

## 基于多目标导向的寒冷地区农村住宅节能设计参数优化研究

邵 腾<sup>1</sup>, 赵丽华<sup>2</sup>

<sup>1</sup>西北工业大学力学与土木建筑学院 陕西西安

<sup>2</sup>南京优佳建筑设计有限公司 江苏南京

**【摘要】**农村住宅节能对于节约能源、保护环境具有重要意义,但在片面追求能耗降低的同时会导致室内热舒适性差和初投资成本高等问题,需要考虑多维目标相互作用对节能设计参数确定的影响。本文整合性能模拟技术、支持向量机建模、多目标遗传算法优化和多属性决策方法,提出以机器学习和优化算法为核心,协同优化建筑能耗、室内热舒适和初投资成本的建筑多目标优化设计流程及方法。以中国寒冷地区乡村住宅为例对设计流程进行应用分析,将建筑朝向、南向和北向外窗宽度及传热系数、各朝向外墙及屋面保温层厚度、冬季采暖设计温度作为优化变量,通过运算得出包括设计变量及优化目标值的 Pareto 非支配解集,并提出考虑节能性、综合性、经济性三种不同需求的设计模式,该方法可为寒冷地区农村住宅节能优化设计提供参考。

**【关键词】**寒冷地区;农村住宅;节能设计参数;多目标优化

**【基金项目】**教育部人文社会科学研究一般项目(编号:20YJC760081)、陕西省自然科学基金基础研究计划项目(编号:2022JQ-549)、陕西省社会科学基金年度项目(编号:2022J009)

**【收稿日期】**2023年4月12日

**【出刊日期】**2023年5月14日

### Optimization of energy-saving design parameters for rural houses in cold regions oriented by multi-objective

Teng Shao<sup>1</sup>, Lihua Zhao<sup>2</sup>

<sup>1</sup>School of Mechanics, Civil Engineering and Architecture, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, Shaanxi

<sup>2</sup>Nanjing U+ Architectural Design CO., LTD, Nanjing, Jiangsu

**【Abstract】** Energy saving in rural houses is of great significance for energy conservation and environmental protection, but the one-sided pursuit of energy consumption reduction will lead to poor indoor thermal comfort and high initial investment cost. It is necessary to consider the influence of multi-objective interaction on the determination of energy conservation design parameters. By integrating the performance simulation technology, support vector machine modeling, multi-objective genetic algorithm optimization and multi-attribute decision method, this paper proposes a multi-objective optimization design process and method for collaborative optimization building energy consumption, indoor thermal comfort and initial investment cost with machine learning and optimization algorithm as the core. Taking a rural house in cold areas of China as an example, the design process is applied and analyzed. The building orientation, south and north exterior windows width and heat transfer coefficient, insulation layer thickness of exterior wall and roof, and heating design temperature in winter are taken as optimization variables. The Pareto non-dominated solution including design variables and optimization objective values is obtained through calculation, thus the design patterns considering three different requirements of energy saving, comprehensiveness and economy are proposed, which can provide reference for the energy-saving optimization design of rural houses in cold regions.

**【Keywords】** Cold regions; Rural houses; Energy-saving design parameters; Multi-objective optimization

### 1 引言

根据《中国建筑节能年度发展研究报告 2021》显示, 2019 年农村住宅运行的商品能耗 2.22 亿吨标准煤、生物质能耗 0.9 亿吨标准煤, 占全国民用建筑总能耗的 28.1%<sup>[1]</sup>。乡村住宅节能是提高能源使用效率、减少碳排放的重要手段。但一味的追求能耗降低, 必然会对室内环境及经济性产生影响, 多目标之间的交互性和矛盾性, 增加了建筑节能优化设计的复杂性, 如在降低能耗的同时, 会使室内热舒适性降低和投资成本增加。而在建筑方案阶段完成节能设计参数优化尤为重要, 国际能源组织 ANNEX 30 研究表明, 40% 以上的建筑节能潜力来自方案阶段, 该阶段处于整个建筑设计过程的初期, 随着设计进程的推进, 建筑节能的可优化余地越来越小, 而达到相同收益的投入成本则越来越高, 方案阶段的决策对于建筑运行过程中的节能性具有决定作用。

针对建筑节能设计参数优化中的多目标、多变量的问题, 人工寻优或常规的模拟评价方法耗时长且无法保证最优解质量。本文整合性能模拟、支持向量机建模、多目标遗传算法优化和多属性决策方法, 提出以机器学习和优化算法为核心的多目标优化设计流程及方法; 进而以西安市农村独立式住宅为载体进行设计流程应用分析, 为寒冷地区农村住宅节能优化设计提供参考。

### 2 多目标优化设计流程与方法

以机器学习和优化算法为核心的多目标优化设计流程, 如图 1 所示, 该方法包括集成建筑本体与环境信息、确定优化目标及设计变量、建立建筑多目标预测模型、耦合预测模型并执行运算、构建节能优化的设计模式五个模块。

#### 2.1 集成建筑本体与环境信息

建筑本体与环境信息集成是优化设计的前处理模块, 包括: ①集成建筑本体参数, 包括几何空间参数: 建筑朝向、建筑体型、空间布局 and 细部尺度等; 构造材料参数: 外墙、屋面、地面和门窗的构造做法、材料及价格等; 设备运行参数: 采暖/制冷设备运行模式、照明和其它电器设备功率及运行情

况; 人员特征参数: 室内人员密度、服装热阻、新陈代谢率; 室内环境参数: 室内设计温度、换气次数。②结合建筑所在地区的典型年气象数据集成室外环境参数, 作为性能模拟的边界条件。③根据集成的建筑本体参数和室外环境参数, 采用性能模拟软件建立建筑信息模型。

#### 2.2 确定优化目标及设计变量

根据建筑方案阶段的节能设计需求, 优化目标包括建筑能耗、热舒适指标 (PPD 或热不舒适小时数) 和初投资成本等。约束条件为自然采光设计评价指标中的采光系数, 需要满足《GB 50033 建筑采光设计标准》中对各类型建筑的规定。根据确定的优化目标, 从集成的建筑本体参数中选择影响优化目标的设计参数作为优化变量, 并限定每个优化变量的取值范围。该范围可根据实际需求及现行国家和地方建筑节能设计标准确定。

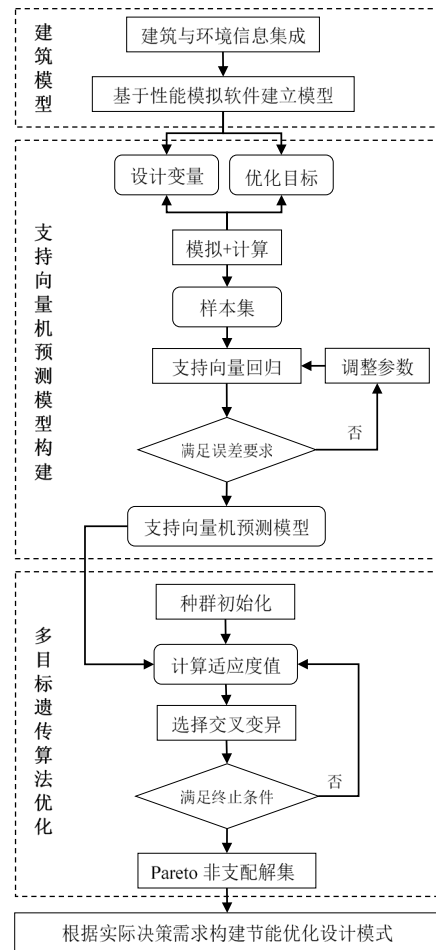


图 1 建筑节能设计参数优化流程

### 2.3 建立建筑多目标预测模型

通过数据集成、处理、训练及模型评价, 建立多目标预测模型, 实现各目标同步和高效预测。该过程以支持向量机 (SVM) 为核心, 该算法是一种基于结构风险最小化原理的机器学习技术, 能较好解决小样本、非线性、高维数和局部最优等问题, 具有良好的泛化能力<sup>[2]</sup>, 包括: ①数据集成。基于建立的建筑信息模型和确定的优化设计变量, 运用性能模拟软件进行“设计变量-优化目标”的映射数据收集, 形成样本数据集, 按照一定比例将其随机分割为训练集和测试集两部分。②数据处理。对获取的样本数据集进行归一化处理, 消除设计变量和优化目标之间的量纲影响。③数据训练。SVM 的类型选取  $\epsilon$ -SVR, 并确定核函数类型及参数组合, 基于确定的优化目标 and 设计变量, 完成对训练集样本数据的学习, 生成各优化目标关于优化设计变量的支持向量机预测模型。④模型评价。采用样本测试集检测生成的支持向量机预测模型, 以均方误差 (MSE) 和决定系数  $R^2$  作为评价指标来评估模型的准确性, MSE 的计算公式如下:

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_{true} - y_{prediction})^2$$

式中:  $n$  为测试集样本的个数,  $y_{true}$  为真实值,  $y_{prediction}$  为预测值。

### 2.4 耦合预测模型并执行运算

运用多目标优化算法耦合预测模型进行参数寻优, 该过程以多目标遗传算法 (NSGA-II) 为核心, 该算法具有运行速度快、解集收敛性好等优点, 常被用来寻求多目标优化问题的 Pareto 解集, 在建筑领域的应用逐渐增加<sup>[3]</sup>。通过设置种群大小、最大迭代次数、交叉概率、变异概率、优化变量数量及阈值等参数, 调用 SVM 预测模型的输出结果作为适应度函数值, 对每个方案的优化目标进行评价和迭代计算, 直到满足收敛条件或达到预先设置的最大迭代次数停止。然后, 将运算结果输出到 MATLAB 工作空间, 提取 Pareto 非支配解集, 该解集包括设计变量取值及对应的优化目标值。

### 2.5 构建节能优化的设计模式

根据实际决策需求, 采用多属性决策方法确定三个优化目标的权重, 并运用加权和法<sup>[4]</sup>计算优化目标的标准化值, 将多标准优化问题转换为标量问题, 计算公式如下。根据优化目标的标准化值对 Pareto 非支配解集中的各方案进行排序, 确定最优节能设计模式。

$$F = w_1 \frac{f_1(x) - f_1(x)_{min}}{f_1(x)_{max} - f_1(x)_{min}} + w_2 \frac{f_2(x) - f_2(x)_{min}}{f_2(x)_{max} - f_2(x)_{min}} + w_3 \frac{f_i(x) - f_i(x)_{min}}{f_i(x)_{max} - f_i(x)_{min}}$$

式中:  $F$  为各优化目标的标准化值,  $f(x)$  为各优化目标值,  $f(x)_{max}$  为各优化目标值中最大值,  $f(x)_{min}$  为各优化目标值中最小值,  $W$  为各优化目标权重值。

## 3 寒冷地区农村住宅节能设计应用分析

### 3.1 建筑本体与环境参数

本文以西安地区单层独立式农村住宅为例对设计流程进行分析。建筑长、宽、高分别为 12 m、8.4 m、3.0 m, 功能包括客厅、卧室、餐厅、厨房、储藏间、卫生间; 南向和北向外窗高度 1.6 m, 外门尺度 1.0 m×2.5 m。外墙从外到内的基本构造为“20 mm 水泥砂浆+XPS 保温板+15 mm 水泥砂浆+240 mm 实心砖墙+20 mm 混合砂浆”, 屋面从外到内的基本构造为“40 mm 细石混凝土保护层+XPS 保温板+防水层+20 mm 水泥砂浆+100 mm 钢筋混凝土楼板+20 mm 混合砂浆”, 地面从内到外的基本构造为“面层+40 mm 细石混凝土+100 mm 素混凝土垫层+素土夯实”。

选择西安地区的典型年气象数据作为模拟的室外计算参数。西安属于寒冷地区, 冬季供暖时间设置为 11 月 15 日-翌年 3 月 15 日, 起居采暖设备运行时间为 7: 00-12: 00 和 14: 00-21: 00, 卧室采暖设备运行时间为 12: 00-14: 00 和 21: 00-7: 00, 换气次数为 0.5 h<sup>-1</sup><sup>[5]</sup>; 照明功率密度设定为 5.0 W/m<sup>2</sup>, 忽略其它使用率较低的非采暖设备的散热。室内人员密度为 0.05 人/m<sup>2</sup>, 冬季平均服装热阻为 1.4 clo, 新陈代谢率为 0.9<sup>[6]</sup>。

结合建筑本体参数和室外计算参数, 采用 Energy Plus 软件建立农村住宅模型 (图 2) 并设置

相关参数。该软件由美国能源部和劳伦斯·伯克利国家实验室共同开发, 可在建筑设计任何阶段进行性能预测与评估, 且通过了美国采暖、制冷与空调工程师学会标准中采用程序间结果对比法对模拟结果的可靠性评测<sup>[7]</sup>。

### 3.2 优化目标与设计变量

本文以建筑能耗(EC)、PPD 和初投资成本(IC)作为优化目标, 建筑能耗以单位建筑面积采暖能耗作为指标, 单位: kWh/m<sup>2</sup>, 该值由 Energy Plus 模拟软件直接输出。采用 PPD 评价室内热舒适性, 由于不同房间的采暖状况不同, 以各房间供暖期的 PPD 平均值表示, 单位: %, 同样由 Energy Plus 软件直接输出。初投资成本主要考虑增设保温材料、外窗更新等节能设计产生的成本增量, 以单位建筑面积投资成本表示, 单位: 元/m<sup>2</sup>。

结合建筑能耗影响因素的分析<sup>[8]</sup>和设定的优化

目标, 选择的优化设计变量包括: 建筑朝向、南向向外窗宽度和北向外窗宽度(外窗尺度的阈值下限满足采光标准要求)、南向向外窗传热系数、北向外窗传热系数、各朝向外墙保温层厚度、屋面保温层厚度和冬季采暖设计温度 11 个, 其符号、单位、取值范围如表 1 所示。

### 3.3 SVM 多目标预测模型

根据确定的优化目标 and 设计变量, 模型的输入项为建筑朝向、南向和北向外窗宽度、南向和北向外窗传热系数、各朝向外墙保温层厚度、屋面保温层厚度、冬季采暖设计温度 11 个变量, 输出值为建筑能耗、PPD、初投资成本。运用 Energy Plus 软件对生成的 1000 组设计方案进行建筑能耗和 PPD 仿真模拟, 并计算各方案的初投资成本, 形成样本数据集, 按照 8: 2 的比例将其分割, 800 组数据用于训练预测模型, 200 组数据检验模型的准确性。

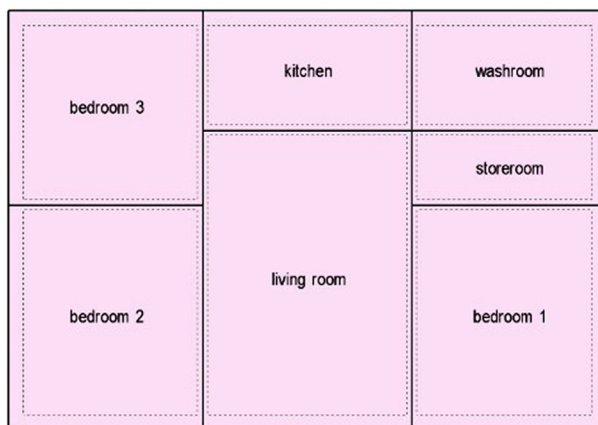


图 2 EnergyPlus 模型平面图<sup>[6]</sup>

表 1 优化设计变量的相关参数设置

名称	符号	类型	变化区间	步长
建筑朝向 (°)	BO	连续变量	[-60, 60]	10
南向向外窗宽度 (m)	SWW	连续变量	[1.8, 2.7]	0.1
北向外窗宽度 (m)	NWW	连续变量	[1.5, 2.1]	0.1
南向向外窗传热系数 (W/m <sup>2</sup> ·K)	SWHTC	连续变量	[1.2, 2.8]	0.1
北向外窗传热系数 (W/m <sup>2</sup> ·K)	NWHTC	连续变量	[1.2, 2.5]	0.1
南向外墙保温层厚度 (m)	SWIT	连续变量	[0.04, 0.25]	0.01
北向外墙保温层厚度 (m)	NWIT	连续变量	[0.04, 0.25]	0.01
东向外墙保温层厚度 (m)	EWIT	连续变量	[0.04, 0.25]	0.01
西向外墙保温层厚度 (m)	WWIT	连续变量	[0.04, 0.25]	0.01
屋面保温层厚度 (m)	RIT	连续变量	[0.06, 0.25]	0.01
冬季采暖设计温度 (°C)	HDT	连续变量	[14, 18]	0.1

基于 MATLAB 平台编写 SVM 算法程序, 核函数的类型选取 RBF 径向基函数, 利用交叉验证方法寻找最佳参数  $c$  (惩罚因子) 和参数  $g$  (RBF 核函数中的方差)。通过 800 组数据的训练学习, 生成各优化目标关于设计变量的 SVM 模型, 并应用测试集检验模型的准确性。三个目标的预测值与测试集中优化目标真实值的对比结果, 如图 3 所示, 建筑能耗:  $MSE=0.00027$ 、 $R^2=0.999$ , PPD:  $MSE=0.00056$ 、 $R^2=0.998$ , 初投资成本:  $MSE=0.00039$ ,  $R^2=0.998$ , 模型的预测结果精确度满足要求。

### 3.4 NSGA-II 多目标算法优化

基于 MATLAB 平台编写多目标遗传算法 (NSGA-II) 程序与 SVM 预测模型耦合, 基本参数设置如下: 种群大小 100、最大迭代次数 1000、交叉概率 0.9、变异概率 0.01。通过算法的迭代运算得出 Pareto 非支配解集, 并绘制成三维散点图, 如图 4 所示, 该解集包括 88 组优化设计变量及对应的优

化目标值。在三个性能导向下, 各目标都让设计参数朝自身最优的方向发展, 从而形成凹向坐标原点的曲面。在目标数值分布方面, 建筑能耗分布于  $15.8 \text{ kWh/m}^2 \sim 51.1 \text{ kWh/m}^2$ , 最大差值  $35.3 \text{ kWh/m}^2$ ; PPD 变化范围为  $6.8\% \sim 11.1\%$ , 最大差值  $4.3\%$ ; 初投资成本分布于  $124.6 \text{ 元/m}^2 \sim 249.7 \text{ 元/m}^2$ , 最大差值  $125.1 \text{ 元/m}^2$ 。

### 3.5 节能优化设计模式

Pareto 非支配解集中的各个解是无法直接判断其优劣的, 需要根据不同的决策需求判别最优节能设计方案。本文选择 3 种工况进行对比分析, 即: EC、PPD 和 IC 的权重值分别设定为:  $0.5/0.3/0.2$  (工况 1)、 $0.33/0.33/0.33$  (工况 2) 和  $0.2/0.3/0.5$  (工况 3)。基于得出的 88 组设计方案, 采用加权和计算公式得出各工况优化目标的标准值, 从而筛选出最优节能设计模式, 各设计变量及对应的目标值如表 2 所示。

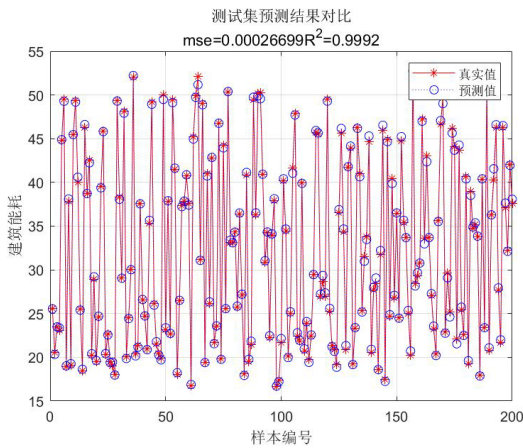


图 3 (a) 建筑能耗测试集预测结果对比

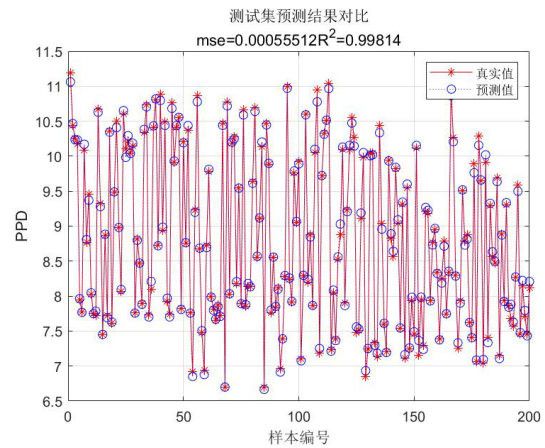


图 3 (b) PPD 测试集预测结果对比

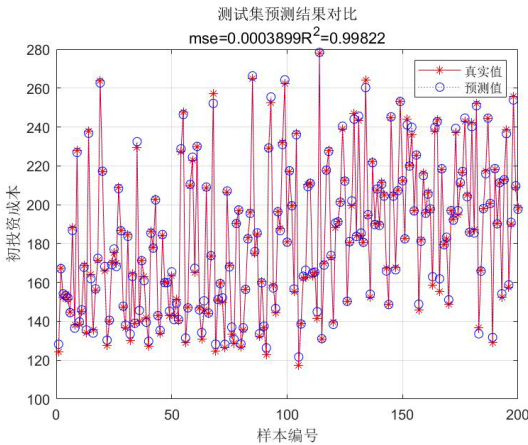


图 3 (c) 初投资成本测试集预测结果对比

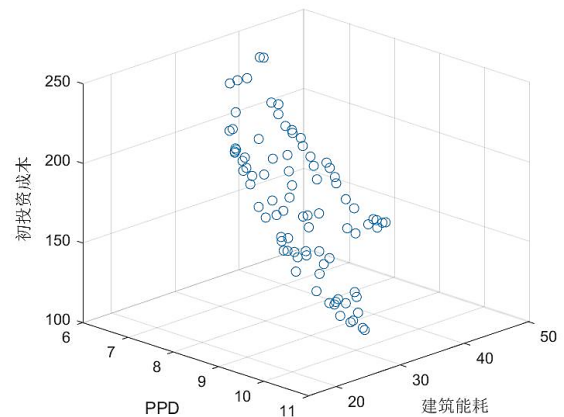


图 4 NSGA-II 算法输出的 Pareto 非支配解集

表 2 三种工况的最优节能设计模式

优化变量	工况 1	工况 2	工况 3
BO	25	24	24
SWW	2.5	2.4	2.3
NWW	2	2.1	2.1
SWHTC	1.9	2.4	2.7
NWHTC	1.8	2.1	2.3
SWIT	0.15	0.1	0.08
NWIT	0.15	0.15	0.1
EWIT	0.17	0.12	0.06
WWIT	0.13	0.12	0.08
RIT	0.17	0.12	0.06
HDT	14.3	16.6	16.8
EC	18.6	36.2	42.3
PPD	9.6	8.5	8.0
IC	195.4	154.7	125.6

从表 2 可以看出, 工况 1 侧重于农村住宅节能效果, 建筑能耗较低, 室内热舒适性和初投资成本有所损失。该工况冬季采暖设计温度为 14.3℃, 且围护结构热工性能较高, 因而使 PPD 和初投资成本较高。

工况 3 从使用者的角度出发, 倾向于经济性更佳, 初投资成本较低, 建筑能耗有所增加, PPD 和冬季采暖设计温度关联性较大, 此时设计温度为 16.8℃, 较工况 1 提升了 2.5℃, 室内热环境有所改善。

工况 2 从综合性角度考量, 三个目标值介于工况 1 和工况 3 之间。实际应用过程中不局限于这三种工况, 可根据具体需求或某个设计参数的限制条件, 在 Pareto 非支配解决中选择设计方案。

#### 4 结论

本文引入机器学习和优化算法等方法, 基于多目标导向提出了建筑节能设计参数优化流程, 并以寒冷地区农村住宅为例进行了应用分析, 得出兼顾建筑能耗、PPD 和初投资成本三个目标的 Pareto 非支配解集。在此基础上, 根据不同的决策需求, 确定了侧重节能性、综合性和经济性的三种节能设计模式, 与传统的单目标优化相比, 考虑多目标权衡得出的节能设计参数值不会因某个目标过优而导致其他目标很差, 且可为农村住宅节能设计决策提供更多的可能性。

#### 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 2021 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2021.
- [2] Yan H., Zhang J., Rahman S.S. et al. Predicting permeability changes with injecting CO<sub>2</sub> in coal seams during CO<sub>2</sub> geological sequestration: A comparative study among six SVM-based hybrid models [J]. *Science of the Total Environment*, 2020,705:135941.1-9.
- [3] Attia S., Hamdy M., O'Brien W. et al. Assessing gaps and needs for integrating building performance optimization tools in net zero energy buildings design [J]. *Energy and Buildings*, 2013, 60(4): 110-124.
- [4] 王东生, 李本庆. 管理运筹学 [M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2015.
- [5] 中国建筑科学研究院. GB/T 50824-2013 农村居住建筑节能设计标准 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [6] Teng Shao, Wuxing Zheng, Xinxin Li et al. Multi-Objective Optimization Design for Rural Houses in Western Zones of China [J]. *Architectural Science Review*, 2022, 65(4): 260-277.
- [7] ASHRAE. Standard 140-2007, Standard Method of Test for the Evaluation of Building Energy Analysis Computer Programs [J]. *American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers*, Atlanta, GA. 2007.
- [8] 邵腾. 东北严寒地区乡村民居节能优化研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学博士学位论文, 2018.

版权声明: ©2023 作者与开放科学出版研究中心 (OSPRC) 所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS