

振荡射流控制方柱绕流的实验研究

景子枫¹, 王万波², 温新^{1*}

(1. 上海交通大学机械与动力工程学院, 上海 200240;
2. 中国空气动力研究与发展中心 低速空气动力研究所, 四川 绵阳 621000)

摘要: 为研究振荡射流对方柱绕流的流动控制效果, 利用粒子图像测速技术 (Particle Image Velocimetry, PIV) 分别测量了不同动量系数下布置于前驻点和后驻点的振荡射流控制的方柱绕流流场, 并对测得的流场进行本征正交分解 (Proper Orthogonal Decomposition, POD)。研究表明: 两种布置方式下振荡射流与流场的作用方式不同, 均可有效控制方柱绕流流场, 且存在着使控制效果达到最佳的动量系数。当位于前驻点的振荡射流动量系数为 0.309 时, 方柱下游流场形态明显改变, 尾涡长度减小约 50%, 湍动能和雷诺剪切应力分别减小约 71% 和 62%, POD 模态表明尾涡呈反对称脱落模式; 当位于后驻点的振荡射流动量系数为 0.174 时, 尾涡基本消失, 此时尾流场湍动能和雷诺剪切应力分别减小 32% 和 67%, POD 模态表明尾涡改变为对称脱落模式。

关键词: 方柱绕流; 流动控制; PIV 测量; 振荡射流; 本征正交分解

中图分类号: V211.76 文献标识码: A DOI: 10.16146/j.cnki.rndlge.2024.01.012

[引用本文格式] 景子枫, 王万波, 温新, 等. 振荡射流控制方柱绕流的实验研究[J]. 热能动力工程, 2024, 39(1): 108-118. JING Zi-feng, WANG Wan-bo, WEN Xin. Experimental study on sweeping jet control of flow around a square cylinder[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2024, 39(1): 108-118.

Experimental Study on Sweeping Jet Control of Flow around a Square Cylinder

JING Zi-feng¹, WANG Wan-bo², WEN Xin¹

(1. School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, China, Post Code: 200240; 2. Low Speed Aerodynamics Institute, China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang, China, Post Code: 621000)

Abstract: In order to study the flow control effect of sweeping jet around the square cylinder, the flow field around the square cylinder controlled by the sweeping jet arranged at the front and rear stagnation points under different momentum coefficients was measured by particle image velocimetry (PIV). And the proper orthogonal decomposition (POD) was used to analyze the measured flow field. The results show that the interactions of the sweeping jet and the flow field are different under the two arrangements, but both arrangements can control the flow field around the square cylinder effectively, which have an optimal momentum coefficient that achieves the best control effect. When the momentum coefficient of sweeping jets at the front stagnation point is 0.309, the shape of the flow field downstream of the square cylinder changes significantly, the wake vortex length, the turbulent kinetic energy and Reynolds shear stress decrease by about 50%, 71% and 62%, respectively. POD modes show that the wake vortices shed downstream antisymmetrically. When the momentum coefficient of sweeping jets at the rear stagnation point is 0.174, the wake vortices are basically eliminated, and the turbulent kinetic energy and the Reynolds shear stress of the wake flow field are reduced by 32% and 67%. POD modes show that the wake vortices change to shed downstream symmetrically.

收稿日期: 2022-09-29; 修订日期: 2022-11-12

基金项目: 空气动力学国家重点实验室基金 (SKLA-20200303)

Fund-supported Project: Fund of State Key Laboratory of Aerodynamics (SKLA-20200303)

作者简介: 景子枫 (1997-), 男, 上海交通大学硕士研究生。

通讯作者: 温新 (1984-), 男, 上海交通大学副教授。

Key words: flow around square cylinder, flow control, PIV measurement, sweeping jet, proper orthogonal decomposition (POD)

引言

方柱绕流流动控制在理论研究和工程实践中都有着重要意义。方柱体后方交替脱落的尾涡会使其表面压力分布和压力脉动发生改变,引起结构振动和疲劳损坏^[1-3]。因此,开发能够有效控制方柱绕流和尾涡脱落的控制方法具有重要的研究意义。

执行器的选择及排布方式决定了不同的控制机理和控制效果。稳态射流作为控制手段已得到广泛研究^[4-6],最近的研究表明非稳态射流与流场的掺混效果更加强烈,从而带来更好的控制效果。张鑫等人^[7]利用对称布局的等离子激励器控制圆柱绕流,实现了减小阻力系数、延迟边界层分离的控制效果。Qu等人^[8-9]分别应用前、后驻点合成射流对方柱绕流进行流动控制,位于前驻点的合成射流改变了涡街脱落频率,抑制了尾流区的速度波动^[8];位于后驻点的合成射流弥补了方柱尾流区的速度损失并有较好的减阻效果^[9]。然而,传统非稳态射流激励器结构复杂,难以在恶劣环境下稳定工作并且产生的射流速度有限,这些都限制了其在工程中的实际应用。振荡射流器作为一种新兴的流体振荡器,不需任何移动部件,就可以在出口产生高频自激励周期性扫掠射流。振荡射流器已成功应用于冲击换热、流动分离控制、增升减阻以及飞行器控制等众多领域^[10-13]。Wen等人^[14]成功将振荡射流应用于气动矢量喷管,使用纹影方法对流场进行了可视化研究,结果表明,在相同流量注入下振荡射流可以达到比直射流更大的偏转角度和更强的掺混能力。因此,振荡射流在流动控制领域具有极大潜力,但将其应用到钝体绕流的案例寥寥无几。相比于传统主动控制手段,振荡射流应用成本更低,未来更有可能应用于实际工程。

本研究采用粒子图像测速技术对前、后驻点振荡射流控制下的方柱绕流流场进行实验研究,分析了不同位置振荡射流控制下的湍动能分布、雷诺剪切应力分布以及POD模态。

1 实验装置及参数

实验在中国空气动力研究与发展中心回流式水洞中进行。该水洞试验段长度为3 m,截面尺寸为0.5 m(长)×0.5 m(宽),模型区湍流度小于0.2%。本实验来流速度 $U_\infty = 0.4$ m/s。基于方柱边长的雷诺数 $Re = 1.2 \times 10^4$ 。

方柱实验模型边长 D 为30 mm,展长为480 mm。实验模型使用3D打印技术制作,振荡射流器及供水管道均内嵌于方柱体内部,实验装置布置如图1所示。本次实验阻塞比为6%,对流动的影响可被忽略^[15]。方柱下端与水洞底部距离超过 $0.6D$,可以忽略水洞底部边界对流动的影响。方柱安装在水洞上方用于搭载测试模型的导轨平台上,可保证在水洞中竖直固定。

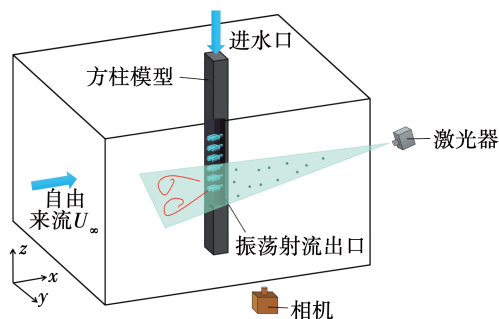


图1 实验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of experiment setup

图2为方柱模型的展向剖面示意图。振荡射流器出口喉部尺寸为1.6 mm(高)×2.5 mm(宽),6个相同尺寸的振荡射流器沿展向阵列布置。定义流向为 x 轴方向,垂向为 y 轴方向,方柱截面几何中心为坐标系中心。方柱内开有空腔,上方外接水泵,空腔内部有连接各个振荡射流器入口的管道。振荡射流器阵列均由此水源驱动,驱动不同振荡射流器的水流量的细微差异可忽略不计。方柱表面均匀喷涂黑色哑光漆以减少反光对PIV测量的影响。在本实验中,驱动振荡射流器的流量由流量计调控,流量调节范围为0~2.5 L/min(LPM),步进间隔为0.5 LPM。动量系数是周期性激励控制涡脱落的重要参数,参考合成射流控制中的定义^[16],动量系数的定义如下:

$$C_{\mu} = 2 \left(\frac{U_j}{U_{\infty}} \right)^2 \left(\frac{A_j}{DL_0} \right) \tag{1}$$

式中: A_j —单个振荡射流器的出口喉部面积; L_0 —相邻两个振荡射流器之间的距离; U_j —射流速度。

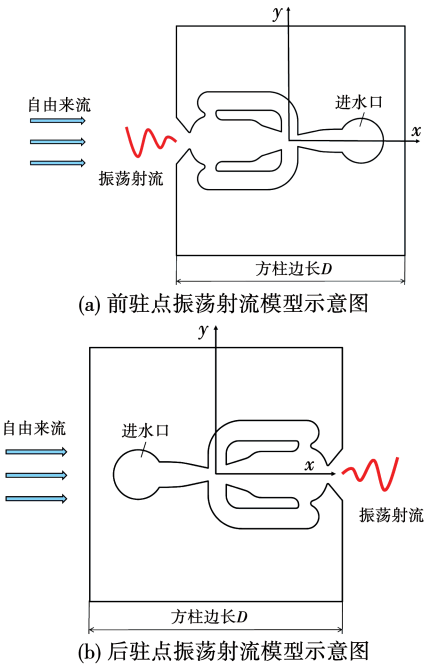


图 2 方柱模型展向剖面示意图

Fig. 2 Schematic diagrams of spanwise section of square cylinder model

由于振荡射流器的周期扫描特性,出口射流速度不稳定,通过驱动水流量与喉部面积之比计算得到射流速度 U_j 。各流量及其对应动量系数如表 1 所示。

表 1 各工况流量及动量系数设置

Tab. 1 Flow rate and momentum coefficient settings under each working condition

体积流量/ LPM	出口速度/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	动量 系数/ C_{μ}	相机采样频率 (前驻点射流)/ Hz	相机采样频率 (后驻点射流)/ Hz
0	0	0	1 000	1 000
0.5	0.42	0.019	1 000	1 600
1.0	0.83	0.077	1 000	1 600
1.5	1.25	0.174	1 000	2 250
2.0	1.67	0.309	1 000	2 250
2.5	2.08	0.482	1 000	2 250

为研究振荡射流控制下的方柱绕流流场,采用二维粒子图像测速系统(PIV)进行流场测量。照明

光源由 532 nm 波长的连续激光器提供,水平照向阵列中间位置的振荡射流器出口中心所在的方柱截面流场,片光厚度约为 1 mm。拍摄区域内的粒子在两帧之间的展向移动距离远小于激光片厚度,可作为准二维流场进行测量。示踪粒子直径为 10 μm ,密度 1.04 g/cm^3 。拍摄设备使用 Photran 公司的 WX100 相机,分辨率 2048 pixel $\times$ 2048 pixel。不同工况下相机采样频率列于表 1 中。采用开源工具包 PIVlab^[17]对相邻两张 PIV 拍摄的流场图片做互相关计算,从而获得拍摄区的速度场。初始计算窗格为 64 $\times$ 64,最终迭代窗格为 32 $\times$ 32。根据 PIV 测量结果,计算了湍动能($\text{TKE} = 0.5 \times (\overline{u'^2} + \overline{v'^2})/U_{\infty}^2$)以及雷诺剪切应力($\text{RSS} = -\overline{u'v'}/U_{\infty}^2$),其中 u' 和 v' 分别是流向速度波动以及垂向速度波动。18 600 帧瞬时速度场被用于计算时间平均场,已达到收敛。

本征正交分解是一种数据降维方法,可有效提取流场主要流动结构^[18-19]。二维速度场可表示为 $p = (u, v)$,其中 u 代表流向速度, v 代表垂向速度。所有流场快照可组成一个矩阵:

$$\boldsymbol{P} = (p_1, p_2, p_3, \cdots, p_N) \tag{2}$$

流场数据组成的矩阵 $\boldsymbol{P}$ 可表示为:

$$\boldsymbol{P} = \bar{\boldsymbol{P}} + \sum_{i=1}^N a_i \boldsymbol{\phi}_i \tag{3}$$

式中: $\bar{\boldsymbol{P}}$ —时均流场; $\boldsymbol{\phi}_i$ —不同的 POD 模态; a_i —各模态所对应的系数。

这些参数可通过奇异值分解计算得到:

$$(\boldsymbol{\phi}, \sqrt{\boldsymbol{\lambda}}, \boldsymbol{a}) = \text{svd}(\boldsymbol{P}) \tag{4}$$

式中:特征值 λ —POD 模态所对应的的能量; $\boldsymbol{\phi}$ 、 $\sqrt{\boldsymbol{\lambda}}$ 和 $\boldsymbol{a}$ —各 POD 模态及对应系数组成的矩阵。

2 实验结果和分析

2.1 无控制方柱

基于 PIV 测量结果,无控制工况下方柱绕流时均尾迹特性如图 3 所示。图 3(a)为无控制工况下的时均流线图,可以看到方柱绕流尾流区的典型流场形态,即因流动分离而形成的关于方柱中心线对称的再循环区域。再循环区域的流向长度约为 2.4 D ,垂向长度约为 1.8 D 。图 3(b)为尾流区的时均湍动能,湍动能可被看作作用在方柱上的不稳定载荷指标,无控制工况下尾流区湍动能沿流向逐渐

增大,并在 $x/D = 2.5$ 附近达到峰值。湍流动能高的区域受漩涡脱落过程影响很大,鞍点附近达到峰值与大尺度涡形成有关,鞍点位置之后涡脱落逐渐减弱,使得湍流动能逐渐减小。图 3(c) 为雷诺剪切应力沿 $y = 0$ 反对称分布,在靠近方柱区域有两对较小的峰值区域,远离方柱的下游区域存在一对较大的峰值区域。该结果与 Saha 等人^[20] 实验测得的结果基本一致。

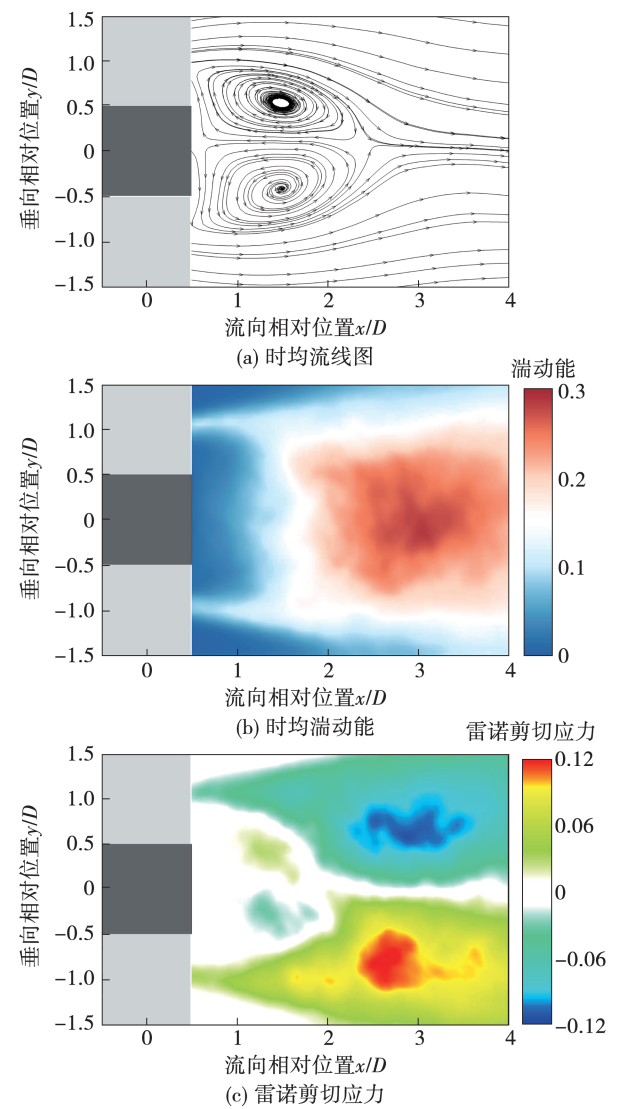


图 3 无控制方柱时均尾流场特征

低阶 POD 模态代表了流场的大尺度涡结构。通常,流向速度的 POD 模态呈对称分布代表对称涡脱落模式,反对称分布代表反对称涡脱落模式;相反,垂向速度的 POD 模态呈对称分布则代表反对称

涡脱落模式,反对称分布则代表对称涡脱落模式^[21]。图 4 为无控制工况下流向速度和垂向速度的前两阶 POD 模态,流向速度的 POD 模态沿方柱中心线反对称分布,垂向速度的 POD 模态,呈对称分布。前两阶模态结果与文献[22]基本一致。

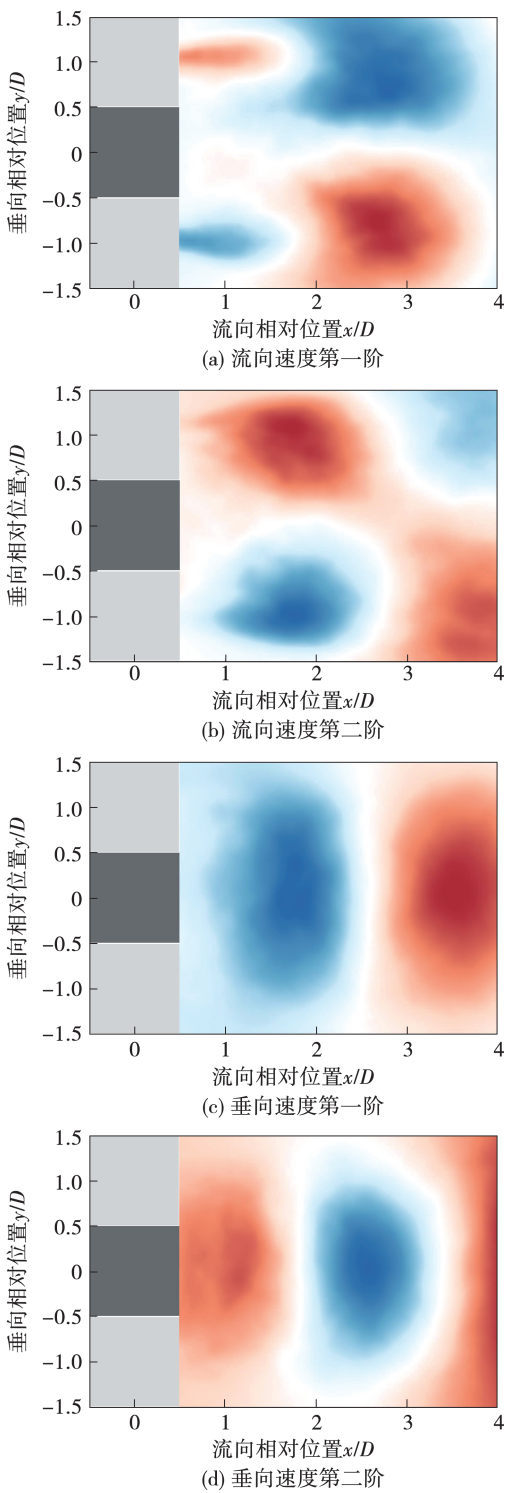


图 4 无控制方柱前两阶 POD 模态

Fig.4 The first and second orders of POD modes without square cylinder

2.2 前驻点振荡射流控制

图 5 为前驻点振荡射流控制下时均流线图。

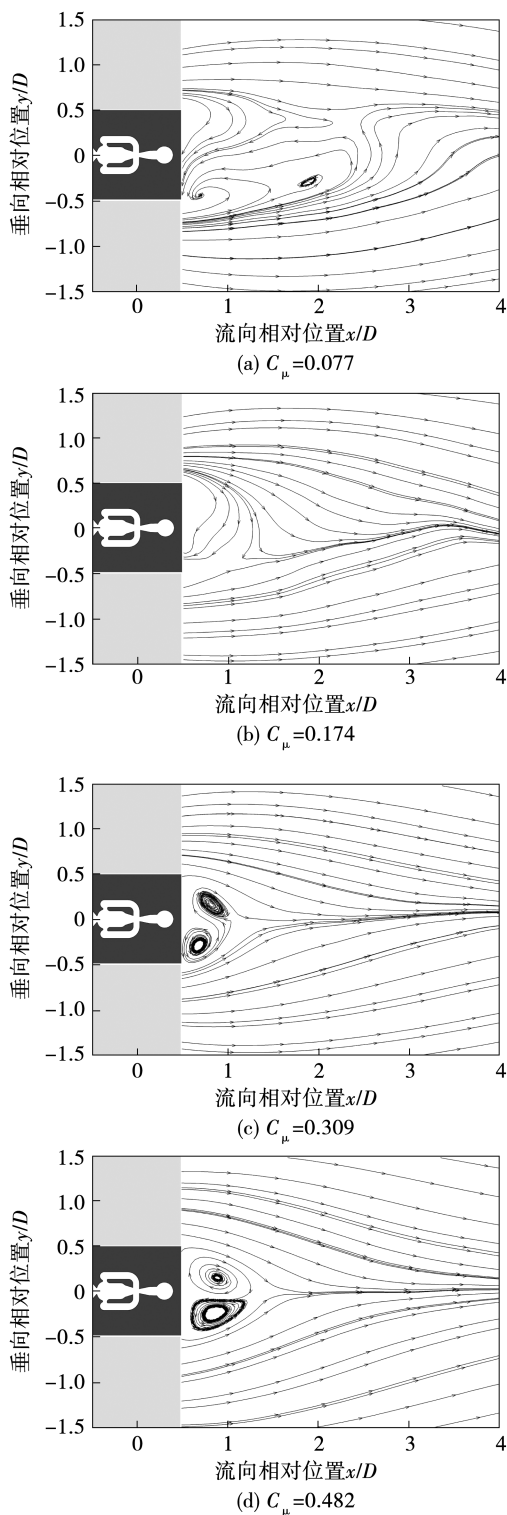


图 5 前驻点振荡射流控制下时均流线图

Fig. 5 Time-averaged streamlines controlled by sweeping jet at front stagnation point

由图 5 可知,位于方柱前驻点的振荡射流迎来自流射出,形成的虚拟前缘可对方柱起到改形的作用,以此可达到流动控制的效果^[23]。由于流动的不稳定性,尾流场形态并非完全对称。可以看出,当 $C_\mu = 0.077$ 时,再循环区域长度较无控制工况无明显变化;当 $C_\mu = 0.174$ 时,鞍点移动至 $x/D = 3$ 的位置附近;当 $C_\mu = 0.309$ 和 0.482 时,鞍点位置在 $x/D = 1.3$ 附近。不同动量系数振荡射流控制下的再循环区域长度差别显著,说明振荡射流强力扰动了漩涡脱落过程,从而显著改变了方柱尾流场。当 C_μ 为 0.309 和 0.482 时,靠近方柱后方的位置形成了一对尺度远小于无控制工况的涡,这对涡的垂向长度略小于方柱特征长度,说明该动量系数下的振荡射流将流动不稳定区域基本控制在垂向长度与方柱特征尺寸相当的后方狭长区域内。可以看出, $C_\mu = 0.309$ 和 $C_\mu = 0.482$ 时振荡射流的控制效果最为显著,再循环区域长度缩减 50% 左右,这一结果与 Feng^[24] 应用合成射流控制圆柱绕流的研究一致,其实验中 $C_\mu = 0.555$ 与 $C_\mu = 1.248$ 下合成射流将分离区控制在圆柱后驻点附近,并指出该现象可说明控制是非常有效的。

图 6 为不同流量下前驻点振荡射流控制下的湍动能。可以发现,随着振荡射流动量增加,湍动能抑制效果增强。当 $C_\mu = 0.077$ 时,湍动能峰值由无控制工况的 0.28 下降至 0.13,湍动能集中区域面积明显减小,峰值区被推至 $x/D = 3.8$ 处。当 $C_\mu = 0.174$ 时,湍动能峰值下降至 0.09,鞍点附近的高端动能区域明显减小。随着流量进一步增大,当 $C_\mu = 0.309$ 和 $C_\mu = 0.482$ 时,尾流场湍动能被控制到 0.08 以下,削减幅度高达 71%,主要分布区域缩小至沿 $y = 0$ 对称的狭长区域,这也说明前驻点振荡射流将方柱涡脱落抑制到此范围内。

图 7 为各工况下时均雷诺剪切应力分布图。可以看出各动量系数下的前驻点振荡射流均对尾流场雷诺剪切应力有明显抑制作用。雷诺剪切应力的降低意味着作用在方柱上的不稳定载荷的减小^[7]。当 $C_\mu = 0.077$ 时,雷诺剪切应力峰值由 0.12 衰减至 0.06,大尺度反对称集中区域中心向下游移动。当 $C_\mu = 0.174$ 时,雷诺剪切应力峰值基本不变,但分布形态明显不同,峰值向上游移动且整体更靠近 $y = 0$,

且呈狭长状。当动量系数增大至 0.309 和 0.482 时,雷诺剪切应力峰值向上游移动至 $x/D = 1.5$ 左右,集中分布于鞍点下游附近的 $y = 0$ 两侧,相较于无控制工况,尾流场雷诺剪切应力减小 62% 以上。

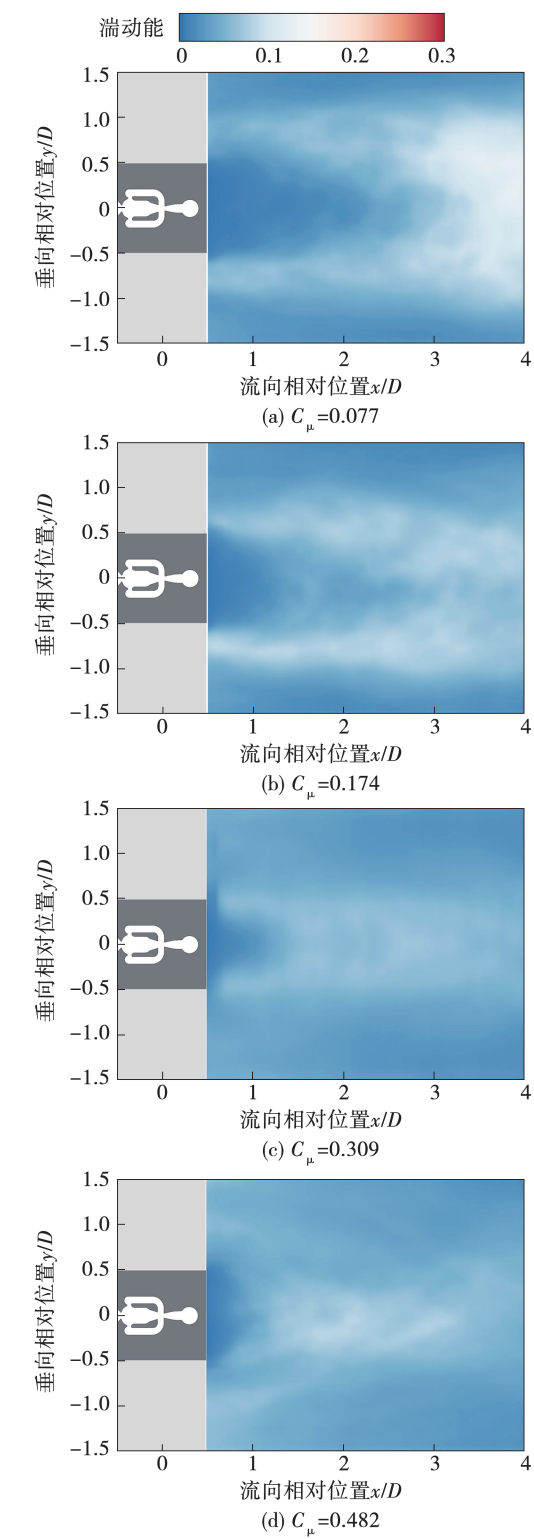


图 6 前驻点振荡射流控制下端动能分布
Fig. 6 Turbulence kinetic energy distributions controlled by sweeping jet at front stagnation point

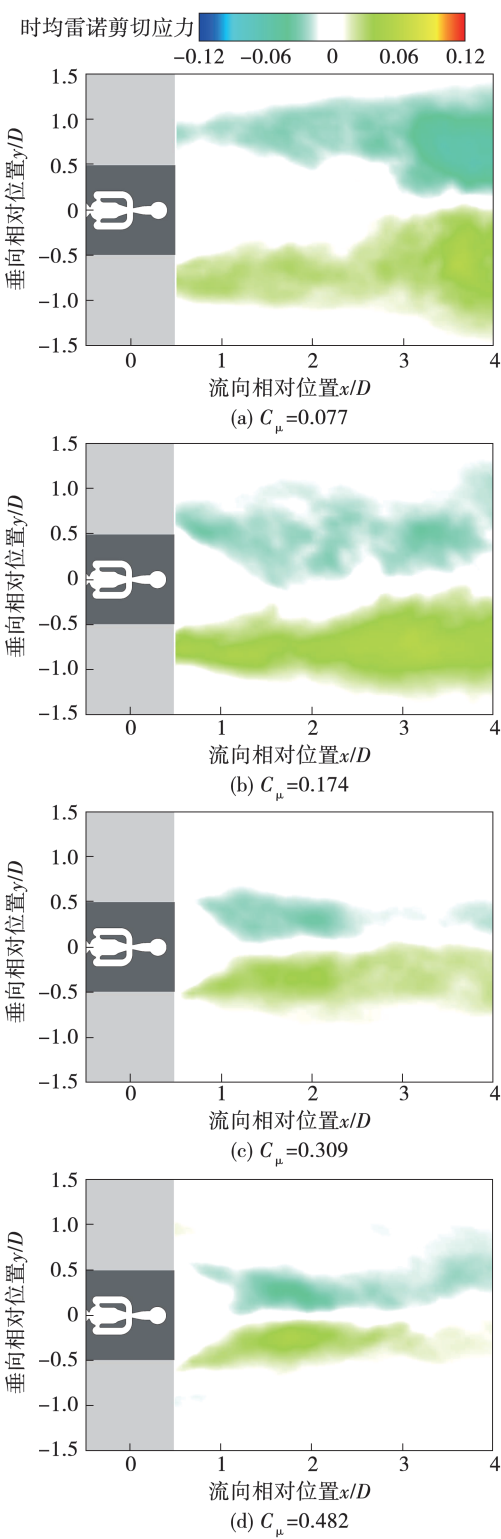


图 7 前驻点振荡射流控制下时均雷诺剪切应力分布
Fig. 7 Time-averaged Reynolds shear stress distributions controlled by sweeping jet at front stagnation point

为进一步研究前驻点振荡射流对方柱尾涡脱落的影响,图 8 列出了前驻点振荡射流动量系数为 $C_\mu = 0.077$ 和 $C_\mu = 0.309$ 时尾流场中流向速度和垂

向速度的前两阶 POD 模态。当 $C_{\mu}=0.077$ 时,射流动量较小,POD 模态与无控制工况下较为类似;当 $C_{\mu}=0.077$ 时,POD 模态与无控制工况差别明显,说明射流显著改变了尾流场的大尺度空间结构。不

同动量系数控制下,流向速度和垂向速度的 POD 模态均为沿中心线反对称分布和对称分布,说明前驻点振荡射流控制下的尾涡脱落的基本模式为反对称脱落。

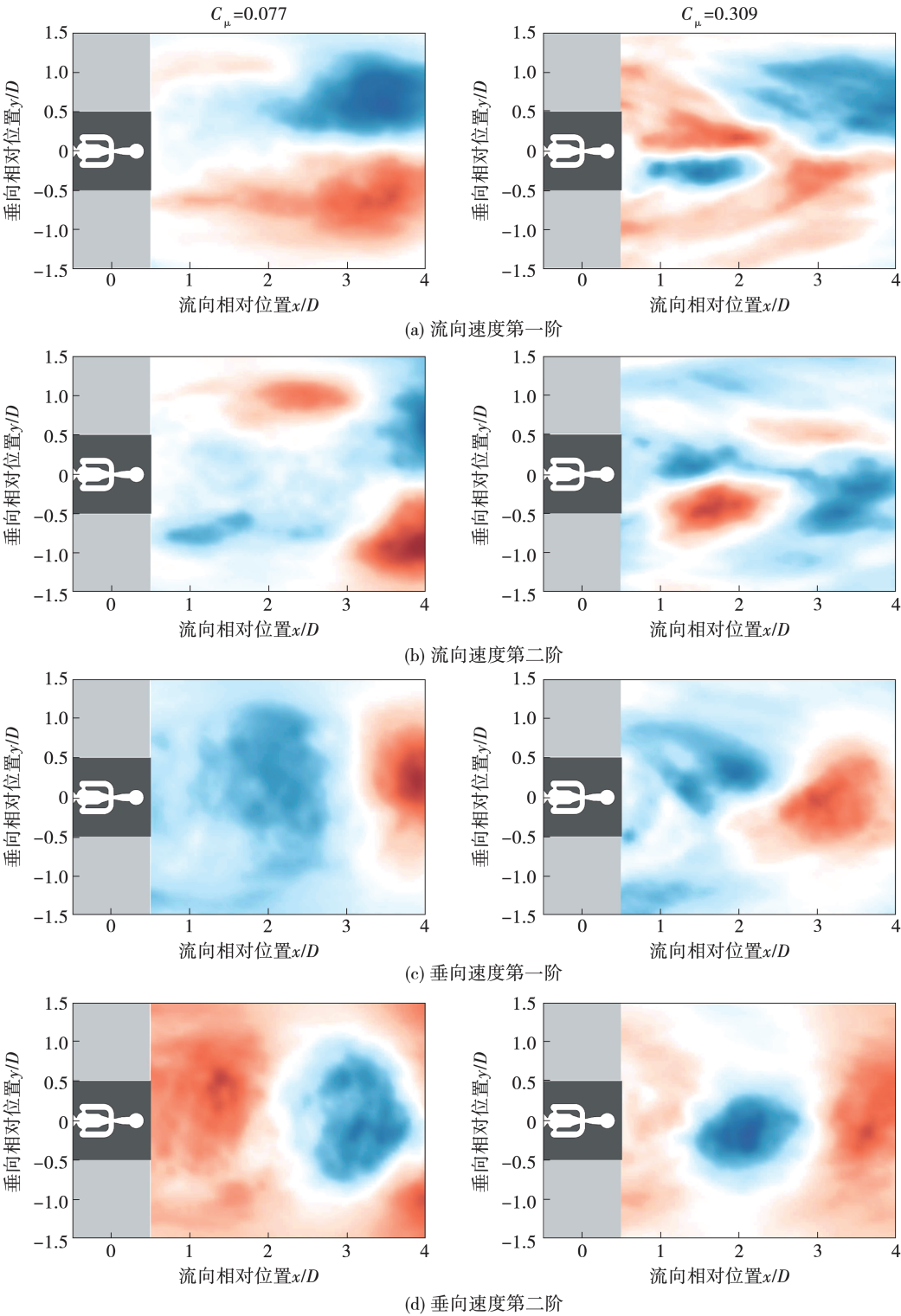


图 8 前驻点振荡射流控制下前两阶 POD 模态

Fig. 8 The first and second orders of POD modes controlled by sweeping jet at front stagnation point

2.3 后驻点振荡射流控制

振荡射流与剪切层直接作用以及对方柱尾流区进行动量补充是方柱后驻点振荡射流控制的主要机理^[25]。图 9 为振荡射流放置于方柱后驻点的时均流线图。当 $C_\mu = 0.019$ 时,由于振荡射流周期性地上下扫掠作用,靠近方柱后驻点位置生成一对较小的涡,因流动分离而形成的两个较大的涡被推至下游位置,再循环区拉长至 $2.8D$ 左右。不同动量控制下方柱尾流去时均流线有所不同。随着振荡射流流量增加, $C_\mu = 0.077$ 工况下振荡射流对流场影响进一步增大,射流所形成的涡增大。当 $C_\mu = 0.174$ 时,靠近方柱后方由射流作用形成的涡成为主导,再循环区基本消除。随着射流动量增强, $C_\mu = 0.309$ 工况下再循环区被完全穿透,由于振荡射流上下扫掠的范围更大,与剪切层作用更强,没有明显的涡对形成。振荡射流动量系数增加导致的流场结构的变化情况与 Qu 等人^[9]使用合成射流以及 Yu^[24]使用稳态射流的结果较为符合。同时,本实验振荡射流 $C_\mu = 0.309$ 取得的效果与稳态射流 $C_\mu = 0.6536$ 接近,振荡射流更强的掺混能力或是其在小流量下取得较好控制效果的主要原因。

图 10 为不同流量下后驻点振荡射流控制下的湍动能。当 $C_\mu = 0.019$ 和 $C_\mu = 0.077$ 时,湍动能峰值由无控制工况的 0.28 下降至 0.27 和 0.25 ,更加明显的控制效果在于高湍动能区域面积的减小。当 $C_\mu = 0.019$ 时,驻点周围的高湍动能区域直径明显减小。当 $C_\mu = 0.077$ 时,峰值区域进一步减小且峰值中心向下游移动。同时,振荡射流直接注入尾流场使得方柱后驻点近壁区域的湍动能有所增高,但由于振荡射流在流向速度衰减很快,所带来的高湍动能区域面积十分有限。当 $C_\mu = 0.174$ 时,尾流区域整体湍动能被有效抑制,除振荡射流出口区域有较高的湍动能区域外,流场湍动能均被控制在 0.12 以下,振荡射流实现了近 60% 的湍动能控制。随着流量进一步增大,当 $C_\mu = 0.309$ 时,尾流场整体湍动能维持在 0.19 以下,更大动量系数的振荡射流直接影响的区域更大,近壁区的湍动能略高于 $C_\mu = 0.174$ 工况。在本次实验范围内存在控制效果最佳

的动量系数。总体而言,施加振荡射流可有效降低尾流场湍动能。

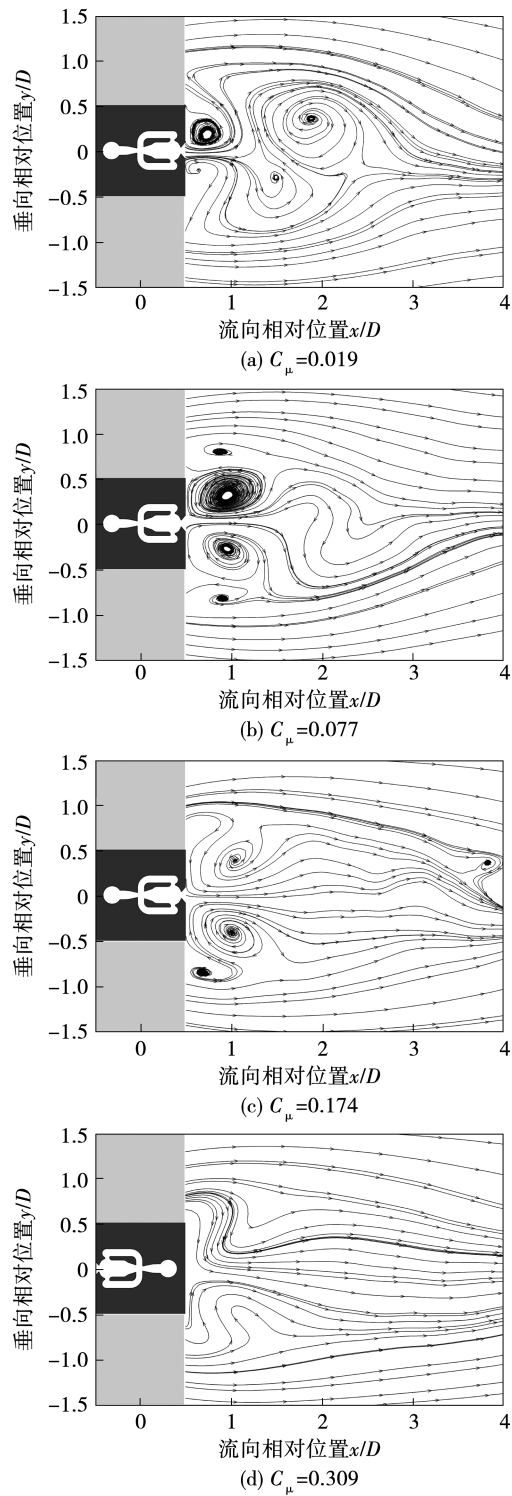


图 9 后驻点振荡射流控制下时均流线图

Fig.9 Time-averaged streamlines controlled by sweeping jet at rear stagnation point

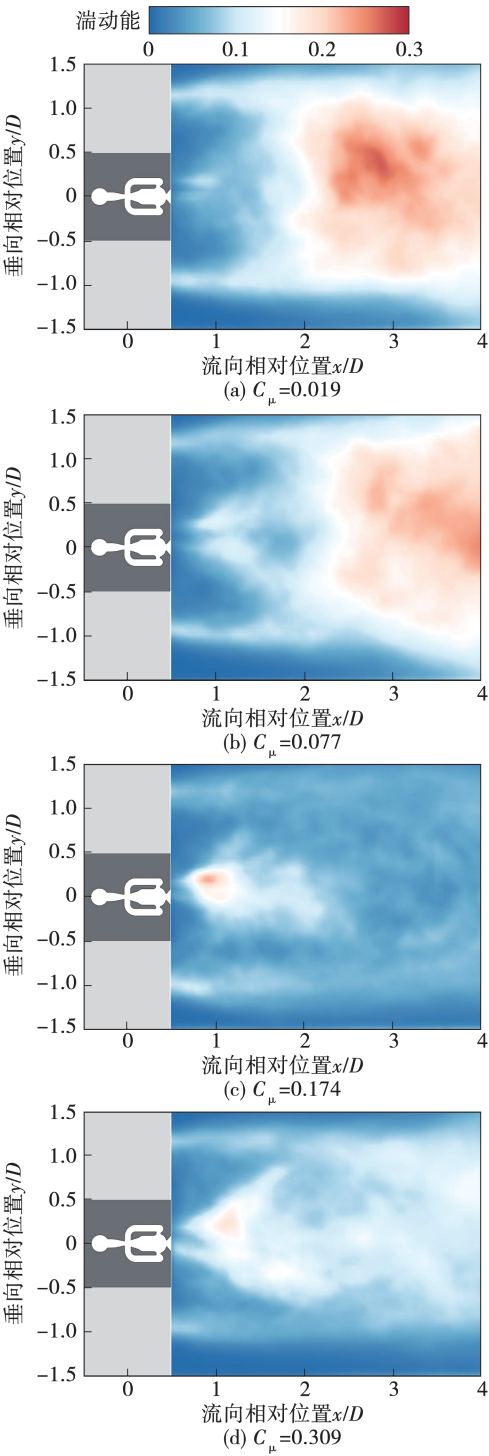


图 10 后驻点振荡射流控制下湍动能分布

Fig. 10 Turbulence kinetic energy distributions controlled by sweeping jet at rear stagnation point

图 11 为后驻点振荡射流控制下的时均雷诺应力分布。当 $C_\mu = 0.019$ 时,振荡射流动量系数较小,尾流场雷诺剪切应力分布基本不变。当 $C_\mu = 0.077$ 时,远离方柱的反对称大尺度雷诺剪切应力集中区的峰值向下游移动,靠近方柱的小尺度雷诺剪切应力集中区被拉伸,这与图 7 中的再循环区鞍点后移

而近壁处有漩涡生成现象一致。当 $C_\mu = 0.174$ 时,大尺度集中区峰值由无控制的 0.12 下降至 0.04 左右,分布形态狭长,说明下游处沿垂向的扩散被基本抑制。靠近方柱的小尺度应力集中区域的峰值有所增强。当 $C_\mu = 0.309$ 时,振荡射流动量系数进一步增大,靠近方柱的应力集中区面积变大,该部分基本由振荡射流所主导。

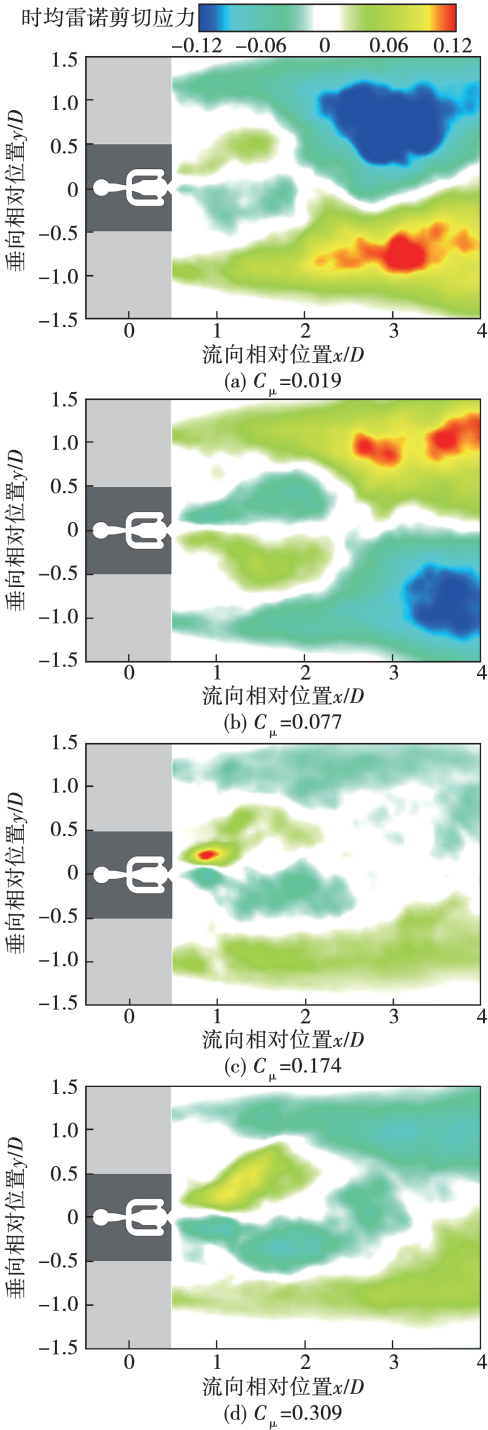


图 11 后驻点振荡射流控制下时均雷诺剪切应力分布

Fig. 11 Time-averaged Reynolds shear stress distributions controlled by sweeping jet at rear stagnation point

图 12 为后驻点振荡射流动量系数为 $C_{\mu} = 0.019$ 和 $C_{\mu} = 0.174$ 控制下的流向速度和垂向速度的前两阶 POD 模态。当 $C_{\mu} = 0.019$ 时,流向速度和垂向速度的 POD 模态分别沿方柱中心线反对称分布和对称分布,与无控工况一致,代表着尾流场反对

称涡脱落模式。当 $C_{\mu} = 0.174$ 时,流向速度的前两阶模态变化为对称分布,垂向速度的前两阶模态则呈现反对称分布,这意味着后驻点振荡射流的注入强烈改变了尾流场大尺度结构,尾涡基本脱落模式转变为对称脱落模式。

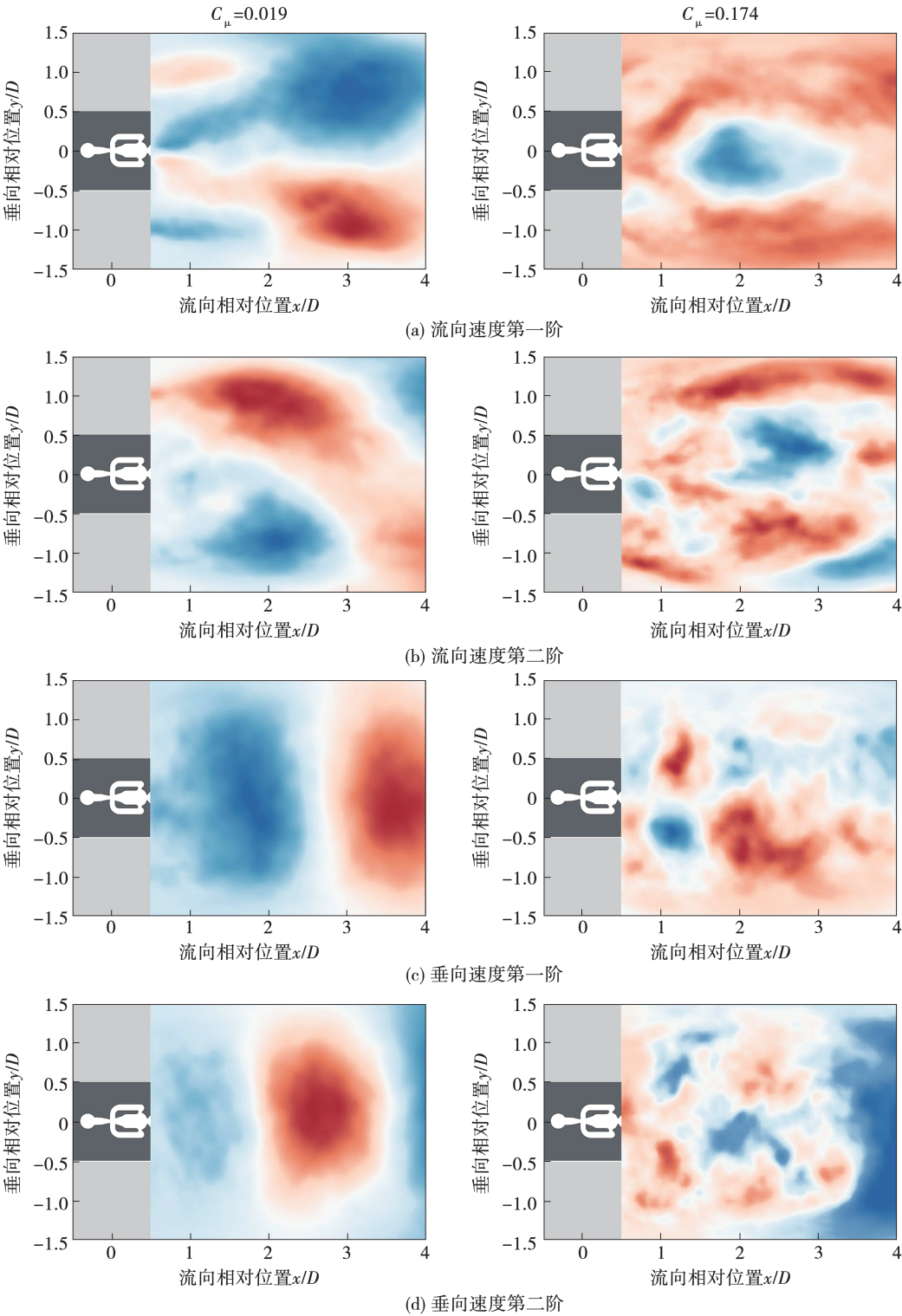


图 12 后驻点振荡射流控制下前两阶 POD 模态

Fig. 12 The first and second orders of POD modes controlled by sweeping jet at rear stagnation point

3 结 论

本文研究了位于前驻点和后驻点振荡射流对方柱绕流流动控制效果。在来流雷诺数不变的情况下,改变射流动量系数并采用二维 PIV 技术分析了各工况的流场,结论如下:

(1) 当振荡射流位于前驻点时,方柱尾流场发生明显改变,较大的动量系数下取得了更好的控制效果。当施加 $C_{\mu}=0.309$ 以上的振荡射流时,湍动能和雷诺剪切应力峰值减小幅度分别在 71% 和 62% 以上,尾涡为反对称脱落模式。

(2) 当振荡射流位于后驻点时,存在使控制效果达到最佳的动量系数,尾流区除射流出口外湍动能和雷诺剪切应力峰值减小幅度分别在 32% 和 67% 以上,尾涡呈对称脱落模式。

本研究实验验证了振荡射流在钝体绕流流动控制应用上的可行性,不同射流方位角下的显著控制效果体现了其在不同应用场合的潜力。但需要指出的是,本研究实验参数存在一定局限性,更多来流雷诺数、方柱偏转角以及绕流结构值得进一步研究,以加深对振荡射流控制钝体绕流机理的认识,促进实际工程应用。

参考文献:

[1] CHOI H,JEON W P,KIM J. Control of flow over a bluff body[J]. Annual Review Fluid Mechanics,2008,40:113 – 139.

[2] 王 勇,郝南松,耿子海,等. 基于时间解析 PIV 的圆柱绕流尾迹特性研究[J]. 实验流体力学,2018,32(1):64 – 70.

WANG Yong,HAO Nan-song,GENG Zi-hai, et al. Measurements of circular cylinder’s wake using time-resolved PIV[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics,2018,32(1):64 – 70.

[3] 苏新军,张修刚,王 栋,等. 气液两相流横掠错列圆柱形成旋涡脱落诱发管束振动的试验研究[J]. 热能动力工程,2004,19(1):14 – 16,51.

SU Xin-jun,ZHANG Xiu-gang,WANG Dong. Experimental investigation of tube bundle vibrations induced by a vortex shedding generated by gas-liquid two-phase flows sweeping across staggered tube arrays[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power,2004,19(1):14 – 16,51.

[4] 史旭阳,孙槿静,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.

[5] CHEN W L,XIN D B,XU F, et al. Suppression of vortex-induced vibration of a circular cylinder using suction-based flow control[J]. Journal of Fluids & Structures,2013,42:25 – 39.

[6] YU H,CHEN W L,HUANG Y, et al. Dynamic wake of a square cylinder controlled with steady jet positioned at the rear stagnation point[J]. Ocean Engineering,2021,233:109157.

[7] 张 鑫,黄 勇,李华星. 等离子体激励器控制圆柱绕流的实验研究[J]. 力学学报,2018,50(6):1396 – 1405.

ZHANG Xin,HUANG Yong,LI Hua-xing. Flow control over a circular cylinder using plasma actuators[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics,2018,50(6):1396 – 1405.

[8] QU Y,WANG J,FENG L, et al. Effect of excitation frequency on flow characteristics around a square cylinder with a synthetic jet positioned at front surface[J]. Journal of Fluid Mechanics,2019,880:764 – 798.

[9] QU Y,WANG J,SUN M, et al. Wake vortex evolution of square cylinder with a slot synthetic jet positioned at the rear surface[J]. Journal of Fluid Mechanics,2017,812:940 – 965.

[10] WEN X,LI Z,ZHOU L, et al. Flow dynamics of a fluidic oscillator with internal geometry variations[J]. Physics of Fluids,2020,32(7):075111.

[11] LI Z,LIU J,ZHOU W, et al. Experimental investigation of flow dynamics of sweeping jets impinging upon confined concave surfaces[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer,2019,142:118457.

[12] SONG J,WANG S,WEN X, et al. Active flow control in an S-shaped duct at Mach 0.4 using sweeping jet actuators[J]. Experimental Thermal and Fluid Science,2022,138:110699. 1 – 110699.9.

[13] PACK L T,MEHTI K,MARLYN A, et al. Active flow control via discrete sweeping and steady jets on a simple-hinged flap[J]. AIAA Journal,2018,56:1 – 13.

[14] WEN X,ZHOU K,LIU P, et al. Schlieren visualization of coflow fluidic thrust vectoring using sweeping jets[J]. AIAA Journal,2022,60(1):435 – 444.

[15] SHARMA A,ESWARAN V. Effect of channel confinement on the two-dimensional laminar flow and heat transfer across a square cylinder[J]. Numerical Heat Transfer, Part A. Application: An International Journal of Computation and Methodology,2005,47(1):79 – 107.

[16] GRECO C S,PAOLILLO G,ASTARITA T, et al. The von Kármán street behind a circular cylinder: Flow control through synthetic jet placed at the rear stagnation point[J]. Journal of Fluid Mechanics,2020,901:1 – 47.