

DOI: 10.19527/j.cnki.2096-1642.2017.02.004

# 基于 POD 方法开缝圆柱绕流流场的研究

江建华, 鲍 锋

(厦门大学航空航天学院, 福建厦门 361005)

## POD Analysis of a Slit Circular Cylinder Near Wake

JIANG Jian-hua, BAO Feng

(School of Aeronautics and Astronautics, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

**摘要:** 利用粒子成像测速技术 (particle image velocimetry, PIV), 在水槽中探究缝隙对圆柱流场结构的影响, 应用频谱分析和本征正交分解 (proper orthogonal decomposition, POD) 方法, 研究了开缝圆柱流场相干结构. 实验 Reynolds 数范围内, 缝隙的“吹吸”作用从根本上改变了圆柱绕流近区尾流结构, 前 6 阶模态形态是流场中最主要的相干结构. 第 1, 2 阶模态形态控制着圆柱绕流流场涡街相继脱落过程, 1 或 2 阶模态系数为尾迹涡的固有频率; 第 3, 4 阶模态形态控制着脱落旋涡沿流向方向能量运输; 第 5, 6 阶模态形态中的同向涡旋结构作用于旋涡缓慢脱离柱体这一过程, 并对旋涡能量起着衰减作用.

**关键词:** 开缝圆柱绕流; 尾迹涡; 粒子成像测速技术; 本征正交分解

中图分类号: O357

文献标识码: A

**Abstract:** Flow around a slit circular cylinder was investigated in a water tunnel with particle image velocimetry (PIV) technique, power spectrum analysis, proper orthogonal decomposition (POD) method and other techniques for data processing. The experimental results show that the flow in the slit demonstrated periodic motion. This oscillating vent-flow has greatly altered the near wake flow features within a certain range of Reynolds number. The total turbulence kinetic energy (TKE) almost contributes from the first six modes. The first and second POD modes control the vortex shedding alternately process. The third and fourth POD modes control the process of vortex energy transition along the flow direction. The interaction of co-rotating vortex pair in the fifth and sixth POD modes effects the vortex energy during the vortex shedding process.

**Key words:** slit circular cylinder; wake vortex; particle image velocimetry; proper orthogonal decomposition

## 引 言

圆柱绕流减阻问题在航空航天飞行器、涡轮机械、海上舰船以及建筑工程等方面具有广泛的工程应用前景<sup>[1]</sup>. 从 Prandtl 创立边界层理论开始, 人们的注意力就集中在型体方面, 即探索物体的流线型. 对于光滑表面圆柱体的绕流, 由于边界层的分离, 在圆柱体前后产生了压力差, 构成圆柱体阻力的绝大部分. 由此结果出发, 可以设想是否可以控制边界层的分离, 以达到减阻的目的. 最直接的方法即是对柱体修形.

日本横须贺国防研究院 Igarashi 对带狭缝圆柱的流场特性进行了一系列相关的实验测量工作<sup>[2-6]</sup>. 1985 年 Igarashi 发表了不同截面形状的圆柱在风洞中进行的实验研究成果<sup>[3]</sup>, 在风洞中, 对直径

$d=34$  mm, 狭缝比  $s/d=0.08$  和  $0.185$  的开缝圆柱在 Reynolds 数  $1.38 \times 10^4 \sim 5.2 \times 10^4$  范围内进行了实验. Igarashi 认为开缝圆柱绕流流场可分为 3 种不同的流动型态:  $0 \leq \beta \leq 40^\circ$  ( $\beta$  为缝隙与来流夹角), 尾流受到自引入现象的控制;  $40^\circ < \beta < 60^\circ$ , 缝隙对流动的影响甚微;  $60^\circ \leq \beta \leq 90^\circ$ , 流动由边界层“吹吸”现象主导; 特别地, 当  $80^\circ \leq \beta \leq 90^\circ$ , 在开缝圆柱缝隙两端, 交替产生“吹吸”现象, 同时伴随着旋涡的周期性脱落, 这种情况造成基部压力骤降, 阻力变大. 随后 Igarashi 测试了不同截面形状的钝体在圆形管道中的涡流溢放效果<sup>[5-6]</sup>, 发现狭缝比  $s/d=0.1$  的开缝圆柱的涡流溢放性能优于梯形柱体, 开缝圆柱具有低阻线形, 其 Strouhal 数和 Reynolds 数的线形关系非常好, 在工业流量测量方面具

收稿日期: 2016-12-05; 修回日期: 2017-01-05

引用格式: 江建华, 鲍锋. 基于 POD 方法开缝圆柱绕流流场的研究[J]. 气体物理, 2017, 2(2): 28-36.

Citation: Jiang J H, Bao F. POD analysis of a slit circular cylinder near wake[J]. Physics of Gases, 2017, 2(2): 28-36.

有潜在的运用价值.

2000 年英国纽卡斯尔大学的 Olsen 等在风洞中进行了缝隙大小和圆柱外轮廓形状对 Strouhal 数和阻力系数影响的研究<sup>[7]</sup>. Olsen 等的研究结果认为 90° 开缝圆柱在  $60 < Re < 1000$  时, 涡流溢放频率大于基准圆柱. 且 Olsen 等明确指出 90° 开缝圆柱能够增强涡流溢放的强度.

在本课题组已有的研究基础上, 本文通过 PIV 测量全流场, 借助频谱分析、POD 分析方法, 重点关注缝隙倾斜角  $\beta = 90^\circ$ , 狭缝比  $s/d = 0.15$  的开缝圆柱绕流流场, 并且揭示其相干结构及物理机制.

### 1 实验模型与研究方法

本文涉及的实验测量工作均在开放式循环水槽中进行, 该水槽配备了拖曳台车、六分量测力天平 and 1 套完整的非介入式粒子成像测速设备 (particle image velocimetry, PIV), 如图 1 所示.

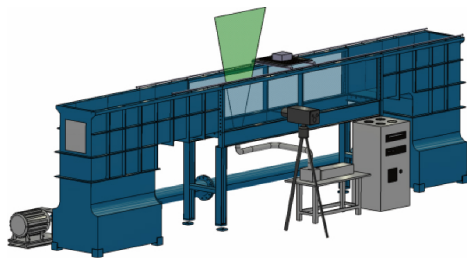


图 1 实验平台  
Fig. 1 Experiment platform

本文须对开缝圆柱绕流的瞬态流场进行分析, 因此建立了时序 PIV 系统, 具体参数见表 1. 选用的激光器为半导体准连续 Nd: YAG 激光器, 工作频率为 40 kHz, 波长为 532 nm, 最大输出功率为 15 W. PIV 相机选用高速 CMOS 相机, 分辨率为 200 万像素, 满幅最大触发频率为 1 kHz, 测量窗口任意可调. 本文实验中的 PIV 系统采用丹麦 DANTEC 公司的 Dynamic Studio 软件, 系统误差在 1% 以内.

表 1 PIV 系统相关参数

Table 1 Relative parameters of PIV system		
parts	model	parameters
laser	Nd: YAG	$P_{max} = 15 \text{ W}$
camera	speedsense 9040	1632 pixels × 1200 pixels
lens	micro-nikkor	$f = 55 \text{ mm}$
processing software	dynamic studio V3.40	—
particle	PSP	$d = 20 \mu\text{m}$

实验模型选用直径  $d = 40 \text{ mm}$ , 缝隙宽度  $s = 6 \text{ mm}$ , 轴向有效长度  $l = 440 \text{ mm}$  的开缝圆柱, 具体参数见表 2.

表 2 开缝圆柱尺寸参数

Table 2 Geometrical parameters of slit cylinder			
diameter of cylinder	length	slit width	ratio
$d = 40 \text{ mm}$	$l = 440 \text{ mm}$	$s = 6 \text{ mm}$	$s/d = 0.15$

为保证 PIV 实验测量的精度, 模型外径公差控制在  $\pm 0.2 \mu\text{m}$ , 并进行黑色阳极氧化处理, 减少激光反射, 如图 2 所示.



图 2 实验模型  
Fig. 2 Experimental model

实验时, 实验模型柱体水平安装于水槽中央, 采用底部中央激光打光, 高速相机在侧面采集原始图像, 如图 3 所示, 实验堵塞比低于 8%.

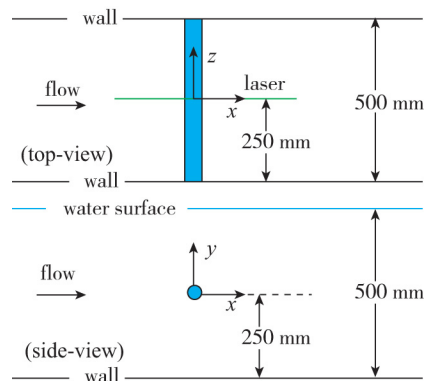
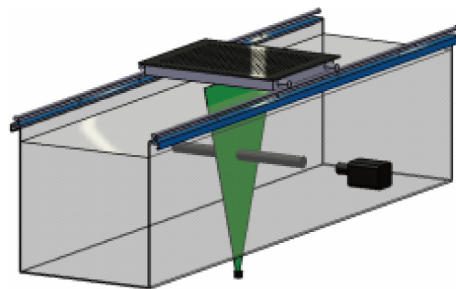


图 3 实验模型及激光切面安装位置  
Fig. 3 Positions of experimental model and laser

### 2 开缝圆柱绕流流场特性分析

为理解开缝圆柱缝隙的“吹吸”作用对圆柱绕流流场的影响，本文设置距离圆柱中心下游 1d 处<sup>[8]</sup>单点 M 为监控点，如图 4 所示。

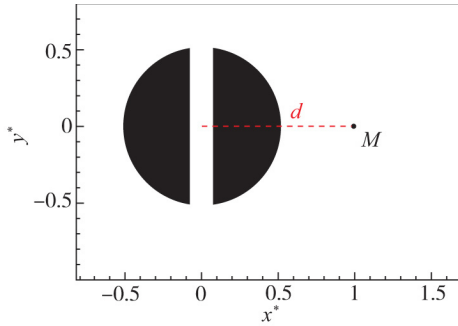


图 4 监控点 M 位置示意图  
Fig. 4 Position of monitoring point M

通过监控点 M 处流体介质法向速度分量 V 划分开缝圆柱缝隙内部及近尾迹场的流场演化周期，如图 5 所示。

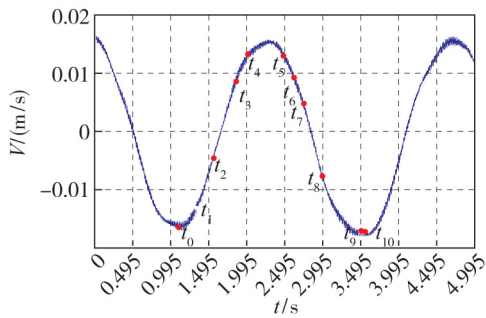
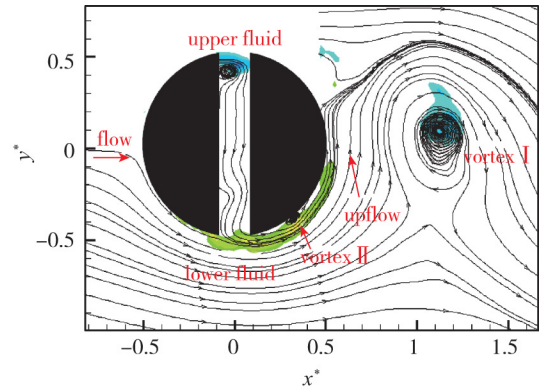
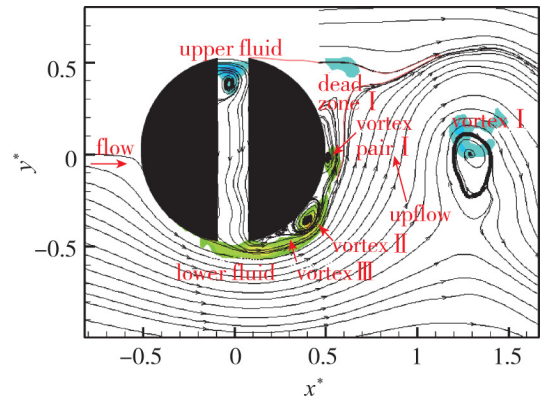


图 5 单点 M 法向速度分量 V 的变化规律  
Fig. 5 Normal velocity variation of monitoring point M

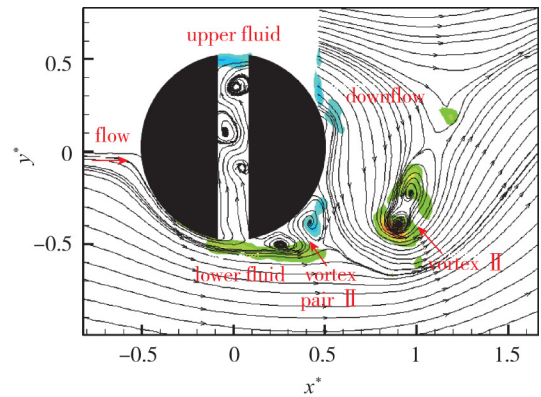
图 6 为水流速度  $v = 0.075 \text{ m/s}$  (基于圆柱直径的 Reynolds 数  $Re_d = 3000$ ) 工况下，一个完整周期内开缝圆柱缝隙内部及近尾迹场的流场演化过程。



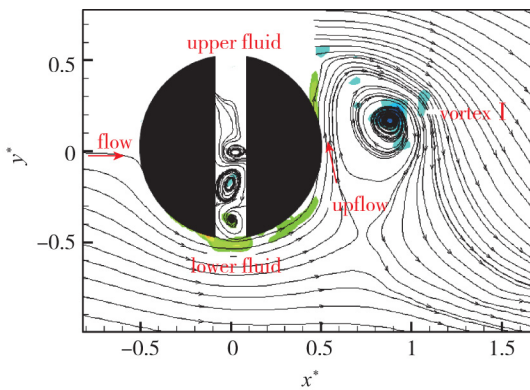
(b)  $t_1$



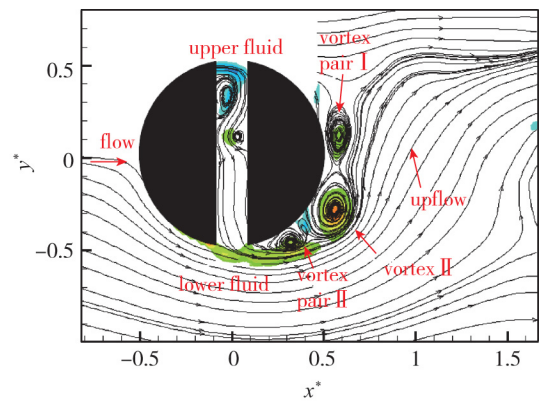
(c)  $t_2$



(d)  $t_3$



(a)  $t_0$



(e)  $t_4$



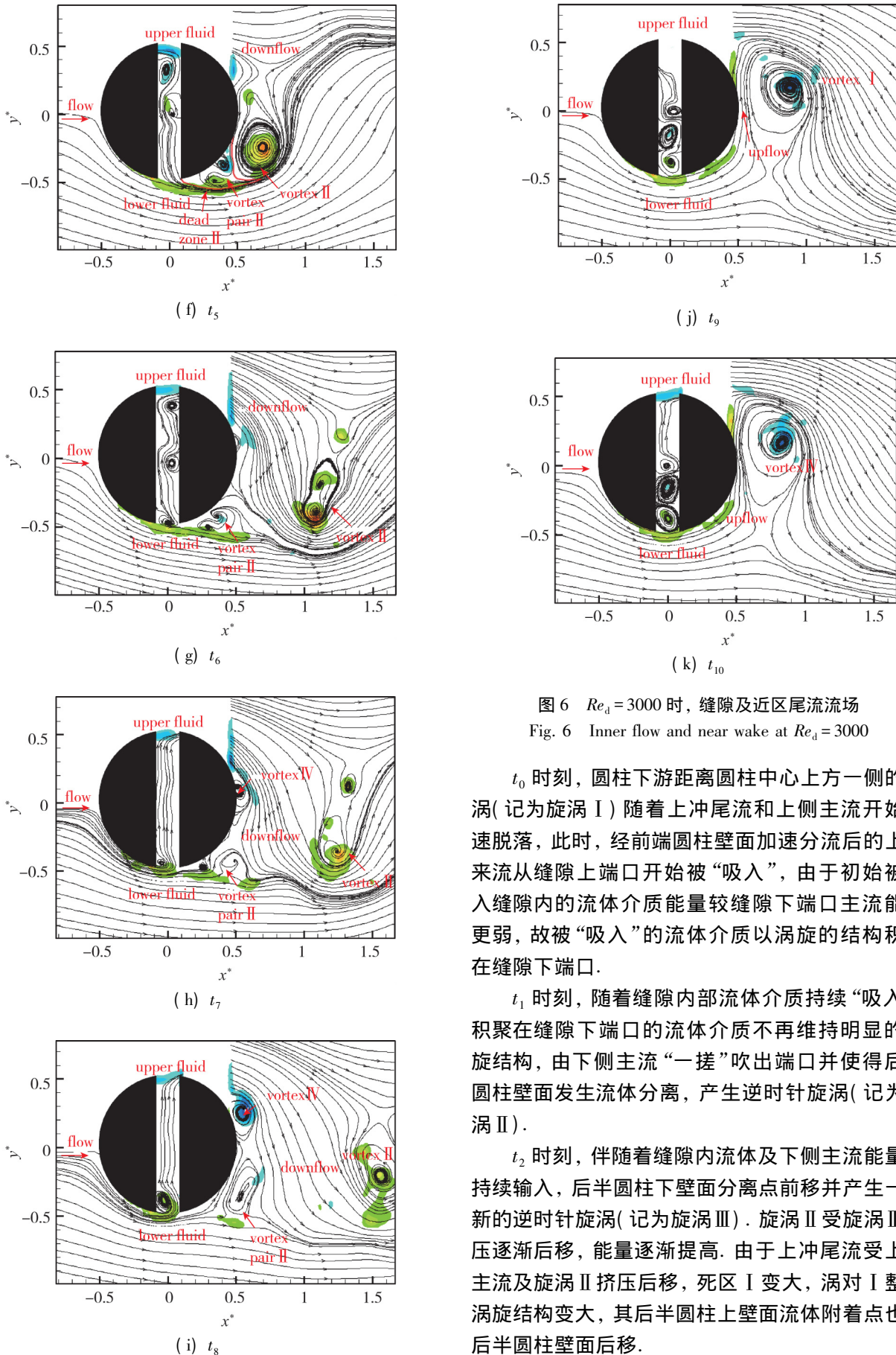


图 6  $Re_d = 3000$  时, 缝隙及近区尾流流场  
 Fig. 6 Inner flow and near wake at  $Re_d = 3000$

$t_0$  时刻, 圆柱下游距离圆柱中心上方一侧的旋涡(记为旋涡 I)随着上冲尾流和上侧主流开始加速脱落, 此时, 经前端圆柱壁面加速分流后的上侧来流从缝隙上端口开始被“吸入”, 由于初始被吸入缝隙内的流体介质能量较缝隙下端口主流能量更弱, 故被“吸入”的流体介质以涡旋的结构积聚在缝隙下端口.

$t_1$  时刻, 随着缝隙内部流体介质持续“吸入”, 积聚在缝隙下端口的流体介质不再维持明显的涡旋结构, 由下侧主流“一搓”吹出端口并使得后半圆柱壁面发生流体分离, 产生逆时针旋涡(记为旋涡 II).

$t_2$  时刻, 伴随着缝隙内流体及下侧主流能量的持续输入, 后半圆柱下壁面分离点前移并产生一个新的逆时针旋涡(记为旋涡 III). 旋涡 II 受旋涡 III 挤压逐渐后移, 能量逐渐提高. 由于上冲尾流受上侧主流及旋涡 II 挤压后移, 死区 I 变大, 涡对 I 整体涡旋结构变大, 其后半圆柱上壁面流体附着点也沿后半圆柱壁面后移.

$t_3$ 时刻,旋涡 I 继续随上冲尾流向后脱落,旋涡 II 与涡对 I 发生明显的耦合作用,死区 I 逐渐消失.旋涡 III 经下侧主流和旋涡 II 的“冲搓”作用,发展成马蹄涡结构的涡对(记为涡对 II).

$t_4$ 时刻,旋涡 II 完全“吞噬”涡对 I 并向后方移动,逐渐脱离后半圆柱壁面,死区 I 完全消失,上侧主流发展成下冲尾流.涡对 II 继续吸收缝隙内部流体及下侧主流能量输入而发展,在此,本文将涡对 II 与下侧主流及下冲尾流之间构成的区域定义为死区(记为死区 II).

$t_5$ 时刻,与  $t_0$  时刻类似,旋涡 II 随着下冲尾流和下侧主流开始加速脱落,此时,经前端圆柱壁面加速分流后的下侧主流从缝隙下端口被“吸入”,由于初始被吸入缝隙内的流体介质能量较缝隙上端口主流能量更弱,故被“吸入”的流体介质以涡旋的结构积聚在缝隙上端口.

$t_6$ 时刻,随着缝隙内部流体介质持续被“吸入”,积聚在缝隙上端口的流体介质不再维持明显的涡旋结构,由上侧主流“一搓”吹出端口并且使得后半圆柱壁面发生流体分离,产生顺时针旋涡(记为旋涡 IV)(由于 PIV 数据采集区域的限制导致旋涡 IV 无法直接观测,但结合  $t_1$  时刻旋涡 II 的形成机理及开缝圆柱流场结构周期性对称性的特点,这里本文直接指出旋涡 IV 的存在及特性).

$t_7$ 时刻,伴随着缝隙内流体及上侧主流能量的持续输入,后半圆柱上壁面分离点前移并产生一个新的顺时针旋涡(记为旋涡 V).旋涡 IV 受旋涡 V 挤压逐渐后移,能量逐渐提高.由于下冲尾流受下侧主流及旋涡 IV 挤压后移,死区 II 变大,涡对 II 整体涡旋结构变大,其后半圆柱上壁面流体附着点也沿后半圆柱壁面后移.

$t_8$ 时刻,旋涡 II 继续随下冲尾流向后脱落,旋涡 IV 与涡对 II 发生明显的耦合作用,死区 II 逐渐消失,随后旋涡 V 经上侧主流和旋涡 IV 的“冲搓”作用,发展成马蹄涡结构的涡对(记为涡对 III).

$t_9$ 时刻,旋涡 IV 完全“吞噬”涡对 II 并向后方移动逐渐脱离后半圆柱壁面,死区 II 完全消失,下侧主流发展成上冲尾流.涡对 III 继续吸收缝隙内部流体及下侧主流能量输入而发展,相同的,本文将涡对 III 与下侧主流及下冲尾流之间构成的区域定义为死区 III.

$t_{10}$ 时刻,流场情况与  $t_0$  时刻一致,开缝圆柱缝隙内部流动完成一个演化周期.

至此,得到如下结论:

在有势力作用下圆柱周围存在一个与圆柱尾缘脱落涡强度相等方向相反的涡,亦称绕形环流.在环流与来流叠加作用下,开缝圆柱缝隙上下端口产生速度差异.再由 Bernoulli 定理可得,缝隙上下端口的速度差异导致了上下端口的压力差异,从而随着开缝圆柱尾缘旋涡周期性脱落,开缝圆柱缝隙内部出现周期性“吹吸”现象.

再者,缝隙内部“吹吸”方向发生变换的起始阶段,缝隙内流体介质以涡旋结构积聚在“吹出”端口.直至缝隙内积聚的能量足以克服来流时,缝隙内流体介质从相应端口“吹出”并导致后半圆柱壁面流体分离,产生旋涡.该旋涡历经附着壁面发展,与另一侧壁面产生的旋涡对耦合直至随来流加速脱落这一系列过程.

### 3 实验结果分析

本征正交分解方法是研究复杂空间-时间变化问题的有效工具,在研究圆柱绕流流场时有独到的实用性.通过分析前几阶模态的分布规律即可推导出支配全流场发展的大尺度逆序结构的演化发展规律,因此 POD 方法提供了分析海量实验数据的一种有效途径.例如 Ma 等<sup>[9]</sup>, Venturi<sup>[10]</sup>, Konstantinidis 等<sup>[11]</sup>均采用 POD 方法研究了圆柱绕流问题.

因此,为了进一步探究决定开缝圆柱绕流流场特性的主要相干结构及不同 Reynolds 数下开缝圆柱绕流流场之间的差异,采用 POD 方法从连续几个完整周期内的开缝圆柱绕流流场中提取开缝圆柱绕流流场主要的相干结构,进而探究 Reynolds 数对于开缝圆柱流场特性的作用机理.

#### 3.1 POD 方法分析开缝圆柱绕流流场

图 7 为不同 Reynolds 数下各阶模态湍动能占比关系.可以发现其分布有比较明显的收敛性.根据各阶模态形态所占湍动能能量量级可以将前 6 阶模态分为 3 部分,其中 1, 2 阶模态(两者占有相同量级的湍动能)对脉动流场贡献最大,其次是 3, 4 阶模态(两者占有相同量级的湍动能),再者是 5, 6 阶模态(两者占有相同量级的湍动能),前 3 部分共占有超过 90%的湍动能,这就决定了前 6 阶模态形态是开缝圆柱绕流流场中最主要的相干结构.下文以此为依据研究前 6 阶模态形态<sup>[12-13]</sup>,从前 6 阶模态形态中探究不同 Reynolds 数下开缝圆柱绕流流场中潜在的性质.

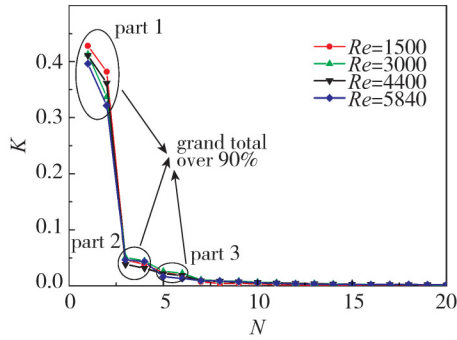


图 7 不同 Reynolds 数下各阶模态湍动能占比关系  
Fig. 7 Each mode's fraction of energy in different Reynolds numbers

下文选取  $Re_d = 3000$ , 对圆柱绕流流场数据进行 POD 分析, 并对前 6 阶模态形态进行细致的研究. 图 8 是 1, 2 阶模态流场结构, 可以发现较明显的沿圆柱中轴线对称且旋向交替的涡街结构.

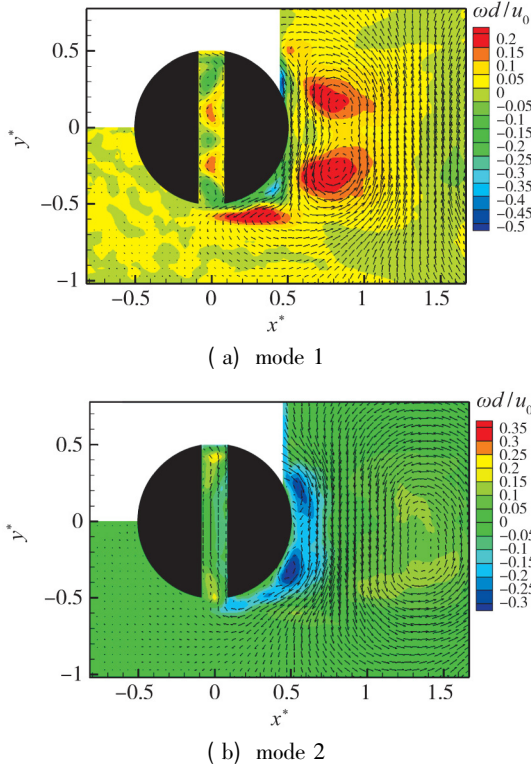


图 8 1, 2 阶模态流场结构 ( $Re_d = 3000$ )  
Fig. 8 Flow constructions of mode 1 and mode 2 ( $Re_d = 3000$ )

图 9 为 1, 2 阶模态展开系数之间的关系, 可以发现模态展开系数  $a_1$  与  $a_2$  具有相同的周期性, 在时间域上仅存在相位之间的差异.

本文利用信号处理中的快速 Fourier 变换 (fast Fourier transformation, FFT) 将时间域上的模态展开系数  $a_1$  信息转变为频率域上信号强度信息, 如图

10(a) 所示, 其波峰对应的频率即为开缝圆柱绕流涡街脱落频率. 图 10(b) 是传统的利用单点位置速度周期性变化信息得到的涡街脱落频率. 比较图 10(a) 与图 10(b), 可以发现, 两种方法得到的结果具有一致性. 因此, 再结合模态展开系数和模态流场结构叠加特性, 本文得出 1, 2 阶模态共同控制着圆柱绕流流场中涡街相继脱落. 与 Liu 等<sup>[14]</sup>对沟槽圆柱后尾迹以及 Shi 等<sup>[15]</sup>对近壁方柱后尾迹的 POD 分析结论一致.

图 11 为 3, 4 阶模态流场结构, 可发现较明显的沿圆柱中心线对称的涡街交替结构. 为说明 3, 4 阶模态流场结构在原始流场中的作用, 统计了单一涡旋结构随时间发展情况, 结果如图 12 所示.

可以看出, 单一涡旋结构在空间上(以涡心位置为基准)几乎水平向后移动发展, 在时间上(以环量大小为基准)可分为涡旋结构缓慢离开柱体时旋涡能量逐渐增大(I)和涡旋结构脱离主体时旋涡能量逐渐消散(II)两部分, 其中旋涡脱离位置为  $x^* = 0.83$  ( $Re_d = 3000$ ). 因此, 3, 4 阶模态形态对开缝圆柱绕流流场起着控制脱落旋涡沿流向方向能量运输的作用.

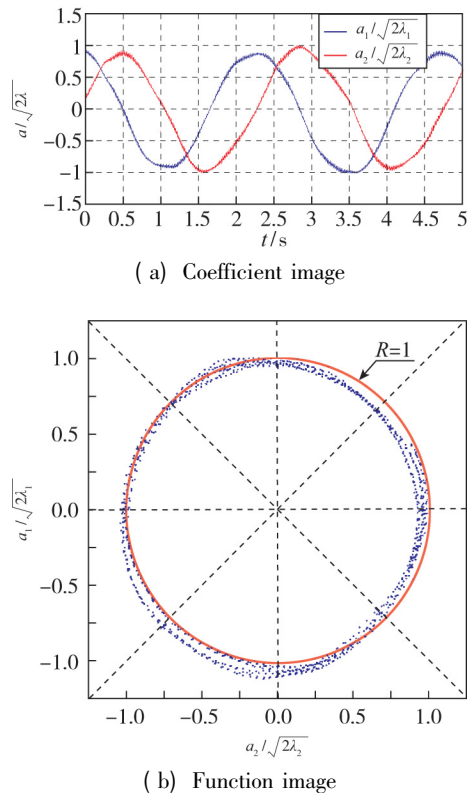
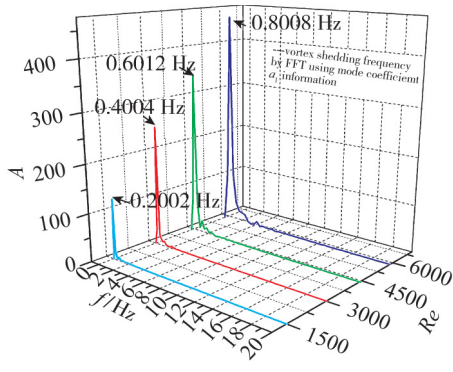
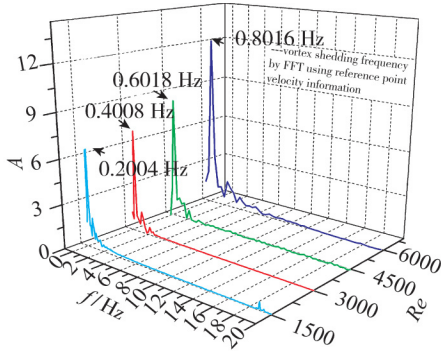


图 9 1, 2 阶模态展开系数之间的关系  
Fig. 9 Correlation between coefficients  $a_1$  with  $a_2$





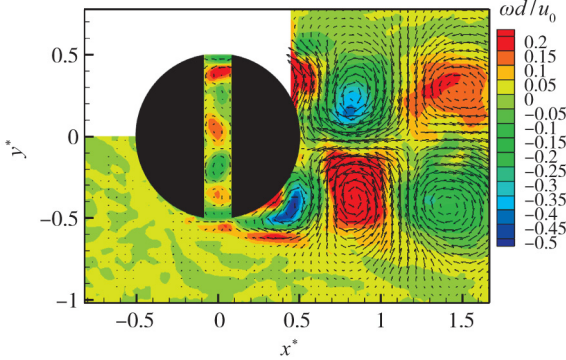
(a) Frequency of  $a_1$



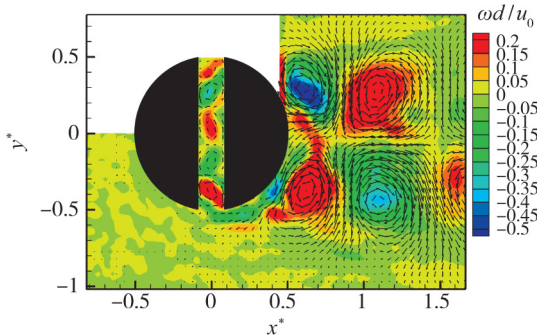
(b) Frequency of  $v$

图 10 两种方法测得的脱落涡频率

Fig. 10 Vortex frequencies by two different methods



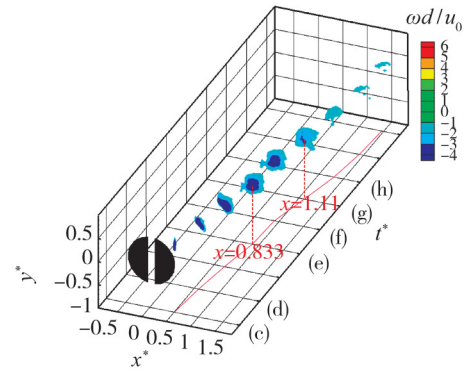
(a) mode 3



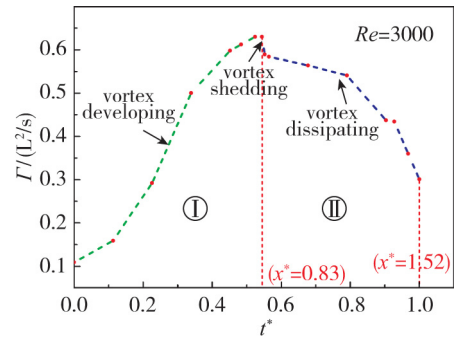
(b) mode 4

图 11 3, 4 阶模态流场结构 ( $Re_d = 3000$ )

Fig. 11 Flow constructions of mode 3 and mode 4 ( $Re_d = 3000$ )



(a) Three-dimensional



(b) Two-dimensional

图 12 涡旋结构随时间发展

Fig. 12 Developments of vortex structure

图 13 是分别利用前 4 及前 6 阶模态形态重构的流场与原始流场之间的差异(以 I) 过程中旋涡环量为统计背景). 可以明显看出, 利用前 6 阶模态形态重构的流场在旋涡能量上与原始流场中的旋涡能量相差无几, 利用前 4 阶模态形态重构的流场在旋涡能量上随时间发展趋势与原始流场中的旋涡能量发展趋势相当, 但两者旋涡能量上存在明显的差异. 因此, 5, 6 阶模态形态在 (I) 过程中存在一定的影响.

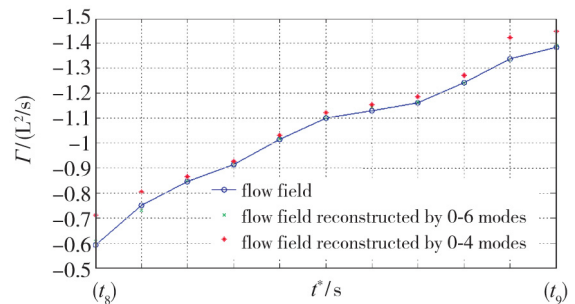


图 13 模态形态重构与原流场之间的差异

Fig. 13 Differences between flow field reconstruction with original flow field

图 14 是 5, 6 阶模态流场结构, 可以观察到明显的同向涡旋结构, 这在第 2 节开缝圆柱流场特性分

析图 6 中  $e$  时刻和  $i$  时刻中的流场结构相对应, 也因此可以看出同向涡旋结构之间的相互耦合, 必定导致旋涡脱落位置处的旋涡能量的变化. 图 15 统计了不同 Reynolds 数下因同向涡旋结构相互作用导致的旋涡脱落位置处旋涡能量变化差异. 图 15 纵坐标为 5, 6 阶模态形态对于旋涡脱落位置处旋涡能量衰减百分比. 可以明显看出, 5, 6 阶模态形态同向旋涡的相互作用, 使得主要的脱落旋涡在能量上存在衰减 (以统计旋涡脱落位置处旋涡能量为基准), 且这种衰减作用随着 Reynolds 数的增大而减小.

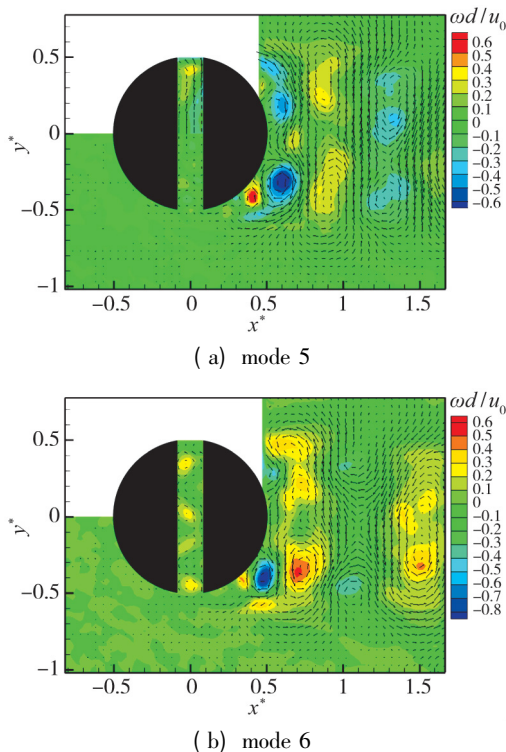


图 14 5, 6 阶模态流场结构 ( $Re_d = 3000$ )

Fig. 14 Flow constructions of mode 5 and mode 6 ( $Re_d = 3000$ )

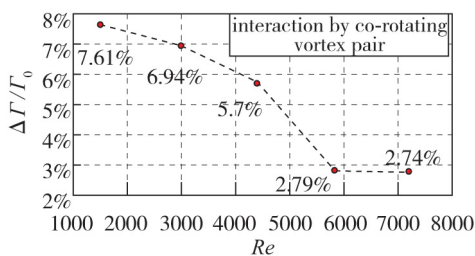


图 15 不同 Reynolds 数下同向旋涡结构相互作用

Fig. 15 Interaction by co-rotating vortex pair in different Reynolds numbers

#### 4 总结

本文采用 PIV 流场测试技术观察了开缝圆柱

的近场区流场特性, 探究缝隙对其流场的影响, 并采用 POD 方法探究开缝圆柱绕流流场各阶相干结构及作用机理, 得到以下结论:

(1) 实验 Reynolds 数范围内, 流体流经开缝圆柱时, 在环流与来流叠加作用下, 开缝圆柱缝隙上下端口产生速度差异, 这种差异导致了近壁面区边界层的“吸入”和“吹出”效应, 从根本上改变了圆柱绕流近区尾流的结构.

(2) 应用 POD 方法对开缝圆柱绕流流场相干结构进行分析时, 得出前 6 阶模态形态是最主要的相干结构.

(3) 第 1 和 2 阶模态形态控制着圆柱绕流流场中涡街相继脱落. 利用 1 或 2 阶模态系数即可得到脱落涡频率.

(4) 第 3 和 4 阶模态形态对开缝圆柱绕流流场起着控制脱落旋涡沿流向方向能量运输的作用.

(5) 第 5 和 6 阶模态形态中的同向旋涡作用在旋涡缓慢脱离柱体这一过程中, 对主旋涡能量起着一定的衰减作用.

#### 参考文献 (References)

- [1] Konstantinidis E, Balabani S. Symmetric vortex shedding in the near wake of a circular cylinder due to streamwise perturbations[J]. Journal of Fluids and Structures, 2007, 23(7): 1047-1063.
- [2] Igarashi T. Flow characteristics around a circular cylinder with a slit: 1<sup>st</sup> report, flow control and flow patterns[J]. Bulletin of the JSME, 1978, 21(154): 656-664.
- [3] Igarashi T. Fluid flow around a bluff-body used for a Karman vortex flowmeter[C]. Proceedings of International Symposium on Fluid Control and Measurement FLU-COME86, Tokyo, 1985, 1017-1022.
- [4] Igarashi T. Flow characteristics around a circular cylinder with a slit: 2<sup>nd</sup> report, effect of boundary layer suction[J]. Bulletin of JSME, 1982, 25(207): 1389-1397.
- [5] Igarashi T. Performance of new type vortex shedder for vortex flowmeter[C]. Proceedings of the 6<sup>th</sup> Triennial International Symposium on Fluid Control, Measurement and Visualization FLUCOME, Sher-brooke, 2000, 13-17.
- [6] Igarashi T. Flow resistance and Strouhal number of a vortex shedder in a circular pipe[J]. JSME International Journal series B: Fluids and Thermal Engineering, 1999, 42(4): 586-595.
- [7] Olsen J F, Rajagopalan S. Vortex shedding behind modified circular cylinders[J]. Journal of Wind Engineering



- and Industrial Aerodynamics, 2000, 86(1): 55-63.
- [8] 马力群, 冯立好. 放置于驻点的合成射流控制圆柱脱落模式的实验研究[J]. 中国科学: 技术科学, 2013, 42(2): 208-219.
- Ma L Q, Feng L H. Experimental investigation on control of vortex shedding mode of a circular cylinder using synthetic jets placed at stagnation points[J]. Scientia Sinica: Technological Sciences, 2013, 42(2): 208-219 (in Chinese).
- [9] Ma X, Karniadakis G E, Park H, et al. DPIV-driven flow simulation: a new computational paradigm[J]. Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, physical and Engineering Sciences, the Royal Society, 2003, 459: 547-565.
- [10] Venturi D. On proper orthogonal decomposition of randomly perturbed fields with applications to flow past a cylinder and natural convection over a horizontal plate [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2006, 559: 215-254.
- [11] Konstantinidis E, Balabani S, Yianneskis M. Bimodal vortex shedding in a perturbed cylinder wake [J]. Physics Fluids, 2007, 19(1): 011701.
- [12] 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: 232-259.
- [13] Feng L H, Wang J J, Pan C. Proper orthogonal decomposition analysis of vortex dynamics of a circular cylinder under synthetic jet control [J]. Physics of Fluids, 2011, 23(1): 014106.
- [14] Liu Y Z, Shi L L, Yu J. TR-PIV measurement of the wake behind a grooved cylinder at low Reynolds number [J]. Journal of Fluids and Structures, 2011, 27(3): 394-407.
- [15] Shi L L, Liu Y Z, Wan J J. Influence of wall proximity on characteristics of wake behind a square cylinder: PIV measurements and POD analysis [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2010, 34(1): 28-36.

#### 作者简介:

江建华(1990-) 男, 浙江台州, 硕士研究生, 研究方向为实验流体力学, 流动控制. 通信地址: 厦门大学航空航天学院(361005). E-mail: 1174153203@qq.com.

鲍锋(1961-) 男, 辽宁营口, 厦门大学航空系教授. 研究方向为实验流体力学, 飞机尾流控制, 流动控制, 航空发动机. 通信地址: 福建省厦门市思明区厦门大学海韵校区物理机电与航空大楼314室(361005). E-mail: fbao@xmu.edu.cn.