

PIV 水下流场测试系统试验研究

胡海豹¹, 宋保维¹, 阮驰², 杜晓旭¹, 毛昭勇¹

(1 西北工业大学 航海学院, 西安 710072)

(2 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710119)

摘 要:基于粒子图像测速技术,设计研制了一套适用于水洞洞体内高速、封闭试验条件的流场测量与显示设备.该系统由光源、成像、图像处理与分析、控制和粒子投放等分系统组成,具有复杂环境下全流场的无接触、无扰动、高准确度测量和显示能力,流场测试误差小于 2%,可为水下航行器外形设计及其改进提供相关的实测数据.

关键词:粒子图像测速技术;流场;水洞;水下航行器

中图分类号:O335.3

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2007)10-1928-5

0 引言

粒子图像测速技术(Particle Image Velocimetry, PIV)是一门综合了激光技术、数字信号处理、图像图形处理、计算机技术、现代光学应用技术和微电子等的跨学科测速技术^[1-2].该技术可实现复杂环境下全流场的无接触、无扰动、高准确度测量和显示,特别适用于湍流等非定常复杂流场的测量,是研究湍流等复杂形态瞬态流动的有力手段.

在 PIV 技术的研究开发及商业应用方面,美国 TSI 公司、德国 ILA 公司、丹麦 Dan Tec 公司、英国爱丁堡大学和 Roll Royce 公司走在最前列^[2],并陆续推出了多型适用于不同流体介质的相关流场测试设备.国内从九十年代起才开始关注该项测试技术,相继有北京大学、清华大学、天津大学、大连理工大学及中国船舶科学研究中心等多家单位从事这方面的研究工作,并对 PIV 技术中的图像处理、数学处理等方面以及该技术在内燃机缸内流场测试、海洋运动检测等领域的应用开展了大量的研究工作.目前国内的研究者大多直接采用国外的 PIV 测试产品,不具备自行设计开发水下 PIV 流场测试设备的能力.鉴于此,自行设计开发 PIV 流场测试设备显得极为必要.

在水下航行器设计领域,准确获得壳体绕流流场至关重要,它可以为水下航行器的设计与改进提供重要参考依据.目前常用的方法主要有理论计算和试验测试两种,由于当前理论计算准确度难以保证,所以高准确度的流场测试试验仍是水下流场最准确可靠的获取手段.本文设计开发了一套适用于水洞有压密闭条件的 PIV 流场显示与分析系统.

该系统可完成洞体内航行器周围瞬时绕流流场动态分布的实时记录与分析,突破了空间单点测量技术的局限性,能在同一时刻记录下整个测量平面的相关信息,从而获得流动的瞬时平面速度场、脉动速度场、涡量场和雷诺应力分布等,具有数字化、高分辨率、大视场显示等突出优点.

1 系统原理及组成

PIV 技术通过在投入了示踪粒子的流体中进行连续两次激光片光照射(前后两次光照的时间差 Δt 为提前设定的可调量,可依据水速大小适当选择),同时用照相机记录下粒子的瞬时图像,再采用自相关或互相关算法对图像进行处理分析计算,最终得到流场横切面上二维速度场^[3].

图像处理时,首先在 t 时刻的图像中选定一块区域 A 作为研究对象,区域 A 称为匹配块.再在 $t + \Delta t$ 图像内选定一块更大的包含匹配块 A 的区域 B,区域 B 称为搜索域.在搜索域 B 内找到与匹配块 A 最匹配的块 A',A 到 A' 的距离即为示踪粒子的位移 Δs ,与时间相比就得到速度.图 1 为 PIV 技术的原理图.

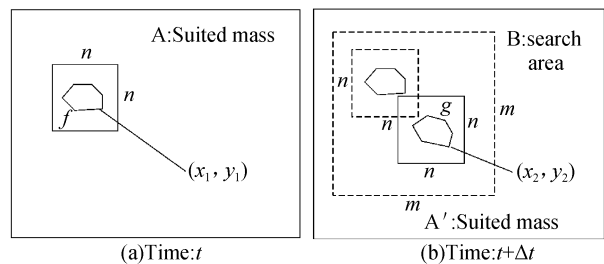


图 1 PIV 原理图

Fig. 1 Principle diagram of PIV

水洞 PIV 流场测试系统包括以下几部分(图 2 为系统布局图).

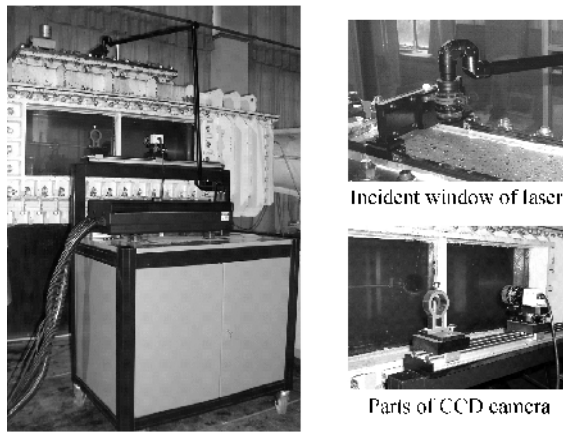


图 2 PIV 系统布局图

Fig. 2 Layout of PIV system

1.1 光源分系统

光源分系统由双脉冲 Nd:YAG 激光器^[4-6]及电源、光合束与倍频系统、导光臂与片光光学系统组成。激光器产生的激光脉冲间隔可根据被测流场的速度进行调整,激光经导光臂传递后,再经片光光学系统形成片状光幕,对所测量的流场截面进行均匀照明。

1.2 成像分系统

由具有双曝光功能的高分辨率 CCD 数码相机与控制软件、成像物镜、镜头倾斜成像调整转台、图像采集卡组、图像捕获卡、控制计算机及相应软件构成,以实现在激光照明期间对被照明流场截面的图像捕获与记录。

1.3 图像处理与分析分系统

图像后处理采用一款专业流场数据处理软件——PivView2C 软件,该软件具有强大的图像几何校正、图像预处理、流场计算分析及固定物体屏蔽等功能,可实现对粒子场图像的分析计算,并能以多种方式直观的显示或保存最终测量结果。另外, PivView2C 软件还提供与其它软件的接口,能够将计算流场结果直接输出到其它软件中,进行流场的进一步处理分析。

1.4 控制分系统

由多路同步脉冲发生器与相应的控制软件组成。根据不同流速的测量要求,对激光脉冲的产生和图像的捕获采集进行精确设定与控制,使整个系统协调工作,保证了高质量图像的准确捕获。

1.5 粒子投放分系统

该分系统包括示踪粒子^[7]、连接管路、水泵、控制开关。首先将粒子混入少量水中,然后采用潜泵强行将其注入水洞洞体内,粒子在洞体内水流的带动下即可自行混合均匀。该分系统对水洞洞体的改造也很小,能实现粒子在有压条件下的稳定投放,且粒子投入量易于控制,操作简便。

2 系统使用环境

该系统使用于高速水洞实验室(图 3 为水洞试验段照片),因此必须适应高速全封闭水洞的使用环境,满足室内、场地开阔、无暗室条件、有弱振动、无洁净防尘措施以及无法对水洞本体进行改造等工作条件。水洞具体相关参量为:1)窗口尺寸:1 200 mm×400 mm;2)水洞内柱面:Φ400 mm;3)水洞中心高:1 900 mm;4)观测窗材料:有机玻璃;5)观测窗厚度:40 mm;6)两侧观测窗距离:760 mm;7)水质状况:自来水。

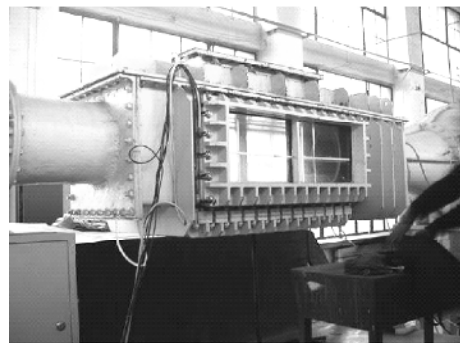


图 3 水洞试验段照片

Fig. 3 Photo of working part in water tunnel

3 系统工作过程

PIV 水下流场测试系统的具体工作流程为:首先在被测流场中投放散射性能强、跟随性好的示踪粒子,使之在整个流场区域中达到一定的浓度要求。启动双脉冲激光器,激光经光路安排,共同通过一倍频晶体,形成穿透性良好且脉冲间隔可调的激光脉冲,再通过导光臂出射端的光学系统(由柱面镜和球面镜共同组成),变为片状光源来照亮流场中的一个很薄的顺流向流场层片。与片状光源相垂直方向或接近正交位置布置的 CCD 数码相机在脉冲激光作用期间,快速捕获流场层片中的流动粒子的图像并送入图像采集卡,再把图像数字化送入计算机。利用自相关或互相关原理进行图像处理,提取出被测流场的速度矢量分布,并将与其相关的各种重要参量以数据或图形等可视化的形式显示出来。

该 PIV 水下流场测试系统有以下三种工作模式:

1)实时成像: CCD 数码相机以最大 30 fps 的速度将图像传送到采集卡,PIV 控制软件对采集卡采集到的图像进行实时显示。该模式可应用于对片光源的聚焦、尺寸标定等需要实时监视的场合。

2)单曝光成像:在软件或硬件进行触发下,以单曝光模式进行工作,主要应用于水洞处于低速情况下的等时间间隔单帧序列图像采集。

3)双曝光成像:一个触发脉冲进行两次曝光,曝

光时间及间隔可调,通过同步脉冲控制电路保证曝光成像与激光器的双脉冲同步.双曝光成像是本PIV系统获取流场粒子图像对的主要工作模式.

4 验证试验及结论分析

为能准确检验该PIV流场显示与分析系统对水洞洞体特殊测试环境的适应性和对流场的测试准确度,本文开展了一系列流场测试试验.试验结果表明,不同来流速度下流场测量误差基本一致,因此这里只给出两组具有代表性的测试结果.

表1为不同来流速度(来流速度由水洞自身测速系统测量)下平流场速度测试结果.图4为6 m/s 水速下回转体模型前端平流场速度测试结果.图5为6 m/s 水速下标准球体模型表面流场测试结果(左侧由于支杆反光的干扰,未能全部显示).图4和图5中(a)为流场速度矢量图,(b)为对应的流场速度流线图.

表1 平流场速度测试结果

来流速度	6 m/s	5 m/s	4 m/s
项目			
$\Delta t=100 \mu s$	5.96 m/s	4.98 m/s	3.98 m/s
$\Delta t=150 \mu s$	5.85 m/s	4.94 m/s	3.94 m/s
$\Delta t=200 \mu s$	5.92 m/s	4.93 m/s	3.92 m/s
$\Delta t=300 \mu s$	5.93 m/s	4.94 m/s	3.98 m/s
$\Delta t=400 \mu s$	5.87 m/s	4.95 m/s	3.94 m/s
均值	5.906 m/s	4.948 m/s	3.952 m/s
方差	0.040 m ² /s ²	0.017 m ² /s ²	0.0024 m ² /s ²
平均误差	1.5%	1.0%	1.2%

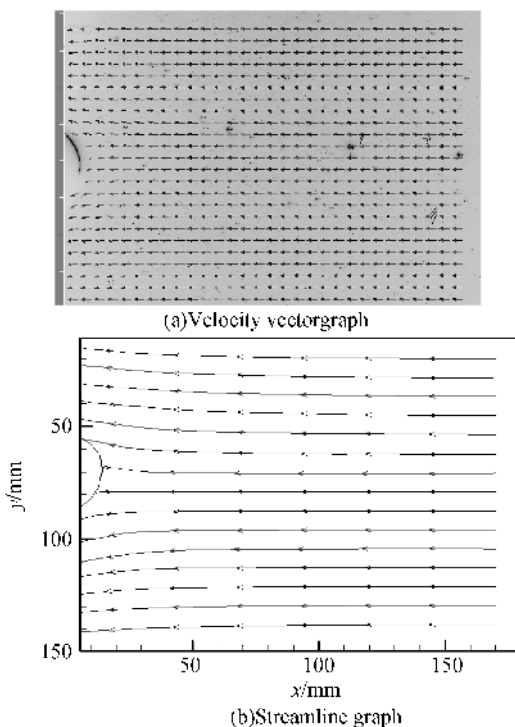


图4 水洞试验段平流场测量结果
Fig.4 Velocity result of working part in water tunnel

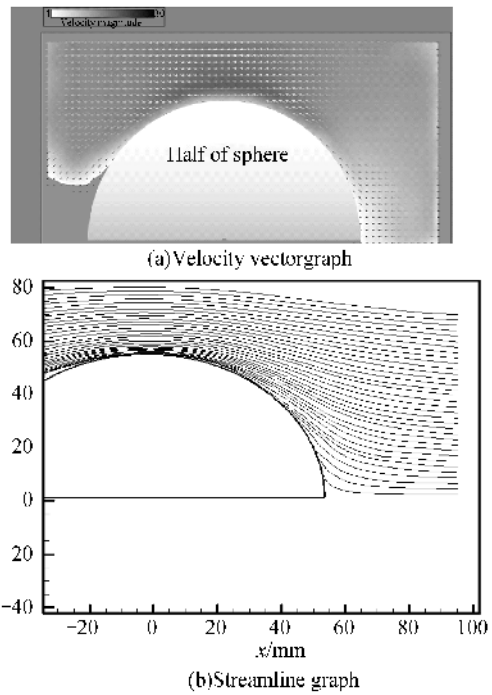


图5 球表面流场速度测量结果
Fig.5 Velocity result of sphere surface

由表1和图4的平流场测试结果可见,该测试系统对平流场的测试准确度很高,除了极少数局部点速度误差较大外,平流场整体平均速度误差小于2%.初步分析误差产生的原因在于:

1)水洞洞体内固体沉淀颗粒较多,且形状、大小不一,并被作为有效粒子计入有效数据.正是这种密度较大、跟随性差的杂质粒子,造成了个别测试点处误差较大.

2)由于目前进口示踪粒子价格昂贵,而水洞内储水量又太大(约40 t水,所需示踪粒子投放量很大),因此为降低费用,试验中采用了自行研制的直径100~220 μm 的微球作为流场显示的示踪粒子.该型粒子与直径为10~20 μm 的进口Magnitude示踪粒子相比,水流场跟随性要稍差些,这也给速度场测量带来了一定的误差.

图5的标准球模型绕流流场测试结果表明,该系统对标准球表面的复杂绕流流场具有较高的测量显示准确度,突破了目前其它空间单点测量技术的局限性,能够在同一时刻完成瞬时绕流流场内速度场动态分布的实时记录.

上述试验结果表明,PIV水下流场测试系统具有测速快、准确度高、信息量大及不干扰被测流场等优点,能够显示非稳定流动的瞬时“冻结”流场,给出常规技术难以得到的非稳场量化参量及其随时间的变化特征.

此外,测试试验中还发现该系统对靠近模型的近壁区流场区域测试能力不足.经初步分析,确定

其产生原因及解决措施为:1)由于模型连接支杆刚度较差,测量过程中球体模型始终在上下快速颤动,导致不同帧图像间模型位置存在偏差,使得模型近壁区的流场无法准确测量.为减小模型振动,实验室考虑下一步将对模型连接结构进行重新设计,提高其抗振能力;2)模型近壁区流动速度较低、且速度变化波动很大^[8],这就要求示踪粒子的跟踪能力要很强,而本试验中示踪粒子直径在 100~220 μm ,跟踪显示能力相对较差,这也影响了测试系统在模型近壁区的测试能力.为提高示踪粒子的跟随性,实验室目前正在探索研制直径小于 100 μm 的示踪粒子.

5 结论

测试分析表明,本 PIV 流场显示与分析系统能够在高速、封闭的水洞洞体内实现流场测量,观测范围达 $200 \times 200 \text{ mm}^2$,并可对水洞中的实验模型在有效测量区域进行流场的测量与分析,系统整体测试准确度较高(流场速度测量误差小于 2%),能够完成对高速水洞洞体中观测范围内各种水下航行器模型绕流场的测量与分析,进而为水下航行器外形设计及其改进提供实测参考数据.

本文的研究同时也反映出 PIV 测速技术在全流场的无接触、无扰动、高准确度显示和测量领域具有巨大的技术优势,应用范围广泛.同时,国内在该技术领域还存在很多影响测试准确度的工程难题,急需开展更深入的研究.

参考文献

- [1] TANG Jing-yuan. Laser measurement technology and applications in industry[D]. Xi'an:Xi'an Jiaotong University,2001:10-34.
唐经源.激光测量技术及其工业应用研究[D].西安:西安交通大学,2001:10-34.
- [2] SHANG Yan-feng. Research on PIV calculating method and application of digital image processing in PIV[D]. Zhengzhou: North-China University of Water Conservancy and Electric Power,2003:7-52.
尚岩峰. PIV 计算方法研究及图像处理在其中的应用[D]. 郑州:华北水利水电学院,2003:7-52.
- [3] YUE Kai-duan, CAO Jian-an, ZHOU Xiang, *et al.* Research of high accuracy laser inclination angle measurement[J]. *Acta Photonica Sinica*,2004,**33**(9):1108-1110
乐开端,曹建安,周翔,等.高准确度激光倾角测量技术研究[J].光子学报,2004,**33**(9):1108-1110.
- [4] BU Yi-kun, ZHENG Quan, XUE Qing-hua, *et al.* Design and manufacture of optical thin films for 500.8 nm Nd:YAG laser[J]. *Acta Photonica Sinica*,2006,**35**(1):79-83.
卜铁坤,郑权,薛庆华,等.500.8 nm Nd:YAG 青光激光器光学薄膜的设计与制备[J].光子学报,2006,**35**(1):79-83.
- [5] FARLEY R W, DAO P D. Development of an intracavity-summed multiple-wavelength Nd:YAG laser for a rugged solid-state sodium lidar system[J]. *Appl Opt*,1995,**34**(21):4269-4273.
- [6] YANG Yong-ming, ZHOU Rong, GUO Zhen, *et al.* End deformation's experiment and its computer mimic in LD end pumped Nd:YAG crystal[J]. *Acta Photonica Sinica*,2005,**34**(9):1297-1300.
杨永明,周荣,过振,等.LD 端泵下 Nd:YAG 端面形变热效应研究[J].光子学报,2005,**34**(9):1297-1300.
- [7] DAI Guang-qing, WU Yan-hua, LIU Qi-hong. Application of emulsifying air bubbles as tracers in PIV[J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*,2000,**32**(1):1-3.
戴光清,吴燕华,刘齐宏.乳化空气泡示踪粒子在 PIV 测速中的应用[J].四川大学学报(工程科学版),2000,**32**(1):1-3.
- [8] ZHANG Zi-xiong, DONG Zeng-nan. Viscous fluid mechanics [M]. Beijing:Tsinghua University Press,1998:351-387.
张梓雄,董曾南.粘性流体力学[M].北京:清华大学出版社,1998:351-387.

Experimental Research on Particle Image Velocimetry Measure System in Fluid Field

HU Hai-bao¹, SONG Bao-wei¹, RUAN Chi², DU Xiao-xu¹, MAO Zhao-yong¹

(1 *College of Marine of Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China*)

(2 *Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, CAS, Xi'an 710119, China*)

Received date: 2006-04-11

Abstract: A particle image velocimetry (PIV) measure system in fluid field is proposed, which is based on the PIV technology. The PIV measure system in fluid field is suitable for the high-speed, hermetical water tunnel experimentations. It is composed of light source subsystem, imaging subsystem, image processing and analyzing subsystem, control subsystem and particles sending subsystem etc., and it has high measure precision and high display capability in the entirely complex flow field without touching and disturbing. The measure error is less than 2%.

Key words: Particle image velocimetry(PIV); Flow field; Water tunnel; Automatic underwater vehicle



HU Hai-bao was born in 1979, and got Master's degree from Northwestern Polytechnical University in 2004. Now he is working for his Ph. D. degree in weapon science and technology in Northwestern Polytechnical University. He is engaged in the design and manufacture of AUV, mainly in drag reduction technology research.