

doi: 10.3969/j.issn.2095-0411.2024.01.009

合成射流对串列双圆柱受力特性及流场特性影响的数值模拟

王海博, 张品源, 于海龙, 孙运兰

(常州大学 石油与天然气工程学院, 江苏 常州 213164)

摘要: 合成射流能够通过改变单个圆柱尾部的旋涡脱落模态有效抑制其涡致振动, 但对多圆柱结构的控制效果尚待研究。采用数值模拟研究了对称布置在上游圆柱尾部的水平合成射流对串列双圆柱的受力特性和尾流特性的影响。在研究中, 来流的雷诺数恒定为 150, 合成射流的位置角度为 45° , 2 个圆柱中心之间的间距比为 2~10。研究表明, 水平合成射流能够同时降低上、下游圆柱的升、阻力系数, 但过大的合成射流动量系数反而会导致上、下游圆柱的阻力系数均大于无合成射流控制情况下的值。当动量系数为 2 和 4 时, 上游圆柱的尾迹完全由水平合成射流主导, 变得完全对称; 但下游圆柱的尾部始终存在交替脱落的旋涡。

关键词: 双圆柱; 合成射流; 受力特性; 尾涡结构; 串列

中图分类号: V 21; O 358

文献标志码: A

文章编号: 2095-0411(2024)01-0076-10

Numerical study on the influence of synthetic jets on the force characters and flow fields of two tandem circular cylinders

WANG Haibo, ZHANG Pinyuan, YU Hailong, SUN Yunlan

(School of Petroleum and Natural Gas Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China)

Abstract: Though synthetic jets can effectively suppress the vortex induced vibration (VIV) of single circular cylinder by changing the vortex shedding pattern in the wake, its control effect on multi-cylinder structures still needs to be studied. In this work, the influence of synthetic jets issued horizontally and symmetrically arranged in the leeward side of the upstream circular cylinder on the force characters and wake structures of two tandem circular cylinders was investigated by numerical simulation. In numerical simulation, the Reynold number of the incoming flow is constant at 150, the position angle of

收稿日期: 2023-02-18。

基金项目: 常州大学科研启动基金资助项目(ZMF21020384)。

作者简介: 王海博(1991—), 男, 河南扶沟人, 博士, 讲师。通信联系人: 于海龙(1975—), E-mail: yhl.doctor@163.com

引用本文: 王海博, 张品源, 于海龙, 等. 合成射流对串列双圆柱受力特性及流场特性影响的数值模拟[J]. 常州大学学报(自然科学版), 2024, 36(1): 76-85.

synthetic jets is 45° , the dimensionless distances between centers of two circular cylinders are in the range of 2—10. The results show that synthetic jets issued in horizontal direction can reduce the lift and drag coefficients of both upstream and downstream circular cylinders, but the drag coefficients of both upstream and downstream circular cylinders can be larger than those of the uncontrolled case when the momentum coefficient of synthetic jets is too large. When the momentum coefficient of synthetic jets equals 2 and 4, synthetic jets issued in horizontal direction could completely dominate the wake of the upstream circular cylinder and make it perfectly symmetrical, but there are still alternative vortices shedding in the wake of the downstream circular cylinder.

Key words: two circular cylinders; synthetic jets; force characters; wake structures; tandem

黏性流体绕流圆柱结构时所产生的周期性旋涡脱落能够诱发结构产生涡致振动^[1], 不仅会造成结构的疲劳损伤, 还可能产生共振效应使结构瞬间破坏^[2]。在工程中, 多圆柱结构比单圆柱结构更为常见, 诸如多分裂导线、海底背负式管道和桥梁并列索等均涉及多圆柱结构。由于多个圆柱之间存在强烈的相互干扰, 当流体流过多圆柱结构时会导致结构的受力特性、表面的压力分布, 以及周围的流动形态更加复杂^[3-4], 并可能导致现有的适用于单圆柱结构的控制措施失效。

合成射流是由激励器交替吹吸周围流体所产生的一种非连续射流^[5], 其通过对宏观流场施加微尺度扰动引发大尺度效应, 进而实现对宏观流场的控制^[6]。与传统流动控制方式(如连续吹气和吸气)相比, 合成射流的产生无需额外流体供应, 其激励器还具有结构简单紧凑、使用及维护成本低、质量轻等优点, 因而在流动分离控制^[7]、热管理^[8]、仿生推进^[9]等多个领域展现出广阔的应用前景。

在圆柱结构的涡致振动控制方面, 合成射流也展现出了良好的控制效果。FENG 等^[10]利用其设计的活塞式合成射流激励器, 通过水槽实验研究了布置在圆柱后驻点的合成射流在 $Re=950$ 时对圆柱表面边界层分离的控制作用。该研究不仅揭示了合成射流在吸和吹过程中的控制机理, 还发现合成射流在吹相和吸相速度相同时的控制效果最佳。WANG 等^[11]采用数值模拟研究了水平方向的合成射流在 $Re=100$ 时对固定圆柱绕流和弹性支撑圆柱单自由度涡致振动的控制效果。研究发现: 只有当合成射流的动量系数足够大、激励频率接近自然涡脱频率并且合成射流喷口位于圆柱后侧 $1/4$ 圆弧表面上时, 固定圆柱尾部的涡脱落才能被有效抑制。但由于圆柱的运动能加剧其表面的漩涡脱落, 仅在满足上述条件的某些工况下, 弹性支撑圆柱的单自由度涡致振动才能被有效抑制。此外, 针对圆柱的双自由度涡致振动, 水平合成射流在吹相和吸相都能通过推迟圆柱表面的边界层分离抑制振动, 并且同向的水平合成射流在高动量系数 ($C_u \geq 4.0$) 和高激励频率 ($f_{sj}^* \geq 5.0$) 条件下对双自由度涡致振动的抑制效果最佳^[12-14]。

尽管现有研究已表明, 合成射流能够通过改变单个圆柱尾部的旋涡脱落模态抑制结构涡致振动, 但合成射流对多圆柱结构的控制效果仍有待研究。鉴于此, 文章选取双圆柱结构这种最简单的多圆柱构型作为研究对象, 分析了水平合成射流对 2 个圆柱之间的间隙流所施加的扰动对上、下游圆柱的受力特性和尾流特性的影响。

1 模型及计算方法

1.1 物理模型

数值计算的物理模型如图 1 所示。由 2 个直径 (D) 均为 0.01 m 的圆柱串列布置, 来流的流速

记为 U_∞ (m/s), 雷诺数 (Re) 恒定为 150, 2 个圆柱中心之间的距离为 L (m)。在模拟中, 2 个圆柱中心之间的间距比 (L/D) 为 2~10。在上游圆柱的背风侧对称布置上、下两股水平方向合成射流 (流速分别为 u_{sj}^u 和 u_{sj}^l , m/s), 2 个合成射流出口的宽度 d (m) 均为圆柱周长的 1/72 ($d = \pi D/72$)。合成射流的位置角度 α ($^\circ$) 定义为圆柱中心到合成射流出口中心的连线与水平方向的夹角, 数值计算中选取 $\alpha = 45^\circ$, 因为该位置角度 ($\alpha = 45^\circ$) 的水平合成射流在 $Re = 150$ 时对单个圆柱尾部的旋涡脱落和涡致振动都具有良好的控制效果^[12]。

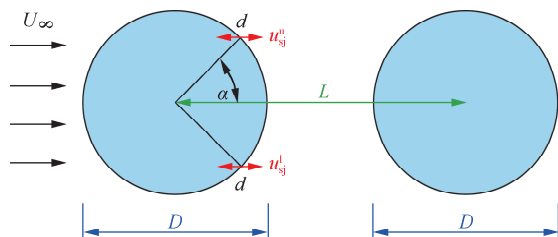


图 1 物理模型

Fig.1 Physical model

1.2 控制方程及求解

文中的数值模拟均在 $Re = 150$ 条件下进行, 流动可视为二维层流流动, 且流体为不可压缩牛顿流体。数值计算的控制方程包括连续性方程和动量方程, 具体为:

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

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad (2)$$

式中: u_i 和 u_j 分别为 x_i 和 x_j 方向上的速度分量, m/s; t 为时间, s; ρ 为流体密度, kg/m^3 ; p 为压力, Pa; ν 为流体的运动黏度, m^2/s 。

为了模拟合成射流对流场的影响, 在上游圆柱的表面设置了速度随时间变化的速度边界条件, 并通过 Fluent 用户自定义函数 (User Defined Functions, UDFs) 来实现。合成射流出口的速度方程为^[15]:

$$u_{sj}^u = U \sin(2\pi f_{sj} t + \varphi_u) \quad (3)$$

$$u_{sj}^l = U \sin(2\pi f_{sj} t + \varphi_l) \quad (4)$$

式中: f_{sj} 为合成射流的激励频率, Hz; U 为速度峰值, m/s; φ_u 和 φ_l 分别为上、下两股合成射流的初始相位, 在模拟中均设置为 0。

数值计算中, 引入动量系数 C_u 来表征合成射流强度, 其定义为

$$C_u = \frac{2U^2 d}{U_\infty^2 D} \quad (5)$$

式中: U_∞ 为均匀来流的流速; D 为圆柱的外径; d 为合成射流出口的宽度。

采用圆柱尾部旋涡脱落的固有频率 $f_{n,vs}$ (Hz) 对合成射流的激励频率做无量纲处理, 具体为

$$f_{sj}^* = \frac{f_{sj}}{f_{n,vs}} \quad (6)$$

此外, 在文中, 升力系数 (C_l) 和阻力系数 (C_d) 分别定义为:

$$C_l = \frac{2F_{Cl}}{\rho U_\infty^2 D} \quad (7)$$

$$C_d = \frac{2F_{Cd}}{\rho U_\infty^2 D} \quad (8)$$

式中 F_{Cl} 和 F_{Cd} 分别为单位长度圆柱所受的升力和阻力, N/m。

在计算中, 采用 Fluent 中自带的 SIMPLE 算法对连续性方程和动量方程进行求解, 计算的残差均设置为 10^{-6} 。对梯度项的处理采用了扭曲面梯度校正模式 (Least Squares Cell Based), 并采用二阶格式处理压力。对瞬态项的离散则采用一阶隐式格式, 计算的无量纲时间步长 $\Delta t U_\infty / D$ 为

0.007 536, 满足 Courant-Friedrichs-Lewy 数 (CFL 数) 小于 1 的要求^[16]。

1.3 计算域和边界条件

如图 2 所示, 数值模拟的计算区域是一个矩形区域, 计算区域的左侧设置为速度入口 (Velocity inlet), 右侧设置为压力出口 (Pressure outlet), 顶部和底部都设置为无滑移壁面 (No-slip condition)。2 个串联布置的圆柱位于计算区域中, 圆柱表面均设置为无滑移壁面 (No-slip condition)。2 个圆柱的中心到计算区域顶部和底部的距离均为 $20D$ (实际尺寸为 0.2 m), 计算区域左侧入口到上游圆柱 (圆柱 1) 中心的距离为 $15D$ (实际尺寸为 0.15 m), 计算区域右侧出口到下游圆柱 (圆柱 2) 中心的距离为 $27D$ (实际尺寸为 0.27 m)。根据计算工况的不同, 2 个圆柱中心之间的间距比变化为 2~10, 整个计算区域的长度也随之在 $44D \sim 52D$ (0.44~0.52 m) 变化。

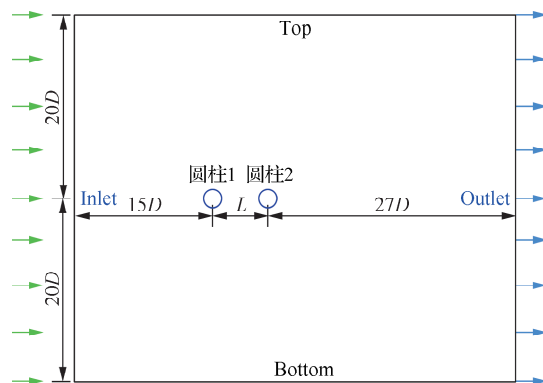


图 2 计算区域

Fig.2 Computational domain

为了在计算精度和计算时间之间取得平衡, 在进行数值计算前, 首先通过调整圆柱表面的周向网格数和周围子区域内径向网格数设置了 M1 (周向×径向为 160×25)、M2 (周向×径向为 240×30) 和 M3 (周向×径向为 320×35) 3 种疏密程度不同的网格, 并选取 $Re=150$, $L/D=3, 5, 7, 9$ 的 4 种工况进行网格无关性验证, 具体结果如图 3 所示。从图 3 中可以观察到, 随着网格数的增加, 采用不同网格计算得到的上、下游圆柱阻力系数的平均值 C_{dm} 和峰值升力系数的平均值 C_{lp} 的差别均逐渐减小, 并且采用 M2 型和 M3 型网格计算得到的结果之间差异很小。

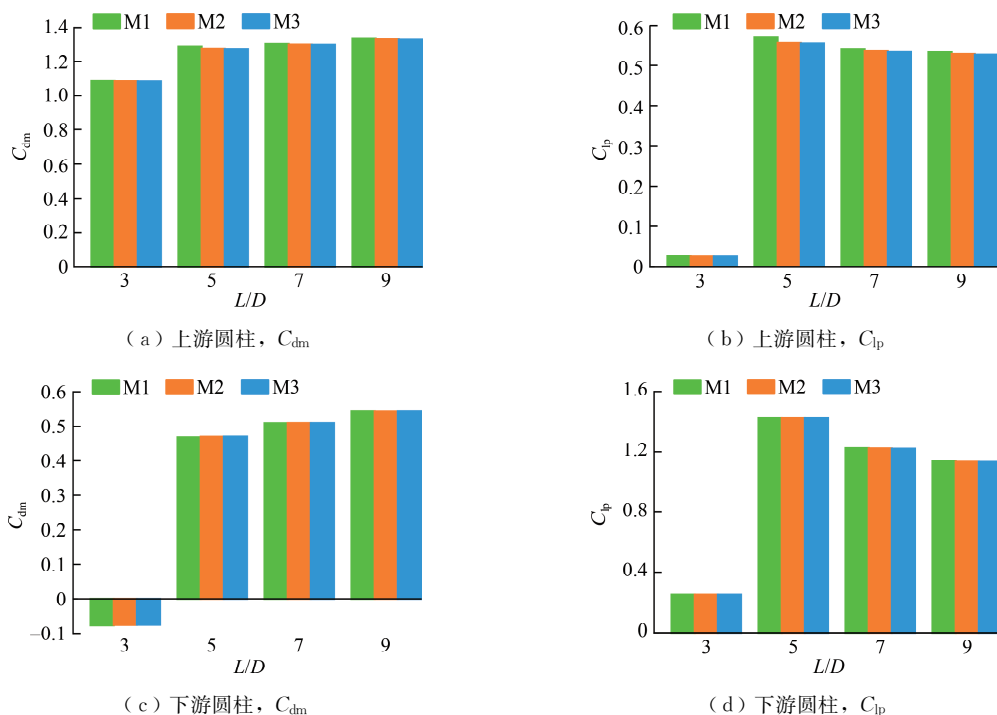


图 3 网格无关性验证结果

Fig.3 Results of mesh independent test

因此，文章选取了 M2 型网格进行数值计算。当上、下游圆柱中心之间的间距比为 $L/D=3$ 时，数值计算所采用的网格如图 4 所示，采用了二维结构化网格对计算区域进行划分，并利用直径为 $2D$ （实际尺寸为 0.02 m）的圆形区域对流场中速度梯度变化很大的圆柱近壁面进行网格加密。

2 数值模拟验证

为验证文中所采用数值方法的可靠性，对 $Re=100$ 和 200 条件下的单圆柱绕流进行了数值计算，并与文献中的结果进行了对比，具体见表 1。对比结果表明，采用文中方法计算所得到的阻力系数的平均值、峰值升力系数的平均值和 Strouhal 数 (Sr) 与文献中的结果吻合较好。其中，Strouhal 数是表征圆柱尾部旋涡脱落情况的无量纲参数，定义为

$$Sr=f_{vs}D/U_{\infty} \quad (9)$$

式中： D 为圆柱的直径； U_{∞} 为来流的流速； f_{vs} 为旋涡脱落的频率，Hz。

针对串联双圆柱绕流，表 2 对比了在 $Re=200$ ， $L/D=3$ 和 $Re=150$ ， $L/D=2$ 时相关文献中的结果和使用本文数值方法计算所得到的结果。通过对比可知，采用本文方法计算所得到的上、下游圆柱的阻力系数的平均值和峰值升力系数的平均值与文献中的结果基本吻合，说明本文数值计算的结果具有较好的可信度。

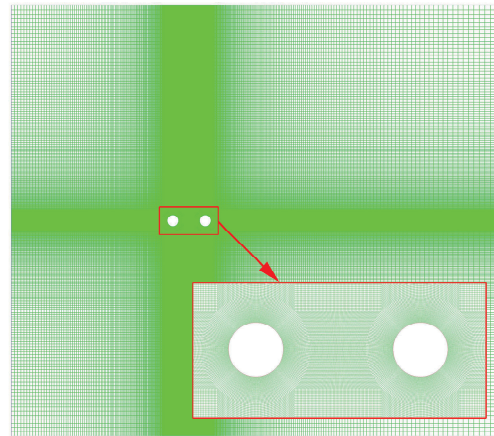


图 4 计算网格

Fig.4 Computational mesh

表 1 单圆柱绕流结果对比

Table 1 Comparison of results for flow around single circular cylinder

Re	数据来源	C_{dm}	C_{lp}	Sr
100	本文	1.369	0.331	0.170
	MAHÍR 等 ^[17]	1.368	0.343	0.172
	HARIMI 等 ^[18]	1.344	0.306	0.165
	张东辉等 ^[19]	1.382	0.342	0.163
200	本文	1.354	0.679	0.196
	刘松等 ^[20]	1.30	0.70	0.195
	BRAZA 等 ^[21]	1.31	0.65	0.194
	张东辉等 ^[19]	1.368	0.685	0.192

表 2 串联双圆柱绕流结果对比

Table 2 Comparison of results for flow around two tandem circular cylinders

Re	L/D	数据来源	上游圆柱		下游圆柱	
			C_{dm}	C_{lp}	C_{dm}	C_{lp}
200	3	本文	1.03	0.03	-0.12	0.30
		刘松等 ^[20]	1.03	0.05	-0.16	0.26
		毕继红等 ^[22]	1.07	0.02	-0.10	0.31
150	2	本文	1.103	0.003	-0.174	0.010
		ZHAO ^[23]	1.086	0.005	-0.171	0.025

3 结果与讨论

3.1 上、下游的圆柱受力特性

图 5 展示了水平合成射流对上、下游圆柱峰值升力系数平均值的影响，图 6 则展示了部分工况的

升力系数时程曲线。从图 5 中可以观察到,当没有采用合成射流控制时,上、下游圆柱峰值升力系数的平均值都先随着间距比的增大而增加,并且均在 $L/D=4$ 时取得最大值(图 6 (a) 和图 6 (b))。上游圆柱峰值升力系数的平均值在 $L/D \geq 6$ 后基本保持不变,而下游圆柱峰值升力系数的平均值则在 $L/D \geq 4$ 后逐渐降低。采用水平合成射流控制后,当 $C_u=1, 2$ 和 4 时,上游圆柱峰值升力系数的平均值在所有间距比条件下都几乎为 0,这与水平合成射流对单个圆柱的控制效果相同^[11],并且升力系数的时程曲线仍呈现出周期性波动的特征(图 6 (c) 和图 6 (d))。合成射流的动量系数对下游圆柱峰值升力系数的平均值的影响则比较显著的,部分工况的升力系数时程曲线如图 6 (e) 和图 6 (f)

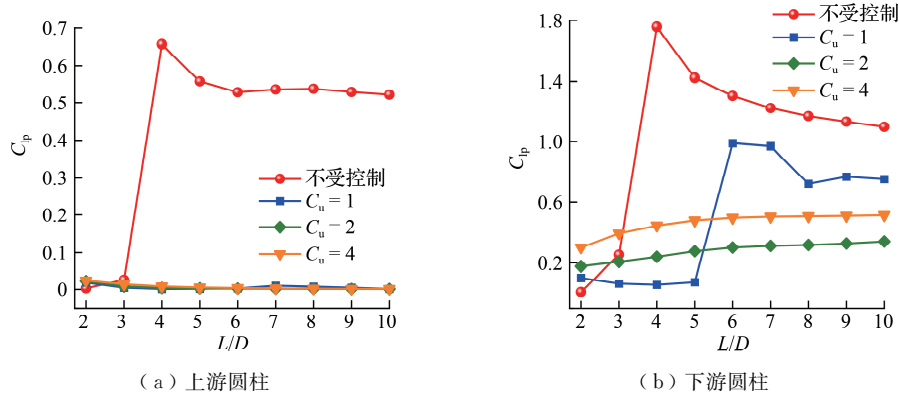


图 5 合成射流对上、下游圆柱峰值升力系数平均值的影响

Fig.5 Influence of synthetic jets on the peak lift coefficients of upstream and downstream circular cylinders

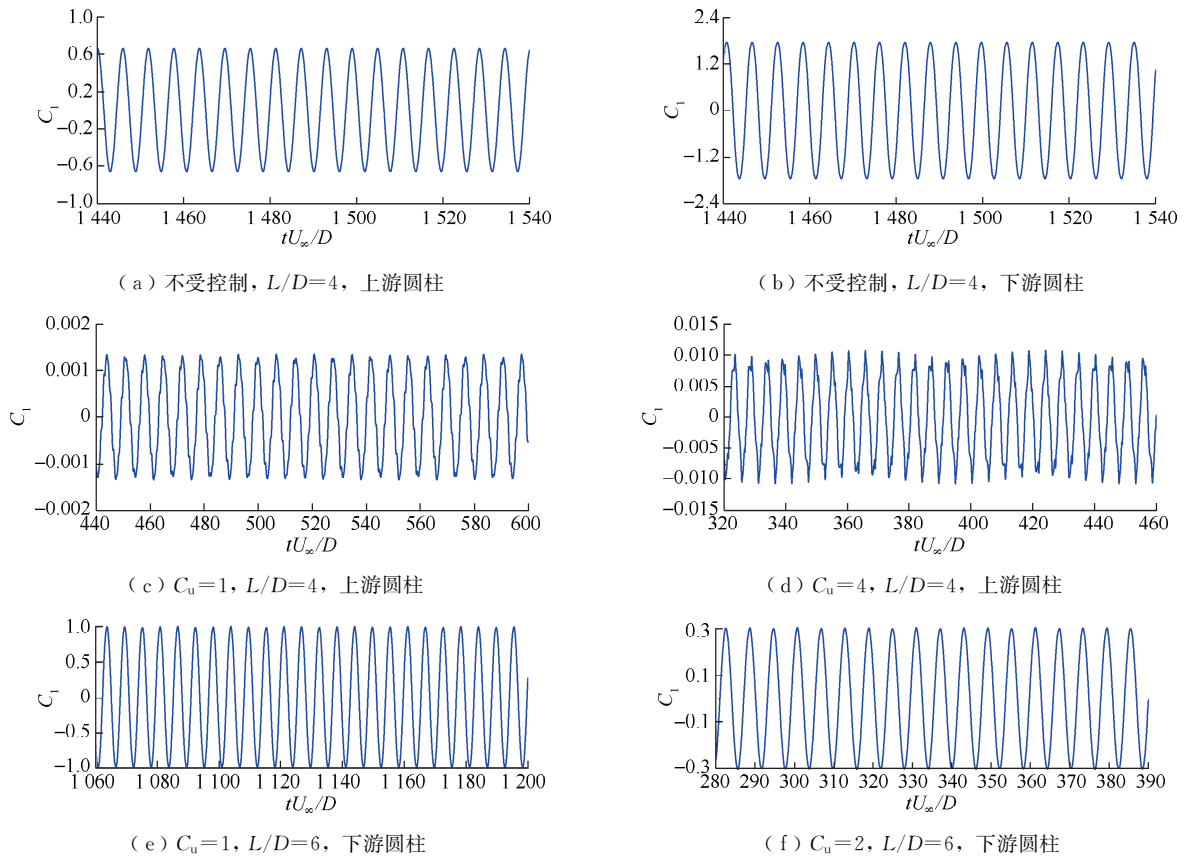


图 6 部分工况升力系数时程曲线

Fig.6 Time histories of lift coefficients for some selected cases

所示。除了下游圆柱峰值升力系数的平均值在 $C_u=1$, $L/D \geq 6$ 时出现显著升高外, 下游圆柱的升力系数随着合成射流动量系数的增大而增加。并且, 当采用水平合成射流控制后, 下游圆柱峰值升力系数的平均值在 $L/D \geq 4$ 时均低于无合成射流控制的下游圆柱。

合成射流对上、下游圆柱平均阻力系数的影响如图 7 所示, 部分工况的阻力系数时程曲线如图 8 所示。在没有采用合成射流控制的情况下, 上、下游圆柱的平均阻力系数均在 $L/D=4$ 时取得极值 (图 8 (a) 和图 8 (b)), 并且在 $L/D \geq 5$ 后都随着间距比的增大而缓慢增加。采用水平合成射流控制

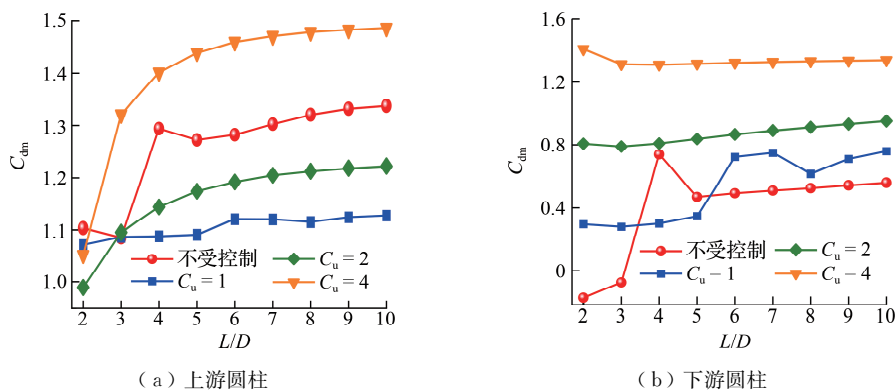


图 7 合成射流对上、下游圆柱平均阻力系数的影响

Fig.7 Influence of synthetic jets on the time-averaged drag coefficients of upstream and downstream circular cylinders

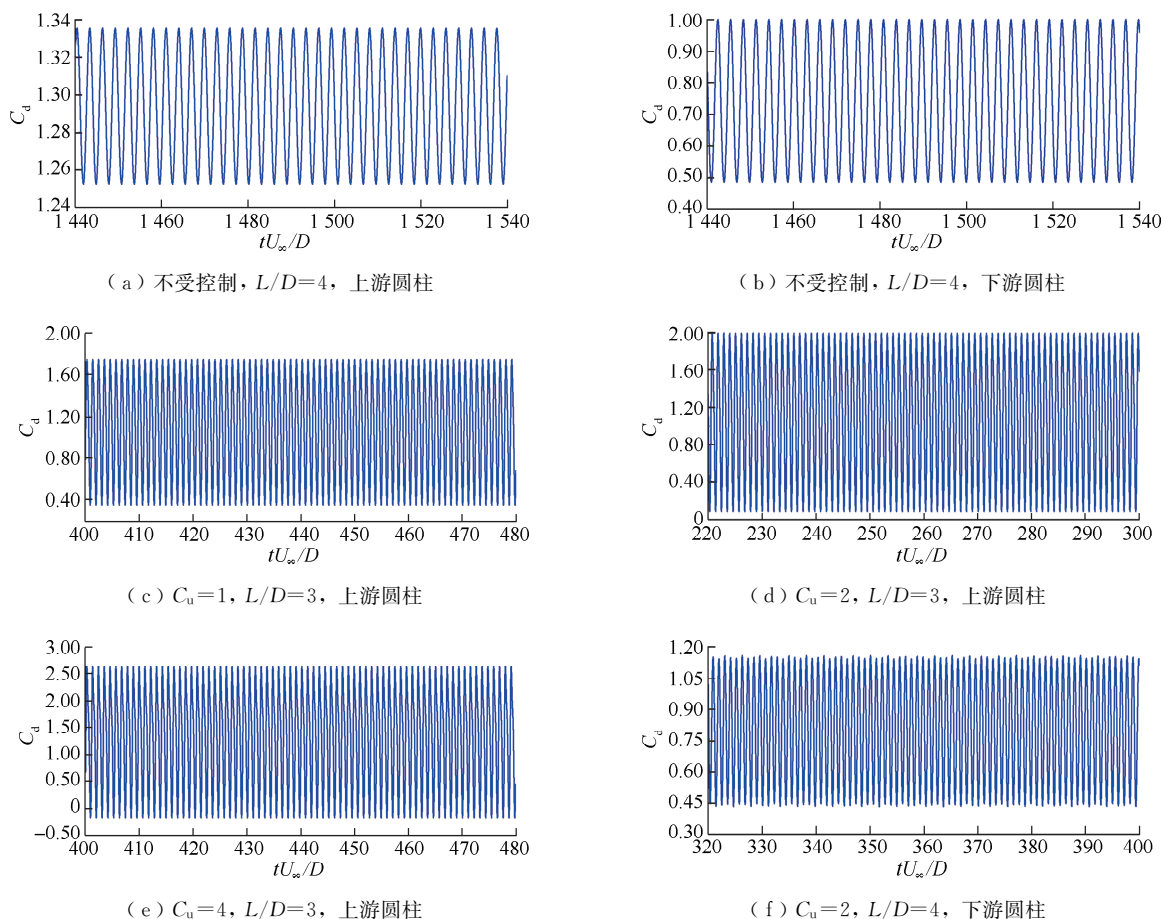


图 8 部分工况阻力系数时程曲线

Fig.8 Time histories of drag coefficients for some selected cases

后,上游圆柱的平均阻力系数整体上都随着间距比的增大而增加,并且当 $L/D \geq 3$ 时随着动量系数的增大而增加。当 $L/D = 3$ 时,上游圆柱的平均阻力系数在 3 种动量系数条件下几乎相同,但从图 8 (c)、图 8 (d) 和图 8 (e) 中可以观察到,上游圆柱阻力系数的波动范围在 3 种动量系数条件下不同,随着动量系数的增大而增大。因为随着动量系数增大,合成射流向流场注入的动量增大,进而对上游圆柱产生更大的脉动推力,导致阻力系数的波动范围增大^[15]。当 $C_u = 4$ 且 $L/D \geq 3$ 时,上游圆柱的平均阻力系数均大于不受控制上游圆柱。当 $C_u = 1$ 和 2 时,除 $L/D = 3$ 的工况外,上游圆柱的平均阻力系数均小于不受控制上游圆柱。采用水平合成射流控制后,下游圆柱的平均阻力系数在所有间距比均随着动量系数的增大而增加。图 8 (f) 展示了 $C_u = 2$, $L/D = 4$ 时下游圆柱阻力系数的时程曲线。并且除了 $C_u = 1$, $L/D = 4$ 和 5 的工况外,水平合成射流都会导致下游圆柱的平均阻力系数大于无合成射流控制情况下的值。

3.2 串联圆柱流动形态演化

当没有采用合成射流控制时,串联双圆柱的尾涡结构如图 9 所示。从图 9 中可以观察到,对于不受合成射流控制的圆柱,当 $L = 2D$ 和 $L = 3D$ 时,从上游圆柱表面分离的剪切层在下游圆柱后面卷起,并没有重新附着在下游圆柱表面。此时,2 个圆柱尾部的旋涡实质上是由上游圆柱所生成的旋涡形成,上、下游圆柱的相互作用处于邻近和尾流干扰区^[24]。随着间距比增大,上游圆柱尾部会出现交替的旋涡脱落,这些旋涡会再附着到下游圆柱表面,与下游圆柱表面所形成的旋涡融合,上、下游圆柱的相互作用进入尾流干扰区^[24]。此外,串联双圆柱的尾迹宽度随着间距比的增大呈现出先增大后减小的趋势,并在 $L = 4D$ 时取得最大值 $3.625D$ 。

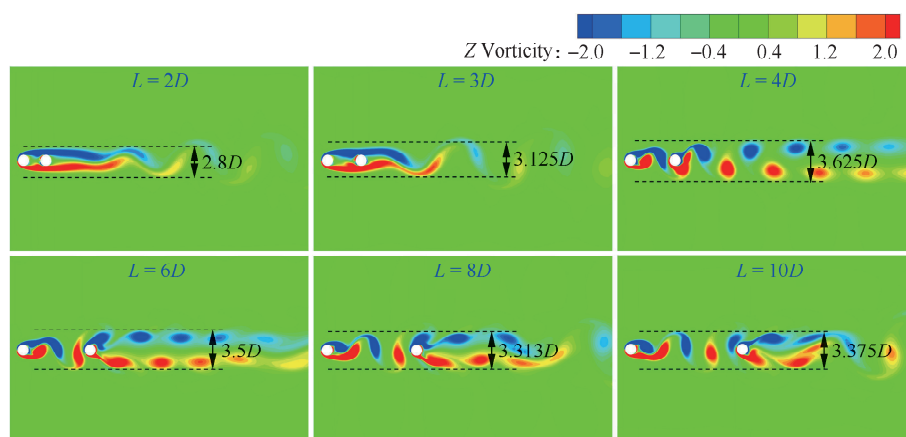


图 9 不受合成射流控制的串联双圆柱尾涡结构

Fig.9 Wake patterns of two tandem circular cylinders without synthetic jets control

采用合成射流控制后,串联双圆柱的尾涡结构如图 10 所示。当 $C_u = 1$, 且 $L = 2D \sim 5D$ 时,上游圆柱表面上、下 2 个剪切层均被拉伸,从上游圆柱表面分离的剪切层包裹住下游圆柱,并且在下游圆柱后面卷起(如图 10 中 $L = 2D$ 和 $L = 4D$ 工况)。这与不受合成射流控制的串联双圆柱在邻近和尾流干扰区^[24](图 9 中 $L = 2D$ 和 $L = 3D$ 工况)的情况类似。当 $C_u = 1$ 且 $6D \leq L \leq 10D$ 时,上、下游圆柱尾部均会出现交替脱落的旋涡,从上游圆柱脱落的旋涡会再附着到下游圆柱表面,与不受控制的串联圆柱在尾流干扰区^[24]的尾涡结构类似。当 $C_u = 2$ 和 4 时,上游圆柱的尾迹变得对称,并且完全由合成射流主导;下游圆柱的尾部仍有旋涡交替脱落。并且当两个圆柱间距过小时,下游圆柱会阻碍上游圆柱尾迹的扩展,而上游圆柱的尾迹则会附着在下游圆柱表面(如图 10 中 $C_u = 2$, $L = 2D$ 和 $4D$, 以

及 $C_u=4$, $L=2D$ 工况)。此外,通过与图 9 中不受合成射流控制的串联双圆柱在同间距比条件下进行对比可以发现,采用动量系数足够大的合成射流控制能够使串联双圆柱的尾迹宽度降低。并且当 $L \geq 6D$ 时,串联双圆柱的尾迹宽度随着动量系数的增大逐渐降低。当 $C_u=4$, $L=10D$ 时,从图 10 中可以观察到最小的尾迹宽度 $2.6D$ 。

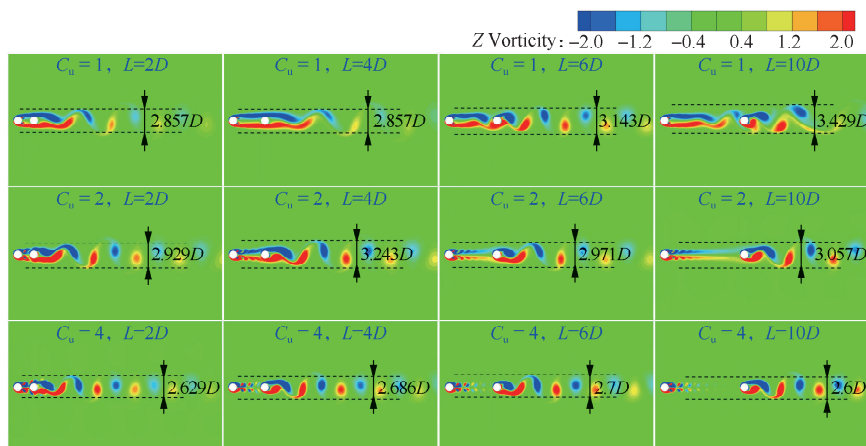


图 10 受合成射流控制的串联双圆柱尾涡结构

Fig.10 Wake patterns of two tandem circular cylinders under synthetic jets control

4 结 论

采用数值模拟研究了布置在上游圆柱背风侧的水平合成射流对串联双圆柱结构的控制效果。通过分析串联双圆柱在合成射流控制下的升力系数、阻力系数和尾涡结构,得到了如下结论:

1) 对串联布置的双圆柱采用水平合成射流控制后,上、下游圆柱的峰值升力系数均会降低。其中,上游圆柱的升力系数在 3 种动量系数条件下 ($C_u=1, 2$ 和 4) 都几乎为 0,而水平合成射流对下游圆柱升力系数的抑制效果明显受到动量系数的影响,当 $C_u=2$ 时,其在所有间距比条件下对下游圆柱升力系数的抑制效果最佳。

2) 采用水平合成射流控制后,上、下游圆柱的平均阻力系数随着合成射流动量系数的增加而增大。当动量系数过大时(例如 $C_u=4$),会导致上、下游圆柱的阻力系数大于无合成射流控制情况下的值。

3) 采用水平合成射流控制后,随着动量系数增加,上游圆柱的尾迹逐渐趋于完全对称,而下游圆柱的尾部始终有旋涡交替脱落。并且采用动量系数足够大的合成射流控制能够使串联双圆柱的尾迹宽度降低。当 2 个圆柱的间距过小时,上游圆柱尾迹的扩展会被阻碍,并且会附着在下游圆柱表面,与下游圆柱表面的剪切层融合。

参考文献:

- [1] YU K R, HAY A, PELLETIER D, et al. Two degrees of freedom vortex-induced vibration responses with zero mass and damping at low Reynolds number[J]. Journal of Fluids and Structures, 2018, 83: 218-237.
- [2] KIM S, ALAM M M, MAITI D K. Wake and suppression of flow-induced vibration of a circular cylinder[J]. Ocean Engineering, 2018, 151: 298-307.
- [3] 张颖,许世林,王雪琴,等.不同管路元件流动声发射信号熵值量化分析方法[J].常州大学学报(自然科学版), 2021, 33(6): 79-86.
- [4] XU W H, JI C N, SUN H, et al. Flow-induced vibration of two elastically mounted tandem cylinders in cross-flow at subcritical Reynolds numbers[J]. Ocean Engineering, 2019, 173: 375-387.

- [5] DENG X, LUO Z B, XIA Z X, et al. Experimental investigation on the flow regime and impingement heat transfer of dual synthetic jet[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2019, 145: 105864.
- [6] SHARMA R N. Fluid dynamics-based analytical model for synthetic jet actuation[J]. *AIAA Journal*, 2007, 45(8): 1841-1847.
- [7] PENG X Y, QU Y, WANG J J. Numerical investigation on synthetic jet control for flow over two-dimensional square cylinder[J]. *Ocean Engineering*, 2021, 239: 109853.
- [8] 黄勇, 张玉雯, 王项链, 等. 甲苯磺化反应放热及其产物热安全性研究[J]. *常州大学学报(自然科学版)*, 2023, 35(1): 43-47.
- [9] GENG L B, HU Z Q, LIN Y. Thrust and flow characteristic of double synthetic jet actuator underwater[J]. *Ocean Engineering*, 2019, 176: 84-96.
- [10] FENG L H, WANG J J. Synthetic jet control of separation in the flow over a circular cylinder[J]. *Experiments in Fluids*, 2012, 53(2): 467-480.
- [11] WANG C L, TANG H, DUAN F, et al. Control of wakes and vortex-induced vibrations of a single circular cylinder using synthetic jets[J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2016, 60: 160-179.
- [12] WANG H B, DING L, ZHANG L, et al. Control of two-degree-of-freedom vortex-induced vibrations of a circular cylinder using a pair of synthetic jets at low Reynolds number: influence of position angle and momentum coefficient [J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2019, 80: 108490.
- [13] WANG H B, DING L, ZHANG L, et al. Control of two-degree-of-freedom vortex induced vibrations of a circular cylinder using synthetic Jets: effect of synthetic jet orientation angle and phase difference[J]. *Ocean Engineering*, 2020, 217: 107906.
- [14] WANG H B, DING L, ZHANG L, et al. Numerical study on two-degree-of-freedom vortex induced vibrations suppression of a circular cylinder via synthetic jets at different excitation frequencies[J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2020, 84: 108593.
- [15] WANG C L, TANG H, YU S C M, et al. Lock-on of vortex shedding to a pair of synthetic jets with phase difference[J]. *Physical Review Fluids*, 2017, 2(10): 104701.
- [16] ZHU H J, GAO Y. Hydrokinetic energy harvesting from flow-induced vibration of a circular cylinder with two symmetrical fin-shaped strips[J]. *Energy*, 2018, 165: 1259-1281.
- [17] MAHİR N, ALTAÇ Z. Numerical investigation of convective heat transfer in unsteady flow past two cylinders in tandem arrangements[J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2008, 29(5): 1309-1318.
- [18] HARIMI I, SAGHAFIAN M. Numerical simulation of fluid flow and forced convection heat transfer from tandem circular cylinders using overset grid method[J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2012, 28: 309-327.
- [19] 张东辉, 石珊, 王军, 等. 串联双圆柱绕流换热特性的数值研究[J]. *江苏科技大学学报(自然科学版)*, 2014, 28(6): 563-569.
- [20] 刘松, 符松. 串联双圆柱绕流问题的数值模拟[J]. *计算力学学报*, 2000, 17(3): 260-266.
- [21] BRAZA M, CHASSAING P, MINH H H. Numerical study and physical analysis of the pressure and velocity fields in the near wake of a circular cylinder[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1986, 165: 79.
- [22] 毕继红, 任洪鹏, 丁代伟, 等. 串联双圆柱静止绕流的二维数值仿真分析[J]. *工程力学*, 2012, 29(S1): 8-11, 19.
- [23] ZHAO M. Flow induced vibration of two rigidly coupled circular cylinders in tandem and side-by-side arrangements at a low Reynolds number of 150[J]. *Physics of Fluids*, 2013, 25(12): 123601.
- [24] ZHOU Y, ALAM M M. Wake of two interacting circular cylinders: a review[J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2016, 62: 510-537.