



基于风速补偿的自然通风 房间热舒适性模拟研究

中国建筑科学研究院 赵 羽[☆] 袁东立

北京市市政工程设计研究总院 谢 飞

摘要 为获得自然通风条件下室内的热舒适评价方法,利用 Fluent 软件,根据杭州市典型室外气象参数确定边界条件,模拟居住建筑室外绕流场、室内通风场和温度场的分布规律;运用基于风速补偿的热适应性评价模型分析室内热舒适状况,并将此法与 PMV 模型结果对比,表明前者定义舒适的阈值较小,且正向偏离较大,后者则能较好反映自然通风房间的热环境。

关键词 自然通风 数值模拟 热舒适 热适应模型

Simulation of thermal comfort in natural ventilated rooms based on wind velocity compensation

By Zhao Yu[★], Yuan Dongli and Xie Fei

Abstract Determining the boundary conditions on the basis of typical outdoor climatic parameters in Hangzhou, simulates outdoor air flow field and indoor ventilation field and temperature field in residential buildings by means of the Fluent software to obtain a thermal comfort evaluation method for indoor natural ventilation. Analyses indoor thermal comfort by the thermal adaptability evaluation model based on wind velocity compensation. Comparing the evaluating result of the method with that of PMV model, the result indicates that the thermal comfort threshold value by the former is less and the forward deviation is larger, and the latter can better reflect the thermal environment in natural ventilated rooms.

Keywords natural ventilation, numerical simulation, thermal comfort, thermal adaptation model

★ China Academy of Building Research, Beijing, China

①

本文利用基于 CFD 模拟技术的 Fluent 软件,根据杭州市典型室外气象参数确定边界条件,模拟某住宅小区的室外绕流场、室内通风场和温度场的分布规律;运用基于风速补偿的热适应性评价模型分析室内热舒适状况,并将此法与 PMV 模型结果对比,给出自然通风建筑热舒适性评价方法的合理化建议。

1 研究对象

自然通风数值模拟,室外绕流场需要较大计算域,而室内气流运动则需要较小的网格划分。为了在满足工程精度的前提下提高运算速度,本文对室内外流场分别进行模拟。

1.1 室外绕流场

选取位于杭州市区的某居住小区,总平面图见图 1,总占地面积 2.7 万 m²,建筑面积 6.9 万 m²。共 12 栋住宅楼,均为 11 层。本文选择位于小区南部的 9 号楼(图中圆圈处)5 层 C1 户型作为研究对象,当夏季主导风向为南向时,该楼处于风场上游,受其他建筑物影响较小。

①[☆] 赵羽,女,1985 年 3 月生,硕士研究生,助理工程师
100013 北京北三环东路 30 号中国建筑科学研究院环能院
106 室
(010) 64517183
E-mail: zhaoyu0321@126.com
收稿日期:2011-09-26

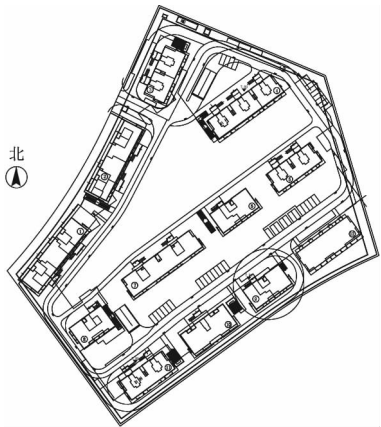


图1 小区总平面图

1.2 通风内场

该户型(见图2)套内面积124 m²,层高3.0 m,朝向北偏西40°;外墙体混凝土厚200 mm,双面抹灰,50 mm厚聚氨酯保温,传热系数为0.43 W/(m²·K);外窗为平开双层中空铝合金断桥窗,传热系数为2 W/(m²·K);假设地面顶棚与其他楼层间无热交换,各房间外窗全部开启,尺寸见表1。

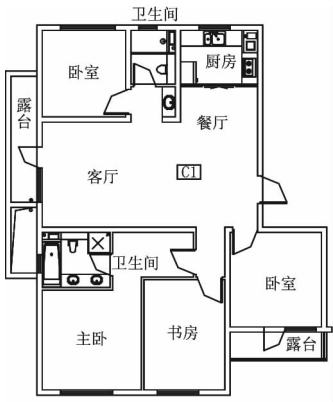


图2 户型图

表1 各房间外窗尺寸 mm×mm

所在位置	尺寸	所在位置	尺寸
主卧室	2 000×1 800	北次卧室	2 100×1 800
南次卧室	1 200×1 800	书房	1 600×1 800
客厅	1 300×1 800	主卫生间	700×1 350
次卫生间	700×1 350	厨房	1 200×1 350

2 自然通风数值模拟

2.1 数学模型

自然通风可视为不可压缩流体低湍流问题。本文采用较常用的K-ε双方程模型,控制方程包括连续性方程、动量方程、能量方程、湍流脉动动能K方程和湍流能量耗散ε方程。

2.2 网格划分

设室外绕流场的计算域为220 m×220 m×100 m的大空间,采用边长为3 m的结构化网格划分,共划分网格体61 633个。室内流场的计算域为该户内区域型,采用边长为0.15 m的结构化网格划分内墙,边长为0.3 m的结构化网格划分户型体,共划分网格体16 665个。

2.3 边界条件

室外绕流场入口边界条件主要是来流风速、风向等的确定。来流风速在近地层随高度有较大变化,遵循指数梯度变化函数^[1]:

$$v_h = v_{ref} \left(\frac{h}{h_{ref}} \right)^n \tag{1}$$

式中 v_h 为任意点的风速,m/s; v_{ref} 为气象台给出的参考高度处的风速,m/s; h 为任意点高度,m; h_{ref} 为参考高度,m,通常取10 m; n 为地面粗糙度,城市一般取0.4。根据以上函数关系运用Fluent编程,确定速度入口大小和方向。设出口为充分发展的自由出口边界。

室内流场的入口边界条件主要是来流风速、风向、环境温度、壁面温度等,本文均按其稳态进行模拟。将来流方向侧(南向)的外窗设为速度入口,大小和方向由外绕流场的模拟结果确定。西向和北向外窗为充分发展的自由出口边界。假设不考虑室内热扰对房间温度的影响,但考虑太阳辐射产生的墙壁的温升,作为定壁温边界,通过给定室外空气温度引入室外综合温度 t_z 的概念。

$$t_z = t_w + \frac{aJ}{\alpha_w} \tag{2}$$

式中 t_w 为室外空气计算温度,本文取30℃; a 为围护结构外表面面对太阳辐射的吸收系数,本文取0.5; J 为围护结构所在朝向日间太阳辐照度,参照相关标准^[2],取12:00各朝向辐照度; α_w 为围护结构外表面传热系数,本文取19 W/(m²·K)^[3]。

则本文研究户型的东、北外墙室外综合温度 t_z 为33.7℃,西、南外墙室外综合温度 t_z 为37℃。考虑太阳辐射使地板吸热升温,其得热量 q_1 为^[2]

$$q_1 = 0.889 S_c IF \tag{3}$$

式中 S_c 为玻璃遮阳系数,取为0.6; I 为太阳辐照度; F 为各向玻璃窗的有效面积。

将待模拟户型参数代入式(3),则各向总辐照

量为 2 000 W,折合到单位面积地面的热流密度为 16 W/m²。

2.4 模拟结果

当 v_{ref} 取 2 m/s、风向正南时,5 层所在高度 14 m 处的室外绕流风速场如图 3 所示,整个小区风速均在 1~3 m/s 的范围内,不会产生不适的吹风感。

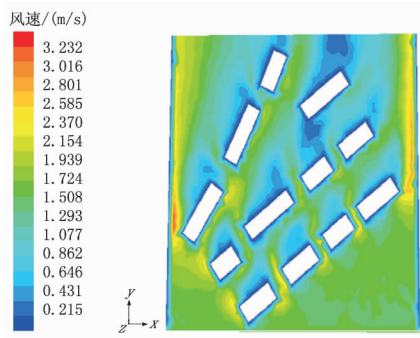


图 3 外绕流场速度分布图

根据上述边界条件的设定,窗口处风速为 1.6 m/s,该户型内人体主要活动区高度($z=1.4\text{ m}$)的风速场见图 4。

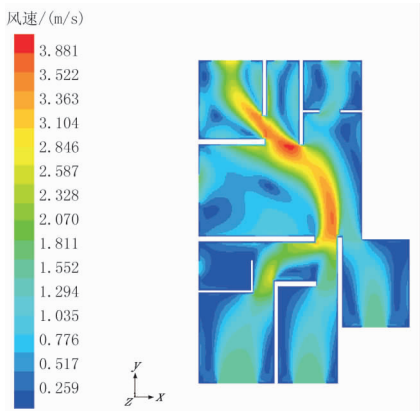


图 4 室内通风场速度分布图

模拟结果表明,大部分区域风速小于 2 m/s,客厅中部最大风速接近 3.9 m/s,人会有不适的吹风感。但值得一提的是,自然通风与空调房间不同之处在于,来流风温度与皮肤表面温度接近,相比同风速的空调低温送风更舒适;同时,自然风还能加大气流扰动以增强人体对流换热,提高了人体的热舒适。

在室外空气温度 30 ℃、考虑太阳辐射对外壁面和地面温度的影响后,模拟该户型温度场,各房间各测点温度见表 2。

表 2 各房间各测点温度			℃
	离地面高度/m		
	0.5	1.5	2.5
北次卧室	30.4	30.3	30.2
客厅	30.2	30.3	30.2
主卧室	30.9	30.5	30.4
卫生间	30.6	30.5	30.2
厨房	30.4	30.3	30.2
书房	30.8	30.5	30.3
南次卧室	30.8	30.4	30.3

引起房间内水平方向温度梯度的主要原因是外围护结构和太阳辐射透过外窗的得热量,浮力是形成竖直温度梯度的原因。由表 2 可见,在不考虑室内热源的情况下,自然通风房间室内外温差并不大,房间内温度分布较均匀,温度梯度不大于 1 ℃。

3 热舒适评价

3.1 热舒适模型的发展

国内外关于热舒适评价的方法很多,目前应用最广泛的是 Fanger 教授提出的人体热舒适模型,即 PMV 模型^[4]。

该模型综合了 4 个环境变量和 2 个人为因素,是迄今为止最为全面的评价热环境的指标。但由于该模型是在基于暖体假人的稳态环境中建立的,没有考虑人自身的热适应行为,也没有充分考虑室外气候的影响。因此该模型在自然通风建筑中应用时有较大误差。夏一哉等人的研究表明,夏季北京居民在自然通风环境中的可接受空气温度高达 30 ℃,而开启空调后可接受温度最高为 27 ℃^[5]。这说明空调建筑中人的心理期望较高,因此,应考虑在不同外部环境中人的心理调节功能。

de Dear 等人认为用户对温度的期望,进而对室内舒适度的期望会随室外温度的改变而改变^[6],其利用 ASHRAE RP-884 数据库建立了自然通风建筑中热中性温度和室外月平均温度的关系,即热适应热舒适模型。文献^[7]对我国 5 个气候地区典型城市进行了冬、夏季现场测试和问卷调查,用线性回归法得出的线性关系式为

$$t_c = 19.7 + 0.30t_o \tag{4}$$

式中 t_c 为热中性温度; t_o 为室外温度舒适性阈值,为中性温度 $\pm 2\text{ }^\circ\text{C}$ 。

热适应模型的观点提出后得到了不少学者的支持,并逐渐发展成为一个较为独立的学派。但同时也有不少学者并不认可,如 Fanger 教授认为热

适应模型中唯一的变量是对人体热平衡没有直接影响的室外温度,而对人体热平衡有明显影响的室内温度、湿度并没有考虑,因此在机理上较难站住脚。国内外已有许多研究者就风速对温度的补偿作用作了大量实验,根据嵇贇喆等人的实验结论:在夏季,相对湿度每增加 10%,相当于室温升高 0.4℃,风速每增加 0.15 m/s,相当于温度降低 0.55℃^[8],本文以热中性温度和相对湿度 60%作为临界点,确定补偿风速计算式为

$$v_c = \frac{0.15}{0.55} \left[(t_a - t_c) + \frac{0.4}{10\%} (\varphi - 60\%) \right] \quad (5)$$

式中 v_c 为补偿风速, m/s; t_a 为室内实际温度,℃; φ 为室内实际相对湿度。

当计算出的补偿风速低于实际风速时,人体感觉偏热;反之,补偿风速高于实际风速时会有一定的凉爽感。

3.2 评价结果对比

本文取杭州最热月平均温度为 28.5℃,相对湿度 70%,代入式(4)得热中性温度 $t_c = 28.25℃$,不考虑室内散湿,即室内相对湿度 70%情况下,则可确定上述各房间内部补偿风速均在 0.6~0.75 m/s 之间。将补偿风速与之前模拟的实际风速进行对比,其速度差值的分布如图 5 所示,正值代表实际风速大于改善热舒适的补偿风速,主要集中在各房间正对窗口区域,人体热感不强烈,但风速过大会不适吹风感,如该户型客厅的中间过道处;负值代表实际风速小于改善热舒适的补偿风速,集中分布在各房间空气流通死角处,人感觉较热,可采用电风扇等局部通风手段提高风速,以加快人体热量的对流散失。

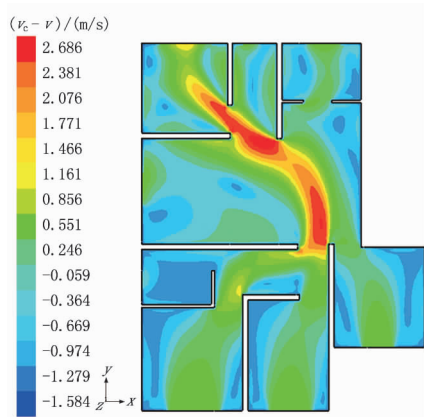


图5 补偿风速与实际风速差值分布

为了对比上述热适应性模型和 PMV 模型的评价结果,将以上工况代入 Fanger 的热舒适方程,其 7 个需确定参数为:新陈代谢率 70 W/m²,做功 0,相对湿度 70%,空气温度和流速为上文模拟值,辐射温度 31℃,服装热阻 0.65 clo。

PMV 分布如图 6 所示,该户型 PMV 值介于 -1.03~+2.83 之间,绿色和蓝色区域 PMV 值介于 ±1 之间,人体基本处于热中性,其他颜色区域代表热感较明显。对比上文中产生不适吹风感的客厅过道处,由于 PMV 模型只考虑了风速的对流降温作用,从而出现了风速大处会产生冷感的错误预测。根据 PMV-PPD 关系式,当 PMV>1 时,有 50%的人感到不满意,显然该户型 PMV 预测环境结果要劣于热适应性模型。同时,结果也证明了 ASHRAE RP-884 数据库中,自然通风建筑要比空调建筑的可接受温度范围宽 70%左右的结论。之所以产生这种差异,笔者认为有两方面原因:

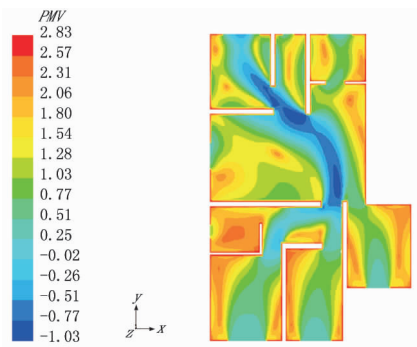


图6 PMV 分布

1) 在非空调环境中人们对环境的期望值较低,同时也会主动通过增减衣物、开关窗户、窗帘遮阳等行为调节方法改善热环境。为了使 PMV 模型在非空调环境下也适用,Fanger 曾提出 PMV 的修正模型,引入期望因子(0.5~1)来修正当量稳态空调条件下计算出的 PMV 值。

2) PMV 模型涉及到的环境参数均为稳态参数,即流体湍动参数没有考虑。自然通风状况下气流的湍流强度较大,通常在 0.5~0.9 之间,而在稳态的空调环境下,其值通常小于 0.4,这种变化可导致人体表面传热系数的变化,从而在外部环境和心理上双重调节人体热感。

4 结论

4.1 自然通风房间室内风速较大,受室外风速、风

向和套内布局影响大,模拟对象风速在 $0\sim 4.2\text{ m/s}$ 之间,房间内各点空气分布不均。在考虑太阳辐射外壁面升温、不考虑室内散热的情况下,室内温度比室外温度略高,在窗口处由于日照得热温度略高,但总体温差不超过 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

4.2 目前室内热舒适评价主要有 *PMV* 模型和热适应性模型两类。*PMV* 定义于稳态人工环境,热适应性模型基于室外月平均温度,从评价结果来看,*PMV* 定义舒适的阈值较小,且正向偏离较大,本文经过修正的基于风速补偿的热适应性模型能较客观反映自然通风房间的热环境,为该领域的深入研究提供了参考思路。

参考文献:

- [1] Feustel H E. COMIS—an international multizone air-flow and contaminant transport model[J]. *Energy and Buildings*, 1999, 30(1): 3-18
- [2] 中国有色工程设计研究总院. GB 50019—2003 采

暖通风与空气调节设计规范[S]. 北京:中国计划出版社, 2004

- [3] 中国建筑科学研究院. GB 50176—93 民用建筑热工设计规范[S]. 北京:中国计划出版社, 1993
- [4] 金招芬,朱颖心. 建筑环境学[M]. 北京:中国建筑工程出版社, 2001
- [5] 夏一哉,牛建磊,赵荣义. 空气流动对热舒适影响的实验研究:总结与分析[J]. *暖通空调*, 2000, 30(3): 41-44
- [6] de Dear R, Richard J, Brager G S. Thermal comfort in naturally ventilated buildings: revisions to ASHRAE Standard 55[J]. *Energy and Buildings*, 2002, 34(6): 549-561
- [7] 杨柳. 建筑气候分析与设计策略研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2003
- [8] 嵇贇喆,高屹,王晓杰,等. 空气流速对人体热舒适影响的研究[J]. *兰州大学学报:自然科学版*, 2003, 39(2): 95-99