

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2017.05.015



既有建筑节能改造保温材料的 NSGA-II 协同设计

霍海娥, 邵俊虎, 冯诗涵

(四川师范大学 工学院, 成都 610101)

摘要: 保温措施是既有建筑节能改造中最有效的节能措施之一。在墙体节能改造设计中, 保温材料种类及其厚度的确定是至关重要的, 受到多个目标参数的制约和影响。基于反问题的研究方法, 建立数值计算方法与多目标遗传算法 NSGA-II 相结合的优化模型, 以单位面积墙体全年总能耗和保温材料成本为目标参数, 对成都地区某既有建筑墙体节能改造的保温材料种类与厚度进行了协同设计。结果表明, 采用常规的保温厚度, 常用的 8 种保温材料中有 6 种都不是最优解, 但是可以通过改变保温材料的厚度或单价等方法使解向 Pareto 前沿逼近, 以实现单位面积墙体年总能耗最小和改造成本最小之间的平衡。

关键词: 协同设计; 反问题; 遗传算法; 数值方法

中图分类号: TU111.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2017)05-0108-08

NSGA-II synergic design of insulation material for existing building energy-saving renovation

Huo Haie, Shao Junhu, Feng Shihan

(Institute of Technology, Sichuan Normal University, Chengdu 610101, P. R. China)

Abstract: Insulation is one of the most effective measures in energy-saving renovation of existing buildings. The determination of type and thickness for the insulation material is crucial in the energy-saving design of wall, which is determined by multiple target parameters. An optimization model combined the numerical method with multi-objective genetic algorithm (NSGA-II) is established based on the inverse problem research method. The total energy consumption of the unit area wall and the transformation cost are selected as the objective parameters, and the synergic design for type and thickness of the insulation material is made for the existing building wall renovation in Chengdu. The results show that there are 6 of the 8 kinds of insulation materials are not the optimal solutions with the conventional thickness. However, the solutions can approach the Pareto frontier by changing the thickness or unit price of the insulation materials, and a balance can be realized between the minimum annual energy consumption and reconstruction cost. The method proposed offers a new idea for building energy-saving design. The conclusions can provide references for the similar energy-saving renovation in Chengdu.

收稿日期: 2016-02-16

基金项目: 四川省教育厅重点项目(17ZA0326)

作者简介: 霍海娥(1974-), 女, 副教授, 博士, 主要从事绿色建筑理论与技术研究, (E-mail) huoyufan_2@163.com。

Received: 2016-02-16

Foundation item: Key Program of Education Department of Sichuan Province(No. 17ZA0326)

Author brief: Huo Haie (1974-), associate professor, PhD, main research interests: theory and technology of green building, (E-mail) huoyufan_2@163.com.

Keywords: synergic design; inverse problem; genetic algorithm; numerical method

建筑节能是中国节约能源、保护环境的基本国策。截止到 2012 年,中国的建筑总能耗约占全国能源消费总量的 19.1%^[1],其中,既有建筑能耗占建筑能耗的 95% 以上^[2]。因此,加强既有建筑节能改造,是降低建筑能耗最有效的途径。目前,常用的建筑节能改造措施有保温、遮阳和自然通风等技术,其中,保温技术由于其显著的节能效果被南北方地区广泛采用^[3-6]。因此,正确选择保温材料及其厚度是实现建筑节能改造目标的关键因素。

许多学者就此做了大量研究。Yu et al 等^[7]采用 P1-P2 经济模型和静态传热模型对夏热冬冷地区 5 种保温材料:EPS、XPS、发泡聚氨酯、珍珠岩和发泡聚氯乙烯进行了评价,结果显示,EPS 由于其最高的节能率和最低的投资回收期,是最经济的保温材料。Hasan^[8]基于 LCC 经济模型和静态传热模型对巴勒斯坦常用的 5 种墙体结构和两种保温材料做了经济分析,他指出,针对不同的墙体结构,由于岩棉的投资回收期低于聚氯乙烯而成为最佳的保温材料。韦毅^[9]应用价值工程法对建筑外墙的 3 种保温材料胶粉聚苯颗粒、XPS 和 EPS 的性能进行了评价,认为 XPS 具有最高的价值系数,是最优的保温材料。Roberts 等^[10]对 8 种保温材料的 6 个性能共 14 个指标进行分析,研究结果显示,岩棉的各项性能指标最佳而 XPS 的性能最差。文献^[11-15]则采用各种方法确定了不同保温材料的最佳保温厚度。Mahlia et al 等^[16]研究了保温材料导热系数与最佳绝热厚度之间的关系,他认为两者之间存在非线性关系并可用多项式函数来表示。

大多数的研究关注最佳绝热厚度的确定,而较少关注保温材料与厚度之间的协同设计——参数协同设计是指满足一定约束条件时各参数之间的最佳匹配关系^[17]。在节能改造设计中,参数设计受多个目标的影响,往往具有不唯一性,本文拟采用多目标优化遗传算法 NSGA-II,以墙体全年总能耗和改造成本最小为约束条件,探寻节能改造设计中保温材料与厚度之间的相互协同关系。

1 模型建立

1.1 问题描述

选取成都市某居住建筑的南向多层复合外墙为研究对象,对其进行节能改造设计,保温方式拟采用外保温方式。复合墙体的主体是 240 mm 砖砌体、

砌体内外各涂抹 20 mm 水泥砂浆,在砌体和外抹灰层之间设置保温材料,其结构形式如图 1 所示。以每平方米外墙年总能耗最小和节能改造改造成本最小为优化目标,对成都地区常用的 8 种保温材料及其保温厚度进行协同设计,寻求两个优化目标之间的平衡。各层墙体材料及 8 种保温材料的热物性参数及二进制代号见表 1。

表 1 建筑材料的热物性参数^[18]

Table 1 Thermophysical properties of building materials^[18]

材料	$\lambda /$ (W · m · K ⁻¹)	$\rho /$ (kg · m ⁻³)	$c /$ (J · kg · K ⁻¹)	单价 / (元 · m ⁻³)	二进制 代号
砖	0.81	1 800	1 050		
水泥	0.93	1 800	1 050		
XPS	0.028	35	1 380	650	0
橡塑	0.035	30	1 380	1 000	1
EPS	0.042	30	1 380	520	10
聚氨酯	0.025	40	1 380	900	11
玻璃棉	0.037	40	1 060	450	100
岩棉	0.05	70	1 220	300	101
玻化微珠	0.069	270	1 050	550	110
胶粉颗粒	0.059	230	1 220	400	111

1.2 数学模型

多层复合墙体的传热模型如图 2 所示。外墙两侧设置为对流换热边界条件,室外侧温度采用综合温度同时考虑室外温度及太阳辐射的影响,室内侧温度按《夏热冬冷地区居住建筑节能设计标准》(JGJ 134—2010) 设定,空调期室内温度设置为 26 ℃,供暖期室内温度设置为 18 ℃。成都地区供暖期和空调期按照文献^[19]提出的方法确定,气象参数取自中国建筑热环境分析专用气象数据集^[20]。

常物性、无内热源、多层复合墙体一维非稳态导热控制方程为

$$\rho_j c_j \frac{\partial T_j}{\partial t} = \lambda_j \frac{\partial^2 T_j}{\partial x^2} \quad j = 1, 2, \dots, M \quad (1)$$

式中: ρ_j 、 c_j 、 λ_j , 分别为第 j 层材料的密度、比热和导热系数。

边界条件:

室外侧:

$$-\lambda_1 \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x=0} = h_0 (T_e(t) - T_{x=0}) \quad (2)$$

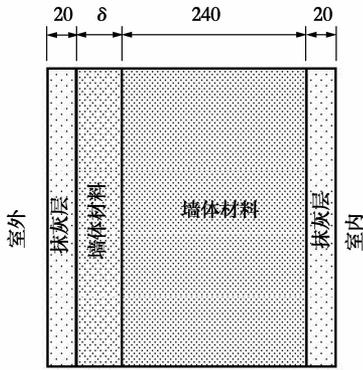


图 1 外保温多层复合墙体

Fig. 1 Multi-layer composite for external insulation wall

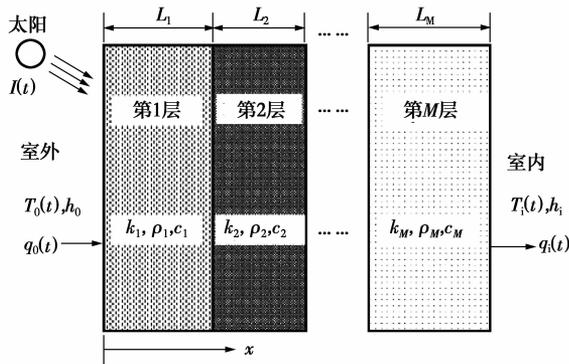


图 2 多层复合墙体的传热模型

Fig. 2 Heat transfer model of multi-layer composite wall

室内侧:

$$-\lambda_M \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x=L} = h_i (T_{x=L} - T_i) \quad (3)$$

式中: h_0 为墙体外表面对流换热系数, 空调期 $h_0 = 19.0 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, 供暖期 $h_0 = 23.3 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; h_i 为墙体内表面对流换热系数, $h_i = 8.7 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; T_i 为室内侧温度, 空调期 $26 \text{ }^\circ\text{C}$ 供暖期 $18 \text{ }^\circ\text{C}$; T_e 为室外综合温度, 按式(4)计算^[18]。

$$T_e(t) = T_0(t) + \frac{\alpha I_T(t)}{h_0} \quad (4)$$

式中: T_0 为室外环境温度; α 为墙体外表面太阳辐射吸收系数, 对于水泥砂浆表面, $\alpha = 0.56$; I_T 为墙体所在朝向的太阳辐射强度, W/m^2 。

初始条件

$$T_j(x, 0) = T_{\text{init}} \quad j = 1, 2, \dots, M \quad (5)$$

式中: T_{init} 为初始温度。

则通过单位面积墙体的年空调传热量为

$$Q_C = \int_{D_{\text{sum}}} h_i (T_{x=L} - T_i) \quad (6)$$

通过单位面积墙体的年供暖传热量为:

$$Q_H = \int_{D_{\text{win}}} h_i (T_i - T_{x=L}) \quad (7)$$

式中: $T_{x=L}$ 为复合墙体内表面的温度; Q_C 为单位面积墙体年空调传热量, MJ/m^2 ; Q_H 为单位面积墙体年供暖传热量, MJ/m^2 ; D_{sum} 为空调期小时数, h ; D_{win} 为采暖期小时数, h 。

假定该建筑物的制冷和供暖采用空气源热泵空调器, 因此, 单位面积墙体的年空调能耗为

$$E_C = Q_C / \text{COP}_C \quad (8)$$

单位面积墙体的年供暖能耗为:

$$E_H = Q_H / \text{COP}_H \quad (9)$$

单位面积墙体的年总能耗为:

$$E = E_C + E_H \quad (10)$$

式中: E_C 为单位面积墙体的年空调能耗, MJ/m^2 ; E_H 为单位面积墙体的年供暖能耗, MJ/m^2 ; E 为单位面积墙体的年总能耗, MJ/m^2 ; COP_C 为制冷设备的性能系数, 2.3 ^[21]; COP_H 为供暖设备的性能系数, 1.9 ^[21]。

2 NSGA-II 算法设计

2.1 NSGA-II 算法描述

Deb 等^[22] 对原始的 NSGA 算法进行了改进^[22], 提出了 NSGA-II, 是迄今为止最优秀的多目标优化算法之一。本算法同样遵循一般遗传进化算法的计算步骤, 即从一个随机初始群体开始, 通过复制、交叉和变异对群体进行更新, 直至进化完毕, 并且在进化过程中加入多样性维护和精英保留策略。本文采用的 NSGA-II 算法求解多目标优化问题的算法流程如下:

1) 令 $t = 0$, 采用二进制编码技术, 随机生成初始种群 $P(t)$, 种群规模为 pop 。采用 Pareto 占优技术, 识别出种群 $P(t)$ 的 Pareto 解集 $F(P(t))$, 设解集中非支配解的数量为 N_1 , 限制其容量使得 $|F(P(t))| \leq Q_{\text{pop}}$ (Q_{pop} 为预先给定的非支配解个数), 即 $N_1 \leq Q_{\text{pop}}$ 。如果超出容量, 即 $N_1 > Q_{\text{pop}}$, 则需要采用拥挤距离降序排列选择前 Q_{pop} 个个体;

2) 对整个种群 $P(t)$ 进行相关性配对、有效区域一多点交叉以及多重均匀变异操作;

3) 令 $P(t+1) = F(P(t)) \cup P(t)$;

4) 求解出 $P(t+1)$ 的 Pareto 解集 $F(P(t+1))$, 设解集中非支配解的数量为 N_2 个, 限制其容量使得 $|F(P(t+1))| \leq Q_{\text{pop}}$;

5) 对群体 $P(t+1)$ 中除 Pareto 解集之外的个

体 ($pop + N_1 - N_2$) 赋予适应度值;适应度函数的构造如下:

$$F(x) = \frac{1}{1 + x - y_2} \quad (11)$$

式中: x 为群体 P 中除了 Pareto 解集之外的任一个体; y 为群体 P 中离个体 x 距离最近的最优非劣个体; $x - y_2$ 为的是 x 与 y 之间的欧式距离。

6) 采用轮盘赌的选择方法选出 ($pop - N_2$) 个个体;

7) 令 $P(t+1) = F(P(t+1)) \cup P(t+1)$;

8) 令 $t = t + 1$, 如果 $t < \text{MaxGen}$ (最大进化代数), 则回到 2), 否则运算结束, 输出最优解。

2.2 目标函数和优化变量

2.2.1 目标函数 在进行建筑节能改造优化设计时, 首先, 要定义恰当的参数指标来反映建筑的热性能。本文选择通过每平方米墙体的全年总能耗 E (包括空调和供暖能耗) 和节能改造成本 C 为优化目标, 目标是使通过单位面积墙体的全年总能耗最小以及改造成本最低。这两个目标之间是相互冲突的, 如果要减少通过单位面积墙体的全年总能耗, 需要增加保温层的厚度来实现, 但是增加保温层的厚度又会增加改造成本, 因此, 需要采用多目标优化技术来实现两者之间的平衡。

单位面积节能改造成本可由式(12)计算

$$C = \delta C_i \quad (12)$$

式中: δ 为保温材料的厚度, m; C_i 为第 i 种保温材料的单价, 元/ m^3 ; C 为采用第 i 种保温材料时单位面积的节能改造成本, 元/ m^2 。

2.2.2 优化变量 优化变量为保温材料的种类和厚度, 其中保温材料的种类是离散变量, 共有 8 种, 见表 1; 保温材料的厚度是连续变量, 对应工程需要, 其厚度取值范围设定为 $0 < \delta \leq 255$ mm。

2.3 多目标优化 NSGA-II 算法设计

2.3.1 编码设计 采用二进制编码, 共 11 位, 前 3 位对应于离散变量, 代表保温材料的种类, 编码结果如表 1 所示, 后 8 位对应于连续变量, 代表保温材料的厚度。由于有 2 个设计变量, 所以每个染色体均应包含两个参数信息。随机产生初始种群, 采用的种群规模为 $N=40$ 。

2.3.2 非支配集排序 根据公式(10)和(12), 计算每个个体对应的两个目标函数值, 即每平方米墙体的年总能耗 E 和节能改造成本 C 。然后根据非支配集排序算法找到种群的 Pareto 前沿, 采用拥挤距

离对 Pareto 解集进行多样性维护。本文中 Pareto 解集的容量 pop 设为 40。

2.3.3 遗传算子设计

1) 选择算子: 如果 Pareto 解集中个体的数量小于种群规模, 则需要补充个体数量。具体做法是, 对于没有进入 Pareto 解集的个体, 按式(11)计算其适应度函数值, 然后采用轮盘赌法进行选择, 每个染色体被选中的概率由其相对的适应度来决定。选择出的个体与 Pareto 解集的个体共同组成父代种群, 然后采用相关性配对, 保证交叉操作能够产生新个体。

2) 交叉算子: 采用一多点交叉算子, 对每个染色体的子串进行单点交叉, 交叉概率为 0.9。

3) 变异算子: 采用多重均匀变异算子, 变异概率为 0.05。

2.3.4 精英保留策略 通过上述遗传操作生成的子代种群不直接代替父代种群成为新种群, 而是通过精英保留策略, 和父代中的最优解共同竞争产生下一代新种群。其做法是将父代种群的 Pareto 解集与其产生的子代种群组合, 共同竞争产生下一代种群, 有利于保持父代中的优良个体进入下一代, 保证某些优良的种群个体在进化过程中不会被丢弃, 从而提高了优化结果的精度。并通过对种群中所有个体的分层存放, 使得最佳个体不会丢失, 迅速提高种群水平。精英策略的实现方法如图 3 所示。

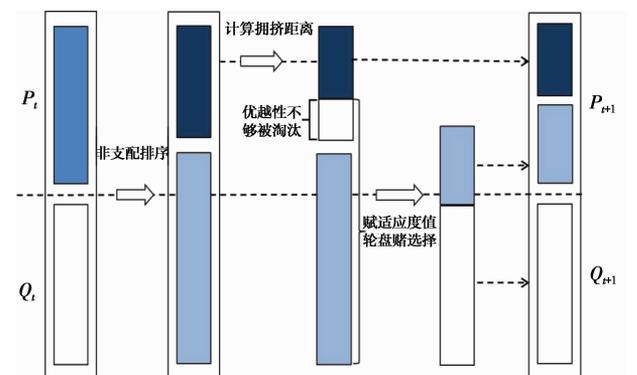


图3 精英保留策略

Fig. 3 The elitist strategy

2.3.5 终止条件 终止条件为最大遗传代数, 设为 100。

2.4 NSGA-II 算法流程

采用的 NSGA-II 算法流程图如图 4 所示。

3 结果与讨论

采用数值计算方法求解传热问题, 所有的计算

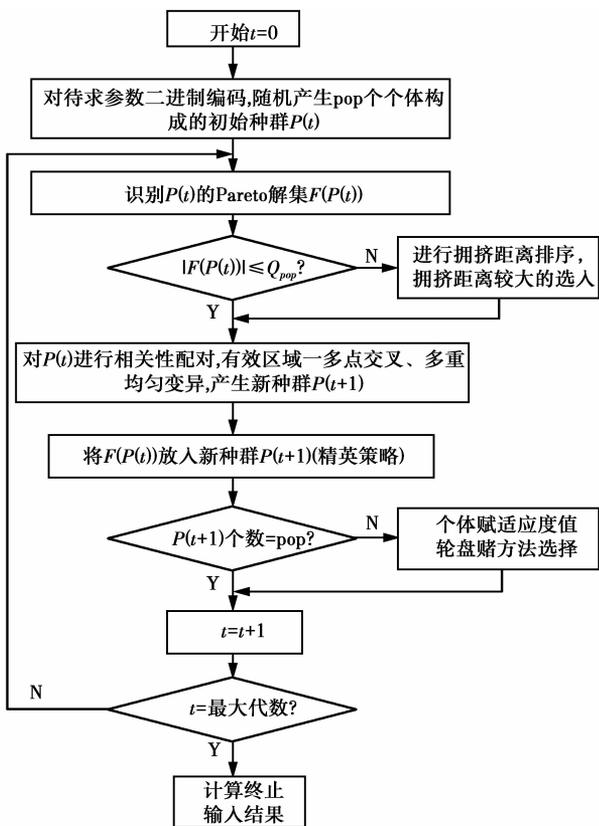


图 4 NSGA- II 算法流程图

Fig. 4 Flow chart of NSGA- II

均由计算机语言 FORTRAN 编程实现, 仿真结果见图 5~图 9。

初始种群分布及其 Pareto 前沿如图 5 所示。

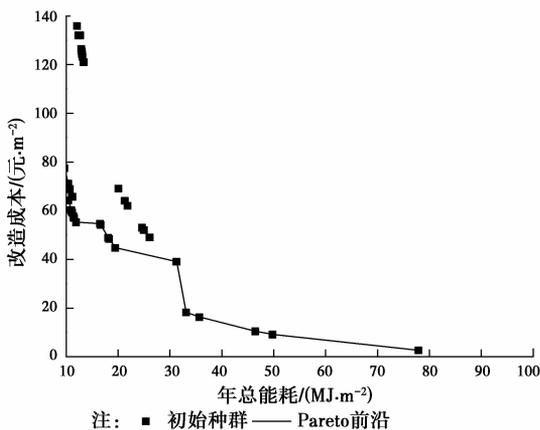


图 5 初始种群分布图及 Pareto 前沿

Fig. 5 Initial population distribution and pareto frontier

由图 5 可知, 初始种群的 40 个个体随机分布在整个平面空间内, 由非支配排序方法得到的 Pareto 前沿上的解都是最优解(非支配解)。与 Pareto 前沿个体欧式距离较小的个体拥有较大的适应度值, 更容易被选中成为父代个体, 执行后续的遗传操作。

随着进化代数的增加, Pareto 前沿不断变化, 可行解越来越逼近最优解, 如图 6 所示。另外, Pareto 前沿中的解个数随着代数的增加而增多, 当非支配解个数超过 pop 时, 需要采用拥挤距离对其进行多样性围护。

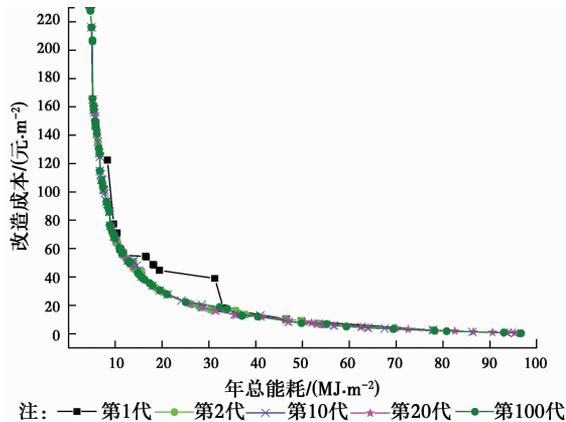


图 6 各代进化 Pareto 前沿比较

Fig. 6 Comparison of pareto frontiers for different generations

图 7 展示了分析计算结束后的 Pareto 前沿。由图可知, 根据 Pareto 前沿的变化, 可以分为两个部分(即 I 和 II 部分)和 3 个区段(AB 段、BC 段和 CD 段)。I 部分包括 AB 和 BC 两个区段, 总体趋势是随着单位面积墙体年总能耗的增加改造成本逐渐减小, 其中, 在 AB 区段, 节能改造成本随单位面积墙体总能耗的增加急剧减小, 说明此段改造成本对单位面积墙体总能耗的变化非常敏感, 可以适当增加墙体总能耗以节约投资; BC 区段中, 节能改造成本与单位面积墙体全年总能耗之间近似为双曲线关系, 说明节约改造成本仍然可以以增加墙体总能耗为代价来实现, 但是需要具体分析运行成本的增加与改造成本减小之间的关系而定。分析 I 部分的非支配解发现, 落在 AB 段的主要有聚氨酯、XPS 和玻璃棉, 落在 BC 段的主要是岩棉。II 部分只包括 CD 段, 随着单位面积墙体全年总能耗的增加, 改造成本几乎没有变化, 说明以牺牲单位面积墙体全年总能耗来实现成本节约是不可取的。

图 8 显示了种群进化到第 100 代时的非支配解分布情况, 可以看到, 共有 4 种保温材料入选, 其中采用岩棉作为保温材料极具优势, 占到了 54%, 接下来依次是 XPS 为 20%, 玻璃棉 15%, 聚氨酯占 11%, 其他 4 种保温材料未能成为最佳选择而被淘汰。

通过市场调研, 发现成都地区外墙外保温设计

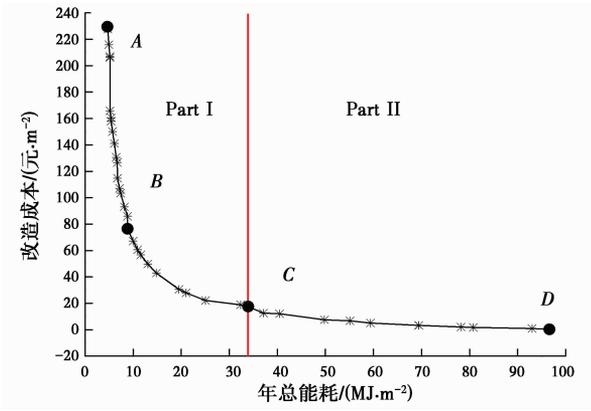


图 7 多目标优化问题的 Pareto 解

Fig. 7 Pareto frontier

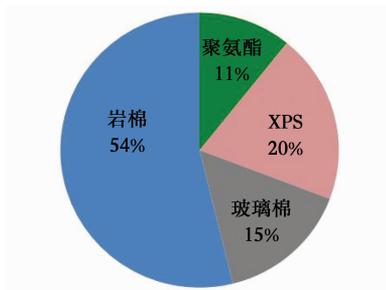
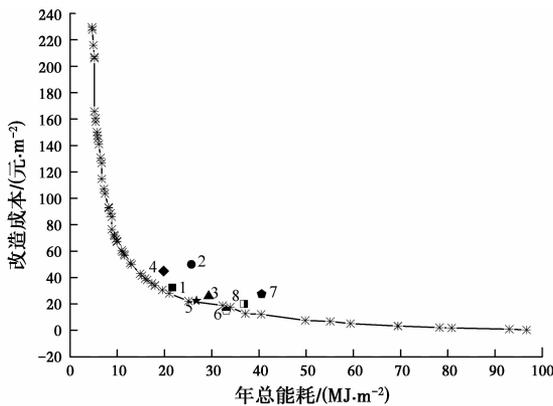


图 8 进化到第 100 代非支配解构成

Fig. 8 Composition of non-dominated solutions

常用的保温厚度为 50 mm。计算 8 种保温材料在厚度为 50 mm 时的单位面积墙体全年总能耗以及改造成本,并与多目标优化结果 Pareto 前沿进行比较,结果如图 9 所示。



注: 1 ■ XPS 2 ● 橡塑 3 ▲ EPS 4 ◆ 聚氨酯 5 ★ 玻璃棉
6 ◆ 岩棉 7 ● 玻化微珠 8 □ 胶粉颗粒 —*— Pareto 前沿

图 9 成都地区 8 种常用保温材料与 Pareto 前沿对比图

Fig. 9 Composition of Pareto frontier with 8 kinds of insulation materials in Chengdu

由图 8 可知,在成都地区,只有 2 种保温材料即玻璃棉和岩棉在厚度为 50 mm 时落在 Pareto 前沿的左下方是最优解,其它 6 种保温材料在厚度为

50 mm 时都不是 Pareto 最优解,也就是说,这些状态点都不能实现单位面积墙体的总能耗最小和改造成本最低之间的平衡。此外,图 9 还指出了在多目标优化技术下,各种保温材料的优化方向,各种保温材料可以通过改变其保温厚度、材料单价等方法向 Pareto 前沿逼近。

通过改变保温厚度(设定范围 0~400 mm)和材料单价对上述 6 种保温材料进行计算分析,得到各材料实现两个优化目标平衡的途径和数据如表 2 所示。

表 2 各保温材料达到最优解的途径和数据

Table 2 The way and the data of the optimal solution for the thermal insulation materials

保温材料	$\lambda /$ ($W \cdot mK^{-1}$)	单价 ($元 \cdot m^{-3}$)	达到最优解的最小厚度/mm	达到最优解的最大单价/ ($元 \cdot m^{-3}$)
XPS	0.028	650	195	
橡塑	0.035	1 000		650
EPS	0.042	520	380	
聚氨酯	0.025	900	230	
玻化微珠	0.069	550		250
胶粉颗粒	0.059	400		280

由表 2 可知,在当前单价下,对于保温材料 XPS、EPS 和聚氨酯,通过改变保温厚度可以实现墙体总能耗最小和改造成本最小之间的平衡,达到最优解对应的最小厚度分别为 195、380、230 mm;而对于保温材料橡塑、玻化微珠和胶粉颗粒,在设定的保温厚度 0~400 mm 内没有任何一个值是最优解,可以通过降低其单价的方法来实现两个优化目标之间的平衡,达到最优解的最大单价分别为 650、250、280 元/ m^3 。因此,在节能改造设计中应该根据实际情况选用保温材料和厚度,对保温材料不加区分而采用同等保温厚度的做法是不可取的。

4 结论

1) 采用多目标遗传算法(NSGA-II)在求解建筑节能多目标优化问题时优势明显,种群的多样性得以保持,算法收敛速度很快,能够在全局搜索到 Pareto 最优解。

2) 提出的数值计算方法与 NSGA-II 相结合的优化模型是可靠有效的,适用于处理建筑节能改造设计中的传热反问题,可用于寻找多目标优化条件

下建筑围护结构设计参数间的协同关系。

3) Pareto 前沿指出了在建筑节能改造多目标优化问题中各种保温材料的优化方向。各种保温材料可以通过改变其保温厚度、材料单价等方法向 Pareto 前沿逼近,越靠近 Pareto 前沿,越能实现墙体总能耗最小和改造成本最小之间的平衡。

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 2014 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
Tsinghua University Buildings Energy Efficiency Research Center. Annual report on China building energy efficiency 2014 [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014. (in Chinese)
- [2] 王肖芳. 重庆既有住宅节能改造研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2007.
WANG X F. The research on energy-conservation transformation of the extant residence buildings in Chongqing [D]. Chongqing: Chongqing University, 2007. (in Chinese)
- [3] ZHOU S Y, ZHAO J. Optimum combinations of building envelop energy-saving technologies for office buildings in different climatic regions of China [J]. Energy and Buildings, 2013, 57: 103-109.
- [4] 沈婷婷. 夏热冬冷地区既有居住建筑节能改造策略研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2010.
SHEN T T. Study on strategies for energy efficiency renovation of existing residential buildings in hot summer and cold winter region [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010. (in Chinese)
- [5] 赵成光. 山东省既有建筑外墙外保温节能改造技术研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2010.
ZHAO C G. Research of external insulation energy saving reconstruction technology of Shandong existing building exterior wall [D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2010. (in Chinese)
- [6] 费良旭. 海南地区既有建筑节能改造技术研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2014.
FEI L X. Research on technologies of energy efficiency retrofit for existing buildings in Hainan [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2014. (in Chinese)
- [7] YU J H, YANG C Z, TIAN L W, et al. A study on optimum insulation thicknesses of external walls in hot summer and cold winter zone of China [J]. Applied Energy, 2009, 86(11): 2520-2529.
- [8] HASAN A. Optimizing insulation thickness for buildings using life cycle cost [J]. Applied Energy, 1999, 63 (2): 115-124.
- [9] 韦毅. 价值工程在外墙保温材料选择中的应用[J]. 价值工程, 2011(7): 36-37.
WEI Y. Application of value engineering in the selection of insulation material of external wall [J]. Value Engineering, 2011(7): 36-37.
- [10] 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.
- [11] UCAR A, BALO F. Determination of the energy savings and the optimum insulation thickness in the four different insulated exterior walls [J]. Renewable Energy, 2010, 35 (1): 88-94.
- [12] DAOUAS N. A study on optimum insulation thickness in walls and energy savings in Tunisian buildings based on analytical calculation of cooling and heating transmission loads [J]. Applied Energy, 2011, 88 (1): 156-164.
- [13] OZEL M. Effect of wall orientation on the optimum insulation thickness by using a dynamic method [J]. Applied Energy, 2011, 88(7): 2429-2435.
- [14] KAYFECI M, KEÇEBAS A, GEDIK E. Determination of optimum insulation thickness of external walls with two different methods in cooling applications [J]. Applied Thermal Engineering, 2013, 50 (1): 217-224.
- [15] HUO H E, JING C J, HUO H B. Effect of natural ventilation on transmission load of building external walls and optimization of insulation thickness [J]. Journals of the Japan Society of Mechanical Engineers, 2015, 10(2): 1-17.
- [16] MAHLIA T M I, TAUFUQ B N, ISMAIL, et al. Correlation between thermal conductivity and the thickness of selected insulation materials for building wall [J]. Energy and Buildings, 2007, 39 (2): 182-187.
- [17] 霍海娥, 敬成君, 霍海波. 改进遗传算法在导热反问题研究中的应用[J]. 西华大学学报(自然科学版), 2014, 33(1): 94-98.
HUO H E, JING C J, HUO H B. An application of improved genetic algorithm in study of inverse heat conduction problem [J]. Journal of Xihua University (Natural Science), 2014, 33(1): 94-98. (in Chinese)

- [18] 陆耀庆. 实用供热空调设计手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.
- LU Y Q. Practical design manual of heating and air conditioning [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2007. (in Chinese)
- [19] 黄光德. 夏热冬冷地区居住建筑能耗分析[D]. 重庆: 重庆大学, 2006.
- HUANG G D. The analysis of energy consumption of residential buildings in hot summer and cold winter zone [D]. Chongqing: Chongqing University, 2006. (in Chinese)
- [20] 中国气象局气象信息中心气象资料室, 清华大学建筑技术科学系. 中国建筑热环境分析专用气象数据集[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
- China Meteorological Bureau-Climate Information Center-Climate Data Office, Tsinghua University-Department of Building Science and Technology. China standard weather data for analyzing building thermal conditions[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2005. (in Chinese)
- [21] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 夏热冬冷地区居住建筑节能设计标准: JGJ 134—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the PRC. Design standard for energy efficiency of residential buildings in hot summer and cold winter zone: JGJ 134-2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.
- [22] DEB K, PRATAP A, AGRAWAL S, et al. A fast and elitist multi-objective genetic algorithm: NSGA-II [C]// IEEE transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182-197.

(编辑 胡玲)