

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2021.04.005

基于 Octopus+Honeybee 的天津乡村住宅被动式节能设计多目标优化技术框架

高源^{1,2}, 池婧祎¹, 罗书龙¹, 胡可¹, 袁景玉^{1,2}, 岳晓鹏^{1,2}

(1. 河北工业大学 建筑与艺术设计学院, 天津 300130;

2. 河北工业大学 河北省健康人居环境重点实验室, 天津 300130)

摘要: 为进一步降低北方乡村住宅采暖能耗、改善室内热舒适性, 依托 Rhino+Grasshopper 可视化编程平台, 构建天津乡村住宅被动式节能设计多目标优化技术框架。结合天津实地调研数据, 对乡村住宅规划和单体的 10 个被动式节能设计参数进行多目标优化, 应用 TOPSIS 综合评价法对帕累托解集做进一步筛选。结果显示: 与基准建筑相比, 优化后 L 型乡村住宅采暖节能率为 4.7%~22.8%, 室内热舒适改善率为 1.3%~8.0%; U 型乡村住宅采暖节能率为 6.1%~16.3%, 室内热舒适改善率为 6.7%~8.8%。

关键词: 多目标优化; 性能模拟; 被动式节能; 乡村住宅; TOPSIS 综合优化法

中图分类号: TU111.1; TU241.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-4710(2021)04-0488-10

Multi-objective optimization technology framework of passive energy-saving design for Tianjin rural houses through Octopus+Honeybee

GAO Yuan^{1,2}, CHI Jingyi¹, LUO Shulong¹, HU Ke¹, YUAN Jingyu^{1,2}, YUE Xiaopeng^{1,2}

(1. School of Architecture & Art Design, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China;

2. Key Laboratory of Healthy Human Settlements in Hebei Province, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

Abstract: The aim of this paper is to construct a multi-objective optimization framework for rural houses passive energy-saving in Tianjin by the Rhino+Grasshopper software to further reduce the heating energy consumption and improve indoor thermal comfort. Based on the Tianjin field research, 10 passive energy-saving design parameters of rural residential planning and monomer were optimized with the Pareto solution set further screened by the TOPSIS comprehensive evaluation method. The results indicated that, compared with the reference building, the heating energy saving rate of optimized L-type rural houses was 4.7% to 22.8%, its indoor thermal comfort improvement rate was 1.3% to 8.0%, the heating energy saving rate of U-type rural houses was 6.1% to 16.3%, and the indoor thermal comfort improvement rate of it was 6.7% to 8.8%.

Key words: multi-objective optimization; performance simulation; passive energy-saving; rural house; TOPSIS

我国乡村住宅建筑面积约 229 亿 m², 生活用能总量 3.11 亿 tce, 占全国建筑总能耗的 28.53%^[1]。但长久以来, 北方乡村住宅以粗放式自筹自建为主,

盲目追求高大气派和对建筑节能的忽视, 导致供暖能耗热损失大、采暖季室温偏低, 能源浪费严重^[2-3]。为实现舒适节能型乡村住宅建设目标, 2017 年, 住

收稿日期: 2021-01-20; 网络出版日期: 2021-09-13

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1294.N.20210911.1252.002.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51808179); 河北省省级科技计划软科学研究专项资助项目(21554501D)

第一作者: 高源, 女, 博士, 高级建筑师, 研究方向为性能导向的绿色低碳建筑设计及评价。E-mail: lacey.125@163.com

通信作者: 袁景玉, 男, 博士, 教授, 研究方向为绿色建筑数字化模拟与优化方法。E-mail: yyuan@hebut.edu.cn

建部将“积极推进乡村住宅节能”正式列入《建筑节能与绿色建筑发展“十三五”规划》。

目前,乡村住宅节能研究主要围绕评价标准^[4-5]、改造策略^[6-8]、技术措施^[9-11]、可再生能源利用^[12]等方面展开,而建筑方案阶段最为关键的被动式节能设计研究仅占文献总量的 3.9%,且多见于对单一或组合设计参数节能效果的单视角分析^[13-14]。上述研究虽具有一定的指导意义,但均未从乡村住宅节能与室内热舒适提升的双重视角,对被动式节能设计进行综合评价。

综合评价被动式节能设计参数对乡村住宅能耗与室内热舒适的双重影响,本质上是多目标优化问题。近年来,相关研究逐步推进,如 Fabrizio 等^[15]以一次能源消耗和热不舒适小时数为目标,对地中海居住建筑围护结构的墙体热惰性、保温材料厚度、外窗透射率等热性能参数进行优化。吴迪等^[16]以冬季采暖负荷和夏季热不舒适小时数为目标,对寒冷地区高层住宅围护结构的保温层厚度、外窗类型、气密性等级等技术方案进行优选。余镇雨等^[17]以经济成本和能耗为目标,对近零能耗高层居住建筑的围护结构传热系数和空调全热回收效率进行了参数优化。然而,上述研究均围绕建筑围护结构、设备系统等参数开展讨论,对建筑方案阶段尤为重要的规划和单体参数鲜有研究。Shi 等^[18]从建筑师视角指出:建筑节能设计既包括围护结构热工性能等非几何参数,也包括建筑形体几何参数,既往研究多以暖通或能源工程师为主导,其专业特性及工作内容的差异使得建筑形体几何参数的优化研究难以开展,因而导致了其研究成果多适用于既有建筑节能改造而非新建建筑方案阶段的被动式节能设计。随后,Camporeale 等^[19]从节能视角对城镇居住建筑形体参数进行了多目标优化研究,但相关研究结论具有明显的局限性,其研究对象、优化目标及优化结果均无法应用于节能与热舒适目标下的天津乡村住宅被动式节能设计。因此,本文采用 Rhino+Grasshopper 可视化编程平台搭载的 SPEA2 优化算法,以设计阶段建筑形体参数为优化变量,构建节能和热舒适目标下的天津乡村住宅被动式节能设计多目标优化技术框架。

1 研究方法

1.1 多目标优化算法及帕累托解集

多目标优化算法常用于解决影响因素相互矛盾的复杂决策问题,通过最小化或最大化特定目标来寻求约束条件的最佳解决方案。对于多目标优化问

题,一个解对于某个目标来说可能是较好的,但对于其他目标来说可能是较差的。因此,存在一个折衷的集合,称为帕累托解集^[20-21]。

1.2 天津乡村住宅被动式节能设计多目标优化技术框架

随着智能优化算法及软件技术的不断发展,建筑被动式节能设计多目标优化技术框架的构建方法大致可分为通用编程平台(Matlab、GenOpt、CAMOS 等)^[22]、通用编程-建筑性能模拟联动平台(Matlab-EnergyPlus、GenOpt-DOE-2 等)^[23]、建筑可视化编程平台(Rhino+Grasshopper、Revit+Dynamo)^[24]三类。前两种方法门槛高、交互性差,难以在建筑师主导的方案阶段推广。因此,本文采用建筑界主流的 Rhino+Grasshopper 可视化编程平台,以 Honeybee 为建筑性能模拟引擎,Octopus 为优化算法运行载体,结合实际调研数据,构建天津乡村住宅被动式节能设计多目标优化技术框架,如图 1 所示,包括:①基准建筑模型生成;②被动式节能设计参数筛选;③优化目标函数设定;④最终方案决策。

Honeybee 运算器可直接调用 EnergyPlus 计算内核完成建筑全年 8 760 小时的冷热负荷、动态能耗等模拟分析。Octopus 运算器内置的 SPEA2 相较于其他多目标优化算法,在基于近邻规则环境选择中得出的解的分布均匀性方面具有较大优势,可以较好地避免陷入局部最优^[25],其个体适应度函数为:

$$F(i) = R(i) + D(i) \quad (1)$$

式中: $R(i)$ 为个体 i 在外部种群和进化种群中的个体支配信息; $D(i)$ 代表个体 i 到它紧邻的第 k 个个体之间的距离拥挤度。

2 实例研究

2.1 基准建筑模型生成

天津市远期规划共保留村庄 2 383 个,94%集中在武清、静海、宝坻、蓟州、宁河 5 个远郊涉农区县^[26]。采用 Robert 等^[27]提出的代表性样本量计算公式(见式(2))对上述区县分层抽样,设自由度为 1、置信度 0.75、统计误差不超过 15%,计算得到代表性样本量 S 为 15。据此,本次调研村庄样本数及乡村住宅分布如表 1 所示。

$$S = \frac{\chi^2 \times N \times p \times (1-p)}{ME^2 \times (N-1) + \chi^2 \times p \times (1-p)} \quad (2)$$

式中: S 为建议样本量; χ^2 为预设置信度下 1 个自由度代表的卡方值; N 为样本总量; ME 为设计误差范围,%; p 为种群比例,一般取 50%来最大化代表样本量。

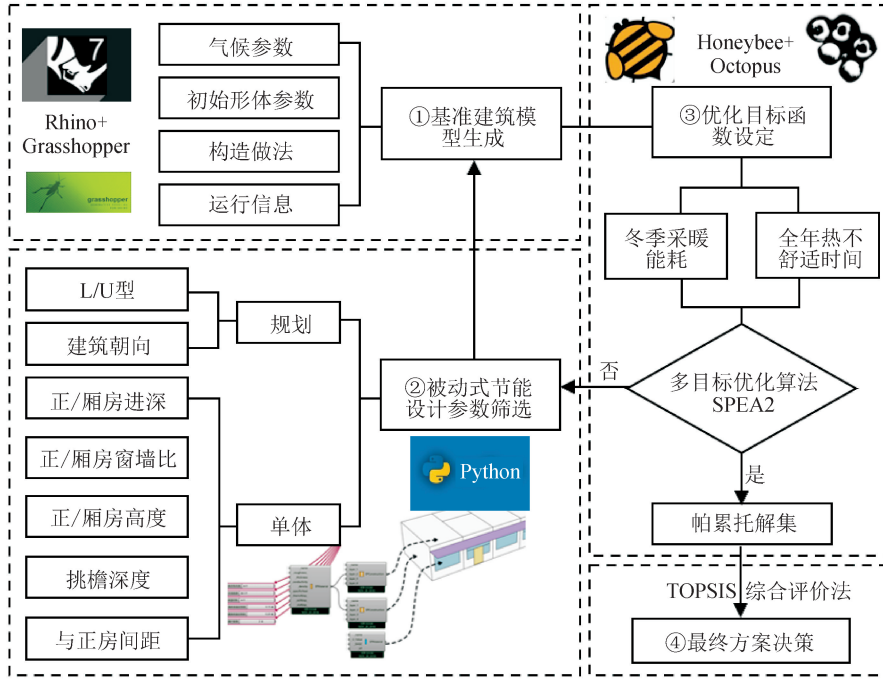


图 1 天津乡村住宅被动式节能设计多目标优化技术框架

Fig. 1 Multi-objective optimization framework of passive energy-saving design for Tianjin rural houses

表 1 调研村庄样本数及乡村住宅分布

Tab. 1 Sample investigation and distribution of rural houses

县区	乡镇	村庄	户数
宝坻区	王卜庄镇	司各庄	2
	方家庄镇	北马营	2
	黄庄镇	小辛码头	2
	黄庄镇	李宦庄村	2
	大口屯镇	朴庄	2
	大口屯镇	薛庄村	2
武清区	大黄堡镇	小杨庄	3
	大孟庄镇	安子上村	3
	大碱厂镇	南辛庄	4
静海区	梁头镇	梁头村	3
	梁头镇	东河头村	2
	梁头镇	孙庄子村	2
宁河区	造甲城镇	造甲城村	4
	板桥镇	北板桥村	2
蓟州区	桑梓镇	桑梓村	4
	桑梓镇	西赵庄村	3
	穿芳峪镇	东水厂村	4
	下营镇	郭家沟村	2
总计	13	18	48

2.1.1 基准建筑初始形体参数

天津乡村住宅调研数据(见图 2)显示:

- 1) 宅基地面积以 200~400 m² 为主,坐北朝南,平面布局多为 L 型和 U 型;
- 2) 正房为主要采暖空间,常设客厅、卧室、厨房等功能,面宽同宅基地,多为 12.5~15.5 m,进深 4.5~5.5 m,檐口高 3.0~3.5 m、室内吊顶高 2.8~3.1 m;
- 3) 厢房基本无采暖,常设厨房、厕所及储藏功能,面宽多为 8.0~12.0 m,进深 3.5~4.7 m,檐口高 2.6~3.3 m,室内吊顶高 2.4~3.0 m,与正房间距 2.2~4.7 m。

由于天津 2000 年之后的新建乡村住宅均为原址翻建,无新增宅基地发放,因此,本文以调研数据中位数作为基准建筑的初始形体参数,其平面布局及尺度如图 3 所示。

2.1.2 基准建筑构造做法

调研发现,天津新建乡村住宅的主体结构仍以砖木为主。结合 GB/T 50824—2013《农村居住建筑节能设计标准》及实测数据,基准建筑围护结构构造做法及传热系数设定如表 2 所示。

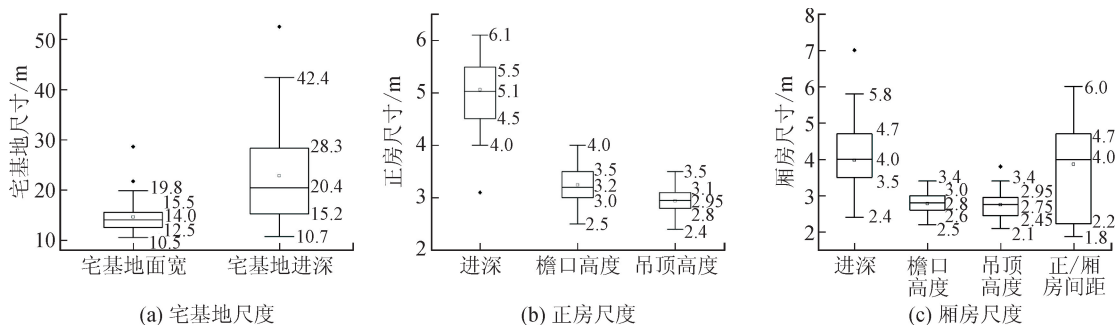


图 2 天津乡村住宅形体参数统计(单位:m)

Fig. 2 Shape parameter statistics of rural houses in Tianjin (unit: m)

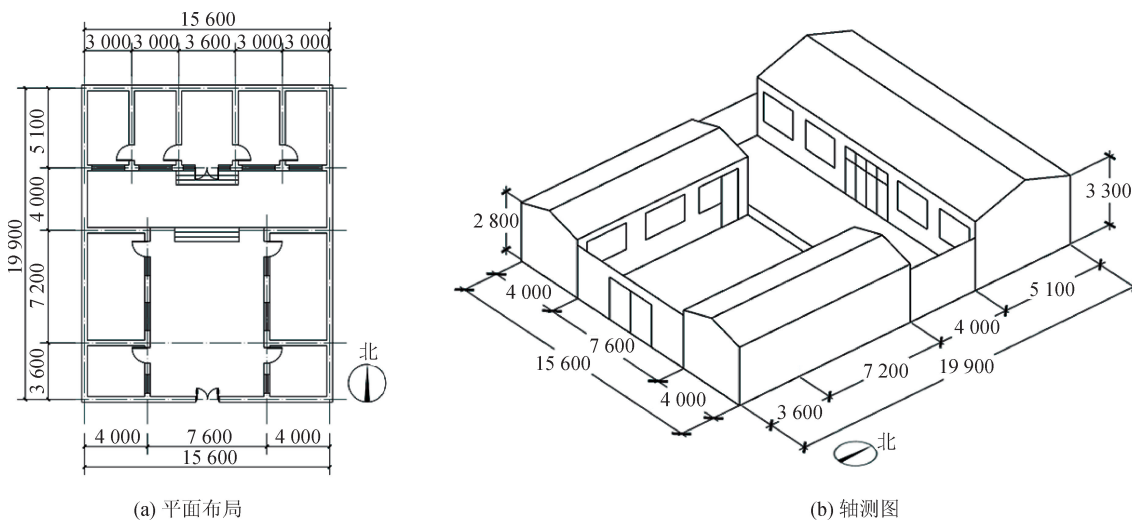


图 3 基准建筑初始形体参数(单位:mm)

Fig. 3 Shape parameters of reference building (unit: mm)

表 2 基准建筑围护结构构造做法及传热系数

Tab. 2 Envelope structure and heat transfer coefficients of reference building

构件	构造(由外至内)	传热系数/(W·(m ² ·K) ⁻¹)
外墙	20 mm 混合砂浆+50 mm EPS 保温板+370 mm 砖墙+20 mm 混合砂浆	0.65
屋面	15 mm 挂瓦+4 mm 涂料防水层+20 mm 望板+木屋架	0.50
吊顶	轻钢龙骨+90 mm EPS 保温板+9 mm 石膏吊顶(木屋架坡屋面)	0.50
外窗	断桥铝合金双玻 6+12A+6 推拉窗	2.50
内墙	10 mm 混合砂浆+370 mm 砖墙+10 mm 混合砂浆	1.44
地面	20 mm 水泥砂浆+60 mm 混凝土垫层+100 mm 素土夯实	3.25
外门	断桥铝合金双玻 6+12A+6 推拉门	2.50

2.1.3 基准建筑运行信息

截至目前,天津乡村住宅已基本完成清洁取暖改造,供暖设备以空气源热泵和燃气壁挂炉为主。随着“3060 双碳”目标的推进,用能电气化已成为乡村住宅供暖新趋势。因此,本文基准建筑供暖设备选择空气源热泵(海尔 RFC140RXSAVA,能效比 3.2),末端形式为散热器,采暖期为 11 月 15 日至次年 3 月 15 日。此外,在城镇化和老龄化背景下,被调研农户常驻人口多为 2~4 人,60 岁以上的老年人占半数以上,全天居家。课题组 2021 年 1 月 8 日~12 日对乡村

住宅室内环境的连续监测显示,24 小时平均室温仅为 6.57℃,湿度 30%~45%,室内风速 95% 低于 0.15 m/s;居民着装以毛衣、棉衣为主,服装热阻 1.15~2.09clo。对居民发放平均热感觉投票问卷,86.1% 的居民希望采暖季室温提升至 15.9℃~17.6℃。照明逐时使用率、换气次数按 GB/T 50824—2013《农村居住建筑节能设计标准》及 JGJ26—2018《严寒和寒冷地区居住建筑节能设计标准》选取,即:5:00 至 8:00 设 50%、17:00 至 18:00 设 50%、19:00 至 22:00 设 80%;换气次

数 0.5 h^{-1} 。基准建筑运行信息如表 3 所示。

表 3 基准建筑运行信息

Tab. 3 Operation information on reference building

运行信息	取值
采暖设置温度/ $(^{\circ}\text{C})$	16
人员密度/ $(\text{人} \cdot \text{m}^{-2})$	0.02
人员在室率/ $\%$	75
居民服装热阻/clo	1.2

2.2 被动式节能设计参数筛选

对基准建筑的被动式节能设计参数进行分类研究,从规划和单体层面筛选优化变量。

各优化变量的取值范围以 2000 年之后翻建农宅实测数据为基础,兼顾乡村经济技术限制、建设习惯、采光节能等功能需求及乡村住宅设计规范要求。

各变量名称、含义、类别、取值范围及步长如图 4 及表 4 所示。

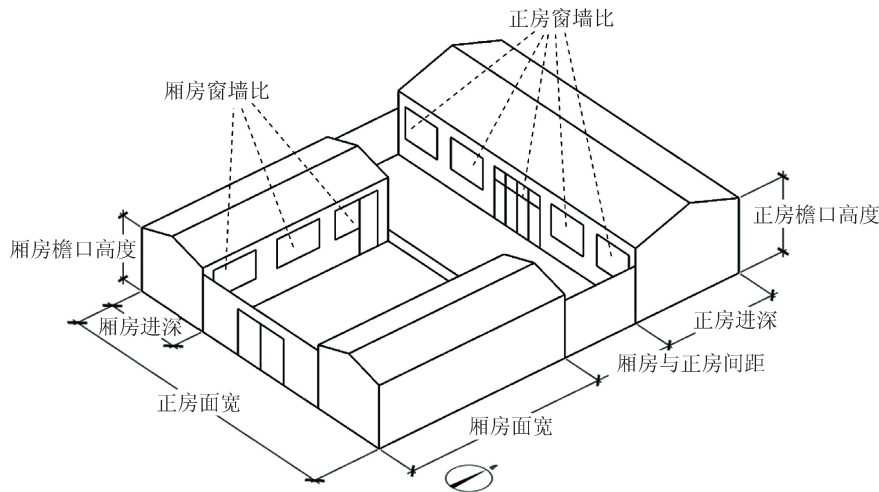


图 4 天津乡村住宅被动式节能设计参数优化变量

Fig. 4 Optimization variable of rural houses passive energy-saving design in Tianjin

表 4 优化变量设定

Tab. 4 Specifications of the decision variables

类别	优化变量	取值范围	步长
规划布局	建筑朝向 (L/U 型)/ $(^{\circ})$	$-15 \sim 15$ (正南 0)	0.1
	进深/m	$4.0 \sim 9.0$	0.1
正房	窗墙比	$0.30 \sim 0.45$	0.01
	檐口高度/m	$2.5 \sim 5.0$	0.1
	挑檐深度/m	$0 \sim \text{正房间距}$	0.1
建筑单体	距正房间距/m	$1.0 \sim 6.0$	0.1
厢房	进深/m	$3.5 \sim 5.5$	0.1
	窗墙比	$0.25 \sim 0.35$	0.01
	檐口高度/m	$2.5 \sim 4.0$	0.1

2.3 优化目标函数设定

本文以乡村住宅冬季采暖能耗和全年热不舒适小时数作为优化目标,多目标优化问题的数学表达式为:

$$\min\{f_1(x_1, x_2, \dots, x_n), f_2(x_1, x_2, \dots, x_n)\} \quad (3)$$

式中: $f_1(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 为单位建筑面积采暖能耗, $(\text{kW} \cdot \text{h})/\text{m}^2$; $f_2(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 为全年热不舒适小时数, h ; x_1, x_2, \dots, x_n 为优化变量参数。

2.3.1 单位建筑面积采暖能耗

调研数据显示,天津乡村居民夏季及过渡季室内环境以自然通风为主,白天人员在室率较低,空调使用频率极低;冬季为农闲时节,人员在室率及热舒适需求较高。

因此,基准建筑年能耗以冬季采暖为主,故以单位建筑面积采暖能耗作为优化目标之一。

通过 Honeybee 调用 EnergyPlus 对乡村住宅冬季采暖能耗进行模拟,气象参数采用 EnergyPlus 官网下载的天津市典型气象年数据,其余工况参数如 2.1.3 节所述。根据模拟结果,单位建筑面积采暖能耗计算公式为:

$$Q_c = \frac{\sum_{i=1}^n Q_{ci}}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (4)$$

式中: Q_{ci} 为各房间的采暖能耗, $\text{kW} \cdot \text{h}$; A_i 为各房间面积, m^2 。

2.3.2 全年热不舒适小时数

由于城乡经济条件和生活习惯的差异,GB/T 50824—2013《农村居住建筑节能设计标准》中指出,我国寒冷地区 80%以上的农户认为冬季室温 13 °C~16 °C、夏季不高于 30 °C 即为舒适。

因此,本文以采暖季室温 14 °C (GB/T 50824 冬季室温设计值)、夏季室温 30 °C 为基准建筑室内热舒适临界值。根据模拟结果,全年热不舒适小时数计算公式为:

$$TDT = (\sum_{i=1}^n MS_i + \sum_{i=1}^n MW_i) / n \quad (5)$$

式中:MS_i和 MW_i分别表示第 i 个房间夏季和冬季的热不舒适小时数,h;n 为房间数量。

2.4 最终方案决策

在多目标优化算法中,所有最优解均无差别地统计在帕累托解集中,某个最优解并不比其他最优

解更好。

因此,如何在这些可行的最优方案中确定最终解决方案,需要决策过程。TOPSIS(Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution)综合评价法是一种有效的决策方法,即对有限个评价对象与理想化目标的接近程度进行排序,又称优劣距离法。计算公式为:

$$C_j = \frac{S_j^-}{S_j^- + S_j^+}, \forall j, C_j \in [0, 1] \quad (6)$$

式中:S_j⁺和 S_j⁻为各评价解到正理想解与负理想解的距离;C_j为第 j 个评价解,0 ≤ C_j ≤ 1, C_j越接近于 1,表明评价解越好。

3 优化结果及分析

对基准建筑初始形体参数进行冬季采暖能耗和全年热不舒适小时数性能模拟,计算结果如表 5 所示。

表 5 基准建筑初始形体参数及热环境性能
Tab. 5 Shape parameters and thermal performance of reference building

规划布局参数		正房形体参数					厢房形体参数			建筑性能	
类型	朝向/ (°)	正房进 深/m	正房窗 墙比	正房檐 口高度/ m	门廊深 度/m	距正房 间距/ m	厢房进 深/m	厢房窗 墙比	厢房檐口 高度/m	单位建筑面积 采暖能耗/ (kW·h)·m ⁻²	热不舒适 小时数/h
L 型	7.1	5.1	0.45	3.3	1.2	4.0	4.0	0.35	2.8	10.98	2 695.2
U 型	7.1	5.1	0.45	3.3	1.5	4.0	4.0	0.35	2.8	11.18	2 725.0

在基准建筑初始性能基础上,基于 SPEA2 算法,以最小化冬季采暖能耗和全年热不舒适小时数为目标,优化表 3 中的形体参数变量。在优化计算中设置种群数量 40 个,迭代 50 次,突变率为 0.5,交叉率为 0.8。最终得到 L 及 U 型乡村住宅的帕累托前沿,如图 5~6 所示。其中,L 型乡村住宅的帕累托解集中共有 25 个解,U 型乡村住宅的帕累托解集中共有 28 个解。

从图 5~6 中可以看出:①所有落在帕累托前沿的最优解其冬季采暖能耗均优于基准建筑;②由于东侧厢房的遮挡,U 型乡村住宅比 L 型住宅的单位面积采暖能耗更高;③冬季采暖能耗与全年热不舒适小时数变化趋势相反,即两个优化目标相互约束,无法同时达到最优。

应用 TOPSIS 综合评价法给两个目标函数(冬季采暖能耗、全年热不舒适小时数)赋权,得到不同权重下的最优方案,如图 7~8 所示。两个目标函数的权重和为 1,图中实线和虚线分别代表了不同权重方案下,帕累托解集中最优方案所对应的建筑采

暖能耗及全年热不舒适小时数值。需要注意的是, TOPSIS 综合评价法仅作用于帕累托前沿的最优解上,当权重为 0 或 1 时,目标函数最优解并不等同于单目标优化结果。

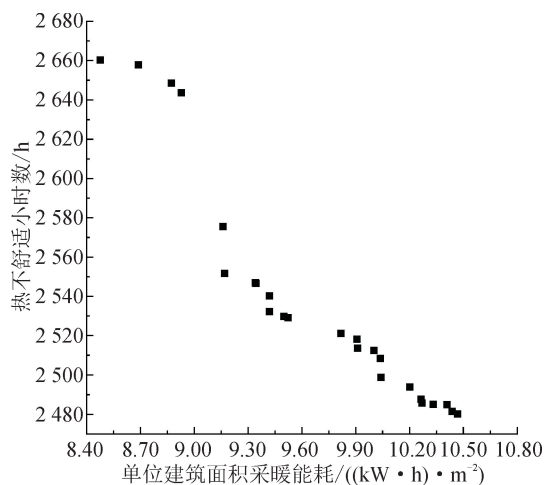


图 5 L 型乡村住宅帕累托解集
Fig. 5 Pareto set of L-shaped rural house

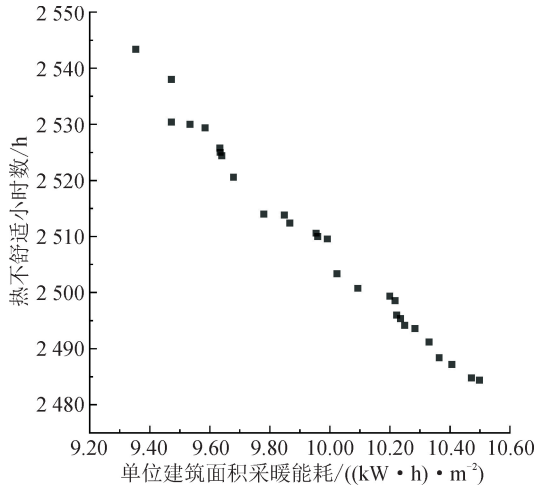


图 6 U 型乡村住宅帕累托解集

Fig. 6 Pareto set of U-shaped rural house

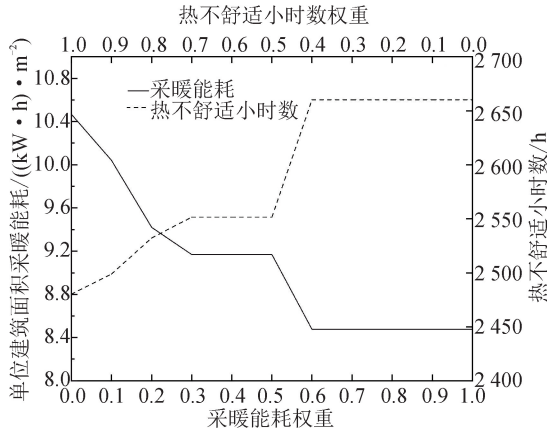


图 7 L 型乡村住宅不同权重下的最优方案

Fig. 7 Optimal scheme of L-shaped rural house

表 6 不同权重下 L 型乡村住宅最优方案

Tab. 6 Optimal plan of L-shaped rural house under different weights

性能取向	采暖能耗权重	角度/°	正房进深/m	正房窗墙比	正房檐口高度/m	门廊深度/m	距正房间距/m	厢房进深/m	厢房窗墙比	厢房檐口高度/m	单位建筑面积极采暖能耗/(kW·h)·m ⁻²	热不舒适小时数/h
热舒适优先	0	15.0	4.0	0.45	4.8	1.0	5.0	3.5	0.25	2.7	10.47	2 480.2
	0.1	12.8	4.0	0.45	4.2	1.0	5.4	3.6	0.25	2.7	10.04	2 498.8
	0.2	-1.8	4.0	0.45	4.1	0.9	5.1	3.6	0.25	2.7	9.42	2 532.2
	0.3	13.0	4.0	0.45	3.5	0.8	5.5	3.6	0.25	2.7	9.16	2 551.6
	0.4	13.0	4.0	0.45	3.5	0.8	5.5	3.6	0.25	2.7	9.16	2 551.6
多目标均衡	0.5	13.0	4.0	0.45	3.5	0.8	5.5	3.6	0.25	2.7	9.16	2 551.6
采暖能耗优先	0.6	-2.9	4.0	0.45	3.5	1.0	5.6	4.5	0.25	2.8	8.48	2 660.2
	0.7	-2.9	4.0	0.45	3.5	1.0	5.6	4.5	0.25	2.8	8.48	2 660.2
	0.8	-2.9	4.0	0.45	3.5	1.0	5.6	4.5	0.25	2.8	8.48	2 660.2
	0.9	-2.9	4.0	0.45	3.5	1.0	5.6	4.5	0.25	2.8	8.48	2 660.2
	1.0	-2.9	4.0	0.45	3.5	1.0	5.6	4.5	0.25	2.8	8.48	2 660.2

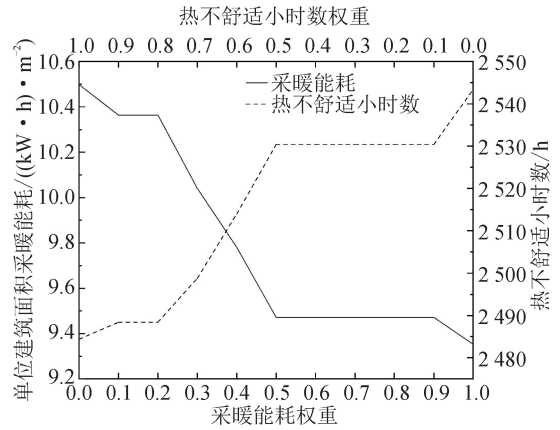


图 8 U 型乡村住宅不同权重下的最优方案

Fig. 8 Optimal scheme of U-shaped rural house

3.1 L 型乡村住宅多目标优化结果及方案评估

表 6 显示了 L 型乡村住宅不同权重下最优方案的详细信息。按照采暖能耗权重的变化区间, L 型乡村住宅最优解可分为热舒适优先、多目标均衡和采暖能耗优先三类: ①室内热舒适性最佳的方案其全年热不舒适小时数为 2 480.2 h, 相较于基准建筑改善 8.0%, 此时冬季采暖能耗为 10.47 (kW·h)/m², 节能率 4.7%; ②最节能方案的冬季采暖能耗为 8.48 (kW·h)/m², 相较于基准建筑节能 22.8%, 此时全年热不舒适小时数为 2 660.2 h, 改善率 1.3%; ③在权重为 0.5 的均衡选择下, 该最优解的冬季采暖能耗为 9.16 (kW·h)/m², 节能率 16.5%, 热不舒适小时数为 2 551.6 h, 改善率 5.3%。

3.2 U型乡村住宅多目标优化结果及方案评估

表7显示了U型乡村住宅不同权重下最优方案的详细信息。与3.1节类似,U型乡村住宅三类最优解方案如下:①室内热舒适性最佳的方案其全年热不舒适小时数为2484.4h,相较于基准建筑改善8.8%,此时冬季采暖能耗为10.49(kW·h)/m²,

节能率6.1%;②最节能方案的冬季采暖能耗为9.35(kW·h)/m²,相较于基准建筑节能16.3%,此时全年热不舒适小时数为2543.4h,改善率6.7%;③在权重为0.5的均衡选择下,该最优解的冬季采暖能耗为9.47(kW·h)/m²,节能率15.3%,热不舒适小时数为2530.4h,改善率7.1%。

表7 不同权重下U型乡村住宅最优方案
Tab.7 Optimal plan of U-shaped rural house under different weights

性能取向	采暖能耗权重	角度/(°)	正房进深/m	正房窗墙比	正房檐口高度/m	门廊深度/m	距正房间距/m	厢房进深/m	厢房窗墙比	厢房檐口高度/m	单位建筑面积采暖能耗/(kW·h)·m ⁻²	热不舒适小时数/h
热舒适优先	0	12.8	4.0	0.45	4.9	1.0	5.8	3.6	0.25	2.6	10.49	2484.4
	0.1	11.2	4.0	0.45	4.9	1.0	6.0	3.7	0.25	2.5	10.36	2488.4
	0.2	11.2	4.0	0.45	4.9	1.0	6.0	3.7	0.25	2.5	10.36	2488.4
	0.3	11.2	4.0	0.45	4.9	1.0	6.0	3.7	0.25	2.5	10.36	2488.4
	0.4	11.7	4.0	0.45	4.5	0.9	5.8	3.6	0.25	2.6	9.78	2514.0
多目标均衡	0.5	10.9	4.0	0.45	4.3	0.9	5.8	3.6	0.25	2.5	9.47	2530.4
	0.6	10.9	4.0	0.45	4.3	0.9	5.8	3.6	0.25	2.5	9.47	2530.4
采暖能耗优先	0.7	10.9	4.0	0.45	4.3	0.9	5.8	3.6	0.25	2.5	9.47	2530.4
	0.8	10.9	4.0	0.45	4.3	0.9	5.8	3.6	0.25	2.5	9.47	2530.4
	0.9	10.9	4.0	0.45	4.3	0.9	5.8	3.6	0.25	2.5	9.47	2530.4
	1.0	-1.9	4.0	0.45	4.3	0.8	6.0	3.6	0.25	2.6	9.35	2543.4

3.3 优化结果整体分析

整体分析两类乡村住宅的优化结果(见表6~7)。

规划层面:①由于东侧厢房的加入会遮挡正房,且增加建筑体形系数,故U型乡村住宅的采暖碳排放表现整体劣于L型住宅;热舒适优先及多目标均衡情况下,两类农宅的热舒适表现差异较小,采暖能耗优先时U型乡村住宅的室内热舒适性更佳;②基于节能与热舒适考虑,天津地区乡村住宅最佳朝向并非正南向,L型乡村住宅最佳朝向为-2.9°~15°,U型乡村住宅最佳朝向为-1.9°~12.8°。

单体层面:①正房的最佳进深均为取值下限4m,与GB/T 50824—2013《农村居住建筑节能设计标准》中的建议值基本吻合;窗墙比落在取值范围之上限0.45,故在乡村住宅设计中适当增加正房开窗面积并不会导致能耗的提高;正房檐口高度,L型农宅较低,为3.5~4.8m,U型农宅较高,为4.3~4.9m;门廊最佳进深均为0.8~1.0m;②L型乡村住宅厢房与正房的最佳间距为5.0~5.6m,U型农

宅因遮挡更为严重,最佳间距为5.8~6.0m;厢房最佳进深分别为3.5~4.5m(L型)、3.6~3.7m(U型);最佳窗墙比均为取值范围及节能标准之下限0.25;厢房檐口高度整体低于正房檐口,L型为2.7~2.8m,U型为2.5~2.6m。入户调研显示,天津地区乡村住宅厢房主要为厨房、卫生间、储藏间等辅助功能,因此在不影响基本功能的前提下,应尽量降低厢房高度、减小厢房窗墙比。

4 结论

基于采暖能耗与室内热舒适双目标优化的新建农宅,与基准建筑相比,L型乡村住宅采暖节能率为4.7%~22.8%,室内热舒适改善率为1.3%~8.0%;U型乡村住宅的采暖节能率为6.1%~16.3%,室内热舒适改善率为6.7%~8.8%。

1) 热舒适最优情况下,L型乡村住宅最佳朝向为南偏东15°,正房进深4.0m、檐口高4.8m、窗墙比0.45、门廊进深1.0m,厢房进深3.5m、檐口高2.7m、窗墙比0.25、距正房5.0m;U型乡村住宅最

佳朝向为南偏东 12.8° ,正房进深4.0 m、檐口高4.9 m、窗墙比0.45、门廊进深1.0 m、厢房进深3.6 m、檐口高2.6 m、窗墙比0.25、距正房5.8 m。

2) 多目标均衡情况下,L型乡村住宅最佳朝向为南偏东 13° ,正房进深4.0 m、檐口高3.5 m、窗墙比0.45、门廊进深0.8 m、厢房进深3.6 m、檐口高2.7 m、窗墙比0.25、距正房5.5 m;U型乡村住宅最佳朝向为南偏东 10.9° ,正房进深4.0 m、檐口高4.3 m、窗墙比0.45、门廊进深0.9 m、厢房进深3.6 m、檐口高2.5 m、窗墙比0.25、距正房5.8 m。

3) 采暖能耗最优情况下,L型乡村住宅最佳朝向为南偏西 2.9° ,正房进深4.0 m、檐口高3.5 m、窗墙比0.45、门廊进深1.0 m、厢房进深4.5 m、檐口高2.8 m、窗墙比0.25、距正房5.6 m;U型乡村住宅最佳朝向为南偏西 1.9° ,正房进深4.0 m、檐口高4.3 m、窗墙比0.45、门廊进深0.8 m、厢房进深3.6 m、檐口高2.6 m、窗墙比0.25、距正房6.0 m。

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 2020:农村住宅专题 [M]. 北京:中国建筑工业出版社,2020.

[2] 单明,王鹏苏,李沁笛,等. 我国农村住宅能源消耗现状调研分析[J]. 建设科技,2012,9:14-19.

[3] 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 & Technology (Natural Science Edition), 2011,43(4):551-556.

[4] 石谦飞,韩乐. 山西东南部传统民居节能评价方法研究[J]. 科学技术与工程,2013,13(21):6323-6328,6338.
SHI Qianfei, HAN Le. Study on the method of energy-efficient assessment of traditional dwellings in south-eastern Shanxi(region)[J]. Science Technology and Engineering, 2013,13(21): 6323-6328, 6338.

[5] 宋冰,杨柳. 寒冷地区农村住宅建筑能耗影响因素及其经济性分析[J]. 建筑科学,2020,36(4):33-38.
SONG Bing, YANG Liu. Analysis of influence factors and economic efficiency of energy consumption of rural dwellings in cold regions[J]. Building Science, 2020,36(4):33-38.

[6] 张兴惠,马质聪,高晨晖,等. 山西农村住宅建筑能耗分析及节能改造策略[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版),2020,52(5):667-673.
ZHANG Xinghui, MA Zhicong, GAO Chenhui, et al.

Analysis on energy consumption of rural residential buildings in Shanxi[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2020, 52(5):667-673.

- [7] 李艾芳,马静,王华. 华北地区典型农宅外围护结构节能生态改造浅探[J]. 建筑科学,2008,24(6):12-14, 33.
LI Aifang, MA Jing, WANG Hua. Discussion on energy conservation and ecological retrofit of the envelope of typical rural residence in North China[J]. Building Science, 2008,24(6):12-14, 33.
- [8] 张丽丽,杨祖贵,王怀德. 寒冷地区现有农村住宅节能改造策略[J]. 工业建筑,2009,39(7):23-25, 40.
ZHANG Lili, YANG Zugui, WANG Huaide. Energy-saving reform strategy of the existing rural residential buildings in cold regions[J]. Industrial Construction, 2009,39(7):23-25, 40.
- [9] 林青,陈静,王向宁. 冀南地区农村住宅节能改造措施与工程应用[J]. 施工技术,2014,43(10):91-94.
LIN Qing, CHEN Jing, WANG Xiangning. Energy efficiency reconstruction measures and engineering application for rural residence in southern Hebei Province [J]. Construction Technology, 2014,43(10):91-94.
- [10] 霍慧敏,徐伟,李安桂. 基于熵值法的北方农宅围护结构改造方案比选分析[J]. 建筑科学,2019,35(8):57-64.
HUO Huimin, XU Wei, LI Angui. Comparison and analysis of envelope structure retrofitting schemes for rural residential building in northern China based on entropy method[J]. Building Science, 2019, 35(8): 57-64.
- [11] 李清,陈思羽,马令勇,等. 严寒地区农宅附加阳光间能耗及效益评价分析[J]. 热科学与技术,2020,19(3):262-269.
LI Qing, CHEN Siyu, MA Lingyong, et al. Analysis on energy consumption and benefit evaluation of solar house of rural residences in severe cold areas[J]. Journal of Thermal Science and Technology, 2020,19(3): 262-269.
- [12] 王建龙. 江南水乡典型农村住宅能耗及能源结构优化研究[D]. 南京:东南大学,2015.
WANG Jianlong. The study on Jiangnan typical rural residential energy and the optimization of energy structure[D]. Nanjing: Southeast University, 2015.
- [13] 张雪研,赵佳艺,杨一鸣,等. 覆膜缓冲空间对农宅室内光热环境的影响——以辽中地区为例[J]. 中南大学学报(自然科学版),2021,52(5):1702-1711.
ZHANG Xueyan, ZHAO Jiayi, YANG Yiming, et al. Impact of film-covered buffer space on indoor light and thermal environment of rural house: a case study in

- central Liaoning[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2021, 52(5):1702-1711.
- [14] 李洁,徐鑫,姚新强,等. 新疆地区既有农宅被动式改造与供暖初期运行效果分析[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(13):5332-5337.
- LI Jie, XU Xin, YAO Xinqiang, et al. Analysis of passive reform and operation effect of rural house during the initial stage of heating in Xinjiang[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20 (13): 5332-5337.
- [15] FABRIZIO A, NICOLA B, ROSA D M, et al. Design of the building envelope: a novel multi-objective approach for the optimization of energy performance and thermal comfort [J]. Sustainability, 2015, 7 (8): 10809-10836.
- [16] 吴迪,刘立,李晓俊,等. 基于多目标优化的被动式低能耗建筑技术研究——以寒冷地区居住建筑为例[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2018, 46 (4): 98-104, 120.
- WU Di, LIU Li, LI Xiaojun, et al. Research on the technologies of passive low energy buildings on the basis of multi-objective optimization method——by taking cold zone residential buildings for example [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2018, 46(4): 98-104, 120.
- [17] 余镇雨,路菲,邹瑜,等. 基于模拟的多目标优化方法在近零能耗建筑性能优化设计中的应用[J]. 建筑科学, 2019, 35(10):8-15.
- YU Zhenyu, LU Fei, ZOU Yu, et al. A simulation-based multi-objective optimization approach for design of nearly zero energy buildings[J]. Building Science, 2019, 35(10):8-15.
- [18] SHI X, YANG W. Performance-driven architectural design and optimization technique from a perspective of architects[J]. Automation in Construction, 2013, 32 (7): 125-135.
- [19] CAMPOREALE P E, MERCADER-MOYANO P. Towards nearly zero energy buildings: shape optimization of typical housing typologies in Ibero-American temperate climate cities from a holistic perspective[J]. Solar Energy, 2019, 193: 738-765.
- [20] CHIANDUSSI G, CODEGONE M, FERRERO S, et al. Comparison of multi-objective optimization methodologies for engineering applications[J]. Computers & Mathematics with Applications, 2012, 63 (5): 912-942.
- [21] GOU S, NIK V M, SCARTEZZINI J-L, et al. Passive design optimization of newly-built residential buildings in Shanghai for improving indoor thermal comfort while reducing building energy demand[J]. Energy and Buildings, 2018, 169:484-506.
- [22] PERERA D W U, WINKLER D, SKEIE N O. Multi-floor building heating models in MATLAB and Modelica environments[J]. Applied Energy, 2016, 171: 46-57.
- [23] ASCIONE F, BIANCO N, DE STASIO C, et al. Simulation-based model predictive control by the multi-objective optimization of building energy performance and thermal comfort[J]. Energy and Buildings, 2016, 111:131-144.
- [24] KAVAN J, VAHID M N, MOHAMMADJAVAD M. A novel design-based optimization framework for enhancing the energy efficiency of high-rise office buildings in urban areas[J]. Sustainable Cities and Society, 2019, 49:101597.
- [25] ZITZLER E, LAUMANN M, THIELE L. SPEA2: improving the strength Pareto evolutionary algorithm [R]. Zurich: Computer Engineering and Networks Laboratory(TIK), 2001.
- [26] 岳晓鹏,王飞雪. 天津农村自建房户型现状及优化设计研究[J]. 建筑学报, 2017(9):83-87.
- YUE Xiaopeng, WANG Feixue. The current conditions and optimization of flat types of self-built houses in rural Tianjin[J]. Architectural Journal, 2017(9): 83-87.
- [27] ROBERT V K, DARYLE W M. Determining sample size for research activities[J]. Educational and Psychological Measurement, 1970, 30(3): 607-610.

(责任编辑 周 蓓)