

投弃式海流剖面仪探头流场 TRPIV 测量

陈文义¹, 张曼曼¹, 刘宁², 田海平³

1. 河北工业大学过程装备与控制工程系, 河北工业大学工程流动与过程强化研究中心, 河北工业大学工程 CFD 计算技术研究所, 天津 300130
2. 国家海洋技术中心, 天津 300112
3. 天津大学机械工程学院力学系, 天津 300072

摘要 投弃式海流剖面仪 (eXpendable Current Profiler, XCP) 探头是最新型的投弃式海洋环境剖面测量探头, 在海洋调查、科学研究以及军事上有着重要应用。XCP 探头在海水中的姿态直接影响海流测量精度, 因此试验研究探头水下姿态对投弃式海流测量技术发展有重要意义。本文通过搭建试验装置, 应用高时间分辨率 PIV (Time Resolution Particle Image Velocimetry, TRPIV) 技术在室内低速循环水槽测量了 XCP 探头水平截面的二维瞬时流场和平均流场。分析了不同旋转速度比及雷诺数对流场的影响, 进而根据马格努斯效应分析了 XCP 探头受到的侧向力。试验结果表明, 探头受到的侧向力与旋转速度呈正比关系, 并且随雷诺数的增加探头受到的侧向力也增加了。据分析结果可知, 实际工作中探头穿越不同的海流层下落时受到变化的侧向力作用, 并导致其在水中以倾斜状态下落。试验结果可为 XCP 探头在下落过程中倾斜情况的估计提供参考和依据。

关键词 XCP 探头; PIV; 流场; 测量; 马格努斯效应

中图分类号 P716

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.23.007

Time Resolution Particle Image Velocimetry Measurement of the Flow Field of Using XCP Probe

CHEN Wenyi¹, ZHANG Manman¹, LIU Ning², TIAN Haiping³

1. Department of Process Equipment and Control Engineering, Research Center of Engineering Fluid and Process Enhancement, Institute of Engineering CFD Computing Technology, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China
2. National Ocean Technology Center, Tianjin 300112, China
3. Department of Mechanics, Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract The eXpendable Current Profiler (XCP) probe is the latest jettison marine probe, which has an important strategic significance in the ocean exploration, scientific research, and military. The attitude of the XCP probe in the seawater directly affects the precision of current measurement. The experimental research on the underwater attitude of the probe is important to the development of expendable current measurement technology. The two-dimensional instantaneous and time-averaged flow fields for the horizontal section of XCP probe are measured using Time Resolution Particle Image Velocimetry (TRPIV) technology, through test device built in the interior experimental channel. The influence of rotating speed rate and Reynolds number on the flow field is analyzed, and the side force is obtained according to Magnus effect. The study results show that the side force is proportional to the rotating speed rate, and increases as the Reynolds number increasing. Based on the analysis, when the probe is in the state of whereabouts, the side forces change. Therefore, the probe is actually in the declining state. The results could provide the reference and basis for estimating the declination solution of the probe.

Keywords XCP probe; PIV; flow field; measurement; Magnus effect

收稿日期: 2012-03-06; 修回日期: 2012-05-30

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (863 计划) 项目 (C2006AA09A304); 河北省科学基金项目 (D2009000035)

作者简介: 陈文义, 教授 (中国科协所属全国学会个人会员登记号: S030000113S), 研究方向为工程中的流体力学、过程强化, 电子信箱: cwy63@126.com

0 引言

投弃式海流剖面仪(eXpendable Current Profiler, XCP)是一种可快速获取海洋环境剖面参数的新型仪器,可以直接服务于海洋调查、海洋环境预报、海洋环境监测和海洋军事。XCP 探头工作原理^[1]为:其在水中自由释放后旋转下沉,由探头上安装的传感器获得某一深度海流和温度信息;信息经处理器处理,通过信号传输线传送,由水面接收机接收。探头采用流线型主体和旋转尾翼设计,旋转尾翼保证探头以不同旋转转速下落。整个探头分为头部、圆柱筒身、中间过水管和尾部4部分,探头外形如图1所示。



图1 XCP 探头外形示意

Fig. 1 Configuration of XCP probe

20世纪30年代国外已开始致力于研究投弃式水文剖面探测仪,并开发了多种型号的剖面测量仪。20世纪70年代国内开始研究船用投弃式海水剖面测量技术,80年代中期国家海洋技术中心开展了机载投弃式表温浮标和温深浮标的研制,90年代完成了机载投弃式温盐深浮标的原理样机研制。21世纪初,开展了机载投弃式温盐深剖面仪探头的研制,在探头设计、传输导线、数据采集等方面做了大量工作^[2],开发了一批试验样机,并多次进行海上试验,获得了完整的试验数据,找出了样机存在的技术问题,为今后各类探头的研究提供了依据。从2005年起,国家海洋中心开展了XCP探头的研究,刘宁等^[3]对XCP探头的测量原理进行了研究,为XCP探头的深入研究提供了理论依据。陈文义等^[4]对XCP探头周围流场进行了数值模拟研究,重点分析了XCP探头头部和尾翼流场流动情况,为同类探头的优化设计提供了参考依据。但该数值计算过程仅考虑理想状况下的运动情况,因此进一步试验研究XCP探头周围流场具有重要的意义。

本文主要考虑了在水平流场冲刷情况下的旋转探头流场,即探头水平截面的二维流场。探头旋转会产生马格努斯效应,即探头某一边的流动分离减弱,旋涡释放受到抑制,而另一边却得到加强和发展,从而使整个流动在垂直来流方向上不对称,此时探头受到一个升力^[5],其原理如图2。影响流动的两个重要参数是雷诺数 $Re = \rho U_{\infty} D / \mu$ (其中 U_{∞} 为来流速度,

D 为探头直径, μ 为流体动力黏性系数, ρ 为流体密度)和旋转速度比 $\alpha = \omega r / U_{\infty}$ (其中 ω 为探头旋转角速度, r 为探头半径)。

海流信号通过XCP探头内部两侧平行放置的电极采集,如果探头垂直姿态发生偏移会造成两个电极采集的海流信号不同步,导致失真。而探头在实际工作中不可避免会发生倾斜情况,尤其在其穿越水平流速不同的海流层时,倾斜更加明显。因此,笔者采用TRPIV技术测量探头水平截面的流场,分析不同旋转速度比及雷诺数对流场的影响,进而分析探头的受力,可以为XCP探头倾斜情况的估计提供参考。

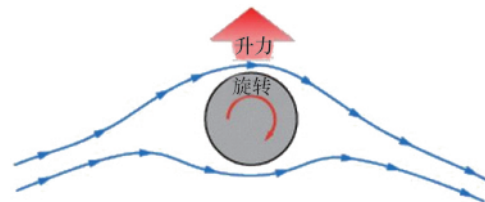


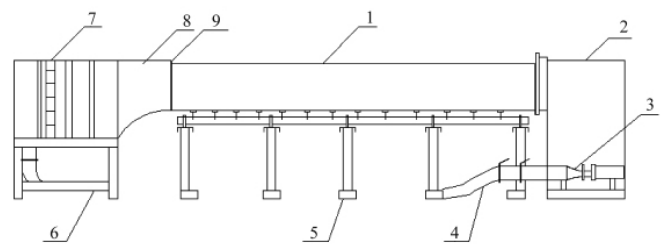
图2 探头马格努斯效应原理

Fig. 2 Magnus effect of XCP probe

1 实验设备及方法

1.1 低速循环水槽

低速循环水槽包括水槽主体、槽体支架、储水箱、潜水泵、回流管道等部分,如图3所示。水槽主体由有机玻璃制成,包括稳定段、收缩段、试验段。试验段全长6000mm,高350mm,宽250mm,稳定段中有一层蜂窝器和三层阻尼网用于整流,以保证自由来流均匀、稳定,自由来流背景湍流度 < 0.2%,不均匀度 < 0.25%,不稳定性 < 0.2%。



1—试验段;2—储水箱;3—潜水泵;4—扩散段;5,6—槽体支架;
7—栅网;8—收缩段;9—插板

图3 低速回流式水槽示意

Fig. 3 Scheme of low-speed circuit water channel

1.2 TRPIV

高时间分辨率TRPIV系统如图4所示,包括:(1)光源系统:Nd:YAG双脉冲激光器并配合激光控制器、时间同步器。激光器主要作用是将出射光束通过柱透镜形成片光;激光控制器控制激光器的工作模式(连续或者脉冲)及调节激光的强度;时间同步器用来控制激光器、CCD(Charge Coupled Device)和图像采集卡,使它们在严格同步的信号基础上工作,保证各部分协调。(2)图像采集系统:由Kodak's KAI-

0340 Interline transfer CCD 图像传感器、电子快门组成的高敏捷性相机, 拍摄高速、高质量图像, 其镜头型号为 PX-VGA120-L, 分辨率 640pixel×480pixel、最高拍摄速度 210fps; 图像采集卡将捕捉到的一系列图像数据实时地传输到计算机的通道。(3) 分析软件: 采用北京立方天地的粒子图像分析系统软件 MicroVecV 3.2.1, 对前后两帧粒子图像进行互相关计算, 得到流场一个定量切面的速度分布^[9]。该软件利用非结构网格差值技术和边界插值技术对不同区域的 PIV (Particle Image Velocimetry) 结果的相邻数据进行拟合处理, 进而得到拼合结果。

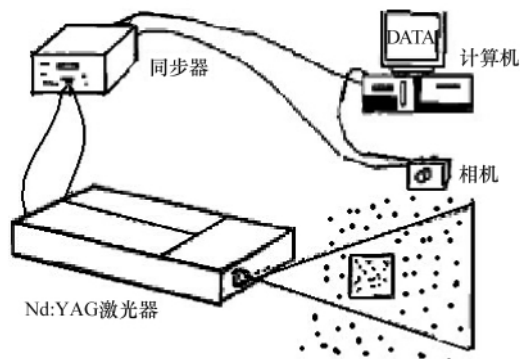


图 4 TRPIV 系统示意
Fig. 4 TRPIV measurement system

1.3 示踪粒子

试验采用无毒、无腐蚀、清洁、性质稳定的聚苯乙烯微球作为示踪粒子, 平均粒径为 15 μm , 粒子密度为 1.05g/cm³, 接近水的密度, 试验结果表明其跟随性满足要求。

1.4 试验模型及方法

试验模型如图 5 所示, 为直径 51mm 的圆柱, 用尼龙棒加工而成, 模型表面拍摄区域涂黑亚光漆, 以防反光, 影响测量效果。直流电动机控制探头模型的旋转, 调速器调节转速。整体试验模型依靠有机玻璃板支架做横梁支撑, 支架一端固定在丝杠上, 可调节探头模型处于水槽中的深度。丝杠位于滑轨上, 通过滑轨可调节探头沿流向移动。探头模型垂直于来流方向, 测试面选择在探头长度方向距水槽底面 180mm 截面处, 测量二维流场。

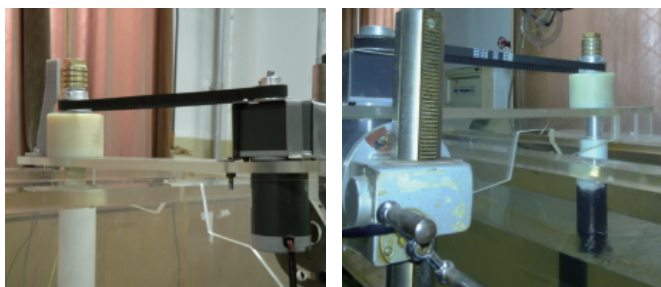


图 5 试验模型
Fig. 5 Test model

试验模型位于水槽试验段中部, 采用 TRPIV 系统对探头周围流场进行测量, 试验布局如图 6 所示。当水槽中流体静止时, 水槽液位高 250mm; 流体以不同流速流动时, 液位会有一些增高。激光片光平面和水槽平面平行, 片光位于距水槽底面 180mm 处。CCD 相机镜头与片光保持平行, 沿流向分 8 个不同位置分别对流场粒子图像进行记录, 第一个位置与所测截面圆柱前端相切, 然后通过滑轨将探头模型移动 45mm 到下一个位置测量。每个位置所记录的粒子图像的视野范围为 73mm×55mm。

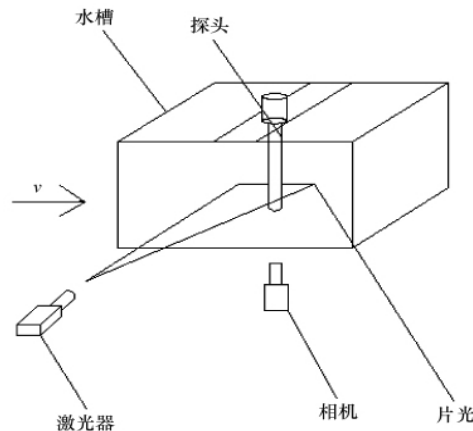


图 6 试验布局
Fig. 6 Test layout

由于测量范围的局限性, 故分左右两部分分别测量, 通过软件拼合功能拼合。对每个位置进行测量时, 采集 1000 对图像, 使用 MicroVec V3.2.1 软件进行图像平均运算得到平均流场, 然后利用 Tecplot 软件绘制平均速度云图、流线图及涡量。图 7 是两张原始的瞬态粒子图像, 图中粒子分布均匀, 图像清晰, 能够正确计算出流场速度矢量。

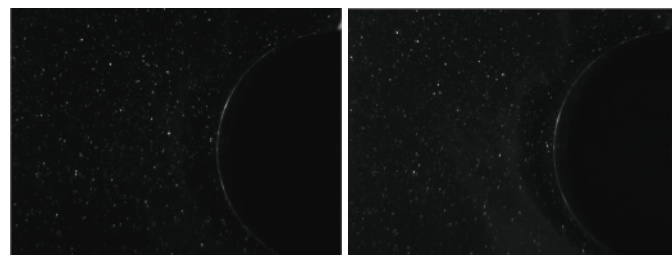


图 7 原始粒子图像
Fig. 7 Original particle images

1.5 PIV 试验参数

1.5.1 流速及转速的选择

通过水槽的速度阀门调节, 得到五个不同的流速, 分别为 0.14、0.19、0.27、0.30、0.34m/s, 相应的跨帧时间分别为 4、3、2.3、1.8、1.6ms。通过调速器调节探头转速, 分别选择 5、7.5、10、12.5r/s。

1.5.2 查询窗口大小

图像数据处理时均采用查询窗口大小为 32pixel×32pixel,重叠率为 50%,得到速度矢量为 79 个×203 个。

1.5.3 图像采集系统

图像采集系统采用 PIV 模式,激光频率为 50Hz,曝光时间为 1ms。

2 结果与分析

2.1 时间平均下 XCP 探头流场显示结果

如图 8 所示,XCP 探头静止时,均匀来流经过探头后,左右流场基本对称,在探头后发生分离形成尾部涡流区,并向下游发展。

由图 9 知,在同一雷诺数,不同转速比情况下,XCP 探头某一截面的周围流场趋势基本一致。探头逆时针旋转,带动周围流体旋转,使得探头一侧的流体速度增加,另一侧流体速度减小。探头尾流的旋涡结构沿探头旋转方向发生偏移。由于黏性的作用,流体在探头周围发生了分离。而当探头静止时,分离发生在迎风面,在探头截面后部形成回流区。在图 8 中,回流区速度较低,根据伯努利定律,此处压力较大,而左右两侧速度对称,故只有探头截面上下存在压力作用。当探

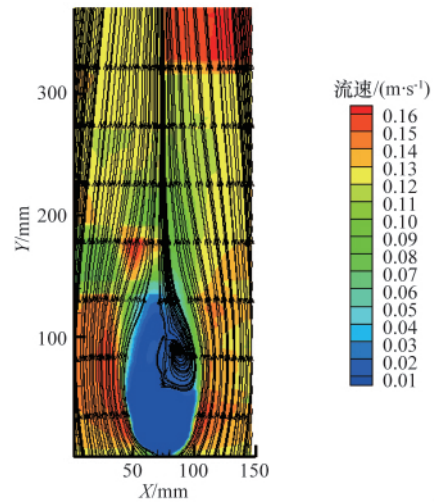


图 8 XCP 探头静止周围流场 (Re=3960)

Fig. 8 Flow field around XCP probe with Re=3960

头旋转时,如图 9 所示,分离发生在探头截面左下方,此处出现回流区,流体对探头有侧向力作用,随旋转速度比 α 增加,与回流区对应的区域流线越来越密集,速度增大压力相应减小,故侧向力越来越大。

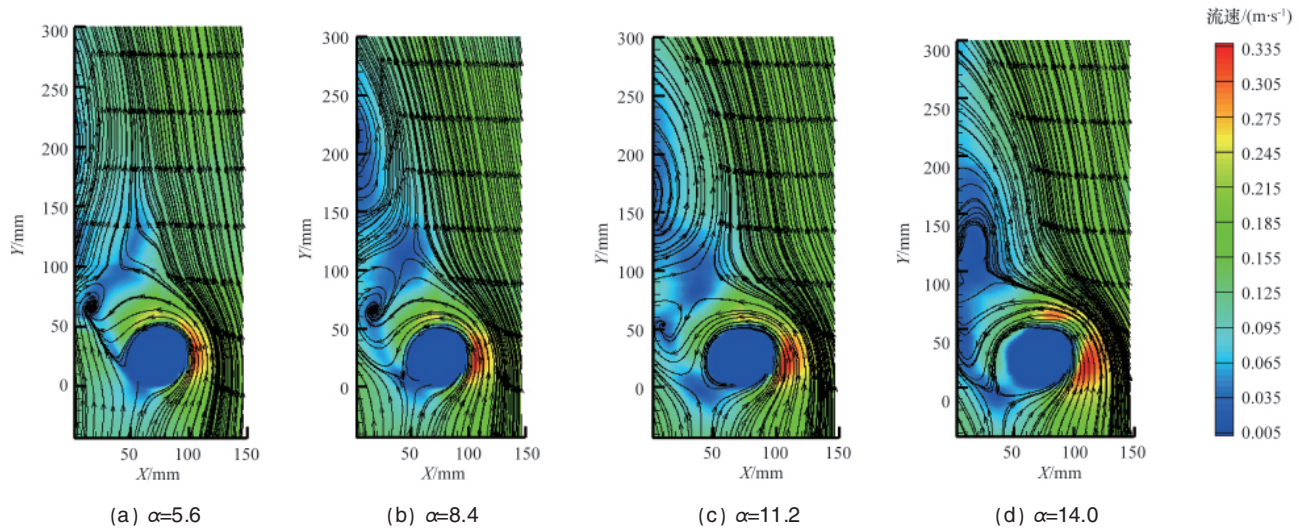


图 9 不同转速比下 XCP 探头周围流场 (Re=3960)

Fig. 9 Flow field around XCP probe with different rotating speed rates (Re=3960)

2.2 不同雷诺数对旋转 XCP 探头流场影响

探头转速为 5r/s 时在不同雷诺数下水平截面平均流场的涡量图由图 10 给出,涡量集中分布于探头周围,回流区涡量为负值,与回流区对应的探头另一侧涡量为正值,随雷诺数的增大,涡量值越来越大。而远离探头位置处的涡量值相对于探头两侧较小,说明在探头周围流体对其的作用强度较大。在水平流速不同的海流层,流体的雷诺数是不同的,故流

体对探头的作用力是不同的。

2.3 XCP 探头侧向力计算

XCP 探头在旋转中下落,获得一个比直接下落更易识别的交流信号。XCP 探头在不同海流层海水冲刷下旋转下落,依据马格努斯效应,在任一海流层,探头将受到侧向力的作用,由图 11 可以看出。据圆柱的有环量绕流问题分析得到理想侧向力公式^[7]:

$$R_y = \rho U_\infty \Gamma$$

$$\Gamma = \oint \nu ds = \nu l = R\omega \cdot 2\pi R = 2\pi R^2\omega$$

其中, R_y 为侧向力, ρ 为流体密度, U_∞ 为来流速度, Γ 为速度环

量, ν 为探头切向速度, l 为探头测量截面周长, R 为探头半径, ω 为探头转速。

由图 11 可知, Re 越大, 侧向力越大; 随着探头穿越不同海流层下落, 海水流速减小, 侧向力也相应减小, 探头下落过

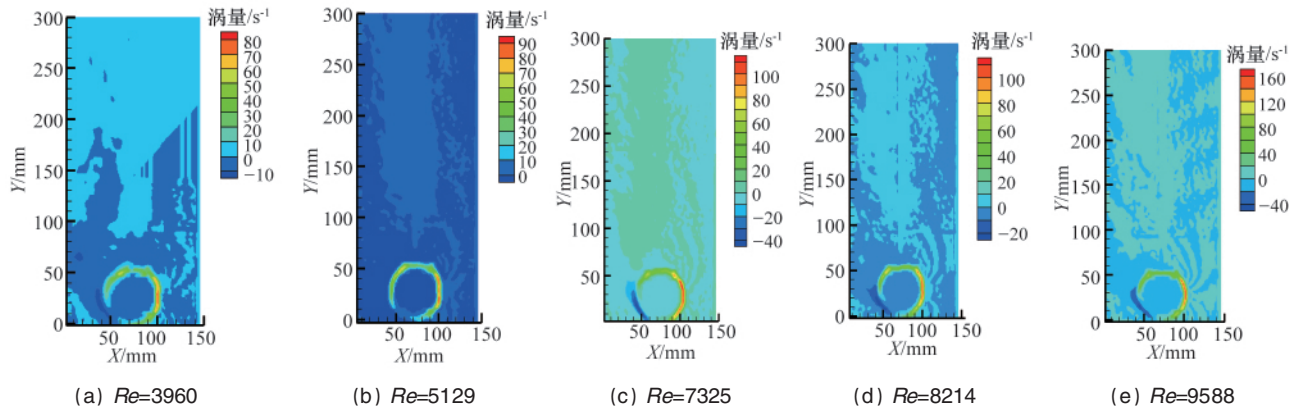


图 10 不同雷诺数下 XCP 探头周围涡量分布

Fig. 10 Vorticity distribution around XCP probe with different Reynolds numbers

程中受到的侧向力为变量, 因此其下落中会产生摆动。但因为旋转刚体的定轴性和旋转中发生的陀螺效应, 探头对自身姿态有一定的修正作用。然而随着探头转速的增加, 探头所受到的侧向力也显著增加了; 同时因为转速加快, 探头下落过程中与流体的摩擦增大, 垂直方向的阻力增大, 不利于探头的快速下落。因此, 探头转速的恰当选择对探头的优化设计有重要影响。

(2) 探头穿越水平流速不同的海流层下落时, 随着雷诺数 Re 的变化, 海流对探头产生不等的作用力。 Re 越大, 侧向力也越来越大。

(3) 在下落过程中探头受到侧向力作用, 导致其发生了倾斜, 对探头测量结果的影响不可忽略。

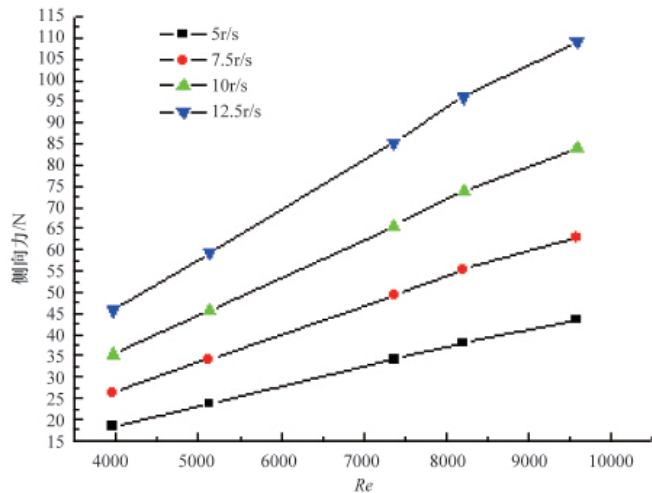


图 11 不同 Re 下侧向力与转速关系曲线

Fig. 11 Relationship curve between side force and rotating speed with different Reynolds numbers

3 结论

利用 TRPIV 技术研究 XCP 探头水平截面二维流场, 得出以下结论。

(1) 流体对探头的侧向力与旋转速度比 α 呈正比关系。

参考文献 (References)

- [1] 肖鸿, 刘长根, 陶建华. 抛弃式温盐探头阻力系数的数值模拟及其实验验证[J]. 海洋技术, 2006, 25(1): 35-37.
Xiao Hong, Liu Changgen, Tao Jianhua. *Journal of Ocean Technology*, 2006, 25(1): 35-37.
- [2] 井彦明, 谭世祥. 机载投弃式温盐深浮标中的三项关键技术研究[J]. 海洋技术, 2001, 20(4): 48-53.
Jing Yanming, Tan Shixiang. *Journal of Ocean Technology*, 2001, 20(4): 48-53.
- [3] 刘宁, 何鸿鲲. 投弃式海流剖面测量仪原理研究 [J]. 海洋技术, 2010, 29(1): 8-11.
Liu Ning, He Hongkun. *Journal of Ocean Technology*, 2010, 29(1): 8-11.
- [4] 陈文义, 张瑞, 刘宁, 等. 投弃式海流剖面仪探头流场数值模拟 [J]. 科技导报, 2010, 28(20): 62-65.
Chen Wenyi, Zhang Rui, Liu Ning, et al. *Science & Technology Review*, 2010, 28(20): 62-65.
- [5] 凌国平. 绕旋转圆柱流动涡流结构和临界状态特性 [J]. 力学学报, 1997, 29(1): 8-16.
Ling Guoping. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 1997, 29(1): 8-16.
- [6] 北京立方天地发展有限公司. 粒子图像分析系统使用手册[R]. 2010.
Beijing MicroVec Sci-Tech Development Co., Ltd. Particle image analysis system manuals[R]. 2010.
- [7] 吴望一. 流体力学[M]. 北京: 北京大学出版社, 1983.
Wu Wangyi. Fluid mechanics[M]. Beijing: Peking University Press, 1983.

(责任编辑 马骁骁)