

住宅建筑中庭内自然通风的数值模拟

赵 林, 李念平

湖南大学土木工程学院, 长沙 410082

摘要 为了研究自然通风对住宅建筑中庭内环境以及住户的影响,以南向水平进入中庭的室外气流为研究对象,在夏季气候条件下,应用 RNG $\kappa-\varepsilon$ 湍流模型,对中庭内热环境和风环境用数值方法进行了模拟,并结合自然通风原理对计算结果进行了分析。研究表明,中庭外窗的充分开启,使得中庭内有较好的热环境和令人满意的风场,既提高了住户居住的舒适性环境,又达到了建筑节能的效果。

关键词 住宅建筑中庭;自然通风;数值模拟;居住环境

中图分类号 TU834

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2009)02-0073-05

Numerical Simulation of Natural Ventilation in Atrium of Residential Building

ZHAO Lin, LI Nianping

College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China

Abstract In order to study the effects of the natural ventilation on the inside environment of the atrium and inhabitants in residential buildings, thermal and wind environments in the atrium are simulated by numerical methods, with RNG $\kappa-\varepsilon$ turbulent model under the summer climates, to obtain the extraventricular airflow entering the atrium from south and to analyze the results combined with theory of natural ventilation. The study indicates the preferable thermal environment and satisfactory wind field in the atrium when the windows of the atrium are fully open, which improves the comfort of the residential environment as well as saves building energy.

Keywords residential buildings' atrium; natural ventilation; numerical simulation; residential environment

自然通风是一种经济实用的通风方式,既能满足室内舒适条件,改善室内空气质量,又能实现有效的被动式制冷,达到节约能源的目的^[1]。中庭是中国传统建筑的精髓,在建筑设计中具有组织自然通风的功能。随着能源的日益紧张和人们

对居住环境要求的提高,中庭也大量出现在住宅建筑中。中庭的出现,给封闭的居住环境带来了阳光、空气以及绿体等自然因素,极大地改善了居住空间的舒适环境,也有利于住宅建筑的节能。

1 住宅建筑中庭的自然通风和室内环境

中庭是高层建筑(群)内部空间环境中最生动、最活跃的因素,其在住宅^[2-3]、学校^[4]、商场、办公室等建筑物里的性能应用,引起了学界的关注。Holford^[5]、Rajapaksha^[6]就中庭自然通风进行了一系列的研究。建筑外窗与外界直接接触,使得院内空气时刻受到外界空气扰动的影响,从而增强了中庭内的自然通风,有效地改善了住宅建筑中庭周围住户的生活环境。

1.1 自然通风实现方法

自然通风最基本的动力是风压和热压。在具有良好的外部风环境地区,风压可作为实现自然通风的主要手段。自然通风的另一原理是利用建筑内部空气的热压差,即通常讲的“烟囱效应”来实现建筑的自然通风。风压通风与热压通风往往互为补充、密不可分^[7]。

对于中庭而言,开敞的建筑外窗以及顶部,可以充分利用风压而对建筑进行自然通风;其贯穿建筑的构造,可形成上下端温差,从而加速室内空气流动,达到真正意义上的“烟囱效应”。

1.2 中庭的室内环境

中庭除改善建筑物的通风采光外,其特有的“烟囱效应”和“温室效应”可对建筑进行降温 and 采暖,提高了建筑的舒适性。烟囱效应是由于空间高度造成热压力差,从而形成中庭内气流的流动,故中庭内空气温度的垂直分布梯度较大。热

收稿日期: 2008-12-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(50778064)

作者简介: 赵林,研究方向为自然通风与节能,电子信箱: xiajlin@126.com; 李念平(通信作者,中国科协会员登记号: E121900450M),教授,研究方向为建筑环境与室内空气品质,电子信箱: linianping@126.com

量通常滞留在中庭顶部,底部温度相对较低^[8]。中庭建筑中心的空气流动是层流向紊流的过渡状态(低雷诺数),这是由于稳定的热分层衰减了垂直方向的湍流;而不稳定的热分层加强了紊流。中庭建筑很大,所以在许多区域,空气几乎是没有任何湍流影响的,甚至是停滞的。

自然通风能从3个方面改善建筑室内环境:①将室内的热空气排出室外,直接降低空气温度,称为降温通风;②有效改善空气的湿度,直接影响人体的蒸发换热和对流换热,称为热舒适通风;③排除室内的有害气体和尘埃,保证新鲜洁净的室内空气,称为健康通风^[9]。

2 中庭室内环境的数值模拟

本文利用 Fluent 软件对中庭进行数值模拟,主要考虑中庭在外窗充分开启时,所引入的自然通风对中庭内部环境以及对周围住户的影响。

2.1 物理模型

模拟的住宅建筑中庭为一整体式中庭,即中庭南面为楼梯间和电梯间,其他3面为住户,顶部为开敞式。中庭的长、宽、高分别为25、13、40 m,建筑物共为10层。中庭周围的窗户都为宽2 m、高2.5 m。南北面的窗户数量为2×10个,东西面的窗户数量为4×10个。定义x轴正方向为南,y轴正方向为东。建筑模型简图如图1所示。

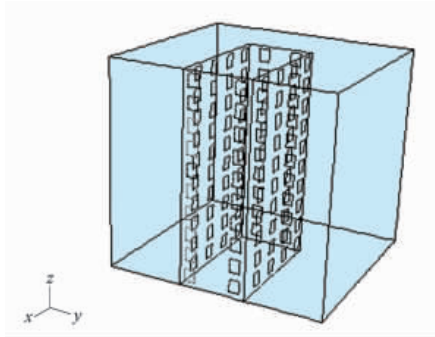


图1 中庭住宅建筑模型

Fig. 1 Mode of atrium residential buildings

2.2 数学模型

中庭空间的空气流动是复杂的三维非稳态湍流流动,在流动中的各种物理参数,如速度、温度等随时间和空间随机变化。自然对流是由于流体内部的温度差或浓度差引起的密度差,在重力场或其他力场作用下形成浮力引起的。内流场核心区域属紊流状态。

本文湍流模型采用 RNG $\kappa-\varepsilon$ 模型,该模型的主要优点有^[10]:①模型中产生项考虑了流动情况以及空间坐标;②修正了湍流黏度,考虑了平均流动中的旋转及旋流流动情况;③提供了一个考虑低雷诺数流动的解析公式,较标准 $\kappa-\varepsilon$ 方程,能更准确地对待近壁面流动。

RNG $\kappa-\varepsilon$ 模型通用方程形式为

$$\frac{\partial}{\partial \tau}(\rho \phi) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \phi) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_i} \right) + S_\phi$$

式中, ϕ 为通用变量; u_j 为 x_j 方向上的速度分量; $i,j=1,2,3$; Γ_ϕ 为 ϕ 的广义扩散系数; S_ϕ 为广义源项。

在本文的自然对流换热模拟中,必须考虑到流体密度随温度的变化,在这样的情况下,连续性方程、动量方程以及能量方程互相耦合求解十分复杂。为便于处理由于温差而引起的浮升力项,采用 Boussinesq 假设。

2.3 边界条件

根据长沙市的夏季气候特征,定义室外空气温度为27℃,室外预报风速为3.7 m/s,但考虑到风向及入流角度等原因,取3 m/s,方向为正南;室内壁面的温度为30℃。

1) 入口边界。入口边界定义为南向主导风进入中庭南面外窗的速度进口,且窗户全部打开。为更接近实际情况,风速随高度变化。其中入口风速服从指数分布^[11]

$$u = u_0 \left(\frac{z}{z_0} \right)^a$$

式中, u 为 z 高度处的风速,m/s; u_0 为参考高度处的风速,m/s; z 为距地面的高度,m; z_0 为参考高度,m; a 为反映地面粗糙的常数,取 $a=0.2$ 。

由于气象台($a=0.16$)与高层建筑($a=0.2$)所处的地区可能不同,所以应对风速 u 进行修正。根据气象学原理,修正后的 u 为

$$u = 0.533 u_z^{0.2}$$

式中, u 为高度为 z 处的风速, u_i 为室外预报风速, z 为风口距地面的高度。

由于楼梯间的进深不大,因此本文忽略风从建筑外窗流经楼梯间的速度损失,取各层窗户中心处的风速计算值为入口风速,则中庭南面各楼层窗口的入口风速见表1。

表1 各楼层入口风速
Table 1 Speed of wind entering different floor

楼层	入口风速/(m·s ⁻¹)	楼层	入口风速/(m·s ⁻¹)
1	1.89	6	2.97
2	2.30	7	3.07
3	2.55	8	3.16
4	2.72	9	3.24
5	2.86	10	3.31

2) 出口边界。中庭的南面窗户为入风口,则四周其他窗户及中庭开敞的顶部为出风口,并定义为压力出口边界条件。

3) 壁面边界。四周壁面考虑浮力产生的紊流中近壁面的粘性支层,采用标准壁面函数处(standard wall function)。在四周的内壁面中,考虑到壁面会受到阳光照射而产生辐射热流,因此定义北面壁面的恒热流密度。其值由下式确定^[12]:

$$q = \rho I = 56.7 \text{ W/m}^2$$

式中, ρ 为墙面吸收系数, 取 $\rho=0.7$; 为日平均太阳辐射强度, 取 $I=81 \text{ W/m}^2$ 。其他壁面均按绝热壁面处理。

2.4 模拟结果和分析

2.4.1 中庭内的热环境模拟

取中庭内 xz 面 ($y=0$, 即南北方向的中垂面)、 xy 面 ($z=0$, 即中庭中部的水平面) 以及壁面进行中庭内热环境进行分析, 温度场如图 2、图 3 所示。

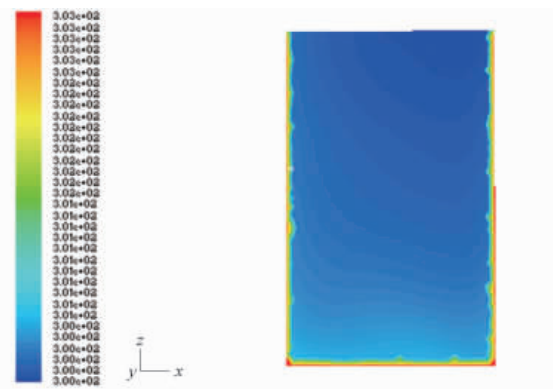


图 2 中庭 $x-z$ 面 ($y=0$) 上的温度场 (K)

Fig. 2 Distribution of temperature on $x-z$ plane

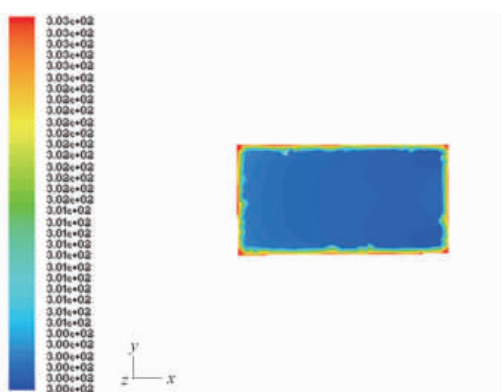


图 3 中庭 $x-y$ 面 ($z=0$) 上的温度场 (K)

Fig. 3 Distribution of temperature on $x-y$ plane

由图 2、图 3 可以看出, 中庭竖直方向上温度分层非常明显, 大部分区域温度维持在 $27\sim 28^\circ\text{C}$ 之间; 近壁面处温度稍高; 中庭内部从下到上温度依次降低; 水平方向上, 由于北壁面的辐射热流影响, 北面温度高于南面。

图 4、图 5 为中庭周围住户壁面上窗户的温度分布情况, 由图 4、图 5 可知, 东、西壁面的北端以及底部温度偏高, 顶部边缘受室外对流换热的影响, 温度偏低; 住户窗户中心处的温度基本维持在 $27\sim 28^\circ\text{C}$ 。

2.4.2 中庭内的风环境模拟

图 6 为中庭窗口所在竖直平面处风速场, 图 7 为中庭顶部出口上的风速场。由图 6、图 7 可知: ① 由于南向楼梯间的窗户充分开启, 使得中庭内部有较大的风速场, 风速在南端的顶部取得最大值, 室内流场由于旋涡的作用有为数不多的几个低流速区; ② 在南向引入的室外空气中, 大部分气流在

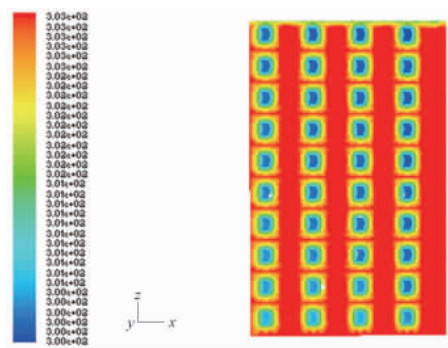


图 4 东、西壁面上的温度场 (K)

Fig. 4 Distribution of temperature on east and west walls

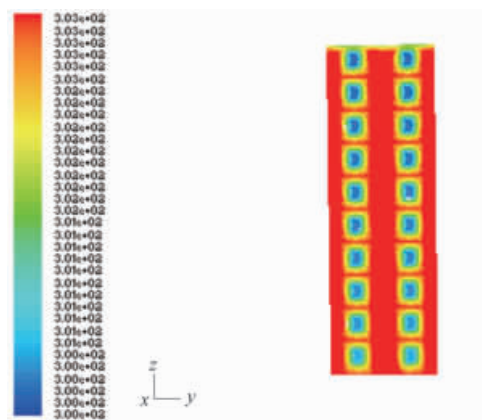


图 5 北壁面上的温度场 (K)

Fig. 5 Distribution of temperature on north wall

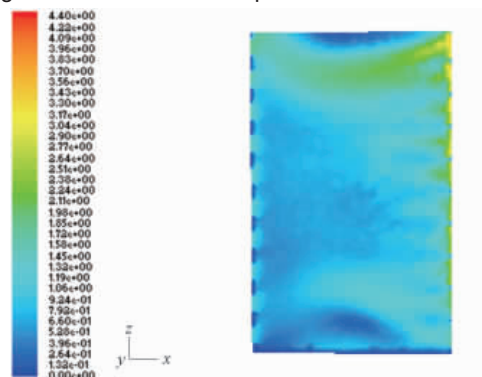


图 6 中庭 $x-z$ 面 ($y=3.25$) 上的风速场 (m/s)

Fig. 6 Distribution of wind speed on $x-z$ plane

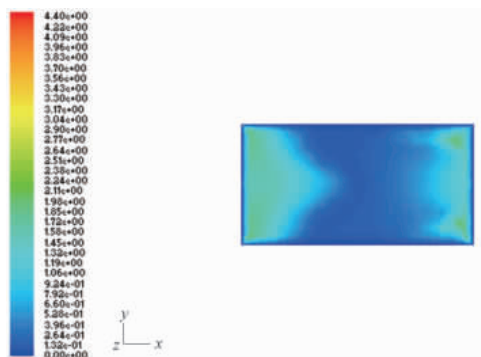


图 7 中庭 $x-y$ 面 ($z=20$) 上的风速场 (m/s)

Fig. 7 Distribution of wind speed on $x-y$ plane

风压的作用下朝北壁面流向住户的窗口,底部气流由于热压和旋涡的作用而未能水平到达对面,上部的气流在风压和热压的共同作用下,一部分沿顶部出口流出室外,一部分沿周围压力出口流出;③中庭顶部出口的中间区域形成了一个低风速区域(图7)。图8、图9为壁面上所有住户窗户中心处的风速分布图。

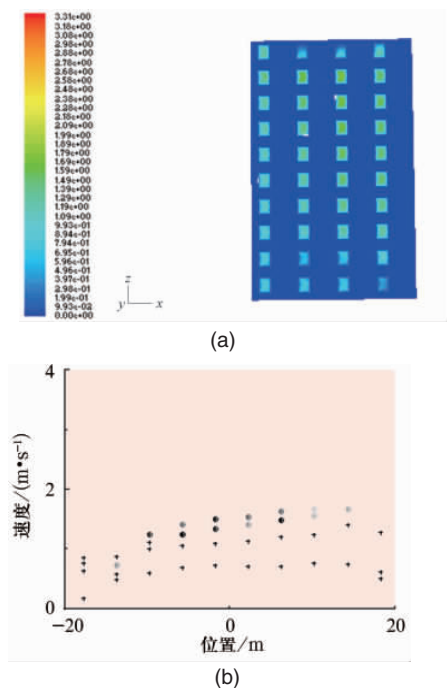


图8 东、西壁面窗户风速分布

Fig. 8 Distribution of wind speed on north windows

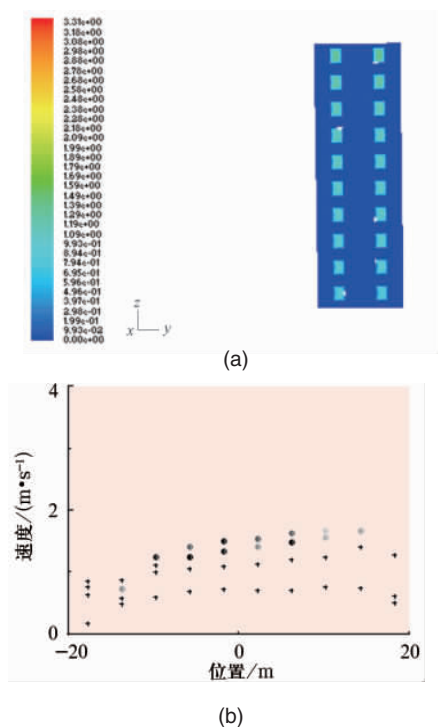


图9 北壁面窗户风速分布

Fig. 9 Distribution of wind speed on east and west windows

2.4.3 模拟结果的分析讨论

1) 由于壁面温度高于室外空气温度,当室外空气进入中庭时,不断与壁面进行对流换热,因此近壁面空气温度稍高。被加热的空气在上升的同时不断与周围的“低温”空气进行热交换,从而造成中庭内温度明显分层。

2) 由于中庭的顶部开口效应和入流风速的分布,在中庭上方空气流速较大,而顶部压力出口又为自由出流,加热的室内空气更容易将热量及时地带出室外。而在底部由于风速相对较低,加上射流的受限,形成了旋涡,使得空气能更充分地进行传热,所以图2中底部温度高于上部。

3) 在中庭顶部,南向气流的进入使得气流上方出现了负压区,室外气流在风压的作用下从南侧被吸入中庭内,由北面窗户和顶部出口流出。因此在图6、图7中,顶部的中央出现了一个低流速区,气流也并非水平到达对面。

4) 北壁面受太阳照射,近壁面温度较高,同时加热了近壁面的空气,在热压的作用下,一部分空气绕壁面流动向东、西压力出口排出;另一部分垂直向上,由顶部压力出口排出。室内壁面受太阳照射而处于一种高温状态时,室外低温空气的充分进入能有效地加强对流换热并带走热量,达到对建筑进行自然降温的效果。中庭内温度的明显分层也将会加大热压通风换气,有效地带走中庭内的余热。考虑气流分布的能量利用有效性,可用能量利用系数来表达,即

$$\eta = \frac{(t_p - t_o)}{(t_n - t_o)}$$

式中, t_p 为排风温度, t_o 为送风温度, t_n 为工作区平均温度^[13]。

在本模拟结果中,均由Fluent得出平均值, $t_p=300.18$ K, $t_o=300$ K, $t_n=300.17$ K, $\eta=1.06$, 相对具有较高的能量利用系数,有较大的节能潜力。

吹风(空气对流交换)是改变室内热环境和影响人体热舒适的主要因素之一,在高于26℃的“热”环境中,通过吹风的补偿作用可使人达到热舒适状态。与一般的机械风相比,自然风具有良好的吹风感觉^[14]。调查结果显示,人们对自然风的偏爱显而易见,即使在有点热的环境中,只要有自然风,人们大多数还是选择自然环境而不是空调环境^[15]。

研究结果表明,环境温度越高,人体的有感风速就越大。试验证明,在15~18℃范围内,测定人体感知风速的最低值为0.2 m/s;而在30℃时人体感知风速的最低值为0.6 m/s^[16]。从本算例的模拟结果(图8、图9)看,住户的窗户风速最高达1.8 m/s,最低风速虽然不足0.2 m/s,但从整体上看,风速低于0.6 m/s的住户只有东、西向的3户而已,仅占3%。其他住户窗口风速都大于0.6 m/s。整个中庭住户窗户的平均风速超过了1 m/s。在室外高温环境下,完全可以满足住户的吹风感。

3 结论

在住宅建筑中,中庭引入了共享空间,并能有效地组织实现与周围住户的自然通风。建筑中若外窗能够部分开启,将会大大提高居住者对室内环境的主观评价,这首先是在心

理上满足了人们亲近自然的需求。自然风与机械风在频谱、湍流度等物理特性上有很大差别,因此给人带来的舒适感也不同;另外,经过漫长的风道、空气处理装置、风口进入室内的新风,其新鲜度也不如从窗户直接进入的自然风。在本次模拟中,由于中庭南向楼梯间的外窗充分开启,使得室外一定速度的水平横向气流直接进入中庭,不仅能有效地带走室内余热,还大大改观了住户的风环境,满足了住户的舒适性需求。由此可见,在夏季气候条件下,住宅建筑中庭的自然通风具有很大的利用空间和可观的利用价值。

在当今技术条件下,营造一个满足居住条件、完全由人工控制、舒适的住宅建筑空间已经并非难事。但是,建筑在使用过程中大量的能源消耗以及居住人群与自然环境缺乏沟通的问题不得不让我们重视。自然通风不同于其他昂贵、复杂的技术,它是一种人们喜欢接受、廉价的技术。在中庭内充分利用自然通风体现了可持续发展的理念。

参考文献 (References)

- [1] 魏景姝, 赵加宁, 高军. 自然通风技术研究方法及工具[J]. 应用能源技术, 2006, 103(7): 1-2.
Wei Jingshu, Zhao Jianing, Gao Jun. *Application of Energy Technology*, 2006, 103(7): 1-2.
- [2] Hisashi K, Masaya N, Ryuji S, et al. Environmental assessment of light well in high-rise apartment building[J]. *Building and Environment*, 2003, 38(2): 283-289.
- [3] Hisashi K, Ryuji S, Toshio Y. Natural ventilation of light well in high-rise apartment building[J]. *Energy and Building*, 2003, 35(4): 427-434.
- [4] Jones J R, Luther M B. A summary of analytical methods and case study monitoring of atrium [J]. *Ashrae Transaction*, 1993, 99(2): 1070-1080.
- [5] Holford M J, Gary R H. Fundamental atrium design for natural ventilation[J]. *Building and Environment*, 2003, 38(3): 409-426.
- [6] Rajapaksha I, Nagai H, Okumiyu M A ventilated courtyard as a passive cooling strategy in the warm humid tropics [J]. *Renewable Energy*, 2003, 28(2): 1755-1778.
- [7] 钟军立, 曾艺君. 建筑的自然通风设计浅析 [J]. 重庆建筑大学学报, 2004, 26(2): 18-19.
Zhong Junli, Ceng Yijun. *J Chongqing Jianzhu University*, 2004, 26(2): 18-19.
- [8] 林川, 田先锋, 房志勇. 中庭建筑设计及其热舒适度控制[J]. 工业建筑, 2004, 34(7): 28.
Lin Chuan, Tian Xianfeng, Fang Zhiyong. *Industry Architecture*, 2004, 34(7): 28.
- [9] 孙超法. 可调节气候的中庭空间 [J]. 湖南理工学院学报: 自然科学版, 2005: 18(3): 84.
Sun Chaofa. *Journal of Hunan Institute of Science and Technology: Natural Science Edition*, 2005, 18(3): 84.
- [10] 王福军. 计算流体力学分析: CFD 软件原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005: 124-125.
Wang Fujun. *Analysis of hydrokinetics: Theory and appalication of sofeware*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005: 124-125.
- [11] 杨建坤, 张旭, 刘东, 等. 自然通风作用下中庭建筑热环境的数值模拟[J]. 暖通空调, 2005, 35(5): 27.
Yang Jiankun, Zhan Xu, Liu Dong, et al. *Journal Heating Ventilating and Airconditioning*, 2005, 35(5): 27.

- [12] Griffiths W. Use of liquid sorption dehumidification to improve energy utilization of air systems[J]. *Ashrae Transactions*, 1998, 86: 1013-1021.
- [13] 吴和英. 气流组织对空气品质的影响分析 [J]. 制冷与空调, 2006(4): 64.
Wu Heying. *Refrigeration & Air-Condition*, 2006(4): 64.
- [14] 朱守林, 李文彬, 董金宝. 自然吹风的人体热舒适分析 [J]. 内蒙古农业大学学报, 2004, 25(1): 11-12.
Zhu Shoulin, Li Wenbin, Dong Junbao. *Journal of Inner Mongolia Agricultural University*, 2004, 25(1): 11-12.
- [15] 贾庆贤, 赵荣义, 许为全. 吹风对舒适性影响的主观调查与客观评价 [J]. 暖通空调, 2000, 30(3): 15-17.
Jia Qingxia, Zhao Rongyi, Xu Weiquan. *Journal Heating Ventilating and Airconditioning*, 2000, 30(3): 15-17.
- [16] 朱唯, 狄育慧, 王万江, 等. 室内环境与自然通风[J]. 建筑科学与工程学报, 2006, 23(1): 92-93.
Zhu Wei, Di Yuhui, Wang Wanjiang, et al. *Journal of Architecture and Civil Engineering*, 2006, 23(1): 92-93.

(责任编辑 代丽)

·学术动态·



全国第三次电子政务 技术及应用学术 研讨会(EGTA2009)征文

为促进我国电子政务建设,推动国内电子政务相关技术和应用研究成果的交流,中国计算机学会暨电子政务与办公自动化专委会决定于2009年9月26-28日召开全国电子政务技术与应用学术研讨会,会议将就电子政务建设相关的共性技术、项目方案设计、实施与应用等问题进行深层次的研讨。会议录用论文中主要论文初定拟以英文方式由IEEE Computer Society Press(EI源刊)正刊出版,其余论文将由核心期刊《计算机科学》专刊、《计算机与数字工程》正刊和清华大学出版社出版(根据录用篇数确定期刊种数)。会议期间除进行会议论文交流外,还将邀请著名学者作特邀报告。欢迎从事电子政务技术与应用相关研究工作的专家、学者和企业界人士踊跃投稿。征文截止日期:2009年4月25日。

征文范围(包括但不限于):电子政务规划;电子政务网络可信互联关键技术;电子政务门户技术;电子政务业务流程优化重组;信息资源整合与利用;电子政务应用支撑平台;决策支持与分析技术;电子政务信息安全保障;电子政务应用系统设计;新技术在电子政务中的应用;电子政务优秀产品和技术;电子政务优秀实施案例分析。

投稿邮箱地址: <http://www.easychair.org/conferences/?conf=egta09>; 大会网站: <http://www.neu.edu.cn/wisa2009>; 会务联系人: 中国矿业大学 姜淑娟 (shijiang@cumt.edu.cn)