

合成射流对圆柱绕流流固耦合特性影响分析

丁林^{1,2}, 杨林^{1,2}, 王海博^{1,2}, 张力^{1,2}

(1. 重庆大学 低品位能源利用技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400030;
2. 重庆大学 能源与动力工程学院, 重庆 400030)

摘 要: 利用合成射流对钝体绕流流动特性及流致振动进行了主动控制数值研究。结果表明:随着合成射流动量系数的增加,对圆柱涡激振动的抑制效果越好。随着射流位置从后驻点移向前驻点,圆柱尾流涡脱模态呈现出柱体背流面附着对称涡的定常状态-过渡状态-反对称 2S 涡脱落模式的演变过程。圆柱双自由度振动轨迹为“8”字形,完全受到抑制时轨迹为“一”字型,部分抑制时其轨迹为“月牙形”,合成射流的引入可有效降低圆柱所受升力,能有效的抑制圆柱横向和流向振动,当合成射流对位于圆柱背风侧的 $1/4$ 弧边缘时,圆柱的流向振荡和横流振荡均可被抑制,其抑制效果最好。

关键词: 合成射流; 流固耦合; 旋涡脱落; 主动控制; 流致振动

中图分类号: V211.3; O358

文献标志码: A

Analysis of effect of synthetic jet on fluid-solid coupling characteristics around cylinder

DING Lin^{1,2}, YANG Lin^{1,2}, WANG Haibo^{1,2}, ZHANG Li^{1,2}

(1. Key Laboratory of Low-grade Energy Utilization Technologies and Systems of Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400030, China;
2. School of Energy and Power Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: The active control of the characteristics of flow around a bluff body and flow-induced vibration was numerically investigated by using the synthetic jet. Results showed that the vortex-induced vibration of the cylinder was well suppressed with the increase of the momentum coefficient of synthetic jet. As the jet position moved from the rear stagnation point to the front stagnation point, the vortex shedding mode of the cylinder wake showed the evolution of the steady state-transition state-antisymmetric 2S vortex shedding mode attached to the backflow surface of the cylinder. The two-degree-of-freedom vibration trajectory of the cylinder was in the shape of “8”, “one” in the case of complete suppression, and “crescent” in the case of partial suppression. The introduction of synthetic jet can effectively reduce the lift force on the cylinder. When the synthetic jet was located at the edge of $1/4$ arc on the leeward side of the cylinder, the in-flow oscillation and cross-flow oscillation of the cylinder can be suppressed with the best suppression effect.

收稿日期: 2019-06-06

基金项目: 国家自然科学基金(51776021)

作者简介: 丁林(1985—),男,副教授、博士生导师,博士,研究方向为流固耦合、流体诱发振动、可再生能源利用等。

E-mail: linding@cqu.edu.cn

引用格式: 丁林,杨林,王海博,等. 合成射流对圆柱绕流流固耦合特性影响分析[J]. 航空动力学报, 2019, 34(12): 2529-2538. DING Lin, YANG Lin, WANG Haibo, et al. Analysis of effect of synthetic jet on fluid-solid coupling characteristics around cylinder[J]. Journal of Aerospace Power, 2019, 34(12): 2529-2538.

Key words: synthetic jet; fluid-solid coupling; vortex shedding; active control; flow-induced vibration

钝体是工程实际中常见的一种非流线型结构。钝体绕流的旋涡脱落会在结构表面形成周期性脉动作用力,导致疲劳破坏,特别当钝体尾涡脱落频率接近结构体的自然频率时,结构受到的破坏更加严重,这种现象即涡激振动(VIV)^[1]。许多工程领域都能观察到涡激振动现象的存在,如深海工程的海洋立管、海洋钻井平台、换热器和城市高层建筑等。因此对结构体旋涡脱落的控制和进一步抑制流致振动具有广泛的应用背景和重要的学术价值。涡激振动的控制方法受到了很多学者的关注,其控制方法大致可以分为主动控制技术和被动控制技术^[2-3]。被动控制技术主要通过添加附加装置或改变结构形状进而抑制旋涡的脱落与形成。主动控制技术则是通过外部激励来改变流场特性。总的来说,两种控制技术对流动实施控制时,会达到延迟分离、提高升力、降低阻力、增加湍流强度以及抑制噪声等作用。

被动控制中改变结构表面形状的常见方法有:圆柱表面添加粗糙带^[4-5]、分隔板^[6-7]、控制杆^[8-9]等。被动控制由于是通过改变系统整体结构,因此其应用范围很局限,无法按需进行控制。主动控制通过在流场中施加一小部分可调的能量,其效果更加有效,应用范围也更广。

主动控制中常见的方法有:施加旋转^[10-11]、合成射流^[12]等。合成射流作为一种有效的主动控制方法,在流动控制领域已经得到广泛应用,包括对流动分离控制^[13-14]、混合控制^[15-16]和湍流控制^[17]。合成射流是流体边界上的压力和速度的周期性振荡而产生的,该边界没有净质量流量^[18],具有无气源、无铰接、结构微型化、响应频带宽和控制效果好等优点。

利用合成射流进行流动控制的一个重要方面是对钝体边界层分离的控制,在现有研究中,Feng等^[19]实验研究了单一的合成射流对圆柱尾迹和减阻的影响。Feng等^[20]研究了当合成射流位于圆柱体的后端或前端停滞点时,单个合成射流对尾迹形态的影响。Béra等^[21]和Feng等^[22]实验发现合成射流能够有效推迟圆柱边界层分离,使圆柱后缘分离区减小甚至完全消失,达到减阻目的。当合成射流开口位于圆柱分离点上游附近时,Williams等^[23]发现合成射流能抑制大尺度卡门涡形成,改变近尾流区旋涡演变规律。马力

群和冯立好^[24]将合成射流放置于圆柱前后驻点,实验研究了圆柱旋涡脱落模式。结果表明,合成射流能够改变圆柱尾迹涡的脱落模式,当激励频率变化时,尾涡呈现反对称-对称与反对称过渡-对称的变化规律。Qu等^[25]实验研究了位于后表面的合成射流对方柱尾涡演化的影响。结果表明,在激励频率较高的情况下,尾迹涡脱落是对称的,涡旋脱落频率与合成射流的激励频率是一致的。Gao等^[26]实验发现合成射流对半圆柱近尾流区域大尺度旋涡结构产生明显影响,出现了对称或不对称尾涡模态。Wang等^[27]数值研究了一对合成射流的3个关键参数(动量系数、激励频率和位置)对抑制层流(雷诺数 $Re=100$)中固定圆柱的涡脱落和圆柱的单自由度VIV的影响。

可以看到目前利用合成射流进行控制的研究主要集中在绕流和单自由度振动,同时合成射流也主要为单口引入。关于低雷诺数下、多口射流时的射流引入位置和射流动量系数对柱体流固耦合性能的影响研究较少。对此本文将采用数值方法研究射流喷口位置及射流强度对圆柱绕流流固耦合特性及近尾流旋涡模态的影响,在绕流的基础上,分析合成射流对双自由度振幅响应和轨迹形态的影响,并针对不同工程控制要求提出了相应的优化措施,其结果表明以层流为基础的研究结果也能为合成射流主动控制方法提供一定理论指导。

1 数学物理模型

1.1 物理模型

本文研究了雷诺数 $Re=150$ 下,合成射流对圆柱双自由度涡激振动的影响,圆柱处于均匀来流中,来流速度为 U ,其对应的无量纲化速度为 $U^*=5[U^*=U/(f_{n,water}D)]$ 。圆柱简化为一个无弹性、不耗能的刚体,直径为 D ,质量比($m^*=m/m_d$), m 是圆柱质量, m_d 是圆柱排开流体质量。横向和流向使用弹簧弹性连接,模型中简化为一个无质量具有线性弹性的弹性元件,其刚度为 K_1 、 K_2 。圆柱所受阻尼简化为一个无质量无弹性、具有线性阻尼系数的元件 C_1 、 C_2 ,如图1所示,圆柱可以沿 x 、 y 方向振动,其控制方程为

$$m\ddot{x} + C_1\dot{x} + K_1x = F_{fluid,x(t)} \quad (1)$$

$$m\ddot{y} + C_2\dot{y} + K_2y = F_{fluid,y(t)} \quad (2)$$

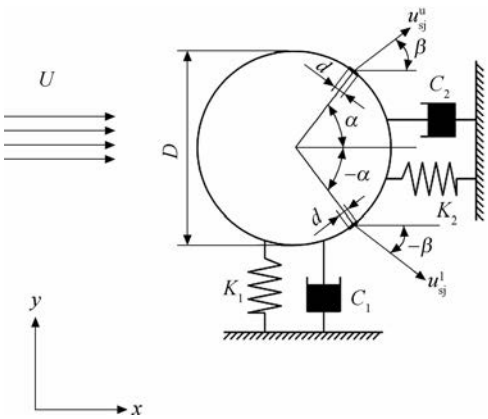


图 1 具有合成射流的圆柱物理模型图
Fig.1 Cylinder physical model with synthetic jet

其中 x 、 y 分别是圆柱沿流向和横向方向的位移, $F_{\text{fluid},x}(t)$ 、 $F_{\text{fluid},y}(t)$ 分别为圆柱在 x 、 y 方向所受的流体力,其总的流体力通过圆柱所受压力和黏性力沿圆柱表面积分而得到。

圆柱的振动是通过合成射流对进行控制的,圆柱表面开口沿流向对称设置合成射流对,如图 1 所示黑色短线,合成射流对具有相同的频率和速度幅值,合成射流对速度可表示为下式:

$$\begin{aligned} u_{\text{sj}}^u &= U_{\text{peak}} \sin(2\pi f_{\text{sj}} t + \varphi_u) (\cos \beta, \sin \beta) \quad (3) \\ u_{\text{sj}}^l &= U_{\text{peak}} \sin(2\pi f_{\text{sj}} t + \varphi_l) (\cos(-\beta), \sin(-\beta)) \quad (4) \end{aligned}$$

其中 β 是合成射流出射方向角,本文射流的出射方向为水平方向(即 $\beta=0$)。 φ_u 和 φ_l 分别是上下合成射流的相位,两合成射流对的相位差可以表示为

$$\Delta\varphi = \varphi_u - \varphi_l \quad (5)$$

本文中合成射流的 $\Delta\varphi$ 为零。合成射流的无量纲化频率 f_{sj}^* 为

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

其中 $f_{\text{n},\text{water}}$ 为圆柱在水中的自然频率

$$f_{\text{n},\text{water}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{m + m_a}} \quad (7)$$

其中 m_a 为附加质量。本文中无量纲化频率 f_{sj}^* 取 5.0。

合成射流的射流强度用无量纲化参数 C_μ 表示

$$C_\mu = \frac{2U_{\text{peak}}^2 d}{U^2 D} \quad (8)$$

其中 d 为射流宽度(即图 1 黑色短线在 xy 平面的宽度),本文取 $d=\pi D/72$ 。

本文研究主要集中分析两个参数的影响,动量系数 C_μ 和合成射流角度 α ,其中绕流部分动量

系数本文取 1、2、3 和 4 四个值,合成射流角度取 $0^\circ \sim 180^\circ$,以 30° 为间隔进行研究。双自由度振动部分动量系数取 1、2 和 4 三个值。合成射流角度取 $0^\circ \sim 75^\circ$,以 15° 为间隔进行研究。其他模型参数如表 1 所示。

表 1 物理模型详细参数
Table 1 Detailed parameters of the physical model

参数	数值
圆柱直径 D/m	0.01
圆柱质量 $m_{\text{osc}}/(\text{kg}/\text{m})$	0.1568
弹性系数 $K_1, K_2/(\text{N}/\text{m})$	0.8786, 0.8786
系统阻尼 C_1, C_2	0, 0
圆柱自然频率 $f_{\text{n},\text{water}}/\text{Hz}$	0.3076
合成射流无量纲化频率 f_{sj}^*	5.0
水的黏度 $\nu_{\text{water}}/10^{-6}(\text{m}^2/\text{s})$	1.0048
水的密度 $\rho_{\text{water}}/(\text{kg}/\text{m}^3)$	998.2

1.2 数学模型

1.2.1 控制方程

本文研究对象为二维不可压缩层流流动。在直角坐标系下,其运动规律可用 N-S(Navier-Stokes)方程来描述,连续性方程和动量方程分别为

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (u_i u_j) = \\ - \frac{1}{\rho_{\text{water}}} \cdot \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu_{\text{water}} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \end{aligned} \quad (10)$$

其中 u_i 为速度分量; p 为压力。

1.2.2 相关参数

本文涉及的相关参数主要有升力系数 C_l 和阻力系数 C_d ,下面给出各个参数的计算公式和物理意义。

阻力系数和升力系数是表征柱体阻力、升力的无量纲参数。定义为

$$C_d = \frac{2F_d}{\rho U_\infty^2 D} \quad (11)$$

$$C_l = \frac{2F_l}{\rho U_\infty^2 D} \quad (12)$$

式中 F_d 和 F_l 为柱体所受阻力和升力。

1.2.3 数值求解

本文计算区域尺寸为 $32D \times 26D$,柱体位于

流场中的位置,如图 2 所示。入口边界 Inflow 距离柱体中心 $11D$, 设定为均匀流速, 出口 Outflow 距离柱体 $21D$, 设定为压力出口。由于上下侧面 (Top 和 Bottom) 与柱体距离较大, 假设不受柱体影响, 采用与入口边界相同的条件。柱体壁面采用无滑移壁面边界条件。本文计算区域整体采用结构化网格, 近壁面区域进行网格加密。为了解本文得出的数值解受网格疏密程度的影响, 分别选取疏密不同的 3 种网格进行绕流计算。表 2 所示为 $Re=150$ 时的圆柱绕流网格无关性验证结果, 将计算得到的 x 方向振幅 A_x (超过 60 个周期最大振幅的平均值)、 y 方向振幅 A_y (超过 60 个周期最大振幅的平均值)、阻力系数 C_d 、升力系数 C_l 进行对比, 本文计算结果 3 种网格得出的结果相近 (相对误差小于 5%), 可以认为计算结果与网格密度无关, 因此, 本文最终计算采用中等网格。合成射流角度为 60° 的计算区域整体网格 (图 3(a)) 和近壁面网格见图 3(b)。在前面的工作^[28-30], 已对本求解器进行了验证, 计算结果与其他学者的结果趋势基本符合。

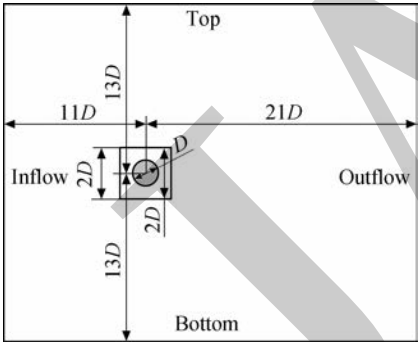


图 2 计算区域及边界条件

Fig. 2 Computational region and boundary conditions

表 2 $Re=150$ 时圆柱网格无关性验证

Table 2 Verification of cylindrical mesh independence at $Re=150$

参数	网格 1	网格 2	网格 3
网格数/ 10^4	14.87+0.72	23.41+1.44	37.09+2.56
$(A_x/D)/10^{-2}$	3.34	3.26(2.4)	3.30(1.2)
$(A_y/D)/10^{-1}$	6.17	6.10(1.1)	6.12(0.3)
C_d	2.49	2.49(0)	2.48(0.4)
$C_{l,rms}$	0.896	0.854(4.7)	0.885(3.6)

注: 表中网格数为背景网格数+嵌套网格数; 括号中表示相对误差, 单位为%。

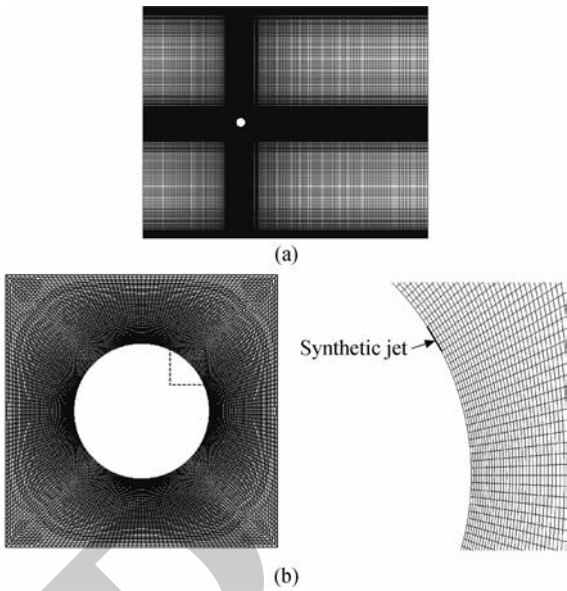


图 3 合成射流角度为 60° 时圆柱整体网格及近壁面网格示意图

Fig. 3 Schematic diagram of cylindrical integral grid and near-wall grid when synthetic jet angle is 60°

2 结果与讨论

本文针对不同合成射流动量系数和引入位置, 首先对圆柱绕流问题进行数值分析, 接着在绕流问题的基础上, 对圆柱双自由度的振幅和轨迹进行数值计算分析。运用有限体积法, 研究了 $Re=150$ 时柱体受力、旋涡脱落、振幅响应和轨迹的情况。详细分析了在不同动量系数和角度下射流对柱体的升阻力系数、柱体旋涡脱落和振幅响应的影

2.1 绕流柱体受力分析

图 4 所示为合成射流角度为 30° 、 90° 和 150° 时柱体升阻力系数随时间变化的曲线。从图中可以明显看到, 30° 时各个动量系数下的升阻力系数几乎不随时间产生振荡, 0° 和 60° 工况也与 30° 的情况类似。随着合成射流角度的增加, 从图 4 中可以看到此时升力系数开始随着时间产生振荡, 并且随着角度的增加, 振荡逐渐增强。

图 5 所示为不同合成射流角度的柱体方均根升力系数 ($C_{l,rms}$) 随动量系数 (C_μ) 变化的规律, 图 6 所示为升力系数随不同合成射流角度变化的曲线, 从图中可以看出在柱体引入合成射流后, 柱体的升力系数都明显低于光滑圆柱的升力系数, 在合成射流角度为 0° 、 30° 和 60° 时柱体的升力系数几乎为零, 说明该角度范围作为合成射流引入位置时, 合成射流能有效削弱柱体所受升力。但值

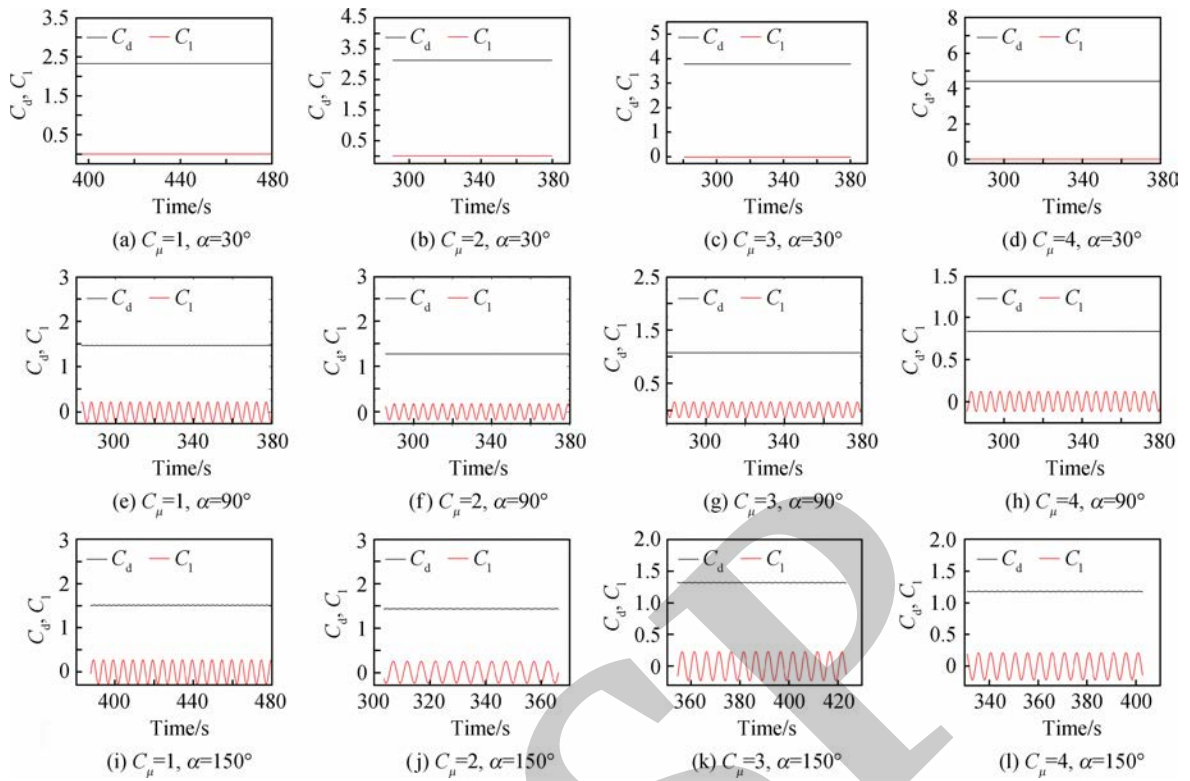


图 4 柱体升力系数、阻力系数随时间变化

Fig. 4 Time histories of lift coefficient and drag coefficient for circular cylinder

得注意的是,此时动量系数的变化对柱体升力系数并无明显影响。由此可见,该角度范围($0^{\circ}\sim 60^{\circ}$)内合成射流的引入位置对柱体升力的影响起主导作用。在 $\alpha=90^{\circ},150^{\circ}$ 时,随着动量系数的增加,柱体升力系数整体趋势逐渐减小。当 α 为 120° 时,升力系数在动量系数 $C_{\mu}=2$ 时出现小幅上升。当合成射流口位于前驻点($\alpha=180^{\circ}$)时,升力系数随合成射流强度增加而降低,但升力系数均高于其他合成射流位置时,如图 5 所示。由此可见,虽然,在合成射流位置位于背风面时,动量系数的变化不会对升力造成明显影响,但是,当合成射流口位于迎风面时,柱体所受升力相比背风面时有所增加,且随着动量系数增大而降低。另外,图 6 直观展示了升力系数随合成射流角度的变化趋势,在角度小于 60° 时,升力系数几乎不随角度发生变化。当 $\alpha>60^{\circ}$ 时,升力增大,升力系数随角度的增加而增加。

图 7 所示为不同合成射流角度时柱体阻力方均根系数($C_{d,rms}$)随动量系数的变化规律。柱体引入合成射流后,合成射流动量系数的大小对阻力系数的有很大影响,柱体的阻力系数在 $0^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 都明显高于光滑圆柱的阻力系数,且阻力系数随着动量系数单调递增。但在 $\alpha>90^{\circ}$ 后,其阻力系数低于光滑圆柱的阻力系数,说明引入合成射流

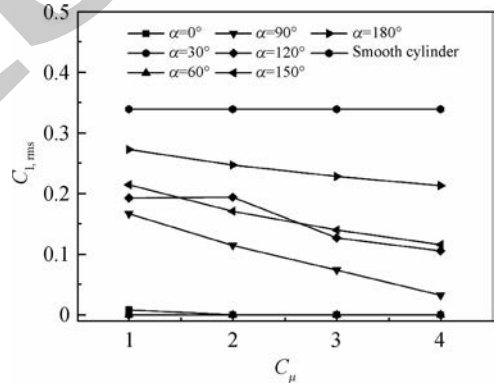


图 5 不同合成射流角度升力系数随动量系数变化曲线

Fig. 5 Variation of lift coefficient with momentum coefficient at different synthetic jet angles

可以用来实施柱体阻力的控制。另外,随着动量系数的增加,阻力系数单调减小。可见,动量系数在两个角度范围内对阻力的影响呈现两种不同的趋势,位于小角度范围时能增大阻力,而在大角度范围会降低阻力。图 8 所示为阻力系数随不同合成射流角度变化的曲线,在不同合成射流动量系数时,阻力系数均在 30° 时达到最大值, 150° 时达到最低值。由此可以发现利用合成射流控制圆柱绕流的阻力控制存在一个最佳的合成射流引入角度。

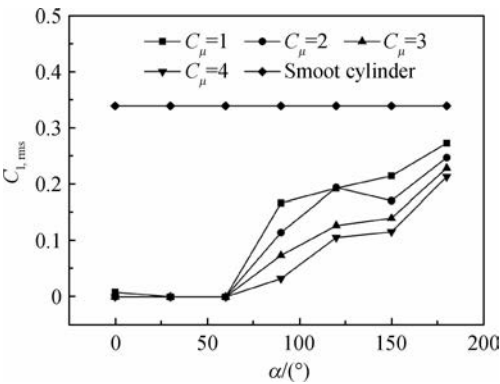


图 6 具有不同动量系数的柱体合成射流的升力系数随角度变化曲线

Fig. 6 Variation of lift coefficient of cylinder synthetic jet with different momentum coefficients varies with the angle

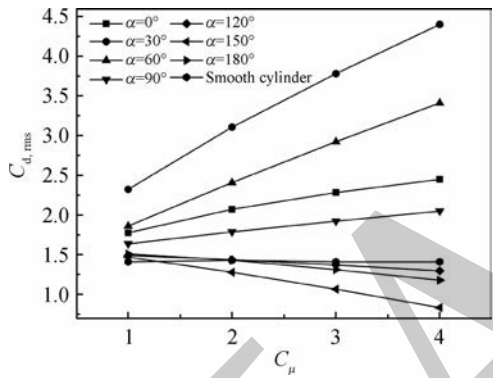


图 7 不同合成射流角度 α 阻力系数随动量系数变化曲线

Fig. 7 Variation of drag coefficient with momentum coefficient at different synthetic jet angles

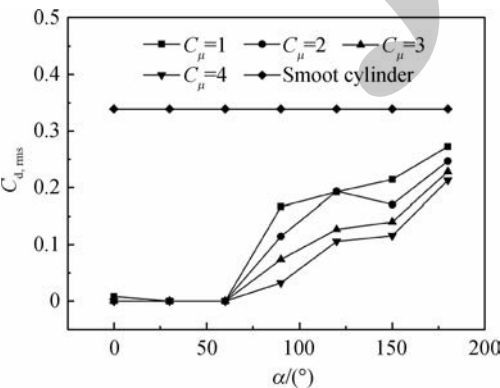


图 8 具有不同动量系数的柱体合成射流的阻力系数随角度变化曲线

Fig. 8 Variation of drag coefficient of cylinder synthetic jet with different momentum coefficients varies with the angle

2.2 绕流柱体旋涡脱落

图 9 所示为不同合成射流角度和动量系数时的柱体尾流旋涡形态。可以看到 0° 、 30° 和 60° 的旋涡形态极其相似,在动量系数很小的情况下,合成射流的尾迹包围在圆柱的尾迹之中,圆柱两侧的尾涡呈现对称的状态,在小角度下圆柱的尾涡为狭长的剪切层。随着动量系数的增加,圆柱的尾迹变为较短的剪切层,而合成射流的尾迹变得更加狭长,这也是合成射流位于 0° 、 30° 和 60° 时圆柱升力系数几乎为零的原因。图 9 中体现出这 3 个角度下柱体并无旋涡脱落,都为剪切层的状态,由此造成了这 3 个角度下阻力系数相对增大。随着动量系数的增加,阻力系数增加,升力系数几乎为零,旋涡抑制效果逐渐变好。

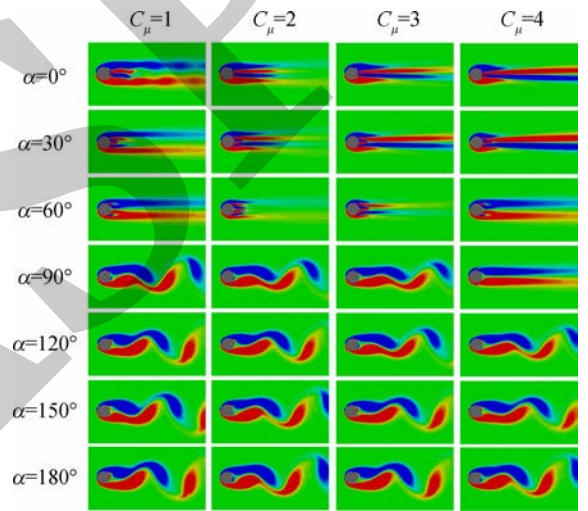


图 9 不同合成射流角度和动量系数的圆柱尾迹旋涡
Fig. 9 Cylinder wake vortices with different synthetic jet angles and momentum coefficients

$\alpha=90^\circ, 120^\circ, 150^\circ, 180^\circ$ 时圆柱尾流具有相似的旋涡形态,旋涡形态为典型的 2S 模式。因为存在旋涡脱落,相比 $0^\circ \sim 60^\circ$ 时,升力系数出现陡增(见图 5)。随着动量系数的增加,旋涡脱落频率明显减小,导致升阻力系数减小。在相同动量系数的情况下,随着角度的增加,圆柱和合成射流的尾迹从分离的剪切层发展成合并的剪切层。随着角度的进一步增加,合并的圆柱和合成射流的尾迹开始产生旋涡脱落,并随着角度的增加旋涡脱落频率减小,造成图 5 和图 7 中所示的升阻力系数变化趋势。

2.3 柱体振动响应

基于圆柱绕流的结果,可以分析得出:合成射

流角度在 $0^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 的范围内,圆柱的旋涡脱落和升力明显受到抑制且抑制效果明显优于其他工况,而圆柱的大幅振动为横向振动,升力的大小直接影响横向振幅的大小。为进一步研究合成射流对圆柱双自由度振动的影响,考虑圆柱绕流的结果,选取了 $0^{\circ}\sim 75^{\circ}$,动量系数为 1、2、4 的 18 组工况进行数值计算分析。

如图 10 所示为动量系数为 1、2、4 的流向振幅和横向振幅随合成射流角度的变化曲线。虚线上方为横向振幅响应,下方为流向振幅响应。动量系数为 0 的曲线也就是没有合成射流的光滑圆柱的振幅响应。当合成射流位于 $0^{\circ}\leq\alpha\leq 75^{\circ}$ 范围内时,除 $C_{\mu}=1$ 时 $\alpha=0^{\circ},15^{\circ}$ 外,由合成射流控制圆柱的流向和横向振幅均低于光滑圆柱。此外,随着动量系数 C_{μ} 的增大,在 $0^{\circ}<\alpha<75^{\circ}$ 范围内,受合成射流控制的圆柱的流向和横向振幅变小。对比横向振幅和流向振幅可以发现,横向振幅最大比流向振幅高出一个数量级,合成射流的引入对横向振幅影响也更大。因此,对圆柱的振动控制优化也应集中于横向振动。

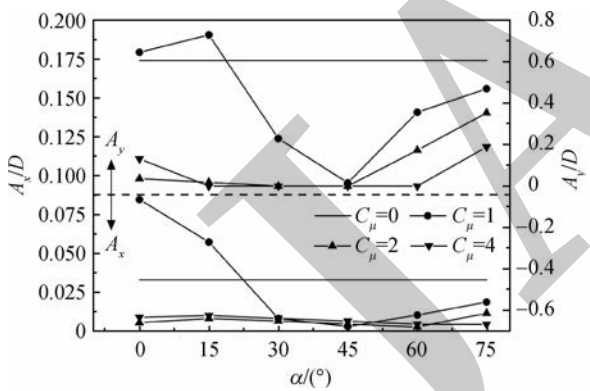


图 10 不同合成射流角度和动量系数的圆柱振幅响应
Fig. 10 Amplitude response of cylinder with different synthetic jet angles and momentum coefficients

一般情况下,施加合成射流的圆柱的横向振幅和流向振幅均低于光滑圆柱振幅。显然,合成射流位置角存在一个角度范围,在这个范围内圆柱的横向和流向振荡完全被抑制。这一角度范围随着动量系数 C_{μ} 的增大而增大。例如,当 $C_{\mu}=1$ 时,只有当 $\alpha=45^{\circ}$ 时,圆柱的横向和流向振荡完全被抑制。当 C_{μ} 增加到 4 时,在 15° 和 60° 的位置角范围内,柱体的横向流动振荡得到抑制。结合图中振幅响应,为了有效地抑制圆柱的双自由度 VIV,合成射流应位于圆柱背风侧的 $1/4$ 弧边缘,动量系数 C_{μ} 应足够高。

2.4 柱体升阻力系数

图 11 给出了双自由度振动圆柱的升阻力系数与合成射流角度之间的关系。虚线上方为阻力系数响应,下方为升力系数响应。动量系数为零的直线也就是没有合成射流的光滑圆柱的振幅响应。在 $0^{\circ}\sim 75^{\circ}$ 的位置角范围内,当合成射流抑制圆柱横流和流向振荡时,升阻力系数的方均根值小于光滑圆柱的方均根值。特别是当横向振荡被完全抑制时,升力系数的方均根值接近于零。这意味着合成射流可以有效地降低 VIV 响应和阻力系数。这也很好验证前面的结论:为了有效地抑制圆柱的双自由度 VIV,合成射流应位于圆柱背风侧的 $1/4$ 弧边缘。对比升阻力系数的曲线可以发现,随着动量系数的增加,排除个别点,升力系数的整体趋势是减小的,而阻力系数却是增加的。这意味着,圆柱的振动受到抑制是以增加阻力为代价的,但是相比于光滑圆柱合成射流的引入是能明显减小圆柱所受阻力。

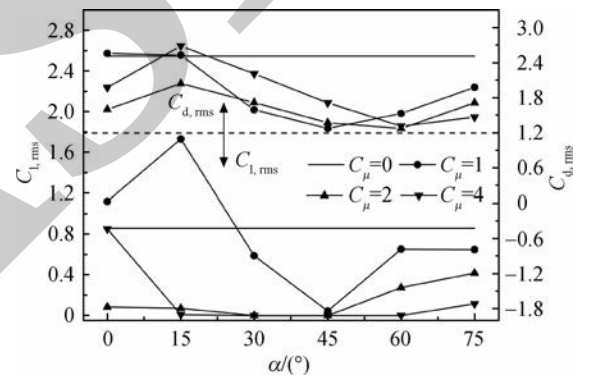


图 11 不同合成射流角和动量系数的圆柱升力系数、阻力系数
Fig. 11 Lift coefficient and drag coefficient of a cylinder with different synthetic jet angles and momentum coefficients

2.5 柱体运动轨迹

光滑圆柱 VIV 的周期轨迹类似于“8”形,振荡是自限的。这是因为阻力波动中的域频率是升力中域频率的 2 倍^[31]。“8”形是单个圆柱的双自由度 VIV 的典型形状,在 Yang 等^[32]、Étienne 和 Pelletier^[33]、Han 等^[34] 的文献中都观察到此现象。

在图 12 中示出了在 $\alpha=30^{\circ},60^{\circ}$ 的位置角度范围内由合成射流控制的圆柱体的振动轨迹。图中给出双自由度圆柱轨迹的变化过程,其他角度完全抑制、部分抑制的情况与图中类似。显然,合流射流抑制了流向振荡和横向振荡。当完全抑制

圆柱的横流振荡时,振荡轨迹为“1”形。例如,当 $C_\mu=4$ 时,在 30° 和 60° 的位置角度范围内仅能识别出流动中的振动,并且振荡轨迹是“一”形状,如果没有完全抑制圆柱的横流振荡,例如 $C_\mu=1$, $\alpha=30^\circ$ 的情况,则振荡轨迹类似于“月牙形”。

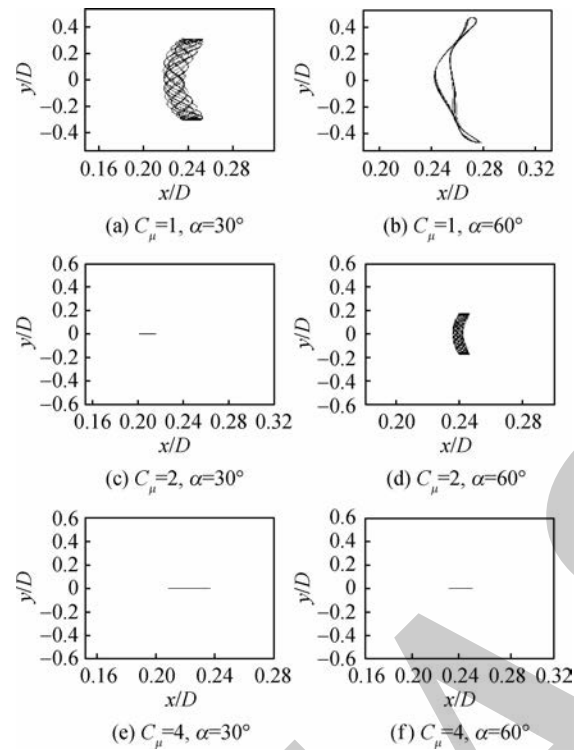


图 12 合成射流控制圆柱的振荡轨迹
Fig. 12 Oscillation trajectories of the circular cylinder controlled by synthetic jets

2.6 柱体运动尾流旋涡图

图 13 为合成射流控制的圆柱涡激振动尾迹旋涡图,图中给出了合成射流控制的柱体(选取的 $\alpha=30^\circ, 60^\circ$; 动量系数为 1、2 和 4)和光滑圆柱的旋涡脱落情况。光滑圆柱的旋涡模态为典型的“2S”模态,即一个周期内交替脱落了 2 个孤立的旋涡,两剪切层相互作用强,旋涡脱落频率较大,不对称性大,这也就使得旋涡在脱落时会对柱体施加不对称的涡脱力,从而使得柱体振动较大。当引入合成射流后,可以发现柱体的剪切层明显被拉长,两剪切层的相互作用减弱,从而削弱了旋涡的脱落,此时柱体所受到的脉动力明显低于光滑圆柱(如图 11 所示),也就使其振幅响应降低(如图 10 所示)。同时从图中可以看到,随着动量系数的增加,两剪切层的相互作用减弱(在 $C_\mu=4, \alpha=60^\circ$ 时两剪切层都没有相互作用了),涡流形成长度逐渐增加,旋涡脱落频率减小。不同射流

引入角度会改变边界层的分离点,从而影响两剪切层的相互作用。

综上,可以发现在引入合成射流后,柱体的边界层分离延迟,两剪切层的相互作用减弱。随着动量系数的增加,分离点向后驻点移动,柱体的涡流长度变长,旋涡脱落频率降低,使得柱体受的脉动力减小,从而抑制了柱体的振动。

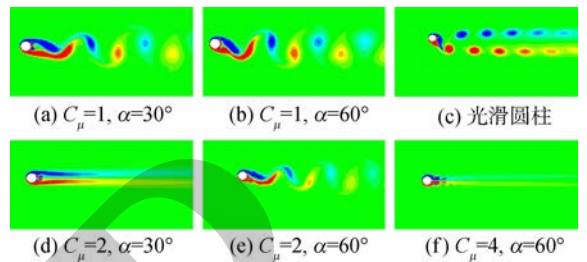


图 13 合成射流控制的圆柱尾迹旋涡图
Fig. 13 Vorticity contours of the circular cylinder controlled by synthetic jets

3 结 论

本文针对不同合成射流动量系数和引入位置,采用数值方法研究了圆柱绕流固耦合特性、近尾流旋涡模态及双自由度涡激振动的影响。详细分析了不同合成射流喷嘴位置及合成射流强度时柱体的升阻力系数,探讨了各种因素对柱体旋涡脱落的影响。得出了以下结论:

- 1) 引入合成射流可以有效降低绕流柱体所受升力,还能对柱体的阻力进行有效控制,并且对旋涡的脱落有良好的抑制效果。
- 2) 合成射流引入位置靠近后驻点和分离点时,旋涡脱落抑制效果最好,升力系数几乎为 0,但此时柱体阻力却受到较大影响,相比光滑圆柱阻力增大。合射流引入位置在远离分离点的位置时,升力系数随角度的增加而增大;阻力系数则随角度的增加先降低,低于光滑圆柱阻力系数后开始出现上升。
- 3) 射流的动量系数对 $0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ 时柱体的升力系数影响很小,在角度超过 60° 后,升力系数随着动量系数的增加而逐渐减小,而阻力系数在不同射流引入角度随动量系数的增加呈现不同的变化趋势。
- 4) 当合成射流位于圆柱背风侧的 $1/4$ 弧边缘时,圆柱的流向振荡和横流振荡均可被抑制,对于所研究的动量系数,当合成射流角度为 45° 时,圆柱的双自由度 VIV 均被完全抑制。合成射流

不仅可以抑制圆柱体的双自由度自由度 VIV,而且可以降低阻力系数。当横流振荡被完全抑制时,升力系数的方均根值接近于零。

5) 当圆柱的横流振荡被完全抑制时,只有流向方向有位移,振荡轨迹为“一”形。当圆柱的横流振荡没有被完全抑制时,可以观察到类似“月牙形”的振荡轨迹。

参考文献:

[1] WILLIAMSON C H K A, GOVARDHAN R. Vortex-induced vibrations[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2004, 36(1): 413-455.

[2] CHOI H, JEON W P, KIM J. Control of flow over a bluff body[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2007, 40(1): 113-139.

[3] RASHIDI S, HAYATDAVOODI M, ESFAHANI J A. Vortex shedding suppression and wake control: a review [J]. Ocean Engineering, 2016, 126(11): 57-80.

[4] XU W, JI C, SUN H, et al. Flow-induced vibration (FIV) and hydrokinetic power conversion of two staggered, low mass-ratio cylinders, with passive turbulence control in the TRSL3 flow regime ($2.5 \times 10^4 < Re < 2 \times 10^5$) [C] // Proceedings of the ASME 36th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. Trondheim, Norway: ASME, 2017: 25-30.

[5] DING L, ZHANG L, WU C M, et al. Numerical study on the effect of tandem spacing on flow-induced motions of two cylinders with passive turbulence control[J]. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 2017, 139(2): 021801-021807.

[6] OZKAN G M, FIRAT E, AKILLI H. Passive flow control in the near wake of a circular cylinder using attached permeable and inclined short plates[J]. Ocean Engineering, 2017, 134(4): 35-49.

[7] LIANG S, WANG J, XU B, et al. Vortex-induced vibration and structure instability for a circular cylinder with flexible splitter plates[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2018, 174(3): 200-209.

[8] SONG Z H, DUAN M L, GU J J. Numerical investigation on the suppression of VIV for a circular cylinder by three small control rods[J]. Applied Ocean Research, 2017, 64(3): 169-183.

[9] WANG J L, ZHOU S X, ZHANG Z, et al. High-performance piezoelectric wind energy harvester with Y-shaped attachments[J]. Energy Conversion and Management, 2019, 181(2): 645-652.

[10] VICENTE-LUDLAM D, BARRERO-GIL A, VELAZQUEZ A. Flow-induced vibration control of a circular cylinder using rotational oscillation feedback[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2018, 847(5): 93-118.

[11] HASHEMINEJAD S M, RABIEE A H, BAHRAMI H R T. Active closed-loop vortex-induced vibration control of

an elastically mounted circular cylinder at low Reynolds number using feedback rotary oscillations[J]. Acta Mechanica, 2018, 229(1): 231-250.

[12] 郝礼书, 乔志德, 宋文萍. 翼型分离流动主动控制实验[J]. 航空动力学报, 2009, 24(8): 1759-1765.

HAO Lishu, QIAO Zhide, SONG Wenping. Experimental research on active control of separation flow over airfoil [J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24(8): 1759-1765. (in Chinese)

[13] TANG H, SALUNKHE P, ZHENG Y, et al. On the use of synthetic jet actuator arrays for active flow separation control[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2014, 57(9): 1-10.

[14] WANG J J, FENG L H, CHAOJUN X U. Experimental investigations on separation control and flow structure around a circular cylinder with synthetic jet[J]. Science in China, 2007, 50(5): 550-559.

[15] PAVLOVA A A, KIYOSHI O, MICHAEL A. Active control of sprays using a single synthetic jet actuator[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2008, 29(1): 131-148.

[16] PAVLOVA A, OTANI K, AMITAY M. Active flow control of sprays with synthetic jets[R]. Reno, Nevada: the 45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 2013.

[17] BRIDGES A, SMITH D R. Influence of orifice orientation on a synthetic jet-boundary-layer interaction[J]. AIAA Journal, 2015, 41(12): 2394-2402.

[18] FEERO M A, LAVOIE P, SULLIVAN P E. Influence of cavity shape on synthetic jet performance[J]. Sensors and Actuators: A Physical, 2015, 223(3): 1-10.

[19] FENG L H, JIN J W. Circular cylinder vortex-synchronization control with a synthetic jet positioned at the rear stagnation point[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2010, 662(7): 232-259.

[20] 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.

[21] BÉRA J C, MICHARD M, SUNYACH M, et al. Changing lift and drag by jet oscillation: experiments on a circular cylinder with turbulent separation[J]. European Journal of Mechanics, 2000, 19(5): 575-595.

[22] FENG L H, WANG J J. Modification of a circular cylinder wake with synthetic jet: vortex shedding modes and mechanism[J]. European Journal of Mechanics, 2014, 43(2): 14-32.

[23] WILLIAMS D R, MANSY H, AMATO C. The response and symmetry properties of a cylinder wake subjected to localized surface excitation[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1992, 234(4): 71-96.

[24] 马力群, 冯立好. 放置于驻点的合成射流控制圆柱涡脱落模式的实验研究[J]. 中国科学-技术科学, 2013, 43(2): 208-219.

MA Liqun, FENG Lihao. Experimental study on vortex shedding mode controlled by synthetic jet placed at stationary point[J]. Scientia Sinica Technologica, 2013, 43(2):208-219. (in Chinese)

[25] QU Y, WANG J J, SUN M, et al. Wake vortex evolution of square cylinder with a slot synthetic jet positioned at the rear surface[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2017, 812(5): 940-965.

[26] GAO N, LI Y Q, BAI H L, et al. Effects of synthetic jets on a D-shaped cylinder wake at a subcritical reynolds number[J]. Flow Turbulence and Combustion, 2016, 97(3): 729-742.

[27] WANG C, TANG H, YU S C M, et al. Control of vortex-induced vibration using a pair of synthetic jets; influence of active lock-on[J]. Physics of Fluids, 2017, 29(8): 083602. 1-083602. 6.

[28] DING L, ZOU Q, ZHANG L, et al. Research on flow-induced vibration and energy harvesting of three circular cylinders with roughness strips in tandem[J]. Energies, 2018, 11(11): 2977-2987.

[29] DING L, ZHANG L, BERNITSAS M M, et al. Numerical simulation and experimental validation for energy harvesting of single-cylinder VIVACE converter with passive turbulence control[J]. Renewable Energy, 2016, 85(1): 1246-1259.

[30] DING L, ZHANG L, WU C, et al. Flow induced motion and energy harvesting of bluff bodies with different cross sections[J]. Energy Conversion and Management, 2015, 91(2): 416-426.

[31] 康庄, 贾鲁生. 圆柱体双自由度涡激振动轨迹的模型试验[J]. 力学学报, 2012, 44(6): 970-980.

KANG Zhuang, JIA Lusheng. Model test of vortex-induced vibration trajectory of a cylinder with two degrees of freedom[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2012, 44(6): 970-980. (in Chinese)

[32] YANG J, PREIDIKMAN S, BALARASE E. A strongly coupled, embedded-boundary method for fluid-structure interactions of elastically mounted rigid bodies[J]. Journal of Fluids and Structures, 2008, 24(2): 167-182.

[33] ÉTIENNE S, PELLETIER D. The low Reynolds number limit of vortex-induced vibrations[J]. Journal of Fluids and Structures, 2012, 31(5): 18-29.

[34] HAN X, LIN W, ZHANG X, et al. Two degree of freedom flow-induced vibration of cylindrical structures in marine environments; frequency ratio effects[J]. Journal of Marine Science and Technology, 2016, 21(3): 479-492.

(编辑:王碧琚)