

文章编号:0258-1825(2011)01-0124-05

建筑 LES 模拟脉动入口的适用性研究

朱伟亮¹, 杨庆山¹, 曹曙阳²

(1. 北京交通大学 土木工程学院, 北京 100044; 2. 同济大学 土木工程防灾国家重点实验室 上海 200092)

摘 要:采用周期入流边界,在展向等间距网格系统对平板湍流边界层(驱动单元)进行 LES 模拟,并将顺压力梯度引入流体控制方程以维持湍流边界层厚度的稳定。记录驱动单元脉动时程并将其引入虚拟模拟网格系统(验证单元)以研究 LES 脉动入口方法的适用性。数值结果表明,采用周期入流边界可成功实现脉动输入,边界层在顺压力梯度下的自保持性良好;脉动入流特性在驱动单元内保持良好,可满足工程需求;顺流向平均流速剖面以及湍流强度剖面均满足低湍流度下的风场特性,数值结果可为我国 B 类地貌下抗风研究采用。

关键词:结构工程;结构抗风;大涡模拟;脉动入口;压力梯度
中图分类号:TU973+.213 **文献标识码:**A

0 引言

土木工程结构一般处于大气边界层甚至城市下垫层内,结构周围常伴随着分离、再附着、漩涡脱落等复杂流动现象。考虑到该特征湍流场及结构表面风压的时变特性,大涡模拟成为采用 CFD 方法对其进行模拟的良好选择。而符合近地脉动风场特性的脉动入口条件则是这一模拟过程的必要前提条件,其对结构上脉动风压的模拟以及强风作用下局部瞬时风荷载的预测有着极为重要的作用。

脉动入口条件的生成一般分为两类。第一类,预先在入流驱动单元(以下简称驱动单元)进行风场(湍流边界层)的 LES 模拟,生成并记录所模拟风场的速度压力时程,将其作为入口条件引入绕流模拟单元(以下简称模拟单元),如图 1 所示。基于该思想,Lund^[1]对平板脉动入流进行了模拟,验证了流场在平板上的自保持性。Nozawa^[2]等将 Lund 的方法发展到粗面边界层,但并未对流场在模拟单元内的保持性进行探讨。第二类即在绕流模拟单元的人口边界,通过逆傅里叶变换结合零散度修正,人工生成入口边界节点速度,其将随空间和时间变化。Kondo^[3]基于蒙特卡洛模拟,考虑风速谱及其空间相关性,经零散度修正后生成离散点上的风速

时程,并利用其研究了各向同性湍流运动。该方法较第一类更为直接,但生成的速度场难于满足 NS 方程,入流面的风场统计特性有可能在计算域内衰减,作者并未对该问题进行说明。方法一的优势在于获得的流场时程满足驱动单元中离散后的 NS 方程及连续方程。然而一般情况下,驱动单元与模拟单元的(展向)网格划分并不匹配,前者的流场解能否在后者中良好保持需要数值计算的验证。

本文基于第一类方法生成脉动时程,首先对驱动单元得到流场进行分析,继而对其作为模拟单元入口条件的有效性(自保持性)进行检验。

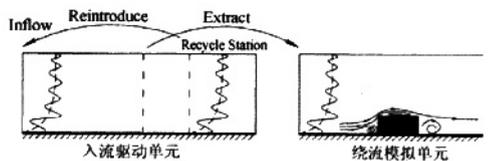


图 1 脉动输入方法

Fig. 1 Turbulent inflow method

1 脉动入口生成方法

1.1 入流驱动单元

对于驱动单元湍流边界层的模拟,为缩减计算时

* 收稿日期:2010-01-28; 修订日期:2010-03-25.

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

作者简介:朱伟亮(1982-),男,北京人,博士研究生,主要从事结构抗风研究. Email: snake-joe@163.com.

间,本文利用周期条件将计算域内某一平面(Recycle Station,图1)的数值湍流解施加入流边界,由于该周期平面的数值解满足流动方程,故湍流特性在计算域内可得到保持,从而脉动输入。需要指出的是,驱动单元内流场因壁面阻力的作用而随时间逐渐减小。为消除此不利影响,本文引入顺流向压力梯度,利用压力与壁面阻力之间的平衡关系,保持边界层厚度稳定,如图2所示。

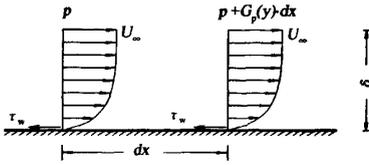


图2 顺流向压力梯度

Fig. 2 Streamwise constant pressure gradient

若边界层厚度保持恒定,则在恒压力梯度作用下,有如下平衡关系式:

$$\left[p \cdot \delta + \int_0^\delta G_p(y) dx dy \right] - p \cdot \delta - \tau_w dx = 0 \quad (1)$$

式中: p 为压力; δ 为边界层高度; G_p 为沿流向恒压力梯度; $\tau_w = \mu \cdot \partial u / \partial y$ 为壁面阻力,当边界层厚度恒定时, τ_w 为常数。由式(1)可得 $\int_0^\delta G_p(y) dy = \tau_w$,其中,

$$G_p(y) = b_f - \frac{b_f}{2} \left\{ 1 + \tanh \left[\frac{5(y/\delta - 0.2)}{0.6y/\delta + 0.2} \right] / \tanh(5) \right\}$$

b_f 为压力梯度幅值。此外,展向流体由于其统计平均速度为零,故可不引入压力梯度。



图3 展向网格

Fig 3 Spanwise grid stretch

1.2 绕流模拟单元

将驱动单元中湍流边界层的速度与压力时程作为入流边界引入模拟单元。如前所述,驱动单元与模拟单元(展向)网格划分一般不匹配(图3),驱动单元的物理量需以插值方式赋予模拟单元入流面,而插值过程可能破坏物理量对流动方程的满足性。因此进行绕流模拟之前,尚需对插值后的脉动输入在绕流单元中的自保持性进行验证。作为验证性分析,本文不对模拟单元设置建筑物,但保留其非均匀网格的划分方式(下称验证单

元)。

2 数值算法

本文验证算例基于LES湍流模型进行。在笛卡尔坐标中,空间网格滤波后的不可压缩流体无量纲连续方程及Navier-Stokes方程分别为:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} = \left[- \left(\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + G_{p,i} \right) \right] + \frac{1}{Re} \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial \bar{\tau}_{ij}}{\partial x_j} \quad (3)$$

式中, $\bar{(\quad)}$ 为空间网格滤波符号; \bar{p} 为等效压力; $G_{p,i} = (G_p(y), 0, 0)^T$ 为恒压力梯度; $\bar{\tau}_{ij} = \overline{u_i u_j} - \bar{u}_i \bar{u}_j$ 为亚格子雷诺应力项,引入标准Smagorinsky涡粘模型:

$$\bar{\tau}_{ij} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \bar{\tau}_{kk} = -2\nu_t \bar{S}_{ij} = -2(C_s \Delta)^2 |\bar{S}| \bar{S}_{ij} \quad (4)$$

式中 δ_{ij} 为Kronecker符号; τ_{ij} 为压力项; $\bar{S}_{ij} = (\partial \bar{u}_i / \partial x_j + \partial \bar{u}_j / \partial x_i) / 2$ 为应变率张量; ν_t 为湍动粘度; $|\bar{S}| = \sqrt{2 \bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij}}$ 为应变率张量大小; $C_s = 0.10$ 为模型常数; Δ 为网格滤波尺度。

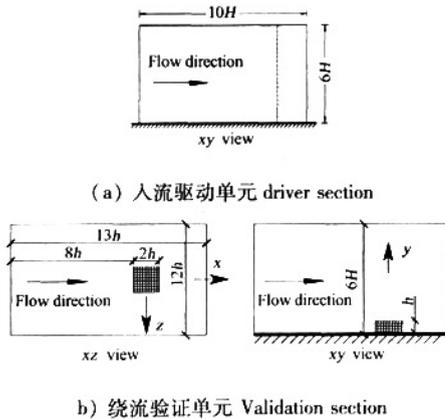
NS方程采用建立在交错网格上的MAC(Marker And Cell)方法进行解耦^[4]。驱动单元中,对流项及湍动粘性项采用Adams-Bashforth格式,粘性项采用Crank-Nicolson格式,各项均采用二阶精度中心差分离散;验证单元采用与实际模拟单元相同的差分格式,各项均采用一阶Euler时间格式及二阶中心差分空间格式,对流项施加部分数值粘性以避免实际模拟中间断引起的数值振荡^[5]。压力Poisson方程由超松弛迭代法(SOR)求解,验证单元入流面采用线性插值方式映射物理量。

3 算例及结果讨论

驱动单元对 $Re_t = u_c \delta / \nu \approx 1200$ (u_c 为无量纲壁面摩擦速度, ν 为流体动力粘度, δ 为边界层高度)的平板湍流边界层进行模拟(图4a),顺流向、竖向、展向尺度分别为 $10H, 6H, 5H$,其中, H 为对数率层高度,循环站(虚线表示)位于距入口 $8.5H$ 处,约为底层条状涡平均长度的2倍^[6],能够保证底层大尺度涡的充分发展。顺流向、竖向、展向网格数为 $64 \times 55 \times 40$,其中顺流向及展向为均分网格,竖向采用双曲正切网格,第一层网格厚度 $\Delta y_{wall}^+ \approx 2.0$ (y 为壁面法向坐标)。为节省计算时间,缩减绕流验证单元计算域(图4b)。

驱动单元入流面及展向为周期边界;壁面为无滑移边界;顶面为对称边界($\partial u / \partial y = 0; v = 0; \partial w / \partial y = 0, u, v,$

w 分别为流向、竖向、展向速度);出流面采用完全发展流 $\partial u_i / \partial x = 0$ 。验证单元入流面采用驱动单元的记录时程,其它位置边界条件同驱动单元,建筑位置处不施加任何边界条件。驱动与验证单元均采用对数率速度剖面进行初始化,驱动单元施加不大于 $10\% U_\infty$ 的随机脉动量以加速边界层发展,总计算时长 $150H/U_H$ (统计时长 $100H/U_H$)。



b) 绕验证单元 Validation section

图4 计算域

Fig. 4 Computational region

3.1 驱动单元的边界层自保持性

图5给出了驱动单元中壁面阻力系数 $C_f = 2/(\rho U_\infty^2) \tau_w$ 沿顺流向的分布。零压力梯度边界层中(Murlis^[7],Lund^[11]), $u_r(\tau_w)$ 及 C_f 不断减小;而恒压力梯度驱动下, $u_r(\tau_w)$ 保持较好, C_f 基本保持在0.0041,由前文引入压力梯度假设可知边界层基本保持恒定。

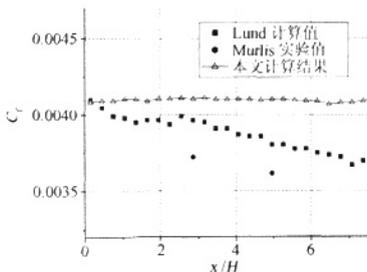


图5 壁面摩擦系数

Fig. 5 Wall friction coefficient

近地湍流边界层平均流速可由对数率描述:

$$U(y) = (u_r/k) \cdot \ln(\gamma \cdot u_r/v) + B \quad (5)$$

式中 K, B 为常数,如前所述,壁面摩擦速度 u_r 在恒压力梯度下沿顺流向保持恒定,因此 $U(y)$ 沿顺流向也将保

持恒定。图6给出了驱动单元中初始平均流场以及统计计算后 $x = H, 6H$ 处展向平均后的速度,由图可知统计平均流速略小于初始流速,这可能由于 Smagorinsky 模型近壁区过高地估计了湍动粘度^[8]。需要指出的是,将该算法应用于一般结构抗风数值模拟时,该统计时长对于结构表面平均风压及脉动风压的统计已足够,故流速的衰减尚在容许范围之内;另一方面,图示计算域内 $x = H, 6H$ 处的平均流速保持良好,验证了顺压力梯度对边界层自保持的有效性。

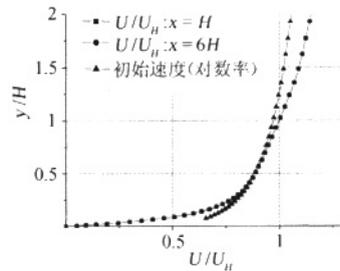


图6 流速剖面的保持

Fig. 6 Equilibrium of streamwise velocity profile

3.2 验证单元脉动流场保持性

图7给出了驱动单元与验证单元(虚拟建筑物处)中时均流速的半对数分布,可知平均流速剖面在验证单元中得到了很好的保持。当 $y/H \leq 0.2$ 时,流动处于粘性底层态, $0.2 < y/H \leq 1$ 时,流动处于对数率层态, $y/H > 1$ 时,流动处于尾迹率态。这也体现了大气边界层底层、下部摩擦层(对数率层)以及上部摩擦层(埃克曼层)的流动分层^[9]。此外,数值模拟结果与对数率式(5)以及指数率 $U(y) = U_H \cdot (y/H)^{0.18}$ 吻合良好,故该风剖面可为我国B类地区(空旷地区,粗糙度指数0.16)结构抗风所引用。

图8给出了流向、竖向、展向(I_u, I_v, I_w)的湍流强度。排除雷诺数效应,流向湍流强度与 DeGraaff 的实验结果吻合良好^[10],而展向湍流强度低于流向强度,竖向湍流强度最低。对数率层($0.2H \sim H$)内的湍流强度 $I_u = 15\% \sim 7\%$,湍流强度较低,这也与我国风荷载规范规定的空旷地貌(我国B类)的湍流特征相吻合^[11]。在验证单元中,入流边界三方向的湍流强度在“虚拟”建筑物处均有所增大,分析潜在原因有如下三点:1)入流面物理量的线性插值造成入流速度零散度特性下降;2)驱动单元中“虚拟”建筑处细化网格提高了模拟解析度;3)验证单元 Euler 显示算法与驱动单元 Crank - Nicolson 半隐式算法间的差别。总体而言,湍流剖面保持基本良

好,可为工程计算所接受。

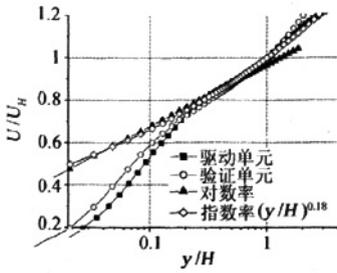


图 7 顺流向流速剖面结构

Fig. 7 Structure of streamwise velocity profile

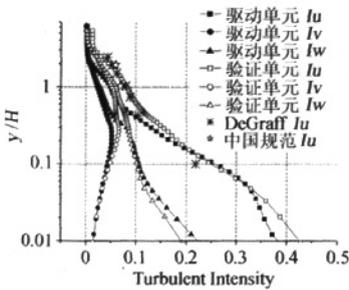


图 8 湍流度剖面

Fig. 8 Profile of turbulent intensity

图 9 给出了驱动单元与验证单元中建筑高度 h 处顺流向风速时程的功率谱,并与 Karman 谱(式 6)进行比较,其中, $\tilde{n} = nL_w/U_h$, L_w 、 U_h 分别为 h 高度处的湍流积分尺度及平均流速。若将风谱分为低频段($\tilde{n} = 0 \sim 0.2$)与惯性子区段($\tilde{n} > 0.2$, $-5/3$ 斜率的对数单减段)以及普遍平衡段^[9],则本文计算风谱对低频段捕捉良好。而惯性子区段亦是工程应用较为关心的高频风谱区段,但本文计算风谱尚未较好地满足这一要求,其原因可能由于测点湍流强度较低($\leq 10\%$)。当无量纲频率约高于 0.2 时,计算频谱急降。由湍流风场的能量级串原理可知,风谱的高频段代表小涡的能量贡献,而 LES 以模拟大尺度涡为基本思想,其可求解的旋涡尺度直接依赖于网格解析度。因此本文计算结果与 Karman 谱在高频段的差异除湍流模型的影响外,也与网格的解析度关系密切,图 9 验证单元“虚拟”建筑处较为细化的网格解出相对较高的计算频谱也说明了这一点。

$$\frac{nS_u(n)}{\sigma_u^2} = \frac{4\tilde{n}}{(1 + 70.8\tilde{n}^2)^{5/6}} \quad (6)$$

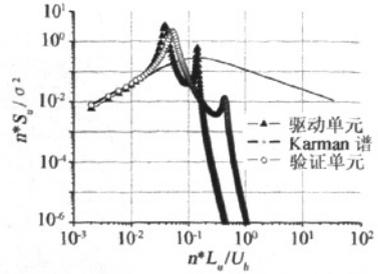


图 9 顺流向风速谱

Fig. 9 Streamwise wind spectrum

4 结论与展望

基于 MAC 方法及差分离散编制了三维 LES 求解程序,采用周期入流边界对湍流边界层进行 LES 模拟,并将顺压力梯度引入流体控制方程以维持湍流边界层的稳定。记录驱动单元脉动时程并将其引入验证单元以研究 LES 脉动入口方法的适用性。数值结果表明,脉动入流特性在验证单元内保持良好。顺流向平均流速剖面以及湍流强度剖面均满足低湍流度下的风场特性,风场频谱满足低频段要求。数值结果可为我国 B 类地貌下工程抗风研究采用。此外,本文尚存在以下几点以待后续工作的开展:

- (1) 出于网格解析度的原因,流速时程频谱在中高频段衰减,与 Karman 谱尚存在差异,因而有必要对数值算法及网格相关性进行研究。
- (2) 实际模拟中增加入流速度的零散度修正以减少小非匹配网格间的线性插值对收敛性的影响。
- (3) 将本文方法与粗面湍流边界层相结合,模拟工程结构抗风关注的高湍流度及高雷诺数风场。

参 考 文 献:

[1] LUND T S, WU X and SQUIRES K D. Generation of turbulent inflow data for spatially - developing boundary layer simulations [J]. *Journal of Computational Physics*, 1998, 140: 233 - 258.

[2] 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: 1151 - 1162.

[3] KONDO K, MURAKAMI S and MOCHIDA A. Generation of velocity fluctuations for inflow boundary condition of LES [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynam-*

- ics, 1997, 67&68: 51-64
- [4] HARLOW F H and WELCH J E. Numerical calculation of time - dependent viscous incompressible flow of fluid with free surface [J]. *Physics Fluids*, 1965, 8: 2182-2189
- [5] LEONARD B P. Computational technique in transient and turbulent flows[M]. Swansea, Pineridge Press, 1981
- [6] SCHLICHTING H. Boundary - layer theory [M]. 7th Edition, New York, McGraw - Hill Book Company, 1979
- [7] MURLIS J, TSAI H M and BRADSHAW P. The structure of turbulent boundary layers at low Reynolds number [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1982, 122: 13-56
- [8] MURAKAMI S. Current status and future trends in computational wind engineering [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 1997, 67&68: 3-34.
- [9] SIMIU E and SCANLAN R H. Wind effects on structuring: an introduction to wind engineering [M]. New York, John Wiley & Sons, Inc, 1996
- [10] DEGRAAFF D B and EATON J K. Reynolds - number scaling of the flat - plate turbulent boundary layer [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2000, 422: 319-346
- [11] 李波, 杨庆山, 黄韬颖. 中、美、澳荷载规范关于脉动风特征的规定[J]. *建筑科学与工程学报*, 2008, 25: 22-26
- LI B, YANG Q, HUANG T. Prescript of wind turbulence characteristics in Chinese, American and Australian load code [J]. *Journal of Architecture and Civil Engineering*, 2008, 25: 22-26

Applicability research on the turbulent inflow for building les simulation

ZHU Wei - liang¹, YANG Qing - shan¹, CAO Shu - yang²

(1. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. Department of Bridge Engineering, Tongji University, Shanghai, 200092, China)

Abstract: Using periodic boundary condition, a flat plate turbulent boundary layer (Driver section) is simulated by LES (Large Eddy Simulation) in a spanwise uniform grid system. Constant streamwise pressure gradient is introduced to NS equation to keep boundary layer thickness constant. Velocity and pressure time history in driver section are recorded and introduced as the inflow condition for a virtual building simulation section (Validation section), to research the applicability of this turbulent inflow. Satisfied numerical result of turbulent inflow is drawn from driver section, and streamwise velocity profile is well preserved by the pressure gradient, Inflow properties is also well preserved in Validation section. Inflow time history holds some of the properties of near ground wind field, and the method presented in this paper can be a reference for wind resistant research in open area.

Key words: structure engineering; wind resistant; large eddy simulation; turbulent inflow; pressure gradient