

城市建筑与发展

Urban Architecture And Development



ART AND DESIGN PRESS INC.

(626 810 4480)

119 S Atlantic Blvd, Suite 300D

Monterey Park, CA 91754

Copyright © 2024 by ART AND DESIGN PRESS INC.

Complimentary Copy



Editorial Board

Editors-in-Chief

Peng Xu

China Municipal Engineering North China Design and Research Institute Co., LTD.

Zhijin Lu

China Municipal Engineering Northeast Design and Research Institute Co., LTD. Dongguan Branch

Editorial Board Member

Longde Cha

Zhejiang Jiahua Architectural Design & Research Institute, China

Feng Gao

China Municipal Engineering South-Central Design and Research Institute Co., LTD.

Chunxiao Lin

China Municipal Engineering South-Central Design and Research Institute Co., LTD.

Andrew Chiou

School of Engineering and Technology Centre for Intelligent Systems

Ritesh Chugh

School of Engineering and Technology Centre for Research in Equity & Advancement of Teaching & Education(CREATE)

城市建筑与发展

Urban Architecture and Development

第2卷 第4期 2024年4月刊

主管 ART AND DESIGN PRESS INC.

主办 ART AND DESIGN PRESS INC.

编辑 《城市建筑与发展》编辑部

ISSN(O): 2993-270X

ISSN(P): 2995-2441

地址: 119 S Atlantic Blvd, Suite 300D Monterey
Park, CA 91754

网址: <https://www.artdesignp.com>

本刊说明:

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

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



建筑规划 · 设计 | ARCHITECTURAL PLANNING · DESIGN

- 004 精细化管理在建筑工程施工中的应用 马晓洁
The Application of Fine Management in Construction
Engineering Construction Ma Xiaojie
- 007 中小校园运动场地设计 毛贝娜
Design of Sports Grounds in Primary and Secondary School Campuses Mao Beina
- 010 浅析消防电气在既有建筑改造中的设计难点与对策 柴飞飞
Analysis of Design Difficulties and Countermeasures of Fire Protection
Electrical Systems in the Renovation of Existing Buildings Chai Feifei
- 013 云南弥勒某景区地域文化视角下的
建筑设计策略 李凌旭, 马明昌, 向冲, 马子童, 孙一峰
The Architectural Design Strategy of Maitreya Taiping Lake Scenic Area: A Regional
Cultural Perspective Li Lingxu, Ma Mingchang, Xiang Chong, Ma Zitong, Sun Yifeng
- 016 陶塑脊饰在宗祠建筑中的应用初探——以广州陈家祠为例 高婷, 梁玮莎
A Preliminary Analysis of the Application of Ceramic Sculpture Ridge Decoration
in Ancestral Hall Architecture——A Case Study of the Chen Family
Ancestral Hall in Guangzhou Gao Ting, Liang Weisha

工程管理 · 实践 | ENGINEERING MANAGEMENT · PRACTICE

- 019 无人机倾斜摄影测量在城市更新中的运用探析 王宏达
Exploration of the Application of UAV Oblique Photogrammetry
in Urban Renewal Wang Hongda
- 022 盐腐蚀冻融对混凝土箱梁静力弯曲性能影响研究 何林
The Effects of Salt Corrosion and Freeze-Thaw Cycles
on the Static Bending Performance of Concrete Box Girder He Lin
- 025 冻融与盐腐蚀对混凝土动态力学性能的影响 熊佳航
Effect of Freeze Thaw and Salt Corrosion on Dynamic Mechanical
Properties of Concrete Xiong Jiahang
- 029 城市地铁及地下工程施工环境安全风险评估与控制分析 马树强
Risk Assessment and Control Analysis of Construction Environment Safety
in City Subway and Underground Engineering Ma Shuqiang
- 032 建筑工程造价的动态管理与成本优化控制分析 刘海平
Dynamic Management and Cost Optimization Control Analysis
of Construction Engineering Cost Liu Haiping
- 035 绿色建筑理念在建筑工程中的应用与发展 王士杰
The Application and Development of Green Building Concept
in Building Engineering Wang Shijie
- 038 基于虚拟现实技术的园林植物造景应用研究 徐琰昊, 王晓敏
Research on the Application of Virtual Reality Technology
in Garden Plant Landscaping Xu Yanhao, Wang Xiaomin
- 041 中深层地热供热站工艺系统设计计算模拟软件
的开发与应用 崔瑞英, 张星汉, 左未东, 杨志豪, 陶丹玉
Development and Application of Simulation Software
For Process System Design of Medium-Deep Geothermal
Heating Station Cui Ruiying, Zhang Xinghan, Zuo Weidong, Yang Zhihao, Tao Danyu

精细化管理在建筑工程施工中的应用

马晓洁

山东百泰建设监理有限公司, 山东 日照 276500

摘 要： 精细化管理作为一种科学的管理理念，在建筑工程施工中的应用日益广泛。其核心在于通过细化管理目标、优化管理流程和提升管理效率，实现施工过程的高效控制和资源的最大化利用。在建筑工程施工中，精细化管理能够有效解决传统粗放式管理带来的问题，如资源浪费、进度延误和质量不达标等，为工程的高质量完成提供有力保障。精细化管理的实施需要从施工的各个环节入手，通过制定详细的管理计划和标准，确保每一道工序都严格按照要求执行。同时，精细化管理还强调数据的收集和分析，通过信息化手段实时监控施工过程，及时发现和解决问题，确保施工的顺利进行。基于此，以下对精细化管理在建筑工程施工中的应用进行了探讨，以供参考。

关 键 词： 精细化管理；建筑工程施工；应用

The Application of Fine Management in Construction Engineering Construction

Ma Xiaojie

Shandong Baitai Construction Supervision Co., LTD. Rizhao, Shandong 276500

Abstract： Fine management, as a scientific management concept, is increasingly widely used in construction engineering construction. Its core is to realize the efficient control of the construction process and the maximum utilization of resources by refining the management objectives, optimizing the management process and improving the management efficiency. In the construction of construction projects, fine management can effectively solve the problems brought by the traditional extensive management, such as resource waste, progress delay and poor quality standards, etc., to provide a strong guarantee for the high-quality completion of the project. The implementation of fine management needs to start from each link of construction, through the formulation of detailed management plans and standards, to ensure that each process is implemented in strict accordance with the requirements. At the same time, fine management also emphasizes the collection and analysis of data, through information means of real-time monitoring of the construction process, timely find and solve problems, to ensure the smooth construction. Based on this, the following discusses the application of fine management in construction engineering for reference.

Keywords： fine management; construction; application

引言

随着建筑行业对工程质量和效率要求的不断提高，精细化管理的应用已成为提升施工管理水平的重要手段。通过将精细化管理理念贯穿于施工的各个环节，企业能够实现对施工过程的全面把控，确保工程的质量、进度和成本目标得以实现。精细化管理不仅能够提升施工效率，还能有效降低施工风险，为建筑工程的可持续发展奠定坚实基础。

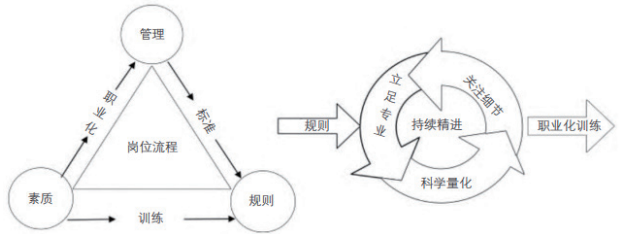
一、精细化管理概念

精细化管理作为一种先进的管理理念，最早在西方发达国家兴起，并迅速在全球范围内得到广泛应用。其核心在于通过系统化的管理手段，将企业的各项业务流程进行细致划分，明确责任与制度，从而实现管理效能的全面提升。具体而言，精细化管理依托于数据的精确化、流程的标准化、任务的分解化以及信息化

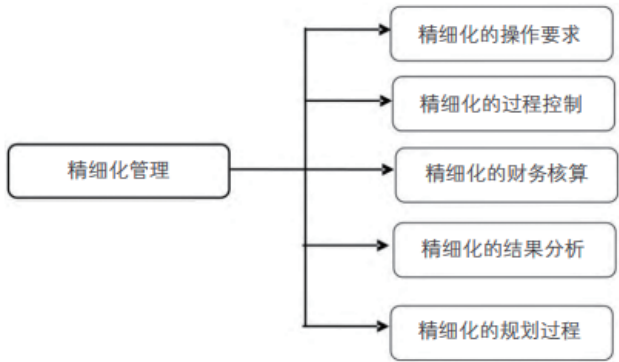
的支持，确保企业在各个环节都能高效运作^[1]。同时，企业还需通过持续的培训与指导，提升组织成员的能力，保障各部门的协调与持续发展。实施流程可参考图1。在当今竞争激烈的市场环境中，精细化管理已成为企业实现可持续发展的关键要素。无论是企业文化塑造、市场拓展，还是生产运营，都离不开高效的管理体系。企业领导者在追求利润最大化的同时，必须深刻认识到管理的重要性。精细化管理作为一种全面且系统化的管理理念，深

作者简介：马晓洁（1988.04—），男，汉族，山东日照人，本科学历，中级工程师，从事建筑工程管理工作。

度融入企业运营的各个环节，旨在通过多维度的优化提升整体效能。它不仅涵盖了战略规划、资源配置、流程控制等核心领域（如图2所示），还注重细节的精准把控与执行。通过科学的数据分析和动态监控，精细化管理能够有效降低运营成本，提高生产效率，并确保各部门之间的协同运作。此外，这种模式还强调持续改进与创新，推动企业在竞争激烈的市场中保持领先地位^[2]。



> 图1精细化管理流程图



> 图2精细化管理的内容

二、精细化管理的特点

（一）目标明确与细化

精细化管理的首要特征在于目标的明确性与细化。在建筑工程施工中，精细化管理要求将整体工程目标分解为多个具体、可操作的小目标，并明确每个目标的责任人和完成标准。通过将大目标细化，企业能够更好地掌控施工进度和质量，避免因目标模糊导致的资源浪费或效率低下^[3]。在质量管理中，可以将整体质量目标分解为材料质量、施工工艺和验收标准等具体指标。目标明确与细化不仅有助于提高施工的针对性和可控性，还能为施工人员提供清晰的工作方向，增强其责任感和执行力^[3]。

（二）流程优化与标准化

在建筑工程施工中，精细化管理强调对施工流程的全面梳理和优化，消除不必要的环节和浪费，提升施工效率。同时，通过制定标准化的操作流程和质量控制标准，确保施工过程的规范性和一致性^[4]。在施工工艺方面，可以制定标准化的操作手册，明确每一道工序的施工步骤和质量要求，确保施工工艺的规范性和稳定性。流程优化与标准化不仅能够提高施工效率，还能减少人为失误和质量隐患，为工程的高质量完成提供保障^[5]。

（三）数据驱动与信息化

在建筑工程施工中，精细化管理强调通过数据的收集、分析和应用，实现对施工过程的实时监控和科学决策。通过信息化手

段，企业能够实时获取施工进度、材料消耗、质量检测等关键数据，并利用数据分析工具进行深入分析，发现施工中的问题和改进空间。数据驱动与信息化不仅能够提高施工管理的科学性和精准性，还能为企业的持续改进和优化提供数据支持，推动施工管理水平的不断提升^[6]。

三、精细化管理在建筑工程施工中的应用

（一）做好施工安全精细化管理工作

在工程管理领域，施工安全始终是不可忽视的核心任务。为确保安全管理的有效性，必须将精细化管理理念深度融入其中，从细节入手，全面提升安全管理水平。精细化管理的核心在于对每一个环节的严格把控，包括管理方式的优化、力度的强化以及机制的完善。通过不断优化精细化管理体系，扩大其覆盖范围，确保安全管理渗透到每一个施工环节，从而有效降低安全事故的发生率^[7]。在具体实施过程中，施工单位应设立专门的安全管理部门，明确划分每位管理人员的职责与权限。无论是管理范围、层级还是时间安排，都需在精细化管理框架下进行科学分配。通过这种方式，确保每位管理人员能够精准履行职责，避免管理盲区。此外，施工现场是安全管理的重点区域，必须对其进行精细化管理。从人员、环境、材料到机械设备，每一个细节都需进行全面排查与检测，确保每一道工序的安全性和可靠性（如3所示）。精细化管理的最终目标是通过系统性、科学化的手段，将安全隐患消灭在萌芽状态，从而为工程项目的顺利推进提供坚实保障^[8]。

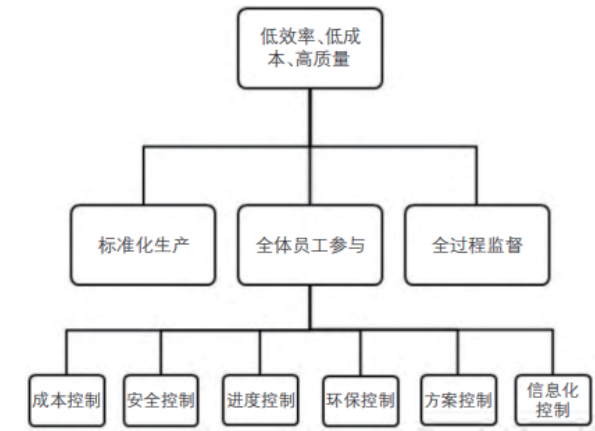


> 图3塔吊安装前构件检测

（二）施工精细化管理体系的构建

在建筑项目管理中，构建一个科学且高效的精细化体系至关重要。传统的粗放式管理模式已无法满足现代工程的需求，必须引入精细化管理理念，对施工全过程进行严格把控。基于此，本文提出了一套以“一个核心目标、全员参与和六大关键项目”为框架的管理体系，旨在实现低成本、高效率、高质量的工程目标作（见图4）。核心目标是以最优化的资源配置完成建筑项目^[9]。这一目标贯穿始终，并分解为各阶段的子目标，明确关键节点和考核机制，确保整体计划的有序推进。精细化管理的成功离不开全员参与。建筑项目具有周期长、成本高、环节复杂的特点，每

个分项工程都有其独特要求。因此，从管理层到一线施工人员，都必须深入参与精细化管理的实施，确保其贯穿于施工的每一个环节。六大关键项目包括成本控制、进度管理、质量监督、安全防范、技术创新和环境保护^[10]。这些项目相互关联，共同支撑精细化管理的落地。通过科学规划、严格监督和持续优化，建筑项目不仅能够实现预期目标，还能在激烈的市场竞争中脱颖而出。



> 图4 施工精细化管理体系

（三）优化绩效考核与激励机制

在企业运营中，绩效考核与激励机制是驱动精细化管理的核心引擎。为保障考核的公正性与透明度，企业需建立健全的内部控制机制，并制定清晰、可量化的考核标准，最大限度降低主观判断的影响^[11]。通过多样化的培训方式，如内部讲座、外部进修以及技能竞赛等，企业能够全方位提升员工的职业技能、实践经验及团队协作水平。这不仅有助于增强管理层的专业能力，还能显著提升一线员工的综合素质，从而为企业的高效运转提供坚实保障。此外，企业应定期评估激励机制的有效性，确保其与战略目标保持一致，并通过反馈机制不断优化，以激发员工的持续动力与创新潜力^[12]。

四、结束语

精细化管理在建筑工程施工中的应用，为提升施工质量和效率提供了科学的管理手段。随着管理技术的不断进步和行业标准的逐步完善，精细化管理将在建筑工程施工中发挥更加重要的作用，为建筑行业的持续发展注入新的动力。

参考文献

[1] 精细化管理应用在建筑工程施工管理中的价值研究 [J]. 董存虎. 中国建筑金属结构, 2020(12): 50-51.
[2] 精细化管理在建筑工程施工中的应用分析 [J]. 吕武军. 中国建筑金属结构, 2020(12): 32-33.
[3] BIM 技术在建筑工程造价精细化管理中的应用价值研究 [J]. 左新宇. 中外建筑, 2020(12): 173-175.
[4] 精细化管理在公路工程施工管理中的实施及应用 [J]. 吴大琨. 黑龙江交通科技, 2020(11): 207+209.
[5] 精细化管理在建筑工程施工管理中的应用 [J]. 刘其爱. 工程技术研究, 2020(20): 137-138
[6] 精细化管理在房地产建筑工程项目管理中的应用探究 [J]. 赵培杰. 冶金与材料, 2020(05): 106-107.
[7] 精细化管理在建筑工程施工中的应用 [J]. 韩龙海. 砖瓦, 2023(07): 100-102+105.
[8] 精细化管理在建筑工程施工中的应用 [J]. 王晓; 张翠萍. 砖瓦, 2023(07): 109-111.
[9] 探究精细化管理模式在建筑工程施工管理中的应用 [J]. 林永毅. 城市建设理论研究 (电子版), 2023(13): 40-42.
[10] 精细化管理模式在建筑工程管理中的应用 [J]. 李伟娟. 房地产世界, 2023(07): 106-108.
[11] 精细化管理在建筑工程施工中的应用分析 [J]. 李志龙. 江西建材, 2022(12): 415-417.
[12] 精细化管理在建筑工程施工中的应用 [J]. 曹天华. 四川建材, 2022(10): 196-197.

中小学校园运动场地设计

毛贝娜

宁波市建筑设计研究院，浙江 宁波 315000

摘 要： 在中小学的校园建筑设计中，关键环节之一是精心规划运动场地。这不仅需要满足学校开展各项体育活动的需求，还应兼顾中小学生在成功和心理健康方面的考量，以促进他们的全面发展。本文以《中小学校园运动场地设计》为研究主题，总结在设计中小学体育场所时应遵循的一些基本原则，并通过具体案例分析，从多角度探讨这一问题。期望本研究的成果能为同行提供一些启示和参考。

关 键 词： 中小学校园；运动场地；安全设计

Design of Sports Grounds in Primary and Secondary School Campuses

Mao Beina

Ningbo Architectural Design and Research Institute, Ningbo, Zhejiang 315000

Abstract： One of the key aspects of architectural design for primary and secondary school campuses is the careful planning of sports grounds. This not only needs to meet the requirements of various sports activities carried out by the school but also takes into account the considerations of primary and secondary school students' success and mental health to promote their comprehensive development. This article takes "Design of Sports Grounds in Primary and Secondary School Campuses" as the research theme, summarizes some basic principles that should be followed when designing sports venues for primary and secondary schools, and explores this issue from multiple perspectives through specific case studies. It is hoped that the results of this study can provide some inspiration and reference for peers.

Keywords： primary and secondary school campuses; sports grounds; safety design

前言

2021年4月，教育部办公室发布《关于进一步加强中小学生体质健康管理工作的通知》（以下简称“通知”），针对当前一些中小学校园空间有限、学生人数迅速增加导致体育活动受限、体育场地严重不足的现状，提出明确的指导建议。《通知》强调，中小学应确保每天至少有30分钟的课间运动时间，并鼓励学生主动参与课外体育活动。为响应这一号召，许多地区的中小学开始对现有体育设施进行改造和升级，或者在现有设施不足的情况下，向政府申请资金支持，以负责新运动场地的设计与建设。

从实际操作来看，运动场地的建设对于大多数中小学而言是一项庞大的工程。如果偏离学校的规划目标和本质，可能会导致巨大的财政浪费和资金流失。因此，对学校的规划工作进行深入的调查和规划。此外，在设计运动场地时，应考虑校园的规模和学生人数，将体育教育的基本需求与学校文化体育活动的具体要求相结合，为学生创造一个优质的教育和活动环境。这旨在全面提升学生的体质，促进其全面发展。鉴于运动场地的设置对于中小学生养成良好的运动习惯和加强体育锻炼具有至关重要的作用，因此，在前期设计阶段，必须准确把握关键要点和设计元素。

一、中小学校园运动场设计遵循的原则

在考虑到中小学校园运动场地的特殊定位时，其设计理念应兼顾经济效益与实用性双重标准，确保能够满足校内师生日常教学与活动的需求^[1]。设计时不仅要尊重校园独有的环境特色、个性化需求以及多元化风貌，同时也要突出运动场地的建筑特色。在设计实践中，以下几个原则是关键所在：

（1）审美性原则。设计校园运动场地时，应避免千篇一律的

设计风格，需与校园总体建筑风格协调统一，展现学校特有的文化底蕴和人文风情，在体育设施的设计上也要坚持个性化的审美标准。

（2）成本效益原则。运动场的设计应考虑学校的财政状况，遵循节约实用的原则，根据学校的投资能力和建设需求来制定方案，避免无谓的攀比和奢华。对于那些因资金短缺暂时无法完成的设施和装饰项目，应合理规划预留空间，为将来的完善留下可能性^[2]。

作者简介：毛贝娜（1981.02—），女，汉族，浙江宁波人，大学本科，高级工程师，研究方向：建筑设计、城市空间、人防工程。

(3) 安全至上的原则。考虑到中小學生正值青春期，思维活跃但自我防护能力较弱，加上体育活动本身带有一定的危险系数，因此务必确保运动场内所有设施的安全性，让师生们在轻松愉悦的氛围中健康地进行体育锻炼。

(4) 灵活适应的原则。中小校园运动场的设计应兼顾其使用功能，鉴于其与教育理念紧密相通，设计运动场地时必须重视其灵活性，确保设计方案既能满足教育需求又具有一定的拓展性^[3]。具体而言，应采用弹性设计策略，以灵活且集中的布局方式，适应未来运动场地的使用需求及功能结构的调整，从而最大程度地优化场地空间利用。

(5) 以人为本的设计原则。在中小校园运动场的设计过程中，应将学生作为核心，遵循人性化设计原则。一方面，通过对运动场地的布局、功能、设施、空间和人流等方面进行周密规划和优化，满足传统体育教学的需求，特别是要根据不同年龄段学生的身体发育状况进行有针对性的设计；另一方面，要尊重并满足师生对体育活动的喜好和需求，通过人性化的设计手法，让学生们能够自主、安全且充满活力地享受优质的运动环境。

二、工程概况及设计要求

(一) 工程概况

该建设项目所选用地坐落于宁波镇海藤山北路西侧，紧邻九龙湖镇新开发的住宅区域东侧，位于仁爱教育集团旗下九龙湖分校的西侧地块，与对岸的教学区隔河相对。该地块总占地面积达到37212m²。设计任务要求必须包含一个标准的400m跑道的田径场、一座看台，以及篮球、排球等多种球类场地和械类运动场地。

设计本工程的主要参考依据包括：

- (1) 所提供的运动场用地红线图及其独特的地理条件；
- (2) 学校方面提出的设计宗旨和详细设计规范；
- (3) 《工程建设标准强制性条文（城市建设部分）》2013年修订版；
- (4) 《体育建筑设计规范》（JTG31-2003）；
- (5) 《中小学合成材料面层运动场地》（GB36246-2018）；
- (6) 其他相关国家及地方性法规与规范^[4]。

(二) 设计要求

中小校园运动场地肩负着支持学校体育活动和重大集会的首要任务，因此，在设计这些场地时，必须遵循一系列特定的设计要求。除前述的基本原则，以下几点也需特别考虑：

(1) 中小学运动场地的规划应满足全校师生集会和聚会的需求，例如升旗仪式、校庆等，因此必须具备足够的承载能力。同时，相关部门和设计机构在施工初期应进行精确估算，以防止工程造价与原预算出现较大偏差^[5]。

(2) 在建设学校运动场地时，必须考虑到学生在紧急情况下的安全撤离问题。面对火灾、地震、人身伤害等突发事件，场地应具备快速调度、应急疏散的能力，并且通道设计要满足这些需求。

(3) 根据不同的用途，对运动场地进行合理规划和设计，同时注意各种尺度的转换与衔接，为学生提供优质的体育设施，同时也要顾及学校建筑的整体形象^[6]。

(4) 在对中小学的校园运动场地进行初步规划与设置时，应确保其满足相应的规范和需求，并保证该场所能够满足日常体育教育和学生体育活动的基本功能。

(5) 运动场地的规划应与整个学校的建筑氛围和环境相协调，在建筑形式和规模上应有准确的把握。根据周边环境，合理布置各种交通流线，以避免交叉和重叠。

三、中小校园运动场地设计内容

(一) 设计理念

处于这山水相依、地灵人杰的福地，一所新成立的学府的综合体育场所设计，不仅要符合各种运动场地的基本要求，还应注重场地整体形象与周遭环境的和谐统一，以及校园整体风貌的和谐相称。

鉴于该项目东傍水系，远处山峰起伏，因此在色调选择上，本案以湖水蓝作为主色，并与运动场地的中心绿茵相结合，形成蓝与绿的交织，使得整体风格显得清爽而具现代感，洋溢着青春的活力（整体规划如图1和图2所示）。



> 图1：本案整体设计方案图



> 图2：运动场地整体鸟瞰图

(二) 规模确定与方位设计

在规划运动场地时，根据学校的实际需求和教学目标，该设计方案必须包含一个标准的400m跑道的田径场、一个能够容纳超过1000名观众的场所，并且融合多种球类及器械类运动场地于一体的多功能运动场，同时也要预留空间未来可举办市级规模的中小学生运动会，以确保满足体育活动需求。

相关数据显示，一些选手在比赛中容易受到风力和眩光等环境因素的影响，导致表现不佳。鉴于我国位于北半球，研究区域的主轴线应优先考虑南北方向。该项目的设计体育场基本南北向，在东侧规划主要的观众看台，在南侧设置各种球类场地。

(三) 各场地设计的详细内容

运动场地的布局匠心独运，最大限度地发挥现有地貌的优势。其东侧与学校的教室区域借由两座行人天桥紧密相连，南侧则配置单独的车行入口，便于外部车辆进出。在北侧，本案规划标准的田径赛场，而南侧则预留各类球类。观众席巧妙地坐落在东北角，紧邻河畔。遵循学校方面的场地配置需求，本案的设计方案主要包括以下要点：

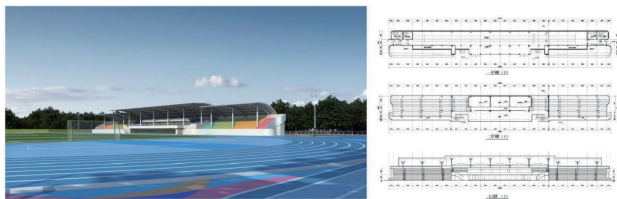
1. 标准化田径场

依据地形特点，本案将面积最大的田径场置于运动场的西北角，与规划边界完美契合。该田径场的半径为36.5m，东西向直道

长度为143m,整体跑道共设有8条赛道。按照客户需求,100m 直道被设计为9条赛道。每条跑道的宽度为1.22m。跑道表层和助跑区均使用13mm 厚的淡蓝色聚氨酯透气型塑胶材料,起跑区则采用25mm 厚的同样材料,缓冲区则是9mm 厚的湖蓝色透气型塑胶。

2. 观众看台

看台位于田径场的东侧,总面积达到1340m²,室内外地面的高度差为150cm,通过缓和的坡道连接,与跑道的距离大约4m。该看台可容纳800至1000名观众。其中,一层设有室内风雨跑道(共4条)、洗手间、器材存放区等设施。看台的第二层分为左右两个区域,作为观众席,第一排座位离地1.2m,最多可容纳12排座位;中央部分为主席台和辅助用房。看台顶部覆盖着约96m 长的钢结构遮阳顶棚,采用弧形钢网架与铝板的组合设计(如图3所示)。



> 图3: 看台设计预想图

外墙涂饰以浅灰白色的真石漆,观众区以蓝、绿、橙、粉红色进行分区,整体设计采用曲面与横向线条的融合,与校园的整体风格相得益彰。

3. 球类运动区

本项目在田径运动场的核心区域布置一片规范的足球场地,并铺设自然草坪。在田径场南边,球类运动区域集中规划,包括6片标准篮球场、2片排球比赛场、1片网球场以及1个五人制足球场,这些场地均以3m 高的钢丝网圈围,并配备夜间照明系统,以便于日常维护和使用。网球场独立位于西南角落,其他球类场地则相对集中。周边还设有一条宽4m 的练习跑道,为校内师生提供丰富的运动锻炼区域。球类运动区地面使用13mm 厚(8mm+5mm)的浅蓝色 EPDM 橡胶地面材料。

4. 田径比赛区

田径场的北半圆区域依照标准配备1个跳远场地和2个铅球投掷区(落地区域半径为25m);南半圆区域则布置1个铁饼投掷场地和1个可进行跳高及标枪的比赛区。

5. 器械锻炼区

中学的器械锻炼区位于场地东北角,靠近观众席北侧;小学的器械锻炼区则设在场地东南角,紧邻球类运动区南侧,方便学生通过连接桥便捷地到达使用。其中,高单杠设有4组(中学2组,小学2组),低单杠5组(中学2组,小学3组),双杠9组(中学5组,小学4组),同时还配备若干云梯和爬杆。器械区的

地面铺装20mm 厚的浅蓝色透气型软质橡胶地面材料。

6. 停车设施

考虑到周边环境与交通状况,在场地南端规划车辆进出口,以备未来向市民开放周末及节假日活动,以及举办各类体育赛事的需求。紧邻南侧及车辆进出口区域,共规划50个汽车停车位以及40个自行车停车位,力求在有限的空间内高效利用每一寸土地,创造出更多的停车区域。

7. 旗杆广场

旗杆与升旗台三柱一组,坐落于田径场西侧,与观众席正面相对。升旗台以浅灰色花岗岩打造阶梯,成为运动场的最高点。

8. 动感广场

在连接教学区与运动场的桥梁入口位置,设计一个采用彩色橡胶地砖铺装的开放空间——动感广场。这个广场位于场地东侧的核心位置,既是运动场地与球场的缓冲带,也是教学区与运动区的交汇点,其中心地位使其成为视觉焦点、人流集散地和交通枢纽。广场与观众席周围的彩色橡胶地砖无缝衔接,赋予整个运动场年轻而充满活力的气息,所有场地的尺寸和划线均遵循相关项目的标准规范。



> 图4: 运动场建成后实景照片

四、结语

综上所述,中小学的运动场地,是师生们进行体育活动的场所。它不仅用于体育教学,还适用于举办大型广场休闲活动,以及日常的体育锻炼。因此,在规划和设计中小学的校园运动场地时,必须考虑到学校的办学规模、师资力量和教学需求,确保与之相匹配。这样才能为全校师生创造一个优良的学习环境,并承担起增强学生和教师体质的重任。在设计过程中,应尽可能多地收集有关场地的信息,与基地建筑进行紧密协作,深入思考,耐心细致地处理每一个设计细节。

参考文献

- [1] 程思思,余利平. 弘文入景——校园运动场地景观设计[J]. 湖南包装, 2022(5).
- [2] 孔德龙. 论中小校园运动场地设计[J]. 中文科技期刊数据库(全文版)工程技术, 2023(4):4.
- [3] 徐志标,李植. 九年一贯制学校全员运动会的设计与实施[J]. 中国学校体育, 2023(5):23-25.
- [4] 林大卫,李阳夫,汤翔宇. 场地层叠式社区运动场地设计研究以雄安新区容东综合运动馆项目为例[J]. 室内设计与装修, 2022(6):120-122.
- [5] 李向忠,刘洋. 让孩子自主快乐运动的健身路径——小学校园内引导学生自主健身场地的设计[J]. 体育教学, 2023,43(S02):4-6.
- [6] 巩琳,魏璐华. 体育运动场地的更新策略研究[J]. 中文科技期刊数据库(引文版)工程技术, 2022(11):5.

浅析消防电气在既有建筑改造中的设计难点与对策

柴飞飞

中国建筑科学研究院有限公司, 北京 100013

摘 要： 近年，随着城镇化高速发展，我国已步入中后期阶段。根据住房和城乡建设部发布数据显示，目前全国已实施城市更新项目超6.6万个，完成投资2.6万亿元，其中既有建筑改造项目的建筑面积达78亿平方米，城镇老旧小区改造5.37万个。为顺应城市发展规律，防止沿用过度房地产化的开发建设方式、大拆大建、急功近利等问题，既有建筑改造已成为城市更新发展趋势。

关 键 词： 既有建筑；消防电气；难点；对策

Analysis of Design Difficulties and Countermeasures of Fire Protection Electrical Systems in the Renovation of Existing Buildings

Chai Feifei

China Academy of Building Research, Beijing 100013

Abstract： In recent years, with the rapid development of urbanization, China has entered the middle and late stages. According to data released by the Ministry of Housing and Urban-Rural Development, over 66,000 urban renewal projects have been implemented across the country, with 2.6 trillion yuan invested. Among them, the building area of existing building renovation projects has reached 7.8 billion square meters, and 53,700 old residential areas in cities and towns have been renovated. To comply with the law of urban development and prevent problems such as over-development, large-scale demolition and construction, and eagerness for quick success and instant benefits, the renovation of existing buildings has become a trend in urban renewal and development.

Keywords： existing buildings; fire protection electrical systems; difficulties; countermeasures

引言

随着新版城市总体规划和“十四五”规划的全面实施，我国进入城市更新、减量发展阶段，既有建筑改造已成为城市更新的重要方式。以北京市为例，根据近年来的全市消防设计审查数据显示，装修、改造类工程占比已超过90%。既有建筑改造工程受自身和周边环境条件限制，往往存在难以满足现行消防技术标准要求的矛盾。其中消防电气设计面临很多挑战，会出现不同于新建建筑的问题与困扰。^[4-6] 基于既有建筑消防改造现状，结合相继完善的规范、政策，系统的解决现有问题，对于激发城市存量建筑发展活力，推动城市更新，助力经济高质量发展，保障既有建筑改造的消防安全，减少火灾危害，保护人身和财产安全具有重要意义。

一、既有建筑改造消防电气设计难点

既有建筑改造包括整体改造、局部改造、内外部装修。在既有建筑的改造项目中，消防电气的设计和改造面临多个难点，主要包括以下几点内容。

（一）原始施工图和竣工图纸资料缺少

目前，既有建筑建设年代不一，建筑类型、功能、规模各异，情况复杂。建成年代不同，其建筑需求，遵守的规范标准，消防设施的配套安装情况均不同。大部分既有建筑年代久远，会出现一些问题。比如，建筑原始施工、竣工图纸缺失，对现状情况熟知的管理、维修人员职位变动，以及因机电隐蔽工程导致现场踏勘结果并不明确，增大了改造的难度。

（二）建筑平面布局及功能改变的局限性

在既有改造项目中，往往遇到现状建筑平面布局变化，建筑功能改变的情况。比如由住宅或商业建筑改为办公建筑这类主要功能发生改变，以及改造面积超总建筑面积50%以上等整体改造项目；还有仅部分房间、部分楼层局部使用功能改变等的局部改造；还有一些后期经过多次精装修改造，建筑增加隔断墙等改造。尤其是局部改造和内外部装修，一般都没有保留过程施工、竣工图纸资料，多次改造后，布局、结构复杂，给设计带来困难，原有的消防电气系统可能不再适用，需要重新评估和设计来满足新的功能需求。

（三）相关规范、规程、标准更新完善

随着各专业规范不断更新和完善，现行标准是最严格的标

作者简介：柴飞飞（1992.11-），女，汉族，山东省菏泽市人，本科，中级电气工程师，研究方向：电气工程及其自动化。

准，各个时期的建筑均有当时的现行标准要求。改造项目在遵守现行规范同时，考虑原有设计的兼容性。若改造区域完全按照新规，将大幅增加改造成本和复杂性。

近年来关于消防电气设计主要变化的规范有《消防设施通用规范》GB 55036-2022，《建筑防火通用规范》GB 55037-2022，《民用建筑电气设计标准》GB 51348-2019，《火灾自动报警系统设计规范》GB 50116-2013，《消防应急照明和疏散指示系统技术标准》GB 51309-2018等，还有一些地区标准，如《北京市既有建筑改造工程消防设计指南》（2023年版）。以上国标、地标或指南可作为改造项目的设计依据^[1-3]。

（四）水、暖规范对电气的要求

除了电气规范，水、暖专业中相关规范也对电气有要求。比如在《消防给水及消火栓系统技术规范》第6.1.10条提出“当建筑物的室内临时高压消防给水系统仅采用稳压泵稳压……消防水泵应按一级负荷要求供电……”本条在电气规范中未提及，容易将消防水泵的负荷等级按二级或三级考虑。

此外，在《民用建筑电气设计标准》中第13.7.7条“民用建筑内的消防水泵不宜设置自动巡检装置。”取消了巡检柜，而在《消防给水及消火栓系统技术规范》中第11.0.14条中规定应采用巡检柜装置，两本规范有出入。

还有，在《建筑防火通用规范》中新增第2.2.4条“设置机械加压送风系统……且该应急排烟窗应具有手动和联动开启功能。”规定，但《建筑防排烟系统技术标准》中却未有。若暖通专业新增应急排烟窗的设计，相应电气消防联动设计也随之补充。

二、既有建筑改造消防电气设计对策

（一）现场踏勘与消防安全评估

针对原始施工图和竣工图纸资料缺少情况，在既有建筑改造开展前，各专业设计人员需多次、详细的对现场进行踏勘，有原始资料的需根据原始资料对现状实际情况进行复核，判断图纸和现状是否一致。大部分既有建筑建成年代久远，中间进行多次装修改造，相应图纸未归档保留，需要设计人员详细实地踏勘，熟悉现状外电源、消防控制室、电气井等电气相关的房间及设备现状情况。建设单位在项目改造实施前，需开展消防安全综合评估，如有必要，可组织专家评审论证，为科学实施改造提供技术支撑^[7]。

（二）空间与布局调整

既有建筑平面布局及功能改变，限制了消防电气系统的改造设计。老旧建筑可能无室内闲置房间或室外空地，此时需要建筑重新规划空间与布局，增加消防控制室、强弱电间、值班室，甚至在整体改造时需要重新更改配电室，室外增加消防相关的强、弱电管线设计。若改造范围内涉及人防区域，对不满足消防评估要求的火自系统和应急照明系统，按现行规范设计，并利用原穿墙套管，新增或改造的消防设备明装、管线明敷设。

（三）规范的适配、合规性

既有建筑改造应执行现行国家工程建设消防技术标准，受条件限制确有困难的，可保留原设计，不低于建成时的消防技术标

准，不得降低既有建筑原有的消防安全水平。

1. 消防电源及其配电

改造区域内的消防电源及其配电系统、消防设备供电负荷等级、消防与非消防电线电缆选型与敷设均要根据改造后的建筑整体功能情况执行现行标准，保证改造区域内消防设施供电需求。若因现状外电源条件不足，消防动力和非消防动力可合用一路进线电缆，改造区域外可维持原设计。

2. 火灾自动报警及联动控制系统

当建筑整体改造时，不管既有建筑现状是否设置，均应按现行标准改造。

当建筑局部改造时，改造区域内新增及更新的电气消防设备应符合现行标准，执行确有困难的，可保留原设计。改造前已设置火自系统的，改造范围内的系统应接入原系统。若改造区域的新增电气消防设备及管线经消防评估后无法满足产品升级及扩展的要求，可在原系统处增设火灾报警控制器，并与原系统实现通讯，在改造后满足整体性能要求，为后续整体改造预留条件^[8]。

在局部改造时，常遇到以下情况：新规要求地下车库设置烟感，旧规是温感；部分房间改为开水间或厨房，需改为温感；开敞改隔断房间，需新增烟感；新规要求每根总线设置短路隔离器。^[10]以上变化引起的更换或新增探测器数量基本在原总线留有10%余量的范围内。若改造后，超出现状消防主机报警点数，需另增设一台消防主机，更换的设备需与现状消防设备同型号或可兼容协调运行。

在整体改造时，曾碰到过厂房改造项目，现状有吊顶，烟感按两主横梁的跨间距设计。取消吊顶后，发现主横梁之间还有五道次横梁，每道次梁的梁底均突出顶棚高度600mm，再加上次梁之间又设计了到顶的隔断房间，导致每道次横梁之间以及隔断房间均需按新规设置烟感，每层平均新增120多个烟感，超出了原有消防报警主机的容量。在设计时，优先保留使用满足消防评估要求的现状火灾报警控制器，并另设一台。在经济造价允许的情况下，可将消防主机直接拆旧换新。此外，新规提到设置火自系统时，消火栓按钮不能作为直接启泵信号，在既有改造项目中，设计人员也需注意。

3. 消防应急照明及疏散指示系统

当建筑整体改造时，均应按现行消防标准改造，新规执行分界较清晰。但大部分既有建筑不满足新规要求，改造内容较多。系统采用A/B集中电源型或A/B自带电源的应急照明配电箱，灯具分为集中电源控制的A/B型灯具或自带蓄电池的A/B型灯具。^[9]另外，《建筑防火通用规范》中删除了关于对建筑高度小于27m的住宅建筑设置疏散照明的描述，即单、多层住宅建筑进行老旧小区改造时，在新规要求的建筑部位要设置疏散照明，而且北京住宅地标还要求消防灯具的持续应急时间不低于90min。

当建筑局部改造时，改造范围涉及的新增或更换的消防灯具、蓄电池电源及管线应满足现行消防技术标准的要求，不采用淘汰产品，其余区域可维持原设计。比如，本市某部分营房仅改造地下室一层，无火自系统，现状应急照明系统仍采用旧规范要

求的220V灯具。按新规,本层可单独采用自带蓄电池非集中控制型系统,每一防火分区均设置B型应急照明箱和灯具,单独自成系统,与地上分开,并为整体改造预留条件。

4. 消防应急广播系统

对于整体改造项目,改造后既有建筑若采用集中报警及控制中心报警系统,改造后应设置此系统。对于局部改造项目,现状有该系统的,改造后在满足消防安全的前提下,可维持原系统设计,末端广播点位及管线应按现行规范要求设计调整。

5. 可燃气体探测报警系统

《消防设施通用规范》新规要求本系统需要单独组成,不允许直接接入火灾报警控制器的报警总线中。对于涉及到本系统的改造项目,需要尤其注意现状原系统需要做相应调整。

6. 电气火灾监控系统

在既有建筑改造项目中,本系统需按现行标准设计,在改造范围内的一级配电柜(箱)的出线端或二级配电柜(箱)设置剩余电流式火灾探测器;在电缆接头等重点发热部位设置测温式火灾探测器。新增的监控主机设置在消控室或值班室。若改造范围的上一级配电系统已经设置本系统或装置,且满足现行技术标准要求时,可不重复设置,并应在《消防安全评估报告》中说明。

7. 消防电源监控系统

对于整体改造,改造后有火自系统时,需设置;局部改造后,现状有火自系统的,改造范围内涉及到新增及改造的电气消防设备末端点位及管线均按现行规范执行,在满足消防安全的前提下,系统可维持原设计。

8. 防火门监控系统

对于整体改造,改造后有火自系统时,需设置;局部改造后,现状有火自系统的,改造范围内涉及到本系统新增及改造的电气消防设备末端点位及管线均按现行规范执行,在满足消防安全的前提下,系统可维持原设计。

9. 布线

旧规对布线要求相对宽松,新规对电线电缆的燃烧性能要求更加严格,比如供电线路和消防联动控制线路必须采用耐火铜芯电线电缆,燃烧性能大于B2级;报警总线等传输线路采用大于B2级的铜芯电线电缆,不再要求耐火性能,只需阻燃。对于布线,按现行规范设计,说明管线的燃烧性能等级等参数。

(四) 水、暖专业规范的协同性

针对消防水泵用电为一级负荷的要求,有的改造建筑现状不

能满足一级负荷所要求的双重电源供电条件,只能新建一台柴发做备用动力电源,增加了经济造价成本;有的可从现状引入另一备用电源。例如,本市某创意园室外消防改造项目,因园区新增消防泵房,室外消防用水量25L/s,按《建筑防火通用规范》要求,消防设备用电按三级即可,因室内仅采用稳压泵稳压,用电负荷按一级。除了由园区泵房附近的现状箱变引入一路电源,还要从离消防泵房约300m处另外一台现状箱变引入一路电源做备用电源,同时消防泵房配电柜也要做末端互投装置。

对于消防水泵是否设置自动巡检柜装置的问题,在设计过程中,一般规范中“宜”遵循“应”的条文,但为了减少无谓的投资,响应节能减排国策,降低故障率,故取消巡检柜设置,同时加强值班人员管理。

对于改造项目中新增应急排烟窗的问题,可由楼梯间所在防火分区内任两只独立的火灾探测器的报警信号作为应急排烟窗开启的联动触发信号,新增手动控制线至消防控制室内的消防联动控制器上实现手动控制。另外,在楼梯间新增可以供消防救援人员在现场手动开启应急排烟窗的就地开启装置,将该装置的手动开启方式引至楼梯间适当位置,便于手动开启。

三、结论

目前,城市更新逐渐成为城市建设的主流。在总量控制、减量发展的新理念、新要求下,城市发展进入有机更新时代。长期以来,针对既有建筑改造的消防技术标准适用问题,存在理解上和执行上的困惑。改造工程完全按照新规执行,改造难度和代价巨大,大量建筑甚至无法实施改造,已成为困扰改造设计的难点、堵点、痛点。

通过以上分析,既有建筑改造中消防电气的难点主要集中在原始图纸资料缺失,建筑布局及功能改变的局限性,各专业现行规范执行的复杂性,系统兼容、合规性,以及以上改变带来的消防安全重新评估的难点问题。这些难点需要通过详细的规划、专业的设计和严格的施工管理来克服,以确保改造项目的顺利进行和建筑的安全使用。本文在保证消防安全的目标下,结合现状建筑实际情况,对比新、旧规范的部分不同之处,了解执行现行规范的困难,通过在实际项目中积累的工作经验及遇到的通用问题,分析消防改造设计技术要求和措施,提供相应的解决对策,可为相关设计人员提供参考。

参考文献

- [1] 陈莹. 既有建筑改造工程电气设计探讨[J]. 智能建筑电气技术, 2021, 15(6).
- [2] 北京市住房和城乡建设委员会. 北京市关于深化城市更新中既有建筑改造消防设计审查验收改革的实施方案 政策解读 [A/OL]. 2021-12-02.
- [3] 北京市建筑设计研究院有限公司. 北京市既有建筑改造工程消防设计指南 2023年版 [S]. 2023-04.
- [4] 倪天晓. 既有建筑改造电气消防设计探讨[J]. 现代职业安全, 2024, (03): 84-86.
- [5] 曹彬, 梁兴芝, 鲍静芝. 既有建筑消防改造电气设计实践分析[J]. 江西建材, 2023, (11): 107-108+114.
- [6] 霍伟亮. 既有建筑改造中电气消防设计探讨[J]. 中国住宅设施, 2020, (05): 18+20.
- [7] 张靖岩, 潘晓旭, 杨玲, 等. 基于火灾风险评价模型的既有建筑消防投资决策分析[J]. 消防技术与产品信息, 2011(3): 4. DOI: CNKI: SUN: XHJS. 0. 2011-03-019.
- [8] 易锦涛. 关于既有建筑改造工程中的电气消防设计分析[J]. 装饰装修天地, 2023(6): 70-72. DOI: 10.12257/j.issn.1006-2122.2023.06.024.
- [9] 银智钢, 范建文. 既有建筑改造中电气消防设计探讨[J]. 百科论坛电子杂志, 2020, 000(009): 1551.
- [10] 陈水龙. 基于建筑电气设计中的消防配电设计分析[J]. 城市建设理论研究: 电子版, 2015, 000(021): 772-773.

云南弥勒某景区地域文化视角下的建筑设计策略

李凌旭¹, 马明昌², 向冲¹, 马子童², 孙一峰³

1. 滇池学院 建筑工程学院, 云南 昆明 650500

2. 长春工程学院 建筑与设计学院, 吉林 长春 130012

3. 吉林大学, 吉林 长春 130012

摘 要： 云南弥勒具有众多景区，位于云南省红河哈尼族彝族自治州，随着人们的生活水平的不断提高，弥勒以其独特的自然景观和浓郁的地域文化特色吸引了大量游客。该区域的文化特质、建筑形式都集合了彝族、哈尼族的传统民俗，广阔的绿地面积也充分展现人与自然的和谐共生理念。近些年弥勒景区还在不断地持续旅游开发中，如何将地域文化融入建筑设计，以实现景区的文化表达与生态保护，是亟需解决的重要课题。本文从地域文化的视角出发，分析弥勒景区的自然与人文特色，并结合现代建筑设计的理论与实践，提出适宜的设计策略，为景区可持续发展提供指导。

关 键 词： 弥勒；地域文化；建筑设计；文化传承；生态设计

The Architectural Design Strategy of Maitreya Taiping Lake Scenic Area: A Regional Cultural Perspective

Li Lingxu¹, Ma Mingchang², Xiang Chong¹, Ma Zitong², Sun Yifeng³

1. School of Architecture and Engineering, Dianchi College, Kunming, Yunnan 650500

2. School of Architecture and Design, Changchun Institute of Technology, Changchun, Jilin 130012

3. Jilin University, Changchun, Jilin 130012

Abstract： Maitreya Taiping Lake Scenic Area is situated in the Honghe Hani and Yi Autonomous Prefecture of Yunnan Province. As people's living standards continue to improve, the scenic area attracts numerous tourists with its distinctive natural landscapes and rich regional cultural heritage. The region's cultural and architectural features reflect the traditional folk customs of the Yi and Hani ethnic groups, while the expansive green spaces embody the principle of harmonious coexistence between humanity and nature. In recent years, tourism development in the Taiping Lake Scenic Area has been ongoing. A key challenge is how to integrate regional culture into architectural design to achieve both cultural expression and ecological preservation. This paper explores the natural and cultural characteristics of Maitreya Taiping Lake from the perspective of regional culture. By combining theoretical insights with modern architectural design practices, it proposes design strategies to support the sustainable development of the scenic area.

Keywords： Maitreya; regional culture; architectural design; cultural heritage; ecological design

引言

弥勒众多景区以湖光山色为依托，融合了红河地区多民族文化的多样性，形成了独特的自然人文景观。然而，随着旅游业的迅速发展，景区内建筑设计面临缺乏对地域文化的深度挖掘与表达，或老旧建筑需要再度更新等问题。王楠^[1]曾以经济条件为前提，提出需要合理利用自然环境资源与区域文化资源大力发展地区经济，他提出可以通过体育产业改善调整本地区的经济结构，从而提升新型城镇化绿色可持续发展。因此本文从弥勒景区的地域文化与民族特征出发，探讨景区内建筑设计如何通过形式、材料、功能与文化表达的深度融合，实现景区文化与生态价值的协调统一，为后续景区规划与建筑实践提供参考。

一、弥勒地区景区地域文化分析

（一）自然资源与文化背景

弥勒所具有的湖泊为云南高原湖泊，周边以丘陵、梯田及喀斯特地貌为主，湖区环境优美，生物多样性丰富。常年气候湿润，土地被大量的植被覆盖，有极具特色的仙人掌林和辽阔的草

坪，吸引大批游客，湖泊附近居民主要为彝族和哈尼族，他们的生产生活方式深受自然环境影响，形成了“人与自然和谐共生”的独特文化内涵。

（二）民族文化特征

弥勒地区也是一个多民族聚居的地方，主要有彝族、苗族、汉族等各民族的文化交织，因此在景区的建筑中，民族特色是鲜

李凌旭（1987.11-），女，汉族，吉林省敦化市人，研究生学历，副教授，滇池学院，云南省昆明市，邮编：650500，研究方向：建筑结构设计。

明的。因此建筑设计充分体现地方少数民族的传统元素。例如，使用彝族和苗族常见的木材和石材，采用他们独特的屋顶造型和装饰风格，如彝族的吊脚楼、苗族的尖顶建筑等。在建筑的门窗、墙面和屋顶等部位，融入民族传统的图案和装饰，如彝族的云纹、苗族的刺绣图案等，这些都可以通过雕刻、绘画、瓷砖装饰等方式呈现。所以在景区内的酒店或民宿及别墅区多以彝族特色为主，“坡屋尖顶”。彝族和苗族的传统建筑有共通点，注重实用性与美观性，多以木、石、竹为主要材料，布局遵循“天、地、人”三界平衡观，建筑色彩丰富，以象征自然和族群的图案装饰房屋。屋顶通常为斜坡式的瓦屋顶，外观多采用木质结构，木梁和木柱是重要的建筑元素^[2]。哈尼族文化的核心是“哈尼梯田”，也是哈尼族与自然和谐共生的真实写照。哈尼族建筑以“蘑菇房”为典型^[3]，草顶结构既经济又具有良好的隔热性能，也充分展现了绿色建筑与环保的特性。此外，彝族、苗族的传统特色图案常常被应用于建筑的门窗、屋檐和墙壁上，展示了当地丰富的文化底蕴。彝族建筑上常常雕刻有象征吉祥和好运的图腾图案，通常以“牛角”为主，体现了彝族文化的精神内涵。苗族的建筑具有浓厚的民族特色，常见的吊脚楼形式体现了对自然环境的适应，尤其是在山地地形上。弥勒地区的部分建筑也能看到这种苗族特色，尤其是在一些民族村落和景区内。汉族建筑风格在弥勒的影响较为广泛，尤其是在城市及周边的传统民居中。汉族建筑通常以砖瓦结构为主，讲究对称性和结构的稳固性。弥勒地区的传统民居中可以看到许多典型的汉族建筑元素，如飞檐、屋脊装饰以及门窗雕刻等。

二、地域文化对建筑的影响

佛教建筑元素也完美融合在建筑设计中，弥勒风景区与佛教文化关系密切，特别是“弥勒”这一名称本身与佛教文化息息相关。在设计过程中，应该加入佛教建筑风格的元素，如飞檐、回廊、佛塔等，并注重庙宇的空间布局，体现庄严肃穆的宗教氛围。建筑中具有符号性和象征性，设计时可以参考佛教的象征性结构和色彩搭配，如佛教寺庙常用的金色、红色和白色，并在一些建筑和雕塑中融入佛教经典故事的表现，传递出佛教文化的精神内涵。

弥勒景区的传统建筑风格是一种多元化的融合，既有云南少数民族的传统建筑特色，也受到佛教文化的深刻影响，同时结合了自然景观的特点与现代建筑的创新^[4]。通过这种文化和建筑风格的传承与创新，不仅保留了传统的风貌，还体现了现代旅游景区对美学和功能性的双重追求。弥勒地域文化对建筑的影响深刻且多样，特别是由于其丰富的民族文化和历史背景，弥勒的建筑风格融合了多种文化元素，体现了当地传统与现代的交融。

三、景区地域文化视角下的建筑设计策略

地域文化视角下的建筑设计策略聚焦于在建筑设计过程中融入地方文化特色，以实现建筑与其自然环境、社会背景和历史文

脉的和谐统一^[5]。这种策略有助于增强建筑的文化认同感，提升其功能性与美学价值。

景区的建筑工程项目需求和地域文化视角下的建筑设计策略，应立足于弥勒地区独特的自然景观和文化传统。在设计过程中，不仅要重视建筑的实用性和舒适性，还要注重文化内涵的传承和现代功能的创新，确保建筑与环境、文化和社会需求的和谐统一^[6]。通过文化特色与现代建筑技术的结合，弥勒景区将成为一个具有文化深度和自然魅力的旅游目的地。

四、景区地域文化视角下的建筑设计策略

（一）生态与自然环境的融合

该风景区的建筑设计应与周围的湖泊、山脉、植被等自然景观融合。建筑设计中可以使用天然材料，如木材、石材、竹子等，可以多开发与建造木屋酒店，配合大面积的玻璃幕墙，充分利用坡屋面覆以大面积绿植，将彝族和苗族特色共同融入屋面文化，蔬菜瓜果爬藤式覆盖和悬垂于屋面，以便游客能更好地感知和享受周围的自然美景。通过采用绿色建筑设计理念，通过太阳能利用、雨水收集、天然通风等手段，确保建筑的可持续性 with 低能耗，减少对自然资源的消耗。

（二）现代化设施与传统文化的结合

随着现代化进程，弥勒的建筑风格逐渐融入了现代建筑设计元素，景区在持续的建设中也多具现代风格，失去了传统少数民族特色，在保留传统文化元素的基础上，更多地采用了现代的建筑材料与技术。虽然强调弥勒景区内的建筑要体现传统文化，但也必须满足现代化的需求。建筑风格可以融入现代设计理念，如简洁的线条、开放的空间布局、智能化设施等，同时保留少数民族传统的外观和装饰元素，确保古今文化的融合。一些新建建筑和旅游设施在外观上仍保留了传统的建筑元素，如拱形门窗、飞檐屋顶等，同时又融入了玻璃幕墙、现代化内部布局和高科技设施，体现了传统与现代的和谐结合。

（三）文化传承与创新

通过建筑中的展示空间、展览馆等形式，集中展示弥勒和各大景区地区的历史文化、民俗风情和自然景观。设计时可以考虑采用现代化展示手段，如虚拟现实（VR）、增强现实（AR）技术，让游客更生动地了解当地文化^[7]，对于景区内的讲解或少数民族工艺制作的展示，可聘请当地少数民族居民，让他们用自身的文化和艺术去感受大自然的美，体会提升自身民族自豪感，宣传自身的同时也能体会其他民族的文化与智慧，同时也可以充分带动当地居民的就业问题。

王奕蓉等^[8]在云南特色地域文化视角下，总结了丽江束河古镇中的街、巷与古代传统建筑空间的发展与形成过程的相关关系，从另一角度提供了地域文化性建筑，在创作或改造过程中需要着重考虑的因素。景区内的艺术作品和建筑设计应当有机结合，展现地方艺术，如彝族的传统雕刻、苗族的织布艺术等。这些艺术形式可以成为建筑的装饰元素，也可以作为独立的景观小品，与建筑融为一体。设计师与建筑师在实际设计中，应该同时

考虑并设计出更多具有地域特色且符合现代生产生活需求的建筑设计，为推动地域文化的可持续发展和建筑创新提供新的思路和方法^[9]。

通过建筑中的展示空间、展览馆等形式，集中展示弥勒和该地区的历史文化、民俗风情和自然景观。设计时可以考虑采用现代化展示手段，如虚拟现实（VR）、增强现实（AR）技术，让游客更生动地了解当地文化^[10]。

景区内的艺术作品和建筑设计应当有机结合，展现地方艺术，如彝族的传统雕刻、苗族的织布艺术等。这些艺术形式可以成为建筑的装饰元素，也可以作为独立的景观小品，与建筑融为一体。

（四）文化表达策略

在建构的过程中，运用城市设计的思想方法，使地域文化在整体空间形态上外显，以此来塑造城市特色^[11]。在在建及即将建设的景区内，设计中硬充分引入彝族、哈尼族的传统建筑装饰元素，有研究发现彝族、哈尼族的自有结构特色较少，但大都体现在彝族的彩绘装饰、哈尼族的“蘑菇房”草顶形式中，可以将文化特征与现代建筑语汇相结合。设计时可以参考丽江古城的成功案例，通过将纳西族传统建筑形式与现代功能需求相结合，增强了文化辨识度。其次，哈尼族的“梯田”文化也不能被忽视，如果游客到一个地方却可以体验多个民族不同的文化，也是很好的体验，建筑设计可以通过层叠式布局或梯田纹样装饰，体现区域的文化内涵。

根据民族习俗和节庆活动需求，设计具有互动性和多功能性的公共空间，如可用于举办彝族火把节、哈尼族长街宴的场所。

（五）生态友好策略

景区的建筑设计应与周围的湖泊、山脉、植被等自然景观融合。建筑设计中可以使用天然材料（如木材、石材、竹子等），以及大面积的玻璃幕墙，以便游客能更好地感知和享受周围的自然美景。在持续开发建设中，建筑应避开敏感生态区域，尽量利用现有地形进行“最小干预”设计，减少对自然景观的破坏。目前，景区内具有森林木屋酒店附近的游客中心就采用半地下建筑形式，与地形完美结合，降低了景观干扰。同时，选用当地可再

生或可循环材料进行建造，不仅降低碳排放，也更贴近地域文化特色，也充分体现了绿色建筑特色。采用绿色建筑设计理念，通过太阳能利用、雨水收集、天然通风等手段，确保建筑的可持续性，减少对自然资源的消耗。建筑的屋顶设计可考虑绿化，创造自然环境与建筑的共生^[12]。

（六）功能与体验设计策略

在当代社会中，旅游代表消遣，代表体验生活，所以建筑设计中可设置文化展览空间，通过多媒体展示彝族和哈尼族的历史、艺术、民俗，增强游客对本地文化的感知。同时建设低影响、高体验的游憩设施，如栈道、生态步道，提供更贴近自然的游览方式，同时保护生态环境。邀请当地少数民族居民参与设计过程，将他们的文化传统与需求纳入设计方案，增强文化认同感与建筑实用性。景区标志性建筑，弥勒大佛等宗教建筑，作为该景区的标志性建筑，弥勒大佛的建设需特别重视文化内涵与建筑风格。其设计应突出佛教文化的庄严与神圣，同时注重建筑与自然环境的和谐共存。风景区内的小型建筑和雕塑作品可以增加景区的文化氛围和艺术感，这些元素的设计应当参考地域传统艺术风格。

虽然弥勒风景区的建筑要体现传统文化，但也必须满足现代化的需求。建筑风格可以融入现代设计理念，同时保留传统的外观和装饰元素，确保古今文化的融合。对于游客中心、休息区等公共空间，设计时要充分考虑游客的便利性、舒适性和互动性，特别是在高峰时段，建筑布局应具有良好的流动性，避免拥堵。

五、结论与展望

地域文化是建筑设计的重要灵感来源，通过深度挖掘弥勒景区的自然与文化特色，建筑设计可以实现文化传承与生态保护和经济的提升的多方共赢。本研究提出了从文化表达、生态友好和功能体验三个维度出发的设计策略，为景区的可持续发展提供了理论指导。未来的研究可以进一步探索数字技术、智能体验与地域文化结合的建筑设计方法，以及文化景区的智能化管理与运维策略，以全面提升景区的文化价值、民族特色传承与游客深度体验。

参考文献

- [1] 王楠. 安徽省两山一湖运动休闲小镇发展研究 [D]. 上海师范大学, 2020.
- [2] 李臻. 峨山彝族新房封顶仪式文化 [J]. 炎黄地理, 2024.
- [3] 麻可可, 刘肇宁. 哈尼族建筑元素符号解析——以元阳哈尼族小镇为例 [J]. 城市建筑, 2019, 16(36):4.DOI:CNKI:SUN:JZCS.0.2019-36-020.
- [4] 崔玉良, 杨大禹. 乡村振兴背景下楚雄彝族传统民居的保护与发展创新研究 [J]. 室内设计与装修, 2024(3):116-117.
- [5] Li Lingxu, Ma Mingchang, Ma Zitong, Su Yifeng. Study on the development value of the relationship between natural landscape and human ecology in Maitreya. *Advances in Social Science, Education and Humanities Research* 874. 2024.
- [6] 夏森. 特色地域文化视角下文旅项目规划策略研究——以云南弥勒太平湖项目为例 [J]. 城市建筑, 2023, 20(21):64-68.
- [7] 李尚操, 许周妹. 哈尼族生态建筑设计与可持续发展 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2024(5):87-89.
- [8] 王奕蓉, 陆衍安. 地域文化视角下的传统建筑空间形态研究——以丽江古城束河古镇为例 [J]. 城市建筑, 2024, 21(14):64-67.
- [9] 何山, 侯莹莹, 杨远健. 地域文化与建筑设计的融合研究 [J]. 模型世界, 2024:180-182.DOI:10.3969/j.issn.1008-8016.2024.18.059.
- [10] 宋国栋. 地域文化传承视角下的住宅建筑设计研究 [J]. 房地产世界, 2023, (12):52-54.
- [11] 张德帅. 地域文化传承视角下的滨水空间城市设计探讨 [J]. 城市建筑, 2024(004):021.
- [12] Jake W. The Spirit of the Pluriverse: Africana Spirit-Based Epistemologies and Interepistemic Thinking [J]. *Journal of the American Academy of Religion*, 2024(4):4. DOI:10.1093/jaarel/lfaf028.

陶塑脊饰在宗祠建筑中的应用初探 ——以广州陈家祠为例

高婷, 梁玮莎

长春理工大学, 吉林 长春 130000

摘 要： 陶塑脊饰作为中国传统建筑装饰艺术中的瑰宝，不仅丰富了建筑的视觉层次，还承载了丰富的文化内涵和象征意义。本文以广州陈家祠为例，探讨陶塑脊饰在宗祠建筑中的应用及其文化与艺术价值，旨在深化对传统建筑文化遗产保护与传承的认识。通过对广州陈家祠陶塑脊饰的研究，解析其在宗祠建筑中的装饰功能和文化象征，探讨这些脊饰如何反映出中国传统文化中对于美学和象征的追求，以及这一传统元素如何在现代的文化保护与传承中发挥作用。并且通过分析揭示了陶塑脊饰在宗祠建筑环境设计中的重要性，展示了其如何与建筑整体风格相结合，增强宗祠的艺术氛围和文化表达。

关 键 词： 陶塑脊饰；广州陈家祠；保护；宗祠建筑；环境设计

A Preliminary Analysis of the Application of Ceramic Sculpture Ridge Decoration in Ancestral Hall Architecture ——A Case Study of the Chen Family Ancestral Hall in Guangzhou

Gao Ting¹, Liang Weisha²

Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130000

Abstract： As a treasure in traditional Chinese architectural decoration art, pottery ridge decoration not only enriches the visual hierarchy of buildings, but also carries rich cultural connotations and symbolic meanings. This article takes the Chen Family Ancestral Hall in Guangzhou as an example to explore the application and cultural and artistic value of ceramic spine decoration in ancestral hall architecture, aiming to deepen the understanding of the protection and inheritance of traditional architectural cultural heritage. Through the study of the ceramic spine decorations in the Chen Family Ancestral Hall in Guangzhou, this article analyzes their decorative functions and cultural symbols in the ancestral hall architecture, explores how these spine decorations reflect the pursuit of aesthetics and symbolism in traditional Chinese culture, and how this traditional element plays a role in modern cultural protection and inheritance. And through analysis, the importance of ceramic spine decoration in the design of ancestral hall architectural environment was revealed, demonstrating how it can be combined with the overall architectural style to enhance the artistic atmosphere and cultural expression of the ancestral hall.

Keywords： ceramic spine decoration; Guangzhou Chen Family Ancestral Hall; protection; ancestral temple architecture; environmental design

引言

宗祠建筑中，陶塑脊饰的使用，除了体现家族身份地位和精神追求之外，也是对家族祖先的一种崇敬与纪念，因此具有十分重要的意义。在众多具有代表性的宗祠建筑中，以广州陈家祠的陶塑艺术作为典型代表而闻名于世，它的陶塑脊饰在全国同类建筑中占有举足轻重的地位，无论是工艺上的精湛程度，还是设计上的独特性。在宗祠建筑中，陶塑脊饰是一种传承，也是一种对家族传统的尊重。

一、陶塑脊饰的艺术与技术

陶塑脊饰是指应用于建筑物屋顶脊部，通常以动植物、神话

故事或抽象图案等各种形态为主题，起装饰、点缀建筑物作用的陶制装饰品。它的历史可以追溯到古代文明，比如古希腊罗马时期起到美化建筑作用的中国琉璃瓦、屋顶装饰等，这些陶塑脊饰

作者简介：

高婷，女，汉族，吉林省人，硕士研究生，环境设计专业，就职于长春理工大学，副教授，系副主任。

梁玮莎（1999.6-），女，汉族，广东省人，硕士研究生，环境设计专业，长春理工大学学生。

既承载了当时的文化艺术精华，又能起到装饰建筑的作用。

的在工艺和工艺上制作上陶塑脊饰都有很多的涉及。首先是选材，通常选用耐火的材料，如陶土等，这样才能保证陶塑经过高温烧制后，在形态和色彩上都能得到保持。其次是用色，使陶塑脊饰通过施釉、彩绘等手法，呈现出浓墨重彩的色彩，为建筑增添了艺术感。制作过程包括模具制作、雕刻、烧制等多个步骤，这些都需要工匠们经过长时间的精心制作，才能将其制作出来。

传统和现代环境艺术设计中陶塑脊饰占有举足轻重的地位。在传统建筑中，它既是反映当时社会审美观念和精神追求的建筑结构的一部分，又是反映当时社会的文化、历史载体。陶塑脊饰则在现代环境艺术设计中，承担着融汇传统与现代，传承现代的使命。在延续传统文化的同时，赋予建筑更丰富的艺术表现力，提升建筑的整体品位和观赏性，设计师们通过对传统陶塑脊饰的重新诠释和创新，将其融入到现代建筑设计中。

二、广州陈家祠的建筑与艺术特色

广州陈家祠又称陈氏书院，是在清朝末年由陈氏家族出资兴建的，主要用于祭祀祖先并为族人集会之用，始建于1894年，为中国传统建筑与装饰艺术的杰出代表，具有典型的粤式硬山建筑风格特征，由正门正厅后厅等部分组成，具有高耸的屋顶宽阔的天井和复杂的木结构等特色。该建筑集传统与精华于一体，是中国南方建筑之冠。

陈家祠的中路建筑是建筑群中等级最高的，建筑坐北朝南，建筑面宽、纵深均为80米，平面呈正方形，为中国的“三进三路九堂两厢抄”院落式布局。建筑东西两侧设有东西两庑，庑内有厢房和廊，斋和前后 厢均采用了硬山顶，中厢采用了卷棚顶。中进大堂是建筑最核心部分——聚贤堂。聚贤堂采用了硬山式结构屋顶，屋顶样式多样、高低起伏，形成了优美的画卷。陈家祠是广东规模最大、装饰华丽、保存完好的中国清代传统岭南宗祠建筑^[1]。

陈家祠运用陶塑脊饰尤为突出，足见岭南陶塑工艺之精湛。采用的是著名的石湾陶塑。其以陶泥为主要原料，雕塑后烧制而成，它拥有耐高温、耐腐蚀、久保色质的优点，很适合高温多雨的岭南地区。陈家祠共有11条陶塑脊饰，其中以聚贤堂上的脊饰规模最为宏大，色彩最为绚丽，制作工艺最为精湛^[2]。

这些脊饰多以神话人物、历史故事、吉祥动植物等为题材，设计精美，色彩鲜艳，既起到装饰、美化的作用，又有避邪祈福之意，因此，这些脊饰的纹饰在造型上陶塑脊饰的摆放位置、造型选择都非常考究，充分展现了匠人的匠心独运，彰显了匠人对传统文化的尊崇与传承。陈家祠的艺术价值和文化内涵通过这些精细的陶塑脊饰得以进一步彰显，使其成为研究岭南传统建筑和雕塑艺术的重要窗口，而不仅仅是族人的聚居地。

三、环境艺术设计中的陶塑脊饰

在广州的陈家祠里，陶塑脊饰既是装饰物，又是宗族文化和信仰的重要内容，其图案与象征意义深深根植于陈氏的宗族文化

和信仰之中。在这些脊饰中，经常以龙作为主题的吉祥物出现，以象征权力与繁荣的保护，也反映了陈氏家族对家族今后的期望与祈祷。以龙为形象代表中华民族对权威与吉祥的追求；以凤凰为形象代表中华民族对高贵与和谐，体现的是具有表达和象征意义对家族未来的期盼。

整个陈家祠与陶塑脊饰的设计的其他艺术元素如木雕件、石雕件、彩绘相协调。在环境融合方面，陶塑脊饰的颜色与祠堂的总体色调相互呼应，运用红蓝两色与中国传统的色彩，同时与大红色之柱体金字雕花与蓝色瓦片协调统一，这种颜色与材质之搭配再加上精雕细刻之工艺。整个建筑群营造出一种庄严神圣之气氛^[3]。

陈家祠在视觉上受到的冲击有了明显的增强。这些位于建筑最高处的立体、色彩丰富的陶塑作品（图1），对于观感和体验层面而言，都在第一时间吸引了参观者的眼球，让人在很远的地方就能感受到这座建筑与众不同的地方^[4]。其细致入微、栩栩如生的形象，让参观者在赞叹手工艺之余，更能感受到一种传承历史、厚重文化。同时，陶塑脊饰的阴影会随着光线的变化，将各种图案抛洒到建筑物上，带给参观者视觉和情感上的不断变化的体验，加深人们对建筑艺术和文化价值的理解。



> 图1 陈家祠陶塑脊饰现状

资料来源：笔者自拍

四、面对现代应用与挑战的陶塑脊饰

作为传统文化的重要表现形式，陶塑脊饰在现代环境艺术设

计中仍有广泛的应用和探索。一些当代建筑师和艺术家为了体现地域文化和艺术的精髓，尝试在现代建筑中融入传统的陶塑脊饰。如现代陶塑脊饰作为景观元素的运用，在一些城市的文化广场、公园或高档住宅小区中都能见到，为其建筑增添了独特的艺术韵味和文化底蕴。

虽有现代设计给予其创新和改造，但陶塑脊饰在现代的运用上也遇到了一定的挑战。传统工艺与现代科技的融合是主要问题之一^[5]。传统的陶塑脊饰虽然拥有独特的手工制作技艺，但在制作效率、成本控制以及环境保护等方面都需要兼顾现代大型建筑工程。因此，陶塑脊饰在现代应用中面临的重要挑战之一就是如何在保持传统工艺魅力的同时，与现代制作工艺和工艺相结合。

另外，对陶塑脊饰的保护与维护也是一个十分重要的课题。随着时间的流逝，陶塑脊饰可能会受到自然风化作用的影响。因此，对陶塑脊饰进行有效的技术手段与政策措施的保护与修复是十分必要的。另外，加强公众对文化遗产保护的认知与参与也是必不可少的^[6]。为使社会对陶塑脊饰得到持续传承与发展的促进与保护意识的提高与法律法规的完善是当务之急。总结起来就是，现代设计运用陶塑脊饰既是对传统文化的传承与创新也是对当代艺术与科技的融合与挑战，是需要传统技艺与现代工艺的结合。

五、案例研究——陈家祠陶塑脊饰的设计思考

选择陈家祠的陶塑脊饰作为案例研究，主要理由在于它是岭南传统建筑的代表之一，承载着深厚的历史文化内涵和艺术价值。对其陶塑脊饰进行深入的剖析，对揭示岭南文化与艺术的独特魅力有一定的借鉴作用，并对传统工艺在现代环境艺术设计中的价值与启示，所以对其进行了深入的探讨与分析。

陈家祠的陶塑脊饰从环境艺术设计的角度来看，表现出了别具一格的设计思路。脊饰图案以龙形吉祥物为主，寓意着家族的荣耀与祈福，是建筑文化的延伸与传承，是陶塑脊饰与其他艺术元素如木雕石雕相协调的结果，共同营造了一种和谐统一的空间氛围，反映了岭南建筑的独特风格和审美理念^[7]。从这一意义上

讲，陶塑脊饰是陈家祠环境艺术设计的一大成功之作。

整个陈家祠陶塑脊饰的设计向人们启示着现代环境艺术设计的发展方向。一是它提醒人们传统工艺与现代设计可以相互融合创新；第二，通过重新解读与运用传统文化，为现代建筑注入新的艺术生机^[8]。最后，陈家祠陶塑脊饰的设计思考也提示人们现代建筑不仅是一个功能性的空间，更多的是文化的载体与精神的象征，它应该被赋予更多的情感与思想内涵。所以现代环境艺术设计，应该重视文化内涵与审美价值的传达^[9]。在现代社会，建筑的作用是双重的。

六、结论

陶塑脊饰在宗祠建筑中占有举足轻重的地位，是宗祠建筑的重要装饰元素，承载着重要的艺术价值和环境设计意义，不可忽视。作为宗祠建筑的重要装饰元素，陶塑脊饰既是对传统工艺的传承与展示，又是对文化精神的体现与传达。对陶塑脊饰的设计和应用，能使宗祠建筑既有艺术气息，又能弘扬家族文化与信仰，为后人留下珍贵的历史遗产。作为环境艺术设计的典范，陈家祠在陶塑脊饰的运用上，既体现了岭南建筑的独特风格，又彰显了陈氏家族的文化底蕴与艺术追求，将陶塑脊饰的艺术价值与宗祠建筑的环境设计意义融为一体。对建筑空间进行精心设计与装饰，以营造一种庄严肃穆而富有文化内涵的氛围，使岭南文化作为其中的一个重要代表之一得以彰显。

为此发展前景广阔的陶塑脊饰研究及应用技术，刻不容缓。需要在传统工艺的保护与传承上多下功夫；对传统工艺与现代科技相结合的研究给予更多的重视与支持^[10]；其次，对陶塑脊饰的制作方法进行深入的探索与改革，使之效率更上一个台阶；重视对陶塑脊饰进行教育与传播工作，在提高公众对传统文化认知与认识的基础上，使陶塑脊饰得到更广泛的应用与开发；通过媒体，借助社会与公众对陶塑脊饰的关注与支持。在社会和公众的推动下，陶塑脊饰将继续在建筑艺术领域中发挥重要作用，为人们创造出更加美好的生活环境。

参考文献

- [1] 陆惠英, 赖彦蓉, 钟云燕. 装饰艺术在陈家祠堂中的应用研究 [J]. 美与时代 (城市版), 2024, (02): 19-21.
- [2] 郭丹瑾. 闽南传统古厝建筑装饰艺术研究 [D]. 南京艺术学院, 2022.
- [3] 陈俊委. 岭南传统雕塑艺术公共性研究 [D]. 湖北美术学院, 2022.
- [4] 唐超. 城市规划中建筑色彩选择的影响因素分析 [A] “中国建筑发展论坛——建筑与科技理论研讨会”论文集 [C]. 科技与企业杂志社、决策与信息杂志社、北京科技大学土木工程学院, 《科技与企业》编辑部, 2015: 1.
- [5] 刘妹, 姚素媛, 陈郁. 石湾陶塑瓦脊的文化意蕴与价值诠释 [J]. 佛山陶瓷, 2022, 32(09): 121-125.
- [6] 阙力. 改革开放以来中国环境陶瓷发展历程研究 (1978年—今) [D]. 中国艺术研究院, 2017.
- [7] 罗晓冉. 探索襄阳地区宗祠建筑艺术的发展和应用 [J]. 美与时代 (城市版), 2021, (07): 12-14.
- [8] 卢钢强. 浅谈我国传统工艺美术在现代设计中的创新应用 [J]. 大众文艺, 2019, (04): 60.
- [9] 李晓雪. 基于传统造园技艺的岭南园林保护传承研究 [D]. 华南理工大学, 2016.
- [10] 王梁. 科技支撑民族文化产业创新发展研究 [J]. 贵州民族研究, 2018, 39 (08): 181-184.

无人机倾斜摄影测量在城市更新中的运用探析

王宏达

沈阳市勘察测绘研究院有限公司, 辽宁 沈阳 110004

摘 要： 城市更新对城市可持续发展意义重大，无人机倾斜摄影测量作为新兴测绘技术，为城市更新提供高效数据获取与分析手段。本文阐述无人机倾斜摄影测量原理及特点，分析其城市更新中基础数据采集、现状评估、规划设计、施工监测环节的运用，探讨面临挑战及应对策略，旨在推动该技术在城市更新中广泛应用，提升城市更新质量与效率。

关 键 词： 无人机倾斜摄影测量；城市更新；数据采集；规划设计

Exploration of the Application of UAV Oblique Photogrammetry in Urban Renewal

Wang Hongda

Shenyang Surveying and Mapping Research Institute Co., Ltd. Shenyang, Liaoning 110004

Abstract： Urban renewal is of great significance to the sustainable development of cities. As an emerging surveying and mapping technology, UAV oblique photogrammetry provides efficient data acquisition and analysis methods for urban renewal. This article elaborates on the principles and characteristics of UAV oblique photogrammetry, analyzes its application in basic data collection, current situation evaluation, planning and design, and construction monitoring in urban renewal, explores the challenges faced and corresponding strategies, and aims to promote the widespread application of this technology in urban renewal and improve the quality and efficiency of urban renewal.

Keywords： UAV oblique photogrammetry; urban renewal; data acquisition; planning and design

一、无人机倾斜摄影测量原理及特点

（一）技术原理

无人机倾斜摄影测量通过搭载多镜头相机的无人机，从多个角度对地面物体进行拍摄。一般包括一个垂直向下的镜头和多个倾斜一定角度的镜头，如前后、左右倾斜镜头。在飞行过程中，无人机按照预定航线飞行，各镜头同时获取不同角度的影像数据。利用摄影测量原理，通过对这些多角度影像进行处理，如影像匹配、空三加密、三维重建等，构建出高精度的城市三维模型，能够真实反映地物的外观、位置、高度等信息^[1]。

（二）技术特点

1. 高效快速：无人机可快速到达作业区域，按照规划航线进行飞行拍摄，短时间内获取大面积区域的影像数据，相比传统测绘方式，大大提高了数据采集效率，能够满足城市更新项目对数据获取速度的要求。

2. 多角度成像：多镜头多角度拍摄获取的影像，能够提供丰富的地物信息，弥补了传统垂直摄影只能获取地物顶部信息的不足，可完整呈现建筑物侧面、道路走向、地形起伏等细节，为城市更新提供更全面的数据基础。

3. 高精度：随着相机技术和数据处理算法的不断发展，无人机倾斜摄影测量能够达到较高的精度，满足城市更新中对建筑物尺寸测量、地形测绘等精度要求，为后续的规划设计、施工监测等环节提供可靠的数据支持。^[2]

4. 灵活性强：无人机操作灵活，可根据城市更新项目的需

求，随时调整飞行高度、航线和拍摄范围，适应城市复杂的地形和环境条件，如狭窄街道、高楼林立区域等，获取传统测绘手段难以到达区域的数据。

二、无人机倾斜摄影测量在城市更新中的运用

（一）基础数据采集

1. 地形地貌测绘：无人机倾斜摄影测量能够以极高的分辨率捕捉城市地形地貌的细节，获取的高精度三维模型可精确呈现地形起伏、坡度、高差等关键信息。对于城市更新中的场地平整工程而言，这些数据能够帮助施工团队精准规划土方开挖与回填量，减少不必要的施工成本与资源浪费。在道路规划方面，依据地形数据可以合理设计道路的纵坡与横坡，确保道路排水顺畅，提高行车安全性与舒适性。同时，在进行排水设计时，准确的地形数据能够辅助确定排水管道的走向与坡度，保障城市排水系统的高效运行，避免积水内涝等问题。^[3]

2. 建筑物信息采集：利用无人机倾斜摄影测量技术，可对建筑物进行全方位的数据采集，精确获取建筑物的位置、形状、高度、层数等信息，并生成逼真的三维模型。通过对建筑物模型的细致分析，能够深入了解建筑物的结构特征，判断其结构体系是否稳固，是否存在结构安全隐患。对于建筑物的外立面状况，可清晰识别出墙面裂缝、剥落、渗水等问题，为外立面的翻新改造提供准确依据。在建筑物的拆除或新建规划中，这些数据能帮助设计师充分考虑周边建筑物的空间关系，避免施工过程中对既有

建筑造成不必要的破坏，同时确保新建建筑与周边环境相协调。

3. 基础设施信息采集：城市道路、桥梁、地下管线等基础设施是城市运行的重要保障。无人机倾斜摄影测量可对这些基础设施进行全面测绘，获取其位置、走向、管径、材质等详细信息。对于道路和桥梁，能够监测其路面破损、桥梁结构病害等情况，为道路维修和桥梁加固提供数据支持。在地下管线方面，准确掌握管线的分布信息，可有效避免在城市更新施工过程中对管线造成破坏，保障城市基础设施的安全和正常运行。同时，这些数据也为基础设施的更新改造提供了基础，有助于规划更合理、更高效的基础设施网络。^[4]

（二）现状评估

1. 城市空间分析：基于无人机倾斜摄影测量获取的三维模型，进行城市空间分析，如容积率计算、建筑密度分析、绿地率计算等，评估城市现有空间利用情况，找出城市空间利用不合理的区域，为城市更新规划提供依据，以优化城市空间结构，提高土地利用效率。

2. 建筑质量评估：通过对建筑物三维模型的观察和分析，可初步判断建筑物的结构安全状况、外立面破损情况、屋顶防水情况等，为建筑的质量评估提供直观的数据支持，确定需要重点改造或维护的建筑对象，合理安排更新改造顺序和资金投入。

3. 环境评估：分析城市绿化覆盖情况、水体分布、噪音污染源等环境因素，评估城市环境质量，为城市更新中的生态修复、环境改善提供数据依据，制定针对性的环境治理措施，提升城市生态环境品质。^[5]

（三）规划设计

1. 方案制定：规划者在进行城市更新规划设计时，可依据无人机倾斜摄影测量获取的三维数据，直观、全面地了解城市现状。结合城市更新目标和需求，能够在三维模型上进行虚拟规划，模拟多种规划设计方案。例如，尝试不同的建筑布局调整方案，分析其对城市空间形态、交通流线、日照通风等方面的影响；对道路进行拓宽或新建规划，评估其对周边交通和土地利用的影响；规划增加绿地和公共空间，分析其对城市生态环境和居民生活品质的提升效果。通过对不同方案的对比分析，运用专业的评估指标和方法，选择最优方案，提高规划设计的科学性和合理性，确保城市更新项目能够实现经济、社会和环境效益的最大化。

2. 可视化展示：将规划设计方案以三维模型的形式展示出来，为决策者、设计师和公众提供了直观、清晰的规划意图和效果呈现。通过虚拟现实（VR）、增强现实（AR）等技术，可让观众身临其境地感受规划后的城市空间，增强沟通与交流效果。决策者能够更直观地评估规划方案的可行性和优势，做出科学决策；设计师之间可以更便捷地交流设计思路，优化设计方案；公众也能够更深入地了解城市更新规划，提高公众参与度，促进规划方案的顺利实施，减少实施过程中的阻力和矛盾。^[6]

3. 日照分析：日照是影响居民生活质量的重要因素。利用无人机倾斜摄影测量生成的三维模型，可运用专业的日照分析软件，准确评估不同建筑布局 and 高度对周边建筑日照的影响。在城

市更新规划设计中，通过合理控制建筑高度、间距和朝向，确保新建建筑不会对周边既有建筑的日照造成负面影响，满足居民对日照的需求，保障居民的合法权益。同时，良好的日照设计也有助于提升建筑的节能效果，降低能源消耗，实现城市的可持续发展。

（四）施工监测

1. 施工进度监测：在城市更新项目施工过程中，定期利用无人机进行倾斜摄影测量，获取施工区域的实时影像数据。将这些数据与规划设计模型进行对比，能够实时监测施工进度。通过图像识别和数据分析技术，可快速发现施工偏差，如建筑物位置偏移、高度偏差、施工区域范围偏差等。一旦发现偏差，可及时采取相应措施进行调整，如调整施工工艺、增加施工设备或人力等，确保施工按计划进行，避免工期延误，降低施工成本。^[7]

2. 施工质量监督：对施工过程中的关键部位和环节进行详细拍摄和分析，是保障施工质量的重要手段。无人机倾斜摄影测量可对基础施工、主体结构施工等关键环节进行多角度、高分辨率拍摄。通过对拍摄影像的分析，能够监测施工质量，及时发现质量问题，如混凝土裂缝、墙体垂直度偏差、钢筋布置不合理等。对于发现的质量问题，可及时通知施工团队进行整改，避免质量问题扩大化，保障施工质量和安全。同时，这些影像资料也可作为施工质量追溯的依据，便于后续的质量检查和评估。

3. 周边环境影响监测：城市更新施工过程中可能会对周边环境产生一定影响，如扬尘、噪音、周边建筑物变形等。利用无人机搭载相应的监测设备，可对施工过程中的周边环境进行实时监测。对于扬尘，可通过监测空气中颗粒物浓度，评估扬尘污染程度，及时采取洒水降尘、设置防尘网等措施；对于噪音，可准确监测噪音源和噪音传播范围，采取降噪措施，减少对周边居民生活的干扰；对于周边建筑物变形，可通过定期测量建筑物的位移和变形情况，及时发现潜在的安全隐患，采取相应的防护措施，保障周边建筑物的安全。

三、无人机倾斜摄影测量在城市更新中运用面临的挑战

（一）数据处理难度大

1. 数据量庞大：无人机倾斜摄影测量获取的影像数据量大，对数据存储、传输和处理设备的性能要求高。在数据处理过程中，容易出现数据传输卡顿、处理速度慢等问题，影响工作效率。2. 数据处理算法复杂：构建高精度的三维模型需要复杂的数据处理算法，如影像匹配、空三加密等，算法的准确性和稳定性直接影响三维模型的质量。对于复杂的城市环境，如高楼林立、地物遮挡严重的区域，数据处理难度更大，可能导致模型精度下降或构建失败。^[8]

（二）精度受限因素多

1. 飞行环境影响：无人机飞行过程中，受天气、气流、电磁干扰等因素影响，可能导致飞行姿态不稳定，影响影像拍摄质量，进而影响测量精度。例如，在大风天气下，无人机晃动较

大，拍摄的影像可能出现模糊、变形等问题。2. 设备精度限制：无人机搭载的相机、GPS 等设备精度有限，在一定程度上影响测量精度。随着设备的使用和老化，设备精度可能会进一步下降，需要定期对设备进行校准和维护。

（三）专业人才短缺

1. 技术人才不足：无人机倾斜摄影测量涉及摄影测量、遥感、计算机技术等多学科知识，需要具备专业知识和技能的人才进行操作和数据处理。目前这类专业人才相对短缺，制约了该技术在城市更新中的推广应用。2. 复合型人才缺乏：城市更新项目需要既懂无人机倾斜摄影测量技术，又熟悉城市规划、建筑设计、施工管理等领域知识的复合型人才，能够将技术与城市更新业务深度融合。这类复合型人才的培养难度较大，人才储备不足。^[9]

四、应对策略

（一）提升数据处理能力

1. 硬件升级：配备高性能的数据存储、传输和处理设备，如大容量硬盘、高速网络、多核处理器等，提高数据处理效率。采用云计算技术，实现数据的分布式存储和并行处理，进一步提升数据处理速度。2. 算法优化：加强对数据处理算法的研究和改进，提高算法的准确性和稳定性。针对复杂城市环境下的数据处理难题，开发适应性强的算法，提高三维模型的构建精度和效率。

（二）提高测量精度

1. 优化飞行方案：根据不同的飞行环境和测量要求，合理选择飞行时间、高度、速度等参数，优化飞行航线，减少飞行姿态变化对影像质量的影响。在飞行前进行充分的气象观测和环境评

估，避免在恶劣天气和强电磁干扰环境下飞行。2. 设备校准与维护：定期对无人机搭载的相机、GPS 等设备进行校准和维护，确保设备精度。采用高精度的测量设备和传感器，提高测量精度。同时，结合地面控制点测量，对无人机测量数据进行精度检校和修正。^[10]

（三）加强人才培养

1. 专业教育培养：高校和职业院校应加强相关专业建设，开设无人机倾斜摄影测量、摄影测量与遥感等专业课程，培养具备专业知识和技能的人才。注重实践教学，提高学生的实际操作能力。2. 在职培训提升：针对在职人员，开展定期的培训和继续教育，更新知识结构，提升专业技能。鼓励企业与高校、科研机构合作，开展技术培训和学术交流活动，培养既懂技术又懂业务的复合型人才。

五、结论

总之，无人机倾斜摄影测量技术凭借其独特优势，在城市更新的基础数据采集、现状评估、规划设计、施工监测等环节发挥着重要作用，为城市更新提供了高效、准确的数据支持，提升了城市更新的质量和效率。然而，在应用过程中仍面临数据处理难度大、精度受限、法律法规不完善、专业人才短缺等挑战。通过提升数据处理能力、提高测量精度、加强人才培养等应对策略，能够有效解决这些问题，推动无人机倾斜摄影测量技术在城市更新中更广泛、更深入地应用，为城市的可持续发展提供有力的技术保障。随着技术的不断发展和完善，无人机倾斜摄影测量将在城市更新领域发挥更大的作用，为城市的高质量发展做出更大贡献。

参考文献

[1] 潘敏青. 无人机倾斜摄影测量技术在广州城市更新改造中的应用研究 [J]. 技术与市场, 2020, 27(08): 62-63.
[2] 卢海城. 无人机倾斜摄影测量在城市建筑物竣工测量中的应用 [J]. 四川水泥, 2020(02): 130.
[3] 倪伟. 无人机倾斜摄影测量技术在城市三维建模中的应用探讨 [J]. 中国地名, 2019(10): 68.
[4] 王佳龙. 无人机倾斜摄影测量在城市三维建模中的应用探讨 [J]. 山东工业技术, 2019(07): 96.
[5] 尹璐璐. 无人机倾斜摄影测量在城市三维建模中的应用 [J]. 山西建筑, 2018, 44(34): 207-208.
[6] 李杰, 马强. 无人机低空倾斜摄影测量技术在玛纳斯智慧城市建设中的应用 [J]. 岩土工程技术, 2018, 32(04): 173-176+211.
[7] 王永兴, 刘明岐. 无人机倾斜摄影测量在三维建模中的应用研究 [J]. 世界有色金属, 2018(09): 30-31.
[8] 张祖勋, 张剑清, 廖明生, 等. 遥感影像的高精度自动配准 [J]. 武汉测绘科技大学学报, 1998 (4): 41-44.
[9] 朱建伟, 袁国辉. 基于倾斜摄影测量技术的无人机城市建筑监测系统在违建查找中的应用 [J]. 工程勘察, 2017, 45 (007): 59-62.
[10] 陈琦, 陈航. 无人机倾斜摄影测量技术在城市更新基础数据调查工作中的应用研究 [J]. 智能城市, 2022, 4 (11): 12-13.

盐腐蚀冻融对混凝土箱梁静力弯曲性能影响研究

何林

青海大学 土木水利学院, 青海 西宁 810016

摘 要 : 为了探究盐腐蚀冻融循环对混凝土梁弯曲性能的影响,采用模型试验研究的方法,设计了试验梁的尺寸和配筋。为了模拟盐腐蚀和冻融的共同作用,将试验梁置于试验环境模拟箱中进行冰冻,然后在浓度为10%的 Na_2SO_4 溶液中融化,腐蚀冻融次数分别为0、15和30次。在盐腐蚀冻融结束后,对试验梁进行了静态三点弯曲加载破坏对比试验,并记录试验梁的破坏过程。研究表明:随着盐腐蚀冻融次数的增加结构的承载力均呈现下降的趋势;梁的弹性变形逐渐减小;但破坏形式仍为弯曲破坏。

关 键 词 : 盐腐蚀; 冻融循环; 抗弯曲性能

The Effects of Salt Corrosion and Freeze-Thaw Cycles on the Static Bending Performance of Concrete Box Girder

He Lin

College of Civil Engineering and Water Conservancy, Qinghai University, Xining, Qinghai 810016

Abstract : To investigate the impact of salt corrosion and freeze-thaw cycles on the flexural behavior of concrete beams, a model experimental research approach was employed, wherein the dimensions and reinforcement of the test beams were meticulously designed. To simulate the combined effects of salt corrosion and freeze-thaw actions, the test beams were subjected to freezing in an environmental simulation chamber, followed by thawing in a 10% Na_2SO_4 solution, with corrosion-freeze-thaw cycles ranging from 0, 15, to 30 cycles. Upon the completion of the salt corrosion and freeze-thaw cycles, a comparative static three-point bending load test was conducted to induce failure, and the failure processes of the test beams were documented. The research findings indicate that the structural load-bearing capacity exhibits a declining trend with an increase in the number of salt corrosion and freeze-thaw cycles; the elastic deformation of the beams gradually diminishes; however, the failure mode remains consistent as flexural failure.

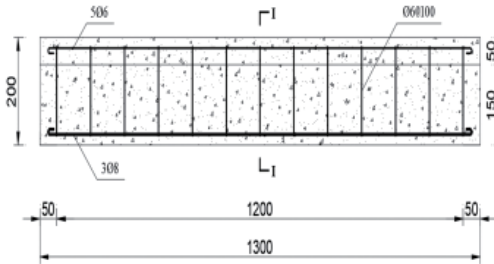
Keywords : salt corrosion; freeze-thaw cycles; flexural resistance

引言

在寒区高硫酸盐区,盐侵蚀与冻融作用是引起混凝土结构退化的重要因素。目前,针对混凝土梁抗盐侵蚀与抗冻性能的实验研究,多针对单一损伤因子进行,而对其在盐与冻融耦合作用下的性能研究尚不充分。刘云雁^[1]研究了氯盐环境引起钢筋锈蚀、混凝土开裂、预应力损失及结构承载性能退化。刘志鹏^[2]对冻融循环以及锈蚀后的预应力混凝土梁分别进行了受弯性能非线性数值模拟分析和试验研究。贺成林^[3]对自密实混凝土简支梁经受不同冻融循环次数后进行抗弯试验。基于寒冷地区结构性能退化,李福海^[4]探究了冻融以及冻融-弯曲荷载耦合作用对聚丙烯纤维水泥基复合材料(PP-ECC)梁抗弯性能的影响。故本文模拟盐腐蚀和冻融循环共同作用对梁结构抗弯曲性能的影响。

一、试验梁设计及制作

试验梁混凝土等级为C40,钢筋采用HPB300级钢筋。制作了3根混凝土箱型梁,试件长度为1300mm,顶板宽度为400mm、底板宽度为240mm,梁高200mm,厚度均为50mm。底板布置了3根纵向钢筋,其纵向配筋率满足最小配筋要求。顶板布置了3根纵向架立钢筋;两侧肋板各布置一根纵向钢筋。采用双肢箍筋,纵向钢筋保护层厚度为20mm。试验梁的立面图如图1所示。



> 图1 试验梁立面图

作者简介: 何林(1998-),男,四川巴中人,在读硕士,主要从事混凝土冲击动力学方面研究。

本次试验的制作，为了保证制作的精度，使用了钢制的模板，将模板和已安装好的钢筋笼放在试验室的振动台上，一边进行浇筑，一边进行振捣。为防止因试件成型不完整而产生内裂缝或损伤，待浇注48小时后拆模，放入标准养护室内28天养护。

二、静态弯曲试验方案

本试验拟采用三点弯曲试验方法，研究盐腐蚀与冻融交替对试件抗弯性能的影响规律。支承形式为简支，以位移荷载为主。在此基础上，开展盐腐蚀-冻融循环作用下的混凝土梁受弯承载力及位移变化规律研究。

（一）准备试验梁

将试验梁从硫酸盐溶液取出并静置3-4天，为了便于区分，文中将盐腐蚀冻融循环0次的试验梁标记为S-SF00、15次、30次的依次为S-SF-15和S-SF-30。试验梁放置在加载试验装置上并调整位置图2为静态弯曲试验布置图。



> 图2静态试验布置图

（二）加卸载方式

试验加载方式以位移加载为主。卸载时也采用同样的方式。试验采用了深圳万测集团的 HUT305A 型300kN 结构断裂疲劳试验机进行加载。该试验机具有精准易操作、全程电脑控制等优点，精度等级为0.5级。同时，配套软件能对加载值、跨中挠度和试件进行记录，以确保试验数据的准确性。

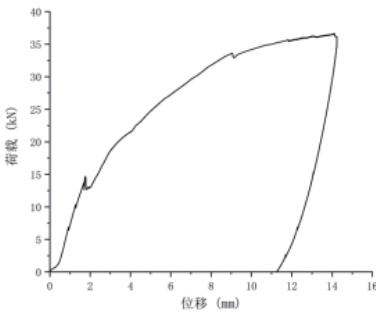
三、盐腐蚀冻融混凝土箱梁试验现象及过程分析

（一）盐腐蚀冻融0次试验梁弯曲破坏

本试验是一种加载破坏试验，其目的是研究混凝土梁在受集中力作用下的力学性能。试验采用位移控制与目标荷载相结合的加载方式，试验开始前将仪器的加载速度设置为1mm/min，设定极限跨中加载位移为30mm。

试验的加载初期弯矩很小，未发现结构出现裂纹，此时混凝土梁还处于弹性阶段。荷载-位移曲线图的斜率近似一致。持续加载，当荷载加载到14.66kN时，荷载位移曲线出现了波动，同时可以看到混凝土腹板处出现了细小垂直裂缝，将此处记作S-SF00的开裂荷载，对应的跨中位移为1.76mm。由荷载-位

移关系图可知，当达到开裂荷载后，其斜率逐渐减小，其增长速度也随之减慢，而与之相反，则是位移加速了发展。继续加载，当加载至33.62kN时试验梁开始屈服，此荷载记为屈服荷载，此时跨中位移为9.05mm，在荷载-位移关系图上，加载速率较慢，位移增加更大。当加载至36.67kN时，达到极限荷载，施加的荷载值开始突然下降，此时跨中位移为14.24mm，因此停止加载，进入卸载段。由荷载-位移图可知，卸荷期很短，也很陡，曲线接近于一次函数。当荷载卸载至0.1kN时，跨中的位移为11.27mm，即为试验梁的塑性变形。试验梁荷载位移曲线如图3所示。

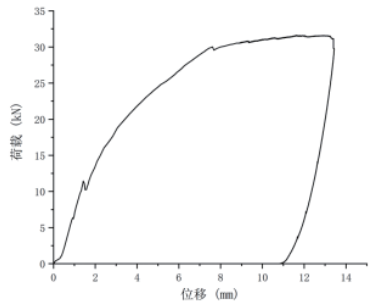


> 图3 S-SF00试验梁荷载位移曲线

（二）盐腐蚀冻融15次试验梁弯曲破坏

通过15次盐水侵蚀和冻融循环后的试件，进行了三点弯曲静力荷载作用下的损伤破坏实验。在荷载为11.44 kN的情况下，混凝土梁在跨中产生了微小的竖向裂纹，这种荷载称为开裂荷载，此时梁跨中位移为1.42mm。当加载至29.94kN时试验梁开始屈服，此荷载记为屈服荷载，荷载增长更加缓慢，跨中位移为7.54mm。当加载至31.55kN时，荷载突然出现了下降，无法继续加载，说明梁已破坏，31.55kN为此次试验梁的极限荷载，此时混凝土梁底已两条贯通裂缝，跨中位移为13.40mm。

当发现荷载出现下降后，开始卸载，由荷载-位移图可知，卸荷期很短，也很陡，曲线接近于一次函数，当荷载卸载至0.10kN时，此时跨中的位移为10.86mm，即为试验梁的塑性变形。试验梁荷载位移曲线如图4所示。



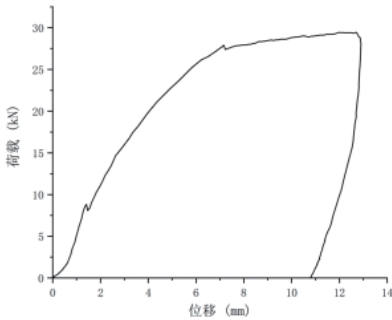
> 图4 S-SF15试验梁荷载位移曲线

（三）盐腐蚀冻融30次试验梁弯曲破坏

在对盐腐蚀冻融30次试验梁三点弯曲静态加载破坏试验时。当荷载达到8.84kN时，混凝土梁跨中出现了细小的垂直裂缝，将该荷载值记为开裂荷载，梁跨中位移为1.41mm。当加载至27.93kN时试验梁开始屈服，记为屈服荷载，荷载增长更加缓慢，跨中位移为7.16mm。当加载至29.46kN时，荷载突然出现了下

降,无法继续加载,说明梁已破坏,29.46kN 为此次试验梁的极限荷载,混凝土梁底已两条贯通裂缝,跨中位移为 12.70mm。

当发现荷载出现下降后,开始卸载,整个卸载阶段依然是非常短暂且很急剧,当荷载卸载至 0.10kN 时,此时跨中的位移为 10.78mm,即为试验梁的塑性变形。试验梁荷载位移曲线如图 5 所示。



> 图5 S-SF30 试验梁荷载位移曲线

四、试验结果对比分析

(一) 开裂、屈服和极限荷载对比分析

三点弯曲静态试验研究发现,遭受不同次数的盐腐蚀冻融下梁的最终破坏仍然为弯曲破坏。梁的各个破坏过程中的试验数据如表 1 所示:

表 1 试验梁三点弯曲静态试验结果

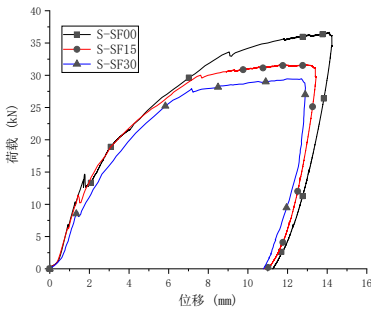
试验梁	开裂荷载 /kN	屈服荷载 /kN	极限荷载 /kN	破坏形态
S-SF00	14.65	33.62	36.67	弯曲破坏
S-SF15	11.44	29.94	31.55	弯曲破坏
S-SF30	8.84	27.93	29.46	弯曲破坏

破坏由表 1 可知,与 S-SF00 相比,试件 S-SF15、S-SF30 的开裂荷载 (S-SF0=14.65 kN) 分别降低了 3.21 kN 和 3.097 kN,降低了 21.91%、43.4%;屈服荷载 (S-SF0 为 33.62 kN) 降低了 3.68 kN,分别降低了 10.94% 和 18.5%;极限荷载 (S-SF0 为 36.67 kN) 降低了 5.12 kN,降低了 4.731 kN,降低了 13.96%,降低了 18.8%。综上,通过三点弯曲静力试验,发现盐腐蚀冻融循环作用下,试件的开裂荷载、屈服荷载和极限荷载均呈降低趋势,尤其是开裂荷载的降低比例最大,并且所有的失效形式都是弯曲破坏,表

明盐腐蚀冻融作用对试件的影响是显著的。

(二) 荷载—位移曲线对比分析

根据荷载—位移曲线对比图 6 可以看出,随着盐腐蚀冻融次数的增加,试验梁的极限荷载 (抗弯承载力) 持续降低。在加载过程中,初始阶段的荷载—位移值变化趋势基本一致,而当到达开裂荷载后各自的荷载—位移曲线都出现了改变,且斜率呈有规律的下降趋势。这主要是因为混凝土在盐分的侵蚀和冻融作用下发生损伤,进而影响了实验梁的承载能力。在卸载段曲线中,不同腐蚀冻融次数下的卸载曲线都很相似,但可以发现,梁的弹性变形随盐侵蚀和冻融循环次数的增多而降低。从整体曲线来看,在不同盐分侵蚀条件下,混凝土的载荷—位移曲线总体趋势基本一致,仍以弯曲破坏为主。这表明,经过 30 个盐蚀和冻融作用后,试件的破坏特性没有发生变化,其破坏模式与试件的弯曲破坏模式一致。



> 图6 荷载—位移对比分析图

五、结论

对腐蚀冻融次数分别为 0、15 和 30 次的混凝土梁进行了静载三点弯曲试验得出如下结论:

1. 梁的开裂荷载、屈服荷载和极限承载力都随冻融循环次数的增多而降低;这表明,经过盐的侵蚀和冻融作用,梁体都出现了不同程度的破坏,并且随着冻融次数的增加,其破坏程度也越来越大。
2. 研究试验梁的荷载—位移曲线的变化发现:盐腐蚀冻融导致试验梁的整体结构的受力性能受到了影响,随着盐腐蚀冻融循环次数的增加,梁的弹性变形逐渐减小;但破坏形式仍然为弯曲破坏。

参考文献

- [1] 刘云雁. 氯盐环境下锈蚀预应力混凝土梁抗弯性能研究 [D]. 大连海事大学, 2020.
- [2] 刘志鹏, 黄悦, 于雯, 等. 冻融循环作用下锈蚀预应力混凝土梁受弯性能数值分析 [J]. 建筑结构, 2024, 54(16): 86-92.
- [3] 贺成林, 韩风霞, 刘清, 等. 冻融作用下自密实混凝土梁抗弯力学性能研究 [J]. 中国科技论文, 2020, 15(10): 1157-1161+1176.
- [4] 李福海, 杨宗驰, 刘耕园, 等. 冻融—弯曲荷载耦合作用下 PP-ECC 梁的抗弯性能研究 [J/OL]. 西南交通大学学报, 1-9.2024.

冻融与盐腐蚀对混凝土动态力学性能的影响

熊佳航^{1,2}

1. 青海大学土木水利学院, 青海 西宁 810016

2. 青海省建筑节能材料与工程安全重点实验室, 青海 西宁 810016

摘 要： 为研究硫酸盐腐蚀与冻融循环耦合作用下对混凝土动态力学性能的影响, 利用分离式霍普金森杆装置, 对于0、15、30次耦合作用下的 C40 混凝土试块, 冲击气压分别为0.175、0.2、0.25、0.3MPa, 分析了不同应变率下的动态性能。结果表明: 混凝土受冻融腐蚀后, 动态峰值应力与动态峰值应变均有明显下降。在应变率逐渐增大时, 伴随着冻融腐蚀次数的增加混凝土应力峰值下降趋势逐渐增大。应变率达到 196.24 s^{-1} 时, 应力峰值下降为22.92%。当应变率相近时, DIF 值随试件冻融腐蚀天次数的升高而增加, 同时冻融腐蚀浸泡时间的延长, 对试件速率敏感性有所提高。高应变率 ($127 \sim 194\text{ s}^{-1}$) 状态下, 冻融腐蚀耦合作用下试件内部裂缝受阻碍, 冲击韧性呈现出先减小后增大的趋势。

关 键 词： 硫酸钠腐蚀; SHPB; 动态力学性能; 冲击荷载; 应变率

Effect of Freeze Thaw and Salt Corrosion on Dynamic Mechanical Properties of Concrete

Xiong Jiahang^{1,2}

1. College of Civil Engineering and Water Resources, Qinghai University, Xining, Qinghai 810016

2. Qinghai Province Key Laboratory of Energy-saving Building Materials and Engineering Safety, Xining, Qinghai 810016

Abstract： The dynamic mechanical properties of C40 concrete specimens were examined using a divided Hopkinson bar setup to study the impact of sulfate corrosion and freeze-thaw cycle interplay. The specimens were subjected to varying numbers of coupling cycles (0, 15, and 30) at different strain rates and impact air pressures (0.175, 0.2, 0.25, and 0.3 MPa) in order to analyze their dynamic characteristics. After freeze-thaw corrosion, the dynamic peak stress and strain of concrete both drastically diminish. As the rate rises, the peak stress of concrete diminishes with an increase in the number of cycles of freezing/thawing. When 196.24 s^{-1} is reached, the peak stress drops to 22.92%. The specimen's number of freeze-thaw corrosion days escalating, the DIF value rises when the strain rates are comparable. At the same time, the extension of the freeze-thaw corrosion soaking time increases the sensitivity of the specimen rate. At strain rates of $127\sim 194\text{ s}^{-1}$, freeze-thaw corrosion coupling impedes the internal cracks in the specimen, and its impact toughness exhibits a pattern of decreasing first, then increasing.

Keywords： Sodium sulfate corrosion; SHPB; dynamic mechanical properties; impact loading; strain rate

引言

混凝土是一种由水泥、骨料、砂和水组成的常见建筑材质, 具备优秀的耐用性和承重能力。然而, 在中国西北地区, 由于天气寒冷, 温度常处于冷热交替状态, 在这种环境下, 混凝土长期受到冻融循环与硫酸盐侵蚀的耦合作用, 其中硫酸盐腐蚀是较为常见的腐蚀之一。混凝土冻融破坏同样也是一种严重的问题, 这些都可能对导致建筑物结构的破坏, 硫酸盐腐蚀混凝土的主要原因^[1]之一是硫酸盐的化学作用。硫酸盐存在于土壤、地下水和工业废水中, 当混凝土暴露在含有硫酸盐的环境中时, 硫酸盐会与混凝土中的钙氢石灰石反应, 生成硬度较小的产物, 导致混凝土的体积膨胀和强度下降。其核心在于环境中的 SO_4^{2-} 离子渗入混凝土内层, 与水泥石内特定一些物质反应, 形成难以溶解的盐类矿物, 这些矿物吸收大量水分后体积膨胀, 产生膨胀的内应力。当应力超过混凝土的抗拉强度时, 混凝土开始受损, 导致其强度和粘结能力下降。硫酸盐侵蚀对混凝土的破坏通常表现为表面出现白色沉积物, 损坏通常从棱角处开始, 随后裂缝逐渐扩展, 伴随剥落, 最终使混凝土变得脆弱甚至破碎。冻融循环对混凝土力学性能的恶化同样是一个重要因素, 目前针对冻融损害的研究主要包括静水压理论、渗透压理论、膨胀压理论等四种假设^[2-3]。尽管各国学者对冻融损害的机理有不同的看法, 但这些假设为混凝土材料的研究提供了基础, 并在提高其抗冻性能方面发挥了关键作用。有关混凝土冻融破坏的研究主要集中在以下几个方面: 深入分析冻融破坏的机制、提升抗冻性能的措施, 以及预测冻融循环对耐久性的影响。

目前对于混凝土的冻融循环与硫酸盐腐蚀研究已取得许多成果,其中对于混凝土的基本力学性能^[4]以及对于损伤后的微观结构围结构分析^[5-6]都有着较为深度的研究,而对于混凝土在遭受硫酸盐腐蚀与冻融循环耦合作用下的动态力学性能方面的研究相对较少,然而受到冻融腐蚀后的混凝土在遭受冲击、振动等突发极端情况破坏时,混凝土在冻融循环与硫酸盐腐蚀耦合作用下的动态力学性能研究就显得尤为重要。

本文利用分离式霍普金森杆(SHPB)试验装置研究混凝土在冻融循环与硫酸盐腐蚀耦合作用下的动态压缩性能,分析在耦合作用下对混凝土的破坏形态、动态增强因子以及冲击韧性的影响,使混凝土在复杂环境下更有效的发挥作用。

一、试验简介

(一) 试件制备

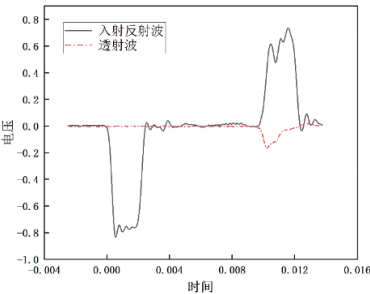
本次试验使用了由青海大学拓华水泥股份有限公司生产朔山牌 P.O42.5 普通硅酸盐水泥作为试验用料;同时采用了 C40 的常规硅酸盐混凝土样品并未加入任何外加剂,其主要成分包含有:水泥、沙子和破损石头及适量的水分等等,具体的混合比例详见表格 1 中的数据。此外,此次试验也制作了一些规格大小分别为 100×100×400 mm 和 100×100×100 mm 的大小不同的样本块来测试它们的性能表现情况。这些模型是在成形后且从模板中取出之后被放置在一个环境条件 (20±2) ° C 中,并且在室内静态保温和干燥的环境下进行了 28 天的观察与养护过程。后钻芯取样直径 72mm、厚度 34mm 的圆柱形试件,再用抛光机对试件进行打磨,保证所有试件打磨后使得端面平整度误差在 ±0.02mm 以内^[7]。

为了模拟腐蚀冻融的共同作用,试验方法是将打磨完的试件放在试验低温模拟箱中进行冷冻,在 10% 的 Na₂SO₄ 溶液中融化,腐蚀冻融次数分别为 0、15、30 次,分别对实验组进行编号(SF00、SF15、SF30)。待达到相应的腐蚀冻融次数后,取出试件静置风干。

(二) 制备和原理

本研究中使用了来自青海大学的振动与冲击试验室的大型分离式霍普金森压杆设备(见图 2),其尺寸为 φ75mm:试件部分的长度为 500mm;入射杆的长度为 5500mm,透射杆为 3500mm。为了避免因接触面磨损导致所产生的误差影响^[8],在测试前需要对被测物体表面涂一层薄油脂即“凡士林”来降低滑动效应并提高测量准确程度。再把试件固定在入射杆和透射杆之间,通过调节氮气瓶的气压来控制冲击子弹的速度。由两侧杆件的应变片收集各个信号,据 SHPB 试验基于一维应力波传播理论和应力均匀性假设,在此假设的基础上以入射应变、透射应变、反射应变为计算方法。随后使用二波法来进行计算,最终得出试件的应变率以及应力-应变曲线。

SHPB 试验典型的波形图如图 1 所示。



> 图1 SHPB 试验典型波形图

表 1 混凝土配合比

强度	成分	水泥	水	砂	石
C40	/kg	370	181	574	1166



二、霍普金森压杆(SHPB)系统

此次 SHPB 试验基于两种假设:应力均匀性假设以及一维应力波传播理论,计算方法包括入射应变、透射应变和反射应变^[9]。

$$\sigma_s(t) = \frac{A_0}{A_s} E \varepsilon_t(t)$$

$$\dot{\varepsilon}_s(t) = -2 \frac{C_0}{L_s} \varepsilon_r(t)$$

$$\varepsilon_s(t) = -2 \frac{C_0}{L_s} \int_0^t \varepsilon_r(t) dt$$

式中: L_s 为试件长度、 E 为杆件的弹性模量, ε_r 、 ε_t 为测得的透射波与反射波, A_0 为压杆面积、 A_s 为试件面积, C_0 为杆中波速。

三、试验结果与分析

(一) 试件破坏形态分析

在此次试验中腐蚀冻融次数分别为 0、15、30 次,分别对试验组进行编号(SF00、SF15、SF30),3 种不同腐蚀情况下的混凝土试件在 4 种不同冲击气压下的破坏形态,具体图 3 所示。试验结果很明显能看出,冻融与硫酸盐腐蚀过程对于混凝土的破坏模式有着显著的影响。经过这种联合效应后,当受到撞击力的影响,试验样品会产生多个裂纹并快速崩溃。随着压力气的不断增大,测试样本承受的变形速度也在提升,并且其损坏情况也变得更加严重。在冲击气压为 0.25MPa 时,未经过腐蚀的试件(SF00)四周破碎严重,但中心保留部分主体并未完全破坏,冻融盐腐蚀

试件 (SF15) 与 (SF30) 多条裂缝相互贯穿, 最终使得试件完全破坏。又由于 SF15 破坏所产生的较大尺寸碎片明显多于 SF30。当冲击气压逐渐增加时, 随着冻融腐蚀次数的增加, 试件裂缝发展更为迅速, 破坏所产生的碎片的尺寸逐渐减小。



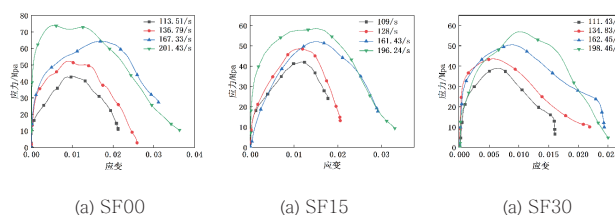
> 图3 相同冲击气压下各腐蚀试件的破坏形态

(二) 应力 - 应变曲线分析

通过试验测得不同冻融循环与硫酸盐腐蚀耦合作用下试件在不同应变率下的应力 - 应变曲线如图4所示。混凝土试块在受到撞击时, 曲线的初始阶段随着应变的增加, 应力呈现出线性增长的趋势。材料在此阶段具有弹性变形特性, 随着应变增大, 试件内部微裂纹逐渐扩展, 曲线斜率逐渐减小, 此时, 应力 - 应变曲线不再呈线性关系, 呈现应变硬化效应, 混凝土试件出现塑性变形现象。当超过峰值应力点后, 试件内部的微裂缝相互贯穿, 这使得混凝土强度迅速下降, 试件进入损伤软化阶段, 应力从峰值后随应变的增大而减小, 试件逐渐失去承载能力, 最终完全被破坏。

经过冻融循环与硫酸盐腐蚀的试件与普通混凝土试件相比, 动态峰值应力与动态峰值应变均有明显下降, 在应变率相近的情况下, 随着冻融腐蚀次数的增加, 混凝土试样的应力峰值不断下降, 在应变率为 109 s^{-1} 左右时, 应力峰值由常态下的 45.2 MPa , 在经历 30 次冻融循环与硫酸盐腐蚀过后, 应力峰值下降至 40.985 MPa , 同比下降了 9.33% , 在应变率接近 128 s^{-1} 左右时, 冻融腐蚀次数从

0 次增加至 30 次的过程中, 混凝土的峰值应力由 52.201 MPa 下降至 48.54 MPa 、 45.24 MPa , 分别下降了 7.01% 、 13.33% 。随着应变率逐渐增大, 当应变率接近 161.43 s^{-1} 、 196.24 s^{-1} 时, 混凝土应变峰值分别下降了 21.39% 、 22.92% 。由此可看出冻融循环与硫酸盐腐蚀耦合作用对混凝土试件抗压性能有明显影响, 当应变率逐渐增大时, 随着冻融与腐蚀次数的增加峰值应力下降趋势逐渐增大。



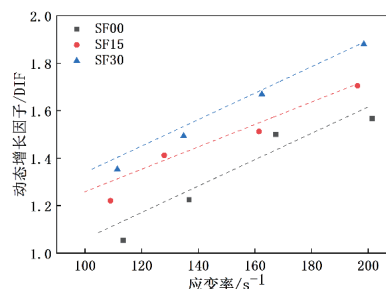
> 图4 试件不同应变率下的应力 - 应变曲线图

(三) 动态强度增强因子

动态强度增加因子 (dynamic increase factor) 一般被定义为动态抗压力与准静态抗压力的比率, 用于对材料的动态性能进行研究。应变率和 DIF 之间的关系如图5所示, 通过下述公式4来计算。

$$\mu_{DIF} = \frac{\sigma_d}{\sigma_s}$$

σ_d 为不同应变率试件的动态抗压强度; σ_s 为准静态试件的抗压强度。



> 图5 应变率与 DIF 关系图

由图可得出, 在应变率从 100 s^{-1} 增加至 200 s^{-1} 左右时, 试件的 DIF 值均呈线性增长趋势, 这是由于不同应变率下, 材料的破坏方式不同, 动态压缩破裂发生时, 非薄弱层会形成众多微裂缝, 而静态压缩破裂则是薄弱层中微裂缝合并形成一条或数条主要裂缝。在动态环境中, 形成裂缝需要更多的能量投入; 同时, 伴随着撞击速度的提升, 产生的微裂缝数量也会相应增加, 进一步消耗了更多的能源。当冻融腐蚀次数达到 30 次时, 随着应变率增加, DIF 值的增长速率由慢变快, 混凝土在不同冻融腐蚀程度下都具有应变率强化效应。同时可见, 受到 Na_2SO_4 腐蚀与冻融过后的试件 DIF 值有着明显影响, 在同样水平应变率下, 试件的 DIF 值随冻融腐蚀次数的增加而升高, 这表明动态抗压强度增强幅度大于静态抗压强度增强幅度。当试样被 Na_2SO_4 侵蚀时, 其内部析出的硫酸钠结晶会持续地填满混凝土中的缝隙, 随着浸泡时间增加, 这些晶体的数量也在逐步增多, 并由此导致了混凝土内的压力增大, 形成扩张应力^[10]。因此, 受 Na_2SO_4 侵蚀的试样的裂纹开始扩展, 这也使其对速度变得更加敏感。

在宁建国^[11]等人的研究中表明, DIF 的取值与应变率的对数

有关,由^{[12]~[13]}给出的拟合模型,得到DIF值于应变率对数的拟合关系式如下:

$$DIF = a_0 (\lg \dot{\varepsilon})^2 + a_1 \lg \dot{\varepsilon} + a_2$$

a_0 、 a_1 、 a_2 均为对试验数据拟合得到的常数,结果如表2所示。

表2 拟合结果与相关系数

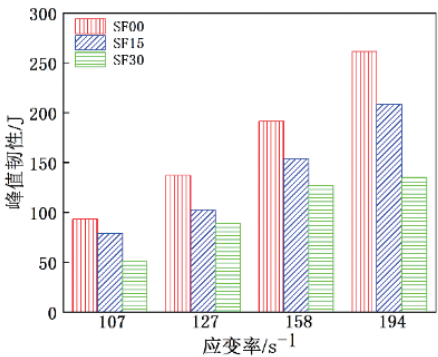
次数	a_0	a_1	a_2	R^2
0	-5.51E-5	0.023	-0.92	0.951
15	-1.70E-5	0.010	0.318	0.901
30	-2.31E-6	0.007	0.623	0.999

(四) 冲击韧性

材料吸收能量的能力通常表示为冲击韧性^[14],可以通过试件体积乘以应变能量密度来表示^[15],如图6所示。可以用材料的应力-应变曲线下方的面积来表示,并按以下公式6计算:

$$W_T = \int_0^{\varepsilon_u} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon$$

式中: W_T —冲击韧性, ε_u —极限应变, $\sigma(\varepsilon)$ —应力-应变曲线。



> 图6 在不同应变率下吸收的能量

在四种不同应变率下试件所能吸收的能量中,应变率为107 s⁻¹左右时,冻融与Na₂SO₄腐蚀15、30次的混凝土试件相较于常态下的试件,冲击韧性下降15.382%、50.631%,这是由于试件内部的水泥石在受到化学反应后遭到一定破坏,裂缝发展较为充分,试件强度明显降低、抗冲击性能下降,使得材料吸能效应降低。当应变率为127至194 s⁻¹之间时,15天和30天的试验样品显示出其冲击韧性的减少与时间呈现线性相关性。这表明它们以约19%~24%和33%~48%的比例逐渐减少。这是因为这些样本正在吸收水份并形成如钙矾石、石膏等物质,同时释放出硫酸钠结晶,这种过程导致了它们的内部孔隙被填满。然而,在这个高应变条件下,混凝土内的形变受到了限制,从而使裂纹的发展速度放缓。具体的表现在于,SF30的冲击韧性开始增加,随后又有所减少,最后才慢慢上升。

四、结论

1. 冻融与硫酸盐腐蚀显著改变了混凝土的破坏模式。在冲击气压下,腐蚀试件(SF15、SF30)裂缝更为严重,且随着冻融腐蚀次数增加,试件破坏速度加快,碎片尺寸减小。冻融与硫酸盐

腐蚀的联合效应使得混凝土在受到撞击时表现出较大的裂纹和更快速的崩溃。

2. 混凝土在遭受撞击时,初始阶段呈现弹性变形,随着应变增加,出现塑性变形并进入损伤软化阶段。冻融与腐蚀对混凝土的应力-应变曲线产生影响,导致混凝土的承载力下降。

3. 随着冻融和硫酸盐腐蚀次数的增加,试件的动态峰值应力明显下降。在相同应变率下,随着腐蚀次数的增加,混凝土的抗压性能逐渐减弱,表现为应力峰值和应变峰值的下降,且冻融腐蚀对混凝土抗压性能的影响在高应变率下更为显著。

4. 冻融和硫酸盐腐蚀导致混凝土冲击韧性显著下降,尤其在应变率为107 s⁻¹时,试件的冲击韧性下降幅度达到50%以上。腐蚀程度与时间的增加对冲击韧性的影响呈线性下降趋势,但在高应变条件下,裂纹发展受限,导致韧性逐渐回升。

参考文献

[1] 作江涛,何锐,王笑风,等. 硫酸盐侵蚀混凝土内外影响因素及影响机理研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(01): 110-117. DOI: 10.13652/j.cnki.issn1001-1625.2019.01.019.

[2] POWERS T C. The mechanisms of frost action in concrete (Durability of Concrete, SP-8) [R]. Detroit: ACI, 1965, 42-47.

[3] LITVAN G G. Frost action in cement in the presence of ice [A]. Proceedings of 6th International Congress on the Chemistry of Cement [C]. Moscow: [sn], 1974, 2: 145-152.

[4] 杨健辉, 李蒲雅, 叶亚齐, 等. 全纤维混凝土的SHPB冲击强度与耗能效应[J]. 振动与冲击, 2020, 39(02): 148-153+177. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2020.02.021.

[5] 夏良学, 许金余, 刘远飞, 等. 硫酸盐环境下混凝土强度变化规律及微观结构分析[J]. 振动与冲击, 2016, 35(20): 203-208. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2016.20.033.

[6] HEKAL E E, KISHAR E, MOSTAFA H. Magnesium sulfate attack on hardened blended cement pastes under different circumstances [J]. Cement and Concrete Research, 2002, 32(9): 1421-1427.

[7] 李胜利, 刘殿书, 李祥龙, 等. Φ75mm分离式霍普金森杆试件长度效应的试验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2010, 39(01): 93-97.

[8] LU F, LIN Y, WANG X, et al. A theoretical analysis about the influence of interfacial friction in SHPB tests [J]. International Journal of Impact Engineering, 2015, 79: 95-101.

[9] 黄雄, 谭焕成, 刘璐璐, 等. 编织角和承载方向对三维四向编织复合材料动态压缩性能的影响[J]. 复合材料学报, 2018, 35(04): 823-833. DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20170720.001.

[10] Gao J, Yu Z, Song L, et al. Durability of concrete exposed to sulfate-attack under flexural loading and drying-wetting cycles [J]. Construction and Building Materials, 2013, 39(2): 33-38.

[11] 宁建国, 任会兰著. 钢筋混凝土的动态本构关系[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2018.12.

[12] 罗银剑, 李秀地, 蔡涛, 等. ECC冲击压缩力学特性及耗能机制的试验研究[J]. 振动与冲击, 2023, 42(04): 19-27+64. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2023.04.003.

[13] 谢磊, 李庆华, 徐世焯. 纤维掺量对聚乙烯醇纤维增强水泥基复合材料动态压缩性能的影响[J]. 复合材料学报, 2021, 38(09): 3086-3100. DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20201204.001.

[14] MANOLS G D, GAREIS P J, TSONOS A D, et al. Dynamic properties of polypropylene fiber-reinforced concrete slabs [J]. Cement and Concrete Composites, 1997, 19(4): 341-349.

[15] HOU X M, CAO S J, ZHENG W Z, et al. Experimental study on dynamic compressive properties of fiber-reinforced reactive-powder concrete at high strain rates [J]. Engineering Structures, 2018, 169: 119-130.

城市地铁及地下工程施工环境安全风险 评估与控制分析

马树强

郑州市建设工程质量安全技术监督中心，河南 郑州 450000

摘 要： 城市地铁及地下工程施工环境十分复杂，存在诸多安全风险隐患，如果是安全风险控制不到位，很容易产生安全事故，造成重大损失。对此，为解决城市地铁及地下工程施工环境安全问题，就需要对安全风险进行评估，并且结合实际情况，采取有效的安全风险控制措施，防止安全事故发生，促使城市地铁及地下工程施工顺利进行，提升施工质量。本文主要分为三个方面，首先介绍施工环境安全风险评估和控制的作用，其次明城市地铁及地下工程施工环境安全风险评估内容，最后提出城市地铁及地下工程施工环境安全风险控制对策，目的是抑制施工环境安全风险产生，确保城市地铁及地下工程施工的安全性，也希望给相关研究工作，提供一定参考。

关 键 词： 城市地铁；地下工程；施工环境；安全风险

Risk Assessment and Control Analysis of Construction Environment Safety in City Subway and Underground Engineering

Ma Shuqiang

Zhengzhou Construction Engineering Quality and Safety Technical Supervision Center, Zhengzhou, Henan 450000

Abstract： The construction environment of city subway and underground engineering is very complex, and there are many potential safety hazards. If the safety risk control is not in place, it is easy to produce safety accidents and cause significant losses. In order to solve the environmental safety problems of city subway and underground engineering construction, it is necessary to evaluate the safety risks, and combine the actual situation to take effective safety risk control measures to prevent safety accidents, promote the smooth progress of city subway and underground engineering construction, and improve the construction quality. This article is mainly divided into three aspects. Firstly, it introduces the role of construction environmental safety risk assessment and control. Secondly, it clarifies the content of environmental safety risk assessment for city subway and underground engineering construction. Finally, it proposes countermeasures for environmental safety risk control in city subway and underground engineering construction. The aim is to suppress the generation of construction environmental safety risks and ensure the safety of city subway and underground engineering construction. It is also hoped to provide some reference for related research work.

Keywords： city subway; underground engineering; construction environment; safety risk

引言

为解决城市空间，最有效的方式就是加大地下空间控制，将人们活动空间逐渐延伸到地下，满足人们活动需求。但是，在城市地铁及地下工程施工期间，由于施工环境相对较为复杂，经常受到各类管线、桩基，以及不良地质等影响，并且在开挖阶段还会面临降水、流沙、坍塌等问题，这些都会诱发安全风险，增加安全事故发生概率。对此，为抑制安全风险，防止安全事故产生，在城市地铁及地下工程施工期间，需要对施工环境进行评估，明确施工环境安全风险，并且根据施工需求，对城市地铁及地下工程施工环境安全风险进行严格把控，营造相对安全的施工环境，也促使城市地铁及地下工程施工高效、高质展开。

一、施工环境安全风险评估的优势

城市地铁及地下工程项目成立以后，就需要根据施工要求以

及施工方案，对施工环境进行安全风险评估，明确安全风险要素，有针对性地进行控制，以此保证城市地铁及地下工程施工环境的安全性^[1]。所以，施工环境安全风险评估和控制，对于城市地铁

及地下工程施工来说，有着十分重要的意义，具体的内容主要表现为以下几点。

1. 由于城市地铁及地下工程施工环境十分复杂，存在诸多建筑物、地下水管以及电力、燃气、通信管路等，并且城市地铁及地下工程施工方案确定以后，一般不能随意更改。对此，为保证城市地铁及地下工程施工环境的安全性，需要在项目成立之初，对施工环境进行勘察和风险评估，根据评估结果，使用合理的施工方法，对施工环境风险等级进行分类，采取合理的控制对策，促使城市地铁及地下工程施工处于相对安全环境下进行。

2. 风险评估主要是对城市地铁及地下工程施工环境变化情况进行监测，实时监测沉降率和变形率，并且结合实际情况，针对不同施工阶段，采取施工环境控制措施，防止安全风险发生。

3. 针对不同城市地铁及地下工程施工阶段，对施工环境风险进行评估，对各个风险点进行研究，构建完善的控制体系，以此保证城市地铁及地下工程施工质量。

4. 安全风险评估可以准确掌握城市地铁及地下工程施工环境的实际情况，提供控制风险标准，针对不同的施工过程，制定有效控制对策^[9]。同时，可以将信息化技术应用到其中，实现信息化安全风险控制，以此实现城市地铁及地下工程安全施工目的。

二、城市地铁及地下工程施工环境安全风险评估

对于城市地铁及地下工程来说，风险是客观存在的，如果控制不到位，就会导致安全事故发生，造成重大经济损失。所以，为保证城市地铁及地下工程施工环境的安全性，需要对安全风险进行客观判断，根据以往成功案例，以及现场的实际情况，对安全风险进行等级划分，根据不同的施工环境安全风险等级，制定控制对策，以此保证城市地铁及地下工程施工效果。但是，由于城市地铁及地下工程施工环境十分复杂，所以在施工环境安全风险评估期间，应当重点考虑以下几点内容。

1. 在城市地铁及地下工程施工环境安全风险评估期间，应当在合适的位置安装风险监测点，了解施工环境的实际情况，例如：在地面沉降点、轨道、既有地铁等位置进行设定，以此监测城市地铁及地下工程施工环境变化情况，评估风险，以此对安全风险进行严格控制。同时，在城市地铁及地下工程施工环境安全风险评估期间，需要对开挖进程进行全过程记录，根据记录情况，做好全面控制，营造安全、稳定的施工环境。

2. 通过利用滑动式测斜仪进行城市地铁及地下工程施工环境安全风险评估，并且利用通信技术和计算机等手段，实现远距离风险监测和评估，判断是否存在安全隐患。同时，在城市地铁及地下工程施工环境安全风险安全评估期间，应当做好24h不连续监测，并且利用裂缝探测仪和激光对围岩位移等情况进行监测，根据监测结果进行风险评估，了解施工环境的实际情况，采取合理、有效的控制对策，防止城市地铁及地下工程施工环境安全风险问题发生。

3. 针对开挖面来说，需要围着施工环境进行变形和沉降监测，并且根据城市地铁及地下工程施工要求，确定安全风险源，

划分安全风险等级，表1所示，确保后期风险控制具有一定针对性^[9]。另外，在城市地铁及地下工程施工环境安全风险评估期间，还应当结合情况，作出适当调整，目的是根据施工动态实时进行风险评估，及时发现和解决安全风险。另外，在城市地铁及地下工程施工环境安全风险评估期间，需要将动态监测数据作为基础，以此保证安全风险评估的准确性。

表2：施工环境安全风险等级

可影响程度	能性等级	A灾难性	B非常严重	C严重	D需要考虑	E可忽略
1	频繁的	I级	I级	I级	Ⅱ级	Ⅲ级
2	可能的	I级	I级	Ⅱ级	Ⅲ级	Ⅲ级
3	偶尔的	I级	Ⅱ级	Ⅲ级	Ⅲ级	Ⅳ级
4	罕见的	Ⅱ级	Ⅲ级	Ⅲ级	Ⅳ级	Ⅳ级
5	不可能的	Ⅲ级	Ⅲ级	Ⅳ级	Ⅳ级	Ⅳ级

4. 可采用调查问卷的方式，对城市地铁及地下工程施工环境安全风险发生的可能性，以及安全风险发生以后所造成的后果进行分析和研究，这样可以为后续方案的制定，提供重要的数据参考。就某地铁工程为，针对工程施工范围，对不同施工区域、不同施工地点等进行调查，实时了解施工环境的实际情况，并且组织专业性的施工人员进行研究，找到安全风险因素，分析安全风险特点，根据安全风险特点计算出风险发生概率，从而制定有效的安全风险预防和控制方案，尽可能规避施工环境安全事故发生^[9]。

三、城市地铁及地下工程施工环境安全风险控制

在了解城市地铁及地下工程施工环境安全风险评估结果以后，就需要结合实际情况，针对不同施工阶段，采取安全风险控制对策，目的是消除安全风险，防止施工安全事故发生，促使城市地铁及地下工程施工顺利进行。同时，在城市地铁及地下工程施工环境安全风险控制期间，可以从以下几点展开。

（一）开挖与支护施工环境安全风险控制

1. 从开挖施工角度来说，应当结合施工环境实际情况，做好施工超前支护，并且应当分段、分层、分步对土体进行开挖，循序渐进，严格控制拱部台阶程度，对开挖边坡进行处理和加固，避免出现坍塌、变形等问题，消除城市地铁及地下工程施工环境安全风险。同时，多洞开挖的时候，需要将洞室支护与仰拱支护进行闭合，并且应当在格栅脚垫处打设锁脚锚管并注水泥浆，以此形成锚固端，再在格栅连接节点位置设置加强筋，利用混凝土对格栅进行封闭处理，中间不能留有空隙，否则很容易产生安全风险。

2. 需要根据开挖和支护施工进度，进行分段支护填充注浆，并且保证初支与岩层紧密贴合，以此保证施工环境的稳固性。同时，还需要根据城市地铁及地下工程施工环境安全风险评估结果，针对特殊段或者易变形位置进行跟踪补偿注浆处理，对变形损失进行弥补，确保变形参数处于额定范围^[9]。另外，针对封闭掌

子面,应当根据施工要求做好应急处理,一旦出现安全风险,应当停止施工,等待安全风险消除以后,才能恢复施工作业。

（二）二衬施工环境安全风险控制

在城市地铁及地下工程施工环境安全风险控制期间,还需要注重二衬施工环境安全风险控制,目的是针对不同施工阶段,消除施工环境安全风险,营造相对良好的施工安全环境。那么,在实施二衬施工环境安全控制期间,可以从以下几点展开。

1. 结合施工环境实际情况,对二衬和临时支护结构受力情况进行转换,目的是避免出现支撑空档的情况,出现围岩沉降,增加城市地铁及地下工程施工环境安全风险。

2. 在临时支护期间,可以采取分段跳间拆除的方式,并且要做好实时监控,根据监测结果,对支护长度和支护范围进行调整,以此保证支护效果,提升城市地铁及地下工程施工环境的安全性^[9]。另外,在支护拆除之前,应当根据实际情况,对受力体系进行转换,以此保证受力体系的均衡性。此外,等待二衬施工完成以后,并且强度达到要求以后,应当对二衬背后进行回填注浆处理,尽可能消除安全隐患。

（三）穿越流沙层施工环境安全风险控制

对于穿越流层来说,应当结合实际情况,适当减少砂层的含水量,并且一定要保证砂层暗隧道处于无水施工环境,这样才能保证城市地铁及地下工程施工环境的安全性。但是,在穿越流沙层施工安全环境控制期间,应当重点考虑以下几点。

1. 应当在施工面设置地面管,目的是起到降水的作用。同时,隧道开挖期间,应当结合实际情况,对流沙层掌子面进行帷幕预注浆处理,这样对流沙、流泥、细中砂、粉细砂等进行凝固处理,固结地层,提升土层的抗渗水性能,形成良好的隔水层,避免因为积水增加施工环境安全风险。

2. 需要 在掌子面或者侧壁设置引水管道,这样可以及时排除

积水,并且需要结合施工环境的实际情况,在仰拱位置设置集水坑实现集水抽排,清除施工环境内部积水,避免出现施工环境坍塌事故^[7]。

（四）施工环境沼气风险控制

根据城市地铁及地下工程施工环境安全风险评估结果可以知道,地下空间存在大量沼气,沼气直接会增加安全风险隐患,导致安全事故发生。对此,在城市地铁及地下工程施工环境安全风险控制期间,一定要注重沼气控制,首先在城市地铁及地下工程施工期间,应当对施工区域进行放气处理,放气以后需要停置一段时间才能进行施工,以此降低施工环境安全风险系数;其次,针对施工环境中管片外侧均匀涂刷防气材料,避免沼气给施工管片带来一定损伤^[8]。同时,应当在施工区域内,设置沼气检测设备,以及通风设备,根据检测结果,加强通风能力,避免沼气浓度较高,引发城市地铁及地下工程施工环境安全事故;最后,根据城市地铁及地下工程施工环境实际情况,实时24h 沼气监测,如果沼气监测结果达到1% 的话,应当立即撤离施工现场,对施工现场进行安全处理,消除安全风险,提升城市地铁及地下工程施工环境安全风险控制效果。

四、结束语

综上所述,在城市地铁及地下工程施工期间,施工环境安全风险诸多,容易导致安全事故发生。对此,应形成完善的城市地铁及地下工程施工环境安全风险评估体系,对安全风险进行等级划分,掌握施工环境的变化情况。同时,将城市地铁及地下工程施工环境安全风险评估作为基础,编制安全风险控制方案,从不同施工阶段消除安全风险,营造安全的施工环境,降低安全事故发生的可能性,提升城市地铁及地下工程施工水平。

参考文献

[1] 苏栋,黄茂隆,韩文龙,等. 城市深层地下空间地质环境韧性评估模型与应用[J]. 中国地质. 2024,51(1).

[2] 张辉. 基于现场监测与有限元分析方法的地铁暗挖隧道施工对周边环境沉降的影响研究[C]// 中国建筑业协会深基础与地下空间工程分会,财团法人地工技术研究发展基金会. 2023海峡两岸岩土工程/地工技术交流研讨会论文集. 北京城建勘测设计研究院有限责任公司, 2023: 7.

[3] 和磊. 基于对城市地铁轨道施工重难点及应对策略新探[C]// 上海筱虞文化传播有限公司. Proceedings of 2022 Engineering Technology Innovation and Management Seminar(ETIMS 2022). 中铁一局集团新运工程有限公司, 2022: 3.

[4] 李忠. 地铁盾构施工对邻近建筑物影响风险评价研究[D]. 华南理工大学, 2021.

[5] 李梦. 基于组合赋权法和云模型的地铁施工风险评价[D]. 青岛理工大学, 2020.

[6] 杨博. 地铁工程建设中的环境安全风险技术管理体系[J]. 新型工业化, 2020, 10 (09): 129-130.

[7] 刘春晓. 城市地铁及地下工程施工环境安全风险评估与控制[J]. 北方建筑, 2018, 3 (06): 54-57.

[8] 田磊. 城市地下工程施工对环境的影响分析及对策研究[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2017, (29): 205+207.

建筑工程造价的动态管理与成本优化控制分析

刘海平

广州庆盛投资有限公司, 广东 广州 510000

摘 要 : 在建筑工程全生命周期中, 建设单位作为项目投资主体, 工程造价管理是确保投资效益的核心环节。科学有效的动态管理不仅能够优化资源配置, 更能规避超支风险, 提升资金使用效率。研究结果表明, 强化设计阶段成本干预、完善合同风险分担机制、构建信息化管理平台是提升建设单位造价管理效能的关键路径, 可为同类项目提供实践参考。

关 键 词 : 建筑工程造价; 动态管理; 成本优化控制

Dynamic Management and Cost Optimization Control Analysis of Construction Engineering Cost

Liu Haiping

Guangzhou Qingsheng Investment Co., Ltd. Guangzhou, Guangdong 510000

Abstract : In the entire lifecycle of a construction project, the construction unit, as the main investor of the project, manages engineering costs as a core aspect to ensure investment efficiency. Scientific and effective dynamic management not only optimizes resource allocation but also avoids overspending risks and improves capital utilization efficiency. Research results indicate that strengthening cost intervention in the design phase, improving the contract risk-sharing mechanism, and building an information management platform are key paths to enhance the cost management efficiency of the construction unit. This provides practical references for similar projects.

Keywords : construction engineering cost; dynamic management; cost optimization control

引言

作为建筑工程的投资方与最终受益者, 建设单位在项目管理中需统筹协调质量、工期与造价三者的关系, 以实现投资效益最大化。传统造价管理多聚焦施工阶段, 而建设单位视角下的动态管理更强调全生命周期成本控制, 涵盖前期决策、设计优化、招标采购、施工监督及后期审计等环节。当前, 部分建设单位仍存在设计变更频繁、合同管理粗放、信息协同不足等问题, 导致投资失控风险加剧。因此, 如何通过系统化的动态管理手段优化成本控制, 成为建设单位亟待解决的核心课题。

一、建筑工程造价动态管理与成本优化遵循原则

(一) 对整个生命周期进行综合管理

需要摒弃传统的“重视施工、轻视前期”的思维模式, 将造价管理扩展到项目的整个生命周期。在决策的过程中, 通过进行可行性分析来确定投资的上限; 在设计过程中, 采用了限额设计和价值工程的分析方法, 以防止设计过度; 在招标的过程中, 应当合理地设定合同的各项条款, 并确立风险共担的策略; 在合同签订前进行充分沟通与交流, 以实现项目的顺利实施。在施工过程中, 加强了变更的审核以及进度资金的支付管理; 运营阶段做好项目跟踪检查工作, 及时解决存在问题。在项目完工的阶段, 会进行严格的结算和审计, 以确保投资的完整闭环。全过程跟踪管理是对项目进行全程管控, 实现项目从决策、设计到建设实施

整个过程中的资源优化配置和高效利用, 降低项目运营费用。采用全流程的动态管理策略可以高效地避免各个环节可能出现的成本风险^[1]。

(二) 技术与经济之间实现了深度整合

造价管理需要将工程技术和经济分析相结合, 特别是在设计阶段, 建设单位应该组织设计、造价、施工等多个团队共同合作。文章从工程设计角度探讨了工程成本控制的有效方法。例如, 利用 BIM 技术来模拟施工计划, 并对管道布局进行优化, 从而降低返工的次数; 通过标准化的设计方法来减少材料的损失; 采用市场询价的方式来动态地调整材料的预算。这些措施有效地保证了工程建设项目顺利实施并达到预期效果。技术与经济的融合验证对于达成成本管理和质量保证的双重愿景是非常有益的^[2]。

（三）关于风险的预先控制和动态调节

建设单位必须构建一个风险预警系统，对地质状况、政策的变化、市场价格的不稳定等不可预测的因素进行预测，并在合同中明确设定价格调整条款。在工程招标中，如果建设单位没有建立统一的集中采购平台，则无法实现物资资源优化配置。同时，利用信息化平台对工程进度和成本的偏差进行实时监测，并根据这些数据动态地调整管理策略。在供应链视角下，建设单位应根据自身实际情况选择合适的采购模式。例如，当材料的价格急剧上升时，可以通过协商或补充协议来分摊风险，从而避免单方面承担损失^[3]。

二、影响工程造价的相关因素

（一）设计阶段的决策偏差

设计方案在决定项目成本方面具有关键性的影响，通常能够直接影响到项目总成本的超过70%。合理确定工程造价，是控制建设项目投资规模和效益的关键一环。但是，有些建设单位在设计过程中忽略了对设计深度的重视，这种疏忽在施工过程中导致了频繁的修改。以某大型购物中心为例，通过分析其工程实例发现，该建设项目中普遍存在着大量的浪费现象，而这些问题主要源于缺乏有效的设计阶段经济性评审机制。在一个商业综合体项目中，由于地下室的结构设计存在一定的冗余性，这导致了混凝土使用量上升了15%，从而直接造成了超过2000万元的投资支出。又如，某高速公路建设项目因业主委托监理工程师编制施工图预算时发现其造价偏高而引起索赔等情况均与设计阶段有关。显然，加强设计阶段的经济效益评估是建设方在成本管理中的首要职责^[4]。

（二）关于合同管理，其细致化程度显然不够

合同中的不明确条款和风险分配的模糊性是导致争议的关键因素。由于工程变更频繁，导致施工过程中出现许多争议问题，影响了工程质量和工程进度。在某些工程项目里，虽然使用了固定总价的合同，但其变更的具体范围并没有明确规定，这为施工方提供了通过签证索赔来增加成本的可能性；同时也造成了承包商与监理工程师之间的矛盾和冲突，影响双方合作关系的稳定。还有一些项目由于缺乏有效的材料调整机制，导致建设单位不得被动地承受市场波动带来的各种风险。另外，合同管理不善也会使承包人无法对工程实施全过程监管。因此，对合同条款进行完善，并引入第三方法律顾问进行审查，是避免这类问题的有效途径^[5]。

（三）的供应链合作效益并不高

材料的采购和供应商的管理直接决定了成本。在工程招标中，如果建设单位没有建立统一的集中采购平台，则无法实现物资资源优化配置。如果建设单位没有建立一个集中的采购平台，他们可能会遭遇到材料价格超过市场平均水平的风险；或者是由于供应商的履约能力不足，从而导致了工程进度的延迟。在供应链视角下，建设单位应根据自身实际情况选择合适的采购模式。采用战略合作框架协议等手段来优化供应链，可以有效地减少采购的成本和履行合同的的风险。

三、工程造价动态管理以及成本优化控制中存在的问题与对策

（一）现存问题分析

1. 部分建设单位在设计阶段过度依赖设计院，未能在方案阶段积极介入成本优化，导致后期设计变更频繁。比如某住宅项目，因外立面装饰方案调整，使得造价增加了约12%。同时，当前数据孤岛现象普遍存在，造价、进度、质量等信息无法实时共享，这就导致管理决策滞后。某项目因未能及时获取施工进度偏差，延误了纠偏时机，最终超支8%。此外，部分项目结算资料不完整，审计仅依赖施工方提交的数据，这极易产生虚报工程量的问题。某园区项目就因审计疏漏，多支付工程款500余万元^[6]。

2. 优化对策与实施路径

建设单位应推行限额设计，明确各专业造价指标，组建联合评审小组，对设计方案进行多轮经济性优化，并引入BIM技术进行碰撞检查与工程量自动核算，减少设计缺陷，以此强化设计阶段成本主导权。在构建全过程信息化管理平台方面，集成ERP系统，实现预算、合同、支付、变更等数据联动，利用大数据分析材料价格趋势，动态调整采购计划，通过移动端实时监控现场进度与成本偏差，提升决策效率。完善合同风险分担机制需要采用EPC总承包模式，将设计、采购、施工风险转移至承包方，在合同中明确变更签证流程与费用调整上限，引入第三方审计机构，对结算资料进行交叉验证。建立供应链协同管理体系则要与优质供应商签订长期框架协议，锁定材料价格，实施供应商绩效评价，淘汰履约能力不足的企业，推行集中采购平台，降低分散采购的议价成本。

（二）涉及工程造价的持续管理以及成本控制的方法

1. 进一步完善管理体制

在当下市场经济环境中，建设单位作为项目的主导者，需依据项目的整体规划与战略目标，精准地完善造价管理制度及相关条款。同时，深度融合工程造价管理流程与成本控制流程，为项目全生命周期的管理活动提供清晰的指引与战略规划。通过构建完善的管理体制，确保项目实施过程中各项成本支出与造价控制在合理范围内，保障项目投资效益最大化。

2. 引入创新的造价管理新策略，确保整个流程的管理

（1）在决策过程中加强对造价的管理

在项目的决策过程中，建设单位应当高度关注投资的预估任务。合理确定工程造价，是控制建设项目投资规模和效益的关键一环。通过利用丰富的行业数据和专门的分析工具，能够准确地估算投资成本。在投资决策过程中，合理地确定工程造价是保证项目顺利实施并取得预期效益的关键。考虑到工程项目涉及的各种复杂因素，需要采用科学的手段来明确各个相关项目之间的数量关联，从而达到减少成本和提高经济回报的目的。传统估算技术已无法满足当前工程建设需求，而工程概算则是一种有效且实用的方式。随着工程管理的信息化程度不断提高，建设单位能够获得获得的工程信息变得越来越详细，这为工程估算的准确性提供了坚实的数据基础^[7]。

（2）确保在设计过程中对成本进行有效控制

在工程设计阶段，成本管理对后续成本支出起着决定性作用。建设单位需组织专业的设计审查团队，对设计方案进行严格审核。重点审查设计方案中的技术指标是否合理，是否与项目实际情况相符，防止施工过程中出现设计变更，从而避免不必要的成本增加。对于复杂或特殊的工程项目，建设单位应组织开展技术与经济评价，确定最优实施方案。在工程施工计划制定过程中，建设单位应明确设备与材料的选型标准，在满足施工质量标准的前提下，充分考虑经济性因素，严格控制成本。建设单位务必重视工程设计工作，这不仅关乎项目建设质量，更直接影响项目投资成本与经济效益。在项目初始阶段，建设单位应督促设计团队深入开展市场调研，全面掌握各类材料价格波动、设备及人工成本情况，制定科学经济的设计策略。

（3）施工阶段的造价的管理和成本的控制

在工程造价的动态管理中，施工阶段对建设单位而言至关重要。此阶段充满各类难以预测的变数，严重影响工程造价。建设单位作为项目的主导者，需要密切关注工程实际情况以及施工方案的变动，及时要求施工单位修改相关参数和计算模型，保证项目实施各阶段费用处于最优状态。建设单位有权利也有责任督促施工单位加强施工阶段的成本控制与管理。通过建立严格的合同约束机制，以及对施工现场进行有效监管，确保工程施工质量达标，同时降低工程建设投资成本。在工程结算环节，建设单位需严格审核，重视设计概算的准确性与合理性，保障自身利益不受损害。施工过程中，建设单位必须时刻监督施工单位，要求其任何变更都保持高度警觉，严格管理变更审批流程，防止因不合理变更致使成本失控。一旦发现施工单位在变更管理上存在漏洞，建设单位应及时指出并督促整改，避免因造价失控给项目带来经济损失。

（4）竣工结算阶段，需要对成本进行控制

竣工结算阶段虽不直接产生工程费用支出，但承担着对整个工程项目造价进行最终审核的关键任务。建设单位应高度重视竣工结算审计工作，选择信誉良好的专业审计机构参与项目竣工结算。审计工作重点聚焦于工程造价管理控制，确保工程建设按计

划有序推进，避免投资失误造成经济损失。建设单位应要求专业审计团队对工程项目进行全面细致的检查，逐一核实工程资料与现场情况，与施工方、业主方共同完成工程量的最终结算。同时，注重记录施工过程中出现的问题，并及时反馈给相关部门。此外，严格依据合同条款审查项目实际建设情况，确保与合同约定相符，避免因经济纠纷导致资金浪费^[8]。

（三）建立一个既科学又合理的造价动态管理框架

一方面，建设单位作为项目的组织者与管理者，需深刻理解造价动态管理的内涵，在项目建设全过程贯彻动态造价管理策略。通过制定合理有效的管理制度，完善制度体系，确保工程造价管理工作得以高效执行。从事造价管理的专业人员应定期深入建筑施工现场，及时发现成本控制过程中存在的问题，防止造价管理与实际施工脱节，提升造价动态管理的实用性与可操作性。同时，建立完善的动态工程造价管理体系，保障工程建设项目投资得到合理有效利用。造价管理团队之间应加强沟通交流，及时共享造价管理相关信息，确保动态造价管理各环节紧密衔接^[9]。建立和完善工程造价管理信息系统，实现对工程各阶段、各环节的有效监控，达到降低工程造价、节约资金的目的。

另一方面，建设单位应确立科学合理的成本管理目标。工程造价人员应从项目整体出发，将成本管理融入工程建设全过程，确保工程项目建设取得理想效果。成本管理目标是动态造价管理的核心，也是保障成本管理先进性与高效性的关键。在实际操作中，应根据不同阶段工程造价管理的特点与要求，明确各阶段成本管理目标^[10]。

四、结束语

建设单位作为建筑工程的投资主体，需以全生命周期视角重构造价管理体系，通过设计优化、合同精细化管理、供应链协同及信息化赋能，实现动态成本控制。未来，随着智能建造技术的普及，建设单位应进一步探索数字化与造价管理的深度融合，以提升投资效益与市场竞争力。

参考文献

- [1] 许琼. 建筑工程造价的动态管理与成本优化控制[J]. 工程机械与维修, 2023(1):99-101.
- [2] 黄思. 建筑工程造价的动态管理与成本优化控制探究[J]. 中国招标, 2023(7):81-83.
- [3] 吴炳辉. 建筑工程造价的动态管理与成本优化控制[J]. 石油化工建设, 2023,45(7):36-38.
- [4] 吴敏. 建筑工程造价的动态管理与成本优化控制研究[J]. 建筑与装饰, 2021(4):57.
- [5] 刘英. 分析建筑工程造价的动态管理与成本优化控制[J]. 建材与装饰, 2021,17(17):138-139.
- [6] 张鑫利. 建筑工程造价的动态管理与成本优化控制[J]. 大众标准化, 2021(9):227-229.
- [7] 王艳. 建筑工程造价的动态管理与成本优化控制[J]. 中国建材科技, 2019,28(4):161,163,160.
- [8] 潘靓丽, 王静. 浅析建筑工程造价的动态管理与成本优化控制[J]. 建筑与装饰, 2022(8):79-81.
- [9] 邹永珍. 探析建筑工程造价的动态管理与成本优化控制[J]. 建筑与装饰, 2021(20):51-52.
- [10] 宗纪康. 建筑工程造价的动态管理与成本优化控制概述[J]. 建筑与装饰, 2021(7):64.

绿色建筑理念在建筑工程中的应用与发展

王士杰

阿拉尔市大学城投资建设有限公司 新疆生产建设兵团第一师，新疆 阿拉尔 843300

摘 要： 绿色建筑理念强调在建筑的全生命周期内节约资源、减少污染，为人们提供健康、高效的使用空间。本文探讨了绿色建筑理念在建筑工程中的应用，包括节能材料与设备、水资源管理、室内环境质量优化、可再生能源利用等方面，并展望了其未来发展趋势，如净零能耗建筑、智能建筑技术的兴起等。绿色建筑理念的应用将推动建筑行业向更加绿色、高效和可持续发展的方向发展。

关 键 词： 绿色建筑理念；建筑工程；节能材料；水资源管理；可持续发展

The Application and Development of Green Building Concept in Building Engineering

Wang Shijie

Alar University City Investment and Construction Co., Ltd. Xinjiang Production and Construction Corps first Division, Alar, Xinjiang 843300

Abstract： The concept of green building emphasizes saving resources and reducing pollution in the whole life cycle of buildings, and providing people with healthy and efficient use space. This paper discusses the application of green building concept in building engineering, including energy-saving materials and equipment, water resources management, indoor environmental quality optimization, renewable energy utilization and other aspects, and looks into its future development trend, such as net zero energy building, the rise of intelligent building technology. The application of the green building concept will push the construction industry to a more green, efficient and sustainable direction.

Keywords： green building concept; building engineering; energy-saving materials; water resources management; sustainable development

在全球气候变化和资源日益紧张的背景下，建筑行业作为能源消耗和碳排放的主要来源之一，面临着严峻的挑战。绿色建筑理念以其环保、节能和可持续发展的优势，为建筑行业提供了新的发展方向。

一、绿色建筑理念的核心与特点

（一）核心要素

绿色建筑理念的核心要素在于强调低耗、高效、经济、环保的理念，这是对传统建筑模式的一种革新与超越。低耗，意味着在建筑的整个生命周期中，要尽量减少对资源的消耗，包括能源、水资源以及建筑材料等。高效，则是指在满足人们居住和使用需求的前提下，通过优化建筑设计、采用先进的建筑技术和材料，提高建筑的能效和性能。经济，不仅体现在绿色建筑的建设成本上，更在于其长期的运营和维护成本较低，能够为建筑的使用者带来实实在在的经济效益。而环保，则是绿色建筑最为显著的特点之一，它要求建筑在设计和施工过程中，要充分考虑对周围环境的影响，采取一系列措施减少对环境的污染和破坏，实现人与自然的和谐共生。这一理念不仅符合当前全球可持续发展的趋势，更是对未来世代负责的表现。

（二）主要特点

绿色建筑的主要特点在于其充分利用环境自然资源，同时确保不对环境造成破坏。这一目标的实现，离不开节能材料和设备的使用以及高效能源管理系统的引入。在建筑材料的选择上，绿色建筑倾向于采用可再生、可回收或低环境影响的材料，这些材料在生产、使用和废弃过程中，对环境的负担较小。同时，绿色建筑还注重节能设备的应用，如高效照明系统、节能空调和供暖系统等，这些设备能够在保证建筑舒适性的同时，大幅度降低能耗。此外，高效能源管理系统也是绿色建筑不可或缺的一部分。通过对建筑内各种能源使用情况的实时监测和智能调控，系统能够及时发现并解决能源浪费问题，从而实现能源的最大化利用^[1]。这些特点共同构成了绿色建筑的核心竞争力，使其在满足人们居住和使用需求的同时，也为环境保护和可持续发展做出了重要贡献。

（三）应用范围

绿色建筑理念的应用范围广泛，它贯穿于从建筑材料选择到建

作者简介：王士杰（1989.03-），男，汉族，河南省柘城县人，大学本科，助理工程师，研究方向：建筑工程管理、项目代建。

筑设计的全过程。在建筑材料选择方面，绿色建筑强调使用环保、可再生或回收材料，以减少对自然资源的依赖和环境的破坏。这些材料不仅具有较低的碳排放量，还能在建筑的使用过程中，通过其优异的性能，如保温、隔热、隔音等，提高建筑的能效和舒适度。在建筑设计阶段，绿色建筑理念要求设计师充分考虑建筑与环境的关系，通过合理的布局、朝向、通风和采光设计，最大限度地利用自然资源和环境优势，减少建筑对人工能源的依赖^[2]。同时，设计师还需关注建筑的全生命周期，从规划、设计、施工到运营维护，每个环节都要体现绿色、低碳、环保的理念，以确保建筑在满足人们使用需求的同时，也能为环境保护和可持续发展做出贡献。

二、绿色建筑理念在建筑工程中的具体应用

（一）节能材料与设备

在绿色建筑工程中，节能材料与设备的应用是核心环节之一。为了有效降低建筑的能耗，提升能源利用效率，工程师们倾向于使用一系列高效隔热材料。岩棉和聚苯板便是其中的佼佼者，它们凭借出色的隔热性能，能够有效阻止室内外热量的传递，从而维持建筑内部温度的稳定，减少空调和供暖系统的能耗。与此同时，新型节能玻璃的应用也为绿色建筑注入了新的活力。夹层玻璃和能量感应玻璃等高科技产品，不仅拥有卓越的透光性和美观性，更重要的是，它们能够根据外界环境的变化自动调节透光率，有效阻挡紫外线和红外线的辐射，进一步降低建筑的能耗^[3]。这些节能材料与设备的应用，不仅提升了建筑的能效，也为人们创造了更加舒适、健康的生活环境。

（二）水资源管理

与此同时，水资源管理同样占据着举足轻重的地位。为了降低水资源消耗，提高利用效率，绿色建筑通常会采用一系列节水设备。低流量水龙头和节水马桶便是其中的典型代表，它们通过优化设计，能够在保证正常使用的前提下，大幅度减少水的消耗，从而有效缓解水资源短缺的问题。除了节水设备的应用，绿色建筑还注重雨水资源的收集和利用^[4]。通过实施雨水收集系统，建筑能够收集并利用雨水进行冲厕、灌溉等用途，这不仅有助于减少自来水的使用，还能在一定程度上缓解城市排水压力，实现水资源的循环利用。这些水资源管理措施的实施，不仅体现了绿色建筑对环境保护的承诺，也为人们提供了更加可持续的生活方式。

（三）室内环境质量优化

绿色建筑在室内环境质量优化方面也做出了诸多努力。为了创造一个健康、舒适的室内环境，绿色建筑倾向于使用一系列环保材料，如硅藻泥等。硅藻泥作为一种天然、无毒的装饰材料，具有良好的吸湿性和透气性，能够有效调节室内湿度，为人们提供一个更加宜人的居住环境。此外，绿色建筑还注重通风和照明系统的优化。通过合理设计建筑的通风口和窗户，确保室内空气的流通和更新，减少有害物质的积累^[5]。同时，采用高效、节能的照明系统，如LED灯具等，不仅能够为人们提供充足的光线，还能有效降低能耗，减少碳排放。这些措施的实施，不仅提升了室内环境质量，也为人们带来了更加健康、舒适的生活体验。

三、绿色建筑理念在建筑工程中的深化实践

（一）可再生能源利用

在绿色建筑理念的指导下，可再生能源的利用已成为建筑工程深化实践中的关键一环。面对传统能源日益枯竭和环境污染加剧的严峻挑战，绿色建筑开始积极探索和利用太阳能、风能等可再生能源，以降低对化石燃料的依赖，减少碳排放。在建筑屋顶或墙壁等适宜位置，绿色建筑巧妙地安装了太阳能板，利用光电效应将丰富的太阳光转化为清洁、可再生的电能，为建筑提供源源不断的电力支持^[6]。与此同时，风能作为一种永不枯竭的清洁能源，也被绿色建筑充分利用。通过在建筑周边或屋顶安装风力发电设备，绿色建筑成功地将风能转化为电能，进一步提升了建筑的能源自给率。这些可再生能源的广泛应用，不仅显著降低了建筑的能耗和碳排放，还有效缓解了能源短缺的问题，为社会的可持续发展做出了积极贡献。未来，随着技术的不断进步和成本的逐步降低，可再生能源在绿色建筑中的应用前景将更加广阔。

（二）绿色屋顶与立体绿化

绿色屋顶与立体绿化是绿色建筑理念在建筑工程中的又一深化实践。通过在建筑屋顶种植绿色植物，如草本植物、灌木等，不仅能够美化建筑外观，还能有效提升建筑的保温隔热性能，减少空调和供暖系统的能耗。这些绿色植物通过光合作用，能够吸收二氧化碳、释放氧气，有助于改善城市空气质量。此外，立体绿化也是绿色建筑中不可或缺的一部分^[7]。通过在建筑的墙面、阳台、露台等位置实施立体绿化，增加城市绿地面积，为城市居民提供更多的绿色休闲空间。这些绿色植物能够吸收雨水、减少噪音污染，还能在一定程度上缓解城市“热岛效应”，改善城市生态环境。绿色屋顶与立体绿化的实施，不仅体现了绿色建筑对环境保护的承诺，也为城市居民带来了更加宜居的生活环境。

（三）智能建筑技术的应用

智能建筑技术，作为绿色建筑理念在建筑工程深化实践中的璀璨明珠，正以其独特的魅力和无限潜力，引领着建筑行业向更加绿色、智能的方向发展。通过深度融合传感器、数据分析等前沿科技，智能建筑能够实现对建筑内部各种系统的实时监测与精准控制，如温度、湿度、光照等关键参数，确保建筑始终处于最优化的运行状态。智能恒温器，作为智能建筑的核心组件，凭借其卓越的自动调节能力，能够根据室内外环境的变化，灵活调整室内温度，为居住者营造出一个既舒适又节能的生活空间^[8]。而智能照明系统，则通过智能感应人体活动和光线强度，实现灯具亮度和开关状态的自动调节，进一步降低了建筑的能耗。这些智能建筑技术的应用，不仅显著提升了建筑的能源效率，减少了不必要的能源浪费，更为人们带来了前所未有的便捷与舒适。

四、绿色建筑理念在建筑工程中的未来发展趋势

（一）净零能耗建筑的推广

随着全球对绿色建筑理念的深刻认识，净零能耗建筑正逐渐成为未来建筑工程的核心发展趋势。净零能耗建筑，这一创新概

念，旨在通过集成一系列前沿的节能技术和可再生能源利用手段，实现建筑的能源自给自足，彻底摆脱对传统能源的依赖，从而达到碳中和的崇高目标。在这类建筑中，太阳能光伏板和风力发电装置将成为标配，它们将源源不断地为建筑提供清洁、可再生的电力，满足其日常能源需求^[9]。与此同时，高效的隔热材料和智能建筑管理系统等先进技术，将共同作用于建筑的每一个角落，最大限度地降低能耗，确保能源的高效、精准利用。净零能耗建筑的推广，不仅是对全球气候变化挑战的积极回应，更是对绿色技术创新和应用的强大推动。未来，随着技术的持续进步和成本的逐步下降，净零能耗建筑将成为建筑行业的主流趋势，引领一场前所未有的绿色革命，为地球的可持续发展注入新的、更为强劲的动力。

（二）可持续材料的广泛应用

在绿色建筑理念的浪潮中，可持续材料的广泛应用正引领着未来建筑工程的新篇章。竹子，这一生长迅速、资源丰富的植物，凭借其出色的力学性能和自然美感，正逐渐成为建筑界的宠儿。在建筑结构的支撑、装饰等方面，竹子都展现出了非凡的潜力，为绿色建筑增添了独特的韵味。与此同时，软木以其卓越的隔音、隔热性能和独特的质感，在绿色建筑中发挥着不可替代的作用。无论是作为墙体材料还是地板材料，软木都能为建筑带来更加舒适、宁静的室内环境。再生塑料的广泛应用，则是对废弃塑料资源的有效回收和再利用。通过先进的处理技术，废弃塑料被赋予了新的生命，成为绿色建筑中的重要组成部分。这不仅减少了原生塑料资源的开采和消耗，还有效降低了环境污染，推动了相关产业链的绿色发展^[10]。未来，随着技术的不断进步和成本的逐步降低，可持续材料将在绿色建筑中得到更加广泛的应用。

这些环保、可再生、低碳的材料，将为建筑行业的可持续发展贡献力量，共同书写绿色建筑的新篇章。

（三）先进技术的融合与创新

在绿色建筑理念的引领下，未来建筑工程将更加注重先进技术的融合与创新。3D 打印、机器人技术、人工智能等前沿科技，将成为推动绿色建筑发展的重要力量。3D 打印技术以其高效、精准的特点，能够大幅度提高建筑构件的生产效率和质量，减少材料浪费和能耗。通过 3D 打印技术，可以定制化生产各种复杂形状的构件，满足绿色建筑对个性化、功能化的需求。机器人技术则能够在建筑施工过程中承担繁重、危险的任务，提高施工安全性和效率。同时，机器人还能够精准控制施工精度，确保建筑结构的稳定性和耐久性。人工智能技术的应用，则能够实现对建筑系统的智能监测和管理，提高能源利用效率和舒适度。通过集成传感器、大数据分析等技术手段，人工智能系统能够实时监测建筑内的各种参数，自动调节温度、湿度、光照等环境因素，为人们提供更加智能、便捷的生活环境。这些先进技术的融合与创新，将进一步提升绿色建筑的建设效率和性能，推动绿色建筑理念在建筑工程中的深入实践。

五、结论

绿色建筑理念在建筑工程中的应用与发展，不仅有助于节约资源和保护环境，还能提升人们的生活质量。随着技术的不断进步和应用的深化，绿色建筑将成为建筑行业可持续发展的关键驱动力。未来，建筑行业应继续加大绿色建筑理念的推广和实践力度，推动建筑行业向更加绿色、高效和可持续的方向发展。

参考文献

- [1] 肖吉文. 绿色建筑技术在建筑工程中的应用及发展趋势 [J]. 陶瓷, 2023, (07):164-166.DOI:10.19397/j.cnki.ceramics.2023.07.042.
- [2] 董光玉. 绿色建筑技术在建筑工程中的应用及发展趋势 [J]. 科技资讯, 2023, 21(13):109-112.DOI:10.16661/j.cnki.1672-3791.2210-5042-8038.
- [3] 董志国, 徐菁. 绿色建筑理念在现代建筑工程中的实践应用 [J]. 湖州职业技术学院学报, 2023, 21(02):81-84.DOI:10.13690/j.cnki.hzyxb.issn.1672-2388.2023.02.17.
- [4] 徐亮. 绿色建筑技术在建筑工程中的应用及发展趋势 [J]. 陶瓷, 2023, (03):149-151.DOI:10.19397/j.cnki.ceramics.2023.03.018.
- [5] 薛统平. 绿色建筑技术在建筑工程中的应用及发展趋势 [J]. 住宅与房地产, 2023, (05):90-92.
- [6] 许炜炜, 王伟伟. 绿色建筑技术在建筑工程中的应用及发展趋势 [J]. 中国建筑装饰装修, 2023, (02):74-76.
- [7] 郭晓斌. 绿色建筑理念在建筑工程施工过程中的应用 [J]. 陶瓷, 2022, (11):149-151.DOI:10.19397/j.cnki.ceramics.2022.11.027.
- [8] 徐健. 绿色建筑设计理念在建筑工程设计中的融合应用 [J]. 陶瓷, 2022, (08):128-130.DOI:10.19397/j.cnki.ceramics.2022.08.054.
- [9] 张晓静. 绿色建筑技术在建筑工程中的应用及发展趋势 [J]. 大众标准化, 2022, (15):24-26.
- [10] 廖江川. 绿色建筑设计理念在建筑工程设计中的融合应用 [J]. 四川建筑, 2022, 42(02):60-61.

基于虚拟现实技术的园林植物造景应用研究

徐琰昊, 王晓敏

中国建筑东北设计研究院有限公司, 辽宁 大连 116000

摘 要 : 在当前科技发展速度不断提升背景下, 虚拟现实技术在各领域中得到广泛应用, 其在园林植物造景领域的运用及其优势同样显著, 其可为园林植物造景提供更直观、真实的设计体验。基于此, 本文研究中将首先对园林植物造景及其艺术特征进行阐述, 同时对虚拟现实技术应用于园林植物造景的优势, 在此基础上, 深入探究虚拟现实技术在园林植物造景中的应用流程。

关 键 词 : 虚拟现实技术; 园林植物造景; 应用

Research on the Application of Virtual Reality Technology in Garden Plant Landscaping

Xu Yanhao, Wang Xiaomin

China Architecture Design and Research Group Northeast Branch, Dalian, Liaoning 116000

Abstract : With the continuous improvement of current technological development, virtual reality technology has been widely used in various fields. Its application and advantages in the field of garden plant landscaping are also significant, as it can provide a more intuitive and realistic design experience for garden plant landscaping. Based on this, this study will first elaborate on garden plant landscaping and its artistic features, as well as the advantages of applying virtual reality technology to garden plant landscaping. On this basis, we will further explore the application process of virtual reality technology in garden plant landscaping.

Keywords : virtual reality technology; garden plant landscaping; application

引言

植物作为园林景观中重要营造要素, 其在风景园林设计中占据主体地位。然而需注意的是, 传统园林植物造景设计方式受二维图纸表达的限制, 使得设计人员难以直观感受空间尺度以及建成效果, 导致方案不确定性较大。而随着虚拟现实技术不断发展, 其在园林植物造景中的应用逐渐得到广泛认可与应用。虚拟现实技术可有效模拟出真实的三维空间, 促使设计人员可身临其境地体验设计效果, 以此更精准地对设计进行调整。由此, 深入探究虚拟现实技术在园林植物造景中的应用价值以及应用要点, 对推动园林设计行业创新发展具有重要现实意义。

一、园林植物造景内容及艺术特征

园林植物造景是结合自然之美以及人类智慧的杰作, 其是人类追求和谐共存、美化生活环境的关键途径。植物造景的魅力不仅源自其丰富的内容, 同时也体现在其独特的艺术风格, 可使人在自然与艺术交融中流连忘返。

在园林植物造景内容方面, 从古代皇家园林到现代都市绿肺, 园林植物造景始终处于不断演变以及发展中。古代园林绿化主要以藤本植物、树木以及灌木为基本元素, 通过精心布局以及搭配, 以营造出宁静致远的城市绿洲^[1]。相关绿洲不仅为居民提供舒适的居住环境, 同时也成为人与自然和谐共处的典范。设计者在实际工作中巧妙利用植物形态、线条以及色彩, 创造出兼具审美需求以及文化底蕴的园林景观。随着时代不断进步, 现代园艺开始将生态学理念融入景观设计中, 使得园林植物造景逐渐趋向

多元化、生态友好型方向发展。现代设计者不仅追求视觉层面的美感, 同时也对景观生态功能和环境适应性做出高度重视。其具体工作中通过科学合理地选择植物种类、优化植物配置, 有效实现景观可持续发展, 切实满足民众对居住环境更高层次的需求^[2]。

在园林植物造景艺术特征方面, 园林植物造景的艺术表现更侧重于追求整体和谐以及多样性统一。设计者可通过巧妙的布局以及植物搭配, 将不同形态、色彩以及纹理的植物融入景观中, 进而创造出更为丰富的视觉效果。相关植物形态特征在景观构成中发挥关键作用, 其共同构成城市中独特的风景线。此外, 园林植物造景还可呈现出动态变化的美。植物造景会随着季节更迭、气候变化而展现出不同形态以及风貌, 植物景观在四季轮回中的变幻莫测, 可为民众带来无尽的惊喜以及愉悦。该动态变化不仅可有效丰富景观层次感, 同时也使得人工设计与自然生长相得益彰, 进而构成既具备人工雕琢美感又不失生命活力的独特景观。

二、虚拟现实技术在园林植物造景中的应用优势

（一）深度沉浸式的三维环境体验

相较于传统二维界面，虚拟现实技术可依托于全尺寸三维空间，使设计者置身于真实园林中，无论是专业风景园林师，还是非专业的客户与大众，均可通过沉浸式环境获得独特的视觉享受，进而大幅拓宽设计探索视野。在虚拟场景支持下，设计者无需费力构想植物与园林元素的比例关系，只需佩戴 VR 设备即可观察到各种设计效果。该直观性不仅可显著提高设计效率，还可确保设计人员轻松获取目标物体各项数据，为精确设计提供有力支持^[3]。

虚拟现实技术还可与交互设备进行配合，实现听觉、嗅觉等多感官沉浸目标。通过模拟雨雪雾等自然现象，并结合空间音频技术，可促使用户身处家中也可真切地感受苏州拙政园“听雨轩”的雨声。该打破物理位置限制的优势，可促使用户深入领略不同植物景观独特韵味。

（二）自由探索与观察空间

虚拟现实技术不仅提供了沉浸式的视觉体验，还让人们能够自由探索与观察园林空间^[4]。通过对视角参数进行调整，设计者可有效模拟不同人群视角对植物造景设计细节进行观察，以充分满足不同群体审美需求；同时，设计者也可切换至鸟瞰视角对整体布局进行审视，以此对园林植物景观整体美感进行调整。对设计者而言，该自由、动态的观察方式对推敲植物景观的空间关系具有重要积极影响。

（三）即时修改的反馈机制

虚拟现实技术的即时修改反馈机制也是其重要优势。传统方案展示方式中，设计者通常是依托于渲染效果图以及动画对设计成果进行展示。若需对模型进行调整，即需要重新进行渲染，此不仅耗时耗力，同时还会对设计思维连贯性造成影响。而在虚拟现实环境中，设计者可对场景元素进行随意修改，并即时观察修改效果。该特性使得设计者在发现错误时可迅速进行修改并进行对比，直至获得满意方案。考虑到植物具备生命性，不同规格的同种植物对景观效果存在重要影响。在支持即时修改的虚拟场景中，设计者可以轻松调整植物模型大小、品种，并比较不同组合的景观效果^[5]。

即时建立与修改场景要素的优势在于，可快速捕捉并展现设计者在交互编辑时的灵感。该即时反馈机制不仅可对园林植物景观展示方式进行革新，同时也可成为设计者思考的助手，充分激发设计者的创新灵感或概念，促使其可在虚拟环境中不断进行尝试与创新，以此提升植物造景设计质量。

三、基于虚拟现实技术的园林植物造景技术应用要点

（一）基于虚拟现实技术的园林植物造景设计流程

虚拟现实（VR）技术融入园林植物造景设计领域可为设计者创作以及体验开辟新路径。三维建模技术是 VR 技术的重要形式之一，其依托于模型构建方面的高度灵活性，适用于创建可自由探索的虚拟园林场景，促使设计者以及观赏者可从任意角度进行深入体验，以此显著提升用户体验。基于虚拟现实技术的园林植物造景设计流程如图1所示。

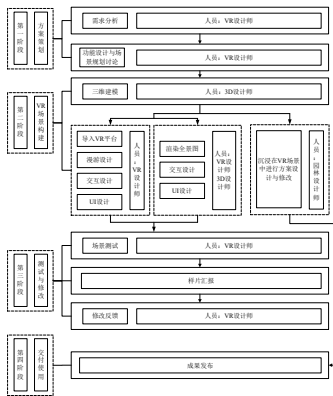


图1 三维建模模式应用于园林植物造景设计的流程

1. 需求分析以及目标设定。在设计初始阶段，VR 设计专家应对目标用户群体及其需求进行深入分析，对虚拟漫游系统应涵盖的内容和功能进行梳理。如对于家庭用户而言，需重点关注景观趣味性以及互动性；而对于专业园林师，则需关注设计精确度以及细节。在此基础上，对各流程环节及其协同机制进行细化，并绘制出详细的工作流程图，确保设计过程整体井然有序。

2. 功能策划与场景构思。基于需求分析结果，VR 设计团队需对既定功能可行性进行评估，并结合项目平面图对关键位置与预设游览路线进行规划。该步骤需团队成员进行紧密协作，共同讨论并确定各场景主题、风格以及需要展示的植物种类与景观元素。

3. 三维模型设计与创建。在三维建模阶段中，VR 设计师可独立或与 3D 建模专家进行合作，充分利用 SketchUp 等专业软件完成模型初步构建。SketchUp 在实际应用中呈现界面简洁易用以及建模功能强大特征，是初学者的首选。对于复杂场景以及细节，则组合要采用 3dsMax 或 Rhino 进行深化处理。相关专业软件可提供丰富的建模工具以及材质库，可帮助设计师快速创建出逼真的园林植物以及景观元素^[6]。

4. 虚拟场景集成以及深化。在完成模型构建后，设计者需将其导入相应软件平台进行场景开发。基于应用目的可将该环节细分为“展示型”以及“设计型”两类。其中展示型主要是采用 Unity3D、Unreal Engine 等虚拟现实平台或游戏引擎，对外部资源进行集成，进而编程实现漫游与交互功能。设计者可设计科学的用户界面，并通过碰撞检测保障用户在虚拟环境中的安全体验。此外，设计者还可利用全景图方式，依托于 V-Ray、Lumion 等工具优势实现全景渲染，并结合全景编辑器进行交互设计，以此为用户提供沉浸式观赏体验。而设计型则是园林设计师在 VR 设备支持下，深入虚拟环境中并对设计方案进行实时调整。该方法虽然耗时较长且成本投入较高，但可直接观察到设计效果，可为方案深度优化提供便利条件支持。此环节常用工具主要包括 Mars、Fuzor、Twinmotion 等，其可为设计者提供丰富的设计工具以及实时渲染功能支持，切实提升设计工作高效性。

5. 场景测试与验证。在完成场景开发工作后，设计者需要利用 VR 设备或直接在 PC 端上进行沉浸式或非沉浸式体验，对逻辑连贯性进行检查并修正代码错误，同时提出有针对性的改进建议。同时，设计者可制作测试样片以便向甲方进行展示并收集反馈。该步骤是保障最终成果质量的关键环节。

6. 样片展示与反馈收集。该环节可向甲方展示测试样片并收集其反馈意见。甲方可从用户角度出发,对场景布局、植物种类、交互功能等方面提出相应修改建议。设计者在实际工作中可广泛收集意见并对其进行记录,以此为后续优化工作提供必要依据支持。

7. 反馈整合与迭代优化。设计者可根据甲方反馈意见,利用720云、pano2vr、Unity3D等工具对场景进行相应调整与补充,通过多轮测试以及修改,不断迭代优化设计方案,直至达到最佳效果。

8. 最终成果部署。提交最终版本给甲方或进行市场推广,此环节标志VR全景系统项目成功完成。在此阶段中,设计者可将最终成果打包成适合发布和传播的格式,并确保其不同设备和平台上的兼容性。同时,设计者还可考虑添加部分附加功能或增值服务,以切实提高项目竞争力以及用户体验。

(二) 基于虚拟现实技术的园林植物造景设计案例分析

在三维场景漫游建模工作实际开展中,生成高质量的全景图在展现园林植物造景设计方面具有重要影响^[7]。以往利用3ds Max结合V-Ray渲染器的方式,虽可生成接近真实照片质量的全景图,但其对硬件要求较高且渲染时间消耗较长,不适用于普通设计团队或个人进行。由此,某公园植物造景设计中采用更高效且易操作的“SketchUp+Lumion”组合方案。

1. 制作流程

(1) 植物模型收集以及处理。植物作为园林植物造景设计中核心元素,其模型精准性以及真实性直接对最终设计效果造成影响。考虑到真实植物形态较为复杂,由此案例工程设计者在收集植物模型时,优先对形态相近的模型进行考虑,以保障设计方案一致性和连贯性。植物模型部分源于Lumion自带的高精度模型库,其余则主要依托于网络搜索获取,进而确保模型种类丰富、形态多样。

(2) 基础场景建模。设计者选定案例公园音乐喷泉厅前的区域作为模拟对象,其具体工作中首先利用SketchUp开展基础场景建模。通过对案例公园的整体建筑、地形进行细致建模,并对建筑细节、装饰小品和地面铺装等细节进行重点关注,可有效展现出设计精致性以及细腻性。针对视线不及或远景部分,设计者则采用几何形状进行简化处理,以切实提高制作效率以及软件运行速度,具体如图2所示。在实际建模过程中,设计者为不同材质被赋予不同颜色,为后续在Lumion中进行材质替换提供便利条件支持。

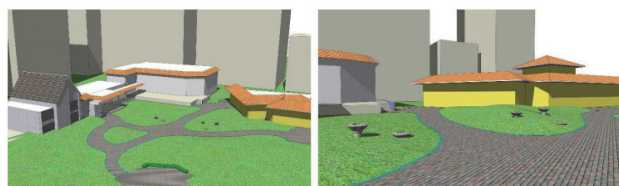


图2 某公园节点模型鸟瞰图(左)与SU模型细节(右)

(3) Lumion场景布置与渲染。设计者将SketchUp模型导入Lumion后,基于实景照片选择相应植物模型开展布置设计。Lumion自带的植物库可提供丰富的植物种类以及形态,设计者可基于实际设计需求进行灵活搭配。在实际进行布置设计过程中,需对植物空间布局和层次感营造进行重点关注,以还原实景植物景观空间氛围。完成场景布置后,即可利用Lumion的VR功能(6.3版本及以上)进行全景图导出。Lumion的实时渲染技术可使

渲染过程快速、高效完成,以此大幅缩短制作周期。

2. 成果展示与对比

将制作完成全景图与实景全景图上传至720云平台,随后即可佩戴VR眼镜对两者差异进行对比。由对比结果可知,Lumion制作的场景可充分还原实景植物景观空间布局以及氛围。林冠线的层次以及林缘线曲折均可得到生动展现,进而确保虚拟场景与实景高度相似。即使在非花期,也可通过对植物模型和色彩渲染进行调整,呈现出植物景观的最佳状态。

虽然受植物模型形态和真实度限制,场景未能达到以假乱真效果,但已可充分满足展示设计方案以及与业主沟通需求,具体如图3所示。通过该方法制作出的虚拟场景,不仅可体现出操作简便、适用范围广泛等优势,同时可大幅节省制作成本以及时间。即使是学生也可轻松掌握,此对于虚拟现实技术在园林植物造景领域的推广具有积极影响。



图3 公园某节点局部实景(左)与场景模拟还原(右)

总而言之,案例工程中利用“SketchUp+Lumion”组合方案,成功实现基于虚拟现实技术的园林植物造景设计工作。该方法不仅可显著提高制作效率以及软件运行速度,同时可有效还原实景植物景观空间布局以及氛围。在720云平台支持下,设计者可开展全景图展示和对比,以此有效验证该方法的可行性以及实用性。后续发展中,需进一步探索虚拟现实技术在园林植物造景领域的应用路径,如全景导览系统、交互式体验等,以此推动园林设计行业不断创新与发展。

四、总结

综上所述,虚拟现实技术在园林植物造景中的应用具备独特优势,在深度沉浸式的三维环境体验支持下,可为设计者提供前所未有的设计视野以及探索空间。由具体设计流程以及案例实践结果可知,基于虚拟现实技术的园林植物造景设计中,通过收集并处理植物模型、基础场景建模以及Lumion场景布置与渲染等步骤,设计者可有效还原出实景植物景观空间布局以及氛围。该方法可有效节省制作成本以及时间,同时也可有效满足展示设计方案以及与业主沟通的需求。

参考文献

- [1] 祁焱华. 植物造景艺术在园林景观设计中的应用[J]. 棉花学报, 2023,35(6):526-526.
- [2] 王菁. 园林植物环境艺术设计在植物景观造景中的应用[J]. 植物遗传资源学报, 2024,25(2):10003.
- [3] 柳娟. 园林景观设计中植物造景的重要性及其方法探究[J]. 现代园艺, 2021,(16).
- [4] 王鑫屹. 植物造景技术在园林景观绿化中的应用[J]. 中文科技期刊数据库(全文版)工程技术, 2022(9):3.
- [5] 叶炜. 植物造景在风景园林设计中的应用[J]. 生态环境与保护, 2022,5(3):34-36.
- [6] 张雅慧, 谢思明, 温铁龙, 等. 岭南园林在华南植物园兰园规划中的应用分析[C]//2022年中国植物园学术年会论文集. 2023.
- [7] 李琼. 特色小镇风景园林设计中植物造景的应用研究[J]. 农业技术与装备, 2019,(9).

中深层地热供热站工艺系统设计计算模拟软件的开发与应用

崔瑞英, 张星汉, 左未东, 杨志豪, 陶丹玉

中石化中原石油工程设计有限公司, 河南 郑州 450000

摘 要： 本文针对中深层地热供热站工艺系统设计复杂、依赖人工计算效率低的问题，开发了一款集成化设计计算模拟软件。该软件通过分析典型工艺系统模型（如直供、梯级利用、热泵组合等），建立模块化计算逻辑和18个功能模块，整合设备选型数据库（涵盖热泵、换热器、管道等），实现全流程自动化计算与模拟。软件具备参数输入、负荷分配、设备选型、投资估算等功能，支持多工况模拟与方案优化。实际案例验证表明，软件可将传统设计周期从1天缩短至几分钟，计算结果与实测数据偏差 $\leq 3\%$ ，显著提升设计效率和精度，为地热供热工程的高效设计与优化运行提供了可靠工具。

关 键 词： 中深层地热供热；工艺系统设计；模拟软件；模块化计算；设备选型；多工况优化

Development and Application of Simulation Software For Process System Design of Medium-Deep Geothermal Heating Station

Cui Ruiying, Zhang Xinghan, Zuo Weidong, Yang Zhihao, Tao Danyu

Sinopec Petroleum Engineering Zhongyuan Co., Ltd. Zhengzhou, Henan 450000

Abstract： In this paper, an integrated design calculation simulation software is developed to solve the problems of complex design and low efficiency of manual calculation for the process system of medium-deep geothermal heating station. By analyzing typical process system models (such as direct supply, step utilization, heat pump combination, etc.), the software establishes modular calculation logic and 18 functional modules, integrates equipment selection database (covering heat pumps, heat exchangers, pipelines, etc.), and realizes the automatic calculation and simulation of the whole process. The software has the functions of parameter input, load distribution, equipment selection, investment estimation, etc., and supports multi-condition simulation and scheme optimization. The actual case verification shows that the software can shorten the traditional design cycle from 1 day to a few minutes, and the deviation between the calculated results and the measured data is less than 3%, which significantly improves the design efficiency and accuracy, and provides a reliable tool for the efficient design and optimal operation of geothermal heating projects.

Keywords： medium-deep geothermal heating; process system design; simulation software; modular calculation; equipment selection; multi-condition optimization

引言

随着全球对清洁能源的需求日益增长以及环境保护意识的不断提高，地热能作为一种可再生、清洁的能源，其开发利用受到广泛关注。中深层地热供暖作为一种高效利用地热能的方式，在我国得到了快速发展。

中深层地热供暖系统的设计需要综合考虑多种因素，如地热水的温度、流量、水质，供暖区域的面积、建筑类型、热负荷需求，以及回灌地质条件等。这些因素相互关联且变化多样，导致系统组合配置复杂、设备选型多样、参数变量繁多，且计算逻辑方法不同，能够衍生出几百种系统方案。传统的设计方法主要依赖设计人员的经验和手工计算，不仅效率低下，而且容易出错，且输入参数与输出结果呈强耦合性，任一参数调整均需重新验证全系统，耗时耗力。目前尚无适用于这类项目的小巧实用的系统模拟计算软件支持全系统建模与多工况模拟，设计过程中需反复试错，这在很大程度上限制了地热供暖项目的高效设计和优化运行，难以满足快速发展的市场需求。^[1]

本研究旨在开发一款中深层地热供热站工艺系统设计计算模拟软件，通过整合典型工艺流程、设备选型特点和全面的选型数据库，实现从基础计算到设备选型、投资估算和占地面积估算的全过程模拟。该软件的开发将大大提高地热供热站设计的效率和准确性，为工程决策提供可靠依据。

一、典型工艺系统计算模型的研究

为便于设计人员能够应用软件完成各种中深层地热供暖工艺系统的全流程计算，就要将各类工艺系统的计算方法统一到一套

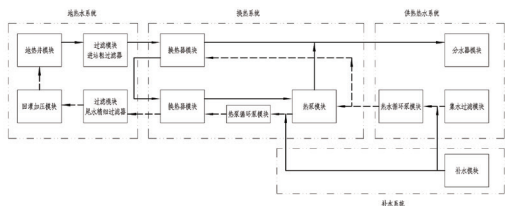
计算逻辑和计算程序中。为实现上述目的，经过以下分析研究：

（一）建立典型工艺系统模型并优化整合

研究人员收集整理了河南、河北、山西、山东、陕西等地区的近百个中深层地热项目案例，深入研究各项目工艺系统特征，

分析其主要影响因素和运行工况。^[2]如地热量、水质、水温、供热用户采暖形式、温度、供热负荷、建筑分区情况、运行模式、设备选型等技术因素等对工艺系统的影响特性。

通过分析研究,发现大部分工艺系统框架的设计思路是基本一致的,主要分为地热井、过滤回灌、直供换热、热泵供热、供暖循环、分区供应、补水系统等几大功能区块。但是工艺系统中设计变量多,对系统计算方法影响较大;不同设备配置又形成了多种运行工况和系统设计。



> 图1 通用模块化工艺系统示意图

研究人员总结设计影响关键因素和工艺系统特点,整合提炼4种可涵盖大部分工艺系统方案的典型工艺系统模型,包括“直供+热泵不分区换热系统”“梯级直供+热泵不分区换热系统”“直供不分区换热系统”“梯级直供分区换热系统”。这些典型模型涵盖了直供、梯级利用、热泵、分区供暖等多种常见工艺形式,能够满足不同项目的需求。

同时结合实际项目的设计和运行经验,对典型工艺系统模型进行优化,使其更加合理、高效。优化后的模型能够更好地适应不同输入参数的变化,提高系统的灵活性和适应性。^[3]

(二) 建立典型工艺系统的全流程计算模型, 确定关键参数特性

对4类典型工艺系统模型,模拟工程设计计算过程,进行全系统计算数据模型的创建。通过四套计算过程试验,总结出1.所有类型计算都需要的基础输入参数列入设计输入模块;2.所有系统计算的数据基础是各个环节负荷和流量的分配,此为关键参数;3.直供和热泵负荷分区分配是关键,一般直供首先满足负荷较小区;4.设备台数和连接方式对系统类型和计算取值有很大影响,是关键参数;直供一般1~2台,有串并联形式,热泵前置板换一般不超过2台,并联为主,热泵跟随分区每区一般1~2台;5.建筑分区一般最多分高、中、低三区;6.各类泵的流量、扬程是关键参数。

通过计算过程分析,采用模块化建模方案,形成18个计算模块,包含:设计参数输入模块、负荷计算和分配模块、高区直供板换模块、高区热泵前置板换模块、高区中间循环泵模块、高区

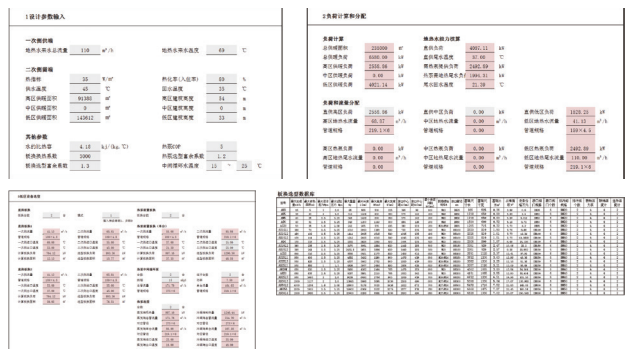


图2 计算模块示例

热泵模块、中区直供板换模块、中区热泵前置板换模块、中区中间循环泵模块、中区热泵模块、低区直供板换模块、低区热泵前置板换模块、低区中间循环泵模块、低区热泵模块、供暖循环泵模块、补水泵模块、潜水泵模块和回灌加压泵模块。涵盖工艺系统所有设备选型和管路设计计算。

（三）整合算法和计算逻辑，创建通用型计算方法

研究人员对不同类型工艺系统计算逻辑归一化分析,研究多种计算模块组合条件下的通用判断条件、计算方法、系统参数关联逻辑,基于以上研究中确定的关键参数,整合算法,通过关键变量参数形成判断条件,进行计算公式的选取和数据的调用。最终设计和创建一套适用性强、覆盖面广的计算逻辑和关联判断条件,将所有系统计算整合成一套计算模型。

研究效果:该方法适用直供、梯级利用、热泵、高中低分区、板换串并联等所有组合形式的计算。可完成整个项目全套系统设备管道的计算。给定条件,自动判断流量划分、自动计算设备选型参数、管道规格、泵功率。^[4]

二、计算数据库的创建研究

为了计算过程中可以调取相应数据,同时实现直接进行设备和管道选型,减少设计人员额外工作,研究人员创建计算数据库:包含热泵选型数据库、板式换热器选型数据库、循环泵、补水泵选型数据库、管道水力计算数据表、管径匹配选型表、泵功率匹配数据表等。

通过分析地热项目参数条件, 筛选建立设备选型数据库, 为了实现计算结果与工程设计紧密结合, 详细记录了设备的性能参数、基础尺寸、配管尺寸、阀门和仪表配套数量、安装操作空间尺寸、投资估算价格、安装估价等信息, 为设备选型提供数据支持。通过分析一般选型方法, 确定关键选型参数, 由面积、负荷、功率等设备参数的计算结果关联数据库进行自动选型。

管道选型数据库中包含有不同流量、压力等级下的对应的管道规格、材质、比摩阻、流速等参数,为管道选型提供依据,由管道流量计算结果数据关联数据库自动选型。^[5]

计算取值数据库包含泵功率计算表、管道水力计算表、管径匹配取值表等,关联系统计算结果,通过结果判定取值,以便用于下一步计算。

[illegible]

> 图3 数据库示例

研究效果：通过数据库的建立和完善，全流程计算数据模型就可以实现输入基础参数和关键参数，一键完成全部工艺计算、

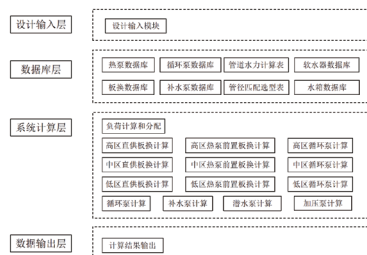
设备选型、管道选型，并可拓展仪表阀门统计、投资估算和面积估算等功能。

三、计算软件开发与应用

基于以上研究积累的计算模型和数据库,采用编程语言开发地热供热系统工艺计算模拟软件,内嵌工艺系统和所有设备选型计算方法、计算公式和逻辑判断条件。^[6-7]

（一）软件架构设计

软件主要由数据输入层、数据库层、系统计算层、数据输出层组成。包含六大功能组件: 设计输入、负荷计算和分配、高区设备计算选型、中区设备计算选型、低区设备计算选型、辅助设备计算选型、计算结果输出。将18个系统计算模块嵌入。



> 图3 软件架构

（二）软件工作流程

软件工作主要流程：软件主界面为设计输入界面，输入项目基本条件参数，点击“负荷计算和分配”功能，可自动计算得出结果，依次点击“高区设备计算选型”“中区设备计算选型”“低区设备计算选型”功能，输入关键变量参数：设备台数、运行模式，后台根据判断逻辑，选取前序计算结果中相对应数据，选用对应公式计算，并调用数据库，形成设备选型参数结果；点击其他功能，输入变量参数，通过系统后台判断，调用前序计算结果和数据库，进行计算。

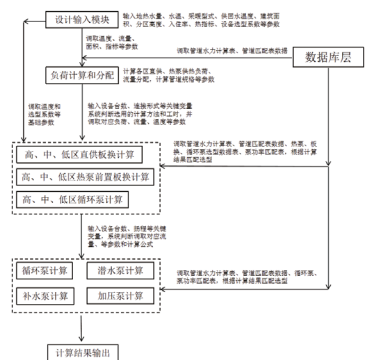


图4 软件工作流程

（三）软件界面设计

软件采用友好的轻便易用的用户界面,以设计输入为主界面,集成各个计算功能模块,计算过程可视化和结果输出,大大提高了使用便捷性。

(四) 软件应用试验

软件能够实现全工艺系统计算过程的集成模拟。研究人员以一个23万平方米小区地热供热站的设计为实验案例,按照平时工作流程和计算过程,进行流程草图绘制、EXCEL 计算表格创建、查找数据、计算调整、翻找样本选型,需要最少1天时间完成;在



多工况变化、方案系统修改、设备选择修改时,需要重新创建计算过程,调整修改,一套至少需要1~2小时完成。通过集成计算软件的应用,只需几分钟即可完成。效率极大提高,且模拟结果与实测数据偏差 $\leq 3\%$ 。

通过实际案例应用,验证了软件在地热供热站设计中的准确性和实用性。用户只需输入基本参数,软件即可自动完成复杂计算和选型过程,大大提高了设计效率。同时,软件支持多种方案的比较分析,有助于优化系统设计和降低工程成本。^[8-9]

四、结论

本研究成功开发了一款中深层地热供热站工艺系统设计计算模拟软件,可对中深层地热供暖的多种工艺系统进行一键快速计算和多种工况模拟,为设计过程中设备和管道选型、工艺方案对比,运行期工况模拟提供高效直观的计算工具。达到减少人力时间投入、缩短设计周期、提高计算精度和质量、指导运行操作等功能。^[10]软件基于对典型工艺流程的深入研究,建立了全面的选型数据库,具有计算准确、功能全面、使用便捷等特点。实际应用表明,该软件可显著提高地热供热站设计效率,为工程决策提供可靠依据,对推动地热能利用技术的发展具有重要意义。

参考文献

- [1] 王伟, 张强, 李华. 中深层地热供热系统换热性能模拟与优化[J]. 太阳能学报, 2021, 42(3): 45-52.
- [2] 刘志鹏, 等. 基于 TRNSYS 的地热供热站动态仿真及参数优化[J]. 暖通空调, 2020, 50(8): 88-94.
- [3] 陈璐, 等. 中深层地埋管地热系统热力计算模型研究[J]. 可再生能源, 2019, 37(12): 1801-1808.
- [4] 黄志刚, 等. 中深层地热井群供热系统热力耦合模型与优化分析[J]. 工程热物理学报, 2022, 43(5): 1205-1212.
- [5] 孙晓峰, 等. 中深层地热供热站工艺参数敏感性分析与优化[J]. 暖通空调, 2023, 53(2): 55-61.
- [6] 吴磊, 等. 中深层地热与热泵联合供热系统的能效分析与设计[J]. 太阳能学报, 2020, 41(6): 152-159.
- [7] 高翔, 等. 中深层地热供热系统经济性评价模型构建与应用[J]. 煤气与热力, 2021, 41(12): 23-28.
- [8] Lund J W, et al. Direct utilization of geothermal energy 2020 worldwide review [J]. Geothermics, 2020, 90: 101915.
- [9] Li X, et al. Optimization of medium-deep geothermal heating systems using hybrid simulation methods [J]. Applied Energy, 2021, 281: 116035.
- [10] Bayer P, et al. Computational modeling of shallow and deep geothermal systems: A review [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022, 160: 112287.

