

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2016.04.003



居住建筑室内热环境低能耗营造的 多目标设计方法

喻伟,王迪,李百战

(重庆大学 城市建设与环境工程学院;教育部绿色建筑与人居环境营造国际合作联合实验室,重庆 400045)

摘要:人居环境改善涉及重大民生问题,节能减排是国家重大战略。因此,有必要寻求合理的居住建筑设计方法,使设计方案既满足居民的室内热舒适需求又能降低建筑能耗。基于多目标遗传优化算法,建立能够对建筑设计方案进行优化、实现增加室内热舒适时间比例的同时降低建筑全年冷热负荷的居住建筑设计双目标优化模型。最后,以重庆典型户型为实例进行优化,优化后的设计方案建筑全年冷热负荷降低了47.74%,室内热舒适时间比例提高了3.94%,验证了模型的可行性和准确性。

关键词:热舒适;建筑能耗;多目标优化;适应度函数

中图分类号:TU111.19 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2016)04-0013-07

Multi-objective design method of improving the indoor thermal environment with low energy consumption in residential building

Yu Wei, Wang Di, Li Baizhan

(Faculty of Urban Construction and Environmental Engineering; Joint International Research Laboratory of Green Building and Built Environment, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

Abstract: To improve the living environment is a major livelihood issue, and energy saving and emission reduction is a major national strategy. Therefore, it is necessary to seek a reasonable design method which could not only meet the needs of residents in the indoor thermal comfort and reduce the building energy consumption of residential building. Based on the genetic algorithm, a multi-objective optimization model of residential building design is established which can optimize the design to increase the indoor thermal comfort time and reduce the annual cooling and heating load. Finally, taking the typical apartment of Chongqing as an example, the annual cooling and heating load of the optimized design plan is decreased by 47.74% and the indoor thermal comfort time ratio is increased by 3.94%, which verify the feasibility and accuracy of the model.

Keywords: thermal comfort; building energy consumption; multiobjective optimization; fitness function

收稿日期:2016-03-16

基金项目:国家自然科学基金(51408079,51578086);建筑安全与环境国家重点实验室开放课题基金(BSBE2014-10);重庆市研究生科研创新项目(CYB15040)

作者简介:喻伟(1983-),男,副教授,博士,主要从事绿色建筑与室内环境研究,(E-mail)yuweixsq@126.com.

Received:2016-03-16

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 51408079, 51578086); Opening Funds of State Key Laboratory of Building Safety and Built Environment (No. BSBE2014-10); Chongqing Graduate Research Innovation Project (No. CYB15040)

Author brief: Yu Wei (1983-), associate professor, PhD, main research interests: green building and indoor environment, (E-mail) yuweixsq@126.com.

人的一生有 80% 的时间生活在室内,改善室内环境质量、提高建筑室内热舒适,为居民创造良好的居住环境对居民健康和社会和谐都极为重要。随着经济水平快速提高,提升居住空间生活品质逐渐成为居民关注的热点,改善室内热环境已经变成人民的迫切需求^[1]。2014 年,中美签署应对气候变化和清洁能源合作的联合声明,中方正式提出 2030 年左右中国碳排放有望达到峰值^[2]。《中国建筑节能年度发展研究报告 2015》^[3]指出,2013 年中国建筑总商品能耗已占到全国能源消费总量的 19.5%,且呈现逐年上升的趋势。因此,减少建筑能耗也已经成为了国家实现节能减排的战略目标的重要一部分。然而,室内热舒适和建筑能耗往往是相互冲突的,如果对建筑室内热舒适的要求提高,往往会带来建筑能耗的增加^[4-5]。要想在保障室内热舒适的同时减少建筑的能耗,就需要对建筑设计方案进行综合优化,寻求最优设计方案。

在建筑方案设计中存在繁多的设计变量,例如,围护结构的热工特性、窗墙比、朝向等。大量设计变量与室内热舒适及建筑能耗之间存在着非线性复杂耦合关系,导致设计师在优化时,一方面有许多可供选择的优化组合,另一方面无法直观地判断各设计组合是否产生了理想的效果,最终导致设计方案减少了能耗也减少了室内热舒适或者既减少了室内热舒适又增加了能耗,搜索不到最佳的设计方案^[6-7]。大多数的建筑优化应用研究都集中在以建筑能耗、经济成本等方面为主的研究,而以降低建筑能耗的同时改善室内热舒适为优化目标的系统研究较少。Coley 等^[8]以成本和能耗为目标,研究地中海低能耗建筑设计方法;Shi^[9]以减少保温材料使用和降低能耗为导向,研究建筑设计方案;Méndez 等^[10]以采暖、制冷、灯光能耗最小为目标,研究建筑的优化设计。

笔者从建筑能耗和室内热舒适出发,使用 NSGA-II (Dominated Sorting Genetic Algorithm-II) 作为方案搜索引擎,GA-BP 模型 (Genetic Algorithm-Back Propagation Neural Network) 作为适应度函数评价工具,建立了居住建筑设计多目标优化模型,并通过实例验证了该模型的可行性和准确性。

1 建筑能耗与室内热舒适的多目标优化方法

同时优化建筑能耗与室内热舒适属于典型的多目标优化问题,它的复杂性在于:建筑能耗与室内热舒适存在相互竞争的关系,当建筑能耗取得较好优化结果的同时,室内热舒适的优化效果可能不理想,所以,最终得到的往往不是唯一的最优方案,而是一组 Pareto 解集。Pareto 解定义为:将建筑能耗及室内热舒适转化为多目标最小化问题,即建筑能耗最低,热不舒适时间最小; g_1 为建筑能耗, g_2 为热不舒适时间,组成 $\bar{g}(\bar{x}) = (g_1(\bar{x}), g_2(\bar{x}))$,其中 $\bar{x}_u \in U$ 为决策变量,若它满足当且仅当不存在决策变量 $\bar{x}_v \in U$,使得 $v = g(\bar{x}_v) = g(v_1, v_2, \dots, v_n)$ 支配 $u = g(\bar{x}_u) = g(u_1, u_2, \dots, u_n)$,则 \bar{x}_u 为 Pareto 最优解,也称非支配解。

多目标遗传算法常被用来寻求多目标优化问题的 Pareto 解集,并且在建筑领域的应用研究逐渐增加^[11]。2000 年,Deb 等^[12]、Chantrelle 等^[13]对遗传算法进行优化,提出了 NSGA-II,相对于之前的其他遗传算法具有更加优越的优化性能,因此,采用 NSGA-II 作为寻求 Pareto 解的算法。

NSGA-II 的计算结果如图 1 所示, g_1 为建筑能耗, g_2 为热不舒适时间。三角形代表 NSGA-II 计算过程中不同遗传代数的设计方案,圆形代表了 Pareto 最优解。NSGA-II 经过 N 代的遗传操作,使建筑设计方案不断朝着 Pareto 最优解的方向前进,最终得到 Pareto 最优解,即得到建筑能耗低,热不舒适时间小的建筑设计方案 Pareto 解集。

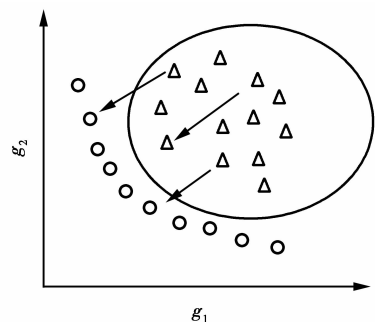


图 1 NSGA-II 计算结果

Fig 1 Calculation results of NSGA-II

2 居住建筑设计多目标优化模型

根据 NSGA-II 的原理,建立多目标优化模型,如图 2。

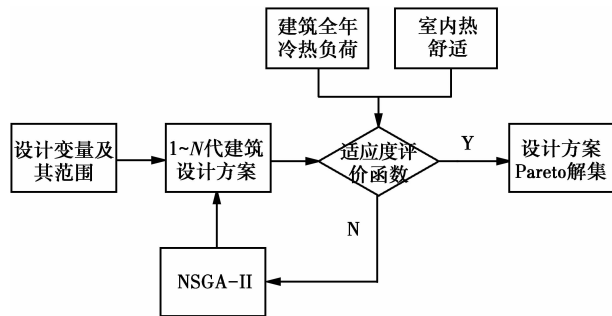


图 2 多目标优化模型的组成

Fig 2 Composition of multi-objective optimization model

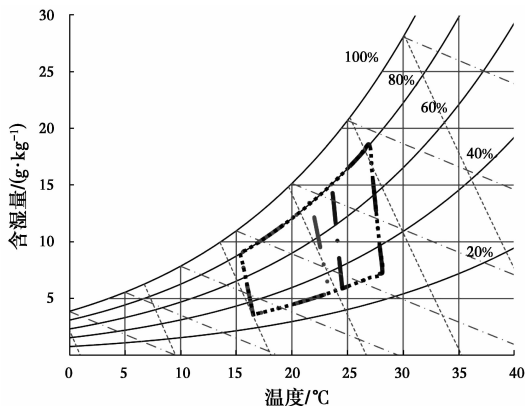
模型以建筑全年冷热负荷的能耗和室内舒适度为性能评价目标,将 NSGA-II 作为方案搜索引擎,GA-BP 作为方案种群的适应度函数评价工具,经过 N 代的遗传操作优化后,最终得到建筑设计方案的 Pareto 解集。在模型中设计师只需要限制设计变量的范围,然后计算机便会自动运算,最终得到设计方案 Pareto 解集。

2.1 优化目标

主要研究寻求保证室内热舒适同时减少建筑能耗的设计方法,因此,将建筑能耗及室内热舒适做作为目标函数。考虑到居住建筑的空调系统形式较为单一,多为单元式空调,因此,选择使用建筑全年冷热负荷取代建筑能耗作为优化目标。而室内热舒适的衡量标准取建筑在非采暖空调的状况下,全年逐时室内温湿度处于可接受热舒适范围内的小时数占全年总小时数的比例。如图 3 所示,重庆地区非采暖空调情况下,可接受范围为图中虚线包围区域^[7]。同理,也可将建筑设计者的其他需求作为目标函数,如通风,采光效果等。

2.2 设计变量

对于一些设计变量,业主往往会提出要求,因而不需要设计师自行确定,如建筑平面布局、楼层、建筑面积等;而其他设计变量则需要设计师自行取值,例如:朝向、窗墙比、体形系数、传热系数等。寻求建筑设计方案的 Pareto 解集便是寻求由设计师自行确定的设计变量的最佳取值组合。结合《夏热冬冷地区居住建筑节能设计标准》^[14]、《重庆市居住建筑节能 65% 设计标准》^[15] 等现行居住建筑节能设计标准和设计规范,可以确定设计变量的取值范围。



注: ———夏季舒适区 —··—冬季舒适区 ·····全年舒适区

图 3 可接受热舒适范围

Fig 3 Acceptable thermal comfort range

2.3 适应度评价函数

NSGA-II 中需要选择合适的计算工具对种群中个体的目标函数进行评价。评价目标为建筑的全年冷热负荷和室内热舒适,目前用于计算这两个目标的常用方法为动态模拟计算。然而动态模拟计算较为复杂,不仅需要对计算软件进行长时间的学习,同时优化模型中涉及到成千上万次的迭代计算,造成的时间消耗不可估量。因此,建筑设计多目标优化模型需采用一种能够既快速又准确预测建筑全年冷热负荷和室内热舒适的工具来对目标函数进行计算。

喻伟等^[16]提出了使用遗传算法修正 BP 神经网络 (Back Propagation Neural Network),建立了 GA-BP 模型,并以重庆市典型居住建筑户型为原型,验证了该模型在预测居住建筑全年冷热负荷和室内热舒适的准确性,如图 4 所示。该模型通过输入样本进行学习各输入变量(设计变量)与输出变量(目标函数)之间的关系,将各个变量之间的关系存储在网络的内部结构中,使用者通过输入各设计变量的值即可快速得到建筑全年冷热负荷和室内热舒适的预测结果。经验证该模型建筑全年冷热负荷预测的最大相对误差为 1.7%,室内舒适比例的最大相对误差为 1.7%。因此,使用该 GA-BP 预测模型作为适应度函数评价工具。

2.4 多目标优化算法设计

多目标遗传算法 NSGA-II 的重点主要在遗传操作的设定上,包括编码方法、初始种群设定、控制参数设定、适应度函数设定。对于不同的优化问题,遗传操作的设计也各有不同。笔者选用浮点数编码方式,根据相关文献^[17]选定了优化模型各个参数的

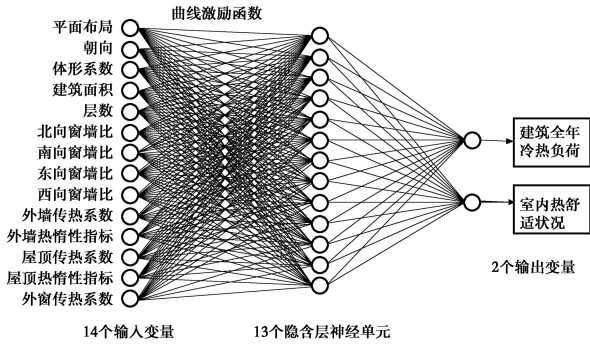


图 4 GA-BP 模型示意图

Fig 4 GA-BP model

取值:选择算法采用竞赛模为 2 的锦标赛选择法,交叉概率为 0.9,变异概率为 0.1;种群大小为 100;最大遗传代数 为 700。

目标函数的计算是 GA-BP 建立起来的人工神经网络计算模块 net。目标函数转化后得到适应度函数,适应度计算函数为

$$eval = sim(net, sol) \quad (1)$$

仿真函数 sim 调用已建立的人工神经网络计算模块 net,计算个体 sol 的适应度值 eval。

两个目标函数分别是建筑全年冷热负荷和室内舒适状况,考虑到个体的适应度值不能为负值,将建筑全年冷热负荷及室内热舒适转化为多目标最小化问题。室内热舒适时间比例的最大值为 1,因此,采用界限构造法,将室内热舒适这一目标函数的适应度函数变化为

$$eval_{min} = 1 - eval \quad (2)$$

最后得到建筑全年冷热负荷及室内热舒适的适应度函数

$$g(1) = eval(1, :) \quad (3)$$

$$g(2) = 1 - eval(2, :) \quad (4)$$

通过使用 Matlab 的 Optimization 工具箱并进行编程,最终建立了多目标优化模型的用户界面,如图 5 所示。

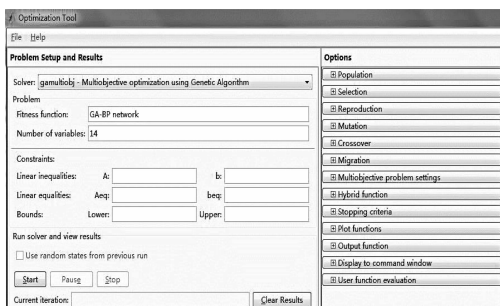


图 5 优化模型用户界面

Fig 5 User interface of optimization model

3 案例

为了验证多目标优化模型的准确性和可行性,以重庆市典型居住建筑户型^[18]为例进行优化分析。案例建筑总建筑面积 600 m²,高 3 层,层高 2.8 m,每层 2 户,每户建筑面积为重庆市的 3 口之家主力户型面积,约 90 m²,如图 6 所示。

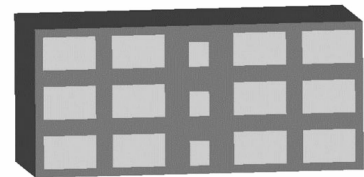


图 6 典型居住建筑平面图及效果图

Fig 6 Diagram of typical residential building

根据《重庆市居住建筑节能 65%设计标准》^[15]设定室内采暖设计温度为 18 ℃,空调设计温度为 26 ℃。室外温度为 18~26 ℃时,通风换气次数设定为 5 次/h,其余均设定为 1 次/h;渗透通风设定为 0.5 次/h。

使用多目标优化模型来寻求既节约能源又能保证室内热舒适的建筑设计方案。建筑布局、楼层、建筑面积、体形系数这 4 个变量已经限定,在表 1 中给出的剩余 10 个设计变量有待求解。按照《重庆市居住建筑节能 65%设计标准》^[15]在模型中设置这 10 个变量的变化范围。

模型优化过程如图 7、图 8 所示。如图 7 所示,随机产生初代种群;当进化到 318 代时,计算结果的平均变化小于设定值 10⁻⁴,优化过程结束。最终优化成功,获得了 Pareto 解集,均匀分布在最优解集中。图 8 中各个点均是设计方案的 Pareto 解,设计者可以根据对全年冷热负荷和热舒适的实际需求在 Pareto 解集中选择优化设计方案。

从图 8 可知,在 Pareto 解的设计方案中,室内热不舒适时间在 52%~54.5%之间分布,这意味着对建筑进行优化后,非采暖空调下的室内舒适时间的比例变化很小。因此,可以在 Pareto 解集中选取建筑全年冷热负荷最低的设计方案为建筑设计方案的最优解,选择出该方案对基准建筑的设计方案进

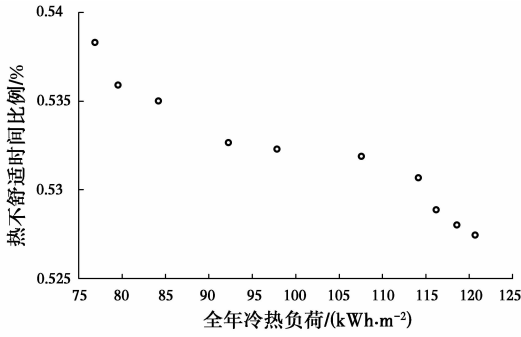


图 7 第 1 代种群分布
Fig 7 First generation population

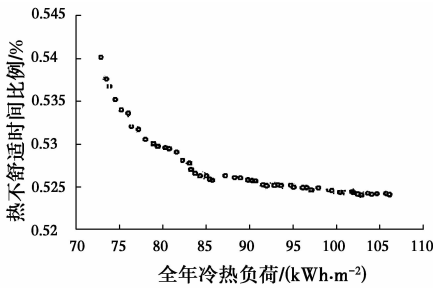


图 8 第 318 代种群分布
Fig8 318th generation population

行优化,如表 1 所示。优化方案对基准方案中的 9 个变量进行了更改。

表 1 建筑设计方案优化调整

Table 1 Optimizing adjustment of building design

优化指标	基准方案	优化方案
朝向/(°)	0(朝南)	172(近似朝北)
东向窗墙比	0.2	0
西向窗墙比	0.2	0
南向窗墙比	0.3	0.2
北向窗墙比	0.35	0.35
外墙传热系数/ (W·(m²·K)⁻¹)	1.96	0.5
外墙热惰性指标	3.03	3.93
屋顶传热系数/ (W·(m²·K)⁻¹)	2.71	0.5
屋顶热惰性指标	1.76	3.41
外窗传热系数/ (W·(m²·K)⁻¹)	5.1	1.8

使用 Energyplus 模拟计算优化前后建筑设计方案的建筑全年冷热负荷和室内舒适状况,并与多目标优化模型的预测结果进行对比,如图 9、10 所

示。可以看出,多目标优化模型的预测结果与 Energyplus 的模拟结果差距较小,其中结果误差最大的是基准方案的热舒适时间比例,但也仅为 2.49%;根据 Energyplus 模拟计算结果,优化后的建筑方案的建筑全年冷热负荷降低了 47.74%,且室内热舒适时间的比例增加了 3.94%,达到了优化的目的。

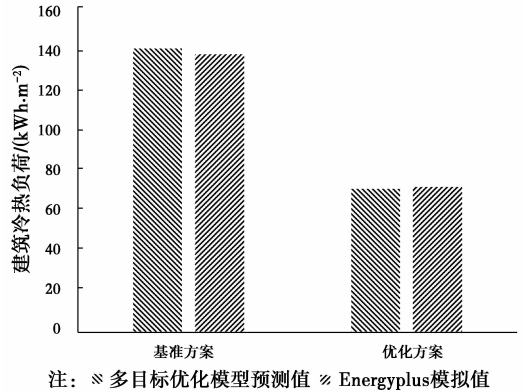


图 9 建筑冷热负荷优化结果

Fig 9 Optimization results of building cooling and heating load

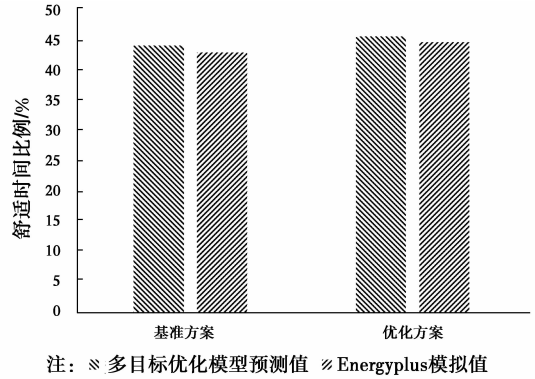


图 10 舒适时间比例优化结果

Fig 10 Optimization results of thermal comfort time ratio

4 结 论

通过使用 NSGA-II 作为方案搜索引擎,GA-BP 作为适应度函数评价工具,建立了以建筑全年冷热负荷和室内热舒适为优化目标的居住建筑设计多目标优化模型。使用该模型对实际案例进行分析,经过 318 代进化后得到了建筑设计方案的 Pareto 解集,从解集中选出了一组优化方案,使得建筑全年冷热负荷降低了近 47.74%,室内热舒适时间的比例增加了 3.94%,从而验证了该模型的可行性。并与 Energyplus 的计算结果进行对比,验证了准确性。

该模型可用于指导建筑设计,实现了在满足室内健康舒适的前提下寻求建筑的最佳节能设计方案,为设计师寻求在保证室内热舒适前提下的低能耗居住建筑设计方案提供了技术支撑。

对于建筑设计多目标优化研究的进一步展望:

1)模型仅以建筑全年冷热负荷和室内热舒适为优化目标,在今后的研究中,从数量上说可以增加至同时优化多个目标,在目标函数上可以扩展到通风、采光效果、经济等其他建筑性能。

2)模型以 GA-BP 模型为适应度计算内核,它的计算精确度取决于训练样本的选择。如果追求更加精确的解可以使用仿真模拟软件来进行计算。

3)各设计变量(多设计变量)共同作用时,对建筑全年冷热负荷和室内热舒适(多目标)的综合影响耦合关系仍有待进一步解析。

4)模型仅以建筑方案设计阶段为主,在今后的研究中,可以将运行阶段影响建筑能耗和室内热舒适状况的因素与设计阶段的因素结合起来。

随着社会的不断发展,建筑使用者会对建筑的各项功能提出更多和更细节的要求,因此,对于建筑设计多目标优化模型的深入研究具有深远意义。

参考文献:

- [1] 张寅平. 中国室内环境与健康研究进展报告[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2012.
ZHANG Y P. Report on the research progress of indoor environment and health in China [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012. (in Chinese)
- [2] ZHENG B, ZHANG Q, BORKEN-KLEEFELD J, et al. How will greenhouse gas emissions from motor vehicles be constrained in China around 2030 [J]. Applied Energy, 2015, 156: 230-240.
- [3] 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[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2015.
Building Energy Research Center of Tsinghua University. China building energy efficiency annual development report [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015. (in Chinese)
- [4] KIM J, HONG T, JEONG J, et al. An optimization model for selecting the optimal green systems by considering the thermal comfort and energy consumption [J]. Applied Energy, 2016, 169: 682-695.
- [5] MANZANO-AGUGLIARO F, MONTOYA F G, SABIO-ORTEGA A, et al. Review of bioclimatic architecture strategies for achieving thermal comfort [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 49: 736-755.
- [6] BEKTAS EKICI B, AKSOY U T. Prediction of building energy needs in early stage of design by using ANFIS [J]. Expert Systems with Applications, 2011, 38(5): 5352-5358.
- [7] 喻伟. 住宅建筑保障室内(热)环境质量的低能耗策略研究[D]. 重庆:重庆大学, 2011.
YU W. The low energy-consumption strategy for improving indoor thermal environment quality in residential building [D]. Chongqing: Chongqing University, 2011. (in Chinese)
- [8] COLEY D A, SCHUKAT S. Low-energy design: combining computer-based optimisation and human judgement [J]. Building and Environment, 2002, 37(12): 1241-1247.
- [9] SHI X. Design optimization of insulation usage and space conditioning load using energy simulation and genetic algorithm [J]. Energy, 2011, 36(3): 1659-1667.
- [10] MÉNDEZ ECHENAGUCIA T, CAPOZZOLI A, CASCONI Y, et al. The early design stage of a building envelope: Multi-objective search through heating, cooling and lighting energy performance analysis [J]. Applied Energy, 2015, 154: 577-591.
- [11] ATTIA S, HAMDY M, BRIEN W O, et al. Assessing gaps and needs for integrating building performance optimization tools in net zero energy buildings design [J]. Energy and Buildings, 2013: 110-124.
- [12] 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.
- [13] CHANTRELLE F P, LAHMIDI H, KEILHOLZ W, et al. Development of a multicriteria tool for optimizing the renovation of buildings [J]. Applied Energy, 2011, 88(4): 1386-1394.
- [14] 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 Construction of the People's Republic of China. Energy saving design standard of residential buildings in hot summer and cold winter regions: JGJ 134-2010 [S]. Beijing: China

- Architecture & Building Press, 2015. (in Chinese)
- [15] 重庆市城乡建设委员会. 重庆市居住建筑节能 65% 设计标准: DBJ50-071-2010 [S]. 重庆, 2010.
Urban and Rural Construction Committee of Chongqing. Design standard for energy efficiency 65% of residential building: DBJ50-071-2010 [S]. Chongqing, 2010. (in Chinese)
- [16] 喻伟, 李百战, 杨明宇, 等. 基于人工神经网络的建筑多目标预测模型[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012, 43(12): 4949-4955.
YU W, LI B Z, YANG M Y, et al. Building multi-objective predicting model based on artificial neural network [J]. Journal of Central South University (Natural Science Edition), 2012, 43 (12): 4949-4955. (in Chinese)
- [17] DEB K. Multi-objective optimization using evolutionary algorithms [M]. New York: John Wiley & Sons, 2001.
- [18] 重庆市建设技术发展中心. 建筑节能设计标准培训辅导教材[M]. 重庆:重庆市建筑节能协会, 2005.
Construction Technology Development Center of Chongqing. Building energy saving design standard training teaching material [M]. Chongqing: Chongqing Building Energy Conservation Association, 2005. (in Chinese)

(编辑 胡英奎)