

边界层吸气对圆柱绕流尾涡脱落结构及圆柱受力的影响

史旭阳,孙瑾静,黄典贵

(上海理工大学 能源与动力工程学院,上海 200093)

摘要:为抑制圆柱绕流时受到的涡激力、保护圆柱结构安全,通过施加边界层吸气控制圆柱在涡激效应下受到的周期力。采用数值模拟方法分析 $Re = 200$ 时吸气口位置和吸气强度对圆柱受力情况及尾涡脱落结构的影响。结果表明:当吸气口布置在 60° 、 90° 和 120° 位置时,添加吸气条件会显著减小圆柱受到的涡激力;吸气条件的引入对圆柱尾涡的脱落规律有显著的影响,相比较而言,吸气口位置对尾涡脱落结构的影响大于吸气强度;在圆柱受到的涡激力显著减小的情况下,圆柱尾部脱落的尾涡结构较之前有明显变化,由交替脱落的、方向相反的对涡变为不再脱落的、狭长的涡结构。

关键词:圆柱绕流控制;吸气口位置;吸气强度;涡激力;尾涡脱落结构

中图分类号: TU973.32 文献标识码: B DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2021.06.010

[引用本文格式]史旭阳,孙瑾静,黄典贵.边界层吸气对圆柱绕流尾涡脱落结构及圆柱受力的影响[J].热能动力工程,2021,36(6):63-69. SHI Xu-yang, SUN Jin-jing, HUANG Dian-gui. Effects of boundary layer suction on the structure of wake vortex shedding around a cylinder and the force on the cylinder[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2021, 36(6):63-69.

Effects of Boundary Layer Suction on the Structure of Wake Vortex Shedding around a Cylinder and the Force on the Cylinder

SHI Xu-yang, SUN Jin-jing, HUANG Dian-gui

(School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai, China, Post Code:200093)

Abstract: In order to suppress the vortex force imposed on the cylinder and protect the structure of the cylinder, the unsteady separated flow around a cylinder was simulated numerically with boundary layer suction at $Re = 200$. We focus on the influence of suction slot position and suction intensity on the force of cylinder and the structure of wake vortex shedding from cylinder. The results shows that the total drag and lift coefficient of cylinder can be decreased under the suction slot position set at 60° , 90° and 120° . The introduction of boundary layer suction has a significant effect on the shedding law of the cylindrical wake. The effect of the suction slot position on the vortex shedding structure is greater than that of the suction intensity. At those positions, the structure of the trailing vortex of the cylindrical tail has changed significantly, from the opposite vortex that alternates the direction of shedding into a long, narrow vortex structure that no longer sheds.

Key words: cylindrical flow control, suction port position, suction intensity, vortex force, structure of wake vortex

收稿日期:2020-08-13; 修订日期:2020-09-29

基金项目:国家自然科学基金(52036005)

Fund-supported Project: Supported by the National Natural Science Foundation of China(52036005)

作者简介:史旭阳(1996-),男,陕西西安人,上海理工大学硕士研究生。

引言

圆柱体作为日常生活中最为常见的工程结构形状,其结构安全一直是人们关心的问题。在流场中由于尾涡周期性脱落会在圆柱体结构表面形成周期性脉动作用力,导致疲劳破坏,特别是当钝体尾涡脱落频率接近结构体的自然频率时,结构体受到的破坏更加严重^[1]。因此对结构体旋涡脱落形式的控制和对结构体振动的抑制具有现实的应用背景和重要的学术价值。

Zhou 等人^[2]研究了粗糙表面圆柱的绕流特性,通过在圆柱表面布置凹坑对圆柱绕流进行流动控制,实验表明凹坑粗糙表面圆柱的阻力相比于光滑圆柱降低了 10%,涡街的振荡强度得到抑制。范宝春等人^[3]采用流场电磁控制的方法对圆柱绕流进行流动控制,取得很好的减阻效果。文献^[4]实验研究了单一的合成射流对圆柱尾迹改进和减阻的影响。文献^[5]研究了当合成射流位于圆柱体的后端或前端停滞点时,单个合成射流对修改尾迹的影响。文献^[6-7]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。Gao 等人^[8]实验表明,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。陈南茜^[9]采用数值模拟的方法研究了利用吸气法对圆柱绕流进行流动控制,发现在一定区域施加吸气条件可以减小圆柱绕流的阻力,抑制圆柱背风区的非对称流动。丁林^[10]采用数值模拟方法研究了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,结果表明:射流的引入可有效降低圆柱所受升力,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明显的演变过程。

本文将吸气条件引入圆柱结构,在 Re 为 200 时研究吸气参数、吸气口位置和吸气强度对尾涡脱落结构的影响。

1 物理模型

图 1 为设置吸气口的固定圆柱物理模型。圆柱静止地固定在流场中,在圆柱上开设沿 X 轴对称分布的两个吸气口,分别以 $\pm\alpha$ 为吸气口中线与 X 轴

的夹角(当 $\alpha=0^\circ$ 或 $\alpha=180^\circ$ 时,两个沿 X 轴对称的吸气口重合为一个吸气口);吸气口形状与圆柱外形贴合,吸气口宽度 L 为所对应圆弧弧长,该弧长对应的圆心角为 β ;吸气方向沿径向向内,吸气速度用 $u = v_{jet}$ 表示,用吸气强度来表征射向圆柱内部的气流强度($C_\mu = 2u^2 d/U_\infty^2 D$);圆柱直径记为 D ;无穷远处来流速度记为 U_∞ , $U_\infty = 0.003 \text{ m/s}$ 。

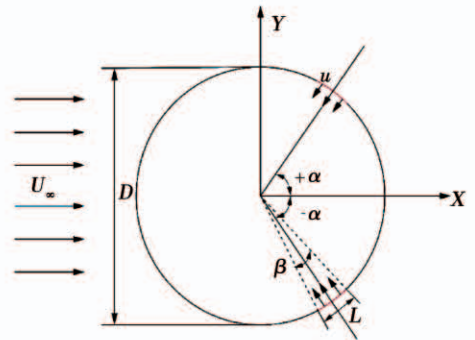


图 1 设置吸气口的固定圆柱物理模型

Fig. 1 Fixed cylinder physical model with suction port

2 计算模型

整体计算域采用矩形计算域,计算域为 $50D \times 40D$ 。柱体位于流场中的位置如图 2 所示。计算域左侧为入口边界,边界条件为速度入口;计算域右侧为出口边界,边界条件为压力出口;为了保证模拟计算为二维无限大平面流动,计算域上、下边界设置边界条件为对称面,圆柱吸气口外的其余边界条件设为无滑移壁面;吸气口位置边界条件设置为速度入口。

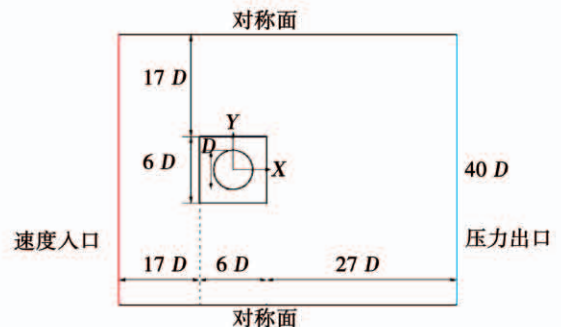


图 2 计算域及边界条件

Fig. 2 Computational region and boundary conditions

为精确模拟圆柱的受力情况,在圆柱附近 $6D \times 6D$ 区域进行局部加密。图 3 给出了圆柱周围局部

网格分布形式。在 $Re = 200$ 时,选用 SA 湍流模型。通过求解二维不可压非定常 N-S 方程获得流场细节。空间采用 Roe's 三阶迎风格式。

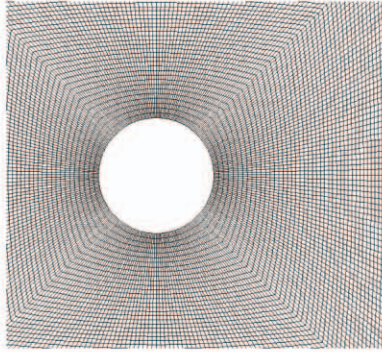


图 3 圆柱周围局部网格分布

Fig. 3 Grid distribution around the cylinder

为了验证计算网格的可靠性,分别采用疏密不同的 4 套网格,对 $Re = 200$ 时的静止圆柱绕流进行模拟。表 1 给出了 4 种网格的节点分布及计算得到的最大升力幅值 C_{L-max} 。由表 1 可知,网格 3 和网格 4 计算得到的最大升力幅值非常接近,当网格量增加 43.75% 时,圆柱受到的升力系数最大值仅改变了 3.1%,此时进一步增加网格数量对模拟结果的影响可以忽略不计。因此,在保证精度和减少计算时间的基础上,计算中都采用网格 3 进行计算。

表 1 网格参数及计算结果

Tab. 1 Mesh parameters and results

网格	圆柱节点	网格数	C_{L-max}
1	100	163 200	0.483 4
2	200	255 000	0.542 9
3	300	573 750	0.598 1
4	400	1 020 000	0.616 5

3 结果与分析

3.1 圆柱受力

3.1.1 吸气强度对柱体升力系数的影响

图 4 给出雷诺数为 200 时,不同吸气口位置下,柱体升力系数随吸气强度的变化,此时吸气形式采取持续不间断的吸气方式。图中数字 1~5 表示吸气强度由小到大的变化,值由吸气速度 u 经式 $C_{\mu} = 2u^2 d/U_{\infty}^2 D$ 无量纲化得到。

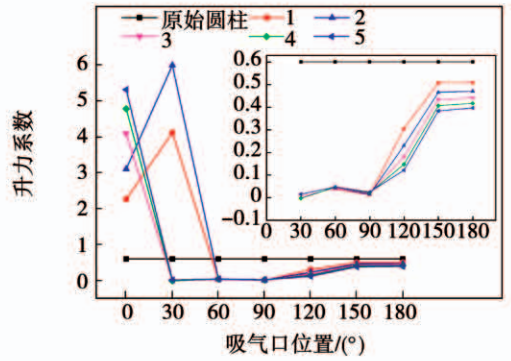


图 4 不同吸气强度时,吸气口位置对升力系数影响

Fig. 4 The influence of suction port position on lift coefficient at different suction intensity

当吸气口布置在 0° 位置时,圆柱的升力系数比原始圆柱时均有明显增加,且增加幅值随着吸气强度的增加而增加。当吸气口布置在 30° 位置时,圆柱的升力系数随着吸气强度的增加,先增加后减小直至趋于稳定。当吸气强度小于 2 时,圆柱的升力系数大于原始圆柱;当吸气强度增加到 3 之后,圆柱的升力系数明显降低并低于原始圆柱。当吸气口位置布置在剩余 5 个位置时,圆柱的升力系数明显降低,其中控制效果最好的为 90° 位置处, 60° 位置略微逊色,吸气口位置布置在这两处均可有效降低圆柱的升力系数,并且吸气强度对控制效果影响不大。

当吸气口布置在 120° 位置时,此时的控制效果差于 90° 和 60° 位置,但优于 150° 和 180° 位置;在此位置处,吸气强度对控制效果影响较大,随着吸气强度的增加,控制效果增强,圆柱的升力系数减小。当吸气口布置在 150° 和 180° 位置时,此时具有一定的控制效果且随着吸气强度的增加,控制效果增强,圆柱的升力系数减小;在此位置时,吸气强度对控制效果的影响优于 60° 和 90° 位置,但差于 $0^\circ, 30^\circ$ 和 120° 位置。

图 5 为不同吸气口位置下升力系数随吸气强度的变化。吸气强度在圆柱背风面与迎风面对升力系数的影响呈现不同趋势:当吸气口布置在圆柱的迎风面 ($120^\circ, 150^\circ$ 和 180°) 时,控制效果随吸气强度的增加而增加,圆柱的升力系数随着吸气强度的增加而减小;当吸气口布置在圆柱的背风面 ($0^\circ, 60^\circ$ 和 90°) 时,控制效果随吸气强度的增加而减小,圆柱

的升力系数随着吸气强度的增加而增大。30°时发生控制效果突变是因为此时吸气口位置处于原始圆柱的分离点附近,吸气强度的改变会明显地影响流场结构。

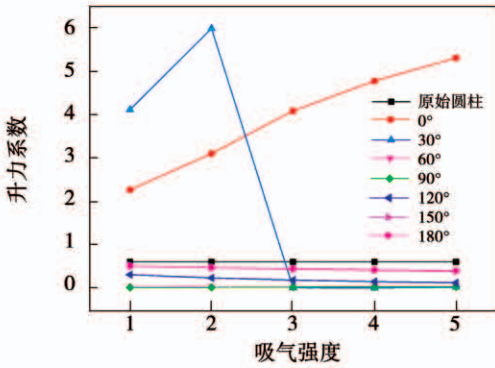


图 5 不同吸气口位置下升力系数随吸气强度的变化
Fig.5 Influence of suction port position on lift coefficient with different suction intensity

3.1.2 吸气强度对柱体阻力系数的影响

图 6 为不同吸气强度时,吸气口位置对阻力系数的影响。当吸气口设置在 0°位置时,圆柱的阻力系数均大于原始圆柱,并随着吸气强度的增加,阻力系数逐步增加,认为在此位置处进行吸气控制是不合适的。当吸气口位置设置在 30°位置时,圆柱的阻力系数均大于原始圆柱,并随着吸气强度的增加,圆柱的阻力系数呈现先增加再减小再增加的过程,总体趋势随着吸气强度的增加而增加。同样,在此位置处进行吸气控制是不合适的。当吸气口设置在其余 5 个位置时,均可有效降低圆柱的阻力系数,其中控制效果最好的为 90°位置处,120°位置略微逊色。并且在这两处位置时,控制效果随吸气强度的增加而增强,圆柱的阻力系数随吸气强度的增强而减小。当吸气口设置在 60°位置时,此时的控制效果略差于 90°和 120°位置(吸气强度为 1 时除外),但优于 150°和 180°位置处,此时吸气强度对控制效果影响不大。当吸气口设置在 150°和 180°位置处时,控制效果较差,但仍可以减小圆柱的阻力系数,在这两处位置时,控制效果随吸气强度的增加而增强,圆柱的阻力系数随吸气强度的增强而减小。综上,认为 60°,90°和 120°位置处引入吸气,控制良好,其中 90°位置处控制效果最好。

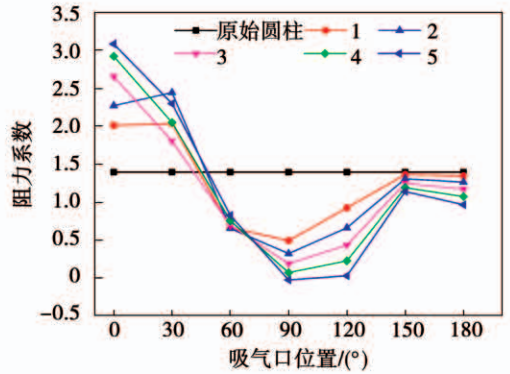


图 6 不同吸气强度时,吸气口位置对阻力系数的影响
Fig.6 The influence of suction port position on drag coefficient at different suction intensity

图 7 为不同吸气口位置下,吸气强度对阻力系数的影响。吸气强度在圆柱背风面与迎风面对升力系数的影响呈现不同趋势。当吸气口布置在圆柱的迎风面(90°,120°,150°和 180°)时,控制效果随吸气强度的增加而增加,圆柱的阻力系数随着吸气强度的增加而减小;当吸气口布置在圆柱的背风面(0°,30°和 60°)时,控制效果随吸气强度的增加而减小,圆柱的阻力系数随着吸气强度的增加而增大。30°时发生控制效果突变的可能原因是:此时吸气口位置处于原始圆柱的分离点附近,吸气强度的改变会明显地影响流场结构,具体原因还有待进一步研究。

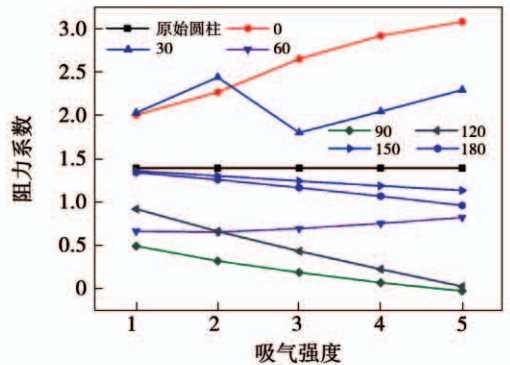


图 7 不同吸气口位置下,吸气强度对阻力系数的影响
Fig.7 The rule of resistance coefficient with suction intensity at different suction positions

3.1.3 吸气口位置对柱体升、阻力系数的影响

图 8 给出吸气口位置设置在 60°,90°和 120°位置处时,不同吸气强度下,柱体升、阻力系数随时间的变化。图中 60-1 表示吸气口位置设在吸气口中

线与 X 轴的夹角 60° 夹角处,吸气强度为 1,其余类推。

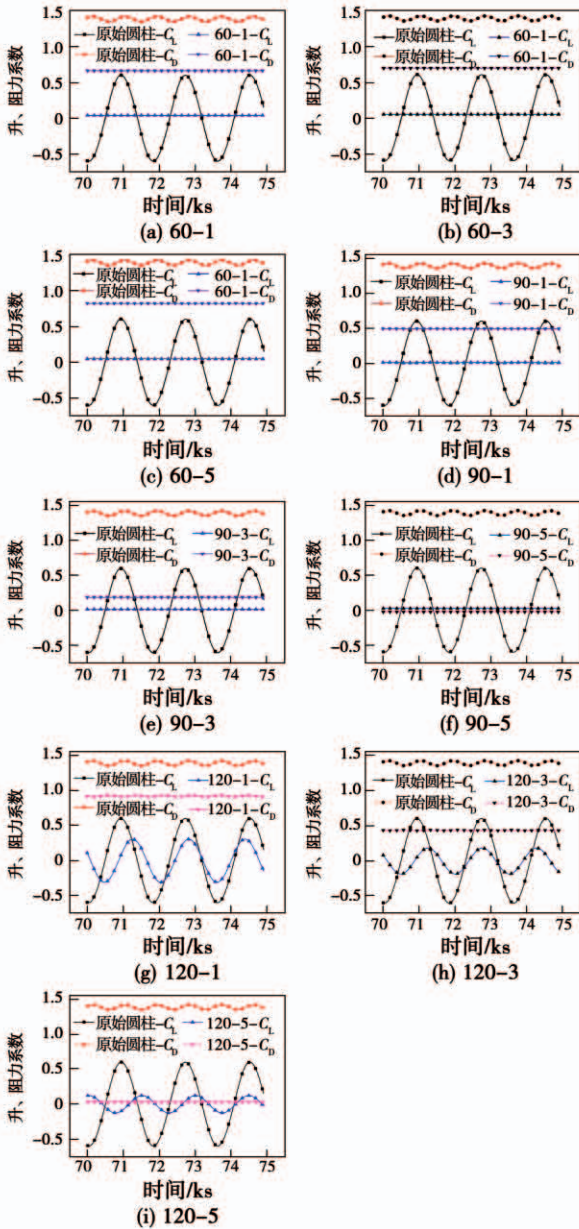


图 8 圆柱体升、阻力系数随时间的变化

Fig. 8 Variations of the lift and drag coefficient of a cylinder with time

当吸气口位置设置在 60° 时,添加吸气条件后,圆柱的升、阻力无论是大小还是频率都得到了明显地抑制,升阻力系数随时间的震荡曲线由正弦曲线基本变为一条直线,此时圆柱的升、阻力系数受吸气强度地影响较小。随着吸气强度增加,圆柱的升、阻力系数都有略微地增加,但数值仍小于原始圆柱的升、阻力系数。

当吸气口位置设置在 90° 时,添加吸气条件后,圆柱受到的升、阻力无论是大小还是频率都得到了明显抑制,升阻力系数随时间的震荡曲线由原来的正弦曲线基本变为一条直线。此时圆柱的升力系数受吸气强度的影响较小,随着吸气强度的增加,升力系数都有略微的增加;圆柱的阻力系数对射流动量的敏感性强于升力系数,随着吸气强度的增加,阻力系数下降较为明显,此趋势与 60° 位置处时相反。

当吸气口位置设置在 120° 时,添加吸气条件后,圆柱受到的升、阻力无论是大小还是频率都得到了一定地抑制。控制后圆柱升、阻力系数随时间的震荡曲线仍然是正弦曲线,但是振幅和频率都得到了一定地抑制,对于阻力系数曲线来说,随着吸气强度的增加,阻力系数明显下降,其振幅趋近消失,阻力系数随时间的震荡曲线接近直线。此位置时,圆柱的阻力系数对吸气强度的敏感性优于 90° 位置;对于升力系数曲线来说,升力系数随时间的震荡曲线均为正弦曲线,随着吸气强度地增加,震荡的振幅有一定地降低,但震荡的频率变化不大。

为了精确定量地表示图 8 中不同位置处引入不同吸气强度的吸气控制后,圆柱本身的升力最大值和阻力平均值与不控制时的降低量,表 2 给出引入升、阻力值的降低率,降低率为控制后圆柱受到的升力最大值(阻力平均值)减去控制前圆柱受到的升力最大值(阻力平均值)的差,除以控制前圆柱受到的升力最大值(阻力平均值)再乘百分之百。负号代表控制后圆柱受到的升、阻力值均小于控制前的数值。

表 2 不同吸气口位置和吸气强度下,控制后圆柱体升阻力系数的降低率 (%)

Tab.2 The reduction rate of lift and drag coefficient under different suction port positions and intensities (%)

控制位置/ $^\circ$	吸气强度		
	1	3	5
60 - C_{L-max}	-93.54	-92.87	-92.17
90 - C_{L-max}	-98.07	-97.14	-95.97
120 - C_{L-max}	-49.22	-69.85	-79.81
60 - C_{D-mean}	-52.35	-50.11	-40.96
90 - C_{D-mean}	-64.58	-86.48	-101.89
120 - C_{D-mean}	-33.85	-68.85	-98.02

3.2 圆柱尾涡结构

图 9 给出雷诺数为 200 时,柱体尾涡脱落结构在不同吸气口位置下的脱落形式,吸气强度分别取 1,3 和 5,此时射流形式仍采取持续不间断的吸气方式。

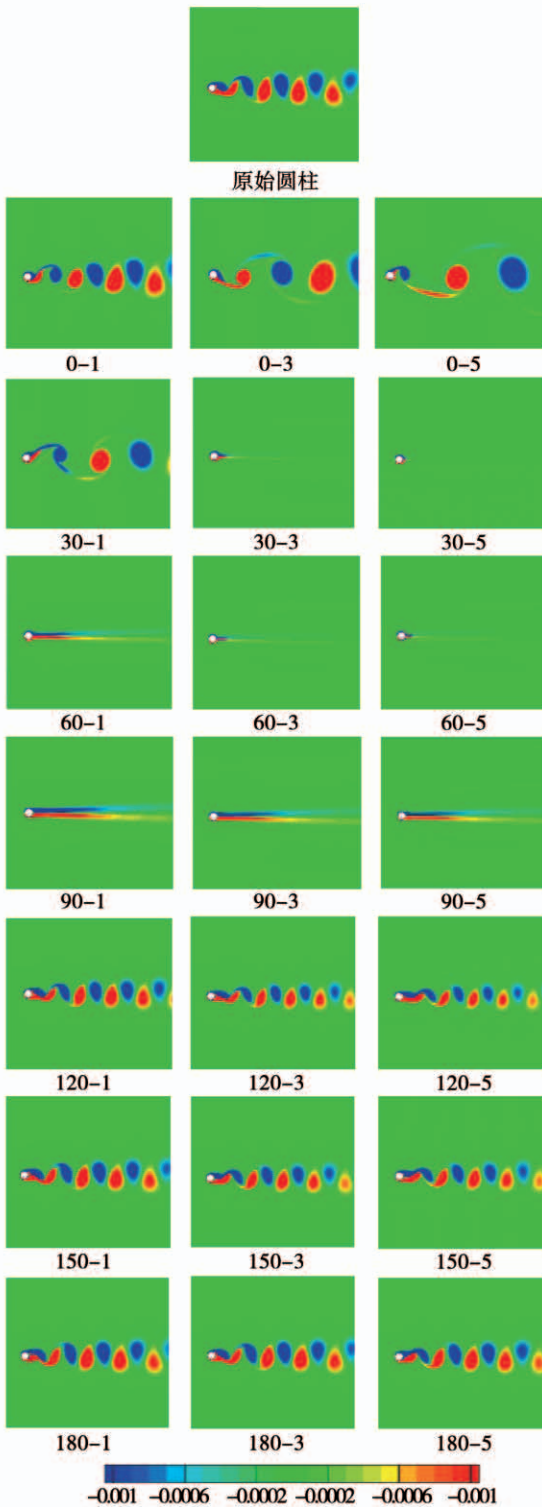


图 9 吸气口位置和吸气强度对柱体尾流旋涡脱落结构的影响

Fig.9 The shape of the wake vortex of cylinder under different suction port position and intensity

由图 9 可知,当吸气口位置在 0°时,圆柱尾涡脱落形式为典型的 2S 模式。相比原始单个圆柱来说,添加吸气条件后,在吸气强度较弱的条件下,脱落呈现对称的状态尾涡,其尺寸有所增加,但脱落频率有所下降。随着吸气强度增强,脱落的尾涡尺寸增加,脱落尾涡频率减小。

当吸气口位置在 30°时,圆柱尾涡脱落形式随着吸气强度的增加发生变化。当吸气强度较小时,圆柱尾涡脱落形式呈现典型的 2S 模式;随着吸气强度的增加,圆柱的尾涡脱落形式由规则的对称交替脱落、具有不同旋转趋势的自由剪切层变为细长的、没有脱落的自由剪切层,由于这种尾涡结构不会引起圆柱体自身的振动,所以此时圆柱体的升、阻力系数显著减小;随着吸气强度进一步增加,细长的自由剪切层长度减小,圆柱体的升、阻力系数进一步减小。当吸气口位置在 60°和 90°时,圆柱尾涡脱落形式与 30°时吸气强度相同,此时圆柱体受到的升、阻力系数显著减小;随着吸气强度进一步增加,细长的自由剪切层长度减小,圆柱体的升、阻力系数进一步减小,此时圆柱自身振动得到了有效控制,在此位置采用吸气手段,控制效果最佳。

当吸气口位置在 120°和 150°时,圆柱尾涡脱落形式呈现典型的 2S 模式,没有出现脱落模式的改变,但是随着吸气强度的增加,尾涡尺寸有所下降,但是脱落频率有所增加,这与 0°和 30°位置处弱吸气强度时规律相反。

4 结 论

(1) 引入吸气条件控制圆柱受力和尾涡结构是可行的,控制效果对吸气口位置和吸气强度反应敏感。

(2) 在 60°和 90°位置引入吸气时,圆柱受到的涡激力和频率均显著下降,此时控制效果最好。除 0°和 30°位置弱吸气强度工况外,其余位置均有一定的控制作用。在吸气口设置于圆柱背风面与迎风面时吸气强度对升力系数和阻力系数的影响呈现不同趋势。

(3) 吸气口位置对圆柱尾涡脱落结构产生显著

影响。吸气强度不变时,吸气口位置不同会明显改变尾涡脱落结构。升、阻力系数频率和幅值不同时,圆柱尾涡结构也发生显著变化。

参考文献:

- [1] ARMIT J. Wind loading on cooling towers [J]. Journal of the Structural Division, 1980, 106 (ST3): 623 - 641.
- [2] ZHOU Bo, WANG Xi-kun, et al. Control of flow past a dimpled circular cylinder [J]. Experimental Thermal & Fluid Science, 2015, 69: 19 - 26.
- [3] 范宝春, 张 辉, 陈志华, 等. 圆柱绕流的优化控制 [J]. 空气动力学学报, 2007 (25): 97 - 101.
FAN Bao-chun, ZHANG Hui, CHEN Zhi-hua, et al. Adjoint-based optimal control of flow around cylinder [J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2007 (25): 97 - 101.
- [4] FENG L H, WANG J J. 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] TENSI J, BOU, PAILL, et al. Modification of the wake behind a circular cylinder by using synthetic jets [J]. Journal of Visualization, 2002, 5 (1): 37 - 44.
- [8] 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 & Combustion, 2016, 97 (3): 1 - 14.
- [9] 陈南茜. 吸气条件对圆柱非定常分离流影响的数值研究 [J]. 空气动力学学报, 1994, 12 (3): 288 - 294.
CHEN Nan-qian. A numerical simulation of unsteady separated flow around a circular at suction boundary conditions [J]. Acta Aerodynamica Sinica, 1994, 12 (3): 288 - 294.
- [10] 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]. 航空动力报, 2019, 34 (12): 2529 - 2538.
DING Lin, YANG Lin, WANG Hai-bo, 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.

(王治红 编辑)