

文章编号: 0258-1825(2010)05-0503-06

大型水洞中螺旋桨尾流场 PIV 测试研究

李广年¹, 张军², 张国平², 陆林章²

(1. 浙江海洋学院船舶与建筑工程学院, 浙江 舟山 316000; 2. 中国船舶科学研究中心, 江苏 无锡 214082)

摘要:以标准桨 DTMB-P4119 为试验对象,开展了螺旋桨尾流场测试分析。试验捕捉到了清晰的螺旋桨梢涡和尾涡的流动结构以及梢涡、尾涡片在尾流中的演化。分析比较了三种载况下的尾流特征,利用捕捉到的梢涡涡心坐标计算了部分涡线的螺距角。文章将测试结果与 LDV 测试数据进行了比较分析,结果表明,PIV 与 LDV 对微观流动结构的测量取得了比较一致的结果。

关键词:螺旋桨;尾涡;梢涡;PIV;LDV

中图分类号:O353.5 **文献标识码:**A

0 引言

由于螺旋桨的三维复杂结构、梢涡和尾涡高频脉动等特点,传统的流场测量手段如皮托管、热线风速仪无法对螺旋桨流场进行测量。激光多普勒测速仪以及粒子图像测速技术的诞生,为螺旋桨这样的旋转机械流场测量提供了重要的先进工具。最早将激光应用到螺旋桨流场测量的是美国 MIT 的 Min^[1],揭开了 LDV 探索螺旋桨流场细观结构的序幕。此后 LDV 测量方法在螺旋桨尾流场测量领域日趋成熟, Jessp^[2], Chesnakas C^[3], Stella^[4] 和陆林章^[5] 都曾利用 LDV 测试技术对螺旋桨尾流场进行过详细的测量。

相对于 LDV 单点测量的方法,PIV 方法具有全场瞬时测量的优点,对于螺旋桨尾流场等复杂流动结构具有一定的优势。近十年来, Cotrooni^[6]、Calcagno^[7]、Sang Joon Lee^[8] 和 Bu Geun Paik^[9] 先后成功开展了螺旋桨尾流场的 PIV 测试研究。国内 PIV 技术应用于螺旋桨尾流场测试仅见于张军^[10] 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,试验并没有精细的捕捉到螺旋桨流场的细观结构。

本文在大型水洞中利用 2D-PIV 系统对均匀流下螺旋桨尾流场进行测量,解决了激光片光照明与 CCD 摄像、粒子示踪、螺旋桨相位与系统的同步控制等技术问题,对三个不同载荷下的螺旋桨尾流场进行

测量,并对不同相位下的速度场进行相位平均分析研究。通过分析对比 PIV 与 LDV 测试数据,验证 PIV 技术在本测试领域的精度。研究还对试验得到的大量的螺旋桨尾流场数据进行了分析,探索研究了螺旋桨尾流场的细观结构。

1 试验设置

试验在中国船舶科学研究中心大型水洞中进行,其试验段长 3.2m,直径 0.8m,试验水速 3~20m/s。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,设计载荷为 $J=0.833$,桨模半径 $R=125\text{mm}$ 。

进速系数定义为: $J = U/nD$ (1)

本次试验工况见表 1。

表 1 试验工况
Table 1 Test condition

	水速 (m/s)	螺旋桨转速 (rps)	进速系数 J
1	3.544	19.06	0.744
2	3.544	17.07	0.833
3	3.544	16.43	0.863

螺旋桨测试设备与布置见图 1。试验采用 Big-Sky-190 脉冲激光器从水洞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 1.5mm。图像记录采用 TSI PowerView 4M 相机,从水洞底面观察窗口进行粒子图像的拍摄,拍摄的测试面为

* 收稿日期:2009-01-25; 修订日期:2009-08-17

基金项目:“十一五”水动力预研基金(51314010201)

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

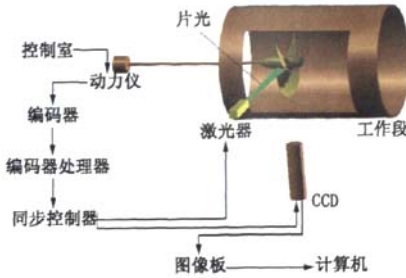


图 1 试验测试简图

Fig. 1 Measurement planes

110mm×110mm。试验播撒的示踪粒子为松花粉，直径约为 40 μ m。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。每组试验只拍摄螺旋桨同一相位的粒子图像。以水流方向为 x 轴正方向， z 轴通过桨盘面中心垂直向上为正， y 轴以右手定则确定。测试区域为 $z/R:0.20\sim 1.15, x/R:0.02\sim 0.90$ 。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，试验共测试 $1^\circ\sim 120^\circ$ 相位内螺旋桨尾流场轴向和径向速度场数据，其中第二工况每隔 1° 测试一次，第一、第三工况每隔 10° 测试一次， $120^\circ\sim 240^\circ, 240^\circ\sim 360^\circ$ 相位区间信息由 $0^\circ\sim 120^\circ$ 分别旋转 $120^\circ, 240^\circ$ 得到。PIV 图像分析采用 TSI 公司开发的 INSIGHT 3G 软件，诊断窗口约为 $2.2\text{mm}\times 2.2\text{mm}$ ，同一相位速度场数据由 100 次测量结果平均得到。

2 试验结果

图 2~图 7 为试验测量得到的典型的尾流场数据。流场中 U 为来流速度， u 为尾流中轴向速度， v 为径向速度， ω 为涡量。图中的横、纵坐标是与螺旋桨半径无因次化后的值。

图 2 为尾流场中轴向诱导速度等值线图，图 3 为尾流场中径向诱导速度等值线图，图 4 为尾流场中诱导速度矢量图。从图 2~图 4 中可以清晰地观察到螺旋桨梢涡结构。整个流场速度梯度层次清晰，图 2 中存在一条清晰的低速带由桨轴延伸至梢涡位置，此为尾涡片经过区域，对应图 3 径向速度中表现为高速

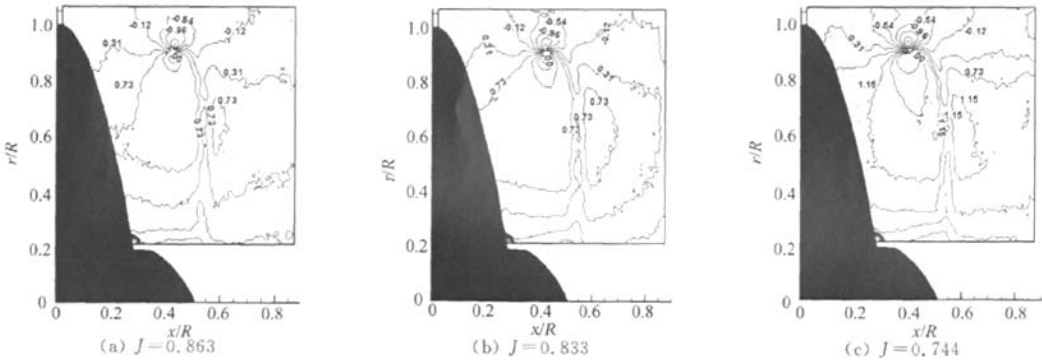


图 2 尾流场速度等值线图 $(u-U)/U, \varphi=60^\circ$

Fig. 2 Wake field velocity contour $(u-U)/U, \varphi=60^\circ$

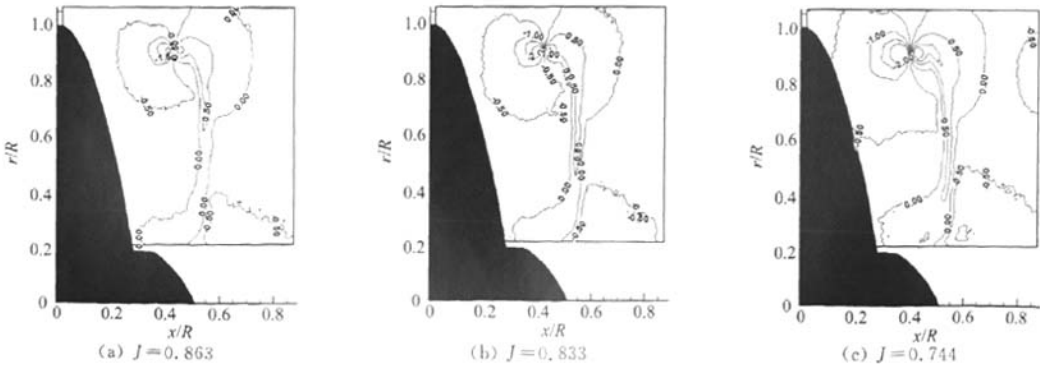
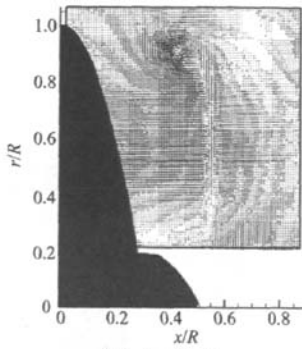


图 3 尾流场速度等值线图 $v/U, \varphi=60^\circ$

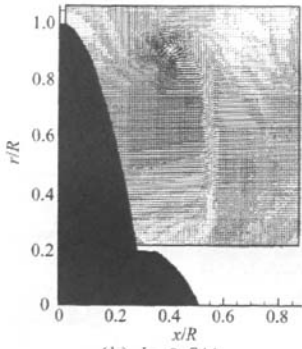
Fig. 3 Wake field velocity contour $v/U, \varphi=60^\circ$

带,这说明试验清晰地捕捉到了螺旋桨尾涡片及其结构。图 4 中梢涡涡旋图形、尾涡带区域的速度剪切层非常清晰。

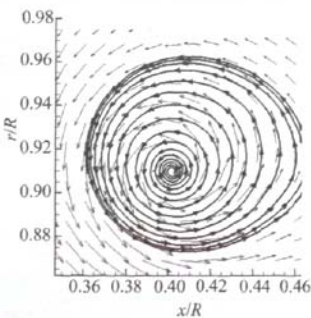
通过速度提取合成,可以得到尾流场中横截面上的速度云图,图 5 为 $x/R=0.3281$ 处, $J=0.833$ 流场信息。观察图 5,可以理解为速度云图上显示出的三个梢涡图形分别对应于三个不同的螺旋桨桨叶。由尾涡片导致的狭窄的高(低)速带在该云图中更加明显。由图 5 可以看出,远尾流场($x/R=0.60$)诱导速度值比近尾流场($x/R=0.44$)诱导速度值小。



(a) $J=0.863$

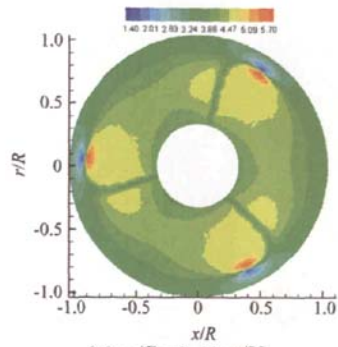


(b) $J=0.744$

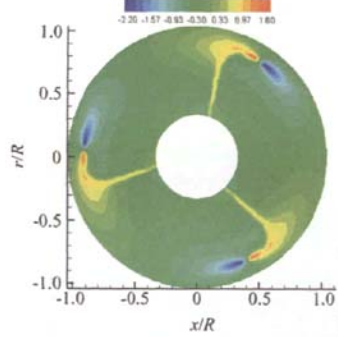


(c) $J=0.744$

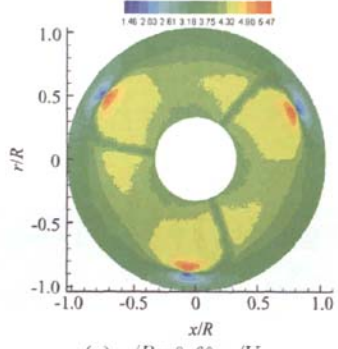
图 4 速度矢量图 $(u-U)/U$, $\varphi=60^\circ$
Fig. 4 Velocity vector $(u-U)/U$, $\varphi=60^\circ$



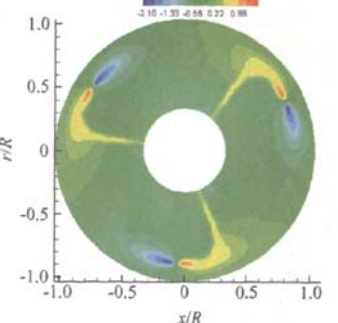
(a) $x/R=0.44; u/U$



(b) $x/R=0.44; v/U$

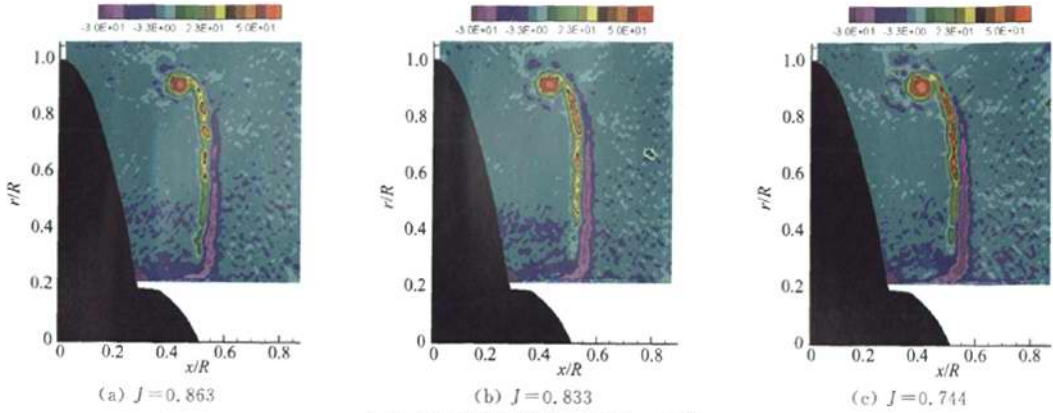
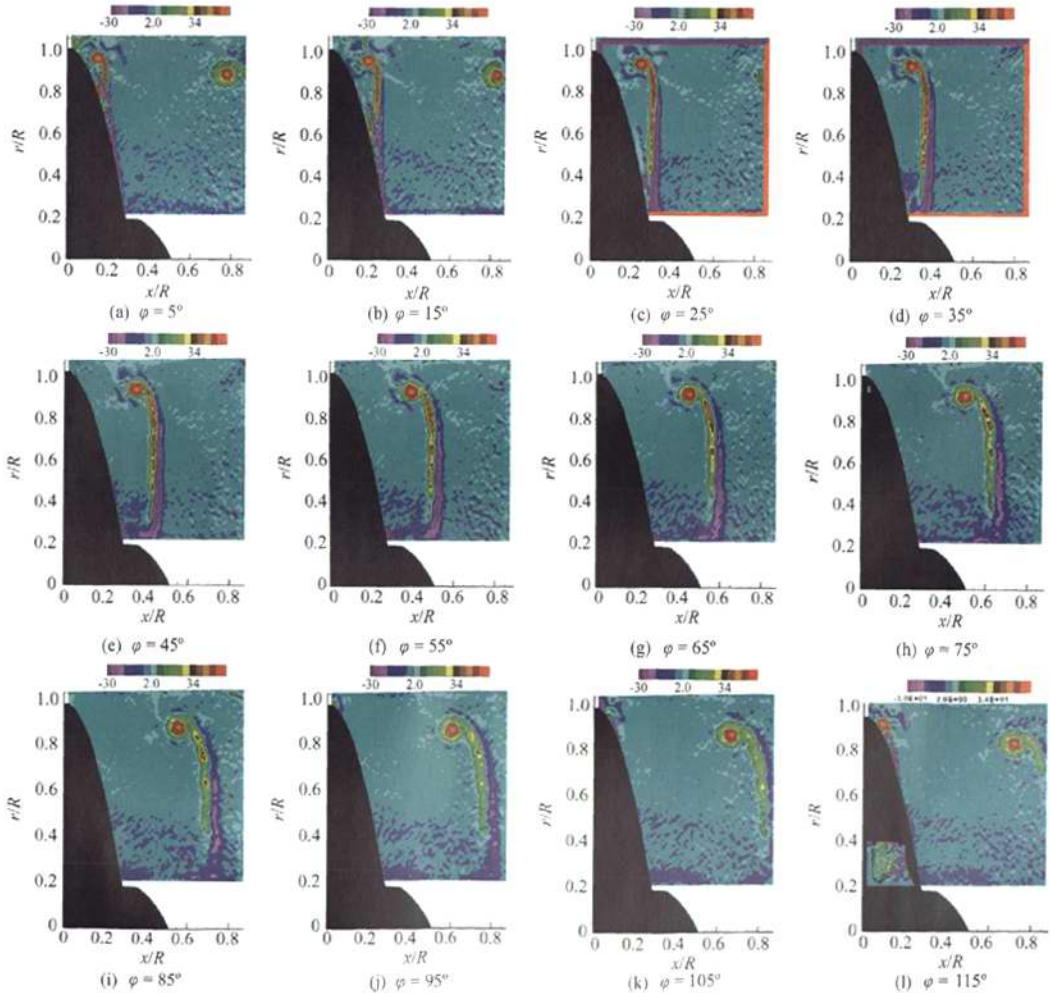


(c) $x/R=0.60; u/U$



(d) $x/R=0.60; v/U$

图 5 横截面速度云图 ($J=0.833$)
Fig. 5 Cross-section velocity contour ($J=0.833$)

图6 不同载荷下的涡量云图($\varphi=60^\circ$)Fig.6 Vorticity distribution at different propeller loading conditions($\varphi=60^\circ$)图7 不同相位处的涡量云图($J=0.833$)Fig.7 Vorticity distribution at different angles($J=0.833$)

试验只测得了螺旋桨尾流场的轴向速度及径向速度,由此根据公式(2)可以计算得到 z 方向的涡分量场:

$$\omega_z = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \quad (2)$$

图 6 为尾流场中 xoy 平面内的涡分量云图。从图 6 可以看出,由螺旋桨随边泻出的尾涡明显的包含两层。这主要是由于桨叶边界层的存在,使得自由涡分成了方向相反的正负两层。正涡量自叶梢处沿尾涡片一直向桨轴延伸,强度逐步减弱;负涡量自桨轴处沿尾涡片向上延伸,强度逐渐减弱;正、负涡层在某一半径处涡量值相等,此时环量沿径向的变化率(即 $\Delta\Gamma \cdot \Delta r^{-1}$)最小,这与螺旋桨理论设计中环量沿径向的分布规律是相吻合的。由于尾涡片随螺旋桨高速旋转,一部分负涡量被卷入梢涡涡线外圈。

图 7 为设计载荷情况下不同相位处轴平面上的涡量分布云图。十二幅图清晰地显示出了梢涡脱落以及尾流演化过程。在 $\varphi=105^\circ$ 处,近梢部可看出梢涡锥形, $\varphi=115^\circ$ 处,桨叶 $r/R=0.97$ 处可见一个完整的梢涡图形,同时 $\varphi=115^\circ$ 处已经出现一截狭窄的尾涡片。此后,梢涡同尾涡片一起在尾流中演化发展,梢涡影响区域扩大,尾涡片逐渐变宽。由于尾流中轴周速度沿径向分布不均匀,尾涡片逐步倾斜。

为了验证本次 PIV 试验的精度,特地针对同一试验对象,在同一试验设施中,同一时段,针对同一个桨模,相同工况(设计载荷)条件下安排了 LDV 试验。其中图 8 为 PIV 与 LDV 测试数据对比,从图中可以看出,在测试面内 PIV 与 LDV 数据无论是在梢涡、尾涡片处的峰值和趋势还是在其他相位的速度值都较吻合,即使在梢涡与尾涡片接触附近的复杂流动处,PIV 与 LDV 都能清晰捕捉速度场的“双峰”^[11]结构,并在峰值上有较好的吻合。这说明本次 PIV 试验有较高的精度。

本文分析过程中,设定一个小范围流场内,涡量到达极值的某一点定义为涡心。图 9 为梢涡涡线径向坐标随轴向坐标的变化情况。图 10 为利用试验中捕捉到的涡心坐标进一步计算得到的梢涡涡线螺距角。图 9 可以看出梢涡自桨叶叶梢脱落后,随尾流下移,保持稳定地收缩,螺旋桨载荷越大,收缩越严重。图 10 表明桨后 $x/R=0.1\sim 0.9$ 尾流中梢涡涡线的螺距角分布在 $15^\circ\sim 20^\circ$ 内,随着尾流走向下游,螺距角逐渐增大。这可以解释为尾流逐步收缩,诱导速度逐渐增大,涡线的螺距角逐渐增大。从图 10 还可以

看出整个螺距角数据带比较离散,说明梢涡涡线在尾流中振荡剧烈。

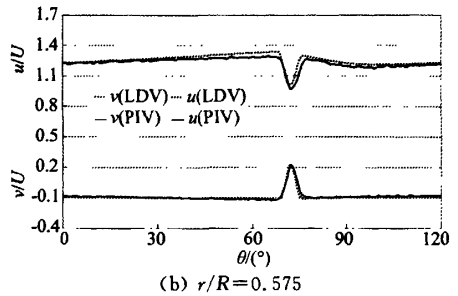
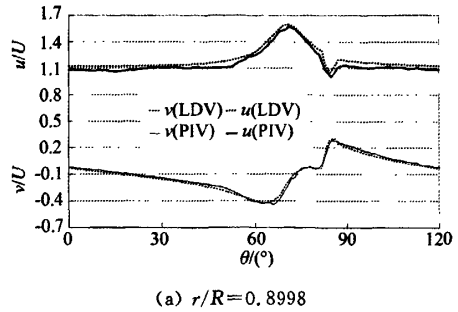


图 8 PIV、LDV 测试结果比较 $J=0.833, x/R=0.3281$
Fig. 8 Compare data from PIV with data from LDV $x/R=0.3281, J=0.833$

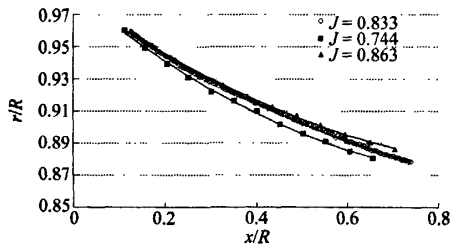


图 9 梢涡涡线径向坐标变化曲线
Fig. 9 Trajectories of tip vortices

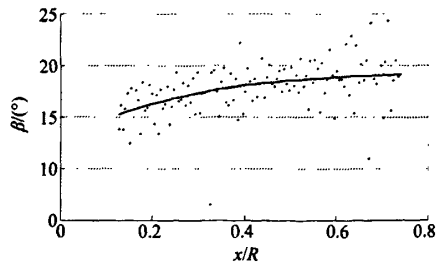


图 10 涡线螺距角
Fig. 10 Angle of pitch

3 结 论

本研究的 PIV 测试数据与同时进行的 LDV 测试数据有很好的 consistency。通过本研究可以得出以下结论:

(1) 螺旋桨的旋转支配着尾流速度场特性,随螺旋桨载荷加大,尾流场中轴向、径向速度值增大,梢涡线随尾流收缩加剧。在近尾流区随尾流下移,梢涡线螺旋角逐步变大。

(2) 梢涡为 Rankine 模式旋涡,在桨后形成一螺旋形涡线,且随尾流下移,保持稳定的收缩。尾涡片包含有正负两层,分别产生于吸力面和压力面。

(3) PIV 测试技术能够快速、清晰地捕捉到螺旋桨梢涡和尾涡片结构,而且在细观流动结构显示上与 LDV 测试数据有较好的一致性。PIV 技术具有较高的精度。

参 考 文 献:

- [1] 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.
- [2] JESSUP S D. An experimental investigation of viscous aspects of propeller blade flow[D]. The Catholic University of America, 1989.
- [3] CHESNAKAS C, JESSUP S. Experimental characterization of propeller tip flow[R]. Naval Surface Warfare Center, Carderock Division. USA. 22nd ONR.
- [4] STELLA A, GUJ G, FELICE F Di. Propeller wake evolution analysis by LDV[R]. 22nd ONR.
- [5] 陆林章. 组合式推进器摸底方案流场 LDV 测试报告[R]. 中国船舶科学研究中心科技报告. 2003.
- [6] COTRONI A, FELICE F Di, ROMANO G P, ELEFANTE M. Investigation of the near wake of a propeller using particle image velocimetry[J]. *Experiments in Fluids*, (suppl), 2000: S227-S236.
- [7] CALCAGNO G, FELICE F Di, FELLI M. Propeller wake analysis behind a ship by stereo PIV[R]. 24th ONR. 07, 2002.
- [8] SANG JOON LEE, BU GEUN PAIK, JOOG HWAN YOON, et al. Three-component velocity field measurements of propeller wake using a stereoscopic PIV technique[J]. *Experiments in Fluids*, 2004, 36: 575-585.
- [9] BU GEUN PAIK, CHOUNG MOOK LEE, SANG JOON LEE. PIV analysis of flow around a container ship model with a rotating propeller[J]. *Experiments in Fluids*, 2004, 36: 833-846.
- [10] 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): 27-33.
- [11] 董郑庆. 导管推进器内流场测试研究[D]. 中国船舶科学研究中心, 2006.

Propeller wake analysis by means of PIV in large water tunnel

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

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

2. China Ship Scientific Research Center, Wuzi, Jiangshu 214082, China)

Abstract: The 2D-PIV (Particle Image Velocimetry) technique is applied to measure the flow characteristics of complex flow around the DTMB-P4118 propeller. The test captures the spatial evolution of the propeller wake, including tip vortex and trailing vortex sheet. Also, this paper compares the wake's characteristic of three different work conditions, and calculated the angle of pitch of some of tip vortex line using the coordinate figure which captured in the test. And the comparison experiment was carried out to measure the propeller wake of DTMB-P4119 by using PIV and LDV technique. The results indicate that the PIV data are in good agreement with the LDV data in the key flow details.

Key words: propeller; trailing vorticity; tip vortex; PIV; LDV