

# 基于互相关算法的液力偶合器内部流场分析\*

柴博森<sup>1</sup> 马文星<sup>2</sup> 刘春宝<sup>2</sup>

(1. 吉林大学汽车仿真与控制国家重点实验室, 长春 130025; 2. 吉林大学机械科学与工程学院, 长春 130025)

**【摘要】** 利用 PIV 技术对液力偶合器内部流场进行了试验测试。针对制动工况( $i=0$ )下液力偶合器涡轮内部流场,以 PIV 图像连续帧的互相关算法提取其径向切面流速分布,实现了内部流场可视化与速度量化测量。研究了制动工况下涡轮内部流场结构特征与分布规律,分析了反向流和二次流等现象产生的原因。结果表明,合理设计偶合器内部结构,可减少反向流和二次流的产生,降低了能量损失,提高了工作性能。

**关键词:** 液力偶合器 互相关算法 可视化 流场分析

**中图分类号:** TH137.332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2011)12-0038-05

## Analysis of Internal Flow Field in Hydrodynamic Coupling Based on Cross-correlation Algorithm

Chai Bosen<sup>1</sup> Ma Wenxing<sup>2</sup> Liu Chunbao<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Automotive Simulation and Control, Jilin University, Changchun 130025, China

2. College of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China)

### Abstract

The internal flow field of hydrodynamic coupling was tested by PIV technology. On the braking condition ( $i=0$ ), flow velocimetry on radial section of turbine was extracted based on PIV cross-correlation algorithm of two continuous images, visualization and quantitative measurement of internal flow field in hydrodynamic coupling were achieved. Flow structure and velocity distribution of internal flow field in turbine on the braking condition were studied. Reasons caused the reverse flow and secondary flow were analyzed specifically. The results showed that the phenomenon above could be reduced by designing the internal structure of hydrodynamic coupling. It could reduce energy loss and raise its work performance.

**Key words** Hydrodynamic coupling, Cross-correlation algorithm, Visualization, Flow field analysis

### 引言

液力偶合器内部的流动是一种极其复杂的非定常三维粘性流动,其内部流动特性决定了外部性能。为了提高液力偶合器的性能,需要对其内部流动进行试验测试,掌握流场的结构与分布规律,为改进液力偶合器设计提供依据<sup>[1]</sup>。

随着高清晰度 CCD 摄像机、超大规模集成电路

(VLSI)和数字图像处理技术的飞速发展,粒子图像测速技术(particle image velocimetry,简称 PIV)在液力元件内部流场试验研究上应用越来越广泛<sup>[2]</sup>。

PIV 测量结果的优劣与选择的速度提取算法有重要关系。根据流场中示踪粒子浓度,PIV 测量技术主要基于两种算法进行速度提取。一种是低粒子密度下的粒子跟踪测速算法,通过实时跟踪单个粒子的运动来获取流场分布情况,这种跟踪算法的精

收稿日期: 2011-06-25 修回日期: 2011-07-25

\* 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2007AA05Z256)、高等学校博士点专项科研基金资助项目(20100061120057)和吉林大学汽车仿真与控制国家重点实验室创新团队计划资助项目

作者简介: 柴博森, 博士生, 主要从事液力传动与自动变速研究, E-mail: cbs\_1984\_115@sohu.com

通讯作者: 刘春宝, 讲师, 主要从事液力传动与自动变速研究, E-mail: liuanbc@126.com

度相对较高,但是数据处理量很大,而且对于复杂的流场结构获得其流场细节信息不够充分;另一种是较高粒子密度下的数字互相关算法测速,此时粒子已经不能单独识别,获得的是一块判读小区域内多个粒子位移的统计平均值,以统计平均流速替代当地流速,它的测量精度相对跟踪测速算法较低,但是获得的流场细节信息更加丰富<sup>[3]</sup>。

液力偶合器工作在不同的工况下,其内部流场分布是不同的。本文基于 PIV 技术采集液力偶合器制动工况下流场,通过互相关算法计算获得该工况下流场结构,分析其内部反向流和二次流等现象产生的原因,实现液力偶合器内部流场可视化测量与速度定量计算。

## 1 PIV 互相关算法

流场中示踪粒子浓度较高时,流动图像上含有足够的粒子信息,但是对于单个粒子的识别和匹配却增加了分析难度,无法通过跟踪单个粒子的运动轨迹而获得其准确的运动速度。因此,需要基于图像连续帧之间的 PIV 相关处理算法对流动图像进行分析。通过将图像划分为一个个小区域,求区域内的平均运动速度,以该平均运动速度代替该小区域中心点的当地流速。

PIV 互相关算法原理见图 1,图像 1 和图像 2 表示相邻时刻的连续两帧图像。在  $t_1$  时刻,图像 1 中选取适当大小的小区域,定义该区域为查询域,表示为  $I_1(x, y) = I(x, y)$ ; 在  $t_2$  时刻,图像 2 中划分出与图像 1 中查询域相同大小的区域,定义该区域为搜索域,表示为  $I_2(x, y) = I(x - \Delta x, y - \Delta y)$ 。为了提取  $\Delta x$  与  $\Delta y$ , 计算  $I_1(x, y)$  与  $I_2(x, y)$  的互相关函数为

$$R(m, n) = \iint I_1(x, y) I_2(x - m, y - n) dx dy = \iint I(x, y) I(x - \Delta x - m, y - \Delta y - n) dx dy \quad (1)$$

根据自相关函数的定义,函数  $I(x, y)$  的自相关函数  $r(m, n)$  的表示为

$$r(m, n) = \iint I(x, y) I(x - m, y - n) dx dy \quad (2)$$

由式(1)和式(2)得到

$$R(m, n) = r(m - \Delta x, n - \Delta y) \quad (3)$$

因为自相关函数是偶函数,且在原点取得最大值,即满足不等式:  $r(0, 0) \geq r(m, n)$ 。结合式(3),可以得到

$$R(m, n) \leq R(\Delta x, \Delta y) \quad (4)$$

由式(4)可知,互相关函数取最大值的位置即可确定  $\Delta x$  与  $\Delta y$ 。

在图像 2 中沿一定的搜索路径移动搜索域并分别和图像 1 中查询域进行互相关运算,直至覆盖完图像 2 中全部区域,计算互相关函数的最大值,寻找峰值的位置,确定搜索域与查询域最为匹配。计算在采集时间间隔  $\Delta t = t_2 - t_1$  内的平均相对位移,最终获得所选择查询域内粒子平均速度矢量(图 1)。

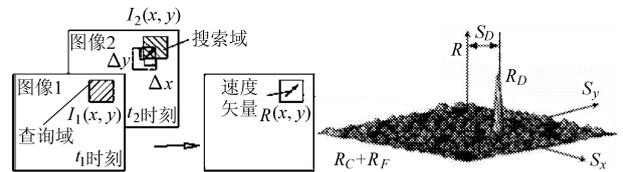


图 1 PIV 互相关算法示意图

Fig. 1 Schematic diagram of PIV cross-correlation algorithm

为了实现全流场区域流速测量,对采集图像进行均匀网格划分,移动搜索域并进行上述互相关计算步骤,直至覆盖完图像 1 中全部区域。确定最优搜索路径,计算每个网格对之间的互相关函数,迭代计算全流场区域的二维速度分布。通常对图像进行 3 次二维的傅里叶变换以提高计算速度,将图像从时域转换到频域进行快速互相关计算。

进行互相关计算时,重点考虑的因素有查询域和搜索域子窗口的大小和移动步长。子窗口大小应适中,过大则易引入干扰,计算量增大,增加了计算时间;过小则没有用于分析计算的足够的信息量,匹配结果不可靠,易引起误匹配,降低计算精度。步长过大,将降低了测量精度和空间分辨率;过小则计算量剧增。通常子窗口设置为 32 像素 × 32 像素,步长取子窗口边长的一半比较合适。

## 2 流动图像采集及流速提取

### 2.1 流动图像采集

利用液力偶合器 PIV 试验测试系统对透明液力偶合器内部流场进行试验测试。试验系统整体包括机械系统和 LSFM150 型激光切面流场测量系统,见图 2。机械系统由 300 kW 变频调速电动机、400 kW 电涡流测功机和输入输出转矩转速传感器等组成,用于驱动和加载液力偶合器,模拟其实际运行工况。LSFM150 激光切面流场测量系统由 300mW 氩离子激光器、CCD、小电动机、光学组件和图像采集部分组成,用于采集偶合器内部流场二维切面上的流动图像。在试验中,偶合器工作腔内流体采用蒸馏水,以铝粉作为示踪粒子。激光测量平面选取为涡轮的径向切面,激光片光厚度约为 1 ~ 2 mm。CCD 相机垂直采集测量区域内流场,每秒记录 25 帧流动图像。在制动工况( $i = 0$ )下,采集涡轮独立流道内的径向切面流动图像,见图 3。

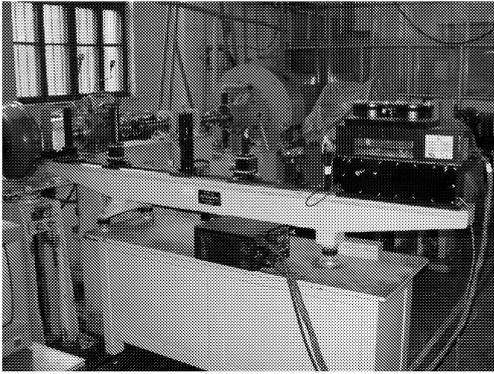


图2 液力耦合器 PIV 试验测试系统

Fig. 2 PIV experimental system of hydrodynamic coupling

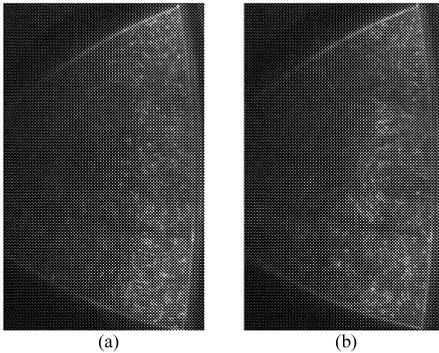


图3 连续两帧粒子图像

Fig. 3 Two successive frames of particle image

(a) 第1帧 (b) 第2帧

## 2.2 标定

互相关计算之前必须对 CCD 相机进行标定。为了定义像素和毫米之间的映射关系以确定标定系数,设计了简单的标定试验,试验中忽略了 CCD 相机放大倍数的因素。制作标定盘,其上均布孔径为 2 mm 的圆孔,分为 4 组,每组 7 个圆孔沿径向分布。将该标定盘固定在液力耦合器外壁表面,见图 4。CCD 相机采集标定盘上的圆孔图像,其镜头距标定盘表面的垂直距离与液力耦合器流动图像采集时 CCD 镜头距耦合器外壁表面距离保持一致。在相同的试验测试环境下,CCD 相机采集每组圆孔图像,通过 Matlab 编程检测出圆孔直径,单位为像素,见图 5。图 5 中反映的是标定盘上的 1 组圆孔采集

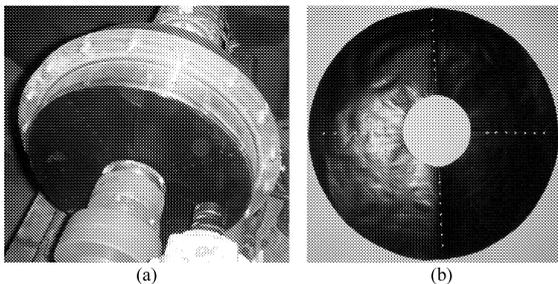


图4 标定试验及标定盘

Fig. 4 Calibration experiment and calibration plate

(a) 标定试验 (b) 标定盘

图像和孔径检测,其数据对应表 1 中的标定图像 3,另外 3 组标定图像未列出,其标定结果数据见表 1 中的标定图像 1、2 和 4。

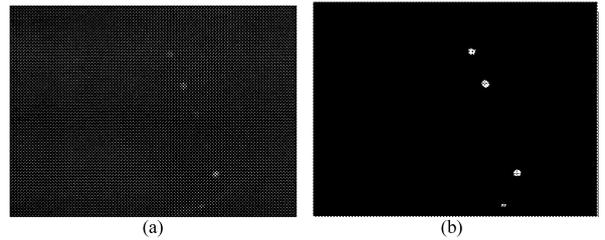


图5 圆孔原始采集图像及孔径检测

Fig. 5 Original image of holes and diameters detection

(a) 圆孔图像采集 (b) 孔径检测

利用标准孔径的实际物理尺寸和图像上检测出孔径的像素尺寸,求出单位像素所对应的物理尺寸,确定了像素与毫米之间的对应关系,获得了标定系数(表 1)。将各组数据取均值后确定 1 像素大约对应 0.215 mm。

表 1 标定结果

Tab. 1 Calibration results

标定图像	图像检测 直径/像素	实际物理 直径/mm	标定系数 $\kappa$ / $\text{mm} \cdot \text{像素}^{-1}$
1	9.641	2	0.207 4
	9.641	2	0.207 4
2	9.373	2	0.213 4
	9.641	2	0.207 4
3	8.667	2	0.230 8
	9.373	2	0.213 4
4	9.167	2	0.218 2
	9.167	2	0.218 2
均值	9.292	2	0.215 2

## 2.3 流速提取

基于 PIV 互相关算法提取液力耦合器内部流场分布。对于原始采集图像进行图像预处理以改善图像质量,首先将原始图像转换为灰度图像,见图 6。然后进行 PIV 相关计算参数设置。为了提高互相关算法的运算速度,对于图像中不存在示踪粒子的区域采用掩膜处理将其覆盖,减少进行互相关计算的时间,以提高运算效率,见图 7。使用互相关算法提取流速的过程中,查询域尺寸的选择很重要。如果尺寸太大,将会引入较大的干扰噪声,不能准确地计算出流速,同时还会增加计算量,降低图像处理速度;如果尺寸太小,则粒子可能不在查询域或搜索域中,粒子匹配的信息不够全面,计算

结果不可靠。因此,合理选择查询域和搜索域,对于提高互相关算法的计算精度和速度意义重大。本文互相关计算选择查询域大小为 32 像素 × 32 像素,见图 8。

在第 1 帧图像上选择查询域,以一定的搜索路径在第 2 帧图像上进行区域搜索,找到最为匹配的区域,确定查询域的平均运动位移。图像采集系统中 CCD 摄像机每秒采集 25 帧图像,由此确定连续两帧图像的时间间隔为 0.04 s。最终获得区域的平均运动速度,并以该速度代替这个区域中心点的速度。经过互相关计算后获得液力偶合器在制动工况下的流速大小与流场分布见图 9。

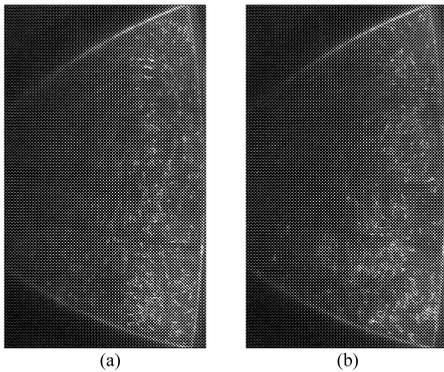


图 6 灰度化处理  
Fig. 6 Gray-scale processing  
(a) 第 1 帧 (b) 第 2 帧

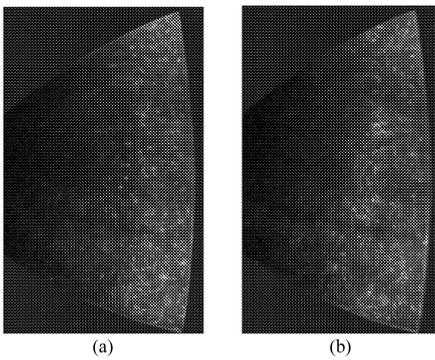


图 7 掩膜处理  
Fig. 7 Mask processing  
(a) 第 1 帧 (b) 第 2 帧

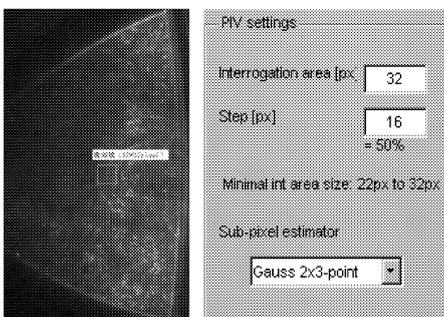


图 8 查询域大小选择  
Fig. 8 Interrogation area size

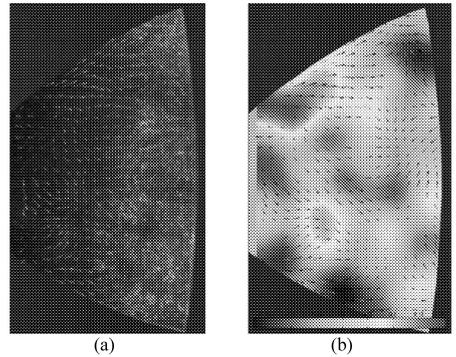


图 9 互相关计算结果  
Fig. 9 Results by cross-correlation  
(a) 流速提取 (b) 速度矢量场

### 3 结果与分析

在制动工况 ( $i = 0$ ) 下,涡轮独立流道内部流动十分复杂。由于离心力的作用,泵轮流道内的液流高速流入静止不动的涡轮流道,在惯性力的作用下,涡轮内部液流的主循环沿着外环流动,从涡轮流道上部沿着周向流向流道下部,最后流出涡轮流道。在主流区域形成较大尺度的涡流,且在涡流中心区域处流速较低,形成低能量区。同时,在涡轮叶片和其外壁交汇处形成了小尺度涡流,此处液流由涡轮流回泵轮。这些不同尺度的涡流形成了泵轮和涡轮之间液流的循环流动。

在涡流区域中心处速度降低,形成局部低能量区,这将造成能量传递中的耗散,影响偶合器的工作性能。在贴近涡轮叶片处出现了反向流现象,这是由于高速液流冲击叶片受到挤压后形成的。二次流是与主流性质不同的从属流动,高速液流在偶合器叶片和外壁形成的角落处不仅出现了小尺度涡流,而且在涡轮流道下部角落处出现了二次流现象,见图 10。制动工况下涡轮内部能量大部分转化成热能耗散。液力偶合器内部液流循环流动方向受其结构影响,涡流、二次流和反向流等现象的形成受偶合器环壁、叶片和轮毂的影响。因此,合理的设计偶合

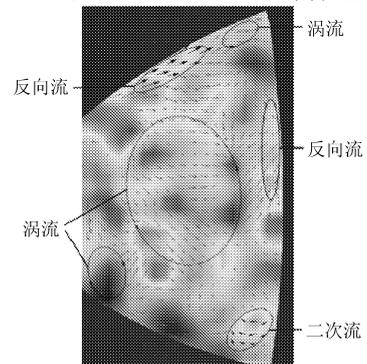


图 10 涡轮流道内流场分析  
Fig. 10 Analysis of flow field in turbine

器的内部结构,减少反向流、二次流、小尺度涡流等现象,能够降低液力偶合器能量的损失,提高其工作性能。

## 4 结论

(1) 在制动工况( $i=0$ )下,基于 PIV 互相关算法提取液力偶合器涡轮流道内速度场分布,实现了

液力偶合器内部流动可视化。

(2) 研究了制动工况( $i=0$ )下液力偶合器涡轮内部流场结构,分析了影响流场结构分布的原因。液力偶合器能量的损失与二次流、反向流和小尺度涡流等现象有关,降低这些现象的产生能够提高液力偶合器的工作性能。

## 参 考 文 献

- 1 马文星. 液力传动理论与设计[M]. 北京:化学工业出版社,2004.
- 2 范洁川. 近代流动显示技术[M]. 北京:国防工业出版社,2002.
- 3 唐洪武. 现代流动测试技术及应用[M]. 北京:科学出版社,2009.
- 4 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,2002,24(5):1~14.  
Sheng Senzhi, Xu Yueting, Yuan Huijing. New development in the technology of flow measurement over the last decade[J]. Mechanics in Engineering, 2002, 24(5): 1~14. (in Chinese)
- 5 Huitenda H, Mitra N K. Improving startup behavior of fluid couplings through modification of runner geometry: part I—fluid flow analysis and proposed improvement [J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 2000, 122(4): 683~688.
- 6 Huitenga H, Mitra N K. Improving startup behavior of fluid couplings through modification of runner geometry: part II—modification of runner geometry and its effects on the operation characteristics [J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 2000, 122(4): 689~693.
- 7 Baldassarre A, Lucia M De, Nesi P, et al. A vision-based particle tracking velocimetry [J]. Real-Time Imaging, 2001, 7(2): 145~158.
- 8 Adrian R J. Particle image velocimetry, a particle guide [M]. 2nd ed. Berlin: Springer-Verlag, 2007.
- 9 Adrian R J. Twenty years of particle image velocimetry [J]. Experiments in Fluids, 2005, 39(2): 159~169.
- 10 Adrian R J. Particle-imaging techniques for experimental fluid mechanics [J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 1991, 23(1): 261~304.
- 11 孙鹤泉,康海贵,李广伟. 基于图像互相关的 PIV 技术及其频域实现 [J]. 中国海洋平台, 2002, 17(6): 1~4.  
Sun Hequan, Kang Haigui, Li Guangwei. The frequency methods of PIV based on cross-correlation of images [J]. China of Fshore Platform, 2002, 17(6): 1~4. (in Chinese)
- 12 吴龙华,严忠民,唐洪武. DPIV 相关分析中相关窗口大小的确定 [J]. 水科学进展, 2002, 13(5): 594~598.  
Wu Longhua, Yan Zhongmin, Tang Hongwu. Determination of the correlation window sizes in correlation analysis of DPIV [J]. Advances in Water Science, 2002, 13(5): 594~598. (in Chinese)
- 13 王延颀,张永明,廖光焯. 数字粒子图像速度测量原理与实现方法 [J]. 中国科学技术大学学报, 2000, 30(3): 302~306.  
Wang Yanting, Zhang Yongming, Liao Guangxuan. The principle and realization of digital particle image velocimetry [J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2000, 30(3): 302~306. (in Chinese)

(上接第 96 页)

- 11 接鑫,李晓峰,孙亮,等. 种子玉米机械脱粒最佳施力方式试验 [J]. 农业机械学报, 2009, 40(12): 71~75, 29.  
Jie Xin, Li Xiaofeng, Sun Liang, et al. Experiment on optimal forcing method for seed-corn thresher [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(12): 71~75, 29. (in Chinese)
- 12 李心平,高连兴. 种子玉米籽粒果柄断裂机理试验研究 [J]. 农业工程学报, 2007, 23(11): 47~51.  
Li Xinping, Gao Lianxing. Experimental study on breaking mechanism of kernel stem of corn seed [J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(11): 47~51. (in Chinese)
- 13 袁月明,栾玉振. 玉米籽粒力学性质的试验研究 [J]. 吉林农业大学学报, 1996, 18(4): 75~78.  
Yuan Yueming, Luan Yuzhen. Experimental investigation of mechanical properties for corn kernels [J]. Journal of Jilin Agricultural University, 1996, 18(4): 75~78. (in Chinese)