

# 基于粒子图像测速技术的液力偶合器漩涡流动特性研究

柴博森, 刘春宝<sup>\*</sup>

(吉林大学机械科学与工程学院, 长春 130022)

**摘 要:** 液力偶合器内部流动特性对能量的高效传递非常重要。深入研究液力偶合器内部流动机理和流场结构分布, 对于优化液力偶合器腔型结构并进一步提高其工作性能具有重要意义。液力偶合器的内部流场是具有多种流动结构和多种物理效应并存的流场, 存在多种复杂的流动现象, 尤其在制动工况下液力偶合器涡轮内部流动是一种特殊的漩涡流动。为了研究制动工况下涡轮独立流道内漩涡流动的产生与运动, 基于粒子图像测速技术 (particle image velocimetry, PIV) 采集涡轮径向切面流动图像。通过灰度化增强、阈值分割、边缘检测、锐化等图像处理技术识别涡轮内部大尺度漩涡流动, 定性分析流场结构分布; 采用连续帧图像互相关算法定量提取涡轮内部速度场和涡量场, 研究涡轮内部小尺度漩涡流动; 分析漩涡流动产生的原因及其对液力偶合器能量传递的影响; 讨论不同尺度涡旋发展变化的过程, 通过涡量场分布结果研究流体能量耗散。分析涡轮近壁面流动区域上的漩涡流动, 证明壁面边界区域上的相对涡量将对能量耗散产生重要影响。通过 PIV 试验研究实现了涡轮内部漩涡流动可视化与流动参数定量提取, PIV 试验研究结果可为液力偶合器内部流动机理研究提供参考。

**关键词:** 流体力学, 涡流, 可视化, 粒子图像测速, 液力偶合器, 速度场, 涡量场

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2013.23.012

中图分类号: TH137.332

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2013)-23-0086-07

柴博森, 刘春宝. 基于粒子图像测速技术的液力偶合器漩涡流动特性研究[J]. 农业工程学报, 2013, 29(23): 86-92.

Chai Bosen, Liu Chunbao. Study on vortex flow characteristics of hydrodynamic coupling based on particle image velocimetry technique[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(23): 86-92. (in Chinese with English abstract)

## 0 引 言

液力偶合器的工作性能是由其内部流动特性所决定的, 深入研究其内部流动机理及流动特性对于液力偶合器性能改进和结构优化设计是极为重要的<sup>[1-4]</sup>。液力偶合器的内部流场是具有多种流动结构和多种物理效应并存的流场, 尤其在制动工况下, 涡轮内部流动是多种漩涡流动相互作用的流场, 存在多种复杂的流动现象, 如涡旋、二次流、附面层分离流和反向流等<sup>[5-6]</sup>。这些复杂的流动现象对液力偶合器的性能具有重大影响。研究液力偶合器内漩涡流动的产生和发展变化过程, 分析漩涡流动对能量传递、耗散的影响, 将有助于深入理解其内部流动机理。

试验研究是探索液力偶合器内部流动规律和机理的重要方法<sup>[7]</sup>。国内外学者一直很重视从试验测量的角度研究液力偶合器内部流动特性。德国德累斯顿工业大学教授 Michael Christen 和德国福伊特公司工程师 Reinhard Kernchen 基于激光多普勒测速 (laser Doppler velocity measurement, LDV) 技术对 422TW 型液力偶合器进行了内部流场测量, 研究了在不同转速下液力偶合器内流动速度分布<sup>[8]</sup>。国内以马文星教授为核心的研究团队基于激光流场测量技术实现了液力偶合器内部流动可视化和流速定量测量<sup>[9-10]</sup>。从文献查阅角度来看, 虽然在液力偶合器内部流动测量方面已经取得了很多科研成果, 但是对于液力偶合器内部漩涡流动这种复杂流动现象的研究却鲜见报道。随着光学技术、计算机技术和图像处理技术的飞速发展, 粒子图像测速 (particle image velocimetry, PIV) 技术作为一种新型流动可视化技术应用在液力偶合器内部流动测量上。对于流场速度梯度较大且存在漩涡流动的复杂流场, PIV 技术能够实现全流场瞬时测量<sup>[11-15]</sup>。

液力偶合器处在制动工况下, 基于 PIV 技术采集涡轮径向切面流动图像, 通过图像处理技术识别漩涡流动特征; 采用连续帧图像互相关计算提取流

收稿日期: 2013-05-09 修订日期: 2013-09-04

基金项目: 教育部高等学校博士学科点专项基金项目 (20100061120057) 和吉林大学基本科研业务费青年教师创新项目 (450060491423) 联合资助。

作者简介: 柴博森 (1984-), 男 (汉族), 吉林长春人, 讲师, 博士。研究方向: 液力传动与自动变速。长春 吉林大学机械科学与工程学院, 130022。Email: chaibos2012@jlu.edu.cn

<sup>\*</sup>通信作者: 刘春宝 (1979-), 男 (汉族), 河北徐水人, 副教授, 博士。研究方向: 液力传动与自动变速。长春 吉林大学机械科学与工程学院, 130022。Email: liuanbc@126.com

动参数, 可视化速度场和涡量场; 研究多尺度漩涡流动产生及发展变化过程, 并进一步分析漩涡流动对能量传递和耗散的影响。通过 PIV 试验测量实现涡轮内部漩涡流动可视化与流动参数量化提取, 为深入理解其内部流动机理提供参考。

## 1 流场测量系统

### 1.1 系统装置

整个系统装置主要包括机械部分、光学部分和图像采集与显示部分。机械部分由调频电动机、联轴器、转速传感器和负载施加装置组成, 用于液力偶合器动力驱动和载荷施加, 并测量泵轮输入轴转速和涡轮输出轴转速, 以模拟液力偶合器的实际工况, 见图 1。光学部分由氩离子连续激光器、机械斩波装置、球面镜和柱面镜组成, 用于形成激光脉冲片光将液力偶合器待测流场区域照亮。图像采集与显示部分由高清 CCD (charge-coupled device) 相机、图像采集卡、同步器和计算机组成, CCD 相机采集液力偶合器内部流动图像, 通过图像采集卡转换, 将流动图像信息全部传递到计算机以进行后续图像信息处理。

试验测量对象为透明型液力偶合器模型样机, 按实际液力偶合器大小以 1:1 比例制作, 材质选择为有机玻璃。液力偶合器样机腔型为矩形腔, 循环圆直径为 230 mm, 泵轮内直叶片数量 13, 涡轮内直叶片数量 11。



图 1 试验测试系统中机械部分

Fig.1 Mechanical parts of experimental test system

### 1.2 示踪粒子

选取合适的示踪粒子是非常重要的, 主要考虑 3 点: ①流动跟随性; ②成像可见性; ③散布均匀度和浓度要求<sup>[16]</sup>。

流动跟随性是指粒子跟随流体运动的能力, 它取决于粒子的尺寸、密度和形状。在成像系统分辨率范围内, 粒子直径越小, 其跟随性越好<sup>[17-18]</sup>, 但是成像可见性却与其相反。成像可见性与激光功率和粒子散射性有关。激光功率越强, 散射信号越强, 不过仅仅考虑增加激光光强不一定经济有效, 而且

还会影响激光器的使用可靠性。散射性与粒子直径、形状、粒子所在激光片光区域内的位置以及流体介质折射指数有关。在散射强度范围内, 散射信号强度和粒子直径的平方成正比。粒子表面越光亮, 散射信号质量越好<sup>[19-20]</sup>。流动跟随性和成像可见性的条件是互相制约的, 要根据实际测量情况选择合适的粒径大小。根据以上要求, 试验中示踪粒子采用铝粉, 粒径约为 0.8 mm。满足散布均匀度和浓度要求, 才能保证全流场流速测量。如果粒子浓度较低, 那么获取流动信息不够丰富, 将影响局部流动信息提取; 如果粒子浓度较高, 粒子之间彼此互相影响和重叠, 不仅会影响图像采集质量, 导致测量精度下降, 而且还容易形成固液两相流, 导致问题复杂化。

## 2 流动图像采集与流速提取

### 2.1 图像采集方案

以蒸馏水作为液力偶合器传动介质充满腔体。图像采集区域为涡轮内相邻两叶片之间形成的独立流道。激光片光将测量区域照亮, 控制片光厚度为 1~2 mm。CCD 相机光轴垂直于激光片光, 相机镜头距离激光片光 18 mm, 保证相机采集范围覆盖整个独立流道测量区域, 流动图像采集方案见图 2。为了分析制动工况下涡轮内多尺度漩涡流动现象, 旨在从整体到局部更详细地分析漩涡流动产生和发展的过程, 所以按投入到流场中示踪粒子浓度的不同, 分别采用粒子跟踪测速模式和粒子图像测速模式分别采集中等粒子浓度下和较高粒子浓度下的流动图像。

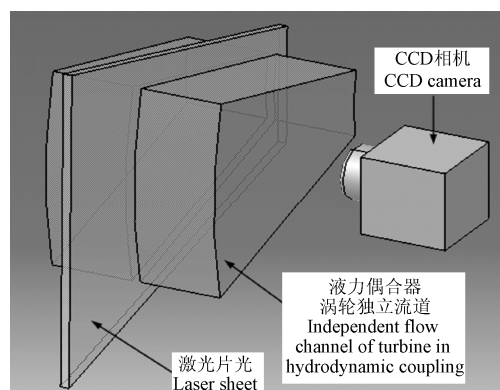


图 2 流动图像采集方案

Fig.2 Capture program of flow image

### 2.2 中等粒子浓度下图像采集与流速识别

#### 2.2.1 图像采集

中等粒子浓度下, CCD 相机能够识别单个示踪粒子在流场中的运动轨迹。设定泵轮输入轴转速为 100 r/min, 涡轮输出轴制动。基于粒子跟踪测速模

式采集涡轮径向切面流动图像,记录单帧图像上示踪粒子的运动轨迹<sup>[21]</sup>,见图3。

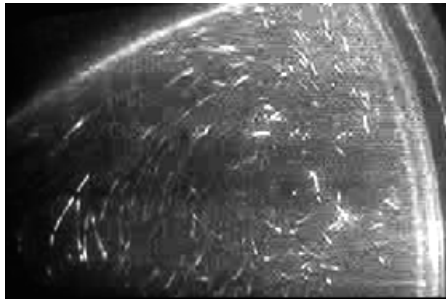


图3 中等粒子浓度下涡轮径向切面流动图像  
Fig.3 Flow image of radial cross-section under medium particle concentration

### 2.2.2 流速识别

为了提取原始采集流动图像中的有效信息,需要对图像进行处理,具体步骤如下:①采用图像灰度化增强,突显粒子运动轨迹的亮度;②采用图像阈值分割处理,将粒子与图像背景完全分开;③基于 Canny 边缘检测算法提取粒子运动轨迹边缘,采用反锐化掩模法对边缘像素进行锐化处理<sup>[22-23]</sup>。通过以上动态图像处理过程使粒子运动轨迹清晰易于识别,见图4。

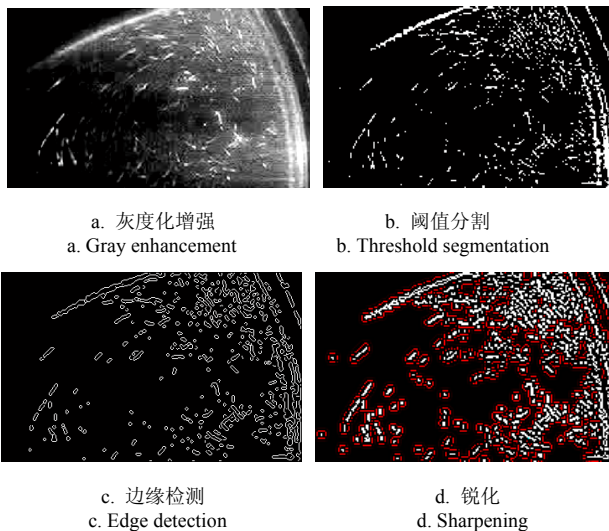


图4 图像处理  
Fig.4 Image processing

在图像处理的基础上,结合涡轮内整体流动趋势判别流速方向,见图5。涡轮独立流道内部存在明显的整体漩涡流动,流动的主流趋势是沿着涡轮内外壁和叶片形成的巨大环流。由于示踪粒子浓度不高,所以粒子运动反馈的流动信息不够充分,全场区域范围内流动细节体现的并不完整。因此,需要进行较高粒子浓度下图像采集,获取更丰富、更全面的流动数据。



图5 粒子跟踪测速模式流场可视化结果  
Fig.5 Flow visualization of particle tracking velocimetry

## 2.3 较高粒子浓度下图像采集与流速提取

### 2.3.1 图像采集

较高粒子浓度下,泵轮输入轴转速为 114 r/min,基于粒子图像测速模式采集涡轮径向切面流动图像。涡轮独立流道内充盈的示踪粒子布满整个待测流场区域,粒子流动信息更加丰富。相对于中等粒子浓度下图像采集结果,较高粒子浓度下采集的单帧流动图像未能直接反映粒子在流场中位移的变化,需要分析连续帧图像间粒子运动位置变化以实现流速提取。图6为选取的连续2帧粒子图像。

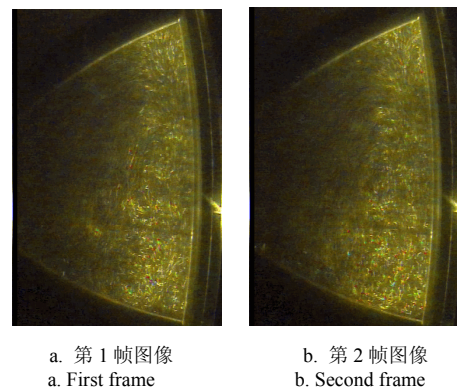


图6 涡轮径向切面连续帧粒子图像  
Fig.6 Successive frames of radial cross-section

### 2.3.2 流速识别与提取

基于连续帧粒子图像互相关计算实现较高粒子浓度下流速识别与提取<sup>[24-29]</sup>。连续帧图像互相关计算属于统计学方法,其基本原理见图7。

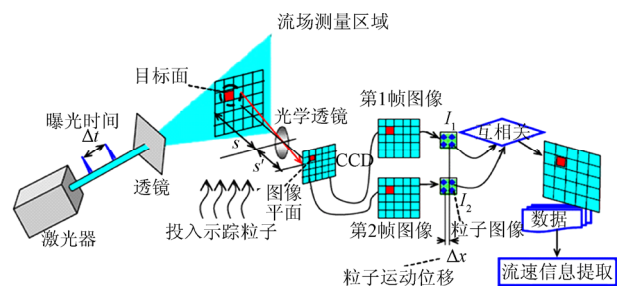


图7 连续帧图像互相关计算的基本原理  
Fig.7 Principle of cross-correlation calculation between two successive frames



将连续 2 帧粒子图像划分成若干个大小尺寸一致的小区域, 见图 7 中红色区域, 定义这些小区域为查询域。比较第 1 帧图像中每个查询域与第 2 帧图像中位置对应的查询域。 $I_1(x, y)$  表示第 1 帧图像中查询域图像灰度值,  $I_2(x+\Delta x, y+\Delta y)$  表示第 2 帧图像中所对应的查询域图像灰度值, 其中  $(\Delta x, \Delta y)$  为第 2 帧图像中查询域相对于第一帧图像查询域的中心移动距离。对于每对可能重叠的查询域, 通过构造它们之间欧式距离的平方和, 寻找最相似 2 个查询域位置变化, 进而求解中心移动距离, 定义欧式距离函数  $R_e(\Delta x, \Delta y)$  如下

$$R_e(\Delta x, \Delta y) = \sum_{x=0}^{X-1} \sum_{y=0}^{Y-1} [I_1(x, y) - I_2(x + \Delta x, y + \Delta y)]^2 \quad (1)$$

$$(x=0, 1, 2, \dots, X-1, \quad y=0, 1, 2, \dots, Y-1)$$

将式 (1) 展开得

$$R_e(\Delta x, \Delta y) = \sum_{x=0}^{X-1} \sum_{y=0}^{Y-1} [I_1(x, y)^2 - 2I_1(x, y) \cdot I_2(x + \Delta x, y + \Delta y) + I_2(x + \Delta x, y + \Delta y)^2] \quad (2)$$

式 (2) 中第一项  $I_1(x, y)^2$  是一个常量, 它与位移  $\Delta x$  和  $\Delta y$  没有关系; 最后一项  $I_2(x+\Delta x, y+\Delta y)^2$  中虽然含有位移  $\Delta x$  和  $\Delta y$ , 但是它却只和第二帧图像有关; 只有式 (2) 中间项  $I_1(x, y) \cdot I_2(x+\Delta x, y+\Delta y)$  同时涉及到连续两帧图像信息。由此定义连续两帧图像之间的互相关计算函数为

$$R(s, t) = \sum_{x=0}^{X-1} \sum_{y=0}^{Y-1} I_1(x, y) I_2(x + \Delta x, y + \Delta y) \quad (3)$$

式中,  $s$  和  $t$  为相似查询域对之间的位移量。

为了提高图像互相关计算的精度和效率, 构建归一化互相关函数, 定义如下

$$R(\Delta x, \Delta y) = \frac{\sum_{x=0}^{X-1} \sum_{y=0}^{Y-1} I_1(x, y) \cdot I_2(x + \Delta x, y + \Delta y)}{\left[ \sum_{x=0}^{X-1} \sum_{y=0}^{Y-1} I_1(x, y)^2 \cdot \sum_{x=0}^{X-1} \sum_{y=0}^{Y-1} I_2(x + \Delta x, y + \Delta y)^2 \right]^{1/2}} \quad (4)$$

基于“归一化”互相关算法对连续 2 帧粒子图像进行相关匹配计算; 采用等效外部标定方法计算图像放大率, 确定 1 pixel 约为 0.24 mm; CCD 相机帧频  $f_p=25$  帧/s, 由此确定连续两帧粒子图像间时间间隔  $\Delta t=0.04$  s<sup>[30]</sup>。提取涡轮径向切面流场速度矢量分布, 见图 8, 在全流场区域上, 由于存在漩涡流动导致流场分布不均匀, 局部流速较大, 整体流动

趋势是绕着涡轮内外壁和叶片的一种环流。

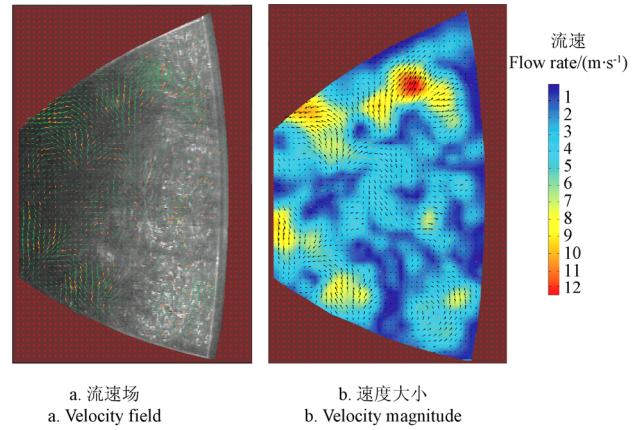


图 8 流场速度矢量分布

Fig.8 Distribution of flow velocity

### 3 涡轮内部漩涡流动分析

#### 3.1 涡量场提取

试验测量过程中观察到液力偶合器涡轮独立流道内部流动伴随有大量漩涡运动。漩涡常用涡量来表示其大小和方向, 漩涡运动的出现往往伴随着流动能量耗散<sup>[31]</sup>。速度场和涡量场是整个流场特性分析中的重要组成部分, 彼此之间相互联系。定义速度场旋度  $\text{rot} \vec{V}$  的一半为流场涡量  $\vec{\omega}$ 。分析涡轮内部涡量场分布能直观反映其内部漩涡流动状态, 对于理解和分析液力偶合器内部流动机理和能量耗散具有重要意义。

简化二维切面流场内流体运动, 分析垂直于平面  $XY$  涡量, 基于斯托克斯定理提取涡量公式如下

$$\omega = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \quad (5)$$

式中,  $v$ 、 $u$  分别为  $X$  和  $Y$  方向上的速度分量, m/s。

由于 PIV 流场计算结果是每个查询域中心点的速度矢量, 为了实现该点处涡量计算, 需要确定涡量中心点  $(i, j)$  周围的其他 8 个点及其坐标, 采用最小二乘法计算涡量, 将避免局部漩涡流动对整体流动的波动效果<sup>[32]</sup>。最小二乘法实现涡量计算式如下

$$\omega_{i,j} = \frac{1}{10\Delta x} (2v_{i+2,j} + v_{i+1,j} - v_{i-1,j} - 2v_{i-2,j}) - \frac{1}{10\Delta y} (2u_{i,j+2} + u_{i,j+1} - u_{i,j-1} - 2u_{i,j-2}) \quad (6)$$

式中,  $\omega_{i,j}$  为坐标点  $(i, j)$  处的涡量,  $s^{-1}$ 。

根据以上理论分析, 提取涡轮径向切面的涡量场分布, 见图 9。

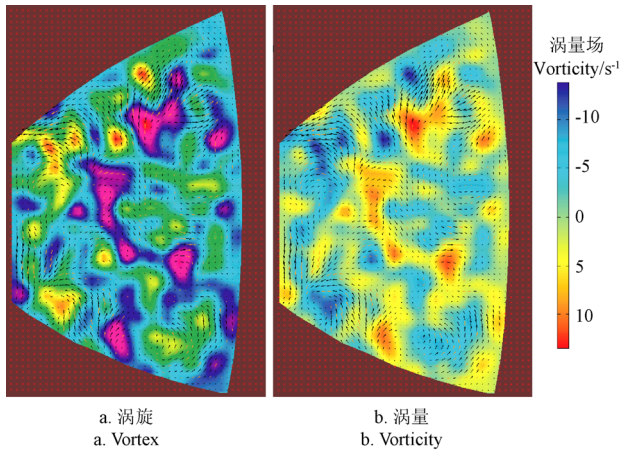


图9 涡量场  
Fig.9 Vorticity field

### 3.2 结果分析与讨论

由于高速液流惯性力和涡轮内部结构阻力的相互作用,导致流道内部出现了不同尺度的漩涡流动,造成流动形式的多样性和复杂性。涡轮内部主流趋势形成大尺度漩涡流动,漩涡中心流速较低;小尺度漩涡出现在涡轮流道外环与叶片交汇角落处,这些小尺度漩涡运动趋势与流道内主流趋势保持一致,分析结果见图10。由于多尺度漩涡之间彼此相互作用,漩涡流动的旋转能量由大尺度漩涡传递给小尺度漩涡,最终由于小尺度漩涡黏性应力将旋转动能转化成热能而耗散,这与大涡数值模拟计算理论保持一致性。因此,漩涡流动的产生将一定伴随有流动能量损耗,影响液力偶合器能量传递。

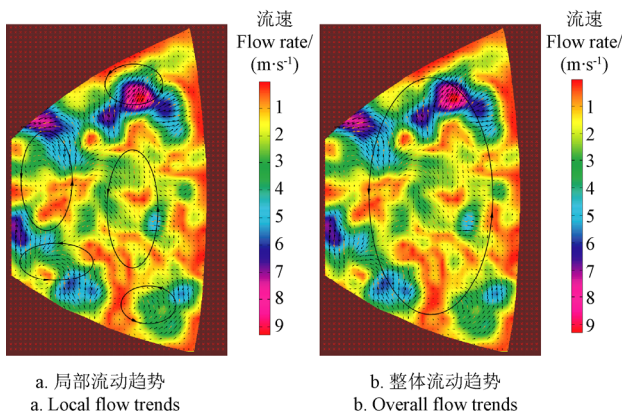


图10 涡轮内部流动趋势  
Fig.10 Flow trends of turbine

流场局部边界处相对涡量和整体流场旋转角速度之间的关系能够反映漩涡流动对能量耗散的影响。如果相对涡量和旋转角速度方向相同,那么两矢量彼此叠加,将加剧漩涡流动,增强流体能量耗散,此时机械能转化为大量热能,使液流温度上升;如果相对涡量和旋转角速度矢量方向不同,那

么两矢量叠加的结果将减弱漩涡流动趋势,降低流体能量耗散。选择液力偶合器轴向为Z轴,涡轮内部流动趋势沿逆时针方向,对比涡轮内局部流动趋势和整体流动趋势,见图10。可以看出在涡轮外环与叶片交汇处,以及轮毂和叶片交汇处,出现较大尺度漩涡流动,这些漩涡的涡量与整体漩涡流动的旋转角速度相同,矢量彼此叠加使能量耗散加剧。因此,制动工况下应尽量减少这样局部小尺度漩涡的出现,降低流动区域上绕流能量的损失。

## 4 结 论

1) 基于PIV技术可视化涡轮内部漩涡流动,通过图像处理技术定量地提取了涡轮流道内流速场和涡量场,由于高速液流惯性力和因腔型结构所引起阻力的相互作用,导致出现多尺度漩涡流动。

2) 对比分析了涡轮流场内局部漩涡流动与整体漩涡流动,发现小尺度漩涡流动的运动趋势与流道内主流运动趋势基本保持一致。流道内流体能量由大尺度漩涡传递给小尺度漩涡,并最终以更小尺度漩涡形式而耗散,验证了大涡数值模拟计算理论的正确性。

3) 通过对涡轮近壁面流动分析,证明壁面边界区域上的相对涡量将对能量耗散产生重要影响。如果相对涡量与流道漩涡流动旋转角速度方向相同,则将加剧导致流体能量损失。相对涡量的出现和漩涡流动的发展变化与腔型结构有直接关系。

4) 通过连续帧图像之间相关计算提取到涡轮瞬态流动图谱,能够反映瞬时涡轮内部复杂流动状态变化,但是对于分析涡轮内连续流动状态变化还需进一步深入研究。

### [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.  
Ma Wenxing. Theory and Design of Hydrodynamic Transmission[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004. (in Chinese with English abstract)
- [2] 刘应诚, 杨乃乔. 液力偶合器应用与节能技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.  
Liu Yingcheng, Yang Naiqiao. Application and Energy Saving Technology of Hydrodynamic Coupling[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006. (in Chinese with English abstract)
- [3] 刘应诚. 液力偶合器实用手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.  
Liu Yingcheng. Practical Handbook of Hydrodynamic Coupling[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2008. (in Chinese with English abstract)
- [4] 杨贵华. 液力传动节能装置: 液力偶合器、液黏调速

- 离合器[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010.
- Yang Guihua. Energy Saving Devices of Hydrodynamic Transmission: Hydrodynamic Coupling, Hydroviscous Variable Speed Clutch[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2010. (in Chinese with English abstract)
- [5] Huitenga H, Mitra N K. Improving start-up 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): 638—688.
- [6] Huitenga H, Mitra N K. Improving start-up 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] 马文星, 何延东, 刘春宝. 液力传动研究现状分析与展望[J]. 农业机械学报, 2008, 39(7): 51—55.
- Ma Wenxing, He Yandong, Liu Chunbao. Situation and prospects of research on hydrodynamic transmission[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(7): 51—55. (in Chinese with English abstract)
- [8] Christen M, Kernchen R. Fluid velocity in constant fill turbo couplings: measurements using laser doppler velocimetry[J]. Antriebstechnik, 2001, 40: 71—74. (in Chinese with English abstract)
- [9] 柴博森, 马文星, 卢秀泉, 等. 基于粒子跟踪测速技术的液力偶合器内部流速测定方法[J]. 农业工程学报, 2011, 27(7): 140—145.
- Chai Bosen, Ma Wenxing, Lu Xiuquan, et al. Internal flow velocimetry of hydraulic coupling based on particle tracking velocimetry technology[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(7): 140—145. (in Chinese with English abstract)
- [10] Bosen Chai, Wenxing Ma, Chunbao Liu. Analysis of internal flow field in fluid coupling based on numerical simulation and experimental measurement[C]// Proceedings of the 2011 International Conference on Fluid Power and Mechatronics, 2011: 742—747.
- [11] Adrian R J. Twenty years of particle image velocimetry[J]. Experiments in Fluids, 2005, 39(2): 159—169.
- [12] Adrian R J. Particle Image Velocimetry[M]. A Particle Guide, second Edition, Springer, 2007.
- [13] Adrian R J. Particle imaging techniques for experimental fluid mechanics[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 1991, 23: 261—304.
- [14] 唐洪武. 现代流动测试技术及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- Tang Hongwu. Modern Flow Measurement Technique and Application[M]. Beijing: Science Press, 2009. (in Chinese with English abstract)
- [15] Stanislas M, Okamoto K, Kahler C J, et al. Main results of the second international PIV challenge[J]. Experiments in Fluids, 2005, 39(3): 170—191.
- [16] 阮驰, 孙传东, 白永林, 等. 水流场 PIV 测试系统示踪粒子特性研究[J]. 实验流体力学, 2006, 20(2): 72—77.
- Ruan Chi, Sun Chuandong, Bai Yonglin, et al. The characteristics of the tracer particles used in water flow field for PIV system[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2006, 20(2): 72—77. (in Chinese with English abstract)
- [17] 严敬, 杨小林, 邓万权. 示踪粒子跟随性讨论[J]. 农业机械学报, 2005, 36(6): 54—56.
- Yan Jing, Yang Xiaolin, Deng Wanquan. Analysis on following features of tracer particles[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(6): 54—56. (in Chinese with English abstract)
- [18] 李恩邦, 李志平, 李淳. 湍流中示踪粒子跟随性的数值分析[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(2): 225—231.
- Li Enbang, Li Zhiping, Li Chun. Numerical analysis of following behaviors of particle tracers in turbulent[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009, 30(2): 225—231. (in Chinese with English abstract)
- [19] Adrian R J. Scattering particle characteristics and their effect on pulsed laser measurements of fluid flow: Speckle velocimetry vs. particle image velocimetry[J]. Appl Opt, 1984, 23(11): 1690—1691.
- [20] 张伟, 路远, 杜石明, 等. 球形粒子 Mie 散射特性分析[J]. 光学技术, 2010, 36(6): 936—939.
- Zhang Wei, Lu Yuan, Du Shiming, et al. Analysis of characteristics of Mie scattering[J]. Optical Technique, 2010, 36(6): 936—939. (in Chinese with English abstract)
- [21] Mark K, David R, Alex L. Real-time image processing for particle tracking velocimetry[J]. Experiments in Fluids, 2010, 48(1): 105—110.
- [22] Cann Y J. A computational approach to edge detection[J]. IEEE Trans Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1986, 8(6): 679—698.
- [23] 李牧, 闫继红, 李戈. 自适应 Canny 算子边缘检测技术[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2007, 28(9): 1002—1007.
- Li Mu, Yan Jihong, Li Ge. Self-adaptive canny operator edge detection technique[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2007, 28(9): 1002—1007. (in Chinese with English abstract)
- [24] Westerweel J. Fundamentals of digital particle image velocimetry[J]. Measurement Science and Technology, 1997, 8(12): 1379—1392.
- [25] Keane R D, Adrian R J. Theory of cross-correlation analysis of PIV images[J]. Applied Scientific Research, 1992, 49(3): 191—215.
- [26] Piirto M, Eloranta H, Saarenrinne P, et al. A comparative study of five different PIV interrogation algorithms[J]. Experiments in Fluids, 2005, 39(3): 571—588.
- [27] Susset A, Most J M, Honore D. A novel architecture for a super-resolution PIV algorithm developed for the

- improvement of the resolution of large velocity gradient measurements[J]. *Experiments in Fluids*, 2006, 40: 70—79.
- [28] Theunissen R, Scarano F, Riethmuller M L. On improvement of PIV image interrogation near stationary interfaces[J]. *Experiments in Fluids*, 2008, 45: 557—572.
- [29] 张伟, 葛耀君, 杨泳昕. 粒子图像测速技术互相关算法研究进展[J]. *力学进展*, 2007, 37(3): 443—452.  
Zhang Wei, Ge Yaojun, Yang Yongxin. Research progress of cross correlation algorithms in particle image velocimetry[J]. *Advances in Mechanics*, 2007, 37(3): 443—452. (in Chinese with English abstract)
- [30] 柴博森. 液力耦合器内部流动可视化与流速识别方法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2012.
- Chai Bosen. Study on Visualization of Internal Flow in Hydrodynamic Coupling and Recognition Method of Flow Velocity[D]. Changchun: Jilin University, 2012. (in Chinese with English abstract)
- [31] Václav K. Vortex Identification: New Requirements and Limitations[J]. *Heat and Fluid Flow*, 2007, 28: 638—652.
- [32] 陈波, 李万平. 移动最小二乘法在 PIV 迭代过程中的应用[J]. *华中科技大学学报: 自然科学版*, 2012, 40(1): 104—112.
- Chen Bo, Li Wanping. Application of moving least square filter to iterative image deformation method in PIV[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology: Nature Science*, 2012, 40(1): 104—112. (in Chinese with English abstract)

## Study on vortex flow characteristics of hydrodynamic coupling based on particle image velocimetry technique

Chai Bosen, Liu Chunbao<sup>\*</sup>

(College of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China)

**Abstract:** It is very important to study internal flow characteristics of hydrodynamic coupling for its high efficient energy transmission. Consequently, it has great significance for us to study the internal flow mechanism and flow distribution of hydrodynamic coupling deeply. Based on this theoretical analysis, the cavity structure of hydrodynamic coupling can be further optimized, and it has great significance to enhance the performance of hydrodynamic coupling. A variety of flow structures and many physical effects will coexist in the internal flow field of hydrodynamic coupling, and there are many complex flow phenomena. Especially on braking condition, internal flow of turbine is a special kind of vortex flow. In order to study the generation and movement of vortex flow in the independent flow channel, flow images of radial cross-section in turbine was captured based on particle image velocimetry (PIV) technology. The large-scale vortices were identified by image processing techniques, including gray enhancement, threshold segmentation, edge detection and image sharpening. Based on this, the direction of flow velocity was identified and extracted clearly. The distributions of flow field were qualitative analyzed. The flow field and vorticity field were extracted through successive frames of image cross-correlation algorithm, and the small-scale vortices were discussed. The reasons of vortices generation and their impacts on energy transmission were analyzed. The development process of different scale vortices was discussed. The energy dissipation of flow was studied through distribution results of vorticity field. On the near-wall flow region of turbine, vortex flow was analyzed. Based on this, relative vorticity on the wall boundary region might have an important impact on the energy dissipation. The flow visualization of vortices and quantitative extraction of flow parameters were achieved by PIV technology and a valuable reference for the internal flow mechanism of hydrodynamic coupling was provided by PIV experimental results.

**Key words:** fluid mechanics, vortex flow, visualization, particle image velocimetry (PIV), hydrodynamic coupling, flow field, vorticity field

(责任编辑: 信世强)