文章编号:1674-2974(2026)03-0165-09 DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2026034

矩形柱气动性能的雷诺数效应及其流动机理

杜晓庆 ,刘辰泽 ,朱红玉 †
(上海大学 力学与工程科学学院,上海 200444)

摘 要:大长细比矩形截面柱广泛应用于超高层建筑和大跨度桥梁等风敏感结构.以宽高比 B/D=1/3~6 的矩形柱为研究对象,基于二维层流模型和三维大涡模拟湍流模型,在雷诺数 Re=100~120 000 范围内,研究了矩形柱的平均阻力系数(C_D)、斯托罗哈数(St)和平均风压系数(C_p)等气动性能的雷诺数效应及其绕流场的演变规律.结果表明,在本研究的宽高比和雷诺数范围内,矩形柱绕流特征可按宽高比分为三类.当 B/D<2.5 时,分离剪切层无再附现象,绕流场的转捩现象发生在 Re=100~250;当雷诺数进一步增大后,矩形柱背风面负压强度增加,导致 C_D 增大.当 2.5<B/D≤6 时,分离剪切层出现再附现象,流动转捩现象发生在 Re=500~1 000,C_D 和 St 也存在显著的雷诺数效应;而当 Re≥1 000 时,二者的雷诺数效应不明显.值得注意的是,对于 B/D=2.5,当 250≤Re≤500 时,分离剪切层会发生再附,尾流长度随着雷诺数的增大而减小;而当 Re≥1 000 时,剪切层再附现象消失,尾流长度明显增加.

关键词:矩形柱;气动性能;流场结构;雷诺数;宽高比
中图分类号:U448 **文献标志码**:A

Reynolds number effects on aerodynamic performance of rectangular cylinders and its flow mechanism

DU Xiaoqing, LIU Chenze, ZHU Hongyu†
(School of Mechanics and Engineering Science, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract: Rectangular cross-section cylinders with high slenderness ratios are commonly employed in wind-sensitive structures such as super-tall buildings and long-span bridges. Two-dimensional laminar and three-dimensional large eddy simulation (LES) were carried out to investigate the Reynolds number (Re) effects of rectangular cylinders with an aspect ratio B/D=1/3~6 and Re=100~120 000. The mean drag coefficient (C_D), Strouhal number (St), mean pressure coefficient (C_p), and flow mechanism of rectangular cylinders were analyzed. It is found that within the ranges of B/D and Re examined in this study, the flow characteristics around rectangular cylinders can be classified into three categories according to B/D. For B/D<2.5, there is no reattachment and flow transition from laminar to turbulence occurring in the range of Re=100~250. As Re increases, the negative pressure on the back surface of the rectangular cylinder rises, leading to an increase in C_D. For 2.5<B/D≤6, separated shear layers reattach to the lateral surfaces, and flow transition occurs from Re=500 to 1 000, accompanied by significant

* **收稿日期**:2025-02-11
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51978392, 52478534),National Natural Science Foundation of China(51978392, 52478534)
作者简介:杜晓庆(1973—),男,江苏无锡人,上海大学教授,博士
† 通信联系人,E-mail: hongyuzhu@shu.edu.cn

Reynolds number effects on C_D and St. However, these effects become negligible when $Re \geq 1\,000$. Notably, for B/D=2.5, shear layer reattachment occurs at Re=250~500, the streamwise length of wake flow decreases with increasing Re; when $Re \geq 1\,000$, the reattachment phenomenon disappears, and the streamwise length of wake flow significantly increases.

Key words: rectangular cylinder; aerodynamic performance; flow structure; Reynolds number; aspect ratio

大长细比矩形截面柱形结构常用于超高层建筑和大跨度桥梁[1],此类结构为风敏感结构,风荷载是主要的设计荷载. 宽高比(B/D)、雷诺数(Re)是影响矩形柱气动性能和绕流特性的两个主要因素[2],研究不同宽高比矩形柱的气动性能、绕流特性随雷诺数的演化规律,有助于揭示大长细比矩形柱体的风荷载特性及其流动机理,为类似结构的抗风设计和截面优化提供理论依据.

研究者主要通过风洞试验和数值模拟对矩形柱的气动性能和流场特性进行研究[3]. Nakaguchi 等[4]通过风洞试验的研究发现,在 Re=2×10^4~6×10^{4}之间,B/D=0.6的矩形柱阻力系数会出现峰值. Yu 等[5]则采用大涡模拟也发现了类似现象. Ohya[6]进一步研究了这一峰值出现的原因,结果表明,在 B/D=0.5 附近时,矩形柱背风面的基底风压系数会发生不规则的波动,认为尾流中存在两种流态的突变. Yu 等[7]发现 Re=1×10^{5}时,$B/D \leq 2$ 的矩形柱不存在分离剪切层的再附现象,B/D>2 的矩形柱则会发生明显的剪切层再附现象. Shimada 等[8]则在 B/D=0.6~8 条件下,通过数值模拟方法研究了矩形柱流态随宽高比的变化情况. 在 Re=1×10^{5}时,Sohankar[9]通过大涡模拟研究发现,斯托罗哈数(St)在 B/D=2.5~3.0 之间会发生不连续的跳跃.

已有研究表明,雷诺数对矩形柱气动性能和流场结构具有显著影响[10]. Van Hinsberg 等[11]通过风洞试验,观察到圆角方柱的气动力在 Re=6.7×10^5~9.8×10^{5}的范围内出现了迟滞效应. Liu 等[12]在 Re=3×10^3~2.1×10^{4}的条件下,对为 B/D=1~4 的矩形柱开展试验研究,发现 B/D=3 左右是矩形柱的临界宽高比,在此宽高比附近,绕流场的流态会发生突变,但这一流态的突变也会受到雷诺数的影响. 王新荣等[13]发现 B/D=4 矩形柱的表面风压分布对雷诺数的变化较为敏感. Schewe[14]对 B/D=5 矩形柱开展试验研究,发现雷诺数会影响分离泡的形状和稳定性,进而改变矩形柱的升力系数. Davis 等[15]在 Re=100~2 800 的条件下,对 B/D=0.6~1.7 的二维矩形柱进行数值分析,发现 St 随着 Re 的增大而增大. Mashhadi 等[16]研究 B/D=0.25~4 矩形柱的雷诺数效应后发现,发生流动转捩的雷诺数会随着宽高比的增大而增大. 于春放等[17]采用大涡模拟(LES)方法对 B/D=4 的圆角矩形柱开展数值研究,结果表明,当 $Re \leq 4\times10^3$ 时,圆角矩形柱气动性能和流场特性的雷诺数效应显著. Mannini 等[18]采用 URANS 方法分析了 B/D=5 的二维矩形柱绕流的雷诺数效应,并指出 URANS 方法在处理瞬态流动的准确性较三维 LES 模型和分离涡模拟(DES)模型仍有较大差距. 综合以往的研究发现,系统研究不同宽高比矩形柱绕流雷诺数效应文献较少,针对雷诺数效应流动机理的探究还有待深入.

本文基于层流模型(Laminar)和大涡模拟湍流模型,在 Re=100~120 000 和 B/D=1/3、1/2、1、2.5、4、6 的条件下,研究均匀来流下矩形柱的平均阻力系数(C_D)、斯托罗哈数和平均风压系数(C_p)等气动性能的雷诺数效应,并探究矩形柱绕流场特性随雷诺数的演化规律.

1 数值方法

大涡模拟模型的基本思想是用滤波器将物理量分成大尺度涡和小尺度涡,大尺度涡的湍流运动是通过瞬时 Navier-Stokes(N-S)方程直接计算得出的,而小尺度涡是通过与大尺度涡的非线性相关量来实现的. 与直接数值模拟和雷诺平均法相比,大涡模拟可以节约计算资源,能更好地实现流场中湍流旋涡的模拟,从而捕捉到更完善的流场脉动信息[19]. 因此,为了准确模拟矩形柱绕流场特性,本文采用大涡模拟方法.

经过滤波函数的滤波后,可得到大尺度涡的不可压缩 N-S 方程:

$$\frac{\partial \overline{u}_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t}+\frac{\partial \bar{u}_i\bar{u}_j}{\partial x_j}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i}+\nu\frac{\partial^2\bar{u}_i}{\partial x_j\partial x_j}-\frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \tag{2}$$

式中:$\bar{u}_i$为滤波后速度分量;ρ为流体密度;$\bar{p}$为滤波后压力;ν为流体动力黏度;τ_{ij}为亚格子应力张量分量.本文采用WALE亚格子应力模型,具有以下形式:

$$\tau_{ij}-\frac{1}{3}\tau_{kk}\delta_{ij}=-2v_t\bar{S}_{ij} \tag{3}$$

$$\bar{S}_{ij}=\frac{1}{2}\left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j}+\frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i}\right) \tag{4}$$

$$v_t=\frac{1}{2}\rho L_S^2\frac{\left(S_{ij}^dS_{ij}^d\right)^{3/2}}{\left(\bar{S}_{ij}\bar{S}_{ij}\right)^{5/2}+\left(S_{ij}^dS_{ij}^d\right)^{5/4}} \tag{5}$$

式中:v_t是亚格子尺度的湍流黏度;$\bar{S}_{ij}$是分辨尺度的应变速率张量分量;L_S代表亚格子网格的最小尺寸.

本文研究采用Ansys Fluent软件,通过SIMPLEC算法来求解压力-速度耦合方程,空间离散方法采用中心差分格式,时间离散方法则采用二阶隐式格式.

2　计算模型与验证

2.1　计算模型

图1和图2以B/D=4的矩形柱为例,给出了本文计算模型和三维计算域示意图.矩形柱绕流的数值模拟计算采用O型计算域,计算域直径为60D,阻塞率为1.67%.计算域采用速度入口边界,出口采用自由流出边界,展向采用了周期性边界,矩形柱表面则采用无滑移壁面.

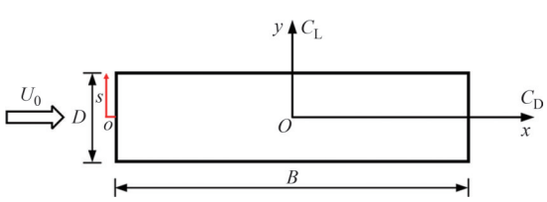


图1　计算模型

Fig.1　Computational model

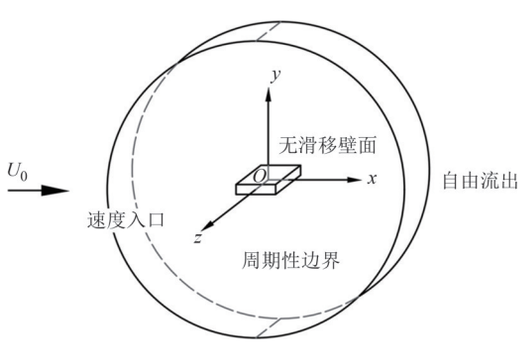
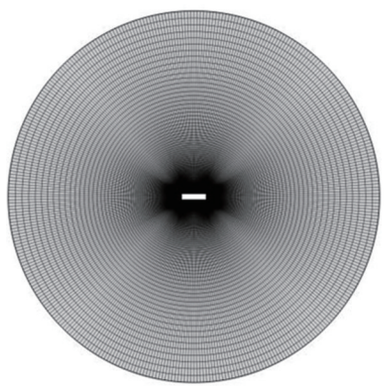


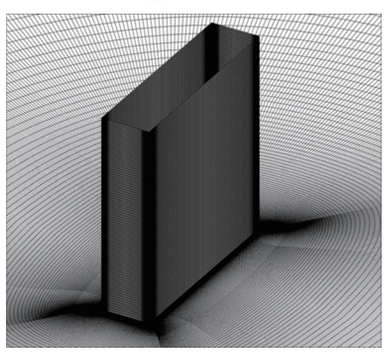
图2　计算域和边界条件

Fig.2　Computational domain and boundary conditions

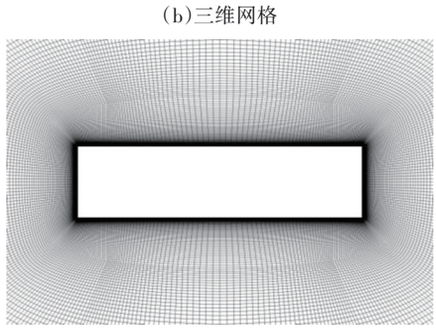
图3为B/D=4的矩形柱结构化计算网格.矩形柱近壁面的y^+<1,满足大涡模拟方法对近壁面网格的要求.



(a)整体平面网格



(b)三维网格



(c)近壁面网格

图3　4∶1矩形柱计算网格

Fig.3　Computational mesh for 4∶1 rectangular cylinder

表1列出了本文的计算参数及网格方案,为了节省计算资源,根据作者所在课题组前期的网格验证工作[20],不同雷诺数采用不同的网格方案和数值模型.

2.2　结果验证

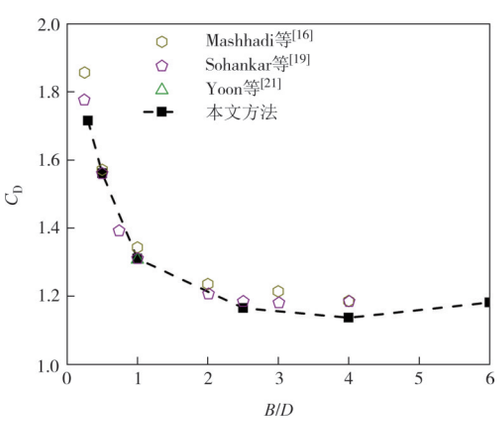
为了确保计算方法和计算参数的准确性,在雷诺数Re=100及120 000的条件下,将本文的计算结果与文献中结果进行对比.图4给出了矩形柱C_D与文献值的比较.由图4可知,本文数值模拟结果与文献[7-8, 16, 19, 21-23]的结果总体变化趋势相同,吻合良好,均处于文献结果的分布范围内.相比Re=

表 1 计算参数及网格方案

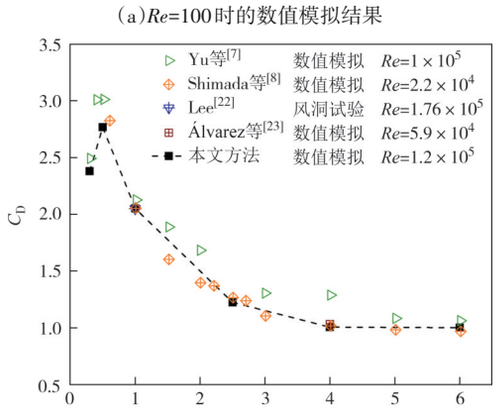
Tab.1 Calculation parameters and mesh scheme

B/*D*	*Re*	数值模型	展向长度	网格方案(周向×径向×展向)
1/3、1/2、1	100	Laminar	0	240×180×0
2.5、4、6	100	Laminar	0	360×180×0
1/3、1/2、1	100、250、500	LES	8	240×180×80
2.5、4、6	100、250、500	LES	8	360×180×80
1/3、1/2、1	1 000、10 000	LES	4	360×180×40
2.5、4	1 000、10 000	LES	4	360×180×40
6	1 000、10 000	LES	4	480×180×40
1/3、1/2、1	120 000	LES	4	360×180×80
2.5	120 000	LES	4	540×180×80
4、6	120 000	LES	4	720×180×80

100 的结果,*Re*=120 000 的结果偏差更大些,特别是在 *B*/*D*=1/2 附近,这可能是因为高雷诺数下的流场更为复杂. 但总体而言,本文的结果与文献风洞试验和数值模拟数值的吻合度较好,这也说明本文的计算模型及网格方案合理,计算结果可信,且在低雷诺数到高雷诺数范围内均适用.



(a)*Re*=100 时的数值模拟结果

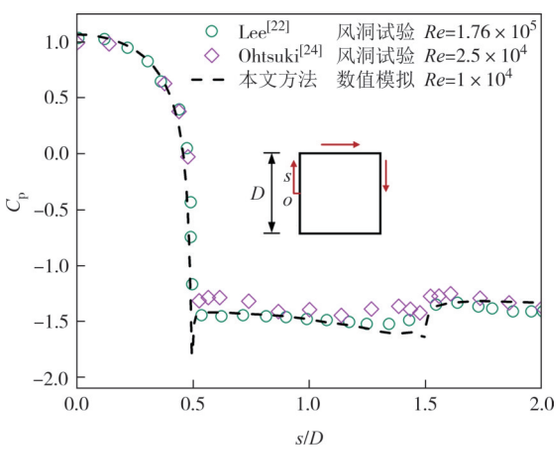


(b)不同 *Re* 下的数值模拟和风洞试验结果

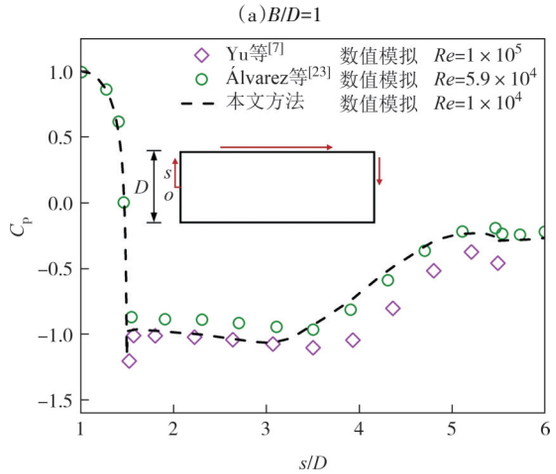
图 4 矩形柱平均阻力系数与文献结果对比

Fig.4 Comparison of average drag coefficients of rectangular cylinders with the results in literatures

为进一步说明本文的计算模型及网格方案的适用性,图 5 给出了 *B*/*D*=1 和 4 的矩形柱表面平均风压系数分布与文献值[7, 22-24]的比较,*s* 为沿矩形柱表面周向的长度(以矩形柱迎风面中点为起点). 由图 5 可以看到,对于方柱,本文表面平均风压系数数值结果和风洞试验数据的最大误差低于 15%,位于方柱侧壁面,考虑是均匀来流条件无法完全还原风洞试验的来流湍流度,且数值模拟阻塞率与试验存在差异. 整体上看,*B*/*D*=1 和 4 的矩形柱表面平均风压系数分布与文献结果基本吻合,分布趋势一致,说明本文的计算模型及网格方案合理,计算结果可信.



(a)*B*/*D*=1



(b)*B*/*D*=4

图 5 矩形柱表面平均风压系数与文献结果对比

Fig.5 Comparison of average pressure coefficients on rectangular cylinders surface with the results in literatures

3 结果与讨论

3.1 平均阻力系数与斯托罗哈数

图 6 为矩形柱平均阻力系数随雷诺数的变化规律. 可以看出,小宽高比(*B*/*D*=1/3、1/2、1)的 C_D 明显

高于大宽高比(B/D=4、6). 对于小宽高比,C_D随Re的增加整体呈上升趋势. 当Re≤250,C_D最大值出现在B/D=1/3 处;当Re>250 时,C_D随B/D的增加先增大后减小,在B/D=1/2 达到最大值,这是因为B/D=1/2 时背风面负压明显大于其他矩形柱;当Re≥1 000,Re对C_D的影响较弱. 对于大宽高比,当Re<1 000,C_D随Re的变化规律较为复杂;当Re≥1 000,C_D略有下降并趋于稳定. 特别的,对于B/D=2.5,在 250≤Re≤1 000 范围内矩形柱C_D逐渐增加;而当雷诺数增加至Re≥ 1 000,C_D逐渐下降;结合下文的流场分析可知,这与分离剪切层是否在矩形柱侧壁面发生再附有关.

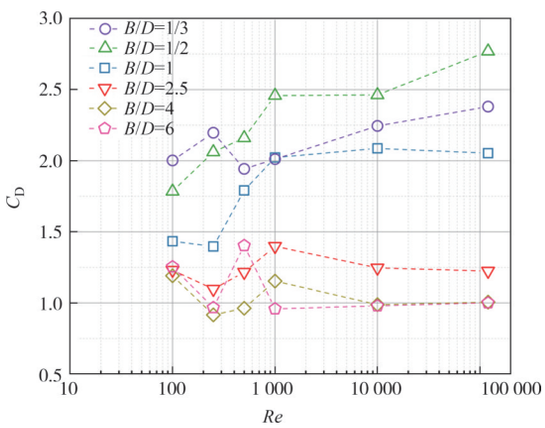


图 6　平均阻力系数随雷诺数的变化

Fig.6　Variation of mean drag coefficients with Reynolds number

图 7 为斯托罗哈数随雷诺数的变化规律. 由图 7 可知,雷诺数对临界宽高比(B/D=2.5)的影响明显强于其他宽高比,当Re≥1 000 时,各宽高比的St逐渐趋于稳定. 对于B/D=1/2、1,St在Re=100~250 略有上升;在Re=250 时达到最大值;在Re=250~120 000,St持续下降. 对于B/D=2.5,St先上升后下降并在Re=500 时达到最大值;当Re=1 000,St急剧减小,此时侧壁面与背风面流场回流区连通,分离剪切层没有发生再附,尾流长度明显增加;当Re=1 000~120 000,St在B/D=2.5 左右时明显小于其他B/D. 对于B/D>2.5,在Re=100 时柱体周围没有出现旋涡脱落;在Re=250 时发生旋涡脱落,且St均在 0.15 附近.

图 8 给出B/D=1/2、2.5 和 6 矩形柱在不同雷诺数下的升力系数功率谱密度. 对于B/D=1/2,St对应的功率谱密度峰值在Re=100 较低;在Re=250 时涡脱频率最快;奇特的是,当雷诺数增大至 120 000 时,St对应的功率谱密度峰值最大,旋涡强度可能增加. 对于B/D=2.5,St先上升后下降,在Re=500 时,St及其对应的功率谱密度均达到峰值,矩形柱侧壁面出现

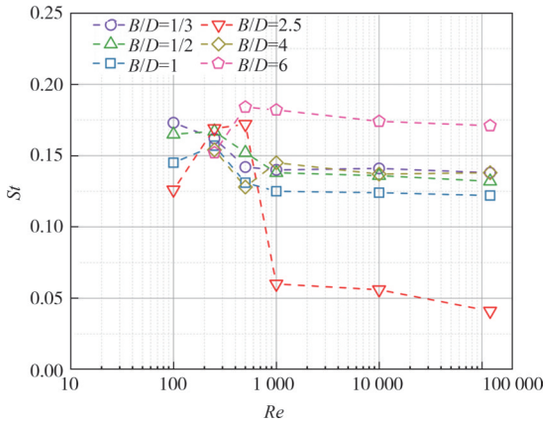


图 7　斯托罗哈数随雷诺数的变化

Fig.7　Variation of Strouhal number with Reynolds number

分离再附现象,升力系数功率谱密度出现高频分量,这可能与流动的湍流转捩息息相关;在Re≥1 000 时,St对应峰值相对较小,高频分量消失但出现明显的低频成分. 对于B/D=6,在Re=100 时矩形柱尾流未出现旋涡脱落现象;Re=250 时,柱体表面发生旋涡脱落;在Re=500 时,St及其对应功率谱密度达到最大值,涡脱最强,同样出现高倍频分量;在Re≥10 000 时,涡脱频率降低,St对应功率谱密度峰值相对较小,涡脱强度减弱.

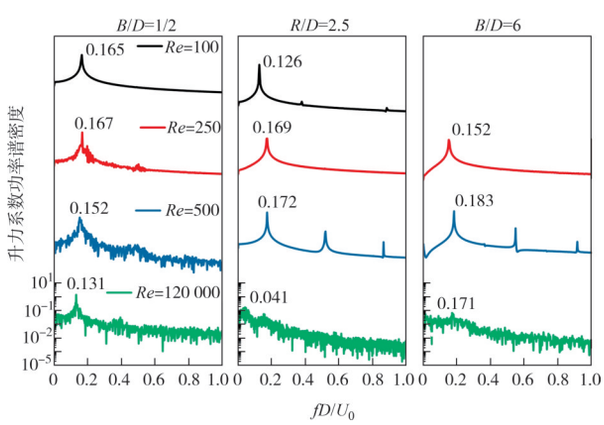


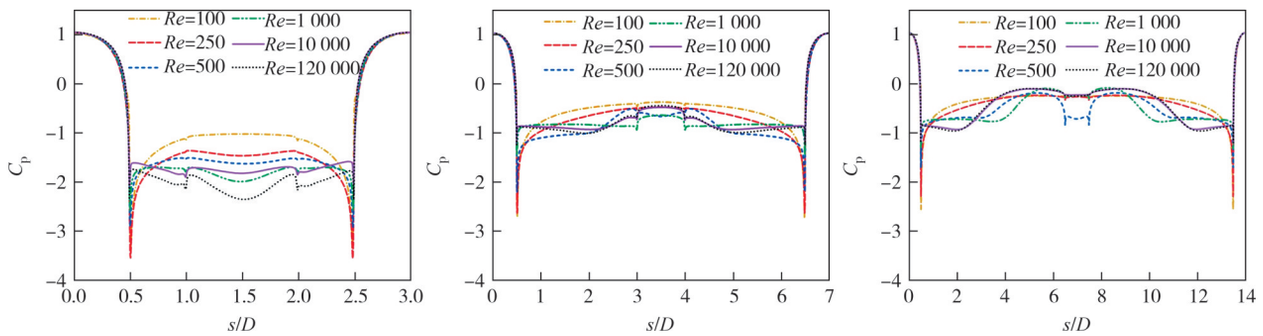
图 8　矩形柱升力系数功率谱密度

Fig.8　Lift coefficient power spectrum density of rectangular cylinder

3.2　平均风压系数

图 9 分别给出了B/D=1/2、2.5 和 6 矩形柱在不同雷诺数下的平均风压系数分布图. 流体流经迎风角点时发生边界层分离,C_p迅速转变为负压,随雷诺数的增加,分离点的负压强度下降,表明迎风角点的流动分离逐渐减弱. 背风角点处C_p出现小幅突变.

对于B/D=1/2,迎风角点处负压强度随着雷诺数的增加而减小,侧壁面负压中心向背风角点移动,使背风角点负压强度增大. 对于B/D=2.5,随着雷诺数



(a)B/D=1/2 (b)B/D=2.5 (c)B/D=6

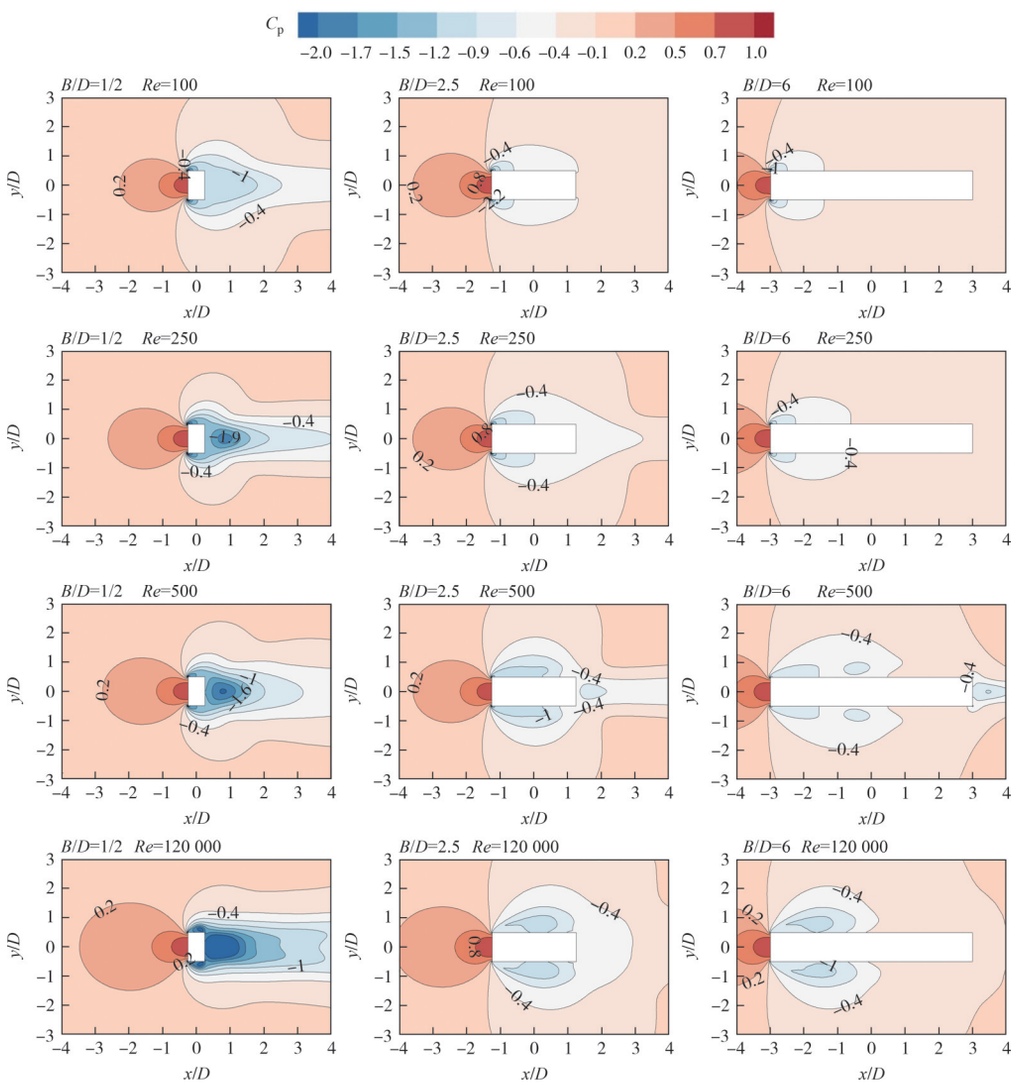
图 9 矩形柱表面平均风压系数

Fig.9 Average pressure coefficient on rectangular cylinder surface

的增加,侧壁面负压强度整体呈先增大后减小的趋势,Re=1 000时,背风面负压强度最大,此时C_D最大.对于B/D=6,Re≥1 000时,侧壁面负压中心逐渐向前缘移动;Re=500时,受背风面小型二次回流旋涡影响,背风面负压强度最大.

3.3 平均风压场

图 10 分别给出了B/D=1/2、2.5 和 6 矩形柱在不同雷诺数下的平均风压系数云图.



(a)B/D=1/2 (b)B/D=2.5 (c)B/D=6

图 10 不同B/D和Re下矩形柱平均风压系数云图

Fig.10 Contours of mean pressure coefficient around the rectangular cylinder with various B/D and Re

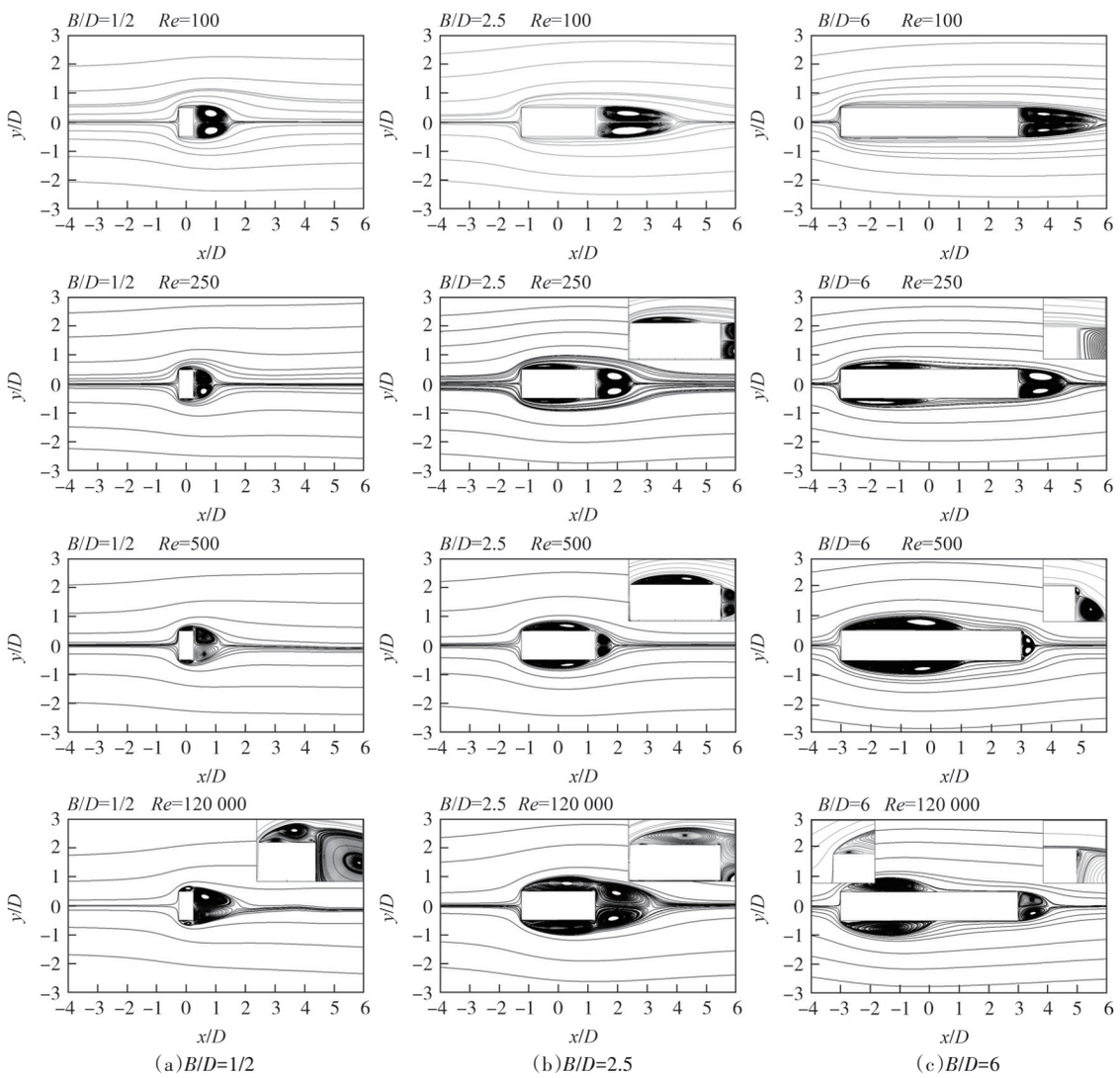
对于 B/D=1/2,Re>1 000 时,侧壁面负压区向背风角点移动,导致背风角点处负压增大,背风面负压绝对值随雷诺数的增大而增大,而迎风面正压基本不变,导致 C_D 随雷诺数的增大而增大.

对于 B/D=2.5,当 Re=250~1 000 时,矩形柱迎风面正压保持稳定,尾流负压区缩减,背风面在 Re=500 时形成负压集中区,导致前后压差增大,压差阻力主导 C_D 上升;当 Re≥1 000 时,侧壁面与背风面回流区连接使尾流宽度增大,同时背风面负压强度显著降低,C_D 下降.

对于 B/D=6,当 Re=500 时,背风面角部附近出现小的二次回流旋涡,使背风角点负压强度显著增大,同时在尾流回流区形成负压集中区域,背风面负压强度达到最大值,导致 C_D 也达到最大.

3.4　平均流线图

图 11 分别给出了 B/D=1/2、2.5 和 6 矩形柱在不同雷诺数下的平均流线图.



(a)B/D=1/2　(b)B/D=2.5　(c)B/D=6

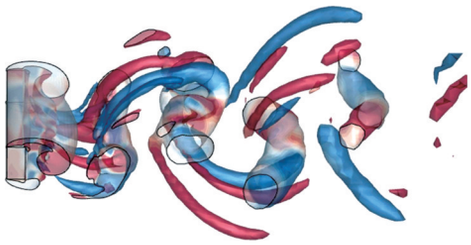
图 11　不同 B/D 和 Re 下矩形柱平均流线图

Fig.11　Mean streamlines around the rectangular cylinder with various B/D and Re

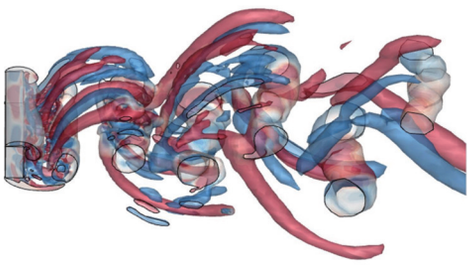
3.5　三维流场特性

为了进一步说明雷诺数效应的流动机理,图 12 和图 13 分别给出了 B/D=1/2 和 2.5 的矩形柱在不同雷诺数下的瞬时三维涡结构.

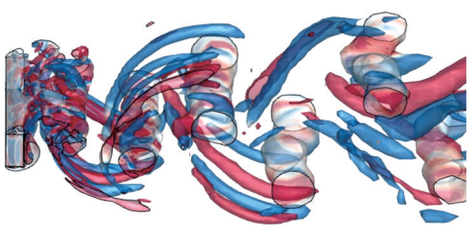
当 B/D=1/2 时,由图 12 可见,当 Re=250 时,矩形柱尾流开始呈现三维特性,正负涡量从矩形柱的上下两侧脱落,形成两排涡街,涡间隙侧出现小尺度的涡结构;Re=500 时,尾流涡的能量耗散加快,矩形柱边界层分离的涡结构逐渐变明显,尾流中产生较多小尺度的涡结构;当 Re≥1 000 后,三维转捩从尾流逐渐发展到剪切层和边界层,矩形柱壁面周围出现较多小尺度涡,尾流宽度明显增大.



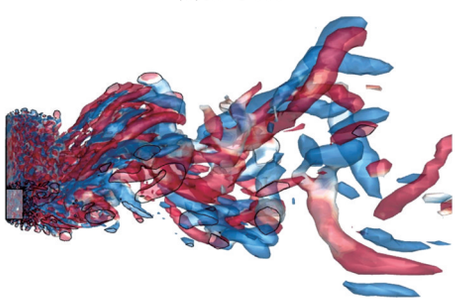
(a)*Re*=250



(b)*Re*=500



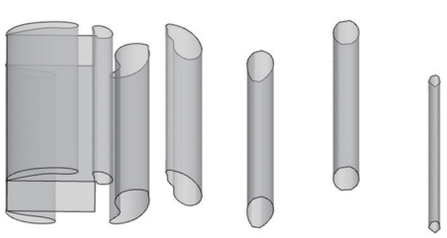
(c)*Re*=1 000



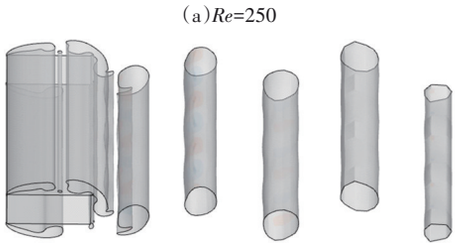
(d)*Re*=120 000

图 12 三维涡结构随雷诺数的变化(*B*/*D*=1/2)

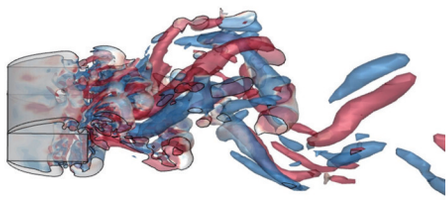
Fig.12 Variation of three-dimensional vortex structure with Reynolds number (*B*/*D*=1/2)



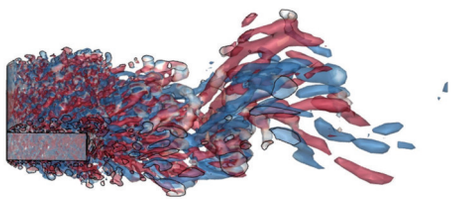
(a)*Re*=250



(b)*Re*=500



(c)*Re*=1 000



(d)*Re*=120 000

图 13 三维涡结构随雷诺数的变化(*B*/*D*=2.5)

Fig.13 Variation of three-dimensional vortex structure with Reynolds number (*B*/*D*=2.5)

由图 13 可见,对于 *B*/*D*=2.5 矩形柱,*Re*=250 时,旋涡交替脱落,尾流涡结构沿展向均匀分布,绕流场未呈现出三维特性;*Re*=500 时,开始发生流动转捩,矩形柱尾流涡结构沿展向发生扭曲,剪切层分离和侧壁面涡脱的不对称导致压力波动的分布不完全对称,从而在升力信号中出现了基本涡脱频率的整数倍分量;当 1 000≤*Re*≤120 000 时,流动转捩位置逐渐向上游移动,从尾流转捩变为剪切层转捩,这可能是导致高频能量衰减的主要原因.

4 结 论

本文采用大涡模拟方法,研究了 *Re*=100~120 000 和 *B*/*D*=1/3、1/2、1、2.5、4、6 矩形柱气动性能随雷诺数的影响规律,并从流场角度探讨了雷诺数效应的流动机理. 主要结论如下:

1)对于 *B*/*D*<2.5,侧壁面剪切层未发生再附现象,在 100<*Re*≤250 范围内,矩形柱绕流场由二维层流向三维层流转捩;当 *Re*>250,随着 *Re* 的增加,流动向湍流转捩,侧壁面回流区厚度及尾流宽度逐渐增加,背风面负压强度增加,导致 C_D 呈上升趋势.

2)对于 2.5<*B*/*D*≤6,侧壁面剪切层发生再附现象,当 500≤*Re*<1 000,矩形柱绕流场发生流动转捩,C_D 和 *St* 存在明显的雷诺数效应;*Re*≥1 000,C_D 和 *St* 趋于稳定,雷诺数效应不明显.

3)值得注意的是,对于 *B*/*D*=2.5,当 250≤*Re*≤500,分离剪切层发生再附现象,随着 *Re* 的增加,尾流长度减小,尾流回流区形成负压集中区,C_D 逐渐上升;在 *Re*≥1 000,剪切层再附现象消失,尾流宽度明

显增加,St急剧下降.

本研究分析了不同宽高比矩形柱气动性能的雷诺数效应,有助于工程技术人员加深对矩形柱气动性能的雷诺数效应及其流动机理的理解,为工程结构设计时的合理截面选择与气动力选取提供了依据.

本研究的雷诺数范围与工程实际仍存在差距,实际工程的雷诺数更高,情况可能更为复杂;此外本文未涉及多柱体间复杂气动干扰的研究.未来可能对更高雷诺数下的矩形柱绕流特性进行研究,并对多柱体气动干扰效应做进一步的研究.

参考文献

[1] 王玮,曹曙阳. 不同攻角下2∶1矩形截面棱柱绕流的大涡模拟研究[J]. 力学季刊,2021,42(2):304-316.
WANG W,CAO S Y. Large eddy simulation of flow around a 2∶1 rectangular prism for various attack angles[J]. Chinese Quarterly of Mechanics,2021,42(2):304-316.(in Chinese)

[2] BRUNO L,SALVETTI M V,RICCIARDELLI F. Benchmark on the aerodynamics of a rectangular 5∶1 cylinder:an overview after the first four years of activity[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics,2014,126:87-106.

[3] 杜晓庆,许庆,董浩天,等. 全风向角下小间距双方柱绕流的大涡模拟[J]. 同济大学学报(自然科学版),2022,50(6):776-783.
DU X Q,XU Q,DONG H T,et al. Large-eddy simulation of flow past two close square cylinders at various incidences[J]. Journal of Tongji University (Natural Science),2022,50(6):776-783.(in Chinese)

[4] NAKAGUCHI H,HASHIMOTO K,MUTO S. An experimental study on aerodynamic drag of rectangular cylinders[J]. The Journal of the Japan Society of Aeronautical Engineering,1968,16(168):1-5.

[5] YU D H,BUTLER K,KAREEM A,et al. Simulation of the influence of aspect ratio on the aerodynamics of rectangular prisms[J]. Journal of Engineering Mechanics,2013,139(4):429-438.

[6] OHYA Y. Note on a discontinuous change in wake pattern for a rectangular cylinder[J]. Journal of Fluids and Structures,1994,8(3):325-330.

[7] YU D H,KAREEM A. Parametric study of flow around rectangular prisms using LES[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics,1998,77:653-662.

[8] SHIMADA K,ISHIHARA T. Application of a modified k-ε model to the prediction of aerodynamic characteristics of rectangular cross-section cylinders[J]. Journal of Fluids and Structures,2002,16(4):465-485.

[9] SOHANKAR A. Large eddy simulation of flow past rectangular-section cylinders:side ratio effects[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics,2008,96(5):640-655.

[10] TAMAI H,OKUDA Y,KATSURA J. On relation between Reynolds number and Kármán vortex formation on a bluff body in natural wind[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics,2001,89(14-15):1619-1633.

[11] VAN HINSBERG N P,SCHEWE G,JACOBS M. Experiments on the aerodynamic behaviour of square cylinders with rounded corners at Reynolds numbers up to 12 million[J]. Journal of Fluids and Structures,2017,74:214-233.

[12] LIU M Q,KUMAHOR S,TACHIE M F. Reynolds number effects on turbulent wakes generated by rectangular cylinders with streamwise aspect ratios between 1 and 4[J]. Journal of Fluids Engineering,2024,146(2):021303.

[13] 王新荣,顾明,全涌. 低紊流度下二维矩形截面柱体模型表面风压分布的雷诺数效应[J]. 建筑结构学报,2015,36(1):143-149.
WANG X R,GU M,QUAN Y. Reynolds number effects on wind pressure distributions of 2D rectangular prisms in low turbulence flow[J]. Journal of Building Structures,2015,36(1):143-149.(in Chinese)

[14] SCHEWE G. Reynolds-number-effects in flow around a rectangular cylinder with aspect ratio 1∶5[J]. Journal of Fluids and Structures,2013,39:15-26.

[15] DAVIS R W,MOORE E F. A numerical study of vortex shedding from rectangles[J]. Journal of Fluid Mechanics,1982,116:475-506.

[16] MASHHADI A,SOHANKAR A,ALAM M M. Flow over rectangular cylinder:effects of cylinder aspect ratio and Reynolds number[J]. International Journal of Mechanical Sciences,2021,195:106264.

[17] 于春放,靖洪淼,张记涛,等. 不同雷诺数下4∶1圆角矩形柱气动力特性及流场数值模拟研究[J]. 工程力学,2024,41(增刊1):332-338.
YU C F,JING H M,ZHANG J T,et al. LES study on aerodynamic characteristics and flow field of a 4∶1 rectangular cylinder with different Reynolds numbers[J]. Engineering Mechanics,2024,41(Sup.1):332-338.(in Chinese)

[18] MANNINI C,ŠODA A,SCHEWE G. Unsteady RANS modelling of flow past a rectangular cylinder:investigation of Reynolds number effects[J]. Computers & Fluids,2010,39(9):1609-1624.

[19] 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.

[20] 施定军. 4∶1双矩形柱气动干扰与气动控制的大涡模拟研究[D]. 上海:上海大学,2021.
SHI D J. Large eddy simulation of aerodynamic interference and control for twin 4∶1 rectangular cylinders[D]. Shanghai:Shanghai University,2021.(in Chinese)

[21] YOON D H,YANG K S,CHOI C B. Flow past a square cylinder with an angle of incidence[J]. Physics of Fluids,2010,22(4):043603.

[22] 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.

[23] ÁLVAREZ A J,NIETO F,NGUYEN D T,et al. 3D LES simulations of a static and vertically free-to-oscillate 4∶1 rectangular cylinder:effects of the grid resolution[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics,2019,192:31-44.

[24] OHTSUKI Y. Wind tunnel experiments on aerodynamic forces and pressure distributions of rectangular cylinders in a uniform flow[C]. 5th Symp. on Wind effects on structures,1978:169-175.