

校园既有建筑绿色化改造性能模拟与多目标优化研究

苗峰源 陈耀文 李思翰 付战涛*

黄河科技学院 河南 郑州 450061

【摘要】：在双碳目标与绿色校园建设持续推进的背景下，校园既有建筑的高能耗、低舒适度等问题日益凸显，绿色化改造成为高校可持续发展的重要课题。性能模拟与多目标优化是解决校园建筑改造中多目标冲突、方案决策困难的关键技术手段。本文系统梳理了建筑性能模拟技术的发展历程与主流工具，分析了多目标优化算法的基本原理及其在绿色改造中的应用逻辑。在此基础上，以黄河科技学院为案例，针对其校园既有建筑的特点和存在的问题，提出了融合性能模拟与多目标优化的绿色化改造策略框架，涵盖数据采集、模拟诊断、优化决策和实施验证四个阶段。研究旨在为寒冷地区高校校园建筑的绿色化改造提供方法论参考和技术路径建议。

【关键词】：校园既有建筑；绿色化改造；性能模拟；多目标优化；绿色校园

DOI:10.12417/2811-0536.26.08.053

引言

伴随着我国绿色建筑体系不断健全以及教育领域的低碳化转型不断深入，绿色校园建设成为教育基建迈向高质量发展的关键支点。校园里既有建筑存量很多，大多老旧教学楼、宿舍楼、办公建筑形成标准不高，其围护结构保温隔热性能较差，通风采光设计不够恰当，机电系统能耗相对较高，长久以来便存有资源耗费严重，室内环境品质不佳，运维手段比较粗糙等状况，很难符合现代绿色校园的创建需求。建筑性能模拟技术可以对建筑能耗、室内热舒适、光环境、风环境进行量化分析，摆脱传统经验化改造的局限性，多目标优化技术可以统筹多个改造目标，避免单一节能改造导致的舒适度降低、成本过高问题。目前国内外对建筑绿色改造的研究已经比较成熟，但是针对校园建筑这种特殊使用场景的专项研究还存在体系不完善、适配度不够等现象。

1 建筑性能模拟技术体系分析

1.1 建筑性能模拟技术概述

建筑性能模拟是指利用计算机数学模型，对建筑的热工性能、能耗以及室内环境质量进行定量分析和预测的技术方法。自20世纪70年代以来，性能模拟技术经历了从简单稳态计算到动态逐时模拟、从单一能耗分析到多性能耦合分析的发展过程，现已成为建筑设计和改造领域不可或缺的技术支撑。其核心原理是基于热力学第一定律和传热学基本原理，建立建筑围护结构、室内空气和暖通空调系统之间的能量平衡

方程，并通过数值方法进行求解。动态能耗模拟软件通常采用热平衡法或加权系数法，考虑室外气象条件、围护结构热工参数、内部得热以及空调系统运行策略等因素，逐时计算建筑的冷热负荷和能耗。

1.2 主流性能模拟工具及其适用性

当前建筑性能模拟领域有多款成熟工具。EnergyPlus 是美国能源部开发的动态能耗模拟权威软件，适用于复杂建筑的详细分析。清华大学开发的DeST 在热环境和空调系统模拟方面具有优势，适合中国气候和建筑特点。eQUEST 建模效率高，适合方案阶段的快速评估；DesignBuilder 则作为 EnergyPlus 的图形界面工具，降低了使用门槛。采光日照分析方面，Ecotect 和 Ladybug、Honeybee 插件应用广泛，支持参数化环境分析和多方案对比。各工具有机结合，可覆盖从概念到详细设计的全流程分析需求。

1.3 性能模拟在校园建筑改造中的应用流程

性能模拟在校园建筑改造中的应用遵循系统化流程，包括数据采集、基准模型建立与校准、改造方案模拟和效果评估。数据采集包括建筑几何、围护结构、设备系统及运行作息信息，通常基于图纸并结合实地调研和能耗账单。基准模型需用模拟软件构建并对照实测能耗校准。改造方案模拟通过调整围护结构和设备参数等，预测性能变化。效果评估量化节能率、室内环境改善和碳减排量。校园建筑改造模拟需特别关注教学楼、宿舍和办公楼的运行时间表差异，以及教室人员密度的时段性波动。同时需考虑改造期间正常

作者简介：苗峰源，男（2004-04），汉，河南长葛人，本科在读，研究方向：建筑学。

基金项目：河南省高等学校大学生创新训练计划项目《基于高预测性能代理模型的校园建筑绿色性能动态优化研究——以黄河科技学院绿色化改造为例》（编号：202511834048）。

教学运行,在模拟中分析分期施工的可能,为实施提供灵活性支撑。

2 多目标优化方法及其在绿色改造中的应用

2.1 多目标优化的基本概念与原理

多目标优化是在约束条件下优化多个冲突目标的数学方法。在建筑绿色化改造中,常见目标如最小化能耗和成本、最大化舒适度、最小化碳排放等。这些目标间存在制约关系,如降能耗会增成本,因此改造决策需寻求多目标间的最佳平衡。

多目标优化问题通常不存在唯一最优解,而是存在一组帕累托最优解。帕累托最优指无法在不使其他目标变差的情况下改进任一目标。所有帕累托最优解构成帕累托前沿,决策者可根据需求和偏好选择最优方案。这一思想适用于校园建筑改造,因校方需在有限预算内兼顾节能、舒适度和运维成本。

2.2 主流多目标优化算法

在多目标优化算法中,遗传算法及改进版本应用广泛,通过模拟进化机制搜索最优解。在建筑改造优化中,可将围护结构参数编码为基因进行迭代优化。NSGA-II 是重要改进算法,通过非支配排序和拥挤度距离提高解集分布与收敛速度,广泛应用于建筑优化领域。粒子群算法收敛快、参数简单,适合连续变量问题。实际应用中,NSGA-II 适合参数多、目标复杂的情况,粒子群适合变量连续、追求快速收敛的场景。校园建筑改造应根据具体问题选择算法,也可组合使用以兼顾搜索与收敛效率。

2.3 多目标优化在校园建筑改造中的应用逻辑

在校园既有建筑绿色化改造中,多目标优化的应用逻辑可概括为四个步骤。第一步是建立建筑性能模拟模型,使其能够准确预测不同设计参数下的建筑性能表现。第二步是设定优化目标和变量,将节能率、室内环境达标率、改造成本等设定为目标函数,将围护结构热工参数、设备系统参数等设为优化变量,并根据节能标准和实际条件设定变量的上下限约束。第三步是运行多目标优化算法进行迭代搜索,在约束条件范围内自动探索大量可能的参数组合,最终生成一组帕累托最优改造方案。第四步是方案比选与决策,校方可根据预算额度、功能定位、改造周期等因素,从帕累托解集中选择最适合的方案。

这一应用逻辑的优势在于,它将复杂的多目标权衡问题转化为可视化的方案集合,使决策者能够直观地看到不同方案在节能、舒适和成本三个维度上的表现差异。同时,整个过程由算法自动完成方案搜索,

大大减少了人工试算的工作量,提高了优化效率。

3 黄河科技学院绿色化改造案例分析与策略构建

3.1 黄河科技学院校园建筑现状分析

黄河科技学院位于河南省郑州市,属于寒冷气候区。该地区冬季寒冷干燥,最冷月平均气温约 0°C ,供暖期约 4 个月;夏季炎热多雨,最热月平均气温约 27°C ,制冷期约 3 个月。全年温差较大,对建筑保温和隔热均有较高要求。在校园建筑方面,学校拥有教学楼、实验楼、宿舍楼和办公楼等多种建筑类型,其中工学部教学楼群为校园核心教学功能区,多建于 2000 年前后,至今已使用二十余年。

以工学部智能楼为例,通过对其 CAD 图纸的初步分析可以发现,该建筑具有以下典型特征。建筑为南北朝向,标准层平面规整。外墙为框架填充墙结构,缺少有效保温层,热工性能难以满足现行节能标准的要求。外窗采用普通单层玻璃窗框,气密性和热工性能均较差,冬季散热和夏季得热问题突出。教室进深较大,内区天然采光不足,部分空间长期依赖人工照明。空调系统采用分体式空调,缺乏集中调控能力,设备能效等级较低。屋顶保温隔热措施不足,顶层房间夏季过热现象较为明显。

综合来看,黄河科技学院既有建筑在绿色性能方面存在四个方面的主要问题。在围护结构方面,热工性能不满足现行节能标准,导致冬季供热和夏季制冷能耗偏高。在自然通风方面,内廊式布局使通风路径不畅,过渡季节难以有效利用自然冷源进行降温。在室内环境方面,天然采光均匀度不足,部分空间照度偏低,同时存在近窗眩光与内区过暗并存的问题。在设备系统方面,分体空调能效低且缺乏智能控制,照明系统功率密度偏高,整体运维管理较为粗放。这些问题既是黄河科技学院建筑的现实困境,也为绿色化改造策略的构建提供了明确的问题导向。

3.2 基于性能模拟与多目标优化的改造策略框架

针对黄河科技学院既有建筑的特点和问题,本文提出一个融合性能模拟与多目标优化的四阶段改造策略框架,为该校绿色化改造提供系统性的技术路径。

第一阶段是基础数据采集与基准模型建立。这一阶段的核心任务是对拟改造建筑进行系统性的信息采集,包括基于 CAD 图纸获取建筑几何尺寸、朝向、层数和功能分区信息,通过实地调研或查阅建设档案确定围护结构材料和构造做法,统计外窗面积、类型和开启方式,记录空调和照明等设备系统的型号和运行参数,并收集近年的能耗账单数据和日常使用作息

信息。在充分采集数据的基础上,利用性能模拟软件建立反映建筑当前性能水平的基准模型,作为后续分析的工作基础。

第二阶段是性能模拟与问题诊断。基于已建立的基准模型,对建筑进行多维度的性能模拟分析。能耗模拟方面,计算建筑全年逐时冷热负荷、单位面积能耗强度以及供暖、制冷、照明、设备等各分项能耗的占比,识别能耗构成中的关键环节。采光模拟方面,分析各功能空间的全天然采光时间百分比和采光系数分布,评估自然采光利用水平。热舒适模拟方面,评估不同季节典型日的室内预计平均热感觉指数,判断室内环境质量是否满足师生使用需求。通过上述多维度模拟,精准定位建筑的性能短板和改造重点,为改造方案的制定提供量化依据。

第三阶段是多目标优化与方案生成。基于校准的性能模型,构建多目标优化模型。优化变量选取影响显著且可行的关键参数,如外墙保温厚度、外窗性能、南向窗墙比、遮阳长度及空调能效。优化目标为最小化能耗强度、最大化采光达标率,并控制改造成本。采用 NSGA-II 算法进行帕累托寻优,其解集分布均匀、全局搜索能力强。约束条件依据节能标准与当地气候设定变量上下限。最终生成一组帕累托最优方案,代表节能、采光与成本间的不同平衡技术组合。

第四阶段是方案比选与决策实施。校方可基于帕累托最优解集,结合预算、节能目标、施工影响及后期维护成本等因素进行比选。复杂决策可借助层次分析法等方法。选定方案后,优先利用假期分阶段施工,改造后通过能耗与环境测试验证效果,并可将数据反馈模型以持续优化。

3.3 关键技术策略建议

结合上述策略框架,针对黄河科技学院既有建筑

的具体情况,提出若干关键技术建议。

围护结构改造优先且效果显著,因其直接影响建筑能耗。外墙宜增设外保温系统,材料可选挤塑聚苯板或岩棉板,厚度经计算确定。外窗宜整体更换为断桥铝合金框配中空 Low-E 玻璃,传热系数应控制在 2.0 以下。屋面可增设保温层或采用冷屋面涂料,减少顶层房间的热量交换。

优化自然通风与采光可改善室内环境。内廊式教学楼可在中部增设通风竖井或门上设亮子,改善气流组织。教室内部宜用浅色饰面,近窗处设反光板以增加采光深度,东西向窗户加活动百叶遮阳以减少眩光。

设备系统能效提升是改造成果的保障。在降低负荷后,老旧空调宜逐步替换为高能效多联机或集中系统,并配备智能控制。照明系统宜更换为 LED 灯具,公共区域增设感应控制以减少无效能耗。

可再生能源利用是实现近零能耗目标的重要补充。校园建筑通常屋顶面积较大且遮挡较少,具备良好的光伏发电系统安装条件。建议在条件适宜的楼栋屋顶安装分布式光伏发电系统,所发电量可优先供建筑自身使用,余电上网,利用可再生能源进一步降低建筑运行阶段的碳排放。

4 结语

本研究主要侧重于理论分析和策略框架构建,尚未对具体建筑开展详细的性能模拟和优化实证,所提策略框架有待在实际改造项目中进一步验证和完善。未来研究可选取黄河科技学院一栋典型建筑进行详细的建模和多目标优化实证分析,进一步探索 BIM 技术与物联网监测在性能模拟中的集成应用,并针对不同气候区和不同建筑类型开发差异化的改造策略。

参考文献:

- [1] 刘成龙.老旧小区改造问题分析与绿色智能化改造路径探究[J].住宅与房地产,2026,(11):39-41.
- [2] 睦迎春.既有建筑绿色化改造施工关键技术与性能提升研究[J].低温建筑技术,2026,48(02):22-25.
- [3] 代晓青.“双碳”目标下既有住宅绿色化改造技术路径探究[J].住宅产业,2026,(01):48-51.
- [4] 卢斌天.城市更新背景下老旧小区绿色化改造研究[J].美与时代(城市版),2025,(12):38-40.
- [5] 李振.既有建筑绿色化改造中再生建材的适配性评估与应用[J].佛山陶瓷,2025,35(12):152-154.
- [6] 胡枫.透水混凝土在厂房绿色化改造中的施工应用[J].山西建筑,2025,51(20):92-94+104.