

文章编号:1673-2049(2007)04-0060-04

近流线型断面静力三分力系数的雷诺数效应识别

白桦,李加武,胡兆同,刘建新

(长安大学 公路学院,陕西 西安 710064)

摘要:基于软件平台 FLUENT 6.3,选用标准 $k-\epsilon$ 湍流模型配合壁面函数法,采用边界层网格计算了近流线型断面雷诺数为 1.38×10^6 的三分力系数,并将数值计算结果与高雷诺数风洞试验结果进行了比较,从中选取对三分力系数识别较好的计算网格计算不同雷诺数的三分力系数。结果表明:基于 FLUENT 6.3 的标准 $k-\epsilon$ 湍流模型配合边界层网格,当近壁面网格控制合理时,能较好地识别近流线型断面雷诺数大于 6.0×10^5 的三分力系数;当雷诺数小于 6.0×10^5 时,数值模拟结果不甚理想。

关键词:近流线型断面;雷诺数效应;三分力系数;数值模拟

中图分类号:TU312.1

文献标志码:A

Identification of Reynolds Number Effect of Tri-component Force Coefficient of Streamline-liked Section

BAI Hua, LI Jia-wu, HU Zhao-tong, LIU Jian-xin

(School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: Based on FLUENT 6.3, the turbulent model of standard $k-\epsilon$ and equilibrium wall function with boundary layer mesh which was used to solve the flow in the near regions was chosen to research the tri-component force coefficient of streamline-liked section when Reynolds number is 1.38×10^6 . The numerical simulation results were compared with the data obtained from wind tunnel test at high Reynolds number. Meshes which can be identified preferably were used to solve the tri-component force coefficient under different Reynolds number conditions. The results show that the tri-component force coefficient of streamline-liked section can be identified preferably by using reasonable control of mesh which is in the near regions when Reynolds number is more than 6.0×10^5 . However, the numerical simulation results calculated by FLUENT 6.3 isn't ideal when Reynolds number is less than 6.0×10^5 .

Key words: streamline-liked section; Reynolds number effect; tri-component force coefficient; numerical simulation

0 引言

静力三分力系数是计算桥梁静力风荷载的重要参数,目前常用方法是制作一定缩尺比的节段模型,通过风洞试验测定。由于风洞试验中的节段模型尺

寸远小于实际断面,导致风洞试验的雷诺数小于实际桥梁风环境下的雷诺数,风洞中测定的三分力系数可能大于实际值。近年来,随着计算流体动力学(CFD)的发展,采用数值仿真方法计算桥梁静力风荷载、静力三分力系数成为可能。数值仿真成本低、

收稿日期:2007-09-22

基金项目:国家自然科学基金项目(50578014)

作者简介:白桦(1979-),男,甘肃西和人,工学硕士,E-mail:baihua15@163.com。

周期短、效率高;不受模型尺度影响,可进行全尺度模拟,克服了风洞试验难以满足雷诺数的困难。笔者采用 FLUENT 6.3 计算了苏通桥近流线型断面的三分力系数,通过对计算网格的调整讨论了数值模拟的精度和可靠性。

1 研究内容

基于雷诺均值(RANS)的标准 $k-\epsilon$ 模型是高雷诺数湍流模型。在近壁区内的流动,雷诺数较低,湍流发展并不充分。本文中引入壁面函数法配合标准 $k-\epsilon$ 湍流模型,在近壁区生成边界层网格,通过控制壁面附近单元的 y^+ 值识别流线型断面的三分力系数。通过与试验数据比较讨论采用此方法进行模拟的可行性。

2 数值模拟

2.1 问题的提出

大量试验表明:湍流流动沿壁面法线方向分为壁面区与核心区。核心区内的流动为完全湍流,壁面区内湍流发展并不充分,湍流的脉动影响不如分子黏性的影响大。在壁面区的底层为黏性底层,流动几乎是层流流动;在黏性底层外面的过渡层,黏性力与湍流剪应力相当,流动状况比较复杂,很难用一个公式或定律来描述。壁面函数法采用一组半经验公式将壁面上的物理量与湍流核心区内的相应物理量联系起来^[1]。标准 $k-\epsilon$ 湍流模型与壁面函数法一起使用可以提高近壁面区的求解速度,配合边界层网格能否识别静力三分力系数的雷诺数效应是笔者要讨论的问题。

2.2 控制方程

计算风工程中,钝体绕流问题的控制方程是黏性不可压 Navier-Stokes 方程。基于雷诺均值的控制方程可写为^[2]

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) &= -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \\ \mu \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u_i u_j}) \end{aligned} \quad (2)$$

边界层内的流动可用普朗特边界方程表示

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (3)$$

$$\frac{\partial p}{\partial y} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (5)$$

2.3 物理模型的建立

2.3.1 数学建模

计算模型采用苏通桥主桥断面的实际几何尺寸。计算流域划分为两层:内侧小计算域局部加密,不断改变内侧网格类型和尺寸,并在桥梁断面的近壁面生成不同的边界层网格;外侧大计算域生成较粗的结构网格并保持不变。局部网格划分见图1。

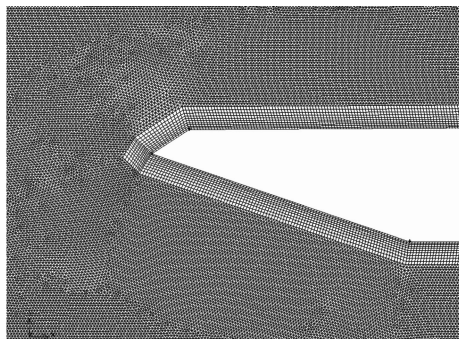


图1 局部网格划分

Fig.1 Division of Local Mesh

2.3.2 边界条件的设定

进口边界为速度入口来流条件;出口边界采用第2类边界条件,即所求解变量在出口处的法向梯度为0,为充分发展流;计算域的上下面采用对称边界条件,等价于自由滑移的壁面。建筑物表面采用无滑移的壁面条件。

2.3.3 网格划分

采用数值模拟方法进行流场计算,网格划分的质量将对数值模拟结果产生直接影响。网格质量的控制包括网格类型和网格尺度两方面。网格类型可分为结构网格与非结构网格,在应用描述流体流动的离散方程进行计算时,采用结构网格可能实现流动和网格成一条线,使数值耗散最小,而非结构网格不可能实现流动与网格成一直线。网格尺度也是影响计算精度的一个因素。要获得精确的解,常需要加密计算网格,但过密的网格又会影响计算速度,降低求解效率。本文中根据近壁面网格的 y^+ 值来控制近壁面网格的密度。 y^+ 可表示为

$$y^+ = \frac{\Delta y \rho u_\tau}{\mu} = \frac{\Delta y}{\nu} \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (6)$$

式中: Δy 为第1排网格节点至壁面的法向距离; u_τ 为壁面摩擦速度, $u_\tau = (\tau_w/\rho)^{1/2}$; τ_w 为壁面剪应力。

近壁区内的流动可用量纲一的参数 $u^+ = \frac{u}{u_\tau}$ 来描述。一般满足如下规律^[3]

$$u^+ = \begin{cases} y^+ & y^+ \leq 11.63 \\ \frac{1}{K} \ln(E y^+) & y^+ > 11.63 \end{cases} \quad (7)$$

式中: K 为 Karman 常数; E 为与表面粗糙度有关的常数。

2.4 三分力系数的计算结果

本文中三分力系数的定义如下:

阻力系数

$$C_D = \frac{F_D}{\rho U^2 HL/2}$$
 (8)

升力系数

$$C_L = \frac{F_L}{\rho U^2 BL/2}$$
 (9)

升力矩系数

$$C_T = \frac{M_T}{\rho U^2 B^2 L/2}$$
 (10)

式中: F_D 、 F_L 、 M_T 分别为体轴坐标系下阻力、升力和升力矩(图 2); ρ 为空气密度; U 为来流风速; L 、 H 、 B 分别为节段模型长度、高度和宽度。本文中选取 5 种网格划分方案计算雷诺数为 1.38×10^6 时的三

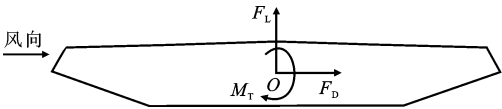


图 2 三分力坐标

Fig. 2 Tri-component Force Coordinate

分力系数,具体方案见表 1,计算结果与文献[4]中苏通桥高雷诺数风洞试验结果进行比较,具体结果见表 2。

表 1 网格划分方案

Tab. 1 Scheme of Mesh Division

方案编号	厚度	间距	小计算域网格类型	网格总数/ 10^4
1	1	0.10	结构化网格	51
2	1	0.10	结构化网格	83
3	4	0.05	结构化网格	43
4	4	0.10	结构化网格	76
5	4	0.10	非结构化网格	80

表 2 三分力系数计算误差

Tab. 2 Calculation Errors of Tri-component Force Coefficient

方案编号	相对风洞试验结果的相对误差/%								
	y^+ 阻力系数			y^+ 升力系数			y^+ 升力矩系数		
	10~30	30~100	100~200	10~30	30~100	100~200	10~30	30~100	100~200
1	7.0	9.0	11.4	7.6	8.8	10.2	15.9	22.0	27.1
2	9.3	10.2	12.1	8.1	9.4	10.3	13.0	15.6	17.2
3	8.6	9.6	10.7	8.2	8.7	9.9	17.3	21.1	23.7
4	4.6	4.5	5.2	5.8	6.0	6.9	5.4	7.7	8.9
5	5.6	6.0	6.2	8.8	9.6	11.0	9.9	10.2	11.7

由表 2 可知:当 y^+ 值大于 200 时,计算误差相对偏大,随着 y^+ 值的减小,计算精度逐渐提高;当不同方案的 y^+ 值接近 10~30 时,计算结果与试验结果能较好地吻合。对比方案 1 和方案 2 可见:当其他条件不变时,加密小计算域网格可以提高升力矩系数的计算精度,对阻力系数与升力系数影响不大。对比方案 2 和方案 4 可见:当其他条件不变时,增加边界层网格的厚度可以明显提高三分力系数的计算精度。对比方案 4 和方案 5 可见:当局部网格加密到一定程度后,非结构化网格计算精度虽较结构化网格差,但也可以满足工程精度要求。

数值模拟要想很好分辨出流体绕流特性,如涡脱、分离、再附等现象,近壁面网格尺度也是一个重要因素。当 y^+ 值小于 30 时,才能较好分辨出苏通桥背风面处流场所出现的驻点及小尺度涡。

2.5 CFD 计算结果与风洞试验结果的比较

采用方案 4 的计算网格研究阻力系数、升力系数、升力矩系数随雷诺数的变化规律,并且将 CFD

计算结果与风洞试验结果比较,检验采用此方法的可行性^[5-7]。

图 3~5 为三分力系数随雷诺数的变化规律。从三分力系数识别结果可见:阻力系数与升力矩系数随雷诺数的变化规律与风洞试验基本一致,当雷诺数大于 6.0×10^5 时,数值模拟结果与风洞试验结果非常接近,最大相对误差不超过 5%;雷诺数小于 6.0×10^5 时,计算相对误差相对较大,最大达到 30%。升力系数当雷诺数大于 6.0×10^5 时,计算结果与试验结果趋势较一致,但相对误差达到 10%。由以上分析可见:标准 $k-\epsilon$ 湍流模型配合壁面函数法在近壁面网格控制合理时,能较好地模拟较高雷诺数的三分力系数;当雷诺数较低时,数值模拟结果不甚理想。究其原因,可能是由于标准 $k-\epsilon$ 湍流模型是高雷诺数湍流模型,即它只有针对充分发展的湍流才有效。在近壁区的流动,虽然引入了壁面函数,但还不能真实反映较低雷诺数的流动。

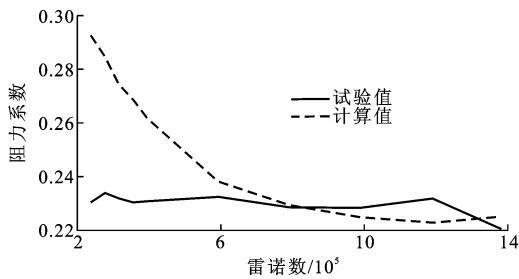


图3 阻力系数随雷诺数的变化

Fig. 3 Variations of Drag Coefficient vs Reynolds Number

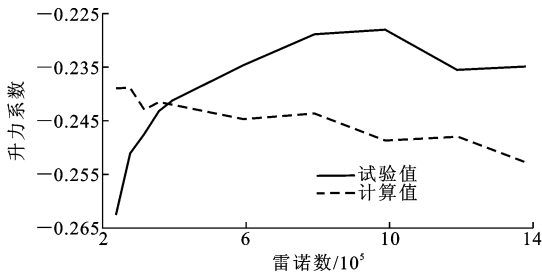


图4 升力系数随雷诺数的变化

Fig. 4 Variations of Lift Coefficient vs Reynolds Number

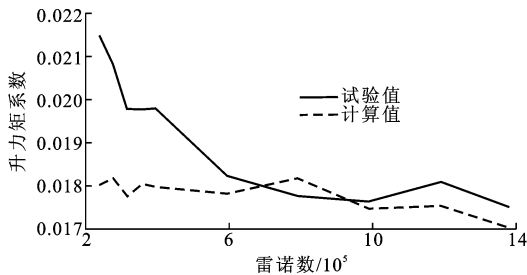


图5 升力矩系数随雷诺数的变化

Fig. 5 Variations of Lift Moment Coefficient vs Reynolds Number

3 结语

(1)标准 $k-\epsilon$ 湍流模型配合壁面函数法,当近壁面网格控制合理时,能较好地识别近流线型断面较高雷诺数的三分力系数;当雷诺数较低时,数值模拟结果不甚理想。

(2)采用壁面函数法进行数值模拟,近壁面的网格尺度设置至关重要。应用边界层网格,当 y^+ 值接近 $10 \sim 30$ 时,计算结果与试验结果能较好地吻合。

(3)其他条件不变时,增加边界层网格的厚度可

以明显提高三分力系数的计算精度。

(4)应用边界层网格,在其外围用非结构化网格局部加密,计算精度较结构化网格略差,但可以满足工程精度要求。

参考文献:

References:

- [1] 王福军. 计算流体力学分析——CFD 软件原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2004:128-132.
WANG Fu-jun. Computation Fluid Dynamics Analysis: Principle and Application of CFD Software[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004: 128-132.
- [2] 陶文铨. 数值传热学[M]. 2 版. 西安:西安交通大学出版社,1998.
TAO Wen-quan. Numerical Heat Transfer[M]. 2nd ed. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1998.
- [3] VERSTEEG H K, MALALASEKERA W. An Introduction to Computational Fluid Dynamics: the Finite Volume Method [R]. New York: Addison Wesley Longman Limited, 1995.
- [4] 李加武. 桥梁断面雷诺数效应及其控制研究[D]. 上海:同济大学,2003.
LI Jia-wu. Research on Reynolds Number Effects of Bridge Deck Section and the Effects-restraint [D]. Shanghai: Tongji University, 2003.
- [5] 李加武,林志兴,项海帆. 桥梁断面三分力系数的雷诺数效应[J]. 同济大学学报:自然科学版,2004,32(10): 1 328-1 333.
LI Jia-wu, LIN Zhi-xing, XIANG Hai-fan. Reynolds Number Effect of Mean Force Coefficient of Two Kinds of Typical Bridge Deck Section[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2004, 32 (10): 1 328-1 333.
- [6] 许福友,陈艾荣,张建仁. 缆索承重桥梁的颤振可靠性[J]. 中国公路学报,2006,19(5):59-64.
XU Fu-you, CHEN Ai-rong, ZHANG Jian-ren. Flutter Reliability of Cable Supported Bridge[J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(5): 59-64.
- [7] 胡建华,王修勇,陈政清,等. 斜拉索风雨振响应特性[J]. 中国公路学报,2006,19(3):41-48.
HU Jian-hua, WANG Xiu-yong, CHEN Zheng-qing, et al. Response Characteristics of Wind-rain Induced Vibration of Stay Cables[J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(3): 41-48.