

文章编号:2095-0411(2016)02-0055-07

等温环境下渗透式纤维空气分布系统 CFD 模型探讨

陈孚江,黄丹丹,吴沁雨,陈建芳,陶 丽
(常州大学 石油工程学院,江苏 常州 213164)

摘要:基于 FLUENT 软件,通过对等温条件下室内气流场分布和计算所需的资源比较分析,探讨了基于多孔介质模型的直接描述法、平均流速法和有效面积法等渗透式纤维空气分布系统物理模型的 3 种描述方法的特性。结果表明:直接描述法、有效面积法和平均流速法均能获得相似的室内气流场分布,但前两者需要考虑纤维结构参数的影响。平均流速法所需计算资源少,且不需考虑纤维孔隙率的影响,更适合工程设计人员预测基于渗透式纤维空气分布系统的室内气流场特性,选择较优的系统设计方案。

关键词:纤维空气分布系统;渗透送风;直接描述法;有效面积法;平均流速法;等温环境

中图分类号:TU 83

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.2095-0411.2016.02.011

Modeling of Fabric Air Dispersion System in Penetration Mode in CFD Simulation under Isothermal Condition

CHEN Fujiang, HUANG Dandan, WU Qinyu, CHEN Jianfang, TAO Li

(School of Petroleum Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China)

Abstract: Using the computer fluid dynamic (CFD) method, three methods to model a fabric air dispersion system (FADS) in penetration mode, namely the direct description (DD) method based on the porous media model, the mean velocity (MV) method and the effective area (EA) method, are discussed in the present work from the aspect of indoor airflow distribution and the computational resource required under isothermal condition. It can be concluded that all three methods can get similar predictions of indoor airflow distribution. Also, the DD method and the EA method need considering the influence of fibre physical structure parameters. The MV method is easy to be implemented and is more suitable for engineering designers to predict the indoor air characteristics based on FADS in penetration mode and to choose the optimum design method of the air-conditioning system.

Key words: fiber air dispersion system (FADS); ventilation in penetration mode; direction description method; effective area method; mean velocity method; isothermal condition

纤维空气分布系统由于诸多的优点^[1-3]而越来越多地应用多种大型场所创造舒适、洁净的室内环境。目前,以纤维空气分布系统作为送风末端的空

调环境下室内空气热湿环境、污染物浓度分布等方面的研究越来越多^[4-9]。李浩^[10]等构建了喷射渗透式布袋风管送风系统内部压力分布的数学模型,分

收稿日期:2015-04-08。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51308077);江苏省高校自然科学基金资助项目(13KJB560001);江苏省政府留学奖学金项目(JS-2014-319)。

作者简介:陈孚江(1979—),男,江苏宿迁人,博士,讲师,主要从事建筑环境、空调系统性能优化、建筑能源利用方面的研究。

析了纤维渗透性和送风量对布袋风管内部压力及送风特性的影响。陈孚江等提出了采用多孔介质模型描述渗透式纤维空气分布系统的方法(下文称直接描述法),并数值研究了不同物理参量(如布局方式、送风量、纤维孔隙率等)对纤维空气分布系统空腔内部和室内气流速度场、温度场、压力场的影响,以及系统的热容性^[11-14]。

然而,实际工程中,设计人员需要快速而准确地预测室内气流场特性,判断空调设计方案的优劣。本文对比分析了基于多孔介质模型直接描述法、有效面积法和平均流速法等3种方法的特性。研究结果可为渗透式纤维空气分布系统的理论研究和工程应用提供参考。

1 渗透式纤维空气分布系统物理模型描述方法

针对渗透式纤维空气分布系统送风气流特征,给出了3种描述方法:直接描述法、有效面积法和平均流速法。其思想如下:①采用直接描述法时,将纤维空气分布系统处理成具有一定厚度的多孔介质区。气流从纤维空气分布系统的入口端进入,充满纤维空气分布系统空腔,然后穿过多孔纤维层,进入室内^[11]。②采用平均流速法时,将纤维空气分布系统简化为一空间曲面(纤维外壁面)开口,并假定气流直接从曲面开口处向室内扩散,流速大小为入口端的送风量与纤维渗透出风的总面积(不考虑孔隙率)的比值,方向垂直于弧形的纤维壁面。③有效面积法是在平均流速法的基础上考虑纤维孔隙率对面积的影响,即送风面积为扣除纤维孔隙后的纤维渗透出风的面积。

设入口端空气体积流量为 Q_{in} , 由纤维空气分布系统四周壁面流出的空气体积流量为 Q_{out} 。根据质量守恒可得:

$$Q_{in} = Q_{out} \quad (1)$$

$$\text{又 } Q_{in} = A_{in} V_{in} = \pi d^2 V_{in} / 4$$

$$Q_{out} = A V_{sup} = \pi d l V_{sup} \quad (2)$$

$$\text{即: } V_{in} = 4 Q_{in} / \pi d^2 \quad (3)$$

$$V_{sup} = Q_{in} / (\pi d l) \quad (4)$$

$$\text{又 } V_{sup} = \varphi V_{phy}^{[15]}, \text{ 所以,}$$

$$V_{phy} = Q_{in} / (\pi \varphi d l) \quad (5)$$

式中: V_{in} 为入口端气流平均流速, $m \cdot s^{-1}$; A_{in} 为入口端纤维空气分布系统剖截面面积, m^2 ; d 为纤维空气分布系统管径, m ; A 为纤维空气分布系统出风面积, m^2 ; l 为纤维空气分布系统长度, m ; V_{sup}

为纤维孔隙中气流表观流速, 即表面体积平均流速, $m \cdot s^{-1}$; V_{phy} 为纤维孔隙中气流实际流速, 即扣除纤维结构所占面积后的表面流速, $m \cdot s^{-1}$ 。

2 案例研究

2.1 模拟房间物理模型

模拟房间长 4.2m, 宽 3.6m, 高 2.5m。纤维空气分布系统长 3.9m, 内径 305mm, 壁厚 0.47mm, 沿 X 轴向对称布置在房间天花天下面。纤维空气分布系统出风方式为渗透式, 即空气从半圆弧形多孔纤维壁面向室内扩散。排风口下檐离地板 0.2m 高, 如图 1 所示。模拟房间内热源主要为台灯、电脑和人员。建立房间模型时, 将纤维空气分布系统上端面直接贴附在天花板上, 房间内各热源体均具有相应尺寸的长方体来代替。房间四周墙壁均视为绝热面。

2.2 数值方法

2.2.1 控制方程

为了研究平均流速法和有效面积法的可行性及其与直接描述法特性的差别, 数值模拟时仅考虑气流为等温流动。气体流动的控制方程通式^[16]为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varphi) + \text{div}(\rho \varphi \mathbf{U}) = \text{div}(\Gamma_{\Phi} \text{grad} \varphi) + S_{\Phi} \quad (6)$$

式中: ρ 为气流密度, φ 为独立变量, \mathbf{U} 为速度矢量, Γ_{Φ} 为有效扩散系数, S_{Φ} 为源项。其中, 动量守恒方程的源项增加了纤维结构阻力项, 其在 3 个方向的具体表达式如下:

$$S_u = - \left(\frac{\mu}{\alpha} + \frac{\rho F}{\sqrt{\alpha}} |u| \right) u,$$

$$S_v = - \left(\frac{\mu}{\alpha} + \frac{\rho F}{\sqrt{\alpha}} |v| \right) v,$$

$$S_w = - \left(\frac{\mu}{\alpha} + \frac{\rho F}{\sqrt{\alpha}} |w| \right) w + g \beta \rho \Delta T \delta_z$$

式中: α 和 F 分别为纤维渗透性和无量纲阻力系数^[17], $\alpha = \frac{D_p^2 \varphi^2}{\psi (1 - \varphi)^2}$, $F = \frac{\zeta}{\sqrt{\psi} \varphi^{3/2}}$ 。 D_p 为纤维的当量直径。 ψ 和 ζ 为纤维结构因子, 需实验测定, 本文取 120 和 1.8^[13]。当 $\varphi = 1$ 时, 气流在非多孔区(除纤维结构层之外的其他房间区域)内流动, $0 < \varphi < 1$ 表示气流在多孔纤维层内流动。具体内容详见文献[12]。

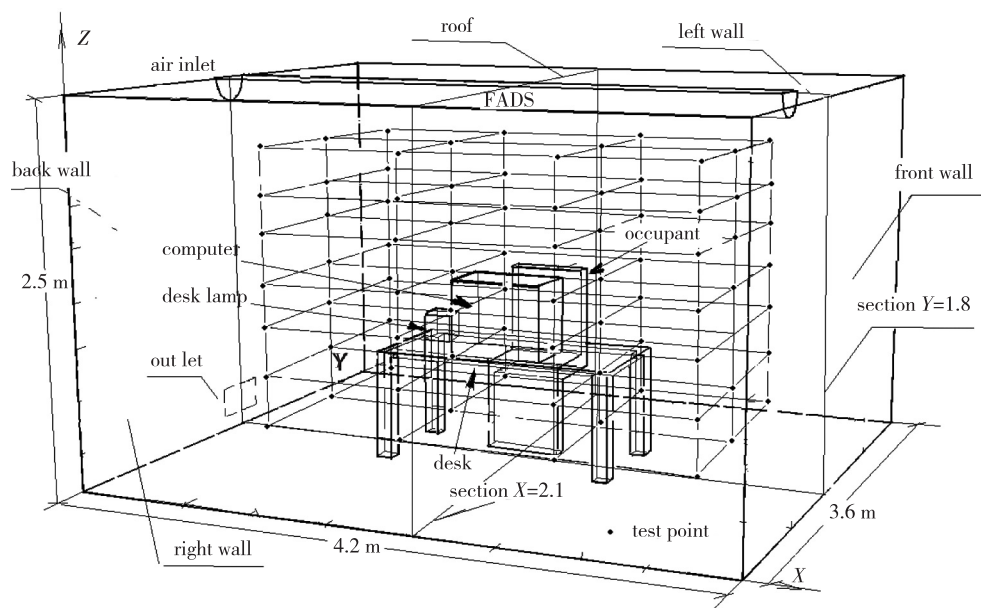


图 1 基于渗透式纤维空气分布系统的模拟房间简化模型

Fig.1 Simplified room model ventilated with fiber air distribution system in penetration mode

2.2.2 边界条件和算法

模拟房间的入口定义为速度入口,流速为平均值。采用直接描述法、平均流速法和有效面积法时,入口流速分别按式(3)~(5)计算。出口为自由出流型。所有固体壁面视为无滑移边界。流体模型为湍流模型,近壁处采用标准壁面函数法。采用SIMPLEC 算法耦合求解速度压力方程。压力项采用体积力差分格式,其余均为二阶迎风差分格式。

采用直接描述法时,计算区域分为纤维空气分布系统空腔和纤维结构层区域和房间其他流体区域

两块区域。计算区域的信息通过 interface 界面相互联系。采用有效面积法和平均流速法时,计算区域仅为去除纤维空气分布系统空腔和结构层之外的室内流体区域。由于纤维空气分布系统的长度和厚度之比非常大,为了减小网格生成的难度,采用结构化网格对纤维空气分布系统空腔和结构层进行离散,其他流体区域为非结构化网格进行离散。计算过程中网格的无关性独立检查已得到检验。3 种方法对应的具体离散格式、网格数量和计算机容量详见表 1。

表 1 3 种描述方法对应的计算资源
Table 1 Computational resource of three methods

模型	计算区域	网格类型	网格数		计算步数	
			分项	总和	分项	总和
直接描述法	纤维空气分布系统空腔	结构网格	1 410 000			
	纤维空气分布系统	结构网格	90 000	2 193 342	222	333
	模拟房间	非结构网格	693 342		111	
有效面积法	纤维空气分布系统空腔	—	—		—	
	纤维空气分布系统	—	—	592 800	—	112
	模拟房间	非结构网格	592 800		112	
平均流速法	纤维空气分布系统空腔	—	—		—	
	纤维空气分布系统	—	—	693 342	—	111
	模拟房间	非结构网格	693 342		111	

3 结果与讨论

3.1 速度分布

图 2 (a)~(c)是基于直接描述法、有效面积法、平均流速法得到的气流在典型截面($X=2.1$ 和 $Y=1.8$)上的速度分布。从图中可以看出 3 种方法得到

的气流速度分布非常相似。气流沿垂直于纤维壁面的方向向室内扩散,下方区域的气流流速大于两侧区域气流流速。有效面积法得到的室内区域,尤其是纤维空气分布系统下方区域气流速度略大于直接描述法和平均流速法的预测结果。同时,纤维空气分布系统两侧区域气流受到下降气流的诱导而形成一定的涡旋区。

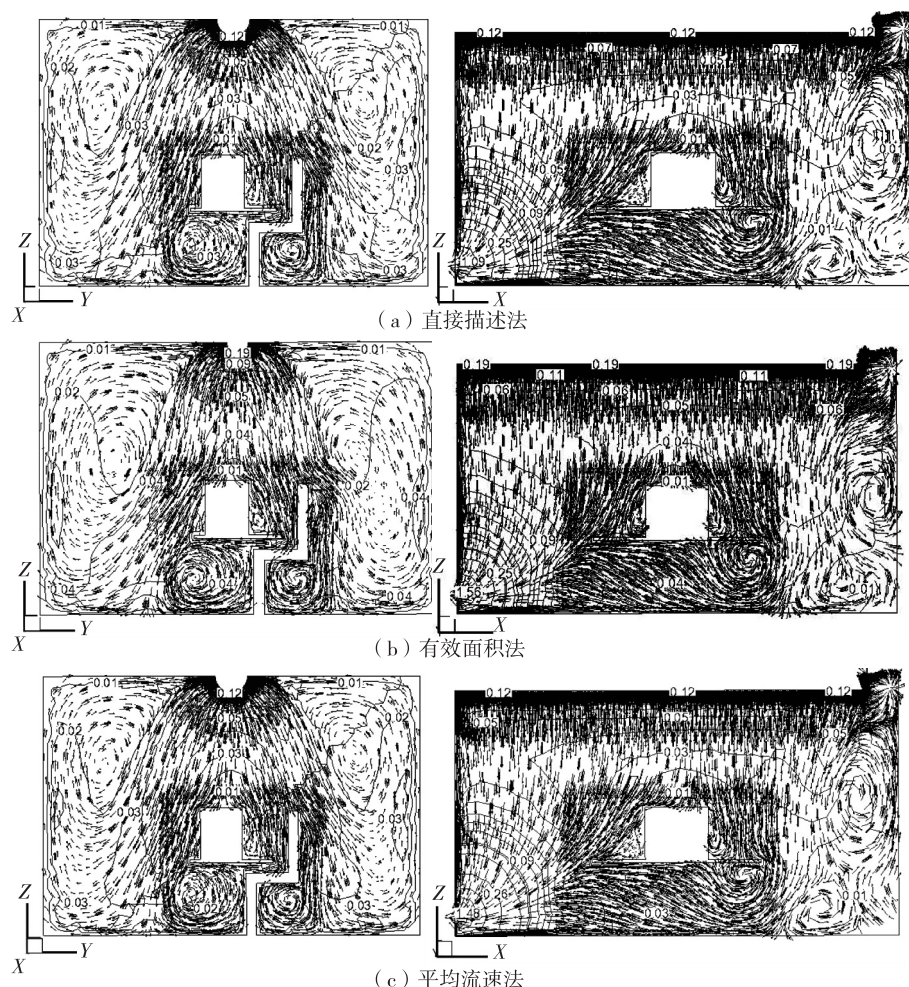


图 2 基于 3 种方法得到的气流在典型截面($X=2.1$ 和 $Y=1.8$)上的速度分布

Fig.2 Velocity distribution on typical section ($X=2.1$ and $Y=1.8$) by three methods

为了细化 3 种方法得到气流速度分布的差异,选择了 3 个截面($Y=0.9\text{m}$, 1.8m 和 2.7m)气流速度值进行量化对比分析。图 3~图 5 显示了 3 个截面上 84 个位置 3 种方法获得的气流速度分布对比情况。从图中可以明显地看出 3 种方法得到的气流速度分布总体变化趋势一致。然而,直接描述法获得的气流速度分布和平均流速法得到的气流速度分布吻合度较好,而有效面积法得到的气流速度分布则以一定的偏差度偏离了其他 2 种方法得到的气流速度分布,尤其是在纤维空气分布系统下方区域(Y

$=1.8\text{m}$),有效面积法得到的气流速度略大于其他 2 种方法的预测结果。

3.2 气流轨迹分布

图 6 (a)~(d)给出了纤维空气分布系统局部气流可视化与基于 3 种不同方法获得的不同迭代次数(30、100 和 500)时的室内气流预测结果。从图中可以看出,气流离开纤维空气分布系统的初期,数值模拟预测得到的气流场分布结果与可视化结果是相似的。气流充满纤维空气分布系统空腔后从整个壁面

同时向室内扩散,流速较低,方向垂直于纤维壁面,受柯恩达效应的影响,贴壁(天花板)区域气流水平流速逐渐减小,同时在惯性力的作用下流动。有效面积法得到的纤维空气分布系统下方区域气流汇集

程度大于其他2种方法,同时两侧区域形成的气流漩涡区域也大于其他2种方法得到的漩涡区域。这与图2和图3~图5得到的结果相一致。

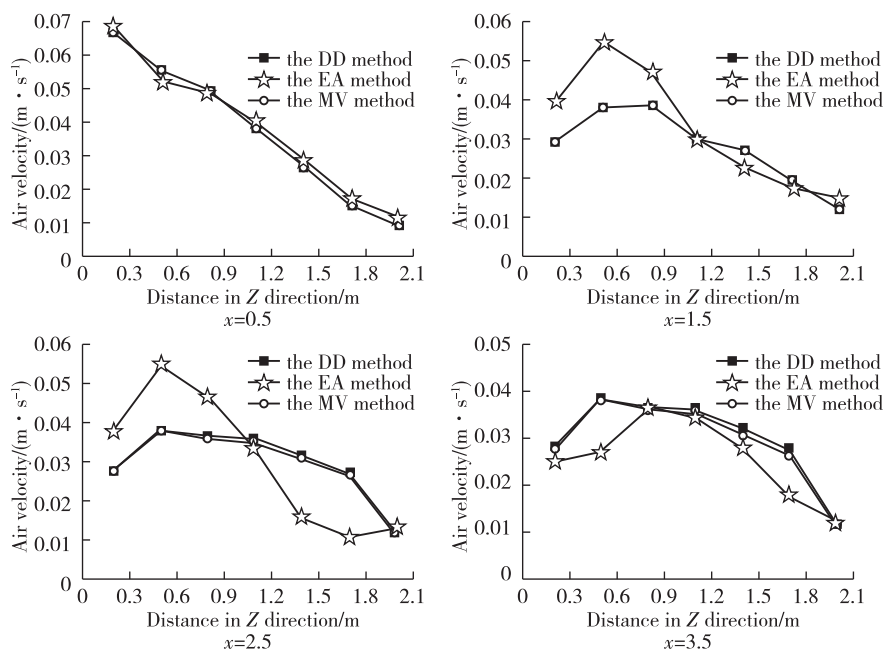


图3 截面 $Y=0.9$ m 上气流速度垂直分布

Fig.3 Velocity distribution on the vertical direction on $Y=0.9$ m section

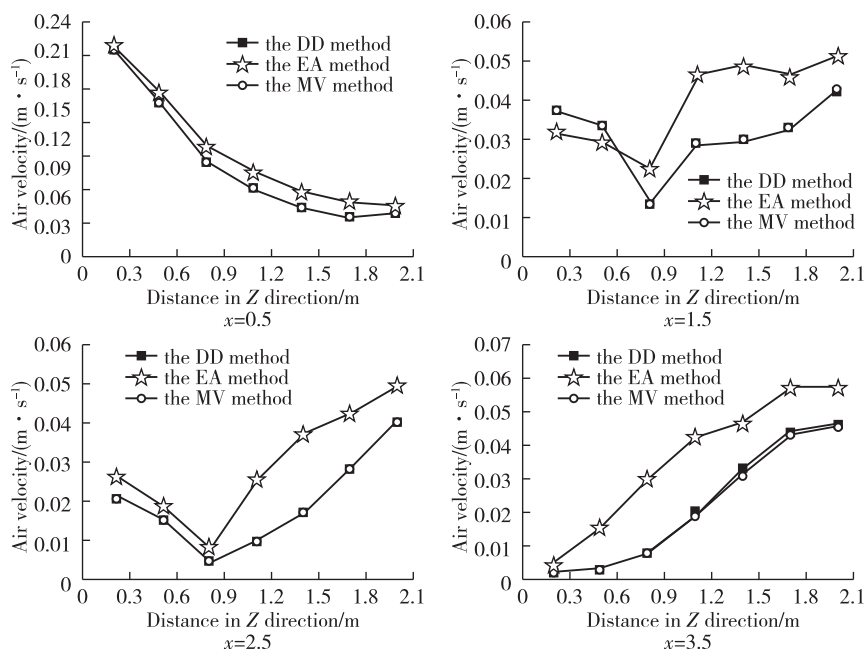


图4 截面 $Y=1.8$ m 上气流速度垂直分布

Fig.4 Velocity distribution on the vertical direction on $Y=1.8$ m section

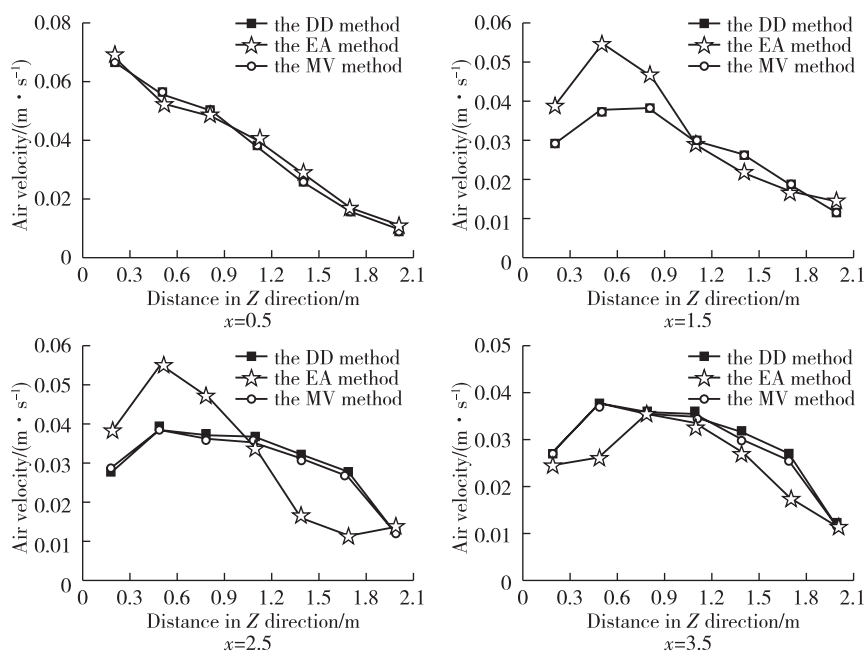
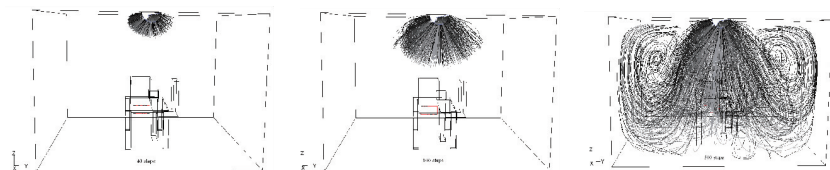


图 5 截面 $Y=2.7$ m 上气流速度垂直分布

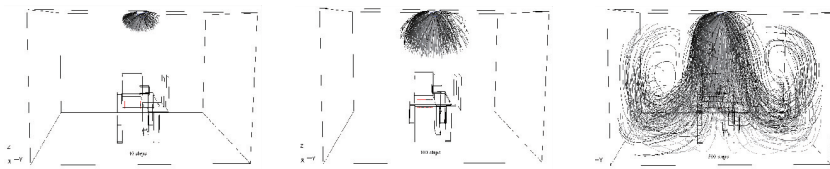
Fig.5 Velocity distribution on the vertical direction on $Y=2.7$ m section



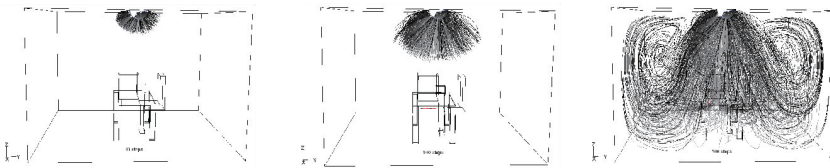
(a) 出风口局部气流可视化结果



(b) 直接描述法



(c) 有效面积法



(d) 平均流速法

图 6 气流轨迹瞬态分布

Fig.6 Streamline distribution of airflow

3.3 所需的计算资源

表1给出了3种描述方法所需的计算资源,包括计算区域、网格数和迭代步数。从表1可以看出,采用有效面积法和平均流速法时,计算区域、网格类型相同,网格数和计算步数也相差不大。而直接描述法因考虑了纤维空气分布系统空腔和纤维结构层内气流的流动,需要增加2,193,342的结构网格数,网格数和计算迭代步数比有效面积法分别增加了270%和197%,比平均流速法分别增加了216.3%和200%。

4 结 论

对渗透式纤维空气分布系统物理模型采用了直接描述法、平均流速法和有效面积法等3种方法进行描述。通过典型截面上气流速度分面,以及相应计算所需资源对比分析,发现:

- 1)直接描述法、有效面积法和平均流速法能获得相似的室内气流场分布预测结果;
- 2)直接描述法考虑了纤维空气分布系统结构参数的影响,需要消耗较多的计算资源;
- 3)平均流速法需要较少的计算资源,但仍需要考虑纤维孔隙率;
- 4)有效面积法不仅需要较少的计算资源,而且不需要考虑纤维孔隙率,适合工程设计中快速预测基于渗透式纤维空气分布系统的室内气流场分布,评价空调方案的优劣;
- 5)渗透式纤维空气分布系统出风流速低,浮升力的影响较大,后续将开展非等温条件下3种方法对气流场分布特性预测结果的差异性。

参考文献:

- [1]杜肯索斯风系统有限公司.杜肯索斯纤维风管空气分布在 HVAC 中的应用[J]. 空调暖通技术,2006(2): 32-35.
- [2]PINKALLA C. Fabric duct air dispersion for HVAC systems[J]. Construction Specifier,2003, 56(6): 57-58.
- [3]冀兆良,江建. 低温送风空调系统末端送风装置的研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版),2009,41(1): 100-105.
- [4]NIELSEN P V, TOPP C, SONNICHSEN M, et al. Air distribution in rooms generated by a textile terminal-comparison with mixing and displacement ventilation[J]. Ashrae Trans, 2005, 8(1): 733-739.
- [5]NIELSEN P V, HYLDGAARD C E, MELIKOV A, et al. Personal exposure between people in a room ventilated by textile terminals-with and without personalized ventilation[J]. Hvac & R Research, 2007, 13(4): 635-643.
- [6]陈孚江,陈焕新,谢军龙,等. 纤维空气分布系统渗透送风对室内舒适性的影响[J]. 暖通空调,2010, 40(8): 140-143.
- [7]FONTANINI A, OLSEN M G, GANAPATHYSUBRAMANIAN B. Thermal comparison between ceiling diffusers and fabric ductwork diffusers for green buildings[J]. Energy and Buildings, 2011, 43(11): 2973-2987.
- [8]陈孚江,陈焕新,董媛媛,等. 渗透式纤维空气分布系统空气速度分布特性[J]. 华中科技大学学报(自然科学版),2010, 38(11): 96-99.
- [9]CHEN F, CHEN H, XIE J. Numerical simulation on air dispersion of the fabric air distribution system in pure-penetration mode[C]//Proceedings of the International Conference the Sixth International Symposium on Heating, Ventilating and Air Conditioning. Nanjing: [s. n.], 2009.
- [10]李浩,黄晨,王昕,等. 喷射渗透式布袋风管送风系统送风特性分析[J]. 暖通空调,2012, 42(2): 57-61.
- [11]CHEN F, CHEN H, XIE J, et al. Characterizing airflow through fabric air dispersion system using a porous media model[J]. Energy and Buildings, 2011, 43(2): 665-670.
- [12]CHEN F, CHEN H, XIE J, et al. Air distribution in room ventilated by fabric air dispersion system[J]. Building and Environment, 2011, 46(11): 2121-2129.
- [13]CHEN F, CHEN H, WANG H, et al. Parametrical analysis on characteristics of airflow generated by fabric air dispersion system in penetration mode[J]. Energy and Buildings, 2013, 67: 365-373.
- [14]陈孚江. 纤维空气分布系统通风特性数值模拟及实验研究[D]. 武汉: 华中科技大学,2011.
- [15]NIELD D A, BEJAN A. Convection in porous media [M]. New York: Springer Verlag, 2006.
- [16]王福军. 计算流体动力学分析: CFD 软件原理与应用 [M]. 北京:清华大学出版社有限公司,2004.
- [17]NEALE G, NADER W. Practical significance of Brinkman's extension of Darcy's law: coupled parallel flows within a channel and a bounding porous medium [J]. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 1974, 52(4): 475-478.

(责任编辑:李艳)