

办公建筑人员工作效率室内环境影响因素及经济分析

兰丽, 连之伟, 宋沅沛

(上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240)

摘要:对上海市两处代表性办公建筑进行实地调研。采用主观问卷调查了建筑内人员对室内环境的总体感觉, 各项人的因素及室内环境质量因素对人员工作效率的影响程度, 病态建筑综合症症状等, 并客观调查了空调系统运行能源消耗费用及人员薪酬等支出情况, 同时对室内的空气温度、湿度、风速、噪声、甲醛和二氧化碳浓度等物理参数进行测量。结果显示, 尽管建筑室内各项物理参数都在标准范围内, 接近 50% 的人员抱怨有病态建筑综合症, 且大多数人希望增加室内新风量, (尤其是开放式办公室) 降低室内噪音水平。热环境、空气品质和噪音是影响人员工作效率的主要环境质量因素。因此, 办公建筑可优先考虑改善这些环境质量因素以提高人员的健康舒适水平和工作效率。在调查的两幢建筑中, 人员薪酬与建筑运行能耗(电费)支出之比也达到 100 倍之多。这表明在中国, 尤其是北京、上海这样的大城市的办公建筑中, 提高人员工作效率有获得巨大经济效益的潜力。

关键词:工作效率; 经济分析; 室内环境; 现场调查

中图分类号: TU11, B842.1

文献标志码: A

文章编号: 1674-4764(2012)S2-0135-05

Field Study on The Effects of Indoor Climate on Human Productivity and Its Economical Consequence in office Buildings

LAN Li, LIAN, Zhiwei, SONG Yuanpei

(School of Naval Architecture, Ocean Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240)

Abstract: In this study we carried out field studies in two office buildings in Shanghai, China to investigate the effects of indoor environmental quality on human productivity. The overall perception of occupants on indoor climate (including thermal sensation, perceived air quality, and perceived noise etc.), the influence of human factors and indoor climate factors on productivity, as well as their sick building syndrome (SBS) symptoms were assessed with subjective questionnaires. The building operating cost and employee's salaries were record objectively. Meanwhile the indoor air temperature, humidity, air velocity, noise, concentration of formaldehyde and carbon dioxide were measured. The results indicate that about 50% occupants complained SBS symptoms when exposed to their office. Most occupants require to increase fresh air and lower the indoor noise level (especially for open-plan office), even though the physical parameters meet the requirement of standards. Thermal environment, indoor air quality and noise assessed to be the three main indoor climate factors that affect human productivity. The employee's salaries were over 100 times of the electrical energy cost in this two buildings, which indicate great financial benefit can be achieved in China to increase occupants' productivity by improving the indoor climate.

Key words: productivity; economic analysis; indoor climate; field study

在当今世界尤其是在亚洲地区, 加班已成为常事, 人们很大一部分时间都是在室内工作环境中度过。主观问卷调查数据显示, 与工作压力和工作满意度相比, 室内环境质量对人员的工作效率影响最大^[1]。作者开展的一系列实验研究也证实室内环境质量对人员工作效率有显著影响。环境温度过高或过低, 人员工作效率都有明显下降, 而凉爽的舒适环境最有利于提高人员的工作效率^[2-5]。暖不舒适环境下, 人员的负面情绪增加, 病态建筑综合症(SBS)症状加剧, 疲劳感上升, 工作热情下降^[5-6]。室内环境对人员健康和工作效率的影响有其内在的生理机理。研究表明, 室内温度升高使人员产生负面的生理反应, 如眼睛泪膜稳定性下降, 动脉血管二氧化碳浓度上升及血氧饱和浓度下降等^[5]。文献

[7]表明, 增加新风量也有利于提高人员的工作效率。

室内环境质量对人员工作效率的影响具有重要的经济效益。人员薪酬在发达国家已经远高于建筑维护和暖通空调设备运行等的费用。Woods 的研究显示在美国, 人员薪酬是建筑维护和设备运行等费用的 100 倍^[8], 挪威也得到了相似的调查结果^[9]。在芬兰, 由于恶劣的室内环境使人员工作效率降低而导致的每年的经济损失达 27 亿欧元^[10]。据估计, 通过改善办公建筑室内环境质量可使人员工作效率提高 0.5—5%, 每年能产生 120 到 1250 亿美元的经济效益^[11]。目前在国内还未见相关的研究报道。

研究对上海市两处代表性办公建筑进行实地调研, 采用主观问卷方法研究办公建筑内影响人员工作效率的环境因

素,并结合客观建筑能耗支出情况分析提高人员工作效率的经济性。

1 研究方法

1.1 调研建筑简介

建筑 A 为某高校一学院行政办公人员和教师的办公楼,共九层,其中二楼三楼为行政人员的开放式办公室,内设中央空调,三楼到九楼为教师的个人办公室,为分体式空调。

建筑 B 为某外企的一栋研发中心大楼,共两层,主要是开放式办公室,其中工作人员超过 150 人。整栋大楼采用中央空调系统。

1.2 调研内容

1) 物理参数测量

所有调研内容在 2010 年 4 月份完成。在调研期间,对室内的空气温度、湿度、风速、噪声、甲醛和二氧化碳浓度等物理参数进行测量。

2) 能耗调查

为了研究提高中国办公建筑人员工作效率所具有的经济效益,对调研建筑的空调系统运行能源消耗费用及人员薪酬等进行调查。

3) 主观问卷调查

主观问卷的内容主要包括人员对室内环境的总体感觉,各项人的因素及室内环境质量因素对人员工作效率的影响程度,SBS 症状等。

采用 ASHRAE(2005) 7 级指标来评价受试者的热感觉^[12],即冷(-3)、凉(-2)、稍凉(-1)、不冷不热(0)、稍暖(+1)、暖(+2)、热(+3)。对声环境和光环境,也都采用 7 级指标来评价。对室内空气质量的评价采用连续指标,从完全不接受(-1)到完全接受(+1)。

受试者评价各项人的因素(健康舒适、工作能力、工作热情、工作满意度及工作压力)及室内环境质量因素(包括热环境、声环境、光环境和空气品质)对人员工作效率影响的程度分别为 0、10%、20%、30%及以上。

病态建筑综合症(SBS)症状调查的项目包括:不舒适、耳痛、恶心、腹胀、嗓子难受、口干、呼吸困难、皮肤干、皮肤痒、头痛、头晕、想睡觉、无精打采、健忘、脑力思考能力下降、难以集中注意力、疲劳、眼睛刺激、流鼻涕、鼻子堵塞、和空气中有不好的气味。采用“0”、“1”、“2”、“3”及“4”五档评分等级,分别表示所处某种 SBS 症状的程度,分别表示“无”、“略有一点”、“有一些”、“相当”和“非常”。

2 结果与分析

在建筑 A,发出 41 份主观问卷,共回收 40 份问卷,回收率为 97.56%。在建筑 B,发出 90 份主观问卷,共回收 63 份问卷,回收率为 70%。所有问卷都是早上发出,下午下班前收回。物理环境测量与主观问卷调查同时进行。

2.1 实测物理参数

表 1 所示为调研期间两栋建筑室内实测的各物理参数值。在调研期间,建筑室外环境温度为 10—23℃,相对湿度为 60—80%。建筑 A 中很少有房间使用空调,而建筑 B 的中央空调系统处于运行状态,所以建筑 A 中空气温度低于建

筑 B。两幢建筑中 CO₂ 浓度水平都较低,建筑 A 室内 CO₂ 的浓度稍高于建筑 B。建筑 B 中噪音水平和甲醛浓度都较建筑 A 要高,都处于中国标准规定范围内。

表 1 建筑室内实测物理参数值(均值±标准差)

物理参数	空气温度/ ℃	空气湿度/ %	风速/ (m·s ⁻¹)	噪声水平/ dBA	甲醛含量/ ppm	CO ₂ 浓度/ ppm
建筑 A	20.2±1.1	47.9±4.0	0.04±0.06	44.9±9.3	0.02±0.01	627±44
建筑 B	23.0±0.9	35.7±0.8	0.15±0.05	46.1±6.8	0.03±0.02	549±38

2.2 人员对室内环境的评价

建筑 A 中大多数人员都感觉室内热环境适中(不冷不热)或稍凉(面部、关节等处感觉凉,可忍受),认为室内声环境还可以,不觉得吵,对室内光环境的明亮程度也觉得适中,可接受室内的空气质量(均值为 0.28)。建筑 B 中人员对热环境、声环境和光环境的感受与建筑 A 中人员的感受类似,但对室内空气质量的接受程度很低(0.03)。图 1 所示为 2 个建筑中人员对各项环境参数的期望值。由图 1 可知,2 个建筑中人员对室内环境的期望变化基本一致。他们对室内温度、湿度、风速和照度基本满意,而对空气质量和噪声环境改变的期望最大,即希望室内新风量有所增加,希望室内噪音能有所下降。其中建筑 A 中希望增加新风量的人员比例为 78%,而建筑 B 中超过 95%的人表达了这样的期望。

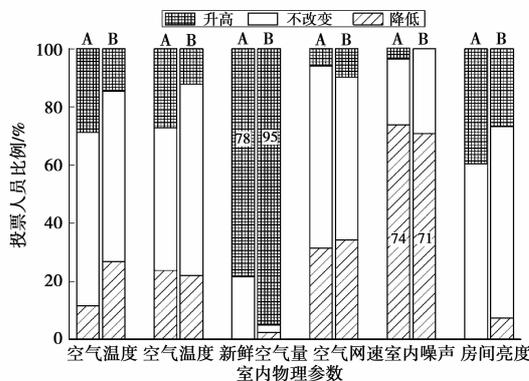


图 1 建筑 A 和 B 中人员对室内各环境参数的期望变化

在对办公室中常见噪音中最难以忍受的种类进行统计后可以发现,建筑 A 中多数人(达 50%)认为讲话、交谈声为最难以忍受的噪音,其次为电话铃声(占 18%),建筑 B 中多数人(占 47.5%)认为电话铃声为最难以忍受的噪音,其次为讲话、交谈声(占 35%),还有部分人员认为室内的走路声、打字机声、关门声、打字敲键盘声等也很难忍受。

2.3 病态建筑综合症症状

图 2 所示为建筑内投票出现各病态建筑综合症症状的人员比例。建筑 B 中有超过 50% 的人员出现了皮肤干、想睡觉、无精打采、疲劳、眼睛刺激等病态建筑综合症症状,出现头晕、健忘、脑力思考能力下降、难以集中注意力等症状的人员比例也非常高,接近 50%。相比较,建筑 A 中有病态建筑综合症症状的人员比例有所下降,出现的症状集中于健忘、疲劳、眼睛刺激等。2 个建筑中都有超过一半的人员抱怨室内空气中有不好的气味。

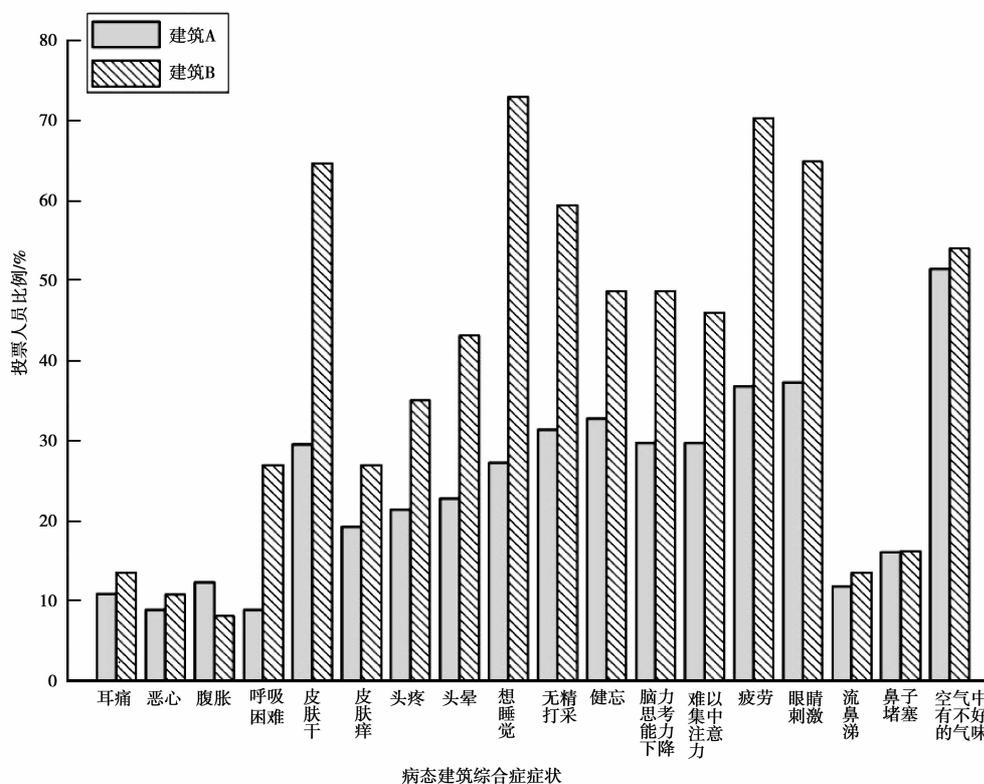


图 2 室内人员病态建筑综合症症状投票结果

2.4 人员工作效率影响因素

关于人的因素和室内物理环境对人员工作效率的影响程度,2幢建筑中人员的投票结果比较一致,因此将两幢建筑人员的投票综合起来分析。图3和图4所示分别为各项人的因素和各项室内物理参数对工作效率影响程度的调查结果。各项人因素都对人员工作效率有较大影响。健康舒适对人员工作效率的影响程度最大,超过75%的人认为健康舒适水平对他们工作效率的影响程度在30%以上。工作热情也有很大的影响,接近70%的人认为工作热情对他们的工作效率影响程度在30%以上。热环境等物理环境参数对人员工作效率也有较大影响。其中热环境、空气品质和声环境作用较大,有接近40%的人认为这2个环境因素对他们工作效率的影响程度在30%以上。而光环境的影响相对较小,不到15%的人认为他们的工作效率受光环境影响程度在30%以上。

2.5 能耗与人员薪酬

本次调研对两幢建筑的人员薪酬和能耗费用(主要是电费)支出进行了统计。表2所示为2009年建筑用电量、电费及人员薪酬支出统计结果。建筑B中人员薪酬与电费之比

表 2 建筑用电量、电费及人员薪酬支出统计结果

参量	用电量 /度	电费 /元	人员薪酬 /元	人员薪酬与电费之比
建筑 A	674,393	416,100	65,902,530	158.4
建筑 B	210,460	210,460	18,000,000	85.53

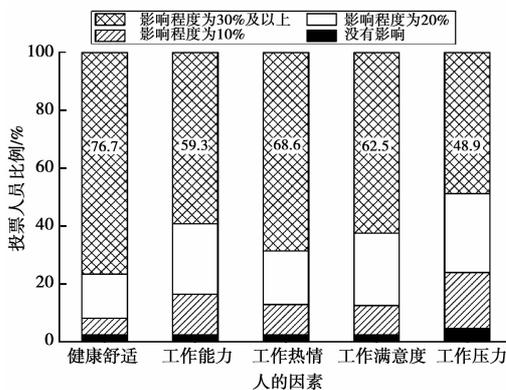


图 3 各项个人因素对人员工作效率的影响程度

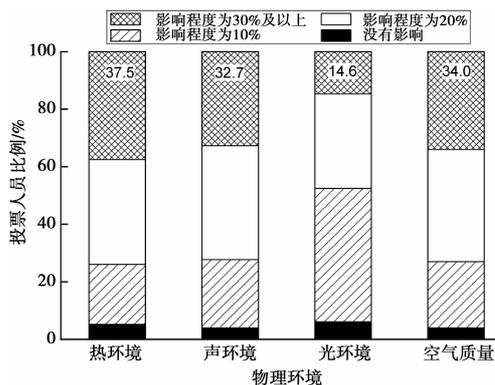


图 4 物理环境参数对人员工作效率的影响程度

为 85.53,建筑 A 中这个比例更高,达 158.4。两幢建筑比例

不同可能是由其建筑内人员的薪酬水平和电价差异所导致

的。由于建筑用电性质不同,建筑 A 的电价为 0.617 元/度,而建筑 B 的电价为 1.0 元/度。

3 讨论

研究显示,室内环境参数如热环境和通风量等都会影响人员的工作效率。根据建立的热环境(热感觉投票)与人员工作效率间的定量曲线,在凉爽的舒适环境下人员的工作效率最高,而环境温度过高或过低都导致工作效率下降,其中暖不舒适导致的工作效率下降幅度更大^[4]。例如,在夏季,服装热阻为 0.5clo 时,室内温度在 25℃ 左右最有利于提高人员工作效率,当温度升高到 28℃ 时人员工作效率下降近 1%。在对建筑进行生命周期经济性分析时,一般根据人员薪酬来计算人员工作的价值^[13]。调研结果表明,在中国,办公建筑人员薪酬也已经是建筑中设备运行能耗费用的 100 倍之多,这意味着不到 1% 的工作效率增加就能弥补因提高室内环境质量水平而增加的建筑运行能耗。这与目前美国、挪威、芬兰等国家的报道一致。这表明在中国,尤其是北京、上海这样的大城市的办公建筑中,提高人员工作效率有获得巨大经济效益的潜力。

在各项人的因素中,大部分人员都认为健康舒适水平对他们工作效率有很大程度的影响。而大量研究显示,室内环境质量对人员的健康舒适水平有重大影响。在暖不舒适环境中,人员病态建筑综合症症状加剧,健康舒适水平下降,而在凉爽的环境下,人员病态建筑综合症的症状有所缓解^[5-6]。当人员的健康舒适水平下降时,其负面情绪增加,工作热情也有所下降^[5-6]。Heerwagen 认为人员的工作效率与工作能力和工作热情都相关^[14]。如果人员没有工作的热情,即使工作能力很高,工作效率也不会高。本文调查研究也显示工作热情对人员工作效率有很大影响(见图 3)。工作效率研究中通常忽略了情绪的影响。事实上,情绪会引起许多行为反应,并进而影响人与室内环境间的关系。Damasio 认为情绪会根据外界环境是否友好而提起警示认知系统,强烈和负面的情绪会通过以下途径降低工作效率^[15]:1)它们会干扰状态调节,可能会引起过反应,不利于提高工作绩效;2)它们会直接干扰任务信息加工过程;3)它们可能会导致心理抱怨,这也会转移工作的注意力。综合以上论述,室内环境质量问题,如热不舒适、空气品质导致的健康舒适水平下降都会影响人员的工作效率。

本次调查显示建筑 B 中人员的病态建筑综合症症状要高于建筑 A(见图 2),这可能是因为建筑 B 中房间内空气温度要高一些(见表 1),而空气质量相对更差(见图 1)。在调查期间建筑 A 中大多数房间都没有开空调,基本所有房间都开着门或窗户,而建筑 B 中基本都开着集中空调,窗户紧闭,因此建筑 A 室内新鲜空气量可能更多。另外,研究表明,房间温度升高(即使是在舒适温度范围内),人员的病态建筑综合症症状增加,而空气温度降低能改善室内感知空气品质,人员感觉空气新鲜度更好^[5]。可能是因为凉爽的环境中,吸入的空气与鼻腔通道的温度差和水蒸气压力差会使上呼吸道的黏膜降温,从而让人感觉空气品质更佳^[16]。在各项室内物理参数中,人员评价热环境和空气品质对他们的工作效率影响相对较大(见图 4),有提高新风量要求的人数也最多(见图 1)。据此可以对办公建筑中室内环境质量的改进方向做

出一些建议。首先,在过渡季节,应尽量减少空调系统的应用,多开窗,以增加室内新鲜空气量,如果需要开空调,也可适当降低室内温度的设定值。另外,在冬季和夏季空调系统运行期间,冬季室内温度设定值应靠近舒适温度下限值(如不应超过 22℃),夏季室内温度设定不可超过上限值(如不应超过 26℃)。研究表明:在冬季,服装热阻为 1.0clo 时,室内温度为 21℃ 时人员的工作效率最高;在夏季,服装热阻为 0.5clo 时,室内温度为 25℃ 时人员的工作效率最高^[17]。在冬季适当降低室内设定温度不但有利于减少室内人员的病态建筑综合症症状,还可以节约能源。此外,调查发现提高新风量是大多数人员的期望,可通过增加空调系统的新风量或采用其他空调技术如个性化送风设备提高室内人员的新风量。本次调查发现人员对降低室内噪音水平的需求也很高。在开放式办公室中,电话铃声对人员干扰作用最大,这与 Banbury 和 Berry 的调查结果一致^[18]。噪音会给人带来生理和心理上的危害,如影响人的神经系统,损害心血管系统等,还会降低人的工作效率^[19]。如研究发现在强噪音环境下受试者文字阅读量显著减少,发现错误的概率降低,而且误检测概率上升。因此,如何降低建筑内(尤其是开放式办公室)的噪音也是亟待解决的问题之一。

4 结论

1) 现场调查发现,尽管建筑室内各项物理参数都在标准范围内,大多数人还是希望增加室内新风量,(尤其是开放式办公室)降低室内噪音水平。

2) 在过渡季节,相对于没有运行空调系统的建筑,使用中央空调系统的建筑内人员的病态建筑综合症症状更显著。因此,在过渡季节应尽量减少空调系统的使用。

3) 在各项人的因素中,健康舒适和工作热情是影响人员工作效率的 2 个最主要因素。在各项室内环境质量因素中,热环境、空气品质和噪音是影响人员工作效率的主要因素,也是影响人员健康舒适和工作热情的重要因素。因此,办公建筑可优先考虑改善这些环境质量因素以提高人员的健康舒适水平和工作效率。

4) 在调查的 2 幢建筑中,人员薪酬与建筑运行能耗(电费)支出之比也达到 100 倍之多。这表明在中国,尤其是北京、上海这样的大城市的办公建筑中,提高人员工作效率有获得巨大经济效益的潜力。

参考文献

- [1] Roelofsen P. The impact of office environments on employee performance: The design of the workplace as a strategy for productivity enhancement[J]. *Journal of Facilities Management*, 2002, 1(3): 247-264.
- [2] Lan L, Lian Z W, Pan L, Ye Q. Neurobehavioural approach for evaluation of office workers' productivity: the effects of room temperature[J]. *Building and Environment*, 2009, 44: 1578-1588.
- [3] Lan L, Lian Z W. Use of neurobehavioural tests to evaluate the effects of indoor environment quality on Productivity[J]. *Building and Environment*, 2009, 44: 2208-2217.
- [4] Lan L, Wargocki P, Lian Z W. Quantitative measurement of productivity loss due to thermal discomfort[J]. *Energy and*

- Buildings, 2011, 43, 1057-1062.
- [5] Lan L, Wargocki P, Wyon D P. et al. Effects of thermal discomfort in an office on perceived air quality, SBS symptoms, physiological responses, and human performance[J]. *Indoor Air*, 2011, 21, 376-390.
- [6] Lan L, Lian Z W, Pan L. The effects of air temperature on office workers' well-being, workload and productivity-evaluated with subjective ratings[J]. *Applied Ergonomics*, 2011, 42: 29-36.
- [7] Sepp O, Fisk W J. Some quantitative relations between indoor environmental quality and work performance or health[J]. *International Journal of HVAC&R Research*, 2010, 12(4): 957-973.
- [8] Woods J E. Cost avoidance and productivity in owning and operating buildings [J]. *Occupational Medicine*, 1989, 4(4): 753-770.
- [9] Sk J E. Indoor environment and economics. Project no. N6405, The Norwegian Institute of Building Research (NBI-Byggforsk) (in Norwegian), Oslo, 1992.
- [10] Sepp O. Estimated cost of indoor climate in Finnish buildings. In: *Proceedings of the Eighth International Conference on Indoor Air Quality and Climate*, Edinburgh, Scotland, 1999.
- [11] Fisk W J, Rosenfeld A H. Estimates of improved productivity and health from better indoor environments[J]. *Indoor Air*, 1997, 7: 158-172.
- [12] ASHRAE Handbook-Fundamentals. Thermal comfort. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc, 2005.
- [13] Wargocki P, Seppnen O. Indoor climate and productivity in offices-How to integrate productivity in life cycle costs analysis of building services, REHVA Guidebook 6. , Federation of European Heating and Air-Conditioning Associations, REHVA, Brussels, 2006.
- [14] Heerwagen J H. Productivity and well-being: What are the links American Institute of Architects Conference on Highly Effective Facilities. Cincinnati, OH, 12-14 March, 1998.
- [15] Damasio A. *Descartes' error: Emotion, reason, and the human brain*. New York: Grosset/Putnam, 1994.
- [16] Toftum J, Jorgensen A S, Fanger P O. 1998. Upper limits of air humidity for preventing warm respiratory discomfort. *Energy and Buildings*, 1994, 28, 15-23.
- [17] Lan L, Wargocki P, Lian Z W. Optimal thermal environment improves performance of office work. *REHVA Journal*, 2012.
- [18] Banbury S P, Berry D C. Office noise and employee concentration: Identifying causes of disruption and potential improvements. *Ergonomics*, 2005, 48(1), 25-37.
- [19] Jones D M, Broadbent D E. Side-effects of interference with speech by noise[J]. *Ergonomics*, 1979, 22, 1073-1081.

(编辑 侯相)

(上接第102页)

参考文献:

- [2] Zhao B, Li X. Revised air-exchange efficiency considering occupant distribution in ventilated rooms [J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2003, 53(6): 759-763.
- [3] Ezaki H, Nambu T, Ninomiya R, et al. Estimation of liquidus temperature of Sn-based alloys and its application to the design of Pb-free solder [J]. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 2002, 13(5): 269-272.
- [4] 石辛民,郝整清. 模糊控制及其MATLAB仿真[M]. 北京:清华大学出版社, 2008.
- [5] Jang J S R. Self-learning fuzzy controllers based on temporal back propagation[J]. *IEEE Transactions on Neural Network*, 1992, 3(5): 714-723.
- [6] Alasha'ary H, et al. A neuro-fuzzy model for prediction of the indoor temperature in typical Australian residential buildings[J]. *Energy and Buildings*, 2009, 41: 703-710.
- [7] Li K J, et al. Forecasting building energy consumption using neural networks and hybrid neuro-fuzzy system: A comparative study[J]. *Energy and Buildings* 2011, 43: 2893-2899.
- [8] Wu J D, Hsu C C, Chen H C. An expert system of price forecasting for used cars using adaptive neuro-fuzzy inference[J]. *Expert Systems with Applications*, 2009, 36: 7809-7817.
- [9] Ying L C, Pan M C. Using adaptive network based fuzzy inference system to forecast regional electricity loads[J]. *Energy Conversion and Management*, 2008, 49: 205-211.
- [10] Servet S. An expert system for the humidity and temperature control in HVAC systems using ANFIS and optimization with Fuzzy Modeling Approach [J]. *Energy and Buildings*, 2009, 41: 814-822.
- [11] 李国勇. 神经模糊控制理论及应用[M]. 北京:电子工业出版社, 2009.
- [12] Yager R, Filev D. Generation of fuzzy rules by mountain clustering[J]. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 1994, 2(3): 209-219.
- [13] Hikmet E, Mustafa I, et al. Modelling a ground-coupled heat pump system using adaptive neuro-fuzzy inference systems[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2008, 31: 65-74.
- [14] Sencan A, Kalogirou S A. A new approach using artificial neural networks for determination of the thermodynamic properties of fluid couples[J]. *Energy Convers. Manage.* 2005, 46 (15-16): 2405-2418.
- [15] Chang F J, Chang Y J. Adaptive neuro-fuzzy inference system for prediction of water level in reservoir[J]. *Advances in Water Resources*, 2006, 29: 1-10.

(编辑 罗敏)