

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.201703124



高雷诺数下二维长方形截面柱 绕流数值模拟

王珊珊, 董毓利, 段进涛, 王冬晔

(华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 为了研究高雷诺数下长方形截面柱绕流特性, 基于 Fluent 软件对宽高比分别为 2, 3, 4 的二维长方形截面柱绕流开展数值模拟, 并考虑角部修正对长方形截面柱的绕流特性的影响. 采用 Realizable $k-\epsilon$ 模型结合标准壁面函数求解长方形截面柱的绕流. 研究宽高比分别为 2, 3, 4 的长方形截面柱在不同风向角 α 和不同雷诺数的条件下, 阻力系数 C_D 、斯托哈数 St 的变化规律. 研究表明: 一定雷诺数范围内, 方向角为 0° 时, C_D , St 随着雷诺数的增加而增加, 随后基本保持不变; 在相同雷诺数下, 宽高比增大, C_D 减小, St 增大; 在高雷诺数条件下, 随着风向角 α 的增加, C_D 出现先减小后增大的现象, 而 St 与之相反.

关键词: 长方形截面柱; 高雷诺数; 气动特性; Fluent 软件; 数值模拟

中图分类号: O 357 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2018)01-0024-07

Numerical Simulation of Flow Around Two Dimensional Rectangular Column at High Reynolds Number

WANG Shanshan, DONG Yuli, DUAN Jintao, WANG Dongye

(College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: In order to study the flow characteristics of rectangular column under high Reynolds number, the numerical simulation of the flow around two dimensional (2D) rectangular column with the aspect ratio of 2, 3 and 4 is carried out based on the Fluent software, considering the influence of the angle correction on the flow characteristics of 2D rectangular column. The Realizable $k-\epsilon$ model combined with the standard wall function is used to solve the flow around 2D rectangular column, the drag coefficient C_D , Strouhal number St of 2D rectangular column with the aspect ratio of 2, 3 and 4 are investigated under various wind angles and various Reynolds numbers. The research results show that, within a range of Reynolds number, C_D and St increase with the increase of the Reynolds number at 0° wind angle, and then basically remain unchanged. Under the same Reynolds number, with the increase of the aspect ratio, C_D decreases, while St increases. At high Reynolds number, with the increase of wind angles α , C_D decreases initially, and then increases, but St increases initially, and then decreases.

Keywords: rectangular column; high reynolds number; aerodynamic characteristics; Fluent software; numerical simulation

钝体绕流现象广泛存在于桥梁工程、海洋工程、风工程等领域, 钝体绕流过程中存在流动分离、旋涡脱落及再附等复杂流动现象, 对建筑物的正常使用和安全性造成极大危害^[1]. 国内外学者采用数值模拟

收稿日期: 2017-03-09

通信作者: 董毓利(1965-), 男, 教授, 博士后, 主要从事结构抗火的研究. E-mail: DongYL@hqu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51278027)

和风洞试验对柱体绕流开展大量研究. 祝志文等^[2]采用剪切压力传输(SST) $k-\epsilon$ 湍流模型对高宽比为 4 的矩形断面进行数值模拟, 并与文献中的结果进行对比, 两者较为一致. 邓燕华等^[3]对雷诺数 $Re=6\times 10^4$ 的二维方柱在风向角 α 为 $0^\circ\sim 45^\circ$ 下的绕流开展数值计算, 得到斯托哈数 St 、平均和脉动风荷载随来流风向角的变化规律. Murakami 等^[4]采用大涡模拟对二维和三维方柱进行模拟, 结果表明三维数值模拟与试验结果更近, 尤其是在压强脉动性方面. Sohankar 等^[5]在低雷诺数条件下对二维方柱绕流进行全风向角数值模拟, 获得斯托哈数 St 、阻力系数 C_D 和升力系数 C_L 与风向角的变化关系. 据此可知, 在现有文献中, 少见对长方形截面柱绕流特性进行系统的研究. 本文基于 Fluent 软件对不同高宽比的二维长方形截面柱绕流开展数值模拟, 并考虑角部修正对长方形截面柱的气动特性的影响.

1 数学模型

1.1 控制方程

采用雷诺平均模型(RANS)作为研究钝体绕流的数值模型. 在直角坐标系下, 二维不可压黏性流体的运动采用 RANS 方程描述为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0, \tag{1}$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j}) + \frac{\partial}{\partial x_j}(-\rho \overline{u'_i u'_j}). \tag{2}$$

式(1),(2)中: ρ, μ 分别为空气密度和动力粘性系数; p 为压力; $u_j, u'_j (j=1, 2)$ 分别为气流沿 $x_i (i=1, 2)$ 的平均速度和脉动速度; $-\rho \overline{u'_i u'_j}$ 为雷诺应力, 是脉动运动的平均动量输运.

1.2 湍流模型

上述雷诺应力的引入使控制方程不封闭, 需要引入湍流模型求解. 两方程模型在计算流体力学软件 CFD 模拟中应用较为广泛. 针对雷诺数较高的情况($Re>10^5$), 采用 Realizable $k-\epsilon$ 模型, 结合标准壁面函数(要求 y^+ 为 $30\sim 300$), 求解长方形截面柱的绕流^[6-9]. 以指定湍流强度与粘性比的方式确定湍动能强度和耗散率; 考虑中等强度湍流时, 湍流强度和粘性比分别为 5% 和 $10^{[10]}$.

值得注意的是, Realizable $k-\epsilon$ 模型只适用于完全发展的湍流, 且受各项同性假设限制, 无法考虑绕流过程中的各向异性的影响.

1.3 边界条件及求解设置

模拟时, 采用速度入流边界和自由出流边界, 总压设置为 0; 流场的上下边界采用对称边界条件, 以减少阻塞率对流动的影响; 长方形截面柱采用无滑移壁面条件; 各流域之间采用界面交换边界.

选择基于压力的瞬态求解器, 采用 SIMPLEC 分离求解算法. 相较于 SIMPLE 算法, 该求解算法在通量修正上做了改进, 具有更快的收敛速度. 为了提高求解精度, 对流及扩散项采用二阶迎风格式.

1.4 无量纲系数

定义矩形断面升力系数 C_L 、阻力系数 C_D 和斯托哈数 St 分别为

$$C_L = \frac{F_L}{0.5\rho U^2 L_L}, \quad C_D = \frac{F_D}{0.5\rho U^2 L_D}, \quad St = \frac{fD}{U}. \tag{3}$$

式(3)中: F_L, F_D 分别为升力和阻力; ρ 为空气密度; U 为来流速度; L_L, L_D 分别为计算升力与阻力系数时的特征长度; D 为特征长度, 取与计算升力系数相同的特征长度 L_L ; f 为涡脱频率.

2 计算分析

2.1 验证模型

方柱边长 $B=0.1\text{ m}$, 风向角 α 以 5° 为间隔, 在 $0^\circ\sim 45^\circ$ 变化. 计算阻力系数 C_D 和升力系数 C_L 时, 采用特征长度 $L=B(\sin \alpha + \cos \alpha)^{[11]}$, 模型姿态如图 1 所示.

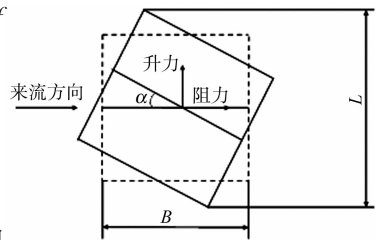


图 1 模型姿态

Fig. 1 Model attitude

为了减少阻塞率的影响,设流域的宽度为 $30B$,长度为 $93B$,方柱的中心位于距离来流入口 $32B$ 处,此时,阻塞率约为 3.3% . 为了方便考虑不同的风向角,将流域分成两个部分,其中,方柱包含于圆形流域内,方柱的中心与圆心重合. 当考虑风向角 α 时,只需要将圆形流域绕着圆心旋转相应的 α 即可. 入流速度采用 $10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,对应的雷诺数 $Re=6.8\times10^4$.

2.2 网格无关性检验

影响网格质量的主要因素包括网格数量、延展因子不同引起的网格疏密和近壁区第一层网格高度等因素. 为了找到较为合理的网格,以方向角 $\alpha=0^\circ$ 设计了 4 组不同网格用于网格无关性检验. 4 组网格参数,如表 1 所示. 表 1 中:延展因子指的是圆形流域内的延展因子,外部的延展因子根据圆形流域外层网格大小进行相应的调整,以保证两个流域在界面交换边界上的网格尺寸基本保持一致. 由表 1 可知:4 组网格的差异在于第一层网格高度和延展因子不同. 不同网格条件下的计算结果与文献的对比,如表 2 所示. 由表 2 可知:4 组网格的计算结果与文献都较为吻合. 为了减少计算开销并保证计算精度,采用第一组网格参数作为后续计算的依据.

2.3 计算结果

壁面第一层网格高度为 0.02 mm ,采用结构化网格,网格总数为 3.8 万. 局部计算网格,如图 2 所示. 其余网格图 2 中未列出. 计算采用上述湍流模型,并考虑中等湍流强度. 计算中监测阻力系数和升力系数,时间步长为 0.001 s ,仿真时间为 1.5 s .

表 1 4 组网格参数

Tab. 1 Parameter of four mesh arrangements

网格编号	第一层高度/mm	延展因子	网格总数
M1	0.02	1.13	38 092
M2	0.02	1.05	71 080
M3	0.01	1.13	40 592
M4	0.04	1.13	36 536

表 2 不同网格计算结果与文献对比

Tab. 2 Comparison between calculation results and results in references for different meshes

项目	$Re/\times10^4$	C_D	St
M1	6.8	2.16	0.135
M2	6.8	2.12	0.125
M3	6.8	2.17	0.132
M4	6.8	2.05	0.131
文献[12]	—	2.10	—
文献[13]	—	2.12	—
文献[14]	2.1	—	0.131

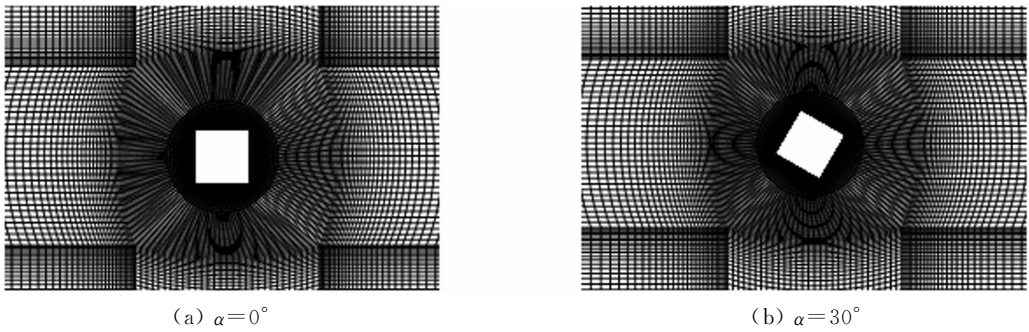


图 2 局部计算网格

Fig. 2 Local mesh arrangement

计算得到不同风向角下的阻力系数平均值 C_D 和斯托哈数 St ,如图 3,4 所示.

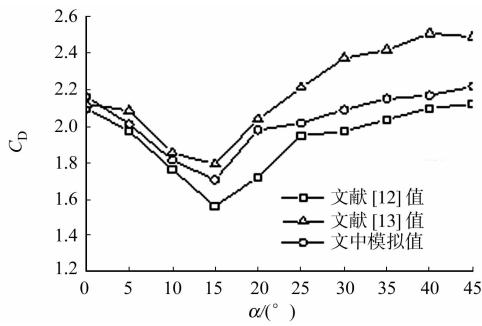


图 3 阻力系数 C_D 模拟值与文献值的对比

Fig. 3 Comparison between drag coefficient C_D simulation value and value in references

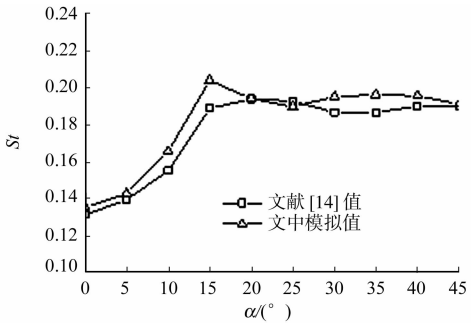


图 4 斯托哈数 St 模拟值与文献值的对比

Fig. 4 Comparison between Strouhal number St simulation value and value in references

由图 3,4 可知:数值模拟结果与既有文献[12-14]吻合地较好;模拟结果与文献[12-13]试验结果吻合较好;风向角 $\alpha=0^{\circ}\sim 15^{\circ}$ 时,随着风向角的增大,阻力系数逐渐下降;当风向角 $\alpha=15^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 时,阻力系数大幅度上升;当风向角 $\alpha=30^{\circ}$ 时,增速变慢. 模拟结果除了 $\alpha=0^{\circ}$ 时比文献[12]的结果多了 3.0%,其他值均为文献[12-13]两者之间的值,文中模拟结果与文献[12]的试验结果更为接近.

由图 4 可知:风向角 $\alpha\geq 15^{\circ}$ 时,斯托哈数 St 比文献[14]的试验结果略高;当 $\alpha=15^{\circ}$ 时,模拟结果与试验相差约 8%;随着风向角逐渐增大,两者的差异变小. 总体而言,两者的发展趋势大致相同,存在误差的主要原因为文献[14]是雷诺数 $Re=2.1\times 10^4$ 三维方柱试验的数据,而文中采用的是 $Re=6.8\times 10^4$ 二维方形截面数值模拟. 上述研究及结果表明:选用的计算参数是合理有效的.

2.4 长方形截面柱计算模型

根据方柱的计算结果,考虑一个 $B\times D$ 的长方形截面柱. 其中, B 仍取 0.1 m, D 取 0.2, 0.3, 0.4 m, 宽高比 D/B 分别为 2, 3, 4. 对于宽高比为 2 的模型,考虑等边切角,切角尺寸为 $B/8$. 采用 0.1 m 作为计算雷诺数 Re 的特征长度,而升力系数 C_L 与阻力系数 C_D 的特征长度 L_L, L_D 与风向角 α 的对应关系,如表 3 所示. 为了研究不同雷诺数 Re 对长方形截面柱绕流的影响,参考文献[15],针对不同的宽高比模型分别设计了 9 种不同雷诺数 Re 的工况,雷诺数 Re 的范围为 $0.2\times 10^6\sim 2.5\times 10^6$. 数值计算中,雷诺数 Re 均大于 10^5 ,采用 Realizable $k-\epsilon$ 模型结合标准壁面函数进行计算. 近壁区最小网格尺寸为 0.02 mm,其余边界条件与上述相同,不再赘述.

表 3 L_L, L_D 与风向角 α 的对应关系
Tab. 3 Relationship among L_L, L_D and wind angles α

$\alpha/(^{\circ})$	$D/B=2$		$D/B=3$		$D/B=4$	
	L_L/m	L_D/m	L_L/m	L_D/m	L_L/m	L_D/m
0	0.200	0.100	0.300	0.100	0.400	0.100
5	0.208	0.117	0.308	0.126	0.407	0.134
10	0.214	0.133	0.313	0.151	0.411	0.168
15	0.219	0.148	0.316	0.174	0.412	0.200
20	0.222	0.162	0.316	0.197	0.410	0.231
25	0.224	0.175	0.314	0.217	0.405	0.260
30	0.223	0.187	0.310	0.237	0.396	0.287
35	0.221	0.197	0.303	0.254	0.385	0.311
40	0.217	0.205	0.294	0.269	0.371	0.334
45	0.212	0.212	0.283	0.283	0.354	0.354

3 计算结果与讨论

3.1 雷诺数 Re 的影响

当风向角为 0° 时,长方形截面柱的阻力系数 C_D 随雷诺数 Re 的变换规律,如图 5 所示. 当风向角为 0° 时,平均升力系数 C_L 为 0,故图 5 未画出 0° 风向角下的升力系数曲线. 由图 5 可知:对于宽高比为 2 的模型,当 $Re=0.2\times 10^6$ 时, C_D 约为 0.14;随着 Re 增大, C_D 也有所增加;当 $Re=0.6\times 10^6$ 时, C_D 约为 0.15,较 $Re=0.2\times 10^6$ 时,增幅为 5.1%;当 Re 为 $0.6\times 10^6\sim 2.5\times 10^6$ 时, Re 的增大对 C_D 基本无影响. 对于宽高比为 3, 4 的模型,阻力系数 C_D 也先随着雷诺数 Re 的增大而增加,当 Re 超过 0.6×10^6 后,阻力系数 C_D 基本保持稳定. 其中,宽高比为 3 时,阻力系数 C_D 约为 1.39;宽高比为 4 时,阻力系数 C_D 约为 1.28. 由图 5 还可知:当雷诺数相等时,随着模型宽高比的增加,阻力系数 C_D 将随之减小.

风向角为 0° 时,长方形截面柱的斯托哈数 St 随雷诺数 Re 的变换规律,如图 6 所示. 计算斯托哈数 St 时,采用表 1 中 0° 风向角对应的 L_L . 由图 6 可知:对于宽高比为 2 的模型,当 $Re=0.2\times 10^6$ 时, St 约

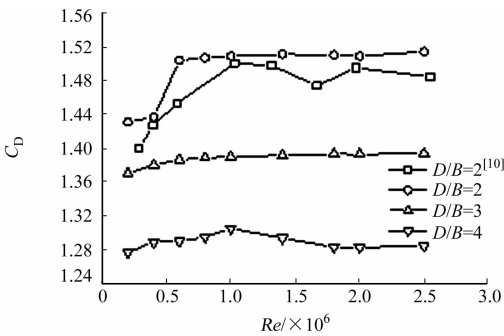


图 5 阻力系数 C_D 随雷诺数 Re 的变换规律
Fig. 5 Variations of drag coefficient C_D with Reynolds number Re

为 0.15;随着 Re 的增加,斯托哈数 St 也有所增大,当 $Re=0.6\times10^6$ 时, St 约为 0.18;雷诺数增至 2.5×10^6 时,斯托哈数 St 基本上保持不变,这与圆柱的斯托哈数 St 随雷诺数 Re 的变化规律类似.当宽高比为 3,4 时,斯托哈数 St 变化规律与宽高比为 2 时情况类似,随着模型宽高比的增加,斯托哈数 St 也随之增大;雷诺数 Re 的变化规律与宽高比为 2 时类似,不再赘述.

3.2 风向角的影响

根据节 3.1 的计算结果,取雷诺数 $Re=1.0\times10^6$,分析风向角对阻力系数 C_D 、斯托哈数 St 的影响.不同宽高比模型的阻力系数 C_D 随风向角 α 的变换规律,如图 7 所示.由图 7 可知:对于宽高比为 2 的模型,当 $\alpha\leq10^\circ$ 时,随着 α 的增大,阻力系数 C_D 变小;当 $\alpha=10^\circ$ 时, C_D 最小值约为 1.15;当 $10^\circ<\alpha\leq45^\circ$ 时,随着 α 的增大,阻力系数 C_D 也随之增大.

由图 7 还可知:其变化关系近似为线性关系.对于宽高比为 3,4 的模型,阻力系数 C_D 与风向角 α 的关系与宽高比为 2 的模型大体相同,但存在一定差异:当宽高比为 3,4 时,阻力系数 C_D 在 $\alpha=5^\circ$ 时,出现最小值,两者的最小值接近,约为 1.10;当风向角 α 变大时,阻力系数也随之增大,但与风向角 α 之间不再为线性关系.综上所述,随着宽高比的增大,改变风向角时,阻力系数 C_D 的最小值所对应的风向角 α 将越小.不同宽高比模型的斯托哈数 St 随风向角 α 的变换规律,如图 8 所示.由图 8 可知:对于宽高比为 2 的模型,当 $\alpha\leq10^\circ$ 时,随着 α 的增大,斯托哈数 St 有所增大;当 $\alpha=10^\circ$ 时, St 最大值约为 0.27;当 $10^\circ<\alpha\leq45^\circ$ 时,随着 α 的增大,斯托哈数 St 随之减小.

不同风向角下长方形截面柱绕流的涡脱频率(f),如表 4 所示.由表 4 可知:随着风向角的增加,涡脱频率随之减小,对于宽高比较大的模型,涡脱频率减小得更显著.但对于宽高比为 4 的模型,当 $0^\circ<\alpha\leq20^\circ$ 时,涡脱频率随着 α 的增大而减小;当 α 增大时,涡脱频率有所增加.

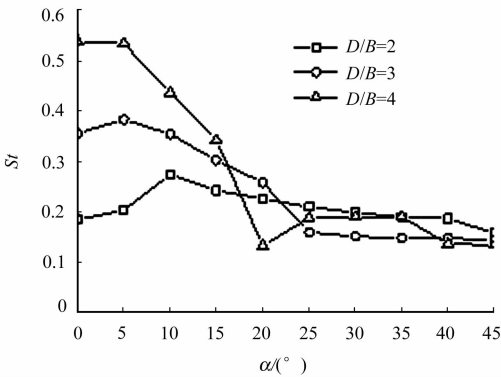


图 8 斯托哈数 St 随风向角 α 变化规律
Fig. 8 Variations of Strouhal number St with wind angles α

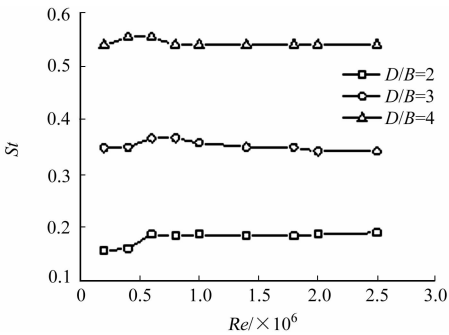


图 6 斯托哈数 St 随雷诺数 Re 的变化规律
Fig. 6 Variations of Strouhal number St with Reynolds number Re

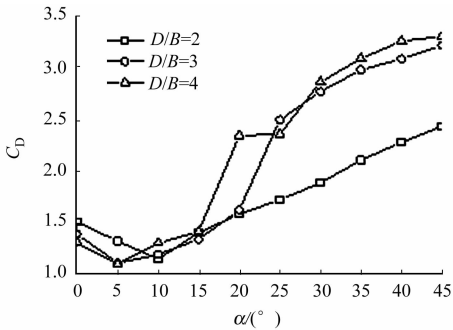


图 7 阻力系数 C_D 随风向角 α 变化规律
Fig. 7 Variations of drag coefficient C_D with wind angles α

表 4 不同风向角 α 对应的 f
Tab. 4 f corresponding to different wind angles α

$\alpha/(^\circ)$	f/s^{-1}		
	$D/B=2$	$D/B=3$	$D/B=4$
0	9.26	11.90	13.51
5	9.80	12.50	13.16
10	12.82	11.36	10.64
15	11.11	9.62	8.33
20	10.20	8.20	3.25
25	9.43	5.10	4.67
30	8.93	4.90	4.81
35	8.62	4.90	4.95
40	8.62	5.05	3.70
45	7.46	5.10	3.82

结合表 4 及式(3),其主要原因是涡脱频率减小导致的.当宽高比为 3 时,斯托哈数 St 与风向角 α 的变化规律与宽高比为 2 的模型在总体趋势上一致,但在 $\alpha=5^\circ$ 时,斯托哈数 St 出现最大值,约为 0.35.对于宽高比为 4 的模型,当 $0^\circ\leq\alpha\leq5^\circ$ 时,斯托哈数 St 的值基本保持不变,约为 0.54;当 α 增大时,斯托哈数 St 的变化规律与对应的涡脱频率类似.综上所述,随着宽高比的增大,改变风向角时,斯托哈数

St 的最大值所对应的风向角将越小.

3.3 角部修正对模型的影响

宽高比为 2 的模型角部修正后的阻力系数 C_D 与未修正模型的对比图,如图 9 所示.由图 9 可知:角部修正后,长方形截面柱的阻力系数 C_D 随雷诺数的变化规律大致与未修正的模型相同.当雷诺数 $Re>1.0\times10^6$ 时,未切角的模型阻力系数稳定值约为 1.51,而切角后的阻力系数稳定值约为 0.84,减少了 44.4%.

切角模型与未切角模型的无量纲流速分布及无量纲湍动能度分布,如图 10,11 所示.

由图 10 可知:对于未切角的模型,尾流长度约为模型宽度的 3 倍,且模型上、下壁面处剪切层厚度较大;切角模型的尾流长度约为模型宽度的 2 倍,且模型上、下壁面处的剪切层厚度明显减小.由图 11 可知:切角之后,模型周围的湍动能有所增加,且尾流区湍动能的带长有所减短.

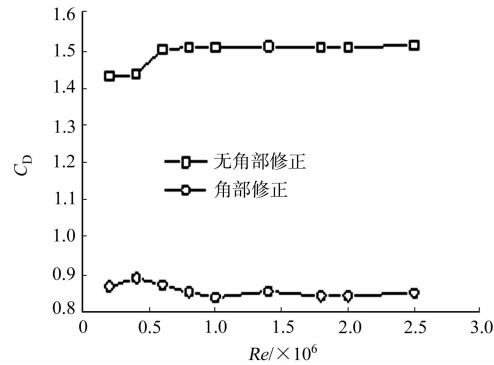


图 9 阻力系数 C_D 修正前后的模型对比

Fig. 9 Model comparison before and after correction of drag coefficient C_D

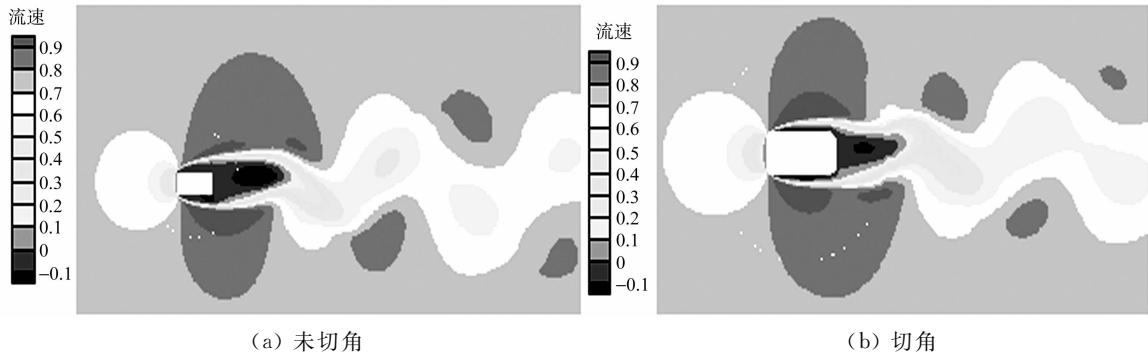


图 10 无量纲速度分布

Fig. 10 Dimensionless velocity distribution

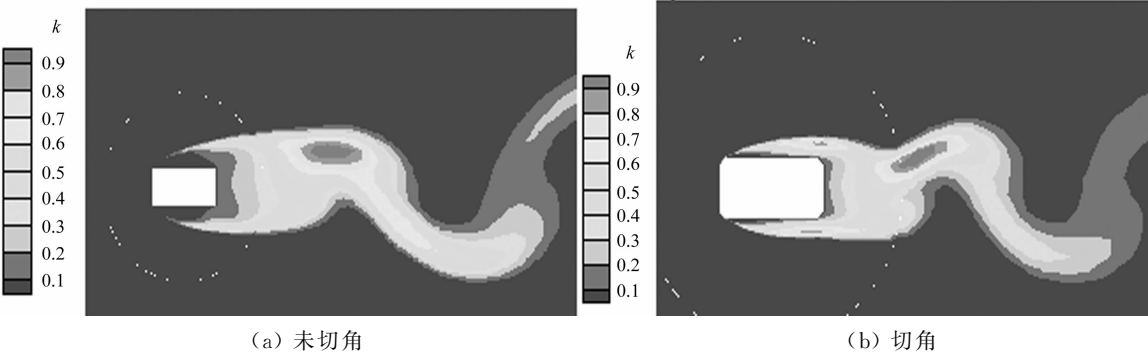


图 11 无量纲湍动能分布

Fig. 11 Dimensionless turbulent kinetic energy distribution

4 结论

1) 采用 Realizable $k-\epsilon$ 模型,结合标准壁面函数对长方体截面柱的复杂绕流及气动特性进行仿真计算,结果与既有文献吻合地较好,表明该模型在二维长方体柱的绕流模拟中具有较好的仿真效果.

2) 对于 0° 方向角的模型,在一定范围内,阻力系数 C_D 、斯托哈数 St 随着雷诺数的增加而有所增加,当雷诺数 $Re>0.6\times10^6$ 时,阻力系数、斯托哈数基本保持不变;在相同雷诺数下,随着宽高比增大,阻力系数 C_D 随之减小,而斯托哈数 St 随之增大.

3) 在高雷诺数($Re>1.0\times10^6$)条件下,随着风向角 α 的增加,阻力系数 C_D 出现先减小后增大的现象;而斯托哈数 St 出现先增大后减小的现象.

参考文献:

- [1] 谢志刚,许春晓,崔桂香,等. 方柱绕流大涡模拟[J]. 计算物理,2007,24(2):171-180. DOI:10.19596/j.cnki.1001-246x.2007.02.008.
- [2] 祝志文,夏昌,邓燕华. 钝体矩形断面绕流场机理与主分量分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2012,39(7):7-13. DOI:10.3969/j.issn.1674-2974.2012.07.002.
- [3] 邓燕华,祝志文. 全风向角下二维方柱绕流数值模拟[J]. 铁道科学与工程学报,2016,13(9):1796-1802. DOI:10.3969/j.issn.1672-7029.2016.09.020.
- [4] MURAKAMI S,MOCHIDA A. On turbulent vortex shedding flow past 2D square cylinder predicted by CFD[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics,1995,54/55:191-211. DOI:10.1016/0167-6105(94)00043-D.
- [5] SOHANKAR A,NORBERG C,DAVIDSON L. Low-Reynolds-number flow around a square cylinder at incidence: Study of blockage, onset of vortex shedding and outlet boundary condition[J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids,1998,26(1):39-56.
- [6] WILCOX D C. Reassessment of the scale-determining equation for advanced turbulence models[J]. AIAA Journal,1988,26(11):1299-1310. DOI:10.2514/3.10041.
- [7] MENTER F R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications[J]. AIAA Journal,1994,32(8):1598-1605. DOI:10.2514/3.12149.
- [8] LIAW K. Simulation of flow around bluff bodies and bridge deck sections using CFD[D]. Nottingham:University of Nottingham,2005.
- [9] 胡坤,李振北. ANSYS ICEM CFD 工程实例详解[M]. 北京:人民邮电出版社,2014.
- [10] 顾明,王新荣. 工程结构雷诺数效应的研究进展[J]. 同济大学学报(自然科学版),2013,41(7):961-969. DOI:10.3969/j.issn.0253-374x.2013.07.001.
- [11] ABOUEIAN J,SOHANKA A. Identification of flow regimes around two staggered square cylinders by a numerical study[J]. Theoretical and Computational Fluid Dynamics,2017,31(3):295-315. DOI:10.1007/s00162-017-0424-2.
- [12] LEE B E. The effect of turbulence on the surface pressure field of a square prism[J]. Journal of Fluid Mechanics,1975,69(2):263-282. DOI:10.1017/S0022112075001437.
- [13] OTSUKI Y,FUJII K,WASHIZU K,*et al.* Wind tunnel experiments on aerodynamic forces and pressure distributions of rectangular cylinders in a uniform flow[J]. Symp Jpn Assoc Wind Eng,1978,5:169-176.
- [14] CHEN J M,LIU C H. Vortex shedding and surface pressures on a square cylinder at incidence to a uniform air stream[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow,1999,20(6):592-597. DOI:10.1016/S0142-727X(99)00047-8.
- [15] LAROSE G L,D'AUTEUIL A. Experiments on 2D rectangular prisms at high Reynolds numbers in a pressurised wind tunnel[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics,2008,96(6):923-933. DOI:10.1016/j.jweia.2007.06.018.

(责任编辑:钱筠 英文审校:方德平)