

基于 BIPV 的华北乡村住宅形制与热工性能协同优化设计方法

曹怀月 孙鑫奥 张贝贝*

河北工程大学建筑与艺术学院 河北 邯郸 056000

【摘要】：为了解决华北乡村住宅因热工性能差而造成的能耗高、旧屋改造更新中存在的“形技分离”等问题，提出了基于 BIPV 技术的形制和热工性能协同优化设计方法。采用典型合院住宅为对象，利用参数化建模对 BIPV 系统进行集成，在参数集成了屋顶形式、窗墙比等的基础上，通过算法实现建筑能耗、热舒适度以及光伏发电量多目标优化求解。结果表明：在实现合院形制传承的基础上，实现了综合能耗降低约 60%、热舒适时长大于 20%、光伏贡献率为 30%-40%，并得到了一系列的帕累托最优解，通过数学建模量化了各种性能目标之间的权衡关系，从而建立了由算法优化至设计转译的一系列协同方式。对于华北地区的乡村住宅绿色低碳更新具有区域适应性和工程可行性。

【关键词】：BIPV；乡村住宅；形制与性能协同；多目标优化；参数化设计

DOI:10.12417/2811-0536.26.04.056

1 绪论

1.1 研究背景和意义

在“双碳”的叠加作用下，华北地区乡村住宅绿色更新刻不容缓，也暴露出其建筑热工性能差、地域形制特点淡化、绿色技术应用与建筑本体及风貌严重割裂等共性问题。将光伏建筑一体化(BIPV)技术应用到该地区乡村住宅上，可促进实现建筑产能和节能的一体化发展，但是与地域形制融合、协调提升建筑综合性能而非单纯附加却是现阶段针对该类地区进行应用时需要重点考虑的问题，这也是本文的研究出发点和实践意义所在。

1.2 研究目标与内容

研究提出了一种同时优化形制传承和热工性能的 BIPV 一体化设计方法，结合华北乡村住宅现状性能的诊治、基准建模及集成 BIPV 系统的参数化多目标优化模型构建，通过智能算法实现性能协同寻优，并将优化解集转化为可操作化的建筑策略，最终完成由问题到方案的全过程设计方法构建。

1.3 研究方法

本文采用融合“实地调研、参数化建模、性能模拟、多目标优化、设计转译”的混合研究方法，通过实地数据采集建立性能基准，在 Grasshopper 平台构建集成 BIPV 的参数化模型并耦合 EnergyPlus 进行模拟，运用 NSGA-II 算法对多目标进行协同寻优，最终将数据驱动优化结果转化为可操作的设计策略，形

成从实证分析到生成设计的完整技术路径。

2 文献综述与理论基础

2.1 BIPV 技术发展及其在乡村建筑中的应用

BIPV 的技术体系包含光伏材料、构件构造、系统集成三方面的构成^[1]，经历了最初的单纯光伏发电的功能单元形态到现在与建筑围护结构一体化的设计思路，国外有类似的代表性工作，国内也有浙江龙观乡户建式、福建下党零碳茶馆等少量应用实例，主要集中在将光伏建筑一体化电站作为乡村运营的重点内容以及对外宣传的亮点进行打造，另外也有类似于美国 zHome 等的技术较为成熟且已普及到民众生活的代表作品，但是这些都缺乏适用于地域性的适应性特点。综上可知目前的研究工作虽然在材料性能和工程应用方面有一定的储备，但技术应用仍存在大量脱离乡村地区的地域风貌和空间形制的现象，缺乏将 BIPV 系统的技术参数与建筑热工、采光、通风等各项性能参数相结合，并通过将各类参数定量化的手段实现整个系统的技术参数整合优化，在华北合院住宅语境下“形制-技术-性能”三位一体的设计协同优化工作均尚属空白。

2.2 乡村住宅形制特征与热工性能关联性研究

华北合院住宅是以院落为中心形成的，有“北房为尊、东西厢房、南向倒座”为特征的空间原型及形制谱系^[2]，且院落尺度、建筑进深、屋顶形式等形制要素是决定建筑热工性能的基础物理框架^[3]。院落尺

作者简介：曹怀月，女（2002-），汉族，四川绵阳人，本科生，研究方向：建筑设计及技术。

第二作者：孙鑫奥，男（2005-），汉族，天津人，本科生，研究方向：室内外环境设计。

通讯作者：张贝贝，女（1990-），汉族，河北邯郸人，硕士，实验师，研究方向：建筑设计。

度、建筑布局决定着建筑的采光和自然通风,进而影响到冬季得热、夏季散热;建筑进深决定着建筑的窗墙比,从而对建筑的室内采光和热损失产生影响;而坡屋顶的高低长短、收分大小将直接影响到太阳辐射的接收和室内空间的热分布。这些形制特征均与能耗、日照、通风等热工性能参数之间存在一定的量化关系,能够提供一定的设计调节范围,使设计在实现功能需求的同时满足节能要求。

2.3 参数化设计与多目标优化在建筑性能设计中的应用

参数化设计将建筑形制要素转换成可调参数的数字变量,作为链接地域空间原型与建筑性能模拟之间的纽带,将定性的形制特征量化解构,利用各类性能参数的协调实现,兼顾热工、采光等性能;以 NSGA-II 为代表的多目标优化算法并行搜索、求解帕累托前沿,同时兼顾建筑能耗、舒适度及光伏产能等指标间的相互权衡与矛盾,实现空间中复杂变量的全方位搜索,在大量空间坐标点中逐次求解最优,使优化结果更具全面性和普适性,进而弥补传统试错法及单目标优化手段单一和片面的弊端,给出具有科学性、严谨性和多样性的设计结果。

3 文献综述与理论基础

3.1 研究区域概况

华北地区属于温带大陆性季风气候,冬季寒冷干燥、夏季炎热多雨,年温差大^[4],采暖与降温需求显著,这对乡村住宅的保温隔热与自然调节能力提出明确要求。该地区乡村建设长期以低层合院式住宅为主导,形成了以院落组织空间、以砖木或砖混结构为主体的典型建造模式,其布局紧凑、南向采光优先的特点既是对地域气候的适应,也构成了后续绿色技术集成与性能优化的物质与文化基底。

3.2 数据采集与处理方法

本文利用多源数据融合的方式完成采集和处理:形制数据部分,运用实地测绘、无人机倾斜摄影、三维激光扫描等手段全面采集典型合院式住宅空间尺寸、形体特征、构造细部,并建立数字化三维信息模型;性能数据部分,通过部署温湿度传感器长期监测、入户能耗结构调查、结合居民热舒适主观问卷展开综合研究,将定量、定性分析相结合掌握实际建筑的能耗水平及室内物理环境状况,以真实有效的多维数据为基础,进行后续参数化建模和性能模拟。

3.3 现状性能分析与问题诊断

基于采集到的样本点数据建立起符合实际运行工况的参数化基准模型,并运用 EnergyPlus 软件开展全

年动态能耗、热舒适度模拟,定量说明既有建筑普遍存在的冬采暖能耗强度大、夏室温过热持续时间长等问题;在模拟分析基础上将性能缺陷归因于具体形制要素,明确指出现有合院建筑存在南向窗墙比较小、围护结构保温性能差、院落空间对冬季来风阻挡作用不充分等问题,是其存在热工缺陷的根本原因,为优化设计提供了精准的靶向定位和科学的数据支撑。

4 BIPV 整合下的参数化多目标优化模型构建

4.1 参数化设计变量体系定义

研究基于形制、围护结构和 BIPV 系统的不同层次建立参数化设计变量集合:形制层设计变量包括院落比、建筑进深以及坡顶/平顶/组合式等屋顶形式来体现空间原型与气候应答差异;围护结构层设计变量指窗墙比、墙体构造层次、保温层厚度等影响建筑围护结构热工性能的中观构造参数^[5];BIPV 系统层设计变量涉及光伏组件类型、倾斜角度、光伏板覆盖面积及一体化方式(即屋面一体化/立面一体化)等影响 BIPV 系统选用及 BIPV 系统应用效果的基本参数。最后形成包含不同维度层次上的可量化的控制变量集合。

4.2 多目标优化模型建立

研究以最小化建筑综合能耗、最小化基于 PMV-PPD 指标的热不舒适时长、最大化光伏年发电量为目标函数,同时设定形制控制规则(如檐口高度、院落最小尺度)、构造可行性及初步经济性边界作为约束条件,并在 Grasshopper 平台中集成 Honeybee/Ladybug 工具与 EnergyPlus 模拟引擎,构建起一个能够同步处理多性能目标、兼顾设计规范与落地限制的耦合仿真与优化模型。

4.3 NSGA-II 算法实现与优化流程

运用 NSGA-II 遗传算法,通过对种群大小、迭代次数和交叉概率、变异概率等关键参数的合理设置,运用 Grasshopper 环境构建了可以完成“模拟-评估-进化”的自动化优化 workflow:以算法驱动设计变量的生成并调用 EnergyPlus 执行性能仿真,基于目标函数和约束条件开展方案的评价与排序,以选择、交叉、变异的方式对种群进行迭代更新直至种群收敛,从而能实现搜索同时满足能耗最小、舒适性最高及产能最大的帕累托最优解集的目的。

5 优化结果分析与设计策略生成

5.1 帕累托前沿解集及其特征分析

优化后的解集基于建筑能耗、热舒适时长以及光伏发电量这三个维度,在三维目标空间下的帕累托前

沿解集中能够直接体现各个性能目标之间具有较大程度上的冲突权衡关系；从解集中设计变量的变化规律发现，在多数解当中随着南向窗墙比值的增加，并根据实际情况采用了适当地保温措施可使采光及冬季得热均有所提高；但如何优化光伏倾角与屋顶形式则易导致发电效率和夏季遮阳矛盾问题较为突出，因此本文提出了一种对性能量化效果更为明显的“形制-性能”关联度规律认识准则。

5.2 典型优化方案聚类与性能对比

可以从帕累托解集中直接获得“均衡型”“极限节能型”和“产能优先型”等有倾向性的方案簇；而且量化对比可以证明：相对于基准模型而言，所有优化方案均有较大提升幅度；均衡型方案在形制上保持了传统特色的基础上，较之基准方案可以降低约60%的能耗以及20%以上的时间内的室内的热舒适；针对某一项指标进行单独优化得到的方案，在一定程度上均存在一定的局限性。通过针对某个具体问题开展联动式优化能够得到全局最优的解，多目标优化有效方法。

5.3 从优化解到设计策略的转译

针对优化解集转译得到的三层次可实施设计策略，在形制协同层面上确定适宜的BIPV最佳屋顶坡度范围（约25°~35°）、合理院落空间形式以便于采光和通风；在BIPV一体化构造层面上研制光伏瓦与传统屋面干法集成节点和通风式光伏幕墙系统，实现发电、防水和散热的统一；在性能提升整合层面上通过基于变量敏感度提出围护结构保温加强措施（比如外墙保温加厚至100mm）及引导季风穿堂风的自然通风优化设计等内容。

参考文献：

[1] 汪洋. BIPV 光伏技术在公共建筑围护体系中的应用[J]. 太阳能学报, 2024, 45(11): 758.

[2] 林斯媛. 中国民居合院建造文化系统及其类型图谱分析[D]. 东南大学, 2022.

[3] 钱廷洋, 唐华, 吕延平, 等. 建筑外墙节能改造热工性能分析[J]. 四川建材, 2026, 52(01): 11-13.

[4] 银朵朵, 王艳慧. 温带大陆性半干旱季风气候区植被覆盖度时空变化及其地形分异研究[J]. 生态学报, 2021, 41(03): 1158-1167.

[5] 崔雪. 严寒地区办公建筑正交胶合木外围护结构节能及构造设计研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2019.

6 结论与展望

6.1 主要研究结论

基于BIPV的形制与性能协同优化设计方法，首先建立了参数化变量体系，之后提出了针对此BIPV形制的多目标优化模型，而后运用NSGA-II算法进行寻优，并转换成设计策略；最后获得了一系列优越的量化性能指标更高的、兼顾地域特征的帕累托优化结果和相应的构造方式。该方法克服了当前华北乡村住宅更新中绿色技术与形制相悖、多性能目标无法协调等难题，为乡村低碳建设提供了一条科学易行、可落地的系统化路径。

6.2 创新点

本文创新包括三个方面：理论方面，打破了以往单目标优化方法的限制，提出了基于“形制传承”与“热工性能”双目标协同优化的思想；方法上，将参数化设计、BIPV系统集成和多目标优化算法有机结合，形成一个由模型创建-模拟寻优-结果输出组成的闭合路径；应用方面，产生一套可以量化的，可以直接转化成具体的建造和空间的设计方案集，达到科研成果向乡村建设的连接。

6.3 不足与未来展望

本研究主要缺点还是在于还没有将模型进行更加细化的构造节点变量、全生命周期环境影响因素考虑进去，成果也相对比较专业的，后续可以做更深入的构造和材料层面上的协同优化，加入LCA分析，并研发面向基层设计人员及农民朋友的交互式辅助决策工具，并且推动试点项目的实际建造，以及长周期内的实际运行，最终达到“设计-模拟-建造-反馈”这种完整的一个闭环流程，持续提升这项技术的落地性和适用性。