

湍流模型和壁面函数对室内空气流动 数值模拟的影响

谢海英, 张 双, 关 欣

(上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093)

摘要: 以室内有隔板的低雷诺数空气流动模型的试验数据为依据, 利用 ANSYS Fluent 软件, 比较了 4 种湍流统计模型(标准 $k-\epsilon$ 模型、可实现 $k-\epsilon$ 模型、重整化群 $k-\epsilon$ 模型和 SST $k-\omega$ 模型)及 4 种壁面函数(标准壁面函数、可伸缩壁面函数、非平衡壁面函数和增强型壁面函数)对室内空气时均流场的预测能力。结果表明, 重整化群 $k-\epsilon$ 模型的预测效果相对最佳, 但 4 种湍流模型的预测能力差别不显著, 预测值与试验值均吻合较好。对于中等疏密度网格, 标准壁面函数对网格和流动的适应性最好, 预测能力最佳, 而其他 3 种壁面函数的处理能力一般。

关键词: 湍流模型; 壁面函数; 室内空气流动; 数值模拟

中图分类号: O 357.5 **文献标志码:** A

Effects of Turbulence Models and Wall Functions on the Numerical Simulation of Indoor Air Flow

XIE Haiying, ZHANG Shuang, GUAN Xin

(School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Based on the experimental velocity data of a model room with a panel under low Reynolds number condition, the effects of four turbulence models (the standard $k-\epsilon$ model, realizable $k-\epsilon$ model, RNG $k-\epsilon$ model and SST $k-\omega$ model) and four wall functions (the standard wall function, scalable wall function, non-equilibrium wall function and enhanced wall function) on indoor air flow simulations were compared using ANSYS Fluent software. The results show that all the four turbulence models can well predict the flow and the RNG $k-\epsilon$ turbulence model performs best, but the prediction difference among the four models is not significant. When adopting medium meshes, the standard wall function can give satisfactory results while the performances of other three wall functions are not very well.

Keywords: turbulence models; wall functions; indoor air flow; numerical simulation

收稿日期: 2016-10-10

基金项目: 上海理工大学博士启动基金资助项目

第一作者: 谢海英(1973-), 女, 讲师。研究方向: 环境流体力学数值模拟。E-mail: xiehaiying_usst@163.com

建筑通风能有效改善室内空气质量^[1~3]. 为评价通风效果, 需要准确了解建筑内的流场特性. 与试验测量方法相比, 数值模拟方法成本低、周期短, 但模拟的难点之一是如何选取合适的湍流模型^[2~10], 尤其低速送风时, 近壁面区的低雷诺数效应明显. 因此, 文献认为对近壁面区流动应直接计算, 湍流模型也应采用 LES(大涡模拟)法^[2], 但该方法的计算成本相对较高. 为明确各湍流模型的预测效果、壁面附近流动的处理以及网格要求, 本文以机械通风模型的试验数据为依据^[3], 采用 ANSYS Fluent 软件, 对几种常用的湍流统计模型和壁面函数的预测能力进行比较, 为建筑通风问题的数值预测提供参考.

1 计算方法

建筑通风模型取自试验研究^[3], 如图 1 所示, 房间模型内的隔板位于模型中间且高度为房间高度 H 的一半, 气流由进口流入, 出口流出, 进、出口面的尺寸相同且位置关于隔板对称. 模拟流动时, 建筑内外无温差, 控制方程为连续性方程、Navier-Stokes 方程和湍流模型方程, 方程具体形式可参见文献^[11]. 坐标原点 O 位于房间左侧墙与地面交线的中点, 沿房间长、宽和高的方向依次为 x , y 和 z 轴. 试验^[3]给出了图 1 中 L_1 (位于进口面中心且垂直该面的线段) 和 L_2 (位于房间对称面上且 $z = H/4$ 的线段) 处的 z 向速度 u_z . 为方便讨论, 以隔板为界, 将流域分为进口区域和出口区域, 并将 L_2 上靠近隔板右侧壁面附近区域定义为 A 域, L_2 与 L_1 的交点附近区域定义为 B 域, L_2 与模型右侧墙面相交的附近区域定义为 C 域. 命名 $y = 0$ 的面为 sym 面, 由于整个流动关于 sym 面对称, 因此, 计算域沿 sym 面取为模型的一半. 进口处气流速度按试验取为 0.235 m/s ^[3], 湍流度设为 1% , 进口处的雷诺数 $Re = 1\,500$, 出口采用出流条件, 其余墙面采用固壁边界条件. 计算采用结构化非均匀网格, 壁面附近网格加密, 计算共采用了 3 套网格, 靠近壁面的第一层网格大小(与壁面垂直方向的尺寸)及网格总数如表 1 所示. 经计算, 房间内隔板厚度对模拟结果几乎无影响, 因此, 将隔板设为零厚度. 计算收敛的标准为残差达到 10^{-5} , 且流场无变化.

针对壁面附近不同的网格情况, ANSYS Fluent 有 4 种壁面函数^[12], 分别为标准壁面函数(standard wall function)、可伸缩壁面函数(scalable wall function)、非平衡壁面函数(non-equilibrium wall

function) 和增强型壁面函数(enhanced wall function), 本文首先进行网格独立性分析和湍流模型预测的比较, 最后讨论 4 种壁面函数的影响.

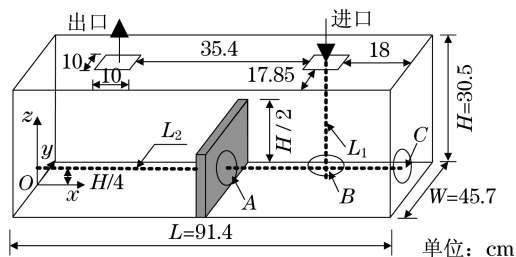


图 1 通风房间模型示意图

Fig.1 Schematic view of a ventilation room model

表 1 网格情况

Tab.1 Mesh parameters

网格名称	壁面第一层网格的大小/mm	网格总数
mesh - 12.5	12.5	32 400
mesh - 8	8	120 176
mesh - 5	5	499 590

2 计算结果与分析

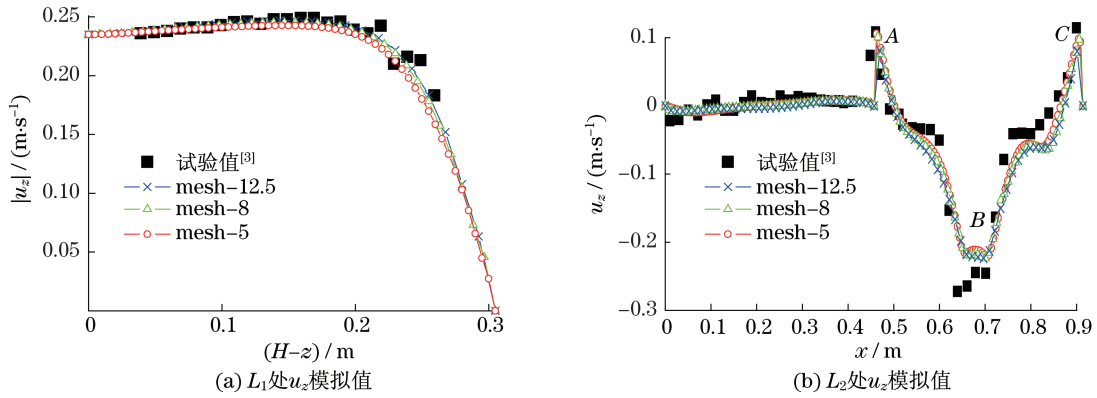
2.1 网格无关性分析

图 2 是采用标准 $k-\epsilon$ 模型和标准壁面函数时得到的 L_1 和 L_2 处速度值. 由该图可知, 3 种密度的网格模拟结果变化不大, 且趋势一致, 并与试验值吻合较好. 在 L_1 上且离开进口 0.2 m 附近, 标准 $k-\epsilon$ 模型对 u_z 的预测值略小于试验值, 这说明模拟的进口速度衰减略快于实际情况. 在 L_2 的 B 域附近, 标准 $k-\epsilon$ 模型的 u_z 略小于试验值, 在 L_2 的 A 域和 C 域, 随着网格的加密, u_z 逐渐增大且更接近试验值. 3 种网格的预测值可认为是网格独立解, 为尽可能提高计算精度, 本文选用 mesh - 5 网格进行后续研究.

2.2 湍流模型的影响

为考察湍流统计模型对室内气流的模拟效果, 本文在 mesh - 5 网格上, 选取标准 $k-\epsilon$ 、可实现 $k-\epsilon$ 、重整化群 $k-\epsilon$ 湍流模型模拟室内气流, 且均采用标准壁面函数. 考虑到室内气流的低雷诺数流动特征, 还选取了 SST $k-\omega$ 模型, 4 种模型的模拟结果如图 3 所示, 图中还给出了文献采用 LES 的模拟值^[2].

由图 3 可知, 所有模型的预测值都与试验值吻合较好, 但在某些位置存在一定的差异. 由图 3(a) 可知, 4 种湍流统计模型对 L_1 处 u_z 的预测能力基

图2 标准 $k-\epsilon$ 模型及标准壁面函数在不同网格时的模拟结果Fig.2 Velocity comparison among the simulation results with different meshes using the standard $k-\epsilon$ model and standard wall function

本接近,并与 LES 的预测结果也基本相同.由图 3(b)可知,在 L_2 的 $x=0.1\sim 0.4$ m 范围内,重整化群 $k-\epsilon$ 模型的 u_z 预测值与试验值吻合最好;在 L_2 的 A 域,重整化群 $k-\epsilon$ 模型、可实现 $k-\epsilon$ 模型和标准 $k-\epsilon$ 模型的 u_z 预测值与试验值几乎相同,而 SST $k-\omega$ 模型和 LES 的模拟值均比试验值大 40% 左右;在 L_2 的 $x=0.6$ m 附近,重整化群 $k-\epsilon$ 模型和可实现 $k-\epsilon$ 模型比标准 $k-\epsilon$ 模型的预测有改善,但略逊于 SST $k-\omega$ 模型和 LES 的模

拟值;在 B 域附近,所有模型的 u_z 预测值均小于试验值;在 C 域附近,重整化群 $k-\epsilon$ 、可实现 $k-\epsilon$ 、标准 $k-\epsilon$ 和 SST $k-\omega$ 模型均与试验值吻合,但 LES 的 u_z 值略小于试验值.综上所述,在本文选取的 4 种湍流统计模型中,就与 u_z 试验值的吻合度而言,重整化群 $k-\epsilon$ 模型的预测能力相对最好, SST $k-\omega$ 模型次之,可实现 $k-\epsilon$ 模型和标准 $k-\epsilon$ 模型预测略差,且湍流统计模型在时均速度的预测上与 LES 的预测能力相当.

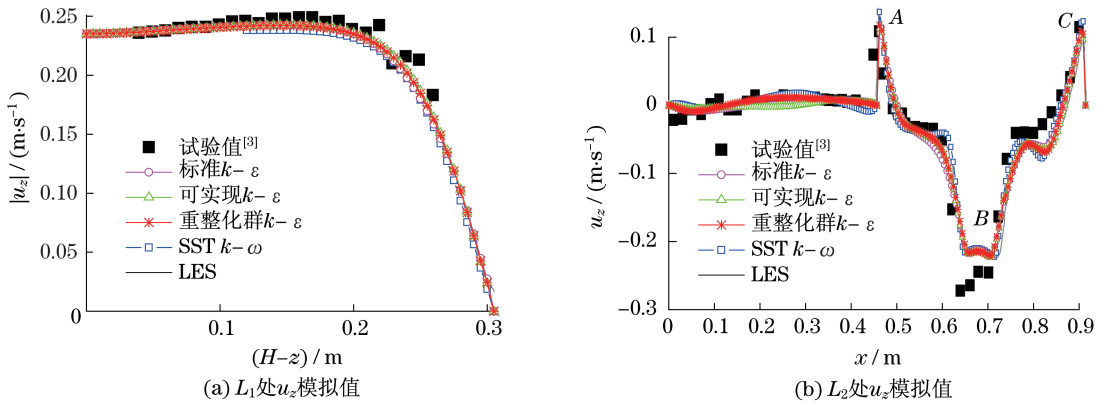


图3 4种湍流模型及标准壁面函数的模拟结果

Fig.3 Velocity comparison among the simulation results by the four turbulence models and standard wall function

图 4(见下页)是重整化群 $k-\epsilon$ 模型在 sym 面的流场图和压力场图.由图 4(a)可知,进口处的气体射流在遇到地板、隔板和右侧墙面时,形成 2 个旋涡区,分别位于隔板右侧和右墙面附近.进口区域的流动速度明显大于出口区域的,尤其在出口区域的地板附近,气体流速很小,在出口域的一半高度处,也有一个较弱的旋涡区.图 4(b)显示气流进口的射流总压最大,然后沿着射流域外边界向外快速减小,出口区域总压最小,总压分布与图 4(a)的流动

趋势一致.

2.3 壁面函数的影响

由于送风速度较低,室内流动为非充分发展湍流,近壁面区的低雷诺数效应显著,因此,有必要进一步讨论近壁面的处理,即壁面函数的选用.对于标准壁面函数,文献[12]建议壁面无量纲距离 $y^+ > 15$ ($y^+ = C_\mu^{1/4} k_P^{1/2} y_P / \nu$, $C_\mu = 0.09$, k_P 为邻近壁面节点 P 的湍动能, y_P 为节点 P 与壁面间的距离, ν 为流体运动黏度系数),即邻近壁面的第一层网格不

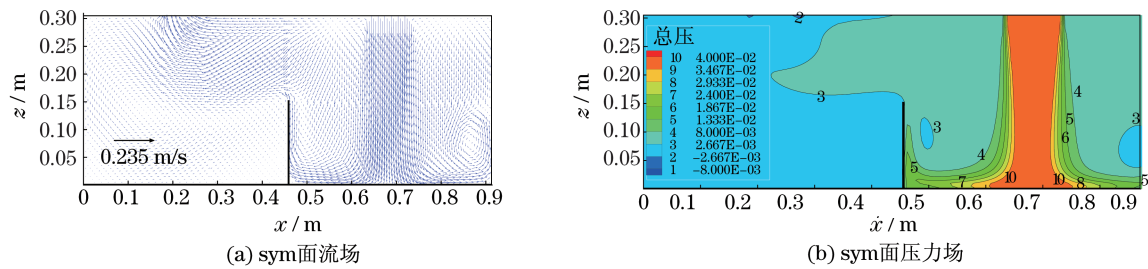


图 4 重整化群 $k-\varepsilon$ 模型及标准壁面函数模拟的流场与压力场

Fig.4 Flow and pressure field by using the RNG $k-\varepsilon$ turbulence model and standard wall function

能太小,否则会影响数值解的准确性.表 2 是 3 种模型在 3 种网格和标准壁面函数时的 $y^+_{\max}$ (计算域中固壁面 y^+ 的最大值),因 SST $k-\omega$ 模型没有壁面函数选用问题,因此,表 2 未给出该模型的 y^+ . 显然,3 种网格不满足 $y^+ > 15$ 的要求,但若将壁面处网格继续增大,则计算收敛性变差,且从前文分析可知,3 种网格的模拟值与试验值的吻合度均较好,因此,标准壁面函数对中等密度网格的适应性良好.

图 5 是采用重整化群 $k-\varepsilon$ 模型和 4 种壁面函数时的模拟值比较.由图 5 可知,标准壁面函数、可

伸缩壁面函数、非平衡壁面函数与增强型壁面函数的计算结果有较明显的差异.

表 2 壁面第一层网格的无量纲距离

Tab.2 Non-dimensional distance near wall for the first layer of mesh

网格	标准 $k-\varepsilon$ 模型	可实现 $k-\varepsilon$ 模型	重整化群 $k-\varepsilon$ 模型
mesh-12.5	<15.0	<9.8	<9.6
mesh-8	<11.7	<8.1	<7.4
mesh-5	<8.0	<5.4	<5.4

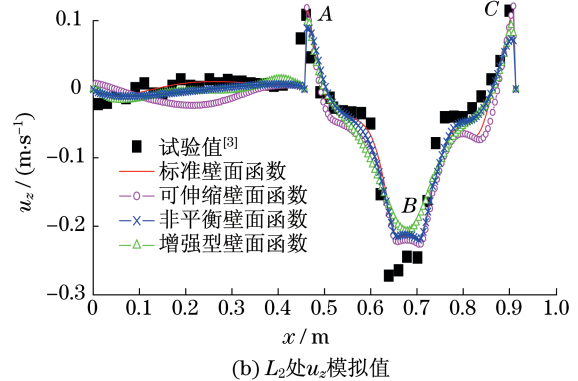
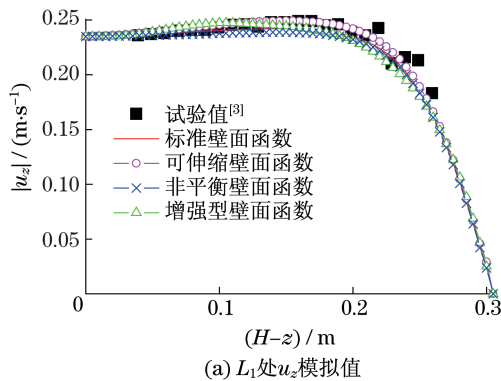


图 5 重整化群 $k-\varepsilon$ 模型和 4 种壁面函数模拟结果比较

Fig.5 Velocity comparison among the results by the RNG $k-\varepsilon$ model and four wall functions

文献[12]建议在 $y^+ < 11$ 时采用可伸缩壁面函数,以避免标准壁面函数的模拟值因网格过密而可能偏离实际值.从表 2 可知,mesh-5 网格的 y^+ 满足可伸缩壁面函数的适用条件,该壁面函数对流动的整体预测尚可(见图 5),但在 L_2 的 $x = 0.1 \sim 0.4$ m 和 $x = 0.5$ m 附近(隔板右侧)的 u_z 预测值均偏小,与试验值的吻合度不如标准壁面函数的模拟值.

图 5 表明,非平衡壁面函数的总体预测要好于可伸缩壁面函数的,尤其在 L_2 的 $x = 0.8$ m 附近,模拟的 u_z 与试验值的吻合度要好于标准壁面函数和 LES(见图 3(b)),但对 L_2 的 A 域和 C 域速度预

测值均偏小.非平衡壁面函数相比于标准壁面函数的修正是考虑沿流向的压力梯度造成的影响,如近壁区速度分布不再服从对数分布律,从而其湍动能的生成与耗损并不平衡.从图 4(b)的压强分布图来看,在隔板及模型右边墙壁附近,沿流向的压强变化并不显著,因此,非平衡壁面函数对上述区域的速度预测反而不如标准壁面函数.

与非平衡壁面函数类似,增强型壁面函数对 L_2 的 A 域和 C 域速度预测值也偏小(见图 5(b)).同时,该壁面函数预测的 u_z 在 B 域附近沿着 x 正、负方向迅速减小,而其他几种壁面函数的 u_z 值在 B 域基本不变(其范围与进口尺寸基本相同),其值略

小于进口速度,也小于试验值.增强型壁面函数在 $y^+ \approx 1$ 时采用低雷诺数的两层模型,当第一层网格布置在湍流区时,采用增强型壁面函数求解壁面物理量.网格 mesh-5 有 $3 < y^+ < 10$,即为中等疏密度网格,尽管该壁面函数对中等疏密网格在固壁附近的速度型线有渐变的处理^[12],但从模拟结果来看,其预测效果并不理想,因此,增强型壁面函数的预测能力还需进一步探讨.

总体来说,本文模拟的室内流动由于壁面函数不同造成的模拟结果差异要明显大于湍流模型的差异(见图3(b)和图5(b)),因此,模拟时应谨慎选取壁面函数.

3 结 论

以室内空气流动的模式试验数据为依据,对有隔板的室内低雷诺数流动进行了数值分析.在得到网格独立解的基础上,采用中等疏密度网格,比较了4种湍流统计模型和4种壁面函数对流动模拟的影响,结论如下:

a. 标准 $k-\epsilon$ 模型、可实现 $k-\epsilon$ 模型和重整化群 $k-\epsilon$ 模型(采用标准壁面函数时)以及SST $k-\omega$ 模型均能较好地预测室内空气流动,重整化群 $k-\epsilon$ 模型的预测效果相对最好,SST $k-\omega$ 的预测能力次之,湍流统计模型对时均流速的预测能力与LES基本相当;

b. 在网格或流动特征不满足标准壁面函数的适用条件时,尽管3种壁面函数(可伸缩壁面函数、非平衡壁面函数与增强型壁面函数)提出了改进,但在本文模拟的流动中并未表现出比标准壁面函数更好的处理能力,相反,标准壁面函数却表现出对网格和流动良好的适应性;

c. 对于本文模拟的室内空气流动,壁面函数不同造成的模拟结果差异要明显大于湍流模型的差异,因此,在流动的模拟中对壁面函数的选取应更谨慎.

参考文献:

[1] THAM K W. Indoor air quality and its effects on humans—a review of challenges and developments

in the last 30 years[J]. Energy and Buildings, 2016, 130:637–650.

- [2] TIAN Z F, TU J Y, YEOH G H, et al. Numerical studies of indoor airflow and particle dispersion by large Eddy simulation[J]. Building and Environment, 2007, 42: 3483–3492.
- [3] POSNER J D, BUCHANAN C R, DUNN-RANKIN D. Measurement and prediction of indoor air flow in a model room[J]. Energy and Buildings, 2003, 35(5): 515–526.
- [4] LI X D, YAN Y H, SHANG Y D, et al. An Eulerian-Eulerian model for particulate matter transport in indoor spaces[J]. Building and Environment, 2015, 86: 191–202.
- [5] LI X D, INTHAVONG K, GE Q J, et al. Numerical investigation of particle transport and inhalation using standing thermal manikins [J]. Building and Environment, 2013, 60:116–125.
- [6] LIU W, WEN J Z, LIN C H, et al. Evaluation of various categories of turbulence models for predicting air distribution in an airliner cabin [J]. Building and Environment, 2013, 65:118–131.
- [7] MERONEYR N. Ten questions concerning hybrid computational/physical model simulation of wind flow in the built environment[J]. Building and Environment, 2016, 96:12–21.
- [8] 李孔清, 龚光彩, 汤广发. V2F模型在室内空气流动数值模拟中与其他湍流模型比较研究[J]. 暖通空调, 2009, 39(1):37–42.
- [9] 化亚魏, 白莉, 车文昊, 等. 三种湍流模型在空气射流数值模拟上的性能比较[J]. 吉林建筑大学学报, 2015, 32(1):51–54.
- [10] BANGALEE M Z I, MIAU J J, LIN S Y, et al. Flow visualization, PIV measurement and CFD calculation for fluid-driven natural cross-ventilation in a scale model[J]. Energy and Buildings, 2013, 66:306–314.
- [11] 谢海英, 陈康民. 点源与建筑物窗口布置对室内空气质量的影响[J]. 上海理工大学学报, 2010, 32(5): 413–417.
- [12] ANSYS Incorporated. ANSYS fluent theoryguide[M]. Version 13. 0. Canonsburg, PA: ANSYS Incorporated, 2010.

(编辑:石 瑛)