

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2026.02.010

<https://xuebao.xaut.edu.cn>

引文格式:张嘉辉,韩玮霄,马召熙,杜强,朱轶韵.基于多目标优化法的关中民居外窗设计参数研究[J].西安理工大学学报,2026,42(2):252-262.

Zhang Jiahui, Han Weixiao, Ma Zhaoxi, Du Qiang, Zhu Yiyun. Study on design parameters of exterior windows in Guanzhong rural residences based by multi-objective optimization method[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2026, 42(2): 252-262.

基于多目标优化法的关中民居外窗设计参数研究

张嘉辉, 韩玮霄, 马召熙, 杜强, 朱轶韵

(西安理工大学 土木建筑工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 针对陕西关中农村民居室内环境品质差与能耗高的问题,本研究采用 NSGA-II 遗传算法耦合多平台模拟方法,构建建筑围护结构薄弱环节的外窗系统优化模型,分析外窗设计参数对光热环境、能耗的作用机理,以实现居住光热舒适度提升与能耗降低的多重目标。获得的最优参数组合:传热系数 $2 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 、南北向窗墙比 0.46 和 0.28、窗台高 1.1 m、窗高宽比 0.6、遮阳挑出系数 0.39、太阳得热系数 0.4、可见光透射比 0.6。实验表明,该方案可使自适应空间采光比提升 41.41%,热舒适比例增加 3.47%,单位面积建筑能耗降低 3.34%,并建立了参数设计推荐区间,为关中地区宜居农宅建设提供优化路径。

关键词: 关中地区; 民居外窗; 多目标优化; 遗传算法

中图分类号: TU201.5

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2026)02-0252-11

Study on design parameters of exterior windows in Guanzhong rural residences based by multi-objective optimization method

Zhang Jiahui, Han Weixiao, Ma Zhaoxi, Du Qiang, Zhu Yiyun

(Faculty of Civil Engineering and Architecture, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: To address the issues of poor indoor environmental quality and high energy consumption in rural residences in Guanzhong region, Shaanxi Province, this study employs the NSGA-II genetic algorithm coupled with multi-platform simulation methods to achieve the dual objectives for enhancing photothermal comfort and reducing energy consumption. An optimization model for the external window system, focusing on weak points of building envelopes, is developed to analyze the mechanism for window design parameters on light-thermal environments and energy performance. The optimal parameter combination obtained includes: heat transfer coefficient of $2 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, north and south window-to-wall ratios of 0.46 and 0.28, windowsill height of 1.1 m, window height-to-width ratio of 0.6, shading projection coefficient of 0.39, solar heat gain coefficient of 0.4, and visible light transmittance of 0.6. Experimental results demonstrate that this solution improves the adaptive spatial daylight ratio by 41.41%, increase thermal comfort proportion by 3.47%, and reduce building energy consumption per unit area by 3.34%. Recommended parameter design intervals are established, providing optimization pathways for constructing livable rural dwellings in the Guanzhong region.

收稿日期: 2024-10-21; 网络首发日期: 2025-03-17

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1294.N.20250314.1720.006>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52078419); 陕西省科技厅重点研发计划项目(2023-YBSF-189); 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2024JC-YBQN-0496)

第一作者: 张嘉辉,男,硕士生,研究方向为建筑节能。E-mail: 1422978020@qq.com

通信作者: 朱轶韵,女,博士,教授,博导,研究方向为绿色生态建筑。E-mail: zyyun@xaut.edu.cn

Key words: Guanzhong region; exterior windows of dwellings; multi-objective optimization; genetic algorithm

为实现人居环境低碳、环保、健康、舒适的可持续发展,必须发展绿色建筑^[1]。《中国建筑节能年度发展研究报告 2024》的数据显示,2022 年我国农村地区居住建筑的煤炭、电、天然气等商品能耗总量达到 2.01 亿 tce,占建筑能耗总量的 18%,其中用电量 3 481 亿 kW·h。随着农村电力逐步普及、农民收入水平逐步提升以及农村家庭家电数量增多和使用频率上升,农村户均电耗呈现出快速增长的态势。

关中地区位于陕西省中部,冬季寒冷干燥,夏季炎热,年均气温 12℃~16℃,冬季最冷月气温在 -3℃~-1℃,夏季最热月气温在 23℃~26℃,且太阳能资源丰富。关中地区的传统乡村民居承载着丰富的生态经验^[2],其“三合头”格局由正房与两侧厦房共同构成,墙体采用外层青砖、内层土坯的结构,具有良好的保温隔热效果,而“南大北小”的窗墙比设计,则通过“冬纳阳光、夏蔽辐射”的原理实现了被动式气候调节。但乡村民居在发展过程中并不尽如人意,许多民居建筑更多地模仿了城市建筑的形式,其平面及空间布局简单,建筑形式单调,围护结构设计也较为粗放,特别在外窗设计上,多追求美观而缺乏精细化考量,忽视了尺寸与型材选择的科学性,且无标准规范可依,从而导致室内光热舒适状况不够理想。

随着经济的持续增长和生活水平的显著提升,人们对室内舒适度的要求不断提高,民居的室内光热环境也亟待改善。作为建筑围护结构中能量交换最活跃的组件,窗户能直接影响室内采光、得热,故其物理构造及性能也需要得到相应提升。随着被动式技术研究的不断深入,通过合理利用关中地区丰富的太阳能资源,可有效改善乡村建筑室内的光热环境^[3]。因此,对外窗进行合理设计显得尤为重要。

近年来,学者们针对农村地区建筑外窗设计参数与室内环境质量的关联开展了系统性研究。Yao 等^[4]对中国寒冷地区农村住宅的光热环境进行了分析,通过合理设置透明围护结构参数显著提升了这些住宅的采光和热舒适性能。王楠玉^[5]通过模拟关中地区典型农宅,在单一因素分析中发现外窗的传热系数对农宅负荷的影响最为显著。虞志淳等^[6]对关中地区乡村住宅的夏季室内热舒适状况与能源消耗进行了详尽的测试与分析,发现合理调整窗户的开启位置和大小可有效降低室内温度并减少能耗。邵腾等^[7]基于优化算法研究了严寒地区农村住宅透明围护结构的形状、尺寸和结构。朱轶韵等^[8]则结

合现场数据测试,利用 DesignBuilder 软件模拟了窗墙比对关中民居建筑冷热负荷的影响,并给出了适宜的综合节能策略。

尽管现有研究已取得显著成果,但仍存在以下不足:①已有研究大多采用单因素分析方法,未能揭示外窗几何参数与构件性能参数(如热工性能参数)的交互作用机制;②针对关中地区的研究多局限于单一季节,缺乏全年动态性能评估体系。

本文针对陕西关中地区的民居外窗,建立典型民居仿真模型,通过构建多参数耦合分析框架,将窗墙比、窗台高等 7 项设计参数统一纳入优化体系,并基于非支配排序遗传算法(NSGA-II),实现室内光热舒适度、节能性的协同优化,从而筛选出关中民居最优外窗设计参数。研究结果可为推动关中地区民居建筑的科学设计提供参考。

1 研究方法

1.1 多目标优化方法

多目标优化^[9]是指在优化问题中同时考虑两个及以上目标,并在各目标间寻求均衡解的过程。帕累托前沿是多目标优化中的核心概念,指在多个相互冲突的目标条件下,无法进一步优化某一目标而不损害其他目标的最优解集合,也被称为非支配解集。为了寻求位于帕累托前沿的一个或多个接近最优的解,需要通过多目标优化算法执行一系列迭代计算。多目标优化问题通常描述为:

$$\min y = F(x) = [f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)] \quad (1)$$

式中: y 为目标函数; n 为优化目标数; $f_n(x)$ 为第 n 个子目标函数。

非支配排序遗传算法(NSGA-II)在多目标优化问题的求解中得到了广泛应用^[10],它通过降低非劣排序遗传算法的复杂性,已成为评估其他多目标优化算法性能优劣的基准。它借助非支配排序、拥挤距离和遗传操作等算法优势,实现帕累托前沿的搜索,可显著提高计算效率和收敛率。NSGA-II 算法的过程如下:

步骤一:创建大小为 N 的随机父种群 A_0 , 设代数 $t=0$;

步骤二:根据性能模拟结果,对 A_0 应用交叉和变异,生成大小为 N 的子种群 B_0 ;

步骤三:如果满足终止条件,则终止算法并返回 A_t ;

步骤四:将父种群 A_t 和子种群 B_t 合并,形成新

种群为 C_i ;

步骤五:使用快速非支配排序算法识别 C_i 中非支配的前沿 $X_1, X_2, X_3, \dots, X_k$;

步骤六:对于每个非支配前沿 $X_i (i = 1, \dots, k)$, 计算 X_i 内的拥挤距离, 并创建 A_{t+1} : 如果 $|A_{t+1}| + |A_i| \leq N$, 则设置 $A_{t+1} = A_{t+1} \cup X_i$, 如果 $|A_{t+1}| + |A_i| > N$, 则将从 X_i 到 A_{t+1} 的最小种群 $N - |A_{t+1}|$ 相加;

步骤七:考虑到计算的拥挤指标, 从 A_{t+1} 中选择潜在的父代, 并将交叉和突变应用于 A_{t+1} , 创建大小为 N 的子种群 B_{t+1} ;

步骤八:将生成计数器增加到 $t = t + 1$, 然后跳转至步骤三。

1.2 多目标优化设计流程

关中民居建筑外窗的性能优化流程如图 1。

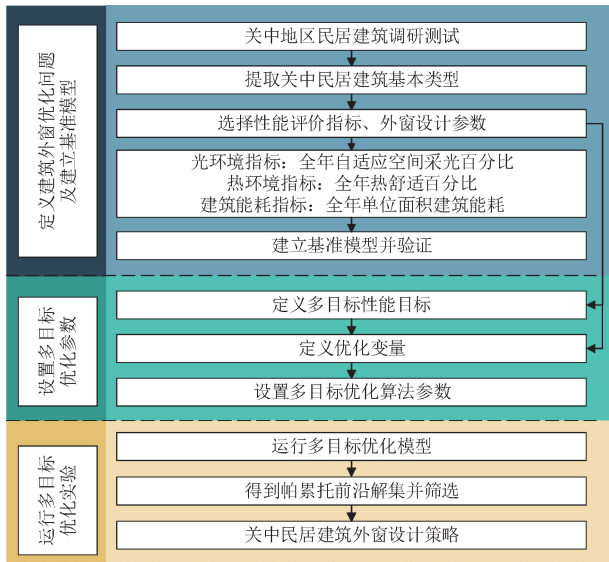


图 1 多目标优化设计流程

Fig. 1 Multi-objective optimization design process

1) 了解关中民居建筑现状, 提取关中民居建筑类型特征, 建立不同功能分区的建筑模型, 再对其构造参数、采光参数和运行参数进行赋值。通过 EnergyPlus 和 Radiance 计算得到初始模型的热舒适、光舒适和能耗数据, 即可得到基准信息模型。

2) 利用 NSGA-II 算法进行多目标优化实验, 以外窗尺寸参数和构造性能参数作为设计变量, 优化目标为最大化热舒适比例与自适应空间采光比, 同时最小化单位建筑面积的能耗。由此获得了一系列位于帕累托前沿的最优解集, 这些解集代表了多目标优化的最优结果。

3) 根据目标函数寻找本研究所需的最优解, 利用逼近理想解排序法 (technique for order preference by similarity to an ideal solution, TOPSIS) 分

析帕累托前沿中各解与理想解的距离并评估其优劣, 从而获得关中民居外窗性能的解决方案。根据实验结果, 分析建筑外窗参数与光热环境等优化目标之间的关系, 探讨适合关中地区民居建筑的外窗尺寸和性能参数。

1.3 多目标决策方法

在多目标优化算法生成的帕累托解集中, 所有候选解均为非支配解 (即不存在其他解在所有目标上均优于该解)。由于这些解之间无法直接比较优劣, 单一解无法在全部目标上占据绝对优势, 需通过权衡不同目标间的关系确定最终方案。

TOPSIS 作为一种多目标决策方法, 通过评估各方案与理想解的接近程度进行排序。首先对帕累托解集进行标准化处理, 消除量纲差异; 随后基于标准化后的决策矩阵, 结合反映居民偏好的权重 ω_1 、 ω_2 、 ω_3 , 构建加权标准化矩阵, 其中权重分布取决于民居调研中对各优化目标的侧重程度; 再分别计算各解与正理想解 (各目标最优值) 及负理想解 (各目标最劣值) 的加权欧几里得距离 d_i^+ 、 d_i^- ; 最后通过式 (5) 计算接近度, 其最大值即为综合最优解。

$$y_{m,n}^* = y_{m,n} / \sqrt{\sum_{n=1}^N y_{m,n}^2} \quad (2)$$

$$d_i^+ = \sqrt{\sum_{z=i,j,k} \omega_z [\min(y_{z,n}^*) - y_{z,n}^*]^2} \quad (3)$$

$$d_i^- = \sqrt{\sum_{z=i,j,k} \omega_z [\max(y_{z,n}^*) - y_{z,n}^*]^2} \quad (4)$$

$$r_i^* = d_i^+ / (d_i^+ + d_i^-) \quad (5)$$

式中: $y_{m,n}^*$ 为多目标优化解的标准化结果; $y_{m,n}$ 为多目标优化解; $y_{z,n}^*$ 为优化解在三维空间中的坐标点; d_i^+ 、 d_i^- 分别为优化解与最优解、最劣解之间的距离; ω_z 为优化目标权重; r_i^* 为接近度; i, j, k 分别代表 3 个不同的目标函数; m 为种群代数某个解; n 为某一代。

2 外窗性能优化分析

2.1 实地调研

课题组深入咸阳、铜川等地, 对 497 户新建民居建筑进行了调研, 系统收集了建筑布局、形态特征、围护结构构造等关键信息, 并提炼出该地区的典型建筑特征。

关中村庄多呈聚落形式布局, 新建民居普遍朝南布置 (西南至东南方向的偏转角在 30° 以内), 与东、西、南三面围墙合围成庭院, 兼具采光与私密性。卧室和客厅多朝南布置, 卫生间、厨房等次要功能房间则位于北侧。调研对象的建筑面积多在 $200 \sim 250 \text{ m}^2$, 建筑层数以二层为主 (占比 65.64%), 故选取二层民居作为研究对象。

调研结果显示,当地民居以砖混结构为主,墙体多为 240 mm 厚的砖墙,无保温层,内墙采用大白粉刷,外墙贴小尺寸瓷砖。屋顶及楼板为现浇混凝土结构,屋面构造包括 EPS 材料保温层和沥青卷材防水层。由于建筑的东西两侧常为围墙或邻宅,外窗多集中于南北立面。南向窗户遮阳覆盖率较低,多依赖室内遮挡措施,部分遮阳设施采用经验性设计,缺乏科学依据。此外,课题组还详细统计了窗墙比、窗台高度、窗宽、窗高以及窗户材质等一系列指标,发现外窗材质以普通玻璃为主,节能性能普遍较差。

在能源利用方面,除少数村庄使用天然气外,大部分村庄在冬季主要依赖煤炭进行取暖。关中地区在热工设计气候分区上被划分为寒冷地区,其冬季采暖期从 11 月持续至次年 3 月。而烹饪和夏季制冷则主

要依赖电力供应,特别是在夏季 12:00—14:00 和 18:00—22:00 这两个时段,电力需求尤为旺盛。

2.2 建立基准信息模型

2.2.1 参数设置

基于 Rhino 与 Grasshopper 软件平台开展仿真模拟。首先,将具有不同使用功能的房间划分为五个独立的建筑区域,包括客厅、卧室(主要功能房间),厨房、卫生间和杂物间(次要功能房间)。在明确基本建筑形态之后,设定围护结构的构造参数,考虑到当地民居建筑外窗热工性能较差,减小外墙、屋顶对室内热环境的影响,参照《农村居住建筑节能设计标准》(GB/T 50824—2013)设置围护结构热工参数,如表 1 所示。

表 1 围护结构参数
Tab.1 Parameters of envelope structure

结构部位	构造形式 (自外向内)	热阻/ ($(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \cdot \text{W}^{-1}$)	传热系数/ ($\text{W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$)
外墙	贴面瓷砖+20 mm 水泥砂浆+240 mm 实心砖+70mm EPS 保温板+10 mm 水泥砂浆	1.61	0.62
内墙	涂料+10 mm 水泥砂浆+240 mm 实心砖+10 mm 水泥砂浆+涂料	0.49	2.04
屋顶	20 mm 水泥砂浆+防水层+10 mm 水泥砂浆+60 mm XPS 保温板+120 mm 钢筋混凝土屋面板	2.04	0.49
外窗	6 mm 单层铝合金框玻璃	0.21	4.70

依据《建筑采光设计标准》(GB 50033—2013)^[11]对围护结构光环境相关系数(如反射比等)进行设置。在完成建筑物理参数设定后,进一步依据《建筑节能与可再生能源利用通用规范》(GB 55015—2021)^[12]中关于居住建筑人员逐时在室率以及照明使用时间的标准设置时间表,将居住建筑的人员密度设定为 0.04 人/ m^2 ,照明功率密度设定为 5 W/m^2 。采用空调作为民居建筑能耗模拟的采暖制冷源。由于农民与城市居民生活习惯不同,经常穿衣进出室内外,因此他们的热舒适认同温度也不同。相关研究建议^[13],西北乡村民居室内采暖控制温度为 16 $^{\circ}\text{C}$,制冷控制温度为 26 $^{\circ}\text{C}$ 。这一建议与调研结果相一致,因此采用此温度作为模拟控制温度。采暖时段按照该地区的集中供暖时间设定,即 11 月 15 日至次年 3 月 15 日,在此时段内,因农民进出室外的时间不固定,需全天运行空调以维持恒温。制冷时段为 6 月 1 日至 8 月 31 日,此时农民处于农忙时期,作息相对规律,因此空调设备的运

行时间主要集中在 12:00—14:00 和 18:00—22:00。至此,基准信息模型构建完成(图 2 和图 3),这为后续的光热环境分析及建筑能耗模拟奠定了基础。

基于建立的基准信息模型,运用 EnergyPlus 引擎来精确计算建筑的能耗水平及热舒适度,借助 Radiance 引擎对光舒适度进行评估。随后,将这三项关键结果作为多目标优化的优化指标,输入以 NSGA-II 算法为驱动核心的 Wallacei 多目标优化软件中。

2.2.2 模型验证

为验证模型的可靠性,选取建筑的南向卧室进行模拟,将空气温度和室内照度的测试数据与模拟数据进行对比。在房间中心、距离地板 1 m 的高度处进行温度测量,测试时间为 2024 年 8 月 2 日 6:00 至 18:00,每隔一小时记录一次数据。测试期间,空调系统均保持关闭状态,外窗则维持半开状态。温度模拟结果如图 4 所示。

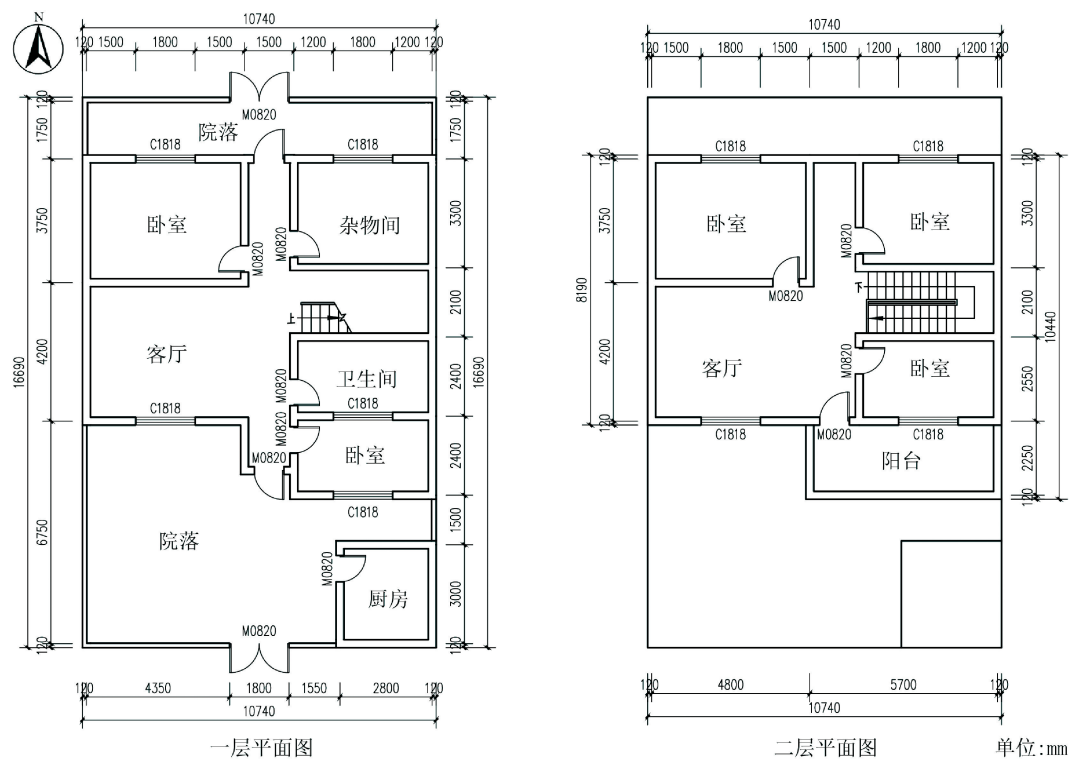


图 2 基准建筑平面图
Fig. 2 Reference building plan

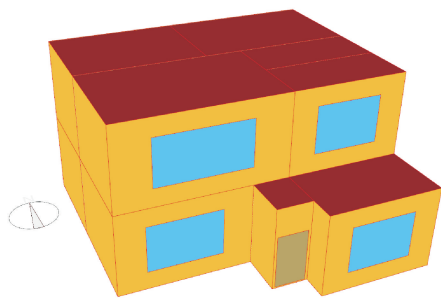


图 3 基准建筑三维模型图
Fig. 3 Reference building 3D model drawing

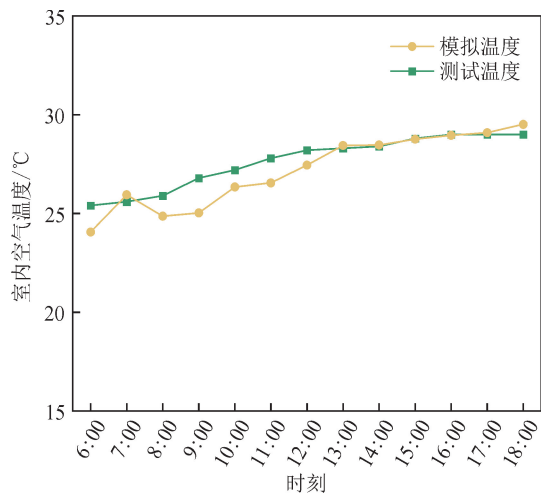


图 4 模拟温度和实测温度对比
Fig. 4 Comparison between simulated temperature and measured temperature

由图 4 可知,模拟温度与测试温度在变化趋势上保持一致,且模拟温度较测试温度略微偏低,均方根误差为 3.06 %,处于合理范围内。

室内照度验证则以基准建筑一层东南向卧室为测试对象,在距离地面 0.75 m 的水平面上进行测试,测试时间为 10:00—18:00,每间隔一小时测试一次,测点分布及上午 10:00 的房间模拟结果如图 5 所示。

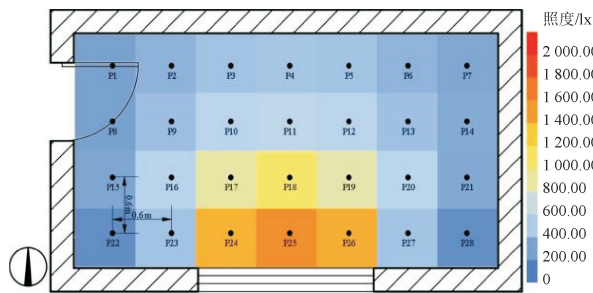


图 5 模拟照度分布图
Fig. 5 Simulated illuminance distribution map

依据模拟结果,测点 25、18、11、4 的模拟照度分别为 1 289.42 lx、785.84 lx、451.48 lx、346.29 lx,与实际照度 1 234.15 lx、759.68 lx、441.95 lx、333.03 lx 的误差分别为 4.48 %、3.44 %、2.16 %、3.98 %,均在 5 % 以内;同时实际测试平均照度为 461.02 lx,与基准模型平均照度 477.65 lx 的误差也不超过 5 %。此外,其余时间点的测试值与模拟值的计算误差均

在5%以内,这确保了模型的可靠性与准确性。

2.3 多目标优化实验设计

2.3.1 构建目标函数

热舒适度^[14]是表征个体对热环境满意程度的主观评价指标,对其进行评估需综合考量环境参数(含空气温度、相对湿度、空气流速、平均辐射温度)与人体变量(包括活动量、新陈代谢率、衣着状态等)。根据《民用建筑室内热湿环境评价标准》(GB/T 50785—2012),本研究采用全年热舒适百分比作为核心指标来评估热舒适度,即各主要功能房间处于人体热舒适状态的平均时长占全年总时长的比例。

1) 采暖制冷工况采用预计平均热感觉指标(P_{MV})来表征, P_{MV} 通过能量平衡方程来量化人体热负荷,其表达式为:

$$P_{MV} = f(t_a, R_H, v, t_r, M, I_{cl}) \quad (6)$$

式中: t_a 为空气温度,℃; R_H 为相对湿度,%; v 为空气流速,m/s; t_r 为平均辐射温度,℃; M 为人体代谢率,MET; I_{cl} 为服装隔热值,clo。

2) 自然通风工况采用预计适应性平均热感觉指标(A_{PMV})来表征,其表达式为:

$$A_{PMV} = P_{MV} / (1 + \lambda \cdot P_{MV}) \quad (7)$$

式中: λ 为自适应系数,根据《民用建筑室内热湿环境评价标准》5.2.2计算。

上述两个指标的取值范围均为 $[-3, 3]$,对应极冷至极热7级标度,其中 $[-1, 1]$ 区间被定义为舒适区。通过统计各房间全年逐时 P_{MV} 、 A_{PMV} 均值在舒适区的持续时间占比,得出热舒适百分比:

$$H_{TCP} = \frac{H_{com}}{n} \times 100\% \quad (8)$$

式中: H_{TCP} 为全年热舒适百分比; H_{com} 为 P_{MV} 、 A_{PMV} 处于 $[-1, 1]$ 的小时数; n 为全年总小时数8760。

光环境是自然光与人工光源交织融合的产物,光舒适则描述了个体在特定光环境中的视觉舒适程度^[15]。自适应空间采光比(spatial daylight autonomy, sDA)是光环境的核心评价指标,它通过光迹追踪技术(如Radiance)模拟建筑全年8760小时的天然采光分布,并统计达标区域面积比例^[16]。根据《绿色建筑评价标准》(GB/T 50378—2019),主要功能空间中sDA不低于60%的面积区域在全年50%以上时间(不少于4380小时)内天然采光照度不低于300 lx。本研究首先采用Radiance进行光迹追踪模拟,网格划分密度 $0.6 \text{ m} \times 0.6 \text{ m}$;然后采用国

际照明委员会(CIE)标准天气模型,逐时计算各网格点的照度分布;若单个网格点全年照度不低于300 lx且满足照度要求的有效时段占比不低于50%,则判定为达标区域。由于多目标优化中的指标为单一值,取各房间结算结果的均值作为优化目标值,单个房间自适应空间采光比的目标函数为:

$$A_{sDA} = \frac{A_d}{A_t} \times 100\% \quad (9)$$

式中: A_d 为达标区域面积, m^2 ; A_t 为空间总面积, m^2 。

本文主要关注光热环境综合影响下的室内人体舒适度,而光热条件又与采暖制冷能耗和采光情况息息相关,因此,本文拟从建筑能耗的角度展开分析。为简化计算,统一采用空调系统来实现室内的采暖与制冷。在追求室内光舒适度的过程中,除了有效利用自然光进行采光外,还配备了人工照明系统作为补充。根据《建筑采光设计标准》(GB 50033—2013),居住建筑主要功能房间的采光照度需达到最低标准(不低于300 lx)。一旦室内的采光照度降至300 lx以下,人工照明系统便会自动启动。因此,合理的建筑能耗是保障人体舒适度的重要前提,故本研究以建筑能耗为优化目标,旨在降低由空调系统采暖制冷及照明系统引起的单位面积建筑总耗电量,具体的优化目标为:

$$E = E_h + E_c + E_l \quad (10)$$

式中: E 为单位面积建筑能耗, $\text{kW} \cdot \text{h}/\text{m}^2$; E_h 为建筑采暖能耗, $\text{kW} \cdot \text{h}/\text{m}^2$; E_c 为建筑制冷能耗, $\text{kW} \cdot \text{h}/\text{m}^2$; E_l 为室内照明能耗, $\text{kW} \cdot \text{h}/\text{m}^2$ 。

2.3.2 设计参数作用机理

外窗设计参数通过其热力学、光学特性与能量传递的耦合作用,系统性地塑造建筑室内热环境。

在热舒适层面,窗墙比与传热系数构成热环境调控的双重维度:南向窗墙比的增加可显著提升冬季太阳辐射得热,但需配合遮阳构件控制夏季过热风险;传热系数直接决定了围护结构的热传导强度,其降低可有效抑制室内外温差驱动的热损失,改善热稳定性。遮阳挑出长度通过几何投影效应削减直射辐射强度,与太阳得热系数形成协同控制机制,前者调节辐射入射的空间分布,后者决定透射能量的光谱选择性。

光环境品质则受控于多重参数的交互作用。窗墙比主导采光总量,窗高宽比调节光线渗透深度与均匀度,竖长方形窗型在相同窗面积下可提升纵深区域照度均匀性达20%~25%;窗台高度的抬升可

优化近窗区眩光问题,但需平衡工作面照度衰减效应;可见光透射比作为光学材料属性,线性影响有效采光光通量,其提升可延长自然采光有效时段 1.5~2 小时^[17]。

建筑能耗呈现动态平衡特征。北向窗墙比与传热系数主导冬季采暖负荷,其每降低 0.1 单位,北向窗墙比可减少热损失 7%~9%;夏季空调能耗则受遮阳效率与太阳得热系数联合控制,两者每优化 0.1 单位,分别对应冷负荷下降 5.8%与 8.2%^[18]。此外,参数间的时空耦合效应尤为显著,南向窗墙比需匹配动态遮阳与低太阳得热系数,以实现全年能耗波动幅度最小化,而高可见光透射比须结合遮阳调节以避免光热矛盾。

2.3.3 设计参数变量设置

关中地区的民居建筑主要为南北朝向,空间布局为多栋建筑联排式分布,这使得建筑在东西向外墙无法设置窗洞口,考虑到居住建筑主要功能房间的窗地面积比不应小于 1/7,换算得出本文基准建筑模型的最小窗墙比为 0.15。此外,考虑到寒冷地区民居建筑南北向窗墙比的最大值分别为 0.5 和 0.3^[19],取南北向窗墙比作为设计参数,其取值范围分别为 0.15~0.50、0.15~0.30。

基于调研数据,南向外窗高宽比平均值为 1.25

(范围 0.6~1.9),北向外窗高宽比平均值为 1.35 (范围 0.7~2.0)。经 *t* 检验,南北向外窗高宽比的差异未达到 0.05 的显著性水平,表明该地区民居在窗型比例上具有统一性。因此,将外窗高宽比的取值范围统一设定为 0.5~2.0,此范围可覆盖调研样本中 98%的南北向窗型比例。窗台高度的变化区间则设定为 0.8~1.2 m。

关中地区部分民居的建筑外窗在南向设置了水平遮阳措施,但不考虑窗户尺寸而单纯分析遮阳长度不足以体现遮阳效果,故本研究采用遮阳挑出系数,即遮阳构件水平挑出长度与窗户高度的比值^[20],来分析水平遮阳构件对窗户的遮挡能力。基于实测数据,当地建筑的水平遮阳长度在 0~1.0 m,窗高在 1.5~2.0 m,据此,将遮阳挑出系数设定为 0~0.67。

外窗构件的性能参数在成品外窗的参数体系中通常呈现为固定组合,这导致各类产品的参数存在较大差异,难以统一。本文依据《民用建筑热工设计规范》(GB 50176—2016)^[21]中提供的典型玻璃与不同窗框组合的传热系数,以及典型玻璃的光学和热工性能参数,同时结合对当地民居外窗类型的深入分析以及对当地建材市场的全面调研,统计整理得到一份包含常用窗框、玻璃类型及其物理参数的数据集,如表 2 所示。

表 2 不同类型的窗户及其参数
Tab.2 Different types of windows and their parameters

序号	窗框类型	玻璃类型	规格/mm	传热系数/ (W·(m ² ·K) ⁻¹)	太阳得热系数	可见光透射比
1	木材	单层玻璃	6	5.8	0.8	0.85
2		单层玻璃	6	5.0	0.78	0.85
3		Low-E 镀膜单层玻璃	6	4.5	0.55	0.75
4	塑钢	中空玻璃	6+12+6	2.9	0.45	0.75
5		热反射中空玻璃	6+12+6	2.6	0.45	0.68
6		Low-E 镀膜中空玻璃	6+12+6	2.5	0.4	0.7
7	铝合金	单层玻璃	6	4.7	0.8	0.85
8		中空玻璃	6+12+6	2.8	0.5	0.75
9		热反射中空玻璃	6+12+6	2.7	0.42	0.65
10		Low-E 镀膜中空玻璃	6+12+6	2.3	0.4	0.7

根据上述内容对外窗设计参数进行筛选,选定南北向窗墙比、窗台高、窗高宽比、遮阳挑出系数、外窗传热系数、太阳得热系数和可见光透射比 8 个参

数作为本次模拟的设计参数,其取值范围及步长如表 3 所示。

表3 设计参数取值范围
Tab.3 Design parameter value range

设计参数	取值范围	单位	步长
北向窗墙比	0.15~0.30	—	0.01
南向窗墙比	0.15~0.50	—	0.01
窗高宽比	0.5~2.0	—	0.1
窗台高	0.8~1.2	m	0.1
遮阳挑出系数	0~0.67	—	0.01
传热系数	2.0~6.0	$W \cdot (m^2 \cdot K)^{-1}$	0.1
太阳得热系数	0.4~0.8	—	0.1
可见光透射比	0.5~0.9	—	0.1

2.3.4 多目标优化参数设置

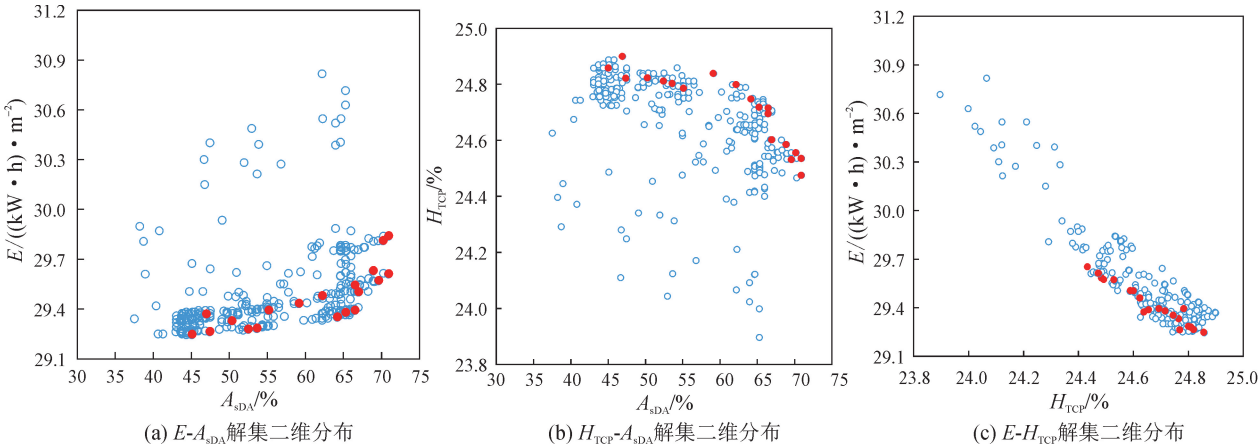
为有效拓宽解空间的搜索范围,合理设定遗传算法中的关键参数至关重要,此操作既可确保求解

过程能够覆盖足够多的潜在最优解,又能规避因参数设置不当可能引发的过早收敛问题,同时还能避免计算过于复杂。具体参数设置:种群规模为50,迭代次数为20,交叉概率为0.9,变异概率为0.01。此外,当最大迭代次数为1 000时(即50个种群历经20代,总共1 000次迭代),优化停止。

3 结果分析与讨论

3.1 多目标优化实验结果

经过1 000次模拟仿真,测试外窗的参数优化结果如图6所示,图中展示了 $E - A_{sDA}$ 、 $H_{TCP} - A_{sDA}$ 和 $E - H_{TCP}$ 三组外窗设计参数的最优解集。红点代表帕累托最优解,这些最优解共同构成了帕累托前沿,其中,位于图6(a)和图6(c)右下角以及图6(b)右上角的点代表了更优的解决方案。



注:蓝点代表多目标优化解,红点代表帕累托最优解。

图6 优化过程中的所有解

Fig.6 All solutions in the optimization process

从上述优化结果可以看出,随着自适应空间采光比增长,单位面积建筑能耗呈现上升趋势,说明在追求更佳的室内采光效果时,往往伴随着能耗的增加。自适应空间采光比和热舒适比例之间存在负相关关系,当自适应空间采光比增加时,热舒适比例呈减小趋势。热舒适比例随着单位面积建筑能耗的增加而减小,这表明室内热舒适水平的提高需要消耗更多的能量。

3.2 实验结果分析

在寻求最优解前,需确定各优化目标的权重系数,本研究通过问卷调查法对建筑使用者展开调研,共收回有效问卷462份。问卷采用李克特五级量表来量化居民对热舒适度、自然采光性能、能耗效率三

个目标的重视程度,其中5分代表“极其重要”,1分代表“毫不重要”。经统计,三个目标得分的算术平均值分别为3.75、2.89、3.00。通过归一化处理获得最终权重分配:热舒适度权重 $\omega_1=0.39$,自然采光权重 $\omega_2=0.30$,能耗权重 $\omega_3=0.31$ 。

图7展示了帕累托解集的空间分布和三个目标解的散点分布,建筑师能够根据具体的设计需求和目标在此图中挑选出最佳解决方案。通过TOPSIS法计算各解与正负理想解的加权欧几里得距离,确定当 $r_i^*=0.79$ 时,综合方案(采光比65.77%,热舒适24.73%,能耗29.36 kW·h/m²)实现最优权衡,具体信息如表4所示。

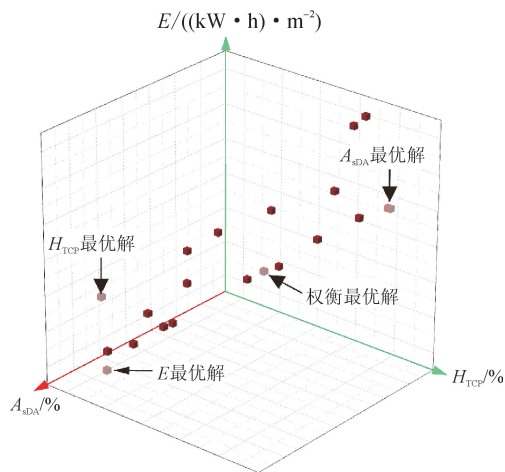


图 7 帕累托前沿解集空间分布
Fig. 7 Spatial distribution of Pareto front solutions

表 4 最佳设计方案的设计值和性能指标

Tab. 4 Design values and performance indicators of optimal design solutions

参数及目标	基准模型解	A_{sDA} 最优解	H_{TCP} 最优解	E 最优解	权衡最优解
北向窗墙比	0.2	0.29	0.15	0.15	0.28
南向窗墙比	0.2	0.49	0.5	0.5	0.46
窗高宽比	1.8	0.6	0.6	0.6	0.6
窗台高/ m	0.9	1.1	1.1	1.1	1.1
遮阳挑出系数	0	0	0.39	0.44	0.39
传热系数	5.8	2	2	2	2
太阳得热系数	0.8	0.4	0.6	0.4	0.4
可见光透射比	0.9	0.5	0.5	0.5	0.6
$A_{sDA} / \%$	46.51	70.91	46.94	44.35	65.77
$H_{TCP} / \%$	23.90	24.47	24.90	24.86	24.73
$E / ((kW \cdot h) \cdot m^{-2})$	30.38	29.61	29.36	29.24	29.36

最佳单位面积建筑能耗方案采用最小北向窗墙比(0.15)与最大遮阳挑出系数(0.44)的组合,通过减少 25% 的北向开窗和增强遮阳,使建筑能耗降至 29.24 kW·h/m²(降幅 3.74%)。但这也导致自适应空间采光比较基准模型下降 4.65%,印证了采光与能耗目标间的矛盾性。值得注意的是,南向窗墙比提升至 0.5 并配合低太阳得热系数(0.4),仍可使热舒适比例提升 4.01%。

最佳热舒适比例方案与能耗方案类似,采用最小北向窗墙比(0.15),但适度增加遮阳挑出系数(0.39),通过将太阳得热系数提高至 0.6,使热舒适比例达到 24.9%(增加 4.01%)。其采光性能(46.94%)接近基准模型,说明遮阳挑出系数在 0.39 时,遮阳措施对采光造成的负面影响被南向大窗墙比(0.5)部分抵消。

通过对比 4 种优化方案与基准模型,发现各方案的性能差异主要源于北向窗墙比和遮阳挑出系数的显著变化,而传热系数、太阳得热系数等其他设计参数在优化方案中保持相对一致。

最佳自适应空间采光比方案,相较于基准模型,通过增大北向(增加 45%)和南向(增加 145%)窗墙比,并配合高窗台(1.1m)和低窗高宽比(0.6),使自适应空间采光比提升 52.46%。虽然遮阳未启用(0),但较低的阳光得热系数(0.4)和可见光透射比(0.5)平衡了能耗表现,单位面积能耗仅降低 2.53%。数据表明,北向窗墙比每增加 0.1,自适应空间采光比提升约 14.2%。

综合权衡方案通过参数的中位值设置实现目标平衡,其北向窗墙比(0.28)较基准模型提升 40%,而较高的可见光透射比(0.6)弥补了遮阳带来的采光损失,使自适应空间采光比提升 41.41%;采用最低传热系数(2 W/(m²·K))和太阳得热系数(0.4),使能耗降低 3.34%。

3.3 外窗设计参数推荐值

图 8 展示了帕累托最优解中外窗设计变量的分布情况,其中横轴表示帕累托最优解中设计变量所处的精确范围,纵轴则代表各个变量的出现频率。

根据图 8 中设计变量的分布情况,总结出以下推荐值范围:在最优解集中,南向窗墙比的取值范围在 0.4~0.5 之间;遮阳挑出系数的取值位于 0.33~0.56 之间;北向窗墙比在不同优化目标下建议控制在 0.27~0.3 之间。窗高宽比和窗台高度建议分别

控制在 0.5~0.8 和 1.0~1.2 m 范围内。考虑到当地外窗类型和居民的经济条件,窗户的传热系数趋向于选择设计范围内的最小值 $2 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,以提升围护结构的热稳定性。而太阳得热系数和可见光透射比的取值范围分别为 0.4~0.7 和 0.5~0.7,这有利于在冬季吸收更多的太阳辐射热量。此外,本文的推荐值是基于多目标优化结果确定的,实际应用时需结合其他因素来确定。

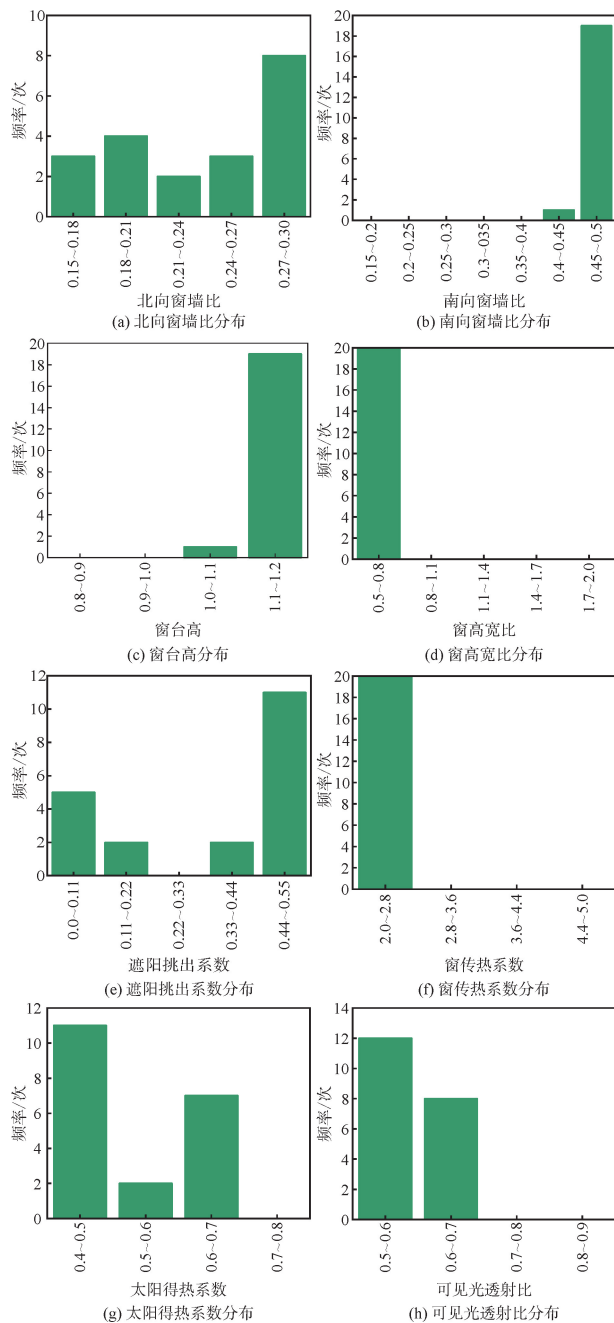


图 8 帕累托最优解中外窗设计变量的值分布

Fig. 8 Values distribution of window design variables in Pareto optimal solution

4 结 论

本文通过实地调研陕西关中地区农村民居的室内环境及其建筑外窗设计的实际情况,归纳出影响室内光环境、热环境及能耗的关键外窗性能设计参数及其合理的取值范围,并通过遗传算法对基准模型的外窗设计参数进行优化,从而得到兼顾光、热、舒适和节能性的优化策略。

1) 外窗的三个性能目标自适应空间采光比、热舒适比例、单位面积建筑能耗之间呈现出一定的相关关系,其中自适应空间采光比和单位面积建筑能耗呈正相关,自适应空间采光比和热舒适比例呈负相关,而热舒适比例和单位面积建筑能耗呈负相关。

2) 权衡最优解的设计参数取值:外窗传热系数为 $2 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,南北向窗墙比分别为 0.46 和 0.28,窗台高 1.1 m,窗高宽比 0.6,遮阳挑出系数 0.39,太阳得热系数 0.4,可见光透射比 0.6。与基准建筑模型相比,综合权衡方案的自适应空间采光比提升 41.41%,热舒适比例提升 3.47%,单位面积建筑能耗降低 3.34%。

3) 关中地区农村民居外窗设计参数的推荐值:北向窗墙比 0.27~0.3,南向窗墙比 0.4~0.5,外窗传热系数 $2 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,窗台高 1.1 m,遮阳挑出系数 0.33~0.56,太阳得热系数 0.4~0.7,可见光透射比 0.5~0.7。

参考文献:

- [1] 清华大学建筑节能研究中心. 中国建筑节能年度发展研究报告[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2024.
- [2] 张蕾,王思思,范小娜,等. 关中地区传统民居气候适应性研究[J]. 西安理工大学学报,2023,39(1): 118-124.
- [3] 刘大龙,韩雨菲. 极端天气对被动式太阳能建筑采暖效率的影响[J]. 太阳能学报,2024,45(2):42-49.
- [4] Yao Sheng, Jiang Zezhi, Yuan Jingyu, et al. Multi-objective optimization of transparent building envelope of rural residences in cold climate zone, China[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2022, 34: 102052.
- [5] 王楠玉. 关中地区农宅节能适应性研究[D]. 西安:长安大学,2021.

- Wang Nanyu. Building energy efficiency system of rural residential buildings in Guanzhong area, China[D]. Xi'an: Chang'an University, 2021.
- [6] 虞志淳, 孟艳红. 陕西关中地区农村民居夏季室内热环境与能耗测试分析[J]. 建筑节能, 2018, 46(1): 39-46.
- Yu Zhichun, Meng Yanhong. Test and analysis of indoor thermal environment and energy consumption in rural residential buildings of central Shaanxi plain in summer[J]. Building Energy Efficiency, 2018, 46(1): 39-46.
- [7] 邵腾, 金虹. 基于优化算法的严寒地区乡村住宅节能优化设计研究[J]. 建筑科学, 2019, 35(12): 99-107.
- Shao Teng, Jin Hong. Optimization design of energy saving for rural houses in severe cold regions based on an optimization algorithm[J]. Building Science, 2019, 35(12): 99-107.
- [8] 朱轶韵, 唐大波, 侯金池, 等. 多因子作用下关中乡村民居冬季室内热环境分析[J]. 建筑节能(中英文), 2022, 50(3): 36-42.
- Zhu Yiyun, Tang Dabo, Hou Jinchi, et al. Indoor thermal environment of rural dwellings affected by multi-factors in Guanzhong area in winter[J]. Building Energy Efficiency, 2022, 50(3): 36-42.
- [9] Wu Haoran, Zhang Tong. Multi-objective optimization of energy, visual, and thermal performance for building envelopes in China's hot summer and cold winter climate zone[J]. Journal of Building Engineering, 2022, 59: 105034.
- [10] Li Run, Luo Linxi, Li Xiaofeng, et al. Multi-objective optimization for generative morphological design using energy and comfort models with a practical design of new rural community in China[J]. Energy & Buildings, 2024, 313: 114282.
- [11] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 建筑采光设计标准: GB 50033—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 国家市场监督管理总局. 建筑节能与可再生能源利用通用规范: GB 55015—2021[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2022.
- [13] 朱轶韵, 陈习习, 马召熙, 等. 基于多因素正交实验的关中民居节能优化分析[J]. 西安理工大学学报, 2024, 40(2): 151-159.
- Zhu Yiyun, Chen Xixi, Ma Zhaoxi, et al. Energy saving optimization analysis for rural buildings in Guanzhong area based on multi-factor orthogonal experiment[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2024, 40(2): 151-159.
- [14] 杨柳, 杨茜, 闫海燕, 等. 陕西关中农村冬季住宅室内热舒适调查研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2011, 43(4): 551-556.
- Yang Liu, Yang Qian, Yan Haiyan, et al. Field study on thermal comfort of rural houses in winter in the Guanzhong region, Shaanxi Province[J]. Journal of Xi'an University of Architecture and Technology (Natural Science Edition), 2011, 43(4): 551-556.
- [15] 李婧豪, 卢玟珺. 天然采光模型对建筑室内光环境及能耗的影响研究[J]. 建筑节能(中英文), 2022, 50(4): 28-33.
- Li Jinghao, Lu Meijun. Influence of natural lighting model on indoor light environment and energy consumption[J]. Building Energy Efficiency, 2022, 50(4): 28-33.
- [16] 汤兵. 寒冷 A 区农房外窗的多目标优化设计研究——以宁夏生态移民村农房为例[D]. 济南: 山东建筑大学, 2020.
- Tang Bing. Research on multi-objective optimization design of exterior windows of rural houses in the cold zone A—A case study of rural housing in ecological immigrant villages in Ningxia[D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2020.
- [17] 陈锦韬. 以低碳健康为导向的住宅窗技术多目标优化方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2022.
- Chen Jintao. Research on multi-objective optimization method of residential window technology aiming at low-carbon and indoor health[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2022.
- [18] Crawley B D, Hand W J, Kummert M, et al. Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs[J]. Building and Environment, 2008, 43(4): 661-673.
- [19] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 严寒和寒冷地区居住建筑节能设计标准: JGJ 26—2018[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
- [20] Wen Jianxun, Xie Yongxin, Yang Shiji, et al. Study of surrounding buildings' shading effect on solar radiation through windows in different climates[J]. Sustainable Cities and Society, 2022, 86: 104143.
- [21] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 民用建筑热工设计规范: GB 50176—2016[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.

(责任编辑 周 蓓)