

夏热冬暖地区办公建筑围护结构改造节能经济性分析*

宋鑫焱^{1,2,3,4}, 叶灿滔^{1,2,3†}, 徐琼辉^{1,2,3}, 李华山^{1,2,3}, 马伟斌^{1,2,3}

(1. 中国科学院广州能源研究所, 广州 510640; 2. 中国科学院可再生能源重点实验室, 广州 510640;
3. 广东省新能源和可再生能源研究开发与应用重点实验室, 广州 510640; 4. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 对夏热冬暖地区某办公建筑进行能耗测试, 利用能耗模拟软件 TRNSYS 对该建筑空调能耗进行模拟, 分析空调冷负荷对于各围护结构的敏感性, 对影响能耗显著的外墙、遮阳系数及建筑渗透率进行改造。利用 NPV 动态经济评价体系, 在建筑运行时间内对 26 种改造方案进行节能经济性分析。结果表明, 外墙中度强化、建筑渗透率高度强化及遮阳系数高度强化方案的经济收益值最大, 改造成本回收年限较短, 为经济性最优改造方案。

关键词: 办公建筑; 围护结构; 敏感性分析; TRNSYS; 经济性分析

中图分类号: TK-9; TU831.6

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.2095-560X.2016.06.011

Energy and Economy Analysis of Building Envelope Retrofitting in the Hot Summer and Warm Winter Zone of China

SONG Xin-yan^{1,2,3,4}, YE Can-tao^{1,2,3}, XU Qiong-hui^{1,2,3}, LI Hua-shan^{1,2,3}, MA Wei-bin^{1,2,3}

(1. Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;
2. Key Laboratory of Renewable Energy, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;
3. Guangdong Provincial Key Laboratory of New and Renewable Energy Research and Development, Guangzhou 510640, China;
4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: This study selected an office building to test the demand of building cooling load in the hot summer and warm winter zone of China. Based on the hourly cooling load simulated by TRNSYS, sensitivity analysis was conducted on the building envelopes, and the exterior wall, shading coefficient and infiltration rate were retrofitted for assessing their thermal responses. Moreover, 26 retrofitting schemes were compared by energy and economic NPV evaluation. The results indicate that the optimal scenario is the scheme of the exterior wall slightly-retrofitted, infiltration rate highly-retrofitted and shading coefficient highly-retrofitted, which owns the maximum profit and an economical payback period.

Key words: office building; building envelope; sensitivity analysis; TRNSYS; economic analysis

0 前言

建筑能耗约为社会总商品能耗的 40%^[1]。中国是世界第二大建筑用能国家, 2015 年公共建筑能耗占社会终端能耗的 37.3%, 预计到 2050 年, 建筑能耗将高达 50%^[2-3]。公共建筑能耗是建筑能耗中的重要部分, 2011 年公共建筑平均单位面积能耗为 21.4 kgce/m², 在所有建筑中能耗增长最为迅速; 公共建筑大部分为高能耗建筑, 对既有建筑的节能改造是实现建筑节能的重要方法, 也是缓解我国能源紧缺、减轻环境污染、促进可持续发展的一项最直

接有效的措施^[4]。

在建筑围护结构改造技术方面的主要研究有: ①围护结构施加保温隔热层, 包括泡沫玻璃保温板、聚苯乙烯泡沫等; ②外窗改造, 主要有更换窗玻璃、使用镀膜玻璃等; ③采用遮阳装置。周丹^[5]对建筑屋面施加聚苯乙烯保温板, 实现了 5.3% 的节能率。郝明慧等^[6]利用清华大学开发的 DesT 软件对建筑能耗进行模拟, 阐述了不同气候区建筑外墙保温厚度与节能率之间的关系。在建筑围护结构改造成果分析方面, STAZI 等^[7]利用 Energy Plus 分析建筑外墙改造中材料、厚度的优化方案。TERÉS-ZUBIAGA

* 收稿日期: 2016-06-16 修订日期: 2016-07-20

基金项目: 广东省重大科技专项 (2013A011404007)

† 通信作者: 叶灿滔, E-mail: yect@ms.giec.ac.cn

等^[8]利用能耗模拟软件 TRNSYS 优化居住建筑外墙、外窗及楼板的热工性能,并分析了外墙、楼板改造的经济性。KIM 等^[9]综合设计了一套适宜于居住建筑的智能外遮阳设施。刘嘉玲等^[10]利用 eQUEST 软件对广州地区办公建筑不同围护结构的节能潜力进行了分析。

本文研究办公建筑围护结构改造方案及其经济性,有别于以上研究。首先,为确保仿真结果的可靠性,进行了建筑能耗测试,对仿真模型进行了校核;其次,分析了对能耗影响较大的因素,对建筑能耗敏感性大的围护结构进行改造,突破以往经验式的改造模式;第三,既研究了单体围护改造方案特点,也分析了综合改造方案的性能,多方位地考察了改造效果;最后,采用动态经济性评价方法,对在建筑运行时间内的 26 种改造方案进行了分析。研究结果对于既有建筑的改造及新建建筑的设计均具有重要的指导作用。

1 办公建筑选取

选取广州为代表区域,广州位于夏热冬暖地区,夏季高温多雨,冬季温暖潮湿,一年中长夏无冬,年平均气温高,日照时间长,属于亚热带海洋性季风气候。该地区办公建筑的节能设计主要考虑夏季空调,不考虑冬季采暖^[11]。本文选取一栋建成于 2003 年的办公建筑为研究对象,根据广州市气象特点,选取 8 月、9 月进行能耗测试,跟踪其具体能耗情况。基准建筑模型如图 1 所示:

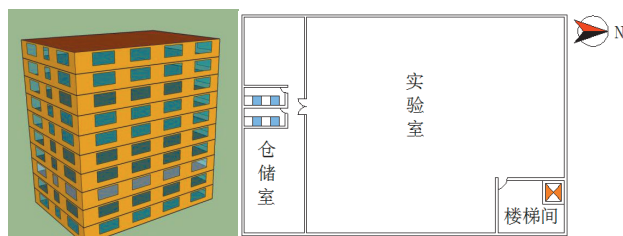


图 1 基准建筑模型

Fig. 1 3D model and plane figure of office building

该办公建筑为东西朝向,正立面朝向西,建筑共 10 层,层高 3.3 m,总建筑面积为 6 120 m²,窗墙面积比约为 0.3。其中,实验室为热工区域,面积为 456 m²,楼梯间和仓储室为非热工区域,不设置空调。办公建筑的内部负荷、室内设计工况及暖通空调系统设置符合相应的建筑设计、节能设计标准。

2 计算模型

2.1 模型建立及校核

(1) 模型建立。对实体建筑进行建筑物理分析,在 TRNSYS 平台搭建计算模型,建筑基本情况如表 1 所示。

表 1 实体建筑基本情况

Table 1 Detailed information of office building model

模拟对象	具体介绍	参数值
外墙	粉煤灰烧结多孔砖 190 mm, 双面抹灰	$k=1.12 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
屋顶	防水复合屋顶, 防水砂浆 30 mm, 陶粒混凝土 80 mm, 聚氨酯防水层 2 mm, 水泥砂浆 30 mm	$k=0.83 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
外窗	铝合金框 5 mm 单层钢化玻璃	$k=5.16 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ $S_c = 0.78$
换气次数	设计要求指标	2.00 次/h

注: k 为传热系数, S_c 为遮阳系数。

基准建筑模型模拟时间为全年 1 月 1 日-12 月 31 日,由于广州地区最热的时段为 8 月、9 月,因此在 8 月、9 月分别选取 3 天,对空调机组和建筑空气渗透率进行检测。办公建筑空调的使用时间为周一至周五,测试时段为 9:00-17:00。空调机组测试参数为制冷机组冷冻水的进口水温、出口水温及冷冻水流量;房间气密性测试参数为 SF₆ 气体浓度。表 2 为测试仪器的参数。

表 2 测试仪器性能参数

Table 2 Characteristics of sensors

参数	单位	测试仪器	不确定度
温度	°C	SIN-RC-4HC/A	±0.50 °C
流量	m ³ /h	LDG-MK	±0.04 m ³ /h
渗透率	vol/h	NDIR	±0.03 vol/h

注: vol 为测试房间体积。

室内空调冷负荷、房间气密性分别可以按照式 (1) 和式 (2) 进行计算^[12-13]:

$$Q_c = 1.15V_L(t_2 - t_1) \quad (1)$$

$$A = (\ln C_0 - \ln C_t) / t \quad (2)$$

式中： Q_c 为室内计算空调能耗，kW； V_L 为测试冷冻水流量， m^3/h ； t_2 为冷冻水出口水温， $^{\circ}C$ ； t_1 为冷冻水进口水温， $^{\circ}C$ ； A 为渗透率， vol/h ； C_t 、 C_0 为 t 时刻和初始时刻的示踪气体浓度， mg/m^3 。

空调能耗测试值与模拟值对比如图 2 所示。

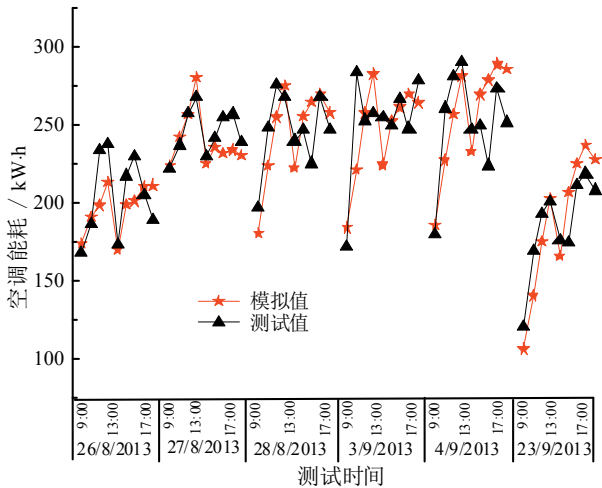


图 2 模拟与测试能耗对比图

Fig. 2 Simulated and measured energy consumption

(2) 模型校核。对比模拟输出结果与能耗测试数据，校核建筑模型，以校核完毕的模型为基准建筑模型。

根据 ASHRAE Guideline^[14]规定，模拟值与测试值的平均百分误差 (NMBE) 在 $\pm 5\%$ 范围内，则模拟结果合理。NMBE 值可按式 (3) 计算。

$$V_{NMBE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{x_i - y_i}{y_i} \quad (3)$$

式中： x_i 为模型计算结果， $kW \cdot h$ ； y_i 为实验测试结果， $kW \cdot h$ ； n 为总的测试次数。根据式 (3) 计算所得结果，模型 NMBE 值为 -0.66% ，表明模型的计算结果在合理范围以内，模型校核完成。

2.2 围护结构敏感性分析

进行建筑能耗模拟分析前，首先确立建筑能耗的影响因素。有别于文献[4]中对于围护结构的敏感性分析，本研究考察冷负荷对外墙传热系数、外窗传热系数、楼板传热系数、渗透率以及遮阳系数等围护结构的敏感性；该办公建筑的窗墙面积比为 0.3，符合建筑采光设计标准^[15]，由于建筑的采光要求，本研究不考虑建筑窗墙面积比对于空调冷负荷的影响；此外，考察建筑围护结构本体对于空调负荷的敏感性，不考虑设备、照明功率等外扰因素。

本文用敏感性系数 (I_C) 来衡量各个因素对建筑冷负荷的影响程度大小，其定义式为^[14]：

$$I_C = \frac{O_P - O_{P,bc}}{O_{P,bc}} \bigg/ \frac{I_P - I_{P,bc}}{I_{P,bc}} \quad (4)$$

式中： O_P 为建筑的模拟输出参数结果，即建筑能耗； I_P 为建筑的模拟输入参数值； $O_{P,bc}$ 为基准建筑的模拟输出参数结果，即基准建筑能耗； $I_{P,bc}$ 为基准建筑的模拟输入参数值。根据式 (4) 计算出各围护结构的敏感性系数，对计算结果进行拟合，结果如图 3 所示。

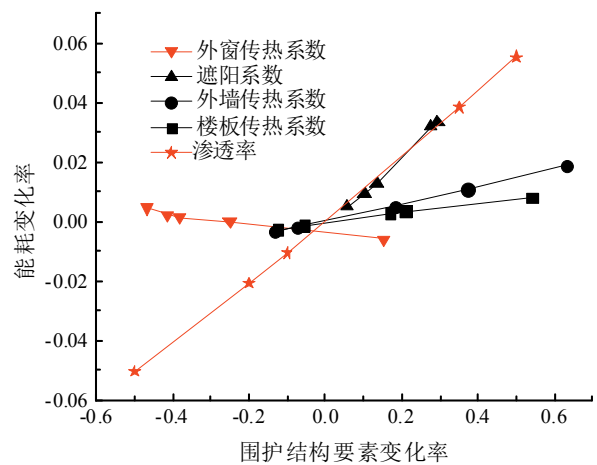


图 3 围护结构敏感性系数

Fig. 3 Sensitivity of envelope parameters

图 3 显示了冷负荷对各围护结构要素的敏感性，各要素拟合曲线的斜率即为其敏感性系数^[16]。为研究各要素的相对敏感性，分析空调冷负荷对围护结构各要素敏感程度的差异，定义相对敏感性系数，计算式如下：

$$\omega_i = \frac{|I_{C_i}|}{\sum_{i=1}^n |I_{C_i}|} \quad (5)$$

式中： ω_i 为相对敏感性系数； I_{C_i} 为各要素的敏感性系数； n 为围护结构参量个数。敏感性系数绝对值的大小反映了该项参数对相应输出结果的影响程度，敏感性系数绝对值越大，表明围护结构对冷负荷的影响越大。敏感性系数为正，表示随着设计参数值的增大，相应的输出值将增大，反之则减小^[8]。

相对敏感性系数如表 3 所示，遮阳系数 (s_c)、渗透率 (I_{nf}) 及外墙传热系数对空调负荷的敏感性

相对较高,三者相对敏感性系数之和为 89.32%,远大于屋顶、外窗的敏感性。

表 3 围护结构敏感性系数及相对敏感性系数
Table 3 Sensitivity and relative sensitivity of envelope parameters

序号	变量	敏感性系数 I_{Ci}	相对敏感性系数 $\omega_i/\%$
1	遮阳系数 S_C	0.1234	42.59
2	渗透率 I_{nf}	0.1062	36.67
3	外墙传热系数	0.0291	10.06
4	屋顶传热系数	0.0158	5.46
5	外窗传热系数	-0.0151	5.22

表 4 围护结构改造方案
Table 4 Detailed information of envelope retrofitting schemes

改造方案	外墙: 施加 EPS 保温板		建筑渗透率 I_{nf} : 渗透率修复		遮阳系数 S_C : 替换高性能玻璃	
	$k / [W/(m^2 \cdot K)]$	改造成本/元	$I_{nf}/(vol/h)$	改造成本/元	S_C	改造成本/元
未改造 0	1.12	0.00	2	0.00	0.78	0.00
中度改造 1	0.49	10 817.28	1.5	26 761.51	0.55	47 754.72
高度改造 2	0.27	29 797.72	1	53 723.42	0.23	96 305.35

3 计算结果与讨论

3.1 仿真结果

根据表 4 中的改造方案,单因子改变围护结构热工系数,调节 TRNSYS 模型热工参数值,计算各改造方案的年能耗水平。各模型的能耗仿真结果如图 4 所示。

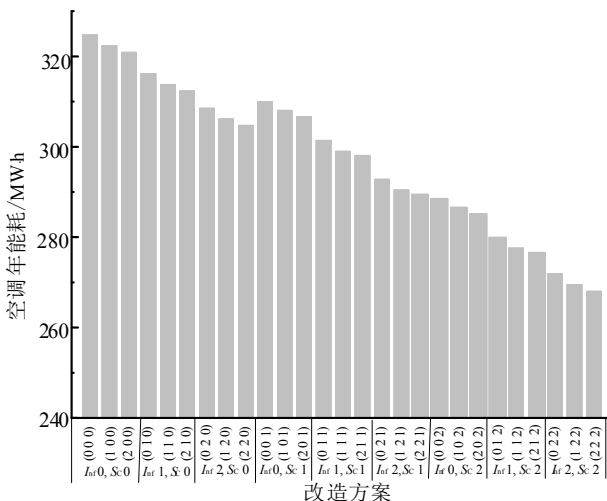


图 4 各改造方案年能耗

Fig. 4 Annual energy consumption of retrofitted scenarios

2.3 围护结构改造

根据围护结构的热工性能敏感性分析结果,遮阳系数、渗透率及外墙传热系数对空调负荷的敏感性相对较高,选择三者进行节能改造。EPS 聚苯乙烯保温板是一种隔热保温性能非常优良的材料,在国内使用最为普遍^[17],外墙通过施加 EPS 保温板进行改造,具有质量轻、隔热性好、低吸水性、易施工等特点;改善建筑渗透率可在建筑墙缝、门窗缝口粘贴防风胶条;遮阳系数的改善通过替换太阳得热系数小的窗玻璃来实现。具体改造方案、改造成本如表 4 所示(改造成本为材料费,不包括建筑维护费用)。

图中,方案(1 2 0)表示外墙中度改造,渗透率高度改造,遮阳系数未改造,其他情况依此类推。由图可知,随着改造强度的加大,各方案年能耗逐渐降低。改造前方案(0 0 0)的年能耗为 324.8 MW·h。改造方案(2 2 2)的年能耗为 268.4 MW·h,年能耗最低,相对于改造前节能率为 17.37%。

3.2 改造经济性分析

在建筑运行时间内,对围护结构改造进行经济性分析能很好地比较节能改造的优劣。净现值(NPV)是项目动态经济性评价的重要指标,当 NPV 值大于 0 时,改造方案可行;在一定的收益时间内,NPV 值越大,改造方案的经济性越高。NPV 值计算式为^[8]:

$$\begin{cases} V_{NPV} = -I + \sum_{n=0}^{L_S} \frac{S_n}{(1+r)^n} \\ S_n = S_0(1+p)^n \end{cases} \quad (6)$$

式中: I 为初投资,即改造成本,元; S_n 为第 n 年的节能收益,元; L_S 为建筑改造后的运行时间,年; r 为基准折现率; p 为能源(如天然气、电能)价格

年均上涨率, %。广东省能源价格上涨率平均为4%^[18], 文献[18]讨论了5种不同取值(4%~8%), 本文中 r 、 p 均按4%取定。

建筑运行时间为30年, 则净现值计算结果如图5所示。各改造方案的净现值和建筑运行时间成线性增长的关系, 净现值图线与横轴($V_{NPV} = 0$)的交点对应的时间为投资回收期。在建筑30年运行时间的条件下, 改造方案(122)能够收获最大的净现值。方案(002)、(020)和(200)分别表示单独对遮阳系数、渗透率和外墙进行高度改造, 三者的投资收益率分别为3.15、2.37和0.32, 表明遮阳系数和渗透率的改造比外墙改造更有经济效益, 其中方案(002)能获得最大的收益率, 成本回收时间最短, 该方案性价比较高。方案(122)收益率为2.82, 成本回收时间为7.85年, 净现值为454 097.02元, 经济收益值最大。

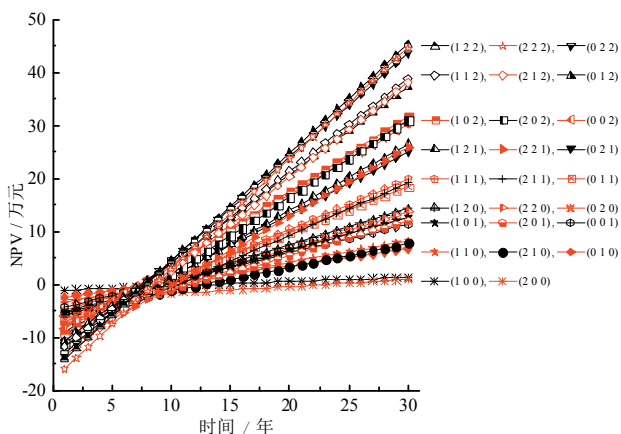


图5 各改造方案现金流

Fig. 5 Cash flows of the retrofitted scenarios

4 结论

本文通过对既有办公建筑进行能耗实测, 建立并校核了TRNSYS动态能耗仿真模型, 分析了围护结构对能耗的敏感性因素; 同时, 对于敏感性较强、能耗影响系数大的围护结构进行改造, 得到26种改造方案, 根据NPV分析了不同改造方案的动态经济性, 得到建筑运行时间内最优的改造方案。结果表明:

(1) 模拟值与测试值的平均百分误差为-0.66%, 仿真模型合理可靠。

(2) 遮阳系数、渗透率和外墙传热系数对于空调冷负荷的相对敏感性系数分别为42.59%、36.67%和10.06%, 为能耗影响系数较大的因素, 是主要的办公建筑改造对象。

(3) 若单独对遮阳系数、渗透率和外墙进行改造, 外墙的经济收益率最低, 遮阳系数经济收益率最高。

(4) 综合改造方案(222)年节能量最高, 相对改造前节能17.37%; 改造方案(122)在建筑运行时间内获得净现值为454 097.02元, 收益最大, 是最优改造方案。

参考文献:

- [1] AHMAD M W, MOURSHED M, MUNDOW D, et al. Building energy metering and environmental monitoring-A state-of-the-art review and directions for future research[J]. Energy and buildings, 2016, 120: 85-102. DOI: 10.1016/j.enbuild.2016.03.059.
- [2] 国家统计局能源统计司, 国家能源局综合司. 中国能源统计年鉴(2015)[M]. 中国统计出版社, 2015: 170-194.
- [3] International Energy Agency (IEA). Energy efficiency market report[EB/OL]. 2015. <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/energy-efficiency-market-report-2015-.html>.
- [4] 杨柳, 侯立强, 李红莲, 等. 空调办公建筑能耗预测回归模型[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2015, 47(5): 707-711. DOI:10.15986/j.1006-7930.2015.05.017.
- [5] 周丹. 夏热冬暖地区建筑围护结构节能方案研究[J]. 制冷与空调(四川), 2015, 29(4): 411-415. DOI:10.3969/j.issn.1671-6612.2015.04.011.
- [6] 郝明慧, 高善峰, 方燕. 外墙外保温对我国各建筑气候分区的公共建筑空调负荷的影响[J]. 中国住宅设施, 2010(9): 51-54. DOI:10.3969/j.issn.1672-5093.2010.09.014.
- [7] STAZI F, VEGLIÒ A, DI PERNA C, et al. Experimental comparison between 3 different traditional wall constructions and dynamic simulations to identify optimal thermal insulation strategies[J]. Energy and buildings, 2013, 60: 429-441. DOI: 10.1016/j.enbuild.2013.01.032.
- [8] TERÉS-ZUBIAGA J, CAMPOS-CELADOR A, GONZÁLEZ-PINO I, et al. Energy and economic assessment of the envelope retrofitting in residential buildings in northern Spain[J]. Energy and buildings, 2015, 86: 194-202. DOI:10.1016/j.enbuild.2014.10.018.
- [9] KIM G, LIM H S, LIM T S, et al. Comparative advantage of an exterior shading device in thermal performance for residential buildings[J]. Energy and buildings, 2012, 46: 105-111. DOI: 10.1016/j.enbuild.2011.10.040.
- [10] 刘嘉玲, 左政, 胡文斌. 广州地区办公建筑围护结构节能潜力分析[J]. 建筑技术, 2013, 44(3): 209-212. DOI:10.3969/j.issn.1000-4726.2013.03.004.
- [11] 赵立华, 李宁, 王钊. 广州地区办公建筑外围护结构的热工性能与节能分析[J]. 建筑科学, 2008, 24(4): 49-53. DOI:10.3969/j.issn.1002-8528.2008.04.011.
- [12] 叶灿滔, 马伟斌, 刘金平, 等. 基于谐波反应法的净化空调系统节能研究[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2013, 41(12): 81-89. DOI:10.3969/j.issn.1000-565X.2013.12.014.

- [13] 田雁晨, 孙冬梅, 刘刚. 建筑围护结构气密性检测方法研究[J]. 绿色建筑, 2010, 2(6): 36-39. DOI:10.3969/j.issn.1004-1672.2010.06.015.
- [14] LAM J C, WAN K K W, YANG L. Sensitivity analysis and energy conservation measures implications[J]. Energy Conversion and Management, 2008, 49(11): 3170-3177. DOI: 10.1016/j.enconman.2008.05.022.
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑采光设计标准: GB50033-2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
- [16] LAM J C, HUI S C M. Sensitivity analysis of energy performance of office buildings[J]. Building and environment, 1996, 31(1): 27-39. DOI: 10.1016/0360-1323(95)00031-3.
- [17] 钱伯章, 朱建芳. 建筑节能保温材料技术进展[J]. 建筑节能, 2009, 37(2): 56-60. DOI:10.3969/j.issn.1673-7237.2009.02.021.
- [18] 广东统计局. 2015 广东统计年鉴[DB/OL]. 2015. <http://www.gdstats.gov.cn/tjnj/2015/directory/content.html?09-05-1>.
- [19] NIKOLAIDIS Y, PILAVACHI P A, CHLETSIS A. Economic evaluation of energy saving measures in a

common type of Greek building[J]. Applied energy, 2009, 86(12): 2550-2559. DOI: 10.1016/j.apenergy.2009.04.029.

作者简介:

宋鑫焱 (1990-), 女, 硕士研究生, 主要从事建筑节能方面的研究。

叶灿滔 (1980-), 男, 高级工程师, 主要从事建筑节能、可再生能源建筑一体化研究。

徐琼辉 (1978-), 女, 博士, 副研究员, 主要从事地热资源的开发与利用研究。

李华山 (1981-), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事低焓热能利用技术研究。

马伟斌 (1959-), 男, 研究员, 主要从事地热能发电、制冷和太阳能发电、供热研究。