

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2023.015



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



寒冷地区模块化钢框架结构多目标优化设计方法

苗茹云, 黄轶森, 董威, 张玉芬, 马国伟
(河北工业大学土木与交通学院, 天津 300401)

摘要:针对寒冷地区模块化钢框架结构节能性与经济性之间的矛盾问题,对模块化钢框架结构能耗和成本两个设计目标进行同步优化研究。根据模块化钢框架结构的特点进行参数化设计研究,提出在不同建筑尺寸下模块化钢框架结构的BIM模型自动建模方法;在Energyplus建筑能耗分析软件计算数据的基础上,采用多种机器学习算法进行建筑能耗预测,建立一种高效精确的建筑能耗预测模型;联立建筑能耗预测模型和建筑成本计算公式,在满足结构承载力的约束条件下,基于NSGA-II算法进行模块化钢框架结构能耗和成本的多目标优化设计,生成帕累托最优解集。多目标优化设计方法解决了模块化钢框架结构“能耗+成本”的多目标一体化设计难题,推动了模块化钢框架结构的智能化升级,实现了模块化钢框架结构设计的快速高效化。

关键词:钢框架结构;参数化建模;建筑能耗预测;机器学习;多目标优化设计

中图分类号:TU391 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2024)01-0152-11

Multi-objective optimization design method of modular steel frame structure in cold regions

MIAO Ruyun, HUANG Yimiao, DONG Wei, ZHANG Yufen, MA Guowei

(School of Civil and Transportation Engineering; Hebei University of Technology, Tianjin 300401, P. R. China)

Abstract: This paper aims at solving the contradictive design problem of the modular steel frame structure in cold regions considering both energy- and cost- saving. A synchronous optimization study with energy consumption and cost objectives is hence carried out for target modular steel frame structures. Parametric modeling of modular steel frame structures is studied according to their characteristics. An automatic BIM modeling method is developed for modular steel frame structures. The building energy consumption is modeled using various machine learning algorithms based on the database constructed from the Energyplus software. The proposed XGBoost model provides efficient and accurate predictions for the building energy consumption. The energy consumption model as well as the cost formula serve as the objective functions in NSGA-II algorithm to build the design optimization program. During optimization, structural bearing capacity must be satisfied. Pareto solution set is then achieved by the developed program and analyzed. By solving the multi-objective design problem of modular steel frame structures with advanced computing techniques, this study contributes to the intelligent upgrade of the modular steel frame structure industry, and realizes its rapid and efficient design.

收稿日期:2022-10-25

基金项目:国家自然科学基金(52078179)

作者简介:苗茹云(1997-),女,主要从事土木工程智能建造研究,E-mail:810363138@qq.com。

黄轶森(通信作者),男,教授,博士生导师,E-mail:yimiao.huang@hebut.edu.cn。

Received: 2022-10-25

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 52078179)

Author brief: MIAO Ruyun (1997-), main research interest: intelligent construction, E-mail: 810363138@qq.com.

HUANG Yimiao (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: yimiao.huang@hebut.edu.cn.

Keywords: steel frame structure; parametric modeling; building energy consumption prediction; machine learning; multi-objective optimization design

近年来,钢结构模块化建筑体系装配单元的模块化和标准化特征在住宅建设中呈现出显著的优势,建筑结构的模块化是建筑工业化高级阶段的标志^[1]。模块化建筑前期结构设计阶段是决定建筑性能的重要阶段,但是同时考虑多个设计目标时如何确定最佳的结构参数并无有效的解决方案。众多学者将自动化建模、节点连接、模块连接等采用 BIM 技术进行分析与设计^[2-5],提供合理的建筑设计策略和方法^[6-8],但是在模块化钢框架结构布置中并未充分考虑建筑总长、建筑总宽、建筑层数、梁尺寸和柱尺寸的影响,并没有参数化设计和多目标优化的计算设计平台和集成结构-能耗-成本为一体的参数化优化方案,即参数化设计在模块化钢框架结构多目标优化设计中并未形成完善的设计体系。

另一方面,建筑运行能耗占中国能源消耗总量的 30% 以上,为了推动如期实现“145 计划”中规划的碳达峰和碳中和目标,建筑结构设计除了安全稳定性能验算外,针对寒冷地区,还应考虑结构对应的建筑能耗。但建筑材料越优质,成本越高,能耗越小,所以降低建筑成本和降低建筑能耗设计目标之间往往相互冲突,尚无有效的研究解决这一多目标优化设计问题,导致设计方案难以满足市场既节能又经济的期望。建筑围护结构对建筑能耗的优化研究已经较为成熟^[9-11]。目前以 Energyplus 为主的建筑能耗计算软件使用流程复杂,难以与其他结构设计环节联动,因此,需要建立更加高效易用的建筑能耗预测计算方法。在建筑能耗预测相关领域已经有了初步的研究进展,主要包括回归预测^[12]、时间序列负荷预测^[13-14]和人工神经网络预测^[15]等,面对建筑能耗预测技术朝着准确率高、计算速度快、实时性强的方向发展的趋势,笔者拟采用先进的机器学习技术解决这一问题。

对于建筑结构的优化设计已有相关学者做出了初步研究,大多基于梯度优化或通过改变加权系数的方式得到多目标函数最优解集^[16-17],以及将元启发式算法应用于结构优化设计中^[18-20],但针对寒冷地区模块化钢框架结构,现有的多目标优化设计并没有集成参数化设计和能耗预测模型的优化设计方案,对寒冷地区模块化钢框架结构的成本和能耗的研究还有所欠缺。笔者针对寒冷地区高能耗、高成本的建筑设计问题,基于模块化钢框架结构的特点优化建筑钢结构参数,在满足承载力要求的前提下,寻求单位面积建筑成本和单位面积建筑能耗的最优平衡。

1 模块化钢框架结构参数化建模方法

采用一种典型的模块化钢框架结构——联肢模块化钢框架结构作为案例进行参数化建模,该建筑主要由 3 部分组成,如图 1 所示。参数化建模方法通过 Dynamo 可视化编程模块实现,生成逻辑更加准确的联肢模块化钢框架结构 BIM 模型,避免了重复的建模工作,同时为嵌入多目标优化设计计算提供环境。

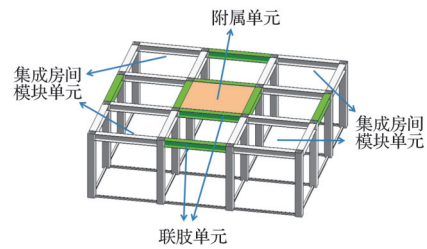


图 1 联肢模块化钢框架结构

Fig. 1 The coupled modular steel frame structure

1.1 参数化模型自动生成逻辑

在联肢模块化钢框架结构中,要求集成房间模块单元的每个模块宽度限制在 3.6 m 以内,且长度与宽度均以模数化为原则进行设计,最终以标准化、工厂化的箱型模块单元呈现。集成房间模块单元的规格如表 1 所示。

表 1 集成房间模块单元规格表

Table 1 Specifications of integrated room module unit

集成房间模块单元名称	外部尺寸/mm		
	长度	宽度	高度
SM-3333	3 300	3 300	3 000
SM-3336	3 600	3 300	3 000
SM-3344	4 400	3 300	3 000
SM-3636	3 600	3 600	3 000
SM-3644	4 400	3 600	3 000

联肢模块化钢框架结构的组拼过程如图 2 所示。首先,以单个房间或特定的建筑功能区将建筑平面划分成若干矩形区块的组合;其次,遵循由四角、周边向中间布置的原则,将集成房间模块单元优先布置在建筑平面的四角矩形区块位置,然后在相邻的集成房间模块单元之间布置联肢单元;最后,组拼其他附属单元,包括在模块区和联肢区之外的矩形区块上填补安装集成楼板,使该层楼板形成完整的平面结构。对于多层联肢模块化钢框架结构房屋,可按照上述方法进行各层各单元的布置与组拼,直至完成整栋联肢模块化钢框架结构的装配。

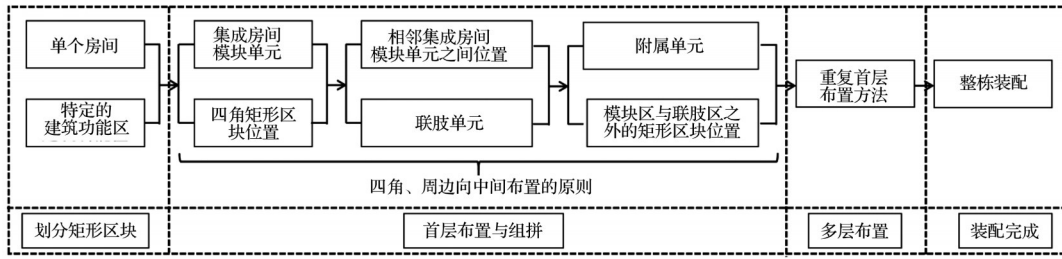


图 2 联肢模块化钢框架结构的组拼过程

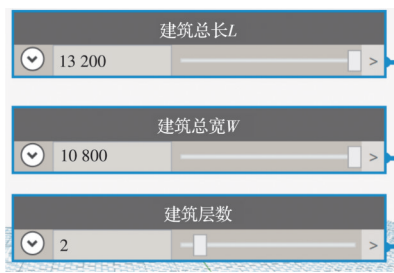
Fig. 2 The assembling process of the coupled modular steel frame structure

1.2 BIM 参数化建模流程

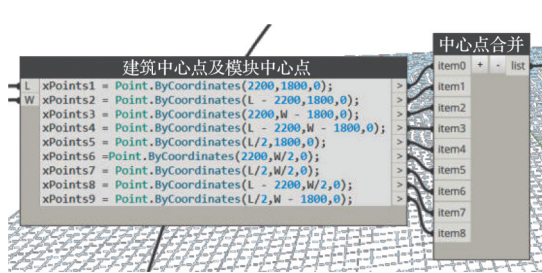
参数化建模的目的是根据建筑总长、建筑总宽以及层数等信息、集成房间模块单元的尺寸、联肢单元的尺寸范围和集成楼板单元的形状特性等条

件自动生成符合特定目标的联肢模块化钢框架结构。

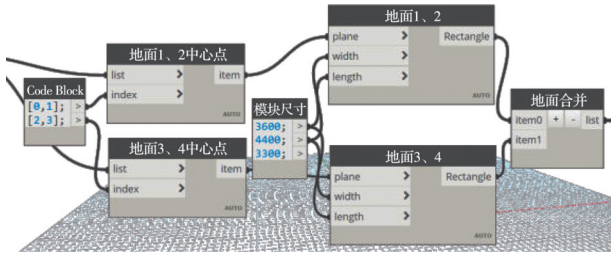
联肢模块化钢框架结构采用 Dynamo 建模, 模块化程序如图 3 所示, 建模流程如图 4 所示。首先



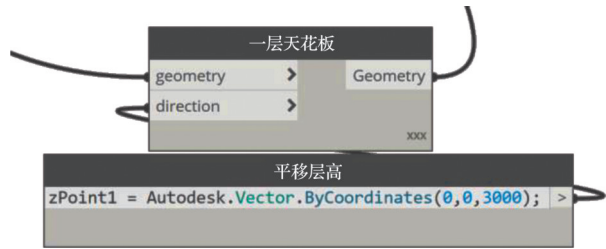
(a) 建筑基本信息



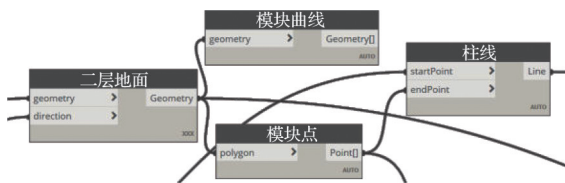
(b) 集成房间模块单元中心点



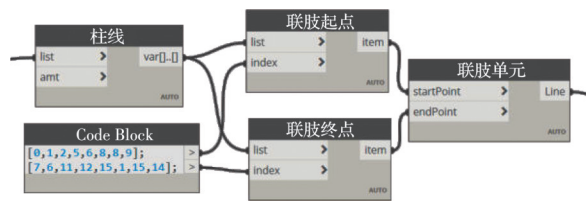
(c) 集成房间模块单元地面位置



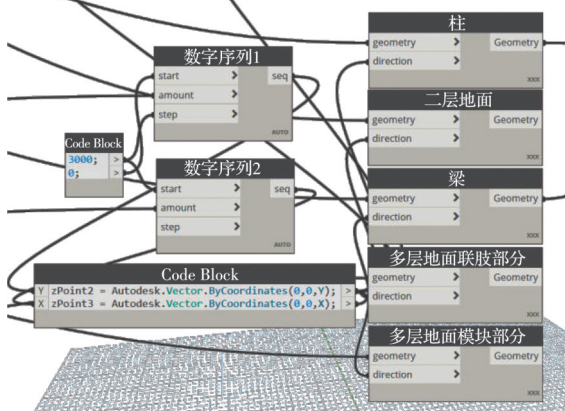
(d) 集成房间模块单元天花板位置



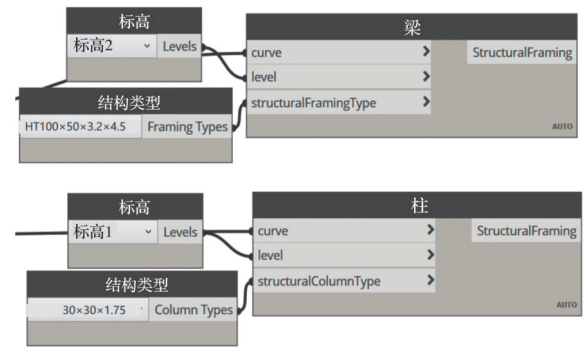
(e) 集成房间模块单元柱线



(f) 联肢单元



(g) 多层柱、梁、地面



(h) 梁、柱构件信息

图 3 联肢模块化钢框架结构参数化建模可视化程序

Fig. 3 The parametric modeling program for the coupled modular steel frame structure

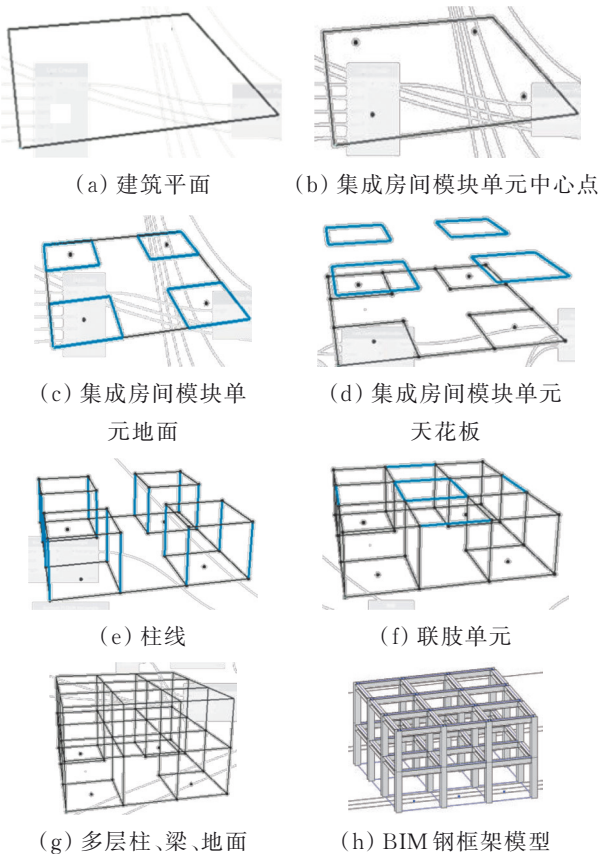


图 4 联肢模块化钢框架结构参数化建模流程示意图

Fig. 4 Schematic of the parametric modeling process of the coupled modular steel frame structure

按照建筑总长、建筑总宽及层数等确定模块化钢框架结构的生成顺序,通过数值可调节 block 模块,形成建筑平面,如图 3(a)及图 4(a)所示。建筑平面确定后可确定集成房间模块单元中心点的位置,如图 3(b)及图 4(b)所示。结合集成房间模块单元的长宽尺寸,确定集成房间模块单元的地面位置,如图 3(c)及图 4(c)所示。然后将集成房间模块单元的地面向上平移一个楼层高度,形成集成房间模块单元的天花板,如图 3(d)及图 4(d)所示。将地面和天花板的矩形分解为点元素和线元素,将角点的坐标分为开始组和结束组,在此基础上形成模块的柱线,如图 3(e)及图 4(e)所示。天花板的矩形分解出点元素和线元素,将相邻模块之间的角点分为开始组和结束组,将相邻模块之间的角点进行连接形成联肢单元,如图 3(f)及图 4(f)所示。将所有底层模块按模块的高度向上移动,形成上层模块,如图 3(g)

及图 4(g)所示。最后将梁柱赋予材料构件信息,钢结构的三维网格模型会在 Revit 中自动建模,如图 3(h)及图 4(h)所示。

2 基于机器学习的建筑能耗计算预测模型

为了实现考虑建筑能耗控制的结构尺寸优化设计,应用机器学习方法建立建筑能耗预测模型,结合 Energyplus 以实际工程案例为对象,数据库组成是实际案例的建筑能耗数据,通过多种机器学习算法完成建筑能耗的预测,对比分析后得到一种高效可靠的建筑能耗预测方法。

2.1 机器学习模型

用于建立机器学习模型的数据库来源于多层模块化装配式钢结构建筑关键技术项目,该项目位于河北省邢台市,主体结构为 2 层钢框架结构。该建筑的三维模型及热区分布图如图 5 所示。由于建筑的能耗是多种因素影响的结果,考虑建筑在建造阶段的建筑材料参数对建筑总能耗的影响,分别研究了外墙保温层厚、屋面保温层厚、地面保温层厚、东朝向窗墙比、西朝向窗墙比、南朝向窗墙比、北向窗墙比及外窗传热系数对建筑能耗的影响,最终计算获得共 1 120 组建筑能耗模拟数据,各建筑材料参数如表 2 所示,均符合《河北省居住建筑节能标准》中规定的外围护结构热工系数的限值标准。

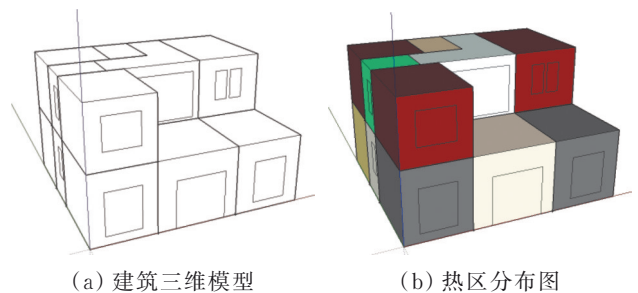


图 5 数据库模型示意图

Fig. 5 Schematic of the database model

利用机器学习算法对数据库进行训练,机器学习建模流程如图 6 所示,为保证模型训练的精度和鲁棒性,在保留原数据集特征的基础上进行特征归一化和外窗类型传热系数取值等特征工程处理,接

表 2 各材料参数取值范围

Table 2 Value range of each material parameter

外墙保温层厚/m	屋面保温层厚/m	地面保温层厚/m	东向窗墙比
[0.080,0.150]	[0.060,0.130]	[0.005,0.070]	[0.075,0.300]
南向窗墙比	西向窗墙比	北向窗墙比	外窗传热系数
[0.200,0.450]	[0.075,0.300]	[0.100,0.250]	{0.540,0.650,0.800,0.900,0.950,1.000}

着按照 7:3 的比例将数据库划分成训练数据集和测试数据集,然后将训练数据集输入至机器学习算法中进行建筑能耗模型建模,期间采用 K-fold(K 取 5)交叉验证和网格检索的方式进行算法的超参数调优,调优的目标函数是数据集的均方误差(MSE),模型训练结束后采用平均绝对误差(MAE)和决定系数 R^2 作为机器学习模型的精度性能评价指标。通常不

同的机器学习模型适合不同的数据挖掘任务,使用多种机器学习算法对建筑能耗数据库进行建模,通过对比不同算法在该任务上的表现,选择出最合适的预测模型。选取的 6 种机器学习算法为:XGBoost 算法(XGBoost)、Gradient Boosting 算法(GBR)、随机森林算法(RFR)、Extra Trees 算法(ETR)、高斯过程算法(GPR)和 K 近邻回归算法(KNN)。

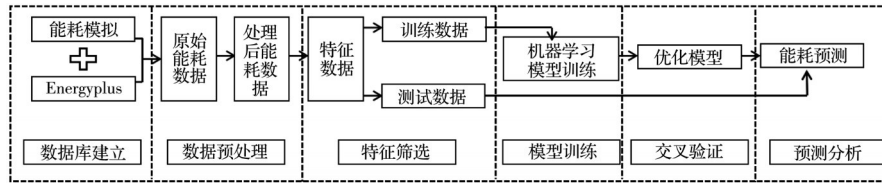


图 6 机器学习建模流程

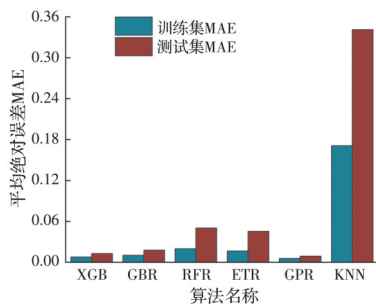
Fig. 6 Machine learning modeling process

2.2 结果分析

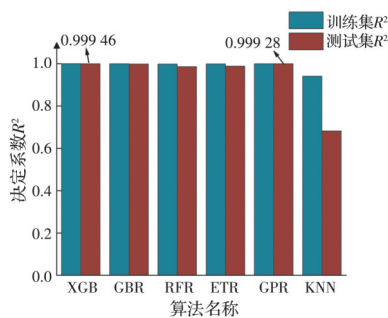
如图 7 所示,对比 6 种机器学习算法模型应用于训练集和测试集后的评价指标(平均绝对误差 MAE 和决定系数 R^2)可知,除 KNN 回归算法外,其余 5 种算法均体现出较好的预测能力。其中 XGBoost 模型和高斯过程模型有更好的离散性(更低的 MAE),XGBoost 模型的 R^2 为 0.999 46,高斯过程模型的 R^2 为 0.999 28,即 XGBoost 模型又拥有更好的预测精度(更高的 R^2),最终确定 XGBoost 模型作为建筑能耗计算模型。

此外,可以通过绘制 XGBoost 模型作用于训练

集和测试集后的计算值与数值解的散点图直观了解 XGBoost 的预测性能。如图 8 所示,以 $y=x$ 作为参照标准,散点高度贴近参考线,表明该模型对于建筑能耗的预测能力非常好。



(a) 6 种机器学习算法平均绝对误差的比较



(b) 6 种机器学习算法决定系数的比较

图 7 6 种机器学习算法比较

Fig. 7 Comparison of six machine learning estimators

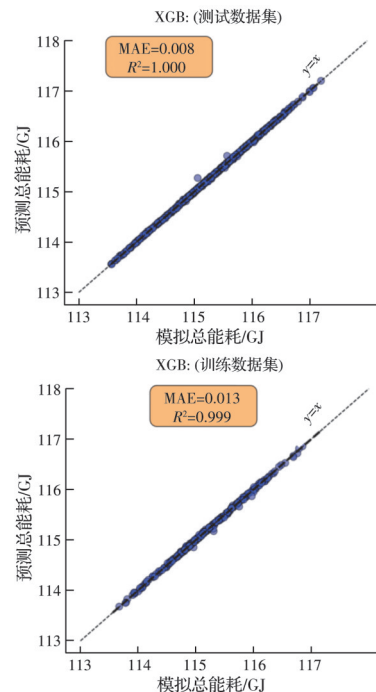


图 8 XGBoost 散点图

Fig.8 Scatter plot by the predicted and observed results

通过统计 XGBoost 模型训练过程中各个特征的贡献值,定量分析各特征对建筑能耗计算的重要性,如图 9 所示。显然外墙保温层厚度(T_w)和屋面保温层厚度(T_r)是影响建筑总能耗最重要的两个变量,其次是地面保温层厚度(T_g)、外窗传热系数(K)、南向窗墙比(R_s),而东向窗墙比(R_e)、西向窗墙比(R_w)、北向窗墙比(R_n)对建筑能耗的重要性程度不大。

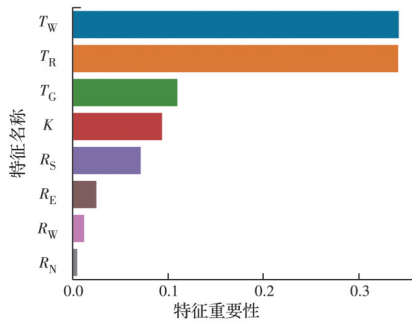


图 9 XGBoost算法模型预测变量的重要性分析

Fig. 9 Importance ranking of different features on the XGBoost model

3 考虑建筑成本和建筑能耗的多目标优化设计

研究的钢框架结构中,柱采用方钢管截面柱,梁选用热轧H型钢。在BIM参数化模型中,需要优化设计的参数包括建筑总长、建筑总宽、层数、柱尺寸、梁尺寸以及外围护结构参数,为了保证优化的客观性,以单位面积建筑成本和单位面积建筑能耗作为优化的目标函数,分别构造成本和能耗计算目标函数。

图10为基于NSGA-II算法的模块化钢框架结构多目标优化设计程序流程图。模块化钢框架结构的成本和能耗双目标问题模型建立完成并确定优化参数的取值范围之后,对优化参数进行编码,生成初始种群且设置进化代数 $Gen=1$,若生成第1代子种群,则 $Gen=2$,否则将对初始种群进行选择、交叉、变异操作,然后将父代种群与子代种群合并生成新种群。若新种群生成,则计算其个体的目标

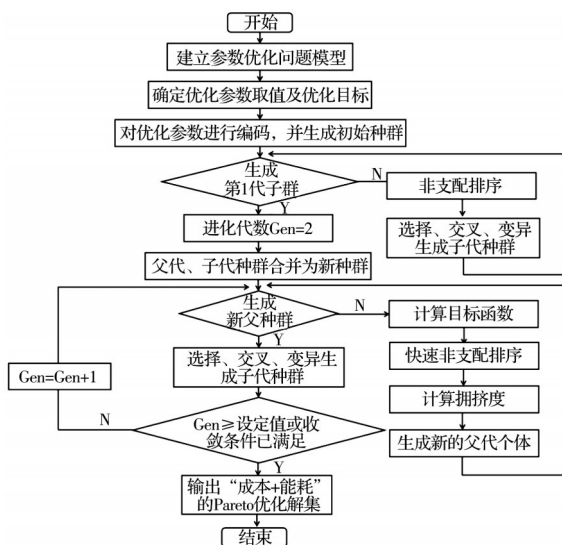


图 10 基于NSGA-II的模块化钢框架结构多目标优化程序流程图

Fig. 10 Flow chart of the NSGA-II-based multi-objective optimization program for the modular steel frame structure

函数结果,并执行非支配排序、拥挤度计算等操作,否则对新种群执行遗传操作。如果 $Gen \geq$ 设定值或达到收敛条件,算法结束,否则将从父代与子代合并成新种群循环计算,最后输出“成本+能耗”的Pareto最优解集^[21]。

3.1 多目标优化设计程序

3.1.1 目标函数

以单位面积建筑成本和单位面积建筑能耗作为模块化钢框架结构多目标优化设计的优化目标,在结构安全稳定的前提下提高建筑的经济性与节能性。二者的计算模型如式(1)、式(2)所示。

$$C(x) = C_{RB} / (L \cdot W \cdot N) \quad (1)$$

$$E(x) = E_{MO} / (L \cdot W \cdot N) \quad (2)$$

式中: C 为单位面积建筑成本; C_{RB} 为居住建筑成本; L 为建筑总长; W 为建筑总宽; N 为建筑总层数; E 为单位面积建筑能耗, E_{MO} 为多目标优化的建筑总能耗,计算方法为基于机器学习算法建立的建筑能耗预测模型。

在1层、2层结构上均已考虑建筑总长、建筑总宽、建筑层数对建筑能耗的影响,且2层结构的建筑能耗与1层结构的建筑能耗呈线性关系,已转化成体形系数与建筑能耗的比例对应关系,充分考虑建筑总长、建筑总宽、建筑层数对建筑能耗的影响。采取相应换算得到优化后的建筑能耗,换算公式如式(3)所示。

$$\frac{S_{ML}}{E_{ML}} = \frac{S_{MO}}{E_{MO}} \quad (3)$$

式中: S_{ML} 、 S_{MO} 为机器学习和多目标优化结果的建筑体形系数,计算方式为建筑外表面积与所包围体积的比值, E_{ML} 、 E_{MO} 为机器学习和多目标优化的建筑能耗。

计算过程中,已将建筑总长、建筑总宽、建筑层数通过换算式(3)中的建筑体形系数 S 体现,均已考虑建筑表面积及体积对建筑能耗的影响,即已考虑建筑总长、建筑总宽、建筑层数对建筑能耗的影响,针对建筑体形系数不满足《严寒和寒冷地区居住建筑节能设计标准》的,均已采取屋顶和外墙两种采暖住宅外围护结构传热系数限值标准,机器学习训练得到的模型可以应用于多层结构中进行建筑能耗预测。且在多目标优化过程中目标函数已换算为单位面积建筑成本与单位面积建筑能耗,消除了额外建筑参数的影响。通过以上两种计算手段,已充分考虑到建筑总长、建筑总宽及建筑层数对建筑能耗的影响,所以机器学习预测的建筑能耗函数,可以应用于多目标优化过程中的建筑能耗计算,预

测合理可靠。

居住建筑的经济费用主要包括居住建筑的外保温材料、外窗、外墙基体、热回收的新风系统、热泵系统和空调系统的初投资,而建筑建造阶段和拆除阶段产生的费用与本研究的对象无直接关系,因此计算时不予考虑。居住建筑经济费用按式(4)计算。

$$C_{RB} = C_{FW} + (C_W + C_R + C_{EW} + C_G) + C_S + C_{SF} \quad (4)$$

式中: C_{FW} 为基础墙体成本; C_W 为窗户成本; C_R 为屋面保温成本; C_{EW} 为外墙保温成本; C_G 为地面保温成本; C_S 为系统成本; C_{SF} 为钢框架成本。

3.1.2 约束条件

根据《建筑与市政工程抗震通用规范》(GB 55002—2021)、《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012)及相关地质资料,考虑恒荷载、活荷载、风荷载和地震荷载4种荷载工况以及荷载组合。结构计算的约束条件在多目标优化程序中通过自编译的函数计算得到,具体荷载情况见表3。

表3 荷载情况

Table 3 Loading conditions

荷载	楼面/(kN/m ²)	天花板/(kN/m ²)	梁上荷载/(kN/m ²)
恒载	3	1.0	3
活载	2	0.5	0

根据《建筑结构可靠性设计统一标准》(GB 50068—2018),其中恒荷载放大系数取1.3,活荷载取1.5,重力荷载放大系数取1.2。

模块化钢框架结构需要根据《钢结构设计规范》(GB 50017—2017)验算压弯构件(柱)和受弯构件(梁)的强度、刚度、稳定性等重要指标,所有要求满足的前提下,认为构件安全可靠。优化过程中,具体结构安全性约束指标见表4,在表4中的第1项

表4 优化模型约束条件

Table 4 The constraint conditions for the optimization program

编号	表达式	说明
1	$\sigma_{b1} = \frac{M_{br}}{\gamma_x W_{br}} \leq f$	钢梁强度约束
2	$\sigma_{c1} = \frac{N_c}{A_c} + \frac{M_{cr}}{\gamma_x W_{cr}} \leq f$	钢柱强度约束
3	$v_b \leq [v_b] = I_b/400$	钢梁的挠度控制
4	$\lambda_{cr} = l_{cr}/i_{cr} \leq [\lambda]$	钢柱长细比控制
5	$\sigma_{c2} = \frac{N_c}{\phi_x A_c} + \frac{\beta_{mr} M_{cr}}{\gamma_x W_{clr} (1 - 0.8 N_c / N_{Ex1})} \leq f$	平面内稳定性
6	$\sigma_{c3} = \frac{N_c}{\phi_y A_c} + \eta \frac{\beta_{lr} M_{cr}}{\phi_b W_{clr}} \leq f$	平面外稳定性

和第2项约束了钢梁、钢柱的强度要求,第3项考虑了钢梁的挠度控制,第4项考虑了钢柱的长细比要求,在表4第5项和第6项中分别控制稳定性要求。

表4中: M_{br} 、 M_{cr} 分别为梁、柱截面绕 x 轴的弯矩设计值,根据建筑所承受荷载及建筑尺寸计算可得; N_c 为柱轴向力设计值,可根据建筑所承受荷载及建筑尺寸计算得到; W_{br} 、 W_{cr} 分别为梁、柱截面抵抗矩; f 为钢材抗压和抗弯的强度设计值,可根据热轧H型钢尺寸规格表及方钢管截面柱的特性表得到; λ 为构件的最大长细比; i_{cr} 为柱在 x 方向的截面最小回转半径; β_{mr} 、 β_{lr} 分别为平面内和平面外的稳定验算等效弯矩系数。

3.1.3 设计变量

将机器学习模型作为多目标优化设计过程中的能耗计算目标函数,由于多目标优化设计的优化目标是单位面积建筑成本和单位面积建筑能耗,所以在多目标优化过程中的设计变量包括建筑总长、建筑总宽、建筑层数、梁尺寸、柱尺寸、外墙保温层厚、屋面保温层厚、地面保温层厚、东向窗墙比、西向窗墙比、南向窗墙比、北向窗墙比、外窗传热系数13个设计变量。设计变量、变量类型及其取值范围如表5所示。在多目标优化计算过程中,可以指定输入能耗计算模型中的变量,与多目标优化的设计变量并不冲突。

为了保证建筑尺寸的合理性及现场装配的效率,结合集成房间模块单元的尺寸约束及建筑装配的合理性,将联肢单元长方向尺寸范围规定为[3.3, 4.4] m,联肢单元的宽方向尺寸范围规定为[3.3, 3.6] m,建筑总长的范围为[9.9, 13.2] m,建筑总宽的范围为[9.9, 10.8] m,根据国办发[2005]26号文件中对普通标准住宅的规定,住宅的建筑面积在120 m²以下,目前大多数地方普通住宅面积标准都在120 m²的基础上上浮了20%,即实际执行144 m²的普通住宅,即普通住宅的建筑面积在144 m²以内,所以在建筑总长和建筑总宽的范围下,建筑面积符合普通住宅的标准。另外,也可将建筑总长、建筑总宽、建筑层数3个参数固定,为已知建筑基本尺寸信息做建筑成本和建筑能耗的多目标优化设计,可以为建筑设计提供前期设计方案。

3.2 优化过程及结果分析

在利用NSGA-II优化设计的过程中,将种群数量设置为200,采样方式选取随机抽样,迭代次数设置为200。

表 5 多目标优化设计变量及取值范围

Table 5 Multi-objective optimization design variables and corresponding value ranges

设计变量	变量类型	取值范围
建筑总长 L/m	连续变量	[9.9,13.2]
建筑总宽 W/m	连续变量	[9.9,10.8]
建筑层数 N	离散变量	[1,6]
柱尺寸	离散变量	《方钢管截面柱的特性表》中的柱尺寸
梁尺寸	离散变量	《GB/T 11263—2017》中热轧 H 型钢尺寸规格表的梁尺寸
外墙保温层厚 T_w/m	连续变量	[0.080,0.150]
屋面保温层厚 T_R/m	连续变量	[0.060,0.130]
地面保温层厚 T_G/m	连续变量	[0.005,0.070]
东向窗墙比 R_E	连续变量	[0.075,0.300]
南向窗墙比 R_S	连续变量	[0.200,0.450]
西向窗墙比 R_W	连续变量	[0.075,0.300]
北向窗墙比 R_N	连续变量	[0.100,0.250]
外窗传热系数 K	离散变量	{0.540,0.650,0.800,0.900,0.950,1.000}

最终程序收敛获得 67 个优化方案。优化方案组成 Pareto 前沿曲线,如图 11 所示。就单个目标而言, B 点为横轴方向上最靠近原点的方案,即 B 点对应的方案为单位面积建筑成本优化最为明显的方案,达到最小值 1 092.66 元/m²,单位面积建筑能耗为 24.97 GJ/m²。 C 点为纵轴方向上最接近原点的点,即 C 点对应的方案为单位面积建筑能耗最小的方案,达到最小值 24.54 GJ/m²,单位面积建筑成本为 1 122.17 元/m²。双目标综合最优解所依据的是基于距离选择的优劣解距离法(TOPSIS)^[22],计算方法如式(5)~式(7)所示,该方法选择两个解,分别是负理想解(目标值最差的点)与正理想解(目标值最好的点),Pareto 中的解与正理想解的距离越近,

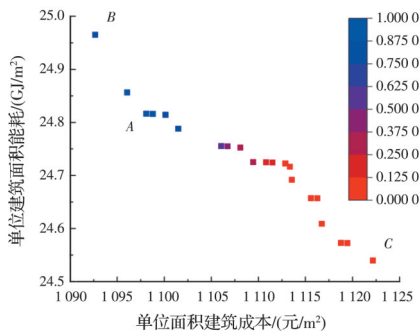


图 11 Pareto 解集前沿分布图

Fig. 11 Pareto front distribution

与负理想解的距离越远,则认为该解对应的设计方案越优。利用接近系数来精确反映各个设计方案之间的综合距离差,接近系数的最大值为双目标综合最优的解。计算接近系数可得, A 点为 C_i 最高的解,即 A 点对应的方案是双目标综合最优方案,单位面积建筑成本优化为 1 098.10 元/m²,单位面积建筑能耗为 24.82 GJ/m²。单位面积建筑成本在 1 092.66~1 122.17 元/m²之间,单位面积建筑能耗在 24.54~24.97 GJ/m²之间。

$$d_{i+} = \sqrt{\sum_{j=1}^2 (F_{ij} - F_j^+)^2} \quad (5)$$

$$d_{i-} = \sqrt{\sum_{j=1}^2 (F_{ij} - F_j^-)^2} \quad (6)$$

$$C_i = \frac{d_{i-}}{d_{i+} + d_{i-}} \quad (7)$$

式中: d_{i+} 、 d_{i-} 分别为评价对象与正、负理想解之间的距离; F_{j+} 、 F_{j-} 分别为单目标优化问题中的第 j 个理想目标值与非理想目标值; C_i 为接近系数。

由图 11 可以看出,模块化钢框架结构设计参数的不同取值组合会产生不同的单位面积建筑成本与单位面积建筑能耗的指标值,并且两个目标值之间存在此消彼长的互斥性。原因为模块化钢框架结构的材料性能越优质,单位面积建筑能耗越小,相应的单位面积建筑成本越高。

根据得到的 Pareto 最优解集方案,计算最优解集中各设计参数值的分布频率,如图 12 所示,用以研究最优解集中设计参数的取值规律。

由图 12 可以看出,对于模块化钢框架结构,除了外墙保温层厚和屋面保温层厚,其余参数在优化搜索范围内存在最优值,其中柱尺寸集中在边长 30 mm、壁厚 1.75 mm 的方钢管截面柱,梁尺寸集中在 HT100×50×3.2×4.5×8 的热轧 H 型钢,东向、西向、南向、北向窗墙比的最优值分别为 0.075、0.075、0.2、0.1。

不同方案对应的单位面积建筑成本和单位面积建筑能耗的变化取决于外墙保温层厚和屋面保温层厚,厚度较大的保温层可以减少单位面积建筑能耗,但同时也会加大单位面积建筑成本。

多目标优化计算程序会封装在参数化建模流程中的可编程模块 Python script 中,可以通过选择 Pareto 解集中的方案,直接生成对应的 BIM 模型。选择 Pareto 解集中双目标综合最优的点,所生成对

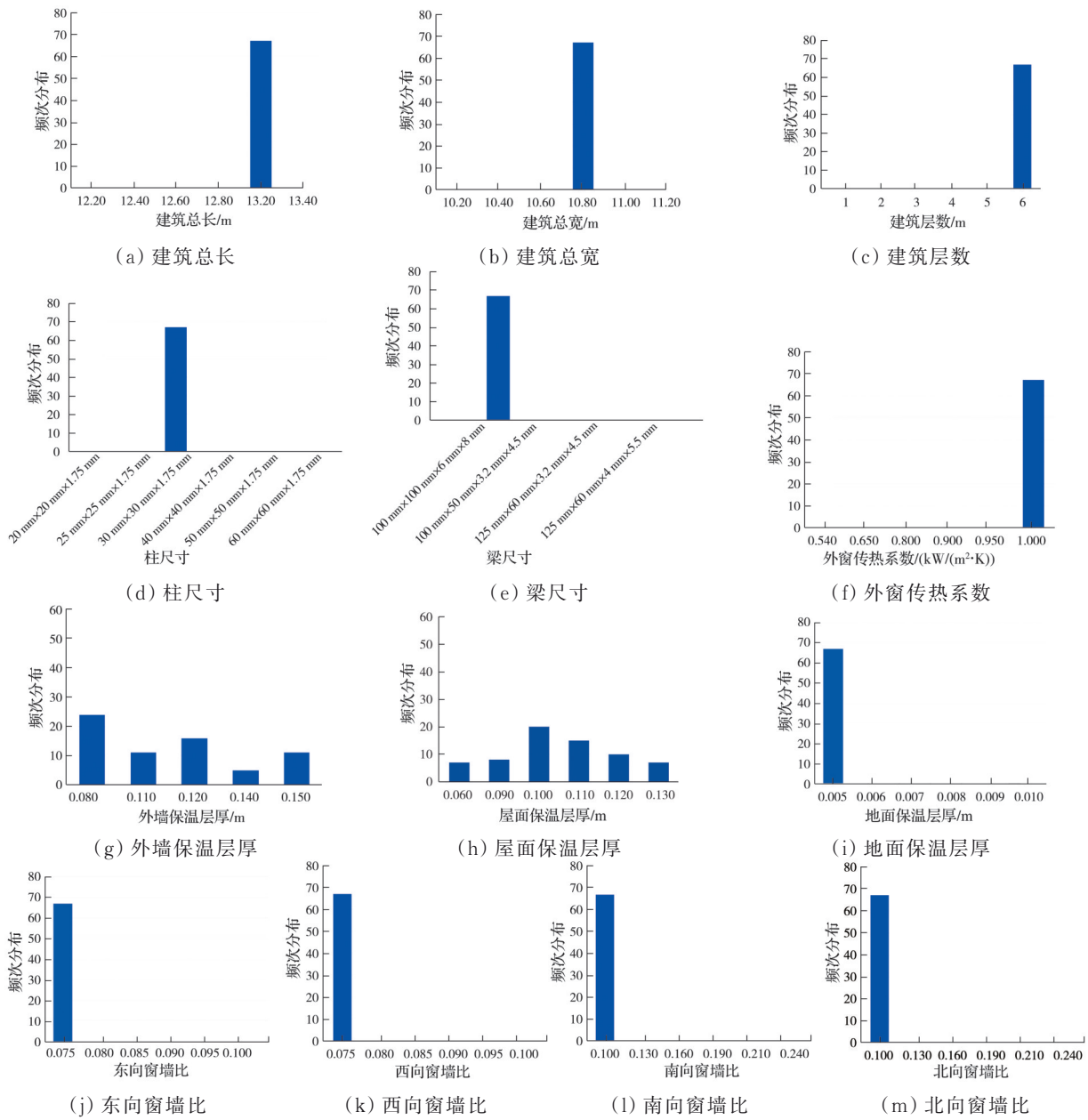


图 12 模块化钢框架结构各设计参数的取值在 Pareto 最优方案集中的频次分布

Fig. 12 The frequency distribution of each design parameter of the modular steel frame structure in Pareto optimal solutions set

应的 BIM 模型如图 13 所示。

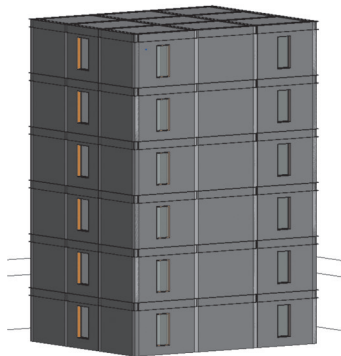


图 13 双目标综合最优点的 BIM 模型(包含钢结构和保温层)
Fig. 13 BIM model with the best dual-objective design solution (including steel structures and insulation layers)

4 结论

针对寒冷地区模块化钢框架结构,基于参数化建模方案提出了一种在满足结构安全性的前提下实现成本与能耗的多目标自动优化的设计方法;通过对比多种机器学习算法,建立了基于 XGBoost 的建筑能耗高效预测模型;再将建筑能耗预测模型和居住建筑经济费用计算公式换算成单位面积结果作为目标函数,通过非支配排序遗传算法,在结构安全规范条件约束下,进行钢结构的多目标优化计算,优化对象为建筑总长、建筑总宽、层数、梁柱尺寸、外围护结构材料参数等。优化结果表明:除了外墙保温层厚和屋面保温层厚,其余参数在优化搜

索范围内均存在最优值,说明外墙保温层厚和屋面保温层厚是影响目标函数计算结果的主要影响因素,这与基于 XGBoost 建筑能耗预测模型的特征重要性分析得到的结论一致。对优化解集根据适合的方法和需求择优,最终的优化方案可以通过建立的参数化建模流程自动生成相应的 BIM 模型。将建筑结构参数化设计和建筑能耗核算相结合,实现模块化钢框架结构设计阶段节能、结构与成本的统一,最终形成一套符合模块化钢框架结构既经济又节能的最优方案集,为交叉学科参数化设计、能耗预测及多目标优化设计在建筑领域的应用提供方法和指导。设计师可根据业主的实际需求选择不同目标函数值对应的建筑结构设计参数,也可根据确定的建筑基本信息(建筑总长、建筑总宽、建筑层数)选择低成本、低能耗的建筑设计方案。后续研究可尝试加入有限元验算或增加能耗影响因素来增大数据库进一步增强多目标优化设计的可靠性,同时强化参数化建模过程中设计计算的集成度,更深入地推动模块化钢框架结构的发展与应用。

参考文献

- [1] WANG H, ZHAO X, MA G W. Novel coupled modular steel structure and seismic tests on high-performance interconnection [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2022, 189: 107058.
- [2] 陈志华, 周子栋, 刘佳迪, 等. 多层钢结构模块建筑结构设计与分析[J]. *建筑结构*, 2019, 49(16): 59-64, 18.
CHEN Z H, ZHOU Z D, LIU J D, et al. Structural design and analysis of multi-storey steel structure module structures [J]. *Building Structure*, 2019, 49(16): 59-64, 18. (in Chinese)
- [3] LUO S, SONG D H, SHEN K L, et al. Influence of the order exchange of the node connection in the force analysis of steel structures [J]. *Frontiers in Materials*, 2022, 9: 893291.
- [4] CHEN K, XU G Y, XUE F, et al. A physical Internet-enabled building information modelling system for prefabricated construction [J]. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 2018, 31(4/5): 349-361.
- [5] 吴会来, 谭洪卫, 邓丰. 基于遗传算法的低密度住宅可再生能源利用潜力参数化设计方法研究[J]. *住宅科技*, 2021, 41(7): 62-69.
WU H L, TAN H W, DENG F. Research on parametric design method of renewable energy utilization potential of zero energy house based on genetic algorithm [J]. *Housing Science*, 2021, 41(7): 62-69. (in Chinese)
- [6] HE Y, LIU X H, ZHANG H L, et al. Hybrid framework for rapid evaluation of wind environment around buildings through parametric design, CFD simulation, image processing and machine learning [J]. *Sustainable Cities and Society*, 2021, 73: 103092.
- [7] 陈圣格, 周婷, 陈志华, 等. 模块建筑参数化平面优化及智能化结构设计方法[J]. *重庆大学学报*, 2021, 44(9): 51-66.
CHEN S G, ZHOU T, CHEN Z H, et al. Parametric plan optimization and structural intelligent design method of modular steel buildings [J]. *Journal of Chongqing University*, 2021, 44(9): 51-66. (in Chinese)
- [8] 高源, 胡可, 岳晓鹏, 等. 北方乡村住宅节能与热舒适的形体参数多目标优化设计[J]. *华侨大学学报(自然科学版)*, 2021, 42(5): 619-627.
GAO Y, HU K, YUE X P, et al. Shape parameters design of northern rural houses for multi-objective optimization of energy performance and thermal comfort [J]. *Journal of Huaqiao University (Natural Science)*, 2021, 42(5): 619-627. (in Chinese)
- [9] SUSOROVA I, TABIBZADEH M, RAHMAN A, et al. The effect of geometry factors on fenestration energy performance and energy savings in office buildings [J]. *Energy and Buildings*, 2013, 57: 6-13.
- [10] 张涛, 王雯翡, 成雄蕾, 等. 数据驱动技术在建筑能耗模拟中的应用研究[J]. *科技与创新*, 2020(16): 156-157.
ZHANG T, WANG W F, CHENG X L, et al. Research on application of data-driven technology in building energy consumption simulation [J]. *Science and Technology & Innovation*, 2020(16): 156-157. (in Chinese)
- [11] MOTUZIENE V, JUODIS E S. Simulation based complex energy assessment of office building fenestration [J]. *Journal of Civil Engineering and Management*, 2010, 16(3): 345-351.
- [12] 李继伟, 冯国会, 徐丽. 建筑能耗预测的机器学习回归模型研究[J]. *沈阳建筑大学学报(自然科学版)*, 2021, 37(6): 1098-1106.
LI J W, FENG G H, XU L. Study on machine learning regression model for prediction of building energy consumption [J]. *Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science)*, 2021, 37(6): 1098-1106. (in Chinese)
- [13] KIM T, JANG M, JEONG H C, et al. Short-term residential load forecasting using 2-step SARIMAX [J]. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 2022, 17(2): 751-758.
- [14] 欧阳前武, 符亚磊, 任中俊. 基于时间序列分析模型的建筑能耗两级预测关系研究[J]. *建设科技*, 2019(14): 53-56.
OUYANG Q W, FU Y L, REN Z J. A study on the two-level prediction relationship of building energy consumption based on time series analysis models [J]. *Construction Science and Technology*, 2019(14): 53-56.

- (in Chinese)
- [15] XU X L, FENG G H, CHI D D, et al. Optimization of performance parameter design and energy use prediction for nearly zero energy buildings [J]. *Energies*, 2018, 11 (12): 3252.
- [16] 马泽宇, 张慧颖, 黄海燕. 地震荷载作用下基于 ASA 和 MMFD 优化组合算法的框架结构多目标优化设计 [J]. *河南科学*, 2017, 35(11): 1819-1822.
MA Z Y, ZHANG H Y, HUANG H Y. Multi-objective optimization design of frame structure based on ASA and MMFD optimal combination algorithm under seismic loading[J]. *Henan Science*, 2017, 35(11): 1819-1822. (in Chinese)
- [17] 王国亮, 张荫, 陶清林. 钢框架结构多目标优化设计 [J]. *低温建筑技术*, 2010, 32(6): 30-32.
WANG G L, ZHANG Y, TAO Q L. Multi-objective optimization for steel frames [J]. *Low Temperature Architecture Technology*, 2010, 32(6): 30-32. (in Chinese)
- [18] 周俊文, 刘界鹏. 基于多种群遗传算法的钢框架结构优化设计[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2024, 46(1): 71-81.
ZHOU J W, LIU J P. Optimization design of steel frame structure based on multipopulation genetic algorithm [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2024, 46(1): 71-81.(in Chinese)
- [19] ASSIMI H, JAMALI A, NARIMAN-ZADEH N. Multi-objective sizing and topology optimization of truss structures using genetic programming based on a new adaptive mutant operator [J]. *Neural Computing and Applications*, 2019, 31(10): 5729-5749.
- [20] PIEGAY N, BREYSSE D, ELACHACHI S M. Effect of intrinsic and epistemic uncertainties on the multiobjective optimal design of a hyperstatic structure [J]. *ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering*, 2019, 5(1): 04018047.
- [21] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA- II [J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2002, 6(2): 182-197.
- [22] YOON P K, HWANG C L, YOON K. Multiple attribute decision making: An introduction (quantitative applications in the social sciences) [M]. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1995.

(编辑 胡英奎)