

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2024.06.011

# 定常吸吹气作用下波浪圆柱主动减阻机制

邹琳, 张毓辰, 左红成, 苗亚博, 徐汉斌

(武汉理工大学机电工程学院, 湖北 武汉 430070)

**摘要:** 针对圆柱绕流减阻抑振问题, 对波浪圆柱采用定常吸吹气主动控制手段, 在雷诺数  $Re=3000$  情况下, 利用大涡模拟数值方法, 研究吸吹气方式、方位角(吹吸气装置与来流反方向夹角)、动量系数对波浪圆柱的升阻力特性、时均压力、速度分布、近尾迹流动结构发展及其减阻抑振的影响规律。结果表明: 定常吸气控制比吹气控制对波浪圆柱减阻抑振效果更好; 定常吸气方位角位于迎风面时波浪圆柱的升阻力系数随动量系数的增大而减小, 位于背风面时则呈先减小后增大再减小趋势, 这主要归因于定常吸气通过吸收低速度流体延缓流动分离, 削弱了尾流的顺流向雷诺应力和横流向雷诺应力, 降低了柱体前后表面的压差, 波浪圆柱的近尾迹宽度在横向上显著变窄; 在适当的吸气动量系数及方位角工况下, Saddle 截面近尾迹回流区基本被消除, 下游出现“带状涡”, 升阻力波动得到了显著控制, 平均阻力系数较未受控制波浪圆柱减少 83.84%。

**关键词:** 波浪圆柱; 定常吸吹气; 大涡模拟; 减阻; 抑振

中图分类号: TV211.3

文献标志码: A

文章编号: 1000-1980(2024)06-0081-09

## Active drag reduction mechanism for wavy cylinders under steady suction and blowing

ZOU Lin, ZHANG Yuchen, ZUO Hongcheng, MIAO Yabo, XU Hanbin

(College of Electromechanical Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of drag reduction and vibration suppression of the cylinder flow, a numerical study has been conducted to investigate several key factors affecting the performance of a wavy cylinder. The study with the 3000 Reynolds number explores the influence of suction and blowing, azimuth (defined as the angle between the suction and blowing device and the opposite direction of incoming flow), and momentum coefficient on various aspects, including the lift and drag characteristics of the cylinder, the distribution of time-averaged pressure and velocity, and the development of flow structures in the near wake. To accomplish this, on the shape of the wave surface, the study uses the steady suction and blowing active control means with the use of the numerical method of large-eddy simulation (LES). The results show that steady suction control proves to be more effective than blowing control in terms of drag reduction and vibration suppression in the wavy cylinder. The lift and drag coefficient of the wavy cylinder decreases with the increase of momentum coefficient when the steady suction azimuth is located on the windward side. Conversely, when the steady suction azimuth is on the leeward side, a pattern emerges: the coefficients initially decrease, then increase, and finally decrease again. This observed behavior can be primarily attributed to the delaying effect of steady suction on flow separation, achieved by absorbing low-velocity fluids. Consequently, this process weakens the downstream and transverse Reynolds stresses in the wake, thereby reducing the pressure difference between the cylinder's front and back surfaces. Moreover, it notably narrows the width of the near wake of the wavy cylinder in the transverse direction. Under the appropriate suction momentum coefficient and azimuth working condition, the recirculation zone of Saddle section near wake is basically eliminated, and the downstream appears “band vortex”, where the lift and drag fluctuation is significantly controlled and the mean drag coefficient is reduced by 83.84% compared to uncontrolled wave cylinders.

**Key words:** wavy cylinders; steady suction and blowing; large-eddy simulation; drag reduction; vibration suppression

工程中钝体周围的非定常流动涉及许多复杂的现象, 包括流动分离和再附着、非定常旋涡脱落等<sup>[1]</sup>, 如桥梁结构中内部强烈紊动的潮涌冲刷桥墩, 后部旋涡脱落会降低桥梁的稳定性<sup>[2]</sup>; 高层建筑受到的横向风振影响<sup>[3]</sup>; 覆冰输电线在风载荷作用下会产生大幅振动<sup>[4]</sup>。钝体减阻抑振一直是工程应用的重要课题。

钝体绕流中阻力升高与流动分离、旋涡脱落相关<sup>[5-6]</sup>, 根据是否有能量输入, 绕流控制方法分为主动控制和被动控制<sup>[7]</sup>。Lam 等<sup>[8]</sup>发现波浪圆柱无量纲波长在 2.5 和 6 附近时, 升阻力系数最低。Sun 等<sup>[9]</sup>在亚临

基金项目: 国家自然科学基金项目(12372232, 11972268)

作者简介: 邹琳(1970—), 女, 教授, 博士, 主要从事计算流体力学研究。E-mail: l.zou@163.com

引用本文: 邹琳, 张毓辰, 左红成, 等. 定常吸吹气作用下波浪圆柱主动减阻机制[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52(6): 81-89.

ZOU Lin, ZHANG Yuchen, ZUO Hongcheng, et al. Active drag reduction mechanism for wavy cylinders under steady suction and blowing[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2024, 52(6): 81-89.

界雷诺数下进行试验,发现波浪圆柱的平均阻力系数和脉动升力系数普遍低于圆柱,最大减阻达 18%。Ahmed 等<sup>[10]</sup>发现波浪圆柱最大截面的平均阻力系数要大于最小截面,并且  $\lambda/D_m$  越大( $\lambda$  为波浪圆柱的波长,  $D_m$  为波浪圆柱的平均直径),两者的差值越小。Lee 等<sup>[11]</sup>发现在雷诺数  $Re=10^4$  时,  $\lambda/D_m=2$  的波浪圆柱较圆柱阻力系数降低了 22%。Lekkala 等<sup>[12]</sup>发现  $\lambda/D_m=6.06$  时阻力减少最大。吸吹气可以广泛应用在各种形状的钝体上<sup>[13-14]</sup>。Gao 等<sup>[15]</sup>发现迎风吸气和背风吹气可以减小柱体的升阻力。Shtendel 等<sup>[16]</sup>发现定常吸气和脉动吹气联合激励下可降低阻力高达 60%。陈文礼等<sup>[17]</sup>使用大涡模拟数值方法,发现前驻点吹气可以降低迎风面的压力;后驻点吹气可以提高背风面压力,降低旋涡脱落导致的升力波动。

在文献[18]对波浪圆柱减阻特性研究的基础上,探究  $Re=3\,000$  时方位角、动量系数对波浪圆柱的升阻力特性、压力和速度分布特性及近尾迹流动结构的影响,探索定常吸吹气作用下波浪圆柱减阻抑振机制,寻求较佳的吸吹气控制参数,以期为钝体绕流减阻抑振提供理论支持。

1 研究方法

本文在 Fluent 计算平台下采用大涡模拟 (LES) 进行仿真计算,大涡模拟的基本思想是对大尺度涡结构直接进行数值计算,小尺度涡对大尺度涡的作用通过亚格子模型描述。大涡模拟通过滤波函数将物理量分解为大尺度分量和小尺度分量<sup>[19]</sup>。大涡的控制方程为

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0$$

(1)

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} = \bar{f}_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial (\bar{p})}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\tau}_{ij} + \tau_{ij,SGS})$$

(2)

其中

$$\bar{\tau}_{ij} = 2\mu \bar{S}_{ij} = \mu \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right)$$

式中:  $\bar{u}_i$  为 GS(格子尺度)速度分量;  $x_i, x_j$  为流体位置坐标分量;  $\bar{f}_i$  为流体微团所受体积力;  $\rho$  为流体密度;  $\bar{p}$  为 GS 压强分量;  $\bar{\tau}_{ij}$  为 GS 湍流应力;  $\mu$  为流体的动力黏度系数;  $\bar{S}_{ij}$  为 GS 应变率张量;  $\tau_{ij,SGS}$  为 SGS(亚格子尺度)湍流应力,使用亚格子模型进行计算,计算过程中,Smagorinsky 常数取 0.1<sup>[20]</sup>,求解算法选择 PISO 算法。

波浪圆柱(图 1(a))的直径  $D$  需满足:

$$D = D_m + 2a\cos(2\pi L_z/\lambda)$$

(3)

其中

$$D_m = (D_{\max} + D_{\min})/2$$

式中:  $D_{\max}, D_{\min}$  分别为波浪圆柱的最大、最小直径;  $a$  为波浪圆柱的幅值;  $L_z$  为波浪圆柱的展向高度。

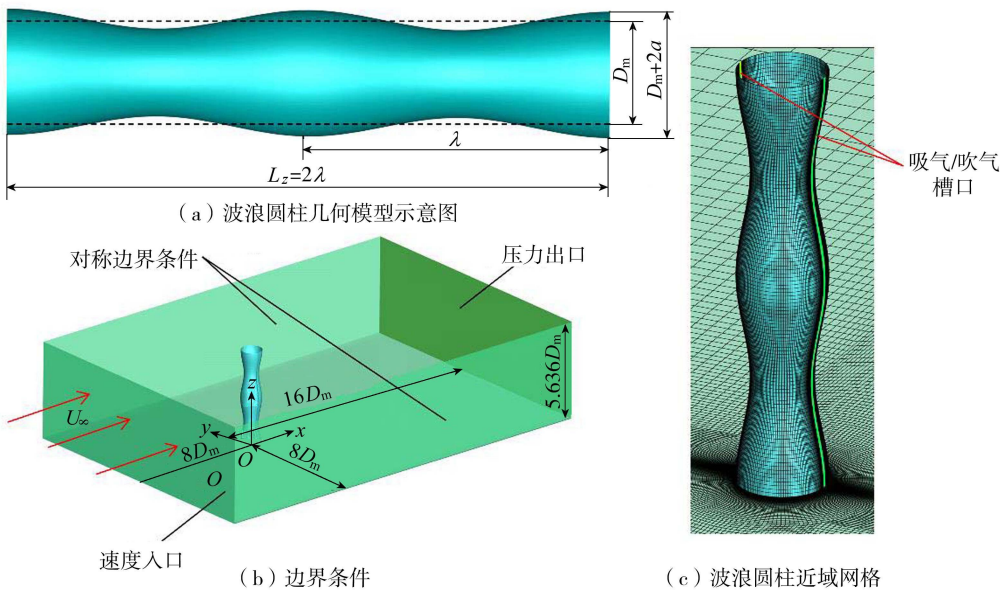


图1 计算模型与网格划分

Fig.1 Computational model and meshing

参考文献[20],选取  $a/D_m=0.091$ ,  $\lambda/D_m=2.818$ ,  $D_m$  取  $0.01\text{ m}$ ;波浪圆柱几何模型如图 1(a)所示,最小直径处称为 Saddle 截面,最大直径处称为 Node 截面,平均直径处称为 Middle 截面;波浪圆柱位于计算域对称轴处,计算域展向方向为  $2\lambda$ ,取为  $24D_m\times 16D_m\times 5.636D_m$ ,如图 1(b)(c)所示。顺流向方向为  $x$  轴,横流向方向为  $y$  轴, $z$  轴为波浪圆柱的展向方向。速度入口和侧面距波浪圆柱圆心  $8D_m$ ,压力出口距圆心  $16D_m$ ,展向高度  $L_z$  为  $2\lambda$ 。根据常书平等<sup>[21]</sup>的研究,估算得到边界层无量纲壁面高度  $y^+\leq 1$  时,第一层边界层高度  $\Delta y\leq 0.004D_m$ ,本文经过验证后  $\Delta y$  取  $0.003D_m$ 。边界层增长率设置为 1.1,设置  $z$  方向网格大小在  $0.1D_m$  内。流动介质为空气,密度为  $1.225\text{ kg/m}^3$ ,动力黏度为  $1.7894\times 10^{-5}\text{ Pa}\cdot\text{s}$ 。 $Re=3\,000$  时,入口来流速度  $u_\infty=0.43822\text{ m/s}$ ,出口为压力出口,相对大气压为  $0\text{ Pa}$ ,计算区域的两个侧面为对称边界条件,波浪圆柱表面为无滑移壁面,展向设置为周期性边界条件。本文的计算模型验证参见文献[18]。

吸吹气装置布置方式如图 2 所示。在波浪圆柱侧面上开宽度为  $b$  的吸气/吹气槽口(图 2(a)),在槽口处设置速度入口边界条件,速度为正表示吸气,速度为负表示吹气。根据文献[17],设置  $b/D_m=0.06$ ,通过改变槽口的吸吹气速度  $U$  控制动量输入,对  $U$  进行无量纲化处理,得到吹吸气动量系数  $C_\mu$ (式(4)), $C_\mu$ 取  $0, 0.0048, 0.0192, 0.0432, 0.0768, 0.1200$ 。

$$C_\mu = 2 (U/u_\infty)^2 (b/D_m) \tag{4}$$

方位角  $\theta$  为吸吹气安装位置与  $x$  轴负方向夹角(图 2(b)),在各方位角处对称布置吸吹气装置,探究吸吹气动量系数减阻抑振控制效果。取  $\theta_1=60^\circ$  和  $300^\circ$ ,  $\theta_2=75^\circ$  和  $285^\circ$ ,  $\theta_3=90^\circ$  和  $270^\circ$ ,  $\theta_4=105^\circ$  和  $255^\circ$ ,  $\theta_5=120^\circ$  和  $240^\circ$ ,其中  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$  为迎风面方位角,  $\theta_4, \theta_5$  为背风面方位角。

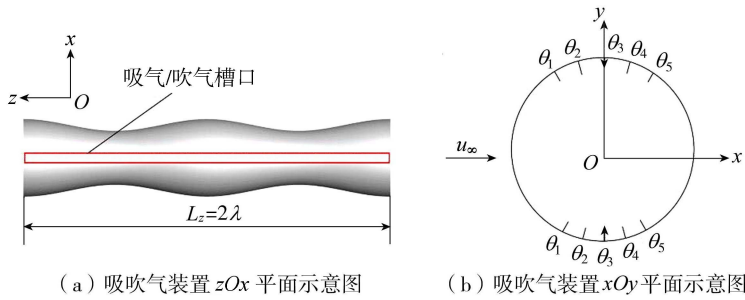


图 2 吸吹气装置布置方式

Fig.2 Arrangement of suction and blowing device

2 结果与分析

2.1 升阻力特性

由图 3 可知,在进行迎风面方位角定常吸气时,随着  $C_\mu$  的增大,平均阻力系数( $\bar{C}_d$ )和脉动升力系数( $C'_l$ )呈减小趋势,并且方位角角度越大,减阻抑振效果越好,  $\bar{C}_d$  较未受控波浪圆柱减小 72.14%。但进行背

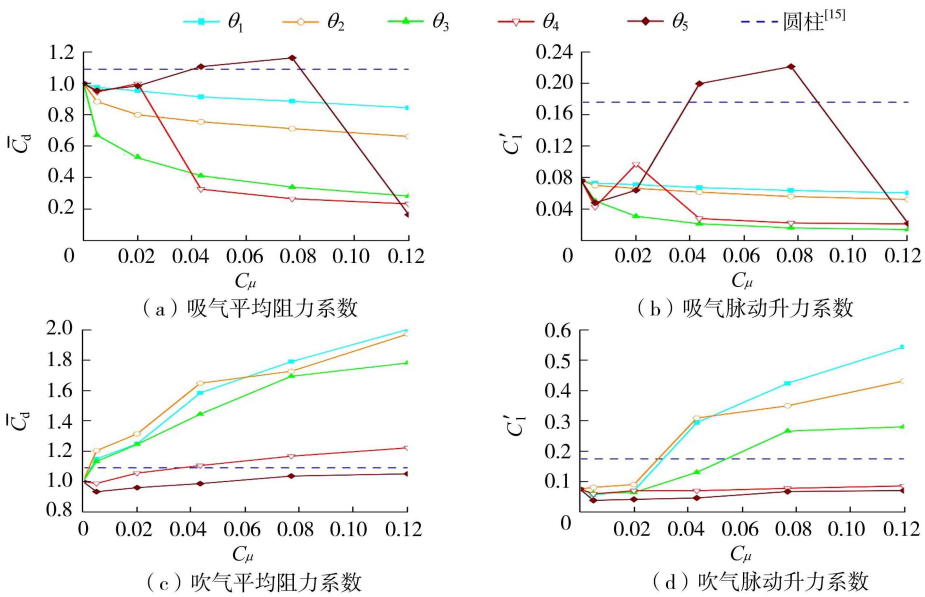


图 3 定常吸吹气下受控波浪圆柱平均阻力系数和脉动升力系数变化

Fig.3 Variation of average drag coefficient and fluctuating lift coefficient for controlled wavy cylinder under steady suction and blowing

风面方位角定常吸气时,随着  $C_\mu$  增大,  $\bar{C}_d$  和  $C'_l$  先小幅减小,再增大,最后大幅减小,表明背风面方位角工况下  $C_\mu$  存在阈值,阈值前后流场结构发生变化,  $\bar{C}_d$  较未受控波浪圆柱减小 83.84%。在进行迎风面方位角定常吹气时(图 3(c)(d)),随着  $C_\mu$  增大,  $\bar{C}_d$  和  $C'_l$  呈增大趋势;在进行背风面方位角定常吹气时,减阻抑振控制效果甚微,对于本文的波浪圆柱,定常吸气控制比吹气控制的减阻抑振效果更好。

根据文献[22],控制效率( $\eta$ )为节省的功率与输入功率之比。从  $\eta$  角度分析,在  $\theta_5$  工况下进行吸气控制,  $C_\mu=0.1200$  时  $\eta$  为最大值(12.3),远大于直圆柱后底部吹气的  $\eta(3.8)$ ,取其作为较佳的控制参数。

2.2 压力分布特性

图 4 为时均压力系数  $\bar{C}_p$  随动量系数  $C_\mu$  的变化曲线,其中  $\alpha$  为观测位置与来流反向的夹角。波浪圆柱关于顺流向中心线对称,且进行迎风面  $\theta$  定常吸气时 Node 截面与 Saddle 截面变化趋势一致(图 4(a)(b))。

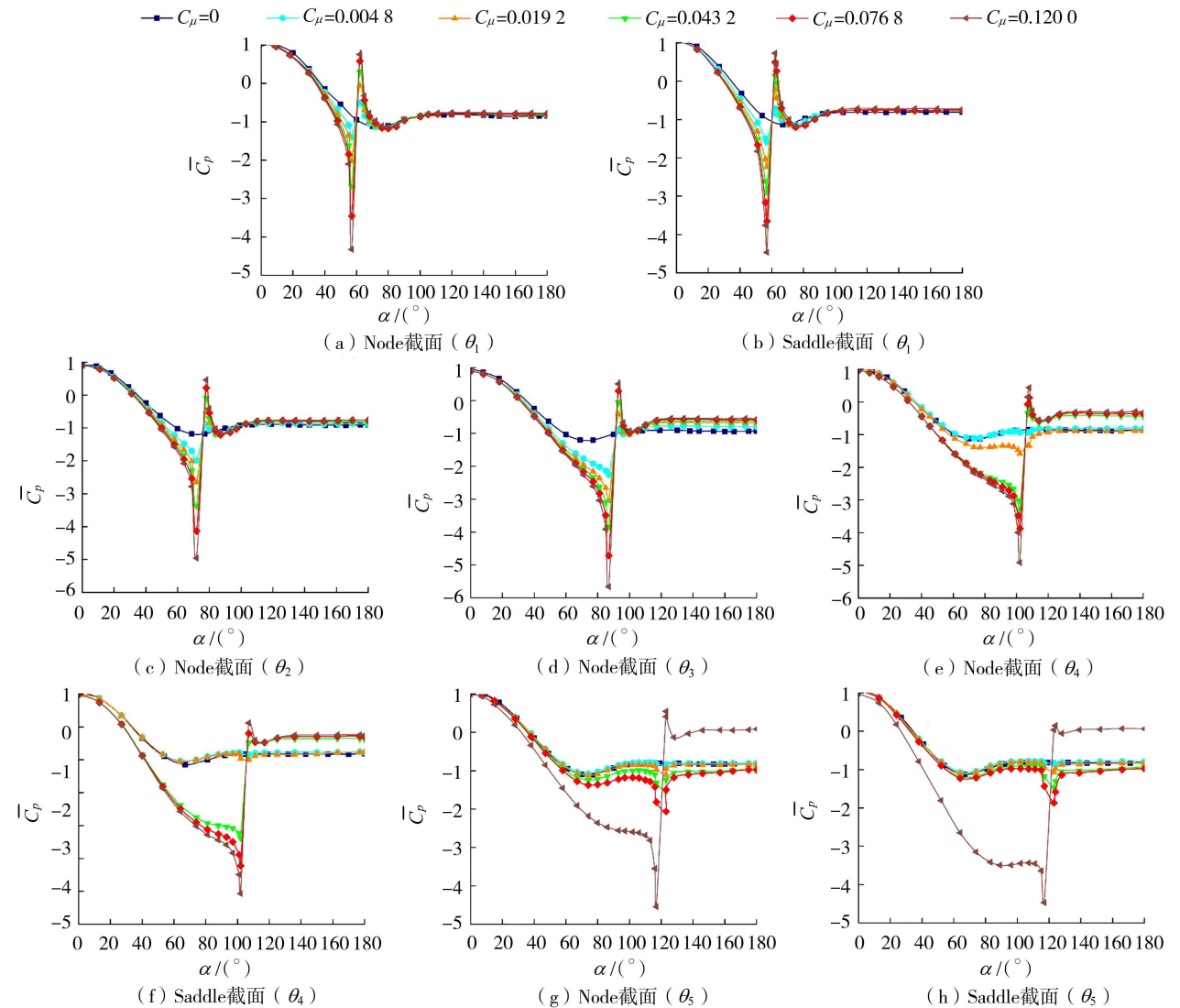


图 4 定常吸气平均压力系数变化

Fig. 4 Variation of mean pressure coefficient of steady suction

对于迎风面方位角,随着  $\alpha$  增大,压力下降;在  $\alpha$  达到  $\theta$  之后,压力急剧上升,然后降至平稳值,这主要是因为吸气槽处存在较大的动量梯度,导致流体质点受到更大外力。对于背风面方位角,  $C_\mu$  存在一个阈值。在  $\alpha < \theta$  工况下,未达到阈值时,压力与未受控制时基本一致,达到阈值后,压力较未受控制时下降;在  $\alpha > \theta$  工况下,未达到阈值时,压力较未受控制时下降,达到阈值后,压力较未受控制时上升。综上,定常吸气的主要减阻机制是通过降低迎风面压力和增加背风面压力,以减少前后压差。

Nishimura 等<sup>[23]</sup>将圆柱分离角定义为背风面压力系数开始呈现均匀时的角度,依此,未受控制波浪圆柱 Node 截面和 Saddle 截面分离角分别为  $92.25^\circ$ 、 $83.31^\circ$ ;迎风面方位角的 Node 和 Saddle 截面分离角最大增加

至  $123.60^\circ$ 、 $117.53^\circ$ ；背风面方位角的 Node 和 Saddle 截面分离角最大增加至  $140.56^\circ$ 、 $136.47^\circ$ ，这表明定常吸气作用延迟了流动分离，使尾流宽度变窄，波浪圆柱所受阻力降低。

Roshko<sup>[5]</sup> 研究发现阻力系数与柱体背风面底部的吸引系数  $\beta$  相关，并通过动量守恒原理推导了阻力系数的近似公式。 $\beta$  越小，尾流宽度越小，涡脱落长度越大，柱体所受阻力越小。由图 5 可知， $\beta$  与  $\bar{C}_d$  的变化趋势（图 3）一致，在  $C_\mu = 0.1200$  时，各方位角减阻效果最佳。在  $\theta_4$  工况、 $C_\mu = 0.0192$  时，Node 截面和 Saddle 截面的  $\beta$  分别由未受控制时的 0.821、0.815 增大至 0.856、0.830。说明阈值前后，流场结构发生了变化。

2.3 速度分布特性

图 6 为定常吸气工况下，Node 截面和 Saddle 截面顺流向速度云图，回流区定义为  $u/u_\infty = 0$  ( $u$  为来流速度) 等值线包围的区域<sup>[24]</sup>。未受控制波浪圆柱(图 6(a))的 Node 截面和 Saddle 截面回流区的长度和厚度不同，主要是因为这两个截面流动分离角不同。在迎风面  $\theta$ 、 $C_\mu = 0.0048$  时(图 6(b)(c)(d))，随着  $\theta$  增大，近尾迹回流区(蓝色区域)变小。在背风面  $\theta$ 、 $C_\mu = 0.0192$  时(图 6(e)(f))，Saddle 截面的回流区显著增大，而 Node 截面在  $\theta_4$  工况下缩小，在  $\theta_5$  工况下小幅增大，表明动量耗散主要发生在 Saddle 截面附近。在  $\theta_5$  工况、 $C_\mu = 0.0768$  时(图 6(g))，Node 截面回流区变小且紧贴柱体，而 Saddle 截面变化与上述一致，表明  $\bar{C}_d$  增大主要归因于 Saddle 截面处回流区的大幅增大。在  $C_\mu = 0.1200$  时(图 6(h)(i)(j))，发现尾流宽度显著降低，回流区显著减少。在  $C_\mu = 0.1200$  ( $\theta_5$ ) 时回流区被完全消除，与  $C_\mu = 0.0768$  ( $\theta_5$ ) 相比，流场结构发生了

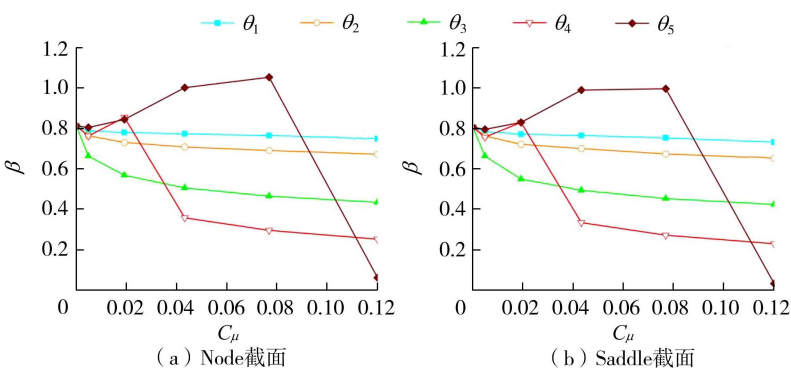


图 5 吸引系数变化曲线  
Fig. 5 Variation curve of attraction coefficient

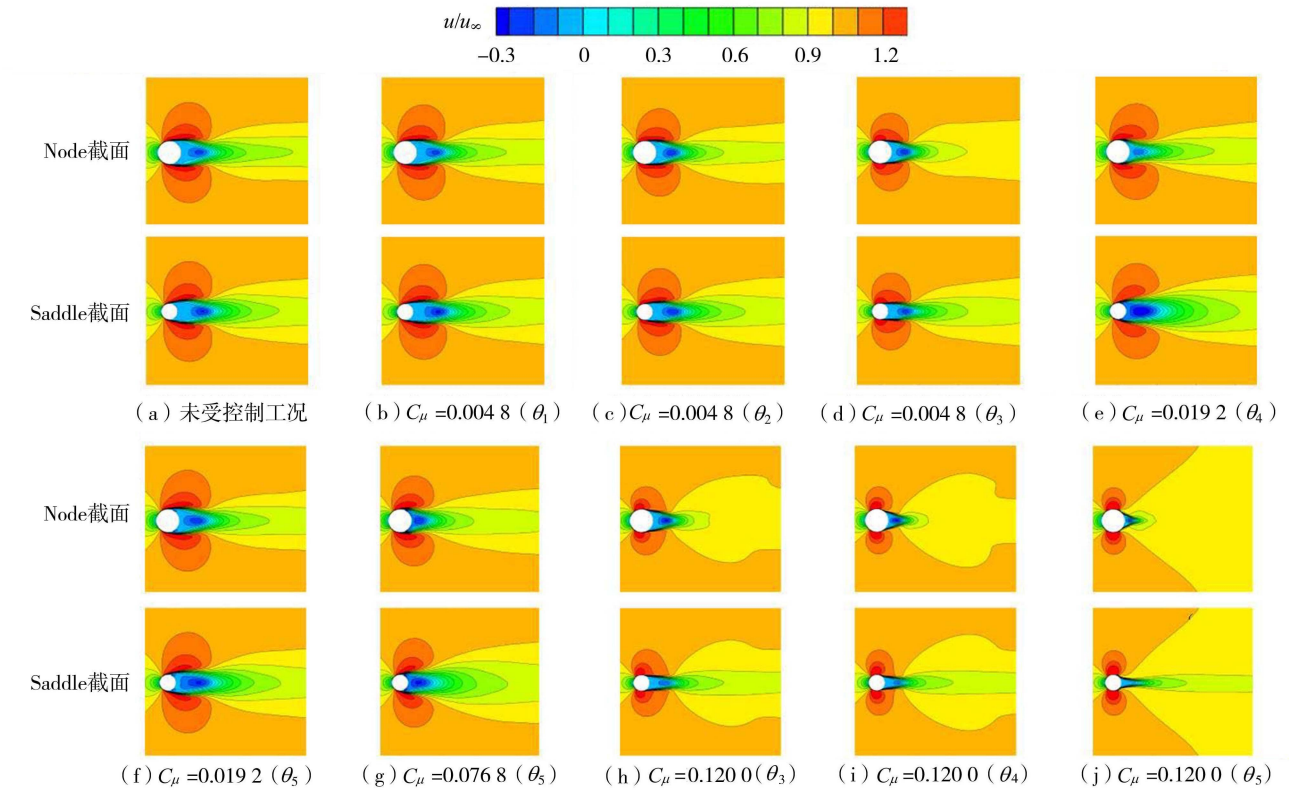


图 6 顺流向速度分布云图(定常吸气)

Fig. 6 Contour of downstream velocity distribution (steady suction)

显著变化,此时尾流稳定,减阻抑振效果优异。

未受控制时(图 7(a),图中  $u'$  为顺流向脉动速度),顺流向雷诺应力(雷诺应力已无量纲化,下同。)呈现双峰(红色区域)模式,峰值为 0.17。在迎风面方位角工况、 $C_\mu = 0.0048$  时(图 7(b)(c)(d)),随着方位角增大,峰值减小,Node 截面最大顺流向雷诺应力降至 0.1, Saddle 截面降至 0.08,表明定常吸气作用抑制了涡沿流向方向发展,且 Saddle 截面抑制更显著。在背风面方位角工况、 $C_\mu = 0.0192$  和 0.0768 时未达到阈值(图 7(e)(f)(g)),发现在波浪圆柱的方位角附近产生新的峰值,从双峰模式发展成四峰模式, Saddle 截面峰值区域显著增大,表明方位角附近发展新涡,流动结构不稳定。达到阈值后(图 7(i)(j)),Node 截面和 Saddle 截面峰值最大下降至 0.04、0.03,在  $C_\mu = 0.1200$  时(图 7(h)(i)(j)),顺流向雷诺应力大幅减小,表明定常吸气显著扼制涡沿流向方向发展。

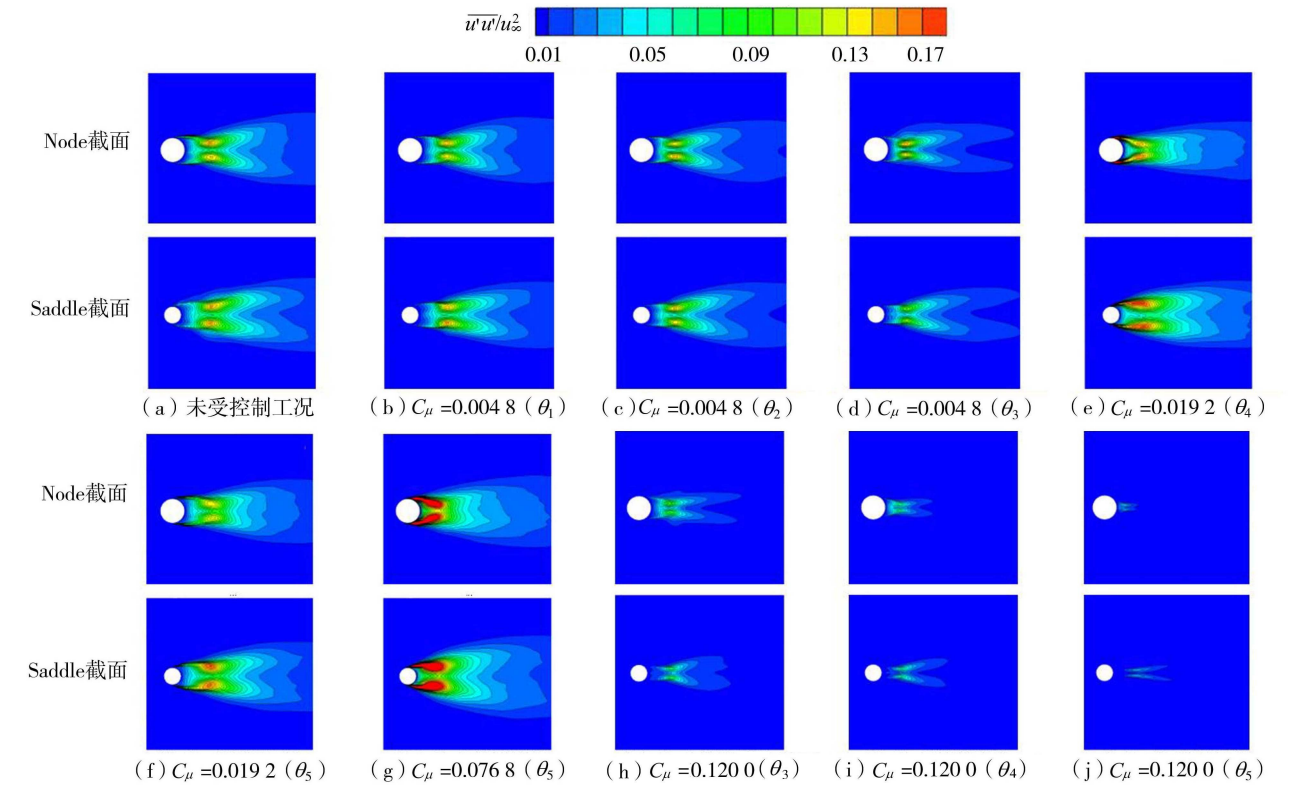


图 7 顺流向雷诺应力分布云图(定常吸气)

Fig. 7 Contour of downstream Reynold's stress distribution (steady suction)

上下尾流涡的相互作用会产生横流向雷诺应力,图 8 为定常吸气工况下,Node 截面和 Saddle 截面横流向雷诺应力分布云图(图中  $v'$  为横流向脉动速度)。未受控制时(图 8(a)),横流向雷诺应力分布呈现单峰模式,Node 截面和 Saddle 截面的最大值分别为 0.42、0.38。在迎风面方位角工况下(图 8(b)(c)(d)),峰值随方位角增大而降低,应力分布宽度变窄。此外,Node 截面峰值较未受控制时最大下降至 0.1, Saddle 截面下降至 0.22,表明 Node 截面为横流向尾流波动的抑制做了主要贡献。在背风面方位角工况、 $C_\mu$  未达到阈值时(图 8(e)(f)(g))横流向雷诺应力在 Saddle 截面处峰值区域变大导致横向波动增大,达到阈值后(图 8(i)(j)),峰值大幅降低,Node 截面横流向雷诺应力峰值最大降至 0.05, Saddle 截面降至 0.09。在  $C_\mu = 0.1200$  时(图 8(h)(i)(j)),横流向雷诺应力大幅减小,此时几乎消除了尾流上下涡流的相互作用。

可见在迎风面方位角工况下,随着  $\theta$  与  $C_\mu$  增大,近尾迹回流区逐渐减小,流体流经波浪圆柱的动量损失减少; Saddle 截面处顺流向雷诺应力下降幅度大于 Node 截面,主要抑制涡的顺流向发展; Node 截面处横流向雷诺应力下降幅度大于 Saddle 截面,主要抑制涡的横流向发展。而在背风面方位角工况、 $C_\mu$  未达到阈值时,近尾迹回流区、顺流向和横流向雷诺应力均增大,且 Saddle 截面增幅较大,表明  $\bar{C}_d$  和  $C'_l$  增大主要是 Saddle 截面近尾迹不稳定造成的。在  $C_\mu = 0.1200$  时,近尾迹回流区几乎消失,顺流向和横流向雷诺应力峰值大幅降低,显著抑制了涡沿顺流向和横流向的发展。

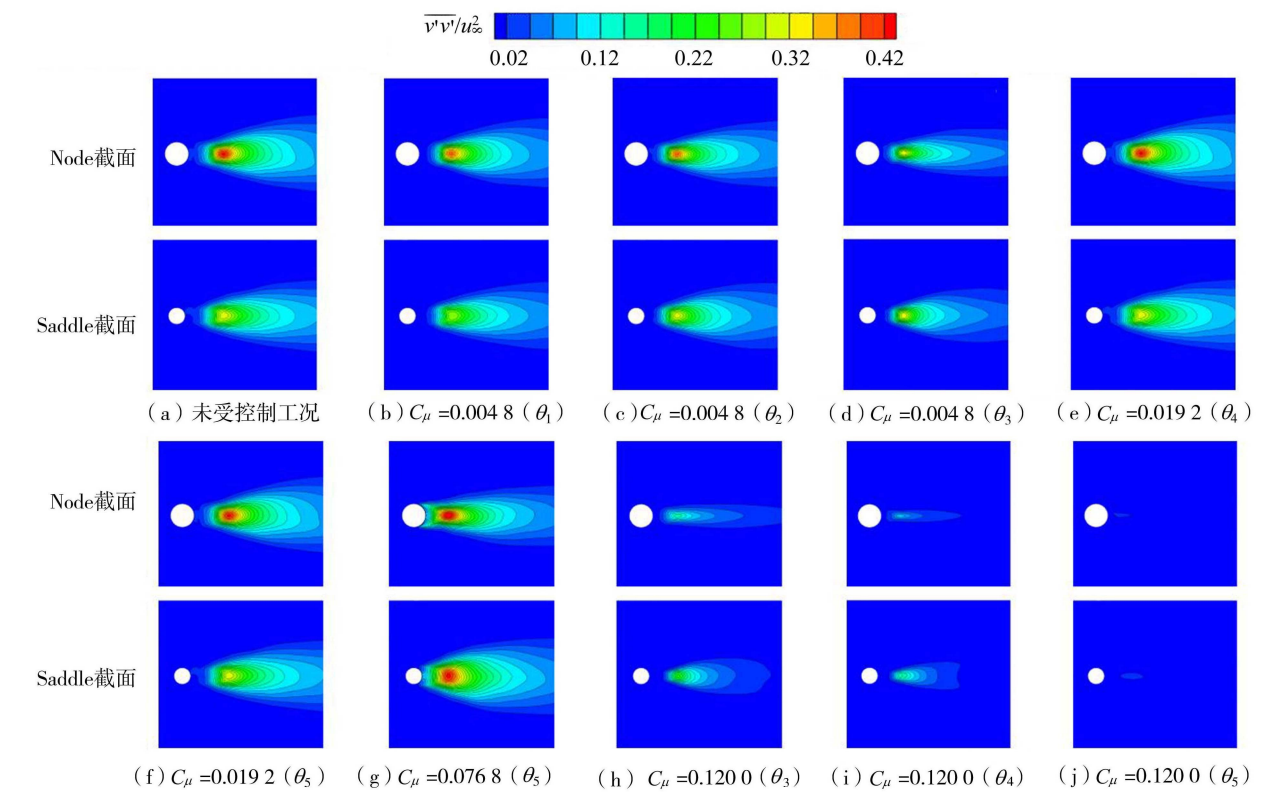


图 8 横流向雷诺应力分布云图(定常吸气)

Fig. 8 Contour of transverse Reynold’s stress distribution (steady suction)

2.4 三维特性

2.4.1 三维涡的确定

如前所述,在背风面方位角工况、 $C_\mu$  阈值前后流场结构会发生变化,传统方法将涡定义为涡量管,涡量的大小定义为涡的旋转强度,这是第一代涡定义和识别方法,第二代涡定义和识别方法中的  $Q$  准则具有广泛应用<sup>[25]</sup>,本文采用  $Q$  准则识别三维涡结构,三维涡结构提供两个视角:斜视图(视角 1)、俯视图(视角 2)。

由图 9 可知,在视角 2 中存在类似“卡门涡街”2S 模式的涡结构。在波浪圆柱表面形状影响下,后部存在“肋状涡”<sup>[26]</sup>,“肋状涡”处的动能较大,为低速区提供能量,保持回流区的面积。迎风面方位角工况下,“肋状涡”动能随着方位角增大而逐渐降低,造成回流区供能不足,尾流宽度逐渐变窄,柱体所受阻力降低,波动受到抑制。背风面方位角工况下,观察到“肋状涡”处动能较未受控制时增大,回流区供能增加,此时吸气动量无法消除低速度产生的强对流,导致  $\bar{C}_d$  和  $C'_l$  增大。在图 9(e) 时,吸气动量足以将回流区控制在一个小范围内,近尾迹流动结构改变,涡脱落在顺流向和横流向上得到抑制,出现“带状涡”,流动结构稳定,造成  $C_\mu$  达到阈值后  $\bar{C}_d$  和  $C'_l$  的急剧下降。

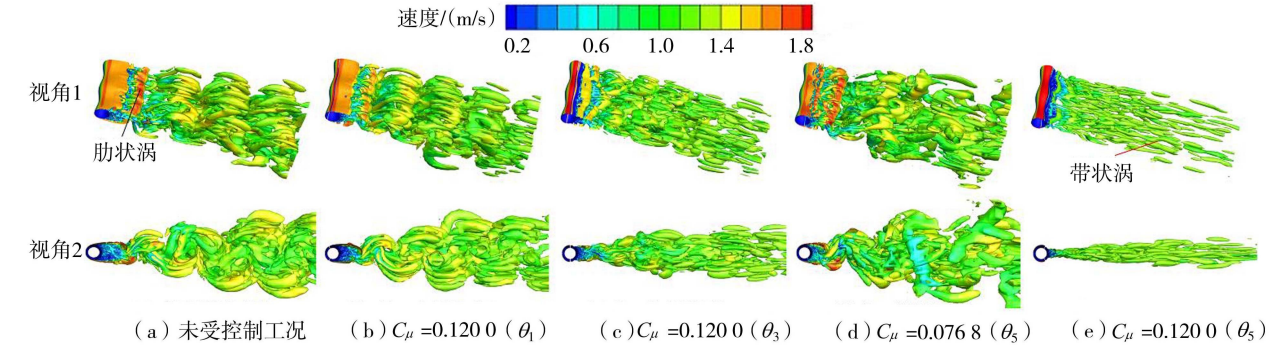


图 9 速度云图( $Q = 6000\text{ s}^{-2}$ )

Fig. 9 Velocity cloud maps ( $Q = 6000\text{ s}^{-2}$ )

2.4.2 z 涡量与时均流线图

由图 10、图 11 可知,Node 截面近尾迹宽度在顺流向未拓宽,而 Saddle 截面有所增加,主要归因于 Node 截面分离角较大,主流抑制了剪切层的发展,涡沿横流向发展受到抑制;而 Saddle 截面分离角较小,导致主流不够“厚”,较 Node 截面抑制能力降低,涡在横流向得以发展。随着方位角增大,尾流宽度显著减小,近尾迹回流区逐渐变小,这主要归因于吸气作用吸走了部分气体,余下的流体将贴着圆柱表面继续向后移动一段距离,造成分离点靠后,起到延迟分离的作用。分离后的自由剪切层受吸气作用影响,会迅速往顺流向向中心线靠拢,导致近尾迹回流区变小且宽度变窄,降低了升阻力。另外,发现在图 11(d)中方位角附近出现一个小涡(图中方框所示)。主涡离波浪圆柱后部更近,并向小涡提供能量,造成近尾迹涡强度显著增大,产生较大的升阻力波动。而图 10、图 11(e)中方位角附近的小涡消失,近尾迹回流区较未受控制时大幅减小,在 Saddle 截面处,涡的形成被遏制,升阻力控制效果显著。

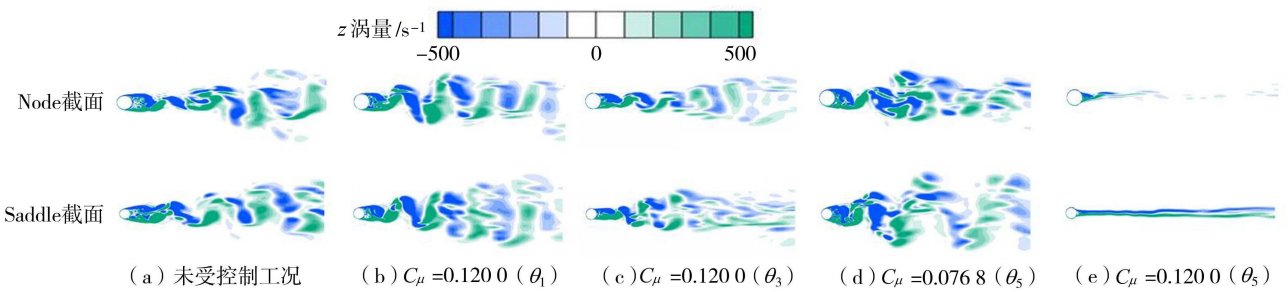


图 10 Node 截面与 Saddle 截面 z 涡量图

Fig. 10 Contour of z vorticity at the Node and Saddle cross-section

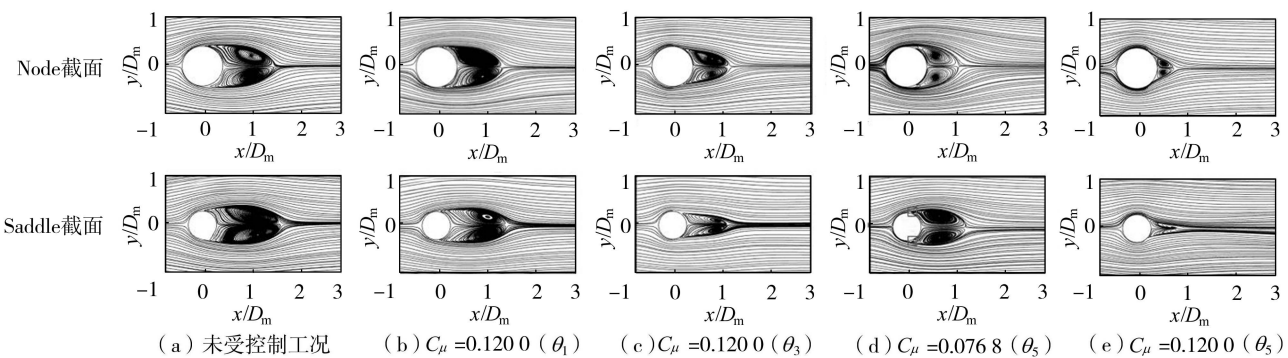


图 11 Node 截面与 Saddle 截面时均流线

Fig. 11 Time-averaged streamline at the Node and Saddle cross-section

3 结 论

- a. 定常吸气比吹气减阻抑振控制效果更佳。在雷诺数  $Re = 3\,000$  下,波浪圆柱定常吸气较佳控制参数为方位角  $\theta_5 = 120^\circ$  或  $240^\circ$ ,动量系数  $C_\mu = 0.1200$ 。受控波浪圆柱的平均阻力系数较未受控制波浪圆柱降低 83.84%。
- b. 定常吸气作用将降低迎风面压力,提高背风面压力,引起吸引系数  $\beta$  和前后压差减小,导致  $\bar{C}_d$  减小。
- c. 定常吸气作用吸收“肋状涡”的动能,减少近尾迹回流区以及尾流宽度,弱化了顺流向和横流向雷诺应力。在  $\theta_5$  工况、 $C_\mu = 0.1200$  时,出现“带状涡”,流场稳定。
- d. 定常吸气作用吸走部分气体,造成分离点靠后,起到延迟分离的作用。分离后的自由剪切层受吸气作用影响,会迅速往顺流向向中心线靠拢,导致近尾迹回流区变小且宽度变窄,降低了升阻力。

参考文献:

[ 1 ] LAM K, LIN Y F, ZOU L, et al. Numerical study of flow patterns and force characteristics for square and rectangular cylinders with wavy surfaces[J]. Journal of Fluids and Structures, 2012, 28: 359-377.  
[ 2 ] 黄君宝, 肖厅厅, 孙志林, 等. 涌潮水流引发的桥墩局部冲刷试验[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, 49(5): 441-446.

- (HUANG Junbao, XIAO Tingting, SUN Zhilin, et al. Experimental study on local scour of piers caused by tidal bore[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(5): 441-446. (in Chinese))
- [3] 黎冠坤, 严姣. 超高宽比矩形烟囱的横风向风振效应探讨[J]. 建筑结构, 2023, 53(增刊1): 343-348. (LI Guankun, YAN Jiao. Study on transverse wind vibration effect of rectangular chimney with ultra high aspect ratio[J]. Building Structure, 2023, 53(Sup1): 343-348. (in Chinese))
- [4] 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))
- [5] ROSHKO A. Experiments on the flow past a circular cylinder at very high Reynolds number[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1961, 10(3): 345-356.
- [6] 杨志坚, 赵西增, 段松长. 钝体绕流尾涡脱落的弹性分流板抑制模拟[C]//中国海洋工程学会. 第十九届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集(上). 北京: 海洋出版社, 2019: 117-123.
- [7] CHOI H, JEON W P, KIM J. Control of flow over a bluff body[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2008, 40: 113-139.
- [8] LAM K, LIN Y F. Effects of wavelength and amplitude of a wavy cylinder in cross-flow at low Reynolds numbers[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2009, 620: 195-220.
- [9] SUN Yifei, LIU Qingkuan, SHAO Linyuan, et al. Experimental investigation of aerodynamic forces and vortex-induced vibrations of wavy cylinders at subcritical Reynolds numbers[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2023, 144: 110869
- [10] AHMED A, BAYS-MUCHMORE B. Transverse flow over a wavy cylinder[J]. Physics of Fluids A: Fluid Dynamics, 1992, 4(9): 1959-1967.
- [11] LEE S J, NGUYEN A T. Experimental investigation on wake behind a wavy cylinder having sinusoidal cross-sectional area variation[J]. Fluid Dynamics Research, 2007, 39(4): 292-304.
- [12] LEKKALA M R, MOHAMED L, JUNG J H, et al. Numerical investigations of flow over wavy cylinders at sub-critical Reynolds number[J]. Ocean Engineering, 2023, 269: 113501.
- [13] GAO Donglai, MENG Hao, HUANG Yewei, et al. Active flow control of the dynamic wake behind a square cylinder using combined jets at the front and rear stagnation points[J]. Physics of Fluids, 2021, 33(4): 047101.
- [14] CHEN Wenli, HUANG Yewei, CHEN Changlong, et al. Review of active control of circular cylinder flow[J]. Ocean Engineering, 2022, 258: 111840.
- [15] GAO Donglai, CHEN Guanbin, CHEN Wenli, et al. Active control of circular cylinder flow with windward suction and leeward blowing[J]. Experiments in Fluids, 2019, 60(2): 26.
- [16] SHTENDEL T, SEIFERT A. Three-dimensional aspects of cylinder drag reduction by suction and oscillatory blowing[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2014, 45: 109-127.
- [17] 陈文礼, 郭艳娇. 基于主动吸吹气的圆柱绕流控制[J]. 空气动力学学报, 2020, 38(5): 989-995. (CHEN Wenli, GUO Yanjiao. Flow control of circular cylinder based on active suction and blow[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2020, 38(5): 989-995. (in Chinese))
- [18] 邹琳, 左红成, 柳迪伟, 等. 基于定常吹吸气的波浪型圆柱主动控制研究[J]. 力学学报, 2022, 54(11): 2970-2983. (ZOU Lin, ZUO Hongcheng, LIU Diwei, et al. Active flow control of wavy cylinder based on steady blowing and suction[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2022, 54(11): 2970-2983. (in Chinese))
- [19] MEHTA D, VAN ZUIJLEN A H, KOREN B, et al. Large Eddy Simulation of wind farm aerodynamics: A review[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2014, 133: 1-17.
- [20] LAM K, LIN Y F. Large eddy simulation of flow around wavy cylinders at a subcritical Reynolds number[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2008, 29(4): 1071-1088.
- [21] 常书平, 王永生, 庞之洋. 用基于 SST 模型的 DES 方法数值模拟圆柱绕流[J]. 舰船科学技术, 2009, 31(2): 30-33. (CHANG Shuping, WANG Yongsheng, PANG Zhiyang. Numerical simulation of flow around circular cylinder using SST DES model[J]. Ship Science and Technology, 2009, 31(2): 30-33. (in Chinese))
- [22] CHOI H, JEON W P, KIM J. Control of flow over a bluff body[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2008, 40: 113-139.
- [23] NISHIMURA H, TANIKE Y. Aerodynamic characteristics of fluctuating forces on a circular cylinder[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2001, 89(7/8): 713-723.
- [24] WANG H F, ZHOU Y. The finite-length square cylinder near wake[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2009, 638: 453-490.
- [25] 刘超群. Liutex-涡定义和第三代涡识别方法[J]. 空气动力学学报, 2020, 38(3): 413-431. (LIU Chaoqun. Liutex-third generation of vortex definition and identification methods[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2020, 38(3): 413-431. (in Chinese))
- [26] ZHANG Zhihao, TU Jiahuang, ZHANG Kai, et al. Vortex characteristics and flow-induced forces of the wavy cylinder at a subcritical Reynolds number[J]. Ocean Engineering, 2021, 222: 108593.