

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202101026



# 北方乡村住宅节能与热舒适的 形体参数多目标优化设计

高源, 胡可, 岳晓鹏, 袁景玉

(河北工业大学 建筑与艺术设计学院, 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,依托 Rhino-Grasshopper 可视化编程平台,构建北方乡村住宅形体参数多目标优化设计框架。结合天津乡村实地调研数据,对北方乡村住宅规划和单体层面的 9 项形体参数进行了多目标优化,应用 TOPSIS (technique for order preference by similarity to an ideal solution) 综合评价法对帕累托解集进一步筛选,得到 L 型及 U 型乡村住宅形体参数最终设计方案。结果显示:优化后的 L 型乡村住宅采暖能耗及热舒适表现均优于 U 型;L 型、U 型乡村住宅形体优化方案在基准建筑基础上分别节约采暖能耗 16.6%~18.0%,16.3%~26.4%,室内热舒适改善 16.5%~17.5%,2.1%~19.0%。

**关键词:** 北方乡村住宅; 节能; 热舒适; 形体参数; 多目标优化; TOPSIS 综合评价法

**中图分类号:** TU 111.195; TU 241.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2021)05-0619-09

## Shape Parameters Design of Northern Rural Houses for Multi-Objective Optimization of Energy Performance and Thermal Comfort

GAO Yuan, HU Ke, YUE Xiaopeng, YUAN Jingyu

(School of Architecture and Art Design, Hebei University of Technology, Tianjin 300130)

**Abstract:** In order to further reduce the heating energy of the rural house in North China and improve the indoor thermal comfort, a parametric energy-saving design framework of Tianjin City rural houses based on Rhino-Grasshopper software was constructed. Combining with the field survey of Tianjin village, 9 parameters of planning and building design were selected for multi-objective optimization. TOPSIS (technique for order preference by similarity to an ideal solution) comprehensive evaluation method was used to further screen the Pareto solution set. The results indicate that: the optimized L-shaped rural house has better heating energy consumption and thermal comfort performance than the optimized U-shaped rural house; the optimal solution of L-type and U-type rural house can save heating energy by 16.6%-18.0% and 16.3%-26.4% respectively on the base of the benchmark building, can improve indoor thermal comfort by 16.5%-17.5% and 2.1%-9.0%.

**Keywords:** northern rural houses; energy-saving; thermal comfort; shape parameters; multi-objective optimization; TOPSIS comprehensive evaluation method

我国北方乡村住宅冬季采暖能耗约占生活总能耗的 56%,但采暖季室温仅为 5.6℃,能源浪费现

**收稿日期:** 2021-01-10

**通信作者:** 袁景玉(1966-),男,博士,教授,主要从事绿色建筑数字化模拟与优化方法的研究. E-mail:yyuan@hebut.edu.cn.

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51808179);教育部人文社科规划基金资助项目(18YJA760075)

象严重<sup>[1-2]</sup>.为实现我国节能减排和美丽乡村建设的双重战略目标,2017 年,住建部将“积极推进农村住宅节能”正式列入《建筑节能与绿色建筑发展“十三五”规划》.建筑方案设计阶段是建筑节能设计的基础和关键环节.然而,现行节能设计方法存在着部分局限:一方面,《节能设计标准》的清单式条款无法直观反映各设计参数的节能效果;另一方面,常规“能耗模拟-方案优化”的性能化设计流程无法实现对设计参数的穷举,同时也难以完成对多个相互制约目标的均衡优化.

随着计算机技术和智能算法的发展,虽然国内外学者开始应用多目标优化算法在建筑保温材料<sup>[3-4]</sup>、节能设计参数<sup>[5-8]</sup>、节能改造措施<sup>[9-10]</sup>方面展开研究,但针对方案阶段节能设计尤为重要的形体参数优化研究,却鲜有涉足. Shi 等<sup>[11]</sup>指出:建筑节能设计不仅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.以往的研究多为暖通或能源工程师主导,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的建筑节能改造而非新建建筑方案阶段的被动式节能设计.此后, Negendahl 等<sup>[12]</sup>、Yu 等<sup>[13]</sup>、Zhang 等<sup>[14]</sup>、Patrcia 等<sup>[15]</sup>分别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,但相关的研究结论仅限于特定研究对象,无法适用于我国北方乡村住宅的被动式节能设计.

鉴于此,本文依托 Rhino-Grasshopper 可视化编程平台,应用多目标优化算法,以节能及热舒适为目标,对北方乡村住宅规划及单体设计阶段的 9 项形体参数进行多目标优化研究.

# 1 研究方法

## 1.1 多目标优化理论基础

多个目标相互矛盾、彼此冲突的复杂决策问题,称之为多目标优化问题.在多目标优化问题中,帕累托最优解被普遍认为是可以最小化所有目标冲突的最佳解决方案<sup>[16]</sup>.由于多目标优化问题的本质在于某个目标的改善会引起其他目标性能的降低,因此多目标优化问题并不存在唯一的全局最优解,而是通过各目标间的权衡产生一个折衷的最优解集合,称为帕累托解集<sup>[17]</sup>.

## 1.2 北方乡村住宅形体参数多目标优化设计框架

以 Rhino-Grasshopper 搭载的 Honeybee 为目标性能模拟引擎,以 Octopus 为优化算法运行载体,构建基于节能与热舒适的北方乡村住宅形体参数多目标优化设计框架,如图 1 所示.该框架包括以下四个模块:1) 基准建筑信息模型;2) 优化变量参数;3) 优化目标函数;4) 优化方案评估.

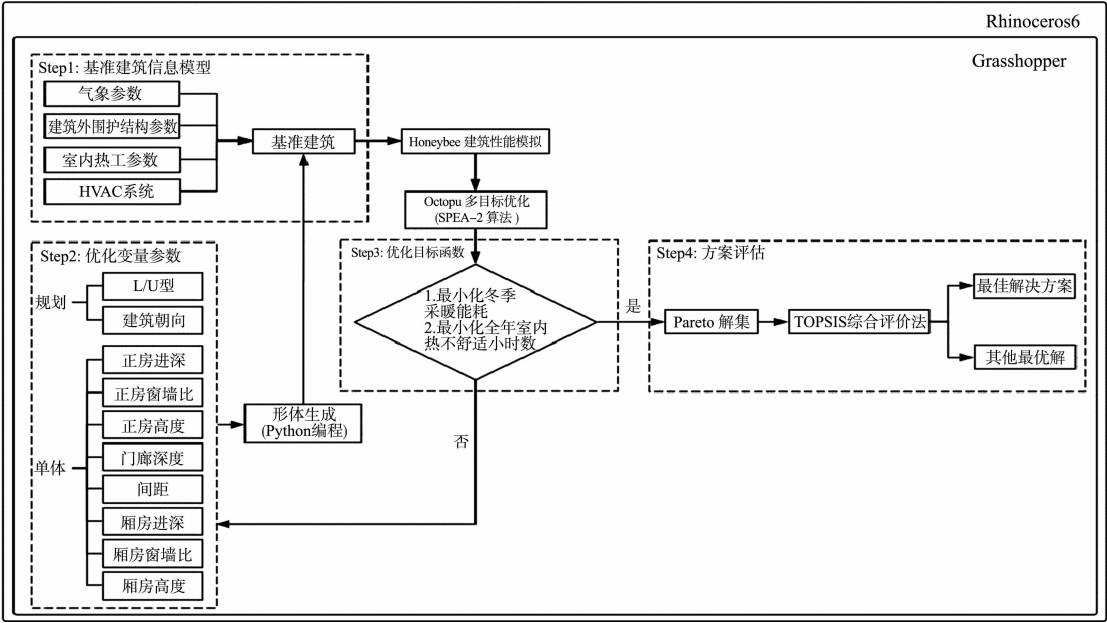


图 1 北方乡村住宅形体参数多目标优化设计框架

Fig. 1 Shape parameters multi-objective optimization design framework of northern rural houses

Honeybee 高效整合既有成熟的建筑性能模拟工具,可直接调用 EnergyPlus 进行能耗及热舒适计

算. Octopus 内置的 SPEA-2 算法, 是 Zitzler 和 Thiele 在 2001 年提出的 SPEA(strength pareto evolutionary algorithm)进化算法的改进版本. 相较于其他多目标优化算法, SPEA-2 在基于近邻规则环境选择中得出解的分布均匀性方面具有较大优势, 可较好地避免陷入局部最优<sup>[18]</sup>. 其个体适应度函数为

$$F(i)=R(i)+D(i).$$

(1)

式(1)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;  $D(i)$  为个体  $i$  到它紧邻的第  $k$  个个体之间的距离拥挤度.

## 2 实证分析

### 2.1 基准建筑信息模型构建

安子上村位于天津市武清区大孟庄北部(寒冷地区), 全村共 447 户, 整体布局南偏东  $7.1^{\circ}$ , 行列式排布, 其规划总平面如图 2 所示. 2019—2020 年冬季, 对该村 150 户乡村住宅进行抽样实测和问卷调查, 得到建筑形态、构造做法和运行信息; 然后, 基于上述数据及能耗校验结果构建北方乡村住宅基准建筑信息模型.



图 2 安子上村的总平面图  
Fig. 2 Siteplan of Anzishang Village

2.1.1 建筑形态 表 1 为安子上村住宅平面类型表, 其中

L 型和 U 型住宅平面占调查农户总量的 74%. L 型和 U 型乡村住宅宅基地面积分布, 如图 3、4

表 1 安子上村住宅平面类型

Tab. 1 House type statistics of Anzishang Village

类型	L 型	U 型	一字型	二字型	回字型	H 型
数量	63	48	22	8	5	4
占比/%	42	32	14.7	5.3	3.3	2.7

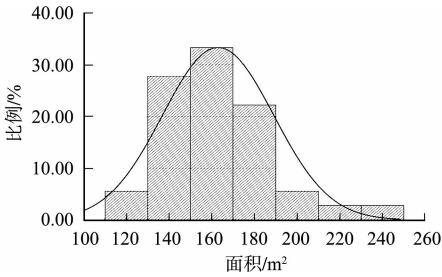


图 3 L 型乡村住宅宅基地面积分布图  
Fig. 3 Area distribution of L-shaped rural house

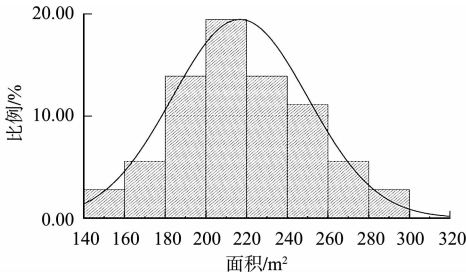
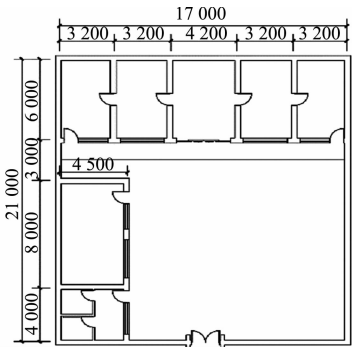
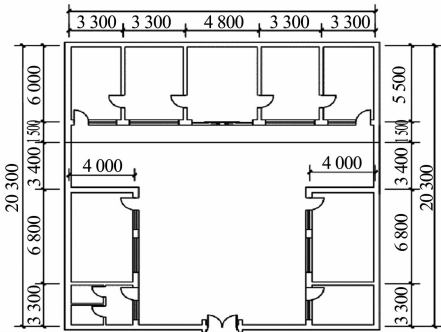


图 4 U 型乡村住宅宅基地面积分布图  
Fig. 4 Area distribution of U-shaped rural house

的 U 型乡村住宅作为基准建筑, 其平面布局及尺度分别如图 5 所示.



(a) L 型乡村住宅



(b) U 型乡村住宅

图 5 L 型和 U 型乡村住宅的平面布局及尺度(单位: mm)

Fig. 5 Layout and scale of L-shaped and U-shaped rural house (unit: mm)

2.1.2 构造做法 安子上村的住宅建设年代分布较广, 以 2000 年之后的砖木结构住宅占比最大, 结合

实测数据及 GB/T 50824—2013《农村居住建筑节能设计标准》的设计限值,基准建筑围护结构构造做法如表 2 所示.表 2 中: $k$  为传热系数.

2.1.3 运行信息 根据调研数据中位数设定人员密度、人员在室率和照明逐时使用率,其余工况参数按 GB/T 50824—2013《农村居住建筑节能设计标准》及 JGJ 26—2018《严寒和寒冷地区居住建筑节能设计标准》选取.天津地区采暖期为每年的 11 月 15 日至次年的 3 月 15 日,乡村住宅室内采暖温度设为 14℃.安子上村现已统一完成“煤改电”清洁取暖改造,采暖设备为空气源热泵冷热水机组(海尔 RFC140RXSAVA),采暖能效比为 3.2,末端形式为散热片.

此外,调研结果显示:虽然中间户乡村住宅占该村总户数的 70% 以上,但通常相邻两户农宅结构独立,且正房进深/高度、厢房布局、房屋空置率等状况均存在较大差异,导致中间户农宅与临街边户农宅的热工环境差异较小.因此,基于 EnergyPlus 软件中的热传导算法,将基准建筑能耗模型中正房及厢房的边墙设定为“外墙”,以模拟绝大多数乡村住宅最不利情况下的实际工况.

表 2 基准建筑围护结构构造做法

Tab. 2 Envelope structure of rural reference house

构件	构造(由外至内)	$k/W \cdot (m^2 \cdot K)^{-1}$
外墙	20 mm 混合砂浆+50 mm EPS 保温板+370 mm 砖墙+20mm 混合砂浆	0.65
屋面	挂瓦+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	断桥铝合金双层中空玻璃 6+12A+6	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	夹板门	2.50

2.1.4 模型校验 针对上述基准建筑原始模型信息,利用 EnergyPlus 软件进行热工模拟,得到建筑采暖、照明及热扰能耗初始模拟值.根据实测数据,对室内照明、热扰及采暖能耗进行模型校验.即首先调整照明和室内热扰设备功率,校准原始模型的照明及设备逐月能耗;然后调整人员在室率、室内换气次数和采暖系统运行时间,校准逐月建筑总能耗( $Q$ ),如图 6 所示.

模型校验完成后,通过平均偏差误差( $e_{MB}$ )和均方根误差变化系数( $R_{MSE}$ )2 个统计指标,判断模型校验的准确性.对照美国采暖、制冷与空调工程师协会标准(ASHRAE)、国际节能效果测量和验证规程(IPMVP)、美国联邦能源管理计划(FEMP)对这 2 个指标提出的不同限定(表 3),校验后的基准建筑信息模型月能耗误差  $e_{MB}$  均控制在 5% 以内(图 6 中短竖线为 5% 误差线),均方根误差变化系数为 4.67%,模拟结果可以反映乡村住宅实际运行情况.

2.2 优化变量参数设定

对北方乡村住宅形体参数进行分类研究,筛选规划及单体层面的 9 项形体参数作为优化变量,并构建数学模型.基准建筑总面积一定时,正房面宽与宅基地面宽相等,正房、厢房进深及间距等其余平面参数变量相互约束,以确保住宅平面始终位于宅基地红线范围内;基准建筑正房高 4.5 m(L 型)和 4.7 m(U 型),窗台高 0.9 m.各优化变量的取值范围及步长设定以调研数据为基础,兼顾使用功能、设计规范及量纲特性,如图 7 及表 4 所示.

2.3 优化目标函数设定

基于节能与热舒适的北方乡村住宅形体参数多目标优化研究的数学表达式为

$$\min\{f_1(x_1, x_2, \cdots, x_n), f_2(x_1, x_2, \cdots, x_n)\}.$$

(1)

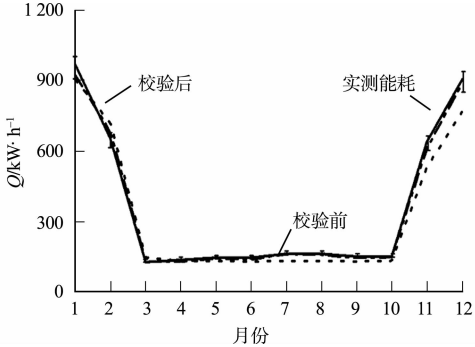


图 6 基准模型能耗校验

Fig. 6 Energy consumption calibration of rural reference house

表 3 不同标准校验可接受误差范围

Tab. 3 Acceptable error range of different standards

指标	ASHRAE	IPMVP	FEMP
$e_{MB}/\%$	$\pm 5$	$\pm 20$	$\pm 5$
$R_{MSE}/\%$	15	—	15

式(1)中： $f_1(x_1, x_2, \cdots, x_n)$ 为目标函数 1，表示单位建筑面积的采暖能耗， $\text{kW} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-2}$ ； $f_2(x_1, x_2, \cdots, x_n)$ 为目标函数 2，表示全年的热不舒适小时数，h； $x_1, x_2, \cdots, x_n$ 为形体参数优化变量。

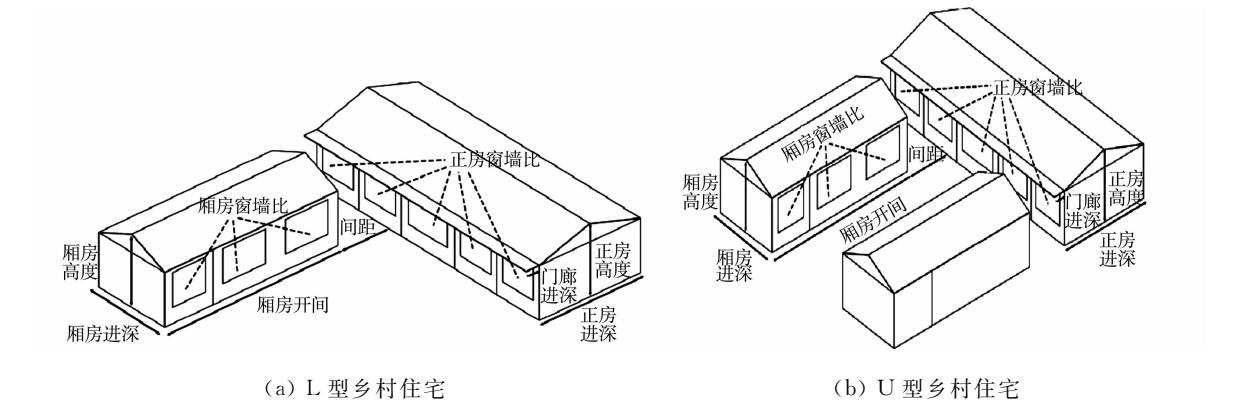


图 7 L 型和 U 型乡村住宅的优化变量

Fig. 7 Optimization variable of L-shaped and U-shaped rural house

表 4 L 型和 U 型乡村住宅的优化变量参数设定

Tab. 4 Parameter setting of optimal variables of L-shaped and U-shaped rural houses

类别	优化变量	取值范围	步长
规划布局	建筑朝向/(°)	−15~15(正南 0)	0.10
建筑单体	正房	进深/m	5.0~8.0
		窗墙比	0.25~0.65
		建筑高度/m	4.0~5.1
		挑檐进深/m	0~1.5
	厢房	正房间距/m	2.0~6.0
		进深/m	3.5~5.5
		窗墙比	0.25~0.53
		建筑高度/m	4.0~4.5

2.3.1 单位建筑面积采暖能耗 安子上村住宅夏季及过渡季人员在室率较低，室内环境以自然通风为主，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，冬季采暖能耗成为乡村住宅生活用能的首要部分。因此，以单位建筑面积采暖能耗作为北方乡村住宅的节能优化目标，其计算公式为

$$Q_C = \sum_{i=1}^n Q_{C,i} / \sum_{i=1}^n A_i.$$
 (2)

式(2)中： $Q_{C,i}$ 为各房间的采暖能耗， $\text{kW} \cdot \text{h}$ ； $A_i$ 为各房间面积， $\text{m}^2$ 。

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，我国寒冷地区 80%以上的乡村居民认为冬季室温 13~16℃，夏季不高于 30℃即为舒适<sup>[20]</sup>。因此，以 GB/T 50824—2013《农村居住建筑节能设计标准》室温设计值(冬季室温 14℃、夏季室温 30℃)作为北方乡村住宅热舒适优化目标的临界值。基准建筑全年热不舒适小时数计算公式为

$$\text{TDT} = (\sum_{i=1}^n M_{S,i} + \sum_{i=1}^n M_{W,i}) / n.$$
 (3)

式(3)中： $M_{S,i}$ 和  $M_{W,i}$ 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。

3 试验结果与分析

3.1 最优解目标性能分析

根据 EnergyPlus 模拟结果，基准建筑形体参数优化变量、单位建筑面积采暖能耗及全年热不舒适小时数初始值，如表 5 所示。表 5 中： $Q_C$  为采暖能耗； $M$  为热不舒适小时数。下同略。

基于 SPEA-2 优化算法，以最小化基准建筑冬季采暖能耗和全年热不舒适小时数为目标，设置种群数量 40 个，迭代 50 次，突变率 0.5，交叉率 0.8，综合寻优后得到 L 型、U 型乡村住宅形体参数的帕累托

解集,如图 8 所示. 表 8 中: $Q_c$  为采暖能耗; $M$  为热不舒适小时数. 下同略.

表 5 基准建筑形体参数及性能表现初始值

Tab. 5 Shape parameters and building performance of rural reference house

规划参数		正房形体参数				厢房形体参数				建筑性能表现	
类型	朝向/ (°)	正房 进深/m	正房 窗墙比	正房 高度/m	门廊 深度/m	间距 /m	厢房 进深/m	厢房 窗墙比	厢房 高度/m	$Q_c$ / $\text{kW}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-2}$	$M/\text{h}$
L 型	7.1	6.0	0.46	4.5	1.2	3.0	4.5	0.48	4.2	10.08	2 393.1
U 型	7.1	6.0	0.48	4.7	1.5	3.4	4.0	0.45	4.4	11.85	2 843.2

从图 8 可知:L 型乡村住宅帕累托解集包含 25 个最优解,U 型乡村住宅帕累托解集包含 38 个最优解;所有最优解的采暖能耗及室内热舒适表现均显著优于基准建筑性能初始值;L 型乡村住宅的采暖能耗及室内热舒适表现优于 U 型乡村住宅;冬季采暖能耗与全年热不舒适小时数变化趋势相反,即优化目标相互约束,无法同时达到最优.

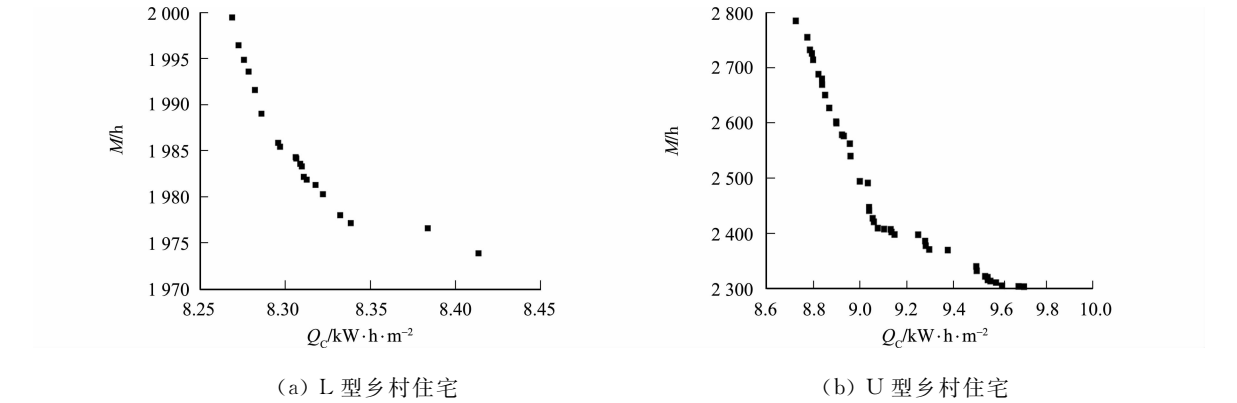


图 8 L 型和 U 型乡村住宅的帕累托解集

Fig. 8 Pareto set of L-shaped and U-shaped rural house

3.2 最优解形体参数分析

从图 8 还可知:所有落在帕累托前沿上的最优解均无差别地统计在帕累托解集中,某个最优解并不代表着比其他最优解更好. 因此,如何在这些最优解中确定最终设计方案,需要决策过程.

TOPSIS(technique for order preference by similarity to an ideal solution)综合评价法又称优劣距离法,是多目标决策分析中的一种有效方法. 应用 TOPSIS 综合评价法对冬季采暖能耗、全年热不舒适小时数两个目标函数赋权,得到不同权重下北方乡村住宅形体参数最优解及其目标性能,分别如表 6~7 和图 9 所示. 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,当单一目标函数权重为 0 或 1 时,该最优解形体参数数值并不等同于单目标优化结果.

表 6 不同权重下 L 型乡村住宅形体参数最优解

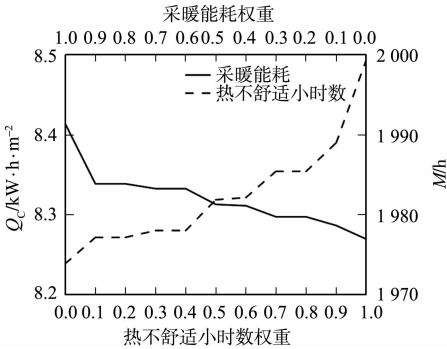
Tab. 6 Optimal solutions of L-shaped rural house with different weights

优化目标	采暖能耗 权重	角度/(°)	正房 进深/m	正房 窗墙比	正房 高度/m	门廊 深度/m	间距/m	厢房 进深/m	厢房 窗墙比	厢房 高度/m
热舒适最优	0	2.2	6.2	0.54	4.5	0.9	6.0	5.5	0.28	4.0
	0.1	2.1	6.0	0.54	4.5	0.8	5.8	5.0	0.28	4.0
热舒适优先	0.2	2.1	6.0	0.54	4.5	0.8	5.8	5.0	0.28	4.0
	0.3	2.1	6.2	0.54	4.5	1.0	6.0	5.0	0.28	4.0
	0.4	2.1	6.2	0.54	4.5	1.0	6.0	5.0	0.28	4.0
多目标均衡	0.5	2.8	5.9	0.54	4.5	0.8	6.0	5.5	0.28	4.0
	0.6	3.0	5.9	0.54	4.5	0.8	6.0	5.5	0.28	4.0
能耗优先	0.7	2.8	6.0	0.54	4.4	0.8	6.0	5.4	0.28	4.0
	0.8	2.8	6.0	0.54	4.4	0.8	6.0	5.4	0.28	4.0
	0.9	4.6	5.9	0.54	4.5	0.8	6.0	5.3	0.28	4.0
能耗最优	1.0	6.7	5.8	0.54	4.3	0.8	5.6	5.5	0.28	4.0

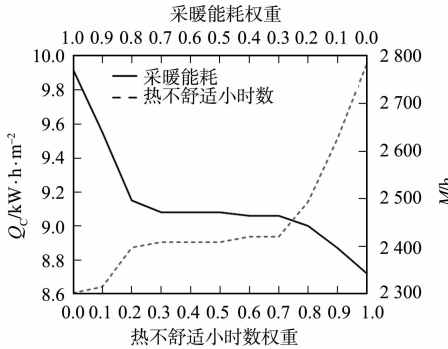
表 7 不同权重下 U 型乡村住宅形体参数最优解

Tab. 7 Optimal solutions of U-shaped rural house with different weights

优化目标	采暖能耗 权重	角度/(°)	正房 进深/m	正房 窗墙比	正房 高度/m	门廊 深度/m	间距/m	厢房 进深/m	厢房 窗墙比	厢房 高度/m
热舒适最优	0	−1.9	7.0	0.54	4.4	0.8	5.9	4.2	0.28	4.0
	0.1	1.2	6.4	0.54	4.6	0.9	6.0	5.0	0.28	4.0
热舒适优先	0.2	−3.2	6.0	0.54	4.4	1.0	6.0	5.0	0.28	4.0
	0.3	1.9	6.6	0.54	4.4	0.8	6.0	4.9	0.28	4.0
	0.4	1.9	6.6	0.54	4.4	0.8	6.0	4.9	0.28	4.0
多目标均衡	0.5	1.9	6.6	0.54	4.4	0.8	6.0	4.9	0.28	4.0
能耗优先	0.6	0.9	5.8	0.54	4.4	0.8	5.9	5.3	0.28	4.0
	0.7	0.9	5.8	0.54	4.4	0.8	5.9	5.3	0.28	4.0
	0.8	3.9	6.8	0.54	4.4	0.9	5.9	4.9	0.28	4.0
	0.9	−1.9	6.0	0.54	4.5	0.8	6.0	5.1	0.28	4.0
能耗最优	1.0	−0.5	5.8	0.54	4.3	0.8	5.4	5.5	0.28	4.0



(a) L 型乡村住宅



(b) U 型乡村住宅

图 9 不同权重下 L 型和 U 型乡村住宅的最优解目标性能

Fig. 9 Optimal solution target performance of L-shaped and U-shaped rural houses under different weights

由表 6~7 和图 9 可得到以下 2 点主要结论. 1) 从规划层面来说,北方乡村住宅基于热工性能表现的最佳朝向并非正南向;东厢房会对正房产生遮挡并增加住宅整体的体形系数,故 U 型布局的北方乡村住宅冬季采暖能耗及室内热舒适表现整体劣于 L 型布局. 2) 从单体建筑层面来说,北方乡村住宅最佳正房进深为 5.8~7.0 m,大于 GB/T 50824—2013《农村居住建筑节能设计标准》中 6 m 的建议值;过深的门廊会影响建筑冬季得热,北方乡村住宅的最佳门廊深度为 0.8~1.0 m;最优解中正房窗墙比均为取值范围的上限值,故在北方乡村住宅的设计中可适当增大正房开窗面积;最优解中厢房高度、窗墙比均落在取值范围的最小值上,由于北方乡村住宅厢房主要为厨房、卫生间、储藏间等辅助空间,所以在不影响基本功能的前提下,设计方案应尽量降低厢房高度、减小厢房窗墙比.

3.3 最终设计方案

3.3.1 L 型乡村住宅 热舒适最优、多目标均衡和采暖能耗最优的 L 型乡村住宅最终设计方案及其目标性能值,如表 8 所示. 从表 8 可知:热舒适最优方案全年热不舒适小时数为 1 973.9 h,相较于基准建筑改善 17.5%,此时冬季采暖能耗为 8.41 kW·h·m<sup>−2</sup>,节能率 16.6%;权重为 0.5 的均衡优化方案,冬季采暖能耗为 8.31 kW·h·m<sup>−2</sup>,节能率 17.6%,热不舒适小时数为 1 981.9 h,改善率 17.2%;能耗最优方案的冬季采暖能耗为 8.27 kW·h·m<sup>−2</sup>,相较于基准建筑节能 18.0%,此时全年热不舒适小时数为 1 999.4 h,改善率 16.5%.

3.3.2 U 型乡村住宅 热舒适最优、多目标均衡和采暖能耗最优的 U 型乡村住宅最终设计方案及其目标性能值,如表 9 所示. 从表 9 可知:热舒适最优方案全年热不舒适小时数为 2 302.3 h,相较于基准建筑改善 19.0%,此时冬季采暖能耗为 9.92 kW·h·m<sup>−2</sup>,节能率 16.3%;权重为 0.5 的均衡优化方案,冬季采暖能耗为 9.08 kW·h·m<sup>−2</sup>,节能率 23.4%,热不舒适小时数为 2 409.0 h,改善率 15.3%;能耗最优方案的冬季采暖能耗为 8.72 kW·h·m<sup>−2</sup>,相较于基准建筑节能 26.4%,此时全年热不舒适

小时数为 2 784.4 h,改善率 2.1%.

表 8 L 型乡村住宅最终设计方案

Tab. 8 Final schemes of L-shaped rural house

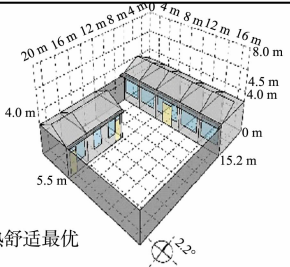
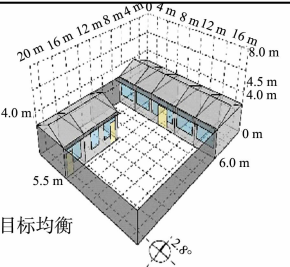
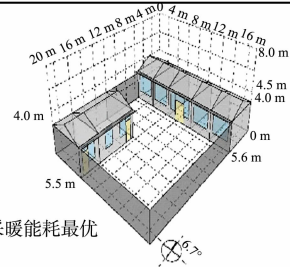
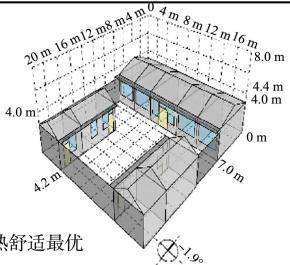
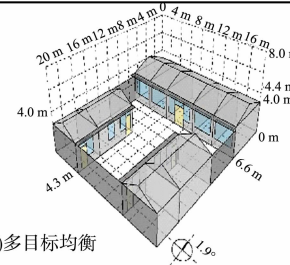
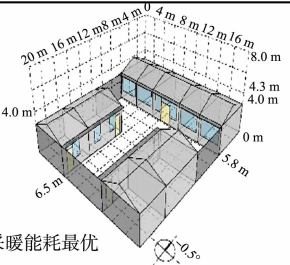
 <p>(a)热舒适最优</p>	 <p>(b)多目标均衡</p>	 <p>(c)采暖能耗最优</p>
南偏东 2.2°,正房进深 6.2 m、高 4.5 m、窗墙比 0.54、门廊深度 0.9 m,厢房进深 5.5 m、高 4.0 m、窗墙比 0.28,与正房间距 6.0 m.采暖能耗为 8.41 kW·h·m <sup>-2</sup> ;热不舒适小时数为 1 973.9 h	南偏东 2.8°,正房进深 5.9 m、高 4.5 m、窗墙比 0.54、门廊深度 0.8 m,厢房进深 5.5 m、高 4.0 m、窗墙比 0.28,与正房间距 6.0 m.采暖能耗为 8.31 kW·h·m <sup>-2</sup> ;热不舒适小时数为 1 981.9 h	南偏东 6.7°,正房进深 5.8 m、高 4.3 m、窗墙比 0.54、门廊深度 0.8 m,厢房进深 5.5 m、高 4.0 m、窗墙比 0.28,与正房间距 5.6 m.采暖能耗为 8.27 kW·h·m <sup>-2</sup> ;热不舒适小时数为 1 999.4 h

表 9 U 型乡村住宅最终设计方案

Tab. 9 Finalschemes of U-shaped rural house

 <p>(a)热舒适最优</p>	 <p>(b)多目标均衡</p>	 <p>(c)采暖能耗最优</p>
南偏西 1.9°,正房进深 7.0 m、高 4.4 m、窗墙比 0.54、门廊深度 0.8 m,厢房进深 4.2 m、高 4.0 m、窗墙比 0.28,与正房间距 5.9 m.采暖能耗为 9.92 kW·h·m <sup>-2</sup> ;热不舒适小时数为 2 302.3 h	南偏东 1.9°,正房进深 6.6 m、高 4.4 m、窗墙比 0.54、门廊深度 0.8 m,厢房进深 4.9 m、高 4.0 m、窗墙比 0.28,与正房间距 6.0 m.采暖能耗为 9.08 kW·h·m <sup>-2</sup> ;热不舒适小时数为 2 409.0 h	南偏西 0.5°,正房进深 5.8 m、高 4.3 m、窗墙比 0.54、门廊深度 0.8 m,厢房进深 5.5 m、高 4.0 m、窗墙比 0.28,与正房间距 5.4 m.采暖能耗为 8.72 kW·h·m <sup>-2</sup> ;热不舒适小时数为 2 784.4 h

4 结论

依托 Rhino-Grasshopper 可视化编程平台,以冬季采暖能耗和室内热舒适为目标,对北方乡村住宅规划及单体建筑方案设计阶段的建筑朝向、形体布局、正/厢房进深、窗墙比、建筑高度等 9 项关键性形体参数变量进行多目标优化研究,得出如下 2 点主要结论.

- 1) L 型布局的乡村住宅冬季采暖能耗及室内热舒适表现整体优于 U 型布局.与基准建筑相比,L 型乡村住宅多目标优化方案的节能率区间为 16.6%~18.0%,室内热舒适改善率为 16.5%~17.5%;U 型乡村住宅多目标优化方案的节能率区间为 16.3%~26.4%,室内热舒适改善率为 2.1%~19.0%.
- 2) 在多目标均衡情况下,L 型乡村住宅最佳朝向为南偏东 2.8°,正房进深 5.9 m、高 4.5 m、窗墙比 0.54、门廊深度 0.8 m,厢房进深 5.5 m、高 4.0 m、窗墙比 0.28、距正房 6.0 m;而 U 型乡村住宅最佳朝向为南偏东 1.9°,正房进深 6.6 m、高 4.4 m、窗墙比 0.54、门廊深度 0.8 m,厢房进深 4.9 m、高 4.0 m、窗墙比 0.28、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:中国工业出版社,2020.

[2] 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. DOI:10.15986/j.1006-7930.2011.04.021.



- [3] ROBERTS B C,WEBBER M E,EZEKOYE O A. Development of a multi-objective optimization tool for selecting thermal insulation materials in sustainable designs[J]. *Energy and Buildings*,2015,105:358-367. DOI:10.1016/j.enbuild.2015.07.063.
- [4] KARAGUZEL O T,ZHANG Rongpeng,LAM K P. Coupling of whole-building energy simulation and multi-dimensional numerical optimization for minimizing the life cycle costs of office buildings[J]. *Building Simulation*,2014,7(2):111-121. DOI:10.1007/s12273-013-0128-5.
- [5] ASCIONE F,BIANCO N,DE MASI R F,*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. DOI:10.3390/su70810809.
- [6] DELGARM N,SAJADI B,DELGARM S. Multi-objective optimization of building energy performance and indoor thermal comfort: A new method using artificial bee colony (ABC)[J]. *Energy and Buildings*,2016(131):42-53. DOI:10.1016/j.enbuild.2016.09.003.
- [7] 喻伟,王迪,李百战. 居住建筑室内热环境低能耗营造的多目标设计方法[J]. *土木建筑与环境工程*,2016,38(4):13-19. DOI:CNKI:SUN:JIAN.0.2016-04-003.
- [8] 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. DOI:CNKI:SUN:HNLG.0.2018-04-015.
- [9] 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. DOI:10.13614/j.cnki.11-1962/tu.2019.12.15.
- [10] YANG Hongwei,LIU Li,LI Xiaojun,*et al.* Tailored domestic retrofit decision making towards integrated performance targets in Tianjin, China[J]. *Energy and Buildings*,2017(140):480-500. DOI:10.1016/j.enbuild.2016.12.040.
- [11] SHI Xing,YANG Wenjie. Performance-driven architectural design and optimization technique from a perspective of architects[J]. *Automation in Construction*,2013,32(7):125-135. DOI:10.1016/j.autcon.2013.01.015.
- [12] NEGENDAHL K,NIELSEN T R. Building energy optimization in the early design stages: A simplified method[J]. *Energy and Buildings*,2015(105):88-99. DOI:10.1016/j.enbuild.2015.06.087.
- [13] YU Wei,LI Baizhan,JIA Hongyuan,*et al.* Application of multi-objective genetic algorithm to optimize energy efficiency and thermal comfort in building design[J]. *Energy and Buildings*,2015(88):135-143. DOI:10.1016/j.enbuild.2014.11.063.
- [14] ZHANG Longwei,ZHANG Lingling,WANG Yuetao. Shape optimization of free-form buildings based on solar radiation gain and space efficiency using a multi-objective genetic algorithm in the severe cold zones of China[J]. *Solar Energy*,2016(132):38-50. DOI:10.1016/j.solener.2016.02.053.
- [15] 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. DOI:10.1016/j.solener.2019.09.091.
- [16] GOU Shaoqing,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. DOI:10.1016/j.enbuild.2017.09.095.
- [17] CHIANDUSSI G,CODEGONE M,FERRERO S,*et al.* Comparison of multi-objective optimization methodologies for engineering applications[J]. *Computers and Mathematics with Applications*,2012(63):912-942. DOI:10.1016/j.camwa.2011.11.057.
- [18] ZITZLER E,LAUMANN M,Thiele L. SPEA2: Improving the strength Pareto evolutionary algorithm[R]. Zurich:Computer Engineering and Networks Laboratory (TIK),2001. DOI:10.3929/ethz-a-004284029.
- [19] 天津市城市规划设计研究院. 天津市乡村规划编制技术要求(修订)[S]. 天津:天津市规划局,2017.
- [20] 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. 农村居住建筑节能设计标准:GB/T 50824—2013[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2013.

(责任编辑:黄仲一 英文审校:方德平)