

# 风环境数值模拟中模拟植被的数学模型与应用

杨 易<sup>1</sup>, 顾 明<sup>2</sup>, 金新阳<sup>1</sup>, 杨立国<sup>1</sup>

(1. 中国建筑科学研究院 风工程研究中心, 北京 100013; 2. 同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

**摘要:** 在建筑风环境数值模拟中, 植被的影响通常不可忽略, 而且流经植被覆盖区的湍流流动非常复杂. 为此, 采用在动量和湍流输运方程中附加源/汇项的方法, 结合粗糙壁面率修正, 模拟植被绕流效应. 首先基于剪切应力输运 (shear-stress transport, SST)  $k$  (湍动能) -  $\omega$  (耗散频率) 模型, 从理论上推导了湍动能耗散频率  $\omega$  方程的新的附加源项模型; 其次, 采用数值模拟方法, 以一植被挡风墙试验为例, 对该模型进行了验证; 最后, 将模型应用到一高层建筑群风环境的数值模拟优化设计中. 结果表明, 该模型可以较准确有效地模拟建筑风环境中的植被效应, 因而具有一定的理论和实用参考价值.

**关键词:** 计算流体力学; 风环境; 植被绕流; 剪切应力输运  $k$  -  $\omega$  模型; 源/汇项

**中图分类号:** TU 973

**文献标识码:** A

## Tree Canopy Model for Wind Environment Simulation and Its Application

YANG Yi<sup>1</sup>, GU Ming<sup>2</sup>, JIN Xinyang<sup>1</sup>, YANG Ligu<sup>1</sup>

(1. Center of Wind Engineering Research, China Academy of Building Research, Beijing 100013, China; 2. State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Although the influence of tree canopy usually can not be ignored in the research on the wind environment around buildings, the numerical simulation of the turbulence flow over a vegetated surface is rather complicated. The method of adding additional source/sink terms in the turbulence and momentum transport equations combining with the roughness modification of wall boundary was applied to appropriately model the effect of the tree canopy. Firstly, the new additional source term model for the turbulence frequency  $\omega$  equation in the Shear-Stress Transport (SST)  $k$  -  $\omega$  model was proposed theoretically. Secondly, the new model was

numerically verified by comparing with the experimental results of the windbreak flow. At last, the proposed source term model was employed in the optimization design of the wind environment around high-rise buildings. It is concluded that the new source term model is accurate and applicable for modeling the canopy flow, which provides a reference for the similar numerical researches on wind environment.

**Key words:** computational fluid dynamics (CFD); wind environment; tree canopy flow; shear-stress transport (SST)  $k$  -  $\omega$  model; source/sink term

建筑风环境主要研究近地表建筑与周围环境的空气绕流问题. 地面的植被覆盖对风环境的影响通常不可忽略, 例如, 植被形成的风屏障增加了风的阻力, 降低了下游遮蔽区的风速, 提高了湍流度, 影响下游流场中介质的输运. 从数值模拟研究的角度, 植被覆盖对地表粗糙度的影响, 增加了绕流场模拟的复杂性.

通常, 研究大尺度的边界层流动时, 可通过粗糙度影响修正的壁面函数来模拟近地表环境. 这种方法得到的是边界层的整体流动特征, 虽然在粘性亚层需要的网格数目较少, 但不能模拟植被的详细特征参数, 也无法得到植被遮蔽区的湍流结构信息. 为了在不增加计算网格消耗的前提下, 模拟植被覆盖区复杂的流动特性, 可采用在流动输运方程中附加源/汇项的方法<sup>[1-4]</sup>. 这种方法虽然比较便捷, 但需要对输运方程中额外增加的附加源项模型仔细考虑和验证, 例如, 文献[4]中采用 SST  $k$  -  $\omega$  模型模拟植被覆盖的地表风场环境, 但其中耗散频率  $\omega$  的附加源项  $S_\omega$  并不恰当.

本文将这两种方法相结合, 以模拟在大尺度流动的情况下, 恰当地考虑流经复杂植被覆盖区的遮

收稿日期: 2009-04-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50708014); 国家自然科学基金重大研究计划资助项目(90715040); “十一五”国家科技支撑计划资助项目(2006BAJ06B05, 2006BAJ02A05)

作者简介: 杨 易(1975—), 男, 副研究员, 工学博士, 主要研究方向为计算风工程. E-mail: yangyi@cabrttech.com

顾 明(1957—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为建筑与工程结构抗风. E-mail: minggu@tongji.edu.cn

蔽效应.首先,基于计算风工程中模拟钝体绕流具有较好适用性的剪切应力输运(shear-stress transport, SST)  $k-\omega$  模型,从理论上推导了湍动能耗散频率  $\omega$  方程的附加源项模型;其次,以一植被挡风墙试验<sup>[5]</sup>为例,对该模型进行了数值验证;最后,将该模型应用到一高层建筑群风环境的数值模拟优化设计中.在数值模拟中,应用了作者先前提出的模拟平衡边界层的边界条件数学模型<sup>[6-8]</sup>,通过和试验结果<sup>[5]</sup>的比较表明,本文提出的模型和应用的方法可以较准确有效地模拟植被绕流效应,具有一定的理论和实用参考意义.

## 1 SST $k-\omega$ 模型中附加源/汇项模型

诸多文献给出了在流动雷诺时均动量和湍流输运方程中,模拟植被效应的附加源/汇项模型表达式<sup>[1-3]</sup>,文献<sup>[9]</sup>对不同模型进行了比较.对于  $k-\epsilon$  模型,动量、湍动能  $k$ ,湍动能耗散率  $\epsilon$  方程的附加源/汇项模型可表达为

$$S_u = -C_d A u_i U \quad (1)$$

$$S_k = C_d A \beta_p U^3 - C_d A \beta_d U k \quad (2)$$

$$S_\epsilon = C_d A \alpha_p \beta_p \frac{\epsilon}{k} U^3 - C_d A \alpha_d \beta_d \frac{\epsilon}{k} U k \quad (3)$$

式(1)~(3)中: $C_d$ 为阻力系数; $A$ 为叶面面积密度(leaf area density, LAD); $u_i$ 为*i*方向速度分量; $U$ 为速度绝对值; $\beta_p$ 代表平均流动的湍动能由于植被阻碍转化成所产生的尾流能量的比率系数; $\beta_d$ 代表和植被障碍物相互作用的能量损失系数;对于标准  $k-\epsilon$  模型, $\beta_p$ 和 $\beta_d$ 可分别取1和4; $\alpha_p$ 和 $\alpha_d$ 为调节系数,对于标准  $k-\epsilon$  模型,可都取1.5,对于SST  $k-\omega$  模型,可分别取3.2和0.

由于  $k-\omega$  模型<sup>[10]</sup>与  $k-\epsilon$  模型之间存在的联系,在SST  $k-\omega$  模型中,动量方程和湍动能  $k$  的输运方程中附加源项可继续采用方程(1)和(2)的形式.但对于SST  $k-\omega$  模型中湍流频率  $\omega$  方程的附加源项  $S_\omega$  的选取,诸多文献没有详细说明.文献<sup>[4]</sup>直接利用  $\omega$  与  $\epsilon$  的线性关系,代入  $k-\epsilon$  模型湍动能耗散率  $\epsilon$  方程的附加源项  $S_\epsilon$  表达式中,仅通过简单线性变换,作为  $\omega$  方程的附加源项  $S_\omega$  模型,作者认为这种方式在理论上并不恰当.虽然  $k-\omega$  模型与  $k-\epsilon$  模型二者存在联系,但  $\epsilon$  和  $\omega$  的控制方程并不相同,不能简单地对附加源项也采用线性变换办法进行拓展,而是应该从控制方程出发得到理论上合理的表达形式.

为得到附加源项  $S_\omega$  的模型,本文采用理论方法进行推导.利用  $\epsilon$  与  $\omega$  的关系: $\epsilon = C_\mu \omega k$  ( $C_\mu$ 为湍流参数),首先代入标准  $k-\epsilon$  方程的  $\epsilon$  方程中,通过展开和线性变换,并减去  $k$  方程,然后再与  $k-\omega$  模型<sup>[10]</sup>中  $\omega$  方程进行类比,于是得到如下  $\omega$  方程附加源项的关系式:

$$S_\omega = \left( \frac{S_\epsilon}{C_\mu \omega} - S_k \right) \frac{\omega}{k} \quad (4)$$

式(4)建立  $S_\omega$  与  $S_k$ ,  $S_\epsilon$  的联系,然后代入源项  $S_k$  和  $S_\epsilon$  的表达式(1)和(2),于是得到如下附加源项  $S_\omega$  表达式为:

$$S_\omega = C_d A (\alpha_p - 1) \beta_p \frac{\epsilon}{C_\mu k^2} U^3 - C_d A (\alpha_d - 1) \beta_d \frac{\epsilon}{C_\mu k^2} U k = C_d A (\alpha_p - 1) \beta_p \frac{\omega}{k} U^3 - C_d A (\alpha_d - 1) \beta_d \frac{\omega}{k} U k \quad (5)$$

式(1),(2)和(5)将作为下文SST  $k-\omega$  模型中进行植被效应数值模拟计算的附加源项模型.

## 2 数值验证

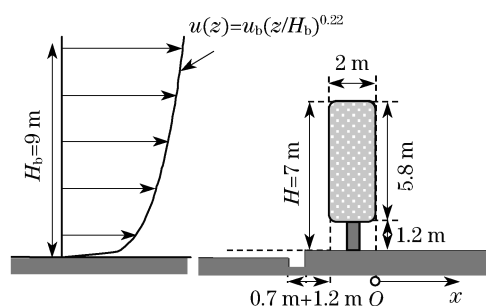
为检验以上推导的附加源项模型模拟植被绕流的适用性,设计一数值算例进行验证,并将数值模拟结果和试验测量结果<sup>[5]</sup>进行比较.

### 2.1 计算模型

参考植被挡风墙试验<sup>[5]</sup>和数值模拟研究<sup>[9]</sup>(图1),建立了相应的数值风洞模型.图1中  $H_b$  为参考高度,  $u_b$  为  $H_b$  处的平均风速.数值模拟计算在计算流体动力学(computational fluid dynamics, CFD)软件Fluent上进行.数值模型中,计算域尺度为100 m ( $L$ )  $\times$  100 m ( $H$ )的矩形,植被占据的流域空间按照式(1),(2)和(5)的形式,在输运方程中通过UDF(user-defined function)编程设置附加源/汇项  $S_u$ ,  $S_k$  和  $S_\omega$  模型.流域采用结构网格对计算域进行离散,近地面的最小网格尺度为0.1 m,总网格单元数目为5万.

### 2.2 数值模型边界条件的设定

平衡边界层的模拟是风环境数值模拟的重要前提<sup>[6-8]</sup>.平衡边界层必须满足水平均匀性条件.作者对这一问题从模型方程角度进行了重新考察,基于标准  $k-\epsilon$  模型,导出模型方程的近似解,提出一类新的湍流边界条件<sup>[6-8]</sup>,并将建议的边界条件运用到SST  $k-\omega$  模型中<sup>[11]</sup>.

图1 植被挡风墙计算模型图示<sup>[9]</sup>Fig.1 Scheme of numerical model of windbreak flow<sup>[9]</sup>

数值模拟计算的第一步,首先进行空计算域的边界层流动模拟,检验平衡边界层的模拟前提条件是否满足.数值模拟中的详细的数值参数和边界条件设定参见文献[11],其中入流边界条件中的参数 $u_*$ , $z_0$ , $C_1$ , $C_2$ , $C_\mu$ 根据试验模拟条件<sup>[5]</sup>以及计算模型<sup>[9]</sup>进行拟合.

### 3 数值计算结果

#### 3.1 平衡边界层的模拟

首先给出简单边界层的数值模拟结果,图2给出了入流面预定义的速度( $u/u_b$ )和湍动能( $k/u_b^2$ )剖面廓线和流域中部 $L/2$ 位置以及出流面的比较.结果显示,所模拟的大气边界层在整个流域实现了较好的保持性.以此为基础,再进行植被绕流的数值模拟计算.

#### 3.2 植被绕流的数值模拟

图3给出了植被遮蔽区下游不同位置上,数值模拟计算得到的平均速度和试验测量结果<sup>[5]</sup>的比较,其中 $U_H$ 为植被挡风墙高度 $H$ 处的平均风速.可以看出,在遮蔽区的下游近距范围,数值模拟计算的速度剖面和试验结果基本吻合.但同时也注意到在下游的尾流区域,数值模拟的速度比试验结果稍偏

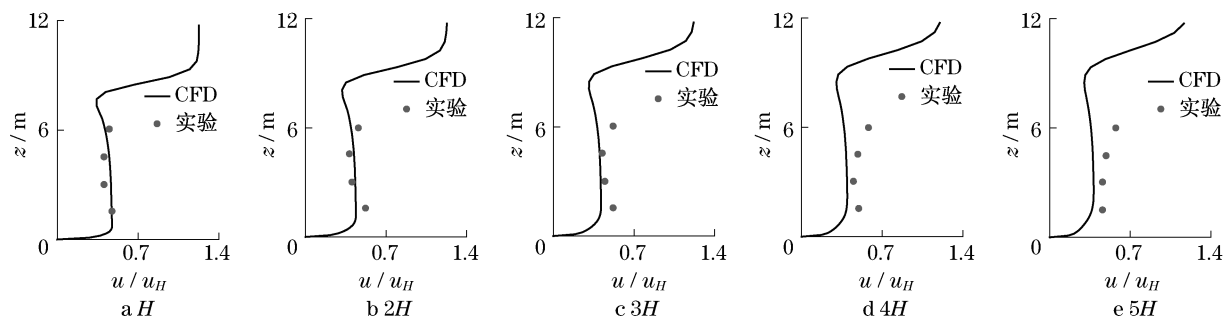
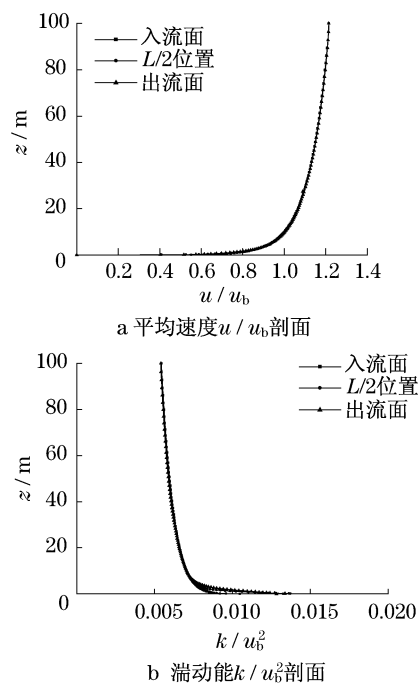


图3 植被遮蔽区下游不同位置速度剖面的比较

Fig.3 Comparisons of the mean velocity profiles at different locations backward the vegetated windbreak

小,原因可能有以下几种:

(1) 与附加源/汇项模型中的参数取值有关.文献[9]对源/汇项模型中的参数取值进行了优化研究,表明模拟结果和参数的取值直接相关.为了减小这种误差,需要再进行详细的参数优化研究.

图2 流域中入流面、 $L/2$ 位置和出流面平均速度与湍动能剖面比较Fig.2 Comparisons of the mean velocity and the turbulence kinetic energy profiles at the inlet,  $L/2$  and outlet

(2) 与建立的数值计算模型与真实试验模型之间的差异有关.由于数值模拟计算中的参数众多,参考文献中提供的资料有限,数值模型和试验模型之间难免存在一些差异.

(3) 数值计算的误差,包括湍流模型模拟植被绕流湍流流动的能力,数值计算的误差等.

对数值模拟验证进行分析,整体上,数值模拟结果和试验测量结果较吻合,这验证了在 SST  $k-\omega$  模型中采用本文的附加源项模型来计算植被遮蔽效应的适用性.因此认为,在 SST  $k-\omega$  模型中采用本文建议的理论上更合理的附加源/汇项模型,加上考虑粗糙修正的壁面函数,可用来在风环境计算中模拟植被的遮蔽效应.

#### 4 工程应用示例

中国建筑科学研究院正在建设中的新科研大楼(图4),与原大楼毗邻,两楼均为80 m高.中间形成的狭长通道,将作为未来该院南北方向通行的交通主干道,人员往来密集.由于大楼面朝开阔的北三环主路,楼前无任何遮挡,中间通道的走向和北京本地主导风向一致,使得即使在新科研大楼尚未建成的情况下(原址为2层低矮建筑),遇大风天气,通道内风速加速明显,行人行走困难.

为评估建筑周围风环境状况,避免新大楼建成后通道内由于“狭管效应”而使得行人风环境更加恶化,中国建筑科学研究院对新科研大楼的行人风环境问题进行了专题风洞试验<sup>[12]</sup>和数值模拟研究<sup>[13]</sup>.



图4 中国建筑科学研究院新科研楼设计方案  
Fig.4 Scheme of the new building of China Academy of building research

风洞试验和数值模拟研究都显示,按原设计方案,通道内行人高度的风速加速比  $C_u$  (风速比  $C_u$  定义为行人高度平均风速  $U_p$  与远前方未扰来流行人高度平均风速  $U_f$  之比  $C_u = U_p/U_f$ ) 最大将达到1.8.结合本地常年风速、风频统计资料进行风环境定量评估,结果显示,通道的风环境品质难以满足行人行走安全和舒适性的要求.为此,配合建筑设计单位,采用数值模拟方法,进行了新科研大楼建筑群风环境的方案优化研究,设计了一系列风环境的改善方案.例如,在通道的北向路口设置大型广告牌作为

挡风屏,原大楼观光电梯旁增设迷宫式遮风屏,新大楼底层开放式行人通道柱廊采取封闭措施等.研究结果显示(图5),采用这些措施能在一定程度上改善局部行人风环境品质<sup>[13]</sup>.然而,由于总体建筑设计方案造成新、老大楼之间形成相对狭窄的通道这一主要特性不可改变,即使采取这些“硬”技术措施,通道中央的风环境整体上仍趋于不利.改善中间通道内的风环境品质是进行该项目风环境优化的关键和难题.

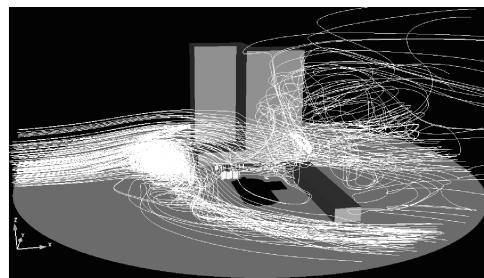


图5 正北风向绕流流线示意图(老楼隐去)  
Fig.5 Streamlines around the building under the north attack

为此,作者尝试应用本文研究成果,研究在通道中央地带增设植被绿化带的挡风效果.数值计算模型中,设通道中央设置的绿化带长度为  $l = 50$  m,高度  $h = 1.5$  m,宽度  $b = 1$  m,阻力系数  $C_d = 0.8$ ;叶面面积密度  $= 1.17 \text{ m}^2/\text{m}^3$ .图6给出了正北风向下,中间通道增设绿化带前后行人高度的风速比  $C_u$  对比云图.

计算结果显示(图6),在通道中央设置一定高度的绿化带,可起到显著减缓行人高度风速的效果.设置植被后,风速比高 ( $C_u > 1.5$ ) 的区域范围得到明显抑制,面积显著缩减,表明植被有效化解了通道内生成的高风速对行人的侵袭,起到“软”挡风屏的作用,从而改善通道内的行人风环境品质.

基于植被挡风效应的数值模拟研究,建议若在设计方案中条件允许,在不阻碍交通和遮挡视线的前提下,在通道中央布置一定高度的绿化带,可有效减缓通道中央行人高度的风速,从而改善通道内不利风环境状况.

#### 5 结语

采用在流体动量和湍流输运方程中附加源/汇项的方法,结合粗糙壁面率修正,模拟植被绕流效应.基于风工程数值模拟中具有较好适用性的 SST  $k-\omega$  模型,首先从理论上推导了湍动能耗散频率  $\omega$  方程的合理的附加源项  $S_\omega$  模型,然后应用作者提出

的模拟平衡边界层的边界条件,通过植被挡风墙算例,对附加源项模型的适用性进行了验证,最后将附加源项模型运用到一高层建筑群的风环境数值模拟优化设计研究中.研究表明,本文介绍的模型和方法

可以较准确地模拟植被绕流,因此有一定的理论和实用参考价值.在本文基础上,对附加源项构造和其中参数的取值进行更深入的优化研究,可进一步提高数值模拟的精度.

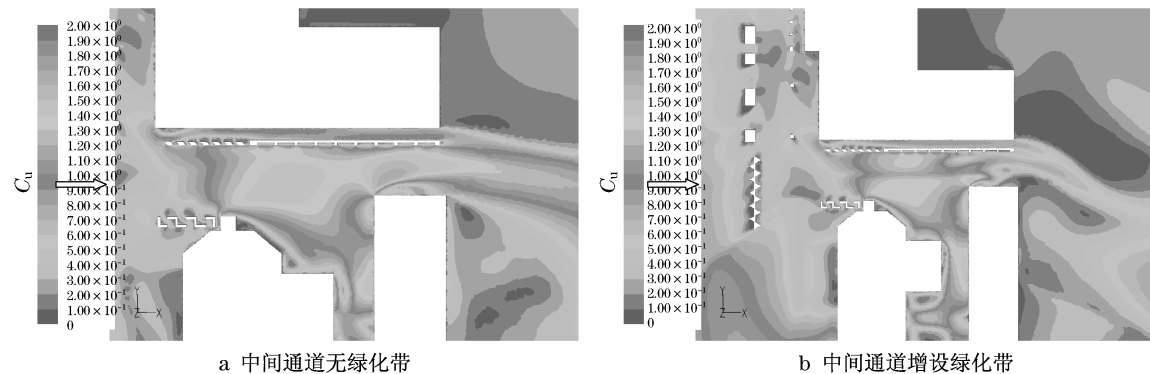


图6 中间通道增设绿化带前后行人高度风速比云图

Fig.6 Comparisons of contours of the wind velocity ratios at the pedestrian level before/after setting the vegetated windbreak in the center of the passage

#### 参考文献:

- [1] Green S R. Modelling turbulent air flow in a stand of widely-spaced trees [J]. *Phoenix Journal of Computational Fluid Dynamics and its Applications*, 1992, 5: 294.
- [2] Svensson U, Häggkvist K. A two-equation turbulence model for canopy flows [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1990, 35: 201.
- [3] Liu J, Chen J M, Black T A, et al.  $E - \epsilon$  modelling of turbulent airflow downwind of a model forest edge [J]. *Boundary-Layer Meteorol*, 1996, 77: 21.
- [4] Pattanapol Wichai, Wakes Sarah J, Hilton Michael J, et al. Modeling of surface roughness for flow over a complex vegetated surface [J]. *International Journal of Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2008, 2(1): 18.
- [5] Kurotani Y, Kiyota N, Kobayashi S. Windbreak effect of tsujimatsu in izumo part 2 [C] // *AJ Environmental Engineering I*. [S. l.]: Architectural Institute of Japan, 2002: 745 - 746.
- [6] Yang Y, Gu M, Chen S Q, et al. New inflow boundary conditions for modeling the neutral equilibrium atmospheric boundary layers in Computational Wind Engineering [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2009, 97(2): 88.
- [7] 杨伟, 顾明, 陈素琴. 计算风工程中  $k - \epsilon$  模型的一类边界条件 [J]. *空气动力学学报*, 2005, 23(1): 97.  
YANG Wei, GU Ming, CHEN Suqin. A set of turbulence boundary condition of  $k - \epsilon$  model for CWE [J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2005, 23(1): 97.
- [8] 杨伟, 金新阳, 顾明, 等. 风工程数值模拟中平衡大气边界层的  
研究与应用 [J]. *土木工程学报*, 2007, 40(2): 9.  
YANG Wei, JIN Xinyang, GU Ming et al. Research on the self-sustaining equilibrium atmosphere boundary layer in computational wind engineering and its application [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2007, 40(2): 9.
- [9] Mochida Akashi, Yoshino Hiroshi, Iwata Tatsuaki, et al. Optimization of tree canopy model for CFD prediction of wind environment at pedestrian level [C] // *The Fourth International Symposium of Computational Wind Engineering*. Yokohama: Architectural Institute of Japan, 2006: 561 - 564.
- [10] Menter F R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications [J]. *AIAA J*, 1994, 32(8): 1598.
- [11] YANG Wei, QUAN Yong, JIN Xinyang et al. Influences of equilibrium atmosphere boundary layer and turbulence parameter on wind loads of low-rise building [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2008, 96: 2080.
- [12] 中国建筑科学研究院. 中国建筑科学研究院新建科研大楼风洞试验研究报告 [R]. 北京: 中国建筑科学研究院风工程研究中心, 2009.  
China Academy of Building Research. Report on the wind tunnel test of the new CABR building [R]. Beijing: China Academy of Building Research. Center of Wind Engineering Research, 2009.
- [13] 中国建筑科学研究院. 中国建筑科学研究院大楼建筑风环境优化数值模拟研究报告 [R]. 北京: 中国建筑科学研究院风工程研究中心, 2009.  
China Academy of Building Research. Report on numerical optimization of the wind environment around the new CABR building [R]. Beijing: China Academy of Building Research. Center of Wind Engineering Research, 2009.