

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2016.04.005



# 京津地区夏季着装行为对办公建筑 空调能耗的影响

李莎<sup>a,c</sup>, 钱晓明<sup>b</sup>, 杨瑞梁<sup>a</sup>

(天津工业大学 a. 机械工程学院; b. 纺织学院; c. 天津市现代机电装备技术重点实验室, 天津 300387)

**摘要:** 着装行为通过影响室内空气参数的设定而影响建筑空调能耗。利用能耗模拟软件 DeST, 计算出该地区典型着装行为下实测运行参数与期望参数对应的建筑空调能耗比推荐标准下能耗分别降低了 10.86% 和 13.16%。而基于典型着装行为的实验热学性能参数下, 平均只降低 4%, 说明由着装热阻关联的主观温度需要按地区着装行为进行修正。提出了控制建筑空调能耗的着装行为调节模型, 着装行为节能率  $\epsilon_c$  为负值时节能, 为正值时不节能。京津地区办公建筑节能率为 0 的临界服装热阻为 0.563 clo, 空调系统设计和运行节能的前提是, 着装热阻低于临界值。着装行为调节模型为地区着装形式和着装面料提供了量化标准, 为精确控制建筑能耗提供了一种方法。

**关键词:** 着装行为; 热阻; 能耗; 节能率

**中图分类号:** TU834.3      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1674-4764(2016)04-0027-06

## Influence of summer dressing behavior to office building air-conditioning energy consumption in Beijing-Tianjin regions

Li Sha<sup>a,c</sup>, Qian Xiaoming<sup>b</sup>, Yang Ruiliang<sup>a</sup>

(a. School of Mechanical Engineering; b. School of textile Engineering; c. Tianjin Key Laboratory of Modern Mechatronics Equipment Technology, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, P. R. China)

**Abstract:** Dressing-behaviour affects building air-conditioning energy consumption by indoor air parameter. Energy consumption simulation software DeST is used to calculate that the energy consumption of operating and expectation parameter is 10.86% and 13.16% lower than the recommended standard parameter in Beijing-Tianjin regions. While energy consumption of experimental thermal property of typical dressing behavior is only 4% lower than the recommended standard parameter. Results showed that the subjective temperature related to thermal resistance needs amendment by the dressing behavior of region. The model of dressing behavior adjust office building Air-conditioning Energy Consumption is given. Energy saving rate of dressing behavior is  $\epsilon_c$ , Energy saving if  $\epsilon_c$  is negative, on the contrary there is no energy saving. The critical thermal resistance is 0.563clo when energy saving rate is 0 in Beijing-Tianjin Regions. The premise of energy saving is thermal resistance of dressing lower than the critical value in the design and operation of air-conditioning system. The model of dressing behavior offer quantitative criteria of style and fabric in region, suppling a method to accuracy control energy

**收稿日期:** 2016-03-04

**作者简介:** 李莎(1971-), 女, 博士, 副教授, 主要从事建筑环境舒适性研究, (E-mail)lisha@tjpu.edu.cn.

**Received:** 2016-03-04

**Author brief:** Li Sha(1971-), PhD, associate professor, main research interest: thermal comforts of building environment, (E-mail)lisha@tjpu.edu.cn.

consumption.

**Keywords:** dressing-behaviour; thermal resistance; energy consumption; energy saving rate

着装行为既影响舒适性,也通过影响室内空气参数的设定而影响能耗<sup>[1-2]</sup>。现行标准推荐的夏季空调房间设计温度范围是在标准服装热阻下感觉舒适,并特别说明:服装热阻与当地的生活习惯及气候密切相关<sup>[3-7]</sup>。不同地区的气候、生活习惯、服饰爱好等存在较大差异<sup>[8-9]</sup>,目前,很多织物的热阻、湿阻低于传统服装<sup>[10]</sup>。另外,国外文献中对服装式样的描述和中国也有一定的差别,针对服装热阻值缺乏比较准确的描述<sup>[11]</sup>。因此,仅在某些标准服装热阻下进行舒适性实验研究不够全面,在中国各地区采用统一的舒适标准作为空调设计指标也不利于能耗的精确控制。因此,有必要研究各地气候、服饰文化、经济等决定的着装行为,并根据其着装行为确定出典型服装的热湿性能参数,利用这些服装热学性能参数可以确定适合地区的舒适标准,从而获得建筑节能的临界服装热阻值。服装热阻值将提供量化标准来指导地区的着装形式和着装面料,而临界服装热阻也可以成为服装产品的一个强制性热学参数。在此基础上建立的建筑空调能耗的着装行为调节模型,将为精确控制建筑能耗提供一种方法。

京津地区各种商务综合型办公建筑面积增长非常快,是建筑能耗的主体,其气候属于寒冷地区,空调度数大于  $90\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 。办公建筑中职员们的着装行为受到气候、生活习惯、性别、年龄、职业、文化背景、经历、审美情趣等的影响。为了研究着装行为对舒适和能耗的影响,在京津地区的中心城区选择有集中空调的办公建筑进行现场测试调查,内容包括个人背景信息、着装形式、着装面料、室内环境热工参数、舒适感觉等。现场调查中被调查者处于正常的工作状态,能准确反映人与环境的交互关系。

## 1 DeST 软件模拟办公建筑空调能耗

现场问卷调查共收集有效样本 532 份,其中男性 53%,女性 47%。样本的平均身高为 168.6 cm,平均体重为 63.9 kg。被调查人员的职业包括建筑设计师、教师、银行职员等 6 类,居住年限均在 3 a 以上,对京津地区的文化背景、气候等非常适应<sup>[12]</sup>。调查结果统计分析得出,京津地区夏季空调办公建

筑中的典型着装形式为短袖+长裤,典型着装面料为纯棉织物。在恒温恒湿室通过出汗暖体假人实验<sup>[13-14]</sup>测试得出典型着装的平均热阻为 0.37 clo,平均湿阻为  $18.09\text{ m}^2\cdot\text{Pa}/\text{W}$ ,该平均热阻比标准服装热阻低 0.13 clo<sup>[15]</sup>。针对增加舒适度的方式,非典型着装样本中主要是增减衣服,而典型着装下首先考虑的是调节环境参数。主观调查获得的典型着装下的期望温度为  $26.76\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,期望相对湿度为 66.67%。而热中性温度为  $26.14\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,中性相对湿度为 64.03%<sup>[16]</sup>。

北京和天津的室外气象条件非常接近,研究以天津市的气象条件为依据,以虚拟某典型办公建筑为例,结合现场调查中室内温湿度参数范围,利用能耗模拟软件 DeST<sup>[17-18]</sup>,研究不同室内设计参数对空调能耗的影响。该办公楼为南北朝向的 4 层长方形建筑,标准层面积  $800\text{ m}^2$ ,总建筑面积为  $3\ 200\text{ m}^2$ ,层高 3.5 m。房间功能主要是办公室、会议室、值班管理室等。普通办公室面积为  $54\text{ m}^2$ ,大厅及会议室面积为  $144\text{ m}^2$ 。该办公建筑空调系统选用普通定风量全空气系统,建筑围护结构的参数信息和各种内扰量,都是按照普通办公建筑的结构和功能设定的。室外气象参数是空调房间的外扰,模拟计算中采用的是调用 Medpha 产生的气象数据。由着装行为决定的室内温湿度参数的设计是影响空调系统能耗最直观的因素。根据夏季长期逗留区域空调室内温度范围(推荐 I 级为  $24\sim 26\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,II 级为  $27\sim 28\text{ }^{\circ}\text{C}$ <sup>[4]</sup>),以及现场测试调查的室内温湿度统计结果,确定该模拟办公建筑夏季室内设计温度系列取为  $23\sim 28\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,间隔  $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;相对湿度取为 50%~70%,间隔为 5%。

### 1.1 空调系统能耗随温度变化的模拟

用 DeST 软件对夏季(5—8 月)进行空调负荷和能耗的动态模拟,计算不同的室内设计参数下该建筑空调系统能耗,经过汇总分析,得到这 4 个月总的空调系统耗电量和室内设计参数之间的数值关系。图 1 为设定某相对湿度模拟的不同温度下,空调系统能耗的变化曲线。

不同相对湿度下空调系统能耗随温度的变化规律基本保持一致。趋势线的  $R$  平方值非常接近 1,

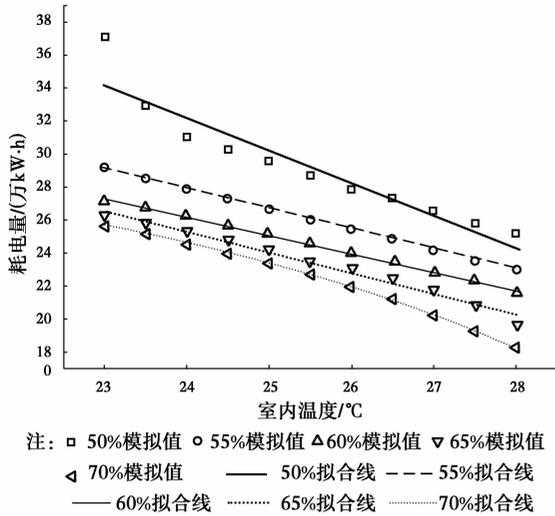


图 1 不同相对湿度设定下空调系统能耗随温度的模拟值和拟合线

Fig. 1 Value of simulation and fit line of air-conditioning energy consumption with temperature under different relative humidity

拟合程度很高,趋势线的可靠性高。只有在相对湿度 50%时,如果室内设计温度低于 24 °C,其能耗才发生较大的变化。同时,相对湿度 50%和 70%时,拟合线的斜率相对较大,意味着相对低湿和高湿条件下,温度的微小变化会带来较大的能耗变化。通过对所有数据进行计算,不同相对湿度下,以 23 °C 作为基准点,温度每增加 0.5 °C,相对前一个设计温度,其能耗降低率的范围为 1.51%~11.32%,平均值为 2.91%。即室内设计温度每增加 0.5 °C,空调系统平均能耗降低率为 2.91%。

1.2 空调系统能耗随相对湿度变化的模拟

设定某温度模拟的不同相对湿度下,空调系统能耗的变化曲线如图 2 所示,是一系列分布比较紧密的趋势变化线,不同温度下,空调系统能耗随相对湿度的变化基本保持一致,趋势线的 R 平方值也接近 1,而且温度越高越接近。室内设计温度低于 24 °C,相对湿度低于 55%时,趋势线的斜率较大,意味着低温低湿的参数条件,消耗能耗的变化率较大。通过对所有数据进行计算,不同温度条件下,以 50%作为基准,相对湿度每增加 5%,能耗降低率的范围为 2.17%~21.4%,能耗降低的平均值为 6.39%,即室内设计相对湿度每增加 5%,空调系统平均能耗降低率为 6.39%。

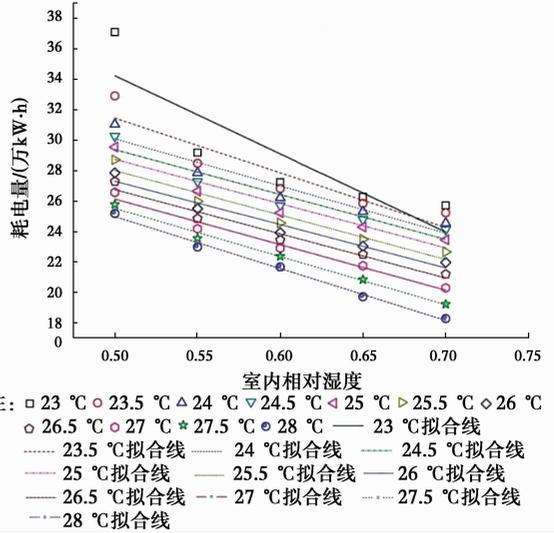


图 2 不同温度设定下空调系统能耗随相对湿度的模拟值和拟合线

Fig. 2 Value of simulation and fit line of air-conditioning energy consumption with relative humidity under different temperature

2 基于实测典型着装行为下与期望下对应的建筑空调能耗

根据典型着装行为下样本的现场环境测试参数统计结果,得到典型着装行为下实测温度和相对湿度的平均值,并依据该环境下的期望温度和期望相对湿度值<sup>[9,12]</sup>,根据模拟结果得出对应的空调模拟能耗,取规范中室内参数舒适度 I 级的中间值(25 °C,60%)下的能耗,作为比较基准<sup>[4]</sup>,计算出相对的节能率,如表 1 所示。

表 1 典型着装行为下实测与期望参数对应的空调模拟能耗和节能率

Table 1 Value of simulation and energy saving rate of operating and expectation parameter by typical dressing-behavior

参数	空调系统能耗/ (万 kW·h)	节能率/%
规范推荐参数 25 °C,60%	25.22	
典型着装下实测参数 26.26 °C,63.03%	22.48	-10.86
典型着装下期望参数 26.76 °C,66.67%	21.90	-13.16

表 1 显示,相对于公共建筑夏季 I 级舒适度常用的推荐参数,典型着装下的实测平均环境参数和期望参数对应的能耗分别降低了 10.86% 和 13.16%,节能率超过 10%,说明设计推荐参数可以根据地区典型着装行为进一步细化和完善。

### 3 基于实验典型着装行为热学性能参数下对应的建筑空调能耗

对该地区典型着装的热学性能测试以及主观温度和相对湿度的计算,获得空调环境中典型着装的湿阻对舒适性影响不大,主要是其热阻起着主导作用,服装热阻的测试符合标准要求<sup>[15]</sup>。因此,统一以相对湿度 60% 作为比较值,典型着装热阻值对应的主观温度如表 2<sup>[12]</sup>,利用能耗软件得到主观温度下对应的空调模拟能耗计算值,如表 2 所示。

表 2 典型着装下热阻参数对应主观温度下的空调模拟能耗和节能率

Table 2 Value of simulation and energy saving rate of subjective temperature related with thermal resistance by typical dressing-behavior

温度参数	空调系统能耗/ (万 kW·h)	节能 率/%
规范推荐温度 25 °C	25.22	
规范标准服装热阻主 观温度 25.11 °C	24.98	-0.95
地区典型 热阻最小值 26.19 °C	23.77	-5.75
着装热阻 热阻最大值 25.32 °C	24.74	-1.90
主观温度 热阻平均值 25.80 °C	24.21	-4.00

表 2 显示,相对于规范中推荐 I 级舒适度推荐参数,标准服装下和典型着装下主观温度对应的能耗都有降低,尤以典型着装下的节能更明显,节能率最小为 1.9%,最大为 5.75%,平均为 4%,但低于表 1 中现场实测典型着装下的节能率。主要原因是其对应的主观温度偏低,说明由着装热阻关联的主观温度需要按地区进行修正。室内参数计算的节能率符合文献的范围<sup>[19]</sup>,但以往文献中没有将节能关联到具体的着装热学性能参数。

### 4 引入着装行为节能率 $\epsilon_c$ 的空调能耗调节模型

常规建筑空调能耗模型,一般只考虑建筑围护结构性能和建筑空调系统运行两方面的影响。通过

前面分析,可以得出,职员在办公建筑中的着装行为和室内热湿参数会相互反馈影响,从而通过短期影响建筑空调系统的运行和长期影响建筑围护结构来影响建筑空调能耗。把逐时变化的地区室外气象参数作为影响建筑能耗的主要干扰因素,考虑增加人的着装行为调节对建筑空调能耗的影响,引用控制论中的方块图绘制成图 3。

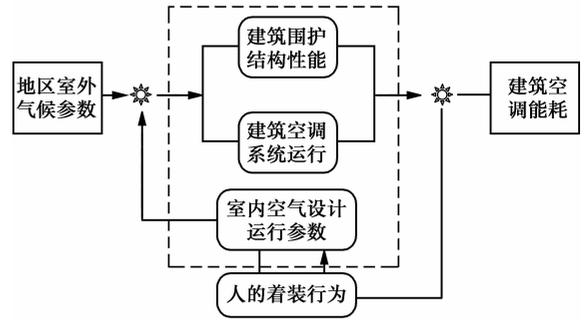


图 3 影响建筑空调能耗的模型图

Fig. 3 Model drawing of influence factor to air-conditioning energy consumption of building

假定,理论空调能耗为  $Q(\tau)$ ,增加着装行为调节后的实际空调能耗为  $Q'(\tau)$ ,定义着装行为节能率为  $\epsilon_c$ ,其对空调能耗的影响,可以表达为

$$Q'(\tau) = (1 + \epsilon_c)Q(\tau) \quad (1)$$

着装行为对空调系统能耗的反馈可能是正值,也可能是负值。当着装行为节能率  $\epsilon_c$  为正值时,则实际能耗高于标准能耗,系统不节能;为负值时,则节能。 $\epsilon_c$  主要由着装热阻决定,根据实验测试的坐姿下,典型着装的热阻和表 2 中对应的主观温度值以及能耗软件模拟计算的节能率,可以获得节能率和着装热阻之间的关系,如图 4,并且得到拟合线性公式(2)。

$$\epsilon_c = -12.9428 + 22.99861 \quad (2)$$

图 4 表明,着装行为节能率  $\epsilon_c$  一般为负值,随着着装热阻值的减小,实际能耗越来越低于标准能耗,实现节能。而随着热阻值的增大,节能率  $\epsilon_c$  逐渐接近 0,甚至为正值,不节能。该地区的调查中,典型着装由于热阻低于热舒适规范中标准服装热阻,节能率都是负值,对应的空调系统实现节能。而其中的金融类办公建筑着装以长袖或短袖加坎肩为主,其着装热阻高于典型着装热阻,节能率很低,甚至不节能。由式(2)获得研究中节能率为 0 的临界着装热阻为 0.563 clo。津京地区办公建筑实现空调系统运行节能的着装热阻必须低于此临界值,为该地

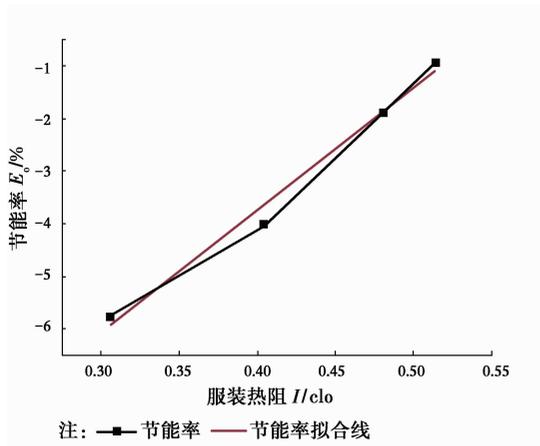


图4 节能率和着装热阻的关系图

Fig. 4 The relationship between energy saving rate and thermal resistance

区办公建筑内职员的着装形式和着装面料提供了量化标准。

## 5 结论

1)采用 DeST 能耗模拟软件获得京津地区办公建筑夏季空调室内温湿度参数和能耗的关系:温度每上升  $0.5^{\circ}\text{C}$ ,其空调系统能耗平均降低 2.91%。相对湿度每上升 5%,其空调系统能耗平均降低 6.39%。

2)基于典型着装行为下现场实测运行参数与期望参数对应的建筑空调能耗比 I 级舒适度推荐设计参数下,能耗分别降低了 10.86%和 13.16%。

3)基于典型着装行为的实验热学性能参数下,对应的建筑空调能耗相对于公共建筑的推荐标准节能率,平均降低 4%,说明由着装热阻关联的主观温度需要按地区进行修正。

4)提出了建筑空调能耗的着装行为调节模型,服装热阻值越低,节能越显著。京津地区办公建筑节能率为 0 的临界着装热阻为 0.563 clo,实现空调系统运行节能的着装热阻必须低于此临界值。

### 参考文献:

[1] HOLMES M J, HACKER J N. Climate change, thermal comfort and energy: meeting the design challenges of the 21st century [J]. Energy and Buildings, 2007, 39(7):802-814.

[2] GIORGOS N S, CONSTANTINOS A B. Energy consumption and the potential of energy savings in Hellenic office buildings used as bank branches—a case study [J]. Energy and Buildings, 2011, 43(4):770-778.

[3] 公共建筑节能设计标准:GB 50189—2015 [S].北京:中国建筑工业出版社,2015.  
Design standard for energy efficiency of public buildings: GB 50189—2015 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015. (in Chinese)

[4] 民用建筑供暖通风与空气调节设计规范:GB 50736—2012 [S].北京:中国建筑工业出版社,2012.  
Design code for heating ventilation and air conditioning of civil buildings: GB 50736—2012 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015. (in Chinese)

[5] 李百战,郑洁,姚润明,等.室内热环境与人体热舒适 [M].重庆:重庆大学出版社,2012.  
LI B Z, ZHENG J, YAO R M, et al. Thermal environment and comfort indoor [M]. Chongqing: Chongqing University Press, 2012. (in Chinese)

[6] 景胜蓝,李百战,李楠,等.基于热感觉指标确定热舒适判据的一项国际标准简介 [J].暖通空调,2010,40(8):110-113.  
JING S L, LI B Z, LI N, et al. Synopsis of an international standard on thermal comfort based on thermal sensation criteria [J]. HV & AC, 2010, 40(8):110-113. (in Chinese)

[7] NICOL J F, HUMPHREYS M A. Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings [J]. Energy and Buildings, 2002, 34(6):563-572.

[8] 金振星.不同气候区居民热适应行为及热舒适区研究 [D].重庆:重庆大学,2011.  
JIN Z X. Thermal adaptation behavior and thermal comfort zone for Chinese resident [D]. Chongqing: Chongqing University, 2011. (in Chinese)

[9] 朱颖心.建筑环境学 [M].3版.北京:中国建筑工业出版社,2010.  
ZHU Y X. Architecture building environment [M]. 3rd edition. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese)

[10] 邱冠雄,姜亚明,刘良森.新型纤维材料及其舒适性研究 [J].针织工业,2004(5):55-59.  
QIU G X, JIANG Y M, LIU L S. The research of new fiber material and comfort [J]. Knit Industry, 2004(5):55-59. (in Chinese)

[11] 杨凯,郑瑾,张渭源.织物动态热湿舒适性能的评价及预测 [J].东华大学学报(自然科学版),2010,36(2):136-139.  
YANG K, ZHENG J, ZHANG W Y. Evaluation and prediction of fabric's dynamic heat moisture comfort properties [J]. Journal of Donghua University (Natural Science), 2010, 36(2):136-139. (in Chinese)

- [12] 李莎. 京津地区夏季着装行为对办公建筑室内环境舒适性及空调能耗的影响研究[D]. 天津: 天津工业大学, 2015.
- LI S. The research on typical dressing behavior and thermal comfort and air-condition energy of office workers in summer in Beijing-Tianjin region [D]. Tianjin: Tianjin Polytechnic University, 2015. (in Chinese)
- [13] QIAN X M, FAN J T. Prediction of clothing thermal insulation and moisture vapour resistance of the clothed body walking in wind [J]. *Annals of Occupational Hygiene*, 2006, 50(8): 833-842.
- [14] WU Y S. Development of a sweating fabric manikin with sedentary and supine postures [D]. Hong Kong: The Hong Kong Polytechnic University the Institute of Textiles and Clothing, 2010. (in Chinese)
- [15] 李莎, 钱晓明, 张恒, 等. 京津地区办公建筑夏季空调环境调查研究之典型着装行为及其热学性能[J]. *暖通空调*, 2015, 45(4): 84-88.
- LI S, QIAN X M, ZHANG H, et al. The investigate on dressing-behaviour and thermal property in summer air-conditioning office building in Beijing and Tianjin area [J]. *HV & AC*, 2015, 45(4): 84-88. (in Chinese)
- [16] 李莎, 邢金城, 贾俊报. 京津地区办公建筑夏季空调环境调查研究之典型着装下热舒适性分析[C]//第十九届全国暖通空调制冷学术年会文集, 2014.
- LI S, XING J C, JIA J B. The thermal comfort investigate on dressing-behaviour in summer air-conditioning office building in Beijing and Tianjin area [C]//The 19<sup>th</sup> academic annual conference proceedings of HVAC & R, 2014. (in Chinese)
- [17] 清华大学 DeST 开发组. 建筑环境系统模拟分析方法 DeST[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.
- DEST Development Group of Tsinghua University. The model analysis DEST of Building environment system [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2006. (in Chinese)
- [18] 朱丹丹, 燕达, 王闯, 等. 建筑能耗模拟软件对比: DeST, EnergyPlus and DOE-2[J]. *建筑科学*, 2012, 28(2): 213-222.
- ZHU D D, YAN D, WANG C, et al. Simulation software of building energy consumption: DeST, EnergyPlus and DOE-2 [J]. *Building Science*, 2012, 28(2): 213-222. (in Chinese)
- [19] 殷平. 室内空气计算参数对空调系统经济性的影响[J]. *暖通空调*, 2002, 32(2): 21-25.
- YIN P. Effects of indoor air design conditions on first investment and operating costs of air conditioning systems [J]. *HV & AC*, 2002, 32(2): 21-25. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)