

人体运动对竖壁贴附通风气流组织影响的模拟及评价

李安桂, 曹雅蕊, 侯义存, 尹海国

(西安建筑科技大学 环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 人体运动对室内气流分布有直接而重要的影响。采用 CFD 方法对一种新型通风方式—竖壁贴附射流通风房间内人体运动进行了数值模拟分析与评价。采用动网格技术实现人体运动, 并将人体运动简化成长方体平移运动的形式。采用动态分层法更新体网格, 研究了人体不同运动速度对室内速度场的影响, 并对室内气流分布性能进行评价。发现人体运动速度越大, 其横向影响范围就越大, 而纵向影响范围一般在 2 m 以下。另外, 研究表明, 人体运动会影响室内人员的热舒适, 但短期运动的影响持续时间较短。

关键词: 竖壁贴附射流; 人体运动; 气流分布; CFD 数值模拟

中图分类号: TU834

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2017)06-0882-08

Numerical simulation and evaluation for influence of human motion on indoor air distribution under the condition of air curtain ventilation

LI Angui, CAO Yaru, HOU Yicun, YIN Haiguo

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

Abstract: Human movement has a direct and important influence on indoor air distribution. The CFD modeling is adopted to analyze and evaluate the characteristics of the human body movement under the condition of air curtain ventilation, a new ventilation way. Human movement can be simplified into a cuboid translational motion realized by dynamic grid technique with the dynamic layering method updating grid. The paper studied variation of the indoor velocity field and evaluated indoor air distribution at different human movement speed. It shows that the greater human moving speed is, the larger horizontal sphere of influence becomes, whereas there is little influence on vertical sphere over 2 m. Additionally, human body-motion has an adverse effect on thermal comfort, and the influence of short-term movement has short duration.

Key words: air curtain ventilation; human motion; indoor flow field; CFD simulation

人的一生有超过 80% 的时间是在室内度过的, 保持一个舒适的室内环境可以使人精神愉快、精力充沛, 使人更富创造力, 提高工作效率^[1]。要使房间内人员工作区成为一个温湿度适宜、空气品质优良的环境, 需要有合理的气流分布。合理的气流组织形式是在消耗最少能源的基础上, 有效改善空气品质, 创建舒适的热湿环境, 同时能够有效消除吹风感, 不对称表面辐射温度等局部热不舒适性的影响^[2-3]。因此, 对通风空调的气流组织的研究就显得尤为重要。基于传统的混合通风和近代的置换通风两种气流组织的对比分析, 李安桂课题组近年来提出了竖壁贴附射流气流组织模式, 如图 1 所示。竖壁贴附射流气流组织在某种程度上

既有混合通风送风口容易布置、不占用工作区有效空间之优点, 又具备置换式通风室内空气品质高、能源消耗较小之优点^[4]。

室内气流分布受到多种因素的影响, 如: 房间的几何形状、送风口的几何形状和位置、排风口位置、送风参数、各种热源的位置分布和散热量及室内人员的活动等^[5]。

课题组前期通过数值模拟、可视化实验及 PIV 缩尺模型试验等对竖壁贴附射流模式送风口形式、送风口及排风口位置、送风参数、室内热源形式及分布等进行了一系列研究^[6-11]。本文在此基础上, 对运动人体影响下竖壁贴附射流模式进行动态数值模拟研究, 分析人体运动对竖壁贴附射流

模式气流分布的影响与评价。

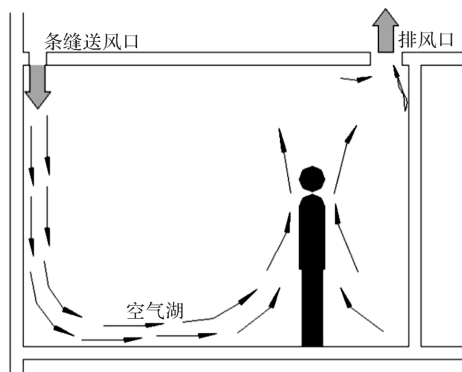


图1 竖壁贴附射流气流组织模式的示意图

Fig. 1 Air distribution of air curtain ventilation

1 数值计算模型建立及参数设定

1.1 物理模型

如图2所示,几何模型采用条缝型风口的竖壁贴附射流通风实验室模型。本模型房间尺寸为4 m(X)×2.6 m(Y)×4 m(Z),条缝型送风口尺寸为0.05 m×1 m,出风口尺寸为0.2 m×0.5 m。鉴于人体的运动方式及外形十分复杂,受网格质量和计算精度的限制,在模拟计算中很难完全准确的描述活动人员的外形细节及其复杂的运动方式,前人在研究中提出过数种简化方法。Edge^[12]研究发现手臂摆动对尾流的影响可以忽略不计,Mazumdar等^[13]对比三种简化模型(圆柱体、长方体和仿人形体),发现三种模型下运动对流场影响相差不大,特别是长方体与仿人形体结果非常接近,因此本文也采用长方体来模拟人体。根据文献[14]统计的人体尺寸均值,取人体尺寸为身高为1.7 m,身体厚度0.2 m,身体宽度0.3 m。采用结构化网格对几何模型进行划分,网格数为118.9万。为了提高计算精度,对送风口区域、竖壁贴附区、地面空气湖区以及动网格区域进行局部加密。

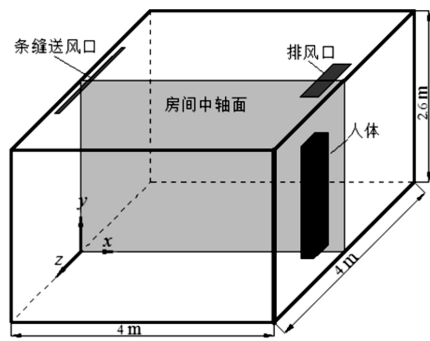


图2 人体简化及房间尺寸

Fig. 2 Model of simplified human body

1.2 数值模拟方法

本文采用有限体积法(Finite Volume Method, FVM)对物理模型进行离散,采用Fluent16.1商业软件对雷诺平均纳维-斯托克斯(Reynolds-Averaged Navier-Stokes, RANS)方程进行数值求解。求解器选用基于压力(Pressure Based)的隐式(Implicit)格式,对流项离散格式采用二阶迎风格式(Second Order Upwind),压力与速度耦合方式采用SIMPLE算法,密度随温度的变化采用Boussinesq假设。课题组前期对用于气流组织模拟的十余种湍流模型进行了筛选,对比分析后,得出剪切应力输运 $k-\omega$ (Shear-Stress Transport $k-\omega$, SST $k-\omega$)湍流模型能够有效预测竖壁贴附射流通风模式的流场分布^[4]。另外,Edge等^[12]对比多种湍流模型,发现SST $k-\omega$ 模型能更准确地预测逆压梯度下的边界层分离流动,更适用于动态模拟。所以本文选择SST $k-\omega$ 模型模拟湍流的影响。

为了实现人体的运动,网格必须要进行更新,所以本文使用动网格模拟方法。为了节省计算空间和时间,整个计算域被区分为两个部分,动网格区域和静网格区域。两个区域之间采用interface边界传递流场参数。在动网格区域,采用动态层模型实现网格更新。模型方程如下。

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \int_V \rho \phi dV + \int_{\partial V} \rho \phi (u - u_s) dA \\ = \int_{\partial V} \Gamma_{\phi} \nabla_{\phi} dA + \int_V S_{\phi} dV \end{aligned} \quad (1)$$

式中: ρ 是流体的密度, u 是流体的速度矢量, u_s 是动网格的网格变形速度, Γ 是扩散系数, S_{ϕ} 是通量的源项, ∂V 代表控制体 V 的边界。

1.3 工况设定

模拟工况和边界条件见表1。人体分别以慢速0.9 m/s、常速1.2 m/s、快速1.8 m/s(人员在办公室内经常表现的三种速度^[15])沿着风口中轴面逆风匀速平移,每个工况移动距离均为2.7 m。考虑到人体热羽流效应,定义人体为热源,人体不同运动速度下散热量的选取依据建筑环境学^[16]人体在不同活动强度条件下的代谢率,其中静止站立时取70 W/m²。根据文献[4]关于竖壁贴附射流模式设计方案确定送风速度为1 m/s、温度为17℃,边界类型选用速度入口 Velocity-inlet,出风口边界类型为自由出流 Outflow。在民用建筑中,建筑容积热强度大致在 $qv=5\sim 15$ W/m³^[17],本文选择15 W/m³,热源均匀分布在地面,热流密度为30 W/m²。

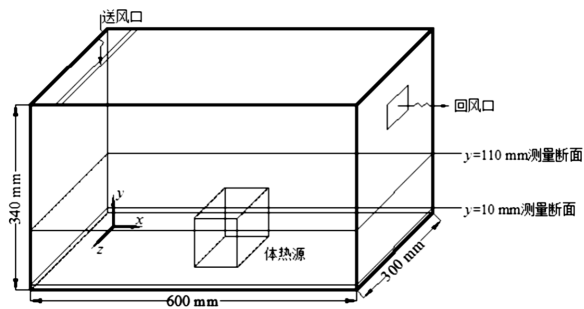
表 1 数值模拟工况及边界条件

Tab. 1 Cases of numerical simulation and boundary conditions

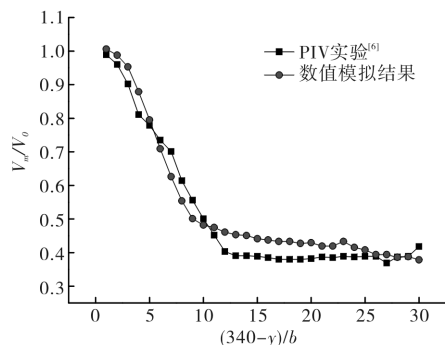
工况	人体散热量/ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	送风温度 $t_0/^\circ\text{C}$	送风速度 $V_0/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	人体移动速度 $V/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	人体运动路径
1	115			0.9	
2	150	17	1	1.2	$x=3.6\text{ m} \rightarrow x=0.9\text{ m}$
3	220			1.8	

2 模型试验验证

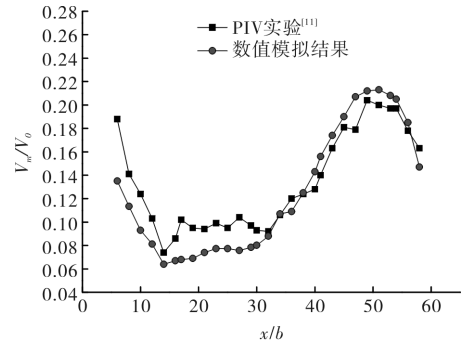
为了验证数值模型的准确性,选择了崔巍峰^[11]热源影响下竖壁贴附射流通风模式 2DPIV 实验.图 3(a)为该实验的几何模型,条形送风口长 300 mm,宽度 10 mm,风口中心距竖壁 50 mm.体热源大小为:高 90 mm,长 80 mm,宽 80 mm.本文选用该实验的两个工况进行模拟验证,对几何模型划分 43.4 万网格并选用 SST $k-\omega$ 湍流模型.图 3(b)为送风速度 $V_0=1.5\text{ m/s}$,热源强度 $Q=1\text{ W}$ 时竖壁区无因次轴线速度分布对比图,图 3(c)为送风速度 $V_0=1\text{ m/s}$,热源强度 $Q=1\text{ W}$ 时 $y=110\text{ mm}$ 空气湖区无因次速度分布对比图.发现数值模拟下速度分布与 PIV 实验非常相似,虽然数值上会有一些差别,但差别较小,考虑到实验误差等因素的存在,所以有理由认为该数值模型能够有效预测热源影响下竖壁贴附射流通风效果.



(a) PIV实验几何模型^[11]



(b) $V_0=1.5\text{ m/s}$ $Q=1\text{ W}$ 时竖壁区无因次轴线速度分布对比



(c) $V_0=1\text{ m/s}$ $Q=110\text{ mm}$ 空气湖区无因次速度分布对比

图 3 PIV 实验模及模型验证

Fig. 3 Geometrical model of PIV and its validation

3 模拟结果分析

为了方便对比不同运动速度对流场的影响,定义无量纲时间 $T=t/(S/V)$, 其中 t 为人体运动时间, s; $S=2.7\text{ m}$ 为总运动距离; V 为运动速度, m/s.

3.1 人体运动对室内流场的影响

3.1.1 人体运动引起的速度场变化

图 4 显示了人体以正常行走速度 1.2 m/s 在室内运动时风口中轴面速度场的变化.人体运动前,竖向贴附区射流主体周围环境空气流速低于 0.2 m/s ,送风能够将新鲜空气和冷/热量有效的送到空气湖区;水平向空气湖区方面,射流主体速度衰减主要发生在地面 0.2 m 高度内,其余区域速度分布均匀,均在 0.2 m/s 以下,形成空气湖区速度分布.此时,人体可视为静态的障碍物,空气湖区气流与其碰撞,形成明显的漩涡,但漩涡处于 0.5 m 以下,不会对人体呼吸区造成影响.由于热羽流效应,人体周围微小环境内产生了较大的气流速度,而且,随着与地面距离的增加,热羽流的影响随之增加,在头顶热羽流速度达到 0.3 m/s .人体开始运动后,人体尾流速度显著增加,最大速度达到 2.6 m/s 左右,大概是人体运动速度的两倍,而贴近人体的气流速度为 1.2 m/s ,与人体运动速度几乎相同.随着运动距离的增加,人体尾流影响范围随之扩大,最大影响范围为

1.5 m左右,而人体对其前方的影响范围几乎不变,大概为0.6 m,另外人体运动引起风速变化的区域仅限于工作区高度内,2 m以上高度的空间内,风速几乎不受影响.人体运动时,其前面空气被挤压,压力增加,而后面压力减小促使头顶形成了一个球形逆时针漩涡,随着人体运动时间的增加,这个漩涡不断的向下延伸,影响范围也随之增大,当人体运动2.25 s时,整个面都受到了影响.但是当人体停止运动后,房间工作区的气流速度在4 s内迅速恢复至0.2 m/s,这意味着人体运动对室内气流速度的影响并不会持续太久.

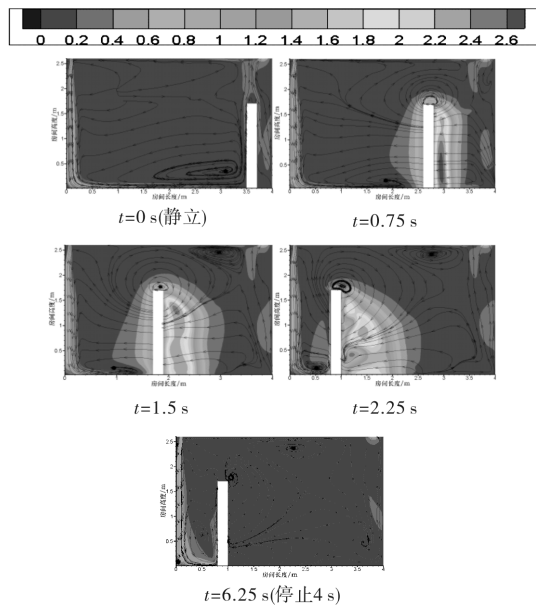


图4 人体以1.2 m/s逆风运动时速度场变化($z=0$ m平面)

Fig. 4 Variation of velocity distribution ($z=0$ m plane)

3.1.2 人体运动对速度场的影响范围

图5显示了不同运动速度下与运动路径不同横向距离处风速随时间的变化情况($x=2.6$ m, $y=0.5$ m水平线上).明显可以看出同一位置处运动速度越大引起的风速变化就越大.另外对比四个图,发现随着与运动路径横向距离的增大,此处风速波动程度迅速减小.横向距离为1 m处只有在运动速度达到1.8 m/s时引起的最大风速将近为0.2 m/s(人体舒适风速).横向距离为1.5 m处三种运动速度下风速变化都非常小,不足0.1 m/s.对比发现,人体在室内运动速度为1.8 m/s时,其横向影响距离在1 m范围内;运动速度为1.2 m/s时,其横向影响距离在0.6 m范围内;而运动速度为0.9 m/s时,其横向影响距离小于0.6 m.所以人在室内最好保持低速行走,以免影响周围人员的舒适度.另外,这一发现也为我们设计室内走

道宽度提供一定的依据.但是测点风速均在人体停止后5 s($T=2.67$)内恢复稳定,即短时间的人体运动造成的影响持续时间很短.

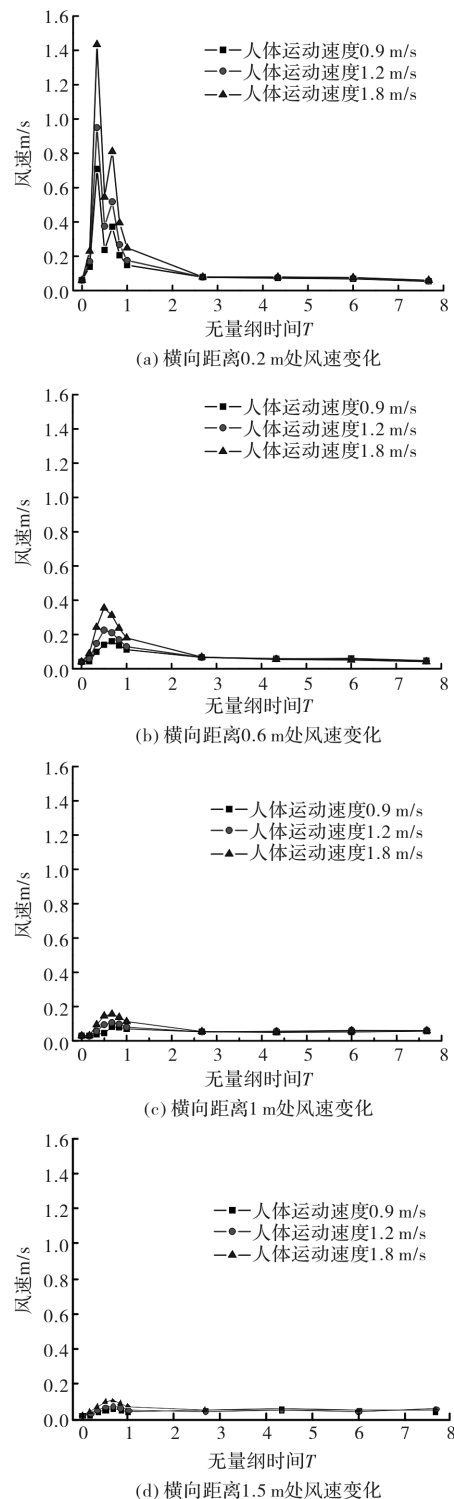
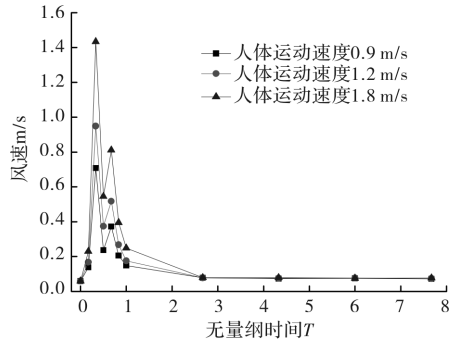


图5 与运动路径不同横向距离处风速变化

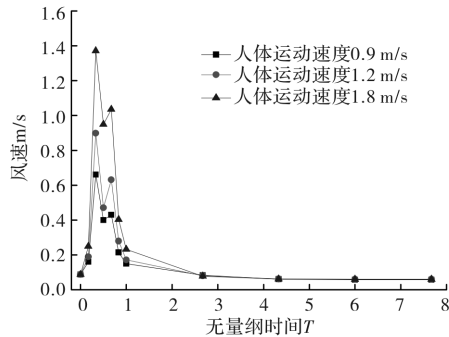
Fig. 5 Variation of velocity at different distance

图6显示了不同运动速度下不同高度处风速随时间的变化情况($x=2.6$ m, $z=0.2$ m竖直线上).单张图中明显可以看出同一位置处运动速度越大引起的风速变化就越大.另外对比四张图,发现同

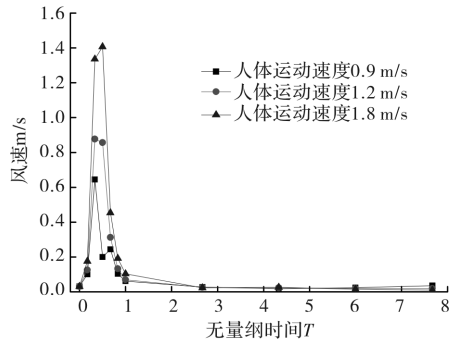
一运动速度在人体高度以下的三个位置处引起的风速大小几乎相同,且引起风速都很大.但在高度为 2 m 处,风速虽然有所变化,但变化值很小,只有运动速度为 1.8 m/s 时引起风速达到 0.2 m/s.所以当人体运动速度小于 1.8 m/s 时,其影响高度



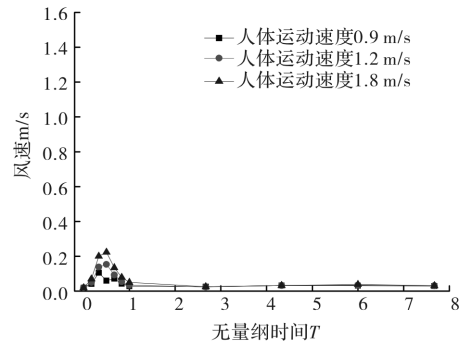
(a) 0.5 m 高度处风速变化



(b) 1 m 高度处风速变化



(c) 1.5 m 高度处风速变化



(d) 2 m 高度处风速变化

图 6 不同高度处风速变化

Fig. 6 Variation of velocity at different heights

在 2 m 以下.另外,人体高度以下的三个位置处,风速均在 5 s 内恢复稳定,而 2 m 高度处,在人体停止那一刻,风速就已经恢复到稳定状态.

3.2 气流分布性能评价

3.2.1 不均匀系数

为了研究人体运动对竖壁贴附射流通风房间工作区温度及速度分布均匀性的影响,采用温度不均匀系数和速度不均匀系数进行评价,其定义式如下:

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

$$K_v = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (u_i - \bar{u})^2}}{\bar{u}} \quad (3)$$

式中: n 为测点数, 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. K_t 、 K_v 的数值愈小,则气流分布的均匀性愈好.表 2、3 分别为不同运动速度下不同时刻工作区温度不均匀系数和速度不均匀系数.

表 2 温度不均匀系数

Tab. 2 Temperature nonuniform coefficient

无量纲时间 T	0.9 m/s	1.2 m/s	1.8 m/s	无量纲时间 T	0.9 m/s	1.2 m/s	1.8 m/s
0	0.017	0.017	0.017	2.67	0.019	0.021	0.022
0.33	0.017	0.017	0.017	4.33	0.018	0.019	0.021
0.67	0.017	0.017	0.018	6	0.016	0.017	0.019
1	0.018	0.018	0.018				

表 3 速度不均匀系数

Tab. 3 Velocity nonuniform coefficient

无量纲时间 T	0.9 m/s	1.2 m/s	1.8 m/s	无量纲时间 T	0.9 m/s	1.2 m/s	1.8 m/s
0	0.639	0.639	0.639	2.67	0.643	0.727	0.783
0.33	1.534	1.661	1.802	4.33	0.582	0.674	0.711
0.67	1.302	1.442	1.561	6	0.524	0.643	0.679
1	1.455	1.489	1.441				

由表 2 可知, 人体运动过程中, 温度不均匀系数变化很小. 另外, 由于人体运动速度的不同导致的温度不均匀系数差异也很小. 这说明短期内的人体运动对温度分布均匀性影响很小. 人体运动前后, 竖壁贴附射流通风房间工作区温度分布均匀性很好, 能够满足工作区人员热舒适的要求.

由表 3 可知, 人体运动过程中, 速度不均匀系数有很大的变化, 且人体运动速度越大, 导致速度不均匀系数就越大. 这说明人体的运动会扰乱室内速度分布的均匀性, 给室内人员造成一定程度的不舒适, 但是短期运动对室内速度分布均匀性的影响持续时间很短, 在 $T=6$ (人体运动后停止 15 s) 时基本上就能恢复到最初水平.

3.2.2 空气分布特性指标(ADPI)

考虑空气温度与风速对人体的综合作用, 当 $T_{EDT}=-1.7\sim+1.1$, 多数的人感觉舒适. 空气分布特性指标(ADPI)定义为满足规定风速和温度要

求的测点数与总测点数之比. 本文在得出室内速度场和温度场的基础上, 对人体运动过程中室内测点进行了 ADPI 计算, 其计算公式如下:

$$T_{EDT}=(T_i-T_{ave})-7.66(u_i-0.15) \quad (4)$$

$$A_{DPI}=\frac{-1.7<T_{EDT}<1.1 \text{ 的测点数}}{\text{总测点数}}\times 100\% \quad (5)$$

式中: T_{EDT} 有效温度差, T_i 为测点温度, T_{ave} 为工作区空气平均温度, u_i 为测点速度, 一般要求 $ADPI\geq 80\%$.

表 4 显示了不同运动速度过程中室内空气分布特性指标变化值. 人体运动前房间内 ADPI 达到 82.5%, 说明竖壁贴附射流通风模式能满足舒适性要求. 人体运动过程中, ADPI 有一定的波动, 某些时刻小于 80%, 对人体舒适度造成一定的影响. 但是当 $T=11$ (人体停止 30 s) 时, 三种运动速度下室内空气分布特性指标都已上升至 80% 以上. 另外, 人体运动过程中, 运动速度不同对 ADPI 的变化并没有影响.

表 4 空气分布特性指标 ADPI
Tab. 4 Air diffusion performance index

无量纲时间 T	0.9 m/s	1.2 m/s	1.8 m/s	无量纲时间 T	0.9 m/s	1.2 m/s	1.8 m/s
0	82.50%	82.50%	82.50%	4.33	71.30%	75.00%	80.00%
0.33	66.30%	71.25%	71.30%	6	80.00%	76.25%	81.30%
0.67	81.30%	83.75%	80.00%	11	85.00%	88.75%	90.00%
1	75.00%	76.25%	73.80%	16	85.00%	83.75%	83.80%
2.67	65.00%	72.50%	78.80%				

3.2.3 能量利用系数(η)

考虑人体运动过程竖壁贴附射流通风模式气流分布的能量利用有效性, 用能量利用系数 η 对其进行评价. 能量利用系数也称为温度效率(Temperature Efficiency), 其定义为

$$\eta=\frac{T_{out}-T_{in}}{T_{ave}-T_{in}} \quad (6)$$

式中: T_{out} , T_{ave} , T_{in} 分别为排风温度, 工作区空气平均温度和送风温度. 表 5 显示了不同运动速度

过程中室内能量利用系数变化值. 由表可知, 人体运动前房间内能量利用系数达到 1.228, 说明竖壁贴附射流通风模式符合下送风的效果. 人体运动过程中能量利用系数有所降低, 最大降低率为 14.4%, 但当 $T=16$ (人体停止 45 s) 时, 能量利用系数已经基本恢复, 仅比运动前降低了 6%. 但是整个过程能量利用系数均大于 1, 仍然比传统混合式送风大.

表 5 能量利用系数
Tab. 5 The coefficient of energy using

无量纲时间 T	0.9 m/s	1.2 m/s	1.8 m/s	无量纲时间 T	0.9 m/s	1.2 m/s	1.8 m/s
0	1.228	1.228	1.228	4.33	1.060	1.056	1.055
0.33	1.188	1.189	1.19	6	1.051	1.167	1.044
0.67	1.173	1.18	1.185	11	1.113	1.108	1.108
1	1.159	1.168	1.177	16	1.154	1.154	1.167
2.67	1.084	1.081	1.205				

3.2.4 吹风感不满意率(PD)

Fanger 等人将湍流强度表征为气流湍动变量, 总结出因吹风感引起的不满意率(PD). ASHRAE55-2004^[3]规定由于风感引起的吹风感不满意率不应超过20%.

$$PD = [34 - (T_i - 273)](u_i - 0.005)^{0.62} (3.14 - 0.37u_i I_i) \times 100\% \quad (7)$$

式中: 为对应测点温度, K; u_i 为对应测点风速, m/s; I_i 为对应测点湍流强度, %。其中: 当 $u_i < 0.05$ m/s 时, 取 0.05 m/s; 当 $PD > 100\%$ 时, 取 100%。

对于竖壁贴附射流模式来说, 工作区人员吹风感主要由于射流主体轴线处较大的风速和较低的空气温度造成。而人体运动路径是沿着轴线速度相对较大的风口中轴面($Z=0$)。因此取 $Z=0$ 断面研究人体以不同速度运动时 PD 值分布情况, 见图7。发现人体运动会引起一定范围内的吹风感。运动速度越大, PD 值大于20%的范围就越大。运动速度为 0.2 m/s 时, 室内没有出现明显的吹风感,

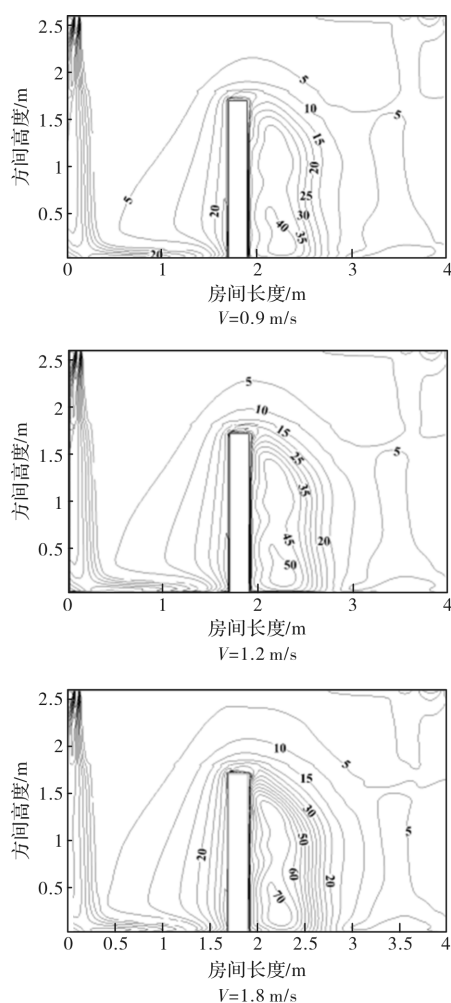


图7 吹风感不满意率(PD)

Fig.7 Percent dissatisfied

能达到人体舒适水平。当运动速度为 1.8 m/s 时, 引起的局部吹风感不满意率达到 70%, 有较强的吹风感, 人体后方 PD 值大于 20% 的范围约为 1 m。所以人体在室内快速运动会引起周围人员的吹风感, 使其感觉不舒适。

4 结论

本文对竖壁贴附射流通风房间内人体运动进行数值模拟分析。研究了人体运动对室内流场的影响范围, 并对人体运动情况下室内气流分布性能进行了评价。

(1)发现人体运动对竖壁贴附射流通风房间流场有显著影响, 在较短时间内一定程度上破坏了地面空气湖, 扰乱了室内流场。人体运动引起室内流场速度峰值达到其运动速度的 2 倍左右。但是, 在人体停止运动后 4 s 内流场可恢复至 0.2 m/s (人体舒适速度), 这意味着短期的人体运动对室内气流速度的影响并不会持续太久。

(2)运动速度越大引起的风速变化就越大。对于人体运动的横向影响, 发现随着与运动路径横向距离的增大, 风速变化程度迅速减小, 且人体运动速度越大, 其横向影响距离就越大。对于人体的纵向影响, 发现同一运动速度在人体高度以下的测点引起的风速大小几乎相同, 且引起风速均较大; 在高度为 2 m 处, 风速有微小变化, 人体运动的纵向影响一般在 2 m 范围内。人在室内的低速行走影响范围有限。

(3)对于不均匀系数, 发现人体运动对室内温度不均匀系数影响较小, 说明人体运动并不会破坏室内温度分布的均匀性; 但人体运动过程中, 速度不均匀系数有较大的变化, 且运动速度越大, 引起的速度不均匀系数就越大, 说明人体的运动会扰乱室内速度分布的均匀性。人体运动对 ADPI 造成一定的影响(一般小于 80%), 对人体舒适度造成一定的影响。人体在室内快速运动会引起周围人员的吹风感增加。另外, 能量利用系数也有所降低, 最大降低率为 14.4%。但是短期运动的影响均能在 1 min 之内恢复人体运动前状态。

特别指出, 本文的研究对象为中国成人, 对于老人、小孩等特殊群体运动产生的影响有待于进一步研究。

参考文献 References

- [1] 李百战. 室内热环境与人体热舒适[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2012.

- LI Baizhan. Indoor thermal environment and human thermal comfort[M]. Chongqing, Chongqing: University Press, 2012.
- [2] 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]. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, 2005.
- [3] Thermal environmental conditions for human occupancy; ANSI/ASHRAE Standard 55-2004[S]. Atlanta, USA; American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, Inc., 2004.
- [4] 尹海国. 条缝型送风口竖壁贴附射流气流组织设计方法研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2013.
YIN Haiguo. Study on design procedures of air distribution by air curtain ventilation with a linear slot diffuser[D]. Xi'an; Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2013.
- [5] ZHANG J S, CHRISTIANSON L L, RISKOWSKI G L. Regional airflow characteristics in a mechanically ventilated room under non-isothermal conditions[J]. ASHRAE Transactions, 1990, 96(1): 751-759.
- [6] 宋高举. 12种典型送风口射流流型可视化及紊流系数试验研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2005.
SONG Gaoju. Visualization of the airflow patterns of 12 typical diffusers and experimental investigation on the turbulent coefficient 2[D]. Xi'an; Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2005.
- [7] 张旺达. 竖壁贴附射流及其空气池现象的预测与可视化验证[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2005.
ZHANG Wangda. Prediction and vsualizing validation of downward directed vertical wall jets and air lake phenomena[D]. Xi'an; Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2005.
- [8] 张如春. 竖壁贴附射流空气池现象数值模拟[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2006.
ZHANG Ruchun. Numerical simulation of downward directed vertical wall jets and air lake phenomena[D]. Xi'an; Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2006.
- [9] 刘艳鹏. 竖壁贴附射流及其空气池现象的数值模拟[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2007.
LIU Yanpeng. Numerical simulation and approach of downward directed vertical wall jets and air lake phenomena[D]. Xi'an; Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2007.
- [10] 王国栋. 一种新型通风方式—非等温条件下条缝型送风口形成的竖壁贴附射流通风模式的 2DPIV 实验研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2009.
WANG Guodong. A new type of ventilation-2DPIV studies of air curtain ventilation in a slot-ventilated enclosure; Non-isothermal condition[D]. Xi'an; Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2009.
- [11] 崔巍峰. 一种新型通风方式—体热源影响下条缝型送风口形成的竖壁贴附射流通风模式 2DPIV 实验研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2010.
CUI Weifeng. A new type of ventilation -2DPIV studies of air curtain ventilation in a slot-ventilated outlet; Volumetric heat source condition[D]. Xi'an; Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2010.
- [12] EDGE B A, PATERSON E G, SETTLES G S. Computational study of the wake and contaminant transport of a walking human[J]. Journal of Fluids Engineering, 2005, 127(5): 967-977.
- [13] MAZUMDAR S, POUSSOU S B, LIN C H, et al. Impact of scaling and body movement on contaminant transport in airliner cabins[J]. Atmospheric Environment, 2011, 45(33): 6019-6028.
- [14] 章曲, 谷林. 人体工程学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2009.
ZHANG Qu, GU Lin. Ergonomics [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2009.
- [15] 韩亚丽, 王兴松. 人体行走下肢生物力学研究[J]. 中国科学: 技术科学, 2011, 41(5): 592-601.
HAN Yali, WANG Xingsong. Study on biomechanics of lower limbs of human body [J]. Chinese Journal of Science and Technology: Technical Science, 2011, 41(5): 592-601.
- [16] 朱颖心. 建筑环境学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
ZHU Yingxin. Built environment [M]. Beijing: China Architecture&Building Press, 2010.
- [17] 赵鸿佐. 室内热对流与通风[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
ZHAO Hongzuo. Indoor heat convection and ventilation[M]. Beijing: China Architecture&Building Press, 2010.

(编辑 吴海西)