优化研究[N].山西科技报,2025-09-08(A12).
- [2] 刘俊青.源网荷储一体化发展关键技术研究与分析[J].

中国战略新兴产业,2025,(23):91-93.DOI:CNKI:SUN:ZLXC.0.2025-23-026.

- [3] 吴昊天,张俊,黄一甲.源网荷储协同技术在新型电力系统中的应用研究[J].电力设备管理,2025,(03):97-99.DOI:CNKI:SUN:DSGL.0.2025-03-025.

Research on Structural Design and Optimization of Commercial Continuous Convenience Bag Sealing Machine

Yonghong Bian Mengyu Qiu Tongqiang Liang

Jiangxi University of Applied Science and Technology, Ji'an, Jiangxi, 343000, China

Abstract

With the rapid development of the packaging industry, commercial continuous convenience bag sealing machines, as key equipment in packaging production lines, have a direct impact on production efficiency and sealing quality. This article focuses on the problems of unstable tension control and uneven sealing quality in high-speed and high-precision operations of domestic sealing machines, and conducts structural design and optimization research. Through modular design methods, the equipment is divided into three functional modules: feeding, heat sealing, and cutting. Combined with transmission system parameter calculation and finite element analysis, a sealing machine design scheme with high stability and efficiency is proposed. The research results indicate that the optimized tension control system can control tension fluctuations within $\pm 2\%$. The heat sealing mechanism adopts a cam spring combination structure, achieving continuity and stability in the sealing process. This article provides theoretical basis and practical reference for the structural innovation and performance improvement of commercial sealing machines.

Keywords

Continuous sealing machine; Modular design; Tension control; Heat sealing mechanism; Finite Element Analysis

商用连续式便利袋封口机结构与优化研究

边永宏 邱梦雨 梁炯墙

江西应用科技学院, 中国 · 江西 吉安 343000

摘要

随着包装行业的快速发展, 商用连续式便利袋封口机作为包装生产线中的关键设备, 其性能直接影响到生产效率和封口质量。本文针对国内封口机在高速、高精度作业中存在的张力控制不稳定、封口质量不均等问题, 开展结构与优化研究。通过模块化设计方法, 将设备划分为送料、热封、裁断三大功能模块, 结合传动系统参数计算与有限元分析, 提出了具有高稳定性和高效率的封口机设计方案。研究表明, 优化后的张力控制系统可将张力波动控制在 $\pm 2\%$ 以内, 热封机构采用凸轮-弹簧组合结构, 实现了封口过程的连续性与稳定性。本文为商用封口机的结构创新与性能提升提供了理论依据与实践参考。

关键词

连续式封口机; 模块化设计; 张力控制; 热封机构; 有限元分析

1 引言

商用连续式便利袋封口机广泛应用于食品、医药、日化等行业的包装流程中, 其性能优劣直接关系到包装质量与生产效率。近年来, 随着快消品市场对包装速度与精度要求的提高, 封口机的高效性、稳定性与智能化成为研究热点。尤其是在高速运行状态下, 张力控制的稳定性、热封温度的精确性及裁断动作的同步性, 是影响封口质量的核心因素。

目前, 国外封口机技术已较为成熟, 特别是在自动化控制、节能设计及智能检测方面具有明显优势。例如, 日本某型连续封口机集成高精度张力控制与视觉检测系统, 封口

合格率高达 99.8%。相比之下, 国内封口机虽在近年取得显著进步, 但在核心零部件制造、系统稳定性等方面仍存在差距。因此, 开展封口机结构与优化研究, 对提升国产设备竞争力具有重要意义^[1]。

本文基于模块化设计理念, 结合传动计算与仿真分析, 提出一种适用于 HDPE/LDPE 筒膜的高效封口机方案, 重点解决张力控制与热封机构的设计难题, 以期国产封口机的技术升级提供参考。

2 封口机总体结构设计

2.1 设计要求与原料特性

本设计针对 HDPE (高密度聚乙烯) 和 LDPE (低密度聚乙烯) 筒膜, 设定最大制袋宽度为 250mm, 最大制袋长度为 300mm, 设备运行速度不低于 30m/min。HDPE 具有较

【作者简介】边永宏 (1988-), 男, 中国江西吉安人, 硕士, 从事智能制造研究。

高的软化温度（125–135℃）和优良的耐化学性，而 LDPE 则具备更好的柔韧性和低温适应性。这两种材料在封口过程中对温度与压力的控制要求较高，需在热封机构中实现精准调控^[2]。

2.2 整体方案与工作流程

封口机采用模块化布局，主要包括供料机构、整平机构、热封机构和裁断机构。其工作流程如下：

放卷与整平：成卷筒膜经放卷机构展开，通过整平辊校正膜面，消除褶皱，为后续封口提供平整基材。

热封成型：膜材进入热封机构，在温度与压力作用下完成边缘熔合。热封机构采用凸轮驱动推杆实现间歇式压合作业，确保封口牢固。

裁断分离：封口后的连续膜材由裁断机构按设定长度精准切割，形成独立包装袋。

整个过程中，张力控制系统保持膜材传输的稳定性，避免因张力波动导致封口不良。

3 关键部件设计与计算

3.1 供料机构设计

供料机构采用电磁阻尼结构，通过力矩电机提供恒定扭矩，确保放卷过程中膜材张力稳定。根据负载分析，选用 YLJ80-2-6 型力矩电机，其堵转扭矩为 2 N·m，满足最大牵引力 20 N 的工况需求。放卷组件结构包括带轮、支撑架与移动挡盘，整体尺寸为 300mm×290mm×350mm，具备良好的刚性与适配性。

3.2 热封机构设计

热封机构是封口质量的核心保障。本设计采用凸轮-弹簧组合结构，通过减速电机驱动凸轮轴，带动推杆实现间歇式压合。加热模块尺寸为 260mm×20mm，覆盖最大膜宽，温度控制精度为 ±1℃。推杆上方设置压板（295mm×40mm），确保压力分布均匀。经计算，热封力设定为 120 N，弹簧回弹力为 20 N，系统总推力为 146.86 N，选用额定扭矩 10 N·m、转速 100 r/min 的减速电机^[3]。

3.3 裁断机构设计

裁断机构采用气动驱动方式，通过气缸推动刀头完成切割作业。根据裁断力 100 N、行程 100 mm、工作气压 0.5 MPa 等参数，计算得出气缸最小缸径为 24.07 mm，选用 MBL25-350 型矩形气缸。工作台面设计为 15.5° 倾斜角，便于膜材滑落，提高生产效率。

3.4 传动系统设计

传动系统由电动机、减速器、同步带等组成。选用 YCTD100-4A 型电磁调速电机，功率 0.55 kW，调速范围 50–1250 r/min。同步带传动部分采用 L 型带，节距 9.525 mm，带轮齿数 16，带宽 56 mm，经校核带速为 0.24 m/s，符合设计要求。

4 结构优化与性能提升

4.1 张力控制系统优化

张力控制是影响封口质量的关键。本设计从三方面进行优化：

1 放卷控制：采用高精度力矩电机，结合张力传感器实现闭环反馈，将放卷张力波动控制在 ±2% 以内。

1 辊压调节：通过多组同步辊系统调节接触压力，确保膜材在输送过程中张力均匀。

1 夹紧机构：采用丝杆滑块调整辊距，保持夹持力一致，避免张力波动。

4.2 热封机构创新设计

传统热封机构结构复杂、调节困难。本设计采用凸轮-弹簧组合，具有以下优点：

1 压力可控：通过调节凸轮位置与弹簧预紧力，实现热封压力的精确控制。

1 缓冲稳定：弹簧吸收外部压力波动，提高封口一致性。

1 操作简便：结构简化，调节便捷，适用于多材质、多工况生产。

5 强度校核与有限元分析

机架作为主要的支撑机构对整个装置的稳定性具有重要作用，本次设计的机架分为多层设计，主要满足塑料薄膜的热封与裁断作业，因此框架需要具有一定的强度^[4]。需要对其进行校核分析，考虑到框架受力的复杂性，本次采用有限元对框架的受力进行分析。首先对整体框架进行受力分析，如下图 1-1 所示，主要承受四部分的重力。

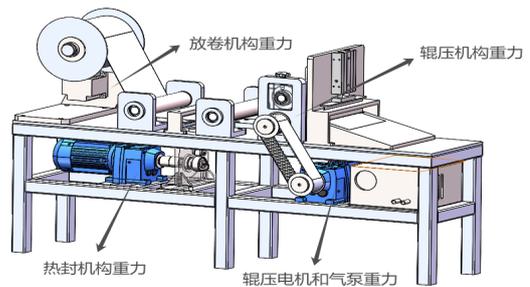


图 1-1 机架受力图

根据上图，将机架的受力分为四个区域，查阅资料以及结合软件评估重量得到第一区域放卷机构的重力为 20kg；第二受力区域的热封机构的重力为 25kg；第三受力区域的辊压机构重力为 30kg；第四受力区域的辊压机构重力为 20kg^[5]。

本次对框架组焊件进行有限元分析采用 Solidworks 中的 Simulation 插件模块，主要进行最大静应力分析及校核，当拖板装载箱体物资到最大位置时，此种状态下应力为框架承受的力最大，本次对于框架的静应力分析即在此状态下

进行。

选择 Q235 钢材，屈服强度 235MPa，弹性模量为 $2.09 \times 10^5 \text{ MPa}$ ，泊松比 0.269，质量密度是 7890 kg/m^3 ；模拟框架的受力情况确定受力位置如图 1-2 图所示，然后确定受力的大小 F，受力的四个区域进行了标示；

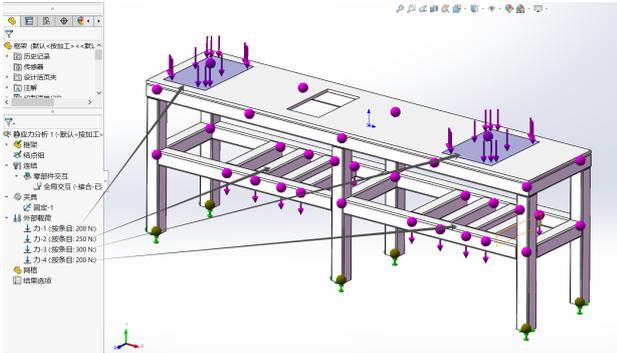


图 1-2 框架的载荷施加

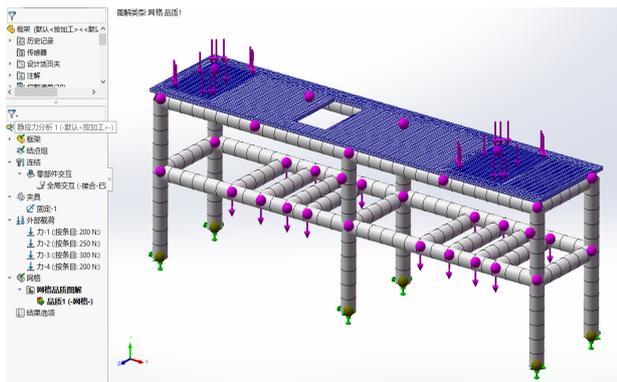


图 1-3 框架网格划分

划分网格，网格单元设定为 0.5mm，为防止局部应力影响增加局部网格控制网格，网格单元为 0.2mm，网格划分，如图 1-3 所示；

然后再有限元分析软件中进行计算，计算结果，如图 1-4 所示。

通过上面的框架应力云图分析，框架最大应力处为 1.51Mpa，材料的能够承受的最大应力为 235Mpa，材料的强度远大于框架变形产生的最大应力，因此框架的设计满足强度要求。

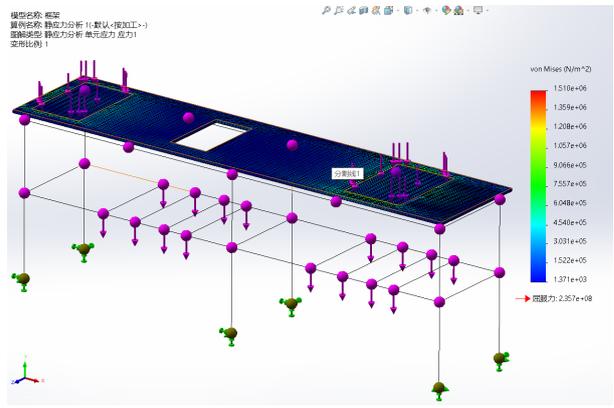


图 1-4 框架应力云图

6 结论

本文围绕商用连续式便利袋封口机的结构设计优化展开系统研究，主要成果如下：

提出了基于模块化设计的封口机整体方案，明确了供料、热封、裁断三大功能模块的结构与协作机制。完成了关键部件的参数计算与选型，包括力矩电机、减速电机、同步带传动及气动裁断系统，确保设备在高速运行下的稳定性。通过张力控制优化与热封机构创新，显著提升了封口质量与设备适应性。利用有限元分析验证了机架结构强度，为设备可靠性提供了理论保障。本研究不仅为封口机的结构设计提供了新思路，也为国产包装设备的技术升级与市场竞争力提升奠定了坚实基础。

参考文献

- [1] 包装机械工业发展报告[J]. 中国包装技术, 22(3), 34-40.
- [2] 张九天, 鲁延迅, 赵聪. 食品热封包装材料的制备与热封技术的应用[J]. 中国食品, 2024(16): 174-176.
- [3] Future Market Insights: Form-Fill-Seal Machine Market Set to Expand From USD 12.2 Billion in 2024 to USD 17.1 Billion by 2034[J]. Manufacturing Close - Up, 2024.
- [4] 吴锦虹, 吴荣城, 余伙庆. 杯装灌装封口机出杯机构的改进[J]. 轻工科技, 2024, 40(05): 80-84.
- [5] 陈强. 国内封口设备核心技术的突破与挑战[J]. 现代制造技术与自动化, 2023, 19(4): 55-60.

Unmanned Flowback Fluid Pump Skid Design for Shale Gas Fields

Quan Liu Hongguo Xu Wensong Liu Tang Tang Shuwen Liu

China Petroleum Engineering Construction Co., Ltd. Sichuan Kehong Company, Chengdu, Sichuan, 610000, China

Abstract

This study addresses the goal of efficient and cost-effective shale gas development by analyzing the requirements for unmanned pumping units. The research identifies critical functions including remote monitoring, intelligent control, data acquisition, early warning systems, safety reliability, and maintenance management. A tailored unmanned return fluid pumping unit solution for the Sichuan-Chongqing region has been developed. The system employs PLC to monitor key parameters such as centrifugal pump motor bearing temperature, pump bearing temperature, silencer chamber temperature, and pump pressure, triggering automatic shutdown when thresholds are exceeded. An electromagnetic flowmeter installed in the unit transmits flow data to the PLC, enabling real-time monitoring and recording. The PLC system uploads data to a monitoring terminal, facilitating remote supervision of centrifugal pumps. Compared to traditional manned pumping units, this unmanned solution reduces labor costs, alleviates on-site maintenance pressure, enhances operational efficiency, and holds significant implications for shale gas development.

Keywords

Shale gas; Unmanned; Flowback fluid; Pump skid

页岩气田无人值守返排液泵橇设计

刘权 徐红果 刘文松 汤棠 刘书文

中国石油工程建设有限公司四川科宏公司, 中国·四川成都 610000

摘要

本文针对页岩气高效、低成本开发的目标,分析得出实现无人值守泵橇需要实现远程监控与管理、智能化控制、数据采集与处理、预警与报警、安全性与可靠性和维护与管理等关键功能,形成了一套针对川渝地区的无人值守返排液泵橇方案。通过对橇内离心泵橇PLC检测离心泵电机轴承温度、泵轴承温度、降声罩内温度、泵前后压力等进行报警,并在离心泵电机轴承温度、泵轴承温度、降声罩内温度、泵前后压力等超过设定上限值的情况下自动停泵。在泵橇内设置电磁流量计,流量信息接入PLC,实现对泵流量的监测和记录。PLC系统数据上传泵橇监控终端系统,实现对离心泵的远程监控。相较于传统的有人值守泵橇,页岩气无人值守返排液泵橇降低了用人成本,减轻了现场运维的压力,提高了现场运行的效率,对页岩气的开发具有重要意义。

关键词

页岩气; 无人值守; 返排液; 泵橇

1 引言

近年来,非常规气藏逐渐成为国内天然气上产的主力军,尤其是页岩气的勘探开发取得了重大突破,完成了规模化的商业开发^[1]。目前,国内形成了涪陵、长宁-威远和昭通等页岩气开发示范区,但主要分布在川渝地区,复杂的地理环境对气田的开发形成了不小的难度,尤其是对于地面工程的建设提出较大的考验^[2]。页岩气开发需要进行水力压裂,压裂后需要将返排液进行运输处理,目前川南地区的页岩气的页岩气返排液主要采用泵送管输的方式^[3],然而受制于川

渝地区人口密度、地理环境和安全管理上的实际情况,目前的泵橇基本不能实现无人值守的功能^[4]。为响应页岩气高效、低成本开发的目标,有必要形成一套针对川渝地区的无人值守返排液泵橇系统^[5]。

无人值守采出水自动化泵橇技术是近年来国内外研究的热点,其核心在于利用先进的自动控制、物联网、数据分析等技术实现泵站的自动化运行,以提高生产效率和安全性。下面将分析国内外在该领域的研究现状,尤其对本企业的现状进行深入探讨,包括技术依托和来源、技术水平和竞争力:

国内研究现状:国内在无人值守采出水自动化泵橇领域的研究起步较晚,但发展迅速。以合肥凯泉电机泵有限公司为例,该公司基于物联网的无人值守一体化泵站自动化

【作者简介】刘权(1993-),男,中国四川南充人,硕士,工程师,从事油气田地面集输设计和研究。

控制系统的研究，代表了国内在这一领域的先进水平。该系统通过 PLC 控制柜与多个数据采集模块、物联网通讯模块等连接，实现远程数据监控、设备诊断、程序维护和故障报警等功能，显著提高了泵站的自动化水平和运行效率。

国外研究现状：国外在无人值守自动化泵橇技术方面的研究较早，技术和经验较为成熟。例如，欧美国家在自动化控制系统、物联网应用、远程监控技术等方面的研究和应用普遍领先，其技术和设备在全球范围内都有较高的市场占有率。

本企业技术依托：本企业的技术主要依托于自主研发和项目实际相结合的方式。通过引进先进的自动控制系统和物联网技术，同时结合自身的研发实力，对各家页岩气公司具体项目进行本地化改造和优化，以满足页岩气开发及市场需求。

技术水平和竞争力分析

技术水平：我司在无人值守采出水自动化泵橇领域的技术水平处于行业领先地位。通过持续的技术研发和创新，已经掌握了一系列核心技术，如不同流量不同扬程不同系列的泵橇设计等，目前已广泛应用于四川页岩气、长宁页岩气、重庆气矿等目标市场，基于物联网的远程监控系统、自动化控制技术，能够为无人值守采出水自动化泵橇提供完整的解决方案和服务。

竞争力分析：与国内外同行相比，我司无人值守采出水自动化泵橇技术自主性强，能够快速响应业主需求。

综上所述，无人值守采出水自动化泵橇技术作为一项前沿技术，其发展前景广阔。科宏公司在这一领域已经取得了一定的效果，但仍需不断努力，通过技术创新和市场拓展，进一步提升自身的竞争力和行业地位。

2 无人值守返排液泵橇关键功能

川渝地区人口密度大，山高路远，工作人员赶往现场的时间较长，要实现无人值守的功能，必须要满足外部环境和内部系统的安全。

2.1 远程监控与管理

实时数据采集：需要能够实时采集泵橇内的关键数据，如水池液位、泵进出口压力、进出口流量、电机电流、降声罩内温度、泵轴承温度、电机定子温度、泵振动数据等，以便于远程监控和管理。

(2) **设备状态监测：**需要对泵橇内及泵橇外的设备工作状态进行实时监测，泵橇内主要包括转输泵的启停、阀门的开度等，泵橇外的设备主要包括进出站阀门的开度、阀组切换、潜水泵的自动启停、水池液位的实时监控等，以便于及时发现和处理异常情况。

(3) **图像监视：**需要通过安装摄像头等设备，实现对泵橇内及泵橇外泵橇全景及重要工位（水池、阀组区等）的图像监视，以便于更好地了解现场情况。

2.2 智能化控制

自动控制：需要实现对转输泵等设备的自动控制，包括根据泵进出口压力、进出口流量、电机电流、降声罩内温度、泵轴承温度、电机定子温度、泵振动数据等参数自动调整设备运行状态，以实现高效、稳定的转水。

远程控制：需要支持通过手机 APP、云网站、上位操作站等方式，对水泵等设备进行远程控制，以便于在特殊情况下进行紧急处理。

2.3 数据采集与处理

数据采集：需要建立稳定、高效的数据采集系统，确保采集到的数据准确、完整。

数据处理与分析：需要对采集到的数据进行处理和分析，包括数据清洗、数据整合、数据分析等，为泵橇的运营管理提供数据支持。

2.4 预警与报警

异常预警：需要建立异常预警机制，对可能出现的异常情况进行预测和预警，以便及时采取措施防范。

报警信息推送：需要将报警信息及时推送给相关人员，包括通过手机 APP、短信、有线通信等方式，确保相关人员能够第一时间掌握报警信息，及时进行处理。

2.5 安全性与可靠性

系统安全：需要确保整个系统的安全性，包括数据安全、设备安全等，防止数据泄露、设备损坏等问题的发生。

设备可靠性：需要选择性能稳定、可靠性高的设备，以确保系统的长期稳定运行。

2.6 维护与管理

设备维护：需要制定合理的设备维护计划，定期对设备进行检查和维护，确保设备的正常运行。

系统管理：需要建立完善的系统管理制度，明确各级管理人员的职责和权限，确保系统的有序运行。

3 无人值守返排液泵橇方案

3.1 自动控制

泵橇设置 PLC 系统，对分别水池液位、泵进出口压力、泵运行状态（泵轴承温度、电机轴承温度等）和降声罩内温度等数据进行实时数据采集，并完成控制、通信等功能，系统可实现低液位自动停泵、超高温自动停泵、超高压自动停泵和现场启停泵等功能。根据生产管理要求，泵橇数据通过气井平台新建通信系统上传泵橇监控终端系统进行监视，实现远程启停泵。泵橇 PLC 采用独立的可编程控制器，主要功能如下：①数据采集和处理功能（可接收模拟和开关量信号）；②模拟和开关量信号输出；③PID 控制及数学运算功能；④逻辑运算、控制功能，实现高液位就地声光报警和低液位停泵；⑤与第三方设备进行数据交换的功能；⑥自诊断功能；⑦故障报警功能；⑧执行上一级控制系统发送的指令，向上级控制系统发送实时数据等。

3.2 检测与控制

3.2.1 橇外

水池设置高频雷达液位检测装置,对水池液位进行监测和报警,信号接入泵橇内 PLC 系统,系统根据液位信息实现高低液位报警和低液位停泵等功能。潜水泵启停信号接入泵橇 PLC 进行远程控制。过滤器设置差压计就地显示。控制阀采用电动执行机构,信号接入泵橇 PLC 系统进行远程控制。泵橇进出口设置压力变送器,信号接入泵橇 PLC 系统进行监测和报警。

3.2.2 橇内

橇内离心泵橇 PLC 检测离心泵电机轴承温度、泵轴承温度、降声罩内温度、泵前后压力等进行报警,并在离心泵电机轴承温度、泵轴承温度、降声罩内温度、泵前后压力等超过设定上限值的情况下自动停泵。在泵橇内设置电磁流量计,流量信息接入 PLC,实现对泵流量的监测和记录。PLC 系统数据上传泵橇监控终端系统,实现对离心泵的远程监控。泵橇上设置 1 套声光报警器,实现系统异常停泵后的报警,分贝应不低于 110db。启泵要求:先启潜水泵,泵进口检测到压力升高后再启离心泵。停泵要求:先停离心泵,再停潜水泵。远程启泵时需进行声光报警,报警 15s 后,水泵开始运转。泵控制信号和运行状态在泵橇 PLC 显示、控制并远传。泵橇进出口设置电动阀并与进出站压力进行联锁并停泵。

3.3 通信

泵橇和所在的天然气平台井站机柜间配置光通信设备,通过自建泵橇至天然气平台井站机柜间的光缆,接入平台井站的光纤通信系统,实现与井区控制中心的 SCADA 数据通信。

3.4 电源

电源依托钻井已建、拟建 10kV 或 35kV 线路供电,泵橇新建预装式变电站。泵橇仪表系统用电采用 UPS 供电,后备时间不小于 2h;现场仪表用 24VDC 电源由控制系统提供。

3.5 数据存储与分析

对泵橇的运行数据进行记录和分析,为优化运行和管理提供科学依据。通过对历史数据的分析,还可以预测泵橇的未来运行趋势。

3.6 安全管理

在实现无人值守的过程中,采取适当的安全措施和技术手段,如访问控制、加密通信等,确保泵橇的安全稳定运行。

4 模块化与橇装化

采用标准化橇装设计,可以节约设计、采购、施工的周期,便于后期现场的运维管理,同时也便于搬迁复用,适应页岩气的开发特点,节约整体投资,实现降本开采的效果。

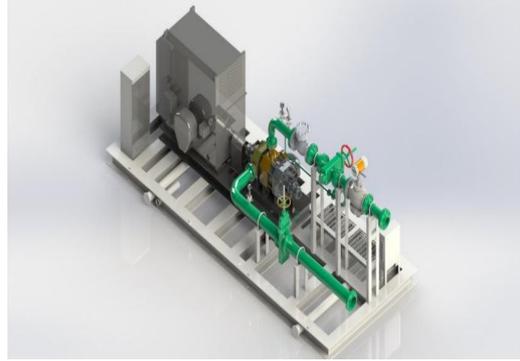


图 1 无人值守返排液泵橇定型三维效果图

5 结论

相较于传统的有人值守泵橇,页岩气无人值守返排液泵橇降低了用人成本,减轻了现场运维的压力,提高了现场运行的效率,对页岩气的开发具有重要意义。但同时也要注意,无人值守带来的风险,在方案设计阶段就要考虑足够的自控、检测、监控、报警等安全措施。

参考文献

- [1] 赵文智,贾爱林,位云生,等.中国页岩气勘探开发进展及发展展望[J].中国石油勘探,2020,25(01):431-44.
- [2] 王柳.长宁地区页岩气压裂供水泵站运行防护及风险分析[D].中国石油大学(华东),2021.
- [3] 祖国强.长宁页岩气区块供水优化研究[D].中国石油大学(华东),2019.
- [4] 胡家晨.页岩气开发水供应系统工程设计与优化[D].北京大学,2024.
- [5] 蒋仪,汤雯.山地城市无人值守泵站的设计和 risk 管控[J].设备管理与维修,2021,(10):85-87.

Cost Control and Analysis of Green Material Application in Landscape Engineering Construction

Hui Bao

Yan'erwo Scenic Area Management Center, Urumqi, Xinjiang, 830049, China

Abstract

With the continuous deepening of ecological civilization construction, the function of landscape engineering is no longer limited to landscape beautification, but extends to multiple categories such as ecological restoration and climate regulation. The traditional construction mode overly relies on high energy consuming materials, and the management method is extensive, resulting in the coexistence of resource waste and cost overruns. Although promoting the use of green materials can improve the ecological environment, the problem of material premium cost and construction adaptability remains a pain point in the development of the industry. Faced with the current background, how to achieve cost control and coordinated optimization of green materials through scientific management has become a key issue that urgently needs to be overcome. Domestic and foreign scholars have conducted certain research on the performance of green building materials, full life cycle cost and other fields. However, systematic analysis of the special characteristics of landscape engineering is still lacking.

Keywords

Landscape engineering construction; Cost control; Application of Green Materials

园林工程施工中的成本控制与绿色材料应用分析

包慧

乌鲁木齐市燕儿窝风景区管理中心，中国·新疆 乌鲁木齐 830049

摘要

伴随生态文明建设的不断深入，园林工程的功能不再局限于景观美化，而是延伸到生态修复、气候调节等多元范畴，传统施工模式过度依赖高耗能材料，且管理方式粗放，造成资源浪费与成本超支问题并存，虽然推广使用绿色材料可以改善生态环境，但材料溢价成本与施工适配性问题，仍是行业发展的痛点，面对当前背景，怎样借助科学管理达成成本控制和绿色材料的协同优化，成了亟待攻克的关键问题，国内外学者针对绿色建材性能、全生命周期成本等领域开展了一定研究，然而对园林工程特殊性的系统性分析仍欠缺。

关键词

园林工程施工；成本控制；绿色材料应用

1 引言

园林工程是城市化进程中的关键一环，施工成本控制和绿色材料应用直接关乎项目经济效益与环境可持续性，行业面临资源消耗高、传统材料污染多、全生命周期成本管理不到位等挑战，急需探索能实现经济与生态协同优化的解决方案，研究对绿色材料在硬质景观、绿化工程和水景修复中的应用展开分析，结合全生命周期成本理论、动态控制方法和价值工程原理，给出设计、施工、运维三个阶段的协同机制。

2 园林工程施工成本控制的理论基础

园林工程施工成本控制的理论基础主要以全生命周期成本管理、动态控制理论和价值工程原理，全生命周期成本管理聚焦于项目从规划、设计、施工到后期维护的全程成本优化，规避传统模式仅关注短期投入却忽略长期运营费用的问题，动态控制理论会实时监控施工过程中的资源消耗、进度偏差以及市场波动情况，利用反馈机制对预算分配做出调整，保证成本目标实现。价值工程原理借助功能分析与成本适配，在保证景观效果、生态功能等核心需求得以满足的基础上，去除冗余设计或高成本低效益的施工环节，运用作业成本法（ABC）精准核算人工、机械、材料等直接成本以及管理费用等间接成本，识别隐性浪费点。现代成本控制新增引入了 BIM 技术，凭借三维模型对施工流程进行模拟，实现资源配置优化并降低返工情况，这些理论一同搭建起成

【作者简介】包慧（1992-），女，中国甘肃秦安人，本科，工程师，从事林绿化管理与景观设计研究。

本控制的框架,需要管理者在质量、工期和成本这三重约束里找到平衡,同时得考量绿色施工造成的成本结构变动,比如环保材料的溢价或许会被后期维护费用的降低所冲抵,开展实践时应结合园林工程特有的艺术与生态特性,杜绝过度压缩成本导致景观价值丧失,最终构建起经济合理且可持续的成本管理体系^[1]。

3 绿色材料在园林工程中的应用

3.1 绿色材料在园林工程中的应用

园林中的硬质景观涵盖了铺装、景墙、台阶、栏杆等各类构筑物,工程的耐久性、美观性和生态性直接受硬质景观材料选择的影响,该领域中绿色材料的应用主要体现为环保型铺装材料、再生骨料混凝土以及低碳金属与木材等方面,像透水砖、透水混凝土和植草砖这类环保型铺装材料,可有效缓解城市内涝问题,使雨水更快下渗以补充地下水。透水砖采用再生骨料或工业废渣制作而成,不但降低了天然石材的开采,还凭借其孔隙结构削减地表径流,改善微气候,传统混凝土铺装易引发热岛效应,透水铺装则可调节地表温度,增强行人的舒适感,停车场、人行道等区域应用植草砖,既能满足承重要求,又能提升绿化覆盖率,实现功能与生态的双重优化。

再生骨料混凝土作为另一类关键的绿色硬质景观材料,以建筑拆除废料中的砖块、混凝土块为骨料,减少了天然砂石的消耗,减轻了废弃物填埋的压力,尽管再生骨料混凝土抗压强度比普通混凝土稍低,但掺入矿渣微粉或纤维增强材料,能大幅提高其力学性能,使其可应用于园林的低负荷道路、小型挡土墙等结构,再生混凝土生产能耗比传统混凝土降低超过30%,碳排放减少近40%,满足低碳施工要求。

3.2 绿色材料在园林绿化工程中的应用

植物种植与土壤改良是园林绿化工程的核心,绿色材料在这一过程中通过有机基质、生物肥料以及节水技术等方式,明显提升生态效益并削减维护成本,像椰糠、腐殖土以及蚯蚓粪,能替换传统园土,使土壤结构更优且提升肥力,椰糠是经椰子壳纤维加工制成的,透气性好、保水性强,非常适用于屋顶花园和容器栽植,既降低建筑荷载,又避免土壤板结。腐殖土是利用城市绿化废弃物(如落叶、修剪下来的枝条)堆肥制成的,既实现资源循环利用,又富含微生物活性,能促进植物根系的发育,蚯蚓粪属于高效有机肥,所含氮、磷、钾含量均衡,而且不含有重金属污染,适用于花卉、草坪等精细绿化区域^[2]。

应用生物肥料和缓释肥料,能进一步减少化学肥料给土壤和水体造成的污染,像固氮菌、解磷菌这类生物肥料,依靠微生物的代谢活动来活化土壤养分,可减少30%~50%的化肥用量,缓释肥料借助包膜技术控制养分的释放速度,避免养分流失,特别适合乔木和灌木的长期养护,和传统化肥相比,虽然这些绿色肥料初期成本高一些,

但可降低植物病害发生率,减少施肥次数,从长远看更具成本效益。

3.3 绿色材料在园林水景与生态修复中的应用

园林工程中,园林工程里,水景工程与生态修复是极为关键的部分,绿色材料在该领域的应用主要围绕水质净化、生态护岸以及生物栖息地建设展开,目的是增强水系统的自净能力和生物多样性,石笼、生态混凝土和植物纤维毯这些生态护岸材料,替换了传统的硬质驳岸,增强了河岸的渗透性与抗冲刷能力。天然石块被钢丝网包裹形成石笼,其缝隙能让植物生长,推动水分交换,并且能给水生生物提供栖息的地方,生态混凝土因掺入稻壳灰、硅灰等工业副产品,通过掺入稻壳灰、硅灰等工业副产品,形成多孔结构,帮助挺水植物扎根生长,进而吸收水体中的氮磷污染物,植物纤维毯(例如椰纤维毯)可作临时护坡材料,降解后会变为有机质,既无需清理也无二次污染,河道、湖泊整治大量应用这些材料,让护岸工程碳排放降低50%以上。

水质净化可用生物填料、矿物滤料以及浮岛植物,生物填料如组合式生物绳、火山岩滤料,可为硝化细菌和反硝化细菌提供附着的载体,借助微生物代谢分解有机物,可用于人工湿地和景观水体循环过滤系统,诸如沸石、凹凸棒土之类的矿物滤料,借助离子交换来吸附重金属和氨氮,特别适合对污染水体进行应急修复,芦苇、菖蒲等浮岛植物的根系会形成生物膜,可吸收富营养物质,还可为鱼类和昆虫打造庇护之所,进而构成微型生态系统。

4 园林工程施工中成本控制与绿色材料应用的协同机制

4.1 设计阶段的协同优化机制

园林工程初步设计阶段,成本控制和绿色材料应用的协同机制重点体现在材料选择、方案比选和全生命周期评估这三方面,在设计阶段统筹兼顾经济性与生态性,可从源头上降低工程总成本,增强可持续性表现,材料的合理选择是设计阶段的关键,要权衡绿色材料的性能、价格与长期效益。尽管透水铺装材料的单价要比传统混凝土高出20%~30%,但它减少排水系统建设成本、降低因热岛效应产生的空调能耗,且延长道路使用寿命,能在5-8年内收回增量投资,设计师通过建立材料数据库,对不同方案的初期投入与运营维护费用加以对比,优先选择全生命周期成本更优的绿色材料,实施本地化采购策略可大幅降低运输费用并减少碳足迹,采用区域内再生骨料替换外地石材,既能降低材料成本,又契合绿色施工要求。

方案比选是通过多目标决策分析来开展的,将成本指标与环境指标纳入统一评价体系,就水景工程而言,对传统钢筋混凝土水池与生态石笼护岸方案进行对比,前者施工迅速,但后续维护费用高昂,生态石笼护岸方案虽初期施工复杂,但具备自净能力且维护成本低,利用价值工程分析法,

量化各方案功能得分与成本的比值,能筛选出性价比最高的生态设计,应用 BIM 技术能在设计阶段模拟材料用量、施工流程和资源消耗,杜绝因设计变更造成的返工浪费,实现成本与环保双优化^[3]。

4.2 施工阶段的动态协同管理机制

施工阶段是实现成本控制和绿色材料应用协同的关键执行阶段,需依靠精细化管理和技术创新,攻克材料溢价、工艺适配和资源浪费等难题,推动经济与环保目标同步达成,施工协同以动态成本监控为基础,需构建实时成本核算系统,跟踪绿色材料的采购、运输和使用情况。生态护坡材料如椰纤维毯的采购可能会因季节性供应而受到影响,价格起伏明显,项目部通过市场预判及集中采购锁定价格,并且对施工时序进行优化,避免因材料短缺引发的工期延误成本,利用物联网技术对材料库存实施动态管理,降低现场堆放造成的损耗,可使材料报废率下降 5% ~ 10%,针对光催化涂料这类高价绿色材料,精准算出涂布率以及优化施工工艺,杜绝过度喷涂引发的浪费,使材料利用率提高到 95% 以上。

协同落地依赖施工工艺创新这一技术保障,传统施工方式可能难以充分展现绿色材料的性能,反而使成本增加,若对再生骨料混凝土采用普通振捣工艺,容易出现强度不均的情况,需要采用高频振捣或者添加增稠剂来保证质量,此项工艺改进虽带来少量技术成本的提升,但成功规避了返工风险,整体节省了总开支,开展透水铺装施工时,通过分层碾压与级配优化相结合,既可以保证透水率,又可以增强抗压强度,降低后期修补开支,施工团队通过专项技术交底与工人培训,保障绿色材料得以正确应用,避免因操作不当引发成本超支。

4.3 运维阶段的长期协同增效机制

园林工程竣工进入运维阶段后,成本控制与绿色材料应用协同机制转向长期绩效评估和适应性管理,通过减少维护成本、延长设施使用寿命、增强生态效益,实现可持续运营,低维护特性是绿色材料实现长期协同的核心要素,和传统材料相比,不少绿色材料在运维阶段具备明显的成本优势。耐候钢栏杆无需定期进行油漆防腐处理,其通过自然锈蚀产生的保护层可使 50 年内维护成本相较于普通钢材降低

70%;透水铺装不易产生积水冻胀现象,裂缝率比混凝土铺装低 50%,降低翻修频次与成本,运维部门通过建立材料档案,量身定制不同的养护方案,如生态护坡只需每年检查植被覆盖度,而硬质驳岸要定期修补勾缝,采用这种针对性的维护策略,可使年度养护预算节省 20% ~ 30%。

基于数据的绩效评估为协同合作提供了科学依据,通过安装传感器来监测绿色材料的实际表现,如透水铺装的渗透率、生态湿地的水质净化效率,与初期设计目标进行对比,评估其经济与环境效益,以某项目的数据为例,生态湿地运行 5 年后,该生态湿地对氮磷的去除率仍维持在设计标准的 90%,而且运维成本仅为传统污水处理设备的五分之一,这些数据既验证了绿色材料的长久价值,还可用于优化后续项目设计,通过区块链的碳足迹追踪技术,可对绿色材料在整个使用阶段的减排量进行量化,为申请绿色补贴或者碳交易提供证明,进而提升项目收益^[4]。

5 结语

园林工程施工期间成本控制与绿色材料应用的协同机制,实际上是经济效益与生态价值实现动态平衡的进程,在设计阶段进行材料比选以及全生命周期评估,从源头上避免了高成本低效益的决策;施工期间的动态管控与工艺改良,将绿色材料性能优势转化为实际成本节约;运维阶段的低维护需求加上数据驱动优化,能进一步提升长期协同效益。随着碳交易市场不断完善、绿色技术持续迭代,园林工程协同管理需进一步结合数字化工具与政策激励机制,更好契合低碳城市发展需求,此项探索不仅为行业转型与升级提供了方法论依据,还为其他基础设施领域的可持续发展提供了可借鉴的模式。

参考文献

- [1] 李建锋.园林施工企业工程项目成本控制及对策研究[J].经济研究导刊,2025(9).
- [2] 蔡鸢.关于园林工程施工成本控制策略分析[J].工程施工新技术,2024(2).
- [3] 陈垦.新时期风景园林工程施工管理及成本控制分析[C]//人工智能与经济工程发展学术研讨会论文集.2025.
- [4] 王有岩.园林施工项目管理中的成本控制与效率优化研究[J].2024.

Theoretical study and engineering application of load calculation of car suspension legs

Sheng Wang

China Railway 5th Bureau Group South China Engineering Co., Ltd., Dongguan, Guangdong, 523133, China

Abstract

Construction cranes are extensively utilized in engineering projects, handling tasks ranging from steel structure installation and material transportation to equipment hoisting, prefabricated component assembly, and beam slab lifting. These machines operate across tonnage categories including super-large, large, and medium-sized models. Characterized by their extended working radius, stringent positioning precision requirements, complex operational conditions, and specialized technical expertise, cranes play a pivotal role in both economic efficiency and safety management within the construction industry. This paper addresses the stability issues in truck-mounted crane operations by establishing a mathematical model for crane outrigger bearing capacity based on static equilibrium principles. Through analyzing the coupled relationships between crane self-weight, load weight, boom geometric parameters, and outrigger layout, an analytical expression for four outrigger bearing capacity is derived, providing theoretical support for safe crane operation.

Keywords

truck-mounted crane; outrigger load; moment balance; safety factor; stability analysis

汽车吊支腿荷载计算理论研究与工程应用

王生

中铁五局集团华南工程有限责任公司, 中国·广东 东莞 523133

摘要

汽车吊在工程建设中应用广泛, 作业内容涉及钢结构的安装、材料转运、设备吊装、预制构件安装、梁板吊装等, 所需设备吨位涵盖超大型、大型及中小型。其作具有业半径大、吊装定位精度要求高、工况复杂, 专业化程度突出的特点, 在工程建设领域中的经济效益和安全管理中占据至关重要的地位。本文针对汽车吊作业稳定性问题, 基于静力学平衡原理, 建立了吊车支腿承载力的数学模型。通过分析吊车自重、吊物重量、吊臂几何参数与支腿布局的耦合关系, 推导出四支腿承载力的解析表达式, 为吊车安全操作提供理论依据。

关键词

汽车吊; 支腿荷载; 力矩平衡; 安全系数; 稳定性分析

1 引言

汽车吊, 系指安装于专用汽车底盘上的流动式起重设备, 可独立执行货物装卸与建筑结构吊装作业。核心构成部件包括: 底盘系统、起重臂结构、液压传动系统、回转机构及支腿装置。

根据近年工程建设领域汽车吊安全事故的统计分析, 支腿的实际荷载超出允许值、超载与支腿沉陷占事故总量的 70%。根据《流动式起重机稳定性的确定》(GBT19924) 规定: 当汽车吊上部回转结构的纵向轴线在指定拱墙区域内与底盘纵轴垂直或重合时, 各支腿承受的最小荷载应不低于起重机总重的 15%, 但未明确给出汽车吊支腿荷载的具体

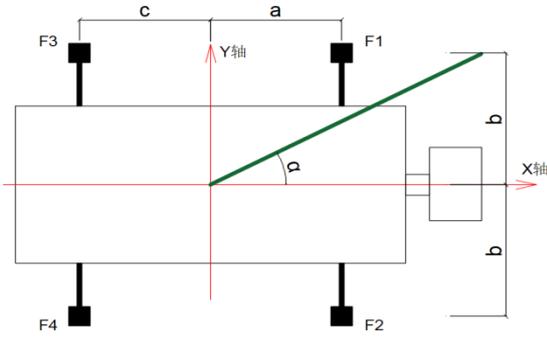
计算方法。为此, 本文开展汽车吊各支腿荷载计算研究, 旨在为支腿荷载计算及地基承载力验算提供理论支撑。

2 支腿荷载计算理论模型

假设一汽车吊自重为 W (含配重), 吊物 (包括吊钩) 重量为 P , 吊臂伸出长度为 L , 吊臂仰角为 β , 吊臂水平投影与吊车轴线夹角为 α , 前后支腿至 y 轴垂直距离为 a 、 c , 左右支腿至 x 轴垂直距离为 b 。以吊车回转中心为坐标系原点, 纵轴为 x 轴, 水平面垂直 x 轴方向为 y 轴, 建立直角坐标系, 如下图所示。

吊车在起吊重物时, 四个支腿对称伸出, 各支腿承受的荷载分别为 F_1 、 F_2 、 F_3 、 F_4 , 现在需要研究其荷载大小的计算方法。

【作者简介】王生 (1974-), 中国湖南衡阳人, 本科, 工程师, 从事桥隧工程施工技术研究。



2.1 基本假设

吊车结构为刚体。刚体假设指吊车结构在受力时不会变形，即忽略材料的弹性变形和非线性效应。该假设大幅简化计算模型。仅需满足力的平衡条件（ $\Sigma F=0$ ， $\Sigma M=0$ ）即可求解。

支腿与地面为理想铰接，无滑移。这个假设符合多数汽车吊支腿的受力特征，聚焦于主要荷载（竖向荷载）的分配计算。

荷载通过支腿中心线传递。忽略支腿偏载引起的局部效应，使各支腿荷载通过对称性直接分布，简化了计算模型。

吊车的重心与回转中心重合。

忽略风荷载及惯性动力等动态因素。吊车作业一般在比较稳定的环境（如室内或低风速条件），忽略风荷载及惯性动力等动态因素，降低计算的复杂程度。而且，静态分析结果可以作为动态分析基准值。

2.2 参数定义

2.2.1 荷载参数

包括吊车自重 W （含配重）、吊物总重 P （含吊具），是计算支腿荷载的核心参数；吊车支腿荷载 F_1 、 F_2 、 F_3 、 F_4 ，方向竖直向上，是验算地基承载力和吊车稳定性的关键参数。

2.2.2 吊臂参数

吊臂伸出长度 L ，是指吊物通过钢丝绳悬吊在吊臂上作用点至回转中心之间的吊臂长度。

吊臂在水平面投影与 X 轴夹角 α ，吊臂仰角（与水平面夹角） β ，这两个参数直接影响荷载在支腿上的分配。

2.2.3 支腿坐标（以回转中心为坐标原点）

前支腿 X 坐标： $x=a$ ；后支腿 X 坐标： $x=-c$ ；左右支腿 y 坐标： $y=\pm b$ 。

3 荷载分配与静力学平衡方程

3.1 吊物作用力位置

为详细分析吊物 P 对各坐标轴的力矩，需计算其在坐标系中的位置。设吊臂伸出长度 L ，仰角为 β ，则其水平投影长度为 $L\cos\beta$ ；吊物水平投影与 X 轴夹角为 α ，故其在 $x-y$ 平面的投影坐标为 $X_p=L\cos\beta\cos\alpha$ 、 $y_p=L\cos\beta\sin\alpha$ 。据此可依据 $\Sigma F=0$ 与 $\Sigma M=0$ 建立力学平衡方程。

3.2 垂直力平衡

吊车四个支腿反力之和，与吊车自重和吊物重之和。

$$\text{即由：}\Sigma F_z=0\text{，得到：}F_1+F_2+F_3+F_4=W+P \quad (1)$$

3.3 绕坐标轴的力矩平衡

吊物 P 的重量会产生绕 x 轴 y 轴的力矩，这个力矩与四个支腿绕 x 轴 y 轴力矩形成平衡。吊物绕 x 轴的力矩由 P 的 y 坐标分量引起，即 $P_y=PL\cos\beta\sin\alpha$ ；同样，吊物绕 y 轴的力矩由 P 的 x 坐标分量引起，即 $P_x=PL\cos\beta\cos\alpha$ 。考虑到力矩方向，可以得到以下方程：

3.3.1 绕 x 轴力矩平衡

吊物力矩： $MP_x=-Py_p=-PL\cos\beta\sin\alpha$

支腿力矩： $MF_x=b(F_1-F_2+F_3-F_4)$

由： $MF_x+MP_x=0$ ，得：

$$b(F_1-F_2+F_3-F_4)=PL\cos\beta\sin\alpha \quad (2)$$

3.3.2 绕 y 轴力矩平衡

吊物力矩： $MP_y=Py_p=PL\cos\beta\cos\alpha$

支腿力矩： $MF_y=a(F_1+F_2)-c(F_3+F_4)$

由： $MF_y+MP_y=0$ ，得：

$$a(F_1+F_2)-c(F_3+F_4)=PL\cos\beta\cos\alpha \quad (3)$$

4 支腿反力计算公式的推导

考虑到对称性以及汽车结构为刚体的假设，每个支腿的反力由两部分组成：一部分来自吊车和吊物重力的分配，另一部分来自力矩的分配。而且，支腿的反力与其到坐标轴的距离成比例。联立方程（1）（2）（3），定义中间变量：

令： $S_x=F_1+F_2$ ； $T_x=F_3+F_4$ ；

由（1）： $S_x+T_x=W+P$ （1'）；由（3）： $aS_x-cT_x=PL\cos\beta\cos\alpha$ 。

联立解得：

$$S_x = F_1 + F_2 = \frac{c \times (W + P) + P \times L \times \cos\beta \times \cos\alpha \times \cos\beta}{a + c}$$

$$T_x = F_3 + F_4 = \frac{a \times (W + P) - P \times L \times \cos\beta \times \cos\alpha \times \cos\beta}{a + c}$$

令： $D_y=(F_1+F_3)-(F_2+F_4)$ ；联立（2）解得：

$$D_y = \frac{P \times L \times \cos\beta \times \sin\alpha}{b}$$

又考虑到因为支腿左右横向距离相等，所以两侧的力矩分配相同（ $F_1-F_2=F_3-F_4$ ）。最终解得：

$$F_1 = \frac{c \times (W + P) + P \times L \times \cos\beta \times \cos\alpha}{2 \times (a + c)} + \frac{p \times L \times \cos\beta \times \sin\alpha}{4 \times b}$$

$$F_2 = \frac{c \times (W + P) + P \times L \times \cos\beta \times \cos\alpha}{2 \times (a + c)} - \frac{p \times L \times \cos\beta \times \sin\alpha}{4 \times b}$$

$$F_3 = \frac{a \times (W + P) - P \times L \times \cos\beta \times \cos\alpha}{2 \times (a + c)} + \frac{p \times L \times \cos\beta \times \sin\alpha}{4 \times b}$$

$$F_4 = \frac{a \times (W + P) - P \times L \times \cos\beta \times \cos\alpha}{2 \times (a + c)} - \frac{p \times L \times \cos\beta \times \sin\alpha}{4 \times b}$$

W-- 汽车吊自重, kN;
 P-- 吊物重量, kN;
 a-- 支腿至 y 轴垂直距离, 单位: m;
 b-- 支腿至 x 轴垂直距离, 单位: m;
 α -- 吊臂水平投影与吊车轴线夹角, 单位: ° ;
 β -- 吊臂仰角, 单位: ° ;
 F1、F2、F3、F4-- 各支腿荷载, kN。

现在需要验证上方方程的正确性。

竖向力: $F_1+F_2+F_3+F_4=W+P$, 因此竖向力满足力的平衡方程。

绕 X 轴 力 矩: $\sum F_i Y_i = F_1 b - F_2 b + F_3 b - F_4 b = PL \cos \beta \sin \alpha$, 符合吊物绕 x 轴的力矩平衡。

绕 y 轴力矩: $\sum F_i X_i = F_1 a + F_2 a - F_3 c - F_4 c = PL \cos \beta \cos \alpha$, 符合吊物绕 y 轴的力矩平衡。

说明以上吊车支腿荷载反力的计算公式是正确的。

5 参数影响分析

5.1 吊臂方位影响

$\alpha=0^\circ$, 正前方作业, 前后反力差最大:

$$\Delta F_{前后} = \frac{P \times L \times \cos \beta}{a + c}$$

$\alpha=90^\circ$, 侧方作业, 左右反力差最大:

$$\Delta F_{左右} = \frac{P \times L \times \cos \beta}{2 \times b}$$

5.2 安全边界条件

支腿不离地, 即 $\min(F_1, F_2, F_3, F_4) > 0$;

地面承载力 $F_{地基} > \max(F_1, F_2, F_3, F_4)$;

临界工况发生在 $\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{2b}{a+c}\right)$ 时, 此时支腿反力达到最大值。

6 工程应用

某 50t 汽车吊, 参数 ($W=40.4t$, $a=3.17m$, $c=2.75m$, $b=3.95m$), 吊物重量 15t, 吊臂长度 15.0m, 吊臂仰角

$\beta=53.13^\circ$, 地面为 20cm 厚 C20 混凝土, 支腿垫板尺寸为 $1.1m \times 1.1m$ 。各支腿在不同工况时的反力如下:

吊臂方位 α	F_1 (t)	F_2 (t)	F_3 (t)	F_4 (t)
0°	22.75	22.75	4.95	4.95
45°	25.09	14.62	13.08	2.61
90°	20.27	5.46	22.24	7.43

当 $\alpha = \tan^{-1}(2 \times 3.95 / (3.17 + 2.75)) = 53.15^\circ$ 时, 支腿反力达到最大值, $F_{max} = F_3 = 26.68t$, 同时出现最小值 $F_{min} = F_2 = 1.02t$ 。

地基承载力按最大支腿反力验算, 混凝土内应力按 45° 角扩散, 则地基荷载:

$$\sigma = 266.8kN / ((1.1 + 0.4) \times (1.1 + 0.4)) = 118.6kPa,$$

只要地基承载力大于 120kPa 均可满足吊装要求。

此结果与实际监测结果基本相符, 说明计算方法有效。

7 结语

建立的支腿反力解析模型精确表征了吊物重量、吊臂位姿与支腿布局的耦合关系, 为吊装设备选择、吊车稳定性验算、地基承载力验算提供理论依据; 最大支腿反力发生在吊臂垂直于支腿对角线方向, 作业时应避开这一工况; 建议作业时优先选择 $\alpha=0^\circ$ 或 180° 方位; 通过调整 β 可优化载荷分布: 增大仰角 β 能显著降低支腿反力极值; 公式可为汽车吊稳定性验算、支腿地基加固方案制定提供理论依据。

参考文献

- 董文俊, 殷克锋, 白贺昶, 等. 一种确定汽车吊支腿荷载大小的计算方法 [J]. 建筑工程技术与设计, 2019(27):4665.
- 郑齐征, 郑士金. 汽车吊支腿反力及楼面等效均布活荷载的计算方法 [J]. 中国标准化, 2019(16):21-22.
- 何文滔. 汽车吊与平板车同时上楼板作业分析 [J]. 中国建筑金属结构, 2023, 22(7):57-59.
- 檀俊成, 张荣. 旧桥拆除汽车吊作用结构计算分析与建议 [J]. 山西建筑, 2018, 44(27):162-164.
- 邓德员, 黄敏, 吴有明. 220t 汽车吊上混凝土桥面施工作业计算分析 [J]. 城市道桥与防洪, 2017(10):94-96, 101.

Investigation and discussion on hidden water disaster caused by coal mine in Northeast Yunnan Province

Quan Qian

Yunnan 143 Coalfield Geological Exploration Team, Qujing, Yunnan, 655000, China

Abstract

Northeastern Yunnan, a coal-rich region in Yunnan Province, encompasses areas including Zhaotong and northern Qujing. With substantial coal reserves and a long mining history, it serves as the core energy supply pillar of the province. However, the area's complex geological structures and variable hydrogeological conditions have made hidden disaster-causing water hazards (such as old mine water accumulation, water-conducting faults, and concealed karst caves) the primary risk constraining coal mine safety. Historical incidents of old mine water outbursts and roof water overflow have caused casualties and property losses. Therefore, conducting systematic investigation of these hidden hazards and establishing targeted prevention systems holds significant practical importance for ensuring safe and efficient coal mining in Northeastern Yunnan.

Keywords

Northeast Yunnan; Coal mines; Hidden disasters; Water hazard prevention and control; measure

云南省滇东北煤矿隐蔽致灾水害调查及防治探讨

钱权

云南省一四三煤田地质勘探队, 中国·云南 曲靖 655000

摘要

滇东北是云南省重要的煤炭资源富集区, 涵盖昭通、曲靖北部等区域, 煤炭储量大、开采历史长, 是云南省能源供应的核心支撑。但该区域地质构造复杂、水文地质条件多变, 隐蔽致灾水害(指赋存于地下、难以通过常规手段直接识别的水害隐患, 如老空积水、导水断层、隐蔽溶洞等)已成为制约煤矿安全生产的首要风险——历史上多次发生老空水突水、顶板水溃涌等事故, 造成人员伤亡和财产损失。因此, 系统开展隐蔽致灾水害调查、构建针对性防治体系, 对滇东北煤矿安全高效开采具有重要现实意义。

关键词

滇东北; 煤矿; 隐蔽致灾; 水害防治; 措施

1 引言

云南省滇东北地区煤炭资源富集区, 区域地质受多期构造运动影响, 褶皱、断层发育、喀斯特地貌显著, 构造复杂, 碳酸盐岩广泛分布, 岩溶作用强烈, 岩溶水的赋存与运移对煤矿开采影响深远, 水害致灾因素难以通过常规手段直接识别, 深入研究其区域煤矿水害特征, 探寻有效的调查方法和防治手段对保障煤矿安全生产具有重要意义。

2 区域地质与水文地质背景

2.1 区域地质构造特征

滇东北地处扬子准地台西缘与横断山脉东段过渡带, 地质构造强烈, 主要特征如下:

褶皱发育: 以昭通-鲁甸向斜、宣威-富源背斜为核心构造, 煤层赋存于二叠系龙潭组、宣威组, 受褶皱影响, 煤层埋深差异大(从几十米到上千米), 局部煤层倾向陡(30°-60°), 增加水害隐患识别难度。

断层密集: 区域内发育多条活动性断层(如小江断裂带分支、昭通断裂), 断层性质以正断层为主, 部分为导水断层——断层破碎带不仅是地下水运移的主要通道, 还可能沟通煤层顶板砂岩含水层与底板茅口组灰岩含水层, 形成跨含水层充水隐患。

喀斯特地貌显著: 滇东北部分区域(如镇雄、威信)属于喀斯特山区, 二叠系茅口组灰岩、三叠系飞仙关组砂岩中溶洞、溶隙发育, 且多呈“隐蔽性”分布(无地表径流关联), 易成为突发水害源。

2.2 水文地质条件

地表水: 滇东北地区整体地形切割较深, 有利于地表水及地下水排泄。各含水层均接受大气降水入渗补给, 地层岩性及地貌控制着地下水的埋藏、运移、富集及排泄条件。

【作者简介】钱权(1984-), 男, 中国云南曲靖人, 本科, 工程师, 从事煤田地质、水文地质、工程地质和环境地质研究。

在以碎屑岩及玄武岩为主的分布区，地表浅部以裂隙潜水为主，地下水埋藏浅且随地形起伏而变化，区内含水层多为含、隔水层相间的裂隙弱含水层组，富水性弱。向深部地下水径流交替循环逐渐减弱，过渡为弱承压含水层，富水性较浅部弱。区内受大气降水入渗补给，大多沿就近沟谷低洼处以泉水形式排泄，地下水径流交替距离较短，形成了既是补给区，又是排泄区，即排泄条件好，水文地质条件相对较简单。

地下水：滇东北地区煤矿地下水系统可分为 3 类关键含水层（见表 1-1），均与隐蔽水害直接相关，地下水以岩溶管道及脉状形式径流于灰岩熔蚀裂隙中，该区地下水除接受大气降水补给外，尚接受地表径流及非可溶岩接触带地下水入渗补给。该区内地下水以岩溶的形式在沟谷低洼处或与非可溶岩接触带有利地段排出地表。含水层富水性及导水性极不均匀，水文地质条件相对较复杂。

表 1-1 滇东北地区煤矿地下水含水层类型

含水层类型	赋存层位	富水性特征	与水害的关联
顶板砂岩含水层	龙潭组上段	中等-强富水，裂隙发育	开采后导水裂隙沟通，引发顶板水溃涌
底板灰岩含水层	茅口组	强富水，溶洞-溶隙发育	水压高（埋深 500m 时水压达 5MPa），易突破底板隔水层引发突水
老空区积水层	历史开采巷道 / 采空区	富水性不均，水量波动大	隐蔽性最强，无固定边界，突水时瞬时流量大（可达 1000m ³ /h）

2.3 开采特征与水害风险叠加

滇东北地区煤矿开采历史久远，存在“小煤矿多、开采不规范”的历史遗留问题：

老空区分布混乱：小煤矿无正规开采台账，老空区边界、积水深度无法精准定位，形成“隐蔽积水库”；

煤层开采强度提升：近年来大型煤矿（如昭通煤矿、宣威煤矿）采用综合机械化开采，采高增加（3-5m），导致顶板导水裂隙发育高度扩大（可达 20-30m），易沟通上部砂岩含水层；

深部开采趋势：部分矿井开采深度超过 800m，底板灰岩含水层水压显著升高，底板隔水层（龙潭组下段泥岩）厚度不足 10m 时，突水风险剧增。

透性强，可沟通顶板砂岩含水层与底板灰岩含水层，形成“跨层供水通道”。

隐蔽性特征：部分断层为“隐伏断层”（地表无出露），物探手段（如地震勘探）难以精准识别其走向与导水性，易被忽视。

3 煤矿隐蔽致灾水害类型及特征

3.1 老空水害（主要类型）

成因：历史小煤矿无序开采遗留采空区，大气降水、地表水或含水层水渗入后形成积水，且因开采台账缺失，积水区边界、水量、水压无法通过常规手段预判。

隐蔽性特征：无地表标识，且老空区多位于现有开采煤层上方或侧方，与现有巷道仅隔数米煤柱，突水前无明显水压显现（如煤壁潮湿、裂隙渗水），突发风险高。

3.2 底板灰岩水害

成因：深部开采时，底板茅口组灰岩含水层水压超过底板隔水层“临界抗水压强度”，隔水层发生“塑性破坏”或被原有裂隙贯通，形成突水通道。

隐蔽性特征：底板隔水层内部裂隙（微裂隙）无法通过常规钻探识别，且灰岩含水层溶洞多呈“孤立状”分布，钻探命中率低（仅 10%-20%），难以提前探明。

3.3 断层 / 裂隙水害

成因：区域内导水断层（如落差大于 10m 的正断层）破碎带宽度可达 5-15m，破碎带内充填物（泥质、砂质）渗

3.4 喀斯特溶洞水害

成因：喀斯特山区灰岩溶洞内积水，若溶洞顶部距离煤层顶板 / 底板小于 10m，开采扰动（如爆破、顶板垮落）会导致溶洞顶板坍塌，积水瞬间涌入井下。

隐蔽性特征：溶洞多与地表无直接水力联系，且分布随机（无规律可循），常规物探（如高密度电法）对溶洞的分辨率仅能达到 5m 以上，小尺寸溶洞（直径 1-3m）易漏判。

4 隐蔽致灾水害调查技术

针对滇东北煤矿水害隐蔽性强、地质条件复杂的特点，需采用“基础资料整合 + 多技术物探 + 钻探验证 + 动态监测”的综合调查体系，具体如下：

4.1 基础资料收集与精细化分析（前置工作）

核心资料：历史煤矿开采台账（如井上下对照图、采掘工程平面图）、地质勘探报告（钻孔柱状图、含水层参数）、老窑调查记录（走访当地老矿工，标注废弃井口位置）；

分析方法：采用 ArcGIS 构建“煤矿空间信息数据库”，叠加煤层埋深、断层分布、含水层厚度等图层，初步圈定“隐蔽水害高风险区”（如断层与煤层交叉处、老空区集中区）。

4.2 多技术物探（隐蔽隐患识别核心手段）

根据不同水害类型的物性差异，选择针对性物探技术，实现“互补验证”：

技术组合策略：先通过三维地震普查井田隐伏断层，再用瞬变电磁法圈定高风险区，最后用高密度电法 + 地质雷达对工作面进行精细化探测，形成“从宏观到微观”的探测链条。

物探技术优势局限对比表 3-1

物探技术	探测目标	优势	局限性	滇东北应用场景
瞬变电磁法 (TEM)	老空区、含水层、导水断层	探测深度大 (可达 500m)、对低阻体 (水) 敏感	受电磁干扰 (如高压电缆) 影响大	深部开采工作面超前探测 (80-100m)
高密度电法	浅部老空区、顶板裂隙水	分辨率高 (1-3m)、成本低	探测深度浅 ($\leq 100m$)	掘进工作面迎头超前探测 (30-50m)
地震勘探 (三维地震)	隐伏断层、大型溶洞	可圈定断层走向、溶洞规模	对小尺寸隐患 ($< 5m$) 识别差	井田尺度隐蔽构造普查
地质雷达	巷道顶板/底板浅部裂隙	分辨率极高 (0.1-0.5m)	探测距离短 ($\leq 10m$)	现有巷道帮部、顶板隐患排查

4.3 钻探验证与水文地质试验 (确认隐患关键步骤)

物探结果需通过钻探验证,避免“误判”或“漏判”,核心工作包括:

超前探水钻孔:严格执行《煤矿防治水细则》要求,掘进工作面超前探水钻孔不少于3个(呈扇形布置),探水距离不小于30m(老空区风险区不小于50m),通过钻孔涌水量、水压监测,确认是否存在隐蔽积水;

抽水试验:对底板灰岩含水层、顶板砂岩含水层施工抽水试验孔,测定渗透系数(k)、单位涌水量(q)等参数,计算“突水系数”(T=P/M, P为水压, M为隔水层厚度)——当T>0.06MPa/m时,判定为突水高风险;

钻孔成像:采用钻孔全景成像系统(BHTV),观察钻孔壁裂隙发育情况、溶洞位置,直观验证物探圈定的隐患区。

4.4 新技术应用 (提升调查精度)

无人机航测+InSAR技术:对煤矿地表进行高精度航测,结合InSAR(合成孔径雷达干涉测量)监测地表沉降,间接推断地下老空区分布(地表沉降区多对应老空区垮落区);

三维地质建模:基于钻探、物探数据,构建“煤层-含水层-断层-老空区”一体化三维模型,动态更新老空区积水范围、含水层富水性分区,实现隐患可视化管理;

数值模拟:采用FLAC3D、TOUGH2等软件,模拟开采过程中顶板导水裂隙发育高度、底板隔水层应力变化,预判水害发生的临界开采条件。

5 针对性防治措施体系

基于调查结果,滇东北煤矿隐蔽致灾水害防治需遵循“预防为主、综合治理、应急兜底”的原则,构建“超前预防-精准治理-应急响应”三级体系:

5.1 一级措施:超前预防 (从源头控制风险)

严格执行“预测预报、有疑必探”制度:

新采区、新工作面设计前,必须完成三维地震+瞬变电磁普查,未探明隐蔽水害的区域不得开采;

掘进工作面每次推进前,必须施工超前探水钻孔,确认前方无老空水、断层水隐患后,方可继续掘进。

建立水文动态监测系统:

对顶板砂岩含水层、底板灰岩含水层布设水位监测孔(每500m²至少1个),实时监测水压变化,当水压骤升/骤降时,立即启动预警;

在井下主要巷道安装流量传感器,监测涌水量变化,当涌水量超过正常数值10%时,停止作业并排查隐患。

优化开采工艺:

对底板隔水层厚度小于15m的区域,采用“条带开采”(采宽 $\leq 5m$),减少底板扰动,降低突水风险;

对顶板含水层富水性强的区域,采用“充填开采”,控制顶板导水裂隙发育高度,避免沟通含水层。

5.2 二级措施:精准治理 (消除已探明隐患)

老空水疏放:

对已探明的老空区,施工疏放水钻孔(孔径 $\geq 110mm$),采用“先降压、后疏放”的方式,将老空区水位降至开采煤层下方5m以下;

疏放过程中,实时监测涌水量、水质(如含泥量、pH值),避免疏放引发泥沙溃涌。

底板注浆加固:

对底板突水系数T>0.06MPa/m的区域,采用“高压注浆”(注浆压力 ≥ 1.5 倍水压),注入水泥-水玻璃双液浆,封堵底板裂隙,提高隔水层抗水压能力;

注浆后需施工验证孔,测定加固后隔水层的“有效厚度”,确保突水系数降至安全值以下。

断层/溶洞封堵:

对导水断层,在断层两侧施工注浆孔(孔距 $\leq 3m$),注入高强度注浆材料(如超细水泥、环氧树脂),形成“隔水帷幕”,切断断层导水通道;

对已探明的溶洞,采用“充填注浆”,先填入碎石(粒径5-10mm),再注入浆液,彻底封堵溶洞积水。

5.3 三级措施:应急处置 (应对突发水害)

制定专项应急预案:

明确突水事故的应急组织机构、人员职责、撤离路线(需标注避灾硐室位置),并定期修订(每年至少1次);

储备应急物资:在井下主要避灾硐室储备排水泵(流量 $\geq 200m^3/h$)、救生舱、应急食品(保质期 $\geq 72h$)、通讯设备(如应急电话、对讲机)。

定期开展应急演练:

每季度至少开展1次突水应急演练,模拟“工作面突水-人员撤离-排水抢险”全流程,确保井下作业人员熟悉撤离路线和自救技能。

突水后抢险处置:

突水发生后, 优先组织受威胁区域人员撤离至安全区域, 切断灾区电源;

根据突水量大小, 启动相应排水方案: 小突水 (<200m³/h) 采用井下现有排水系统; 大突水 (>500m³/h) 调用地面备用排水泵 (流量≥1000m³/h), 实施“地面-井下联合排水”。

6 存在问题与建议

6.1 当前存在的主要问题

历史资料缺失严重: 部分小煤矿关闭后, 开采台账、老空区图纸丢失, 导致老空区调查难度大, 隐蔽水害隐患无法全面探明; 技术装备水平不均: 中小型煤矿物探设备 (如三维地震仪、瞬变电磁仪) 配备不足, 依赖传统钻探, 调查精度低、效率差; 人员专业能力不足: 部分煤矿防治水人员缺乏专业知识, 对物探数据解读、水文参数分析能力弱, 易导致隐患误判。

6.2 改进建议

加强历史资料整合: 由地方政府牵头, 组织煤炭、地质部门开展“滇东北煤矿老空区专项普查”, 通过走访老矿工、整理档案、物探验证, 建立统一的“老空区数据库”, 实现信息共享; 加大技术投入: 鼓励煤矿企业引进三维地质建模、智能化监测 (如物联网水文监测系统) 等新技术, 对中小型煤矿给予技术补贴, 提升整体调查装备水平; 强化人员培训: 定期组织煤矿防治水人员参加专业培训 (每年不少于40学时), 考核合格后方可上岗, 同时邀请地质院校、科研院所专家开展现场指导, 提升实操能力。

7 结语

滇东北煤矿隐蔽致灾水害的核心风险源于“地质构造复杂+历史开采遗留问题+深部开采水压升高”的叠加, 其中老空水害、底板灰岩水害是最主要的隐患类型。通过“基

础资料整合+多技术物探+钻探验证”的综合调查体系, 可实现隐蔽水害的精准识别; 而构建“超前预防-精准治理-应急兜底”的防治体系, 能有效控制水害风险。

参考文献

- [1] 巷道水害防治中瞬变电磁超前探测应用分析.冯浩.能源与节能,2019(12)
- [2] 探放水技术在掘进巷道中的应用.张良.内蒙古煤炭经济,2020(08)
- [3] 定向探放及局部疏放在水害防治中的应用研究.谷圆中.山西化工,2024(12)
- [4] 浅析我国煤矿水害防治研究现状及展望.高政;李波波.采矿技术,2021(02)
- [5] 开元矿井下探放水方案设计及应用.郑建龙.煤炭与化工,2022(09)
- [6] 福建煤矿水害防治面临的安全风险及应对建议.卓炳平.海峡科学,2022(07)
- [7] 程孝兵. 瞬变电磁法在某矿井水文地质勘探中的应用[J]. 煤, 2011(12): 15—19.
- [8] 卢纪周.王河煤矿充水因素分析及防治水措施[J].中州煤炭, 2006 (04): 256.
- [9] 超前探放水在加强煤矿防治水工作中的应用研究[J].黄冲.能源与节能,2021(12)
- [10] 老空水超前钻探技术方案分析[J].王江平.内蒙古煤炭经济,2020(10)
- [11] 煤矿工作面水害防治技术及安全性评价.祝建东.山西化工,2024(06)
- [12] 煤矿涌水危险性分析及水害防治研究.田鹏飞.能源与节能,2024(11)
- [13] 煤矿水害防治技术的现状与发展探讨.李艳龙;孙建军;王亮;邢佳佳.矿业装备,2023(11)
- [14] 物探技术在煤矿水害防治中的应用.聂朋启.矿业装备,2022(04)

Geotechnical Engineering Investigation of Soft Soil Foundations

Kuo Jiang

China Ship Survey and Design Research Institute Co., Ltd., Shanghai, 200333, China

Abstract

Soft soil foundations are widely distributed in coastal plains and alluvial areas along rivers. Their high water content, high compressibility, and low strength characteristics pose numerous challenges for engineering construction. As a prerequisite for engineering design, geotechnical investigation faces technical difficulties under soft soil conditions, such as sampling disturbance, parameter variability, and long-term deformation prediction. Starting from the characteristics of soft soil engineering, this paper reviews the theoretical basis and methodological system of investigation work, analyzes key difficulties in sampling quality control, representation of spatial parameter variability, geological stratification, and stability prediction, and proposes measures to ensure quality, including optimizing investigation design, improving the testing supporting system, establishing multi-source data integrated analysis methods, and constructing a full-process quality control mechanism. These measures provide a reference for improving the quality of soft soil foundation investigations.

Keywords

Soft soil foundation; Geotechnical investigation; In-situ testing; Parameter variability; Quality control

软土地基的岩土工程勘察研究

蒋扩

中船勘察设计研究院有限公司, 中国·上海 200333

摘要

软土地基在沿海平原及河流冲积地区广泛分布, 其高含水量、高压缩性以及低强度特性给工程建设带来诸多挑战。岩土工程勘察作为工程设计的前提环节, 在软土地基条件下面临取样扰动、参数变异以及长期变形预测等技术难题。本文从软土工程特性出发, 梳理勘察工作的理论基础与方法体系, 剖析取样质量控制、参数空间变异性表征、地质分层界定以及稳定性预测中的关键难点, 提出优化勘察方案设计、完善测试配套体系、建立多源数据综合分析方法以及构建全过程质量控制机制等保障措施, 为提升软土地基勘察工作质量提供参考。

关键词

软土地基; 岩土工程勘察; 原位测试; 参数变异性; 质量控制

1 引言

沿海地区经济发展带动了大规模基础设施建设, 软土地基条件下的工程问题日益凸显。这类土体形成于特定地质历史时期, 海陆交互沉积环境造就了其独特的物理力学性质——含水量往往超过液限, 孔隙比高达 1.5 甚至更高, 承载力却低得惊人。传统勘察手段在面对软土时常遭遇困境: 钻探取样过程中土样结构破坏严重, 室内试验结果与现场实际状况出现偏差, 地层分布规律难以准确把握。这些问题不仅增加了勘察成本, 更可能导致设计参数选取不当, 进而影响工程安全。如何在软土复杂性与勘察经济性之间寻求平衡, 如何从有限的勘察数据中提取最大信息量, 成为岩土工程界持续关注的课题。本文尝试从理论到实践层面探讨软

土地基勘察的关键环节, 力图为勘察工作质量提升提供可操作思路。

2 软土地基岩土工程勘察的理论基础

2.1 软土的工程特性与成因机制分析

软土工程特性根源于其成因过程与沉积环境。滨海平原地区的软土多属海陆交替相沉积, 潮汐作用携带细颗粒在平静水域缓慢沉降, 有机质随之富集, 形成了高含水、高孔隙比的土体结构。这种结构极为脆弱——颗粒间联结主要依靠微弱的分子引力, 在外力作用下容易产生不可恢复变形。压缩性高是软土最显著的工程特性, 荷载施加后孔隙水缓慢排出, 固结过程可能持续数年甚至数十年, 地面沉降因此成为软土地区建筑物的常见病害^[1]。抗剪强度低则直接威胁地基稳定性, 基坑开挖或路堤填筑时若处理不当, 软土可能发生整体滑动破坏。灵敏度高意味着土体结构一旦遭受扰动, 强度急剧衰减, 这给施工带来额外风险。渗透性差导致固结速度慢, 也使得排水加固措施的效果打了折扣。掌握这些特

【作者简介】蒋扩(1990-), 男, 中国安徽怀宁人, 本科, 工程师, 从事工程勘察研究。

性的内在关联机制，是制定合理勘察方案的前提。

2.2 软土地基勘察的基本原理与方法体系

勘察工作本质上是信息获取与处理的过程。软土地基条件下，地层结构往往呈现水平分布特征，但局部透镜体、夹层的存在增加了复杂性。钻探是最基础的勘察手段，通过岩芯观察可以初步判断土层性质与分布规律，但软土取样质量受钻进方式影响很大。静力触探利用探头贯入阻力变化反映土层软硬程度，在软土地区应用广泛，其连续性数据有助于识别薄层界面。十字板剪切试验直接测定原位不排水抗剪强度，避免了取样扰动对强度参数的影响^[2]。扁铲侧胀试验则能获得土体侧向变形特性，为水平向受力构筑物设计提供依据。不同方法各有侧重点——钻探提供地层框架，原位测试获取力学参数，室内试验补充物理指标，三者结合才能构建完整的地基信息体系。方法选择需要根据工程类型、场地条件以及经济成本综合权衡，大型工程往往采用多种手段交叉验证。

2.3 软土工程参数测试与获取的技术要求

参数准确性直接决定设计可靠性。软土含水量测定看似简单，但取样过程中水分散失会导致结果偏低，现场密封与快速运输成为关键控制点。压缩模量通过固结试验获得，加载等级划分、加载持续时间都需严格遵守规范要求，否则压缩曲线形态失真。抗剪强度参数获取更为复杂——不固结不排水试验模拟快速加荷条件，固结不排水试验考虑部分固结影响，固结排水试验反映长期强度特性，不同试验条件对应不同工程场景。渗透系数测定在软土中难度较大，常规变水头试验耗时且精度受限，改进型试验装置能够缩短测试周期。参数离散性是软土的固有属性，单点测试结果代表性有限，统计分析方法需要介入——标准值、特征值的确定要基于足够数量的试验数据，异常值剔除与分布规律识别需要专业判断。

3 软土地基岩土工程勘察的技术难点

3.1 软土取样与原位测试的质量控制问题

取样扰动是软土勘察最棘手的问题。薄壁取样器虽然能减少扰动，但贯入过程中仍会产生剪切应变，土样结构部分破坏。取样器直径、壁厚、刃口角度等设计参数影响扰动程度，钻进速度控制不当同样加剧破坏。运输过程中的振动、温度变化都可能改变土样状态，从现场到实验室的每个环节都存在质量风险。原位测试虽然避免了取样扰动，但测试结果受操作因素影响明显^[3]。静力触探贯入速度需保持稳定，否则孔隙水压力变化会干扰锥尖阻力读数。十字板试验中十字板插入深度、转动速率都需精确控制，插入过程本身就对土体产生扰动，休止时间不足会低估强度。设备标定与维护同样关键，传感器漂移、密封失效等故障可能长期存在却未被察觉。

3.2 软土参数的空间变异性与表征难题

软土参数在空间上呈现强烈变异性，同一层土在水平

方向上强度可能相差数倍。这种变异源于沉积环境的微小差异——水流速度略有不同就导致颗粒级配改变，有机质含量分布不均造成土质差异。有限的勘探点难以捕捉这种变异规律，两个钻孔之间的土层状况往往需要依靠经验推测^[4]。统计方法能够描述参数分布特征，但概率模型的建立需要大量数据支撑，常规勘察工作量很难满足。空间插值技术可以从离散数据推测未知位置参数，克里金法、反距离加权法各有假设前提，选择不当会引入系统误差。垂向变异相对规律性强，但软硬互层、透镜体夹层的存在打破了简单分层模式。如何用最少的勘探工作量获取最有代表性的参数，如何量化参数不确定性对设计的影响，都需要理论突破。

3.3 软土工程地质分层与界面识别困难

软土地层界面往往呈渐变过渡而非突变，物理力学性质连续变化使得分层界线难以明确划定。钻孔岩芯观察受主观判断影响，不同技术人员对同一土样的描述可能存在差异。静力触探曲线虽然连续，但在均质软土中阻力值波动不大，薄层夹层容易被掩盖。波速测试能够识别刚度变化界面，但软土波速普遍较低且差异不明显。地层对比面临更大挑战——钻孔间距过大时，同一层土的埋藏深度、厚度变化显著，单纯依靠深度对比容易出错。标志层的寻找与确认需要综合多种信息，颜色、颗粒组成、含水量、贝壳碎片等细节都可能成为判断依据。三维地质建模技术能够直观展现地层空间分布，但模型精度受控于输入数据质量，不恰当的插值算法会产生虚假界面。

3.4 软土长期变形与稳定性预测的不确定性

软土固结过程漫长，沉降预测需要准确掌握压缩参数与渗透特性。室内固结试验采用重塑土或扰动土，压缩曲线与原位状态存在偏差。分层总和法计算沉降时假设各层独立压缩，实际上相邻土层间存在相互约束。次固结沉降机理尚未完全阐明，经验系数法难以适用于所有土质条件。荷载施加速率、堆载历史都会影响沉降发展规律，在预测模型中难以全面考虑这些因素。稳定性分析同样充满不确定性——抗剪强度参数究竟选用总应力法还是有效应力法，不同规范给出的建议并不一致。渐近破坏过程中土体强度逐步发挥，传统极限平衡法假设所有点同时达到极限状态，这与实际情况不符。孔隙水压力分布受施工速率影响，快速加载与慢速加载的稳定性评价结果可能完全不同^[5]。

4 软土地基岩土工程勘察的质量保障措施

4.1 优化勘察方案设计与现场作业流程

勘察方案设计应当根据工程特点与场地条件量身定制。建筑物基础勘察关注承载力与沉降，勘探深度需到达压缩层底界；基坑工程则侧重稳定性与变形控制，勘探范围应覆盖可能的滑动面。勘探点布置不能机械套用规范最低要求，复杂场地应当加密布点。勘察阶段划分要清晰——可行性研究阶段侧重区域地质背景调查，初步设计阶段需获取主要地层参数，详细勘察阶段则要查明细部地质条件。现场作业流程

标准化能够减少人为失误，钻机就位后的水平校核、取样器使用前的检查、岩芯装箱时的编录都需按照规定程序执行。质检员随机抽查现场操作，发现违规行为立即纠正。恶劣天气条件下暂停作业，避免雨水进入钻孔污染土壤。

4.2 完善原位测试与室内试验的配套

体系原位测试与室内试验各有优势，合理搭配能够互补短板。静力触探提供连续剖面单参数间接，室内试验数据直接却受取样扰动影响，两者对比可以校验取样质量。十字板试验测得的原位强度与三轴试验结果存在系统差异，建立本地区经验关系式有助于参数转换。标准贯入试验在软土中贯入阻力很小，数据离散性大，但仍可作为地层划分的辅助手段。波速测试快速经济，用于初步判断土层软硬程度，异常值出现时再进行详细勘探。室内试验项目选择要有针对性——常规物理指标必测，力学参数根据设计需要确定，特殊土还需进行专项试验。平行样测试评估试验误差，结果偏差超出允许范围时重新取样。不同实验室间的比对试验能够发现系统偏差，促进测试水平提升。

4.3 建立基于多源数据的综合分析

评价方法单一勘察手段获取的信息总是片面的，多源数据融合能够还原地真实状况。地球物理勘探快速获取大范围浅部地层信息，但分辨率有限；钻探精确但点位稀疏；两者结合可以用物探圈定异常区域，再用钻探验证。遥感影像揭示地表水系分布，历史上的河道、池塘位置往往对应软弱土层富集区。地方志记载的海陆变迁过程帮助判断沉积环境，为考古资料中的古建筑基础处理方式提供传统经验参考。数值模拟技术能够检验勘察成果的合理性，用有限元模型预测变形，若计算值与监测数据吻合较好说明参数选取可靠。贝叶斯方法将先验知识与现场测试数据结合，逐步修正参数估计，减少不确定性。专家经验虽然难以量化，但在处理复杂情况时不可或缺，组织多学科会审能够避免重大判断失误。

4.4 构建全过程质量控制与成果验证机制

质量控制应当贯穿勘察全过程而非仅停留在成果审查环节。方案编制阶段组织技术论证，避免设计缺陷；现场作

业期间实行旁站监督，关键工序留存影像资料；在室内试验过程中双人复核，异常数据追溯原因；报告编写时多级审核，技术负责人、审核人、审定人层层把关。成果验证可以采用多种方式——补充勘探验证可疑部位，邻近工程资料对比，施工揭露地层与勘察结果对照，基础施工后的载荷试验检验承载力，沉降观测验证变形预测。建立勘察质量信息反馈机制，将设计、施工中发现的问题及时反馈给勘察单位，作为技术改进依据。勘察资料长期保存并建立数据库，对区域地质规律的认识需要长期积累。引入第三方检测增强公信力，特别是重大工程应当强制执行。质量责任终身制促使从业人员增强责任意识，勘察报告签字人对成果质量承担法律责任。

5 结语

软土地基勘察工作的复杂性源于土体本身的特殊性质与工程需求的多样性。技术难点的存在不应成为降低勘察质量的借口，反而需要更加严谨的态度与更加精细地操作。质量保障措施的落实依赖于管理制度完善与技术人员素质提升，单纯依靠某一环节的改进难以根本解决问题。勘察成果最终要接受工程实践检验，设计合理、施工顺利、使用安全才是衡量勘察质量的根本标准。随着新技术不断涌现，软土地基勘察手段将更加丰富，但基本原理与质量意识永远不能丢弃。

参考文献

- [1] 蔡海涛.软土地基岩土工程勘察探究[J].中国地名,2025(7):0199-0201.
- [2] 冯建新.探讨软土地基岩土工程勘察要点[J].中文科技期刊数据库(引文版)工程技术,2025(5):029-032.
- [3] 邵万强.基于软土地基的岩土工程勘察研究[J].中国地名,2025(9):0196-0198.
- [4] 张飞,霍伟大.湿陷性黄土地区岩土工程勘察与软土地基处理试验研究[J].中国新技术新产品,2024(1):91-93.
- [5] 张慧敏.软土地基岩土工程勘察与处理技术研究[J].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术,2024(12):066-069.

A physical bonding technology in which the cement interface is integrated with the original concrete structure

Zhiwu Dong

Jiangxi Qifu Waterproof Technology Co., Ltd., Pingxiang, Jiangxi, 337000, China

Abstract

Concrete, as the most widely used structural material in modern architecture, is commonly employed in infrastructure construction such as houses, Bridges, roads and ground hardening due to its high strength, durability and plasticity. However, during long-term use, due to factors such as temperature stress, load, foundation settlement and construction defects, concrete structures are prone to secondary damages such as cracks, freeze-thaw damage and alkali-aggregate reaction, leading to phenomena such as sanding, peeling and delamination, which seriously threaten the safety and durability of buildings and have become a long-term unsolved technical problem in engineering construction and operation management. In response to this issue, this study innovatively introduces the mortise and tenon structure principle of traditional Chinese wooden buildings and proposes a physical mortise and tenon technology that integrates the new cement mortar repair interface with the original concrete structure. This technology forms an integral force-bearing structure by uniformly constructing a mechanical interlocking system of trapezoidal mortise grooves on the concrete surface and the lightweight concrete layer, effectively overcoming the problems of interface separation, peeling, bubbling and delamination caused by the shrinkage difference between new and old materials. Experiments and engineering practices have shown that this process significantly enhances the shear resistance, peel resistance and long-term stability of the repair layer. After more than three years of tracking observation, there are no signs of recurrence at the repair interface, providing a reliable solution for the repair of concrete structure base surfaces.

Keywords

Engineering technology; engineering construction; building repair; concrete structure restoration

一种水泥界面与原混凝土结构融合为一体的物理卯固技术

董志武

江西启福防水科技有限公司, 中国 · 江西 萍乡 337000

摘要

混凝土作为现代建筑中应用最广泛的结构材料, 凭借其高强度、耐久性和可塑性, 被普遍用于房屋、桥梁、道路及地面硬化等基础设施建设。然而, 在长期使用过程中, 受温度应力、荷载作用、地基沉降及施工缺陷等因素影响, 混凝土结构易产生裂缝、冻融破坏、碱骨料反应等次生损伤, 导致起沙、起壳、分层等现象, 严重威胁建筑物的安全性与耐久性, 成为工程建设与运营管理中长期未解的技术难题。针对此问题, 本研究创新性地引入中国传统木构建筑榫卯结构的卯固原理, 提出一种新水泥砂浆修复界面与原混凝土结构融合为一体的物理卯固技术。该技术通过在混凝土表面均匀构建梯形卯槽与轻质混凝土层的机械咬合体系, 形成整体受力结构, 有效克服新旧材料因收缩差异导致的界面分离、起壳、鼓泡及分层问题。实验与工程实践表明, 该工艺显著提升修复层的抗剪切、抗剥离性能及长期稳定性, 经三年以上跟踪观测, 修复界面无复发迹象, 为混凝土结构基面修复提供了可靠解决方案。

关键词

工程技术; 工程施工; 建筑修缮; 混凝土结构修复

1 引言

随着我国城市化进程加速推进, 大量既有建筑进入维护周期, 结构老化与损伤问题日益凸显。其中, 混凝土基面起沙、起壳及结构分层现象尤为普遍, 不仅影响建筑美观与使用功能, 更直接削弱结构承载能力, 引发安全隐患。据统

计, 我国现有建筑中约 35% 的混凝土结构存在不同程度的界面损伤, 年均修复成本高达数百亿元, 而传统修复方法如单纯水泥砂浆覆盖或化学粘结剂加固, 因新旧材料物理性能差异 (如弹性模量、热膨胀系数不匹配), 在环境温度变化或荷载作用下易产生界面脱粘、鼓泡及分层, 导致修复效果短暂且反复维修率高。究其根源, 新水泥砂浆在硬化过程中体积收缩, 与原混凝土基体变形不同步, 界面处累积剪切应力与剥离力, 最终引发粘结失效。这一技术瓶颈严重制约了建筑维护与结构加固领域的可持续发展。

【作者简介】董志武 (1977-), 男, 中国江西萍乡人, 工程师, 从事建筑工程防水研究。

基于此,本研究突破传统思维局限,从中国传统木构建筑智慧中汲取灵感。榫卯结构历经千年验证,以几何嵌合实现无金属连接的牢固结合,具备优异的整体性、稳定性和抗震性能。本研究将这一原理创新性地转化为现代混凝土修复工程技术,通过构建物理卯固体系,使新旧材料形成机械咬合而非依赖化学粘结,从而实现界面永久性融合。该技术不仅解决了材料收缩差异导致的界面失效问题,更契合绿色建筑与可持续发展理念,为混凝土结构修复开辟了新路径。本文系统阐述技术原理、施工流程及工程验证,旨在推动该工艺标准化应用,提升基础设施耐久性。

2 形成因素与技术难点分析

混凝土界面损伤的形成机制复杂。首要因素为材料结构差异:新水泥砂浆在水化硬化过程中产生约0.1%~0.3%的体积收缩,而原混凝土基体因龄期较长已趋于稳定,两者热膨胀系数差异(砂浆约 $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$,混凝土约 $8 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)在温度循环下引发界面剪切应力。当环境温度变化 10°C 时,界面剪切应力可达0.5~1.2 MPa,远超传统粘结层的抗剪强度(通常0.3~0.8 MPa)。其次,荷载作用下地基不均匀沉降导致结构变形,界面处产生剥离力;冻融循环中水分渗入微裂缝,结冰膨胀产生9%体积增量,加速起壳与分层;碱骨料反应则因内部膨胀应力使表层疏松起沙。这些因素综合作用,使界面成为结构最薄弱环节。

技术难点集中于三方面:其一,新旧材料界面粘结强度难以长期维持。化学粘结剂(如环氧树脂)初期粘结力强,但易受紫外线、湿度影响而老化降解,5年内粘结强度衰减率达40%~60%。其二,修复层整体性不足。传统工艺中砂浆层与基层仅靠表面摩擦力结合,抗变形能力弱,在温度应力下易产生微裂缝并扩展为宏观分层。其三,施工可控性差。现场环境多变,砂浆配比、养护条件等微小偏差即可导致界面失效,质量验收缺乏量化标准。现有解决方案如增设锚栓或纤维增强,虽能部分提升性能,但锚栓易锈蚀引发二次损伤,纤维分散不均则影响均匀性,且均未从根本上解决材料收缩差异问题。因此,亟需一种能实现新旧材料协同变形、具备自锚固能力的创新工艺,以突破界面失效的技术瓶颈。

3 技术原理与设计思路

本技术核心在于将榫卯结构的“以形锁力”理念转化为混凝土修复的物理卯固机制。榫卯结构通过凸榫与凹卯的几何嵌合实现空间锁定,其稳定性源于精确的尺寸配合与变形协调能力,而非依赖外部粘结剂。本研究据此设计梯形卯槽-轻质混凝土咬合体系:在原混凝土基体表面开凿梯形凹槽(卯眼),新浇筑水泥砂浆层(模拟榫头)嵌入其中,形成机械互锁。该设计基于三大原理:

首先,几何嵌合增强界面抗剪切能力。梯形槽口窄底宽(口宽4 cm、底宽8 cm、深4 cm),使砂浆在硬化收缩时被槽壁“楔紧”,产生径向压力。根据库仑摩擦理论,界

面抗剪强度 τ 可表示为 $\tau = c + \sigma \tan \phi$,其中 c 为粘聚力, σ 为正应力, ϕ 为摩擦角。卯槽结构将 σ 提升至0.8~1.5 MPa(传统方法仅0.2~0.5 MPa), ϕ 值因粗糙表面增至 35° ~ 40° ,显著提高 τ 值。其次,变形协调机制。梯形槽的斜面设计允许新旧材料在温度变化时沿槽壁微滑移,吸收部分变形能量(力),避免应力集中。有限元分析显示,当温度变化 15°C 时,卯槽结构界面最大主应力降低62%,有效抑制裂缝萌生。最后,整体受力体系构建。通过均匀分布卯槽(间距 $60 \text{ cm} \times 60 \text{ cm}$),修复层与原结构形成空间网格状协同工作体系,荷载通过机械咬合传递至基层,避免局部剥离。

设计思路强调“物理卯固为主、化学辅助为辅”。卯槽密度经优化计算:密度过高削弱基层强度,过低则咬合力不足。基于断裂力学模型,设定60 cm间距可平衡应力分布与结构完整性。轻质混凝土层选用LC30级以上材料,掺入 0.9 kg/m^3 聚丙烯抗裂纤维及5%防水剂,降低自重同时提升韧性。金属网格板与双层玻纤网的引入,进一步强化修复层整体性,使咬合力从单纯界面扩展至三维空间。该设计摒弃了传统对化学粘结的依赖,转而利用材料自身几何特性实现永久融合,从根本上解决了界面失效问题。

4 施工流程详解

本工艺严格遵循标准化流程,确保施工精度与质量可控,具体步骤如下:

4.1 勘察定位与卯槽开凿

施工前对损伤区域进行无损检测(如超声波探伤),确定起沙、起壳范围及基层强度。以 $60 \text{ cm} \times 60 \text{ cm}$ 网格为基准,用激光测距仪精确定位卯槽中心点,墨线标出轮廓。采用金刚链式切割机开凿梯形凹槽,控制参数:长度20 cm、深度4 cm、底宽8 cm、口宽4 cm,槽壁倾斜角 15° 。开凿后高压水枪冲洗槽内浮尘,确保无松动颗粒,槽壁粗糙度 $R_a \geq 50 \mu\text{m}$ 以增强咬合。此步骤需严格监控,深度偏差 $\leq \pm 0.2 \text{ cm}$,否则影响咬合强度。

4.2 金属网格板安装与防腐处理

选用Q235镀锌网格板(丝径网孔 $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$)或304不锈钢网格板,按修复区域尺寸裁剪,搭接长度 $\geq 10 \text{ cm}$,搭接处点锚钉固定。网格板以M8膨胀锚钉(间距30 cm)锚固于基面,确保平整无翘曲。关键创新点在于:在每个卯槽正上方网格板位置,用角磨机开18 cm长、2 cm宽的矩形送料口,便于砂浆流入槽内。随后进行防腐处理:先喷涂环氧富锌底漆(锌含量80%,厚度 $75 \mu\text{m}$),表干后涂覆聚氨酯面漆(厚度 $75 \mu\text{m}$),总涂层 $\geq 150 \mu\text{m}$ 。

4.3 玻纤网铺设与界面强化

在网格板上方平铺两层耐碱玻纤网(网孔 $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$,单位面积质量 165 g/m^2),层间错缝 45° 以避免薄弱面。采用刮刀涂刮水泥基胶粘剂,用量 1.2 kg/m^2 ,确保玻

纤网完全浸润、无气泡。胶粘剂渗透至网格板及卯槽底部，形成过渡层，提升新旧材料界面相容性。此步骤需在防腐涂层表干后2小时内完成，防止污染。

4.4 水泥砂浆浇筑与养护

选用 LC30 轻质水泥修复料（425 标号水泥：砂：水=1:3.5:0.45），掺入 0.9 kg/m³ 聚丙烯纤维（长度 12 mm）及 5% 硅烷防水剂，搅拌至坍落度 60~80 mm。浇筑时从区域一侧斜向推进，优先填充卯槽：通过送料口注入砂浆，振动棒轻振确保槽内密实无空洞。修复层总厚度按场景不同控制在 2-5cm，表面收光后立即覆盖湿麻袋。养护是关键环节：前 3 天每 2 小时洒水保湿，4-7 天覆盖塑料薄膜，环境温度低于 5℃ 时采用电热毯保温。终凝后 7 天内禁止荷载，强度达设计值 90% 后方可验收。全程采用物联网传感器监测温湿度，确保养护达标。

质量控制要点：卯槽尺寸用塞规检测，合格率 ≥95%；砂浆坍落度每批次检测；修复层 28 天抗压强度 ≥20 MPa，拉拔强度 ≥1.5 MPa。该流程标准化程度高，单人日均施工面积达 15 m²，较传统方法效率提升 30%，且质量偏差率低于 5%。

5 技术优势分析

相较于传统修复方法（如纯砂浆覆盖、化学灌浆或纤维贴片），本工艺具备四大核心优势：

5.1 结构整体性显著增强

物理卯固机制使修复层与原结构形成刚性-柔性协同体系。梯形卯槽提供机械咬合力，界面抗剪强度提升至 1.8~2.5 MPa（传统方法仅 0.6~1.0 MPa）。在模拟地震荷载试验中，修复结构位移角达 1/50 时仍保持完整，无分层现象，而对照组在 1/80 时即发生界面剥离。金属网格板作为“骨架”，将局部应力分散至整个修复区域，抗裂强度提高 98%，有效抑制裂缝扩展。

5.2 变形适应能力卓越

卯槽斜面设计赋予结构“自适应”特性。温度循环测试（-20℃~60℃）显示，修复层与基层变形差值从传统方法的 0.15 mm/m 降至 0.04 mm/m，界面应力峰值降低 65%。修复材料层安装金属抗裂网格板后，极限拉应强度达到百分之百，可吸收地基沉降产生的微变形。工程实测表明，在年温差 30℃ 地区，修复层无温度裂缝产生。

5.3 施工可控性与经济性优化

工序高度标准化，各环节均有量化指标：卯槽定位误差 ≤±2 mm，砂浆坍落度波动范围 ±5 mm。施工质量通过数字化工具实时监控，验收一次合格率达 98%，减少返工

成本。材料成本仅增加 15%（主要源于网格板与玻纤网），但寿命延长至 50 年以上（传统方法平均 5~8 年），全生命周期成本降低 55%。

5.4 绿色环保与可持续性

摒弃有机溶剂型粘结剂，减少 VOC 排放 90% 以上。轻质混凝土降低自重 10%，减少资源消耗；金属网格板可回收利用，符合循环经济理念。经第三方检测，修复过程碳排放较传统工艺降低 25%，获绿色建筑认证支持。该技术响应“双碳”目标，推动行业向低碳化转型。

6 应用前景与展望

本技术已在多个工程场景成功试点，验证了广泛适用性。在某南方城市商业综合体地下车库（面积 1200 m²）应用中，针对严重起沙区域，采用本工艺修复后，经 3 年跟踪监测：修复层表面硬度提升至 65 Shore D（原基层仅 40），无起壳、分层现象；车辆荷载下挠度稳定在 0.5 mm 内，远优于规范限值。在北方某高速公路桥面（年温差 45℃）修复项目中，修复层经历 50 次冻融循环后，质量损失率仅 1.2%（传统方法达 4.5%），抗滑系数保持 0.7 以上。此外，在老旧小区屋顶天台、工业厂房地面硬化等场景中，均实现一次性修复达标，用户满意度达 100%。

未来发展方向明确：一是标准化推进，联合行业协会制定《混凝土结构物理卯固修复技术规程》，明确卯槽参数、材料配比等核心指标；二是模块化升级，开发预制卯槽模板与智能施工机器人，提升效率 30% 以上；三是功能拓展，结合自修复微胶囊技术，赋予修复层微裂缝自动愈合能力。预计 5 年内，该技术将在市政工程、交通基建及历史建筑保护领域规模化应用，市场潜力超百亿元。随着智能监测技术的融合，可构建“修复-监测-预警”一体化系统，实现混凝土结构全生命周期管理，为智慧城市基础设施维护提供关键技术支撑。

7 结语

本研究提出的基于榫卯原理的物理卯固技术，成功解决了混凝土基面结构修复中界面分离、起壳及分层等长期技术难题。通过构建梯形卯槽与修复层的机械咬合

参考文献

- [1] 吴思杉,田泽辉,王礼建,等.装配式混凝土建筑预制外墙接缝防水技术研究[J].四川建筑,2021,41(S1):141-143.
- [2] 张泉,孙媛.防水混凝土结构防渗漏施工技术[J].城市住宅,2021,28(8):255-256.
- [3] 王超.关于改善混凝土结构整体性能防水方法[J].大众标准化,2021(12):138-140.

Grouting construction technology in water conservancy project waterproofing treatment

Fangjing Shao

Chengdu Hydroelectricity Construction Engineering Co.,Ltd., ofSinohydro Bureau No.7 Company, Chengdu, Sichuan, 611130, China

Abstract

Seepage prevention directly impacts the safety and stability of water conservancy projects. Grouting construction technology plays a pivotal role in seepage prevention, serving as a critical technical application for structural integrity. This method involves injecting specialized materials into rock-soil cracks to effectively seal vulnerable areas, thereby enhancing the overall structural integrity of water conservancy projects. Building on theoretical analysis and engineering practice, this paper examines the application and related aspects of grouting technology in seepage prevention, aiming to provide valuable references for professionals in the industry.

Keywords

water conservancy engineering; seepage control treatment; grouting construction technology; principle; application

水利工程防渗处理中的灌浆施工技术

邵方敬

中国水利水电第七工程局成都水电建设工程有限公司，中国·四川 成都 611130

摘 要

防渗处理直接关乎水利工程的安全稳定，灌浆施工技术在防渗施工领域有着十分重要的地位，更是水利工程防渗处理至关重要的技术应用。灌浆施工技术在水利工程防渗处理中的应用主要借助于注入特定材料到岩土体裂缝里实现防渗薄弱区域有效填充，从而促使水利工程结构整体性增强。有鉴于此，本文基于理论分析与工程实践结合的方法，针对水利工程防渗处理过程中灌浆施工技术的应用及其相关进行了分析、探讨，希望能够给行业中相关从业人员工作开展提供一定参考。

关键词

水利工程；防渗处理；灌浆施工技术；原理；应用

1 引言

对于社会经济与民生保障而言，水利工程都是十分重要的基础设施。而在长期运行过程中，水利工程在水的渗透侵蚀作用下极易出现渗漏问题。一旦水利工程出现渗漏问题，不但会导致大量水资源浪费，而且会引发地基沉降、坝体失稳等严重问题，为水利工程的运行埋下严重安全隐患^[1]。灌浆施工技术在水利工程防渗处理中的应用主要是采用注浆的方式将高强度的浆液灌注到地层的裂缝、孔隙当中，待凝固之后形成防渗帷幕，实现止水防渗的目的。灌浆施工技术是当前水利工程防渗处理最为常见的重要技术。

2 灌浆施工技术的应用原理

在水利工程防渗处理中灌浆施工技术的应用主要是利用了气压、液压、电化学等原理通过将具备特定性能的浆液

灌注到岩石、孔隙、裂缝、土体等结构当中，进而获得对整体结构较好的防渗、加固效果。灌浆施工利用了帕斯卡定律，利用灌浆泵等压力设备，克服空隙、缝隙等阻力将浆液压注到结构当中，并均匀分布至目标区域。比如，在对水利工程坝基进行灌浆施工防渗，采用液压泵向浆液施加压力使其深入至坝基结构的细小裂缝当中，对孔隙、缝隙等进行填充，进而达到提高坝基结构密实性与防渗性能的效果。不同的施工需求与地质条件，在压力施加方式的选择方面有所差异。对于地基或者裂缝较浅的情况，需要的灌浆压力较小，可采用重力灌浆设备或者小型灌浆设备提供压力；若是地基深度较大或者缝隙的扩散范围较大，则需要选择压力较高的灌浆设备进行施工，确保浆液能够充分、全面注入。压注的浆液会和周边介质发生复杂的物理化学反应。比如，水泥浆液在缝隙中发生水化反应，生成氢氧化钙、水化硅酸钙等一系列水化物，随着时间推移逐渐凝结、硬化，与缝隙中的土体颗粒胶结形成稳定的整体，进而达到强化地基结构的效果。同时浆液的填充过程会将缝隙中的水分、空气等挤压排出，

【作者简介】邵方敬（1984-），男，中国四川广安人，高级工程师，本科，从事水利水电工程技术施工与管理研究。

形成密实结构,实现对地基的防渗处理。对于黏土等特殊地质,浆液和粘土矿物之间发生的化学反应还能达到强化土体稳定性与抗渗性的效果^[2]。除此之外,环氧树脂、聚氨酯等化学材料的使用还能得到粘结力、耐久性更好的结构,即便是在较为复杂的工况下也有着较好的适用性。

3 水利工程防渗处理常用的灌浆施工技术

3.1 循环式灌浆技术

循环式灌浆施工技术在水利工程防渗处理中的应用具备施工便捷、灌浆效果优异等特点,在实际应用中能够快速处理泥浆扩散问题,实现对裂缝、孔隙等的有效填充。这一技术的应用主要是利用射浆管将浆液准确地注入到预定的岩土体区域孔隙中,同时产生的回浆经过回浆管回收至搅拌装置进行处理,然后进行注浆的循环利用,如此很好地保证了浆液注浆的连续、稳定,同时提高了灌浆压力,孔隙等的填充更为充分,这也是循环式灌浆技术较之纯压力填充技术的填充效果好的主要原因。除此之外,循环式灌浆施工还能结合地质情况对浆液配比、灌浆压力等进行灵活调整,更好地满足工程施工的实际需求。

3.2 压力灌浆施工技术

压力灌浆施工技术在水利工程防渗处理中有着较为广泛的应用,主要是利用压力设备将预先配制的浆料压注到失稳的结构中,实现强化结构性能,提高抗渗效果的目的。低压灌浆与高压灌浆都是较为常用的两种压力灌浆施工技术,其中高压灌浆施工,主要是借助高压设备将浆液压注到混凝土、岩土等结构中进行防渗处理。在实际施工中需要按照实际工况的压力指标选择合适的高压注浆设备,并基于对注浆孔隙的全面分析合理地确定注浆顺序,确保浆料能够充分填充每一处缝隙,才能取得较好的防渗加固效果。低压注浆则是采用低压泵进行注浆,不具备机械施工条件的区域可采用手动注入的方式进行施工。相对来说,低压注浆施工的应用范围较小,主要应用于小规模施工或局部施工,但是具备施工灵活、便捷,施工成本低、施工工期短等优势,与其他灌浆施工技术联合应用,往往能够获得更好的综合效果。

3.3 高压喷射灌浆技术

高压喷射灌浆技术在水利工程防渗施工中也有着较为广泛的应用,且效果显著。这一技术的应用主要是利用了压缩空气产生的冲击力将预制浆液喷射到施工结构当中,实现对结构内部大部分缝隙的填充处理,达到防渗加固效果。浆液配置的有效性在较大程度上决定了喷射灌浆施工技术应用的效果,同时在施工中需要对喷射注入的有效性进行检查,并且在完成阶段性灌浆之后需要静置等待一段时间再对缝隙的填充情况进行检查,确保填充到位、全面。高压喷射灌浆技术的应用具备操作难度低、防渗效果显著、经济效益明显等优势。但是对设备及操作人员的专业性要求较高,主要适用于小体积的结构防渗处理^[3]。

4 水利工程防渗处理中灌浆施工技术应用的具体流程及质量控制措施

4.1 施工准备

在施工前需要做好全面的施工勘察,确保地勘报告、地形地貌信息、水文气象信息等收集详细、全面,准确把握施工现场的地质、岩石特性、地下水位等实际情况,奠定施工设计的坚实基础。组织人员进行施工设计文件的学习、熟悉,做好全面的技术交底,对灌浆施工目的、范围、技术要求等进行充分明确,确保施工人员准确熟知、掌握灌浆施工在材料、压力、浆液配比等方面的要求。然后进行施工场地清理,拆除所有阻碍施工的障碍物,做好施工现场的三通一平,做好临时工棚、仓库等设施的合理布置,以便于施工材料、设备等的存放。水泥、外加剂、掺合料等灌浆材料必须严格按照设计要求与质量标准进行采购,做好对材料的分类存放,以及做好设备、材料的防潮、防雨等保护措施。在灌浆施工设备的选择方面尤需注意符合施工类型、施工规模、施工工艺等要求,确保灌浆泵、搅拌机、钻机、空压机等设备性能可靠,并事先做好对设备的调试维护,确保安全可用。

4.2 钻孔施工

结合设计图纸对现场控制点进行合理确定,借助全站仪、水准仪等对灌浆孔位置进行精准测放,做好相应标志,并安排专人复核,严格控制孔位偏差。结合地质情况与设计要求对冲击钻进、回转钻进、跟管钻进等钻孔方法进行合理选择,并在钻进过程中将钻孔的垂直度、孔径等控制在合理偏差范围。通常需要结合对导向装置、定期测量钻孔倾斜度等方法应用来确保孔位偏差处于合理范围^[4]。钻进地层的不同在钻进速度、钻压、泥浆排量等的控制方面有着不同要求,需要结合实际情况进行合理调整,同时做好孔深、地层、钻进异常等信息的全面、准确记录,作为后续灌浆施工调整的重要依据。

4.3 冲洗和压水试验

钻孔结束后则需及时采用高压水冲洗、风水联合冲洗等方式将孔内的岩粉、泥屑等全面清除,以便浆液顺利灌入。在进行高压水冲洗时需要将冲洗管伸入到孔的底部,借助高压泵将清水注入孔内,将其中的杂质挤压、排出。然后采用风水联合冲洗的方式强化冲洗效果,直至冲洗的回水清澈方可停止。灌浆施工设计需要准确把握地层的渗透性,需要采用压水试验的方式来准确测定地层透水率。在进行压水试验之前需要采用栓塞的方式将钻孔进行合理分段,逐段进行压水试验。整个过程需要确保栓塞良好的密封效果,避免出现漏水现象。采用压水设备对孔内进行注水,对单位时间内注水量进行测量,注水压力保持稳定,详细记录各个时间段的注水量数据。

4.4 灌浆施工

浆液配合比需要以设计要求、压水试验结果为参考依据,结合地层、灌浆效果要求等合理确定,以充分满足各种

施工要求。按照配合比对施工原材料进行准确称量,按照先后料的顺序配置浆液。水量需一步到位,水泥、外加剂、掺合料等材料需要缓慢加入,且边加边搅拌,才能得到均匀的浆液材料。整个过程需要对浆液密度、浓度等性能指标进行定期检测,确保性能达标、稳定,禁止使用不符合要求的浆液进行施工。按照既定位置对灌浆泵、搅拌机、储浆桶等设备进行安装、连接、密封,确保不会出现漏浆现象。灌浆管路的安装需尽可能地确保距离短、线路直,确保浆液流动顺畅^[5]。并且需要将压力表、流量计等检测设备安装在管路的准确位置,对灌浆压力、流量变化等情况进行实时监测。结合实际工况与设计要求的纯压式、循环式等的关键方式进行合理选择。前者采用灌浆泵将浆液直接压入孔内,对于孔深浅、地层密实的情况的应用效果较好;后者施工过程中浆液在整个灌浆体系中循环流动,一边灌注、一边返回,浆液的均匀性以及灌注效果较好,在孔深大、地层渗透性强的缝隙防渗中应用效果较好。

4.5 封孔施工

完成灌浆施工之后需要严格按照设计要求做好封孔处理。选择流动性、凝固后强度较高、抗渗性能较好的材料进行封孔,如高强度的水泥砂浆、水泥浆等。结合实际情况合理选择封孔施工方法,对于施工规模、孔深、孔径较大的情况,可采用机械压浆的方式将封孔材料泵压进孔内,充满孔口停止施工;对于小规模、孔深孔径较小的情况,则采用人工压浆施工即可,利用压浆器具缓慢向孔内倒入封孔材料,充分振捣、充实。材料密实、内部无孔洞、无缝隙是封孔施工的标准要求。最后是做好孔口的平整处理,做好相应的保护措施,避免外力因素破坏封孔材料。

4.6 质量检查与验收

灌浆封孔结束之后需要进行施工质量检查与验收,

对漏浆、裂缝、隆起等问题进行全面排查,及时发现和整改问题。严格按照取样试验要求在灌浆区域进行钻孔取芯,对灌浆结石体的强度、完整性、胶结情况进行检查、评估。如,对样品进行抗压、抗渗试验,评估灌浆的物理效果达标情况。准确记录施工记录、检测报告,向建设单位提交验收申请。由建设单位、监理单位组织设计、施工、检验等多方按标准进行工程验收,针对验收过程中存在的问题提交施工单位整改,直至验收达标为止。然后各方就验收合格的事项签署验收意见,完善验收手续。

5 结语

综述可知,灌浆施工技术在水利工程防渗处理中有着十分重要的作用,是提高工程防渗效果,保障工程安全,延长水利工程使用寿命的重要技术保障。对此,相关单位需要结合水利工程渗漏问题的实际情况,选择合适的灌浆施工技术,加强人员的技术培训与现场管理,严格按照技术流程与要求进行施工,确保水利工程较好的防渗处理效果,为水利工程的安全、稳定运行提供保障。

参考文献

- [1] 赵腾.水利工程防渗处理中的灌浆施工技术分析[J].工程施工新技术, 2024, 3(16):134-136.DOI:10.37155/2811-0609-0316-45.
- [2] 韦明景,韦利华.水利工程防渗处理中灌浆施工技术探讨[J].中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术, 2023.
- [3] 王泽源.水利工程防渗处理中的灌浆施工技术分析[J].环球市场, 2022(1):166-168.
- [4] 阿拉法提·阿不都赛买提.水利工程防渗处理中的灌浆施工技术分析[J].安防科技, 2020(005):000.
- [5] 申准伟.水工隧洞灌浆基础防渗处理技术在水利工程中的应用价值探讨[J].中文科技期刊数据库(引文版)工程技术, 2024(003):000.

Pioneering an efficient and streamlined medical architecture model: a parking building, outpatient building, and inpatient building are vertically aligned on the third floor

Feng Lin

Guangxi University Design Institute Co., Ltd., Nanning, Guangxi, 530000, China

Abstract

This study proposes a “parking building + outpatient building + inpatient building” tripartite layout model to address congestion in hospital traffic systems and spatial overload. By integrating parking with outpatient services and aligning outpatient with inpatient departments, the approach achieves three key improvements: reducing patient movement routes by over 30% while ensuring optimal emergency response time; enhancing medical staff commuting efficiency and consultation accessibility; and optimizing material transportation. The model also reduces elevator usage by 40% and improves space utilization by 50%, effectively lowering operational costs. This innovative solution provides an efficient development framework for urban hospitals and specialized medical institutions in land-constrained areas.

Keywords

same-level layout; same-level juxtaposition; vehicle diagnosis and treatment; diagnosis and treatment

初探一种高效快捷的医疗建筑模式——停车楼 + 门诊楼 + 住院楼三楼并列组合

林峰

广西大学设计院有限公司, 中国·广西 南宁 530000

摘要

本文对于现代医院交通体系人流物流拥堵、空间过载等问题, 提出“停车楼 + 门诊楼 + 住院楼”三楼并列组合模式。通过停车与门诊同层布置、门诊与住院科室同层布置, 实现三重提升: 患者动线缩短30%以上, 急诊黄金抢救时间获保障; 医护通勤及会诊效率提升, 物资转运更便捷; 医院电梯压力锐减40%、空间利用率提升50%, 降低运营成本。该模式为土地紧张城市医院及专科性医院提供高效建设发展方向。

关键词

同层布置; 同层并置; 车诊同层; 诊疗同层

1 引言

针对当前医院人流、物流、医效、成本等问题, 提出采用停车楼、门诊楼、住院楼相应科室同层并置, 通过空间整合与流程优化, 实现了医疗效率、患者体验与管理成本的三重提升, 尤其在土地资源紧张的一二线城市, 垂直化、复合化的设计模式将成为未来医院建设的主流方向。

2 医院当前模式的弊病

现代医院多层、高层门诊、医技及住院楼的交通体系普遍存在以下问题: 医院的人流(患者、医护、探视者等)

与物流(药品、器械、医疗垃圾、餐食等)均从一层、负一层进出, 从而导致流线交叉拥堵、物流污染风险、空间负荷过载、应急安全隐患等四大结症。

2.1 人流流线混乱

交叉拥堵导致就医效率低下, 特殊群体体验差。急诊动线受阻, 延误黄金救治时间, 普通患者动线绕路, 就医时间增加, 医护通勤受干扰, 工作效率下降。

2.2 物流交叉污染

打破洁净与污染的隔离规范, 引发感染风险。洁净物流被污染, 影响诊疗安全, 污染物流扩散, 威胁公共健康, 物流效率低下, 延误诊疗物资供应。

2.3 空间负荷过载

两层功能饱和, 运营管理难度剧增。一层大厅功能挤兑, 候诊体验差, 负一层车库人车混流, 安全隐患多, 电梯资源

【作者简介】林峰(1966–), 男, 壮族, 中国广西南宁, 本科, 建筑师, 从事建筑学研究。

紧张，跨楼层转运效率低。

2.4 应急安全隐患

疏散通道单一，突发情况难以应对。火灾疏散在这两层出入口形成拥堵，易发生踩踏，突发公共卫生事件，无法快速隔离，设备故障应急物资无法快速送达。

3 提出解决方案——车诊同层

其实医院人流、物流均从一层、负一层进出的本质问题，是打破了医院“人流与物流分离、洁净与污染分离、普通与应急分离”的三大运营原则，导致效率低、风险高、管理乱。解决该问题的方向是分层分流，由此产生了停车库与门诊楼相应科室“同层布置”的设计理念。

停车库与门诊相应科室“同层布置”。即某楼层同时包含停车区域与对应门诊科室，或停车库某层通过专用通道与门诊同层直接连通，其核心优势围绕缩短停车到就诊全流程距离，降低患者尤其是行动不便者的就医门槛、缓解医院交通拥堵展开，具体可从患者体验、医护效率、医院运营管理三个维度深入剖析：

3.1 对于患者，实现停车即就诊的高效衔接

驾车就医的患者及陪同家属的核心痛点是停车难、找路难，找到车位后需从停车库到电梯再到门诊楼层的反复绕路，尤其对行动不便的老年患者、残疾人、术后复查患者或携带大件物品如轮椅、婴儿车、行李的人群，这段路程会大幅增加就医负担。同层布置直接解决这一问题，具体优势如下：

3.1.1 缩短停车到就诊的动线

减少体力消耗与时间成本，避免跨层跨区奔波。传统布局中，停车库多集中在地下1-2层或门诊楼外独立区域，患者停车后需找车库电梯、乘电梯到门诊对应楼层、穿过候诊区找到诊室，全程耗时10-20分钟，且需记忆走过的路线以防迷路。而同层布置下，患者在对应楼层停车后，如眼科门诊在7层，7层车库直接连通眼科候诊区，步行20米内即可到达诊室，无需乘坐电梯或绕路。另外，在停车楼入口和各楼层设置导视系统，引导患者驾车直接前往目标科室所在楼层停车，可节省30%以上找车位、找科室的双重时间。

3.1.2 降低行动不便者的就医风险

患者在车库与门诊间往返时，需经过车库坡道、电梯口、走廊拐角等易滑、易磕碰区域，同层布置可有效避免这些环节，减少摔倒、磕碰隐患，提升安全性。此外，对于急诊患者快速就医的优势更突显，同层布置可实现停车即急诊，为争取黄金抢救时间提供硬件支持。

3.1.3 优化陪同家属体验，减少停车焦虑

驾车就医的患者中，约50%有家属陪同，家属找车位耗时久，担心患者独自等候。同层布置可让家属快速找到对应科室楼层的停车位，停车后立即陪同患者就诊，无需因找车位让患者独自长时等待，减少心理负担。

3.2 对医护人员，可缩短通勤动线，提升工作效率

传统停车库需经过停车到乘电梯再到科室，早高峰易因找车位、电梯拥堵耽误上班时间，同层布置可优化医护通勤流程，具体优势如下：

3.2.1 节省通勤时间，避免早高峰延误

门诊医护人员尤其是驾车上班的门诊医生、护士，可直接将车停在对应科室所在楼层的医护专用停车区，然后通过专用医护通道直接进入科室，无需绕行患者候诊区或等待公共电梯，平均可缩短10分钟到岗时间，迟到率下降60%。

3.2.2 便利物资转运，减少科室后勤负担

门诊科室日常所需物资如药品、医疗器械、办公用品等，传统模式下需从医院后勤仓库进入地下车库再经电梯到达科室，环节多、耗时长。同层布置后，物资运输车可直接停在科室对应楼层的停车库，通过同层专用通道将物资运至科室库房，无需跨层搬运。

3.3 对医院管理，可分散交通压力，优化空间与资源配置

从医院整体运营角度，停车库与门诊同层布置可解决集中于首层、地下停车库的人流拥堵、空间浪费问题，提升管理效率，具体优势如下：

3.3.1 分散人流、车流，缓解电梯与大厅拥堵

传统地下停车库是人流集中点，所有驾车患者需从地下车库乘电梯到门诊各楼层，导致早高峰（8:00-10:00）地下电梯口排队长度达20-40人，等待时间超过5分钟，同时首层门诊大厅入口因人流集中非常拥堵。同层布置让车流、人流按科室分层分散，患者无需集中到地下车库或首层门诊大厅，电梯压力锐减40%以上，门诊大厅拥堵率显著下降50%。

3.3.2 优化空间利用，降低土地与建设成本

城市中心医院的土地资源稀缺，传统模式需单独建设大型地下停车库，占地面积大、建设成本高。同层布置可利用门诊楼高层或裙楼相邻的空间建造高层停车库，无需额外占用地面或地下土地，节省土购置与地下车库建设成本，一般地下车库建设成本约为地面同层车库的2-3倍。

3.3.3 对于物流同层分流替代跨层交叉，保障洁净与安全

医院物流需严格遵循洁净物流（药品、无菌器械）与污染物流（医疗垃圾、感染废物）不交叉的原则，同层布置通过水平分区实现三类物流的独立转运，从空间上阻断污染传播，同时提升配送效率。

3.4 同层布置的核心逻辑

即驾车就医动线的零距离，停车库与门诊相应科室同层布置，本质是医院从以建筑功能为中心向以患者体验为中心的空间规划转型，其优势并非单纯停车方便，而是通过“停车-就诊”的同层衔接解决驾车患者的核心痛点——距离远、

耗时长、风险高，同时为医护提供便捷通勤、为医院缓解运营压力。这种布局尤其适合城市中心、驾车就医比例高、土地资源紧张的医院，以及行动不便患者集中的科室，是现代医院提升就医便利性的重要创新方向。

4 提出进一步的解决方案——诊疗同层

与“车诊同层”理念相似的“诊疗同层”也是提升医疗效率的另一方向。

门诊楼与对应科室住院楼同层布置，即某科室的门诊区与该科室的住院病区位于同一楼层，或通过同层连廊、专用通道直接连通，是医院空间规划中诊疗一体化理念的重要体现。这种布局模式的核心优势，在于缩短患者从门诊诊断到住院治疗全流程中的动线距离，优化医护协作效率，降低医疗运营成本，具体从患者、医护、医院管理三个层面展开分析：

4.1 对于患者，减少由门诊到住院衔接的奔波，提升就医体验

患者从门诊就诊到确诊住院的过程中，常需往返于门诊楼与住院楼之间，如办理住院手续、转运检查、术前评估等，同层布置能最大程度简化这一流程，尤其利好行动不便、病情复杂的患者

4.1.1 缩短从门诊到住院的转运距离

降低体力消耗与风险，避免跨楼、跨层奔波。若门诊与住院楼分离，患者需从门诊楼出院、步行至住院楼、再乘电梯到对应专科楼层，全程可能耗时 15-30 分钟，且需携带病历、检查报告、个人物品，对行动不便者极为不便。^[1]同层布置下，患者在门诊确诊后，可由医护人员通过同层专用通道，如门诊诊室无缝对接同层住院护士站直接转运至病房，无需走出楼层，步行距离缩短至 50 米内，大幅减少体力消耗。再者可降低转运风险，对病情危重的患者，如急性心衰、术后观察患者，门诊与住院同层可避免转运途中病情突发的风险，如患者在门诊复查突发病危，可立即通过同层通道将其送至住院病区抢救，无需等待救护车或跨楼转运，为急救争取宝贵时间。

4.1.2 简化住院前检查、评估流程，减少重复排队

患者住院前常需完成术前检查、病情评估，同层布置可实现检查、评估、住院的同层闭环，缩短住院等待时间。

4.1.3 提升门诊随访、术后复查的便利性

出院患者需定期返回门诊复查，如肿瘤患者术后化疗复查、骨科患者术后康复评估等，同层布置让复查、住院衔接更顺畅；若患者复查需再次住院，可在同层门诊完成评估后，直接通过专用通道进入住院病区，无需重新办理跨楼登记、转运手续。

4.2 对于医护人员，优化门诊与住院的协作效率，减少沟通障碍

门诊医生与住院医生需频繁交接患者病情、参与会诊、

随访反馈等，同层布置能打破门诊与住院的空间壁垒，让医护协作更直接、高效。

4.2.1 实现病情无缝交接，减少信息误差

门诊医生接诊后，判断患者若需住院，可直接步行至同层住院病区，与住院医生面对面交流病情，同时同步病历、检查报告、诊疗方案，避免电话、微信传递信息时产生的遗漏或误解；住院患者需门诊专家会诊时，门诊专家可通过同层通道直接到病房查房，无需提前预约、跨楼奔波，会诊效率提升 50% 以上。

4.2.2 共享同层医技资源，降低设备重复投入

门诊与住院同层布置时，可共享该楼层的专科医技设备，避免门诊买一套、住院再购置一套的重复投入。门诊患者与住院患者共用同层检查、治疗设备，查诊结果同步至住院病历系统，医护可实时查看，既节省设备成本，又提升查治效率。

4.2.3 简化术后 - 出院指导流程，提升患者依从性

住院患者出院前，需门诊医护进行出院后护理指导，同层布置让指导更便捷，避免患者出院后再单独来门诊挂号咨询，或患者对指导有疑问，可直接返回同层住院病区找医护确认，减少电话咨询不清的问题，提升患者对出院后护理的依从性。^[2]

4.3 对医院管理，可降低运营成本，优化资源配置

从医院整体运营角度，门诊与住院同层布置能减少跨楼转运、设备重复、人力协调带来的隐性成本，提升空间与资源的利用效率。

4.3.1 降低患者转运的人力与物力成本

若门诊与住院楼分离，医院需配备专门的转运人员如护工、转运设备如轮椅、平床，负责接送患者跨楼；同层布置则可减少转运人员数量，同时无需频繁在电梯、楼道间移动，从而降低平床、轮椅的损耗折旧，转运时间缩短 15 分钟，人员成本降低 30%。

4.3.2 便于专业科室统一管理，提升服务质量

同层布置让某一专业科室的门诊、住院、医技、辅助功能集中在同一楼层，形成专科诊疗单元，便于统一协调排班、制定诊疗标准。对急诊与应急，同层快速响应替代跨层延误，争取了黄金救治窗口。

4.3.3 突发公共卫生事件，可快速实现同层隔离阻断感染

因各科室以器官系统为划分原则，污染区域相对独立分区，若发生传染病可将某楼层设为“感染专科单元”，与其他楼层物理隔离，感染患者从该楼层停车区进入后，全程在同层诊疗，避免跨楼层扩散；医疗垃圾、感染废物等污染物也在该楼层同层转运，进一步阻断病毒传播路径。

4.4 诊疗同层的核心逻辑

即诊疗流程零距离无缝衔接，门诊楼与对应科室住院楼同层布置，本质是通过空间布局的优化，^[3]将门诊诊断、

住院治疗、术后随访全流程压缩在同一楼层，这种布局尤其适合专科性强、门诊、住院衔接频繁的科室、如外科、心内科、肿瘤科、妇产科等，是现代医院从功能分区向诊疗一体化转型的重要方向。

5 结语

综上所述，停车楼、门诊楼、住院楼相应科室同层并置，三栋楼水平并列、连通融合，通过空间整合与流程优化，形成“停车-门诊-住院”平面一体化专科诊疗单元，这种竖

向水平化、复合化的设计模式将成为未来智慧型医院建设发展的主流方向和新模式。

参考文献

- [1] 医院建筑施工管理及绿色建筑施工管理问题探讨[J]. 郑炎. 中国建筑装饰装修, 2022(02)
- [2] 既有医疗建筑绿色改造过程中装配式装修技术应用研究. 姜洪祥. 工程建设与设计, 2025(08)
- [3] 绿色建筑设计方法在医疗建筑中的应用分析[J]. 郭鑫. 工程建设与设计, 2022(20)

Planning and architectural design of high tech Industrial Park

Yang Yang Bin Song Zhiyuan Hao

China Wuzhou Engineering Design Group Co., Ltd., Beijing, 100053, China

Abstract

Actively fulfilling the requirements of sustainable development and addressing climate change, developing modern ecological industrial parks is an effective way to achieve harmonious economic and environmental development. This article mainly elaborates on the theoretical basis and planning and design principles of modern ecological industrial park planning and design. Firstly, the theoretical basis of circular economy and industrial ecology in ecological industrial parks is introduced. Then, the principles of overall, circular, diverse, and sustainable planning and design for industrial park planning are elaborated, providing theoretical basis and basis for its planning and construction, enabling it to play a greater role in resource utilization, environmental protection, and competitiveness enhancement, and promoting sustainable regional economic development.

Keywords

Modern Ecological Industrial Park; Theoretical foundation; Principles of Planning and Design

现代生态产业园理论与规划设计原则探讨

杨洋 宋玢 郝志远

中国五洲工程设计集团有限公司, 中国·北京 100053

摘要

积极履行可持续发展与应对气候变化要求, 发展现代生态产业园是实现经济与环境和谐发展的有效途径。本文主要从论述现代生态产业园规划设计的理论依据与规划设计原则两个方面进行阐述。首先介绍生态产业园的循环经济、产业生态学理论基础, 之后对产业园规划的整体性、循环性、多样性、持续性的规划设计原则进行阐述, 为其规划建设提供理论基础与依据, 使其在资源利用、环境保护、竞争力提升方面发挥更大作用, 促进地区经济可持续发展。

关键词

现代生态产业园; 理论基础; 规划设计原则

1 引言

随着工业化程度的不断加深, 传统工业发展也带来了一定的负面影响, 如消耗大量资源、造成环境质量下降等。随着全球可持续发展理念的兴起和“双碳”目标不断推进, 现代生态产业园开始成为解决传统工业企业发展问题的重要路径。与传统工业园区不同, 现代生态产业园以绿色、环保为导向, 通过循环经济模式、数字技术和先进管理手段构建产业协同、循环发展、环境友好的产业生态系统, 是一种有利于区域经济高质量发展的产业升级和模式创新。

2 现代生态产业园理论基础

2.1 循环经济理论

循环经济理念是以“减量化、再利用、资源化”3R为指导思想的, 是现代生态工业园区的理论基础。所谓循环经济, 就是企业应通过高科技手段减少原材料用量和废物产生, 如优化制造工艺流程, 可减少原材料的用量; 再利用就是产品或部件再利用, 如办公室用品经维修翻新后对外出租; 资源化就是废物回收再利用, 如废旧报纸、生活垃圾等。它可降低企业成本, 减少环境污染, 构建循环网络, 提升生态工业园区的可持续性^[1]。

2.2 产业生态学理论

产业生态学将工业系统比拟为自然生态系统, 基于物质流、能量流、信息流配置产业布局并实现产业耦合, 布局空间相近、资源需求相似、废弃物类型相似的企业, 例如化学工业企业共享一个污水处理厂; 产业耦合通过资源关联企业构建产业生态链, 例如钢铁炉渣供给建材企业、热电厂余

【作者简介】杨洋(1987-), 女, 中国陕西铜川人, 本科, 工程师, 从事产业园区规划, 军工安全布局, 技术质量管理研究。

热用于供暖；通过共生共存，提升资源利用效率与环境生态效益。



图1 循环经济理念

2.3 可持续发展理论

可持续发展贯穿于园区发展整个生命周期，寻求经济、社会、环境协调发展。在经济发展上，发展绿色产业、高新技术产业，推动结构优化；在社会发展上，关爱职工、联动社区、促进就业、维系和谐；在环境发展上，严控污染排放、发展新能源、推广绿色建筑。只有坚持这一导向，园区才能实现可持续发展，人才能获得全面发展^[2]。

3 现代生态产业园规划设计原则

3.1 整体性原则

整体性原则就是从园区整体出发，综合考虑各方面因素，建立相互支撑、稳定的生态系统。具体落实到功能布局上，就是形成生产区、生活区和生态区，并将三者有效衔接，形成和谐的生态肌理。生产区即以产业为功能划分，按流程差异布局生产区域，形成较高的生产效率；生活区建设基础设施和公共服务系统，方便居民生活；生态区建设足量绿地、湿地，发挥生态平衡功能，各区通过交通和生态廊道相连接，形成互补。如生产区以交通线为轴线布局，方便物流运输；生活区靠近生产区，并配套学校、商超等；生态廊道连接绿带、河道等，一方面发挥生态平衡作用，另一方面形成休憩游憩空间。另外，园区要与周边环境融为一体，从建筑风格、产业布局等方面与周边生态环境、城市建设有机结合，避免对周边环境造成噪音干扰，形成产业合力，带动区域经济整体发展。

3.2 循环性原则

循环性原则就是高效利用资源，降低资源消耗与环境污染，建立物质、能量、信息、价值等循环利用系统，形成产业耦合与资源循环利用模式，减少垃圾污染。从物质循环利用来看，在企业之间建立废弃物交换平台与生态产业链条，如：造纸企业提供废弃纸张作为包装企业的原料，包装边角废料则回收用于造纸。从能量循环利用来看，加强能源综合利用，推广清洁能源，如热电厂提供热能，其余热供应周边企业；发展太阳能和风能，降低对化石能源的消耗，减少碳排放。从信息流循环利用来看，在企业之间建立信息流

平台，加强技术、市场、环境等信息沟通，通过协作协同提升资源利用效率与经济运行效能，降低污染排放，提升园区持续发展能力和水平^[3]。

3.3 多样性原则

多样性原则即生物多样性、产业结构多样性、功能多样性等，是保证园区稳定发展的重要措施。生物多样性方面，注重本地物种保护，通过绿地、湿地、生态廊道构建适生环境，提升生物数量和质量，既改善环境、增强生态稳定性，也对调节气候、净化空气等具有重要价值。产业结构多样性方面，避免产业单一化，发展多元产业，形成相互补充的产业结构。例如，以工业为主体，发展服务业、研发、物流等配套产业，提升经济韧性、增强应对风险能力。功能多样性方面，兼顾生产、生活、休闲和科教等功能，建设生活空间、休闲空间及科研院所等，增强吸引力和竞争力，形成稳定且富有生机活力的发展局面。

3.4 持续性原则

持续性是指以未来发展为导向，立足当下、放眼长远，实现经济与环境良性循环发展。在节约高效方面，通过先进技术提高资源利用率，倡导使用节水型设备，优化土地利用，提高土地利用率、优化用地结构等，保证资源永续利用；在环保方面，建立长期监测制度、严格环保标准、加大环保设施投入，建设污水处理厂、垃圾处理厂等，确保污染物达标排放与生态环境稳定；在发展方面，选择具有发展前景的产业、项目，扶持企业技术进步与产品创新，支持节能环保及新能源技术的开发与应用，推动绿色化发展；同时建立长效运营管理模式，保障长期持续发展，为未来发展预留空间，实现代际公平与持续发展^[4]。

4 现代生态产业园规划设计中的关键要素

4.1 产业选择与布局

产业选择与布局是现代生态产业园规划设计工作的基础和前提，在产业选择上，要优先选择国家产业政策扶持、能源利用效率高、污染物少、产业附加值高的产业。依据当地资源禀赋、产业基础和发展需要，确定园区主导产业与配套产业，如太阳能资源丰富地区，应优先选择太阳能光伏产业，并配套研发、生产、销售和服务产业。同时，要注重产业的关联性、协同性和产业生态链打造，如一个以新能源汽车产业为主导的生态产业园，可配套引进电池生产企业、电机生产厂家、零配件生产企业等，形成从原料供应、配件生产到新能源汽车组装一条龙生产的生态产业链，实现产业共生共赢；布局上要根据各类产业的自身特点与要求，合理划分功能区。将污染大、对环境要求低的产业布局于远离生活区、生态保护区的区域，并配套区域内环保设施；将研发、办公、商业等布局于交通便利、环境优良的区域，便于人才交流和业务活动；注重功能区交通联系和物流运输，节约运输成本与时间。如通过内部道路网和物流通道的建设，便于

在园区内运输原料和产品。

4.2 基础设施建设

完善的基础设施是现代生态产业园运行发展的保证,其中,基础设施的建设要注意以下几点。首先是交通建设。园区应具备对外交通便利和内部交通通畅的条件,对外交通靠近高速公路、铁路、机场等交通枢纽,方便运输原材料和产品。内部交通道路网规划合理,人车分流,交通更安全、更通畅。建设交通设施,如停车场、充电桩等,满足园区内车辆停放、充电需求。其次是能源供应设施建设。园区应拥有稳定的能源供应,能源以清洁能源、可再生能源为主。如:建设太阳能电站、风电电站、生物质能电站等,为园区提供电能;建设集中供冷供热设施,提高能源利用率,减少能源浪费。再次是建设水利用和污水处理设施。园区提高水资源利用率,加强节水降耗技术设备的投入。提高水的重复利用率,建立污水处理厂,对园区内的污水进行集中处理,经处理达标后排放或回用;加强通讯、网络、消防、安防等设施建设,为园区的发展提供全面服务,提高园区的运行效率^[5]。

4.3 生态环境保护与修复

生态环境保护与修复,是现代生态产业园规划设计的重要内容,园区规划时,应尽量保护园区原有自然生态环境,减少破坏;对于已遭到破坏的生态环境,尽快进行修复补救。一是保护与培育园区植被。通过植树造林、种植花草绿化园区,提升园区内绿地面积与植被覆盖率。绿地不仅美化园区,还具有调节气候、净化空气、减少噪音等生态功效。二是保护与修复园区的水体生态。对于园区河流、湖泊等水体,加强水质监控与治理,防止水体污染。通过人工湿地、生态湖岸等措施,进行水体生态环境治理,提升水体的自净能力。三是保护与修复园区的土壤。防止土壤污染和水土流失,通过生态农业和有机农业,对园区土壤进行保护与修复,恢复土壤肥力与生态功能。此外,还需要保护园区的生物多样性,设立生物多样性保护区,为野生动植物提供适宜的栖息地。通过保护和治理生态环境,现代生态产业园可以实现产业经济发展和生态环境保护的平衡。

4.4 智慧化管理系统

在信息技术快速发展下,智慧化管理系统在当前生态产业园中应用越来越广泛,能够提高园区管理运行水平,实现园区资源优化配置,促进园区的可持续发展。智慧化管理

系统主要有以下几种。一是智能监测系统,通过在园区内设置传感器、摄像头等对园内的环境质量、能源消耗、交通流量、企业生产等进行实时监测,为园区的管理决策提供数据支持。例如:在园区内设置环境监测传感器对园内的污染情况、水质条件等进行监测,当园区内出现异常时,发出预警信息。二是智能能源管理系统,通过对园区内能源生产、传输、消耗等进行实时监测,实现园区能源优化配置及高效利用。例如:根据不同时段园内不同区域对能源的需求,调节能源供应量,降低能源消耗成本。三是智能交通管理系统。通过对园区交通流量的实时监测、分析,优化调整交通信号、引导车辆行驶、优化交通流量,减轻交通拥堵。还有智能物流管理系统、智能安防管理系统等。通过智慧化管理系统的建设,可以实现现代生态产业园的智能化、精细化管理与发展,提升园区竞争力和可持续发展能力。

5 结语

现代生态产业园是绿色发展的载体,研究园区理论和规划设计原则对绿色发展具有深远的意义。循环经济理论、产业生态学理论、可持续发展理论是园区的理论支撑,是绿色发展的重要科学方向,整体性原则、循环性原则、多样性原则、持续性原则是园区的具体设计原则,是构建经济与环境协同发展的核心原则。目前园区建设存在产业协调度不高、技术水平不足等问题,应加强理论与实践相结合,注重政策引导与技术指导,加快实现园区资源循环化、产业化、生态化进程,使园区成为区域发展的绿引擎和可持续发展示范区,为全球绿色可持续发展提供新思路。

参考文献

- [1] 武明月.基于自组织理论的金盆山梅花生态产业园规划研究[D].安徽农业大学,2020.
- [2] 潘冬,李丹妮,周婷.产城融合视角下生态产业园发展困境及规划对策研究——以眉县经济技术开发区为例[J].建筑与文化,2023,(06):111-114.
- [3] 邓玉婷,左婵,肖国增,等.智慧农业理念下荆州观音垱生态产业园规划设计[J].山西建筑,2022,48(03):1-5.
- [4] 杨富钧,付林江,杨长焕,等.天柱县瓮洞镇油茶生态产业园规划研究[J].乡村科技,2021,12(12):24-26.
- [5] 陈飞飞.循环共生理念下的生态产业园规划设计与评价研究[D].兰州理工大学,2020.

Optimization strategy of interior decoration construction materials under the “double carbon” target

Xiaoming Liao

Guangdong HenSam Construction Engineering Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong, 518000, China

Abstract

As global climate change intensifies, China has set the strategic goals of “peaking carbon emissions by 2030 and achieving carbon neutrality by 2060,” charting a low-carbon development path for industries. This study investigates material optimization for interior decoration in green buildings under the “dual carbon” objectives. It interprets the “dual carbon” goals and green building principles, analyzes their impacts on sustainable construction, and examines material classifications, current applications, challenges, and lifecycle carbon emissions. The paper proposes four optimization strategies: material selection refinement, performance enhancement, innovative R&D, and circular utilization. These multidimensional measures aim to reduce material-related carbon emissions, promote high-quality development of green buildings under the “dual carbon” goals, and provide actionable references for the construction industry’s low-carbon transition.

Keywords

“dual carbon”; green building; interior decoration; material optimization

“双碳”目标下绿色建筑室内装饰施工材料优化策略

廖晓明

广东鑫森建设工程有限公司, 中国·广东深圳 518000

摘要

当前,全球气候变暖问题日益严峻,我国提出“2030年前碳达峰2060年前碳中和”的战略目标,为各行业发展指明低碳方向。本文围绕“双碳”目标下绿色建筑室内装饰施工材料优化展开研究。解读“双碳”目标与绿色建筑内涵,分析“双碳”对绿色建筑的影响。剖析绿色建筑室内装饰施工材料的分类、应用现状与问题,以及全生命周期碳排放情况。从材料选择优化、性能提升、创新研发、循环利用四方面提出优化策略,旨在通过多维度举措降低材料碳排放,推动绿色建筑在“双碳”目标下实现高质量发展,为建筑行业低碳转型提供参考。

关键词

“双碳”; 绿色建筑; 室内装饰; 材料优化

1 引言

建筑行业属于高耗能的领域范畴,在落实“双碳”目标这件事情上起着关键作用,绿色建筑作为建筑行业实现转型的核心方向,其室内装饰施工材料朝着低碳化发展显得极为关键。但当下绿色装饰材料存在着区域应用不均衡、成本较高以及监管出现漏洞等一系列问题,并且在全生命周期碳排放管控方面存在不足。基于此,剖析“双碳”目标之下绿色建筑室内装饰施工材料的优化策略,对于推动绿色建筑的发展以及帮助“双碳”目标的实现有着关键的现实意义。

2 “双碳”目标与绿色建筑概述

2.1 “双碳”目标解读

“双碳”目标涉及碳达峰以及碳中和,是我国依据全球气候治理责任和可持续发展需求而作出的战略部署。碳达峰意味着特定区域或者行业的二氧化碳排放量达到峰值之后会逐渐下降。碳中和是借助减排、固碳等方式实现二氧化碳净零排放。2020年我国明确了“2030年前碳达峰、2060年前碳中和”的目标,这是应对全球气候变暖的必然选择,也是推动产业结构升级以及能源体系转型的关键契机,为各个行业的发展确定了低碳方向,其中高耗能的建筑行业成为落实“双碳”目标的关键领域^[1]。

2.2 绿色建筑内涵

绿色建筑并非仅追求“绿色外观”,而是将全生命周期理念作为核心,实现一种环境友好、资源高效且健康舒适的建筑模式。它的核心内涵包含节能、节水、节材、环保这

【作者简介】廖晓明(1992-),男,中国广东深圳人,本科,从事建筑装饰施工研究。

四大维度。在设计阶段要考虑对自然采光通风进行优化；施工阶段需着重选用低污染材料并减少建筑垃圾产生量；在运营阶段强调能源梯级利用以及水资源循环利用，要保障室内空气质量和空间舒适度。和传统建筑相比较，绿色建筑更看重“全链条低碳”，能减少建造与使用过程中的碳排放，还可为使用者提供健康宜居的环境，是“双碳”目标下建筑行业转型的核心方向。

2.3 “双碳”目标对绿色建筑的影响

“双碳”目标为绿色建筑发展提供了强制性动力，促

使其从“自愿性选择”转变为“刚性需求”。一方面，“双碳”目标促使绿色建筑标准升级，如我国《绿色建筑评价标准》增添了“低碳性能”指标，将建筑全生命周期碳排放核算纳入评价体系^[2]。另一方面，“双碳”目标加快绿色建筑技术创新，使光伏建筑一体化、超低能耗围护结构、再生建材应用等技术从实验室迈向实际工程。“双碳”目标还带动绿色建筑产业链重构，推动建材生产、施工建造、运营管理等环节朝着低碳化转型，形成“设计—建造—运营”全链条低碳发展格局，扩大绿色建筑的市场规模与应用范围。

表 1 影响分析

推动维度	具体表现	实例 / 成果
发展定位转变	绿建从“自愿选择”转“刚性需求”	-
标准体系升级	完善绿建标准，纳入全周期碳核算	《绿建评价标准》增低碳指标
核心技术创新	低碳技术落地工程	光伏建筑一体化等应用
产业链结构重构	全环节低碳化，形成全链条格局	建“设计—建造—运营”模式

3 绿色建筑室内装饰施工材料现状分析

3.1 常用室内装饰施工材料分类

当下绿色建筑室内装饰施工材料主要可划分为四大类别。其一为墙面装饰材料，如环保型乳胶漆、天然硅藻泥、再生石膏板等都属于此类，这类材料着重于把控甲醛释放量以及具备呼吸调湿功能；其二是地面装饰材料，包括实木复合地板、再生树脂地板、透水陶瓷砖等，具有耐磨性与低碳特性；其三是吊顶装饰材料，主要有铝合金蜂窝板、无醛矿棉板、竹木纤维集成吊顶，突出轻量化与防火性能；其四是辅助装饰材料，例如水性胶粘剂、植物基密封胶、可降解壁纸等，主要解决传统化学助剂带来的污染问题。随着技术不断发展，智能型绿色材料如温感变色涂料、自清洁玻璃等也逐渐进入应用阶段，形成了多元化的材料体系。

3.2 材料应用现状与问题

就应用情形而言，绿色装饰材料在新建绿色建筑项目中已经有了一定程度的普及，但区域之间的应用差异大，发达城市项目的使用率远远高于三、四线城市，后者依旧以传统材料作为主要使用材料。具体到材料的类型，墙面材料与地面材料的绿色化推进进程比较快，而吊顶材料与辅助材料的绿色转型相对迟缓，传统吊顶板材以及溶剂型胶粘剂仍然占据着比较大的市场份额。当前的应用中存在三个方面的核心问题：其一，绿色材料的成本比传统材料高出许多，这限制了中小规模项目的应用；其二，市场监管存在漏洞，部分宣称“绿色环保”的材料实际上并未达到标准，存在以次充好的现象；其三，施工技术与绿色材料的适配性欠缺，现有的施工团队对部分绿色材料的专用施工工艺掌握得不够好，使得材料性能无法得到充分发挥。

3.3 材料碳排放分析

从全生命周期的视角出发进行剖析，室内装饰材料的碳排放主要集中在三个关键阶段。生产阶段是碳排放的主要

源头，不同材料的生产工艺存在差异，这导致碳排放量有较大差距。像依赖高温加工的传统板材，其碳排放量较高，而采用回收原料生产的材料，碳排放大幅降低。运输阶段的碳排放量与材料的运输距离以及材料密度相关，远距离运输的材料相较于本地生产的材料会产生更多碳排放，lightweight 材料在运输环节的碳排放优势更大。施工与废弃阶段的碳排放占比相对较低，但仍需关注^[3]。传统材料在施工过程中产生的废料难以降解，处理过程中会产生额外碳排放，而可降解材料的废弃处理碳排放大幅减少。材料使用阶段的隐性碳排放容易被忽略。部分材料由于保温隔热性能较差，会增加建筑运营过程中的能耗，间接产生更多碳排放，而具有优异节能性能的材料则能有效降低这部分隐性碳排放由此可见，材料选择对全周期碳足迹有关键影响。

表 2 现存问题

类别	具体内容
核心应用问题 1: 成本	绿色材料成本高，限制中小项目应用
核心应用问题 2: 监管	监管有漏洞，部分“绿色”材料不达标，以次充好
核心应用问题 3: 技术	施工技术与绿色材料适配差，团队未掌握专用工艺，性能难发挥

4 “双碳”目标下绿色建筑室内装饰施工材料优化策略

4.1 材料选择优化

材料选择优化应以全生命周期低碳理念为核心要点，构建多维度评估体系，优先选用天然可再生材料，如竹材、原木等。这些材料在生长期可吸收二氧化碳，并且生产加工环节所消耗的能量比较低。要注重材料的本地化采购，减少跨区域运输所产生的碳排放。例如，在北方地区优先选用本地生产的陶瓷砖，避免南方材料长途运输造成能源消耗。要严格筛选低环境负荷材料，着重关注材料生产阶段的碳足

迹，避开依赖高温冶炼、化学合成的高碳材料，如传统铝合金型材可替换为再生铝型材。还应结合建筑使用场景进行差异化选择，例如在潮湿区域选用防潮性能良好的绿色材料，减少后期维修更换带来的二次碳排放，通过科学选择实现材料全周期碳排放量最小化。

4.2 材料性能提升

材料性能的提升需要着重关注节能降耗以及低碳协同这两个方面，并且针对一些关键性能指标展开强化工作。就保温隔热性能而言，可以通过对材料微观结构加以改进来实现这一目标，例如在墙体材料里面添加多孔保温颗粒，提升材料的热阻，减少建筑在运营阶段的空调以及供暖能耗，最终间接降低碳排放。在防火阻燃性能的优化方面，需要研发无卤阻燃剂用以替代传统的含卤阻燃剂，这样做可以契合安全方面的需求，而且还可以避免有害物质的释放以及高碳生产工艺。要重视材料耐久性的提升，借助表面改性技术来提高材料抗老化以及抗磨损的能力，延长材料的使用寿命，减少因为频繁更换所产生的废料以及碳排放。此外，强化材料的环保性能，严格把控甲醛、VOC等有害物质的释放量，实现材料性能与低碳、健康属性的同步提升。

4.3 材料创新研发

材料创新研发要紧密跟随“双碳”技术发展趋势，突破传统材料的限制。在新型低碳材料研发方面，加大研发力度，像开发基于农业废弃物的复合装饰材料，把秸秆、稻壳等废弃物加工成环保板材，实现废弃物资源化利用以及低碳生产这两个目标。在智能低碳材料研发应用方面，推动相关工作，例如研发温敏变色涂料，它能依据室内温度自动调节颜色深浅，辅助调节室内温度，降低空调能耗，研发自修复材料，当材料出现微小破损时可以自行修复，减少维修过程中的材料消耗以及碳排放。加强材料生产工艺创新，例如采用低温烧结技术生产陶瓷砖，取代传统高温烧制工艺，降低生产阶段的能耗与碳排放，促使材料产业朝着低碳化、高端化方向转型。

4.4 材料循环利用

构建全链条回收利用体系对于材料循环利用十分关键，可有效提升资源利用率，施工阶段应建立装饰材料分类回收机制，将施工产生的边角料如木材、金属、塑料等进行分类收集，防止混合丢弃造成资源浪费，对于可再加工的边角料，运输到专业加工厂进行二次加工，制成小型装饰构件或辅助材料。建筑拆除阶段要提前制定材料回收方案，把仍有使用价值的装饰材料如地板、门窗、吊顶等拆卸回收，经过检测、修复后重新投入市场使用，推动循环利用标准建设，明确回收材料的质量要求、加工工艺与应用场景，规范回收利用流程，减少回收过程中的碳排放，形成“生产—使用—回收—再利用”的闭环体系。

5 结语

在“双碳”目标的大背景之下，绿色建筑室内装饰施工材料的优化成为建筑行业朝着低碳方向转型的关键构成部分。本文针对材料的现状以及所存在的问题展开深入剖析，提出了一系列策略，覆盖选择优化、性能提升、创新研发以及循环利用等方面，这些策略可切实有效地减少材料在整个生命周期内所产生的碳排放，成功突破当前在应用过程中所面临的困境。还需要健全材料循环利用的标准，强化跨领域之间的技术协作，促使材料优化与绿色建筑全链条的发展实现深度融合，不断提高材料的低碳化水平，为“双碳”目标的实现以及绿色建筑的可持续发展注入更为强劲的动力。

参考文献

- [1] 胡世蓉. “双碳”背景下建筑工程管理中绿色建筑的废料处理技术 [J]. 石材, 2025, (10): 179-181.
- [2] 王萌, 朱杰. “双碳”背景下夏热冬冷地区绿色建筑低碳性能评价方法研究——以江西省为例 [J]. 绿色建筑, 2025, (05): 26-30.
- [3] 焦鑾. “双碳”目标下我国绿色建筑法律机制的现实问题及完善路径 [J]. 住宅与房地产, 2025, (26): 9-12.