

应用 PIV 系统研究横流中近壁水平圆柱绕流旋涡特性

吴 剑¹, 齐鄂荣¹, 李 炜¹, 黄明海², 李国亚³

(1. 武汉大学水利水电学院, 湖北 武汉 430072; 2. 长江科学院, 湖北 武汉 430010; 3. 中国三峡总公司溪洛渡工程建设部, 云南 永善 657300)

摘要: 应用粒子图像测速(PIV)系统对横流中近壁水平圆柱绕流进行了试验研究。介绍了试验原理及装置, 讨论了试验参数的选取和粒子的跟随性问题。分析了上游来流的流动特性, 显示了亚临界雷诺数下间隙比为 0.5 时圆柱后尾流区旋涡产生、发展和消亡的动态过程, 比较了时均流场和瞬时流场旋涡结构。对圆柱尾迹的旋涡脱落特性进行了分析, 得出在试验条件下斯特劳哈尔数保持为常数 0.2 的结论。

关键词: 粒子图像测速; 横流; 圆柱绕流; 旋涡; 斯特劳哈尔数; 雷诺数

中图分类号: TV135 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-6791(2005)05-0628-06

环境工程中水体中的排污管道, 管道输运工程中铺设于海底的运输管道、光缆, 隧道工程中采用沉管法放入水体底部的管状隧道等都可概化为非往复流近壁水平圆柱绕流。随着圆形构筑物广泛地应用于生产实践中, 人们对由于流体横向流过而使圆柱体产生振动以及流场的流动特性更是特别关注。

在对近壁面水平圆柱绕流的研究中, 较早的有 Bearman 和 Zdravkovich^[1], 他们用风洞试验研究了在 Re 为 4.8×10^4 , 缝隙度 G (圆柱底部和水槽底壁之间的距离 e 与管径 D 的比值) 为 $0 \sim 3.5$ 时的流动, 测量了圆柱周围和平板上的压力分布, 并得出了在 $G = 0.3$ 时斯特劳哈尔数保持为常数的结论。Fredsoe 和 Hansen^[2] 基于 Bearman 的研究成果, 研究了 $G < 0.3$ 时圆管在恒定流中的升力。Lei^[3] 等研究了雷诺数 (Re) 为 1.30×10^4 到 1.45×10^4 之间圆管与平板缝隙度、边界层厚度及速度梯度等与升力、阻力、涡脱落现象的关系。另外, 陈兵^[4]、林长圣^[5] 也对近壁水平圆柱绕流进行了数值模拟和分析。

以往的实验大部分是在风洞内进行的, 对亚临界区内较低雷诺数情况下流场的研究较少, 而且由于测试手段的局限, 主要集中在升力系数、阻力系数等直接与压力有关的测量, 对圆柱后旋涡结构和演化过程多依赖于定性化的流动显示技术, 不能很好的得到流动的瞬态流场, 从而不能很好的揭示尾流中旋涡产生、发展和脱落的动态演化过程。鉴于此, 本文针对有固壁影响圆柱绕流中流体的流动特性, 采用了粒子图像测速(Particle Image Velocimetry, PIV) 这一具有较高空间分辨率和可以测量瞬时流速场的技术, 同时采用 Tecplot 9.0 图形软件对其测量的数据进行处理和分析。

1 试验原理、装置及粒子跟随性

1.1 PIV 技术及试验装置、参数的选取

PIV 技术是采用流场可视化和摄影成像的方法记录流场中粒子的位移并利用相关技术测量其位移, 从而得出流场瞬时速度矢量及涡量强度分布。它由光路成像系统、图像记录系统和数字图像分析显示系统组成, 分别采用粒子图像激光成像技术和数字图像自动判读技术加以实现。

本试验在一条宽 100 cm, 高 50 cm 和长 1300 cm 的开放玻璃水槽内进行, 其首部为一直角三角形量水堰, 测量通过水槽的横流流量; 横流经过一段发展后到达放置圆柱的测试区; 在水流下泄区, 布置了可以调节水槽

收稿日期: 2004-06-21; 修订日期: 2004-10-15

作者简介: 吴 剑(1978-), 男, 贵州桐梓人, 博士研究生, 主要从事水力学及河流动力学研究。

E-mail: wujian0725@sina.com

水位的控制尾门，见图 1(a)。流场测试采用美国 TSI 公司的产品 ULTRA- 型 PIV 系统。它含有两台铷-铷石榴石激光器，由同步仪分别触发，然后由一组反射镜将两路脉冲激光合并为一束，再由特别涂层的光学组件形成片光，经光导臂照射所需的测试区，测试区粒子图像通过 CCD(固态充电耦合装置) 视频相机记录在感光纸上，以获得流场中双曝光单幅粒子图像或多幅粒子图像，见图 1(b)。PIV 成像系统和图像记录系统提供了在已知时间间隔内流场中粒子群的位移信息，数据的处理采用互相关算法，对所得的粒子图像进行三次二维快速傅立叶变换来得到粒子图像中的位移信息。

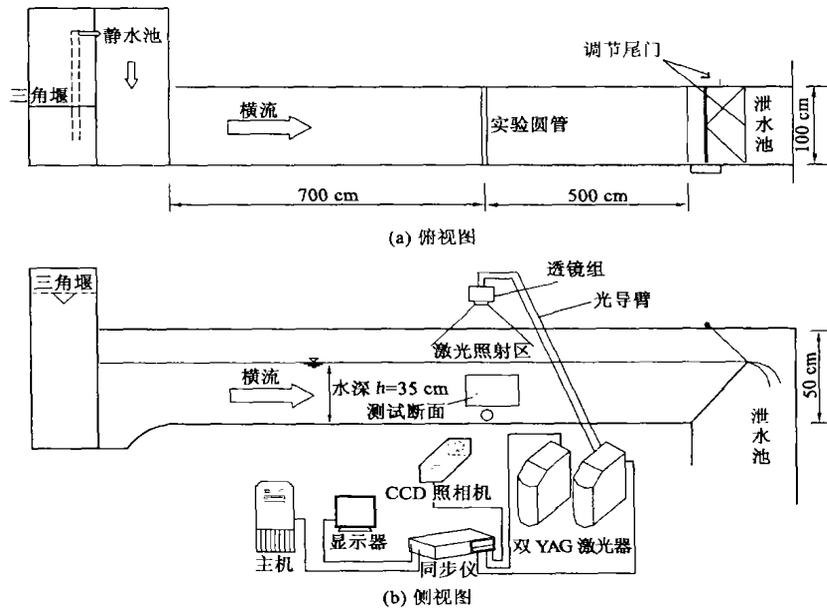


图 1 试验装置及 PIV 流速测量系统

Fig.1 Experimental equipment and PIV system

试验中通过将流场的粒子浓度控制为 0.35 g/L 和选取询问小区的尺寸为 3.35 mm × 3.35 mm (即 32pixel × 32pixel)，使得 PIV 的测试为高粒子浓度模式，询问小区中的粒子对数目平均为 11 对，保证了在图像采集过程极少出现随机亮斑和粒子脱落现象。试验采用的是水中的天然泥沙颗粒，对光的散射性较一些标准粒子如 TiO₂ 粉末(粒径约为 6 μm)差，因此，本试验选用了较强的激光强度 125 ~ 130 mJ，保证了光能够均匀照亮流场。试验过程中在 CCD 放大率为 2.8 的情况下通过多次调试比较，在较低流速时，采用了 400 ~ 500 μs 的曝光时间间隔，在较高流速时采用了 2000 ~ 2500 μs 的曝光时间间隔，取得了满意的结果。

1.2 粒子跟随性讨论

由于 PIV 系统是通过记录流场中粒子的运动实现对流场的测量，因此，流体中粒子的跟随性直接影响测量结果的准确性，而粒子跟随性的好坏取决于粒子的浓度和粒径。对试验所用水样进行颗粒采样分析得到，粒径在 0.005 ~ 0.05 mm 之间的粒子含量在 97% 以上，颗粒密度为 1.071 g/cm³，表明粒子基本上为粘土微粒。根据粒子在水中的运动方程，并用 Stocks 法对之进行简化得到 $\frac{|V - U|}{|V|} < 7.4 \times 10^{-5}$ ，V 代表微粒的拉格朗日速度，U 代表流场的欧拉速度，表明试验颗粒具有良好的跟随性。另外，还需要考虑在速度有明显变化区域的响应能力，由粒子所受的阻力，惯性力以及虚质量力三力平衡可得特征时间的计算式 $= \frac{d_p^2}{18\nu} \left(\frac{1}{2} + \frac{\rho}{\rho_p} \right)$ ，估算出对于本文实验 约为 2.2 × 10⁻⁴ s，表明了微粒对速度变化具有良好的跟随性。张永泽等^[6]对紊流中悬浮颗粒跟随性对粒子粒径和密度的依赖性进行了分析，得出该密度下粒径小于 1.0 mm 时颗粒几乎完全跟随流动运动。

2 流场结构分析

2.1 圆柱上游来流流动特性分析

图2给出了本文试验的示意图, 试验控制水深 h 为 35 cm, 选取 3 种管径 D 为 3.5 cm、4.5 cm 和 5.5 cm, 间隙比 G 取为定值 0.5, 雷诺数(以管径为特征长度)根据水槽所能达到的范围取为 900 ~ 8000。

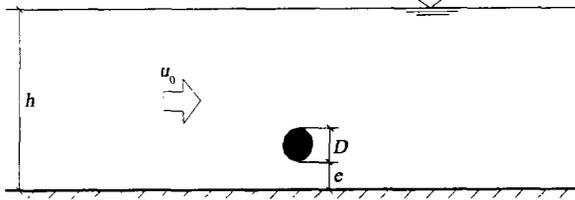


图2 试验示意图

Fig.2 Sketch of experiment

由于上游来流的流动特性对圆柱尾迹旋涡的形成起着决定性的作用, 因此有必要对来流特性进行分析。本文试验水槽宽度远大于管径, 在水槽中线附近测量来流断面流速分布, 重合性较好, 保证了流场流动的二维性。运用美国 SonTek 公司生产的 Micro ADV (Acoustic Doppler Velocimeter) 三维声速多普勒流速仪对圆柱上游 20 cm 处来流进行了测量。图3给出了水槽中心线上来流时均流速和紊动强度分布。在不同流速下, 该断面上量纲为一化后的时均流速

服从对数分布, 并且基本一致, 用最小二乘法对之进行拟合得到上游断面纵向时均流速分布公式: $\frac{Y}{h} = 0.00002 \exp\left[9.6707 \left(\frac{u}{u_0}\right)\right]$, 来流为剪切流动。由于整个断面上沿水流方向的紊动强度远远大于另外两个方向上的紊动强度, 因此定义来流紊动强度 $N = \sqrt{u'^2} / u_0$, 在 $Y/h = 0.2$ 时 N 达到最大值约为 0.15, 并沿两侧逐渐减小, 其平均值约为 0.085。

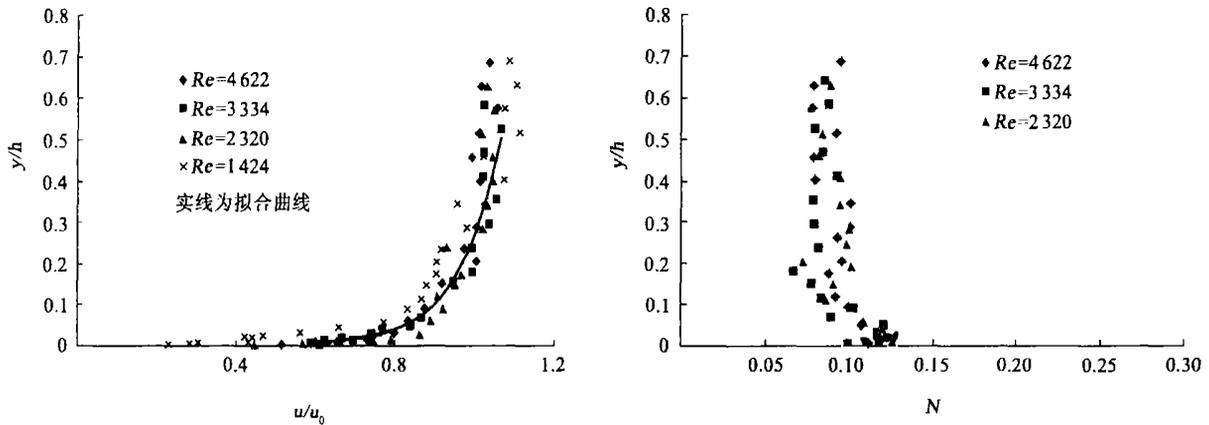


图3 断面时均流速分布及紊动强度分布

Fig.3 Time-average velocity distribution and turbulent fluxes distribution in profile

2.2 圆柱尾迹旋涡脱落过程分析

在对粘性不可压缩流体绕流的研究中, 人们特别感兴趣的就是流场中出现的旋涡现象。利用 PIV 系统对整个流场进行了测量, 并经过后处理得到图4所示的瞬态流线图, 显示了一个周期内圆柱尾迹旋涡产生、发展和消亡过程。可以看出, 从图4(a) ~ 图4(e)圆柱尾迹上方旋涡产生并逐渐发展, 同时下方已发展的旋涡在圆柱后约 $2D$ 处消亡, 且开始产生一个新的小旋涡; 从图4(f) ~ 图4(i)圆柱尾迹下方旋涡逐渐发展, 同时上方发展的旋涡消亡并产生新的旋涡, 回到与图4(a)相似的状态, 周期约为 2.16 s, 涡径和管径同数量级。因此, 通过 PIV 测速系统可清晰的得到圆柱后上下旋涡交替产生、发展和消亡的过程。我们发现在圆柱尾流区并没有出现“卡门”涡街。圆管上方主流对尾迹的影响不大, 而下方的主流受到水槽底壁的“推挤”作用而在尾流中向上抬, 随着旋涡脱落周期性的上下摆动, 因此没有形成“卡门”涡街。在底壁回流区由于固壁的存在而形成附着涡,

当水中悬浮颗粒较大时可以看到明显的“积沙”现象。这些都是无限圆柱绕流所没有的现象，而存在于有固壁影响圆柱绕流中的特殊运动规律。

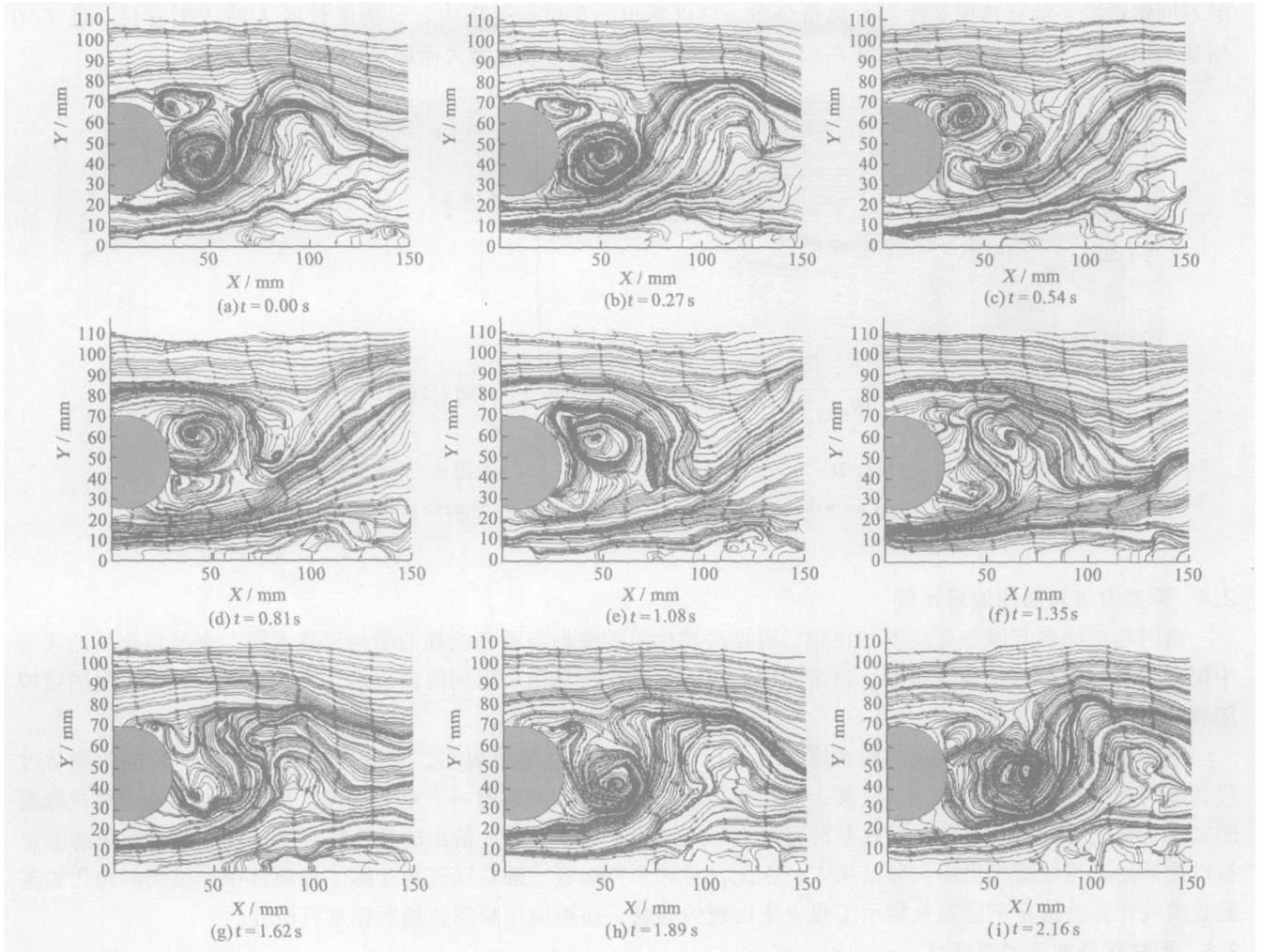


图 4 尾迹旋涡脱落过程 ($Re = 5702, D = 4.5 \text{ cm}$)

Fig. 4 Process of vortex shedding in the wake ($Re = 5702, D = 4.5 \text{ cm}$)

对圆柱管径为 3.5 cm 和 5.5 cm 时流场的流动也进行了试验，发现尾迹旋涡的脱落规律基本相同。通过大量的试验，我们了解到尾迹中涡对有规律的拟序结构：启动涡生成后，很不稳定，随着外部水流的不断加入而发展增强，当达到一定强度时脱离圆柱壁面随水流向下游运动。在这个过程中伴随着涡的破裂、合并、重联等复杂现象。分离流一方面表现貌似随机的混沌特征；另一方面又存在规律性。随着旋涡的周期性脱落，流场产生规则的振动，振动方向与来流方向正交。圆柱上方的主流基本保持平行流动，下方的主流受到槽壁的“推挤”和旋涡的“卷吸”作用而在尾流中向上抬起，随着旋涡周期性脱落而周期性的上下摆动，在底壁附近回流区形成附着涡。

2.3 圆柱尾迹时均特性分析

由实验所测得的瞬态数据，按时均化方法处理为时均流速场分布。图 5 就是时均化处理后得到的圆柱尾迹时均流线图，可以看出在圆柱尾迹形成上下两个大小相似的大尺度旋涡对，涡径和管径的数量级相同。将流线从圆柱表面分离出去的位置定义为分离点，分离点附近的流动满足 $\left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)_o = 0; \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y}\right)_o < 0$ ；将圆柱后驻点到

尾迹末端的长度定义为分离区长度(L),将后驻点到分离点的圆心角定义为分离角(θ),分离区长度表征了时均流场旋涡的大小,分离角表征了流线在圆柱表面边界层脱落的位置。图6给出了管径为45 mm,间隙比为0.5时不同雷诺数下的分离区长度和分离角分布,可以看出,在试验范围内,分离区长度 L 略大于管径,且 L/D 值基本保持在1.1左右;分离角在65到75之间,并随雷诺数的增大而减小。

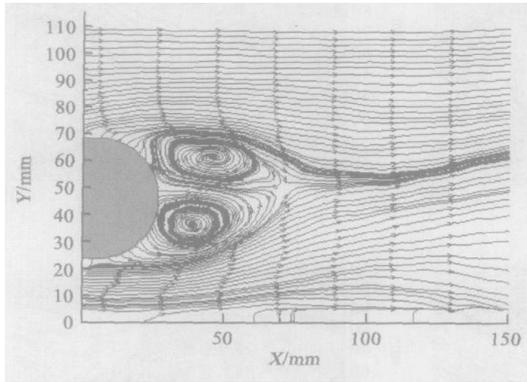


图5 尾迹时均流线图($Re = 5702, D = 3.5\text{ cm}$)
Fig. 5 Time-average streamline in the wake
($Re = 5702, D = 3.5\text{ cm}$)

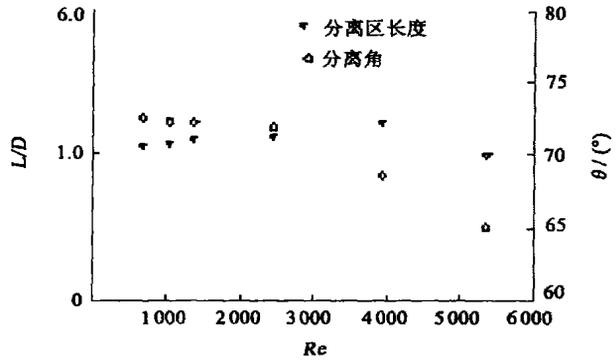


图6 分离区长度及分离角
Fig. 6 Separate domain length and separate angle

2.4 瞬态流场与时均流场比较

将时均流场图与瞬态流场图相比较,可见时均化后的流场与瞬态流场的结构明显不同,在时均化后的流场中尾迹出现一个与管径等数量级、稳定的旋涡对,而瞬态流场则可以同时出现多个旋涡,并且这些旋涡的结构随着时间不断发生变化。

这些分析说明,时均流场与瞬态流场是完全不同的。实验结果表明,近壁圆柱绕流是一个复杂的流动过程,用瞬态的观念为一个非定常过程,而用较长时间的时均观念则为一个定常过程。也可以说,近壁圆柱绕流的实质是非定常的流动过程,但在某种程度上可用时均化描述。图5给出的具有规则稳定旋涡的时均流线图正是以往采用时均仪器得出的实验结果^[1]。因此,对许多类似近壁圆柱绕流的实际工程项目中,仅用时均化的实验数据或计算数据是不能完全揭示工程中所出现的问题,还得应用瞬态流场数据进行研究。

2.5 圆柱尾迹旋涡脱落特性

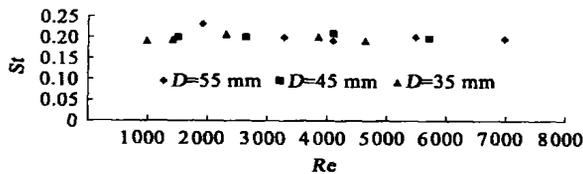


图7 Re 与 St 的关系图($G = 0.5$)
Fig. 7 Relationship between Reynolds number and Strouhal number($G = 0.5$)

斯特劳哈尔(Strouhal)数(St)是圆柱绕流的一个重要参数,它是表明旋涡脱落特性的相似准则数,计算式为 $St = D / u_0 T$, T 为脱落周期。Bearman^[1]的风洞试验中,通过热线流速仪产生的信号测出了流场中旋涡脱落的频率,并得出了 Re 为 4.8×10^4 , $G > 0.3$ 时斯特劳哈尔数保持常数为0.2左右。本文试验通过对流场流速的测量,得到圆柱后旋涡脱落过程的同时,根据CCD视频照相机的曝光时间间隔,计算出旋涡脱落的周期,并经过多次算术平均,得到平均周期,从而算

出斯特劳哈尔数。如图7所示,给出了雷诺数与斯特劳哈尔数的关系,在 Re 为900~8000时, St 保持常数0.2左右,说明近壁圆柱绕流尾迹流动是“无序中的有序”的流动结构。当流体流动工况处于亚临界区范围,即 $300 < Re < 3 \times 10^5$ 时,无限圆柱绕流时 St 数几乎保持为0.2的定值^[7]。这说明虽然近壁圆柱绕流由于固壁的影响与无界圆柱绕流的流场结构有很大的不同,但就旋涡脱落特性来说,二者是极为相似的。

3 结 论

(1) PIV 粒子图像测速技术突破传统单点测量的限制, 是一种非接触式全场诊断技术, 具有较高的测量精度, 是研究复杂流场流动特性的很好的测试手段, 其显著优点之一是可以得到瞬态流场结构。

(2) 通过 PIV 粒子图像测速仪对近壁水平圆柱绕流在亚临界区的流场进行观测, 清晰地了解到圆柱尾迹旋涡交替产生、发展和脱落的过程。在 $D=4.5\text{ cm}$, $G=0.5$ 时, 旋涡在圆柱后约 $2D$ 的地方脱落消亡, 且不产生“卡门”涡街, 在尾流区底壁附近形成附着涡。

(3) 对瞬时流场时均化后得到的时均流场和瞬时流场进行比较分析后, 发现时均流场和瞬时流场的结构明显不同。时均流场中有稳定、规则的涡对, 是定常流动; 而瞬态流场有复杂的旋涡脱落过程, 旋涡结构随时间不断发生变化, 是非定常流动。以往由于测试仪器的限制, 未能得到真实的流态和真实的瞬时旋涡结构。

(4) 在亚临界区内, 表征旋涡脱落特性的斯特劳哈尔数和雷诺数是无关系的, 保持为常数 0.2 左右。表明虽然近壁圆柱绕流与圆柱绕流的流场结构有很大的不同, 但其旋涡脱落特性却是极为相似的。同时, 本文试验也是 Bearman 实验得出相同结论雷诺数范围的补充。

参考文献:

- [1] Bearman P W, Zdravkovich M M. Flow around a circular cylinder near a plane boundary[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1978, 89(1): 33 - 47.
- [2] J rgen Freds e, Eric Asp Hansen. Lift forces on pipelines in steady flow[J]. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, ASCE, 1987, 113(2): 139 - 155.
- [3] Lei C, Cheng L, Kavanagh K. Re-examination of the effect of a plane boundary on force and vortex shedding of a circular cylinder[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1999, 80: 263 - 286.
- [4] 陈 兵, 李玉成, 赖国璋. 近底水平圆柱振荡绕流的三维数值模拟[J]. *水动力学研究与发展*, 2002, A 辑, 17(1): 9 - 16.
- [5] 林长圣. 近平板圆柱绕流的边界元分析[J]. *重庆建筑大学学报*, 2000, 22(6): 34 - 36.
- [6] 张永泽, 李 嘉, 赵文谦. 紊流中悬浮颗粒跟随性对粒径和浓度的依赖性分析[J]. *四川水力发电*, 1997, 16(2): 83 - 88.
- [7] 林宗虎, 李永光, 卢家才, 等. 气液两相流旋涡脱落特性及工程应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2001. 3 - 15.

Research on vortexes of cross flow past a horizontal circular cylinder by PIV system

WU Jian¹, QI Erong¹, LI Wei¹, HUANG Ming-hai², LI Guo-ya³

(1. School of Water Resource and Hydropower, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China;

3. China Yangtze Three Gorges Project Development Corporation Xiluodu Project Construction Department, Yongshan 657300, China)

Abstract : The experimental research on cross flow pasting a circular cylinder near a plane boundary is conducted based on the particle image velocimetry (PIV) system. The experimental principle and devices are introduced. The problems about parameter s selection and particle s tracking are discussed. And the flow characteristics of the upstream of the cylinder are analyzed. Behind the cylinder, the dynamic process of the vortex formation, its development and extinction are displayed on the sub-critical Reynolds number range and gap-ratio is 0.5. The structure of the time-average and instantaneous flow field is compared. Finally, the characteristics of the vortex shedding in the wake are analyzed. Under the given experimental condition, the conclusion is drawn that the Strouhal number keeps the constant of 0.2.

Key words : particle image velocimetry; cross flow; flow past circular cylinder; vortex; Strouhal number; Reynolds number