

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.02.017

倾斜 O 形环对圆柱绕流非定常水动力特性影响的数值模拟

武庆泽¹, 冀鸿兰^{1,2}, 牟献友¹, 罗红春¹, 李志军³

(1. 内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院; 2. 黄河流域内蒙古水资源与水环境综合治理协同创新中心;
3. 大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室)

摘要: 采用 Transition SST 湍流模型模拟分析了亚临界雷诺数下不同相对间距和倾斜角的 O 形环对圆柱表面力学特征、尾涡脱落特征和尾迹流动结构的影响机制。结果表明:相对间距为 3/4 的倾斜 O 形环通过延长剪切层、扰乱尾涡脱落的主导频率、减小圆柱前后压差、降低圆柱柱后顺流向脉动流速与湍动能,对圆柱绕流非定常水动力特性控制显著;随着倾斜角的增大,控制效果增强,时均阻力系数、升力系数标准差较无控制工况约分别降低 13% 和 37%,斯特劳哈尔数约降低 7%;相对间距为 3/4、倾斜角为 30° 的倾斜 O 形环表现出最佳控制效果,为最佳倾斜 O 形环结构。

关键词: 倾斜 O 形环; 力学特征; 脉动流速; 湍动能; 尾涡; Transition SST 湍流模型

Numerical simulation of effect of inclined O-rings on unsteady hydrodynamic characteristics of flow around a cylinder

Wu Qingze¹, Ji Honglan^{1,2}, Mou Xianyou¹, Luo Hongchun¹, Li Zhijun³

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University;
2. Autonomous Region Collaborative Innovation Center for Integrated Water Resources and Water Environment in Inner Mongolia Section of Yellow River Basin;
3. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology)

Abstract: The Transition SST turbulence model was used to simulate and analyze the influence mechanisms of O-ring with different relative spacings and inclination angles on the mechanical characteristics of the cylinder surface, vortex shedding characteristics, and wake flow structures at a subcritical Reynolds number. The results show that the inclined O-ring with a relative spacing of 3/4 significantly controls the unsteady hydrodynamic characteristics of flow around a cylinder by extending the shear layer, disrupting the dominant frequency of vortex shedding, reducing the pressure difference between the front and rear of the cylinder, and decreasing the streamwise fluctuating velocity and turbulent kinetic energy behind the cylinder. With the increase of the inclination angle, the control effect is enhanced. Compared with the uncontrolled case, the time-averaged drag coefficient and the standard deviation of lift coefficient are reduced by about 13% and 37%, respectively, and the Strouhal number is reduced by about 7%. The inclined O-ring with a relative spacing of 3/4 and an inclination angle of 30° shows the best control effect, which is the optimal inclined O-ring structure.

Key words: inclined O-ring; mechanical characteristic; fluctuating velocity; turbulent kinetic energy; wake vortex; Transition SST turbulence model

钝体绕流现象广泛存在于自然界及众多工程领域,而圆柱绕流是钝体绕流的典型代表^[1],是理论分析、试验及模拟的主要研究对象。在实际工程中,当流体流经圆柱时会产生结构失稳,出现剪切分离、转捩等现象,使圆柱结构受到顺水流方向的阻力及横向水流方向的周期性升力的作用,同时圆柱下游出现尾涡交替脱落的现象^[2]。当圆柱尾涡脱落频率与圆柱固有频率接近时,便会引起圆柱结构的涡激共振,极易对其结构造成疲劳损伤^[3-4]。因此,研究圆柱绕流控制方法,改变其流动形式,以实现有效减阻和振动控制,具有重要的工程参考价值。

基金项目: 国家自然科学基金项目(52169017,52379014);国家自然科学基金联合基金项目(U23A2012);内蒙古自治区教育厅一流学科科研专项项目(YLXKZX-NND-010)

作者简介: 武庆泽(1997—),男,硕士研究生,主要从事计算流体力学与寒旱区桥墩冲刷研究。E-mail:wuqingze1106@163.com

通信作者: 冀鸿兰(1970—),女,教授,博士,主要从事寒区河冰过程与河流泥沙运动力学研究。E-mail:honglanji@imau.edu.cn

绕流控制方法较多,根据其控制原理可以分为主动控制和被动控制两类。主动控制方法通过引入外界干扰改变初始流场来实现,需要额外的能量输入^[5]。典型主动控制方法包括射流控制法^[6]、旋转圆柱法^[7]等。被动控制与主动控制相反,无需额外的能量输入,一般通过改变物体几何形状或增设控制装置抑制边界层分离、强化流场三维特征及干扰尾涡脱落,以实现绕流控制^[5],如螺旋条^[8-10]、控制杆^[11-12]、凹槽^[13-14]、O 形环^[15-16]等。主动控制虽然能够通过改变能量输入形式直接对流场进行控制,但会导致流场中的水力特性复杂化;相比主动控制,被动控制方法结构简单、维护方便、控制成本低,不需要外界能量输入,被广泛应用于实际工程中^[5]。

螺旋条是较早研究并应用于实际工程的涡激振动抑制装置之一,其控制效果与截面形状、突起高度和螺距有关^[8-10]。其中,3 条螺旋条因覆盖范围广,能够有效破坏规则旋涡,减小升力系数,抑制尾涡脱落,成为主要的试验研究对象^[10]。3 条螺旋条能够在较大范围内扰乱流场,有效减弱涡激振动的幅度和频率,提高结构的稳定性和耐久性,但可能导致螺旋条在降低圆柱绕流阻力方面效果不显著^[9]。控制杆控制方法是通过在圆柱附近的适当位置增设控制杆,形成局部的流动分离和再附着现象,致使尾涡脱落不稳定,从而抑制尾涡脱落。控制杆的控制效果主要与杆的直径、安装位置及数量有关^[11-12]。较大直径的控制杆会对流场产生更强的扰动,从而更有效地抑制尾涡脱落,但过大的直径可能会引入额外的阻力,反而不利于流体的流动^[12]。凹槽控制效果与其结构形状、尺寸和排列方式有关^[13-14]。凹槽内可产生微小涡流,增加边界层的能量,使流体更贴近物体表面,推迟或减弱流动分离^[13],并改变圆柱表面的摩擦力和压力分布,降低流体对物体表面的压力波动,以实现减阻效果^[14]。O 形环作为一种典型的被动控制装置,通过在圆柱表面附加环状结构,能够有效影响边界层特性,改变流体的分离点,以实现有效减阻和振动控制。O 形环对圆柱绕流的控制效果主要取决于其截面形状、尺寸和安装间距^[15-16]。与无控制工况相比,装有特定尺寸 O 形环的圆柱,其尾涡区更长,尾流更窄;在雷诺数为 3.2 万时,尾涡脱落现象基本恒定,随着雷诺数的增大,尾涡脱落频率逐渐升高,最终在高雷诺数下尾涡脱落现象逐渐消失^[16]。目前对 O 形环的研究主要集中在探究其在风荷载作用下对圆柱风雨激振和干索驰振的影响,涡激振动的研究相对较少,研究方法多以物理试验为主。

本文在不破坏圆柱自身结构的基础上,提出一种新型圆柱绕流控制装置,即倾斜 O 形环,并通过改变 O 形环的相对间距和倾斜角,在雷诺数为 11 167(基于圆柱直径)的条件下,采用 Transition SST 湍流模型模拟对比分析了 9 种倾斜 O 形环被动控制装置的圆柱绕流工况和无控制(光滑圆柱)工况,旨在探究不同相对间距和倾斜角的倾斜 O 形环对圆柱绕流力学特征、尾涡脱落特征和尾流结构的影响。

1 数值方法

在数值模拟试验中,顺流向圆柱周围复杂的流体流动以基于 RANS 理论处理后的三维不可压黏性纳维-斯托克斯(Navier-Stokes)方程(N-S 方程)来表征^[17],并将雷诺应力引入 N-S 方程使得流动问题简化,但会导致 N-S 方程不再封闭。本研究中的雷诺数($Re=11\,167$)处于亚临界雷诺数区间内($300\leq Re<1.3\times10^5$),会出现局部湍流和非对称的旋涡脱落,但绕流的边界层仍是层流分离,出现层流向湍流的转捩现象^[18],故本文采用 Transition SST 湍流模型进行模拟分析。该模型是由湍流间歇运输方程、转捩动量厚度雷诺数运输方程与 SST $k-\omega$ 湍流模型组合而成的 4 个方程,可以敏感捕捉流体分离和压力梯度变化,预测边界层转捩^[19],封闭 N-S 方程,确保数值模拟试验的可靠性。

湍流模型在多面体网格上求解。基于压力瞬态求解器,选取 SIMPLEC 算法处理压力与速度的耦合关系,计算压力场。梯度项基于单元体的最小二乘法,构造网格面上的标量值,计算二阶扩散项和速度导数,给定变量的梯度用于离散动量方程中的对流和扩散项;采用二阶格式离散压力对流项;采用二阶迎风格式离散 x,y,z 方向的速度、湍动能和比耗散率;此外,对于黏性项采用二阶精度,时间采用二阶隐式欧拉法离散。各方程收敛的控制残差精度为 1.0×10^{-6} ,残差达到收敛精度即时间步收敛。

2 计算模型及网格

2.1 计算模型

参考 Izadinia 等^[20]局部冲刷防护研究的螺旋条结构参数,倾斜 O 形环结构如图 1(a)所示,其截面为圆形,直径 d 与圆柱直径 D 之比为 0.15,圆柱直径 D 取 4 cm; θ 为倾斜 O 形环与圆柱水平 xOy 截面的夹角,即

倾斜角,分别取 0°、15°、30°;S 为两倾斜 O 形环的相对间距,即 L/D ,两 O 形环之间的间距 L 分别取 2、3、4 cm。螺纹条结构如图 1(b) 所示,其截面形状和直径与倾斜 O 形环结构一致。本文采用螺纹条数(N)为 1、倾斜角为 15°(螺距约为 3.40 cm)和螺纹条数为 2、倾斜角为 30°(螺距约为 7.30 cm)的两种螺纹条结构与倾斜 O 形环结构做对比。

2.2 计算域及网格划分

模型计算域如图 2 所示,笛卡尔坐标系圆心位于圆柱中心处。参照 Hu 等^[21]计算域尺度设置,总长度(x 轴方向)为 $30D$,圆柱中心距离上游入口边界 $10D$,距离下游出口边界 $20D$;总宽度(y 轴方向)为 $20D$,其堵塞比(桥墩与计算域宽度的比值)为 5%,可忽略边壁对圆柱绕流的影响^[22];展向高度(z 轴方向)为 $3D$ 。Lehmkuhl 等^[23]研究表明, $z=0.5\pi D$ 已足以捕获单圆柱流动的最大尺度旋涡。计算域上表面及左右面采用对称边界;下表面及圆柱表面采用无滑移的固定壁面边界;入口采用速度入口边界,来流速度 u_0 为 0.28 m/s;出口为压力出口边界,设置为 0 Pa;计算域中流体介质为标准液态水,密度为 998.2 kg/m^3 ,运动黏度为 $1.003\times10^{-6}\text{ m}^2/\text{s}$; x 轴正方向为顺水流流向,与圆柱正交,未考虑斜向来流。

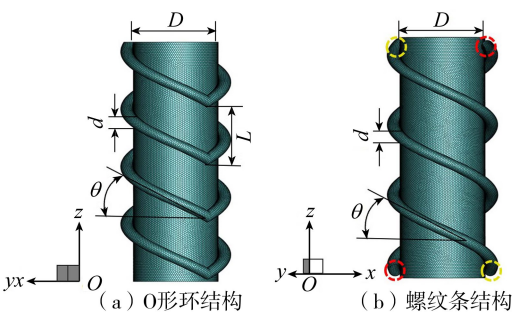


图 1 计算模型及网格示意图
Fig. 1 Schematic diagram of computational model and grid

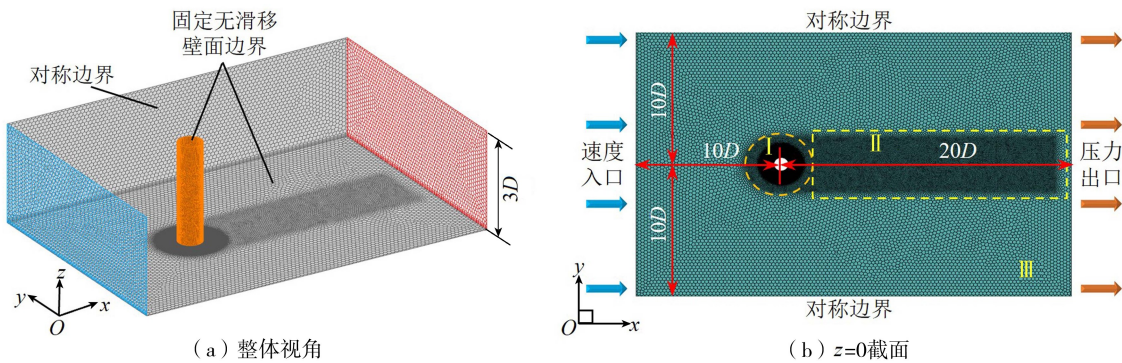


图 2 计算域及网格示意图
Fig. 2 Schematic diagram of calculation domain and grid

参考陈威等^[24]的计算网格模型,采用多面体网格对计算域进行划分,以确保计算精度和优化计算过程。在靠近圆柱(图 2(b)区域 I)及墩后尾流区(图 2(b)区域 II),由于各物理量变化剧烈,对区域 I、II 进行局部加密。对于近壁面边界层网格处理,根据 $y^+ = \sqrt{\tau_w/\rho y}/\nu$ (τ_w 为壁面剪切应力; y^+ 为到壁面处的无量纲距离; y 为第一层的网格高度)确定第一层网格的尺寸^[22]。由于 Transition SST 湍流模型包含 SST $k-\omega$ 湍流模型, y^+ 接近于 1 为佳^[25],故在本文数值模拟中 y^+ 取 1。

2.3 网格与模型验证

在亚临界雷诺数($Re=11\,167$)下先对无控制工况进行计算模拟,探索网格尺寸和时间步长对圆柱绕流时均阻力系数($\bar{C}_d$)、升力系数标准差(C'_l)和斯特劳哈尔(Strouhal)数(Sr)的影响,结果如表 1 所示。综合考虑计算精度和所需时间,选取方案 2 作为其他控制工况的数值模拟方案。

表 1 无控制工况网格尺寸及时间步长独立性验证

Table 1 Verification of independence of grid size and time step size for uncontrolled case								
方案	网格数量/ 10^6	$\Delta x/D$			$\Delta t/s$	$\bar{C}_d$	C'_l	Sr
		区域 I	区域 II	区域 III				
方案 1	2.97	0.054~0.065	0.079~0.095	0.079~0.112	0.005	1.217	0.516	0.190
方案 2	5.50	0.029~0.035	0.054~0.065	0.054~0.112	0.005	1.261	0.589	0.216
方案 3	8.35	0.026~0.031	0.048~0.054	0.054~0.112	0.005	1.267	0.582	0.216
方案 4	5.50	0.029~0.035	0.054~0.065	0.054~0.112	0.001	1.262	0.579	0.215

注: Δx 为网格尺寸大小; Δt 为时间步长。

为进一步验证所选湍流模型、边界条件、求解设置和计算域尺寸在圆柱绕流数值模拟中的适用性,在亚临界雷诺数为 5 000、10 000 和 20 000 的条件下,对方案 2 进行数值模拟并与相关研究的结果进行对比,结果如表 2 所示。由表 2 可知,本文计算结果与试验结果^[26-27]和数值模拟结果^[22,28]基本一致,验证了所采用的数值模型及网格划分的可行性。此外,不同雷诺数条件下的结果一致性进一步证明所选方法在亚临界雷诺数下捕捉圆柱绕流主要水动力学特征的稳定性。

图 3 和图 4 分别为雷诺数为 10 000 条件下对方案 2 在 $z=3D$ 截面处进行数值模拟得到的时均压力系数($\bar{C}_p$)和无量纲顺流向时均流速(u/u_0)分布曲线(图 3 中 α 为压力测点夹角)。通过与相关文献^[22,28-29]的结果对比分析可知, $\bar{C}_p$ 与 u/u_0 的变化趋势基本一致,这进一步表明 Transition SST 湍流模型能够较好地模拟圆柱表面压力分布与尾迹区的流动特征,从而证明该湍流模型模拟亚临界雷诺数下的圆柱绕流具有较好的适用性。

表 2 亚临界雷诺数下圆柱绕流数值模型验证

Table 2 Validation of numerical model for flow around a cylinder in subcritical Reynolds

<i>Re</i>	数据来源	$\bar{C}_d$	<i>Sr</i>
5 000	本文研究	1.04	0.20
	Ozkan 等 ^[26]	1.07	0.21
	Soyler 等 ^[22]	1.12	0.20
10 000	本文研究	1.24	0.21
	吴应湘等 ^[27]	1.20	0.19~0.205
	Wornom 等 ^[28]	1.22	0.20
20 000	本文研究	1.25	0.20
	Wornom 等 ^[28]	1.27	0.19
	Soyler 等 ^[22]	1.21	

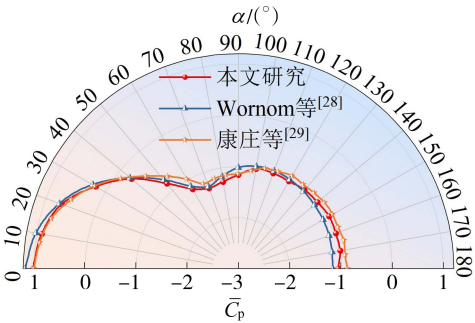


图 3 亚临界雷诺数下圆柱表面时均压力系数分布曲线
Fig. 3 Distribution curves of time-averaged pressure coefficient on cylinder surface in subcritical Reynolds

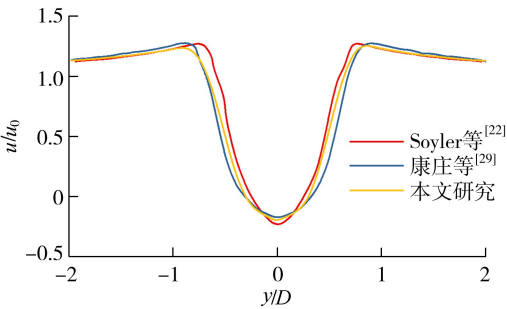


图 4 亚临界雷诺数下 $x/D=1$ 处 u/u_0 分布曲线
Fig. 4 u/u_0 distribution curves at position $x/D = 1$ in subcritical Reynolds

2.4 数据选取

在数值模拟过程中,每个工况模拟流体流动时长为 40 s,重复模拟 3 次,以确保数值模拟的准确性。此外还模拟了流动时间为 100 s 的典型案例。如图 5 所示,升力系数(C_l)和阻力系数(C_d)在 10 s 之后趋于周期性变化,因此文中的瞬时数据选取流动时间为 25 s 的计算值,时均值和标准差是在 15~34 s 时段内计算得到的;为确定圆柱周围压力分布,在 $z=2D$ 的圆柱表面,以 $x=0.5D$ 处为起点,顺时针每隔 10° 设置一个压力系数检测点。

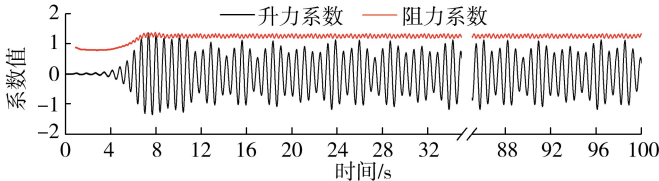


图 5 典型工况 100 s 升力系数和阻力系数时程曲线
Fig. 5 Time history curves of lift coefficient and drag coefficient for 100 s under typical working conditions

3 结果与分析

3.1 圆柱表面力学特征变化

3.1.1 压力系数

与无控制工况相比,设有控制装置的圆柱表现出不同的力学特性。以往的研究表明,光滑圆柱的阻力由压力阻力和摩擦阻力组成,其中压力阻力占总阻力的 98% 以上^[13]。图 6 为不同控制工况下各测点的时均压

力系数($\bar{C}_p$),由于压力系数分布具有对称性,图中仅给出 $0^\circ \sim 180^\circ$ 范围内各测点的时均压力系数。

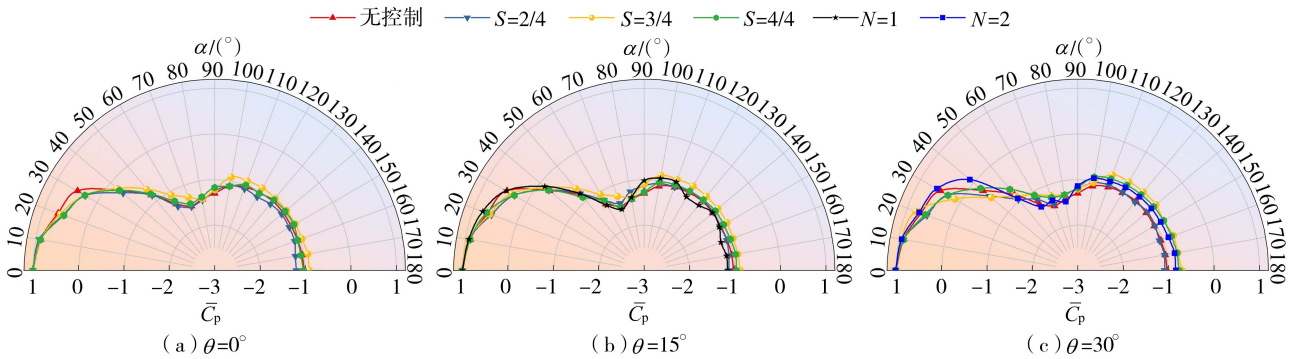


图 6 不同工况圆柱表面时均压力系数分布

Fig. 6 Time-averaged pressure coefficient distribution on cylinder surface under different working conditions

由图 6 可知,随着压力测点夹角(α)的增大,圆柱测点 $\bar{C}_p$ 表现出先减小后增大的变化规律。由于圆柱上下表面水流分离的剪切层作用,导致圆柱近尾流区出现再循环区域,使得圆柱背水流 $100^\circ \sim 180^\circ$ 范围内测点的 $\bar{C}_p$ 几乎不再变化。与无控制工况相比,倾斜 O 形环对圆柱表面的 $\bar{C}_p$ 有一定的控制效果。 $S=3/4$ 时 $\theta=0^\circ$ 、 15° 、 30° 和 $S=4/4$ 时 $\theta=15^\circ$ 、 30° 的倾斜 O 形环可以增大圆柱柱后的 $\bar{C}_p$,降低圆柱前后的压差,从而有效减小圆柱绕流阻力。其中 $S=3/4$ 、 $\theta=30^\circ$ 的倾斜 O 形环控制工况的圆柱柱后 $\bar{C}_p$ 相比无控制工况增大幅度最大,在 $\alpha=180^\circ$ 时, $\bar{C}_p$ 增大约 32%。 $N=2$ 、 $\theta=30^\circ$ 的螺旋条亦可以提高圆柱柱后的压力系数,但与 $S=3/4$ 、 $\theta=30^\circ$ 的倾斜 O 形环相比,其对圆柱柱后的压力系数控制效果相对较弱,在 $\alpha=180^\circ$ 时,两种工况 $\bar{C}_p$ 相差约 20%。

3.1.2 阻力系数和升力系数

不同工况圆柱时均阻力系数($\bar{C}_d$)、阻力系数标准差(C'_d)、时均升力系数绝对值($|\bar{C}_l|$)和升力系数标准差(C'_l)变化情况如表 3 所示,其中 C'_d 反应阻力系数的波动情况。由表 3 可知,倾斜 O 形环对圆柱绕流 $\bar{C}_d$ 有显著的影响,随着相对间距 S 的增大 $\bar{C}_d$ 呈现先减后增的趋势。与无控制工况相比, $S=3/4$ 时 $\theta=0^\circ$ 、 15° 、 30° 和 $S=4/4$ 时 $\theta=15^\circ$ 、 30° 的倾斜 O 形环能够有效降低 $\bar{C}_d$ 和 C'_d 。其中 $S=3/4$ 、 $\theta=30^\circ$ 的倾斜 O 形环对圆柱绕流阻力系数控制效果最好, $\bar{C}_d$ 和 C'_d 分别降低约 13% 和 47%。粗糙表面已被证明能够控制流动分离,使分离点向下游移动,削弱涡流强度并减小阻力和升力^[30]。而倾斜 O 形环可以视为和表面粗糙度相似的外界扰动,通过增大 θ 、改变 S ,使得圆柱表面粗糙度沿轴向变化,从而使圆柱柱后流动呈现三维特性。相比之下,Hao 等^[31]通过螺旋凹槽提高圆柱表面粗糙度,其 $\bar{C}_d$ 降低 6.6%,控制效果小于倾斜 O 形环。Bingham 等^[32]研究表明,在雷诺数为 9 500 的条件下,控制杆控制工况与无控制相比,其 $\bar{C}_d$ 降低 8%。在相近雷诺数情况下,倾斜 O 形环控制效果优于控制杆。

表 3 不同工况圆柱阻力系数和升力系数变化

Table 3 Variations of drag coefficient and lift coefficient of cylinder under different working conditions

工况	$\bar{C}_d$	C'_d	$ \bar{C}_l $	C'_l
无控制	1.262	0.040	0.519	0.589
$N=1, \theta=15^\circ$	1.396	0.058	0.574	0.623
$N=2, \theta=30^\circ$	1.221	0.027	0.432	0.493
$S=2/4, \theta=0^\circ$	1.475	0.060	0.541	0.606
$S=3/4, \theta=0^\circ$	1.210	0.029	0.473	0.520
$S=4/4, \theta=0^\circ$	1.272	0.036	0.515	0.577
$S=2/4, \theta=15^\circ$	1.369	0.050	0.538	0.599
$S=3/4, \theta=15^\circ$	1.178	0.026	0.438	0.488
$S=4/4, \theta=15^\circ$	1.237	0.033	0.507	0.566
$S=2/4, \theta=30^\circ$	1.335	0.044	0.523	0.590
$S=3/4, \theta=30^\circ$	1.096	0.021	0.363	0.371
$S=4/4, \theta=30^\circ$	1.205	0.024	0.427	0.451

除 $S=2/4$ 时 $\theta=0^\circ$ 、 15° 、 30° 的倾斜 O 形环控制工况外,其余工况均可以降低 $|\bar{C}_l|$ 和 C'_l ,对圆柱绕流具有一定的控制效果。其中 $S=3/4$ 、 $\theta=30^\circ$ 的倾斜 O 形环对圆柱绕流升力系数控制效果最佳, $|\bar{C}_l|$ 和 C'_l 分别降低约 30% 和 37%。相较而言, $N=2$ 、 $\theta=30^\circ$ 的螺旋条虽可以减小升力系数和阻力系数,但控制效果较弱;而 $N=1$ 、 $\theta=15^\circ$ 的螺旋条对圆柱周围流场扰动过于频繁,导致圆柱升力系数和阻力系数增大。在 Takeshi 等^[33]的研究中, $P/D=8$ 、 $d/D=0.1$ (P 为螺距, d 为螺旋条直径)的螺旋条显著降低了升力系数及其展向相关性,但阻力系数几乎没有变化。这表明,在粗糙表面的流动控制中,过大的粗糙度和粗糙不足对圆柱绕流控制的效果均有一定的局限性,需在设计中权衡扰动强度与流动稳定性。

3.2 尾涡脱落特征

为分析不同倾斜 O 形环对 S_r 的影响,本文采用快速傅里叶变换(FFT)对不同工况下 0~34 s 内升力系数(C_l)波动情况进行功率谱密度(PSD)分析。如图 7 所示,与无控制工况相比,除 $S=2/4, \theta=0^\circ$ 的倾斜 O 形环和 $N=1, \theta=15^\circ$ 的螺纹条控制工况外,其余工况均可降低 PSD 峰值。当 $\theta=0^\circ$ 时,倾斜 O 形环对流体的扰动较小;随着 θ 的增大,倾斜 O 形环延长流体的绕流距离,对流体流动产生更强的扰动,同时扰乱尾涡脱落的主导频率,减小流体的动力波动,降低 PSD 峰值;当 $\theta=30^\circ$ 时,倾斜 O 形环具有最佳的降低效果。 $S=3/4, \theta=30^\circ$ 的倾斜 O 形环与 $N=2, \theta=30^\circ$ 的螺纹条相比,PSD 峰值降低约 21%;而 $N=1, \theta=15^\circ$ 螺纹条则增大 PSD 峰值,相较于无控制工况,增幅约为 3%。

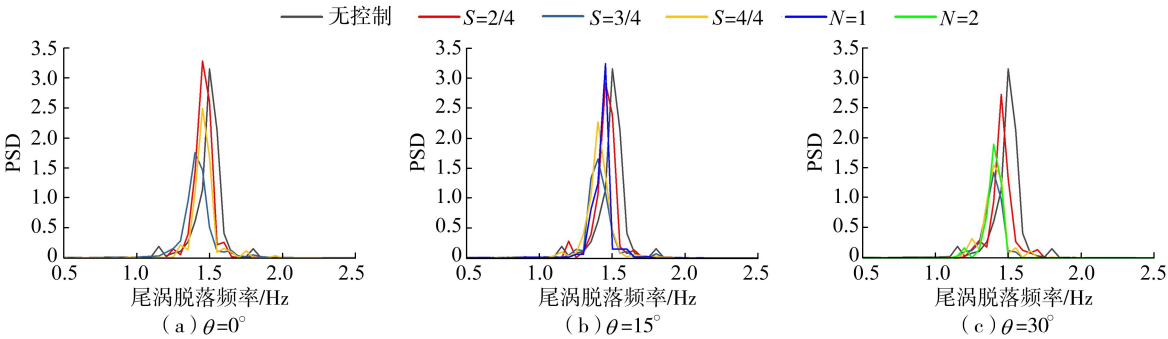


图 7 不同工况圆柱升力系数功率谱密度

Fig. 7 Power spectral densities of lift coefficient of cylinder under different working conditions

倾斜 O 形环的相对间距 S 亦是控制圆柱绕流的一个重要因素。由图 7 可知, $S=3/4$ 的倾斜 O 形环可显著降低 PSD 峰值及 S_r 。相比之下, $S=2/4, 4/4$ 的倾斜 O 形环对圆柱绕流的控制效果相对较差, PSD 峰值的降低效果均不显著;当相对间距较小时,倾斜 O 形环对流体的扰动过于频繁,导致更多尺度的旋涡结构进入流场,增加了流体流动的复杂性;而当相对间距过大时,倾斜 O 形环对流体的扰动强度不足,难以有效破坏流场中尾涡脱落的主频率。总之,与无控制工况相比, $S=3/4, \theta=30^\circ$ 的倾斜 O 形环对 PSD 峰值和 S_r 降低效果最佳,约分别降低 55% 和 6%,即为最佳倾斜 O 形环结构。

3.3 尾流流动结构变化特征

3.3.1 顺流向脉动流速变化特征分析

图 8 为不同工况 $z=2D$ 截面处顺流向无量纲脉动流速($u^*=u_{rms}/u_0$, 其中 u_{rms} 为顺流向脉动流速,是衡量湍流强度的重要参数,反映流体速度波动幅度的大小)云图,图中黑色虚线为 $u/u_0=0$ 的等值线; L_r 为回流

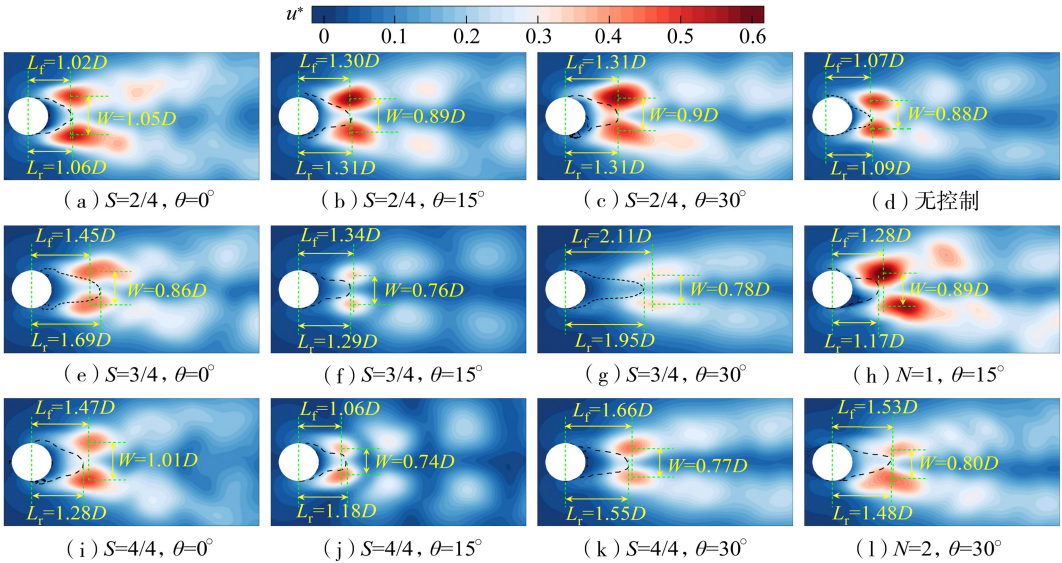


图 8 不同工况顺流向无量纲脉动流速云图

Fig. 8 Contours of streamwise dimensionless fluctuating velocity under different working conditions

区顺流向长度,定义为 $u/u_0 = 0$ 等值线上的点到圆柱中心的最长距离^[34]; L_r 为旋涡长度,定义为 u^* 最大值的点到圆柱中心的最长距离^[35]; W 为尾迹宽度,定义为圆柱中心线两侧 u^* 最大值点之间的距离^[36]。

由图 8 可知,较大的 u^* 集中分布在柱体尾迹区域,在尾涡的形成过程中产生显著的顺流向脉动流动。倾斜 O 形环控制工况 u^* 在柱体中心线附近呈现双峰对称分布;而螺纹条属于非对称结构, θ 和 N 改变流体绕流路径,导致尾流结构 u^* 峰值发生偏转,这与 Ekmekci 等^[37]的研究结果一致。与无控制工况相比,除 $S = 2/4$ 、 $\theta = 0^\circ$ 的倾斜 O 形环控制工况外,其余工况通过改变边界层的分离位置,使得剪切层在卷起之前向下游延伸,从而使尾涡的形成位置远离圆柱, L_r 和 L_f 延长。这一效应降低了升力系数和阻力系数,减小尾涡脱落频率。而螺纹条诱导流体沿螺旋方向产生附加旋涡,尾流结构 u^* 峰值发生偏转, L_r 和 L_f 延长。与其他倾斜 O 形环工况相比, $S = 3/4$ 、 $\theta = 30^\circ$ 的倾斜 O 形环控制工况的 L_r 和 L_f 增长幅度最大,较无控制工况分别延长 0.86D 和 1.04D。

尾迹宽度 W 是衡量圆柱尾迹大小的重要指标。与无控制工况相比, $S = 3/4$ 时 $\theta = 0^\circ$ 、 15° 、 30° 和 $S = 4/4$ 时 $\theta = 15^\circ$ 、 30° 的倾斜 O 形环控制工况在不同程度上降低了圆柱尾迹的 W 和 u^* 。主要原因在于,在一定的 S 和 θ 下倾斜 O 形环能够有效地分流,抑制边界层分离,降低流速梯度,从而减小圆柱的 W 和 u^* 。然而对于 $S = 2/4$ 的倾斜 O 形环控制工况和 $N = 1$ 、 $\theta = 15^\circ$ 的螺纹条控制工况, W 和 u^* 较无控制工况均有所增大。主要原因是,当相对间距较小时,倾斜 O 形环对流体的扰动过于频繁,增强剪切层的不稳定性,使得剪切层中的速度梯度增大,容易诱发剪切层内旋涡的形成和脱落,进而在圆柱后方产生强烈且集中的能量旋涡,导致升力和阻力增大。而螺纹条的螺距由 θ 决定,即 θ 越小,螺距越小;当 $\theta = 15^\circ$ 时,螺纹条螺距约为 0.84D,对流体扰动频繁,导致柱后 u^* 峰值和 W 增大。

3.3.2 湍动能变化特征分析

湍动能是描述湍流中能量分布的重要物理量,反映流体中速度脉动的强度,与圆柱周围流体中旋涡的形成密切相关。图 9 为 $z = 2D$ 截面处不同工况无量纲湍动能(k)云图。

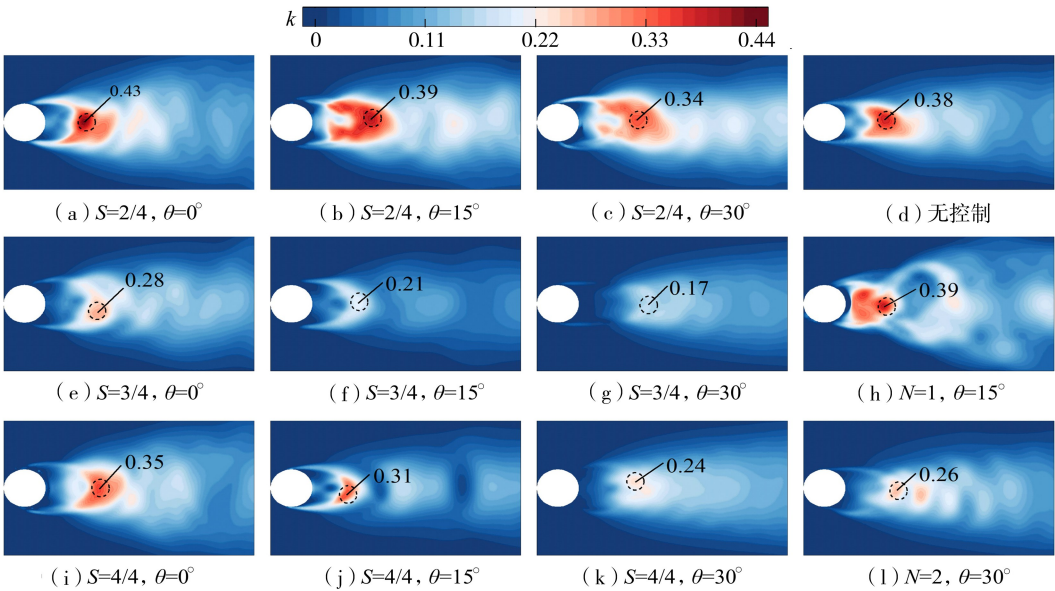


图 9 不同工况无量纲湍动能云图

Fig. 9 Contours of dimensionless turbulent kinetic energy under different working conditions

由图 9 可见, k 从圆柱柱后开始向下游增大,在尾迹区达到最大值,然后向下游方向逐渐减小。在无控制工况下, k 峰值较高,主要集中在圆柱尾迹区。相对于无控制工况,倾斜 O 形环改变了流体绕流路径和扰动特性,湍动能峰值普遍降低,且其分布区域发生显著变化。 $S = 3/4$ 和 $S = 4/4$ 的倾斜 O 形环不仅降低了圆柱柱后的 k ,使得 k 峰值向下游延伸,同时也有效缩小了 k 较大水体的分布面积。其中 $S = 3/4$ 、 $\theta = 30^\circ$ 的倾斜 O 形环控制工程对圆柱绕流的控制效果最佳,相比无控制和 $N = 2$ 、 $\theta = 30^\circ$ 的螺纹条控制工况, k 分别减小 55.26% 和 34.62%。而 $S = 2/4$ 时 $\theta = 0^\circ$ 、 15° 的倾斜 O 形环与 $N = 1$ 、 $\theta = 15^\circ$ 的螺纹条对圆柱周围流体扰动过于频繁,导致圆柱柱后尾迹旋涡混乱,增大 k 峰值,扩大了 k 较大水体的分布面积。对比图 8 和图 9,尾迹流

场 u^* 增大,同时伴随着 k 增大。

3.3.3 展向涡结构特征分析

图 10 为不同工况 $z=2D$ 截面处无量纲时均展向涡度($\omega^*=\bar{\omega}D/u_0$,其中 $\bar{\omega}$ 为平均涡度)分布云图。流体流经圆柱表面分离形成圆柱剪切层,上下剪切层存在相反的涡度^[2]。

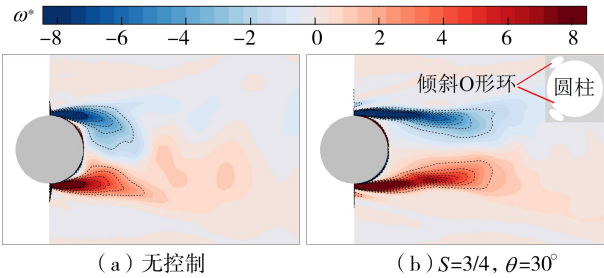


图 10 不同工况无量纲时均展向涡度云图

Fig. 10 Contours of dimensionless time-averaged spanwise vorticity under different working conditions

由图 10 可知,由于倾斜 O 形环附着在圆柱表面,分流圆柱表面流体,使得圆柱上下剪切层耦合被抑制。因此,剪切层向下游延展,并在远离圆柱的位置处上下剪切层卷起形成旋涡。而剪切层延展则会增强圆柱柱后流体的逆向流动,延长回流区,提高流体的夹带和扩散能力^[38],这与图 8 的结果一致。此外,倾斜 O 形环抑制了圆柱剪切层的失稳,使尾涡形成位置后移,从而延缓尾涡的脱落, Sr 减小。Gerrard^[39]建立了 Sr 与尾涡长度和剪切层内涡度横向扩散之间的关系,通过定义与剪切层厚度相关的扩散长度来量化扩散,并指出扩散长度越大,尾涡形成所需的时间越长,因此 Sr 越小;Gerrard^[39]还推断,旋涡长度越长,扩散长度越长,因为在尾涡形成之前,剪切层会经历进一步的扩散。

圆柱尾流的流动特性主要受尾涡形成与发展的影响。图 11 为不同工况 $z=2D$ 截面处无控制工况下尾涡从形成到脱落的一个周期时间步(T)的瞬时无量纲展向涡度($\omega'=\omega D/u_0$,其中 ω 为涡度)分布云图,其中位置 I、II、III 显示了旋涡的生成、演变和脱落过程;“控制工况”指最佳倾斜 O 形环控制工况。由图 11 可知,边界层从圆柱表面驻点处开始形成,沿圆柱表面逐渐增厚,并在分离点处脱离圆柱表面,形成上下剪切层。这些剪切层相互耦合、卷曲,形成旋涡,并不断向下游发展,最终形成大尺度旋涡。与无控制工况瞬时展向涡度云图相比,最佳倾斜 O 形环控制工况的尾迹涡度尺度明显减小,上下波动幅度减弱,下游涡量减少。此外,对比位置 III 和 III' 的尾涡可以发现位置 III 的尾涡已经明显脱落,而位置 III' 尾涡与上游旋涡仍有黏连,尚未完全脱落。由此可见,较无控制工况,最佳倾斜 O 形环控制工况的尾涡脱落周期更长。倾斜 O 形环诱导的尾涡改变了原有的旋涡脱落模式,拉长剪切层,使得尾涡脱落更加稳定, Sr 减小并有效抑制尾涡脱落的波动幅度和强度。

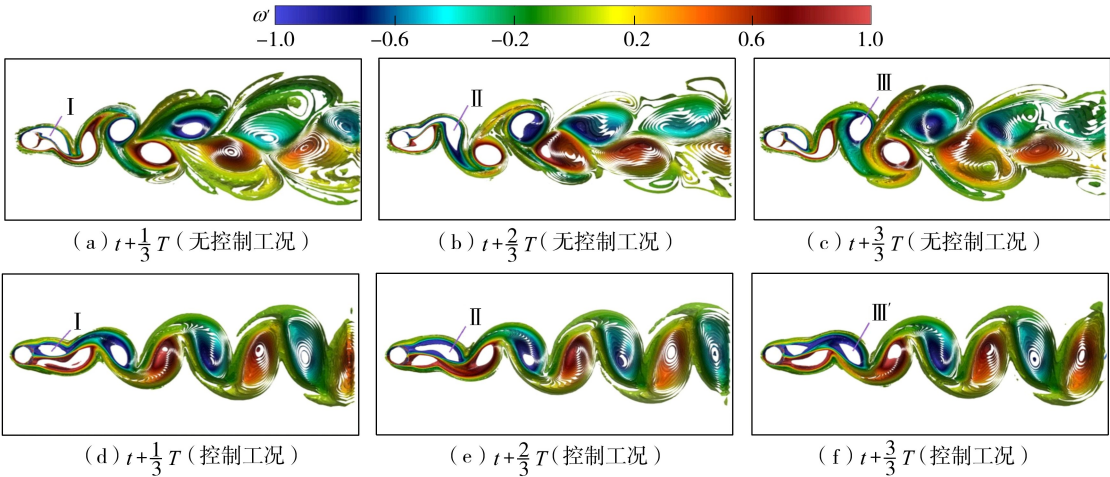


图 11 不同工况瞬时无量纲展向涡度云图

Fig. 11 Contours of instantaneous dimensionless spanwise vorticity under different working conditions

4 结 论

- a. 与无控制和螺纹条控制工况相比, $S=3/4$ 、 $\theta=30^\circ$ 的倾斜 O 形环为最佳被动控制结构,能够显著控制圆柱绕流水动力特性。相比于无控制工况,该结构的时均压力系数 $\bar{C}_p(\alpha=180^\circ)$ 约增大 32%,时均阻力系数 $\bar{C}_d$ 约降低 13%,升力系数标准差 C_l' 约降低 37%,PSD 峰值及斯特劳哈尔数 Sr 分别约降低 55%和 7%。
- b. $S=3/4$ 和 $S=4/4$ 的倾斜 O 形环在控制圆柱绕流流场方面效果更佳。较小的相对间距导致倾斜 O 形环对流体扰动过于频繁,增加了流动的复杂性,使得剪切层中的速度梯度增大,导致圆柱后方存在强烈且集中的能量旋涡,进而增大圆柱表面的升力和阻力。
- c. 倾斜 O 形环通过改变倾斜角增强圆柱柱后流场的三维特性对尾迹结构有显著影响,使得剪切层在凸起处分离,然后重新附着到圆柱表面,最终在更远的下游位置与圆柱分离,延长回流区顺流向长度和旋涡长度,并减小尾迹宽度,降低无量纲脉动流速和湍动能。

参考文献:

[1] 刘健,邹琳,陶凡,等. 串列双锥柱绕流流动特性的大涡模拟研究[J]. 力学学报,2022,54(5):1209-1219. (Liu Jian,Zou Lin,Tao Fan,et al. Large eddy simulation of flow past two conical cylinders in tandem arrangement[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics,2022,54(5):1209-1219. (in Chinese))

[2] Williamson C H K. Vortex dynamics in the cylinder wake[J]. Annual Review of Fluid Mechanics,1996,28(1):477-539.

[3] 廖绍凯,张研,陈达. 基于 S-A 模型的覆冰输电线绕流数值分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(1):110-117. (Liao Shaokai,Zhang Yan,Chen Da. Numerical analysis of flow past iced conductor based on S-A model [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(1):110-117. (in Chinese))

[4] Sumer B M, Fredse J. Hydrodynamics around cylindrical structures[M]. Singapore:World Scientific,1997.

[5] Choi H,Jeon W P, Kim J. Control of flow over a bluff body[J]. Annual Review of Fluid Mechanics,2008,40:113-139.

[6] Liu Yu,Li Peng,Wang Yu,et al. Experimental investigation on the vortex-induced vibration of the vertical riser fitted with the water jetting active vibration suppression device[J]. International Journal of Mechanical Sciences,2020,177:105600.

[7] 刘天羽,胡海豹,宋健,等. 均匀旋转对圆柱水动力及流动结构的影响[J]. 力学学报,2024,56(4):928-942. (Liu Tianyu, Hu Haibao,Song Jian,et al. Hydrodynamics and flow structures of a uniformly rotating circular cylinder[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics,2024,56(4):928-942. (in Chinese))

[8] Sui Juan,Wang Jiasong,Liang Shengping,et al. VIV suppression for a large mass-damping cylinder attached with helical strakes [J]. Journal of Fluids and Structures,2016,62:125-146.

[9] Huang Shan,Sworn A. Hydrodynamic coefficients of two fixed circular cylinders fitted with helical strakes at various staggered and tandem arrangements[J]. Applied Ocean Research,2013,43:21-26.

[10] Quen K L,Abu A,Kato N,et al. Performance of two- and three-start helical strakes in suppressing the vortex-induced vibration of a low mass ratio flexible cylinder[J]. Ocean Engineering,2018,166:253-261.

[11] Cicolin M M,Buxton O R H,Assl G R S,et al. The role of separation on the forces acting on a circular cylinder with a control rod [J]. Journal of Fluid Mechanics,2021,915(433):A33.

[12] Jiménez-González J,Huera-Huarte F. Vortex-induced vibrations of a circular cylinder with a pair of control rods of varying size [J]. Journal of Sound and Vibration,2018,431:163-176.

[13] Yan Fei,Yang Haifeng,Wang Lihui. Study of the drag reduction characteristics of circular cylinder with dimpled surface[J]. Water,2021,13(2):197-217.

[14] Zhou Bo,Wang Xikun,Guo Wei,et al. Experimental study on flow past a circular cylinder with rough surface [J]. Ocean Engineering,2015,109:7-13.

[15] Nakamura H,Igarashi T. Omnidirectional reductions in drag and fluctuating forces for a circular cylinder by attaching rings[J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics,2007,96(6):887-899.

[16] Lim H,Lee S. Flow control of a circular cylinder with O-rings[J]. Fluid Dynamics Research,2004,35(2):107-122.

[17] 祝志文,喻鹏,刘震卿. 桥台局部冲刷形态的 CFD 动态仿真[J]. 土木工程学报,2014,47(3):103-111. (Zhu Zhiwen,Yu Peng,Liu Zhenqing. On CFD dynamic simulation of local scour around bridge abutments[J]. China civil Engineering Journal, 2014,47(3):103-111. (in Chinese))

[18] 杨海凤. 表面布置凹坑结构的圆柱绕流及其减阻特性研究[D]. 镇江:江苏科技大学,2021.

[19] 雷娟棉,谭朝明. 基于 Transition SST 模型的高雷诺数圆柱绕流数值研究[J]. 北京航空航天大学学报,2017,43(2):207-217. (Lei Juanmian,Tan Zhaoming. Numerical simulation for flow around circular cylinder at high Reynolds number based on Transition SST model[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics,2017,43(2):207-217. (in Chinese))

[20] Izadinia E,Heidarpour M. Simultaneous use of cable and collar to prevent local scouring around bridge pier[J]. International Journal of Sediment Research,2012,27(3):394-401.

[21] Hu Xiaofeng,Zhang Xinshu,You Yunxiang. On the flow around two circular cylinders in tandem arrangement at high Reynolds numbers[J]. Ocean Engineering,2019,189:106301.

[22] Soyler M,Ozalp C,Polat C, et al. Experimental and numerical investigation of flow structure of grooved cylinder[J]. Ocean Engineering,2022,264(15):1018-1030.

[23] Lehmkühl O,Rodríguez I,Borrell R, et al. Unsteady forces on a circular cylinder at critical Reynolds numbers[J]. Physics of fluids,2014,26(12):125110.

[24] 陈威,刘炳文,刘家睿,等. 控制杆-强制旋转对圆柱涡激振动的抑制作用研究[J]. 船舶力学,2024,28(5):705-715. (Chen Wei,Liu Bingwen,Liu Jiarui, et al. Suppression of cylindrical vortex induced vibration by control rods and forced rotation[J]. Journal of Ship Mechanics,2024,28(5):705-715. (in Chinese))

[25] Stringer R,Zang J,Hillis A. Unsteady RANS computations of flow around a circular cylinder for a wide range of Reynolds numbers[J]. Ocean Engineering,2014,87:1-9.

[26] Ozkan M G,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,2017,134:35-49.

[27] 吴应湘,林黎明,钟兴福. 带有新型涡激振动抑制罩的圆柱体的水动力特性[J]. 力学学报,2016,48(2):307-317. (Wu Yingxiang,Lin Liming,Zhong Xingfu. Investigation in hydrodynamics of a circular cylinder with the new suppressing shroud for vortex-induced vibration[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics,2016,48(2):307-317. (in Chinese))

[28] Wornom S,Ouvrard H,Salveti V M, et al. Variational multiscale large-eddy simulations of the flow past a circular cylinder: Reynolds number effects[J]. Computers and Fluids,2011,47(1):44-50.

[29] 康庄,张橙,张立健,等. 基于改进湍流模型的圆柱涡激振动数值模拟研究[J]. 哈尔滨工程大学学报,2018,39(5):837-844. (Kang Zhuang,Zhang Cheng,Zhang Lijian, et al. Numerical simulation of vortex-induced vibration of cylinder based on improved turbulence model[J]. Journal of Harbin Engineering University,2018,39(5):837-844. (in Chinese))

[30] Servini P, Smith F T, Rothmayer A P, et al. The impact of static and dynamic roughness elements on flow separation[J]. Journal of Fluid Mechanics,2017,830:35-62.

[31] Hao Zhiyong,Sun Chenlin,Lu Yucen, et al. Suppression of vortex-induced vibration and phase-averaged analysis of the wake generated by a circular cylinder covered with helical grooves[J]. Fluids,2022,7(6):7060194.

[32] Bingham C,Morton C,Martinuzzi J R. Influence of control cylinder placement on vortex shedding from a circular cylinder[J]. Experiments in Fluids,2018,59(10):1-22.

[33] Takeshi I,Tian L. Numerical study on suppression of vortex-induced vibration of circular cylinder by helical wires[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics,2020,197:104081.

[34] Duan Fan,Wang Jinjun. Fluid-structure-sound interaction in noise reduction of a circular cylinder with flexible splitter plate [J]. Journal of Fluid Mechanics,2021,920:A6.

[35] Lam K,Wang F H,So R M C. Three-dimensional nature of vortices in the near wake of a wavy cylinder[J]. Journal of Fluids and Structures,2004,19(6):815-833.

[36] He Guosheng,Li Nian,Wang Jinjun. Drag reduction of square cylinders with cut-corners at the front edges[J]. Experiments in Fluids:Experimental Methods and Their Applications to Fluid Flow,2014,55(6):1745.

[37] Ekmecki A,Rockwell D. Effects of a geometrical surface disturbance on flow past a circular cylinder;a large-scale spanwise wire [J]. Journal of Fluid Mechanics,2010,665:120-157.

[38] Zhou Jiankang,Qiu Xiang,Li Jiahua, et al. The experimental investigation on wake dynamics of flow around a circular cylinder with the splitter plate[J]. Journal of Fluids and Structures,2024,127:104130.

[39] Gerrard J H. The mechanics of the formation region of vortices behind bluff bodies[J]. Journal of Fluid Mechanics Digital Archive,1966,25(2):401-413.