

近零能耗建筑围护结构多目标优化研究

冯国会,陈 菲,常莎莎

(沈阳建筑大学市政与环境工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘 要 目的 对近零能耗建筑围护结构进行多目标优化,进一步提升建筑能效水平。

方法 采用 EnergyPlus 模拟软件计算建筑使用阶段的能量消耗,利用全生命周期理论建立近零能耗建筑全生命周期运行能耗、碳排放及成本计算模型,基于 NSGA-II 遗传算法,利用 MOBO 优化工具与 EnergyPlus 软件耦合联用,选取了 7 个设计参数作为优化变量,根据决策者的实际需求,采用权重法寻找最优解,对近零能耗建筑的全生命周期运行能耗、碳排放和成本进行多目标、多参数优化研究。**结果** 最优解下近零能耗建筑节能率、碳排放节约率和成本节约率分别为 0.87%、1.51% 和 3.04%。**结论** 笔者提出的近零能耗建筑围护结构评价指标体系和围护结构最佳组合形式具有经济性、节能性和环保性,可为近零能耗建筑围护结构设计参数的选取提供参考。

关键词 近零能耗建筑;多目标优化;围护结构;全生命周期;碳排放

中图分类号 TU111.4⁺8

文献标志码 A

Multi-objective Optimization of Envelope Structure for Near Zero Energy Building

FENG Guohui, CHEN Fei, CHANG Shasha

(School of Municipal and Environmental Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: The purpose of this paper is to optimize the net zero energy building envelope structure with multiple objectives in order to improve the level of building energy efficiency. The energy consumption in the use stage of the building was calculated by EnergyPlus simulation software. The multiple objectives function model with energy consumption, carbon emission and cost of net-zero energy building in the whole life cycle was established based on the whole life cycle theory. Based on NSGA-II genetic algorithm and MOBO optimization tool coupled with EnergyPlus software, seven design parameters were selected as optimization variables of the model. According to the actual needs of decision-makers, the optimal solution of the model was found by the weight method, and based on the solution the multi-objective and multi-parameter optimization research was carried out on the energy consumption, carbon emission and cost of near-zero energy

收稿日期:2022-09-13

基金项目:国家重点研发计划政府间国际科技创新合作项目(2019YFE0100300);国家自然科学基金项目(51778376);沈阳市科技计划项目(21-108-9-03)

作者简介:冯国会(1964—),男,教授,博士研究生导师,主要从事建筑节能技术等方面研究。

consumption buildings in the whole life cycle. With the optimal solution, the energy-saving rate, carbon emission saving rate and cost saving rate of net-zero energy building were 0.87%, 1.51% and 3.04%, respectively. According to the results of the multi-objective and multi-parameter optimization, the index system of building envelope with near zero energy consumption and the optimal combination form of building envelope with economy, energy saving and environment are proposed, which can provide reference for the selection of building envelope design parameters with near zero energy consumption.

Key words: near zero energy building; multi-objective optimization; envelope structure; life cycle; carbon emission

目前,建筑能耗占全社会总能耗的比重约为 40%,建筑能源消耗强度高、碳排放量大。在建筑运营阶段,碳排放在全社会总碳排放量中所占的比重达到了 22%^[1-3]。近零能耗建筑的发展对降低能源消耗、减少碳排放、保护环境有着促进作用。N. Abdou 等^[4]对摩洛哥六个气候区建筑进行改造,使其满足近零能耗建筑的要求,找到同时满足建筑生命周期成本、节能和热舒适的最佳解决方案,借助 MOBO 优化工具与 TRNSYS 软件联合使用,对建筑朝向、窗型、窗墙比、墙体和屋面的保温渗水率等进行了多目标优化。M. Fesanghary 等^[5]提出了一种基于和声搜索算法的多目标优化模型,使生命周期成本和碳排放量最小化,以找到一种最佳的建筑围护结构组合。霍海娥等^[6]在成都某既有建筑墙体的节能改造设计中,建立了数值算法和多目标遗传算法 NSGA-II 的优化模型,对墙体单位面积的年总能耗和保温材料的成本进行优化。余镇雨等^[7]将 MATLAB 和 TRNSYS 能耗模拟软件联合运行,对近零能耗建筑全生命期的运行一次能耗和全生命期成本进行多目标优化,给出了不同气候区典型城市多目标优化均衡解。国内外学者虽已开展近零能耗建筑和可持续建筑的多目标优化设计研究,但研究中同时考虑建筑能耗全生命周期碳排放和经济性的三目标优化设计研究较少。

因此,笔者以沈阳市某一近零能耗示范建筑为例建立模型,基于对近零能耗建筑的

全生命周期运行能耗、碳排放以及成本进行多目标、多参数的优化研究,利用 NSGA-II 遗传算法,并使用 MOBO 优化工具和 EnergyPlus 模拟软件耦合模拟计算;再利用加权和法通过给目标函数分配不同的权重因子来线性量化转换成单目标问题,以得到多目标问题的最优解。

1 多目标优化方法

1.1 NSGA-II 遗传算法

NSGA-II 算法是在多个优化目标的约束下,逐步在帕累托前沿解的方向上进行优化,通过多代的遗传操作,算法能够自动进行设计方案的空间搜索和优化,尝试不同的设计决策,不断细化建筑设计方案,并逐步到达帕累托前沿解。该算法能够有效地避免设计方案陷入局部最优状态,实现全局最优果^[12]。

1.2 MOBO 优化平台

MOBO 软件可处理具有连续变量和离散变量的单目标和多目标优化问题,可以自动改变需要优化的参数,实现迭代操作过程。通过对连续变量和离散变量数量的函数的关系来进行评估,选择适当的算法和参数,如表 1 所示。

表 1 NSGA-II 遗传算法相关参数

| Table 1 NSGA-II genetic algorithm parameters | | | |
|--|------|--------|--------|
| 种群规模 | 迭代次数 | 突变概率/% | 交叉概率/% |
| 6 | 150 | 3 | 90 |

整个搜索空间仅通过 $6 \times 150 = 900$ 个建筑围护结构参数配置来迭代计算,避免计算

次数过多,节省了大量时间。

1.3 目标函数

多目标优化问题是研究多个目标函数 ($n \geq 2$) 在满足一定约束条件下实现最优化的问题,其数学模型描述:

$$\text{Min } \{F_1(x), F_2(x), F_3(x)\}. \quad (1)$$

式中: F_1, F_2, F_3 为目标函数, $x = [x_1, x_2, \dots, x_n]$ 。

第一个函数 (F_1) 为全生命周期建筑运行能耗,定义为建筑采暖能耗、制冷能耗、设备能耗之和。在建筑的全生命周期内,建筑使用阶段的能耗占 90% 以上,因此能耗计算限定于建筑的使用阶段。建筑照明能耗、生活热水能耗不受优化变量影响,因此不考虑在内,同样也没有考虑这部分的碳排放和成本。其计算式可表示为

$$E = n \times (E_h + E_c + E_e). \quad (2)$$

式中: E_h 为建筑年供暖能耗, J; E_c 为建筑年制冷能耗, J; E_e 为建筑年均设备能耗, J; n 为建筑设计使用寿命,取 50 a。

第二个函数 (F_2) 为全生命周期碳排放量,包括生产阶段碳排放和运行阶段碳排放,采用排放因子法进行计算,即按照每个阶段碳的来源,整理出碳排放清单,然后将数据与其对应的碳排放因子相乘即为某一排放渠道的碳排放量^[10]。电力碳排放系数采用东北电网平均碳排放因子 0.776 9 kg CO₂/ (kWh),建筑使用寿命取 50 a。其计算式可表示为

$$LCCE = C_p + C_r. \quad (3)$$

$$C_p = \sum \delta_i \eta_i \beta_i A_i. \quad (4)$$

$$C_r = E \beta_c n. \quad (5)$$

式中: C_p 为建材生产阶段碳排放量, kg; C_r 为建筑运行阶段碳排放量, kg; δ_i 为第 i 种材料的厚度, m; η_i 为第 i 种材料的密度, kg/m³; β_i 为第 i 种材料的碳排放系数; A 为各围护结构的面积, m²; E 为建筑供暖空调年耗电量, J; β_c 为电力碳排放系数。

第三个函数 (F_3) 为全生命周期成本,包括建筑初投资及全生命周期内运行费用折合成现值的总和^[8]。对于建筑围护结构的优化设计,建筑初投资只计算了建筑围护结构生产阶段所用到的建材成本。运行阶段是全生命期内空调系统、设备系统的运行费用折合成现值的总和。其计算式^[7]可表示为

$$LCC = TC_i + TC_o. \quad (6)$$

$$TC_i = \sum \varphi_i \times M_i. \quad (7)$$

$$TC_o = (E_i \times P_e) \sum_{n=1}^N (1+r)^{-n}. \quad (8)$$

$$r = (R - e) / (1 + e). \quad (9)$$

式中: TC_i 为初投资成本, 元/m²; TC_o 为使用阶段成本, 元/m²; φ_i 为第 i 种材料的单价, 元/m²; M_i 为第 i 种材料的消耗量, m³; E_i 为建筑供暖空调年耗电量, (kW·h)/m²; P_e 为电价, 元/(kW·h); r 为贴现率; R 为名义利率, 取 0.07; e 为能源价格增长率, 取 0.02。 n 为建筑设计使用寿命, 取 50 a。

1.4 目标优选

在实际应用中,通过多目标优化计算可以筛选出一系列最优解方案,如何进行寻优是关键,最优解的选择主要取决于设计者自身或者其研究目的。为了从 Pareto 解中确定多目标优化问题的最优解,采用加权和法,将多准则优化问题转化为单准则优化问题,通过为对目标赋予权重系数,构建新的目标函数,以得到不同决策重心下的参数组合。函数定义为

$$\begin{aligned} \text{Min} [u(F_1(x), F_2(x))] = \\ w_1 \left(\frac{F_1(x) - F_{1\min}}{F_{1\max} - F_{1\min}} \right) + w_2 \left(\frac{F_2(x) - F_{2\min}}{F_{2\max} - F_{2\min}} \right) + \\ w_3 \left(\frac{F_3(x) - F_{3\min}}{F_{3\max} - F_{3\min}} \right). \end{aligned} \quad (10)$$

式中: $F_{i\min}$ 和 $F_{i\max}$ 分别为第 i 个目标函数的最大值和最小值; w_1, w_2 为反映目标函数相对重要性的权重系数; $\sum w_i$ 必须等于 1, 在无偏好的情况下,对标准化处理后的目标函数平均分配权重。

使用节能率(ESR)、碳排放量节约率(CESR)、成本节约率(CSR)与建筑初始值进行比较,以评价确定的最优解^[4],公式如下:

$$ESR = 1 - (F_{1opt}/F_{1bc}). \tag{11}$$

$$CESR = 1 - (F_{2opt}/F_{2bc}). \tag{12}$$

$$CSR = 1 - (F_{3opt}/F_{3bc}). \tag{13}$$

式中: F_{opt} 为最优解的目标函数值; F_{bc} 为建筑初始目标函数值。

2 多目标优化模型

2.1 模型建立

以沈阳建筑大学近零能耗示范建筑为例,根据设计图纸基础信息,对建筑平面、外立面及屋顶样式进行了适当简化,借助OpenStudio 软件建立基准模型。该建筑能源供应系统以地源热泵为主,以太阳能供热系统为辅。由于EnergyPlus 是通过热工区域来模拟建筑能耗,因此将该两层建筑分为 10 个热区(见图 1)。

2.2 气候参数

案例建筑所处地区辽宁省沈阳市,年平均气温为 14.6 ℃,年太阳总辐射量为 2 262.84 W/m²。按现行标准《公共建筑节能设计标准》(GB50189—2015)^[15],该建筑处在严寒 C 区,冬季室内计算温度设定为 20 ℃,夏季室内计算温度为 26 ℃。

表 2 优化变量的相关参数设定

Table 2 Relevant parameter settings of optimization variables

| 变量设计 | 外墙保温 | 屋面保温 | 地面保温 | 外层玻璃 | 中间层玻璃 | 玻璃间距 | 外墙保温 |
|------|---------|---------|---------|-------|-------|------------|------------|
| | 层厚度 | 层厚度 | 层厚度 | 厚度 | 厚度 | | 材料类型 |
| 初始值 | 300 | 280 | 240 | 6 | 5 | 18 | EPS |
| 值域 | 200~400 | 200~400 | 200~300 | 5,6,8 | 5,6,8 | 9,12,18,20 | EPS、XPS、PU |
| 步长 | 50 | 50 | 50 | — | — | — | — |

3 多目标优化结果与分析

3.1 双目标对比分析

多目标优化的解决方案并不唯一,而是给出一组折中的权衡解决方案,称为帕累托

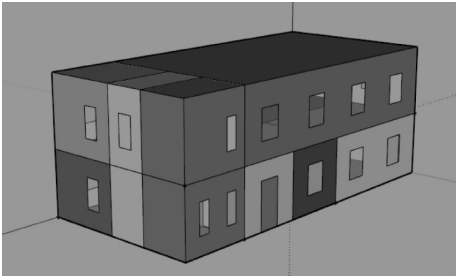


图 1 建筑热工分区图

Fig. 1 Thermal zoning of the building

2.3 决策变量

通过对近零能耗建筑围护结构影响因素的调查分析后,选取 5 种围护结构,共 7 个变量参数,包括外墙保温层厚度、屋面保温层厚度、地面保温层厚度、Low-e 窗户参数(外层玻璃厚度、中间层玻璃厚度和玻璃间距)以及保温材料类型。表 2 列出了建筑围护结构的输入参数以及参数初始值和变化范围,其中外墙、屋面、地面保温层厚度为连续变量,玻璃厚度和玻璃间距为离散变量,而不同类型的保温材料会有不同的传热系数、密度及比热,需要改变的参数过多,因此无法同时模拟,其优化结果单独列出。聚苯板(EPS)、挤塑板(XPS)、聚氨酯(PU)三种保温材料的导热系数分别为 0.033 W/(m·K)、0.028 W/(m·K)、0.023 W/(m·K)。

前沿解。对建筑能耗、碳排放及成本三个目标函数两两组合,进行对比分析,得出建筑能耗-成本、碳排放-能耗、碳排放-成本的寻优结果(见图 2~图 4)。

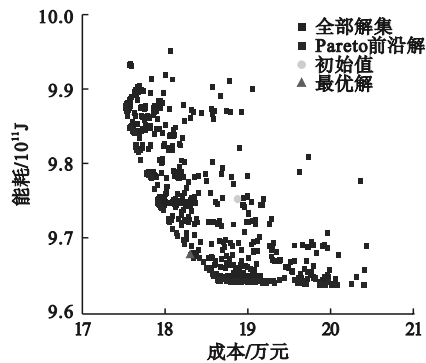


图2 能耗-成本目标优化结果

Fig. 2 Target optimization results of energy-cost

由图2可以看出,全生命周期能耗及成本两个目标函数之间呈帕累托分布,结果呈反比。随着成本的增加,能耗呈下降趋势,原因是决策变量的改变与成本直接相关。采用保温性能一般的墙体虽然会降低建筑成本,但是建筑能耗必然会增大。

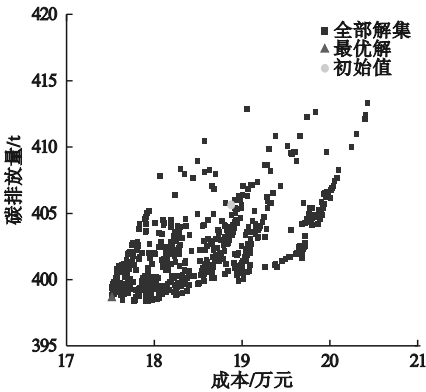


图4 碳排放量-成本目标优化结果

Fig. 4 Target optimization results of carbon emissions-cost

3.2 三目标优化结果分析

为了实现近零能耗建筑的低能耗、低成本以及低碳排量,将三个目标最小化的多目标优化结果如图5所示。目标函数增加到了3个,因此此时的帕累托前沿解将不再是一条曲线,而是一个曲面,筛选出的最优解均分布在帕累托前沿上。

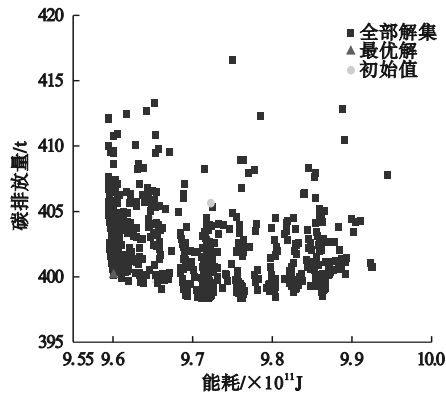


图3 碳排放量-能耗目标优化结果

Fig. 3 Target optimization results of carbon emissions-energy consumption

图3中,全生命周期碳排放和能耗两个目标函数之间也呈帕累托分布,但是随着能耗的增加,碳排放量有小范围增加,因运行能耗的增加导致运行阶段的碳排放量也随之增加。

图4中,由于全生命周期碳排放和成本目标函数使用相似公式进行评估,因此两目标并不是冲突目标,结果并未获得帕累托分布,所寻的最优解也是互相重叠,趋近于极值点。

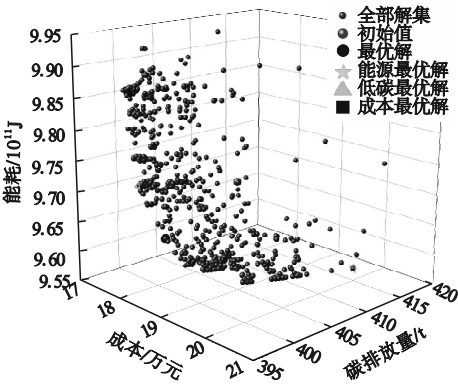


图5 能耗-碳排放量-成本目标优化结果

Fig. 5 Target optimization results of energy consumption-carbon emissions-cost

加权和法除了筛选出的最优解,另外分别给出了能源最优、低碳最优、成本最优时的情况,分别与案例建筑初始性能进行比较。

表3为近零能耗建筑围护结构优化结果。从表3中可以看出,最优解相对于初始状态来说,外墙保温层厚度增加了40 mm,屋顶保温层厚度减少了80 mm,地面保温层厚

度减少了 40 mm,外层玻璃厚度减少了 1 mm,中间层玻璃厚度增加了 3 mm,玻璃间

表 3 近零能耗建筑围护结构优化结果

| 优化 结果 | 外墙保温 | 屋顶保温 | 地面保温 | 外层玻 | 中间层玻 | 玻璃间 | 能耗/ | 碳排放量/ | 成本/元 |
|----------|------------|------------|------------|------------|------------|------|---------|---------|---------|
| | 层厚度/ mm | 层厚度/ mm | 层厚度/ mm | 璃厚度/ mm | 璃厚度/ mm | 距/mm | MJ | kg | |
| 初始值 | 300 | 280 | 240 | 6 | 5 | 18 | 972 285 | 405 648 | 188 739 |
| 最优解 | 340 | 200 | 200 | 5 | 8 | 18 | 963 811 | 399 515 | 183 010 |
| 能源最优 | 400 | 390 | 200 | 8 | 8 | 18 | 959 393 | 412 098 | 204 007 |
| 低碳最优 | 280 | 200 | 200 | 5 | 6 | 18 | 971 944 | 398 355 | 179 033 |
| 成本最优 | 200 | 200 | 200 | 5 | 8 | 18 | 986 054 | 399 340 | 175 148 |

对近零能耗建筑各优化结果进行 ESR、CESR、CSR 三目标评估(见图 6),从图 6 中可以看出,优化后的建筑围护结构与初始状态相比得到了改进。在最优解下,建筑的节能率为 0.87%,全生命周期碳排放节约率为 1.51%,全生命周期成本节约率为 3.04%。能源最优的情况下,节能率为 1.33%,但是全生命周期碳排放节约率和全生命周期成本节约率却是 -1.59% 和 -8.09%,说明当优先降低能耗时碳排放和成本均增加,此时外墙保温层厚度达到了 400 mm,在节能的同时,成本大幅度增加。在低碳最优的情况下,节能率为 0.04%,全生命周期碳排放节约率为 1.80%,全生命周期成本节约率为 5.14%。在成本最优的情况下,节能率为 -1.42%,全

生命周期碳排放节约率为 1.56%,全生命周期成本节约率为 7.20%。采用加权和法确定的最优解能兼顾建筑的节能性、成本性和环保性,单项最优解却有一定的局限性,在优化某一个目标时可能会导致其他目标不尽如人意。

3.3 外墙保温材料类型的影响结果

在非透明围护结构中,外墙所占的热损失比例是最高的,因此,近零能耗建筑围护结构一般采用保温性能高的保温材料,能耗虽然降低,但也会相应增加建筑碳排放以及建筑的初始成本。选择 3 种常用建筑外墙保温层材料,进一步分析建筑的各方面性能。通过多目标优化模拟计算得到的一系列解集(见图 7)。最优解 A,B,C 分别为当建筑外墙保温层材料为 EPS,XPS,PU 时对应的最优结果。

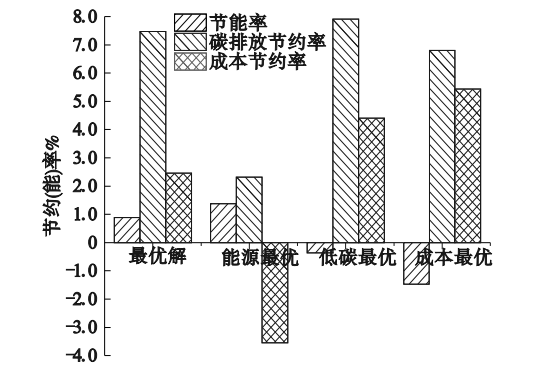


图 6 优化后近零能耗建筑三目标评估结果

Fig. 6 Three objective evaluation of net zero energy building after optimization

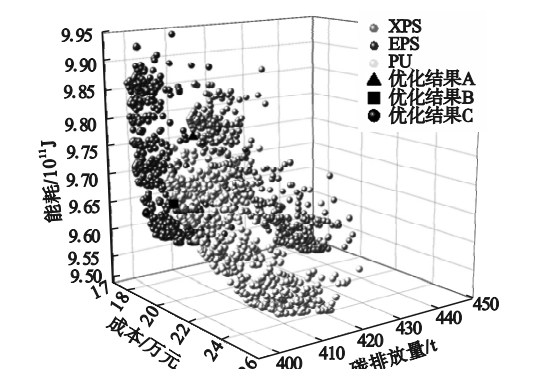


图 7 外墙保温材料的三目标优化结果

Fig. 7 Three objective optimization results of exterior wall insulation materials

表4为不同外墙保温材料类型围护结构的优化结果。建筑外墙初始保温层材料为EPS,由表4可以看出,相较于选择EPS,选择XPS为保温材料时,外墙保温层厚度减少

130 mm,中间层玻璃厚度减少3 mm;选择PU为保温层材料时,外墙保温层厚度减少120 mm,中间层玻璃厚度减少2 mm。但是相应的,其能耗及碳排放均有不同程度增加。

表4 不同外墙保温材料类型围护结构优化结果

| 保温材料类型 | 外墙保温层厚度/mm | 屋顶保温层厚度/mm | 地面保温层厚度/mm | 外层玻璃厚度/mm | 中间层玻璃厚度/mm | 玻璃间距/mm | 能耗/MJ | 碳排放量/kg | 成本/元 |
|--------|------------|------------|------------|-----------|------------|---------|---------|---------|---------|
| 初始值 | 300 | 280 | 240 | 6 | 5 | 18 | 972 285 | 405 648 | 188 739 |
| EPS | 340 | 200 | 200 | 5 | 8 | 18 | 963 811 | 399 515 | 183 010 |
| XPS | 210 | 200 | 200 | 5 | 5 | 18 | 975 718 | 413 488 | 177 995 |
| PU | 220 | 200 | 200 | 5 | 6 | 18 | 966 499 | 401 503 | 196 063 |

更改外墙材料参数后,对建筑进行三目标函数评估(见图8),由图8可看出,与建筑初始状态比较,当外墙保温层类型为EPS时,建筑的节能率和碳排放节约率均为最高,分别为0.87%和1.51%,成本节约率为3.04%;当外墙保温层类型为XPS时,建筑节能率为0.35%,碳排放节约率为-1.93%,成本节约率为5.69%,虽然建筑成本有所减少,但是能耗变化不明显,并且增加了建筑的碳排放;当外墙保温层类型为PU时,建筑节能率为0.60%,碳排放节约率为1.02%,成本节约率为-3.88%。由此可见,当同时考虑建筑能耗、碳排放及成本时,EPS外墙保温材料为最优。

4 结 论

(1)通过对不同类型保温材料分析,综合考虑建筑能耗、碳排放等多个目标,外墙保温层类型为EPS时,建筑的节能率和碳排放节约率均为最高。与初始状态相比,三个目标均得到了改进,最优解下净零能耗建筑节能率、碳排放节约率和成本节约率分别为0.87%、1.51%和3.04%。

(2)近零能耗建筑围护结构参数最佳组合为外墙保温层厚度340 mm、屋顶保温层厚度200 mm、地面保温层厚度200 mm、外层玻璃厚度6 mm、中间层玻璃厚度5 mm、玻璃间距18 mm。

参考文献

[1] 中国建筑节能研究报告2020[J]. 建筑节能(中英文),2021,49(2):1-6.
(China building energy consumption annual report 2020 [J]. Journal of BEE, 2021, 49 (2): 1-6.)

[2] 简毅文,江亿.窗墙比对住宅供暖空调总能耗的影响[J].暖通空调,2006,36(6):1-5.
(JIAN Yiwén, JIANG Yì. Influence of window-wall ratio on annual energy consumption for heating and air conditioning in residential buildings[J]. Heating ventilating & air conditioning, 2006, 36(6): 1-5.)

[3] PALONEN M, HAMDY M, HASAN A. MOBO a new software for multi-objective building performance optimization [C]//13th international conference of the IBPSA. Chambéry, France; IBPSA c/o miller-

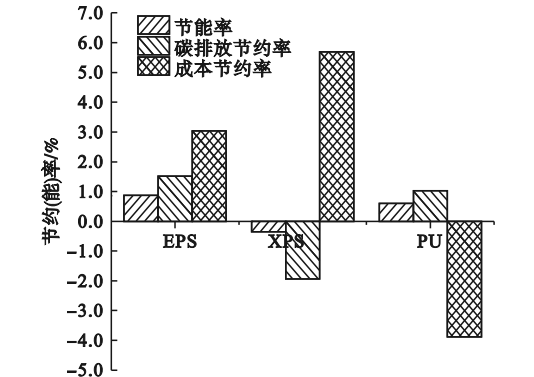


图8 不同材料类型的三目标评估结果

Fig. 8 Three objective evaluation of different material types

- thompson,2013;2567-2574.
- [4] ABDON N, MGHOUCHI Y E, HAMDOUNI S, et al. Multi-objective optimization of passive energy efficiency measures for net-zero energy building in Morocco [J]. Building and environment, 2021, 204(10): 280-285.
 - [5] FESANGHARY M, ASADI S, ZONG W G. Design of low-emission and energy-efficient residential buildings using a multi-objective optimization algorithm [J]. Building and environment, 2012, 49: 245-250.
 - [6] 霍海娥, 邵俊虎, 冯诗涵. 既有建筑节能改造保温材料的 NSGA-II 协同设计[J]. 土木建筑与环境工程, 2017, 39(5): 108-115.
(HUO Haie, SHAO Junhu, FENG Shihan. NSGA-II Collaborative design of thermal insulation materials for energy-saving renovation of existing buildings [J]. Journal of civil, and environmental engineering, 2017, 39(5): 108-115.)
 - [7] 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.)
 - [8] HASAN A, PALONEN M, HAMDY M. Simulation-based optimization for energy and buildings [J]. Springer international publishing, 2015(10): 3-15.
 - [9] HONG T, KIM J, LEE M. A multi-objective optimization model for determining the building design and occupant behaviors based on energy, economic, and environmental performance [J]. Energy, 2019, 174: 823-834.
 - [10] 王瑶. 寒冷地区城市住宅全生命周期低碳设计研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2020.
(WANG Yao. Research on the low-carbon design of urban residential life cycle in cold regions [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2020.)
 - [11] JUNG Y, HEO Y, LEE H. Multi-objective optimization of the multi-story residential building with passive design strategy in South Korea [J]. Building and environment, 2021, 203: 108061. 1-108061. 18.
 - [12] CELLURA M, MONTANA F, LONGO S, et al. Multi-objective building envelope optimization through a life cycle assessment approach [C]//IEEE international conference on environment and electrical engineering/IEEE industrial and commercial power systems Europe conference. Genova, Italy: Univ Genoa, 2019.
 - [13] 金虹, 邵腾. 基于多目标的严寒地区村镇被动式低能耗住宅设计研究[J]. 当代建筑, 2021(9): 51-54.
(JIN Hong, SHAO Teng. Research on the design of passive low-energy housing in towns and villages in cold regions based on multiple objectives [J]. Contemporary architecture, 2021(9): 51-54.)
 - [14] 冯国会, 徐小龙, 王悦, 等. 以能耗为导向的近零能耗建筑围护结构设计参数敏感性分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2018, 34(6): 1069-1077.
(FENG Guohui, XU Xiaolong, WANG Yue, et al. Sensitivity analysis of nearly zero energy buildings envelope design parameters based on energy consumption [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2018, 34(6): 1069-1077.)
 - [15] 中国建筑科学研究院. 公共建筑节能设计标准: GB50189—2015 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
(China Academy of Building Research. Design standard for energy efficiency of public buildings: GB50189—2015 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015.)
 - [16] 李晓萍, 李宝伟, 王国慧, 等. 基于多目标优化的严寒地区近零能耗建筑适用技术研究[J]. 建筑节能, 2020, 48(11): 63-66.
(LI Xiaoping, LI Baowei, WANG Guohui, et al. Application technologies of nearly zero energy building in severe cold zone based on multi-objective optimization method [J]. Building energy efficiency, 2020, 48(11): 63-66.)
 - [17] DIAKAKI C, GRIGOROUDES E, D KOLOKOTSA. Towards a multi-objective optimization approach for improving energy efficiency in buildings [J]. Energy and buildings, 2008, 40(9): 1747-1754.
 - [18] 赵玉清, 侯向阳, 唐胜世, 等. 基于全寿命期的近零能耗建筑经济性分析与碳排放量分析[J]. 建筑节能, 2020, 48(8): 126-130.
(ZHAO Yuqing, HOU Xiangyang, TANG Shengshi, et al. Economic analysis and carbon emissions of near-zero energy buildings based on lifetime [J]. Building energy efficiency, 2020, 48(8): 126-130.)
 - [19] 吴伟东. 寒冷地区零能耗太阳能居住建筑多目标优化设计研究: 以京津地区为例[D]. 天津: 天津大学, 2015.
(WU Weidong. Research on multi-objective optimization design of zero-energy solar residential buildings in cold regions: with Beijing-Tianjin region as the research object [D]. Tianjin: Tianjin University, 2015.)
 - [20] 岳小莉. 民用建筑功能、成本及碳排放多目标方案优选研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2016.
(YUE Xiaoli. Research on the multi objective plan optimization of function cost and carbon emissions for civil building [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016.)

(责任编辑: 王国业 英文审校: 唐玉兰)