

文章编号: 1000-8055(2010)09-2083-08

PIV, LDV 在螺旋桨尾流测试中的比对应用

李广年¹, 张 军², 陆林章², 张国平²

(1. 浙江海洋学院 船舶与建筑工程学院, 舟山 316000;

2. 中国船舶重工集团公司 中国船舶科学研究中心, 无锡 214082)

摘 要: 为验证粒子图像测速仪(PIV)技术在螺旋桨尾流场测试应用中的精度, 在空泡水筒中, 针对同一螺旋桨, 在同一工况, 同一时段, 对螺旋桨尾流场开展了 PIV 和激光多普勒测速仪(LDV)比对测试研究. 试验结果表明: 两种测试技术在流场宏观量显示上得到了比较一致的结果, PIV 技术同样可以捕捉到沿周向仅有 8 的速度突跳, 只是突跳值较 LDV 测试值小. PIV 数据均值与 LDV 有 2%~3% 的偏差, 进一步分析表明: 提高 PIV 测试系统的定位精度可以缩小这种偏差.

关 键 词: 空泡水筒; 流动测试; 粒子图像测速仪 (PIV); 激光多普勒测速仪 (LDV); 螺旋桨
中图分类号: U661.3 **文献标识码:** A

Comparative study of PIV and LDV measurements in the wake of a propeller

LI Guang nian¹, ZHANG Jun², LU Lin zhang², ZHANG Guo ping²

(1. School of Naval Architecture and Civil Engineering,
Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316000, China;

2. China Ship Scientific Research Center,
China Shipbuilding Industry Corporation, Wuxi 214082, China)

Abstract: In order to validate the accuracy of PIV (particle image velocimetry), the paper carried out the experiment to measure the same propeller wake by using PIV and LDV (laser Doppler velocimeter) technique in the cavitation tunnel during the same period and working condition. The results indicate the PIV data get good agreement with the LDV data in the flow macrostructure. The PIV can display the velocity peak which is only span 8° in peripheral direction, but the velocity peak is smaller than LDV data. As a whole, the difference of PIV data and LDV data is about 2%~3%, further analyses show that the improvement of the positioning accuracy of PIV system can reduce the error.

Key words: cavitation tunnel; flow measurement; particle image velocimetry; laser Doppler velocimeter; propeller

流动速度是描述流动现象的主要参数, 研究流场, 首先就是要研究速度场. 因此流速测量是研究流动现象必不可少的一个重要环节. 传统的毕托管和旋转流速仪均不能提供流动的紊动信息, 这就制约了流体力学湍流研究的进一步发展. 在

20 世纪 20 年代以后, 热线/热膜技术 HWFA (hot wire/film anemometry) 的诞生, 为湍流运动的统计积累了大量的试验数据, 湍流统计理论由此得到很大发展^[1].

鉴于以往的测速技术都有部分器件直接介入

收稿日期: 2009-07-20; 修订日期: 2010-01-22

基金项目: 浙江省科技攻关重大课题(2008C13070)

作者简介: 李广年(1981-), 男, 山东东平人, 讲师, 硕士, 主要从事船舶水动力学研究.

流体中,或多或少地对所测流场产生干扰,因此,众多研究者开始探寻能够不干扰流场的非接触式测速技术,试图在不引入误差的情况下观察流体的真实运动.伴随着这方面的探索,ADV (acoustic Doppler velocimeter), LDV (laser Doppler velocimeter) 的诞生,意味着声、光技术逐渐进入流动测速领域,并迅速发展为主导方向. LDV 具有极好的时间分辨率和空间分辨率,测量精度超过了其他任何方法,因此,它的研究和应用得到迅速发展,如今已成为流速测量的标准技术.

上述几种方法的共同缺点是只能完成流场的单点(或数点)测量,虽然可实现瞬时测量,但对于复杂非定常流场来说,全流场的瞬时测量结果更有意义.因此,氢气泡技术、激光诱导荧光技术(laser induced fluorescence, LIF)、粒子图像测速技术应运而生.随着现代计算机、芯片、图像处理和 CCD (charge coupled device) 技术的发展,PIV (particle image velocimetry) 技术有了很大进展,特别是二维测量系统,已广泛应用到流体测试中,带来了巨大的社会和经济效益,三维 PIV 测量系统也已经开始在科学研究中体现出优势.

综上,流体力学测试手段已经经历了几代变革,其发展方向是,从接触式向非接触式,从静态(稳态、定常)到动态(瞬态、非定常),从单点到多点(平面、空间),从二维到三维(时空四维连续采集),朝着所谓理想的或近乎理想的流体力学试验手段迈进.各种测量技术在不同的领域和应用环境中各有所长,互为补充.目前常用的流动测试技术的比较见表 1^[2].

表 1 常用的流动测试技术比较

Table 1 Comparison of fluid measurement technologies				
测试技术	测量方式	速度范围/ (mm/ s)	测量体	跟踪 粒子
毕托管	接触式	> 80	单点	不需要
螺旋流速仪	接触式	> 25	单点	不需要
氢气泡技术	非接触式	< 300	全场	需要
HWFA	接触式	< 3 × 10 ⁵	单点	不需要
LDV	非接触式	0. 01~ 超声速	单点	需要
ADV	非接触式	0. 1~ 2 500	单点	需要
LIF	非接触式	标定范围	全场	需要
PIV	非接触式	> 0. 1	全场	需要

空泡水筒是一种重要的水动力试验设施,利

用空泡水筒可以开展螺旋桨性能试验以及平板湍流边界层速度分布测量、二维翼型表面压强分布测量、有限长翼型尾涡显示试验、回转体和翼型空泡流显示与测量、平板湍流边界层噪声测量、翼型空泡噪声试验等.测试技术对以上诸多试验的开展尤为重要.现代流体测试技术,特别是 LDV, PIV 的发展,使得螺旋桨尾流这种具有高频脉动特征的流场精细测量变为现实.最早将激光应用到螺旋桨流场测量的是美国麻省理工学院(MIT) 的 Min^[3], 揭开了 LDV 探索螺旋桨流场微观结构的序幕.此后, Jessup^[4], Stella^[5], 董世汤^[6] 都曾利用 LDV 测试技术对螺旋桨尾流场进行过详细的测量.所有这些测量结果都为螺旋桨尾流发展、叶梢流动结构的试验研究作出了很大的贡献.1998 年, Felice^[7] 首开 PIV 技术测试螺旋桨尾流场的先河,随后, Cotroni^[8], Calcagno^[9], Lee^[10] 和 Paik^[11] 先后成功开展了螺旋桨尾流场的 PIV 测试研究.国内 PIV 技术应用于螺旋桨流场测试仅见于张军^[12] 在减压拖曳水池进行的导管螺旋桨内流场的测量,但是由于当时设备与试验条件限制,试验并没有精细地捕捉到螺旋桨流场的细节结构.此外,国内鲜见有关螺旋桨流场的 PIV 测量与分析的资料.

本文选定 DTMB-P4119 标准螺旋桨为研究对象,在同时段、同工况情况下于空泡水筒中开展 PIV, LDV 比对研究,旨在验证 2D PIV 的测试精度,探索研究提高 PIV 测试精度的方法措施.

1 试验设置

试验在中国船舶科学研究中心大型空泡水筒中进行,其试验段长 3. 2 m, 直径 800 mm, 试验流速 3~ 20 m/ s. 试验选取 DTMB-P4119 标准螺旋桨作为测试对象,该桨为右旋三叶桨,毂径比为 0. 2, 无侧斜、无纵倾,桨模半径 $R=125\text{ mm}$. 进速系数定义为 $J=U/nD$, U 为来流速度, n 为桨模转速, D 为桨模直径.试验在该桨的设计进速系数 $J=0.833$ 情况下进行,来流速度 $U=3.544\text{ m/ s}$, 螺旋桨转速 $n=17.07\text{ r/ min}$.

PIV 测试采用 BigSky-190 脉冲激光器(2 × 380 mJ@ 532 nm, 10 Hz, 本次试验频率为 5 Hz, 能量 100 mJ), 从水筒侧面观察窗口进行片光照明,片光展开位于轴线水平位置,厚度为 1. 5 mm, 两束激光发光间隔为 70 μs. 图像记录采用 TSI PowerView 4M (2048 pixel × 2048 pixel) 相机,从水筒底面观察窗口拍摄粒子图像,拍摄面积为

110 mm × 110 mm. 试验播撒的示踪粒子为松花粉, 直径约为 40 μm. 试验过程中由同步控制器接收轴编码器处理器发生的等相位信号, 延时后控制激光器与相机. PIV 图像分析采用 TSI 公司开发的 INSIGHT 3G 软件, 诊断窗口为 42 pixel × 42 pixel, 成像系数为 0.053, 合 2.2 mm × 2.2 mm, overlap 为 50%. 同一相位速度场数据由 100 次测量结果平均得到, 试验设备简图见图 1.

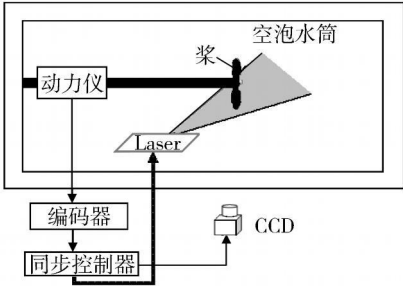


图 1 试验设备简图

Fig 1 Schematic diagram of experiment

以水流方向为 x 轴正方向, z 轴通过桨盘面中心竖直向上为正, y 轴以右手定则确定. 测试区域为 $y/R = 0.20 \sim 1.15$, $x/R = 0.02 \sim 0.90$. 运动坐标系以桨叶参考线为 0° , 静止坐标系以水平子午面为 0° , 以螺旋桨旋转方向为正方向(如图 2). 试验共测试 $240^\circ \sim 360^\circ$ 相位内螺旋桨尾流场轴向和径向速度场数据, 每隔 1° 测试一次. 假定 $0^\circ \sim 120^\circ$, $120^\circ \sim 240^\circ$ 相位下流场与 $240^\circ \sim 360^\circ$ 相位下流场相同. 同一测试区域片光不动, 桨叶转到设定相位即可采集. 横截面数据由各相位处同一横向位置提取合成得到, 示意图见图 3, 即完成式(1)的转化. u 为轴向速度, v 为径向速度.

$$\left. \begin{matrix} u(x, r) \\ v(x, r) \end{matrix} \right\} \Rightarrow \left. \begin{matrix} u(r, \theta) \\ v(r, \theta) \end{matrix} \right\} \quad \begin{matrix} \theta = 0^\circ, 1^\circ, 2^\circ, \dots, 120^\circ \\ x = 0.3281R \end{matrix} \quad (1)$$

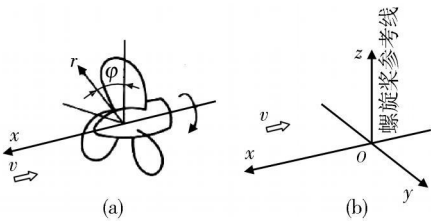


图 2 螺旋桨坐标系

Fig. 2 Coordinate system of propeller

LDV 试验采用 TSI 公司生产的二维激光测速仪, 试验时分别采用波长为 514.5 nm 的绿光测量轴向速度和波长为 488.0 nm 的蓝光测量径向

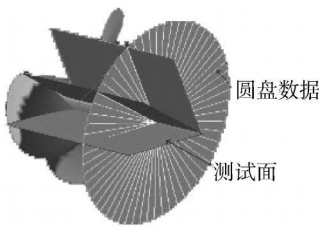


图 3 横截面数据提取示意图

Fig. 3 Schematic diagram of getting the data of cross section

速度, 采用 750 mm 的聚焦镜, 光束夹角为 9.7° , 控制体为 $1.5 \text{ mm} \times 0.8 \text{ mm}$ 的椭球体. 测量桨盘面后轴向位置 $x/R = 0.3281$, 径向位置 $r/R = 0.3875 \sim 1.0$ 内 8 个测试点轴向与径向速度, LDV 测量诊断体椭球体. 与 PIV 测试不同, LDV 采用随机采集并同时记录轴编码器相位的方法进行相位同步, 单组试验就可以同时记录 $0^\circ \sim 360^\circ$ (每隔 0.9°) 相位区间内速度分布.

2 试验结果

试验获得了螺旋桨尾流场的大量信息. 本文中以 U 为来流速度, 图中的横、纵坐标是与螺旋桨半径无因次化后的值.

图 4 为 PIV 试验获得的典型流场信息. 图 4 (a)、(b) 分别为轴向和径向速度. 图中的梢涡、尾涡以及由尾涡引起的速度突变带都非常清晰.

图 5 为 $x/R = 0.3281$ 横截面处的速度云图, 图中圆形线、半径线分别为沿周向、径向比较迹线. 图 5(b)、图 5(d) 中 LDV 测试所得流场显示螺旋桨尾流场中横截面等间距分布着三个梢涡, 对应于三个叶片, 涡心位于 $r/R = 0.90$ 左右. 图 5 (a)、图 5(c) 为 PIV 数据, 也显示有三个梢涡, 说明在 PIV 试验中假设 $0^\circ \sim 120^\circ$, $120^\circ \sim 240^\circ$ 相位下流场与 $240^\circ \sim 360^\circ$ 相位下流场相同是可行的.

图 5(b) 中 LDV 测试数据显示尾流场中横截面轴向速度对应于三个叶片分别有三条明显的低速带, 从桨毂处一直延伸到叶梢, 与梢涡连在一起. 同样, 图 5(d) 显示尾流场中横截面径向速度有三条高速带从桨毂处一直延伸到叶梢, 与梢涡连在一起.

PIV 同样非常准确的捕捉到了这三低(高)速带. 这三条发生突变的速度区域是客观存在的, 为三条沿轴向与螺旋桨一起做旋转运动的尾涡片穿透横截面所致.

比较 PIV, LDV 轴向、径向速度云图可发现,

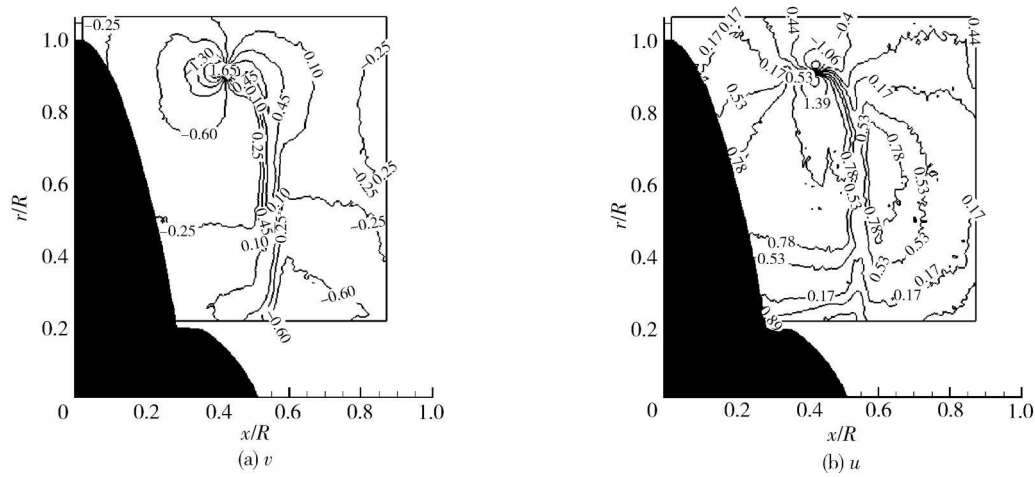


图 4 PIV 试验数据, $\varphi = 60^\circ$
Fig. 4 Experiment data of PIV, $\varphi = 60^\circ$

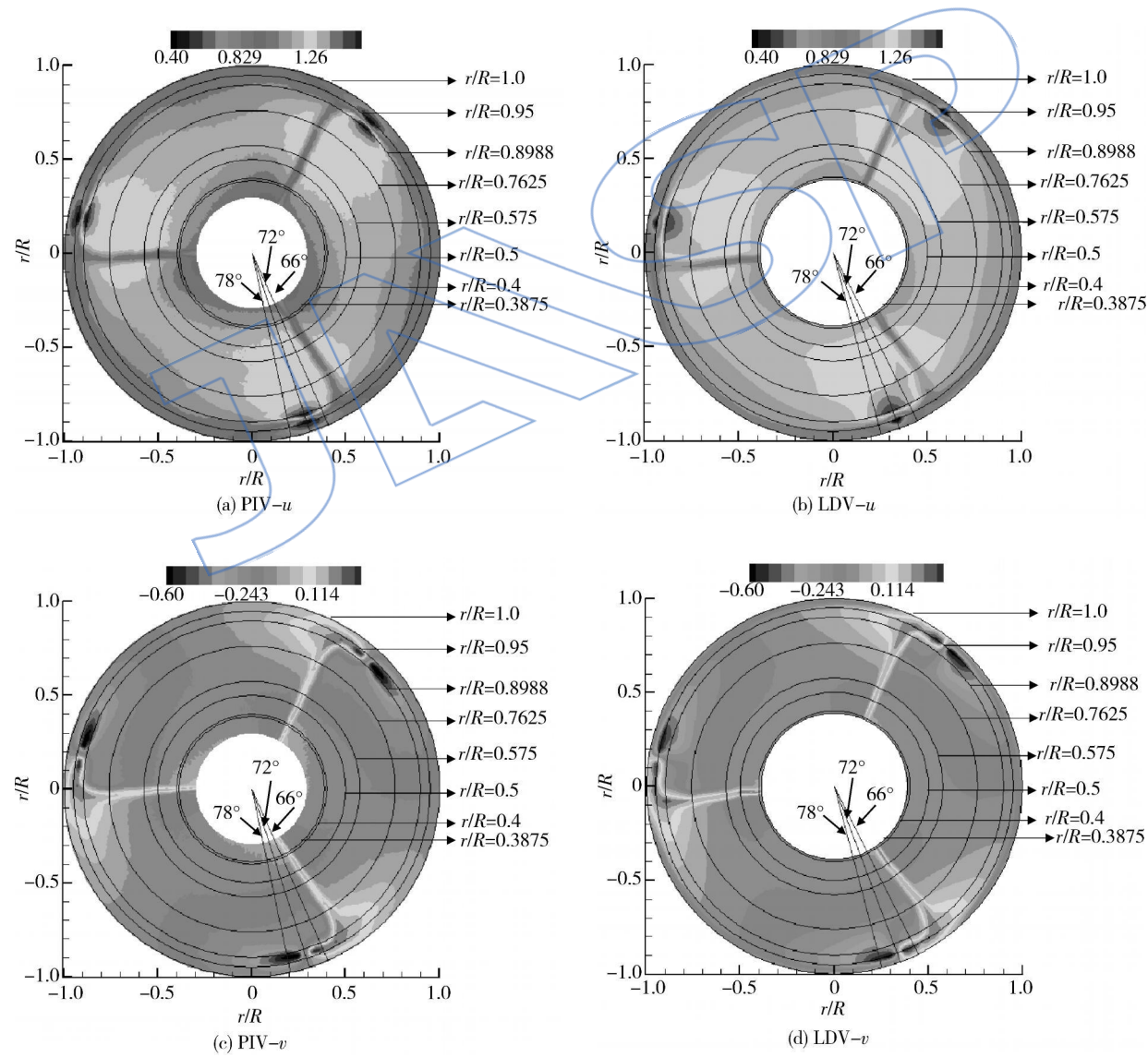


图 5 横截面速度云图 ($x/R = 0.3281$)
Fig. 5 Cross section velocity contour ($x/R = 0.3281$)

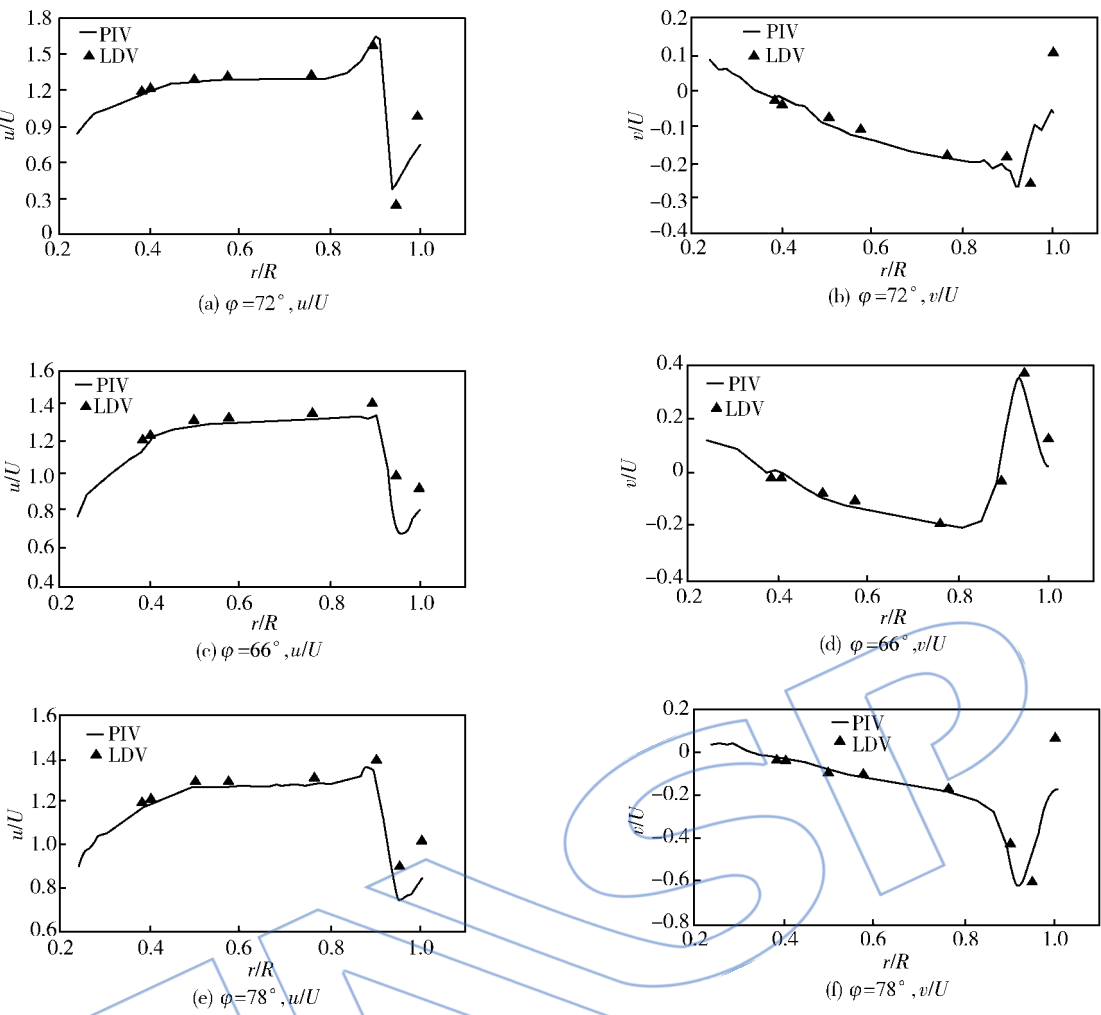


图 6 PIV, LDV 速度沿径向分布比较

Fig.6 Comparison of velocity of PIV and LDV at radial distribution

PIV 数据沿径向分布明显比 LDV 测试数据层次分明. 这是由于 LDV 沿径向的数据点稀疏(只有 8 个), PIV 沿径向的数据点密集(有 80 个)所致.

图 6 是轴向速度及径向速度在一个半径上的分布图. 选取的三个相位 ($\varphi=66^{\circ}, 72^{\circ}, 78^{\circ}$) 对应于尾涡片所在相位区间.

观察图 6 速度分布, 发现内半径处 PIV 测量数据与 LDV 测量数据吻合情况比外半径处更好一些. 这是因为外半径处速度梯度较大, LDV 与 PIV 数据点在空间定位上的偏差会带来速度数值上的误差.

图 7 为 PIV, LDV 测试所得速度沿周向的分布比较.

图 7(b)、图 7(c) 分别是 $r/R=0.95$ 与 $r/R=0.8988$ 处轴向速度在 $[0^{\circ}, 120^{\circ}]$ 相位区间内的分布, 从图 7(b) 中可以发现在一个桨叶周期内出现了两个速度突跳, 这主要是因为梢涡不与叶片泄出的尾涡片重合在一起, 当 LDV 测量体先后穿

过尾涡和梢涡, 测量的速度就有两个跳跃, 这是速度分布中出现两个峰的原因. PIV 同样非常准确的捕捉到了这种“双跳跃”现象.

图 7(d) ~ 图 7(h) 分别是 $r/R=0.7625, 0.575, 0.5, 0.4$ 和 0.3875 处轴向速度在 $0^{\circ} \sim 120^{\circ}$ 相位区间的分布情况. 图中比较尖的突跳为测量点穿过尾涡片所致, PIV, LDV 都捕捉到了这种周向跨越仅有 8° 的速度突跳.

记 $\bar{u}_{LDV} = \frac{1}{400} \sum_{i=1}^{400} u_i$ 为 LDV 所测的某一半径

处轴向速度沿周向平均, $\bar{u}_{PIV} = \frac{1}{360} \sum_{i=1}^{360} u_i$ 为 PIV 所测的某一半径处轴向速度沿周向平均. 图 8 为不同半径处轴向速度沿周向平均值. 从图 8 可以看出, PIV 数据与 LDV 数据在分布趋势上比较吻合, 只是 PIV 比 LDV 普遍小 $2\% \sim 3\%$, 初步分析其中应包含一些系统误差, 如物像平面的标定误差及坐标定位中的误差等.

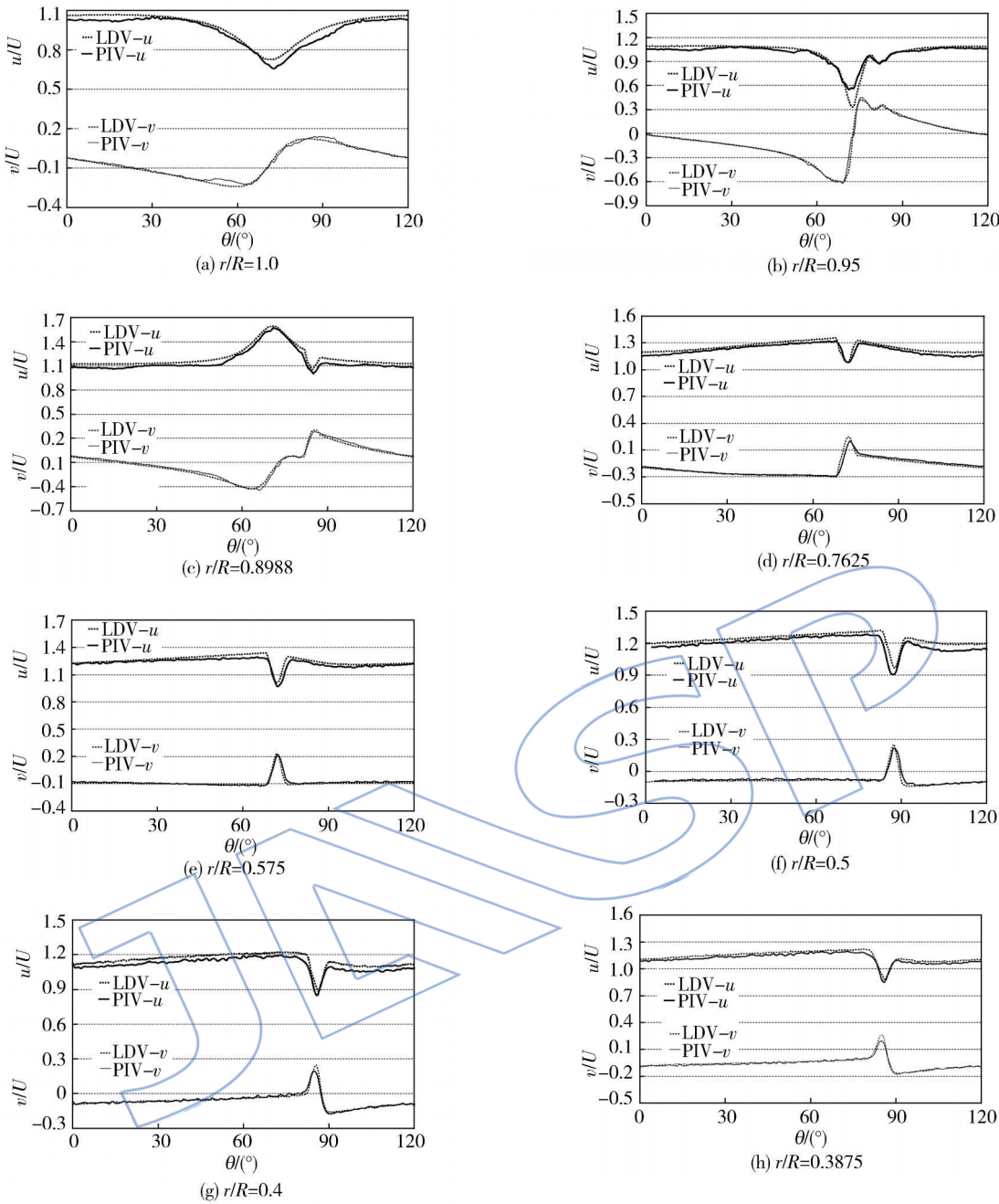


图 7 PIV, LDV 速度周向分布比较

Fig. 7 Comparison of velocity of PIV and LDV at circumferential distribution

3 误差分析

尽管 PIV 数据同 LDV 数据一样可以捕捉到周向跨越仅有 8° 的速度突跳, PIV 数据和 LDV 数据相比还是有一定的差别. 如图 7(b) 两种试验结果对“双跳跃”结构的显示中, 第一个峰值 LDV 结果约比 PIV 结果小 0.2. 测试结果差异应该包含有 PIV 测试坐标定位不准确带来的误差. 本次试验中 LDV 测试系统配有高精度的位移架, 可以进行准确的定位, PIV 系统仅靠标靶定位, 由于

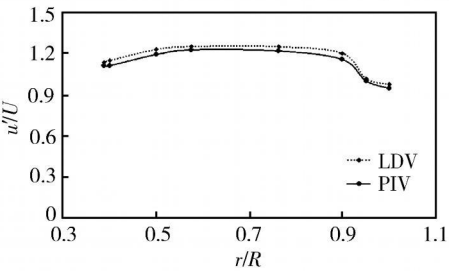


图 8 各半径处轴向速度平均值

Fig. 8 Average of axial velocity at radial distribution

梢涡涡线附近的流场速度梯度比较大,微小的径向、轴向定位误差就会给测试结果带来很大的差别.图 9 中 $x/R=0.3281$ 横截面处, $r/R=0.950$, $r/R=0.941$, $r/R=0.958$ 三个不同半径圆上的速度分布如图 10 所示,其中径向距离差距 $\Delta r=|r/R_{0.950}-r/R_{0.941}|=1\text{ mm}$.比较图 10 三条曲线,径向距离差距仅为 1 mm 其速度分布有很大的不同.同理,该位置沿轴向的速度梯度也比较大,图 11 为 $x/R=0.3191$, $x/R=0.3281$, $x/R=0.3290$ 三个不同横截面上 $r/R=0.95$ 处轴向、径向速度分布,其中 $\Delta x=1\text{ mm}$,从图中可以看出, $\Delta x=1\text{ mm}$ 的轴向偏差, $r/R=0.95$ 处的速度分布有明显的差别,如此大的速度梯度给坐标定位带来了很大的难度.

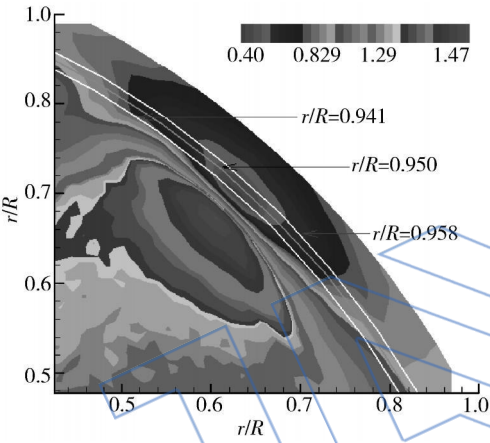


图 9 $x/R=0.3281$ 处 PIV 测试数据云图
Fig. 9 Velocity contour of PIV, $x/R=0.3281$

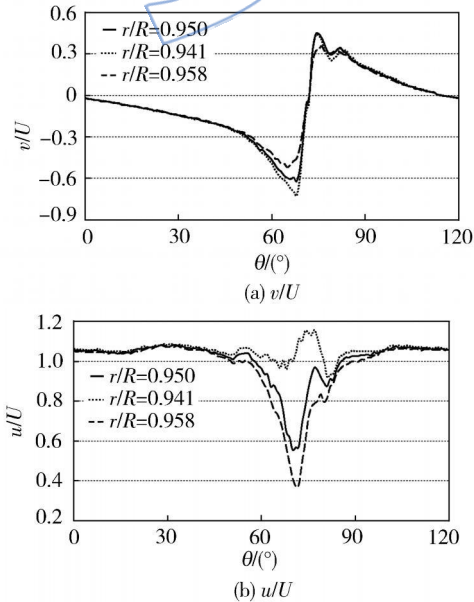


图 10 $x/R=0.3281$ 处不同半径上 PIV 数据
Fig. 10 PIV data of $x/R=0.3281$ at different radius

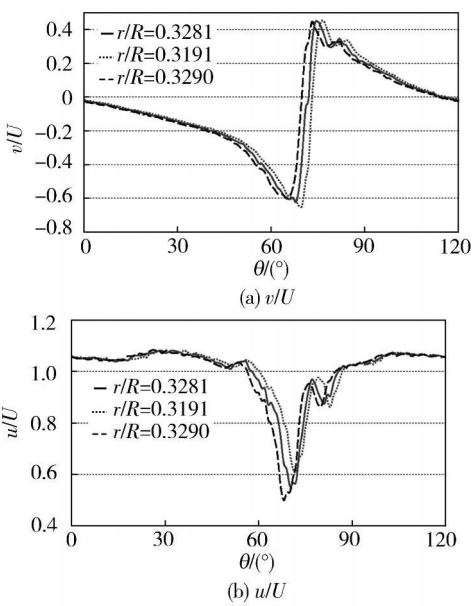


图 11 各横截面上 $r/R=0.95$ 半径处 PIV 数据
Fig. 11 PIV data of $r/R=0.95$ at different cross sections

4 结 论

本研究进行了 DTMB-4119 标准螺旋桨尾流场的 PIV 测试,并与同时进行的 LDV 测试数据进行了比较分析.通过本研究可以得出以下结论:

- 1) PIV 测试技术能够清晰的捕捉到螺旋桨梢涡和尾涡片结构,并在流场的宏观、微观结构上都与 LDV 测试数据有较好的一致性. PIV 可以瞬时得到全流场信息,与 LDV 相比显示出较高的效率.
- 2) 分析了 PIV 测试误差产生的原因,改善坐标定位装置的精度可以进一步减少误差.
- 3) PIV 测量可以达到较高的精度,PIV 技术对于诸如螺旋桨尾流场等复杂流动结构的研究是一种有效的手段.

参考文献:

[1] 盛森芝,徐月亭,袁辉靖.近十年来流动测量技术的新发展[J].力学与实践,1998,24(5):1-15.
SHENG Senzhi, XU Yueting, YU AN Huijing. New development in the technology of flow measurement over the last decade[J]. Mechanics and Engineering, 1998, 24(5): 1-15. (in Chinese)

[2] 唐洪武.现代流动测试技术及应用[M].北京:科学出版社,2009.

[3] Min K S. Numerical and experimental methods for prediction of field point velocities around propeller blades[R]. MIT: Department of Ocean Engineering Report, No78

- 12, 1978.
- [4] Jessup S D. An experimental investigation of viscous aspects of propeller blade flow [D]. Washington, DC: The Catholic University of America, 1989.
- [5] Stella A, Guj G, Felice F D, et al. Propeller wake analysis by means of LDV phase sampling techniques[C] // Proceedings of the 3th International Symposium on Cavitation. Grenoble: [s. n.], 1998.
- [6] DONG Shitang, XU Xingqi. LDV benchmark measurements of flow around a propeller[C] // Proceedings of the 20th ITTC Propulsor Committee. Wuxi: CSSRC, 1993.
- [7] Felice F, Romano G P, Elefante M. Propeller wake analysis by means of PIV[C] // Proceedings of the 23th Symposium on Naval Hydrodynamics. Val De Reuil, France: Office of Naval Research, 1998.
- [8] Cotroni A, Felice F D, Romano G P, et al. Investigation of the near wake of a propeller using particle image velocimetry[J]. Experiments in Fluids, 2000(suppl.): S227-S236.
- [9] Calcagno G, Felice F D, Felli M. Propeller wake analysis behind a ship by stereo PIV[C] // Proceedings of the 24th Symposium on Naval Hydrodynamics. Fukuoka, Japan: Office of Naval Research, 2002.
- [10] Lee S J, Paik B G, Lee C M. Phase averaged PTV measurements of propeller wake[C] // Proceedings of the 24th Symposium on Naval Hydrodynamics. Fukuoka, Japan: Office of Naval Research, 2002.
- [11] Paik B G, Kim J, Park Y H, et al. Measurements of flow around a rotating propeller using PIV technique in a cavitation tunnel[C] // Proceedings of the 6th International Symposium on Particle Image Velocimetry(0012). Pasadena, California, USA: American Society of Mechanical Engineers, 2005.
- [12] 张军, 张志荣, 朱建良, 等. 导管螺旋桨内流场的 PIV 测量[J]. 实验流体力学, 2007, 21(2), 82-88.
- ZHANG Jun, ZHANG Zhirong, ZHU Jianliang, et al. Investigation of internal flow field of ducted propeller using particle image velocimetry[J]. Journal of Experiment in Fluid Mechanics, 2007, 21(2): 82-88. (in Chinese)