

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2013.S1.012

钢筋混凝土框架结构高层建筑风振特性

岳高伟, 刘坤, 贾慧娜

(河南理工大学 土木工程学院, 河南 焦作 454000)

摘要:针对钢筋混凝土框架结构高层建筑风载作用下的安全性问题,通过建立其在大气流场中的力学模型,数值模拟了高层建筑的风载作用形态,同时对结构进行模态分析,通过仿真清楚地看到流场的风速分布图、风场的压力图。高层建筑前后壁面风速和压力变化都将对其振动特性产生显著地影响。通过模态分析得到超高层建筑在风载作用下的固有频率和振型形式,并对此采取必要的措施,从而避免在使用中由于共振的因素造成不必要的损失。高层建筑在风荷载下的谐波响应进行了分析,避免共振发生。

关键词:高层建筑;风振特性;模态分析;谐波响应

中图分类号:TU973 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2013)S1-0052-05

Wind Vibration Characteristics of High-rise Building of RC Frame Structures

Yue Gaowei, Liu Kun, Jia Huina

(School of Civil Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, Henan, P. R. China)

Abstract: For high-rise building of RC Frame Structures, its security problems with wind load is more important, in this paper the mechanical model is established to simulate the atmospheric flow field around high-rise building, and the modal analysis is carried on for the structure. The simulation results show that velocity contour of wind field and pressure change contour describe the wind field characteristics. Wind velocity and pressure change near frontwall and backwall will affect obviously the vibration characteristics of high-rise building. Natural frequency and vibration mode can be obtained though modal analysis of high-rise building with wind load action, and necessary measures will be taken to avoid unnecessary losses due to resonance factors. And harmonic response is analyzed for high-rise building with load action to avoid resonance.

Key words: high-rise building; Wind vibration characteristics; modal analysis; harmonic response

近年来高层建筑向着更高、更柔的方向发展,来风在建筑物的周围会形成湍流风场,并引起建筑物一定幅度的振动^[1]。对于高层和高耸结构的风振动力反应主要有以下3方面的考虑:第一,由风振产生的惯性力在结构中引起附加内力;第二,由于风振动力反应发生的频度较高,有可能使结构产生疲劳效应;第三,建筑结构的振动加速度会使生活和工作中的人产生不舒适感。风对结构的作用受到风的自然特性、结构的动力特性以及风和结构的相互作用的制约,在风的作用下,由于结构的振动对空气力的反馈作用,产生一种自激振动机制,如颤振和驰振达到临界状态时,将出现危险的发散振动。

目前进行风荷载预测的主要手段有CFD数值模拟、风洞测试以及动态风振计算等。其中CFD数值模拟基于经验湍流模型,可十分方便地对结构表面平均风压和周围流场进行预测,由于其周期短、费用低而被广泛应用^[2-4],但由于湍流模型、壁面函数等因素的影响^[5-6],目前还仅用于定性研究。

1 κ - ϵ 湍流模型

湍流作用下的钝体空气动力学方程包括连续性方程和

Navier-Stokes 方程^[7],即

$$\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial t} + \tilde{u}_j \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \tilde{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\nu \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_i} \right) \quad (2)$$

式中 u_i ($i=1,2,3$) 为 x, y, z 方向的速度分量, p 为压力, ρ 为空气密度, ν 为气流的运动粘性系数,上标“~”表示瞬时量。

1.1 湍流流动的 Reynolds 时均方程

将各瞬时量 u_i, p 分解成平均量(用大写字母表示)和脉动量(用小写字母表示)之和^[8],即

$$\tilde{u} = U_i + u_i \quad \tilde{p} = P + p \quad (3)$$

将式(3)代入到方程(1)、(2)中,并对方程中的每一项作平均化运算可得到平均量的控制方程,得到湍流流动的 Reynolds 时均方程

$$\frac{\partial U_j}{\partial x_i} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\nu \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(-\overline{u_i u_j} \right) \quad (5)$$

收稿日期:2013-03-05

基金项目:河南省重点学科资助项目(509919)

作者简介:岳高伟(1977-),男,博士,主要从事高层建筑气动特性研究,(E-mail)mxlygw@163.com。

其中二阶关联项 $-\overline{u_i u_j}$ 称为 Reynolds 应力,它代表了脉动速度对平均流动的影响。

1.2 湍流封闭模型

引入了 Boussinesq 假设^[9],湍流脉动所造成的应力可以表示为:

$$-\overline{u_i u_j} = \nu_t \left(\frac{\partial U_j}{\partial x_i} + \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) - \frac{2}{3} \kappa \delta_{ij} \quad (6)$$

式中, ν_t 是紊流涡粘性系数, k 为紊流动能。

由三维非稳态的 N-S 方程可导出模化后的 k 方程与 ϵ 方程:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(C_k \frac{\kappa^2}{\epsilon} + \nu \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] - \overline{u_i u_j} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \epsilon \quad (7)$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + U_j \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(C_\epsilon \frac{\kappa^2}{\epsilon} + \nu \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] - C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{\kappa} \overline{u_i u_j} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - C_{\epsilon 2} \frac{\epsilon^2}{\kappa} \quad (8)$$

时均化的连续性方程(4), N-S 方程(5)和模型化了的 k 方程(6)、 ϵ 方程(8)以及 Reynolds 应力的涡粘性系数表达式(6)组成了标准 $k-\epsilon$ 双方程模型的封闭的控制方程组。

2 模型的建立

2.1 高层建筑结构的有限元模型

某楼为 110 m 高的钢筋混凝土框架结构体系。建筑物平面一字形,受场地限制,宽度为 35 m,所有楼板和屋面皆为 100 mm 厚的现浇混凝土板,混凝土设计强度等级均取 C30,屋面活载取 3.0 kN/m²,形体系数取 1.0。

1) 单元类型:框架梁、柱单元可承受单向的拉伸、压缩、扭曲和弯曲。楼板单元在每一个结点上有一个自由度,即沿着三个坐标轴方向的自由度和分别绕着三轴的旋转自由度。在单元中考虑应力刚度和大变形的影响,可施加面荷载。实常数主要有单元厚度,附加质量的形式取质量/单位面积。

2) 材料模型:钢筋混凝土的弹性模量为 31.0 GN/m²,泊松比 0.2,密度为 2 500 kg/m³。

3) 创建几何模型:采用自底向上进行实体建模时,从最低级的图元向上构造模型,即:首先定义关键点,然后依次是相关的线、面、体。

4) 创建单元:材料和单元类型已定,通过网格划分来创建单元。

框架结构的整体模型如图 1 所示。

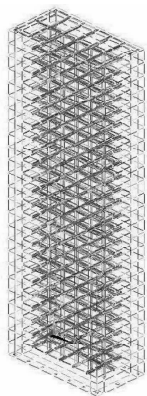


图 1 高层建筑的模型构造图

2.2 高层建筑流场模型

计算区域的选取:长度为最高建筑物高度的 10 倍,计算高度为最高建筑物高度的 4 倍。

边界条件的选取:入口边界条件为速度入口边界,出流面设定为完全发展出流边界,结构表面及地面采用无滑移的壁面条件。来流空气为不可压缩的理想气体,计算区域的离散采用结构网格,网格均匀布置,建筑流场模型如图 2。

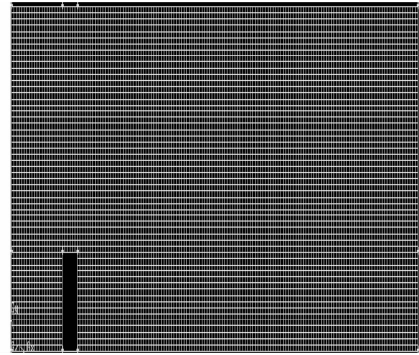


图 2 高层建筑流场模型

来流风速从地面到 10 m 高度,风速 V_1 为均匀风;自 10 m 高度以上,风速服从下述分布的指数风, $V/V_1 = (Z/Z_1)^\alpha$,其中 $\alpha = 0.22$, $Z_1 = 10$ m, $V_1 = 5, 8, 15$ m/s。

3 高层建筑流场数值模拟

从图 3 中可以看出,在建筑物顶部高处存在风速最高点,此处风速变化剧烈,当来流风速 5 m/s,顶部最大风速达到 28.4 m/s,与 110 m 高处入口边界的风速比值为 3.35;当来流风速 8 m/s,顶部最大风速达到 45.5 m/s,与 110 m 高处入口边界的风速比值为 3.35;当来流风速 15 m/s,顶部最大风速达到 85.8 m/s,与 110 m 高处入口边界的风速比值为 3.35;根据以上数据结果显示,风速最大值随着来流风速的增加而增大,速度比值保持不变。由于建筑物的遮挡造成的高风速区的范围随风速的提高有明显的变化,下游风速仅随来流风速的增加而增加。而且,它们所形成的漩涡尺寸并无明显变化,分布基本相同。图 4 是不同来流风速下高层建筑前后的压力变化云图。从图 4 可以看出,在高层建筑的迎风面,压力在偏下部略有增大,而在上部压力减小;在背风面,压力都是减小,即形成负压区;在高层建筑顶部,压力变化最大。并且随着风速增大,压力在不同区域的变化量也变大。

图 5 为高层建筑迎风、背风壁面的风速随高度的变化曲线图。从图 5 可以看出,在高层建筑的迎风面,壁面风速随高度先增大,在高层建筑顶部达到最大,而后随高度增大风速逐渐减小;而在高层建筑背风面,壁面风速随高度先增大后减小,至高层建筑顶部减小至最小,而后风速迅速增大,至某一高度后风速逐渐减小。图 6 为高层建筑迎风面、背风面壁面压力变化量随高度的变化曲线图。在风场中,高层建筑前后壁面的风压急剧减小,并且随着风速增大,迎风面和背风面壁面压力变化越大,例如,在来流风速为 5、8 和 15 m/s 时,迎风面风压压降最大值分别为 376.68、884.09 和 3 333.49 Pa,背风面风压压降最大值分别为 389.54、1 046.39 和 3 596.69 Pa。高层建筑前后壁面风速和压力变化都将对其振动特性产生显著地影响。

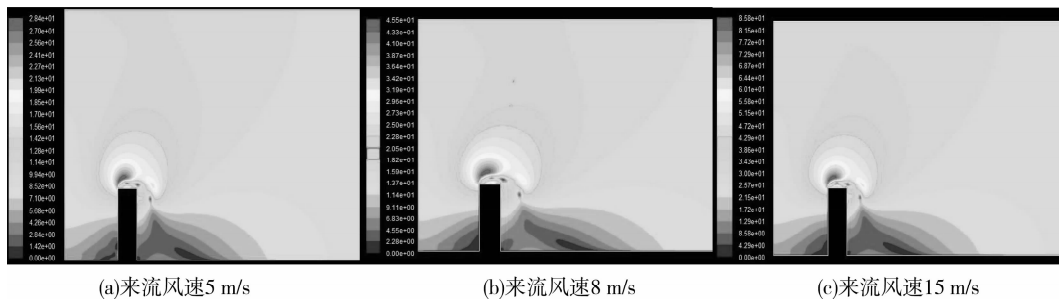


图 3 不同来流风速高层建筑附近流场云图

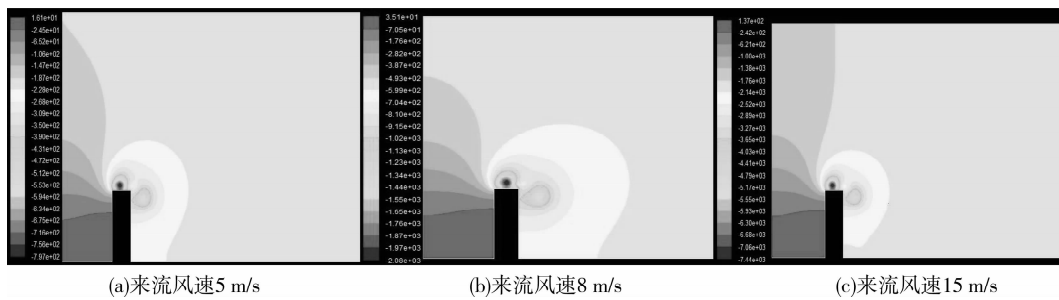


图 4 不同来流风速高层建筑附近压力变化云图

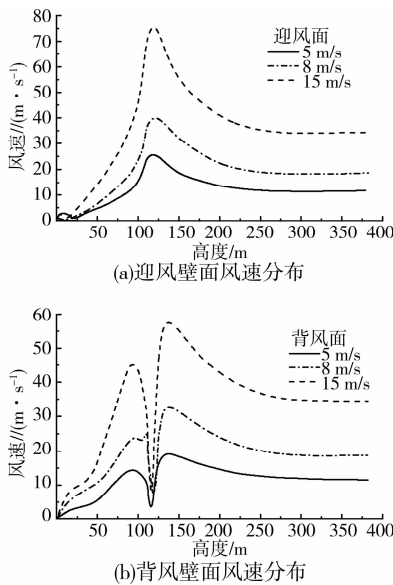


图 5 不同来流风速高层建筑迎风/背风墙面风速

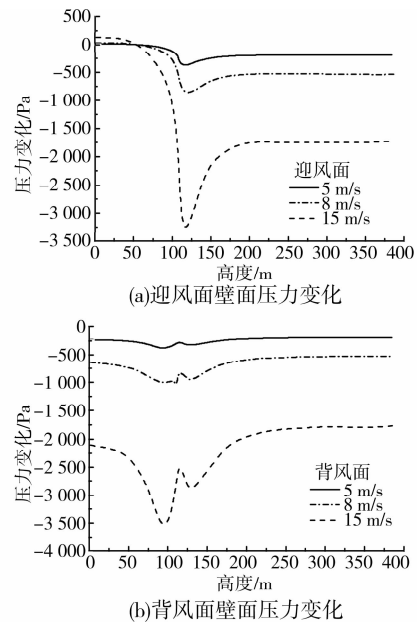


图 6 不同来流风速高层建筑迎风/背风墙面压力变化

4 高层建筑风载作用模态分析

一般对于动力加载条件下的结构设计而言,频率响应和模态是非常重要的参数。图 7 为结构的前 10 阶自振频率。图 7 表明随着阶数的增加,频率也随着增加,而且增加几乎呈现线性趋势。

高层建筑结构前 10 阶振型变形图和位移矢量图如图 8 所示:随着阶数的增加,建筑物的变形越来越严重,但是产生最大位移的地方一直在顶端没有改变。将前 10 阶模态的最大位移统计后得出如图 9 所示,由图 9 可知,超高层建筑的前 10 阶模态中,能产生最大位移的是第 6 阶模态。但是最大位移的幅度在不断地改变,而且改变量在 0.3 m 左右内浮动。

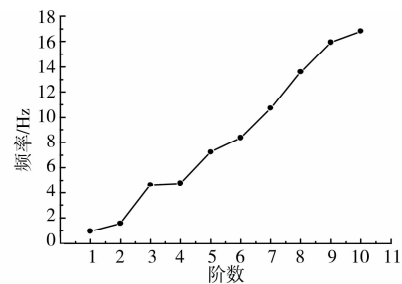


图 7 结构的前 10 阶自振频率

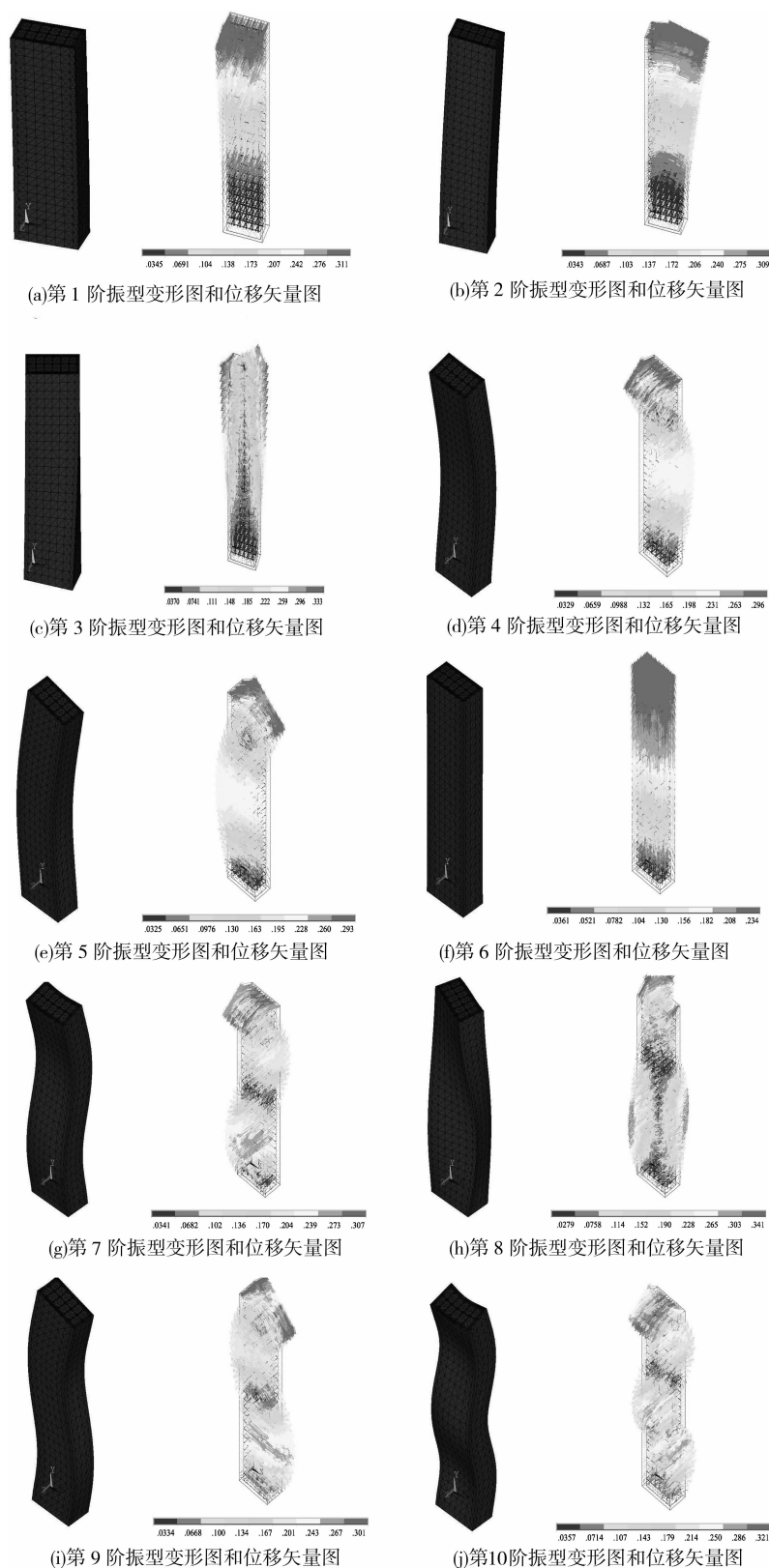


图 8 高层建筑结构前 10 阶振型变形和位移矢量图

5 谐响应分析

根据已经得到的高层建筑的频率来计算个某位置的谐响应。从图 10 可以看出,在风场中建筑物表面最高点处能产生共振的频率为 50 Hz。从上图可以看出,在风场中建筑

物表面中点处能产生共振的频率为 40 Hz。

6 结论

本文通过建立其在大气流场中的力学模型,数值模拟了高层建筑的风载作用形态,同时对结构进行模态分析,计算

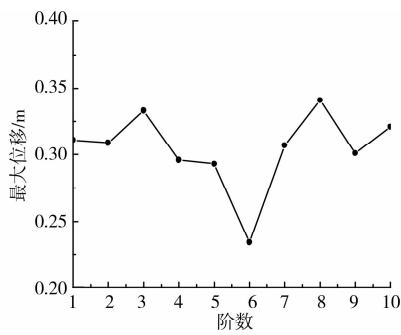
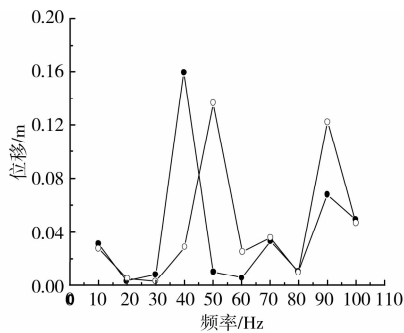


图 9 各阶频率下最大位移统计图



注:—●—高层建筑物顶部表面—○—高层建筑物终点处

图 10 建筑物表面最高点处与中点处质点在 z 方向的位移-频率曲线

结果表明,在高层建筑的迎风面,压力在偏下部略有增大,而在上部压力减小;在背风面,压力都是减小,即形成负压区;在高层建筑顶部,压力变化最大。在高层建筑的迎风面,壁面风速随高度先增大,在高层建筑顶部达到最大,而后随高度增大风速逐渐减小;而在高层建筑背风面,壁面风速随高度先增大后减小,至高层建筑顶部减小至最小,而后风速迅速增大,至某一高度后风速逐渐减小。在风场中,高层建筑前后壁面的风压急剧减小,并且随着风速增大,迎风面和背风面壁面压力变化越大。高层建筑前后壁面风速和压力变化都将对其振动特性产生显著地影响。通过模态分析得到超高层建筑在风载作用下的固有频率和振型形式,随着阶数的增加,建筑物的变形越来越严重,但是产生最大位移的地方一直在顶端没有改变。并对此采取必要的措施,从而避免

在使用中由于共振的因素造成不必要的损失。高层建筑在风荷载下的谐响应进行了分析,避免共振发生。

参考文献:

- [1] Kwok K C S, Melbourne W H. Wind-induced lock-in excitation of tall structures [J]. Journal of Structure Division, ASCE, 1981, 105(Sup1): 105-112.
- [2] 顾明,杨伟,傅钦华. 上海铁路南站屋盖结构平均风荷载的数值模拟[J]. 同济大学学报, 2004, 32(2): 141-146.
Gu M, Yang W, Fu Q H, et al. Numerical simulation of wind loads acting on roof of shanghai railway station building [J]. Journal of Tongji University, 2004, 32(2): 141-146.
- [3] 林斌,孙晓颖,武岳,等. 大庆石油学院体育馆屋盖风荷载的风洞试验和 CFD 数值模拟[J]. 沈阳建筑大学学报:自然科学版, 2006, 22(3): 357-361.
Lin B, Sun X Y, Wu Y, et al. Wind tunnel test and CFD numerical simulation of wind-induced loads on gymnasium roof of daqing petroleum institute [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University: Natural Science, 2006, 22(3): 357-361.
- [4] 许伟,黄敬明,李庆祥,等. 大跨度结构风荷载的风洞试验和 CFD 数值模拟研究[J]. 工业建筑, 2009(Sup1): 394-398.
Xu W, Huang Q M, Li Q X, et al. Wind tunnel test and cfd numerical simulation of wind-induced loads on big span structures [J]. Industrial Construction, 2009(Sup1): 394-398.
- [5] Blocken B. CFD simulation of the atmospheric boundary layer: wall function problems [J]. Atmospheric Environment, 2007 (41): 238-252.
- [6] Blocken B. CFD evaluation of wind speed conditions in passages between parallel buildings—effect of wall-function roughness modifications for the atmospheric boundary layer flow [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2007, 95: 941-962.
- [7] 陶文铨. 数值传热学[M]. 2 版. 西安:西安交通大学出版社, 2001.
- [8] 陈矛章. 粘性流体力学理论及紊流工程计算[M]. 北京:北京航空学院出版社, 1986.
- [9] 帕坦卡. 传热与流体流动的数值计算[M]. 北京:北京科学出版社, 1992.

(编辑 罗 敏)