

【文章编号】 1004-1540(2008)02-0098-05

圆柱绕流的流场特性及涡脱落规律研究

涂程旭, 王昊利, 林建忠

(中国计量学院 计量测试工程学院, 浙江 杭州 310018)

【摘要】 采用粒子图像测速技术对 630、800 及 950 三种雷诺数条件下的圆柱绕流场进行了实验, 给出了圆柱下游沿流动方向 4 倍圆柱直径和垂直方向 3 倍圆柱直径区域内的速度场、涡量场以及涡脱落现象的时空演化规律. 结果表明: 圆柱尾流区域位于垂直方向约 1.5~2.5 倍圆柱直径范围内, 随着雷诺数增大, 这一范围呈现缩小趋势, 而主流对涡的拉伸和输运能力有所增强; 涡脱落频率随雷诺数增大而增大, 小雷诺数时能够较为完整地捕捉到涡生成、脱落、发展和耗散过程, 由于 PIV 采集频率的限制, 大雷诺数条件下涡脱落整个过程不易被完整捕捉到.

【关键词】 圆柱绕流; 粒子图像测速技术; 速度场; 涡量场; 涡脱落

【中图分类号】 V211.7; O357.5

【文献标识码】 A

Experimental research on the flow characteristics and vortex shedding in the flow around a circular cylinder

TU Cheng-xu, WANG Hao-li, LIN Jian-zhong

(Fluid Measurement & Simulation Institute, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: The flow around a circular cylinder under the Reynolds numbers of 630, 800 and 950 was studied experimentally by using particle image velocimetry (PIV). The velocity and vorticity fields were given within the area in the longitudinal direction of 4 times of cylinder diameter and in the lateral direction of 3 times cylinder diameter; and the spatial-temporal evolutions of vortex shedding were studied. The experimental results show that the wake is located within the lateral distance with 1.5 to 2.5 times of cylinder diameter, and the distance tends to be reduced as Reynolds number increases while the capabilities of vortex stretching and transport by the main flow increase. The frequency of vortex shedding increases with the increasing of Reynolds number. The process of vortex production, shedding, development and dissipation can be captured basically for the case of small Reynolds number. However, it is difficult to capture the entire process of vortex shedding for high Reynolds number because of the limit of frame grabbing frequency.

Key words: flow around a circular cylinder; particle image velocimetry; velocity field; vorticity field; vortex shedding

【收稿日期】 2008-02-26

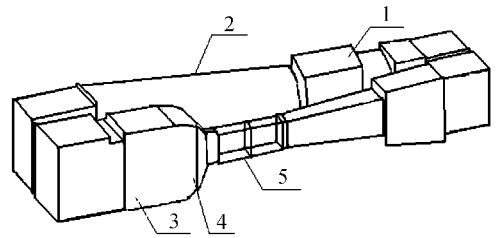
【作者简介】 涂程旭(1984-), 男, 福建东山人, 硕士研究生. 主要研究方向为粒子图像、测速技术等.

圆柱绕流是流体力学的经典问题之一,广泛地存在于航空航天、建筑工程、水利工程、高空电缆、机械、核工业、远洋钻井、风工程等科学研究和工程实践领域.早在1908年,Bénard就采用素描的方法记录下了水中圆柱背对来流一侧的周期性漩涡脱落.1911年冯·卡门从理论上研究了圆柱绕流产生的两列涡街的稳定性,此后引起了众多学者对圆柱绕流问题广泛的关注^[1].随着流体测试技术的发展,人们开始使用更先进的热线风速仪(HWA)、激光多普勒测速仪(LDV)及粒子图像测速技术(PIV)来研究圆柱绕流的涡脱落现象.其中PIV是20世纪80年代末出现的一种瞬态、非接触式、全场定量测速技术.它克服了热线、LDV等只能单点测量的局限,非常适用于研究具有大的时间和空间演化过程的复杂流动问题.到目前为止,已有一些学者利用PIV研究圆柱绕流问题. Williamson 等人在1996年对二维圆柱绕流涡动力学领域的研究作了全面的总结,并于2004年回顾了其采用PIV技术对静止和振动圆柱绕流的实验研究,分析了尾涡的形成机理^[2,3]; Julio 利用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^[4]; Lee 等人在前人的研究的基础上利用PIV技术研究了自由壁面对圆柱绕流的影响^[5]; 张炜、王元等则对圆柱绕流的涡系演变进行了PIV测试(Re 数为510)^[6]. 目前,圆柱绕流的研究关注较多的是尾流涡脱落问题^[7],与涡脱落频率相关的研究成果已经应用于生产实践,如涡街流量计的研制开发等.本文采用PIV技术对不同雷诺数条件下圆柱绕流尾流的速度场、涡量场分布特性以及涡脱落规律进行了实验研究.

1 实验设备和方案

圆柱绕流实验是在中国计量学院流体检测与仿真研究所的循环风洞的实验段开展的.风洞由风机、扩压段、整流段、收缩段和实验段五个部分组成,能稳定提供湍流度小于2%的空气流场,见图1.其中实验段长2 m,截面尺寸为600 mm×600 mm,由有机玻璃镶嵌于钢框架封闭而成.实验采用德国Lavisision公司生产的PIV系统,该系统由双脉冲Nd:YAG激光器、CCD相机、同步控

制器及计算机系统组成.其中激光器产生532 nm 的绿光,额定脉冲能量为125 mJ,激光重复率为15 Hz. CCD相机型号为Imager Prox,像素达到2 M(1 600×1 200 pixel),具有12位灰阶,最小的曝光时间间隔小于120 ns,能够实现高速流场测量. PIV的硬件控制和所有的数据采集及后处理由Lavisision提供的DaVis7.2软件完成,可以针对不同类型的实验(如二维、三维)进行标定、图像处理和分析、矢量场计算和数据分析.

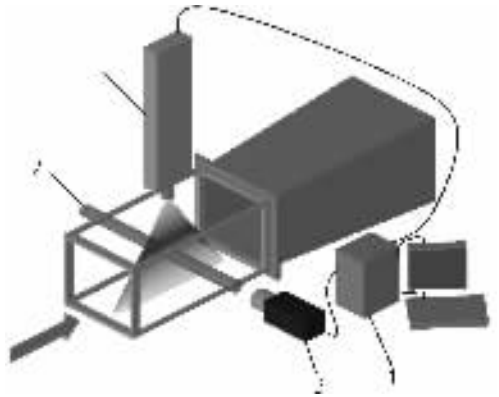


1—风机;2—扩压段;3—整流段;4—收缩段;5—实验段

图1 循环风洞结构示意图

Figure 1 circular wind tunnel

实验采用的圆柱为直径25 mm的有机玻璃管,长500 mm,由钢制支架固定于实验段中央,见图2.



1—激光器;2—圆柱;3—CCD相机;4—计算机

图2 PIV系统及实验装置

Figure 2 PIV system and experimental set

由于圆柱边缘和风洞边界的距离与圆柱直径的比 $G/D \gg 1.0$,因此无需考虑风洞壁面对圆柱绕流的影响^[8].激光器发射的片光照射在沿圆柱长度方向的中央,集中观测圆柱后 $3 \sim 4D$ (D 为圆柱直径)内的流场情况,根据文献^[9]的结论,可以近似将本实验视为二维问题,而采用二维PIV进行测

试. CCD相机固定于圆柱轴线方向偏下游一侧,通过标定得到的视场大小为 $119\text{ mm}\times 89\text{ mm}$,约为4~5倍圆柱直径. 示踪粒子由Lavision公司Laskin喷嘴式烟雾发生器通过压缩空气驱动产生. 在实验段的下游撒播粒子,经历充分的循环时间后粒子的浓度即可达到测量要求. 圆柱远前方来流风速通过变频器控制风机转速获得. 在进行速度场测量前采用皮托管和热线风速仪标定风机频率对应的实验段风速. 针对实验选取的630、800和950三种不同雷诺数,跨帧时间分别设定为 $780\text{ }\mu\text{s}$ 、 $625\text{ }\mu\text{s}$ 及 $520\text{ }\mu\text{s}$,计算雷诺数所采用的特征尺寸和特征速度分别取为圆柱直径和远来流平均风速. 计算速度矢量时,采用Davis软件提供的多通道互相关算法,判读域从 256×256 像素回归至 32×32 像素,空间分辨率可达 2.38 mm ,从而获得具有较高空间分辨率的速度分布.

2 结果与分析

2.1 圆柱绕流的速度场

绕流雷诺数为630、800和950的某一瞬时速度矢量分布由图3所示. 可以看到,三种雷诺数条件下,均匀来流在经过圆柱后形成类抛物线状的尾流区,尾流区集中于竖直方向上距圆柱中心 $0.5\sim 1.5D$ 的区域,并向下游发展;在这一区域外气流很快恢复到来流状态,这与Zdravkovich描述的绕流速度分区相一致^[10]. 比较三种雷诺数条件下尾流区域,可以看到随着雷诺数的增大,尾流在垂直主流方向的影响区域减小. 实验表明, $Re=630$ 时,尾流在垂直方向的扰动区域能达到2.5倍的圆柱直径; $Re=800$ 时仅影响到1.5~2倍圆柱直径的区域;而对于 $Re=950$,影响区域已经不足1.5倍圆柱直径. 分析原因可知,随着雷诺数的增加,主流动能增大,其对尾流的影响增加,尾流影响被主流抑制^[11].

2.2 圆柱绕流的涡量场

三种雷诺数条件下,某一时刻尾流的涡量分布由图4给出. 从空间分布状况来看,具有如下特征:1)涡量集中的区域主要分布于圆柱的上下两侧,强度相近. 根据颜色可判断两个区域的涡矢量方向相反,上侧的为负值,下侧的为正. 这两个位置可以看作尾流和主流的分界区域,存在较大速度梯度;2)如同速度场分布特点,小雷诺数条件下

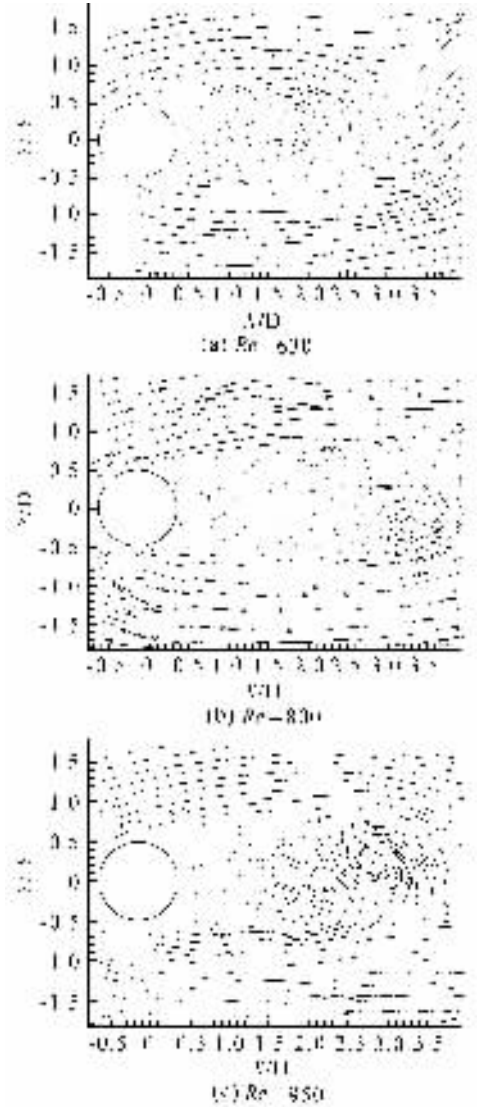


图3 三种雷诺数下的速度场

Figure 3 Velocity vectors at (a) $Re=630$;
(b) $Re=800$; (c) $Re=950$

涡量在垂直方向扩散的能力强于大雷诺数的情况,因为主流动能的增加更易制约涡量在垂直方向的扩散;3)从涡量向下游的扩散情况来看,大雷诺数条件下涡量向下游的衰减更慢. 这是因为高雷诺数条件下,圆柱对主流的扰动更为强烈. 由于涡量在垂直方向的扩散受到限制,因此向下游扩散的能力得到增强.

2.3 不同雷诺数下涡脱落规律分析

PIV系统的激光器和CCD相机在同步器控制下,图像采集频率达到 10 Hz ,因此每 0.1 s 能够得到一个整场涡系分布. 由文献^[12]知,当 Re 为 $600\sim 1\ 000$ 时,圆柱涡的脱落频率约为 $3\sim$

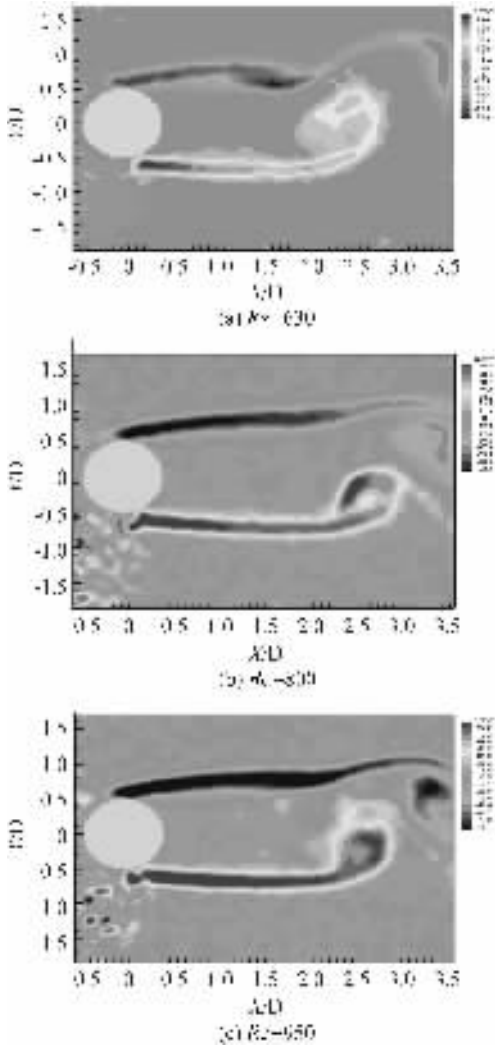


图 4 三种 Re 数下的涡量图

Figure 2 Vortex fields at (a) $Re=630$; (b) $Re=800$; (c) $Re=950$

5 Hz,所以 PIV 系统能够采集到三种雷诺数下相对完整的涡周期性脱落过程.但由于 CCD 的采集频率不容易与涡脱落频率达到恰好一致,故本文借鉴文献[6]的提法,将“拟周期”概念应用于涡脱落分析.通过对已获得的速度场绘制流线图,得到圆柱绕流涡系的时空演化过程.

$Re=630$ 的圆柱尾流涡系演变的拟周期过程由图 5 给出,在实验得到的所有结果中截取了 $t=3.4\text{ s}$ 到 $t=3.8\text{ s}$ 的五个瞬时流动状态.从 $t=3.4\text{ s}$ 和 $t=3.8\text{ s}$ 两个时刻的流线图能够看到,无论是涡的分布还是涡的大小两者都非常相似,可以判断前四个时刻构成了一个“拟周期”.在 $t=3.4\text{ s}$ 时,圆柱下方生成一个小涡,经历 $t=3.5\text{ s}$

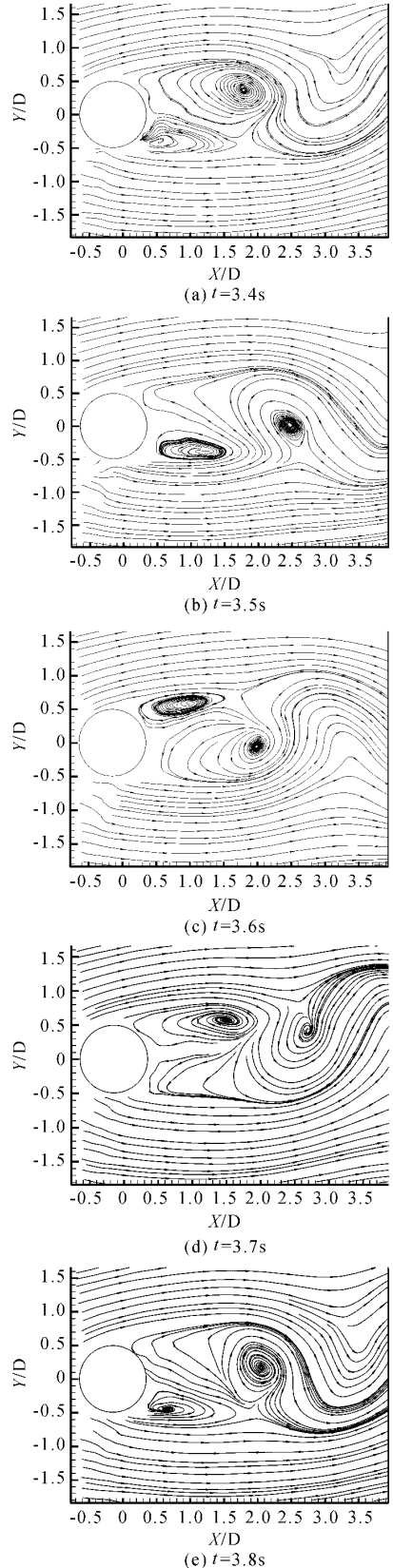


图 5 $Re=630$ 的圆柱绕流涡系演变过程

Figure 5 Evolutions of vortex shedding of the flow around a circular cylinder with $Re=630$

时刻的涡拉伸和 $t=3.6\text{ s}$ 时刻的发展过程后于 $t=3.7\text{ s}$ 时刻末被流体的粘性耗散掉. 同时, 可以看到 $t=3.6\text{ s}$ 时圆柱上部也新生成一个涡, 在随后的两个时刻, 这一新生成的涡向下游扩散, 也将最终被耗散掉. 涡向下游扩散, 也将最终被耗散掉. 圆柱上下涡交替生成、脱落、发展及耗散, 形成了一个相对完整的涡系时空演化过程.

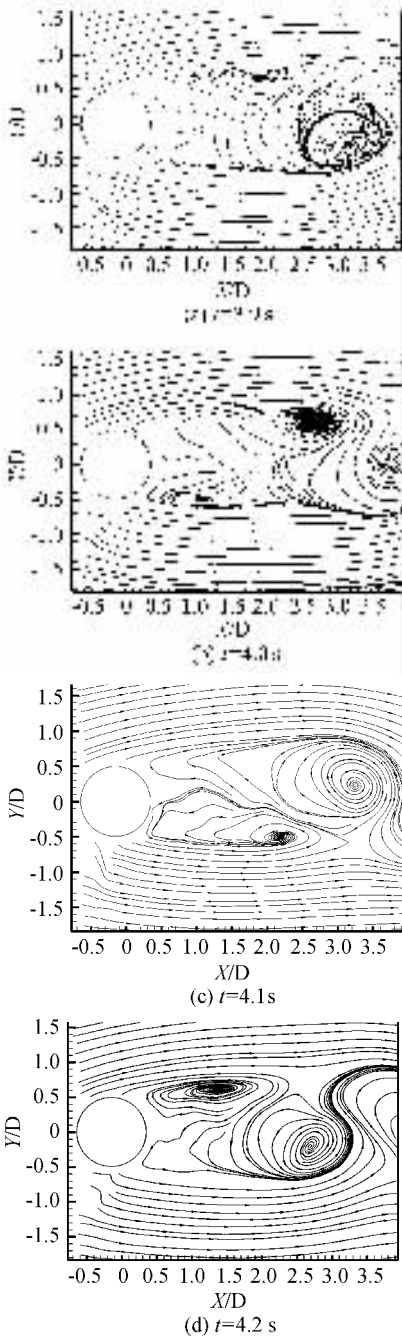


图 6 $Re=800$ 时的圆柱绕流涡系演变过程

Figure 6 Evolutions of vortex shedding of the flow around a circular cylinder with $Re=800$

图 6 给出了 $Re=800$ 全部时间序列中截取的 $t=3.9\text{ s}$ 到 $t=4.2\text{ s}$ 时刻的四个瞬时状态. 从图中可以看到, 从 $t=3.9\text{ s}$ 到 $t=4.1\text{ s}$ 圆柱绕流经历了一个“拟周期”. 与 $Re=630$ 的情况相比较可以看到, 由于涡脱落频率随雷诺数增加而增加, “拟周期”时间缩短了 0.1 s .

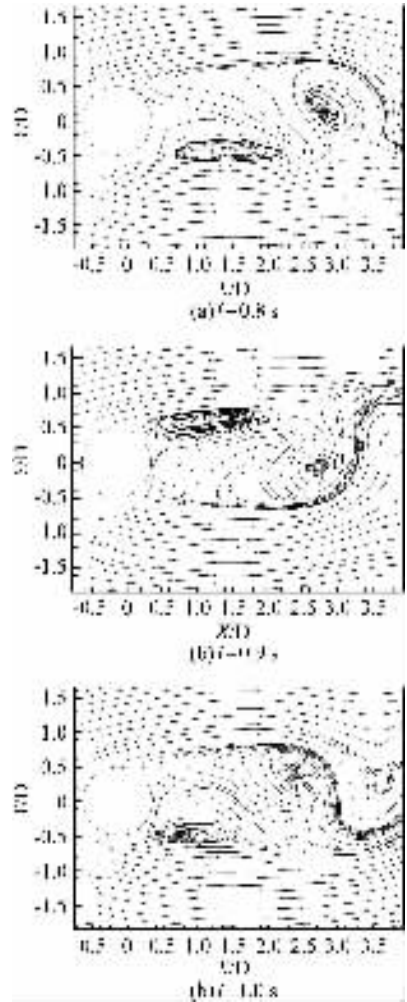


图 7 $Re=950$ 时的圆柱绕流涡系演变过程

Figure 7 Evolutions of vortex shedding of the flow around a circular cylinder with $Re=950$

图 7 给出了 $Re=950$ 时 $t=0.8\text{ s}$ 到 $t=1.0\text{ s}$ 三个时刻的涡系演化过程, 从中可以看到, 因此经历一个“拟周期”仅需要 0.2 s . 由于涡脱落频率进一步增加, 更为精细的脱落过程已经不易被捕捉到. 结合前述涡量分析可知, 涡沿流向的传播能力有所增强.

(下转第 136 页)

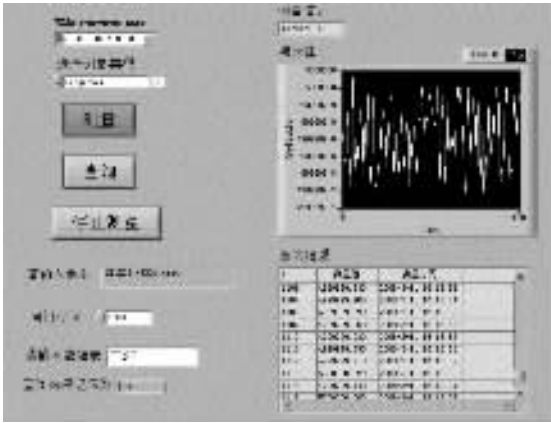


图6 控制面板

Figure 6 Control panel

各种便利的方法和属性,能够有效地实现对所采集数据的统计和管理。

(上接第102页)

3 结语

本文采用粒子图像测速技术对圆柱绕流的流场结构进行了实验研究,获得了三种不同雷诺数条件下的圆柱绕流流场特性和涡脱落的时空演化规律.对比三种雷诺数条件下获得的速度场和涡量场,得到如下主要结论:尾流在垂直于流动方向的区域随雷诺数增加而减小,主流对涡的拉伸作用以及涡量沿流向传播能力随雷诺数增大而增大。

【参考文献】

- [1] VON KÁRMÁN TH, RUBACH H. On the mechanism of resistance in fluid[J]. *Physikalische Zeitschrift*, 1912, 13(5):351-358.
- [2] WILLIAMSON C H K. Vortex dynamics in the cylinder wake[J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 1996, 28: 477-539.
- [3] WILLIAMSON C H K, GOVARDHAN R. Vortex-induced vibrations[J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2004, 36:413-455.
- [4] JULIO S. An investigation of the wake of a circular cylin-

【参考文献】

- [1] 国防科工委科技与质量司组织编写. 时间频率计量[M]. 北京:原子能出版社,2002:46-56.
- [2] 钟绍俊,许素安,林德辉. 基于 LabVIEW 的分布式虚拟测试系统的设计与实现[J]. *中国计量学院学报*, 2004, 15(2): 117-119.
- [3] 周熊,叶平. LabVIEW 中利用 LabSQL 对数据库访问的实现[J]. *理论与方法*, 2007, 26(7):15-17.
- [4] 秘晓元,张彦斌,薛德庆,等. LabVIEW 中利用 LabSQL 访问数据库[J]. *微计算机信息*, 2004, 20(10):53-54.
- [5] 杨乐平,李海涛,赵勇,等. LabVIEW 高级程序设计[M]. 北京:清华大学出版社,2003:470-484.
- [6] 钱献芬,娄源萍,刘祥军,等. 利用 LabSQL 在 Labview 中访问数据库实例[J]. *科技咨询导报*, 2007, 27:16.
- [7] 熊宗接,毕鹏. 利用数据库在 LabVIEW 中实现自动测试[J]. *应用天地*, 2007, 26(8):56-58.

der using a video-based digital cross-correlation particle image velocimetry technique[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 1996, 12:221-233.

- [5] LEE S J, DAICHIN. Flow past a circular cylinder over a free surface; Interaction between the near wake and the free surface deformation[J]. *Journal of Fluids and Structure*, 2004, 19:1049-1059.
- [6] 张玮,王元. 圆柱绕流涡系演变的 DPIV 测试[J]. *空气动力学学报*, 2002, 15(4):381-387.
- [7] 刘宇,苏中地. 不同雷诺数下方柱绕流的数值模拟[J]. *中国计量学院学报*, 2006, 17(1):40-43.
- [8] PRECE S J, SUMNER D. Flow visualization around a circular cylinder near to a plane wall[J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2002, 16(2):175-190.
- [9] SLAOUTI A, GERRARD J. An experimental investigation of the end effects on the wake of a circular cylinder towed through water at low Reynolds numbers[J]. *Journal of Fluid*, 1981, 112:297-314.
- [10] ZDRAVKOVICH M M. *Flow around circular cylinders* [M]. Oxford: Oxford University Press, 1997:4-5
- [11] 谢明亮,林建忠. 边界层流场时空模式动力稳定性的数值计算及相互转换[J]. *中国计量学院学报*, 2007, 18(2):89-95.
- [12] 周杏鹏,仇国富. *现代检测技术* [M]. 北京:高等教育出版社,2006:268-270.