

文章编号 : 0258-1825(2002)04-0379-09

# 圆柱绕流涡系演变的 DPIV 测试

张 玮<sup>1</sup> 王 元<sup>1</sup> 徐 忠<sup>1</sup> 金 文<sup>2</sup>

(1. 西安交通大学流体机械研究所, 西安, 710049 2. 西安航空技术高等专科学校, 西安, 710077)

摘 要 : 利用数字式 PIV 技术在阵风环境风洞中对  $Re = 500$  时的圆柱绕流进行测量, 给出了圆柱后 2.2 倍直径、圆柱两侧各一倍直径的区域内一系列瞬态的速度矢量场、涡量场和流线图。根据可视化图像和量化结果, 着重分析了该区域的涡系结构和一个拟周期内旋涡的发展演化过程。

关键词 : DPIV ; 圆柱绕流 ; 涡系演变 ; 拟周期

中图分类号 : V211.7 ; O357.5 文献标识码 : A

## 0 引 言

圆柱绕流是一个典型的流体力学问题, 以圆柱绕流为代表的钝体绕流已成为流体力学的一个研究分支。人们之所以对其研究的热情经久不衰, 是由于其中很多重要的流动机理至今仍不清楚。长期以来, 由于测试手段的局限, 对圆柱绕流的研究主要集中在升力系数、阻力系数等直接与压力有关的测量, 或者是利用 HWA/LDV 进行的单点速度测量, 对圆柱后旋涡结构和演化过程的研究则多依赖于定性化的流动显示技术。早在 1927 年, Prandtl 使用铝粉对  $Re < 40$  时圆柱绕流的定常流动进行了流动显示, 后来又给出了圆柱由静止启动到恒定速度条件下其周围流动发展的不同阶段的流线<sup>[1]</sup>

二维 PIV (Particle Image Velocimetry) 技术是在流动显示的基础上发展起来的一种光学测量技术, 它突破了单点测量的限制, 能够直接获得流动中某一瞬时的两维速度场, 因而特别适合于研究流动的非定常发展过程。二维 PIV 技术可靠的测量精度和高效已经取得公认, 目前广泛应用于各种流动测量中, 它的出现也为圆柱绕流的深入研究提供了有力的技术支持。Julia<sup>[2]</sup> 利用互相关数字式 PIV 技术对圆柱绕流进行了测试, 就垂直于圆柱轴线的平面和经圆柱轴线沿流向的平面上的瞬时速度场、涡量场展开了讨论; Brückner<sup>[3]</sup> 则采用 PIV 技术和片光逐面扫描的方法对短圆柱启动时的三维湍流流动进行了研究; Rockwell D 和 Lin J C 等<sup>[4]</sup> 测量了振荡水波中圆柱周围的涡旋运动。上述测试均是在水中进行的, 在风洞中对圆柱绕流的详细研究相对较少, 刘宝杰<sup>[5]</sup> 测量分析了  $Re = 510$  时圆柱后一定范围内的旋涡结构, A. Krothapalli 等人<sup>[6]</sup> 进行了  $M = 0.3 \sim 0.6$  范围内圆柱尾迹的研究。本文运用 PIV 技术具有的非定常、整场测量的特点, 捕捉  $Re = 500$  时圆柱绕流瞬时的流动

\* 收稿日期 : 2001-09-17 ; 修订日期 : 2002-01-10.

基金项目 : 国家自然科学基金资助项目( No. 59876028 )

作者简介 : 张 玮 (1973-), 西安交通大学流体机械研究所, 博士研究生, 从事叶轮机械动静干涉的 PIV 测量及数值模拟研究。

状态,对圆柱后涡系结构及其演变过程做如实反映和初步分析。

## 1 实验设备和方案

### 1.1 PIV 系统

本实验所用的 PIV 测试系统由美国 TSI 公司引进,主要由光路系统、图像采集系统、同步控制及图像数据分析系统等几部分组成,如图 1 所示。

采用集成式的 Nd/Yag 双激光器作为光源,产生持续时间为 10ns、每个脉冲能量为 300mJ、波长为 532nm 的绿色脉冲光,工作频率为 10Hz。激光光束经光臂传导,由柱面镜和球面镜变成二维片光照亮测试区域。互/自相关 CCD 摄影机的型号为 PIV CAM 10 -

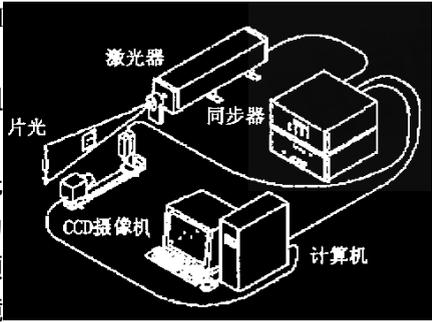


图 1 标准的 PIV 系统示意图

Fig.1 Standard PIV system

30 分辨率为 1018 像素  $\times$  1008 像素,图像采集速度最大可达 30 帧/秒。帧抓取器(Frame Grabber)从 CCD 直接读取数字化的粒子影像并将信息传送到计算机,由图像分析软件进行处理。这种采用 CCD 作为粒子图像记录介质,应用帧抓取器直接传送数字化图像信息的 PIV 技术称为 DPIV(Digital PIV)。

由 PIV 测试获得 256 个灰度级的粒子图像,将粒子图像按照查问域(interrogation grid)进行互相关分析提取速度信息,当查问域布满整个图像画面时,就获得了整场的速度信息。互相关分析处理的对象是两次脉冲时得到的各曝光一次的示踪粒子图像,进行相关分析的两帧粒子图像必须时间间隔很小。采用“跨帧(Frame straddling)”技术<sup>[7]</sup>可以有效地保证所得到的一对图像之间的时间间隔小于  $1\mu\text{s}$ 。

630032 型同步器控制激光脉冲发出和图像采集的时序。PIV 系统的控制和数据分析软件是基于 Windows NT 4.0 操作系统的 Insight NT,该软件具备连续捕获 1000 帧的高分辨率( $1\text{k} \times 1\text{k}$ )图像的能力,并具有批处理功能,可以快捷地得到流动瞬态的矢量场、涡量场以及切应变速率的分布。

### 1.2 实验装置

圆柱绕流测量在西安交通大学流体机械国家专业实验室的阵风环境风洞中进行,风洞为直流吸入式,分别由入口段、整流段、收缩段、实验段、变径段及动力段组成,如图 2 所示。风洞收缩比为 4,总长 10.24m,各截面形状均为矩形。实验段截面尺寸为  $0.6\text{m} \times 0.5\text{m} \times 7.4\text{m}$ ,采用有机玻璃作为框架,镶嵌浮法玻璃以方便激光片光到达测试区和 CCD 摄像机采集图像。为了消除轴向压力梯度,专门在实验段设计了可调顶壁,调节范围是  $0 \sim 0.1\text{m}$ 。风洞实验段空气动力特性如表 1 所示。

以直径为 20mm 的有机玻璃管作为测试对象,安放于风洞中垂直来流的方向。圆柱长径比为 30,测试面选择在圆柱长度方向的中心轴面,可认为流动是二维的。激光片光从风洞上部射入,照亮  $1/2$  圆柱表面以及其后尾迹区,片光厚度约 1mm。

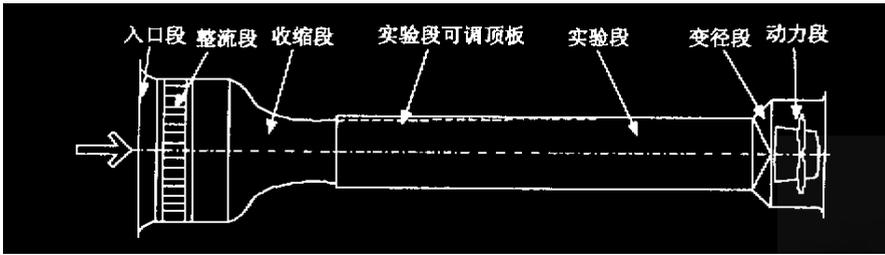


图 2 阵风环境风洞示意图

Fig. 2 Gust environmental wind tunnel

表 1 风洞实验段空气动力特性参数

Table 1 Aerodynamic parameter of wind tunnel section

气流均匀性	$\delta_v \leq 0.8\%$	稳定风速范围	0.4 ~ 20m/s
气流稳定性	$\eta \leq 1.0\%$	轴向静压梯度	$L \cdot  dC_p/d\alpha  \leq 0.1\%$
最大气流偏角	$\Delta\alpha \Delta\beta \leq 0.8^\circ$	原始湍流度	$\epsilon \geq 1.0\%$

### 1.3 实验参数的选择

要获得高精度的 PIV 测量结果,实验必须遵循一系列的准则<sup>[8]</sup>,主要通过调控脉冲之间时间间隔  $\Delta t$ 、脉冲延迟时间、片光厚度和高度、判读域大小以及示踪粒子的特性等参数实现。这些参数互相关联,变更一个就意味着其他参数也需要做相应的调整。因而,PIV 实验的参数设置是一个不断选择优化的过程。

#### (1) 脉冲之间时间间隔 $\Delta t$ 和脉冲延迟时间

为了保证以 Lagrange 速度代表 Euler 速度的精度,要求粒子在两脉冲间隔的位移应不大于 1/4 的查问域,即有下式成立

$$\Delta t = \frac{\Delta x \cdot M}{U}$$

式中: $U$  是测试平面内预估的主流速度, $M$  是 CCD 的放大率,用每个象素代表的实际距离表示  $\mu\text{m}/\text{pixel}$ ,是在两个脉冲间隔粒子发生的位移。如查问域为  $32 \times 32\text{pixel}$ , $U = 20\text{m/s}$ , $M = 120\mu\text{m}/\text{pixel}$  则  $\Delta t \leq 48\mu\text{s}$  就可满足条件。

脉冲之间时间间隔确定后,还须根据“跨帧”技术的要求设置脉冲延迟时间。对于 PIV CAM 10-30 的双曝光运行,脉冲延迟时间应小于  $275\mu\text{s}$ ,大于  $(275 - \Delta t)\mu\text{s}$ 。

#### (2) 片光厚度和高度

PIV 测试中用于照亮测试区域的片光是在柱面镜和球面镜的作用下形成的,柱面镜使激光光束在高度方向扩展,球面镜则用于控制片光的厚度。片光的最薄部分在球面镜的焦距处,一般为 1mm。理想的测试区应位于片光的“腰部”,尽量减少在垂直于片光方向上粒子影像的重叠记录。实验时,须根据测试区域的尺度,选择不同焦距的柱面镜和球面镜进行组合产生合适的片光。

#### (3) 查问域大小

查问域是互相关分析处理的基本单元,查问域的尺寸应足够小,使得一个矢量可以代表空间点的局地速度,同时,调整查问域的尺寸也可以在粒子浓度不变的时候控制其中粒子对的数目。

#### (4) 示踪粒子的特性和施放

进行成功的 PIV 测量的一个关键要素是示踪粒子的选择和施放。示踪粒子必须具备良好的流动跟随性和对特定激光较高的散射率,同时在测量域内播撒的示踪粒子应均匀分布,浓度恰当。本实验采用 Rosco1600 烟雾发生器产生示踪粒子,在稳定工作状态下,产生的球形液滴平均粒径为  $1 \sim 2 \mu\text{m}$ ,分布范围集中,能够满足 PIV 测试对示踪粒子的要求。在低速流动情况,为了保证示踪粒子在气流中充分扩散、分布均匀,并且对流动无干扰,从风洞入口引入示踪粒子,距测试区域约  $7\text{m}$ 。待示踪粒子在风洞中充分混合均匀后进行测试,测量结果表明低速下这种整体发烟的方式比较合适。

## 1.4 测量精度

利用 PIV 技术测速,其精度取决于粒子位移测量的精度和脉冲时间间隔的控制精度。一般激光脉冲光源具有的极小颤动约为  $1\text{ns}$ ,由此带来的时间控制误差可以忽略不计。位移测量误差大致可分为以下几类:加速度误差、速度梯度误差、跟随性误差、系统误差和随机误差<sup>[9]</sup>。其中,跟随性误差可以通过选择恰当的粒子及其散播方法来避免,随机误差能通过多次测量来减少,但另一些误差无法避免,如由加速度和查问单元内的速度梯度及信号峰值的位置确定过程中导致的误差。对本研究所搭建的 PIV 系统的精度校验结果表明,在紧邻固体壁面 10% 的范围速度测量值有偏小的趋势,但在其他 90% 的区域内均能得到与分析解吻合的测量值<sup>[10]</sup>。另外,当 PIV 测试的试验参数设定满足一定准则,瞬态速度的相对测量误差将不超过 1%<sup>[8]</sup>。

## 2 实验结果和分析

圆柱绕流测试在以圆柱直径为特征长度、来流速度为特征速度计算的  $Re$  为 500 时进行。CCD 分别在两个位置对圆柱绕流进行了测量,每个位置采集 50 对粒子图像。当 CCD 采集图像位置距风洞壁面  $0.42\text{m}$  时,测试域为  $120\text{mm} \times 117\text{mm}$ ,用于观察圆柱后 5 倍直径范围内涡系的变化;当 CCD 采集图像位置距风洞壁面仅  $0.01\text{m}$  时,测试域为  $50\text{mm} \times 46\text{mm}$ ,用于观察圆柱后 2.2 倍直径内涡系的变化。图像数据处理时均采用查问域大小为  $64 \times 64\text{pixel}$ ,空间分辨率分别为  $116.3\mu\text{m}/\text{pixel}$  和  $53.8\mu\text{m}/\text{pixel}$ ,得到矢量为  $50 \times 50$  和  $35 \times 35$  个。图 3 是一对原始的瞬态粒子图像,图中粒子分布均匀,图像清晰,能够分辨出圆柱后旋涡的形成位置。

### 2.1 圆柱后涡系结构

图 4 是两个瞬时的圆柱绕流的速度矢量、涡量和流线、速度量级图,观察区域由圆柱中心开始沿流向延伸至 5 倍直径处,上下两侧各为 2 倍直径。从图 4 可看出,速度量值最大区域在圆柱上下两侧的主流区,圆柱表面、其后回流区以及旋涡的核心部分属于低流速区。涡量的模较大的区域主要位于圆柱两侧,呈带状分布,上下两侧涡量符号相反。距离圆柱壁面最近的区域涡量模最大,也最为集中,两侧涡量“带”沿流向朝下游扩散,在旋涡区重新有涡量的聚集,但强度远低于圆柱两侧。从一系列瞬态的涡量变化过程来看,涡量好象是从圆柱上下两侧壁面生成,然后沿流向“抛出”,正负交替。

根据流线和涡量图的对比发现,与圆柱尺度相当的旋涡主要位于圆柱的后方距柱体壁面 1~2 倍直径的区域,在 2.5 倍圆柱直径以后旋涡已经扩散,顺时针旋转的旋涡对应于负的涡量,逆时针旋转的旋涡对应于正的涡量。

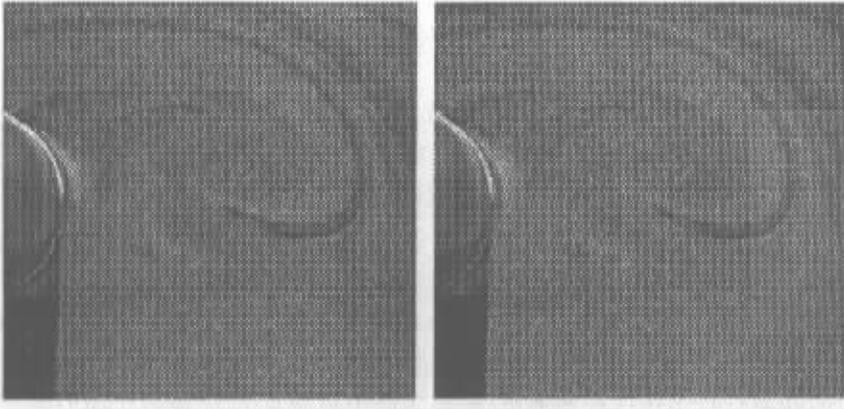
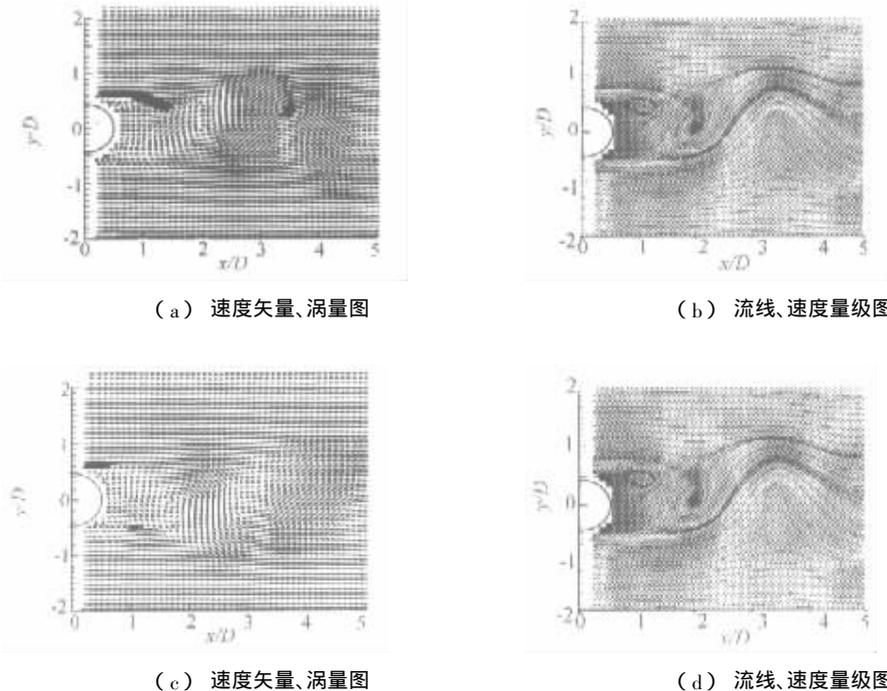


图 3 PIV 实验测得的典型的粒子图像对

Fig. 3 Typical pictures of particles by PIV

由于在  $Re = 500$  时圆柱后较完整的涡主要位于其后 2 倍直径的范围内。同时,考虑到  $M$  的减小将有助于提高空间分辨率,所以,为了更细致地分析圆柱后涡系的演变过程,将注意力集中在圆柱后 2.2 倍直径、圆柱两侧各一倍的直径区域内。



(a) 速度矢量、涡量图

(b) 流线、速度量级图

(c) 速度矢量、涡量图

(d) 流线、速度量级图

图 4 两个瞬态的圆柱绕流所对应的速度矢量、涡量图和流线、速度量级图

Fig.4 velocity vectors , vortex field , stream line and velocity magnitude at two instants

### 2.2 圆柱后涡系演变过程

在测试过程中,通过实时显示就可以观察到圆柱后旋涡运动的过程。圆柱上下两侧紧邻圆柱表面的流体交替脱离柱体、形成旋涡、发生脱落、向下游移动、迅速扩散,呈现明显的周期性。文献 [11] 中总结了  $Re$  在  $200 \sim 3 \times 10^5$  范围内圆柱绕流流动的主要特征是旋涡的周期性脱落,与在本实验中的观察是相符合的。

图 5(a)~图 5(g) 给出了  $T = 3.0s$  到  $T = 3.6s$  的 7 个瞬时流动状态所对应的速度矢

量、流线和涡量等势线图。根据旋涡不断演化的形态,可认为这 7 幅图构成了圆柱绕流历经的一个“拟周期”。所谓“拟周期”,是区别于真正意义上的圆柱绕流流动的旋涡脱落周期。PIV 测量过程中,激光脉冲固定的工作频率限制了 CCD 的采样频率,即 CCD 必须按照固定的时间间隔进行图像数据的采集,在本实验中每隔 0.1s 记录一个瞬时的流动状态相对应的速度信息。当采样频率高于旋涡的变化频率时,才可能从一系列的速度信息中提取出一个周期的变化过程。对于  $Re = 500$  的圆柱绕流来说,大尺度涡的变化频率很低,采样频率已经足够使得到的信息反映其流动发展的非定常过程。另外,由于难以将采样的时间设置得恰好与周期流动相符,因此只能得到圆柱绕流一个近似的周期性流动的图景,本文中称为“拟周期”。

在  $T = 3.0s$  时刻,圆柱正后方 1.2 倍直径处形成一个顺时针旋转的大尺度旋涡,具有负的涡量集中区,发展得非常饱满。在该旋涡左下角紧邻圆柱体表面处形成一个逆时针旋转的小涡,其中心正的涡量有集中的趋势; $T = 3.1s$  时大尺度旋涡向四周扩散,沿流向拉伸明显,旋涡中心仍有负的涡量集中区存在,小涡进一步长大,出现正的涡量集中区; $T = 3.2s$  时大尺度涡已经扩散并向下游移动,负的涡量集中区消失,同时小涡尺度已增大到 3.0 时刻的 2 倍,正的涡量集中区进一步发展; $T = 3.3s$  时原来逆时针旋转的小涡已发展至最饱满阶段,成为大尺度涡,与圆柱尺度相当,其左上方与圆柱表面相邻处形成一个顺时针旋转的小涡。至此,旋涡的状态与  $T = 3.0$  时具有对称性,可以推测旋涡运动大约经历了  $1/2$  周期。

在  $T = 3.4s$  时逆时针旋转的大尺度涡沿流向扩散,旋涡中心后移,小尺度的顺时针旋转的涡继续长大; $T = 3.5s$  时大尺度涡不具备涡量集中区,小尺度涡继续生长,同时旋涡中心下移,流动发展至  $T = 3.6s$  时圆柱正后方形形成一个顺时针旋转的尺度与圆柱直径相当的大涡,同时左下角生成一个反向旋转的小涡,还没有涡量集中区。可以注意到, $T = 3.6s$  时刻与  $T = 3.0s$  时刻无论速度矢量、流线和涡量分布都极为相似,可以认为圆柱绕流已完成一个“拟周期”的流动。

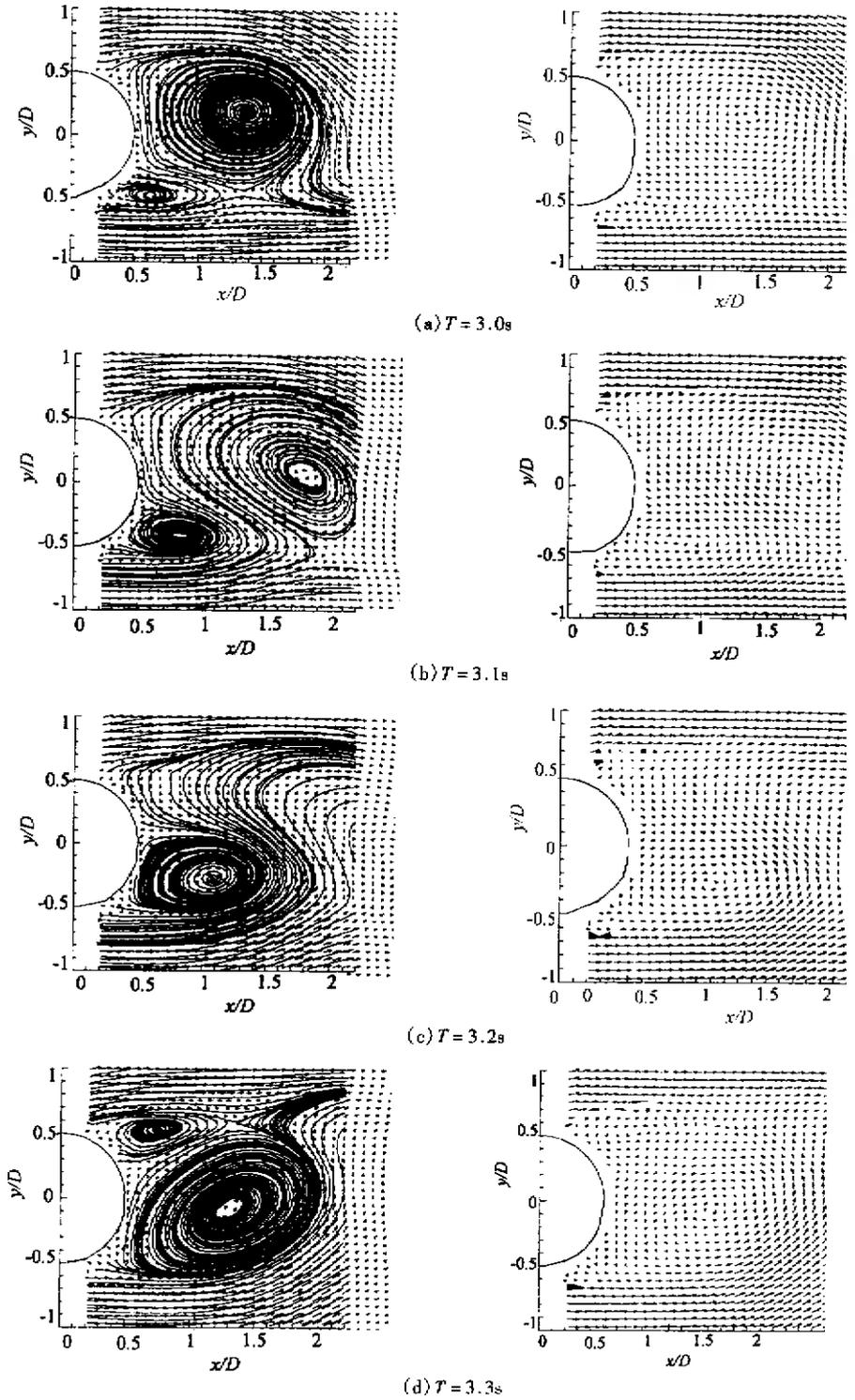


图 5 圆柱涡系一个演变周期所对应的速度矢量、流线和涡量场

Fig. 5 Velocity vectors, vortex field and stream line of the flow around circle cylinder in a pseudo-period

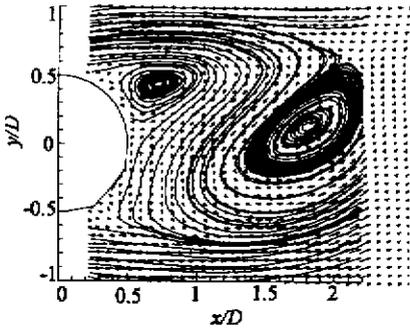
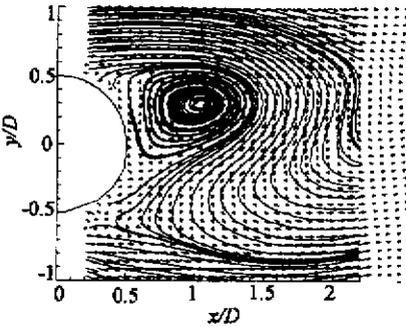
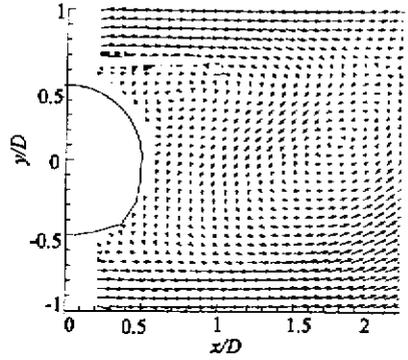
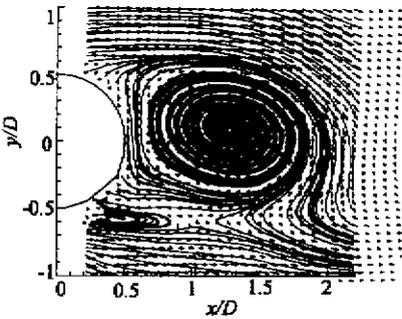
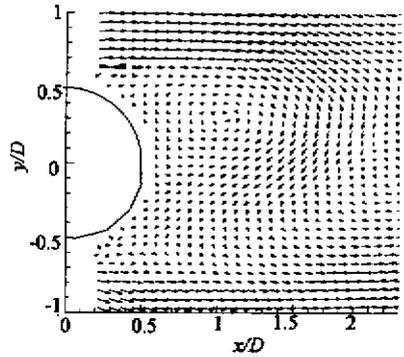
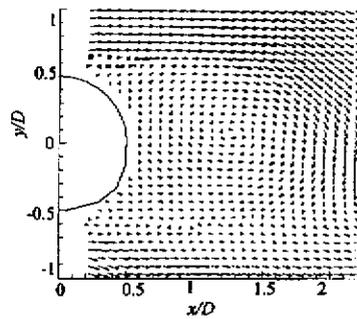
(e)  $T = 3.4s$ (f)  $T = 3.5s$ (g)  $T = 3.6s$ 

图5 续

Fig. 5 Continue

### 3 结论

本文利用 DPIV 技术在环境风洞中对  $Re = 500$  时圆柱绕流进行了测量,分析了圆柱后涡系的结构及其演变过程,得到如下结论:

(1) 圆柱后的涡系结构具有明显的规律性,与圆柱尺度相当的旋涡主要位于圆柱的后方距柱体壁面  $1 \sim 2$  倍直径的区域,有涡量集中区与其中心对应。距离圆柱壁面最近的区域涡量模最大,也最为集中,两侧涡量“带”沿流向朝下游扩散。从连续的瞬态涡量变化过程来看,涡量似乎是从圆柱上下两侧壁面生成,然后沿流向“抛出”,正负交替。

(2) 对于  $Re = 500$  时的圆柱绕流所产生的变化频率低的旋涡运动,PIV 技术的采样频率能够细致、如实地反映其非正常的发展演化过程,每个瞬时状态所对应的速度场、涡量

场和流线图提供了丰富的流动信息。可以设想,当 PIV 技术的时间分辨率进一步提高,将有望实现对复杂流动高频变化的湍流结构的实时测量。

### 参 考 文 献:

- [ 1 ] 巴特勒 G K 著,沈青 贾复译. 流体动力学引论[ M ],北京 科学出版社,1997.11 :附录.
- [ 2 ] JULIO S. An investigation of the near wake of a circular cylinder using a video-based digital cross - correlation particle image velocimetry technique[ J ], *Experimental Thermal and Fluid Science* , 1996 ,12 221-233
- [ 3 ] BRUCKER CH. Digital-particle-image-velocimetry( DPIV ) in a scanning light-sheet 3D starting flow around a short cylinder [ J ], *Experiments in Fluids* , 1995 ,19 255-263.
- [ 4 ] ROCKWELL D , LIN J C , CETINER O. Quantitative imaging of the wake of a cylinder in a steady current and free-surface waves[ J ], *Journal of Fluids and Structures* , 2001 ,15( 3-4 ) 427-443.
- [ 5 ] 刘宝杰. 尾流旋涡的流动机制及其应用[ D ],北京 北京航空航天大学动力工程系,1999.99-109.
- [ 6 ] KROTHAPALLI A , SHIH C , LOURENCO L. The near wake of a circular cylinder at  $0.3 < M < 0.6$  : a PIV study[ R ], A-IAA-94-0663.
- [ 7 ] MARK P , PLINE W A. Particle-displacement tracking in two speed ranges[ R ], NASA Tech Brief LEW-15675 , Cleveland Ohio : NASA Glenn Research Center , 1994 , 95.
- [ 8 ] KCAOC R P , DRIAN R F , Theory of cross-correlation of PIV images[ J ] *Applied Sci. Res.* 1992 , 49 : 191-215
- [ 9 ] 刘胤. 采用 PIV 技术测量压气机内流实验研究[ D ]北京 北京航空航天大学动力工程系 2000.3.20
- [ 10 ] ZHANG W I , WANG YUAN , XU ZHONG. Application of particle Image velocimetry( PIV ) to measurement of poiseuille flow and flow around a circular cylinder[ J ]. *Journal of Xian Jiaotong University* 2002 ,36( 3 ) 246-251.
- [ 11 ] 陈矛章. 粘性流体动力学基础[ M ]. 北京 高等教育出版社. 1993.10 524-530.

## Experimental investigation of vortex evolution around a circular cylinder by digital particle image velocimetry( DPIV )

ZHANG wei<sup>1</sup> ; WANG yuan<sup>1</sup> ; XU zhong<sup>1</sup> ; JIN wen<sup>2</sup>

( 1. Institute of Fluid Machinery , Xi 'an Jiaotong University , Xi 'an , 710049 China ;

2. Xi 'an Aeronautical College , Xi 'an , 710077 China )

**Abstract** : Measurements of flow around a circular cylinder at  $Re = 500$  in gust environmental wind tunnel have been carried out with Digital Particle Image Velocimetry ( DPIV ). A series of instantaneous velocity vectors , vorticities and stream line graphs are shown in the area behind the circular cylinder , 2.2 times of the diameter long and 2 times of the diameter wide. The vortex evolution procedure around the circular cylinder in a pseudo-period is discussed , as well as the typical vortex structures , according to the visualization pictures and qualitative data.

**Key words** : DPIV ; flow around a circular cylinder ; vortex 's structure and evolution ; pseudo-period