专题
研讨

人体活动对医院关键科室 空气污染控制的影响(1):综述

同济大学 沈晋明[☆] 唐喜庆 李洪欣

摘要 医院关键科室内应考虑人体活动引起的动态尾流对空气中污染物扩散的影响,通常假设人体静态的模拟方法并不能反映真实情况。对人体动态模拟的研究现状和特殊性及其 CFD 模拟方法进行了介绍,提出对医院关键科室内污染物扩散的模拟应逐渐从稳态模拟向动态模拟转变。

关键词 人体活动 医院关键科室 空气污染物 动态模拟

Impact of man's movement on air contamination control in crucial medical rooms(1):a review

By Shen Jinming[★], Tang Xiqing and Li Hongxin

Abstract The impact of unsteady aerodynamic wake of man's movement on contaminant transportation should be taken into account in the air contamination control of crucial medical rooms, and most previous studies regard the occupant as static object, which resulted in the contaminant distribution in hospital being rather different from the actual situation. Summaries the research status, particularity and CFD method of the dynamic simulation, and points out that the CFD simulation of contaminant distribution in the crucial medical rooms should be reoriented from static method to dynamic method.

Keywords man's movement, crucial medical room, air contamination, dynamic simulation

★ Tongji University, Shanghai, China

①

0 引言

人体通常处于动态的室内环境中,大多研究中却将室内环境假设为静态,与实际情况有很大出入。人体的行走和运动会形成动态尾流,尾流之于人,如同阳光下之人影,有人就有影,人动影也动。在工程实践中,人体尾流很少引起人们的重视,但尾流对污染物扩散的影响对室内污染控制和个人防护有重要意义。如高度无菌或隔离病房的环境控制中,人或障碍物移动形成的尾流会对污染物传播产生一定影响(见图 1),使得交叉感染风险增

大。目前有关医院空气环境的研究大部分以微生物浓度、洁净度、温湿度、压差控制等为研究要素,缺少以人为要素的研究,本文对人体活动对室内气流分布影响的动态模拟作一分析。

1 室内气流分布动态绕流的研究现状

从 1768 年达朗贝尔(D'Alembert)提出的绕物体流动“阻力绝对等于零”的疑题算起,钝体绕流问题的研究已有 200 多年历史。英国的马洛克(Mallock)和法国的伯纳德(Benard)分别在 1907 年和 1908 年观察到并研究了单相流体流过钝体后

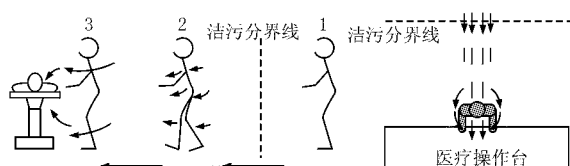


图 1 人体活动引起的医院内污染传播示意图^[1]

①[☆] 沈晋明,男,1946 年 10 月生,博士,教授,博士生导师
200092 上海市四平路 1239 号同济大学暖通空调研究所
(021) 65988388

E-mail: jinming_shen@163.com

收稿日期:2006-12-06

修回日期:2007-03-26

在物体后部形成的周期性旋涡脱落现象。1911 年冯·卡门(Von Karman)系统地研究了涡街形成与稳定性问题并确定了涡系动量与尾流阻力之间的关系,成为钝体绕流研究的一个里程碑。钝体绕流的旋涡脱落现象是流体流动和钝体二者相互作用的结果,是一种复杂的流动,受到流体流动状态、湍流度、障碍物几何形状等许多因素的影响,有些流动现象和机理仍未得到透彻的认识。实际物体的外形非常复杂,最具典型意义的钝体外形是圆柱和方柱^[2],人体绕流可视为有限高度圆柱绕流,边界层分离的不稳定性会诱发尾流成为非定常流,如图 2 所示。

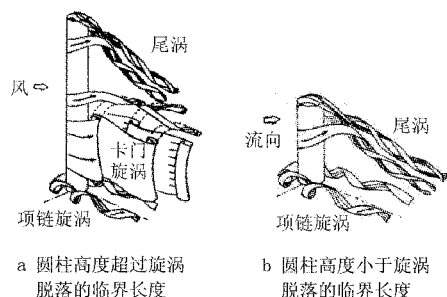


图 2 有限高度圆柱绕流示意图^[3]

D. K. George 等人将绕站立人体的空气流动简化为二维圆柱绕流,认为人体回流区的污染排除机理是湍流扩散与涡脱落^[4]。S. Okamoto 等人对不同形状比圆柱的研究表明,圆柱高宽比为 3 时与人的体型相近,并在下游出现长度约为 4 倍圆柱直径的回流区;同时还发现,圆柱高宽比为 3 时,处于周期性与非周期性旋涡脱落的过渡区^[5]。M. Sandberg, M. Mattsson, E. Bjørn 等人对置换通风情况下人体运动对气流分布的影响进行了大量的研究,研究表明当人体无运动时,房间内气流分层明显,人体运动加大后分层现象逐渐减弱,运动扰动会影响房间内污染物的均匀分布^[6-13]。B. A. Edge 等人通过观察发现行走中人体手臂的摆动对身后尾流的影响很小,可以忽略不计,而两腿之间的间距则对人体主导运动方向尾流的结构有重要影响^[14]。Suh-Jenq Yang 等人采用任意拉格朗日-欧拉法(arbitrary Lagrangian-Eulerian method)对手术室中人员往返移动一次对送风气流的影响进行了模拟,认为通常将人处理为静态的气流模拟方法与实际相比有很大差别,人体活动产生的涡流会卷吸带走室内污染物^[15]。施阳正等人对隔离病房

内医护人员走动情况下的动态气流进行了研究,认为特定送风条件下,人体活动不会影响室内污染物分布^[16]。

2 动态绕流问题的特殊性

CFD 模拟的发展趋势之一就是从简单边界和初始条件的稳态模拟到复杂边界和初始条件的动态模拟^[17],目前室内气流的 CFD 研究还以稳态模拟为主,动态气流模拟的文献较少,而模拟人或物体扰动的文献则更少见。通常对空调室内气流的数值模拟或风洞实验采用定常方法,即房间与人和物体为静止状态,空气流动;而对动边界问题而言,除空气流动外,人与物体也是运动的,这两种情况下所产生的流场是不同的。

动边界数值模拟的难点在于计算中要实时地得到流场边界的位置及边界处速度、压力等参数值^[18],这给数值模拟和实验研究都带来了很大困难,采用实验的方法很难捕捉到扰动情况下室内流场各参数随时间的变化,就目前洁净室常用检测仪器粒子计数器而言,也仅能测得固定点的污染物浓度,无法了解污染物的扩散与传递过程。CFD 模拟在一定程度上可直观地了解医院环境内的空气流动特性与污染物传播途径。动边界的数值模拟需要合理地处理以下几个问题^[2]。

- 1) 要处理物体边界随时间变化的问题。
- 2) 要保证所计算的非定常过程具有时间精确性。时间步长的选择既要满足计算的稳定性,又要保证一定的精度。
- 3) 对非定常流动的模拟迄今尚缺乏完全适合的湍流模型,只能根据情况选择较为接近的模型进行研究。

目前解决动边界问题的基本思想是:采用一种快速而有效的方法来动态地调整网格,以适应流场边界位置和形状的变化^[19]。现在使用的算法主要可分为两种:一种是带有移动网格的分区算法,生成两套计算网格,分别绑定到具有相对运动的两个物体上,随着物体的运动,两套网格之间进行相对运动,针对两套网格分别进行计算,在网格的交界处进行流场参数的信息交换;另一种是动态调整网格分布的方法,只生成一套网格,以适应流场边界变化,因涉及动态重建网格、网格单元的合并与拆分等,目前仅限于应用在简单的物体外形和简单的物体间相对运动,对于复杂的物体外形和运动方

式,随时间变化自适应地调整网格仍然很复杂^[2]。

对于常见的气流运动,拉格朗日(Lagrangian)法和欧拉(Eulerian)法是两种基本模拟方法。在拉格朗日法描述下,网格随流体一起运动,网格点的速度与当地流体微团的速度相同;在欧拉法描述下,网格的空间位置固定,即网格点的速度为零,流体微团穿过网格单元构成的控制体。对于动态模拟而言,除流动的空气外还有人或物体的运动,因此,动边界问题采用单纯的欧拉法或拉格朗日法很难解决,需根据情况进行相应的简化,也有学者结合二者的特点采用任意拉格朗日-欧拉法来研究此类问题^[15],将两种方法统一起来,允许网格以任意速度运动,当网格速度为零时则用欧拉法,当网格速度等于流体速度时则用拉格朗日法,可以实现比拉格朗日法更大的网格变形计算,还可得到比欧拉法更详细的计算结果^[1]。

3 人体活动的 CFD 模拟方法

3.1 动态人体模型的简化

人体是由 200 多个旋转关节组成的复杂形体,外形极不规则,不同于一般的刚体,真实的运动人体为具有上百个自由度的复杂系统,要准确地描述

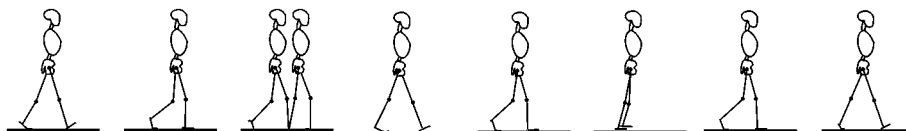


图 4 人体行走步态周期示意图^[21]

一个步态周期的活动可分为支撑时相和摆动时相。常速行走时,支撑时相约占整个步态周期的 60%~65%^[22]。定义行走时左右足跟(或趾尖)间的纵间距离为步长,同侧足跟(或趾尖)两次着地间的距离为步长或周期跨距。研究表明,步长与身高显著相关,中国青年男性的步长约为 55.0~77.5 cm,女性约为 50.0~70.0 cm^[23]。身高相同的男、女性,其步长无显著性差异,且步长随着年龄的增大而减小^[24],但人体行走存在因人而异的特点,考虑医院中病人多,其步长与正常人相比会小些。另外,健康成年人正常步态行走时,身体质心上下起伏的幅度约为 4.4 cm^[25],除腿和脚有较大活动外,躯干基本接近匀速运动的刚体。目前的文献大多忽略行走时脚和腿的动作对气流的影响,与实际情况相比会有所出入,但已可以定性地说说明问题,因此大多将人体活动简化为在水平方向匀速直线前

人体运动存在很大困难,为此需对人体的运动和外形作适当简化。

3.1.1 运动方式的简化

人行走的控制参数主要包括:运动主体、距离、时间、行走模式、摇臂与否和侧身与否。人体各肢体之间存在一定的运动连带关系,若将关节看成点,将关节之间的骨骼看成是链,则可以按照运动关系将各肢体链接起来,用树状结构来表示人体模型的层次关系,如图 3 所示^[20]。

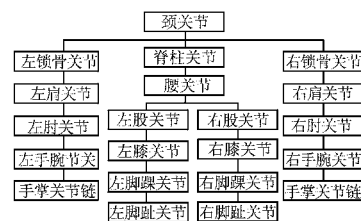


图 3 人体关节的树状结构层次图

根据 B. A. Edge 的研究^[14],手臂摆动对尾流的影响可忽略不计,故可抽取上述腰链与腿链作为人体运动的主体特征。行走过程中,从一侧脚跟着地开始到该脚跟再次着地构成一个步态周期,如图 4 所示。

行的刚体进行研究。

3.1.2 人体外形的简化

目前的文献中,根据计算内容的不同,不同的研究者对人体外形的简化有多种方法,将人体按比例简化为立方体^[1,15]或圆柱体^[26-27],如室内气流模拟常用的 Airpak 软件就将人体处理为立方体;将人简化为近似圆柱体^[14,28]时,文献中的直径在 0.3~0.5 m 之间、高度在 0.8~1.75 m 之间变化。但不论将人体外形简化为立方体或圆柱体,人体受力及与气流的相互作用与柱状体受力之间的等效关系存在一定差异,从流体力学的概念与现象来讲,方柱绕流与圆柱绕流也具有明显的区别,在绕流中人体的迎风面起主要的屏风作用,气流外掠人体的阻力受侧面轮廓形状影响。也有研究者采用三维人体扫描技术获得人体模型^[29],外形基本接近真实人体,但受实验条件限制,目前应用还较少。

暖通空调工程领域的气流模拟中,人体的尺度与空间相比情况不一,对于大空间而言,人体模型外形的差异对流场的影响无关紧要,但对于层高 $2\sim 3$

m 左右的房间而言,人体的高度与外形对流场的影响不能忽略,需根据情况考虑人体模型的选择。图 5 为文献中的几种人体模型。

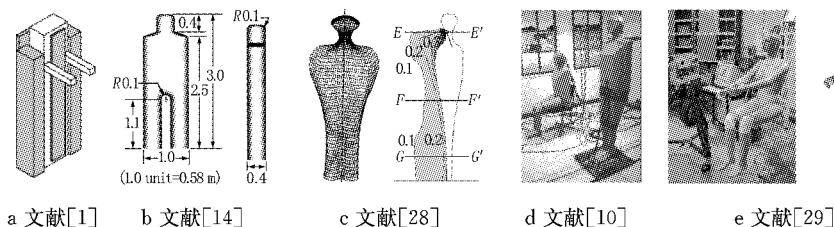


图5 文献中的几种人体模型

3.2 动网格方法

网格划分对人体活动的模拟效果有很大影响,人体的活动可用动网格(dynamic mesh)来实现,常见的动网格分弹簧压缩式(spring based smoothing method)、动态层铺式(dynamic layering method)和局部网格重构式(local remeshing method)三种变形方法,三种动网格原理如下^[30]。

3.2.1 弹簧压缩法

通过调整已知移动边界节点位移的控制容积的内部节点,来实现网格的动态变化,如图 6 所示。该方法只调整网格节点的位置,不改变网格的连接方式,将每个网格的边抽象为一个理想的弹簧模型,把动边界与其他边界用一个弹簧网连接起来,对于任意一个给定位移的边界节点按一定比例生成力,通过弹性连接传递给与它直接相连的每一个节点,从而将位移扩散到整个区域。

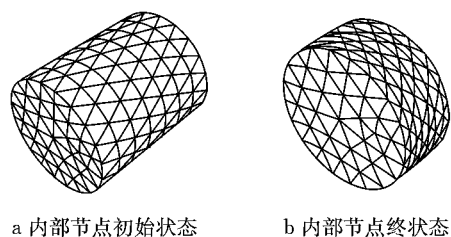


图 6 弹簧压缩式动网格示意图

3.2.2 动态层铺法

动态层铺法基于弹簧压缩法之上,在距运动边界一定距离的地方重新生成或删除网格层,避免网格在被拉伸或压缩的过程中形成的网格过稀或过密。应用动态层铺法需为动边界网格定义一个理想高度 h_{ideal} ,作为网格分割或合并的判断准则。如图 7 所示,最下方边界为沿竖直方向向下运动的边界,随着边界的运动,紧靠运动边界的网格层被拉伸,当其高度 $h > (1 + \alpha_s)h_{\text{ideal}}$ 时被分为两层(α_s 为

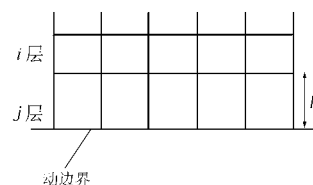
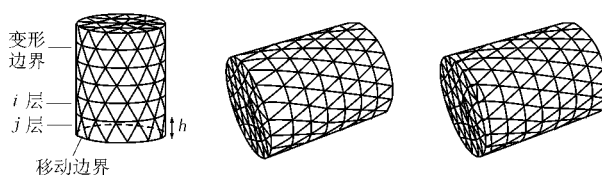


图7 动态层铺式动网格示意图

网格分裂系数),反之,当网格被压缩到 $h < \alpha_c h_{\text{ideal}}$ 时(α_s 为网格合并系数),该层和与它相连网格层就会合并为一个新的层。

3.2.3 局部网格重构法

计算中根据设定的条件判断是否进行网格重构,当满足以下三个判断准则时,动边界网格进行重构。1) 动网格小于设定的网格最小值;2) 动网格大于设定的网格最大值;3) 动网格偏斜度超过设定的网格最大容许偏斜度。如图 8 所示,局部网格重构法适合于动边界位移幅度较大的情况。



a 网格重构的变形边界 b 网格重构前的拉伸圆柱 c 网格重构后的拉伸圆柱

图 8 局部网格重构式动网格示意图

3.3 动态模拟的湍流模型

目前,尚没有适合所有问题的通用湍流模型,对于动态模拟也同样如此。文献中通常采用标准 $K-\epsilon$ 模型^[1,31-32],但该模型对于 Reynolds 应力的各个分量,假定黏度是各向同性的标量,用于强旋流、弯曲壁面流动或弯曲流线流动时,会产生一定的失真^[33]。RNG $K-\epsilon$ 模型和 Realizable $K-\epsilon$ 模型虽然对流场中的旋转流动进行了改进,但属高 Re 湍流模型,在人体绕流中紧靠人体表

面的流动 Re 较低,湍流发展不充分,湍流的脉动影响不如分子黏性的影响大,这样无法准确反映人体走动时体表与气流之间的作用。文献[30]表明, $K-\omega$ 模型在预测自由剪切流传播速率时有很好的效果,可成功应用于尾迹流、圆柱绕流、平板绕流和混合流动等。 $K-\omega$ 模型分为标准 $K-\omega$ 模型和 SST $K-\omega$ 模型,标准 $K-\omega$ 模型基于 Wilcox

$K-\omega$ 模型,在考虑低 Re 、可压缩性和剪切流的基础上修改而成;SST $K-\omega$ 模型全称为剪切应力输运(shear-stress transport) $K-\omega$ 模型,是为使标准 $K-\omega$ 模型在近壁区有更好的精度和算法稳定性发展而来的,许多情况下比标准 $K-\omega$ 模型更有效。SST $K-\omega$ 模型是一种经验模型,基于湍流能量方程和扩散速率方程,方程如下:

$$K \text{ 方程} \quad \frac{\partial}{\partial t}(\rho K) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho K u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_K \frac{\partial K}{\partial x_j} \right) + G_K - Y_K + S_K \quad (1)$$

$$\omega \text{ 方程} \quad \frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega \quad (2)$$

式(1),(2)中 Γ_K 和 Γ_ω 分别为 K 和 ω 的有效扩散率; G_K 和 G_ω 分别为 K 和 ω 的湍流动能产生项; Y_K 和 Y_ω 分别为 K 和 ω 的湍流耗散率; S_K 和 S_ω 分别为 K 和 ω 的自定义源项; D_ω 为交替扩散率。

4 结论

医院无菌、隔离病房等关键科室由于污染控制要求高,必须考虑人、物移动尾流对室内污染控制和个人防护的影响。但是如考虑人、物的移动会使室内污染控制研究变得更加复杂,这就需要采用动态 CFD 模拟的方法来分析室内气流分布(见后续文章)。本文对人体动态 CFD 模拟的难点和实现方法进行了分析,认为通常医院气流模拟中将人体假设为静态的方法与实际状况相比有很大出入。对室内气流分布尤其是污染物扩散的 CFD 模拟,应逐渐从稳态模拟向动态模拟转变。目前对动态模拟的研究仍存在以下需要解决的问题:

1) 准确便捷的动态网格算法。动网格的划分会对模拟的精度和效率产生很大影响,目前动网格的网格数量、计算时间、模型的复杂程度与计算精度之间相互制约,对复杂模型的动态模拟计算成本很高。

2) 适合室内人员或物体动态模拟的湍流方程。目前对湍流方程的研究多集中在稳态模拟领域,动态模拟湍流方程的研究和应用缺少足够多的计算和实验数据支持。

3) 能反映实际活动情况的动态人体模型。动态人体模型应能同时反映形体和动作对室内气流的影响,目前的一些动态模拟大多忽略了肢体的活动而以运动的刚体来代替,存在一定的局限性。

参考文献:

[1] Brohus H, Balling K D, Jeppesen D. Influence of

movements on contaminant transport in an operating room[J]. Indoor Air, 2006, 16(5):356-372

[2] 童秉纲,张炳暄,崔尔杰. 非定常流与涡运动[M]. 北京:国防工业出版社,1993

[3] Kawamura T, Hiwada M, Hibino T, et al. Flow around a finite circular cylinder on a flat plate[J]. Bulletin of the Japan Society of Mechanical Engineers, 1984, 27(232):2142-2151

[4] George D K, Flynn M R, Goodman R. The impact of boundary layer separation on local exhaust design and worker exposure [J]. Applied Occupational and Environmental Hygiene, 1990, 5(8):501-509

[5] Okamoto S, Sunabashiri Y. Vortex shedding from a circular cylinder of finite length placed on a ground plane[J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 1992, 114: 512-521

[6] Sandberg M, Mattsson M. The effect of moving heat sources upon the stratification in rooms ventilated by displacement ventilation [C]// Roomvent'92: Proceedings of the 3rd International Conference on Air Distribution in Rooms. Aalborg, Denmark, 1992: 33-52

[7] Mattsson M, Sandberg M. Contaminant distribution in displacement ventilation—influence of physical activity[C]// Roomvent'94: Proceedings of the 4th International Conference on Air Distribution in Rooms. Krakow, Poland, 1994:77-92

[8] Mattsson M, Sandberg M. Velocity field created by moving objects in rooms [C] // Roomvent'96: Proceedings of the 5th International Conference on Air Distribution in Rooms. Yokohama, Japan, 1996:

- 547-554
- [9] Mattsson M, Bjørn E, Sandberg M, et al. Simulating people moving in displacement ventilated rooms[C]//Proceedings of Healthy Buildings'96, 5th International Conference on Healthy Buildings, Washington D C, USA, 1997: 495-500
- [10] Bjørn E, Mattsson M, Sandberg M, et al. Displacement ventilation—effects of movement and exhalation[C]//Proceedings of Healthy Buildings'96, 5th International Conference on Healthy Buildings, Washington D C, USA, 1997:163-168
- [11] Bjørn E, Nielsen P V. Passive smoking in a displacement ventilated room[C]//Proceedings of Indoor Air'96, The 7th International Conference on Indoor Air Quality and Climate, Nagoya, Japan, 1996:887-892
- [12] Mattsson M. Displacement ventilation in a classroom—influence of contaminant position and physical activity[C]//Proceeding of 19th AIVC Conference, Oslo, Norway, 1998:333-341
- [13] Mattsson M. On the efficiency of displacement ventilation—with particular reference to the influence of human physical activity[D]. Gävle, Sweden: Royal Institute of Technology, 1999
- [14] 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(6): 967-977
- [15] Yang S J, Fu W S. A numerical investigation of effects of a moving operator on airflow patterns in a clean room[J]. Building and Environment, 2002, 37(7):705-712
- [16] 施阳正, 周火链, 邱正吉. 隔离病房内部动态气流模拟分析[C]//2004 年能源与冷冻空调学术暨建筑物能源管理技术研讨会. 中国台北, 2004
- [17] 谭良才. 暖通空调软件技术及其发展[EB/OL]. [2003-12-30]. http://www.eastac.com/chinese/technology/dis_tech-1.asp?techid=21
- [18] 孙潜. 通道内高速运动物体气动性能的数值模拟[D]. 北京:北京航空航天大学, 2004
- [19] Tsai H-M, Cai J. Unsteady flow calculations with a multi-block moving mesh algorithm [J]. AIAA Journal, 2001, 39(6):1021-1029
- [20] 卢晓军, 李焱, 贺汉根. 基于 Petri 网的虚拟人行动作建模及其仿真实现[J]. 系统仿真学报, 2005, 17(11):2679-2682
- [21] Dion Fun, Csaba Nagy. Normal gait[EB/OL]. <http://sprojects.mmi.mcgill.ca/gait/normal/intro.asp>
- [22] 吴剑, 李建设. 人体行走时步态的生物力学研究进展[J]. 中国运动医学杂志, 2002, 21(3):305-307
- [23] 戴克戎. 步态分析及其应用[J]. 中国骨科杂志, 1991(11):207
- [24] 伍颢, 陆爱云, 庞军. 健康老年人常速行走的步态分析[J]. 上海体育学院学报, 2000, 24(2):52-55
- [25] Inman V T, Ralston H J, Todd F. Human walking [M]. Baltimore: Williams & Wilkins, 1981
- [26] Brohus H. Personal exposure to contaminant sources in ventilated rooms [D]. Denmark: Aalborg University, 1997
- [27] 雷波, 刘应清. 列车风作用下人体气动力的计算分析[J]. 铁道学报, 1999, 21(6):20-23
- [28] Tatsuya Hayashi, Yoshiaki Ishizu, Shinsuke Kato, et al. CFD analysis on characteristics of contaminated indoor air ventilation and its application in the evaluation of the effects of contaminant inhalation by a human occupant [J]. Building and Environment, 2002, 37(3):219-230
- [29] Gao Naiping, Niu Jianlei. CFD study on micro-environment around human body and personalized ventilation [J]. Building and Environment, 2004, 39(7):795-805
- [30] Fluent Inc. FLUENT6.1 User's Guide[M], 2003
- [31] Matsumoto H, Hai N L, Ohba Y. Influence of moving object on air distribution in ventilated rooms [C]//Roomvent 2002: Proceedings of the 8th International Conference on Air Distribution in Rooms, Copenhagen, Denmark, 2002:261-264
- [32] Matsumoto H, Matsusaki A, Ohba B. CFD simulation of air distribution in displacement ventilated room with a moving object[C]//Roomvent 2004: Proceedings of the 9th International Conference on Air Distribution in Rooms, Coimbra, Portugal, 2004
- [33] 郭鸿志. 传输过程数值模拟[M]. 北京:冶金工业出版社, 1998