

DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.20240409002

文章编号: 1674-599X(2025)02-0053-10

引用格式: 周烽, 曾鑫, 吴庆凌, 等. 考虑端部效应的方柱绕流特征及风载分布规律[J]. 交通科学与工程, 2025, 41(2): 53-62.

Citation: ZHOU Feng, ZENG Xin, WU Qingling, et al. Flow characteristics around square columns and wind load distributions considering the end effect[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2025, 41(2): 53-62.

考虑端部效应的方柱绕流特征及风载分布规律

周烽¹, 曾鑫¹, 吴庆凌¹, 高星元², 唐浩俊²

(1. 西南交通大学 力学与航空航天学院, 四川 成都 611756;

2. 西南交通大学 土木工程学院, 四川 成都 611756)

摘 要:【目的】探究有限长度方柱的绕流特性及端部效应对其气动力分布的影响。【方法】采用数值模拟对不同宽高比和纵向长度下方柱的气动特性进行了系统分析。首先, 通过二维方柱截面计算验证了模型及方法的可靠性, 并讨论了宽高比对截面气动力的影响。随后, 分析了三维有限长度方柱的气动力沿纵向的演变规律及端部绕流的影响范围。【结果】截面宽高比的增加导致尾流区域旋涡长度随之增加, 负压区减小, 阻力系数和斯特劳哈尔数呈线性递减趋势; 当长高比小于20时, 方柱整体阻力系数与斯特劳哈尔数随纵向长度的增加而迅速增大, 尾流场变化显著, 呈现出明显的三维特征; 当长高比进一步增大时, 参数的增幅趋缓, 但端部绕流现象仍然突出, 两端旋涡脱落现象减少, 气动力呈现中部大而端部小的分布特征。【结论】揭示了有限长度方柱绕流的三维特性及端部效应对气动力分布的重要影响, 为工程设计与空气动力学应用提供了重要参考。

关键词: 空气动力学; 三维方柱; 端部效应; 数值模拟; 流场特性; 气动力

中图分类号: O355

文献标志码: A

Flow characteristics around square columns and wind load distributions considering the end effect

ZHOU Feng¹, ZENG Xin¹, WU Qingling¹, GAO Xingyuan², TANG Haojun²

(1. School of Mechanics and Aerospace Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China;

2. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China)

Abstract: [Purposes] The paper aims to investigate the flow characteristics around finite-length square columns and the impact of end effects on aerodynamic force distribution. [Methods] This study conducted numerical simulations to systematically analyze aerodynamic behaviors under varying width-to-height ratios and longitudinal lengths. Initially, the reliability of the computational model and method was validated using a two-dimensional square column section, and the influence of the width-to-height ratio on sectional aerodynamic characteristics was examined. Subsequently, the evolution of aerodynamic force distribution in the longitudinal direction and the extent of end flow effects were identified in three-dimensional finite-length square columns. [Findings] Results indicate that as the width-to-height ratio increases, the vortex length in the wake region grows while the low-pressure zone shrinks, which leads to a linear decrease in drag coefficient and Strouhal number. When the length-to-

收稿日期: 2024-04-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(52178507); 四川省自然科学基金项目(2022NSFSC0431、2022NSFSC0004); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2023002)

通信作者: 唐浩俊(1988—), 男, 副教授, 主要从事桥梁风工程方面的研究工作。E-mail: thj@swjtu.edu.cn

投稿网址: <https://jtkxygc.csust.edu.cn/jtkxygc/home>

height ratio is below 20, both the overall drag coefficient and Strouhal number rise rapidly with the increasing longitudinal length, and the wake flow field changes significantly, exhibiting strong three-dimensional characteristics. As the length-to-height ratio continues to increase, the growth rates of these parameters slow down. However, end flow effects remain prominent. The vortex shedding near both ends weakens, which makes aerodynamic force show the distribution characteristics of being higher in the middle and lower at the ends. [Conclusions] This study reveals the three-dimensional flow characteristics around finite-length square columns and highlights the critical role of end effects in their aerodynamic force distribution, providing valuable insights for engineering design and aerodynamic application.

Key words: aerodynamics; three-dimensional square column; end effect; numerical simulation; flow field characteristic; aerodynamic force

钝体绕流是桥梁工程领域中常见的问题,气流在经过桥梁主梁、桥塔或缆索构件时,可能会发生流动分离,并导致在尾流区域内产生旋涡脱落,造成桥梁整体结构或局部构件产生风致振动。因此,钝体绕流问题一直是桥梁风工程领域的研究热点,对于桥梁风荷载的取值及风致振动机理的研究具有重要意义^[1-4]。

许多学者选择理想矩形或圆形截面作为研究对象,其研究结论不仅能直接反映具有相似截面结构的绕流特性,还有助于分析具有复杂截面结构的绕流特性。张航等^[5]以串列双矩形拱肋为对象,研究了拱桥拱肋的气动力及气动干扰效应,为拱肋气动外形设计提供了参考。李文舒等^[6]研究了矩形前缘剪切流对圆柱气动力的影响,为桥上行车的安全性和稳定性分析提供了参考。陈修煜等^[7]研究了矩形立柱的非定常驰振问题,为桥梁工程中类矩形钢立柱、钢吊杆或钢梁的驰振分析提供了参考。LI等^[8]研究了大尺寸矩形断面尾流对小尺寸圆形断面气动性能的影响,揭示了桥塔周围细长吊索的尾流致振机理。熊涛等^[9]对宽高比为4的矩形柱涡激振动进行数值模拟后发现,二维、三维模型的数值模拟方法均能准确地捕捉矩形柱的涡激振动区间。郭志远等^[10]分别采用传统监测点分析方法与局部流场动态模态分解方法计算圆柱剪切层不稳定性的特征频率,发现这两种方法得到的频率基本一致。

桥梁结构的抗风性能分析通常基于条带假定,即假定某一截面的气动力特性代表其他截面的气动力特性。因此,相关研究大多集中于二维绕流问题,即使进行三维模拟,由于截面在纵向保持不变,其本质上仍然是二维绕流问题。然而,对于实际工程中的有限长度结构,由于端部绕流

效应的存在,其流场呈现出三维特性,与二维模拟结果存在显著差异。李石清等^[11]通过风洞试验对宽高比为1:5的方柱的绕流特性进行了研究,发现时均阻力系数最大值出现在模型自由端附近,而脉动升力系数的最大值出现在模型中段。王汉封等^[12]运用大涡模拟方法对有限长度的正方形棱柱绕流问题进行了研究,结果表明:在自由端后下扫流的作用下,有限长棱柱的尾流具有显著的三维特性。

在桥梁施工阶段,由于端部绕流效应的影响,条带假定可能并不完全适用。在悬索桥的加劲梁吊装施工过程中,以及斜拉桥主梁、拱桥拱肋悬臂的施工过程中,端部绕流会导致局部流场呈现出三维特性^[13-14]。因此,掌握端部效应对结构气动力的影响能更准确地评估桥梁施工阶段的抗风性能。

桥梁主梁截面往往具有钝体特性,例如,流线型的钢箱梁在加装附属设施或考虑来流攻角时也会展现出钝体特征。为了更好地掌握端部绕流对钝体结构气动力的影响,本文以方柱为对象,通过数值模拟,系统地比较了端部效应对其绕流特性的影响,对不同宽高比、长高比下的有限长度方柱在高雷诺数条件下的阻力系数和斯特劳哈尔数的变化规律进行了深入研究,并探讨了气动力沿方柱纵向的非均匀分布特性,以及其随纵向长度的演变规律。

1 方柱截面的绕流特性

本文针对钝体截面的绕流特性进行了数值模拟研究。首先,分析了正方形截面(宽高比为1)的绕流特性。在验证模型可靠、结果准确的基础上,

进一步分析了其他截面(宽高比为0.7~1.3)方柱对绕流特性的影响,并确定了阻力系数和斯特劳哈尔数随宽高比的变化规律。

1.1 二维模型及结果分析

计算区域如图1所示,其中 D 、 B 分别为截面高度、宽度。取 D 为0.1 m,来流风速 U 为3.22 m/s,此时雷诺数 $Re=22\ 000$ 。

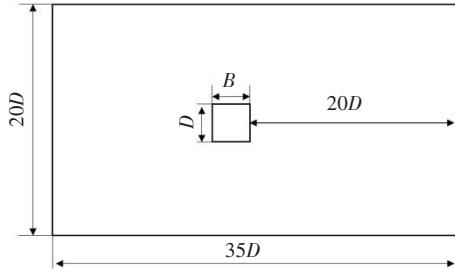
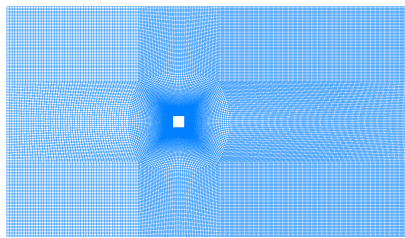


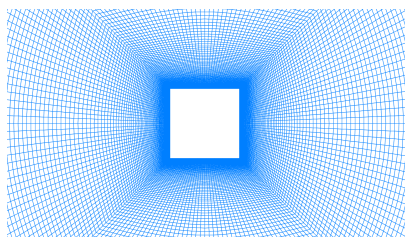
图1 二维方柱计算区域

Fig. 1 Calculation area of two-dimensional square column

采用结构化的四边形网格对方柱边界区域进行“O-Block”切分,确保贴近方柱边界的网格高度足够小(本文取网格高度为 10^{-6} m),而远离方柱边界的网格高度则逐渐增加。总网格数量为7.2万个,网格划分如图2所示。左侧边界设置为风速进口条件,取来流风速为 $U=3.22$ m/s,右侧边界设置为压强出口条件。湍流因子取为10%,黏性系数取为2。上下壁面设置为对称边界条件,方柱设置为无滑移固壁边界条件。根据 $(\Delta t \cdot U)/D < 1$ 的原则确定计算步长 Δt 为0.01 s。研究表明:SST $k-\omega$ 湍流模型得到的模拟结果与风洞试验结果最为吻合,因此本文选择SST $k-\omega$ 模型作为湍流模型,求解方法选用SIMPLEC算法。



(a) 整体网格



(b) 局部网格

图2 网格划分

Fig. 2 Mesh division

在体轴坐标系下,阻力系数 C_D 、升力系数 C_L 、斯特劳哈尔数 St 分别按照式(1)~(3)进行定义。

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho U^2 DL} \quad (1)$$

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2} \rho U^2 BL} \quad (2)$$

$$St = \frac{fD}{U} \quad (3)$$

式中: F_D 为阻力; F_L 为升力; L 为纵向长度,二维计算时 L 取1 m; f 为截面的旋涡脱落频率; ρ 为流体密度。

待计算稳定后,取足够时间内的结果进行分析,得到阻力系数平均值 $\bar{C}_D$ 为2.11。升力系数 C_L 的时程曲线如图3所示,对该曲线进行频谱分析,升力系数功率谱如图4所示,由图4可以观察到卓越频率为3.989 7 Hz。卓越频率是由尾流中的旋涡脱落所导致的,因此它表征了该截面的旋涡脱落频率。将这一频率代入式(3)中,可以得出方柱截面的 St 为0.124。当雷诺数为22 000时,采用不同方法得到的 St 、 C_D 如表1所示,结果表明:本文所得阻力系数平均值和斯特劳哈尔数与相关文献所得结果基本一致^[15-18],验证了本文计算结果具有较高的可信度。

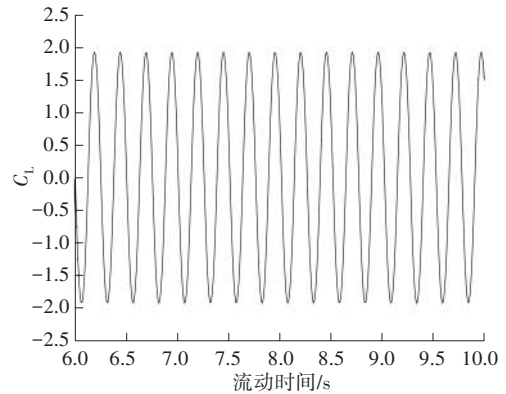


图3 升力系数时程曲线

Fig. 3 Lift coefficient time history curve

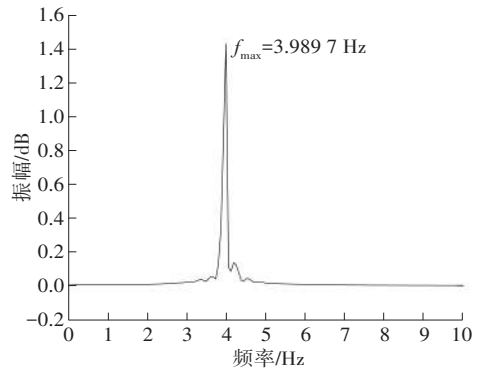


图4 升力系数功率谱

Fig. 4 Lift coefficient power spectrum

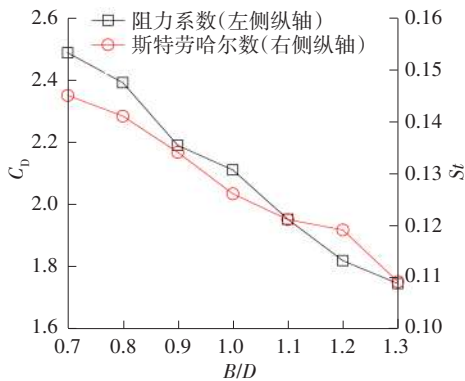
表1 计算结果对比

Table 1 Comparison of calculation results

算例	St	C_D
LYN ^[15]	0.132	2.06
李雪健等 ^[16]	0.126	2.13
杜明倩等 ^[17]	0.132	2.18
谢志刚等 ^[18]	0.125	2.12
本文	0.124	2.11

1.2 截面宽高比 B/D 的影响

基于前述二维计算的结果,本文保持计算区域、计算参数、来流风速不变,进一步研究了不同宽高比对截面气动特性的影响。保持特征高度 D 不变,改变特征宽度 B 使宽高比 B/D 取为 $0.7 \sim 1.3$ 。待流场稳定后,按前述方法计算得出 C_D 、 St 随宽高比的变化规律,如图5所示。

图5 C_D 、 St 随 B/D 变化规律图Fig. 5 Variation pattern of C_D and St with B/D

由图5可知, C_D 、 St 均随着 B/D 的减小而增大, 即 C_D 、 St 与 B/D 呈负相关关系, 本文基于流场的变化来解释其变化规律。取10个以上旋涡脱落周期后的时均静压强作为压强数据, 绘制了不同 B/D 下的时均压强云图, 如图6所示。由图6可知, 方柱迎风侧始终承受正压强, 而背风侧则始终承受负压强; 随着 B/D 的增大, 背风侧负压强数值逐渐减小, 而由于高度 D 始终为 0.1 m , 迎风侧正压强数值未见明显变化; 压强越小, 尾流的吸力也越小, 从而导致 C_D 相应减小。因此, C_D 随 B/D 的增大而减小的主要原因是背风侧负压强数值的减小。

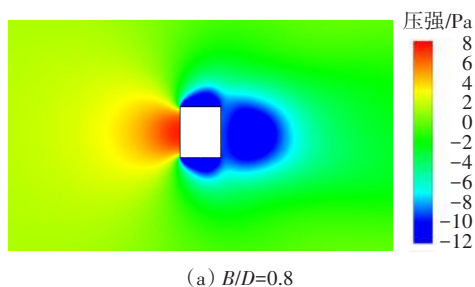
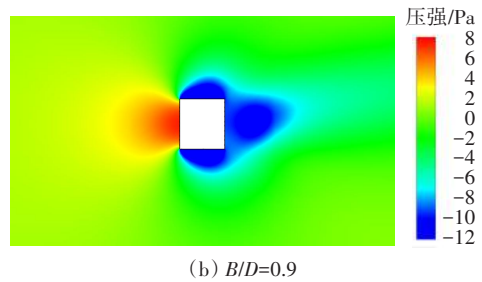
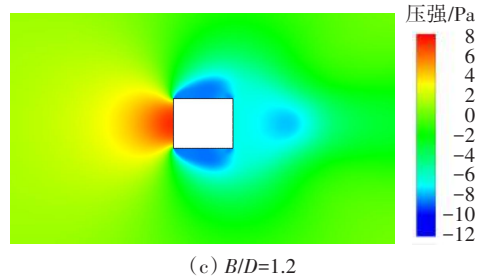
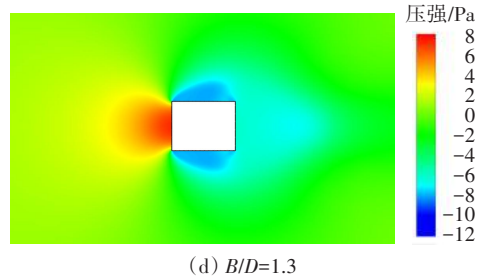
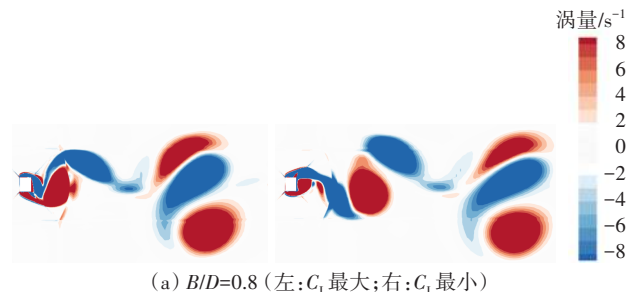
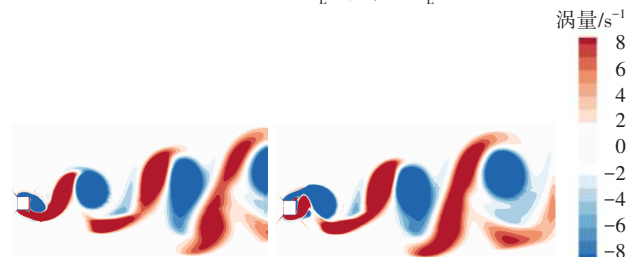
(a) $B/D=0.8$ (b) $B/D=0.9$ (c) $B/D=1.2$ (d) $B/D=1.3$

图6 不同宽高比截面的时均压强云图

Fig. 6 Time averaged pressure contours of sections with different width-to-height ratios

不同宽高比截面的瞬时涡量云图如图7所示, 为了便于比较, 统一选取了流场稳定后各截面升力系数达到最大值和最小值的两个时刻进行绘制。随着 B/D 的增大, 截面逐渐由长方形向正方形变化, 但观察尾流场中的旋涡尺寸并未发现明显变化。因此, 仅凭图7中的瞬时涡量云图无法给出 St 与 B/D 呈负相关关系的原因。

(a) $B/D=0.8$ (左: C_L 最大; 右: C_L 最小)(b) $B/D=0.9$ (左: C_L 最大; 右: C_L 最小)

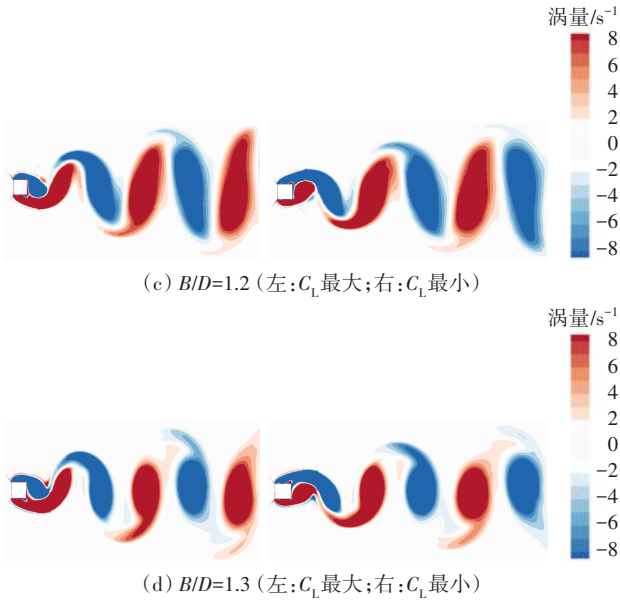


图7 不同宽高比截面的瞬时涡量云图

Fig. 7 Instantaneous vorticity contours of sections with different width-to-height ratios

2 考虑端部效应的三维方柱绕流特性

2.1 模型尺寸及网格划分

基于二维模型结论进一步分析三维模型。首先,不考虑端部绕流的影响,即假设模型两端与边界直接相接,这种情况下模型反映的仍是截面的二维绕流特性,其计算区域如图8(a)所示。接着,为了更真实地模拟实际情况,模型设计时应考虑端部绕流的影响以充分模拟三维流场特性,此时方柱两侧与计算边界保持足够的距离,计算区域如图8(b)所示。方柱的特征高度 D 取为0.1 m,在 xoy 平面内,网格的划分方式与前述二维模型的类似; z 方向上,在靠近方柱端部处对网格进行加密(加密网格尺寸为 10^{-4} m),而在远离端部处,网格尺寸则逐渐增加以减少总网格数量,提高计算效率。网格划分如图9所示,不考虑端部绕流的模型与考虑端部绕流的模型网格总数量分别为132万个和151万个。三维方柱绕流计算中计算参数的取值与前述二维模型的保持一致。

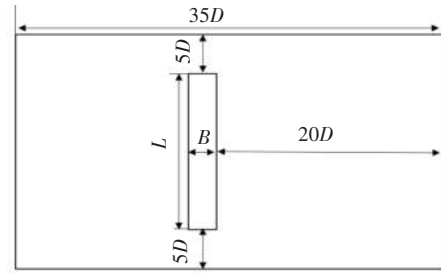
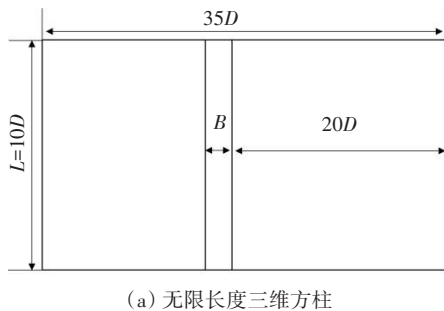


图8 三维方柱模型计算区域平面示意图

Fig. 8 Schematic diagram of the calculation area of the three-dimensional square column model

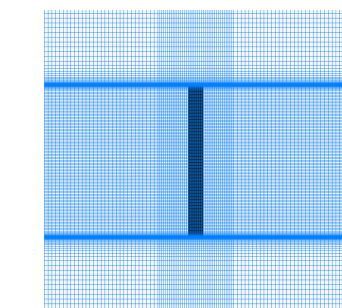
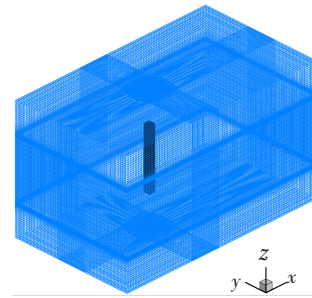
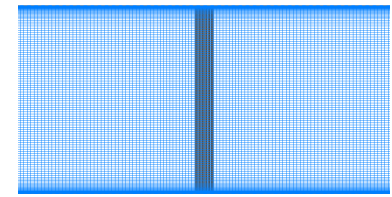
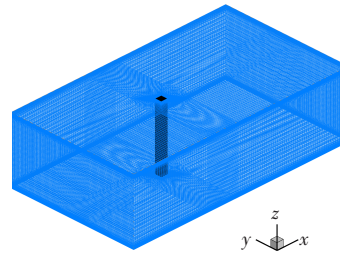


图9 三维方柱网格划分

Fig. 9 Mesh division of three-dimensional square column

将三维方柱的计算结果与二维方柱的结果进行对比,结果如表2所示。不考虑端部效应的三维方柱绕流的计算结果与二维方柱绕流的计算结果

较为接近,验证了三维模型计算结果的可靠性。

表2 二维、三维方柱绕流计算结果

Table 2 Calculation results of flow around two-dimensional and three-dimensional square columns

模型	C_D	旋涡脱落频率/Hz	St
二维	2.110	3.990	0.124
三维(不考虑端部效应)	2.114	3.923	0.122

2.2 长高比 L/D 改变的影响

为研究端部效对方柱绕流特性的影响,本文选取 $L/D=1, 2, 4, 6, 8, 10, 20, 30, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110, 120$ 的方柱,在 $B/D=1$ 的工况下分别进行数值模拟,研究 L/D 对 C_D 和 St 的影响。 C_D 和 St 的变化规律如图10所示, C_D 和 St 随 L/D 的增大而增大,在 $L/D>80$ 后, C_D 、 St 的增加趋势变得平缓,且在 $L/D=120$ 时,其值与二维、三维方柱的 C_D (约2.11)、 St (约0.12) 接近。在 $L/D\leq 2$ 时, St 趋近于0,说明此时不存在旋涡脱落现象,当 $L/D\geq 4$ 时,出现旋涡脱落现象。基于流场的变化分析 C_D 、 St 变化规律,在中心截面处,不同 L/D 下的时均压强云图和涡量云图分别如图11、12所示。

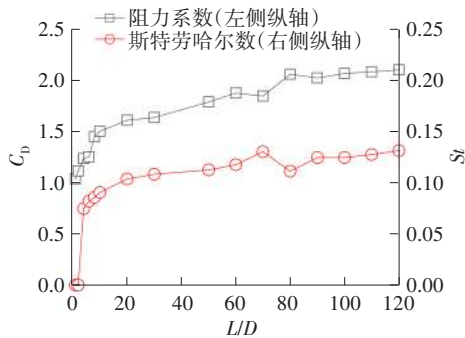


图10 C_D 、 St 随 L/D 变化规律图

Fig. 10 Variation pattern of C_D and St with L/D

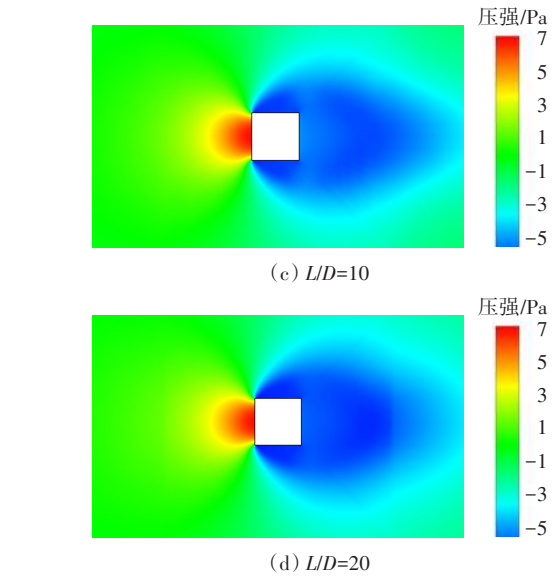
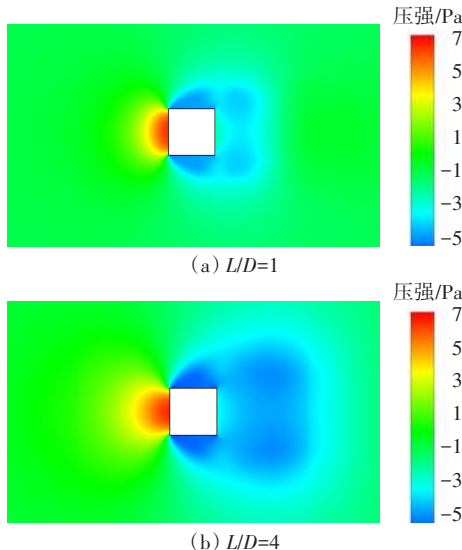


图11 不同长度三维方柱中心截面的时均压强云图

Fig. 11 Time averaged pressure contours of center sections of three-dimensional square columns with different lengths

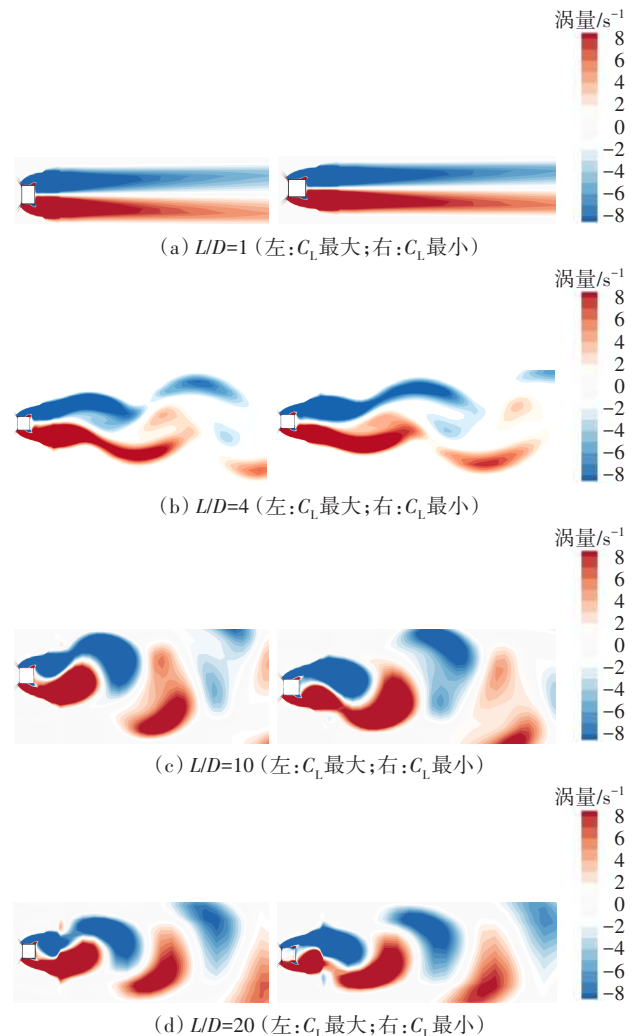


图12 不同长高比下三维方柱中心截面的瞬时涡量云图

Fig. 12 Instantaneous vorticity contours of center sections of three-dimensional square columns with different aspect ratios

方柱迎风侧始终承受着正压强,而背风侧总是承受着负压强,且随着 L/D 的增大,背风侧的负压强数值逐渐增大,导致尾流的吸力也随之增强,而迎风侧正压强数值未见明显变化。因此, C_D 随 L/D 增大而增大的主要原因是背风侧负压强数值的增大。结合涡量云图来看,在 $L/D < 20$ 时,随着 L/D 的增大,方柱尾流场具有显著的三维特征,并发生了显著变化。具体而言,当 $L/D=1$ 时,方柱不存在旋涡脱落现象,因此 St 为0;而在其他 L/D 比值下,均可观察到旋涡脱落现象,且随着 L/D 的增大,尾流旋涡的长度逐渐减小。结合本节 C_D 、 St 与 L/D 呈正相关关系的结论,可推测旋涡脱落频率随尾流旋涡长度的减小而增大。根据 $St=fD/U$ 可知, St 也随尾流旋涡长度的减小而增大。因此,尾流旋涡长度的减小导致 St 随 L/D 的增大而增大。

2.3 宽高比 B/D 改变的影响

为进一步考虑有限长度的三维方柱截面宽高比的影响,本文选取 $B/D=0.4、0.7、1.0、1.5、2.5、3.0$ 的方柱,在 $L/D=10$ 的工况下分别进行数值模拟,研究 B/D 对 C_D 和 St 的影响,得出 C_D 和 St 随 B/D 的变化规律曲线,如图13所示。

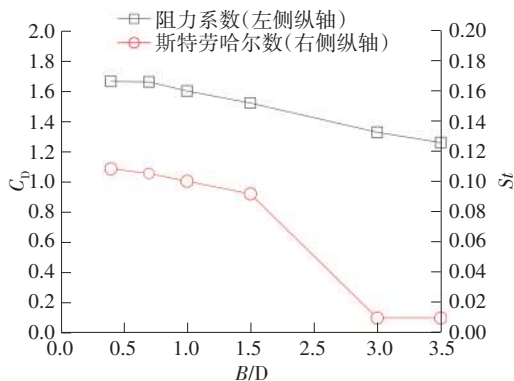


图13 C_D 、 St 随 B/D 变化规律曲线

Fig. 13 Variation pattern of C_D and St with B/D

由图13可知,三维有限长度方柱绕流 C_D 和 St 的变化规律与二维情况下的变化规律相似(图5),即 C_D 和 St 均与 B/D 呈负相关关系。随着 B/D 的增大,方柱背风侧负压强的数值逐渐减小,导致尾流的吸力也随之减弱,而迎风侧正压强数值则没有明显变化。因此, C_D 随 B/D 的增大而减小的主要原因是背风侧负压强数值的减小。随着 B/D 的增大,尾流旋涡的长度逐渐增加。当 B/D 增大到2.5时,旋涡脱落现象消失。

2.4 端部效应分析

为进一步讨论端部绕流对气动力分布规律的影响,选取 $L/D=50、60、70、80、90、100$ 的方柱,在 $B/D=1$ 的工况下分别进行数值模拟。为研究端部效应对 C_D 、 St 的影响,沿方柱纵向(z 方向)均匀地划分出20

个小截面,并监测 C_D 、 St 随截面高度 z 的变化规律。通过分析这些监测点的数据评估端部绕流对 C_D 、 St 的影响率。监测点的具体位置如图14所示。

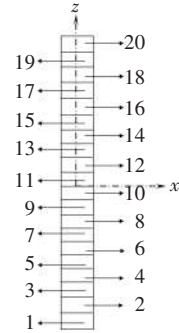
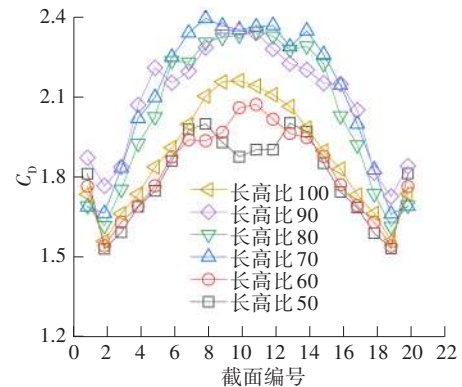


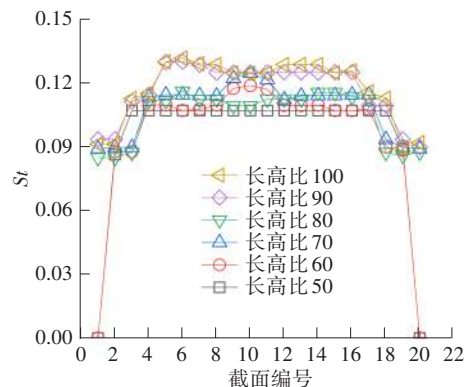
图14 监测段划分示意图

Fig. 14 Schematic diagram of monitoring section division

不同 L/D 下 C_D 和 St 随截面位置变化的分布规律如图15所示(测段编号与其上表面截面编号相同)。由图15可知,受端部效应的影响, C_D 呈现出负二次函数的分布规律。两端截面的 St 与中间截面的相差较大,中间截面的 St 表现出较高的相似性, C_D 和 St 均呈现出中部大而端部小的分布规律。随着 L/D 的增加,与中间截面 St 相差较大的两端截面数量随之增多,这表明端部绕流的影响正逐渐增强。



(a) 阻力系数的分布规律



(b) 斯特劳哈尔数的分布规律

图15 C_D 和 St 沿纵向的分布

Fig. 15 Distributions of C_D and St in the longitudinal direction

以 $L/D=50$ 工况为例,分析端部绕流对 C_D 和 St 的影响,将方柱整体的 $C_D=1.769$ 、 $St=0.1124$ 作为基准值,计算出各监测段的差值率,见表3。

表3 $L/D=50$ 工况时各监测段 C_D 、 St 的差值率

Table 3 Difference rate of C_D and St in each monitoring section under $L/D=50$ working condition

测段	$\delta_{C_D}/\%$	$\delta_{St}/\%$
1	0	100.0
2	16	21.9
3	13	3.0
4~17	2~9	3.0
18	13	3.0
19	16	19.2
20	0	100.0

在计算差值率时不考虑正负,仅考虑数据绝对值的大小,差值率越大则说明该监测段受端部绕流的影响越大。当某监测段的差值率大于10%时,就认为其受端部绕流的影响显著。随着监测段的位置朝方柱中部移动,其差值率会逐渐减小。当某个监测段的差值率小于等于10%,并且从该段一直到中间段,差值率都不再出现大于10%的情况时,则可认为从该段开始端部绕流的影响逐渐减弱。由表3可知,对于 C_D 而言,单侧受端部绕流影响显著的监测段有3个;对于 St 而言,单侧受端部效应影响显著的监测段有2个。基于此,按式(4)来定义端部绕流的影响率。

$$\Delta h = \frac{z_i}{20} \times 100\% \quad (4)$$

式中: Δh 为端部绕流的影响率; z_i 为两侧受端部绕流影响显著的监测段数量。

当 $L/D=50$ 时,端部绕流对 C_D 和 St 的影响率分别为30%和20%。为了更好地分析该工况下端部绕流的作用及流场的分布,统一选取升力系数达到最大值的时刻,并据此得出了不同位置的时均压强云图(图16)和瞬时涡量云图(图17)。

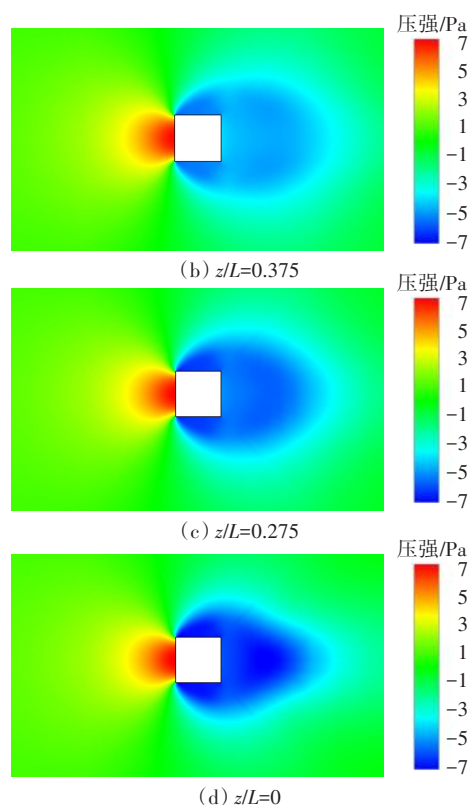
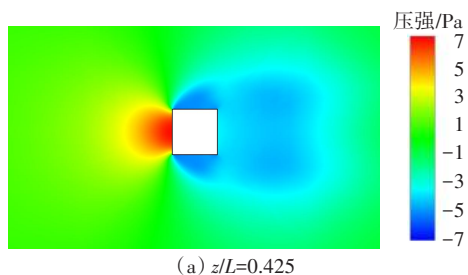
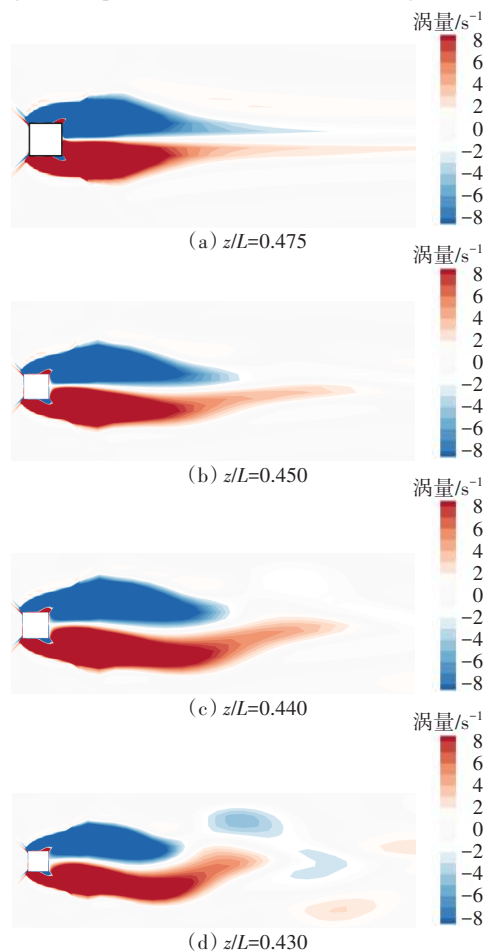
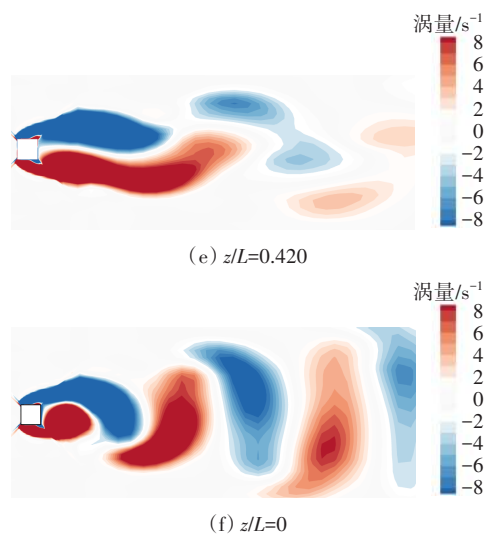


图16 $L/D=50$ 时不同纵向位置的时均压强云图

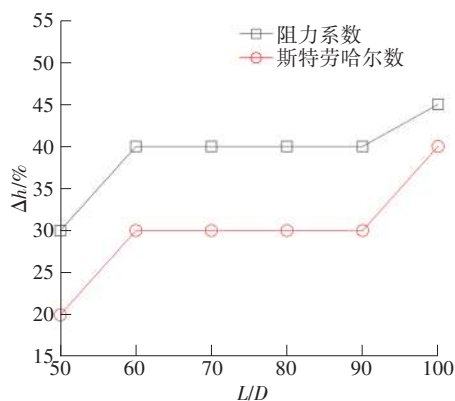
Fig. 16 Time averaged pressure contours at different longitudinal positions under $L/D=50$ working condition



图 17 $L/D=50$ 时不同纵向位置的瞬时涡量云图Fig. 17 Instantaneous vorticity contours at different longitudinal positions under $L/D=50$ working condition

由图 16、17 可知,随着 z/L 的减小,方柱背风侧的负压强数值逐渐增大,导致尾流的吸力越来越强,而迎风侧的正压强数值未出现明显变化。此时 C_p 随 z/L 的减小而增大,同时,随着 z/L 的减小,方柱尾流逐渐表现出旋涡脱落的趋势,但实际未发生旋涡脱落现象,因此对应的 $St=0$ 。当 $z/L=0 \sim 0.43$ 时,即监测段位置接近方柱中部时,旋涡脱落现象逐渐出现,且尾流旋涡的长度随 z/L 的减小而缩短,因此会形成如图 15(b)所示的 $L/D=50$ 工况下 St 随 z/L 的减小而增大的规律。总体而言,端部绕流对 St 分布规律的影响率比对 C_p 分布规律的影响率小。

其他工况下端部绕流对 C_p 和 St 的影响率如图 18 所示。在本文的计算工况范围内,端部绕流对阻力系数和斯特劳哈尔数的影响率均随着 L/D 的增大而增大,即 L/D 越大,受端部效应影响的截面范围越广。

图 18 影响率随 L/D 的变化规律图Fig. 18 Variation pattern of influence rate with L/D

3 结论

本文对方柱截面和有限长度的三维方柱端部绕流进行了数值模拟,研究了截面宽高比、纵向长宽比等参数对截面气动力的影响,得到以下结论:

1) 方柱的宽高比越大,尾流区域内旋涡长度越长而斯特劳哈尔数越小。旋涡脱落强度的减小使负压区对截面产生的吸力减小,即阻力系数减小。

2) 方柱长高比越大,即方柱越细长,方柱整体阻力系数和斯特劳哈尔数也越大。当长高比小于 20 时,方柱尾流场变化大,具有显著的三维特征;当长高比大于等于 20 时,尾流场的端部绕流效应仍然突出,其两端的旋涡脱落强度比中部的旋涡脱落强度小,故气动力呈现出中部大而端部小的分布规律。

3) 端部绕流对方柱阻力系数和斯特劳哈尔数的影响率与长高比呈正相关关系,即方柱长高比越大,受端部效应影响的范围越大。说明在实际工程中,当研究对象具有钝体特性且纵向长度有限时,有必要考虑端部绕流对其气动性能的影响。

参考文献 (References):

- [1] IRWIN P A. Bluff body aerodynamics in wind engineering [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2008, 96: 701-712. DOI: 10.1016/j.jweia.2007.06.008.
- [2] YU X T, WU T. Simulation of unsteady flow around bluff bodies using knowledge-enhanced convolutional neural network [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2023, 236: 105405. DOI: 10.1016/j.jweia.2023.105405.
- [3] LI K, HAN Y, CAI C S, et al. Study on the influence of structural parameters and 3D effects on nonlinear bridge flutter using amplitude-dependent flutter derivatives [J]. Journal of Fluids and Structures, 2024, 125: 104085. DOI: 10.1016/j.jfluidstructs.2024.104085.
- [4] 刘叶, 王方立, 韩艳, 等. 风屏障对平层公铁桥上列车防风效果分析 [J]. 交通科学与工程, 2021, 37(1): 51-59. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021.01.008.
LIU Ye, WANG Fangli, HAN Yan, et al. Study on the protective effects of wind barriers on the train on highway and railway same-story bridge [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2021, 37(1): 51-59. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021.01.008.
- [5] 张航, 唐浩俊, 莫威, 等. 双矩形拱肋间的气动干扰效应研究 [J]. 工程力学, 2023, 40(6): 131-143. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2021.11.0889.

- ZHANG Hang, TANG Haojun, MO Wei, et al. Research on aerodynamic interference between two arch ribs with rectangle cross sections [J]. Engineering Mechanics, 2023, 40 (6) : 131-143. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2021.11.0889.
- [6] 李文舒, 王汉封, 李欢, 等. 矩形前缘剪切流对圆柱气动和绕流特性影响规律的研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20 (10) : 3638-3647. DOI: 10.19713/j.cnki.43-1423/u.t20222113.
- LI Wenshu, WANG Hanfeng, LI Huan, et al. Effects of the leading-edge shear layer of a rectangular on the aerodynamics and flow of a circular cylinder[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2023, 20 (10) : 3638-3647. DOI: 10.19713/j.cnki.43-1423/u.t20222113.
- [7] 陈修煜, 朱乐东, 檀忠旭. 矩形立柱非定常驰振三维非线性分析及气弹模型试验验证[J]. 中国公路学报, 2024, 37 (3) : 321-329. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2024.03.020.
- CHEN Xiuyu, ZHU Ledong, TAN Zhongxu. Three-dimensional non-linear analysis and aeroelastic model test on unsteady galloping of rectangular column [J]. China Journal of Highway and Transport, 2024, 37 (3) : 321-329. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2024.03.020.
- [8] LI Y I, TANG H J, LIN Q M, et al. Vortex-induced vibration of suspenders in the wake of bridge tower by numerical simulation and wind tunnel test[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2017, 164: 164-173. DOI: 10.1016/j.jweia.2017.02.017.
- [9] 熊涛, 许育升, 陈银伟, 等. 矩形柱的涡振三维特性数值模拟研究[J]. 交通科学与工程, 2023, 39 (2) : 62-70. DOI: 10.1654553464/j.cnki.cn43-1494/u.20210831001.
- XIONG Tao, XU Yusheng, CHEN Yinwei, et al. Numerical simulation study on three-dimensional vortex vibration characteristics of rectangular columns [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2023, 39 (2) : 62-70. DOI: 10.1654553464/j.cnki.cn43-1494/u.20210831001.
- [10] 郭志远, 虞培祥, 欧阳华. 基于大涡模拟的圆柱绕流剪切层不稳定性[J]. 上海交通大学学报, 2021, 55 (8) : 924-932.
- GUO Zhiyuan, YU Peixiang, OUYANG Hua. Shear layer instability of cylindrical flow based on large eddy simulation[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2021, 55 (8) : 924-932.
- [11] 李石清, 王汉封, 罗元隆, 等. 不同湍流边界层中高层建筑模型气动力特性[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2020, 51 (6) : 1606-1613. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2020.06.015.
- LI Shiqing, WANG Hanfeng, LUO Yuanlong, et al. Aerodynamic characteristics of high-rise building models in different turbulent boundary layers [J]. Journal of Central South University (Natural Science Edition), 2020, 51 (6) : 1606-1613. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2020.06.015.
- [12] 王汉封, 徐萌霞. 有限长正方形棱柱绕流的双稳态现象[J]. 力学与实践, 2013, 35 (3) : 46-50. DOI: 10.6052/1000-0879-13-100.
- WANG Hanfeng, XU Mengxia. The bistable phenomenon of flow around a finite length square prism [J]. Mechanics and Practice, 2013, 35 (3) : 46-50. DOI: 10.6052/1000-0879-13-100.
- [13] TANG H J, KANG J, LI Y L. Aerostatic and aerodynamic stability of a suspension bridge during early erection stages [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2023, 233: 105297. DOI: 10.1016/j.jweia.2022.105297.
- [14] 张航. 大跨度拱桥施工阶段拱肋涡振性能的三维流固耦合分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2022. DOI: 10.27414/d.cnki.gxnju.2022.001823.
- ZHANG Hang. Arch ribs vortex-induced vibration performance of long-span arch bridge during construction by 3D fluid-structure interaction analysis [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2022. DOI: 10.27414/d.cnki.gxnju.2022.001823.
- [15] LYN D A. Phase-averaged turbulence measurements in the separated shear layer region of flow around a square cylinder [C]// Proceedings of 23th Congress International Association for Hydraulic Research. Ottawa: Association for Science and Technology, 1989: 85-92.
- [16] 李雪健, 苏中地. 方柱绕流的二维和三维模拟[J]. 中国计量学院学报, 2013, 24 (4) : 378-380.
- LI Xuejian, SU Zhongdi. Two dimensional and three-dimensional simulations of flow around square columns [J]. Journal of China Institute of Metrology, 2013, 24 (4) : 378-380.
- [17] 杜明倩, 毛海英, 李宁佳. 不同倒角半径下方柱绕流的数值模拟及水动力特性研究[J]. 海洋科学, 2017, 41 (7) : 138-140. DOI: 10.11759/hyxx20161120001.
- DU Mingqian, MAO Haiying, LI Ningjia. Numerical simulation and hydrodynamic characteristics of flow around columns with different chamfer radii [J]. Marine Science, 2017, 41 (7) : 138-140. DOI: 10.11759/hyxx20161120001.
- [18] 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) : 172-176. DOI: 10.3969/j.issn.1001-246X.2007.02.008.
- XIE Zhigang, XU Chunxiao, CUI Guixiang, et al. Large eddy simulation of flow around a square column [J]. Computational Physics, 2007, 24 (2) : 172-176. DOI: 10.3969/j.issn.1001-246X.2007.02.008.

(责任编辑:薛仪)