

工程研究前沿

Frontiers of Engineering Research

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

工程研究前沿

Frontiers of Engineering Research

Volume 2 · Issue 2 · February 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 2 February 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 | 基于地域文化的风景园林设计策略分析
/ 王焕 | 22 | 新形势下农村公路设计理念与思路的探讨与研究
/ 李瑞 |
| 4 | 浅析露天矿山爆破震动的控制技术
/ 颜丙欣 | 25 | 煤矿采煤技术中的智能化设备应用与优化
/ 裴亮 |
| 7 | 港口岸电系统与分布式光伏/风电的协同供电策略研究
/ 梁恒溢 | 28 | 城市更新改造项目全过程工程造价动态管控体系构建研究
/ 黄国华 |
| 10 | 高密度电法在岩溶区地基勘察中的分层解译方法改进及工程适用性分析
/ 张辉 米慧慧 张援峰 | 31 | 以调节情绪为主导的园林意境营造路径探析——以新疆拜城喀普斯浪河东岸滨河景观为例
/ 李凡 |
| 13 | 采矿工程智能规划与优化设计实践
/ 王健 | 34 | 建筑机器人底盘融合控制系统研究与应用
/ 王帅 吴瑞 沈钰泉 崔义龙 张建清 |
| 16 | 建筑工程框架剪力墙结构中梁柱点质量控制方法分析
/ 甘育山 | 40 | 城市公园绿化栽植工程施工技术研究
/ 黄钊 |
| 19 | 基于纳米硅负离子涂料的公路隧道侧壁耐污亮化技术研究应用
/ 韦勇克 贺云 蓝东好 梁昌明 冒卫星 | 43 | 碱金属气室对称无磁加热优化研究
/ 曹新雨 翟跃阳 刘学静 |

- 1 Analysis of Landscape Architecture Design Strategies Based on Regional Culture / Huan Wang 22 Discussion and research on the design concept and idea of rural road in the new situation / Rui Li
- 4 Analysis of the control technology of blasting vibration in open pit mine / Bingxin Yan 25 Application and optimization of intelligent equipment in coal mining technology / Liang Pei
- 7 Research on cooperative power supply strategy of port shore power system and distributed photovoltaic / wind power / Hengyi Liang 28 Research on the Construction of a Dynamic Control System for the Entire Process of Engineering Cost in Urban Renewal and Transformation Projects / Guohua Huang
- 10 Improvement of hierarchical interpretation method and engineering applicability analysis of high-density electric method in foundation investigation in karst area / Hui Zhang Huihui Mi Yuanfeng Zhang 31 Analysis of Landscape Artistic Conception Creation Path Dominated by Emotional Regulation: A Case Study of the Riverside Landscape on the East Bank of Kapuslang River in Baicheng, Xinjiang / Fan Li
- 13 Intelligent Planning and Optimization Design Practice for Mining Engineering / Jian Wang 34 Research and Application of Integrated Control System for Building Robot Chassis / Shuai Wang Rui Wu Yuquan Shen Yilong Cui Jianqing Zhang
- 16 Analysis of quality control method of beam and column points in shear wall structure of building engineering framework / Yushan Gan 40 Research on Construction Technology of Greening Planting Engineering in Urban Parks / Zhao Huang
- 19 Research and application of road tunnel side wall anti-pollution and lighting technology based on nano-silicon anion coating / Yongke Wei Yun He Dongyu Lan Changming Liang Weixing Mao 43 Research on the Optimization of Symmetrical Non-Magnetic Heating for Alkali Metal Gas Chambers / Xinyu Cao Yueyang Zhai Xuejing Liu

Analysis of Landscape Architecture Design Strategies Based on Regional Culture

Huan Wang

Xicheng Engineering Design Group Co., Ltd. Xinjiang Branch, Urumqi, Xinjiang, 830000, China

Abstract

Landscape architecture design, as an important component of urban and rural environmental construction, carries the dual tasks of natural landscape and cultural inheritance. Regional culture is the accumulation of local history, geography, ethnicity, and social background, which determines the unique cultural appearance of a region. With the increasing emphasis on regional culture, landscape design is gradually shifting towards a direction that pays more attention to local characteristics and cultural connotations. Landscape architecture design based on regional culture not only requires the integration of traditional cultural elements, but also innovation based on modern design concepts. This article analyzes the influence of regional culture on landscape design, explores the challenges faced in current design, and proposes design strategies to enhance the value of regional culture.

Keywords

regional culture; Landscape architecture design; Cultural inheritance; design innovation

基于地域文化的风景园林设计策略分析

王焕

西城工程设计集团有限公司新疆分公司, 中国·新疆 乌鲁木齐 830000

摘要

风景园林设计作为城市和乡村环境建设的重要组成部分, 承载着自然景观与文化遗产的双重任务。地域文化是地方历史、地理、民族以及社会背景的积淀, 它决定了一个地区独特的文化面貌。随着地域文化的重视, 风景园林设计逐渐转向更加注重地方特色和文化内涵的方向。基于地域文化的风景园林设计, 不仅需要融合传统的文化元素, 还要在现代设计理念的基础上进行创新。本文分析了地域文化对风景园林设计的影响, 探讨了当前设计中面临的挑战, 提出了提升地域文化价值的设计策略。

关键词

地域文化; 风景园林设计; 文化遗产; 设计创新

1 引言

随着社会的变迁和城市化进程的加速, 如何在现代风景园林设计中保持和融入地域文化特色, 已成为设计领域的重要课题。尤其是在现代城市建设中, 风景园林不仅仅是一个功能性空间, 还应是文化的载体。将地域文化与现代设计理念相结合, 能为人们创造一个既具有历史感又符合现代需求的景观环境^[1]。

2 地域文化的风景园林设计的概述

风景园林设计作为一种融合自然与文化、艺术与科技的综合性学科, 强调自然景观与人文环境的协调统一。随着城市化进程的加速, 风景园林设计逐渐成为城市建设的重要

组成部分。近年来, 随着人们对文化遗产和地方特色的关注, 基于地域文化的风景园林设计理念逐步兴起。地域文化是指一个地区在长期发展过程中形成的、具有地方特色的文化系统, 包括历史背景、传统习俗、民间艺术、地域特色等。而地域文化对风景园林设计的影响, 不仅体现在视觉上的呈现, 更深层次地反映在空间布局、植物选择、材料运用等方面。因此, 在风景园林设计中, 如何深刻理解并恰当融入地域文化已成为当前设计领域中的一个重要课题。

地域文化的风景园林设计, 强调从地方特色和传统文化出发, 结合自然环境与历史遗迹, 创造出具有地方特色和文化内涵的景观空间。这种设计方式注重空间布局和环境景观的互动, 旨在为人们创造一个与地域文化密切相关的生活和休闲空间。例如, 山水文化、传统建筑风格、地方植物种类等都会成为设计的核心元素, 通过与自然环境的结合, 提升设计的文化价值和独特性。因此, 基于地域文化的风景园林设计不仅仅是对传统元素的模仿, 它还需要在现代园林

【作者简介】王焕(1986-), 男, 中国新疆霍城人, 本科, 工程师, 从事风景园林设计研究。

设计理念的基础上进行创新与转化,达到文化传承与创新的统一。

随着全球化的影响,地域文化的独特性逐渐受到重视,各地风景园林设计开始寻求与自身文化的紧密结合,力求在现代景观设计中保持地域的独特性。尤其是在中国,随着“文化自信”的不断增强,各个城市和乡村都在尝试通过风景园林设计的手段展现其文化特色,强化地方文化的认同感。这不仅使得风景园林设计具有了更深层次的文化含义,还使得这一设计方式成为实现社会、文化和环境可持续发展的重要手段^[2]。

3 地域文化的风景园林设计的意义

3.1 传承与弘扬地方文化

以地域文化为依托的风景园林设计,可切实达成传承与弘扬地方文化的目标,各个区域的风景区都留存下当地的历史记忆与文化符号。在设计阶段添加当地的特色内容,可使园林景观并非只是充当审美的空间,更是承担文化传承的载体,采用对传统建筑风貌、民间艺术作品、历史遗存开展保护与再现的方式,风景园林设计帮地方文化搭建起一个展示平台。

3.2 提升城市文化品位和旅游吸引力

以地域文化为支撑开展的风景园林设计,不只是对地方文化的继承与凸显,还能在现代社会里起到关键的经济与社会方面意义。伴随旅游业的迅猛增长,游客选择目的地的标准正慢慢出现变动,除自然景观透露出来的吸引力以外,文化与历史成为影响游客目的地选择的关键要点。作为城市公共空间核心部分的风景区,其设计不只是在景观美观水平方面起到影响,更牵涉一个城市文化的呈现与弘扬,采取把地域文化特色和现代设计理念相匹配的方式,风景园林可雕琢出具有独特文化魅力的景观区域。在吸引游客的这一阶段,也为当地居民塑造出文化维度的认同感与归属感,表达地方特色的景区在旅游业方面可起到十分关键的促进效果,拉动城市的经济上扬,造就就业岗位,赋予地方经济以活力,依靠地域文化与园林设计的合理结合,城市不仅凸显了文化风采,还达成了文化与经济的相辅相成、互利共赢局面。

3.3 促进环境与人文和谐共生

聚焦地域文化亮点的风景园林设计不只是留意自然景观的规划,还积极夯实人与自然和谐共生的理念根基,在开展设计的这一阶段,用心把地方自然环境跟文化特色交融在一起,让园林景观得以体现自然的俊美,还可凸显人文风采。凭借跟自然环境的衔接,结合地域文化元素的风景区可打造舒适的休闲空间,推动人的身心健康。条理规范且逻辑合理的设计方案,可以将自然景观、历史遗迹以及地方文化恰当地融合在一起,培育出不落窠臼的文化氛围,此类别的人文景观,不仅让人体会到历史与文化的节奏,还能带动人们催生对环境与文化的深厚情感,进而帮助人文环境与自然环

境达成协调相称。

4 地域文化的风景园林设计的问题

4.1 地域文化理解不够深入

虽然近期依托于地域文化实施的风景区园林设计得到了普遍关注,然而部分设计师在地域文化理解深度方面不足的问题依旧存在。在实施具体设计任务的阶段里,好些设计师更多地顾及景观的形式以及美学成效,然而漏掉了地域文化的内涵及历史背景。这种采用“形式主义”的设计策略,大概会造成设计作品看上去带有地方特色,但实际上缺乏真正的文化根基底蕴,要做到地域文化切实融入风景园林设计里面,设计师得形成对地域文化全面的理解与认识,只有深入钻研地方文化的精神要义,继而跟现代设计理念相一致,才能构建出真正带有文化价值与历史意义的风景园林作品^[3]。

4.2 设计与环境的协调性不足

在实施风景园林设计的这一阶段,地域文化的融入要以跟自然环境和谐交融作为根基,某些设计已吸纳地域文化元素,但在实现文化与自然环境深度融合的过程中存在薄弱方面,设计师有时过度把重点放在文化元素的呈现效果上,却看轻了周边环境的自然特性及生态要求。某些园林在实施营造时选取地域文化元素之际,或许只看重传统的建筑形式或装饰性内容,却未顾及地形、气候以及本地植物的适应条件,令设计呈现出生硬、不贴合实际的印象,这些现象不仅造成设计跟生态环境的协调效果不理想,大概还会对当地自然景观及生态环境造成不良后果,为实现人与自然的共同繁荣昌盛,设计应把自然环境的特点纳入思考体系,杜绝文化符号的无序堆叠,保障设计在视觉美感跟生态可持续性维度实现均衡效果。

4.3 传统文化的过度还原

在诸多的风景园林设计工作落实进程里,传统文化元素被过度照起初样子还原,造成设计作品过度被现存的传统样式局限,但缺失创新行动,在部分历史文化景区跟遗址公园里面,此现象的显现尤为多见,设设计师在凸显传统文明的阶段里,大概会大量采用古旧的建筑结构、雕塑、图案等,期望切实地还原古代气象,然而这样的设计往往没有做到与现代生活方式相衔接。过度开展传统元素相关的还原活动,会使设计看上去既陈旧又呆板,还可能失去原本就有的活力与吸引力,部分传统园林的建筑风格也许跟现代人的使用需求存在矛盾点,景观的功能属性慢慢陷入被忽视的境地,让游客在体验这些设计时出现陌生与不便的体验。

5 地域文化的风景园林设计的措施

5.1 深化地域文化的研究与理解

为了更好地融入地域文化,设计师不仅要研究地方历史和传统,还要深入了解当地的风俗习惯、社会结构以及文化背景。例如,某地传统的手工艺品、民俗节庆等都能为园林设计提供独特的文化元素。设计师需要从文化的源头入

手,通过访问老一辈的工匠师和传承者,参与地方节庆活动,进一步感受并挖掘这些文化元素的内涵。通过这些调研,设计师能深入了解文化背后的精神象征和独特的生活方式,将这些元素转换成具体的设计符号。文化的深度理解不仅使设计作品更加有意义,同时也能为城市或区域增添丰富的文化色彩。风景园林作品最终会成为人们与其文化产生情感共鸣的空间,具备更高的历史价值与文化价值。

在一个以水乡文化为主题的园林设计中,设计师通过对地方传统水乡文化的研究,深入了解水文化和水上建筑的历史。设计师根据当地典型的水道布局,设计了沿湖而建的小桥、流水与石拱门等元素,并在园林中融入了地方特有的文化符号,如手工编织的篱笆、竹制亭台等,带有浓厚的水乡特色。这种设计不仅让当地居民感受到传统文化的延续,也吸引了游客对水乡文化的认知与体验。

5.2 加强设计与自然环境的协调性

基于地域文化的设计需要充分关注自然环境与人文环境的融合。在选择设计元素时,设计师不仅要考虑文化的背景,还要密切关注当地的自然环境特征,例如气候、地形和植被等。在设计中选择与自然环境高度契合的元素,不仅有助于节能环保,还能够提升园林设计的自然美感。例如,北方干旱地区的园林设计,设计师可以考虑使用耐旱植物,避免过多使用需大量水资源的植物,以保持植物生态的和谐与景观的持久性。通过设计与自然的紧密配合,风景园林的景观效果更加符合实际的生态需求,减少人为因素的干扰。

在新疆的干旱地区,设计师在进行风景园林设计时,选用了适应性强的耐旱植物,如沙枣、梭梭等,并结合多层次植被覆盖技术,有效减少水分蒸发,提升土壤水分保持能力。园区的景观布局以沙丘、石块与本地植物为主要元素,巧妙融入了当地特有的地形特色,最大程度地保留了原生态的自然景观,完美契合了新疆的气候特点和生态需求。这样的设计不仅确保了园林景观的可持续性,还显著降低了园区日常维护的成本。

5.3 创新传统文化元素的运用

在现代园林设计中,创新传统文化元素是提高设计作

品现代感和实用性的关键。传统文化的元素不应单纯复制,而应该在理解其文化意义的基础上进行创新与转换,使其符合现代人们的审美需求和生活方式。通过创新性的设计,传统文化不仅可以与现代景观功能相结合,还能带给人们全新的视觉体验。例如,设计师可以通过结合现代建筑材料、光影效果或现代雕塑与传统文化元素相融合,使得传统的美学在新时代焕发新生。这种方式可以为公众创造一个兼具历史感和现代感的空间,让传统文化在新的环境中重新获得生命力。

在一座现代城市的公园设计中,设计师将传统的中国园林元素——如水池、假山、庭院和竹林等,融入了现代的建筑风格。设计师采用了玻璃、钢材等现代建筑材料,将传统园林的景观形式进行了现代化的改造。园中的桥梁、亭子使用了钢结构,而水池中则设置了LED灯光,通过灯光的变换呈现出水的流动效果。这种融合传统和现代的设计,使得公园既保留了传统文化的象征意义,又符合现代城市居民的审美需求和生活功能。

6 总结

基于地域文化的风景园林设计是对传统文化的传承与创新的结合,是现代城市环境建设中不可或缺的部分。通过对地域文化的深度挖掘与理解,结合现代设计理念与技术,可以实现更具地方特色的景观设计。然而,设计中仍面临理解不够深入、环境协调性不足以及传统文化元素过度还原等问题。通过加强对地域文化的研究、注重与自然环境的协调、创新性地使用传统文化元素,风景园林设计不仅能提升城市文化品位,还能够增强公共空间的功能性与吸引力。

参考文献

- [1] 韩炳越,沈实现.基于地域特征的风景园林设计[J].中国园林,2005,21(7):7.
- [2] 李晓颖.基于地域文化的景观规划设计——以河北省迁西县东山公园为例[C]//陈植造园思想国际研讨会暨园林规划设计理论与实践博士论坛.2009.
- [3] 刘春燕,刘玉石.园林景观设计中的地域文化探析[J].建材与装饰,2018(35):2.

Analysis of the control technology of blasting vibration in open pit mine

Bingxin Yan

Hongda Blasting Engineering Group Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong, 510623, China

Abstract

As an inevitable phenomenon in the open-pit mine operation, how to effectively control and reduce the blasting vibration is of great significance to ensure the safe production and environmental protection. This study deeply analyzes the generation principle and propagation law of blasting vibration in the open-pit mine, and systematically studies the influence of blasting vibration according to the source radius, blasting load, blasting distance and other factors. It is found that the influence of blasting vibration can be effectively reduced by optimizing the blasting parameters and adopting certain blasting techniques, such as reasonable control of hole depth, loading amount of medicine pack and spacing of hole holes. At the same time, modern measuring equipment and methods are used to monitor the blasting vibration of open-pit mines in real time, which can further guarantee the safe production of open-pit mines.

Keywords

blasting vibration of open-pit mine; optimization of blasting parameters; real-time monitoring technology

浅析露天矿山爆破震动的控制技术

颜丙欣

宏大爆破工程集团有限责任公司，中国·广东广州 510623

摘要

露天矿山爆破震动作为露天矿山作业中不可避免的一种现象，如何有效地控制并减少爆破震动对保障安全生产、环境保护具有极其重要的意义。此项研究对露天矿山爆破震动的产生原理和传播规律进行了深入分析，根据震源半径、爆破荷载量、爆破距离等因素对爆破震动影响进行了系统的研究。研究发现，通过优化爆破参数和采取一定的爆破技术，如合理控制炮孔深度、药包装药量、炮孔间距等，能够有效地减小爆破震动的影响。同时，利用现代测量设备和方法对露天矿山爆破震动进行实时监控，能进一步保障露天矿山的安全生产。

关键词

露天矿山爆破震动；爆破参数优化；实时监控技术

1 引言

露天矿山作业作为全球提供原材料的主要途径之一，其安全生产和环境保护始终为产业和环保两大领域共同关注的焦点。亦是实现可持续发展的重要环节。其中，露天矿山爆破震动被视为露天矿山作业中不可避免的一种现象，其对生产环境和周边地区的影响尤为显著。如何有效地控制这种震动，降低其对周围环境的不良影响，成为一项极其重要的任务。

2 露天矿山爆破震动的产生与传播

2.1 露天矿山爆破震动的来源

露天矿山爆破震动的来源主要是爆炸物在炮孔内起爆

后，释放出大量能量产生的冲击波和地震波^[1]。这些波动通过固体介质进行传播，导致周围岩石的震动和位移。爆破震动的产生过程可以分为起爆、能量释放、能量传递和震动传播几个阶段。在爆破起始阶段，爆炸物的化学能迅速转化为高温高压气体，产生强烈的冲击波。此冲击波沿着岩体的孔隙和裂隙传播，逐步转变为地震波。这些地震波通过地质结构，以复杂的衰减模式向四周传播。在这一过程中，岩层的物理性质，例如密度、弹性模量等，会显著影响震动的传播特性。地表条件、不均匀层状介质和地下水位等也对震动波的特征施加影响。了解爆破震动的来源对于设计合理的爆破方案和有效控制爆破震动，以降低其对周围环境和设施的影响具有关键的作用。有效的震动控制不仅能减少对基础设施的破坏，还能提高矿山作业的安全性和生产效率。

2.2 露天矿山爆破震动的传播特性

露天矿山爆破震动的传播特性是研究爆破震动影响范

【作者简介】颜丙欣（1991-），男，中国山东单县人，硕士，工程师，从事非煤矿山爆破研究。

围及强度的一项重要内容。在爆破过程中，震动能量以波动形式向四周传播，主要表现为压缩波、剪切波及表面波等。传播过程中，震动受地形、地质条件以及介质属性的影响显著。震动的传播速度和衰减趋势与波形特征相关，压缩波通常传播最远，震动强度逐渐减弱。传播路径上遇到不同的地质结构，如裂隙、层理或界面的存在，会导致震动波的反射、透射及衰减，改变其传播特性。震动的传播距离还会受到爆破规模、荷载量和炮孔布局等因素的制约。通过分析这些传播特性，可以为合理规划施工方案、优化爆破设计提供参考依据，确保矿山作业的安全性和有效性。理解震动传播特性是控制矿山爆破震动的基础，有助于制定更为科学的减振措施。

2.3 露天矿山爆破震动的影响因素

露天矿山爆破震动的影响因素复杂多样，主要包括爆破设计参数、岩体性质和地形条件等。爆破设计参数如震源半径、药包量和炮孔间距对震动幅度具有显著影响。岩体性质中的密度、弹性模量及节理特征等影响震动的传播速度及衰减特性。地形条件则通过改变震动传播路径和能量分布来影响震动强度。不合理的设计和复杂的地质条件可能导致震动扰动范围扩大，增加对周边设施和环境的影响，需通过精细控制进行有效管理。

3 影响露天矿山爆破震动的主要因素

3.1 震源半径对爆破震动的影响

震源半径是影响露天矿山爆破震动的重要因素之一。震源半径通常指的是炸药爆破时能量释放的范围，与爆破震动的幅度和频率密切相关。当震源半径较大时，爆破所产生的能量在更大范围内均匀分布，导致震动强度相对较小，传播的频率较低。较大的震源半径也可能引发更广泛的影响范围，对周围环境和结构可能造成一定的影响。在设计爆破方案时，需综合考虑震源半径的选择，以在控制震动强度和保证爆破效率间找到平衡点。

合理选择震源半径的过程中，需要评估矿山的地质特征、爆破的具体要求以及周围环境的承受能力。通过数学模型和现场实验，可以模拟不同震源半径对震动效果的影响，从而确定最优的半径参数。控制震源半径不仅能有效减少不必要的震动传递，还能进一步提升矿山爆破作业的安全可靠性，对矿山的整体运营有着重要意义。

3.2 爆破荷载量对爆破震动的影响

爆破荷载量是影响露天矿山爆破震动的一个关键因素。荷载量的大小直接决定了爆破过程中能量的释放程度，从而影响震动强度和传播范围。当爆破荷载量过大时，能量集中释放，会导致震动强度急剧增加，可能对周围环境和建筑物造成不利影响。过大的荷载量还可能导致地面塌陷或结构破坏，威胁安全生产^[2]。反之，当爆破荷载量适中时，通过合理的能量释放，可以有效地控制震动的强度和范围，减少对

环境的负面影响。在爆破作业中，需要根据矿体地质条件、开采规模以及安全要求等因素，科学合理地选择和调整爆破荷载量，以达到控制震动的目的，同时满足生产需要^[3]。这种动态调整和控制有助于实现安全、高效的爆破作业。精确的荷载量设计不仅能提高矿山开采效率，还能显著降低震动带来的潜在危害。

3.3 爆破距离对爆破震动的影响

爆破距离是影响露天矿山爆破震动的重要因素之一。爆破震动的衰减与爆破点和监测点之间的距离呈现一定的规律性。随着爆破距离的增加，震动强度通常会显著降低。这是由于震动能量在传播过程中逐渐扩散和耗散。增加爆破距离可以减小震动对周边环境的影响，保障安全生产。合理的爆破设计需综合考虑炸药的布置和穿孔位置，以控制震动能量的传递并降低附近结构物的受损风险。通过精确计算和预测爆破震动的传播路径，可以对矿区进行有效的震动控制。

4 露天矿山爆破震动的控制技术

4.1 构建合理的爆破参数

合理构建爆破参数是有效控制露天矿山爆破震动的重要手段之一。控制炮孔深度能够影响爆破震动的传播路径，从而减少震动的强度。调节药包装药量则可以优化爆破能量释放，使震动效应达到最小。合理的炮孔间距设计通过调整爆破能量的分布，使多个爆破点之间的震动波相互抵消，有效减低震动强度。这些参数的优化组合有助于减少爆破震动对周围环境及结构的影响，为露天矿山的安全生产提供了良好的技术支持。

4.1.1 控制炮孔深度

控制炮孔深度是优化爆破参数的重要环节，对减小爆破震动有显著影响。适当调整炮孔深度能够降低震动波的能量释放和传播速度，从而减少对周围环境的影响。在实际操作中，应依据矿山地质条件和爆破设计要求，确定合适的炮孔深度，以实现震动控制的目标。这种优化不仅提高爆破作业的效率，还有效减小了震动对矿山安全和设备稳定性的负面影响。通过科学合理地控制炮孔深度，能显著提升露天矿山爆破作业的安全性和环保性。

4.1.2 调节药包装药量

调整药包装药量，以匹配震源特性，有助于减小震动幅度，提升爆破作业的整体安全性和有效性。

4.2 采取有效的爆破技术

在露天矿山中，合理设计爆破方案是控制爆破震动的基础。施行微差爆破技术是其中一种行之有效的技术手段。微差爆破通过延迟爆炸，使得各个爆破段的震动波峰错开，从而削弱震动强度。这一技术在实践中展现出显著的效果，能够减少震动波的叠加，使震动对周围环境的影响降到最低。

降低爆破产生的冲击则是另一种策略。通过预裂爆破的应用，可以有效减缓岩体的整体性破坏。预裂爆破在主爆之前形成裂缝，引导爆破波的传播路径，从而减少震动的传递。预裂爆破通常与缓慢升阶技术结合使用，以优化爆破效果并减少震动扰动。

控制爆破震动还需要控制炸药的用量和布置方式。采用小药量爆破技术，通过减少每次爆破的炸药量，可以显著降低爆破震动。增加爆炸点的数量并适当设置间隔，可以分散爆炸能量，使得震动影响更加均匀且缓和。药量的精准控制是一种技术性的考量，其能有效调节爆破强度，进而优化震动效应。

保护性爆破技术，作为重要的创新方法，在实际应用中得到积极推广。此种技术通过改变传统爆破的方式，如使用柔性炸药和先进炸药布置技术，来限制震动能量传输。柔性炸药能够减少炸药与周围介质的直接接触面积，降低震动传递效率。优化炸药排列方式使得每批次爆破的能量释放更加均衡，进一步减少震动影响。

上述爆破技术在实际操作中，不仅需要科学的技术理论支持，更需通过现代化的技术手段来实施。在实施这些技术过程中，应充分考虑矿山的地理条件、岩体性质以及环境限制，以确保爆破作业的安全性与环保性。通过实时监测设备，实现对震动效应的动态评估，加深对爆破技术选择及实施效果的认识，从而最终确保露天矿山的安全、高效作业与生态环保。控制技术的发展和革新，使得露天矿山的爆破震动控制迈向精细化、智能化，保障矿山作业整体安全与可持续发展。

5 露天矿山爆破震动的实时监控

5.1 采用现代测量设备

露天矿山爆破震动的实时监控对于确保矿山安全生产至关重要。现代测量设备的采用显著提高了爆破震动的检测和分析能力。地震检波器是当前广泛应用的设备之一，它能够生成高精度震动数据并对爆破过程中的震动波形进行详细分析。数据采集系统的结合则使得所测得的数据能够被迅速收录、传输和处理。三轴向震动传感器作为另一关键设备，可测量震动的三个不同方向，进而提供全面的震动特性数据，使爆破震动的监控更加精准。激光测距仪在实时测量中也发挥了作用，它不仅可以监测爆炸后的位移变化，还能进行精确的空间定位。全站仪利用其精确的定位和测量能力，为危险区域的动态监控提供了可靠的技术支持。有这些现代设备的支持，露天矿山爆破震动监控的及时性和准确性得到极大提升，为优化爆破设计和减少不利影响提供了科学依

据。通过这些技术手段，震动监测呈现出更为动态和全面的特征，使安全生产水平进一步提高。

5.2 利用监控技术

在露天矿山爆破震动的监控中，监控技术的应用能够有效提升震动数据的获取和分析能力。通过部署地震传感器和加速度计等高精度监测设备，实时捕捉震动波的频率、幅度等特征参数，确保对爆破过程中的震动情况进行全面监测。利用无线传输和数据云存储技术，能够实现远程数据收集和分析，为及时调整爆破方案和采取预防措施提供科学依据。结合地理信息系统（GIS）和数据分析软件，可对震动场进行可视化处理，有助于更直观地评估爆破对环境的影响。通过上述技术手段的应用，能够显著提升露天矿山的安全管理水平，并为制定高效的震动控制策略奠定基础。

5.3 预防性措施的设定及实施

在露天矿山爆破作业中，为减少爆破震动的影响，设定并实施预防性措施是保障矿山安全的重要手段。这些措施包括制定详细的作业计划和震动监测方案。通过合理安排爆破时间，避开高风险时段，能有效减少对周边环境的影响。加强人员培训，提高作业人员对震动风险的认知与应对能力，确保紧急状况时能够迅速反应。建立完善的预警系统，通过实时监控数据的分析，提前识别可能的震动风险，并及时采取措施进行调整和防护。预防性措施的有效执行可显著提升矿山作业的安全性，减少震动对环境和设施的潜在威胁。

6 结语

本研究通过深入探讨了露天矿山爆破震动的产生原理和传播规律，系统地分析了不同因素对爆破震动影响的作用，并通过优化爆破参数及技术措施，显著减小了爆破震动的影响。目前对爆破震动控制效果的实时监控技术还存在一定的局限，需要开发更高精度、更实用的监测设备和方法。未来的研究需要继续深化对爆破震动控制机理的认识，特别是在不同地质条件下的爆破震动特性研究。同时，还应致力于开发新型的爆破技术和监测工具，以提高爆破震动控制的效果和实时监测的精度。

参考文献

- [1] 李想.露天矿山爆破震动控制技术分析[J].中国金属通报,2021(12):35-36.
- [2] 杨广亮.降低露天矿山爆破震动危害技术[J].中国科技期刊数据库工业A,2020(07).
- [3] 周其江,钱旭林,张进涛,韩金潮.露天矿山爆破震动控制技术的综合评价[J].中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术,2020(09).

Research on cooperative power supply strategy of port shore power system and distributed photovoltaic / wind power

Hengyi Liang

Guangxi Beibu Gulf International Container Terminal Co., Ltd., Qinzhou, Guangxi, 535000, China

Abstract

Port is the core node of the global logistics network, but now the pollution problem caused by traditional ship fuel power supply is becoming more and more prominent. Driven by the stricter emission standards of the International Maritime Organization and the goal of “double carbon,” the port shore power system is accelerating. However, there is still the limitation of indirect transfer of carbon emissions. At the same time, the large-scale application of distributed photovoltaic, wind power and other renewable energy in the port area provides a new direction for the optimization of port energy structure. How to realize the efficient coordination of shore power system and wind and solar energy has become the key research direction of industry development. This paper explores the coordinated power supply strategy of port shore power system and distributed photovoltaic and wind power, hoping to provide some research help for the development of its industry technology.

Keywords

port shore power system; distributed photovoltaic / wind power system; collaborative power supply; strategy exploration

港口岸电系统与分布式光伏 / 风电的协同供电策略研究

梁恒溢

广西北部湾国际集装箱码头有限公司，中国·广西 钦州 535000

摘要

港口作为全球物流网络的核心节点，但现在传统船舶燃油供电带来的污染问题日益突出，在国际海事组织的排放标准趋严及“双碳”目标驱动下，港口岸电系统加速普及，然而岸电依赖电网供电仍存在碳排放间接转移的局限性。与此同时，分布式光伏、风电等可再生能源在港区的规模化应用，为港口能源结构优化提供了新方向。如何实现岸电系统与风光能源的高效协同，已然成为如今行业发展的关键研究方向。本文就对港口岸电系统与分布式光伏、风电的协同供电策略展开探究，希望能够对其行业技术发展提供一定的研究帮助。

关键词

港口岸电系统；分布式光伏/风电系统；协同供电；策略探究

1 引言

港口岸电系统作为船舶靠港期间替代传统燃油发电的清洁供电方式，与分布式光伏 / 风电等可再生能源的协同应用，是推动港口低碳化转型的关键路径。本文分析了协同供电模式的特点与难点，并提出以智能调度及储能集成等相关的技术措施，希望以此能够有效降低港口的碳排放与运营成本，为港口绿色化发展提供理论支撑。

2 协同供电的特点与难点

2.1 能源供需的时空不匹配

分布式光伏发电完全依赖日照条件，其出力曲线呈现

明显的昼夜周期性变化，通常在正午时段达到峰值，而在夜间出力为零；风电则受气象条件影响更大，不仅存在日内波动，还可能面临持续数日的低风速天气，导致发电量锐减。相比之下，港口岸电系统的负荷需求具有相对稳定的特点，船舶靠港作业期间的电力需求往往持续且集中，特别是在集装箱装卸或冷链物流等场景下，供电中断或电压波动可能直接导致作业停滞，造成重大经济损失。一般来说大型集装箱码头在船舶接驳期间需维持 3-6MW 的稳定负荷，而大多数的光伏电站出力高峰出现在午间 12 点至 14 点，与晚间的船舶靠港高峰期完全错位，此类时间维度的不匹配使得光伏发电无法直接满足岸电需求，必须通过储能系统或电网调峰进行补充^[1]。并且季节性差异也进一步加剧了供需矛盾，如我国南方港口冬季日照时间短且风力强，而夏季则可能面临连续阴雨天气，导致可再生能源出力与港口作业旺季的电力需求难以同步。

【作者简介】梁恒溢（1992-），男，壮族，中国广西钦州人，本科，工程师，从事新能源发电技术、智能电网与新型电力系统、港口水运供配电系统研究。

2.2 系统兼容性挑战

从系统架构来看，现代港口岸电需要同时支持多种电压制式，只有这样才能满足不同吨位船舶的多样化用电需求，然而分布式光伏发电通过逆变器输出的通常是 380V 或 690V 交流电，风电则多采用 690V 或 1kV 交流输出，此类电源特性与岸电系统的多制式需求之间存在明显的接口不匹配问题。更为复杂的是，可再生能源的间歇性发电特性通过逆变器并网时，会引入一系列电能质量问题：首先是谐波污染，光伏逆变器开关器件的高频动作会产生 5 到 7 次等特征谐波，这会造成电流波形畸变，实测数据显示某些港口光伏并网点的总谐波畸变率可能超过 8%，远超 IEEE Std 519-2014 规定的 5% 限值；然后是电压波动与闪变问题，当风速突变导致风机出力在秒级时间尺度上发生 10%~15% 的功率波动时，会引起公共连接点电压偏差超过 $\pm 10\%$ 的允许范围，直接影响精密装卸设备的正常运行；还有就是频率稳定的问题，当可再生能源渗透率达到 30% 以上时，系统的惯性响应能力会进一步下降，在负荷突变情况下可能出现 0.5Hz 以上的频率偏移^[2]。并且如此多的兼容性问题还会在港口特殊环境中被进一步放大，港口区域通常存在大量变频驱动的龙门吊等大功率非线性负载，其运行产生的背景谐波与可再生能源并网谐波相互叠加，形成复杂的谐波谐振现象，某沿海港口的实测案例显示，在特定工况下谐波电压放大倍数可达 3~5 倍，更严重的甚至会威胁到电气设备绝缘寿命。

2.3 投资成本压力

完整的协同供电系统需要包含三大核心投资板块：首先是可再生能源发电设施，以典型的 10MW 级港口光伏电站为例，包含光伏组件、支架系统以及逆变设备等在内的单位投资成本约为 4~5 元/W，总投资额达到 4000 万~5000 万元；随后是储能系统的配套建设，考虑到港口需要同时满足调峰与应急供电的需求，一般需配置 2~4 小时的储能容量，按照当前主流磷酸铁锂电池储能系统 1.6~2.0 元/Wh 的价格计算，10MWh 储能系统的投资约为 1600 万~2000 万元；还有智能管理系统的开发部署，包括能源管理系统以及智能调度平台等软件系统，此类智能化改造的投资规模通常在 500 万~800 万元区间。以广西北部湾钦州港为例，其岸电系统需要同时满足 6.6kV/60Hz 或 6kV/50Hz 高压以及 380~400V 低压两种供电标准，为此必须配置具备自动切换功能的双绕组变压器还有多功能整流逆变装置等系统，这便造成单位功率建设成本比单一制式岸电高出 30%~40%，单个泊位的改造费用超过 300 万元。除了直接成本以外，协同供电系统还面临着可观的隐性成本，在电网接入方面，当可再生能源渗透率超过 25% 时需要升级港口变电站的并网设备，其改造费用可能达到 500 万~1000 万元；运营维护方面，多能互补系统的年维护成本约为初始投资的 2%~3%，远高于传统供电系统 1% 左右的水平。从全生命周期成本角

度分析，虽然协同供电系统在后期运营中能节省可观的燃油替代费用与碳减排收益，但较长的投资回收期仍然会对港口企业的资金周转造成较大压力。

3 解决方案与技术措施

3.1 多能源互补与智能调度

3.1.1 动态负荷匹配

动态负荷匹配需要通过多层次的技术体系来实现，在感知层方面，需要建立全覆盖的物联网监测网络，通过在光伏阵列部署辐照度传感器，在风机安装振动监测装置，在配电节点配置电能质量分析仪，以及在各泊位设置负荷监测终端，形成分钟级精度的全系统数据采集能力；在数据处理层，需采用混合预测算法模型，将物理模型与机器学习相结合，对于光伏发电预测，要采用结合数值天气预报的 LSTM 神经网络模型，可实现未来 72 小时发电功率预测误差小于 8%，对于风电预测则应用基于 SCADA 数据的时间序列分析与极端梯度提升的组合算法，将超短期预测精度提升至 90% 以上；在决策优化层，需要开发多目标动态调度算法，该算法需同时考虑经济性环保目标，采用改进的粒子群优化算法进行求解；在执行控制层要构建分级控制系统，上层能源管理系统负责制定调度计划，中层区域控制器实现功率分配，底层设备控制器执行具体操作指令，通过 OPC UA 通信协议确保各层级间的实时数据交互，控制响应时间控制在 200ms 以内^[3]。

3.1.2 混合储能系统

当前主流的“电池+氢能”组合储能方案，在技术架构上形成了四级储能体系：超级电容应对秒级至分钟级的瞬时功率波动；锂离子电池处理分钟级至小时级的能量调节；氢能储能系统解决数小时至数日的长时调峰需求；而季节性储氢则可应对风光资源在季度尺度上的不均衡分布。以青岛港的示范项目为例，该系统整合了 2MW/4MWh 的磷酸铁锂电池，1MW 的质子交换膜电解槽，200kg 的固态储氢装置以及 500kW 的燃料电池，实现了对港口 10MW 风光装机容量的全时段平滑输出。在技术集成方面，该项目创新性地将岸电整流装置与储能变流器共用一套功率转换系统，通过智能切换开关实现不同工作模式的自动转换，此设计不仅节省了约 30% 的设备投资，还将关键设备的利用率从传统方案的 60% 提升至 85% 以上。系统运行数据显示，混合储能方案可将可再生能源的弃电率从 15% 降至 5% 以下，同时通过参与电网辅助服务获得的额外收益可达项目总收入的 12%~15%。从技术经济性角度看，虽然氢能系统的初始投资较高，但其 20 年以上的使用寿命及其近乎无限的循环次数使其全生命周期成本反而低于单纯扩建电池储能。

3.2 多制式兼容与柔性并网技术

3.2.1 变频变压装置

现代港口对岸电系统的要求日益复杂，既要满足国际

航运界常见的高压交流制式，又要兼容低压需求，同时还需要处理光伏发电的直流输入以及风电的变频交流输入，如此多制式的复杂供电环境催生了新一代宽频段智能岸电电源系统的创新发展。在硬件架构方面，最新研发的第四代变频变压装置采用三级功率转换拓扑结构，前级采用三电平 ANPC 整流器，实现风光直流输入与交流电网的柔性接入；中间级配置基于 SiC 器件的双向 DC/DC 变换器，实现 200~1500V 宽范围直流电压调节；后级采用模块化多电平矩阵变换器 (M3C)，可在输出端生成 30~70Hz 连续可调的交流电压，电压等级覆盖 380V~11kV^[4]。在控制策略上，其智能装置集成了多模式自适应算法，当检测到船舶接入时会自动识别其电压/频率需求并切换至相应模式，当风光发电充足时会优先采用“直流微网”模式，将光伏直流电直接经 DC/DC 升压后供给船舶，而在电网供电模式下，则启动有源滤波功能，消除岸电负荷产生的谐波污染。

3.2.2 虚拟同步机技术

在港口岸电与分布式风光协同供电系统中，VSG 技术通过数字化的方式模拟同步发电机的关键动态特性，有效解决了高比例可再生能源接入导致的系统惯性下降以及调频能力不足等核心问题，现代 VSG 技术不仅模拟了同步发电机的转子运动方程，还扩展了对励磁调节系统等关键功能的数字化重构。通过实时解算摇摆方程 $Jd^2\delta/dt^2 + Dd\delta/dt = \Delta P$ (其中 J 为虚拟惯量， δ 为功角， ΔP 为功率差额)，VSG 控制器能够动态调整逆变器输出特性，使风光发电单元具备与传统同步机组相似的频率响应能力。在控制架构方面，最新研发的第三代 VSG 系统采用分层控制策略，底层硬件控制环基于 FPGA 实现微秒级快速响应，确保电压/电流的精确跟踪，中层虚拟同步算法运行在实时操作系统上完成功频调节及无功电压控制等核心功能，上层系统优化模块则通过模型预测控制实现多 VSG 单元的协调运行。

3.3 政策引导与商业模式创新

3.3.1 峰谷电价联动

根据电网公司制定的分时电价政策，在电价较低的谷时段储存电能，在电价较高的峰时段释放使用，从而降低整体用电成本。目前我国大部分地区实行的是三时段电价制度：高峰时段（一般为 8:00—11:00、18:00—23:00）、平段（6:00—8:00、11:00—18:00）以及低谷时段（23:00—次日

6:00），不同时段的电价差异可达 2-3 倍。而实施峰谷电价联动需要具备几个基本条件，首先是储能设施的建设，港口通常采用锂电池储能系统，其容量配置要根据港口用电负荷来确定，一般建议储能时长在 4~6 小时，随后是智能控制系统的部署，该系统需要实时监测电价信号及负荷需求，并自动制定最优的充放电策略，还有电网接入条件的保障，包括必要的电力计量装置与通信接口^[5]。

3.3.2 绿电交易机制

通过市场化的碳交易以及绿电认证体系，将港口使用可再生能源产生的环境效益转化为实际经济收益，从而反哺协同供电系统的运营。在我国绿电交易机制主要包括碳排放权交易与绿电证书交易，港口可以通过使用岸电与可再生能源替代传统燃油发电，获得相应的碳减排量，而减排量则可以在全国碳市场进行交易。以年吞吐量 500 万标箱的大型集装箱港口为例，全面使用岸电后每年可减少碳排放约 5 万吨，按照当前 60 元/吨的碳价计算，可获得 300 万元的碳收益。同时港口还可以通过采购或自发自用的可再生能源电力，获得国家认可的可再生能源证书，凭借证书就能在绿电交易平台上进行售卖。

4 结语

综上所述，港口岸电系统与分布式风光能源的协同供电，需从技术经济与社会政策等多维度协同推进，今后对其研究将会朝着高比例可再生能源渗透下的电网韧性提升，以及港口—船舶—城市能源网络的全局优化方向进展，以此来助力国家“双碳”的目标实现，更为全球港口绿色转型提供可复制的方案。

参考文献

- [1] 查道正,姚晨,李夫仲,等.港口岸电现状及运维技术讨论[J].中国物流与采购,2025(02):59-60.
- [2] 顾伟博.基于通信网络交换的分布式风电光伏智能运维系统设计[J].电子技术,2024,53(09):304-305.
- [3] 郭少臣.大数据下分布式风电光伏储能容量配置方法[J].光源与照明,2024(05):111-113.
- [4] 段树勋.面向分布式风电光伏的储能容量优化配置方法研究[J].自动化应用,2023,64(19):68-70.
- [5] 张怡,常鹏飞.新能源电力系统分布式模型预测负荷频率控制[J].电气传动,2022,52(20):70-75.

Improvement of hierarchical interpretation method and engineering applicability analysis of high-density electric method in foundation investigation in karst area

Hui Zhang Huihui Mi Yuanfeng Zhang

Shaanxi Geominerals Exploration Team Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi, 710000, China

Abstract

In this study, aiming at the problem of layered interpretation and engineering applicability of high-density electric method in foundation investigation in karst area, the limitations of traditional methods are deeply analyzed, and improvement strategies are proposed and verified. Through multi-parameter fusion, the introduction of artificial intelligence algorithms, and the optimization of electrode arrangement and data acquisition schemes, the hierarchical interpretation method of high-density electrical method was improved. The numerical model was constructed and field experiments were carried out, and the results showed that the improved method was significantly better than the traditional method in the accuracy of karst cave and dissolution fracture identification and stratigraphic division, and the interpretation accuracy was increased by more than 30%. The engineering applicability analysis shows that this method has its own advantages and disadvantages under different karst geological conditions, and can complement each other when combined with geological radar, shallow seismic and other methods, and plays an important role in engineering cases such as highways, bridges, and high-rise buildings. The study points out that in the future, it is necessary to optimize the numerical model, expand the experimental scope, and explore the application of new technologies to improve the survey efficiency.

Keywords

high-density electrical method; foundation investigation of karst area; hierarchical interpretation; Artificial intelligence algorithms

高密度电法在岩溶区地基勘察中的分层解译方法改进及工程适用性分析

张辉 米慧慧 张援峰

陕西地矿物化探队有限公司, 中国·陕西 西安 710000

摘要

本研究针对高密度电法在岩溶区地基勘察中分层解译与工程适用性问题, 深入剖析传统方法局限性, 提出改进策略并开展验证。通过多参数融合、引入人工智能算法及优化电极排列与数据采集方案, 改进高密度电法分层解译方法; 构建数值模型并开展现场实验, 结果表明改进方法在岩溶洞穴、溶蚀裂隙识别及地层划分精度上显著优于传统方法, 解译准确率提升超 30%。工程适用性分析显示, 该方法在不同岩溶地质条件下各有优劣, 与地质雷达、浅层地震等方法结合可优势互补, 在高速公路、桥梁、高层建筑等工程案例中均发挥重要作用。研究指出未来需优化数值模型、并探索新技术应用以提升勘察效能。

关键词

高密度电法; 岩溶区地基勘察; 分层解译; 人工智能算法

1 岩溶区地基勘察中高密度电法分层解译方法现状

在岩溶区地基勘察中, 传统高密度电法分层解译主要依赖电阻率剖面特征分析与异常识别技术, 通过对比第四系松散层(电阻率几十至几百欧姆·米)与基岩(上千欧姆·米)的电阻率差异划分地层界面, 依据岩溶洞穴的高阻亮色异

常、溶蚀裂隙的低阻暗色异常判断其位置与规模, 并利用数据滤波、对比分析等手段甄别真实异常, 曾在某岩溶区公路项目中精准定位洞穴保障工程安全。然而, 随着工程精度要求提升和岩溶地质条件日趋复杂, 传统方法弊端尽显: 复杂地层岩性致使电阻率差异模糊, 地层划分困难进而误判地基稳定性; 岩溶构造形态多变, 仅靠简单电阻率异常易漏判小洞穴、误判裂隙, 埋下塌陷隐患; 地下水活动使介质电阻率旱雨季波动大, 传统固定特征解译难以适应; 受电极间距和装置分辨率限制, 难以识别 1 米以下小尺度岩溶体, 且人工

【作者简介】张辉(1987-), 男, 中国陕西商洛人, 工程师, 从事物探方法在工程勘探中的应用研究。

分析数据效率低、准确性差,无法满足勘察时效需求^[1]。如广西某岩溶区工程中,传统方法将5米厚强风化基岩误划至第四系,遗漏多个1-3米小洞穴,误判10米长、0.5米宽的溶蚀裂隙,严重威胁地基安全,这充分表明在复杂岩溶地质条件下,改进高密度电法分层解译方法对实现工程勘察高精度需求刻不容缓。

2 高密度电法分层解译方法改进方向与策略

2.1 基于多参数融合的解译方法改进

在岩溶区地基勘察中,基于多参数融合的高密度电法分层解译方法,能显著提升解译准确性。传统单参数解译依赖电阻率,难以应对复杂地质,而多参数融合可实现信息互补。电阻率可初步识别岩溶构造位置与范围,但存在局限。当岩溶洞穴被黏土填充,其电阻率与周围地层相近,易造成误判。极化率能反映介质电化学性质,富含金属矿物的岩溶体极化率与围岩差异大,可弥补电阻率解译不足。将电阻率与极化率融合,通过多参数反演算法联合建模。先依电阻率定位地质体,再借极化率分析其性质。此外,自然电位、介电常数等参数也可引入。自然电位与地下水活动相关,能辅助判断岩溶连通性;介电常数可用于识别地层含水状态。某岩溶区工程实践印证了多参数融合的优势。通过同步测量电阻率、极化率和自然电位,采用多参数反演处理,相较于传统方法,该方案精准识别出更多小尺度岩溶洞穴与溶蚀裂隙,明确地质构造的位置、规模和性质,为工程设计提供可靠依据,有效降低施工风险,展现出显著的应用价值。

2.2 引入人工智能算法提升解译精度

引入人工智能算法是改进高密度电法分层解译的核心策略。神经网络与支持向量机(SVM)凭借独特优势,为岩溶区复杂地质解译提供新方案。神经网络具备强大的非线性映射与自学习能力。以多层感知器为例,其输入层接收电阻率等数据,隐藏层提取地质特征,输出层给出解译结果。训练时需用涵盖多样岩溶地质情况的样本数据,并通过数据增强、正则化防止过拟合,提升泛化能力。SVM基于结构风险最小化原则,通过将电阻率数据映射至高维空间,寻找最优分类超平面识别地质体。核函数选择是关键,径向基核函数因适应非线性数据,在岩溶地质解译中应用广泛。合理调参可提升其对岩溶洞穴、溶蚀裂隙等的识别精度。某岩溶区工程勘察实践证实,传统解译方法对岩溶构造误判率约30%,引入神经网络与SVM后,误判率降至10%以内。神经网络能捕捉小尺度岩溶洞穴,SVM擅长区分复杂溶蚀裂隙形态。二者协同应用,显著提升高密度电法解译精度,为工程建设提供可靠地质支撑,展现出人工智能算法在该领域的巨大应用潜力。

2.3 优化电极排列与数据采集方案

电极排列与数据采集方案直接影响高密度电法在岩溶区地基勘察的分层解译效果,合理优化可提升勘察效能。温

纳装置电极等间距排列,对浅层岩溶体分辨率高,适用于5米内浅层勘察,但探测深度有限。偶极-偶极装置通过调整偶极间距增强深部探测能力,可识别30米以下岩溶构造,不过易受旁侧地质体干扰。施伦贝格装置在深浅层探测间取得平衡,利于划分地层界面与识别大型岩溶构造,却难以捕捉小尺度岩溶体。实际应用中,应按需选择电极排列方式:浅层岩溶区优先用温纳装置;探测深部构造选偶极-偶极装置;综合勘察则采用施伦贝格装置。还可采用组合排列,如某项目结合温纳与偶极-偶极装置,分别探测浅部与深部岩溶,综合分析后显著提升解译精度。数据采集环节,电极间距需兼顾分辨率与工作量;供电电流和测量时间要保障数据稳定。在噪声大的区域,可增加测量次数并运用滤波技术。某复杂岩溶区通过增加测量频次、启用低通滤波,有效降噪,优化数据质量,使分层解译结果更精准,充分体现参数优化对提升勘察准确性的重要意义。

3 改进方法的数值模拟与实验验证

为验证改进后的高密度电法分层解译方法在岩溶区地基勘察中的有效性,本研究通过数值模拟与现场实验展开系统性验证。

在数值模拟实验设计中,构建涵盖多元地质特征的岩溶区模型,设置直径1-10米、形态各异的岩溶洞穴,模拟水或黏土填充的溶蚀裂隙,以及第四系松散层与基岩组合、石灰岩与白云岩互层等复杂地层。依据实际地质数据设定各介质电阻率,考虑5-15米深度的地下水位影响。采用Comsol Multiphysics软件,基于有限元法模拟电场与电流,运用温纳-偶极-偶极组合电极排列,电极间距设为1-5米,多次采集数据并滤波降噪。同时,以电极间距3米的单温纳装置、传统电阻率剖面分析方法作为对照,对比改进前后对岩溶地质体的识别精度与解译效果。

模拟结果显示,改进方法优势显著。在岩溶洞穴识别上,传统方法因依赖单一电阻率参数,在模拟连通且黏土填充的洞穴场景中,漏判两个2-3米直径小洞穴;而改进方法融合电阻率、极化率等多参数,结合神经网络算法,不仅精准识别所有洞穴,还能清晰刻画边界。对于溶蚀裂隙,传统方法面对水与黏土混合填充、走向复杂的裂隙时难以判断;改进方法通过多参数融合与人工智能算法,利用极化率判断填充物质,经神经网络综合分析,准确识别裂隙走向与范围。划分地层界面时,传统方法在电阻率相近地层中易误判;改进方法引入支持向量机结合多参数分析,实现精准分层^[2]。

现场实验选址贵州强岩溶发育区,采用组合电极排列方案,浅部用2米间距温纳装置提升浅层分辨率,深部以偶极间距10米、电极间距2米的偶极-偶极装置增强深部探测能力。经5次测量取均值并数字滤波降噪后,与电极间距5米的单温纳传统方法对比。结果表明,改进方法在岩溶洞穴与溶蚀裂隙识别上表现优异,如精准定位直径3米、埋深

10 米的洞穴，而传统方法仅识别为微弱异常；准确解译 20 米长、0.5 米宽的溶蚀裂隙走向，传统方法却因电阻率差异难辨而错判。钻探验证显示，改进方法对岩溶构造解译准确率超 90%，远高于传统方法的 60%。

4 高密度电法在岩溶区地基勘察中的工程适用性分析

4.1 不同岩溶地质条件下的适用性

高密度电法在岩溶区地基勘察中的适用性，受岩溶发育程度、地层结构及地下水活动等显著影响。在岩溶发育程度低的区域，小规模岩溶体与围岩电阻率差异大，高密度电法凭借高分辨率优势，配合 1 - 2 米小电极间距，可精准探测 1 - 2 米直径洞穴和 0.5 米以下宽度裂隙，为地基评估提供依据。岩溶强烈发育区，复杂连通的岩溶网络使电流传播畸变，视电阻率异常重叠，传统解译方法失效。需运用多参数融合、人工智能算法，并结合地质雷达、地震波数据综合分析，才能准确识别地质体。地层结构复杂时，岩性相近地层电阻率差异小，单纯依靠电阻率划分地层易误判。可引入自然电位、极化率等参数辅助，同时优化电极排列、缩小间距，提升地层分辨率。地下水频繁活动区域，水位变化导致岩溶体电阻率波动，干扰解译准确性。通过分时段多次测量，掌握水位对视电阻率影响规律，或结合水文资料校正数据，可增强解译可靠性。这些因素表明，根据具体地质条件灵活调整高密度电法的应用策略，才能保障岩溶区地基勘察的有效性。

4.2 与其他勘察方法的对比分析

在岩溶区地基勘察中，高密度电法常与地质雷达、浅层地震等方法协同使用。各方法优劣势与适用场景不同，合理选用可提升勘察效能。地质雷达基于电磁波原理，对浅层岩溶洞穴、溶蚀裂隙探测分辨率极高，能精准识别直径小于 1 米的小洞穴，但探测深度受限（通常几十米内），且在导电性强的介质或电磁干扰环境中，信号易衰减、受扰。浅层地震勘探利用地震波传播特性，探测深度可达数百米，适合获取深部岩溶构造与基岩面信息。不过，其对场地开阔度要求高，在复杂地形难以施展，且因分辨率低，易遗漏小尺度岩溶体。相较而言，高密度电法探测效率高，一次布极可采集多数据，能快速圈定岩溶构造分布范围。它不受岩溶体充水影响，通过多参数融合与人工智能算法，可准确识别地质构造特征。某项目中，地质雷达擅长浅层探测，浅层地震勘探聚焦深部，而高密度电法兼顾深浅层，三者结合为工程设

计提供全面地质依据，凸显了按需选用勘察方法的重要性^[1]。

4.3 工程案例适用性

为验证高密度电法在岩溶区地基勘察中的适用性，选取广西高速公路、湖南桥梁、贵州高层建筑三个典型案例进行分析。广西某高速公路穿越岩溶强烈发育区，地层复杂且地下水活跃。高密度电法借助改进解译方法，通过多参数融合与人工智能算法，精准识别大小岩溶洞穴与溶蚀裂隙。虽受地下水动态影响，但结合水文资料校正数据后，仍为路线设计和地基处理提供关键信息，适应复杂地质条件下勘察需求。湖南某桥梁工程中，桥址岩溶中等发育。高密度电法优化电极布置，清晰划分地层界面、显示基岩起伏，可确定岩溶构造大致情况，但对小尺度岩溶体分辨率有限。与地质雷达结合后，实现优势互补，为工程设计奠定基础。贵州某高层建筑场地岩溶发育较弱，高密度电法凭借高分辨率优势，快速且准确识别孤立岩溶洞穴与裂隙，高效完成勘察任务，为地基设计提供可靠依据。综上，高密度电法在岩溶区地基勘察有一定适用性，但因工程场景与地质条件而异。复杂区域需结合多方法与资料提升精度，简单区域可充分发挥其高效精准的优势，实际应用中应依需求合理选用，保障工程安全。

5 总结

本研究围绕高密度电法在岩溶区地基勘察展开，取得多项成果。分层解译方法上，通过多参数融合、引入人工智能算法及优化电极排列，显著提升解译精度，经数值模拟与现场实验验证，对岩溶构造识别效果良好；工程适用性分析表明，该方法在不同岩溶条件下各有优劣，与其他方法结合能发挥更大作用，多个工程案例证实其有效性。但研究仍有局限。数值模拟模型难以完全反映实际地质复杂性，现场实验覆盖范围不足，特殊工程场景下的适用性研究还需深入。未来应优化数值模型，扩大现场实验范围，针对特殊工程需求深化研究，同时探索多场耦合探测、更先进人工智能算法及物联网技术的应用，提升高密度电法勘察效能。

参考文献

- [1] 喻晓通,马妮.高密度电法综合分析法在机场溶洞探测中的应用[J].智能城市,2018,4(20):75-76.
- [2] 孙中科,et al."城市地下工程岩溶勘察方法分析."中国铁道学会铁道工程学会工程地质与路基专业委员会第25届年会暨学术交流论文集.Ed.,2016,298-303.
- [3] 俞美华,宁万辉,方明慧.施工勘察在岩溶区地基基础设计中的应用[J].建筑技术开发,2021,48(14):159-160.

Intelligent Planning and Optimization Design Practice for Mining Engineering

Jian Wang

Shanxi Meiyuan Huasheng Energy Development Co., Ltd., Jinzhong, Shanxi, 031300, China

Abstract

With the rapid development of information technology and intelligent manufacturing, traditional mining projects are gradually transforming and upgrading to digital and intelligent. Based on the actual case of an iron ore mine, this paper discusses the key technologies and practical experience of intelligent planning and optimization design of mining engineering. Through three-dimensional geological modeling, mining sequence optimization, intelligent design of blasting parameters and other means, the scientific and refined management of the mining plan is realized. At the same time, intelligent equipment such as intelligent drilling rigs were introduced, and production scheduling optimization models were constructed, which effectively improved production efficiency and equipment utilization. The practical results show that the mine production efficiency is increased by 35%, the equipment energy consumption and personnel accident rate are significantly reduced, and the payback period is shortened to 2.5 years.

Keywords

mining engineering; intelligent planning; Optimized design; Production scheduling

采矿工程智能规划与优化设计实践

王健

山西梅园华盛能源开发有限公司, 中国·山西 晋中 031300

摘要

随着信息技术与智能制造的快速发展,传统采矿工程逐步向数字化、智能化方向转型升级。本文基于某铁矿山的实际案例,探讨了采矿工程智能规划与优化设计的关键技术与实践经验。通过三维地质建模、开采顺序优化、爆破参数智能设计等手段,实现了矿山开采方案的科学化、精细化管理。同时,引入智能钻机智能化设备,并构建生产调度优化模型,有效提升了生产效率与设备利用率。实践结果表明,智能化改造后矿山生产效率提升35%,设备能耗与人员事故率显著降低,投资回收期缩短至2.5年。

关键词

采矿工程; 智能规划; 优化设计; 生产调度

1 引言

采矿工程是国民经济的重要基础产业,关系到能源资源的稳定供应与可持续发展。然而,传统采矿方式普遍存在资源利用率低、生产效率不高、安全事故频发等问题。近年来,以大数据、人工智能为代表的信息技术快速发展,为解决上述难题提供了新思路。通过智能规划与优化设计手段,可以显著提升矿山开采的科学性与精细化水平,实现安全、高效、绿色开采。

2 矿山地质条件分析与开采方案智能设计

2.1 三维地质建模与矿体空间分布特征分析

为实现矿山开采方案的智能化设计,需要对矿区地质条件进行精细刻画。项目团队基于勘探钻孔数据,利用地质统计学方法,构建了高精度三维地质模型。该模型直观呈现了矿体的空间展布特征、品位分布规律等关键地质信息(如图1所示),为后续开采方案优化奠定了扎实基础。通过模型分析可知,该矿区矿体呈似层状产出,平均厚度为45m,倾角 52° ,整体连续性良好。矿石品位平均38.5%,最高达到62%,富矿体主要分布在矿区中段。利用多指标信息融合技术,对矿体进行了精细划分,识别出6个独立矿体单元。结合不同矿段品位分布与工程条件,可有针对性地制定差异化开采策略。

【作者简介】王健(1987-),男,中国山西介休人,在职硕士,工程师,从事煤炭开采研究。



图 1 矿区三维地质模型与矿体空间分布特征

2.2 基于遗传算法的开采顺序优化设计

确定合理的采场开采顺序是矿山生产组织的关键。传统人工设计往往依赖经验判断，缺乏定量分析手段，难以兼顾矿山服务年限、出矿品位等多目标需求。针对此问题，项目采用遗传算法对开采顺序进行智能优化。根据开采工艺特点，构建多目标优化数学模型^[1]。目标函数包括采场工作面数量最小、各期平均品位波动最小、边坡稳定性最优等。然后，选取开采单元作为染色体编码，交叉变异操作实现解的迭代演化。通过精英选拔保留精英个体，避免最优解丢失。经过 500 代进化，算法收敛于最优开采方案。优化结果表明，采用该方案可使矿山服务年限延长 3.5 年，各采场平均品位提高 2.7 个百分点，采场边坡安全系数均大于 1.3，有效规避了采空区垮塌风险。与人工经验设计相比，遗传算法能够快速搜索到高质量可行解，为矿山长远规划提供了科学依据。

2.3 采场稳定性数值模拟与安全评价

为保障采场边坡长期稳定性，项目利用三维离散元软件对露天采场进行了稳定性数值模拟分析。通过地质力学参数反演，构建了全尺寸采场地质模型，并考虑了实际开采工况下的动荷载扰动影响。数值模拟结果表明，矿山整体边坡稳定性良好，局部陡倾角地段存在坍塌风险。采取优化爆破、及时清理坡面等措施后，边坡位移速率得到有效控制。同时，项目构建了基于雷达的边坡在线监测系统，对位移、变形进行实时预警，最大位移速率触发值设定为 5mm/d，确保了采场作业安全^[2]。

3 智能化设备配置与生产调度优化

3.1 智能钻机作业参数自适应调整系统

露天钻孔桩考虑地质条件的复杂多变性，钻进参数需要根据岩性变化实时优化，以达到高效节能的目的。项目在钻机上安装了多传感器融合系统，通过钻压、转速、给进量等参数实时反演岩性，并结合岩石可钻性、钻头磨损状态等因素，动态调整钻机作业参数，实现钻进过程自适应优化控制。现场应用结果显示，智能钻机平均贯入度提高 15%，台时利用率达到 85% 以上，钻头平均使用寿命延长 20%。通过参数优化，单位进尺油耗降低 12%，节能效果显著。

自适应控制方案有效解决了露天钻孔作业“盲人摸象”的难题，为钻孔桩布置优化创造了条件。

3.2 基于物联网的设备状态监测与预测性维护

传统设备管理模式以事后检修为主，存在维护不及时、设备故障率高等问题。项目应用物联网技术，在关键设备上部署了状态监测终端，对温度、振动、压力等参数进行在线采集^[3]。利用时间序列分析算法，构建了设备健康状态评估与剩余寿命预测模型，实现从“亡羊补牢”到“未雨绸缪”的维护策略转变。根据设备健康指数，维修单位可提前 15 天识别出故障征兆，合理制定检修计划，将非计划停机时间降至最低。同时，大数据分析技术挖掘出设备故障模式与影响因素，为设备选型、备件管理、工艺优化提供了数据支撑。统计显示，预测性维护模式可减少设备故障率 30% 以上，全年检修成本降低 25%。

3.3 生产调度多目标优化模型构建与求解

矿山生产调度涉及采矿、运输、加工等多环节协同，需要平衡产量、品位、成本等多个目标。传统人工调度难以实现全局优化，项目构建了多目标优化调度模型，同时考虑各生产环节的设备能力、物料平衡等约束，目标函数综合兼顾产量最大化与成本最小化。针对该多目标组合优化问题，设计了改进的非支配排序遗传算法 (NSGA-II)，引入精英保留策略和自适应交叉变异，在最优解集中搜索平衡解，实现产量、品位、成本的协同优化。最终生成的季度生产计划可提高产量 5%，回采品位稳定在 40% 以上，加工成本降低 8%，为矿山创造了可观的经济效益。

4 生产效率提升与成本控制效果分析

4.1 智能化改造前后生产效率对比分析

为定量评估智能化改造的效果，项目以 2020 年为基准，对比分析了 2021 年智能化运行后的生产效率指标变化（如表 1 所示）。

表 1 智能化运行后的生产效率指标变化

生产效率指标	2020 年	2021 年	提升幅度
采剥总量 (万吨)	2580	3350	29.8%
矿石产量 (万吨)	960	1320	37.5%
单台设备平均产量 (吨/台时)	623	845	35.6%
设备运转率	82%	95%	15.8%

数据显示，智能化改造后矿山采剥总量与矿石产量分别提升 29.8%、37.5%，设备单产提高 35.6%，设备运转率达到了 95% 以上。通过系统优化，9 个主要生产工序的作业效率平均提升 35% 以上，劳动生产效率实现跨越式增长。

4.2 设备利用率与能耗降低数据统计

智能化设备的引入有效提升了单机作业效率，实现了机械化换人、自动化减人的目标。项目选取铲运机、矿卡、破碎机等 6 类核心设备，对智能化前后的生产效率进行了对比（如图 2 所示）。



图2 智能化前后设备生产效率对比

分析显示,改造后6类设备平均利用率达到85%以上,接近设计产能的极限水平。通过合理调度与预测性维护,设备故障停机率下降60%,有效降低了维修备件成本。结合节能工艺的应用,设备单位能耗下降15%,吨矿电耗降至27度/吨,大幅降低了生产成本。

4.3 人员安全事故率下降与劳动强度减轻

矿山开采面临高风险作业环境,一线员工长期处于繁重的体力劳动中,安全隐患突出。项目采用智能化、无人化作业替代人工,大幅降低一线作业人员数量,显著改善了员工的劳动环境。统计显示,项目实施后矿山年度重大事故发生率降至0,轻伤事故降低85%以上。危险岗位作业强度下降60%,员工职业病发病率减少90%。作业环境的改善提升了员工的工作积极性,总体劳动效率提高30%以上。通过培训与再就业安置,原有员工90%以上完成智能化技能转型,适应了新的生产方式。

4.4 投资回收期与经济效益量化

智能化改造需要前期大量资金投入,因此有必要对项目经济性进行评估。根据改造后的生产成本变化,对比测算了投资回收期(如表2所示)。

表2 对比测算投资回收期

指标	金额(万元)
智能化设备投资	11500
配套工程投资	4600
年新增利润	6240
投资回收期	2.6年

测算表明,智能化改造总投资1.61亿元,年新增利润6240万元。按此水平,投资回收期约为2.6年,项目经济性良好。改造后吨矿总成本下降25元,年创造经济效益达9600万元。考虑到设备使用寿命通常在10年以上,项目全生命周期经济效益可观。敏感性分析表明,即使产品价格下

降20%,项目仍能保持7年以内的投资回收期,抗风险能力较强。

5 智能采矿技术推广与标准化建设

5.1 智能化采矿关键技术标准体系

为规范行业智能化实践,指导不同矿山差异化实施,亟须建立智能采矿关键技术标准体系。本项目梳理总结了矿山数字化、自动化、智能化建设的共性需求,提炼形成22项关键技术标准,涵盖矿山感知、联网、分析、执行等各个层面。这些标准有助于矿山企业有序推进智能化转型,避免重复建设和资源浪费。同时为设备、系统集成商提供了技术依据,促进矿业装备的标准化、模块化发展,加快形成智能矿山产业生态。

5.2 不同矿山地质条件下的适应性改进

我国矿产资源地质条件复杂多样,不同矿种、不同开采方式的智能化改造需求各异。露天煤矿、地下有色金属矿的开采特点与技术路线存在显著差异。因此,在推广智能采矿时需要因地制宜,进行适应性优化。以露天煤矿为例,其采剥规模大、工艺流程长,运输系统复杂,更加依赖数字化手段优化生产组织。应重点突破采场精细化建模、无人驾驶卡车编组、矸石排土场智能调度等技术。而地下有色金属矿受开采深度增加影响,应着眼提升通风、支护、充填等系统的自动化水平,发展有轨运输等技术,确保深部开采安全高效。

6 结语

本文以某铁矿智能化改造项目为例,系统阐述了采矿工程智能规划与优化设计的实践经验。通过三维地质建模、生产计划优化、设备远程监控等手段,矿山生产效率得到显著提升,能耗物耗大幅降低,项目取得了良好的技术经济效益。同时,本文分析了不同矿山条件下智能化实施的差异性需求,探讨了智能采矿人才培养与技能要求,并就推动行业转型升级提出了政策建议。未来,仍需加快构建智能矿山标准规范体系,健全人才培养与激励机制,促进先进适用技术成果的推广应用。

参考文献

- [1] 尹建平.地下采矿工程中通风系统的优化设计与安全管理[J].中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术,2025(2):147-151.
- [2] 李会东.采矿工程中的人工智能技术应用探索[J].中文科技期刊数据库(引文版)工程技术,2024(10):0046-0049.
- [3] 安静.采矿工程中通风系统优化设计与节能策略[J].中国科技期刊数据库 工业A,2025(3):101-104.

Analysis of quality control method of beam and column points in shear wall structure of building engineering framework

Yushan Gan

Guigang Construction Group Co., Ltd., Guigang, Guangxi, 537000, China

Abstract

Frame-shear wall structures, known for their excellent lateral stiffness and spatial flexibility, are widely used in modern construction projects. The quality of beam-column joints, which are critical load transfer points, directly impacts the overall stability and safety of buildings. This paper systematically explores the methods for controlling the quality of beam-column joints in frame-shear wall structures, delving into the characteristics of these joints in terms of force characteristics and construction requirements. It also details the key factors affecting the quality of beam-column joints during the formwork, reinforcement, and concrete stages of construction. Specific measures to optimize joint formwork installation, standardize reinforcement anchoring and connections, and control concrete pouring and vibration are proposed. Additionally, the paper emphasizes the importance of collaborative strategies in construction management and quality inspection, aiming to provide theoretical and practical guidance to enhance the construction quality of beam-column joints in frame-shear wall structures, thereby ensuring the structural safety and durability of buildings.

Keywords

frame shear wall structure; beam-column joint; quality control; construction technology; structural safety

建筑工程框架剪力墙结构中梁柱点质量控制方法分析

甘育山

广西贵港建设集团有限公司, 中国·广西 贵港 537000

摘要

框架剪力墙结构凭借良好的抗侧刚度与空间灵活性, 成为现代建筑工程的常用结构形式, 而梁柱节点作为结构关键传力部位, 其质量直接影响建筑整体稳定性与安全性。本文系统探讨建筑工程框架剪力墙结构中梁柱节点的质量控制方法, 深入剖析梁柱节点在受力特性、构造要求等方面的特点, 详细阐述模板工程、钢筋工程、混凝土工程等施工环节中影响梁柱节点质量的关键因素, 并针对性提出优化节点模板支设工艺、规范钢筋锚固与连接、控制混凝土浇筑振捣等质量控制措施, 同时强调施工管理、质量检测等协同保障策略, 旨在为提升框架剪力墙结构梁柱节点施工质量提供理论与实践指导, 保障建筑工程结构安全与耐久性。

关键词

框架剪力墙结构; 梁柱节点; 质量控制; 施工工艺; 结构安全

1 引言

随着城市化进程的加速推进, 建筑工程朝着高层化与复杂化趋势迈进, 对建筑结构承载的能力、抗震的性能和空间适配性提出更高规格, 框架剪力墙结构融合了框架结构平面布置灵活的特性与剪力墙结构抗侧刚度大的优势, 在诸如高层住宅、商业综合体等建筑中大量应用, 框架剪力墙结构中, 框架梁跟柱交汇的地方就是梁柱节点, 充当结构内力传递的关键要冲, 承担着将梁端弯矩、剪力以及轴力有效递送至柱的关键作用。当梁柱节点出现质量方面差错, 像节点核心区混凝土强度不达标、钢筋锚固长度短缺、箍筋配置欠妥

等, 将引起结构传力路径的中断, 引起结构整体抗震性能降低, 甚能引发结构崩解。深度剖析框架剪力墙结构中梁柱节点的质量控制手段, 对保证建筑工程质量安全、延长建筑的使用时长具备重要现实意义。

2 框架剪力墙结构梁柱节点的特点与重要性

2.1 受力特性

处于荷载作用下的框架剪力墙结构, 梁柱节点遭遇复杂的受力情形, 由水平荷载(例如风荷载、地震作用)产生的弯矩、剪力和轴力借框架梁传递到梁柱节点, 再让节点把相关力传递给框架柱, 处于地震作用期间, 节点核心区承受的力, 不只是梁、柱传来的剪力, 还会因梁柱弯曲变形而产生额外的拉力与压力, 复杂的受力状态要求梁柱节点务必具备足够的强度、延性和刚度, 从而保证结构在正常运行和面

【作者简介】甘育山(1991-), 中国辽宁庄河人, 本科, 工程师, 从事土木工程研究。

临灾害时的稳定状态^[1]。

2.2 构造要求

梁柱节点构造设计应兼顾结构受力与施工工艺两方面要求，从钢筋配置这一角度，梁、柱纵筋于节点内的锚固长度与连接方式，直接关乎节点的承载能力，设计与施工过程中需严格遵循相关规范要求落实，需加密配置节点核心区的箍筋，借此约束混凝土，强化其抗剪强度以及延性，在节点处支设模板，需保证其密封性和稳定性达标，以此保证混凝土浇筑的质量，由于梁柱的截面大小以及配筋率偏大，节点位置处钢筋密集集聚，为钢筋绑扎、混凝土浇筑与振捣增添了较大难度，对施工工艺的要求进一步提高。

2.3 梁柱节点在结构中的重要性

作为框架剪力墙结构关键部位的是梁柱节点，该部位质量直接关乎整个结构是否安全可靠，优质的梁柱节点质量可保障结构在承受荷载时内力实现有效传递，使框架梁、柱彼此协同行事，一同抵御外部施加的荷载，处于地震等突发灾害情境中，设计合理、施工质量佳的梁柱节点可吸收及耗散地震所带来的能量，防止结构出现脆性崩解，维系建筑结构的整体稳定水平，为保障人员安全与财产提供关键支撑，要是梁柱节点存有质量上的缺陷，会成为结构里的薄弱地带，也许会让结构局部出现破坏乃至整体塌落，带来惨重的人员伤亡与财产亏失^[2]。

3 影响框架剪力墙结构梁柱节点质量的因素

3.1 模板工程因素

3.1.1 模板设计不合理

部分工程模板设计阶段中，未周全考量梁柱节点复杂构造及施工荷载，模板支撑体系的刚度与稳定性欠佳，模板立杆间距拉得过大、水平拉杆设置数量匮乏，导致混凝土浇筑的时候模板变形、涨模了，造成梁柱节点尺寸精度与外观质量出现问题。

3.1.2 模板安装不规范

模板安装过程中，节点上模板拼接密封性差，较易产生漏浆现象，造成混凝土表面形成蜂窝、麻面等质量缺陷，模板加固稳固效果欠佳，在实施混凝土振捣时模板出现位移，引起梁柱节点位置出现了偏差，干扰了结构的受力性能表现。

3.2 钢筋工程因素

3.2.1 钢筋锚固与连接问题

梁、柱纵筋在节点处的锚固长度不契合规范标准，部分施工人员为图施工简单，胡乱截断或弯折钢筋，让钢筋跟混凝土之间的粘结力有所削弱，引起节点承载能力的下降，钢筋连接方式选用不当或连接质量差强人意，若机械连接接头未拧紧合适、焊接接头焊缝长度不充足、焊接质量较差等，造成钢筋传力受阻，影响到节点的受力性能状况。

3.2.2 箍筋配置与绑扎不规范

节点核心区箍筋数量短缺、间距未契合设计要求，无

法对混凝土进行有效约束把控，引发节点抗剪强度和延性的下降，箍筋绑扎牢固性不达标，混凝土浇筑期间箍筋出现位置移动，无法实现其该有的功用，鉴于节点周边区域钢筋密集，施工人员可操作空间有局限，较易出现箍筋少绑、漏绑的现象。

3.3 混凝土工程因素

3.3.1 混凝土配合比不当

混凝土配合比设计未实现合理调配，水灰比过大，会引起混凝土强度降低以及收缩变形增大；若砂率过小，混凝土和易性会变差，不利于混凝土的浇筑与振捣实施，粗骨料粒径甄选不佳，在钢筋密集排布的梁柱节点区域，易出现堵管、下料困难等现象，影响混凝土浇筑质量的达标。

3.3.2 浇筑与振捣不规范

混凝土浇筑顺序及方法不合理，若从节点一侧做单向浇筑，极易造成节点核心区混凝土密实度不足，显现空洞、蜂窝这类的缺陷，振捣工作实际推进期间，振捣棒插入深度未达标、振捣时间不充分或振捣过量，会引起混凝土出现分层离析情形，使混凝土强度与均匀性受到波及，若梁柱节点和梁板的混凝土强度等级不一样，若对浇筑控制不恰当，较易出现低强度混凝土流入高强度构件范围的情形，造成节点承载能力下滑。

3.4 施工管理因素

3.4.1 技术交底不到位

技术人员未向施工操作人员进行周全的技术交底，引发施工人员对梁柱节点施工工艺、质量标准、控制要点认识不足，在施工进程中凭经验开展操作，无法达成施工质量要求。

3.4.2 质量监督与检查缺失

施工现场质量监督体系存在漏洞，缺少对梁柱节点施工进程的全程把控，质量检查人员在节点施工质量检查方面把关不严，无法迅速察觉并改正施工中的质量差错，造成质量缺陷于后续施工里被掩盖，最终影响结构整体的质量水平。

4 框架剪力墙结构梁柱节点质量控制方法

4.1 模板工程质量控制

4.1.1 优化模板设计

在模板设计阶段，按照梁柱节点的尺寸规格、形状特征与施工荷载，实施模板支撑体系的专项规划，借助有限元分析软件对模板支撑体系做受力计算，恰当选定立杆间距、水平拉杆步距以及剪刀撑布置，保证模板支撑体系具备充足的刚度与稳定性，就复杂的节点而言，不妨采用定型化模板或预制装配式模板，增强模板的适用范围与安装精准度。

4.1.2 规范模板安装

需严格依照模板设计方案实施安装，做到模板拼接严实无缝，缝隙宽度不得超出1.5mm，针对较大缝隙问题，采用海绵条或密封胶做封堵处理，模板加固要坚固又可靠，

采用对拉螺栓与钢管扣件等加固途径,使模板在混凝土浇筑过程里不出现变形及位移状况,待安装工作结束后,对模板平整度、垂直度及尺寸做全面检查,把偏差限制在规范可接受的范围里^[3]。

4.2 钢筋工程质量控制

4.2.1 确保钢筋锚固与连接质量

按照设计及规范要求,切实管控梁、柱纵筋在节点内的锚固长度,施工时加强对钢筋下料及安装的检查环节,杜绝擅自截断或弯折钢筋,依照钢筋直径及受力情形,合理抉择钢筋连接途径,若钢筋直径超22mm,优先采用机械连接为佳,直径较小的钢筋,采用绑扎搭接或焊接连接均可,严格按照操作规程开展机械连接接头施工,保证连接质量合格;焊接接头要让焊缝的长度、宽度及厚度符合规定,完成焊接后实施外观检查及力学性能检测。

4.2.2 规范箍筋配置与绑扎

严格依照设计图纸及规范要求布置节点核心区箍筋,让箍筋的数量、间距、规格满足既定标准,在开展钢筋绑扎活动期间,采用定位箍筋以及钢筋支架等手段,保证箍筋位置无误、绑扎紧实,针对钢筋密集聚集的区域,可借助开口箍筋或者分段绑扎的方式开展,利于施工作业开展,同时保障箍筋绑扎质量合格,强化对箍筋绑扎质量的查验,保证不出现漏绑、少绑情形。

4.3 混凝土工程质量控制

4.3.1 合理设计混凝土配合比

基于梁柱节点的受力特点及施工情形,交由有资质的试验室设计混凝土的配合比,优化混凝土相关配合比参数,掌控水灰比、砂率及粗骨料粒径大小,促进混凝土的和易性、强度及耐久性能提升,针对高强度等级的混凝土,可以适量掺入外加剂及掺合料,诸如减水剂、粉煤灰之类的,提高混凝土的性能水准,减小水化热的数值,就梁柱节点与梁板混凝土强度等级有差别的情况而言,做出专项的配合比设计方案,使节点区域混凝土强度达成设计设定^[4]。

4.3.2 规范混凝土浇筑与振捣

制订合乎科学逻辑的混凝土浇筑方案,就梁柱节点所在区域而言,不妨采用分层浇筑及对称浇筑之法,杜绝混凝土出现离析、空洞现象,要是梁柱节点跟梁板的混凝土强度等级不一样时,需先对节点核心区的高强度等级混凝土进行浇筑,再开展梁板低强度等级混凝土的浇筑工作,在两种混凝土相交接的地方采用钢丝网等分隔办法,防止低强度等级混凝土涌入节点区域,于混凝土振捣作业期间,选用恰当的振捣棒,插入深度应进入下层混凝土50~100mm,振捣时间

以混凝土表面不再显著沉降、无气泡冒出、表面呈现泛浆为宜,杜绝过振与漏振现象。

4.4 施工管理质量控制

4.4.1 加强技术交底

技术人员应对施工操作人员进行周全的技术交底,交底包含了诸如梁柱节点施工工艺、质量标准、控制要点及安全注意事项等内容,采用书面交底、实地示范及视频教学等诸多方式,保障施工人员透彻理解与掌握施工要求,搭建技术交底签字确认体系,保障技术交底全面落实好^[5]。

4.4.2 强化质量监督与检查

完善施工现场质量监督相关体系,招录专职的质量检查人员,加强对梁柱节点施工全阶段的监控工作,在钢筋绑扎、模板安装还有混凝土浇筑等关键工序做完后,按照质量验收规范严格实施检查验收,工序未经检验合格或未验收,不得进入下一个施工步骤,就检查当中发觉的质量问题,快速下达整改文书,要求施工人员在限定日期整改好,而后实施复查操作,保证质量问题获得有效处理。

5 结论

框架剪力墙结构梁柱节点作为建筑结构关键所在,要让建筑工程安全可靠,其质量控制不可或缺,通过对影响梁柱节点质量的模板工程、钢筋工程、混凝土工程及施工管理等因素展开深入剖析,对应性地提出优化模板设计与安装工作、让钢筋锚固与连接符合规范、合理设计混凝土配合比且规范浇筑振捣过程以及加强施工技术交底和质量监督检查等质量控制手段,可有效增进梁柱节点的施工质量水平,维持框架剪力墙结构整体性能的正常水平。在实际的工程项目中,必须严格依照相关规范与标准,切实强化施工过程管理,时常归纳并革新质量管控手段,保障建筑工程框架剪力墙结构梁柱节点的品质,为建筑工程的安全利用奠定可靠基础。

参考文献

- [1] 杨伟. 建筑工程中框架剪力墙结构工程施工技术分析[J]. 居业, 2024(11): 22-24.
- [2] 郑万军. 框架剪力墙结构在建筑施工中的应用探讨[J]. 中国建筑装饰装修, 2024(21): 177-179.
- [3] 蓝铭铭. 房屋建筑框架剪力墙结构主体工程施工技术探讨[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2023(24): 118-120.
- [4] 高卫. 框架剪力墙结构施工质量的控制[J]. 四川水泥, 2022(03): 174-175+178.
- [5] 樊小辉. 房屋建筑框架剪力墙结构主体工程的施工技术探讨[J]. 住宅与房地产, 2020(09): 182.

Research and application of road tunnel side wall anti-pollution and lighting technology based on nano-silicon anion coating

Yongke Wei^{1,3} Yun He² Dongyu Lan² Changming Liang² Weixing Mao⁴

1. Guangxi Traffic Design Group Co., Ltd., Nanning, Guangxi, 530000, China

2. Guangxi New Development Transportation Group Co., Ltd., Nanning, Guangxi, 530000, China

3. Department of Underground Engineering, School of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai, 200092, China

4. Anhui Zhongyi New Material Technology Co., Ltd., Chuzhou, Anhui, 239000, China

Abstract

To enhance the quality and efficiency of highway tunnel construction, improve the visual environment inside tunnels, extend their service life, and reduce management and maintenance costs, this article analyzes the performance advantages of nano-silicon negative ion coatings. It integrates existing technical resources and draws on past successful experiences, with material characteristics as the foundation. By adopting technical adaptation, process innovation, quality monitoring, and daily maintenance, the article aims to establish a robust technical system, refine construction procedures, and promote the transformation and upgrading of the current highway tunnel side wall anti-pollution and lighting construction system.

Keywords

highway tunnel; side wall pollution resistance and lighting; nano-silicon anion coating; application path

基于纳米硅负离子涂料的公路隧道侧壁耐污亮化技术研究应用

韦勇克^{1,3} 贺云² 蓝东好² 梁昌明² 冒卫星⁴

1. 广西交通设计集团有限公司, 中国·广西南宁 530000

2. 广西新发展交通集团有限公司, 中国·广西南宁 530000

3. 同济大学土木工程学院地下建筑工程系, 中国·上海 200092

4. 安徽中益新材料科技股份有限公司, 中国·安徽滁州 239000

摘要

为提升公路隧道的建设质效,改善隧道内视觉环境,延长隧道使用寿命,降低管理维护成本。文章从多个维度出发,在分析纳米硅负离子涂料性能优势的基础上,整合现有技术资源,借鉴过往有益经验,以材料特性分析为前提,通过技术适配、工艺创新、质量监测、日常维护等路径,健全技术体系,完善施工流程,推动现有公路隧道侧壁耐污亮化施工体系的转型升级。

关键词

公路隧道;侧壁耐污亮化;纳米硅负离子涂料;应用路径

1 引言

隧道侧壁长期受车辆尾气、粉尘、油污等污染物侵蚀,加之光照条件有限,导致侧壁污损严重、视觉环境昏暗,不

仅影响隧道美观,更降低了驾驶员的视觉辨识度,存在较大安全隐患^[1]。纳米硅负离子涂料凭借其独特的纳米材料特性和负离子释放功能,在耐污、自洁、空气净化及光反射性能方面展现出显著优势,为公路隧道侧壁耐污亮化提供新的解决方案。

【基金项目】广西重点研发计划资助(项目编号:桂科AB22080002)。

【作者简介】韦勇克(1971-),男,壮族,中国广西都安人,硕士,正高级工程师,从事桥梁与隧道工程研究。

2 纳米硅负离子涂料在公路隧道侧壁耐污亮化中的主要优势

2.1 服务寿命长

纳米硅负离子涂料采用纳米级硅基材料作为主要成膜

物质，纳米颗粒的粒径通常在 1~100 纳米之间，这种纳米级结构赋予涂层优异的致密性和机械性能。纳米硅颗粒能够紧密堆积，形成连续且均匀的涂膜，有效阻挡外界污染物、水分及腐蚀性气体的侵入，减缓涂层老化速度。同时，涂料中添加的负离子发生材料具有良好的化学稳定性，在隧道复杂环境中不易发生化学反应，可长期稳定发挥其功能特性。研究表明，在正常使用和维护条件下，纳米硅负离子涂料的使用寿命可达 10~15 年，相较于传统隧道涂层材料 5~8 年的服务年限，在很大程度上，延长了涂层更换周期，降低了隧道运营维护成本^[2]。

2.2 可清洁性高

纳米硅负离子涂料有着较强的自洁性能，涂层表面呈

现纳米级粗糙度，形成类似荷叶表面的“微-纳米”双重结构，这种双重结构使得水滴与涂层表面的接触角大于 150°，滚动角小于 10°，从而使得纳米硅负离子涂料具备超疏水特性。当污染物附着在涂层表面时，水滴在滚动过程中可将污染物带走，实现自清洁效果。同时，纳米硅负离子涂料在释放负离子的过程中，能够与空气中的氧分子结合，形成具有强氧化性的羟基自由基（·OH）^[3]。羟基自由基对有机污染物有较强的分解能力，生成二氧化碳和水。纳米硅负离子涂料的材料特性，使得其与瓷砖等传统隧道侧壁施工方案相比，在清洗时间、耗水量、清洗方式、间隔时间以及清洗人数等方面，表现出明显的优势，如表 1 所示：

表 1 隧道侧壁不同施工方案清洁效果

施工方案	综合功效	清洗时间	耗水量	清洗方式	清洗液体	清洗时间间隔	人数
瓷砖	油污、灰尘等污染物极易吸附在隧道侧壁	约 8 天	约 12 车	水车冲洗 + 人工刷洗	清水 + 化学清洁剂	3 个月	6 人
纳米硅负离子涂料	油污、灰尘等污染物难以吸附在隧道侧壁	约 3 天	约 9 车	水车冲洗	清水	4 个月	3 人

2.3 耐受性较好

隧道内部环境复杂，与其他公路结构相比，具有温湿度变化大、车辆振动频繁、强光照与弱光照交替等特点。纳米硅负离子涂料具有良好的环境耐受性，其热膨胀系数与隧道侧壁混凝土基材相近，能够适应隧道内较大幅度的温湿度变化，避免因热胀冷缩产生涂层开裂、剥落等现象的发生，提升隧道侧壁总体结构的稳定性。纳米硅负离子涂料的柔韧性和抗冲击性能能够有效抵御车辆振动带来的影响，保持涂层结构完整。同时，纳米硅负离子涂料具备优异的耐候性，在紫外线照射下不易发生黄变、粉化等现象，确保涂层长期保持良好的亮化效果和装饰性能。

3 纳米硅负离子涂料在公路隧道侧壁耐污亮化中的应用路径

3.1 做好材料特性分析

在开展纳米硅负离子涂料施工前，工作人员要从材料学角度出发，着眼公路隧道侧壁耐污亮化的定位，对材料特性进行全面、深入地分析，综合材料特性与施工定位，制定实用、可行的技术方案。具体来看，施工企业组织人员系统性研究涂料的化学成分和微观结构，掌握纳米硅颗粒的粒径分布、负离子发生材料的种类及含量等关键参数，评估其对涂层性能的影响。通过扫描电子显微镜（SEM）、X 射线衍射仪（XRD）等先进分析手段，观察涂层的微观形貌和晶体结构，揭示材料性能与结构之间的内在联系。在此基础上，施工企业要联合专业团队，利用技术设备，定向测试涂料性能指标，掌握附着力、硬度、耐磨性、耐水性、耐碱性参数，确保纳米硅负离子涂料满足公路隧道侧壁涂层的使用要求。开展模拟隧道环境的加速老化试验，研究涂料在温湿度循

环、光照辐射、污染物侵蚀等多因素耦合作用下的性能变化规律，为纳米硅负离子涂料的选型和应用提供科学依据。

3.2 做好施工技术适配

公路隧道侧壁结构特殊、环境复杂，为确保耐污亮化效果，施工企业要着眼纳米硅负离子涂料特点，对施工技术开展选型，确保技术方案的整体适配性。具体来看，施工企业针对隧道侧壁的平整度、粗糙度等表面特征，选择合适的基层处理方法，确保涂层与基材之间具有良好的附着力^[4]。对于不平整的侧壁，可采用水泥砂浆找平、打磨等工艺进行处理；对于表面过于光滑的基材，需进行拉毛处理，增加表面粗糙度。施工企业综合涂料的特性和施工环境，选择适宜的施工方法，做好喷涂、刷涂、辊涂等方案的横向对比，结合过往经验，喷涂方案的施工效率高、涂层均匀性好，适用于大面积施工；刷涂和辊涂等方案更适用于边角、复杂结构部位的涂装。为保证纳米硅负离子涂料的喷涂效果，施工企业要引入控制思维，确立合理举措，精准控制施工环境参数，使得温度、湿度、风速等要素满足涂料施工要求，降低环境因素对正常施工活动的扰动。通常情况下，公路隧道侧壁纳米硅负离子涂料涂覆环节，施工温度应控制在 5 -35℃，相对湿度应低于 85%，保证纳米硅负离子涂料能够正常干燥和固化，避免因环境因素导致涂层出现流挂、起泡、开裂等质量问题。

3.3 做好施工工艺创新

为提高公路隧道侧壁纳米硅负离子涂料的施工质量与施工效率，施工企业应当在施工技术适配工作的基础上，做好施工技术的定向创新，搭建完备的耐污亮化施工体系。具体来看，施工企业引入智能化喷涂设备，借助机器人技术和自动化控制系统，实现喷涂过程的精准控制。通过设置喷涂

压力、喷涂距离、喷涂速度等喷涂参数,确保涂层厚度均匀一致,减少人工喷涂的误差和缺陷。优化施工流程,采用“基层处理—底漆涂装—中间漆涂装—面漆涂装”的多层涂装体系,每层涂料干燥固化后再进行下一层涂装,增强涂层的整体性能和耐久性。具体来看,基层处理环节,施工企业采用高压水射流清洗技术,将水流压力保持在15~25MPa,通过高速水流冲击,去除隧道壁表面的油污、灰尘、松散颗粒等杂质,确保表面残留的污渍、氧化皮等不超过总面积的5%,整体清洁度达到ISO 8501-1标准的Sa2.5级。底漆涂装环节,施工企业采用无气喷涂工艺,喷涂压力保持在15~25MPa,喷枪与基层表面距离保持在200~300mm,喷枪移动速度为30~50cm/s,确保涂层均匀覆盖基层表面,无漏喷、流挂等缺陷,底漆涂层干膜厚度控制在60~80 μm ,每平方米涂料用量控制在0.2~0.3kg^[5]。中间漆涂装环节,施工企业仍然借助无气喷涂工艺,喷涂参数与底漆涂装基本一致,中间漆涂层干膜厚度控制在120~150 μm ,分两次喷涂完成,每次喷涂厚度约为60~75 μm 。每道涂层间隔时间控制在4~6小时,以确保涂层之间良好结合。面漆涂装环节,施工企业采用有气喷涂或辊涂工艺,在有气喷涂过程中,将喷涂压力控制在0.3~0.5MPa,喷枪与表面距离200~250mm;在辊涂过程中,选用合适的滚筒,确保涂层均匀,面漆干膜厚度控制在60~80 μm ,每平方米涂料用量约0.15~0.25kg。

3.4 做好施工质量监测

公路隧道侧壁纳米硅负离子涂料施工过程中,施工企业要质量导向,做好质量监测,做好监测数据的反馈。具体来看,施工企业运用无损检测技术,工作人员操控涂层测厚仪、光泽度仪、硬度计等设备,对涂层的厚度、光泽度、硬度进行实时监测,确保涂层质量符合设计要求。利用光谱分析技术,通过红外光谱(FT-IR)、紫外可见光谱(UV-Vis)等专业设备,对涂料的化学成分和涂层的固化程度进行检测,判断涂料是否完全固化,是否存在成分偏差等问题。施工企业引入物联网技术,强化数据获取、数据传输、数据应用能力,实现纳米硅负离子涂料施工过程的可控性。工作人员基于物联网技术框架,在隧道侧壁安装传感器,实时监测涂层的表面温度、湿度、污染物附着量等环境参数,通过数据分析预测涂层的性能变化趋势,及时发现潜在的质量问题并采取相应的处理措施。同时,建立施工质量追溯体系,记录涂料的生产批次、施工人员、施工时间、施工工艺等信息,便于质量问题的溯源和责任认定。

3.5 做好施工区域维护

公路隧道纳米硅负离子涂料施工任务结束后,施工企业应当加强对施工区域的维护管理,借助合理举措,确保纳米硅负离子涂料的长期性能。具体来看,施工企业综合系列影响因素,制定科学合理的维护计划,调配设备、组织人员,定期对隧道侧壁涂层进行检查和清洁。纳米负离子涂料清洁

时,施工企业应当选择合适的清洁剂和清洁工具,避免使用强酸、强碱等腐蚀性清洁剂,防止对涂层造成损坏。对于轻微的污渍,采用高压水枪冲洗或软质刷子擦拭;对于顽固污渍,使用专用的涂料清洁剂进行处理。同时,加强对隧道内环境的管理,布设净化设备,增设通风口,旨在控制车辆尾气排放,减少粉尘、油污等污染物的产生,延长涂层的使用寿命。对于出现破损的涂层结构,施工企业应当建立涂层修复机制,当纳米硅负离子涂层出现局部损坏、剥落等质量问题时,及时进行修复处理。修复过程中应确保修复区域与原涂层的颜色、性能一致,保证隧道侧壁的整体美观性和功能性。

3.6 做好施工过程管理

为提升纳米硅负离子涂料施工技术的科学应用,减少技术应用误差,施工企业需要建立健全施工管理制度,明确施工各环节的质量标准、操作规范和安全要求,加强对施工人员的培训和管理,提高施工人员的专业技能和质量意识。在施工前,组织施工人员进行技术交底,使其熟悉涂料的性能特点、施工工艺和质量要求。在施工过程中,加强现场监督和管理,及时发现并解决施工中出现的各种问题,确保施工进度和质量。合理安排施工进度,避免因赶工导致施工质量下降。同时,做好施工安全管理工作,设置安全警示标志,配备必要的安全防护设备,防止施工过程中发生安全事故。建立施工档案,记录施工过程中的各项数据和资料,为后续的工程验收、维护管理提供依据。

4 结语

纳米硅负离子涂料凭借其在服务寿命、可清洁性和耐受性等方面的优势,为公路隧道侧壁耐污亮化提供了创新解决方案。通过深入分析材料特性、适配施工技术、创新施工工艺、加强质量监测、完善区域维护和优化过程管理等应用路径,可有效提升纳米硅负离子涂料在公路隧道工程中的应用效果。

参考文献

- [1] 付义书, 聂易彬, 史玲娜等. 基于纳米硅负离子涂料的公路隧道侧壁耐污亮化技术研究与应用[J]. 隧道建设(中英文), 2023(2): 107-114.
- [2] 魏赐美. 瓷化涂料在隧道洞壁亮化中的应用[J]. 福建交通科技, 2023(12): 118-121.
- [3] 冯守中, 周龙, 冒卫星. 侧壁涂料对公路隧道光环境与人眼视觉特性影响试验研究[J]. 现代隧道技术, 2024(3): 220-227.
- [4] 徐达, 何世永. 公路隧道侧壁污染对隧道光场内光谱S/P值影响研究[J]. 灯与照明, 2025(1): 100-106.
- [5] 陈庆香, 史玲娜, 文森等. 基于注视特性的公路长大隧道壁面标作用效果评估[J]. 隧道建设(中英文), 2023(2): 144-150.

Discussion and research on the design concept and idea of rural road in the new situation

Rui Li

Hami Ruizhong Highway Engineering Co., Ltd., Hami, Xinjiang, 839000, China

Abstract

With the increased investment in road construction by the state, the rural road network has been continuously improved, significantly boosting regional economic development. The 'Medium-and Long-Term Development Outline for Rural Roads' issued by the Ministry of Transport outlines future goals and tasks. To enhance service quality, improve efficiency, expand functions, build a convenient transportation network, achieve integrated development, and promote rural revitalization, it is essential to continuously update design concepts and optimize design strategies during the initial design phase.

Keywords

rural road; design innovation; rural revitalization

新形势下农村公路设计理念与思路的探讨与研究

李瑞

哈密市瑞忠公路工程有限公司, 中国·新疆哈密 839000

摘要

在国家加大公路建设投资的背景下,农村公路网络不断完善,对区域经济发展起到了显著促进作用。在交通运输部印发的《农村公路中长期发展纲要》中明确了今后的目标任务,如何推进农村公路提升服务品质、提高服务效率、扩展服务功能,构建便利交通网络,实现多产融合发展,推动乡村振兴,这就需要在前期设计工作中,要不断更新设计理念,提级优化设计思路。

关键词

农村公路;设计创新;乡村振兴

1 引言

交通运输部印发的《农村公路中长期发展纲要》,系统绘制了全面建设社会主义现代化国家阶段农村公路发展蓝图,提出要构建“四好农村路”高质量发展格局,建立安全、便捷、绿色、美丽的农村公路交通运输体系,实现与农业农村现代化发展相适应、与生态环境和乡村文化相协调,与现代信息通信技术相融合的目标。基于乡村振兴战略的总体要求,亟需通过多维度的系统优化,全面提升农村公路的服务效能,构建高效互联的城乡交通网络体系,打造安全舒适、绿色生态的出行环境,为区域经济协同发展提供坚实的交通支撑。因此,在农村公路设计阶段,就要切实立足新发展阶段的目标任务和要求,科学统筹做好规划,更新设计理念,结合当地实际,综合考虑多重因素制定科学化合理化的设计方案,推进与现代农业产业链、生态环境治理体系、文

化旅游资源开发、城乡空间规划等领域的深度融合与协同发展,便于更好服务和支撑乡村振兴战略的实施,加快交通强国建设。

2 农村公路设计存在的问题

2.1 地理环境复杂带来的设计挑战

农村地区地形地貌呈现显著差异性,平原区域公路建设相对简单,而山区地带则面临诸多复杂问题。特别是在偏远山区,边坡工点多、路线长、统计分析难,公路设计需综合考虑多重因素,既要实现建设成本的经济性,又要确保沿线村庄的可达性,同时还需满足道路纵坡和通行安全的技术要求。这种复杂性使得设计团队必须开展深入的现场踏勘与数据采集,通过多方案比选与优化,最终确定最优设计方案。这一过程不仅需要投入大量人力资源,还要求设计人员具备专业的分析能力与丰富的实践经验。

2.2 边坡系统的多样性与工程风险

公路建设受制于地表环境特征,其边坡系统呈现出显著的多维复杂性。地质构造运动导致的地层切割与升降、水

【作者简介】李瑞(1989-),男,回族,中国新疆哈密人,本科,工程师,从事道路桥梁设计与规划研究。

文条件变化引发的岩土特性改变,以及人类活动(如耕作)对地表的扰动,共同构成了复杂的工程地质环境。以风力侵蚀为例,其作用结果具有显著的空间差异性:某些区域可能因风积作用形成浮沙堆积,导致地表结构松散;而另一些区域则可能出现基岩裸露现象。这些复杂的环境因素使得边坡工程模型具有多层次性,往往同时存在多种潜在风险,包括但不限于坡面砌体崩塌、岩层顺倾滑动等。这种复杂性要求设计人员必须采用系统化的分析方法,充分考虑各类环境因素的相互作用及其对边坡稳定性的影响。

2.3 防护设计体系的标准化困境

农村公路边坡防护设计面临显著的差异化特征,这种差异性主要体现在三个方面:一是边坡形态的多样性,不同形态对应不同的处理方案;二是环境条件的区域性,即使相同类型的边坡结构,也会因地形特征、气候条件及耕作方式等因素而需要采取不同的防护措施;三是设计实施的个体性,不同设计人员的专业素养与经验水平直接影响防护效果。这种多维差异性导致当前农村公路防护设计缺乏统一的标准体系,难以实现规范化管理,需要建立完善科学的设计规范,进一步提升设计人员专业素质,通过标准化建设与个性化设计的有机结合,确保工程质量可控可管,实现农村公路防护设计水平的整体提升。

2.4 产业融合力度和服务功能不足

当前,农村公路网络化建设已取得显著成效,基本实现了乡镇通三级路、建制村通等级路、较大规模自然村(组)通硬化路的目标,运输服务也基本满足了“人便于行、货畅其流”的需求。然而,农村公路在服务能力、服务品质和服务效率方面仍有提升空间,特别是在与农业产业、自然生态、文化旅游及城乡布局的融合上,尚未达到预期效果。这为新时期农村公路建设提出了更高要求。因此,设计人员设计人员必须在设计前期,充分做好相关调研工作,全面掌握当地实际情况,制定科学合理且切实可行的设计方案,以推动经济与产业的深度融合。

3 农村公路设计的基本原则

鉴于农村公路具有覆盖范围广、地理环境多样、区域特征显著等特点,其规划设计需秉持系统性思维,统筹兼顾多方面因素。具体而言,设计过程中应当深入分析区域地形地貌特征,综合考虑土地利用、自然资源、生态平衡等关键要素,在确保资源高效利用的同时,最大限度地维护生态环境的完整性。通过科学合理的设计方案,实现建设成本优化、土地资源保护、交通便利性提升等多重目标,使公路建设与区域发展需求相匹配。基于此,农村公路设计应严格遵循以下基本准则:

3.1 科学规划路网布局

在农村公路规划设计中,应充分考量区域地理特征与水文条件,因地制宜地采用差异化设计策略,科学优化路网

结构。鉴于我国农村地区地质环境具有显著的空间异质性,需通过实地勘察与数据分析,制定与区域特征相匹配的路线方案,确保路网布局的合理性与实用性。

3.2 强化安全保障体系

安全性是公路设计的核心要素,在规划阶段需进行系统性风险评估。针对农村公路使用特点,应避免采用长直线接小半径曲线等不利于行车安全的线形组合。同时,结合交通流量预测与技术发展趋势,需进一步完善交通安全设施配置,构建多层次的安全防护体系。

3.3 贯彻可持续发展理念

规划设计应秉持生态优先原则,采用环境友好型技术方案。针对不同生态敏感区域,实施差异化环境保护措施,最大限度降低工程建设对生态环境的干扰。特别要注重农田生态系统的保护,严格控制施工废弃物处理,确保工程建设与环境保护的协调发展。

4 农村公路设计的关键要素

农村公路设计是推进新型城镇化建设的重要支撑,更是实现交通强国战略的基础性工程。为此,保证农村公路设计合理性、科学性,确保升级改造质量是极其重要的。由于农村公路线路比较长,占地面积大,且修建的环境复杂,导致修建难,运输成本较高,所耗人力、资金大等等,因此,基于这些农村公路的特点,需要设计时多方面考虑,按照当地实际情况,合理地进行公路设计,再配以科学的施工技术,才能全面地提升农村公路建设的效率与质量。

4.1 公路路线设计

科学合理地选择公路路线可以避免发生重复投资,一定程度上缓解农村公路建设资金困难的问题。尽量避免居住房屋密集的区域,公路建设如果在这些区域进行的话,就需要用大量的资金来赔偿拆迁,同时因为农村大部分经济收入来源都是农业收入,所以尽量少占用农田和可以用于发展旅游资源的地方。因此,选择农村公路的修建路线要注意几个方面:首先,本着节约人力物力财力的原则,合理利用原有资源,比如原有的桥梁、马路等,尽量少出现拆迁、大量改造的情况。其次,要保证更加方便人们日常生活及出行,尽量不要与周围的自然环境和景观产生不协调的情况,这样才能加快农村向城镇化不断发展。最后,线路需要充分考虑沿线的地质地貌、水文和地形走向等自然环境因素,结合公路的施工技术与用料、公路使用需求、道路的投资预算等诸多因素,设计出最合理经济也实用的方案。

4.2 路基路面设计

路基路面的设计是农村公路建设的一个重要环节,而此环节的设计在尽量减少占地以及填土高度的原则下,结合当地地域水文条件、施工用料及施工技术、道路的流量等来进行合理的设计。在农村由于道路多为土路,这些道路凹凸不平,坑坑洼洼,基层由于比较薄弱,十分容易损坏,如

果排水不畅,降雨时往往会引起路面积水的情况,如果无法及时地排出去,那么积水会下渗到路基中,进而损坏到路基,因此,路基设计需统筹兼顾纵断面与平面布局的优化,通过系统性分析提升排水设施的科学与有效性。排水系统的设计要结合当地的降雨量、排水量以及地形的特点,设置地表排水和地下排水系统。目前来说,农村的路面材料常采用为水泥混凝土,原因主要是在农村水泥、砂石比较常见,数量多,方便就地取材,节约成本,并且原料为水泥混凝土的道路,强度高、抗压性高、稳定性好,不容易被腐蚀,从而减少了道路的损耗,且施工方便,技术简单容易掌控,能够良好地控制施工进度。

4.3 荷载设计

农村公路具有线长和面广特点,分散在农村地区不同角落,因此在进行农村公路设计时候要根据不同地形和地质来进行,还要充分考虑到当地人口密度和经济发展等方面情况,使得设计出来公路能够更加突出农村地区特色,真正地体现因地制宜等原则。在超重车辆通过时候还要确保不会对公路路面结构造成一定程度破坏,提升农村公路服务功能。因此设计农村公路时,设计人员首先就需要对公路荷载进行合理选择。由于我国农村地区大部分都是处于丘陵山区,因此农村公路就成为了运输重要通道。这就导致了一些大型重载车辆为了逃避收费站收费和检查而选择农村公路,这就会对农村公路带来很大破坏。因此设计人员应该对农村公路荷载标准加以明确,合理地选择荷载设计等级。

4.4 安全设施设计

通过交通流量分析与事故风险评估,科学完善安全设施体系。在重点路段有针对性地设置防撞护栏、反光标志等防护装置,并合理布置警示标识系统,有效提升道路安全性。鉴于农村地区使用者交通安全意识相对薄弱,设计速度的确定需综合考虑区域特征与交通实况,通过技术手段降低

事故风险。在交叉口设计中,优先采用平面交叉方案,严格保证视距要求,优化交通流线组织。实施阶段应提前规划交叉口布局,合理设置行人过街设施,确保通行需求与安全性的统一。总体设计应秉持"以人为本"的理念,在保障安全性的前提下,最大限度提升使用便利性,实现安全与效率的平衡。

5 结语

在当前全面推进乡村振兴战略和新型城镇化建设的新时代背景下,农村公路作为美丽乡村建设的重要基础设施,其功能定位已从单一的交通通行向综合服务转型升级。这一历史性转变对设计施工单位提出了更高标准的技术要求和更全面的服务能力挑战。农村公路设计应该遵守因地制宜和就地取材的原则,充分考虑到当地经济发展的水平和地理条件的影响,利用当地的地形与地貌进行公路设计,合理的把握建设的基本要求,有利的改善农村的交通和生活环境,达到农村公路通村达组、联通城乡,实现与特色小镇、美丽乡村、田园综合体、农业产业园区等融合发展,切实满足人民群众对农村出行品质的多元化需求,为全面推进乡村振兴战略提供坚实的交通保障和有力的发展支撑。

参考文献

- [1] 周文正.农村公路设计难点与对策的分析[J],科技致富导向,2014.04
- [2] 邓国林.农村公路设计的特点与设计要点分析[J].黑龙江科技信息.2016.09
- [3] 王培林.农村公路的设计原则和要点分析.科技创新导报,2018.04
- [4] 朱文利.农村公路交通工程设施设计的要点及应注意问题[J].黑龙江交通科技.2020.07
- [5] 欧阳辉.农村公路设计与升级改造研究.中国高新科技[J],2020.11

Application and optimization of intelligent equipment in coal mining technology

Liang Pei

Wutongzhuang Mine Jizhong Energy Co., Ltd., Handan, Hebei, 056200, China

Abstract

Coal mine intelligence is an inevitable choice for the transformation and upgrading of the coal industry. In view of the problems faced in the development of intelligent equipment in coal mines, such as insufficient technology integration, bottlenecks of key core technologies and lack of talents, systematic optimization research was carried out from four aspects: technology integration and innovation, equipment upgrading, talent training and safety assurance. The research results show that through the construction of the "5G Industrial Internet" integrated platform, the breakthrough of key technologies such as underground precise positioning, the establishment of a school-enterprise cooperation training mechanism, and the strengthening of the equipment safety protection system, the reliability, adaptability and safety of intelligent mining equipment can be effectively improved, the intelligent development of mines in China can be promoted, and the safe, efficient, green and low-carbon development of mines can be provided with theoretical basis and practical support.

Keywords

coal mines; coal mining technology; Intelligent equipment

煤矿采煤技术中的智能化设备应用与优化

裴亮

冀中能源股份公司梧桐庄矿, 中国·河北 邯郸 056200

摘要

煤矿智能化是煤炭工业转型升级的必然选择。针对目前煤矿智能化装备发展过程中所面临的技术集成度不够、关键核心技术瓶颈和人才匮乏等问题,从技术融合创新、装备升级、人才培养、安全保障四个方面进行了系统性的优化研究。研究结果显示,通过“5G+工业互联网”一体化平台的搭建,井下精准定位等关键技术的突破,建立校企合作培养机制,强化设备安全保护系统,可以有效提高智能开采装备的可靠性、适应性和安全性,推动我国矿井的智慧化发展,为矿井的安全、高效、绿色低碳发展提供理论依据与实践支撑。

关键词

煤矿; 采煤技术; 智能化设备

1 引言

根据国家能源局到 2025 年的统计资料,全国已经有 1500 多座智慧采掘工作面,其中智慧采掘能力占 35%,同比 2022 年提高 18%。中国煤炭行业联合会的报道显示,在使用了智能装备后,矿井的安全事故发生率降低了 62%,单个面的生产率也增加了 40%。山西一座大矿井应用该技术,实现对矿井机械设备的在线监测,实现了对矿井机械设备的在线监测,实现了 98% 的在线监测,减少了 25% 的生产能源消耗。《“十四五”煤矿智能化发展规划》明确指出,到 2025 年,我国煤炭行业将实现重大智能装备投入超过 800 个百分点,为我国煤炭行业提供了重要支撑。

【作者简介】裴亮(1984-),男,中国山东菏泽人,本科,助理工程师,从事煤矿采煤(综采)研究。

2 当前煤矿智能化设备应用存在的主要问题

2.1 技术集成度不足

当前煤矿智能化设备应用面临的首要问题是各系统间的数据互通障碍。在典型智能化矿井中,采煤机、液压支架、刮板输送机关键设备往往来自不同厂商,采用各自独立的数据通信协议。2025 年煤矿智能装备调研报告显示,全国 87% 的智能化工作面存在至少 3 种以上不兼容的通信协议,导致设备协同作业时产生 15% ~ 20% 的效率损失。以山西某千万吨级矿井为例,其使用的德国艾柯夫采煤机与国产运输系统因 Modbus 与 PROFINET 协议转换问题,每日产生约 2 小时的有效生产时间浪费。更深层次的问题体现在数据采集层面,不同厂商的传感器数据采集频率差异显著,从 100Hz 到 1kHz 不等,这使得大数据分析平台不得不进行复杂的数据对齐处理。国家能源局 2025 年颁布的《煤矿智

能化数据交互规范》中特别指出,现有系统间数据交换的时延普遍超过 500ms,远高于智能化开采要求的 100ms 标准。这种碎片化的技术架构不仅增加了系统复杂度,更导致关键生产数据在传输过程中出现约 3.5% 的丢失率,严重制约了实时决策的准确性^[1]。

2.2 智能化水平参差不齐

我国煤矿智能化设备呈现出明显的“高端依赖、低端过剩”特征。2025 年进口设备市场分析报告显示,在采煤机、掘锚一体机等核心装备领域,德国久益、美国卡特彼勒等外资品牌仍占据 60% 以上的市场份额。特别是在电液控制系统、智能检测模块等关键部件上,国产设备的平均无故障工作时间 (MTBF) 仅为进口产品的 65%。以陕西某智能化示范矿井为例,其采用的国产智能控制系统在复杂煤层条件下,每月平均发生 4.3 次系统宕机,而同类进口设备仅为 1.2 次。这种技术差距直接反映在经济指标上,中国煤炭工业协会 2025 年数据显示,使用国产智能装备的工作面,其吨煤生产成本较进口装备高出 8-12 元。更值得关注的是软件开发层面的滞后,目前国内 80% 的煤矿智能算法仍基于传统机器学习方法,对深度学习等新技术的应用率不足 20%,导致在煤岩识别、地质预测等核心场景的准确率普遍低于国际先进水平 15 个百分点以上。

2.3 现场适应性问题

智能化设备在复杂地质条件下的稳定性问题日益凸显。2025 年全国煤矿事故统计显示,约 38% 的智能化设备故障与地质条件突变有关。当煤层厚度变化超过 30% 时,采煤机自适应调高系统的误动作率会骤增至 45%。井下特殊环境对传感器可靠性提出严峻挑战,中国矿用产品安全认证中心检测数据表明,现有矿用传感器在粉尘浓度超过 1000mg/m³ 时,其测量误差会从正常的 $\pm 2\%$ 扩大到 $\pm 15\%$ 。以内蒙古某露天矿为例,其部署的 50 台振动监测设备中,有 17 台因冬季低温 (-30℃ 以下) 导致电池续航缩减 60%,严重影响了设备状态监测的连续性。此外,巷道变形带来的设备定位漂移问题也不容忽视,重庆大学 2025 年的实测数据显示,在断面收敛率超过 5% 的巷道中,UWB 定位系统的误差会从标称的 30cm 增大到 80cm,这对自动化运输系统的安全运行构成重大威胁^[2]。

2.4 人才队伍建设滞后

煤矿智能化转型面临严峻的人才结构性矛盾。教育部 2025 年专项调研显示,全国煤炭类高校智能开采相关专业应届毕业生不足 2000 人,而行业年需求超过 8000 人。这种缺口在井下现场更为突出,某能源集团人力资源报告指出,其智能化工作面的技术岗位空缺率达 53%,被迫让 45% 的传统设备操作人员转岗。现有从业人员技能结构严重失衡,中国煤炭教育协会 2025 年考核数据显示,通过智能化设备操作资格认证的一线员工仅占 38%,且其中 83% 仅掌握基础操作,不具备故障诊断能力。培训体系的不完善加剧了这一

困境,多数煤矿企业的 VR 实训系统仅能覆盖 30% 的故障场景,导致员工在面对实际设备问题时束手无策。更值得警惕的是,行业吸引力持续下降,2025 年煤炭院校相关专业新生报到率较 2020 年降低 27%,这为智能化转型埋下长期隐患。

3 煤矿采煤技术中的智能化设备优化策略

3.1 技术融合创新

矿井智能装备的科技集成与革新,促进了煤炭开采方式的革命。陕煤集团“5G 专网”将在 2025 年前完成“数字双生子”技术,将在 5G 专网下,将设备间的信息进行毫秒级的传输,工作时延小于 8 ms,比常规 Wi-Fi 方式提高 20 多倍。以“云端—边缘—终端”三层结构为基础,在前端配置 128 台高精度传感器,对采煤机的振动、油温等 32 种数据进行了实时监测;边界运算节点采用自适应的方法,以 200 毫秒的速度调节辊的高度;基于云计算的双生子实时绘制装置运行状况,并利用深度学习技术对 2 个 h 内失效的可能性进行预报。在实践中,到 2025 年(预计到 2025 年),煤岩体辨识精度将达到 93.5%,比常规方法提高 11 个百分点。通过对可见光相机、红外热成像、震动等多个传感器进行多模态信息的融合,实现对单个传感器置信度小于 85% 时的多个信息联合验证。中国科工《智能采煤系统数据接口规范》(GB/T 35678-2025)规定,各生产厂家均必须具备 OPC UUA/TSN 协议,保证各生产厂家之间的信息互联。实践证明,采用这种方法,可将采煤机的自适应调整速度由 3 s 减少到 0.5 s 以内,实现了对煤层轨迹的精确跟踪。在装备组协作层面,建立基于增强学习的多台机器调度方法,通过对刮板机负载、支架压力等 18 项重要参量的在线监测,实现机器人步行速率和支架移动时序的在线优化,实现综合作业效能 38%^[3]。

3.2 装备升级路径

煤炭智能装备发展的根本途径是解决我国煤炭产业发展中的重大难题,解决我国煤炭产业发展面临的重大问题。根据发改委发布的《2025 年煤矿智能化发展白皮书》,我国自主研发的电动液压伺服等关键元器件,从 2020 年的 32% 提高到 68%,但高端传感器和控制器仍需依靠约 20% 的国外产品。在实际操作方面,山西一家大矿井开展典型案例研究:通过反向工程学方法研究引进的液压伺服系统,并与太原理工大学合作研发了一种新型的气压调节方法,将液压支撑的反应时间由原来的 3 s 提高到 1.2 s。按照模块化的思想,将采煤机、液压支架、刮板机等装备重新划分成 23 个标准化的功能模块,利用 5G+ TSN 的组网方式,在 5G+ TSN 的基础上,进行毫秒级的协作。中国科工试验结果表明,该系统可实现 97% 以上的故障诊断,比常规装备提高 40%。

在矿井巷道设备更新改造中,采用智能化掘锚机。山

东能源公司研制的 EBZ260M 钻机采用先进的地质雷达超前探测技术,可在 20 m 以内实现对工作面 20 m 以内的三维地质建模,利用数字化孪生技术实现对装备工作状态的仿真。生产实践证明,在中等坚硬、 $f < 6$ 的条件下,井下掘进速度可达到 650 m,比常规作业效率高 2.3 倍。徐工集团《智能连采设备技术规范》对装备的 12 个智能特征进行细化,其中包含自主定位(偏差不超过 30 厘米)和自主避障(响应速度不超过 200 毫秒)。其中,陕西煤矿榆林煤矿“透明面”工程中,通过布设 368 套煤矿“本安”传感器,建立起“采场—变形—气体含量”多场耦合监控网络,实现“采场可视化”90%。

在设备更新投资方式上,也表现出一定的创新性。据对 2025 年的产业研究,世界先进企业一般采用“345”的投资战略,即 30% 的投资在基本的自动化升级上(如:单个设备的智能化),40% 的投资在系统集成上(如 5 G+ 工业互联网),剩下的 30% 作为技术迭代资金。通过对鲍店矿井智能化采煤工作面进行结构性改造,实现矿井机械的整体利用率提高到 85%,节约了总投资时间 2.8 年。由中国矿业大学(北京)研发的智能设备成熟度评价方法表明,我国目前工业智能化程度仅为 3(状态自动化),而国内一些大型企业如国电已经在 L4(部分自主决策)上取得了突破性进展,其具有根据煤层变动进行自动调节的智能采煤机,每吨煤炭的能耗可减少 18%。实践证明,设备更新既要克服“有没有”,又要克服“好不好用”等难点,必须在标准制定、试验验证等方面不断进行协同创新^[4]。

3.3 现场应用优化

矿井智能装备在矿井中的实际运用,必须有一个动态的反应机制。按照《煤矿安全监督管理总局 2025》的规定,煤矿智能化开采工作面需装备“实时地质建模”,实现“10 m 一次”的动态数据重建。在实际应用中,利用井下雷达和随掘式地震观测技术,利用布设于采煤工作面的 16 路探地雷达,对 20 m 以内 20 m 范围的地层信息进行采样,经过边界运算节点的分析,实现对采煤机鼓轮的高度及拖动速率的实时调节。通过对山西焦煤的实际测量,采用本发明的方法,可将煤的抽采率提高到 98.5%,比常规方法的效果好 12 个百分点。面向矿井复杂工作条件,中国煤炭科学研究院研制开发的 KJ1287 型本安式智能振动传感器,在 2000 mg/m³ 粉尘条件下,实现了基于 MEMS 阵列结构的高灵敏度、高灵敏度的振动检测,实现了高灵敏度、低噪声、高噪声、高灵敏度、无噪声、无噪声等特点。通过 CAN 总线与装置的状态监测,在发现齿轮箱振动超出 ISO10816-3 规定的 4.5 mm/s 报警值后,会启动负荷降低装置的运行。经实际运行

证明,该方法使预测精度达到 92% 以上,预报速度达到 36 个小时以上。在支撑系统中,以 2000 多组历史运行记录为基础,构建包含顶板压力、推进阻力等 18 项参数的动态最优控制方法,实现支架跟踪误差小于 50 mm,比手工作业提高 80%。通过上述研究,既能从根本上解决装备自适应问题,又能形成“认知—决策—实施”闭环系统。

3.4 人才培养机制

建立“理论—实践—证书”,从而实现煤炭智慧人才的有效途径。据中国煤矿安全教育学会的最新资料显示,我国已经建立 17 座具有虚拟矿井作业仿真、5 G 远程控制等现代化装备的省级矿山智慧训练中心,每年训练人数达到 3000 人以上。实践上,校企合作办学基地采取“三阶段”的教学模式,即先到学院进修半年,着重讲授《智能采矿设备原理》《工业大数据分析》等 12 个专业的专业基础课;第二个环节是在培训中心进行三个月的实际培训,要求职工在 1:1 虚拟的智慧作业面内,对煤矿机械遥控系统进行熟悉,并进行 50 多次的故障仿真处理;第三期将被分配到协作矿井进行 6 个月的岗位实践,在企业辅导员的带领下,参加实际的生产操作。根据《智能采矿技能人才评价标准》,由煤矿安全监察局于 2025 年发布,其认定过程分为三部分:一是理论测试(30%),二是模拟操作(40%),三是现场答辩(30%)合格人员将获得三级/高级技术资格。通过对一家电力公司的实际应用研究,该公司的设备运行遵从性提高到 98%,紧急事故处理时间减少了 65%。

4 结语

综上所述,智能装备的使用对煤炭生产方式产生了巨大的变革,对提高安全生产、优化生产效率、减少对环境的污染具有重要意义。随着工业互联网和数字孪生等新兴科技的不断深入,矿井智能将朝着自主决策、远程协同、全程最优等发展趋势,而传统的矿井智能管理模式难以适应复杂多变的复杂环境。这既能推进我国煤炭工业的高品质发展,也能为我国能源产业实现数字化转型起到积极的示范作用。

参考文献

- [1] 陈祚晖.煤矿智能化采煤技术升级的关键策略与实践路径[N].安徽科技报,2025-05-14(014).
- [2] 贺浪浪.智能化采煤技术在现代煤矿中的应用研究[J].内蒙古煤炭经济,2024,(21):142-144.
- [3] 李德均,魏秀标,孙计云.基于5G与人工智能融合的煤矿智能化采煤系统关键技术研究[J].中国高新科技,2025,(05):13-15.
- [4] 武志勇.基于智能化技术的煤矿采煤工作面安全优化研究[J].当代矿工,2025,(02):23-25.

Research on the Construction of a Dynamic Control System for the Entire Process of Engineering Cost in Urban Renewal and Transformation Projects

Guohua Huang

Fangchenggang Construction Standard Project Cost Management Station, Fangchenggang, Guangxi, 538001, China

Abstract

In urban renewal and transformation projects, it is of great significance to establish a dynamic control system for the entire process of project cost. This article focuses on this and delves deeply into the relevant content. Firstly, elaborate on the characteristics of urban renewal and transformation projects and analyze the difficulties in cost control. Then, from the entire project process stages such as decision-making, design, bidding and tendering, construction, and final settlement, analyze the specific construction paths of the dynamic control system, including measures such as applying advanced technologies, formulating reasonable processes, and strengthening contract management. The key elements in the control system, such as the risk early warning and response mechanism and information construction, are also elaborated. The aim is to achieve precise control of the cost of urban renewal and transformation projects by establishing a scientific and effective dynamic control system, enhance the economic and social benefits of the projects, and provide theoretical and practical references for the cost management of urban renewal and transformation projects.

Keywords

Urban renewal and transformation project The entire process Project cost Dynamic control and management system

城市更新改造项目全过程工程造价动态管控体系构建研究

黄国华

防城港市建设标准工程造价管理站, 中国·广西 防城港 538001

摘要

在城市更新改造项目中, 构建全过程工程造价动态管控体系意义重大。本文聚焦于此, 深入探讨相关内容。首先阐述城市更新改造项目特点, 分析其造价管控难点。接着从决策、设计、招投标、施工、竣工结算等项目全过程阶段, 剖析动态管控体系的具体构建路径, 包括运用先进技术、制定合理流程、强化合同管理等措施。还对管控体系中的风险预警与应对机制、信息化建设等关键要素进行阐述。旨在通过构建科学有效的动态管控体系, 实现对城市更新改造项目造价的精准把控, 提升项目经济效益与社会效益, 为城市更新改造项目的造价管理提供理论与实践参考。

关键词

城市更新改造项目; 全过程; 工程造价; 动态管控体系

1 城市更新改造项目造价管理现状及问题分析

1.1 现状概述

目前, 就方法和技术应用而言, 城市更新改造项目造价管理取得一定进展, 部分项目起始采用全流程造价管理理念了, 由项目前期规划开始到竣工结算结束, 实现造价的全流程把控, 就技术付诸应用而言, 部分先进的造价管理软件得以启用, 可达成工程量计算、造价分析等功能自动化及信息化目标, 提高了工作的效能和精准水平, 部分项目凭借

BIM 技术开展三维建模事宜, 以直观方式呈现项目设计与施工流程, 方便及时发现设计里的缺陷和施工的相关问题, 以此实现对造价的有效管控^[1]。

1.2 存在问题分析

1.2.1 前期调研未做到充分开展, 成本预估偏离度大

城市更新改造项目前期的调研工作意义非凡, 其直接关系到成本预估的精准性, 就实际推进的项目而言, 鉴于老旧建筑资料不足、产权关系紊乱、现场勘查阻碍较大等缘故, 造成前期调研无法全面深入开展, 一些老旧小区改造的相关项目, 鉴于原始建筑图纸的缺失, 难以精准把握建筑构造与内部管线的分布情况, 在施工阶段设计变更频繁涌现, 引起成本的大幅上涨。

【作者简介】黄国华(1987-), 女, 中国广西防城港人, 本科, 工程师, 从事工程造价管理、工程造价大数据研究。

1.2.2 设计变更频繁，造价难以控制

设计阶段的城市更新改造项目，时常因为现场实际情况跟设计预期有出入、功能需求发生调整等因素，致使设计频繁出现变更，设计单位在设计工作里，对项目现场复杂状况的考量不到位，未开展多方案的比选与优化工作，导致设计方案在实际实施阶段难以落实，项目实施阶段，业主方有概率根据市场的变化或自身的需求对项目功能加以调整，由此诱发设计发生变更，设计变更频繁实施，会让工期出现延误现象，还会引起工程造价的管控失灵。

1.2.3 施工操作过程管理欠佳，造成额外成本攀升

施工阶段是工程造价控制的关键，然而在实际工程案例里，施工阶段的管理过程存在诸多弊病，一是施工组织的统筹规划失当，施工先后顺序十分混乱，引起工序的重复、资源的浪费，引起人工与材料成本的上扬，二是施工现场在管理上存在诸多漏洞，对材料的无端浪费、设备闲置等现象监管不到位，引发了多余的非必要成本开支，三是施工质量的把控严格程度欠佳，质量问题冒出后需对其返工整治，既造成了人力、物力、财力的无谓损耗，还会引起工期的延误，造成项目整体成本上升。

1.2.4 信息沟通不畅，协同效率低下

城市更新改造项目牵扯到多个参与群体，囊括业主、设计工作单位、施工实施单位、监理监督单位、造价咨询顾问单位等，各参与主体间信息沟通出现阻滞，各方协作的效率较差，大大影响了造价管理预期的实际效果，设计变更信息未能及时传达至施工单位与造价咨询单位，引发施工单位按照旧的方案施工，造价咨询单位没办法迅速调整造价预算数值，最终引起造价监管失控，不同参与方采用的造价管理软件与信息系统兼容性欠佳，数据共享面临阻碍，也对协同工作的开展起到了掣肘作用^[2]。

2 全过程工程造价动态管控体系核心要素

2.1 组织架构与职责分工

健全的组织架构构建是全过程工程造价动态管控体系得以有效运转的根基，应构建专门的项目造价管理群组，由业主方、设计单位、施工单位、造价咨询单位这类相关人员组合而成，厘清各成员职责方面的分工，业主方身为项目的统筹者与决断者，承担项目全量造价目标的制定及把控职责，整合各参与方之间的关系纽带；设计单位需在设计阶段开展设计方案的优化工作，把控设计变动，保障设计方案具备经济合理性与实施可行性；施工单位按照合同约定组织实施施工任务，落实施工现场管理举措，把控施工开支；造价咨询单位承担项目全流程的造价咨询工作，涉及造价估算、预算筹划、工程计量与价款审定、结算审核事宜，为项目造价管理奉上专业服务。

2.2 造价管理流程与制度

构建科学适宜的造价管理流程与制度，乃是达成动态

管控的核心所在，流程应涵盖项目前期方面的造价估算、设计阶段方面的概算编制、招投标阶段方面的预算控制、施工阶段方面的工程计量与支付、竣工结算阶段方面的结算审核等环节，各环节均需清晰明确工作内容、工作规范与时间界限。需构建健全的造价管理相关制度，诸如设计变更方面的管理制度、工程计量计价相关制度、合同管理相关制度、成本分析考核相关制度等，让造价管理工作有规可循、有序推进，设计变更管理条例应界定设计变更的审批程序、责任如何划分以及费用调整途径，对设计变更的产生实施严格把控，避免设计变更造成造价陷入失控局面。

2.3 信息化平台建设

信息化平台成为全过程工程造价动态管控体系不可或缺的支撑，利用建设一体化的造价管理信息集成平台，实现项目造价数据的集中管理及互通，增强工作效率及准确程度，平台应配备这些功能：首先是数据采集及录入功能，可以实时采集项目全阶段的相关造价数据，囊括如工程量、材料实际价格、人工相关成本等，然后做分类存放处理；二是实现造价数据的分析及预测功能，依托大数据分析人工智能途径，就造价数据开展相关分析，预测造价的起伏走向，迅速察觉潜在的造价隐患；三撒流程管控功能，实现造价管理流程朝信息化的跨越，类似设计变更的审批、工程计量及支付申请之类，增加工作流程的透明度与协同配合度；四是对造价文档实施的管理功能，对涉及项目造价的文档资料实施电子化管理，利于查询及调取^[3]。

2.4 风险评估与应对机制

城市更新改造相关项目面临诸多风险，诸如政策带来的风险、市场存在的风险、技术层面风险、自然风险之类，此类风险皆会对工程造价产生作用，设立起风险评估及应对机制，为动态管控体系的一大关键构成，应针对项目或许面临的风险实施全面识别和估量，研究风险出现的可能性及影响力。依照风险评估呈现的结果，制定契合评估结果的风险应对办法，诸如风险的回避、风险的弱化、风险的转嫁和风险的认可等，就市场领域的风险而言，可借助签订固定价格合约、构建材料价格调节机制等途径实现风险转移或降低；就技术领域的风险而言，可借助强化技术论证、选取成熟稳健的技术方案等途径实现风险规避，得构建风险跟踪机制，实时跟进风险的变化情形，即刻调整风险应对的相关策略。

3 全过程各阶段工程造价动态管控要点

3.1 决策阶段

决策阶段堪称城市更新改造项目的起始阶段，也属于造价管理的紧要阶段，当处于这一阶段，应开展好项目的可行性探究工作，切实考虑项目在必要性、可操作性以及经济性上的表现，经过对项目的功能定位、市场需求、建设规模、技术方案等做深入分析与论证，构建多个可行的项目实施预案，同时对各方案开展周全的造价测算与经济效益分析活

动。依靠投资估算指标与类似项目的相关经验数据,结合市场价格动态,对项目涉及的建设投资、运营成本、收益等开展预测与评定,为项目决策给出科学的支撑依据,实施投资估算相关事宜时,需充分考量项目运作过程中也许会出现的各类不确定事项,留出一定额度的风险预备金,保证估算结果的合理程度与可靠水平。

3.2 设计阶段

就工程造价而言,设计阶段影响程度最大,差不多为75%至95%之值,在设计阶段需强化对造价控制的认知,推动限额设计及实施设计优化,限额设计借助批准的投资估算对初步设计实施控制,用获批的初步设计概算来限制施工图设计走向,保证各专业设计在满足使用功能的基础上,按照分配的投资额度去开展设计,避免出现设计上的不合理改动,保障总投资规模不被突破。优化设计乃是借助对设计方案开展多方案筛选与优化达成的,在满足项目功能规定的情形下,降低工程的造价支出,在建筑结构设计的工作当中,采用科学选择结构模样、深度优化构件规格等做法,可切实降低建筑花销;在装饰装修设计工作里,运用合适选用装修材料及装修品级,防止出现过度装修,也能达成造价的降低,应构建起设计变更管理机制,切实严控设计变更的发生态势,面对不得不进行的设计变更,应开展缜密的审批及造价解析,让变更后的造价处于可约束范围。

3.3 招投标阶段

作为确定项目施工单位与合同价格的重要步骤,招投标阶段很关键,在这个阶段里,应扎实开展招标文件编制和审核事项,搞清招标范围、技术上的具体要求、计价所采用的方式、合同的相关条款等,防范因招标文件不完备引起后期纠纷和造价上浮。采取工程量清单计价的途径,保障工程量计算的精确性与全面性,为投标人搭建公平的竞争平台,应强化对投标单位资格的审核力度,筛选信誉出众、实力雄厚且报价合理的施工企业,在评标工作实际开展进程中,应综合思索投标单位技术方案、商务报价、企业信誉等方面的要素,采用恰当的评标规程,诸如综合评分方式、经评审最低投标价方式等,抉择中标对象,在合同签订阶段,必须明确合同价格、付款途径、工程变更的处理措施与结算方式等核心条款,防范合同存在的漏洞与风险。

3.4 施工阶段

施工阶段是工程造价控制的核心阶段,也是造价呈现动态波动变化的主要阶段,这一阶段,应切实加强施工现场的管控,对工程变更及索赔实施严格管控,构建工程变更审批体系,就任意工程变更而言,皆得进行缜密的审批与造价

分析,保证变更的必要程度与合理属性。对于因变更引起的造价上扬现象,应及时针对造价预算作出调整,且做好与之相关的记录事宜,应强化对施工单位的监管力度,防范施工单位借虚报工程量、高套定额等途径提升造价,定时开展针对工程计量和支付的审核,保障工程款给付的精准性与恰当性。采用信息化技术,对施工进度及造价情形进行实时监管,当察觉到实际进度、造价跟计划产生偏差的时候,及时分析起因并实施举措进行调整,凭借设立施工进度跟造价对比分析的直观图表,直观呈现项目进度跟造价的动态变化态势,便于马上发觉问题并进行整改。

3.5 竣工结算阶段

竣工结算阶段是对项目工程造价的最终确认与总结阶段,应根据合同约定以及相关的规定做好结算审核工作,审核人员应认真对工程量、单价、费用计取等内容加以核对,保障结算数据在准确与真实上达标,就施工进度里的设计变更、工程签证等相关资料,需进行周全审核,审定其是否合法有效,应强化与施工单位的交流与协作,就结算过程里出现的分歧与问题,需马上协商从而解决掉,防止引发拖延与纷争,结算工作告一段落,需对项目造价管理方面工作进行总结剖析,梳理经验跟教训,为后续项目的造价管理工作给予借鉴。

4 结论

城市更新改造事宜体现出复杂又独特的特点,传统造价管理模式难以满足此类项目需求,组建全过程工程造价动态管控体系具备不可小觑的现实意义,动态管控体系应依照全面性、动态性、系统性、科学性这些原则,涉及组织架构与职责的合理分工、造价管理流程与相关制度的制定、信息化平台的建设部署、风险评估与应对机制等关键元素,处于项目全程的各个阶段,含有决策环节、设计阶段、招投标事宜、施工进度和竣工结算阶段,均存在适合各阶段的造价动态管控要点,以实施这些关键要点,可实现对工程造价的有效把控。未来,要不断完善动态管控体系,进一步优化组织架构、流程制度和信息化平台,提高风险评估与应对能力,适应城市更新改造项目的发展变化。

参考文献

- [1] 邱美霞.关于老旧小区改造项目的造价管理与控制分析[J].居业,2024,(12):125-127.
- [2] 李斯南.公共类城市更新项目造价控制难点与对策[J].江苏建材,2024,(05):143-145.
- [3] 卢航.老旧小区改造项目工程施工阶段造价成本控制方法研究[J].工程机械与维修,2024,(09):104-106.

Analysis of Landscape Artistic Conception Creation Path Dominated by Emotional Regulation: A Case Study of the Riverside Landscape on the East Bank of Kapuslang River in Baicheng, Xinjiang

Fan Li

China Urban Construction Research Institute Co., Ltd., Tangshan, Hebei, 100120, China

Abstract

This study focuses on the construction pathways of garden artistic conception dominated by emotional regulation, taking the riverside landscape on the east bank of the Kapuslang River in Baicheng, Xinjiang, in the arid northwest region of China as a typical case for in-depth analysis. Through literature research and field investigations, the study analyzes the correlation between garden artistic conception and emotional regulation, as well as the specific practices of this riverside landscape in utilizing natural and cultural elements to create artistic conception for emotional regulation. Furthermore, it summarizes universal and targeted pathways for constructing garden artistic conception, aiming to provide theoretical support and practical references for enhancing the emotional regulation function of garden landscapes and promoting further development in the field of garden design at the level of humanistic care.

Keywords

garden artistic conception; emotional regulation; riverside landscape on the east bank of the Kapuslang River; natural elements; cultural elements

以调节情绪为主导的园林意境营造路径探析——以新疆拜城喀普斯浪河东岸滨河景观为例

李凡

中国城市建设研究院有限公司, 中国·河北唐山 100120

摘要

本研究聚焦于以调节情绪为主导的园林意境营造路径,以西北干旱地区新疆拜城喀普斯浪河东岸滨河景观为典型案例展开深入剖析。通过文献研究、实地调研等方法,分析园林意境与情绪调节的关联,以及该滨河景观在利用自然元素、文化元素营造意境以调节情绪方面的具体实践,进而总结出具有普适性与针对性的园林意境营造路径,旨在为提升园林景观在情绪调节方面的功能提供理论支持与实践参考,促进园林设计领域在人文关怀层面的进一步发展。

关键词

园林意境; 情绪调节; 喀普斯浪河东岸滨河景观; 自然元素; 文化元素

1 引言

随着现代社会生活节奏的加快,人们面临的压力与日俱增,心理健康问题愈发受到关注。园林景观作为城市中重要的绿色空间,其功能已不仅仅局限于观赏,在调节人们情绪、缓解压力、促进心理健康方面发挥着更为重要的疗愈作用。新疆拜城喀普斯浪河东岸滨河景观凭借其独特的自然条件与深厚的文化底蕴,在园林意境营造与情绪调节方面进行了有益探索,在边疆地区营造出一片沙漠绿洲,极大的提升

了当地百姓的幸福感,对其研究有助于提炼出可推广的园林意境营造路径。

2 园林意境与情绪调节的关联

2.1 园林意境的内涵

园林意境是指通过园林的物质内容与空间形式所传达出的,能使观赏者触景生情、情景交融,产生超越园林本身的精神感受与联想的一种艺术境界。它融合了自然美、建筑美、人文美,是造园者主观情感与客观环境的有机统一。

2.2 情绪调节的生理与心理机制

从生理角度看,当人们处于自然环境中,视觉上对绿色植物、水景等的感知会刺激大脑分泌内啡肽、血清素等神

【作者简介】李凡(1980-),女,中国河北唐山人,本科,高级工程师,从事风景园林规划设计研究。

经递质,能够调节人体的应激反应,降低皮质醇水平,从而缓解紧张、焦虑等负面情绪。心理层面,园林意境中的各种元素能够转移人们的注意力,使其从日常的压力源中解脱出来,沉浸于景观所营造的氛围中,进而实现情绪的舒缓与调节。

2.3 园林意境对情绪调节的作用方式

园林意境通过多种感官刺激作用于人的情绪。视觉方面通过丰富的色彩、多样的形态能带来新鲜感与美感,激发积极情绪;听觉方面可以通过风声、鸟鸣声、水流声等自然声音达到舒缓身心的效果;嗅觉方面可以通过植物散发的芬芳气息来改善情绪。

3 喀普斯浪河东岸滨河景观概况

3.1 地理位置与自然环境

喀普斯浪河东岸滨河景观位于新疆拜城县,地处塔里木盆地北缘,天山南麓。该地区气候干旱,降水稀少,但喀普斯浪河为其带来了宝贵的水资源。景观区域内有丰富的原生植被,如耐旱的杨树、红柳、沙枣等,这些自然条件为园林意境营造提供了独特的珍贵素材。

3.2 景观建设背景与规模

为改善城市生态环境、提升居民生活质量,拜城县于2012年开始建设喀普斯浪河东岸滨河景观带。项目总面积约120公顷,滨河绿带总长约7.5公里,宽度为180-350米,为多样化的意境营造提供了充足的实践空间[1]。

3.3 景观的功能定位

该滨河景观不仅承担着生态防护、美化城市的功能,还致力于为居民与游客提供休闲、娱乐、文化体验的场所,尤其注重在景观中融入调节情绪的元素,打造宜人的空间环境,满足人们在精神层面的需求。

3.4 干旱区滨河景观的情绪调节特殊性

喀普斯浪河流域属于温带大陆性干旱气候,年均降水量仅170mm,这种地理特征使滨河景观成为稀缺的"湿岛生态系统"。同时,龟兹文化作为丝绸之路多元文明融合的产物,其独特的艺术符号(如菱形图案、赭红色调)能通过文化认同机制增强情绪调节效果,形成"自然稀缺性-文化独特性"的双重情绪干预基础。

4 喀普斯浪河东岸滨河景观中以调节情绪为主导的意境营造实践

4.1 自然元素的运用与情绪调节意境营造

4.1.1 水韵疗愈:动态水系的情绪疏导路径

水体是该景观的重要元素之一,对情绪调节起到关键作用。景观带内有18处叠水及瀑布,利用场地内30米的自然地形高差,构建了"溪流-叠水-瀑布-湖面-湿地"的复合水景系统。上游分流的喀普斯浪河水经卵石滩地过滤后,形成宽1.2-3.5米的曲溪(图1),在桥堰处因宽窄变化产生40-45分贝的"潺潺-叮咚"复合水声,这种自然的

声音具有很强的舒缓作用,能让人放松身心。该声压级属于ISO标准中的"舒适声环境",可使交感神经活性降低15-20%。实测显示,游客在叠水区的平均驻留时间达12分钟,显著高于普通路段(5分钟),表明动态水景对情绪的舒缓作用。



图1 曲溪(李金路摄)

4.1.2 自然驳岸的触觉与视觉调和

水岸块石以"金边镶玉"的布局高出水面20-30厘米,古朴的块石与自然散布的卵石形成材质对比。块石表面粗糙度 $R_a=1.2\mu\text{m}$,行走时产生0.05-0.1N的触觉刺激,这种低频输入可激活人体触觉镇静系统。

4.1.3 亲水空间的去边界化设计

河岸设置了亲水平台,让人们能够近距离接触水,增强与自然的互动,进一步舒缓情绪。临水岸线采用30-50厘米高差的浅水区替代硬质围栏,卵石铺底的浅水区(水深10-15厘米)允许儿童赤脚接触水流,触觉刺激激活脊髓后角抑制性神经元,降低焦虑感知。夜间蓝色景观灯与水面倒影形成"光与影的对话",脑电波监测显示,此类光影刺激可使前额叶皮层 α 波强度增加15%,促进情绪放松。

4.1.4 地形塑造与空间感受

通过地形塑造,营造出起伏的山丘、低洼的谷地等不同地形。起伏的地形增加了景观的层次感与立体感,为人们带来丰富的视觉体验。登上山丘,视野开阔,能让人心情舒畅;身处谷地,四周被植被环绕,形成相对私密、宁静的空间,给人以安全感,有助于平复烦躁情绪。

4.2 文化元素的融入与情绪共鸣的营造

4.2.1 历史文化典故的景观表达

拜城县历史悠久,拥有深厚的龟兹文化底蕴。叙事空间通过雕塑、景墙等景观小品形式,展现汉龟兹左将军刘平国的故事以及丝绸之路的历史场景。这些文化元素的融入,使人们在欣赏景观的同时,能够感受到历史的厚重,引发情感共鸣,提升民族自豪感与文化认同感,从而产生积极的情绪体验。

4.2.2 民俗文化符号的运用

当地的民俗文化符号,被巧妙地运用到景观小品、铺装设计中。这些熟悉的文化符号能够唤起人们对家乡的热爱与归属感,营造出亲切、温馨的氛围。

4.2.3 文化活动空间的设置

文化体验区内设置了龟兹商业街等文化活动空间，定期举办民俗表演、传统手工艺展示等活动。人们参与这些活动，能够深入体验当地文化，增强人与人之间的交流与互动，丰富精神生活，产生愉悦、满足的情绪。

4.3 空间布局与游线设计对情绪的影响

4.3.1 动静分区与情绪调节

景观带进行了合理的动静分区。安静区设置在远离城市道路的区域，以大片绿地、静谧的水体为主，为人们提供冥想、休憩的空间，帮助人们放松身心，缓解压力。活动区则设置了广场、游乐场等设施，满足人们娱乐、社交的需求，激发活力，提升愉悦感。

4.3.2 游线设计与情绪体验

游线设计遵循起承转合的原则，通过曲折的路径、开合有致的空间序列，引导人们的游览节奏。从入口的开阔广场，逐渐过渡到幽静的林间小道，再到视野开阔的观景平台，最后回到热闹的活动区域，让人们在游览过程中体验到不同的情绪变化，增加游览的趣味性与吸引力。

5 以调节情绪为主导的园林意境营造路径总结

5.1 基于自然元素的营造路径

5.1.1 多样化的水体设计策略

结合场地地形，设计多样化的水体形式。注重水体的声音、光影效果，以及与周边环境的融合。设置亲水平台、水上步道等设施，增强人与水的互动，充分发挥水体在舒缓情绪、放松身心方面的作用。

5.1.2 自然生态的水岸处理手法

利用古朴优美的块石与卵石搭配组团植物打造亲水驳岸，拉结绿地与水面营造自然、柔美的生态空间，利用简洁而流畅的线条营造出宁静、开敞的碧水蓝天，给人以舒缓、放松的愉悦感。

5.1.3 打造细腻生动的亲水空间

选择视线开阔，人流聚集的区域设置亲水空间，以简洁大气兼顾安全防护的休憩设施布置场地，同时考虑亲水功能，设置浅水区供游人戏水、亲水，放松身心。

5.2 基于文化元素的营造路径

5.2.1 深入挖掘与提炼地域文化

对当地的历史文化、民俗文化、艺术文化等进行深入研究，挖掘具有代表性的文化元素，将这些文化元素进行提炼、抽象，转化为可应用于园林景观设计的符号、图案、色彩等。

5.2.2 多样化的文化元素表达形式

通过雕塑、景墙、桥堰、铺装等景观设施，将文化元素直观地展示出来（图3）。通过主题园区、文化广场等形式，集中展示地域文化特色。利用现代科技手段如多媒体展示、互动装置等，增强文化元素的表现力与吸引力，引发游客的情感共鸣。



图2 桥堰（李金路摄）

5.2.3 文化活动与体验的融入

在园林中设置文化活动空间定期举办各类文化活动。设计参与式的文化体验项目，让游客亲身参与到文化活动中，深入感受地域文化魅力，提升文化认同感与归属感。

5.3 基于空间布局与游线设计的营造路径

5.3.1 合理的动静分区规划

根据园林的功能定位与使用人群的需求，明确划分动静区域。静谧区远离城市主干道与噪音源，营造宁静、私密的空间氛围，适合人们进行休息、冥想、阅读等活动。活动区兼顾交通便利性与开阔视野，提供多样化的娱乐、健身及社交设施，满足人群活力释放与社交互动的核心需求。

5.3.2 富有节奏的游线设计

游线设计要考虑游客的游览心理与情绪变化，遵循起承转合的原则。通过设置入口广场、引导性道路、过渡空间、高潮景点、休息节点等，营造出有节奏、有变化的游览体验。利用曲折的路径、开合有致的空间序列，增加游览的趣味性与探索性，避免单调乏味。

6 结论

喀普斯浪河东岸滨河景观在边疆地区以调节情绪为主导的园林意境营造方面进行了成功实践，通过合理运用自然元素、深入融合文化元素以及科学的空间布局与游线设计，为人们打造了一个能够有效调节情绪、舒缓压力的园林空间。本研究总结出的基于自然元素、文化元素以及空间布局与游线设计的园林意境营造路径，具有一定的普适性与借鉴意义，可为其他园林景观提供设计提供参考。经济形势严峻之际，园林设计肩负着更重的人文责任：须精研意境营造对情绪健康的调节机制，突破传统营造手法，显著增强景观作为“心灵绿洲”的心理健康支持功能。

参考文献

- [1] 王作鹏.新疆拜城县喀普斯浪河东岸滨河景观设计[J].风景园林, 2015.9
- [2] 李树华,张文英.(2010).园艺疗法在园林中的应用与实践.中国园林,26(7),1-5
- [3] 王向荣,林箐.(2012).风景园林与人的心理健康.中国园林,28(3),5-9.
- [4] 刘滨谊,张德顺.(2014).城市绿地景观对居民心理健康的影响研究.风景园林,30(5),34-39.

Research and Application of Integrated Control System for Building Robot Chassis

Shuai Wang¹ Rui Wu² Yuquan Shen² Yilong Cui¹ Jianqing Zhang³

1. Wuhan Construction Group Co., Ltd., Wuhan, Hubei, 430056, China

2. Wuhan University of Science and Technology, Wuhan, Hubei, 430065, China

3. Wuchang Institute of Technology, Wuhan, Hubei, 430223, China

Abstract

The chassis control system of construction robots is the core technology for their effective operation. This paper addresses the challenges faced by construction robots under various working conditions and designs a chassis fusion control system specifically. This system includes not only lightweight chassis design but also the actuation system and its fusion control system. Through this design, construction robots can perform a variety of functions, such as wireless remote control, remote video monitoring, magnetic track following technology, automated operation processes, and autonomous task planning. The implementation of the control system's functions provides a solid technical foundation for construction robots in labor operations, enabling them to efficiently and safely complete tasks in various complex environments.

Keywords

control system; chassis structure; chassis debugging; performance optimization

建筑机器人底盘融合控制系统研究与应用

王帅¹ 吴瑞² 沈钰泉² 崔义龙¹ 张建清³

1. 武汉建工集团股份有限公司, 中国·湖北 武汉 430056

2. 武汉科技大学, 中国·湖北 武汉 430065

3. 武昌理工学院, 中国·湖北 武汉 430223

摘要

建筑机器人底盘控制系统是其进行有效作业的核心技术。本文针对建筑机器人在不同工况条件下作业时面临的挑战, 特别设计了一套底盘融合控制系统。这套系统不仅包括轻量化底盘设计, 还涵盖了作业系统及其融合控制系统。通过这种设计, 建筑机器人能够实现多种功能, 如无线遥控操作、远程视频监控、磁导循迹技术、自动化作业流程以及自主规划任务等。控制系统功能的实现, 为建筑机器人在劳动作业中提供了坚实的基础支撑和技术基础, 使其能够在各种复杂环境中高效、安全地完成作业。

关键词

控制系统; 底盘结构; 底盘调试; 性能优化

1 引言

建筑业是国民经济的重要支柱^[1], 传统建造方式较为粗放, 工程建设作业高度依赖人工, 效率低、质量差、风险高^[2,3]。随着中国社会经济结构的调整、新兴产业的出现, 建筑从业群体呈现老龄化加重、用工成本上升等趋势^[4]。建筑机器人具备高度自动化、智能化等特性, 可替代重复性、高强度人工劳动, 提升工程建设效率^[5]。底盘控制系统对建筑机器人的可控性、安全性和智能化至关重要, 但传统系统已无法满足现代施工需求。因此, 开发一种集成的先进控制

技术与底盘结合变得必要。本文提出了一种轻量级建筑机器人底盘设计, 以增强其在复杂环境中的稳定性, 并探讨了融合控制系统的关键技术, 包括遥控、远程控制和 PLC 控制系统的实现与调试。本文旨在为建筑机器人的操作提供理论和实践上的指导与支持。

2 轻量化

运用 SolidWorks 对底盘结构进行受力分析和优化计算, 优化底盘结构力学特性, 实现底盘结构轻量化设计。底盘由型材车架(图 1)、前后轴、轮胎、电机与控制系统组成, 如图 2 所示。车架为底盘主体支撑结构。前后轴分别负责转向与驱动; 悬挂系统通过弹簧与减振器抵御路面冲击、保持车身稳定; 刹车系统利用刹车盘、刹车片、刹车卡钳实现底盘制动。

【作者简介】王帅(1989-), 男, 中国湖北随州人, 博士, 高级工程师, 从事智能建造研究。

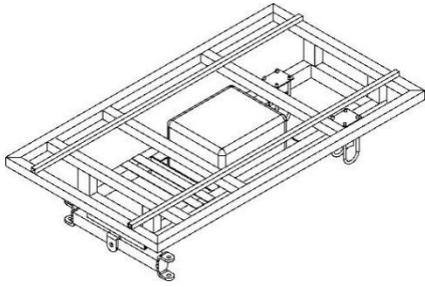


图 1 轻量化底盘车架结构



图 2 底盘总装效果示意

3 底盘作动系统原理

步进电机通过舵机控制器实现精确转向，无刷电机控制移动方向。刹车系统由电推杆和鼓刹组成，负责底盘制动。三个电机均配有独立控制器，无线遥控系统协调它们的工作。信号模块让无刷电机和电推杆控制器通讯，执行联动指令。可调模块允许调整转向幅度、速度和伸缩长度，以适应不同工况。综合调试确保模块协同，提升机器人运行效率和稳定性。

表 1 底盘主要作动元件

初状态		无刷电机	步进电机	电推杆
遥控器信号	前进 (后退)	前进 (后退)		推出 (刹车)
	左转 (右转)		转向回中	收缩 (松刹)
				推出 (刹车)

注：前进和转向信号可同时进行，互不干涉

4 融合控制系统

控制系统负责接收遥控信号，处理传感器和编码器的数据信息，同时向各个电机驱动器发送指令，实现底盘的精确控制。本系统具备多种控制方式于一体，具体如下表

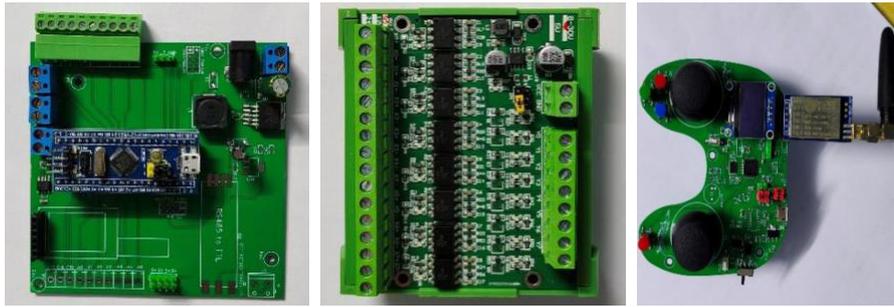


图 3 控制模块

表 2 控制方式

序号	控制方式	适用特点
1	遥控方式	适用于短距离、实时要求高、延迟率低的场景。如混凝土施工作业。
2	远程控制	适用于长距离作业的场景，如智能道路巡检机器人。
3	PLC 作业方式	适用于机械重复性工作，如定点钻孔作业，土方路线压实。
4	磁导循迹	适用于既定线路的作业，如地面开槽作业。
5	自主导航	适用于需要自助决策的场景，如喷涂、自主搬运等作业。

4.1 遥控系统

4.1.1 线控转向系统

线控转向系统包括伺服电机、驱动器、光电编码器和万向节。系统启动时，光电编码器记录电机位置，数值 50000 表示中立位置。控制单元接收转向信号后，驱动器使电机旋转，数值相应变化。信号消失时，电机停止转向。控制单元程序使电机反向旋转，直到编码器数值回到 50000，完成回中。若转向信号持续，编码器数值超出阈值，系统将限位。

4.1.2 线控驱动系统

永磁同步电机、控制器组成线控驱动系统，当前进或

后退信号输入至控制单元时，控制单元随即驱动控制器，永磁同步电机旋转，实现前进后退功能。

4.1.3 线控制动系统

刹车盘、刹车片和刹车卡钳组成线控制动系统，当制动信号输入至控制单元时，推杆作动并带动刹车连杆，驱动刹车卡钳对刹车片施加压力，实现刹车功能。

4.1.4 遥控系统

遥控手柄为遥控系统主体，包含左右两摇杆、OLED 以及 Lora ATK 01，遥控系统布有多种类型接口，便捷了调试工作。遥控系统的工作原理图如图 5 所示。



图 4 光电编码器输出图

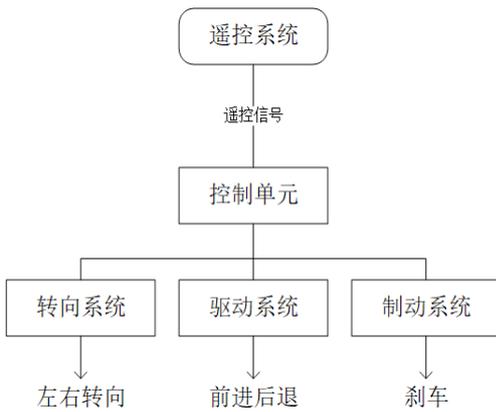


图 5 遥控系统原理图

4.1.5 底盘遥控调试原理

重载线控底盘控制系统程序基于 C 语言编写，依赖 Keil 仿真模式检验代码合理性，如图 6 所示，使用 STLinkV2 烧录代码。通过 M Servo Suite 精确配置伺服参数，选用 Position(I/O Controlled) 为主控模式，如图 7 所示。使用 Lora ATK 01 发送与接收信号，如图 8 所示。利用 STM32F10 系列工业控制板进行数据处理工作。使用 CH340E 串口模块实现伺服位置的可视化。

4.1.6 底盘调试过程

重载线控底盘的调试过程需结合实际使用场景合理调整参数数值。表 3 提供基本底盘调试用例，实现底盘移动精细调控。经实验验证本研究的重载线控底盘控制系统测试结果均符合预期，运行效果优秀。

4.2 远程控制系统

4.2.1 远程控制系统原理

远程控制通过手机 App 发送指令，经由网络和服务器传输至接收模块，转换为 PWM 信号驱动电机。高清摄像头实时传输视频，确保低延迟和高可靠性。接收模块与驱动系统直接连接，提高响应速度和稳定性。

4.2.2 远程控制系统工作流程

远程控制系统利用网络通信，让用户通过手机 App 发送指令至云端服务器，服务器再将指令转发至目标小车，控制其电机实现移动或停止。

同时，摄像头模块将实时画面压缩后上传，用户通过 App 实时接收视频流，形成可视化界面。系统采用双通道传输控制指令和视频流，确保互不干扰，并通过心跳检测机制监测网络连接，保障安全。

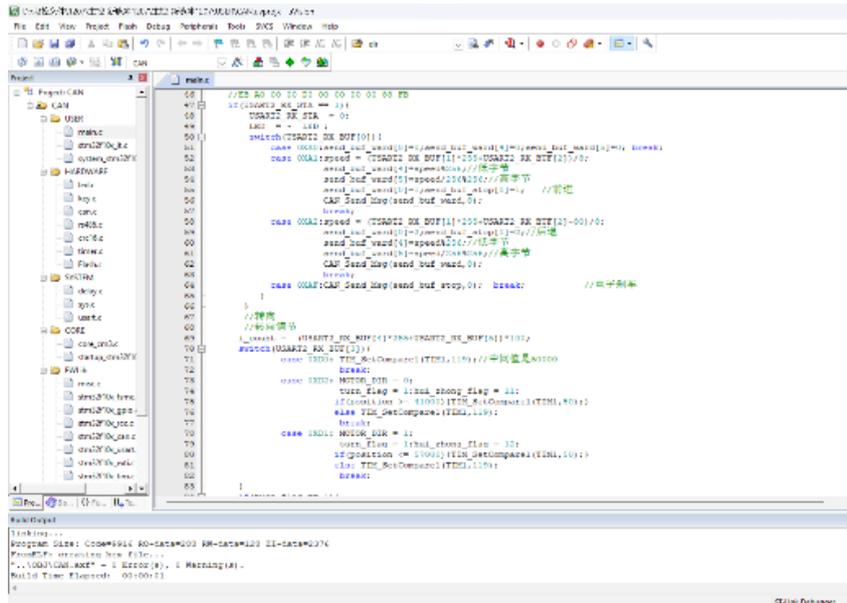


图 6 代码合理性检验图

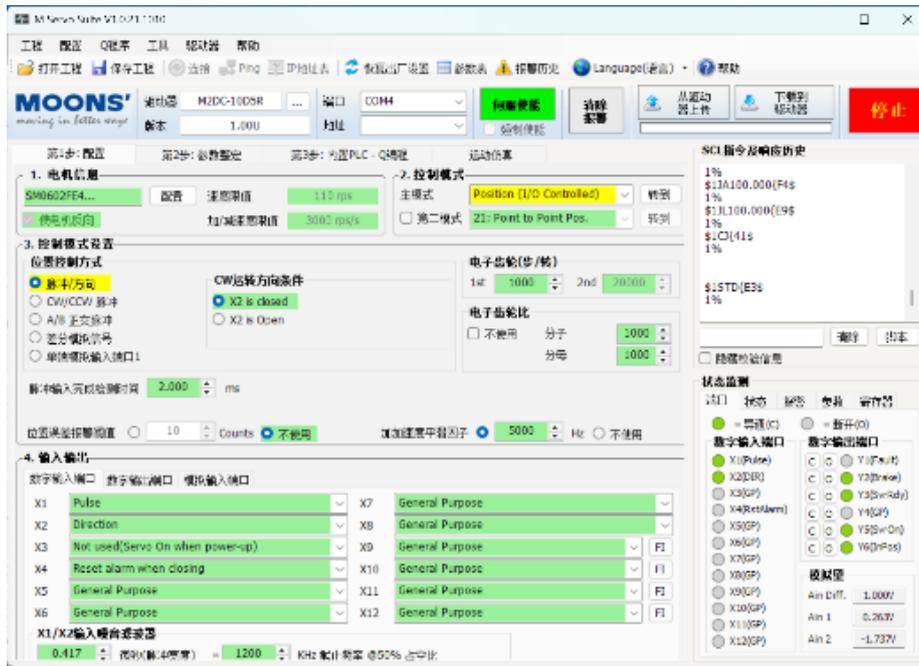


图 7 伺服参数配置图

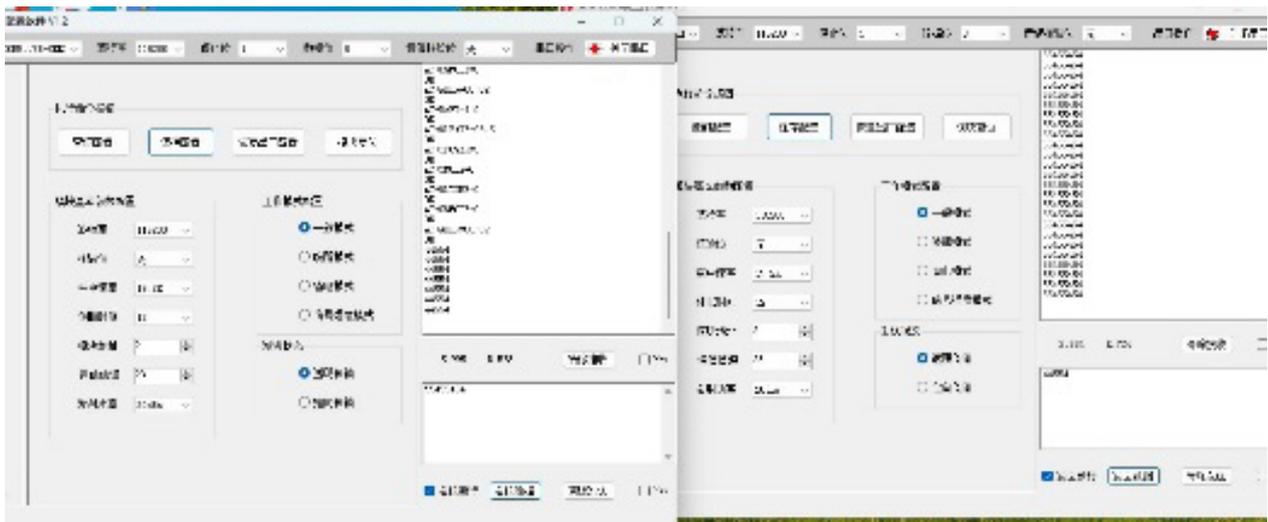


图 8 Lora 配置图

表 3 底盘调试用例表

调试用例	用例名称	调试步骤	预期结果
TC001	启动底盘	底盘上电，观察底盘状态	底盘正常上电，无异常
TC002	转向测试	短时遥控转向，观察转向轮	转向正常
TC003	转向限位测试	持续遥控同一方向转向，观察转向轮	转向到预设偏转角度时，转向停止
TC004	转向回中测试	遥控转向 5s 后停止遥控	停止遥控后，转向轮可自动回中
TC005	前进测试	持续遥控前进	驱动轮加速至速度最大值并保持不变
TC006	后退测试	持续遥控后退	驱动轮加速至速度最大值并保持不变
TC007	转向驱动同时操作测试	同时遥控转向与前进或后退	转向与前进或后退均可流畅运作
TC008	制动测试	驱动遥控后执行制动操作	驱动轮立即制动
TC009	异常断电测试	遥控操作底盘过程中予以断电	驱动轮立即制动，转向轮回中



图 9 网络发射机



图 10 4G 接收机

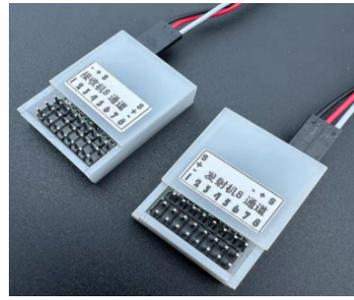


图 11 PWM 通道模块



图 12 摄像头



图 13 摄像画面

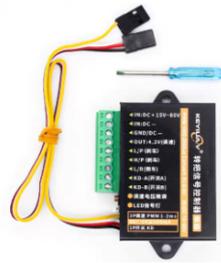


图 14 信号控制器



图 15 驱动器

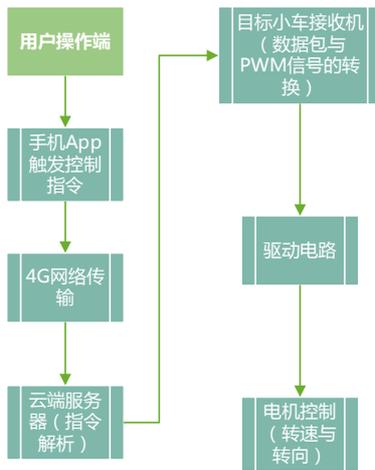


图 16 用户操作端流程图

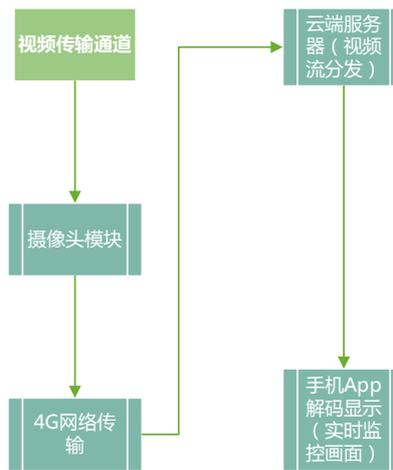


图 17 视频传输流程图

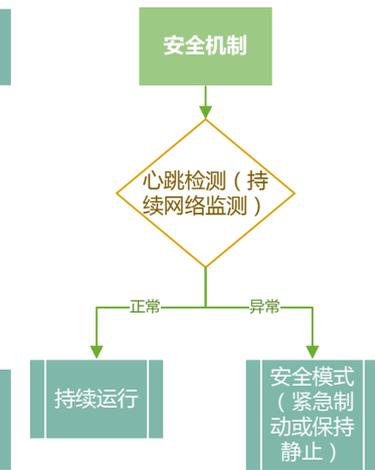


图 18 安全机制流程图

4.2.3 远程控制系统操作方法

用户通过手机 App 登录并保存小车信息后，与目标小车建立连接。连接后，App 显示实时视频和控制面板，用户通过操作控制发送指令至云端服务器，服务器再将指令传给小车接收机，接收机生成 PWM 信号驱动电机，完成控制。

用户可实时监控底盘小车运行和环境，调整路径或速度。通过 App 选择功能，切换控制模式，并发送停车指令使小车停止并待机。系统记录操作日志和异常报警，方便故障排查。本远程控制系统实现了跨地域精确操控底盘小车，满足复杂施工场景的智能化需求。



图 19 虚拟操纵摇杆界面

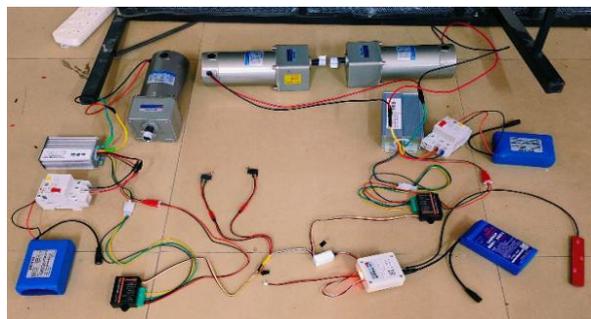


图 20 底盘系统实物图

4.3 PLC 控制系统

4.3.1 PLC 控制系统功能

底盘小车 PLC 控制系统通过硬件接口与驱动系统、传感器和作业设备连接，实现自动化控制。用户可使用上位机软件或触摸屏编写控制程序，设定运动路径和作业动作。

程序通过通信接口上传至 PLC，形成动作库以便调用。PLC 实时读取传感器信号，根据预设程序判断任务条件，控制作业设备。任务完成后，PLC 发出停止指令，底盘进行下一动作或返回待机位置。这种方式无需人工干预，可精准执行高重复性任务，提高施工效率和精度。

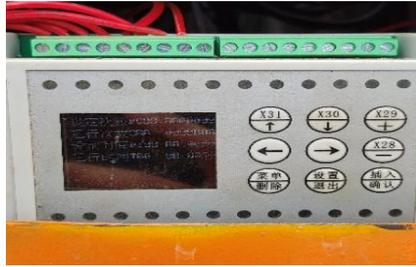


图 21 按键式可编程 PLC



图 22 触摸屏式可编程 PLC



图 23 土方压实机器人



图 24 土方压实机器人 plc 控制系统



图 25 压实效果



图 26 矩阵式钻孔机器人



图 27 矩阵式钻孔机器人 plc 控制系统



图 28 钻孔效果

参考文献

- [1] 建材业与建筑业成为国民经济重要支柱[J]. 中国建材, 2005, (09): 23-24.
- [2] 央视网. 智能建造引领建筑业转型升级 共绘“十四五”高质量发展新蓝图 [EB/OL]. (2022-02-26). <http://finance.people.com.cn/n1/2022/0226/c1004-32360249.html>.
- [3] 林佳瑞, 陈柯吟, 潘鹏. 建筑工程标准数字化与智能化: 现状与未来[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2025, 55(01): 16-29.
- [4] 张宇婷, 崔晗, 陈嘉宇. 建筑业人机协作研究综述[J/OL]. 土木与环境工程学报(中英文), 1-16[2025-06-16].
- [5] 付珍珠. 土木工程专业与人工智能技术交叉应用的可行性分析与实践探索[J]. 科技与创新, 2025, (10): 75-78.

Research on Construction Technology of Greening Planting Engineering in Urban Parks

Zhao Huang

Yunnan Free Trade Zone Construction Engineering Co., Ltd., Kunming, Yunnan, 650000, China

Abstract

In the construction of urban parks, green planting is a crucial stage. The optimized design of green planting projects and the scientific and reasonable application of construction techniques can ensure high survival rates, improve landscape quality, and reduce maintenance costs. Construction units need to prepare according to the project plan, grasp key points, and implement them from plant selection, soil treatment, planting to final maintenance, standardize construction, and enhance the efficiency of green planting. Supported by construction technology, optimizing urban park construction, improving green quality, and promoting ecological city construction. This paper analyzes the construction key points of green planting technology in urban parks, explores specific cultivation techniques, and analyzes maintenance technology key points for reference by relevant personnel.

Keywords

urban parks; landscaping planting projects; construction techniques

城市公园绿化栽植工程施工技术研究

黄钊

云南自由贸易试验区建设工程有限公司, 中国·云南昆明 650000

摘要

城市公园建设中绿化栽植是十分关键的环节,绿化栽植工程的优化设计和施工技术的科学合理使用,可以保障绿化成活率,提高景观质量,降低养护成本。施工单位需要根据工程方案做好准备,把握要点,从植物选择、土壤整治、植物栽植到最后养护,落实要点,规范建设,提升绿化栽植的效率。在施工技术的支持下,优化城市公园建设,提高绿化质量,促进生态城市建设。在本文的研究工作中,分析城市公园绿化栽植技术的施工要点,探究具体的栽培技术,并分析养护技术要点,以供相关人员参考。

关键词

城市公园;绿化栽植工程;施工技术

1 引言

现阶段,我国城市规划建设过程中,园林绿化工程已经逐步成为关键的构成部分。通过打造公园园林绿化工程,为人们营造更加安全美观的生活环境,提高生活质量。在园林绿化的工程中,施工单位需要合理应用绿化栽培施工技术,优化布置整体布局,落实技术要点,从而提高绿化的整体质量。

【作者简介】黄钊(1983-),男,中国河南信阳人,本科,高级工程师,从事市政公用工程、道路工程、生态绿地修复、园林绿化、环保工程、给排水污水管网、房建室外公共配套等研究。

2 城市公园绿化栽植工程施工要点分析

2.1 施工前期准备

在城市公园绿化栽植工程中选择合适技术,可以保障植物的成活率,提升景观效果,通过前期准备,可以确保栽植工程顺利进行。在前期环节施工队伍需要开展现场勘察工作,实际测量明确公园内土壤的类型、pH值、地下管线地形坡度等基本信息。然后清除杂草、树根、建筑垃圾等各种杂物,初步整平土壤,回填低洼处,高处适当的削坡,确保排水通畅^[1]。对土壤进行取样分析,确定土壤的肥力、酸碱度等各项指标,若不符合施工要求,则进行针对性地改良。

2.2 科学选择植物

做好植物的科学选择,优化配置,从而提高公园绿化栽植工程的整体质量。首先要严格按照要求,选择树种、规格、树形等合适的苗木,优先选择本地苗圃或者相似气候地区的苗木,并对苗木进行标记。同时还要考虑到公园的观赏性,因此注意不同植物之间的合理配色,便于提升景观的视

觉冲击力。考虑到不同植物的季节特性，选择季节性植物，从而提高整体的成活率。在选择花卉时选择观赏期比较长的花卉，要确保植物移植时处于健康的状态，便于提高整体的敏感性。

2.3 优化土壤处理

在施工前根据公园土壤的具体情况，采取适当的土壤改良方案。如果土壤偏碱性，可以加入适量的石膏，降低土壤碱度。在改良过程中，施工人员控制石膏的加入总量，通过浇水溶解土壤中的碱性物质。施工人员也可以采用生物法进行改良，种植一些绿色植物用于吸收土壤中的碱性物质。针对透气性比较差的土壤，可以加入适量的腐烂叶片，埋入适量的透气管道，从而促进土壤空隙的增加，提升整体的透气效果，确保植物能够快速生长。将改良后的种植土回填至设计标高，预留沉降量。不同植物对于种植厚度有着不同的要求，因此要合理控制整体厚度。

表 1 植被土层厚度标准

植被类型	土壤厚度 /cm
花卉	30
草坪植被	30
小灌木	45
大灌木	60
浅根乔木	90
深根乔木	150

3 城市公园绿化栽植工程的栽培技术

3.1 乔木栽植技术

针对乔木采取适当的栽植技术，提高施工质量。首先，施工人员需要根据乔木的特点确定种植孔的深度和尺寸。树穴的直径比土球大 30~50cm，深度比土球高 20~30cm，底部预留 10~15cm 的松土层，在底部加入腐熟基肥，与底土拌匀。在树种种植前施工人员要对土壤进行了杀菌杀虫处理，可使用多菌灵粉杀菌，百威颗粒杀虫。在种植孔底放置特定浓度的营养土。使用软绳缠绕树干吊装点选在树干中心以上，进行吊装操作，要确保树干垂直朝向美观，回填时分层夯实土壤。回填至土球高度的 2/3 时浇透定根水。如果是大乔木，需要设置三角支撑，支撑点用软布包裹底部固定牢固。

在栽植过程中，工作人员要结合植被的种类，采取恰当的修剪措施。针对萌发能力较强并且容易失水的大乔木绿化植物，工作人员要适当的加大修剪力度，而除水能力强的树木，可适当的多留一些树干^[2]。修剪完成以后，若存在过大的伤口，要及时消毒处理，确保树木不会受到细菌感染出现枯萎死亡的情况。移栽树木的过程中，施工人员要注意，保护好植物根系，根据移植乔木的大小，确定根部土球的大小，运输的过程中也要做好保护工作，避免根系受损。挖移树种时，施工人员在土球中间和平行于地面的区域进行腰绳缠绕，树干倾斜缠绕。确保土绳有效融合。黏土土球适当地

降低缠绕密度，确保土球运输的过程中不会松动。运输过程中，树冠朝向运输尾部土球放置在驾驶室附近的区域，用板子垫在下方使用软绳包裹。采取恰当的保护措施，避免土球根部、树冠和树干受到损坏。

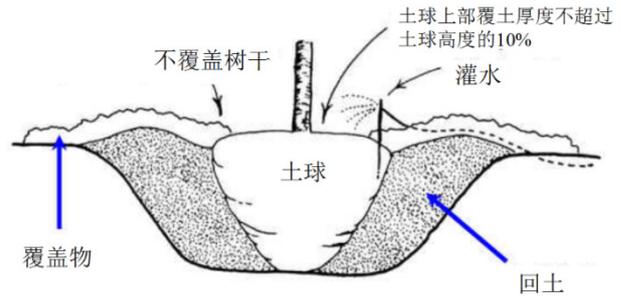


图 1 栽植定植方法

3.2 灌木与绿篱栽植技术

灌木和绿篱栽种技术实施的过程中有着相对较高的繁琐性。通过应用一些栽植工具和机械，提高整体的栽种效率。灌木冠幅和高度比较小，如果是喜阳植物类型需要选择合适的栽种区域，避免受到高大建筑或乔木的遮挡。施工人员要根据公园情况，合理规划乔木的种植区域。绿篱采用条状沟栽植，沟的深度控制在 50~60cm。灌木挖圆形穴直径比土球大 20~30cm。灌木相对乔木来说，体量相对较小，采用一次性大量栽植的方式，但如果时间耗费过长会使灌木出现脱水情况。因此工作人员提前确定好移栽地点，做好整地工作，与此同时在运输灌木环节对其根部进行保湿，可以有效提升灌木的成活效果。要根据植物种类的情况确定栽植密度。要确保后期冠幅相接不重叠，根据冠幅确定株距。定植时灌木土球顶面与地表齐平，回填土时，使根系舒展，分层压实后浇水。绿篱需要修剪顶部和侧枝，确保整体整齐。

3.3 地被与花卉栽植技术

针对地被植物和花卉采取恰当的栽培技术，要做好整地处理，将土壤整细去除石块，做高 20~30cm 的畦，畦间留 30cm 的排水沟。在种植地被植物时，可以采用分株或者从植的方式，株行距控制在 20~30cm，深度与原生长深度一致，种植结束后踩实土壤，并浇水。铺设草坪时，工作人员要密切关注铺设环境的影响情况，选择合适的生长环境。如果土壤过于贫瘠，适当的插入一些肥料，促进草坪的健康生长，如果区域处于低洼潮湿区，土壤细菌含量多，还需要对土壤进行杀菌处理，确保草坪的根部不会受到影响。草坪铺设结束后，及时灌溉处理，确保草坪受到充足的水分滋养，提高生长效率。一年生花卉直接播种或者移栽，多年生花卉则带土球栽植，要确保根系与土壤的紧密接触。针对球茎类植物，需要将肥料置于慢耕孔中，确保植物可以缓慢地吸收。采用薄肥多施的方法，严禁一次性摄入大量的肥料，防止植物出现烧根的情况。开花时，施工人员还应注意调节施肥的类型，保障植物开花过程中有足够的养分支持。

4 城市公园绿化栽植工程的栽培养护技术

4.1 水分管理

在公园绿化栽植工程中,植物栽植结束后,要采取恰当的养护措施,便于提高成活率。针对植被花卉等根系比较浅植物,浇水时要监测表面的湿度情况,浇水的频率应当大于灌木和乔木。与此同时,还需要根据天气土壤墒情以及树种习性及时补水,保持土壤湿润,浇水要浇透,避免只浇表层水。若是雨季还需要注意排水防涝。若是乔木可每3~5天浇一次水,灌木每2~3天,浇一次水必备植物每天浇一次水。成活以后则根据土壤的湿度调整浇水的频率,夏季高温时可以向枝叶喷水增加空气的湿度,而在冬季时则需要减少浇水。植物的种类不同,浇水的方式不同,针对灌木和地被植物可以采用滴灌或者喷灌的方式,而针对乔木采用树盘漫灌的方式。浇水后检查树木是否出现倾斜和支撑松动情况,要及时扶正和加固。

4.2 合理施肥

合理施肥可以保证植物健康生长,首先施工人员要根据植物的种类和生长需求了解其所需要的养分比例。调查土壤情况,确定土壤的养分含量和pH值,然后将结果对比分析,确定最终的肥料种类和施肥方式^[1]。有机肥含有有机物质,改善土壤结构,保持土壤湿度;无机肥还有丰富的氮、磷、钾元素,迅速提供给植物所需的养分;复合肥是有机肥和无机肥的混合物。施工人员可以根据植物的种类所需营养以及生长阶段等的不同,合理施肥,为植物提供所需营养,促进它们的健康生长。施肥方法有基肥和追肥。施工前可在种植区域施用基肥,便于促进植物生长。追肥是在植物生长的过程中根据植物的生长状态补充肥料。采用恰当方法控制施肥的总量,避免过度施肥,影响土壤和导致病虫害的发生。

4.3 病虫害防治

病虫害防治工作中要坚持以预防为主、综合防治为辅的原则,施工人员根据不同种类的生长特点,掌握病虫害的

发展规律,开展预测和防治工作,定期检查植物的生长情况,查看是否有缺水和病虫害的问题,采取适当的措施,要定期清除落叶和杂草,切断病虫害的来源。可采用物理生物防治结合的方法,例如投放天敌,增加诱捕灯,直接捕杀害虫。也可以采用化学方法,针对病害可以喷施多菌灵,针对虫害可以使用吡虫啉喷雾。通过综合应用,可以有效防治病虫害的影响,确保植物的健康生长,提高园林绿化的质量。

4.4 修剪植物

采用恰当的修剪技术,确保植被景观的美观性。乔木定植以后,要去除病弱枝、重叠枝。灌木种植以后,采取恰当的修剪措施,定期修剪确保高度一致,形状美观。针对地被花卉,要及时摘除残花去除过密枝叶,促进通风透光。可以将绿色植物修剪成扇形、球形等不同的形态,满足人们多元化的观赏需求。不同植物的修剪特性也存在一定的差异,例如灌木修剪时要从内到外、从上到下来完成。通过定期修剪保持美观,也能促进植物的健康生长。

5 结语

综上所述,城市公园绿化栽植工程中采用恰当的技术,可以提高植物的成活率和景观的美观度,为促进城市发展建设提供支持。因此在具体的工程项目中,施工人员要优化方案设计,根据公园特点,选择合适的植物,加强土地整理。而针对乔木灌木和花卉等不同类型的植物,采用恰当的栽植技术和养护技术,便于提高植物的成活率,优化景观布置,实现预期目标。

参考文献

- [1] 欧阳毅. 森林公园升级改造中绿化栽植工程施工技术[J]. 花卉,2024(4):43-45.
- [2] 翟朝阳,李顺兵,张铭. 探究园林绿化工程中园林植物的栽植施工技术[J]. 工程建设与技术,2024,2(12).
- [3] 吴敏翔. 古美公园绿化工程施工技术与后期养护管理思考[J]. 工程建设,2024,56(2):73-78.

Research on the Optimization of Symmetrical Non-Magnetic Heating for Alkali Metal Gas Chambers

Xinyu Cao¹ Yueyang Zhai² Xuejing Liu^{3*}

1. School of Optoelectronic Information and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai, 200093, China

2. School of Instrumentation Science and Opto-electronics Engineering, Beihang University, Beijing, 100191, China

3. Qinhuangdao Hongyan Optoelectronic Technology Co., Ltd., Qinhuangdao, Hebei, 066001, China

Abstract

Atomic magnetometers are highly valued in the field of quantum precision measurement technology due to their high sensitivity and accuracy. The alkali metal atomic vapor cell, as a core component, plays a decisive role in measurement precision, and precise temperature control is a key factor in achieving high-precision measurements. This study designed a 150mm cubic heating system for the alkali metal vapor cell used in atomic magnetometers. By employing finite element methods to study the impact of different heating patterns on temperature distribution, it was found that a two-sided symmetric heating approach can improve temperature uniformity, with an atomic density uniformity of 1.46%. Additionally, experiments have confirmed the feasibility of this heating mode.

Keywords

atomic magnetometer; alkali metal gas chamber; gas chamber temperature control; finite element method; temperature uniformity

碱金属气室对称无磁加热优化研究

曹新雨¹ 翟跃阳² 刘学静^{3*}

1. 上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 中国·上海 200093

2. 北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 中国·北京 100191

3. 秦皇岛红燕光电科技有限公司, 中国·河北 秦皇岛 066001

摘要

原子磁强计在量子精密测量技术领域因其高灵敏度和精确度而备受重视。碱金属原子气室作为其核心部件,对测量精度具有决定性影响,而精确的温度控制是实现高精度测量的关键因素。本研究设计了一种用于原子磁强计碱金属气室的150mm立方体加热系统。通过有限元的方法研究了不同加热模式对温度分布的影响,结果表明两面对称加热方式可提高温度均匀性且原子密度不均匀性为1.46%,同时实验也验证了该加热模式的可行性。

关键词

原子磁强计; 碱金属气室; 气室温控; 有限元法; 温度均匀性

1 引言

原子磁强计作为基于量子精密测量原理的高灵敏度磁场传感器,凭借其无需低温环境、宽频带响应等优势,在脑磁图、地磁勘探和生物医学检测等领域展现出重要应用价值^[1-2]。碱金属气室作为原子测量仪器的核心部件,其内部常充有一种或多种碱金属元素(如钾、铷),以及一种或多种辅助气体(氦气、氮气)^[3],其中碱金属气密度对输出信号具有重要影响,检测灵敏度与气室内原子数密度紧密相关,而原子数密度又与气室的温度呈指数关系。这表明气室温度的精确控制对于提高原子磁强计的灵敏度至关重要。因此碱金属气室的加热方法和加热结构的优化、气室温度稳定性和均匀性的提升成为原子测量仪器灵敏度进一步提升的关键技术之一。

目前气室加热主要有热对流加热,激光加热,电加热三种方法:热对流加热虽无磁噪声,但系统复杂不利于小型化、集成化,而且温度稳定性不高、气流扰动较大、加热均匀性不好;Li^[4]等构建一种基于激光加热技术的蒸汽池加热结构,并通过石墨薄膜优化了温度的空间分布使蒸汽池的内部温度CVT降低了67%。该方法非常依赖激光器光源的稳定性,而且出于安全考虑,只能采用低功率的激光,难以用于加热功率大的场合。电加热方法在材料创新和结构设计方面取得突破,北航^[5]提出的双采双控系统显著提高了控温精度,但仍存在因材料导热不均导致的温度分布问题。

基于上述研究背景,本文针对电加热系统中材料导热不均导致的温度分布问题,提出了一种解决方案即使用高导热复合材料和对称无磁加热结构来消除局部热点,提高热均

匀性。通过构建有限元模型分析，发现材料导热系数不均会导致温度分布不均。为解决这一问题，我们设计了对称无磁加热结构，以优化温度分布和加热效率。这种结构旨在实现更高效、均匀的温度控制，为碱金属气室提供稳定均匀的工作环境。

2 结构设计与理论分析

2.1 烤箱结构设计

本研究针对碱金属原子气室在正常工作状态下对高温和均匀受热环境的需求，设计了一款正方体烤箱作为其载体。该烤箱的设计旨在通过在内壁安装加热片来均匀地将热量传递给气室，以确保气室的温度分布均匀，从而提高原子磁强计的测量精度和稳定性。在 150mm 立体烤箱四个面上各设计直径为 10mm 的通光孔。其中两个用于探头激光器和泵浦激光器的光学通道，便于原子的光学探测和操控；另外两个用于连接烤箱内部加热片与外部温度传感器，实现对碱金属原子气室温度的实时监测。

热场分析基于热传导、热对流和热辐射等基本原。在本文设计的碱金属原子气室烤箱中，热传导是主要的热传递机制，而热对流和热辐射的影响相对较小，可以忽略。热传导是物体各部份之间不发生相对位移时产生的热能传递，可以用傅里叶热传导定律表示为

$$q = -k \frac{\partial T}{\partial x} \quad (1)$$

式中， q 为热流密度； k 为导热系数。

2.2 加热元件设计

为了完善电加热所带磁场干扰的缺点，需要对加热膜的材料和走线进行设计来实现无磁加热。加热膜选取聚酰亚胺薄膜作为衬底，在薄膜的基础上进行加热丝加工。加热膜

分为两层结构，相邻加热丝之间流过的电流方向相反、大小相等，可以让空间中产生的磁场相互抵消，大大减小加热过程中产生的磁场干扰^[6]。

3 仿真分析与讨论

为了深入探究电加热对烤箱内部的温度分布均匀性及其对碱金属原子气室工作性能的具体影响，本研究采用 COMSOL 软件，运用有限元分析方法对烤箱内的热场进行仿真分析。在模型建立过程中定义了烤箱的三维几何结构并设置了包括恒压比热容、密度、导热系数在内的关键材料属性，以及相应的边界条件。通过这些设置模拟了烤箱在多样化加热条件下的温度分布状态。

设定加热面的温度为 650K，而其他面及原子气室的初始温度设定为 293.15 K，广义向内的热通量 q_0 为 $6W/m^2$ 。经过热传导达到热平衡稳态后得到图 1 温度分布图。一面加热：温度分布不均匀，中心区域温度较高，边缘区域温度较低。这种加热方式会导致碱金属原子密度分布不均。两面对称加热：温度分布较为对称，气室中心区域温度梯度较小。这种加热方式有助于碱金属原子均匀分布，提高光吸收效率和自旋极化率，从而改善磁强计的灵敏度和稳定性。两面非对称加热：温度分布不对称。在靠近加热膜的区域，由于更直接接触热源，会吸收更多的热量，从而使得这些区域的温度上升得更快，导致气室一侧温度高，另一侧低。三面加热：温度分布更均匀，气室中心区域温度梯度进一步减小。这种加热方式能够更好地维持碱金属原子的均匀性，适合高精度磁强计的应用，但需注意避免局部过热。四面加热：温度分布最均匀，整个气室处于稳定的热环境中。这种加热方式虽然能最大化碱金属原子的均匀性和稳定性，显著提升磁强计的信噪比和长期可靠性，但是设计和能耗成本较高。

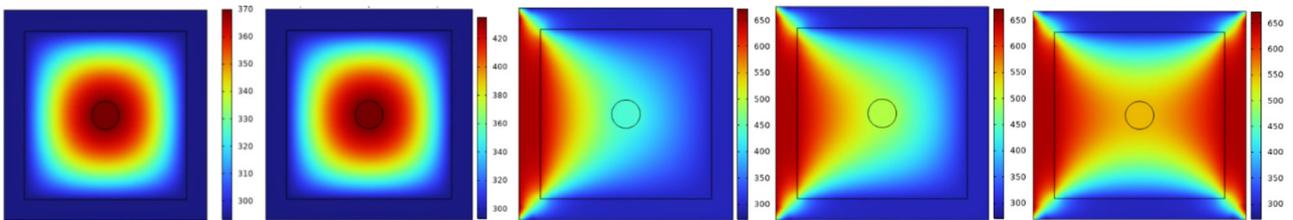


图 1 温度分布图

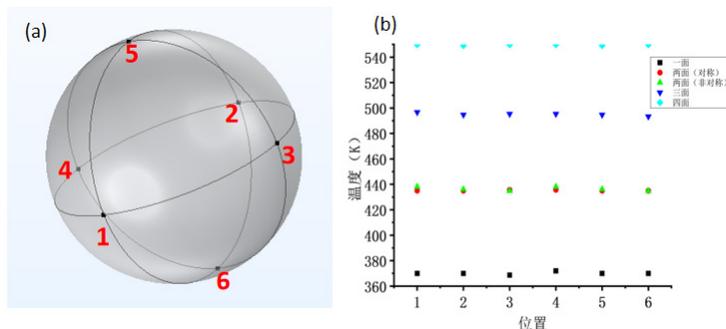


图 2 (a) 气室取点位置 (b) 点在不同加热下的温度

根据碱金属 Rb 原子数密度 n 与温度 T 的关系，在温度为 T 时，碱金属蒸气的饱和密度由以下方程给出：

$$n = \frac{1}{T} 10^{21.866+A-B/T} \quad (5)$$

式中 A 为 4.312, B 为 4040。图 3 展示了在不同加热条件下六个测量点的碱金属原子密度。结果表明，在一面加热、两面非对称加热和四面加热的情况下，原子密度梯度变化显著，分布不均匀。而在两面对称加热和四面加热的情况下，原子密度梯度变化较小，表明原子密度分布较为均匀。虽然两面对称加热方式时原子密度不均匀性为 1.46%，略高于四面加热时的 0.91%，但四面加热在实验实施上可能更为复杂且成本更高。相比之下，两面对称加热结构简单、易于实现，并且仍然能够有效降低原子密度的不均匀性。

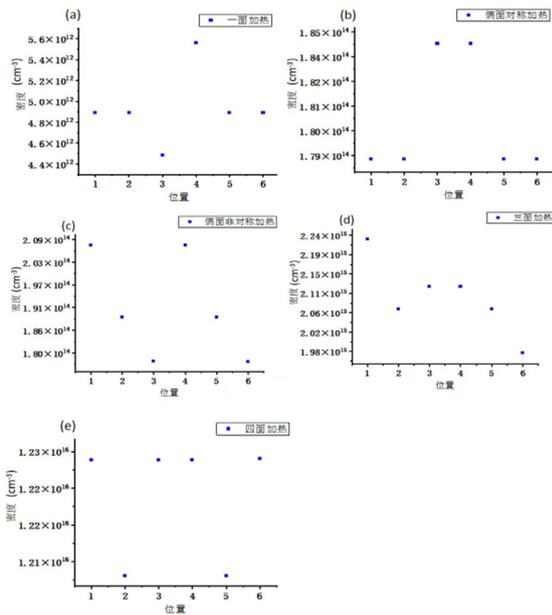


图 3 不同加热时原子密度

4 实验验证

为验证本文设计的烤箱加热保温结构的有效性，构建保温结构有效性验证实验系统。实验装置基于 SERF 原子磁强计原理，内部的碱金属气室是一个边长为 20mm 的正方体，碱金属原子为 Rb，还有惰性气体 N₂。探测光为 DFB 半导体激光器，提供 780nm 的光源，加热部分采用的是一对无磁加热片加热气室，产生的温度梯度与探测光传播方向垂直，使用热敏电阻和温度控制器对实验温度进行控制，热敏电阻作为测温探头置于烤箱外壁附近。

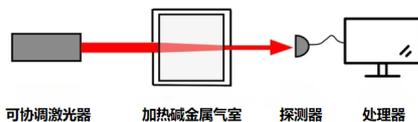


图 4 实验示意图

实验结果如图 5 所示，接近加热元件位置 A 温度最高；靠近空气位置 C 温度低于 A 层；B 层虽然通过金属架接触实现有效散热，使其温度低于 A 层，但由于气室内部热传导的特定分布特性，其最终温度仍高于 C 层。图 6 展示其位置分布下碱金属原子密度且不均匀性为 1.93%。尽管这一结果与仿真结果存在一定差异，但符合实验设计的要求。

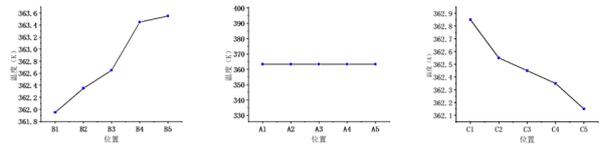


图 5 不同点位置处的温度

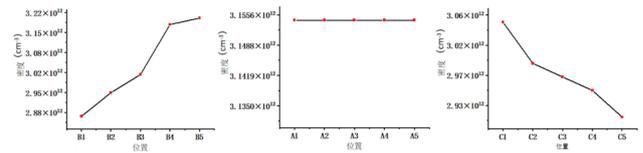


图 6 不同点位置处的 Rb 原子密度

5 结论

本研究针对原子磁强计中碱金属气室的温度控制问题，进行了深入的理论和实验研究。通过设计正方体烤箱作为碱金属原子气室的载体来探索其不同加热方式对气室温度分布均匀性的影响。利用有限元法进行仿真分析发现两面对称无磁加热时，碱金属气室温度分布更均匀且原子密度不均匀性 1.46%，并通过实验验证采用两面对称无磁加热时，烤箱温度分布更均匀且原子密度不均匀性为 1.93% 满足要求，这对原子磁强计的气室加热具有一定的参考价值。

参考文献

- [1] Hill, R.M.; Boto, E.; Holmes, N.; Hartley, C.; Seedat, Z.A.; Leggett, J.; Roberts, G.; Shah, V.; Tierney, T.M.; Woolrich, M.W.; et al. A tool for functional brain imaging with lifespan compliance. *Nat. Commun.* 2019, 10, 4785.
- [2] Perry, A.R.; Bulatowicz, M.D.; Larsen, M.; Walker, T.G.; Wyllie, R. All-optical intrinsic atomic gradiometer with sub-20 fT/cm/root Hz sensitivity in a 22 μ T earth-scale magnetic field. *Opt. Express* 2020, 28, 36696–36705.
- [3] 于明智. “基于创新内侧壁成型工艺的具有多光通道的微制造原子蒸气池” *工程* 35, no.4 (2024): 46-55.
- [4] Li, Yang, et al. “Laser Heating Method for an Alkali Metal Atomic Cell with Heat Transfer Enhancement.” *Photonics* 10.6 (2023): 637.
- [5] A dual-sampling dual-control high-precision and low-noise non-magnetic electric heating system for alkali metal vapor cells, CN2024100000000, 2024年5月20日, 国家知识产权局.
- [6] 李德文等. “无磁加热薄膜仿真设计与实验验证.” *光学与光电技术* 21, no. 3 (2023): 87-91.