

文章编号:1007-4708(2012)05-0734-06

# 基于 FLUENT 的大气边界层风场 LES 模拟

王婷婷\*, 杨庆山

(北京交通大学 土木建筑工程学院, 北京 100044)

**摘要:**通过拟周期边界条件、布置粗糙元和添加随机扰动等措施实现了大气边界层风场的 LES 模拟。对可能影响数值模拟结果的网格密度、粗糙元高度、随机数大小、随机数赋值方向及范围等主要参数进行分析,确定其影响规律,并据此生成满足目标要求的四类不同地貌大气边界层风场。结果表明,本文的模拟结果满足结构抗风计算的要求,验证了本文所采用的数值模拟方法的可行性,为后续进行结构绕流的大涡模拟提供了有价值的来流生成方法。

**关键词:**结构工程;结构抗风;大涡模拟;大气边界层风场;拟周期边界条件

**中图分类号:**O355 **文献标志码:**A

## 1 引言

随着国民经济的发展和社会活动的需要,人们对工程结构的要求越来越高。为了增加高度与跨度,结构逐渐采用轻质高强的建筑材料,使得结构刚度日趋减小,对风荷载更加敏感;由于对建筑效果的追求,建筑结构的体型越来越丰富多彩,使得确定结构风荷载的难度不断增加。如果不能合理确定作用在结构上的风荷载将会造成工程结构损伤和破坏,给人民生命财产带来重大的损失,所以确定风荷载的准确取值是结构抗风设计的关键。而大气边界层的流场特性,如风速剖面,湍流度剖面及脉动风速功率谱等是确定结构风荷载的基础。因此,准确描述建筑结构周围的大气边界层风场情况是确定结构风荷载的前提。

随着计算机软硬件水平的飞速发展,CFD 技术正逐渐成为计算结构风荷载、模拟复杂风环境的重要方法之一。土木工程结构所处的大气边界层风场是不可压缩的湍流运动。根据对湍流中各级尺度涡计算精度和对控制方程处理方法的不同,CFD 的模拟方法可分为直接数值模拟法(DNS)、

雷诺平均法(RANS)和大涡模拟法(LES)三类。其中,大涡模拟法是数值抗风研究中兼顾计算精度与计算效率的主要选择<sup>[1-4]</sup>。而基于 LES 方法模拟的大气边界层风场必须是满足一定约束条件(谱特性、湍流强度、湍流积分尺度、空间相关性及零散度等)的非稳态的时空变化序列,且应能描述真实的流动过程。从近年取得的研究成果看,现有的大气边界层风场的生成方法主要有序列合成法和预前模拟法两类。

序列合成法是指人工合成一组满足上述约束条件的时序序列,并将其作为来流边界条件施加于结构绕流 LES 模拟计算域的入口节点上。Kondo<sup>[5]</sup>基于该方法对各向同性湍流的衰减进行模拟,取得了与试验吻合较好的结果。Tutar<sup>[6]</sup>将该方法与有限元程序结合,模拟了圆柱绕流问题,研究了湍流场对钝体分离流的影响。序列合成法合成的空间脉动场与真实湍流有一定区别,虽经过零散度修正,但很难同时满足离散后的 N-S 方程,因此将该脉动场作为结构绕流的来流时,风场特性将在计算域内发生一定改变,需要一段缓冲区以待其发展为真实的湍流,且改变后的湍流性质不一定符合预期的标准,这无疑在增加计算工作量的同时,带来计算的不确定性。

预前模拟法是一种被动生成风场的方法,即通过设立单独的计算域,并结合各种粗糙装置,被动生成不同地貌的大气边界层风场。目前该方法在包括

收稿日期:2011-06-12;修改稿收到日期:2011-12-01.

基金项目:国家自然科学基金重大研究计划重点(90815021);  
国家自然科学基金杰出青年基金(50725826)资助项目.

作者简介:王婷婷\*(1987-),女,硕士生  
(E-mail: 09121583@bjtu.edu.cn);  
杨庆山(1968-),男,教授,博士生导师.

风工程在内的一些领域有了一定的应用,Lund<sup>[7]</sup>对平板湍流边界层进行了模拟,从中提取速度时程,并验证了其有效性和自保持性;Nozawa<sup>[8]</sup>等将Lund的方法发展到具有较高雷诺数的粗面边界层模拟中,并将边界层内的流动作为来流风场应用于低矮建筑的LES绕流模拟。预前模拟法所记录下的流动时程满足流体离散控制方程的约束,因此作为结构绕流的来流边界条件,其在主模拟域内无需或只需要极短的“缓冲区”即可充分发展为“真实”湍流,具有良好的程序收敛性。

本文将采用预前模拟法对不同地貌类别的大气边界层风场进行数值模拟,为模拟建筑结构绕流、确定结构表面风荷载提供依据。首先,阐述数值模拟大气边界层风场的方法,包括基本方程、拟周期边界条件的应用以及随机扰动方法的提出;其次,对数值模拟方法进行验证,并分析影响数值模拟结果的主要参数,掌握其影响规律;最后,通过改变各影响参数的取值,生成满足目标要求的大气边界层风场。

## 2 数值方法

### 2.1 基本方程

本文采用LES湍流模型,其在笛卡尔坐标系下空间网格滤波后的不可压缩流体连续方程及N-S方程为

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = 0$$

$$\rho \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \rho \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (1)$$

式中  $\bar{x}_i$  和  $\bar{x}_j$  ( $i, j=1, 2, 3$ ) 为笛卡尔坐标,带上划线的量为滤波后的场变量,  $\bar{p}$  为等效压力,  $\rho$  和  $\mu$  分别为流体密度和动力粘性,  $\tau_{ij} = \rho \overline{u_i u_j} - \rho \bar{u}_i \bar{u}_j$  为亚格子尺度应力,它是可解尺度与亚格子尺度能量交换的纽带。

大涡模拟控制方程求解过程中,对压力项采用 standard 离散格式,动量采用 bound central difference 离散格式。数值计算方法采用 SIMPLE 算法,亚格子应力模型采用 snagorsky-lily 模型,其中 Smagorinsky 常数  $C_s$  取为 0.1<sup>[9]</sup>。

### 2.2 数值模型及数值方法

建立如图1所示的数值模型,底面交错布置(间距200m)等高长方体粗糙元,其顺风向及横风向尺寸均为40m,竖向尺寸随场地类别的不同而有所改变。粗糙元沿顺风向共布置9排,沿横风向布置4列。计算域尺寸为1600m(顺风向)×500m(竖向)×400m(横风向)。底面、粗糙元表面采用无滑移壁面条件,顶面采用滑移壁面条件,出口采用完全发展流边界条件,横风向两侧采用周期边界条件。

为了缩短计算域,减少计算时间,并保持边界层内速度的稳定,入口采用Kataoka<sup>[10]</sup>提出的一种处理方法较简单的拟周期边界条件,即将循环面的脉动速度乘以权函数,并重引回入口边界,叠加到入口指定的平均速度剖面上,其中循环面位于距入口800m处,如图1所示。为了增加流场高处的湍流度水平,本文尝试采用添加随机数的方法加大高处的扰动,在减少计算量的同时,使调试过程简单明确,并最终得到满足目标要求的湍流度水平。

由湍流度的计算公式  $I = \sigma / \bar{v}$  可知,沿某一方向的湍流度  $I$  乘以顺风向平均风速  $\bar{v}$ , 可得这一方向的脉动速度均方根,即  $\sigma = I \bar{v}$ 。由于只布置粗糙元时高处的脉动速度几乎为零,所以如果想通过添加随机数的方法使湍流度达到某一水平,则添加的随机数的均方根应该近似等于由上述公式计算得到的脉动速度均方根  $\sigma$ , 如果添加的随机数满足正态分布且均值为零,则脉动速度均方根  $\sigma$  又近似等于添加随机数的标准差。

综上所述,本文通过添加满足正态分布的随机数的方法加大流场某一高度处的湍流度水平,且添加的随机数均值为零,标准差为

$$\text{rand}_{\text{std}} = (I_{\text{final}} - I_0) \times \bar{v} \quad (2)$$

式中  $I_{\text{final}}$  为需要得到的湍流度值,  $I_0$  为仅布置粗糙元时流场的湍流度,  $\bar{v}$  为顺风向平均风速,  $\text{rand}_{\text{std}}$  为添加的随机数标准差。

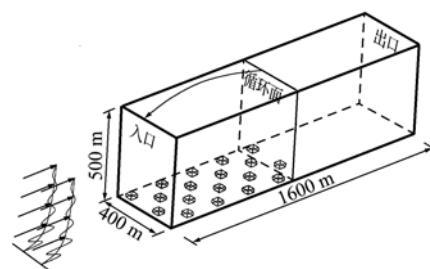


图1 数值模型  
Fig. 1 Numerical model

将添加在入口边界上的随机数与上述拟周期边界条件结合,并对其进行修正,得

$$\begin{aligned} u_{\text{inlt}}(y, z, t) &= \bar{u}_{\text{inlt}}(y, z) + [u_{\text{recy}}(y, z, t) - \\ &\quad \bar{u}_{\text{recy}}(y, z)] + \phi(\theta) \times \text{rand}_{\text{std}} \\ v_{\text{inlt}}(y, z, t) &= v_{\text{recy}}(y, z, t) + \phi(\theta) \times \text{rand}_{\text{std}} \\ \omega_{\text{inlt}}(y, z, t) &= \omega_{\text{recy}}(y, z, t) + \phi(\theta) \times \text{rand}_{\text{std}} \end{aligned} \quad (3)$$

式中  $u$ 、 $v$  和  $\omega$  分别为顺风向、竖向和横风向速度,  $\bar{(\quad)}$  为时间平均符号,下标 inlt 表示入口边界,recy 表示循环站,其中入口平均速度采用指数律模型描述  $\bar{u}_{\text{inlt}} = 26.8 \times (y/10)^\alpha$ ,  $\alpha$  为地面粗糙度指数,按照中国规范进行取值;26.8 为根据北京地区 50 年一遇基本风压换算得到的 10 m 高度处的平均风速,权函数  $\phi(\theta)$  为

$$\phi(\theta) = \frac{1}{2} \left\{ 1 - \tanh \left[ \frac{8.0(\theta - 1.0)}{0.7 - 0.4(\theta - 0.3)} \right] / \tanh(8.0) \right\} \quad (4)$$

式中  $\theta = y/L_y$ ,  $L_y$  为边界层厚度,即计算域竖向高度。权函数  $\phi(\theta) \leq 1.0$ ,其作用是减小边界层高处循环的脉动量,以增加计算稳定性。

式(3)即为本文最终采用的大气边界层风场的数值模拟方法,即通过拟周期边界条件、布置粗糙元和添加随机扰动等措施,生成满足不同地貌类别要求的大气边界层风场。上述方法通过 C 语言编程并作为用户自定义函数(UDF)嵌入到 FLUENT 软件中参与计算。

### 3 参数分析

在上一节中,提出了不同地貌大气边界层风场的生成方法,即粗糙元加随机数并结合拟周期边界条件的数值模拟方法。本节将对这一方法进行验证,并针对影响数值模拟结果的主要因素逐一进行分析。

#### 3.1 网格密度

在大涡模拟中,网格尺度决定了能够得到的湍流脉动信息量的多少,网格质量决定了 CFD 的计算精度和计算效率,因此,网格必须有足够的空间分辨率和较好的质量才能得到准确的数值模拟结果。考虑到计算流域比较规则,采用质量较高均匀性较好的 6 面体结构化网格,沿顺风向和横风向均匀划分整个流场,沿壁面法向方向加密网格,使得近壁面网格较密,远离壁面的网格较疏。

表 1 三套网格系统参数对比

Tab. 1 Three cases in the analysis of grid density

网格编号	近壁面最小网格尺寸/m	各方向网格数量(顺风向×竖向×横风向)	网格总数量
1	0.1	160×120×20	约 40 万
2	0.01	320×120×20	约 80 万
3	0.001	320×140×40	约 180 万

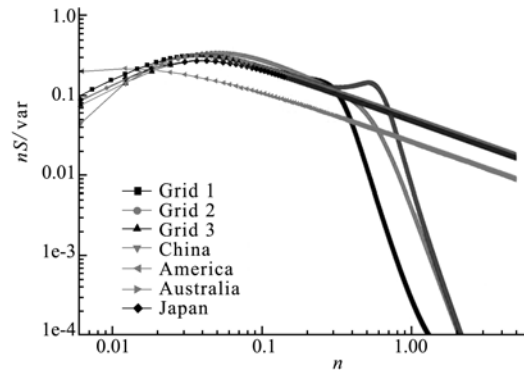


图 2 网格密度变化对脉动风速功率谱的影响  
Fig. 2 Influence of grid density

经过对三套不同密度网格(见表 1)的功率谱进行对比发现,改变网格密度对湍流脉动风速功率谱的影响较大。随着网格密度的增加,脉动风速功率谱模拟的结果越好,但同时将耗费更多的时间。当以第三套网格计算得到的风场模拟结构风振响应时,基本可以激起一般建筑结构的低阶模态响应。综合考虑计算质量与效率,本文最终选用第三套网格系统进行求解。

通过对比三套网格系统中同一点的脉动风速功率谱如图 2 所示,网格 1、网格 2 和网格 3 分别对 0.4 Hz、0.6 Hz 和 0.9 Hz 以下频率段的风谱捕捉良好,其上功率谱衰减明显。分析其原因,风谱的高频段代表湍流风场中小涡的能量贡献,而 LES 以模拟大尺度涡运动为基本出发点,其数值解无法体现小于网格尺寸的漩涡代表的高频能量,因此,数值计算的功率谱一般会存在高频衰减现象。

#### 3.2 粗糙元高度

通过对表 2 中四种工况进行参数分析发现,改变粗糙元的高度对流场湍流度剖面产生了较大的影响如图 3 所示,在同一地貌类别下,随着粗糙元高度的增加,流域下部流场受到的扰动也随之加大,近地面处的湍流度水平相应提高。但是,湍流度仅在近地面处变化明显,说明粗糙元只对近地面的风场特性产生影响,对高处风场的流动特性影响很小,其影响范围大致为粗糙元高度的 8 倍。

表2 对粗糙元高度进行参数分析的四种工况  
Tab.2 Four cases of different roughness element heights

工况	粗糙元高度 /m	地貌类别
A1	20	B
A2	25	B
A3	35	B
A4	50	B

### 3.3 随机数

由 2.2 节的分析可知,在流场底部布置粗糙元只能改变近地面的流场特性,而对高处的流场影响很小。为了提高流场高处的湍流度水平,本文提出了一种添加随机扰动的方式,即在流场指定范围内添加满足正态分布的随机数。为得到添加的随机数对流场湍流度水平的影响规律,本文通过改变随机数的赋值方向、标准差大小以及赋值的范围得到 9 种工况见表 3,分别对 B 类场地相同粗糙元高度 (25 m) 大气边界层风场进行数值模拟,对随机数进行参数分析。其中工况 B1 是只布置高度为 25 m 的粗糙元,而不添加随机数;工况 B2 和 B3 是在随机数大小相同的情况下,改变随机数的添加方向;从工况 B4~B6 是在随机数赋值方向及范围相同的情况下,逐渐增大随机数的标准差;从工况 B7~B9

表3 对随机数进行参数分析的 9 种工况  
Tab.3 Nine cases of different random numbers

工况	赋值方向	标准差	赋值范围
B1	无	无	无
B2	顺风向(x)	3.5	150 m 以上
B3	竖向(y),横风向(z)	3.5	150 m 以上
B4	顺风向(x)	3	150 m 以上
B5	顺风向(x)	4	150 m 以上
B6	顺风向(x)	5	150 m 以上
B7	顺风向(x)	4.5	100 m 以上
B8	顺风向(x)	4.5	150 m 以上
B9	顺风向(x)	4.5	200 m 以上

是在随机数赋值方向及标准差大小相同的情况下,逐渐减小随机数的赋值范围。

图 4~图 6 分别给出了改变随机数添加方向、标准差大小及赋值高度时顺风向湍流度剖面的对比图,从图 4~图 6 可以看出:

(1) 当同时在横风向及竖向添加标准差为 3.5 的随机数时,其沿顺风向的脉动成分远远小于仅在顺风向添加相同大小的随机数时的情况,前者几乎为后者的一半。大气边界层中的顺风向脉动在湍流脉动中占有较大的比重,因此结构风工程中人们比较关心的主要是沿顺风向的脉动风特性,本次模拟目的也是通过调试使得对顺风向脉动风特性的

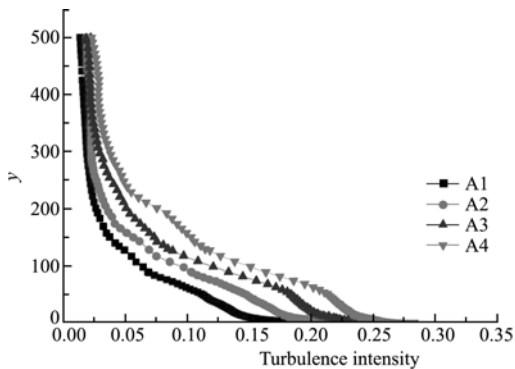


图3 粗糙元高度变化对湍流度剖面的影响  
Fig.3 Influence of roughness elements height

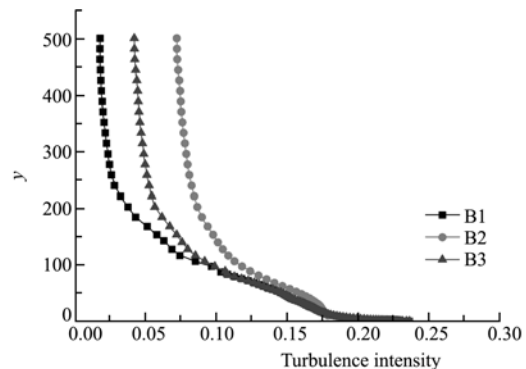


图4 改变随机数添加方向对湍流度的影响  
Fig.4 Influence of the adding direction of random number

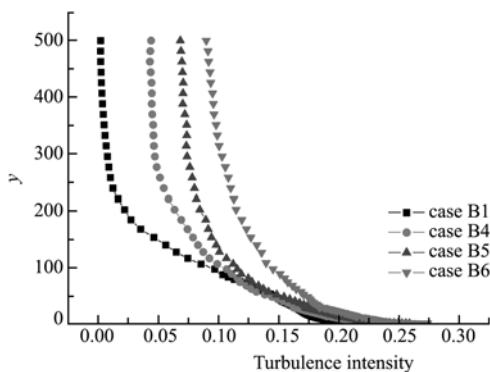


图5 改变随机数大小对湍流度的影响  
Fig.5 Influence of the standard deviation value of random number

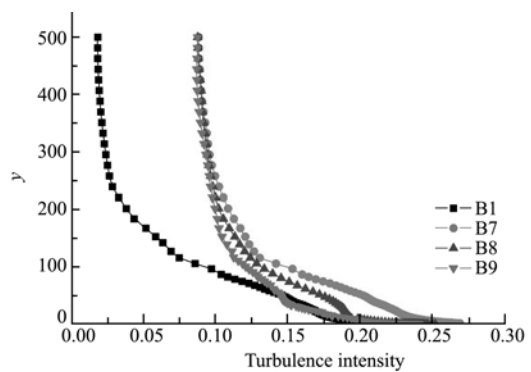


图6 改变随机数赋值高度对湍流度的影响  
Fig.6 Influence of the assignment range of random number

数值模拟结果与规范尽可能一致。因此,下文的模拟都是考察随机数的添加对顺风向湍流度的影响,且主要只在顺风向添加随机扰动。

(2) 随着流场内添加的随机数标准差的逐渐增大,在添加随机数的范围内(150 m 以上),湍流度水平逐渐提高,且湍流度各自增加的值基本等于添加的随机数标准差乘以平均风速,即满足式(2)。粗糙元高度 25 m 以下的湍流度水平比不添加随机数时略大,但变化不显著。

(3) 当添加的随机数大小相同而赋值高度不同时,流场高处的湍流度水平几乎一致,且湍流度增加的值近似满足式(2);随着随机数赋值范围的不断增加,上部流场的扰动在湍流掺混的作用下发展到近地面区,使近地面的湍流度水平在随机扰动与粗糙元的共同作用下有所增加。

### 4 不同地貌大气边界层风场的 LES 模拟

本文在上一节中对拟采用的数值方法进行验证,并对影响参数进行了分析。本节将直接采用上述方法,分别对中国规范中规定的 A、B、C、D 四类风场进行数值模拟。

#### 4.1 模拟目标及参数取值

通过对大气边界层风场特征参数的分析及对各国规范的对比,最终确定本次模拟的参数主要有平均风剖面、湍流度剖面及脉动风速功率谱,模拟的目标分别为中国规范指数律风剖面<sup>[11]</sup>、日本规范湍流度剖面<sup>[12]</sup>及中国规范 Davenport 谱。

模拟的基本思路是在拟周期边界条件中,直接给定满足中国规范指数律风速剖面的入口条件,通过调整粗糙元的高度和随机数的赋值方式,对湍流度剖面目标曲线进行逼近,并分析此时的脉动风速功率谱。

依照上述数值模拟思路,分别对 A、B、C、D 四

类风场进行模拟,最终确定不同地貌类别下的粗糙元高度和随机数赋值方式见表 4。

#### 4.2 A、B、C、D 四类模拟风场

采用表 4 中有关粗糙元和随机数的参数取值,分别对中国规范中的 A、B、C、D 四类风场进行模拟。图 7 给出了四类风场在时程提取处(顺风向 1400 m 剖面)的平均风剖面、湍流度剖面、50 m 高度处的脉动风速功率谱,及其与模拟目标的对比。对于平均风速剖面,数值模拟的结果与中国规范基本吻合,这是由于在拟周期边界条件中,对于入流边界直接给定满足中国规范要求的指数律风速剖面,而添加的随机数和由循环面提取并叠加到入口边界处的脉动风速的均值都为零,不会对平均风速剖面产生影响,这也体现了本文所采用的拟周期边界条件对平均风剖面模拟的优势。

对于湍流度的模拟,A、B、C、D 四类模拟风场的湍流度剖面与日本规范 I、(II、III)、IV、V 基本一致,其中 B 类模拟风场的湍流度介于日本规范 II、III 类之间,这是根据中国和日本规范中对于地貌类别划分的描述,将中国 B 类地貌归类于日本规范 II、III 类之间。

表 4 不同地貌类别粗糙元高度的取值和随机数的赋值方式

Tab. 4 Height of roughness element and assignment of random numbers in different terrains

地貌类别	A	B	C	D
粗糙元高度 /m	20	25	35	50
随机数赋值方向	顺风向 (x)	顺风向 (x)	顺风向 (x)	顺风向 (x) 竖风向 (y) 横风向 (z)
随机数标准差	4	5	7	10
随机数赋值范围	150 m 以上	150 m 以上	100 m 以上	100 m 以上

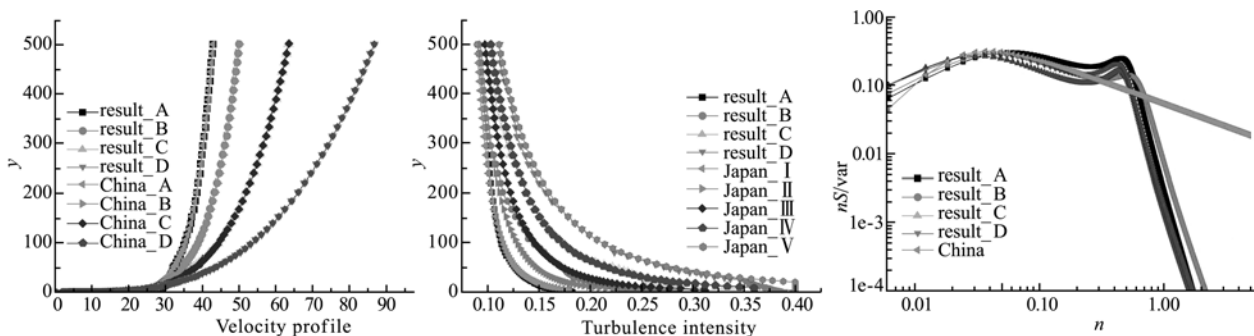


图 7 A、B、C、D 四类模拟风场的平均风剖面、湍流度剖面、脉动风速功率谱

Fig. 7 The mean velocity profiles, turbulence intensity profiles and power spectrum in A, B, C, D type of terrain

综上所述,对湍流度剖面的数值模拟结果较为合理,与模拟目标日本规范基本吻合,也验证了本文采用的数值方法的可行性和正确性。

对于脉动风速功率谱的模拟,与 2.1 节的结论相似,其频谱在中低频区段与中国规范的 Davenport 谱基本吻合,高频段出现衰减,其原因同样是由于大涡模拟本身的求解原理所致。

## 5 结 论

本文对四类不同地貌类别的大气边界层风场进行了 LES 模拟,通过改变影响参数的取值,使模拟得到的风场特征参数逐渐逼近模拟目标,最终生成满足目标要求的大气边界层风场。总结如下。

(1) 得到了大涡模拟大气边界层风场的方法,即采用预前模拟法,并结合拟周期边界条件,通过布置粗糙元和添加随机扰动的方法改变流场的湍流度,以生成不同地貌类别的大气边界层风场。其中,通过布置粗糙元增加流场底部的扰动,通过在流场指定范围内添加满足正态分布的随机数来加大流场上部的扰动,并得到了添加随机数标准差的近似计算公式。

(2) 通过对影响数值模拟结果的主要参数进行分析发现:网格密度的改变对湍流脉动风速功率谱的影响很大,随着网格密度的增加,脉动风速功率谱模拟的结果越好,但同时将耗费更多的时间,应综合考虑计算质量与效率;改变粗糙元的高度主要影响流场近地面的风场特性(其影响范围大致为粗糙元高度的 8 倍),且随着粗糙元高度的增加,近地面处的湍流度水平随之增大;改变随机数的赋值方式,可以得到具有不同湍流度水平的风场。

(3) 调试模拟了中国规范中的 A、B、C、D 四类地貌大气边界层风场,其风场特征参数与模拟目标基本吻合,即平均风速剖面与中国规范吻合良好;湍流度剖面与日本规范吻合良好;脉动风度功率谱在中低频与中国规范基本吻合,在高频段出现衰减。

## 参考文献(References):

[1] 樊洪明,朱蒙生,何钟怡. 风口区空气流动的有限元模拟与实验研究[J]. 计算力学学报, 2009, **26**(6): 829-833. (FAN Hong-ming, ZHU Meng-sheng, HE Zhong-yi. Numerical and experimental study on the flow characteristics in the vicinity of diffuser[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2009, **26**(6): 829-833. (in Chinese))

- [2] 秦鹏高,朱利刚,陈志华,等. 双柱体绕流中高度变化对其阻力的影响[J]. 计算力学学报, 2010, **27**(4): 634-641. (QIN Peng-gao, ZHU Li-gang, CHEN Zhi-hua, et al. Influences of two-cylinder heights on their drag coefficients in a rectangle channel[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2010, **27**(4): 634-641. (in Chinese))
- [3] 吴锤结,陈 剑. 沙漠地貌演化过程的湍流大涡模拟研究[J]. 计算力学学报, 2009, **26**(3): 358-363. (WU Chui-jie, CHEN Jian. Large-eddy simulation of the evolution of land form of desert[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2009, **26**(3): 358-363. (in Chinese))
- [4] 朱伟亮,杨庆山. 薄膜结构风致耦合作用数值初探[J]. 计算力学学报, 2010, **27**(3): 422-427. (ZHU Wei-liang, YANG Qing-shan. Numerical investigation on fluid-structure interaction of membrane structure[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2009, **26**(3): 358-363. (in Chinese))
- [5] Kondo K, Murakami S, Mochida A. Generation of velocity fluctuations for inflow boundary condition of LES[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1997, **67-68**(4~6): 51-64.
- [6] Tutar M, Celik I, Yavuz I. Modeling of effect of inflow turbulence data on large eddy simulation of circular cylinder flows[J]. *ASME Journal of Fluids Engineering*, 2006, **129**(6): 780-790.
- [7] Lund T S, Wu X, Squires K D. Generation of turbulent inflow data for spatially-developing boundary layer simulation[J]. *Journal of Computational Physics*, 1998, **140**(2): 233-258.
- [8] Nozawa K, Tamura T. Large eddy simulation of the flow around a low-rise building immersed in a rough-wall turbulent boundary layer[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2002, **90**(10): 1151-1162.
- [9] Murakami S. Current status and future trends in computational wind engineering[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1997, **67-68**(4~6): 3-34.
- [10] Kataoka H. Numerical simulations of a wind-induced vibrating square cylinder within turbulent boundary layer[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2008, **96**(10-11): 1985-1997.
- [11] GB50009-2001. Load Code for the Design of Building Structures[S]. Beijing, 2006.
- [12] Architectural Institute of Japan. AIJ Recommendations For Loads on Buildings[S]. 1996.

- application as limiters for runge-kutta discontinuous galerkin method II; two dimensional case[J]. *Computers & Fluids*, 2005, **34**(6):642-663.
- [17] Zhu J, Qiu J. Hermite WENO schemes and their application as limiters for runge-kutta discontinuous galerkin method, III: unstructured meshes[J]. *Journal of Scientific Computing*, 2009, **39**(2):293-321.
- [18] Zhu J. Runge-kutta discontinuous galerkin method using WENO limiters II: unstructured meshes [J]. *Journal of Computational Physics*, 2008, **227**(9): 4330-4353.
- [19] Luo H, Baum J D, et al. A discontinuous galerkin method based on a taylor basis for the compressible flows on arbitrary grids[J]. *Journal of Computational Physics*, 2008, **227**(20):8875-8893.
- [20] Xu Z L, Liu Y J, Shu C W. Hierarchical reconstruction for discontinuous galerkin methods on unstructured grids with a WENO-type linear reconstruction and partial neighboring cells[J]. *Journal of Computational Physics*, 2009, **228**:2194-2212.

## Investigation of a slope limiter for Runge-Kutta discontinuous Galerkin methods

REN Xiao-dong\*, GU Chun-wei

(Key Laboratory for Thermal Science and Power Engineering of Ministry of Education,  
Department of Thermal Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** A new slope limiter was formulated for the discontinuous Galerkin methods in this paper. Unlike the previous slope limiters, this slope limiter reconstructed the new gradients for limiting by using the total differential method and took no account of the element types. Consequently, it can be adopted on structured grids, pure-element unstructured grids and mixed-element unstructured grids, leading to a versatile limiter to resolve more effectively complex geometry problems. The developed slope limiter was used in a discontinuous Galerkin method to compute a variety of flow problems. The numerical results show its capability to different types of elements, to preserve the accuracy in smooth regions as well as to prevent spurious oscillations near solution discontinuities.

**Key words:** discontinuous Galerkin methods; unstructured grids; slope limiters; Taylor basis; compressible flows

~~~~~  
(上接第 739 页)

## Large eddy simulation of atmospheric boundary layer flow based on FLUENT

WANG Ting-ting\*, YANG Qing-shan

(School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract:** A method combining with the pseudo-periodic boundary condition, the roughness elements and random disturbance for large eddy simulation of atmospheric boundary layer flow is described in the paper. The possible parameters influencing the simulation results such as the grid density, the extraction position, the roughness element height and the random number assignment are analyzed. Atmospheric boundary layer flows in four types of terrains are produced through modifying the above influencing parameters. The results got in the paper agree well with desired characteristics and can be adopted as the inflow conditions for the large eddy simulation of flow around buildings.

**Key words:** structure engineering; wind resistant; large eddy simulation; atmospheric boundary layer flow; pseudo-periodic boundary condition