旋转圆柱尾流中柔性丝线的拍动模式研究

胡浪超, 刘难生*, 丁航, 陆夕云

中国科学技术大学近代力学系, 合肥 230027

*联系人, E-mail: lns@ustc.edu.cn

收稿日期: 2018-05-02; 接受日期: 2018-06-13; 网络出版日期: 2018-07-19

国家自然科学基金(编号: 11472268, 91752110)和科学挑战专题(编号: TZ2016001)资助项目

摘要 本文采用罚浸入边界/格子玻尔兹曼方法研究了旋转圆柱尾流中的柔性丝线拍动模式. 通过改变圆柱旋转率(α)及圆柱与丝线的水平间距(G), 分析了 $\alpha=0.1-3.0$, $G/D=0.05-3.5$ (D 为圆柱直径)的参数平面内柔性丝线的拍动模式, 探讨了模式间的转变特性及不同模式的形成机理. 根据拍动丝线形成的包络图, 本文发现了反向、缠绕和正向拍动三类主要模式, 其中反向和正向拍动模式分别包含以下典型亚模式: 反向单侧拍动模式、反向双侧拍动模式、反向静止模式; 正向单侧拍动模式、正向双侧拍动模式、正向静止模式; 并基于参数空间的模式相图, 获得了间距比 G/D 渐增导致的反向-正向模式的主要模式转变路径; 通过分析不同模式的典型尾涡结构, 探讨了柔性丝线拍动模式形成的流动机理; 此外, 发现在特定参数下, 丝线拍动可产生明显的反馈作用: 完全抑制旋转圆柱尾流脱涡或促进尾涡生成脱涡, 导致旋转圆柱减阻(甚至产生推力)或明显增阻.

关键词 柔性丝线, 旋转圆柱, 格子玻尔兹曼方法, 拍动模式

PACS: 47.15.Uv, 62.50.Ef, 47.11.-j

1 引言

流固耦合是自然界和实际工程应用中的常见现象, 如游轮在水中航行、红细胞在血液中输送、桥墩尾流中的游鱼、旗杆上随风飘扬的旗帜, 等等. 因而, 流固耦合研究一直是现代流体力学研究的关键基础科学问题, 在诸多工程实际中也具有重要应用背景.

圆柱绕流作为流体力学研究的经典问题, 因其尾流脱涡产生的强烈非定常特性, 易于诱发富于变化的流固耦合现象, 成为刚性体流固耦合研究的典型流动模型. 其中, 广为研究的问题包括: 尾流脱涡诱导的圆

柱振动^[1,2]、旋转圆柱的绕流干扰^[3]、串置^[4-6]或并置圆柱的相互作用^[7,8]等. 另一方面, 与生物推进机理密切相关的柔性体流固耦合问题一直是仿生科学的前沿研究热点, 近期研究有肥皂膜流动中柔性丝线的动力学特性^[9,10]和串置丝线的相互干扰^[11]、旗帜拍动的不稳定性^[12-14]、以及均匀来流中倒置板的流固耦合作用^[15]、并置丝线的绕流干扰^[16]等.

同时存在刚性体和柔性体的流固耦合问题更具现实意义, 流动现象更为丰富, 其中的复杂耦合作用机理亟待探索. 例如, 河流中的鱼群经常追随航行的船舶并巡游于其船头或船尾区域, 人们推测鱼群可从这些区

引用格式: 胡浪超, 刘难生, 丁航, 等. 旋转圆柱尾流中柔性丝线的拍动模式研究. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2018, 48: 094706
Hu L C, Liu N S, Ding H, et al. Study on flapping modes of a flexible filament in the wake of an upstream rotating cylinder (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2018, 48: 094706, doi: [10.1360/SSPMA2018-00170](https://doi.org/10.1360/SSPMA2018-00170)

域的流动中获利达到减阻和提高巡游效率的效果. 事实上, 实验和数值研究表明, 在尾流的合适区域, 游鱼的确能利用物体绕流的脱涡减小阻力、从而降低自身能耗^[17]. 研究还发现, 通过调节其在尾流中的位置, 流线型物体可随着绕流脱涡做振荡运动, 从中吸收能量帮助推进^[18,19]. 据此可知, 上游物体的绕流尾迹能够对下游柔性体的动力学特性和运动方式产生重要影响.

刚性体和柔性体的流固耦合通常模化为绕流圆柱和拍动丝线的相互作用问题, 广为研究. 例如, 基于浸入边界/格子玻尔兹曼方法, 前人数值模拟了静止圆柱尾流与无质量柔性丝线的耦合干扰^[20]、丝线运动方式对上游圆柱尾流的反馈影响^[21]; 肥皂膜流动的实验研究发现, 随着相对圆柱的位置变化, 柔性丝线在尾流中呈现出三种典型的拍动响应模态^[22]; 实验还证实, 拍动柔性丝线可从静止圆柱的脱涡尾流中获得推力(而不是阻力)^[23]. 另外, 作者研究组也开展了圆柱/丝线流固耦合的典型问题数值模拟: 拍动丝线绕流和下游圆柱脱涡^[24]、静止圆柱尾流和下游丝线拍动^[25]的相互干扰机理. 以上研究主要关注静止圆柱和柔性丝线的流固耦合问题.

已有研究表明, 旋转圆柱尾流中的脱涡模态更为丰富多彩: 随着旋转率的增大, 尾流可多次经历定常/周期性脱涡模态的相互转变^[3,26]. 研究表明^[3], 对于雷诺数 $Re=100-200$ 的旋转圆柱, 当旋转率 $\alpha=0-1.9$ 时, 旋转圆柱尾流为第一类周期性脱涡模态, 即涡街向上偏斜, 正负涡的位置和强度不再对称; 当 $\alpha=1.9-4.7$ 时, 尾流转变为第一类定常模态, 此时沿旋转圆柱迎面面形成顺时针涡且向下游延伸呈“舌状”, 沿背风面形成逆时针“舌状”涡但偏斜向上, 尾流脱涡消失; 当 $\alpha=4.7-5.2$ 时, 尾流转变为第二类周期性脱涡模态, 即涡街脱泻且向上偏斜, 靠近旋转圆柱上表面形成正涡并脱落, 其向下游运动时尺寸增大, 抑制了负涡在圆柱表面的形成和脱落, 因此尾流下游只出现强度很弱的负涡; 当 $\alpha>5.2$ 时, 尾流转变为第二类定常模态, 即迎面面和背风面产生的涡层紧附于圆柱表面, 不能形成涡脱泻^[3,26].

目前, 旋转圆柱绕流与拍动丝线的流固耦合问题还不多见. 据此, 本文利用浸入边界/格子玻尔兹曼方法, 数值模拟旋转圆柱绕流与拍动丝线的相互干扰, 重点考察改变圆柱旋转率和圆柱/丝线的相对位置对柔性丝线动力学行为的影响规律和相关机理、以及该

流固耦合系统中丝线拍动模态转变特性.

2 物理问题与控制方程

旋转圆柱绕流与拍动丝线的流固耦合问题如图1所示. 均匀来流速度为 U 、密度为 ρ 、动力学黏性系数为 μ . 旋转圆柱直径为 D , 旋转率为 α . 柔性丝线头部简支固定, 与圆柱后缘点水平间距为 G 、垂直间距为 0 , 尾端可自由拍动; 其长度为 $L=D$ 、密度为 ρ_s 、厚度为 h 、杨氏模量为 E .

流体和丝线的运动方程分别为Navier-Stokes方程和非线性Bernoulli-Euler方程, 如公式(1)–(3)所示. 本文采用 ρ , U 和 D 作为基本特征量进行无量纲化, 得到无量纲控制方程的形式如下:

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} = -\nabla p + \frac{1}{Re} \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{f}, \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \mu_m \frac{\partial^2 X}{\partial t^2} - K_s \frac{\partial}{\partial s} \left[\left(1 - \left(\frac{\partial X}{\partial s} \cdot \frac{\partial X}{\partial s} \right)^{1/2} \right) \frac{\partial X}{\partial s} \right] \\ + K_B \frac{\partial^4 X}{\partial s^4} = F_f, \end{aligned} \quad (3)$$

其中 $\mathbf{f}$ 为体积力, F_f 为丝线受到的流体力. 丝线运动方程中的无量纲参数有: 质量比 μ_m 、拉伸刚度系数 K_s 、弯曲刚度系数 K_B , 其定义分别为

$$\mu_m = \frac{\rho_s h}{\rho L}, K_s = \frac{Eh}{\rho U^2 L}, K_B = \frac{EI}{\rho U^2 L^3}, \quad (4)$$

流体运动方程中有雷诺数 $Re = \rho UD / \mu$. 另一无量纲控制参数为间距比 G/D .

为了求解上述方程, 初始条件和边界条件如下: 计算域的入口和上下边界固定速度 $\mathbf{u} = (U, 0)$, 出口设

图1 (网络版彩图)均匀来流中旋转圆柱尾流与柔性丝线的流固耦合问题示意图

Figure 1 (Color online) Schematic diagram of fluid-structure interaction (FSI) between the wake flow of a rotating circular cylinder and a flexible filament in a uniform flow.

为 $\partial u / \partial x = 0$ 和 $\partial p / \partial x = 0$, 在旋转圆柱壁面上设置 $u = (-\alpha U \sin \theta, \alpha U \cos \theta)$, 其中角度 θ 定义如图 1 所示, 计算初场取为 $u = (U, 0)$.

丝线方程的边界条件为 $X(s=0, t) = (x_0, y_0)$, 其中 $s=0$ 代表丝线固定端, 其对应的坐标向量为 $(x_0, y_0) = (0.5D + G, 0)$, 丝线速度为 $v = \partial X / \partial t$, 初始时刻丝线静止, 坐标为 $X(s, t=0) = (x, 0)$, 其中 $x_0 \leq x \leq (x_0 + L)$.

3 数值方法与验证

本文采用罚浸入边界/格子玻尔兹曼方法^[16]求解控制方程(1)–(3). 经测试计算比较后, 本文中计算域取为 $x \times y = [-25D, 30D] \times [-25D, 25D]$. 为解析圆柱和丝线附近的强烈流固耦合作用, 采用多块网格技术以提高网格分辨率^[27,28]. 测试计算分析表明, 圆柱和丝线附近的网格尺寸 $\Delta x = 1/320$ 时, 计算结果具有网格无关性.

为验证计算程序的可靠性, 本文首先模拟了静止圆柱尾流与柔性丝线的流固耦合问题, 将计算结果与前人工作^[16,29,30]对比验证. 计算参数设置为雷诺数

$Re=100$ 、丝线长度 $L/D=1$ 、间距比 $G/D=3$ 、拉伸刚度系数 $K_s = 1000$ 、弯曲刚度系数 $K_b = 0.001$ 、质量比 $\mu_m = 0.1$ 和 $\mu_m = 0.2$. 如表 1 所示, 本文计算结果与前人结果^[29,30]对比良好, 说明计算程序能够有效模拟圆柱尾流中柔性丝线的拍动特性.

在本文模拟旋转圆柱尾流与拍动丝线相互作用的计算中, 通过改变旋转率 $\alpha=0.1-0.3$ 和间距比 $G/D=0.05-3.5$, 研究柔性丝线的拍动特性, 另设质量比 $\mu_m = 0.3$, 其他参数设置和静止圆柱尾流与柔性丝线的流固耦合问题一致.

需要指出的是, $Re=100$ 时旋转圆柱绕流在 $\alpha=0.1-0.3$ 范围内的脱涡模态丰富^[26], 利于考察柔性丝线在不同绕流尾涡中的动力学特性. 研究还发现 $K_b = 0.0001$ 时, 均匀来流中单根丝线的拍动模态从静止模态转变为周期性拍动模态的临界质量比 $0.27^{[12]}$. 另外, 质量比为 $\mu_m = 0.3$ 时, $K_b = 0.0001$ 的单根柔性丝线在均匀来流中可实现周期性拍动, 而 $K_b = 0.001$ 时则呈静止模态. 因此, 本文设定质量比为 $\mu_m = 0.3$, 以便反映旋转圆柱尾流对丝线拍动的影响及非定常相互作用. 丝线长度过大时, 柔性丝线将出现多种复杂拍动模

表 1 基于静止圆柱尾流与柔性丝线耦合作用的程序验证^[29,30]. 其中, $\bar{C}_D$ 为圆柱平均阻力系数, $\bar{C}_{d,f} / \bar{C}_{d,f0}$ 为丝线阻力比, A/D 为丝线自由端拍动振幅, St_f 为丝线拍动的 Strouhal 数, $\bar{C}_{d,f}$ 和 $\bar{C}_{d,f0}$ 分别是拍动丝线在静止圆柱尾流和均匀来流中的平均阻力系数, Δx 是固体附近的网格尺寸

Table 1 Code validation based on FSI between wake flow of a static circular cylinder and a flexible filament. Here, $\bar{C}_D$ is the time-average drag coefficient of the cylinder, $\bar{C}_{d,f} / \bar{C}_{d,f0}$ is the drag ratio and A/D is the flapping amplitude of the free end of the filament, and St_f is the flapping Strouhal number of the filament, with $\bar{C}_{d,f}$ and $\bar{C}_{d,f0}$, respectively, being the mean drag coefficient of the filament in the wake of a static cylinder and that in a free stream. Δx is the finest mesh spacing near the cylinder and filament

Refs	μ_m		$\bar{C}_D$	$\bar{C}_{d,f} / \bar{C}_{d,f0}$	A/D	St_f
Tian ^[16]	0.1		1.42	0.47	0.73	0.161
	0.2		1.42	0.58	0.77	0.153
Yuan ^[29]	0.1		1.49	0.49	0.72	0.166
	0.2		1.49	0.57	0.74	0.166
Wu ^[30]	0.1	$\Delta x=1/60$	1.47	0.58	0.63	0.169
		$\Delta x=1/80$	1.42	0.51	0.69	0.163
		$\Delta x=1/120$	1.38	0.47	0.71	0.161
	0.2	$\Delta x=1/60$	1.48	0.66	0.64	0.168
		$\Delta x=1/80$	1.42	0.60	0.71	0.161
		$\Delta x=1/120$	1.39	0.56	0.73	0.159
Present	0.1	$\Delta x=1/320$	1.33	0.43	0.71	0.160
	0.2	$\Delta x=1/320$	1.33	0.51	0.73	0.159

态, 其与旋转圆柱尾流的相互干扰机理难于合理分析, 因而文中取丝线长度为 $L/D=1$. 弯曲刚度系数和拉伸刚度系数的选取实验情况基本相符^[11].

4 计算结果与分析

4.1 丝线拍动模式

基于 $(\alpha, G/D)$ 参数空间中的大量算例分析发现, 旋转圆柱尾流中的柔性丝线呈现一系列典型的拍动模式. 根据拍动丝线相对于固定端的流向位置, 可分为反向(R)、缠绕(C)和正向(N)拍动三大类模式. 根据以下依据: 1)拍动丝线相对于固定端的侧向位置; 2)丝线静止抑或拍动, 反向拍动又可分为三类亚模式: 反向单侧拍动模式(R1)、反向双侧拍动模式(R2)、反向静止模式(R3); 正向拍动包含的亚模式有: 正向单侧拍动模式(N1)、正向双侧拍动模式(N2)、正向静止模式(N3).

为清楚展示旋转圆柱尾流中柔性丝线的典型拍动特性, 图2给出了上述不同 $(\alpha, G/D)$ 参数下的各类模式的丝线拍动包络图.

4.2 $(\alpha, G/D)$ 平面上的模式相图

通过大量计算分析, 本文给出了旋转圆柱尾流中柔性丝线拍动模式在 $(\alpha, G/D)$ 参数平面上的相图, 如图3所示. 总的来说, 当 $\alpha < 0.5$ 时, 增大 G/D 可使丝线拍动发生反向-正向模式转变; 当 $\alpha = 0.5 \sim 0.6$ 时, 随着 G/D 的增大, 柔性丝线先由反向单侧拍动模式R1历经缠绕模式C转变为正向双侧模式N2, 即拍动模式转变路径为R1-C-N2; 当 $\alpha > 0.6$ 时, 增大 G/D 也可使丝线拍动发生反向-正向模式转变. 另外, 当 $\alpha > 1.5$ 时, 发生反向-正向模式转变的临界间距比基本保持不变, 即 $G/D \approx 0.5$.

需要特别指出的是, 对于不同旋转率 α , 增大 G/D 导致的反向-正向模式转变可历经不同的亚模式. 具体来说, 1)当 $\alpha < 0.5$ 时, 柔性丝线依次历经反向单侧拍动模式R1、反向双侧拍动模式R2进入正向双侧模式N2, 即模式转变路径为R1-R2-N2; 2)当 $\alpha = 1.0 \sim 1.1$ 时, 柔性丝线依次历经反向静止模式R3、反向单侧拍动模式R1到达正向双侧拍动模式N2, 即路径为R3-R1-N2; 3)当 $\alpha = 1.5$ 时, 则依次历经反向单侧拍动模式R1、反向静止模式R3、正向单侧拍动模式N1到达正向双侧拍动模式N2, 即路径为R1-R3-N1-N2; 4)当 $1.5 < \alpha < 3.0$ 时, 丝线拍动发生反向-正向模式转变依次历经反向单侧

图2 (网络版彩图) 柔性丝线拍动的各类典型模式, (a)模式R1, (b)模式R2, (c)模式R3, (d)模式C, (e)模式N1, (f)模式N2, (g)模式N3. 图中括号内的数字分别为旋转率和间距比, 即 $(\alpha, G/D)$. 图中红点表示丝线固定端

Figure 2 (Color online) Typical flapping modes of the flapping flexible filament, (a) Mode R1, (b) Mode R2, (c) Mode R3, (d) Mode C, (e) Mode N1, (f) Mode N2, (g) Mode N3. Here, the numbers in the bracket respectively represent the values of rotation rate and distance ratio, namely, $(\alpha, G/D)$. The red point in the plot represents the fixed end of the filament.

拍动模式R1、反向静止模式R3、正向单侧拍动模式N1、正向静止模式N3, 即路径为R1-R3-N1-N3; 5)当 $\alpha = 3.0$ 时, 则依次历经反向单侧拍动模式R1、反向静止模式R3、正向静止模式N3, 即路径为R1-R3-N3.

图 3 (网络版彩图) (α , G/D) 参数平面上丝线拍动模式的相图. 图中蓝色、绿色和红色符号分别表示反向(R)、缠绕(C)和正向(N)拍动模式

Figure 3 (Color online) The phase diagram of the flapping mode of the filament in the (α , G/D) parameter plane. Here, the blue, green and red symbols stand for the reversed (R), coiled (C), and normal (N) flapping modes, respectively.

分析以上模式转变路径可以发现, 对于低旋转率 ($\alpha \leq 1.5$), 当间距比 $G/D > 2$ 时丝线拍动模式不再发生改变, 保持为正向双侧拍动模式 N2; 而对于高旋转率 ($\alpha > 1.5$), 则 $G/D > 0.5$ 时柔性丝线保持为正向静止模式 N3. 考虑到增大间距比 G/D 可减弱旋转圆柱尾流与柔性丝线拍动之间的相互干扰, 由模式相图可以推测, 当 $G/D > 2$ 时丝线拍动受决于旋转圆柱尾流的脱涡特性, 而其对圆柱尾流运动的影响微弱. 另外, 当圆柱与丝线相距较近时 (例如 $G/D = 0.05 - 0.75$), 旋转圆柱尾流与柔性丝线拍动的流固耦合作用较为剧烈, 因而改变旋转率可导致丝线拍动模式的丰富变化.

4.3 拍动模式的尾涡分析

为研究旋转圆柱尾流中不同拍动模式的形成机理, 我们针对各典型亚模式的相应尾涡流场进行分析. 圆柱静止或旋转率较低时, 其下游会形成回流区, 该区域压力较低因而流向速度 (x -方向分量) 为负, 也称吸力区^[31]. 当柔性丝线处于吸力区时, 易出现反向拍动现象. 增大圆柱旋转率可显著改变尾流脱涡模式, 且丝线处于尾流中的不同位置时, 其头部来流状态各异, 丝线与圆柱脱涡尾流形成不同的相互干扰形式, 从而形成丰富的拍动模式, 并反过来改变旋转圆柱的脱涡特性. 图 4 给出了不同典型亚模式下的瞬时涡量等值线.

图 4(a) 对应于模式 R1, 柔性丝线由于回流区低压作用被吸引至紧靠圆柱表面, 其自由端与圆柱上表面的剪切层相互作用发生沿流向的偏折并小幅拍动. 整体而言, 柔性丝线是做反向拍动. 沿圆柱表面形成的上下负涡, 丝线固定端出现正涡生成, 旋转率大于 1.5 时, 尾流中没有发生涡脱泻, 旋转率小于 1 时, 尾流中发生涡脱泻. 从模式相图 (图 3) 可以看出, 反向单侧拍动模式主要发生于间距比 G/D 较小时. 此时, 柔性丝线处于旋转圆柱后缘的回流区中, 因回流作用反向运动, 同时被圆柱逆时针旋转带动而向上侧延伸. 随着 α 的增大, 发生模式 R1 的 G/D 范围变小. 另外, 对于间距比 G/D 较大的模式 R1, 拍动丝线不出现自由端沿流向的偏折 (如图 2(a) 所示).

图 4(b) 为模式 R2 下的尾流涡结构. 可以看到, 柔性丝线固定端处于回流区后缘, 其自由端因脱涡回流和低压作用被吸引进入回流区中, 伴随着旋转圆柱表面的正负涡交替形成和脱落而上下拍动. 如模式相图 (图 3) 所示, 模式 R2 出现在旋转率 α 较小时, 即 $\alpha < 0.5$. 此时, 旋转圆柱尾流依然存在周期性的涡街脱泻, 其回流区的流体也因正负涡的交替形成做周期性运动.

图 4(c) 显示了模式 R3 的尾流流场. 如图所示, 丝线处在旋转圆柱表面剪切层分离形成的正负静止涡对中, 尾流不发生涡脱泻现象, 为定常流动, 因而丝线处于静止状态. 尾流中负涡从圆柱上表面生成, 正涡从丝线下游侧生成. 模式相图 (图 3) 显示, 模式 R3 主要发生在高旋转率 ($\alpha \geq 1.5$) 时, 此时旋转圆柱绕流脱涡基本消失, 流动大都处于定常状态; 随着 α 的增大, 出现模式 R3 的间距比 G/D 参数区间变小. 另外, 对于 α 较小的模式 R3, 此时旋转圆柱回流区相对较大, 柔性丝线更易沿回流反向延伸且发生自由端偏折 (见图 2(c)).

图 4(d) 为模式 C 的脱涡流场. 从图中可以看到, 丝线固定端处于回流区中后缘, 自由端因回流和低压作用被吸引向上游运动, 带动丝线部分进入回流区, 做反向拍动; 另一部分则因脱涡作用保持在固定端下游, 因而丝线弯曲缠绕于固定端, 做周期性拍动. 缠绕的丝线整体伴随着旋转圆柱表面的正负涡交替形成和脱落而上下拍动. 模式相图 (图 3) 显示, 模式 C 主要发生在 $\alpha = 0.5 - 0.6$ 附近, 拍动丝线与旋转圆柱间距中等. 图 2(d) 中模式 C 的丝线包络图表明, α 较大时, 拍动丝线的包络范围略有减小.

图 4(e) 为模式 N1 下的尾流涡结构. 可以看到, 丝线

图 4 (网络版彩图)典型亚模态的瞬时涡量等值线图, (a)模态R1, (b)模态R2, (c)模态R3, (d)模态C, (e)模态N1, (f)模态N2, (g)模态N3. 图中括号内的数字分别为旋转率和间距比, 即 $(\alpha, G/D)$. 图中红线为拍动丝线, 下同

Figure 4 (Color online) Instantaneous vorticity contours of typical sub-mode of filament flapping, (a) Mode R1, (b) Mode R2, (c) Mode R3, (d) Mode C, (e) Mode N1, (f) Mode N2, (g) Mode N3. Here the numbers in the bracket respectively represent the values of rotation rate and distance ratio, namely, $(\alpha, G/D)$. The red line represents the flapping filament.

固定端处于旋转圆柱下表面的剪切层后缘, 尾流中正涡形成脱落后因圆柱旋转和对流作用偏斜向上且往下流运动, 导致丝线做正向单侧拍动. 模态相图(图3)显示, 模态N1主要发生在高旋转率($1.5 \leq \alpha < 3.0$)时, 随着 α 的增大, 出现模态N1的临界间距比 G/D 变小且其参数区间变小. 另外, 对于 α 较小的模态N1, 丝线正向单侧拍动的幅度和包络范围相对较大(见图2(e)).

图4(f)为模态N2对应的尾流涡结构. 此时, 丝线固定端处于回流区之外, 上游旋转圆柱尾流中交替脱落的涡街流经丝线时, 与丝线上下表面生成的正负涡相互作用, 融合后在丝线自由端形成周期性地脱涡. 从模态相图(图3)可以看到, 模态N2主要发生在中低旋转率($\alpha \leq 1.5$)和较大间距比($G/D \geq 1.5$)时, 其成因为旋转圆柱尾流中发生的周期性涡街脱泻. 随着 α 的增大, 涡街的向上侧倾斜程度增大, 拍动丝线正向双侧拍动幅度减小、偏斜向上更为明显(见图2(f)).

图4(g)为模态N3的尾流场. 如图所示, 丝线处在旋转圆柱表面剪切层之外, 尾流定常, 脱涡现象消失; 旋转圆柱表面的舌状涡与丝线上下表面生成的正负涡不相接触, 因而丝线处于静止状态. 模态相图(图3)显示, 模态N3发生在较高旋转率($\alpha \geq 1.9$)时, 随着 α 的增大, 圆柱背风面的舌状涡更加贴近圆柱表面, 与丝线不发生相互干扰, 丝线正向静止时向上偏斜程度增大(见图2(g)).

4.4 丝线拍动的反馈作用

总体而言, 旋转圆柱脱涡特征是决定处于下游不同位置的柔性丝线拍动模态的主导因素, 以上典型拍动模态的流动分析证实了这点. 但是, 在某些特定参数下, 柔性丝线运动反馈作用于上游旋转圆柱尾流后, 可显著改变其脱涡特性, 例如抑制原有的脱涡现象或促进尾涡脱泻, 以及旋转圆柱的受力特性. 这可通过以下与均匀来流中单个旋转圆柱绕流计算结果对比加以说明.

事实上, 本文发现当间距比较小时, 丝线可能对旋转圆柱尾流具有显著影响. 如图5所示, 间距比为 $G/D = 0.05$, $\alpha = 1.0$ 和 1.5 时, 没有拍动丝线干扰时旋转圆柱尾流出现周期性涡脱泻(见图5(a), (c)); 而当拍动丝线存在时, 尾流场中的涡脱泻现象完全被抑制(见图5(b), (d)). 另一方面, 丝线拍动也可能促进原本定常的旋转圆柱尾流形成脱涡现象. 从图6中可以发现, 当间距比

图 5 (网络版彩图)瞬时涡量等值线图. 无丝线干扰的旋转圆柱尾流脱涡: (a) $\alpha=1.0$, (c) $\alpha=1.5$; 丝线反馈作用导致旋转圆柱尾流脱涡被抑制: (b)模式R3, $(\alpha, G/D)=(1.0, 0.05)$, (d)模式R1, $(\alpha, G/D)=(1.5, 0.05)$

Figure 5 (Color online) Instantaneous vorticity contours. Vortex shedding behind the rotating circular cylinder with filament free in the wake: (a) $\alpha=1.0$, (c) $\alpha=1.5$; suppression of vortex shedding behind the rotating circular cylinder due to the feedback of the filament in the wake: (b) mode R3, $(\alpha, G/D)=(1.0, 0.05)$, (d) mode R1, $(\alpha, G/D)=(1.5, 0.05)$.

$G/D=0.5$ 时, 对于 $\alpha=1.9$ 和 2.0 的旋转圆柱, 其尾流在没有拍动丝线干扰时是定常流动, 不发生脱涡现象(见**图6**(a), (c)); 相反, 拍动丝线存在时, 尾流因其反馈作用发生周期性脱涡(见**图6**(b), (d)).

拍动丝线在显著改变旋转圆柱尾涡流场的同时, 也可对其受力特性产生重要影响. 如**图7**所示, 当间距比 $G/D=0.05$ 时, 拍动丝线的反馈干扰具有减阻作用, 且越大减阻效果越好; 在高旋转率 $\alpha=3.0$ 时甚至导致推力出现. 类似的情况发生在 $G/D=0.25$ 时. 不同的是, 当 $G/D=0.5$ 时, 旋转圆柱在 $\alpha<1.8$ 时获得减阻; 而当 α 进一步增大时, 则所受阻力增大. 结合丝线拍动模式(**图3**)

图 6 (网络版彩图)瞬时涡量等值线图. 无丝线干扰的旋转圆柱定常尾流: (a) $\alpha=1.9$, (c) $\alpha=2.0$; 丝线反馈作用导致旋转圆柱尾流脱涡: (b)模式N1, $(\alpha, G/D)=(1.9, 0.5)$, (d)模式N1, $(\alpha, G/D)=(2.0, 0.5)$

Figure 6 (Color online) Instantaneous vorticity contours. Steady wake behind the rotating circular cylinder with filament free: (a) $\alpha=1.9$, (c) $\alpha=2.0$; vortex shedding behind the rotating circular cylinder enhanced by the feedback of the filament in the wake: (b) mode N1, $(\alpha, G/D)=(1.9, 0.5)$, (d) mode N1, $(\alpha, G/D)=(2.0, 0.5)$.

和尾涡流场(**图4-6**)可以看出, 当拍动丝线反馈具有抑制尾流脱涡时, 旋转圆柱获得减阻; 当其促进尾流脱涡时, 则导致增阻效果.

5 总结与展望

本文数值模拟了柔性丝线与上游旋转圆柱尾流的相互作用, 研究了旋转率和间距比对丝线拍动的影响, 获得了柔性丝线的3类主要拍动模式: 正向、缠绕和反向拍动模式, 及6类典型亚模式: 反向单侧拍动模式、反向双侧拍动模式、反向静止模式、正向单侧拍动模

图 7 (网络版彩图) 旋转圆柱的阻力系数比 $\overline{C}_D / \overline{C}_{D0}$ 随旋转率的变化曲线. $\overline{C}_D$ 和 $\overline{C}_{D0}$ 分别为有/无丝线干扰时旋转圆柱的平均阻力系数

Figure 7 (Color online) Variation of the drag ratio $\overline{C}_D / \overline{C}_{D0}$ as a function of rotation rate α . $\overline{C}_D$ and $\overline{C}_{D0}$ are the mean drag coefficient of the rotating circular cylinder with and without filament in the wake, respectively.

态、正向双侧拍动模态、正向静止模态. 通过分析参数空间中的模态相图, 总结了不同圆柱旋转率范围内柔性丝线反向-正向模态的转变路径. 基于对不同模态(亚模态)的尾涡流场和丝线拍动特征, 考察了柔性丝线拍动模态形成的相关流动机理. 最后, 通过考察对比柔性丝线存在与否的旋转圆柱尾流特性, 发现丝线拍动可在特定参数下的显著反馈作用: 对尾涡生成脱泻的完全抑制作用或显著促进作用, 相应的导致旋转圆柱减阻甚至产生推力的效应或是明显增阻效应.

本文所研究的柔性丝线与旋转圆柱尾流的相互作用, 是既有刚性结构又有柔性结构的典型流固耦合问题, 可为工程实际应用中的相关研究提供参考.

参考文献

- Williamson C H K, Govardhan R. Vortex-induced vibrations. *Annu Rev Fluid Mech*, 2004, 36: 413–455
- Morse T L, Williamson C H K. Prediction of vortex-induced vibration response by employing controlled motion. *J Fluid Mech*, 2009, 634: 5–39
- Mittal S, Kumar B. Flow past a rotating cylinder. *J Fluid Mech*, 2003, 476: 303–334
- Zdravkovich M M. The effects of interference between circular cylinders in cross flow. *J Fluids Struct*, 1987, 1: 239–261
- Xu G, Zhou Y. Strouhal numbers in the wake of two inline cylinders. *Exp Fluids*, 2004, 37: 248–256
- Carmo B S, Meneghini J R, Sherwin S J. Secondary instabilities in the flow around two circular cylinders in tandem. *J Fluid Mech*, 2010, 644: 395–431
- Hu J C, Zhou Y. Flow structure behind two staggered circular cylinders. Part 1. Downstream evolution and classification. *J Fluid Mech*, 2008, 607: 51–80
- Ueda Y, Sellier A, Kida T, et al. On the low-Reynolds-number flow about two rotating circular cylinders. *J Fluid Mech*, 2003, 495: 255–281
- Zhang J, Childress S, Libchaber A, et al. Flexible filaments in a flowing soap film as a model for one-dimensional flags in a two-dimensional wind. *Nature*, 2000, 408: 835–839
- Zhu L, Peskin C S. Simulation of a flapping flexible filament in a flowing soap film by the immersed boundary method. *J Comput Phys*, 2002, 179: 452–468
- Jia L B, Yin X Z. Passive oscillations of two tandem flexible filaments in a flowing soap film. *Phys Rev Lett*, 2008, 100: 228104
- Connell B S H, Yue D K P. Flapping dynamics of a flag in a uniform stream. *J Fluid Mech*, 2007, 581: 33–67
- Argentina M, Mahadevan L. Fluid-flow-induced flutter of a flag. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2005, 102: 1829–1834
- Alben S. The flapping-flag instability as a nonlinear eigenvalue problem. *Phys Fluids*, 2008, 20: 104106
- Huang H, Wei H, Lu X Y. Coupling performance of tandem flexible inverted flags in a uniform flow. *J Fluid Mech*, 2018, 837: 461–476
- Tian F B, Luo H, Zhu L, et al. An efficient immersed boundary-lattice Boltzmann method for the hydrodynamic interaction of elastic filaments. *J Comput Phys*, 2011, 230: 7266–7283
- Liao J C. The Karman gait: novel body kinematics of rainbow trout swimming in a vortex street. *J Exp Biol*, 2003, 206: 1059–1073
- Beal D N, Hover F S, Triantafyllou M S, et al. Passive propulsion in vortex wakes. *J Fluid Mech*, 2006, 549: 385–402
- Shao X, Pan D, Deng J, et al. Hydrodynamic performance of a fishlike undulating foil in the wake of a cylinder. *Phys Fluids*, 2010, 22: 111903
- Sui Y, Chew Y T, Roy P, et al. A hybrid immersed-boundary and multi-block lattice Boltzmann method for simulating fluid and moving-

- boundaries interactions. *Int J Numer Meth Fluids*, 2007, 53: 1727–1754
- 21 Yildirim I, Rindt C C M, Steenhoven A A. Vortex dynamics in a wire-disturbed cylinder wake. *Phys Fluids*, 2010, 22: 094101
 - 22 Jia L B, Yin X Z. Response modes of a flexible filament in the wake of a cylinder in a flowing soap film. *Phys Fluids*, 2009, 21: 101704
 - 23 Wang S Y, Jia L B, Yin X Z. Kinematics and forces of a flexible body in Karman vortex street. *Chin Sci Bull*, 2009, 54: 556–561
 - 24 Tian F B, Luo H, Zhu L, et al. Interaction between a flexible filament and a downstream rigid body. *Phys Rev E*, 2010, 82: 026301
 - 25 Hua R N, Zhu L, Lu X Y. Numerical investigation of the dynamics of a flexible filament in the wake of cylinder. *Adv Appl Math Mech*, 2014, 6: 478–493
 - 26 Rao A, Radi A, Leontini J S, et al. A review of rotating cylinder wake transitions. *J Fluids Struct*, 2015, 53: 2–14
 - 27 Yu D, Mei R, Shyy W. A multi-block lattice Boltzmann method for viscous fluid flows. *Int J Numer Meth Fluids*, 2002, 39: 99–120
 - 28 Peng Y, Shu C, Chew Y T, et al. Application of multi-block approach in the immersed boundary–lattice Boltzmann method for viscous fluid flows. *J Comput Phys*, 2006, 218: 460–478
 - 29 Yuan H Z, Niu X D, Shu S, et al. A momentum exchange-based immersed boundary-lattice Boltzmann method for simulating a flexible filament in an incompressible flow. *Comput Math Appl*, 2014, 67: 1039–1056
 - 30 Wu J, Qiu Y L, Shu C, et al. Flow control of a circular cylinder by using an attached flexible filament. *Phys Fluids*, 2014, 26: 103601
 - 31 Eldredge J D, Pisani D. Passive locomotion of a simple articulated fish-like system in the wake of an obstacle. *J Fluid Mech*, 2008, 607: 279–288

Study on flapping modes of a flexible filament in the wake of an upstream rotating cylinder

HU LangChao, LIU NanSheng^{*}, Ding Hang & LU XiYun

Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China

Flapping mode of a flexible filament in wake flow behind a rotating circular cylinder has been studied numerically by using of an immersed-boundary-based lattice Boltzmann method. In a parameter space of $\alpha=0.1\text{--}3.0$ and $G/D=0.05\text{--}3.5$, where α is the cylinder rotation rate and G/D is the distance ratio between the filament and cylinder which has a diameter of D , flapping modes of the filament are analyzed in the phase diagram to examine the mode transition features and the mechanism of formation for different modes. Specifically, three kinds of flapping modes have been found which are labelled as reversed, coiled, and normal flapping modes; six sub-modes: reversed one-side, two-side and steady modes, and normal one-side, two-side and steady modes have been identified. Based on the phase diagram in the $(\alpha, G/D)$ plane, the transition pathways from the reversed to normal modes have been revealed as a consequence of increasing G/D . The critical value of G/D for transitions to the normal flapping modes demonstrates a decreasing trend for a small rotation rate, then becomes unaltered for a large α . The forming mechanism of different modes has been explored by analyzing the vortical wake behind the rotating cylinder and flexible filament. Moreover, great feedback effect of filament flapping on the cylinder wake flow has been revealed. Specifically, at specific parameters, the interaction between the flapping filament and the cylinder wake flow acts to totally suppress or trigger on the unsteady vortex shedding behind the cylinder, which correspondingly leads to great drag reduction even generation of thrust for the rotating cylinder, or significant drag enhancement.

flexible filament, rotating cylinder, lattice Boltzmann method, flapping mode

PACS: 47.15.Uv, 62.50.Ef, 47.11.-j

doi: [10.1360/SSPMA2018-00170](https://doi.org/10.1360/SSPMA2018-00170)