

小微空间通风空调贴附式气流组织的有效性研究

李安桂, 李明明

(西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 基于室内零方程湍流模型, 利用水平贴附射流原理, 改变小微空间的送风口位置, 进行三维数值模拟, 分析不同情况下的温度场和速度场分布; 利用不均匀系数、通风效率和空气龄值指标对气流组织效果进行评价, 得出最佳风口布置位置。通过计算, 发现对于小空间, 送风口位置的变化对投入能量利用系数的影响不大, 对不均匀系数影响较大。

关键词: 风口布置; 气流组织; 数值模拟; 小微空间

中图分类号: TU834

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2016)01-0115-07

Research on the effectiveness of air curtain ventilation air distribution for small micro-space

LI Angui, LI Mingming

(School of Environment and Municipal Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

Abstract: Based on indoor zero equation turbulence model and horizontal wall attached jet principle, by changing the position of air diffuser in small micro space, and using three-dimensional numerical simulation, temperature and velocity distribution under different conditions were analyzed. Uniformity coefficient, ventilation efficiency and mean age of air are used to evaluate airflow effect, and obtain the optimum diffuser layout. The results of calculation show that changing the position of air outlet has little effect on ventilation efficiency, but greater effect on energy utilization coefficient.

Key words: air diffuser distribution; airflow; numerical simulation; small micro space

随着时代的发展和进步, 工业厂房行车室及控制室, 列车车厢, 太空舱, 飞机机舱, 胶囊旅馆等此类小微空间在人们的生活中占的比重越来越大, 在这种封闭的环境中, 易造成因通风不当引起的憋闷等不舒适感, 因此就需要一个舒适, 均匀, 高效的气流组织^[1]。目前室内通风系统大多数为混合通风和置换通风, 李强民^[2]对置换通风的原理、设计及应用进行了研究, 马仁民^[3]等人对置换通风的有效性进行了研究, 袁丽丽^[4]等人对不同通风方式下室内空气质量进行了研究, 陆佩强^[5]等人对置换通风方式下室内的温度分布进行了研究, 但是在狭小空间内这两种通风方式都有局限性。本文采用上送下回送风方式, 对利用气流顶板水平贴附原理进行送风的方式进行了探索。

1. 研究方法

1.1 物理模型

以某市胶囊旅馆为例, 其尺寸为 2.2 m×1.1 m×1.2 m。室内可容纳 1 人, 人体模型尺寸依据中国成年人人体尺寸标准制定, 姿势考虑卧姿。取人体

尺寸参数为: 身高 1.68 m, 胸深 0.2 m, 肩距 0.44 m。条缝型送风口, 尺寸: 0.05 m×0.4 m。回风口尺寸: 0.05 m×0.6 m。

1.2 数学模型

在 CFD 计算流体动力学领域中, 流体流动和换热问题的核心是求解流体控制方程。控制方程可表示为:

$$\frac{\partial (\rho\phi)}{\partial t} + \text{div} (\rho U\phi) = \text{div} (\Gamma_\phi \text{grad}\phi) + S_\phi$$

其中: ρ 为空气密度, U 为速度矢量, ϕ 为通用变量, 可表示速度矢量分量, 温度等流体参数; Γ_ϕ 为对应 ϕ 的扩散系数; S_ϕ 为源项。

1.3 假设、边界条件及参数设计

(1) 室内空气不可压缩, 密度符合 Bossinesq 的假设;

(2) 空气气流具有较高的 Re 数, 为稳态湍流;

(3) 气流速度较低, 忽略由流体粘性力做功所引起的耗散热; 忽略胶囊门的漏风影响^[6]。

本文选取某胶囊旅馆, 以夏季运行工况为计算

依据,总送风量为 $82.7 \text{ m}^3/\text{h}$,环境温度取 30°C ,相对湿度 60%。入口边界条件:送风口设在房内侧墙顶部中央位置,送风温度为 20°C ,速度为 1.5 m/s ;壁面边界条件:房内除西面侧墙外均与其他房间相邻,取为绝热面,西面侧墙按定壁温计算,取为 30°C 。人体按照定温度计算,取为 36.6°C 。

1.4 网格划分与无关性验证

网格划分质量是数值模拟过程中的非常关键的影响因素,直接关系到求解的准确性。若想获得高质量网格,应使求解域内网格疏密程度与研究变量的梯度变化相适应;求解域内的单元光滑变化且扭曲度较小。具体到本文研究的物理模型,应尽可能的减小胶囊内划分网格的倾斜度,满足网格 Aspect ratio > 0.15 和 Face alignment > 0.15 的要求,以提高求解的精确度。

模型建立在三维直角坐标系中,选择 Airpak 提供的六面体结构化网格,最大尺寸不超过“胶囊”房间尺寸的 $1/20$ 时对于长方体模型能够形成较好的网格质量。无关性验证过程中,当网格数取值为 363 000 时,随着网格数的增加,模拟值变化量很小,最终确定网格数为 400 000,网格最大尺寸为房间高度的 $1/40$,即 0.03 m ,并在送风口和回风口进行网格局部加密。

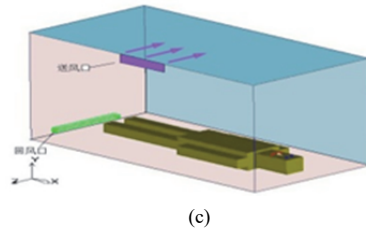
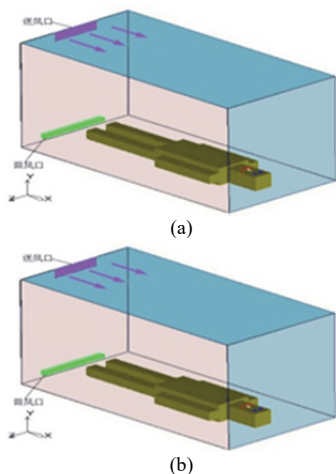
2 送风口位置对室内气流组织的影响分析

改变送风口的位置,并对其进行数值模拟分析。

(1) 位置一:送风口位于西面侧墙顶部中央位置,模型如图 1(a)所示。

(2) 位置二:送风口位于东面侧墙顶部中央位置,模型如图 1(b)所示。

(3) 位置三:送风口位于南面侧墙顶部中央位置,模型如图 1(c)所示。



(c)

图 1 不同的送风口布置方案

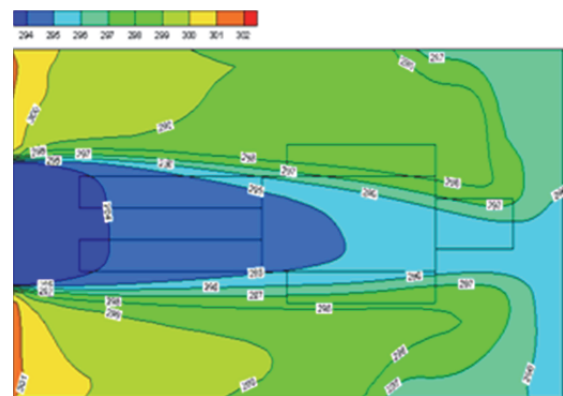
Fig.1 Different layout scheme of air supply outlet

2.1 不同风口布置方案的影响分析与评价

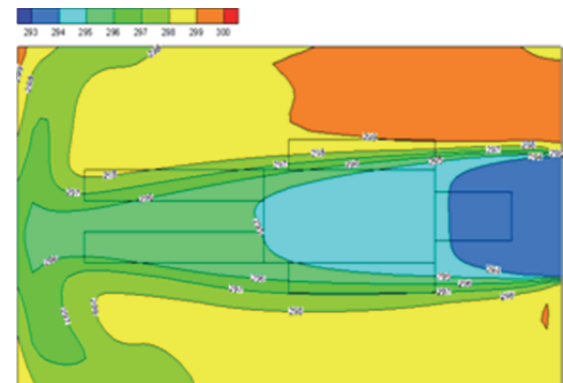
在 Y 方向上,分别选取 $Y=1.175 \text{ m}$ 切面,即“胶囊”内顶部送风口所在平面,分析该切面上的温度场; $Y=0.2 \text{ m}$ 切面,即人体平卧高度切面,分析该切面上的温度场和速度场;在 Z 方向上,选取 $Z=0.55 \text{ m}$ 切面,即“胶囊”内正中间切面,分析该切面上的温度场和速度场,并依据 ISO7730 标准[14]进行热舒适分析。

2.1.1 不同风口布置温度场对比

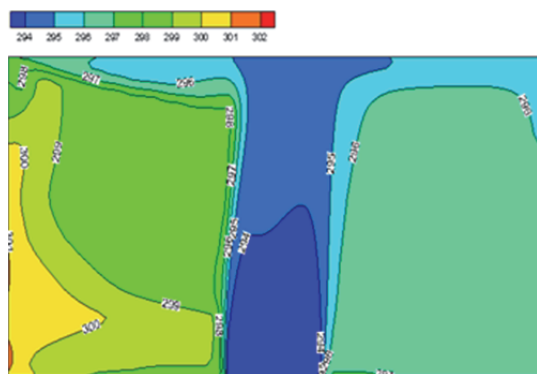
由图 2 可以明显看出:送风口处于位置一情况下,温度分布比较均匀;处于位置二,整体温度分布较高,可能是由于回风口布置在了西侧墙下部,送风口布置在了东侧墙顶部,导致一部分送风直接回流,冷量没有得到充分地利用;处于位置三,顶板左侧温度较高,是因为外界环境通过西侧墙向房间内部传热所致。



位置一



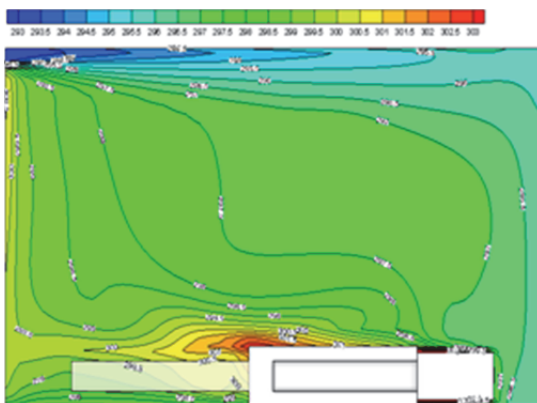
位置二



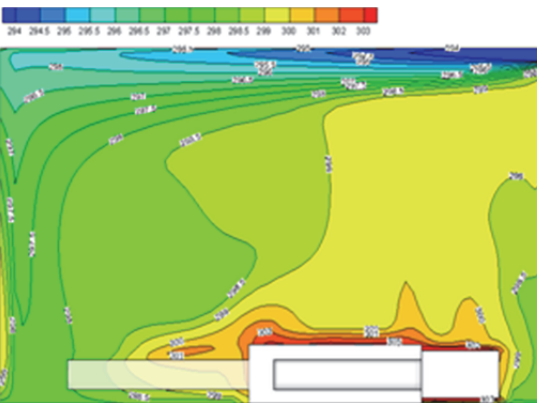
位置三

图 2 $Y=1.175\text{m}$ 切面的温度分布Fig.2 The temperature distribution of section $Y=1.175\text{m}$

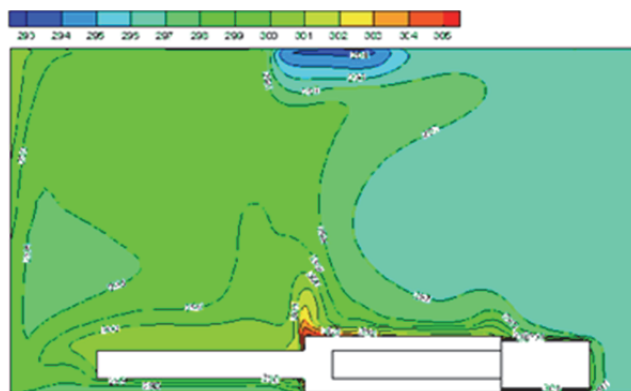
由图 3 可以看出, 人体活动区温度分布比较均匀, 贴近顶板处温度梯度较大, 出现明显的温度分层现象, 在人体平躺区域温差较小, 温度梯度不大, 形成了温度均匀的空气湖. 风口处于位置一情况下, 温度分布比较均匀, 左侧温度较高, 是因为外界环境通过西侧墙壁向内传热, 但整体温差并不大, 不易对人员造成不舒适感; 处于位置二, 人体上部区域温度分布均匀, 但靠近人体区域整体温度较高, 人体易产生热不舒适感; 处于位置三, 温度分布均匀, 但靠近人体区域温度偏低, 人体易产生热不舒适感.



位置一



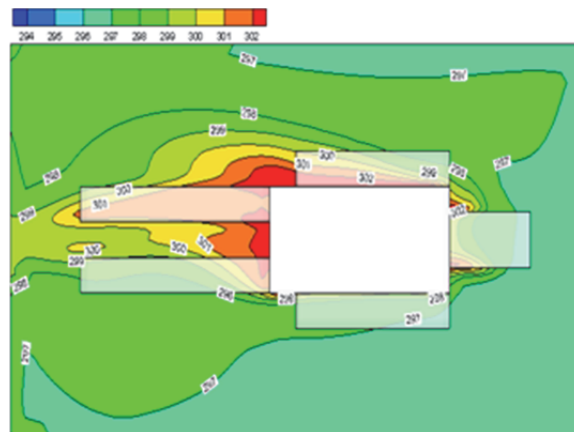
位置二



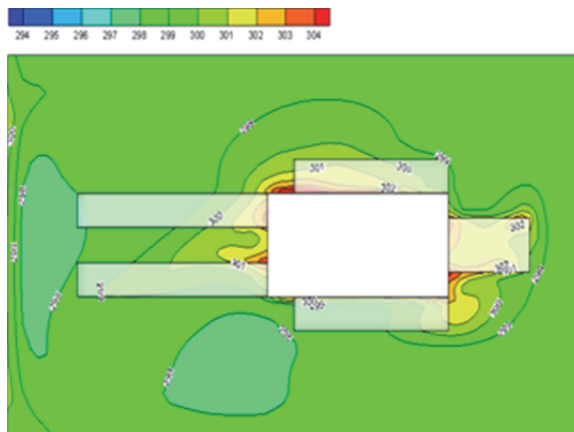
位置三

图 3 $Z=0.55\text{m}$ 切面的温度分布Fig.3 The temperature distribution of section $Z=0.55\text{m}$

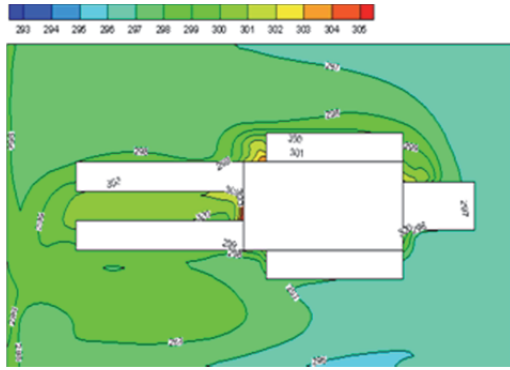
考虑到整个人体的舒适性, 更加准确地分析人体从头到脚的温度分布, 对 $Y=0.2\text{m}$ (即人体平卧高度) 切面的温度分布进行研究. 由图 4 可以看出, 三种情况下室内温度分布规律近似相同, 人体表面整个温度场最大温差为 $3\text{ }^{\circ}\text{C}$, 头部与脚部的温差最大为 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$, 温度梯度较小, 在人体休息区产生了一个类似空气湖的温度分布模式, 比较均匀, 不易使人体产生热不舒适感. 其中, 风口处于位置一时, 人体表面温度分布整体比较均匀, 位置二整体温度较高, 位置三整体温度偏低.



位置一



位置二

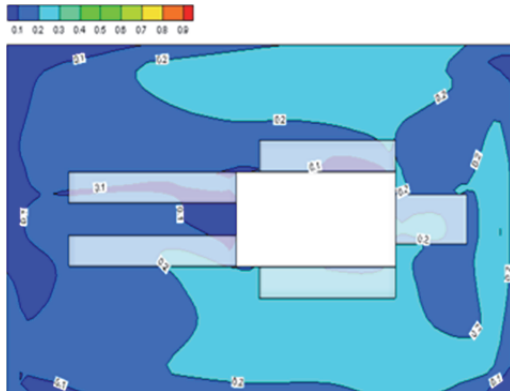


位置三

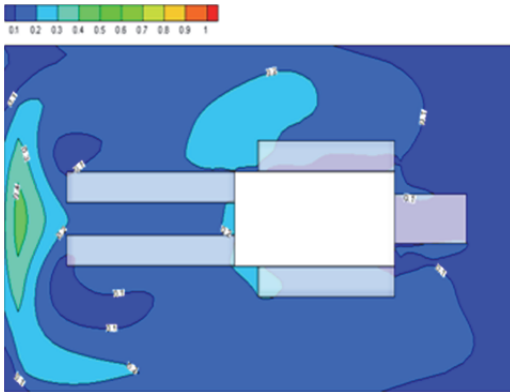
图4 $Y=0.2\text{m}$ 切面的温度分布Fig.4 The temperature distribution of section $Y=0.2\text{m}$

2.1.2 不同风口布置速度场对比

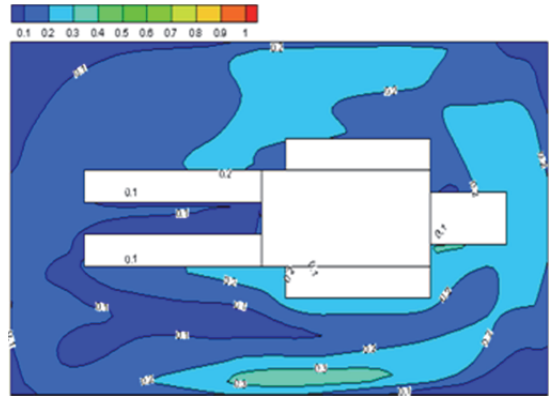
由图5可以得知,射流沿顶板从送风口水平送出后产生贴附效果,与侧墙发生撞击后继续沿壁面向下运动,到达底部后发生第二次撞击,在底部形成了速度均匀的空气湖。气流流动过程经历两次撞击,消耗了流体动能,降低了风速。其中风口处于位置一和位置二时速度分布比较相似,整体速度约为 0.2 m/s ,能够保证送风的舒适性,不易产生吹风感,处于位置三时温度分布均匀性较差,可能是因为房间宽度较小,射流撞击壁面后发生紊乱,贴附壁面效果较差引起的。



位置一



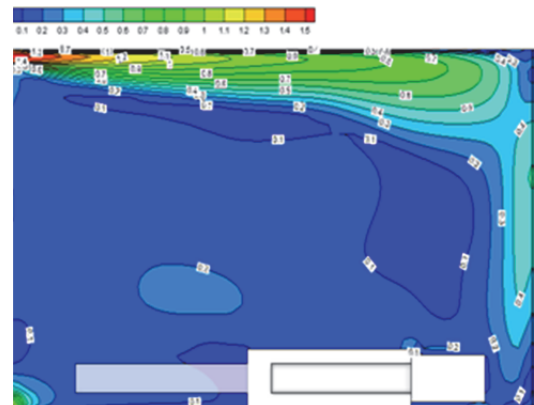
位置二



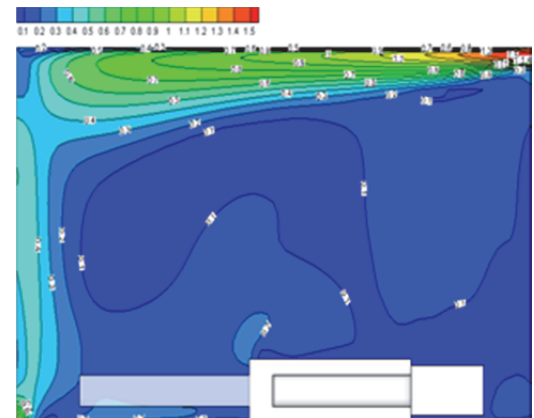
位置三

图5 $Y=0.2\text{m}$ 切面的速度分布图Fig.5 The velocity distribution of section $Y=0.2\text{m}$

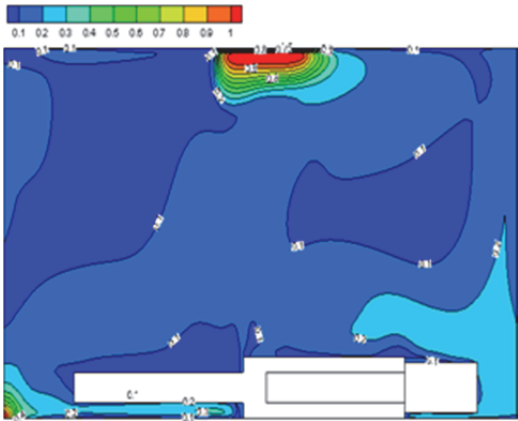
由图6可以看出,三种情况速度分布规律比较相似,在贴近顶板处,速度产生了明显的分层现象。人体休息区速度分布较均匀,没有产生大的速度梯度,射流主体周围的气流速度接近 0.1 m/s ,不超过 0.2 m/s ,既能够将冷/热量有效地送到空气湖区,又不会产生吹风感。在房间西侧角落出现小面积的温度不均匀分布,对空气湖区速度场分布影响较小。



位置一



位置二



位置三

图 6 Z=0.55m 切面的速度分布

Fig.6 The velocity distribution of section Z=0.55m

3 不同风口布置方案的评价

由于胶囊旅馆的特殊性, 需要采用一定的指标对“胶囊”内不同风口布置方案的设计效果进行合理的评价. 针对不同的风口布置情况, 采用不均匀系数、投入能量利用系数和空气龄值对“胶囊”内的气流组织进行评价. 选取人员休息区, 人体口鼻位置所在高度 $Y=0.2\text{ m}$ 切面, 人体左臂、躯干中心、右臂所在三条轴线($Z=0.3\text{ m}$, $Z=0.55\text{ m}$, $Z=0.8\text{ m}$) 上均匀分布的共 21 个点作为测点.

3.1 不均匀系数

对于“胶囊”内温度及速度分布的均匀性, 采用温度不均匀系数和速度不均匀系数来评价, 定义式如下^[15]:

$$K_t = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2}}{\bar{t}} \tag{1}$$

$$K_v = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (u_i - \bar{u})^2}}{\bar{u}} \tag{2}$$

式中: n 为测点数目, t_i 为测点温度, u_i 为测点速度, \bar{t} 为测点平均温度, \bar{u} 为测点平均速度. 计算结果见表 1.

表 1 人员休息区的温度和速度不均匀系数
Tab.1 temperature and velocity nonuniform coefficient in personal resting area

人员休息区的温度和速度不均匀系数			
送风方案	位置一	位置二	位置三
温度不均匀系数	0.056	0.062	0.068
速度不均匀系数	0.493	0.524	0.568

由表 1 可知, 风口处于位置一时, 温度不均匀系数和速度不均匀系数最低, 即“胶囊”内人员活动区的温度和速度均匀性最好, 能保证较好的舒适

度; 处于位置三时, 温度不均匀系数和速度不均匀系数最高. 可见风口位置的改变对室内气流组织温度和速度均匀性方面有很大的影响.

3.2 投入能量利用系数

对于空调送风排除工作区余热来说, 空间内冷负荷相对稳定, 主要采用稳态通风效率评价通风的排除余热性能, 此时通风效率又可称为投入能量利用系数, 定义式如下^[16]:

$$E = \frac{t_e - t_0}{t_n - t_0} \tag{3}$$

式中: t_e 为排风温度, t_0 为送风温度, t_n 为工作区平均温度. 计算结果见表 2.

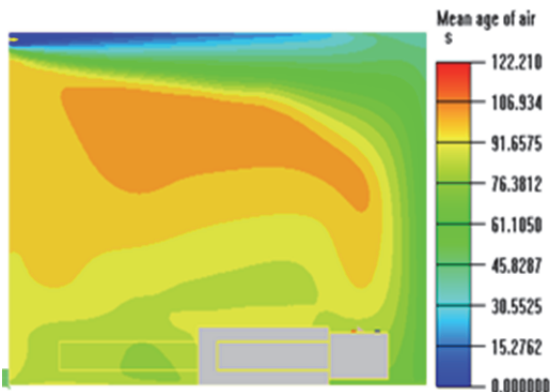
表 2 人员休息区的投入能量系数
Tab.2 The energy utilization coefficient in personel resting area

人员休息区的投入能量利用系数			
送风方案	位置一	位置一	位置一
通风效率	1.174	1.153	1.138

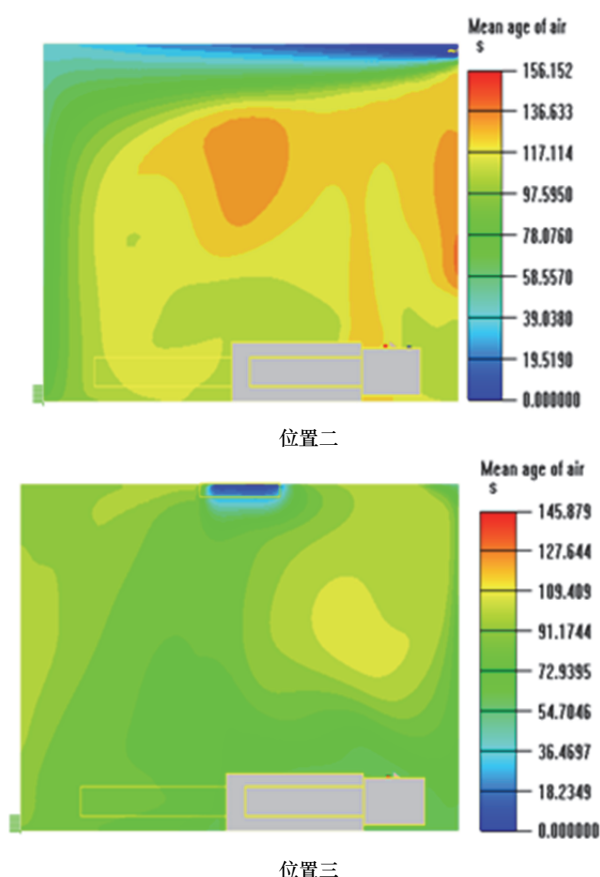
由表 2 可以看出, 风口处于位置一时, 投入能量利用系数最高, 说明“胶囊”内的冷量得到了充分利用, 人员休息区的余热排除的最快, 最为节能; 处于位置三时, 投入能量利用系数最低, 说明部分冷量未得到充分利用而被排走, 排除余热能力最小; 此外, 三种风口布置方案的投入能量利用系数均接近于 1, 说明风口位置对投入能量利用系数的影响不大.

3.3 空气龄值

由图 7 可知, 空气龄与速度场分布规律相似, 在贴近顶板及侧壁方向, 气流速度大, 空气龄小, 人体休息区以及休息区上方速度小, 空气龄大. 经过计算, 风口处于位置一时人员休息区空气龄在 122 s 以内, 空气更新速度最快, 能够满足人体对新风量的需求. 处于位置二时在 156 s 以内, 处于位置三时在 145 s 以内.



位置一

图7 $Z=0.55\text{m}$ 切面的空气龄分布Fig.7 Mean age of air distribution of section $Z=0.55\text{m}$

综上所述,通过对“胶囊”内温度和速度不均匀系数、投入能量利用系数以及空气龄值进行比较,可以得出风口处于位置一时,温度及速度不均匀系数最小,投入能量利用系数最高且人员休息区的空气龄值分布较均匀且较小,为最佳送风位置。

4. 结论

(1) 采用室内零方程湍流模型,通过变化送风口的位置,对小微空间内的气流组织进行了数值模拟,得到温度场和速度场分布并进行分析,发现送风口的位置对小微空间气流组织有较大的影响。

(2) 根据不均匀系数、投入能量利用系数和空气龄值评价指标,对“胶囊”内的气流组织效果进行评价,得到最佳风口位置为第一种布置方式。

(3) 对于小微空间,改变送风口位置,对不均匀系数影响较大,对投入能量利用系数的影响不大。

(4) 以“胶囊”旅馆为例,对空间气流组织的有效性进行研究,可以对此类小微空间的通风空调气流组织的优化与工程设计起到一定的借鉴意义。

参考文献 References

[1] 姚润明, 陈启高, 李百战, 等. 通风降温建筑室内热环

境模拟与热舒适研究[J]. 暖通空调, 1999, 27(6): 5-9.

YAO Runming, CHEN Qigao, LI Baizhan, et al. Indoor thermal environment simulation and thermal comfort study in aeration cooling building[J]. Journal of HV & AC, 1999, 27(6): 5-9.

[2] 李强民. 置换通风原理、设计及应用[J]. 暖通空调, 2000, 30(5): 41-46.

LI Qiangmin. Displacement ventilation principle, design and application[J]. Journal of HV & AC, 2000, 30(5): 41-46.

[3] 马仁民. 通风的有效性室内空气质量[J]. 暖通空调, 2000, 30(5): 20-23.

MA Renmin. The effectiveness of ventilation and indoor air quality[J]. Journal of HV & AC, 2000, 30(5): 20-23.

[4] 袁丽丽, 刘斌. 不同通风方式下室内空气品质的研究[J]. 暖通空调, 2010, 40(1): 1-3.

YUAN Lili, LIU Bin. Study on indoor air quality under different ventilation system[J]. Journal of HV & AC, 2010, 40(1): 1-3.

[5] 陆佩强. 置换通风系统室内温度分布的实验研究[J]. 暖通空调, 2009, 39(4): 99-103.

LU Peiqiang. Experimental study of indoor temperature distribution of displacement ventilation system [J]. Journal of HV & AC, 2009, 39(4): 99-103.

[6] SV 帕坦卡. 传热与流体流动的数值计算[M]. 张政译, 北京: 科学出版社, 1984: 13-18.

PATANKAR S. V. Numerical heat transfer and fluid flow[M]. ZHANG Zheng, translated, Beijing: Science press, 1984: 13-18.

[7] CHEN Q Y, XU W R. A zero-equation turbulence model for indoor airflow simulation[J]. Energy and Building, 1998, 28(2): 137-144.

[8] JELENA S, CHEN Q Y. Validation of zero equation turbulence model for complex indoor airflow simulation[J]. ASHRAE Trans, 1999(105): 414-427.

[9] 陈晓春, 朱颖心, 王元. 零方程模型用于空调通风房间气流组织数值模拟的研究[J]. 暖通空调, 2006, 36(8): 19-24.

CHEN Xiaochun, ZHU Yingxin, WANG Yuan. Study on air distribution numerical simulation using zero equation model of ventilation room[J]. Journal of HV & AC, 2006, 36(8): 19-24.

[10] 赵彬, 李先庭, 彦启森. 用零方程湍流模型模拟通风空调室内的空气流动[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2001, 41(10): 109-113.

ZHAO Bin, LI Xianting, YAN Qisen. Airflow simulation used zero equation turbulence model of ventilation room. [J]. Journal of Tsinghua University (Natural Science Edition), 2001, 41(10): 109-113.

[11] 狄育慧, 王善聪. 利用 Airpak 模拟室内气流组织的误差分析[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2013, 45(1): 73-78.

DI Yuhui, WANG Shancong. Error analysis of indoor air distribution using airpak simulation [J]. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2013, 45(1): 73-78.

[12] YUAN Xiaoxiong, CHEN Qingyan, GLICKSMAN Leon R. Measurements and computations of room airflow with displacement ventilation[J]. ASHRAE Transaction: 1999,

- 105 (1):340-352.
- [13] 采暖通风与空气调节设计规范: GB50019-2003[S].北京:中国计划出版社, 2004.
Code for design of heating ventilation and air conditioning: GB50019-2003. [S]. Beijing: China Planning Press, 2004
- [14] Ergonomics of the thermal environment - Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal: ISO 7730:2005. [S]. Switzerland: Geneva, International Organization for Standardization, 2005.
- [15] Thermal environmental conditions for human occupancy: ANSI/ASHRAE Standard 55-2004. [S]. USA: Atlanta, American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, Inc., 2004.
- [16] ZHAO HZ, ZHAO L. Temperature efficiency of rooms with displacement ventilation [J]. ASHRAE Trans 2001; 107(1): 64-70.
- (编辑 沈波)

(上接第94页)

参考文献 References

- [1] 李玲, 王伟, 陈以一. 连续性倒塌工况下钢管柱框架节点的破坏模式与鲁棒性[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(4): 9-15.
LI Ling, WANG Wei, CHEN Yiyi. Failure modes and robustness of beam-to-column joints for steel tubular frame resisting progressive collapse[J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(4): 9-15.
- [2] YANG B, TAN KH. Robustness of bolted-angle connections against progressive collapse: Experimental tests of beam-column joints and development of component-based models[J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 2013, 139(9): 1498-1514.
- [3] GUO LH, GAO S, FU F, et al. Experimental study and numerical analysis of progressive collapse resistance of composite frames[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2013, 89: 236-251.
- [4] KANDIL KS, ELLOBODY EA, ELDEHEMY H. Progressive Collapse of Steel Frames[J]. World Journal of Engineering and Technology, 2013, (1): 39-48.
- [5] 何政. 框架结构悬连线效应研究新进展[J]. 力学进展, 2012, 42(5): 547-561.
HE Zheng. Progress in studies of catenary action in frame structures[J]. Advances in Mechanics, 2012, 42(5): 547-561.
- [6] 霍静思, 王宁, 陈英. 钢框架焊接梁柱节点子结构抗倒塌性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(4): 100-108.
HUO Jingsi, WANG Ning, CHEN Ying. Experimental study on collapse resistance of welded beam-column connection substructure of steel frame based on seismic design[J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(4): 100-108.
- [7] YANG B, TAN KH. Experimental tests of different types of bolted steel beam-column joints under a central-column-removal scenario[J]. Engineering Structures, 2013, 54(9): 112-130.
- [8] GSA 2003. Progressive collapse analysis and design guidelines for new federal office buildings and major modernization projects[S]. Washington, D.C.: United States General Services Administration, 2003.
- [9] YANG B, TAN KH. Numerical analyses of steel beam-column joints subjected to catenary action[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2012, 70(3): 1-11.
- [10] AZIZINAMINI A, RADZIMINSKI J. Static and cyclic performance of semi-rigid steel beam-to-column connection[J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1989, 115(12): 2979-2999.
- [11] 陈惠发. 钢框架稳定设计 [M]. 周绥平译, 上海: 世界图书出版公司, 1999.
CHEN Huifa. Stability design of steel frames [M]. ZHOU Suiping Translated. Shanghai: World Publishing Corporation, 1999.
- [12] Eurocode 3: design of steel structures, Part 1-8: design of joints: BS EN 1993-1-8: 2005. [S]. UK: British Standards Institution, 2005.
- [13] YANG B, TAN KH. Robustness of bolted-angle connections against progressive collapse: Mechanical modeling of bolted-angle connections under tension[J]. Engineering Structures, 2013, 57: 153-168.
- [14] YU HX, BURGESS IW, DAVISON JB, et al. Numerical simulation of bolted steel connections in fire using explicit dynamic analysis[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2008, 64: 515-525.
- [15] LOU YS, HUH H. Prediction of ductile fracture for advanced high strength steel with a new criterion: Experiments and simulation[J]. Journal of Material Processing Technology, 2013, 13(8): 1284-1302.
- (编辑 吴海西)