

文章编号: 1007-7294(2024)05-0705-11

# 控制杆-强制旋转对圆柱涡激振动的抑制作用研究

陈威<sup>1a</sup>, 刘炳文<sup>1b</sup>, 刘家睿<sup>1a</sup>, 王坤<sup>1b</sup>, 包燕旭<sup>1b</sup>,  
唐国强<sup>2</sup>, 李晓彬<sup>1a</sup>

(1. 武汉理工大学 a. 船海与能源动力工程学院; b. 理学院, 武汉 430063; 2. 大连理工大学  
海岸和近海工程国家重点实验室 辽宁 大连 116023)

**摘要:**为实现圆柱涡激振动的高效抑制,本文基于控制杆-强制旋转组合结构讨论圆柱涡激振动的抑制问题。对低雷诺数下的圆柱涡激振动进行数值模拟研究,对比分析不同控制杆数量和圆柱转速比下的流场特性、振动响应和流体力响应等。结果表明:与裸圆柱相比,控制杆具有一定的涡激振动抑制效果;对于三、五控制杆,通过调节转速比,可以实现最高98%的圆柱振幅抑制(对三控制杆,转速比为0.4~0.6;对五控制杆,转速比为0~0.2);圆柱振幅抑制与圆柱减阻区间相同;对于四、六控制杆,旋转对振幅抑制的影响较小;主圆柱表面的漩涡脱落和漩涡的合并会引起流体力系数的高幅波动,导致圆柱高振幅响应;没有漩涡合并和圆柱表面脱涡不明显时,流体力系数则无明显波动,圆柱振幅也显著降低。

**关键词:** 涡激振动; 圆柱; 控制杆; 流固耦合; 旋转

中图分类号: O352 文献标识码: A doi: 10.3969/j.issn.1007-7294.2024.05.007

## Suppression of cylindrical vortex induced vibration by control rods and forced rotation

CHEN Wei<sup>1a</sup>, LIU Bing-wen<sup>1b</sup>, LIU Jia-rui<sup>1a</sup>, WANG Kun<sup>1b</sup>, BAO Yan-xu<sup>1b</sup>,  
TANG Guo-qiang<sup>2</sup>, LI Xiao-bin<sup>1a</sup>

(1a. School of Naval Architecture, Ocean and Energy Power Engineering; b. School of Science, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China; 2. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China)

**Abstract:** To effectively suppress cylindrical vortex induced vibration (VIV), the suppression of cylindrical VIV based on the combined control rod-forced rotation structure was discussed in this paper. Numerical simulations of the cylindrical VIV at low Reynolds number were carried out for comparison and analysis of the flow characteristics, vibration response and hydrodynamic response under different numbers of control rods and rotation rates of the cylinder. The results show that compared with the bare cylinder, the control rods have a positive effect on VIV suppression. For three and five control rods, up to 98% of the cylindrical amplitude suppression can be achieved by adjusting the rotation rate (three control rods, rotation rate 0.4~0.6; five control rods, rotation rate 0~0.2). The amplitude suppression range of the cylinder is identical to the drag reduction range of the cylinder. For the four and six control rods, the effect of rotation on amplitude suppression is small. Vortex shedding on the main cylindrical surface and vortex merging will cause high amplitude fluctu-

收稿日期: 2023-11-23

基金项目: 大学生创新创业训练计划项目(S202210497220); 国家自然科学基金资助项目(52201334);

大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室开放基金项目(LP2203)

作者简介: 陈威(1988-),男,博士,副教授,通讯作者,E-mail: whutcw01@126.com。

ations in the fluid force coefficients, resulting in a high cylindrical amplitude response. For the cylindrical surface with no vortex merging and insignificant vortex shedding, there are no significant fluctuations in the fluid force coefficients and the cylindrical amplitude is significantly reduced.

**Key words:** vortex-induced vibration; cylinder; control rod; fluid-solid coupling; rotation

## 0 引言

在海洋工程领域(如系泊线、立管)和基础设施领域(如建筑物、桥梁),通常会观察到钝体绕流现象,在其尾流中会发生交替旋涡脱落并诱导产生脉动流体力,导致涡激振动(Vortex Induced Vibration, 即VIV)。涡激振动是海洋立管等海洋钝体结构物遭受疲劳损伤的根源。由于涡激振动的危害性,圆柱涡激振动的抑制问题受到工程界和学术界的广泛关注。近年来,学者们对涡激振动控制方法进行了一系列的研究<sup>[1-6]</sup>。

涡激振动控制通常可通过改变圆柱周围流场来实现,譬如在圆柱周围放置附体结构物,如在立管周围放置控制杆,是有效控制立管涡激振动的方式之一。控制杆通过影响主圆柱表面边界层来抑制圆柱表面漩涡的生成和脱落,从而抑制圆柱的涡激振动。徐万海等<sup>[7]</sup>通过室内模型实验,研究高雷诺数条件下控制杆对柔性圆柱涡激振动抑制效果,结果表明控制杆对柔性圆柱的涡激振动抑制效果显著,且四控制杆的抑制效果优于三控制杆;吴浩<sup>[8]</sup>通过水池实验,发现多根控制杆对立管涡激振动响应具有非常显著的抑制作用,能够同时消减立管流向和横向两个方向最高达90%的位移响应,且抑制性能对来流方向具有较强的适应性,控制杆的间距越小、覆盖率越高则抑制效果越好;Lu等<sup>[9]</sup>通过实验研究证明,三控制杆结构具有较好的涡激振动抑制效果,而四控制杆的抑制效果又优于三控制杆;Wu等<sup>[10]</sup>通过实验研究使用多个控制杆对细长立管涡激振动的抑制作用,结果表明,多个控制杆在抑制涡激振动方面表现良好,且较大的覆盖率对横流向涡激振动具有更好的抑制效果;Zhu等<sup>[11]</sup>通过数值模拟方法,研究一定雷诺数范围内带有多个控制杆的圆柱涡激振动抑制,结果表明在适当的位置放置适当数量的控制杆,可以在较宽的雷诺数范围内达到较好的涡激振动抑制效果。关于这一点,徐万海等<sup>[12]</sup>的研究也有相似结论。

除在圆柱周围放置附体结构物外,对圆柱施加强制旋转也是有效减小涡激振动的方式之一。Mittal等<sup>[13]</sup>通过数值计算研究表明,对圆柱施加强制旋转,在一定的转速下能显著抑制圆柱表面漩涡的生成和脱落,从而抑制圆柱的涡激振动;郭春雨等<sup>[14]</sup>通过数值模拟分析,研究旋转圆柱的三维流场和受力特性,结果表明旋转作用会导致柱体尾部流场与流动方向间产生夹角,影响尾涡的周期性规则脱落,在大转速时会导致出现正负涡交替环绕而不脱落现象,进而抑制圆柱的涡激振动,但主圆柱缓慢旋转时会使涡激振动响应略微放大;Bourguet<sup>[15]</sup>的研究也获得类似结论。

放置控制杆或施加强制旋转都会对涡激振动产生一定的抑制效果,那将二者结合起来,圆柱涡激振动能否得到进一步控制?目前还没有见到对控制杆-旋转组合的圆柱涡激振动抑制情况的研究结果。有鉴于此,本文针对控制杆-旋转组合对圆柱涡激振动的抑制进行了一系列研究,所研究的问题包括:(1)控制杆-强制旋转联合作用能否进一步抑制圆柱的涡激振动响应;(2)联合作用能否进一步降低圆柱表面阻力;(3)增加控制杆数量能否进一步抑制圆柱的涡激振动响应。针对以上问题,本文围绕控制杆-强制旋转联合作用下圆柱的流致振动进行了数值模拟研究,并分析了圆柱振幅响应、表面流体力和尾流漩涡脱落模式,为今后研究抑制立管涡激振动提供了新思路。

## 1 计算模型及方程

### 1.1 计算模型

本文的计算模型为控制杆-旋转圆柱系统,由主圆柱、控制杆和弹簧-阻尼系统组成。其中,主圆

柱的直径  $D$  设置为 100 mm, 质量比  $m^*$  (质量比为主圆柱质量与等体积的流体质量之比) 设为 2.6, 主圆柱周围放置多根与主圆柱同步运动的控制杆, 其数量分别设置为三、四、五、六, 这些控制杆直径相同, 等角度且等间隙地放置在主圆柱体周围。如图 1 所示, 控制杆与主圆柱二者直径之比为  $d/D=0.25$ , 间隙比为  $g/D=0.5$ , 同时控制杆跟主圆柱位移同步。

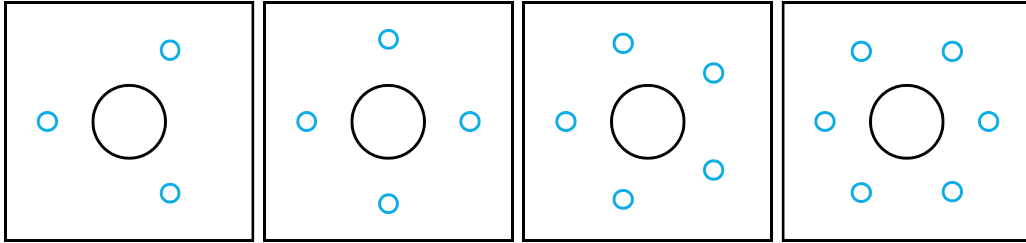


图1 控制杆摆放示意图

Fig.1 Schematic diagram of placement of control rods

主圆柱为一个可以自由振动的质量-弹簧-阻尼系统, 主圆柱连接了位于横流向和顺流向的由弹簧和阻尼器组成的弹簧-阻尼系统。计算模型如图 2 所示, 支撑主圆柱的弹簧系统由横流向的线弹性弹簧  $K_1$  和顺流向的线弹性弹簧  $K_2$  组成, 弹簧的弹性系数为  $k$ ; 阻尼系统由横流向的阻尼器  $C_1$  和顺流向的阻尼器  $C_2$  组成,  $c$  代表系统的阻尼系数 (本文取值均为 0)。主圆柱绕其轴逆时针旋转, 转速比由  $\alpha$  表示 ( $\alpha=D\Omega/2U, \Omega$  为旋转主圆柱的角速度,  $U$  为来流速度), 在 0 到 1 之间变化, 增量为 0.2。

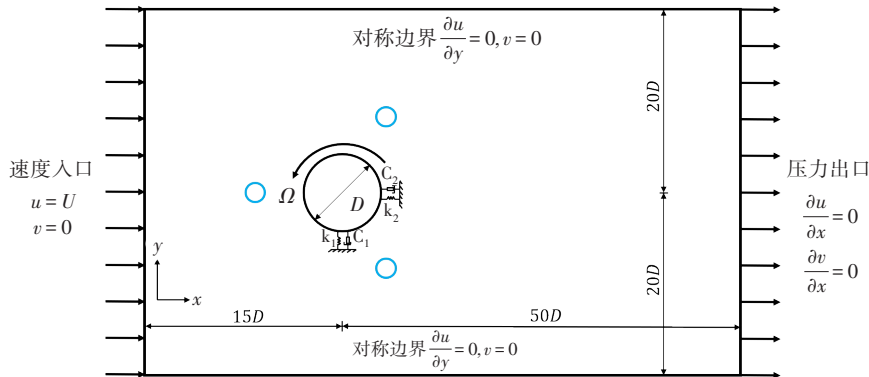


图2 控制杆-旋转圆柱系统的计算模型

Fig.2 Computational model of control rods-rotation systems

本文基于 Ansys/Fluent 软件进行流场数值计算, 结合用户自定义函数 (User Defined Functions, 即 UDF) 实现双向流固耦合数值模拟。流体介质为水, 密度为  $\rho=998.2 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , 流体运动粘度为  $\nu=1.004\times 10^{-6} \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ , 雷诺数数值为 200, 其定义为  $Re=UD/\nu$ 。该矩形计算域在顺流方向的长度为  $65D$ , 横流方向的长度为  $40D$ , 堵塞比为 2.5%, 流场宽度对结构响应的影响可忽略。

该计算域的边界条件设置如下: 左侧入口边界为速度边界条件, 其中  $u=U, v=0$ ; 右侧出口边界的边界条件为  $\partial u/\partial x=0, \partial v/\partial x=0$ ; 上下边界采用对称边界, 其边界条件为  $\partial u/\partial y=0, v=0$ ; 主圆柱和控制杆表面均设置为无滑移壁面, 其边界条件为  $u(t)=dx(t)/dt, v(t)=dy(t)/dt$ 。

### 1.2 控制方程及迭代方法

本文基于二维雷诺平均 Navier-Stokes 方程描述不可压缩的流动, 质量守恒和动量守恒方程分别表示如下:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \tag{2}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (3)$$

式中,  $u$ 、 $v$  分别为顺流向和横流向的速度,  $p$  为压力,  $\nu$  为流体的运动粘度。

主圆柱的振动系统设置为质量-弹簧-阻尼系统, 引入一系列无量纲参量, 得到无量纲化的圆柱系统振动控制方程:

$$\begin{aligned} \ddot{y}(t) + \frac{4\pi\zeta}{V_r} \dot{y}(t) + \left( \frac{2\pi}{V_r} \right)^2 y(t) &= \frac{2C_1}{\pi m^*} \\ \ddot{x}(t) + \frac{4\pi\zeta}{V_r} \dot{x}(t) + \left( \frac{2\pi}{V_r} \right)^2 x(t) &= \frac{2C_d}{\pi m^*} \end{aligned} \quad (4)$$

式中,  $m^* = 4m/(\rho\pi D^2)$  表示主圆柱的质量比,  $\zeta = c/2\sqrt{km}$  表示系统的阻尼比, 主圆柱表面顺流和横流系数分别定义为  $C_d = 2F_x/\rho DU^2$  和  $C_1 = 2F_y/\rho DU^2$ ,  $F_x$ 、 $F_y$  分别表示主圆柱在顺流向和横流向上受到的流体力。约化速度定义为  $V_r = U/(f_n \times D)$  (本文约化速度取值为 5),  $f_n = 1/2\pi\sqrt{k/m}$  为主圆柱固有频率。主圆柱在横流向和顺流向上的无量纲化位移、速度和加速度分别用  $y(t)$ 、 $\dot{y}(t)$ 、 $\ddot{y}(t)$ 、 $x(t)$ 、 $\dot{x}(t)$ 、 $\ddot{x}(t)$  表示。采用四阶 Runge-Kutta 法对控制方程进行离散求解, 可将式(4)离散为

$$\begin{aligned} y(t_{n+1}) &= y(t_n) + \frac{\Delta t}{6} (K_1 + K_2 + K_3 + K_4) \\ \dot{y}(t_{n+1}) &= \dot{y}(t_n) + \frac{\Delta t}{6} (L_1 + 2L_2 + 2L_3 + L_4) \end{aligned} \quad (5)$$

式中,  $K_1, K_2, K_3, K_4, L_1, L_2, L_3, L_4$  分别表示为

$$K_1 = \dot{y}(t_n) \quad (6)$$

$$L_1 = \frac{F(t_n)}{m} - \omega^2 y(t_n) - 2\zeta\omega_0 \dot{y}(t_n) \quad (7)$$

$$K_2 = \dot{y}(t_n) + \frac{\Delta t}{2} L_1 \quad (8)$$

$$L_2 = \frac{F(t_n)}{m} - \omega_0^2 \left( y(t_n) + \frac{\Delta t}{2} K_1 \right) - 2\zeta\omega_0 \dot{y}(t_n) \left( \dot{y}(t_n) + \frac{\Delta t}{2} L_1 \right) \quad (9)$$

$$K_3 = \dot{y}(t_n) + \frac{\Delta t}{2} L_2 \quad (10)$$

$$L_3 = \frac{F(t_n)}{m} - \omega_0^2 \left( y(t_n) + \frac{\Delta t}{2} K_2 \right) - 2\zeta\omega_0 \dot{y}(t_n) \left( \dot{y}(t_n) + \frac{\Delta t}{2} L_2 \right) \quad (11)$$

$$K_4 = \dot{y}(t_n) + \frac{\Delta t}{2} L_3 \quad (12)$$

$$L_4 = \frac{F(t_n)}{m} - \omega_0^2 \left( y(t_n) + \frac{\Delta t}{2} K_3 \right) - 2\zeta\omega_0 \dot{y}(t_n) \left( \dot{y}(t_n) + \frac{\Delta t}{2} L_3 \right) \quad (13)$$

式中,  $\Delta t$  为计算时间步长。

## 2 网格模型及验证

基于图2中计算模型划分网格, 为进行精确的流固耦合迭代并提高工作效率, 进行网格区域划分。主圆柱体周围的正方形区域为密集网格(SIZE I), 为了实现主圆柱及结构的运动和主圆柱的旋转, 设置动态网格模型, 定义为(A)振动区; 为准确捕捉尾流

表1 不同区域的网格尺寸

Tab.1 Mesh sizes for different areas

Mesh	$\Delta x/D$		
	(A)振动区	(B)尾流区	(C)外流区
SIZE I	0.02-0.04	0.04-0.10	0.10-0.30
SIZE II	0.05-0.10	0.10-0.20	0.20-0.50
SIZE III	0.10-0.20	0.20-0.40	0.40-1.00

形态,在(A)区域后矩形区域设置静态网格区域,为较密集(SIZE II)网格,定义为(B)尾流区;计算域其他区域计算精度要求较低,设置静态网格区域,为较稀疏网格(SIZE III),定义为(C)外流区。各区域详细尺寸如表1所示。

各区域网格均采用非结构化的三角形壳面网格,并在主圆柱和控制杆表面设置边界层网格,边界层网格及附近区域为刚性网格区域,在动网格模型工作中不发生变形和重构。网格模型如图3所示。

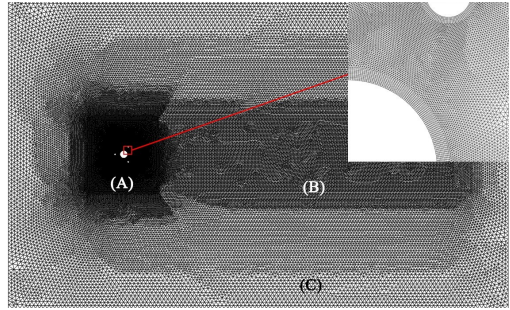


图3 网格区域图

Fig.3 Divided mesh area

本文对三种不同网格尺寸(SIZE I、SIZE II和SIZE III)的固定圆柱绕流模型进行了数值模拟,验证了本研究的网格独立性和数值模拟方法的有效性,相关结果见表2。

表2 圆柱绕流参数及对比

Tab.2 Comparison of  $C_{d-mean}$  for flows around circular cylinder

工况	Mesh	$C_{d-mean}$	$St$
A1	SIZE I	1.33	0.19
A2	SIZE II	1.36	0.19
A3	SIZE III	1.30	0.19
(Mendes & Branco, 1999) <sup>[16]</sup>		1.46	0.21
(Braza et al, 1986) <sup>[17]</sup>		1.38	0.20

式中,  $C_{d-mean}$  表示阻力系数均值,  $St$  表示斯特劳哈尔数。

比较三种不同网格大小的数值模拟结果, SIZE II 网格和 SIZE I 网格得到的结果基本接近, 说明 SIZE II 网格大小均能够满足精度要求, 出于计算量的考虑, 本文选择 SIZE II 网格。同时, 通过和前人研究数据<sup>[16-17]</sup>进行对比, 验证了本文数值方法和模型的有效性。

为进一步验证本文计算方法的可靠性, 进行无旋转裸圆柱涡激振动的数值模拟对比验证, 选取与 Shiels 等<sup>[18]</sup>的研究相同的工况 ( $m^* = 1.25, Re = 100$ ), 得到的数据如表3。

结果表明, 本文数值模拟结果与 Shiels 等的研究结果较为吻合, 进一步验证了本文数值方法的可靠性。

表3 无旋转圆柱流致振动参数及对比

Tab.3 Comparison of FIV results from different sources for flow around circular cylinder (no rotating case)

	$A_y$	$C_{l-AM}$	$C_{d-mean}$	$St$
Shiels et al <sup>[18]</sup>	0.58	0.77	2.22	0.196
Bourguet <sup>[19]</sup>	0.57	0.88	2.08	0.188
Shen et al <sup>[20]</sup>	0.57	0.83	2.15	0.190
Present	0.57	0.86	2.10	0.190

### 3 计算结果与分析

#### 3.1 圆柱振幅响应分析

不同转速比下三至六控制杆的圆柱组合结构涡激振动响应如图4所示, 其中, 实线为不同转速比下裸圆柱的振动响应。图4(a)为主圆柱横流向振幅, 由图可见, 无旋转下控制杆对主圆柱横流向涡激振动均有抑制效果, 且五控制杆时效果最优。施加强制旋转后, 裸圆柱振幅随转速比增加略微减小, 表明旋转对振幅的抑制效果弱于控制杆, 而三、五控制杆下的横流向振幅随转速变化较大, 在转速比较低(0~0.2)时, 五控制杆的抑制效果较好, 三控制杆次之; 随着主圆柱转速比的增加, 五控制杆的抑制效果下降, 三控制杆的抑制效果较好。通过同时调节控制杆放置数量和圆柱转速比, 可以使圆柱横流向振幅降低至0.007D(振幅抑制达98%), 说明旋转-控制杆组合结构对横流向涡激振动抑制效果明

显。四、六控制杆下横流向振幅随转速变化较小,横流向振幅总体上呈现随转速增大而增大的趋势,说明此控制杆数量下旋转-控制杆组合结构对横流向涡激振动的抑制效果不明显,整体抑制效果弱于三、五控制杆。图4(b)为主圆柱顺流向振幅,与裸圆柱相比,控制杆对主圆柱顺流向涡激振动有一定的抑制效果。施加强制旋转后,四、六控制杆时圆柱顺流向振幅随着转速比的增大而上升,但仍低于裸圆柱振幅。三、五控制杆情况下观察到明显的振幅抑制区间(三控制杆,转速比0.4~0.6;五控制杆,转速比0~0.2),顺流向振幅受抑制区间与横流向振幅抑制区间相同。

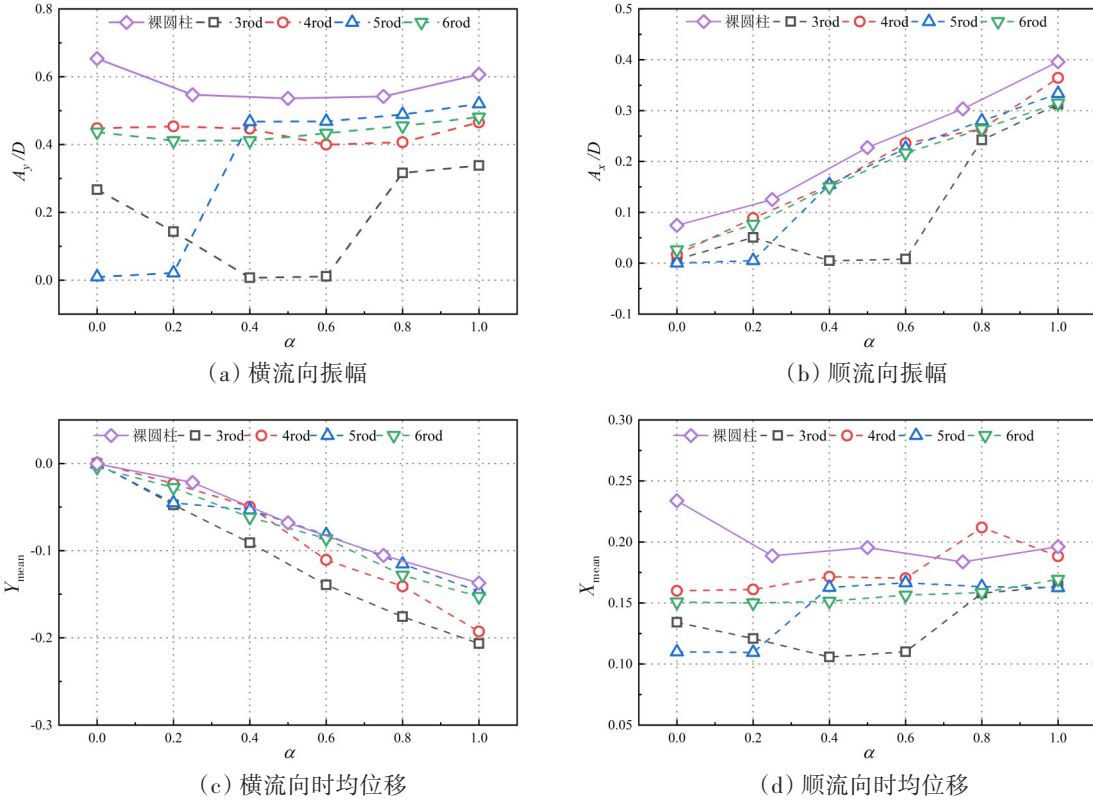


图4 不同转速比与控制杆数量下的主圆柱振动响应

Fig.4 Vibration responses of main cylinder under different rotation rates and with different number of control rods

图4(c)为主圆柱的横流向时均位移,对于无旋转情况,控制杆影响下主圆柱的横流向时均位移较小。随着转速比的增大,由于马格努斯效应,主圆柱横流向时均位移将偏离无旋转情况下的平衡位置,其偏移量随转速比增大而线性增长。其中,裸圆柱随旋转的偏移量较小,三控制杆的横流向时均位移最大,五控制杆时最小。主圆柱的顺流向时均位移如图4(d)所示,无旋转下控制杆对顺流向时均位移的抑制效果明显。随着转速比的增大,顺流向时均位移大致呈现增大的趋势。顺流向时均位移与横流向振幅的抑制保持同步。

3.2 尾流结构分析

主圆柱表面尾流情况如图5所示,在主圆柱从下向上运动至平衡位置时对流场进行捕捉。对于三控制杆,转速比为0.4和0.6时未发生合并,主圆柱表面漩涡脱落受抑制,尾流沿下游方向消散,横流向振幅(图4(a))受显著抑制;在其余情况下,主圆柱下侧边界层与两控制杆的下侧边界层发生合并,在转速比为0和0.2时,随着转速比增大,漩涡合并较不明显,横流向振幅也随之降低。对于四控制杆,在转速比为0、0.2、0.4的情况下,其主圆柱下侧边界层与左右两控制杆的下侧边界发生合并,其余转速比时,其主圆柱下侧边界层只与右侧控制杆合并,主圆柱脱涡明显且转速比的变化对其影响较小,横流向振幅无明显波动;在转速比为0和0.2时,四控制杆尾流发生重组,其小涡重新融合成大涡的进度延迟,其余组无明显现象。对于五控制杆,在转速比为0和0.2时,其主圆柱下侧边界层与三控

制杆的下侧边界发生合并,主圆柱无明显脱涡,横流向振幅接近消失;在转速比为0.4、0.6、0.8和1时,其主圆柱下侧边界层逐渐不与左侧控制杆的下侧边界发生合并;主圆柱出现明显的脱涡,随着转速比的增大,主圆柱的脱涡变得更明显;在转速比为0.4时,横流向振幅瞬时增大,后随转速比的增大,横流向增幅呈缓慢增长趋势。对于六控制杆,在转速比为0时,其主圆柱下侧边界层与右下方控制杆的下侧边界发生合并,漩涡合并发生在漩涡生成期间;在转速比大于0后,其主圆柱下侧边界层与右侧控制杆的下侧边界发生合并,随着转速比的变大,尾流变化较小,横流向增幅无明显变化趋势,顺流向振幅呈线性增长。

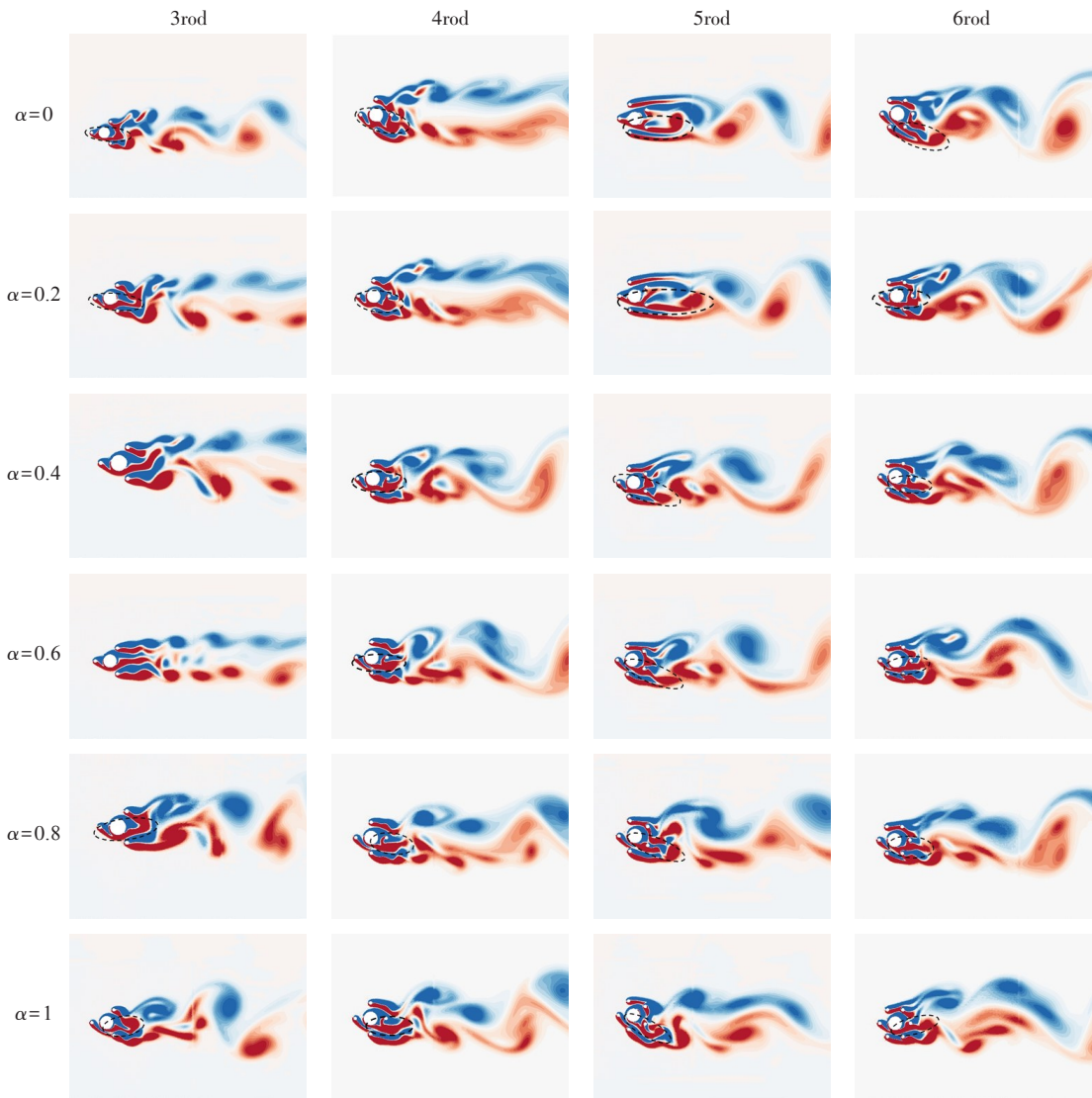


图5 主圆柱表面尾流情况

Fig.5 Wake on the surface of the main cylinder

为进一步讨论三控制杆结构在不同转速比下的振幅变化,图6~8分别给出转速比0、0.6和1时主圆柱振幅与力系数的时程曲线,展示了圆柱单个振动周期内的脱涡情况。在转速比为0和1时,主圆柱流体力随时间成周期变化且升力系数与阻力系数并不同相。由于在圆柱表面发生明显的漩涡生成与脱落,并且主圆柱尾流与控制杆尾流发生合并,圆柱表面力系数发生显著波动,最终引起了圆柱的高振幅响应。在转速比为0.6时,未观察到主圆柱表面发生明显脱涡,同时主圆柱尾流与控制杆尾流未发生合并,因此圆柱表面力系数波动不明显,导致圆柱低振幅响应。

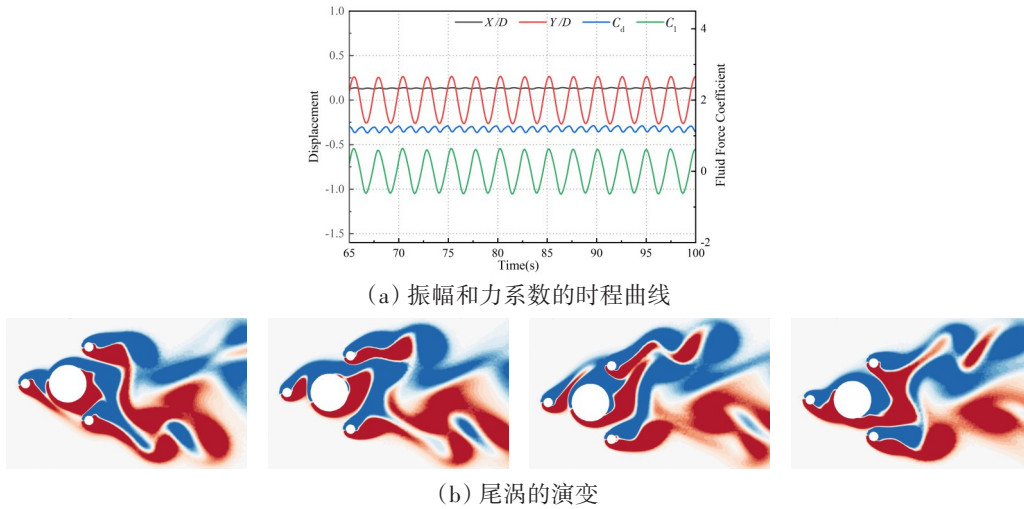


图6 振幅和力系数的时程曲线及尾涡的演变(三控制杆,转速比为0)  
 Fig.6 Time histories of amplitude and force coefficient and wake flow evolution ( $\alpha=0$ )

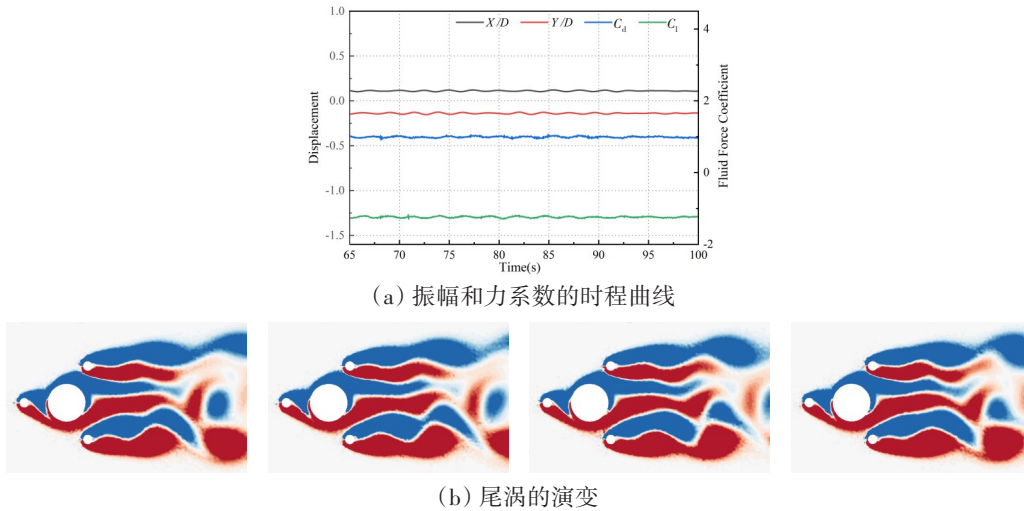


图7 振幅和力系数的时程曲线及尾涡的演变(三控制杆,转速比为0.6)  
 Fig.7 Time histories of amplitude and force coefficient and wake flow evolution ( $\alpha=0.6$ )

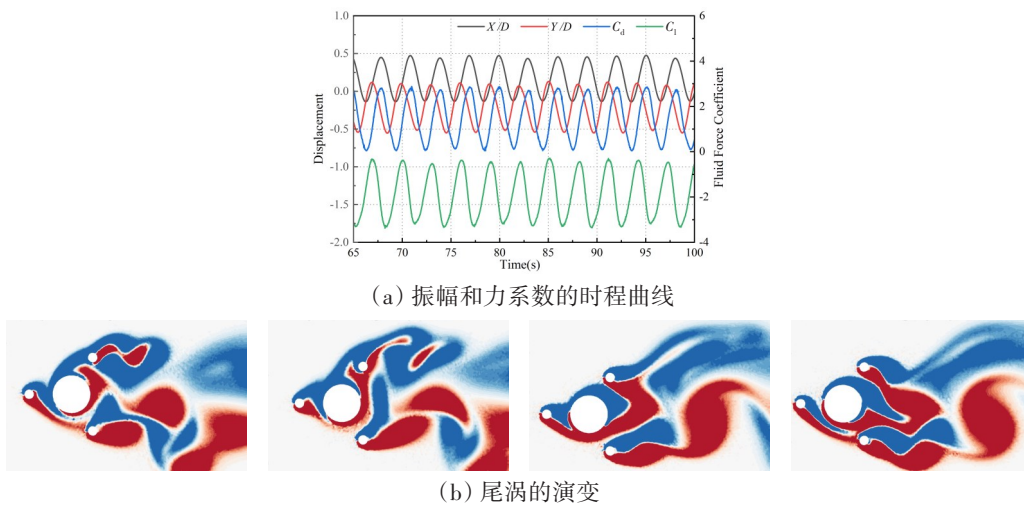


图8 振幅和力系数的时程曲线(三控制杆,转速比为1)  
 Fig.8 Time histories of amplitude and force coefficient and wake flow evolution ( $\alpha=1$ )

### 3.3 圆柱表面流体力分析

不同转速比下三至六控制杆的主圆柱表面流体力变化如图9所示,其中,实线为裸圆柱的表面流体力。图9(a)为主圆柱表面升力均值,转速比在0~1范围内提高时,主圆柱表面升力也同时上升,且以三控制杆时上升趋势最明显。五、六控制杆表面升力较为接近。图9(b)为主圆柱表面阻力均值,无旋转下控制杆对主圆柱阻力均值均有抑制效果,五控制杆的阻力抑制效果最强。随着转速比的增加,裸圆柱阻力均值缓慢降低,但仍高于安装控制杆的情况。四、六控制杆的阻力抑制效果受旋转影响较小,且六控制杆的抑制效果优于四根。五控制杆阻力表现出明显的上升趋势,阻力抑制效果不断降低。在转速比增加过程中,三控制杆在转速比0.4~0.6范围内表现出较好的抑制效果,优于其他工况,但其它范围的转速比,即 $\alpha > 0.6$ 或 $\alpha < 0.4$ ,阻力降低效果会被削弱。

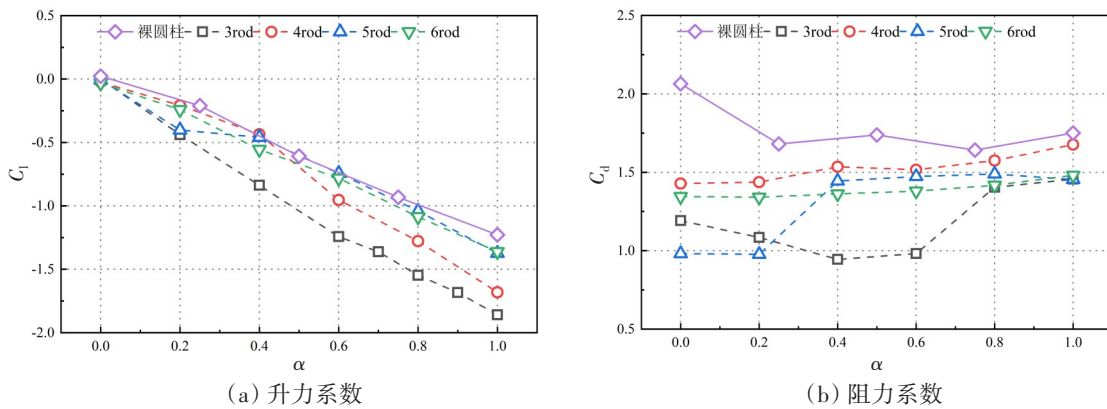


图9 主圆柱表面流体力系数时均值

Fig.9 RMS of fluid force coefficients for main cylinder

## 4 结 论

为研究圆柱涡激振动抑制机理,实现圆柱涡激振动的高效抑制,本文探讨了控制杆-强制旋转组合结构对圆柱涡激振动的抑制效果。通过改变控制杆数量和圆柱转速,对低雷诺数下的圆柱涡激振动及抑制进行了数值模拟研究,对比分析了圆柱表面流场特性、振幅响应和流体力系数等,结果表明:

(1) 在无旋转情况下,控制杆对主圆柱涡激振动具有一定的抑制效果,通过改变控制杆数量,主圆柱横流向振幅在五控制杆下受到显著抑制,三控制杆的振幅抑制效果较弱,四、六控制杆最弱。施加旋转后,五控制杆对主圆柱横流向振幅的抑制能力显著减弱,与四、六控制杆的抑制能力相当;三控制杆振幅抑制能力在转速比为0.4~0.6区间内显著增强,在转速比为0.4时达到98%的振幅抑制效果,转速比为0.8后再次显著减弱;四、六控制杆受转速比的影响较小,保持较弱的主圆柱振幅抑制效果。

(2) 受到控制杆-强制旋转组合结构的影响,圆柱表面流场特性变得复杂。对于三控制杆,随着转速比的增大,主圆柱表面漩涡脱落,在转速比为0.4~0.6时受到抑制,此时主圆柱振幅显著降低;其他转速比下主圆柱漩涡和控制杆漩涡发生合并,并在主圆柱表面发生漩涡脱落,不利于圆柱振幅的进一步抑制;对于五控制杆,转速比为0~0.2时,主圆柱漩涡与控制杆漩涡发生合并,但主圆柱表面仍无漩涡脱落,此时,主圆柱振幅受到显著抑制。

(3) 控制杆对主圆柱表面升力系数均值的影响较小,随着转速比的增大,升力系数均值发生偏移。控制杆明显降低了主圆柱表面的阻力系数均值,在主圆柱振幅受到显著抑制的区间内,主圆柱阻力系数均值也受到显著抑制,表明主圆柱振幅的抑制与阻力系数均值的抑制是同步的。

## 参 考 文 献:

- [1] 吴仕鹏, 王晓飞, 赵福臣, 等. 螺旋列板涡激振动抑制效率试验研究和分析[J]. 中国造船, 2022, 63(03): 159-166.  
Wu Shipeng, Wang Xiaofei, Zhao Fuchen, et al. Experimental study on suppression efficiency of vortex induced vibration for spiral plate[J]. Shipbuilding of China, 2022, 63(03): 159-166. (in Chinese)
- [2] 马焯璇, 宋志友, 徐万海. 基于能量传递规律的海洋立管涡激振动抑制研究[J]. 力学学报, 2022, 54(04): 901-911.  
Ma Yexuan, Song Zhiyou, Xu Wanhai. Study on vortex-induced vibration suppression of marine riser based on energy transfer[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2022, 54(04): 901-911. (in Chinese)
- [3] 肖宏宇, 李芙蓉, 孙铭伯, 等. 整流罩对长柔性立管的涡激振动抑制的数值模拟[J]. 水动力学研究与进展 A 辑, 2022, 37(01): 10-20.  
Xiao Hongyu, Li Furong, Sun Mingbo, et al. Numerical simulation of suppressing vortex-induced vibration of long flexible riser with fairing[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics (Part A), 2022, 37(01): 10-20. (in Chinese)
- [4] 何开孟. 抑制圆柱涡激振动的分离式分流板设计研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2021.  
He Kaimeng. Study on the design of detached splitter plate for suppressing vortex induced vibration of cylinder[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2021.
- [5] 王嘉松. 海洋圆柱结构流激振动及其抑制研究[C]//第三十一届全国水动力学研讨会论文集(上册), 2020.  
Wang Jiasong. Flow-induced vibration and VIV suppression for offshore circular cylinders[C]//Proceedings of the 31st National Conference on Hydrodynamics (Volume I), 2020. (in Chinese)
- [6] 王晓龙, 王刻强, 胡 成. 导流板涡激振动抑制模拟分析[J]. 辽宁化工, 2019(11): 1115-1118.  
Wang Xiaolong, Wang Keqiang, Hu Cheng. Simulation analysis on vortex-induced vibration suppression of guide plate[J]. Liaoning Chemical Industry, 2019(11): 1115-1118. (in Chinese)
- [7] 徐万海, 杨 猛, 芦 燕. 控制杆对柔性圆柱涡激振动的抑制效果研究[J]. 船舶力学, 2019, 23(2): 172-179.  
Xu Wanhai, Yang Meng, Lu Yan. Investigation on the effectiveness of control rods in suppressing VIV of a flexible cylinder [J]. Journal of Ship Mechanics, 2019, 23(2): 172-179. (in Chinese)
- [8] 吴 浩. 多根控制杆对细长柔性立管涡激振动抑制作用的实验及数值研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2013.  
Wu Hao. Experimental and numerical studies on the suppression of vortex induced vibration of long flexible riser by multiple control rods[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013. (in Chinese)
- [9] Lu Y, et al. Cross-flow vortex-induced vibration reduction of a long flexible cylinder using 3 and 4 control rods with different configurations[J]. Applied Ocean Research, 2019, 91: 101900.
- [10] Wu H, et al. Experimental investigation on the suppression of vortex-induced vibration of long flexible riser by multiple control rods[J]. Journal of Fluids and Structures, 2012, 30(1): 115-132.
- [11] Zhu H, Jie Y. Numerical evaluation of passive control of VIV by small control rods[J]. Applied Ocean Research, 2015, 51: 93-116.
- [12] 徐万海, 覃雯琪, 栾英森, 等. 不同措施对倾斜柔性圆柱结构涡激振动抑制研究[C]//第二十九届全国水动力学研讨会论文集(下册), 2018.  
Xu Wanhai, Qin Wenqi, Luan Yingsen, et al. Comparative study of different VIV suppression devices on inclined flexible cylinder[C]//Proceedings of the 29th National Conference on Hydrodynamics(Volume II), 2018. (in Chinese)
- [13] Mittal S, Kumar B. Flow past a rotating cylinder[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2003, 476: 303-334.
- [14] 郭春雨, 宋妙妍, 常 欣, 等. 旋转圆柱尾涡及受力计算方法研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2019(12): 1943-1950.  
Guo Chunyu, Song Miaoyan, Chang Xin, et al. Research on the method of force and wake mode of a rotating cylinder[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2019(12): 1943-1950. (in Chinese)
- [15] Bourguet R. Flow-induced vibrations of a rotating cylinder in an arbitrary direction[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2019, 860: 739-766.
- [16] Mendes P A, Branco F A. Analysis of fluid-structure interaction by an arbitrary Lagrangian-Eulerian finite element formulation[J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 1999, 30(7): 897-919.

- 
- [17] 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: 79–130.
- [18] Shiels D, Leonard A, Roshko A. Flow-induced vibration of a circular cylinder at limiting structural parameters[J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2001, 15(1): 3–21.
- [19] Bourguet R, Jacono D L. Flow-induced vibrations of a rotating cylinder[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2014, 740: 342–380.
- [20] Shen L, Chan E S, Lin P. Calculation of hydrodynamic forces acting on a submerged moving object using immersed boundary method[J]. *Computers & Fluids*, 2009, 38(3): 691–702.