

文章编号 1004-924X(2013)08-2079-08

## 液浮转子式陀螺的间隙流场

唐飞<sup>1\*</sup>, 师玉鹏<sup>1</sup>, 王晓浩<sup>1,2</sup>

- (1. 清华大学精密仪器系精密测试技术与仪器国家重点实验室, 北京 100084;
2. 重庆大学新型微纳器件与系统技术国家重点学科实验室, 重庆 400030)

**摘要:**研究了液浮转子式陀螺仪转子在高速转动时其间隙流场的流动状态。采用计算流体力学中的雷诺应力模型,对陀螺仪转子与定子间的封闭流场进行数值模拟,并运用粒子成像测试技术(Micro PIV)观测运动流场,测量液浮陀螺的间隙流场速度。模拟结果表明,转子上下表面与侧壁面均形成了不同类型的二次流动,该现象随转速及空间尺寸的增大而增强;当转速增大到 7 500 r/min 时,二次流速可达到 0.3 m/s,故减小空间尺寸有利于提高转子的运动稳定性。另外,文中给出了运用粒子成像测试技术(Micro PIV)得到的流场矢量分布与流线分布图。实验证实, Micro PIV 测试技术可实现对转子转速在 0~1 000 r/min 内的流场速度的精确观测,满足限域空间内对高速运动流场的非接触测量要求。

**关键词:**液浮转子式陀螺;流场;数值模拟;粒子成像测速

**中图分类号:** TP212.12; TB937 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132108.2079

## Gap flow field of liquid floating rotor gyro

TANG Fei<sup>1\*</sup>, SHI Yu-peng<sup>1</sup>, WANG Xiao-hao<sup>1,2</sup>

- (1. State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Department of Precision Instruments Tsinghua University, Beijing 100084, China;
  2. National Key Laboratory of Fundamental Science of Micro/Nano Device and System Technology, Chongqing University, Chongqing 400030, China)
- \* Corresponding author, E-mail: tangf@mail.tsinghua.edu.cn

**Abstract:** The flowing state of liquid medium for the rotor at high-speed rotation in a suspended rotor gyroscope was explored. The Reynolds stress model of hydromechanics was adopted to simulate the closed flow field between the rotor and the stator, and the Micro Particle Image Velocimetry (Micro PIV) technology was used to observe the motion of flow field and to measure the speed of flowing field. The simulation results indicate that the upper and lower surfaces of the rotor form different types of secondary flows with sidewall surfaces, and this phenomenon is enhanced with the increase of velocity and spatial dimensions. When the speed of the rotor increases to 7 500 r/min, the speed of secondary flow reaches 0.3 m/s, which means that reducing space dimensions helps to improve the motion stability of the rotor. The experiment proves that Micro PIV technology is capable of accurate observation of the flow velocity with the rotor speed at 0—1 000 r/min, and can meet the require-

收稿日期:2013-03-12;修订日期:2013-04-17.

基金项目:国家重大科学研究计划资助项目(No. 2012CB934103)

ments of non-contact test of the flow field.

**Key words:** liquid floating rotor gyroscope; flow field; numerical simulation; Particle Image Velocimetry(PIV)

## 1 引言

陀螺传感器是以自身为基准,用来检测运动物体的摆动方位及偏移基准的一种装置,通常用在飞机、船舶、汽车、机器人等运动物体的方位、摇摆度、位置距离等检测<sup>[1]</sup>。

悬浮转子式陀螺仪是利用电磁力(或静电力)悬浮使检测质量与衬底分开以消除摩擦力对转子影响的陀螺仪。这种设计有效地提高了陀螺的精度,减小了磨损和功耗,并可实现双轴角速度和三轴加速度的测量<sup>[2]</sup>。研究人员发现,通过对转子与定子之间的区域填充液体,可改善转子的运动稳定性,并且转子速度越高,稳定性改善越明显。

间隙层的流场特性对陀螺仪的性能有着直接的影响。过多的湍流现象不仅会降低转子运动的稳定性,而且增大了流场阻力,消耗了陀螺转子的驱动功率。此外,湍流现象的出现使哥氏力的检测误差增大,影响陀螺的精度。因此,减小湍流现象的影响,保证流体运动的定常性是研究的重点。

基于实际需要,国外研究人员很早就开展了针对旋转封闭流场的工作。研究主要通过数值模拟<sup>[3-5]</sup>及实验<sup>[6]</sup>2个方面进行。这些研究主要基于宏观尺度下的流场流动特性,侧重于研究流场结构的变化以及边界层效应。在微尺度流动中,虽然连续介质假设仍能成立,但由于流动特征尺度的变小,各种影响因素的相对重要性发生了变化,从而导致流动规律也发生变化,尺度效应、表面力、相对表面粗糙度、阻力及流体黏性等因素对流场流动特性的影响需要重新考虑<sup>[7]</sup>。本文采用 fluent 作为流体仿真软件,对陀螺仪转子与定子间的封闭流场进行数值模拟,并改变空间尺寸及转子转速等仿真参数,研究了流场流动特性的变化。

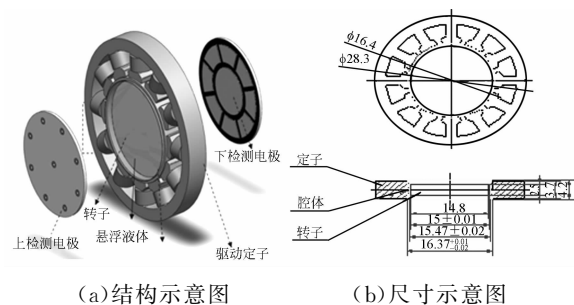
粒子成像测速技术(PIV)是为获得流体的速

度与流型,在液流中引入不同大小的微粒作为示踪粒子以测量流体参数的测试技术。它是目前流行的流场非接触测试技术,国外学者将其广泛应用于测量微管道或流体膜的实验中,并对成像算法做出相应改进<sup>[8-13]</sup>。本文将 PIV 测试技术应用于液浮陀螺的间隙流场速度测量,实验证明,PIV 技术完全可以胜任限域空间内高速流场的测量要求。

## 2 计算模型

### 2.1 陀螺物理模型

图 1 为液浮转子式微陀螺仪的结构设计及加工尺寸图。如图所示,陀螺的质量块是密封在液体中与液体密度相近的中空转子,通过将六相交叠驱动信号施加在定子的 12 个驱动线圈中,使驱动线圈产生驱动磁场,转子在驱动磁场作用下高速、平稳的运动。



(a) Structural profile (b) Schematic diagram of size

图 1 液浮转子式微陀螺仪示意图

Fig. 1 Schematics of liquid floating rotor gyro

### 2.2 参数表征体系

表 1 所列为流场流动特征参数。其中:流场尺寸参数表征了流场的宏观尺寸、形状、边界条件;流体性质参数表示流体的主要物理性质;流场运动参数表示流场在高速运动中体现出来的特征参数,也是模拟仿真的重点。

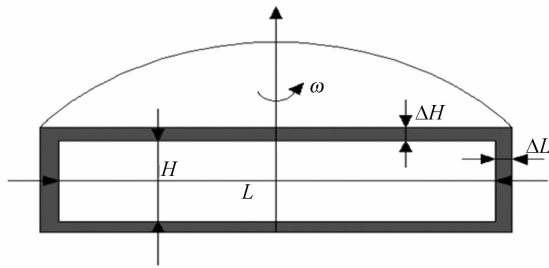
图 2 所示为相应的模型结构简图,数值模拟

采用轴对称模型。将转子表面设为旋转壁面,定子表面设为固定壁面,转子表面又细分为上下表面与侧壁面。

表 1 流场流动特征参数表

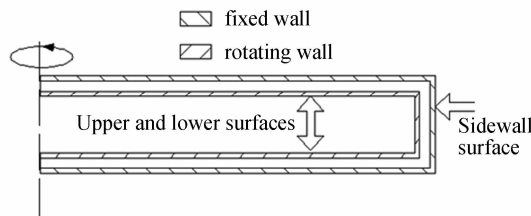
Tab.1 Characteristic parameter table of flow field

流场尺寸参数	流体性质参数	流场运动参数
转子直径 $L$	流体密度 $\rho$	流场温度 $T$
转子厚度 $H$	流体动力黏度 $\mu$	流场速度 $v$
上下表面流场厚度 $\Delta H$	流体运动黏度 $\nu$	流场压力 $p$
侧壁面流场宽度 $\Delta L$	流体导热系数 $K$	雷诺数 $Re$
转子与侧壁表面粗糙度 $R$		壁面剪切力 $\tau_w$
转子转动角速度 $\omega$		湍流动能 $k$
		湍流黏度耗散率 $\epsilon$



(a) 流场结构示意图

(a) Structural profile of flow field



(b) 流场截面示意图

(b) Schematic section of flow field

图 2 流场示意图

Fig. 2 Image of flow field

### 2.3 数值模拟算法

雷诺应力模型的控制方程如(1)所示,在计算中采用二阶迎风格式进行离散。其中: $R_{ij}$ 为雷诺应力张量, $P_{ij}$ 为应力产生项, $D_{ij}$ 为湍流扩散项, $G_{ij}$ 为浮力产生项, $\Phi_{ij}$ 为压力应变项, $\epsilon_{ij}$ 为耗散项, $S_{ij}$ 为系统旋转产生项<sup>[14]</sup>。

$$\frac{dR_{ij}}{dt} = P_{ij} + D_{ij} + G_{ij} + \Phi_{ij} - \epsilon_{ij} + S_{ij}, \quad (1)$$

其中湍流扩散相使用标量湍流扩散模型:

$$D_{ij} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left( \frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_k} \right), \quad (2)$$

浮力引起的产生项  $G_{ij}$  模拟为

$$G_{ij} = \beta \frac{\mu_t}{P_n} \left( g_i \frac{\partial T}{\partial x_j} + g_j \frac{\partial T}{\partial x_i} \right), \quad (3)$$

压力应变项  $\Phi_{ij}$  可以分为 3 项,即

$$\Phi_{ij} = \Phi_{ij,1} + \Phi_{ij,2} + \Phi_{ij,3}, \quad (4)$$

$\Phi_{ij,1}$ 、 $\Phi_{ij,2}$  和  $\Phi_{ij,3}$  分别是慢速项、快速项和壁面反射项。

耗散张量  $\epsilon_{ij}$  模拟为

$$\epsilon_{ij} = \frac{2}{3} \delta_{ij} (\rho \epsilon + Y_M). \quad (5)$$

### 2.4 边界条件设定

转子直径  $L$  取 15 mm,转子厚度  $H$  取 2.5 mm,转子与侧壁表面粗糙度  $R$  设为 0;假定壁面绝热,仿真流体选择柴油,柴油的密度  $\rho$  为 730 kg/m<sup>3</sup>,20 °C 时的动力黏度为 0.002 4 kg/(m · s),导热系数为 0.149 W/(m · K);上下表面流场厚度  $\Delta H$ ,侧壁面流场宽度  $\Delta L$ ,转子转动角速度  $\omega$  作为变量参数。

## 3 仿真结果分析

本文选择 fluent13.0 作为仿真软件,仿真结果导入 tecplot10 中进行后处理,仿真对象主要是流场速度与压力的变化。在图 3~图 6 中,速度的单位均为 m/s,图 7~图 8 中,压力的单位为 Pa,以下不再赘述。

### 3.1 不同转速下的速度场特征

图 3 所示为流场速度截面云图(彩图见期刊电子版),切向速度为流场的主速度方向,在转子的侧壁面,流场切向速度(swirl velocity)展现层流的特点,由内而外逐渐增大,而在上下表面,则体现出环状分布,即越远离转子中心,切向速度越大。

图 4 显示的是不同转速下流场径向速度与轴向速度的分布云图(彩图见期刊电子版)。由图(a)1 与(b)1 可知,径向速度最大的区域是在转子上下表面与侧壁面交界处,并可看出,在转子上下

表面附近形成了以近转子面的离心运动和近壁面的向心运动形成的二次流,并且转速越大,二次流现象越明显。由图(a)2与(b)2可知,轴向速度同样在转子上下表面末端达到最大,并且在该处形成了分别沿  $x$  轴正向和反向的流动,即图(a)2所示的红色区域和蓝色区域。

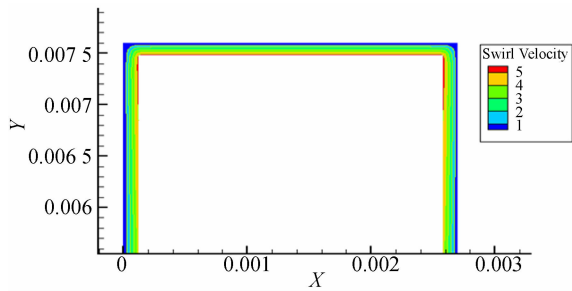
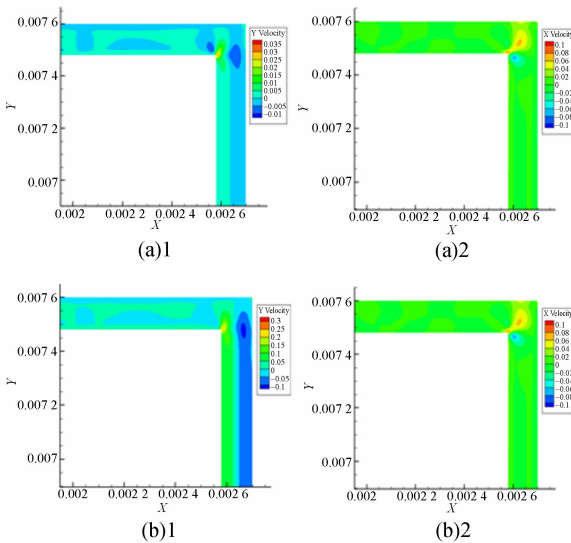


图 3 流场主速度云图( $\omega=7\ 500\ \text{r/min}$ )

Fig. 3 Main speed contour of flow field ( $\omega=7\ 500\ \text{r/min}$ )



(a):  $\omega=1\ 500\ \text{r/min}$ ; (b):  $\omega=7\ 500\ \text{r/min}$ ;  
1: radial velocity; 2: axial velocity;

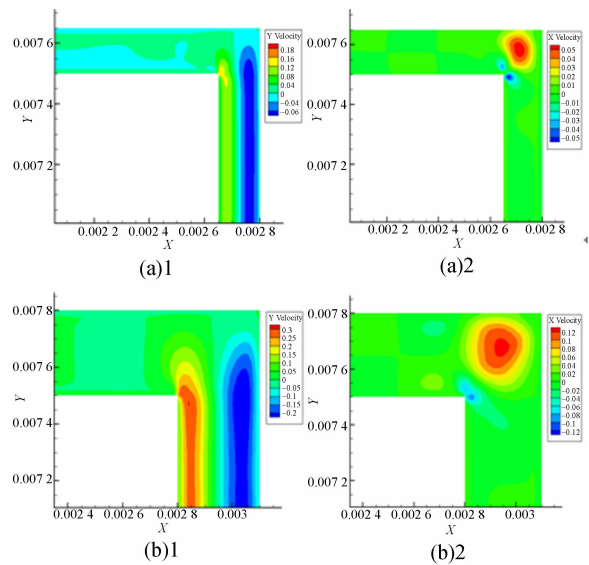
图 4 流场径向与轴向速度随转速变化图

Fig. 4 Variations of radial and axial velocities of flow field with changes of rotation speeds

### 3.2 不同空间尺寸下的速度场特征

图 5 所示为不同空间尺寸下流场径向速度与轴向速度的分布云图(彩图见期刊电子版)。由图(a)1与(b)1知,转子上下表面处的径向二次流随空间尺寸增大而产生分离,在  $\Delta L$  由 0.1 mm 增大到 0.3 mm 的过程中,离心运动与向心运动区

域之间的产生较明显的过渡区域。由图(a)2与(b)2看出,虽然转子转速相同,但流场轴向运动随着空间尺寸的增大而变剧烈;从图中可以看出,随着  $\Delta L$  增大,分别代表正向流动与负向流动的红蓝区域分别扩大,并且最高速度由 0.05 m/s 提高到 0.12 m/s。以上四幅图表明,空间尺寸增大同样加剧了流场的二次流现象。

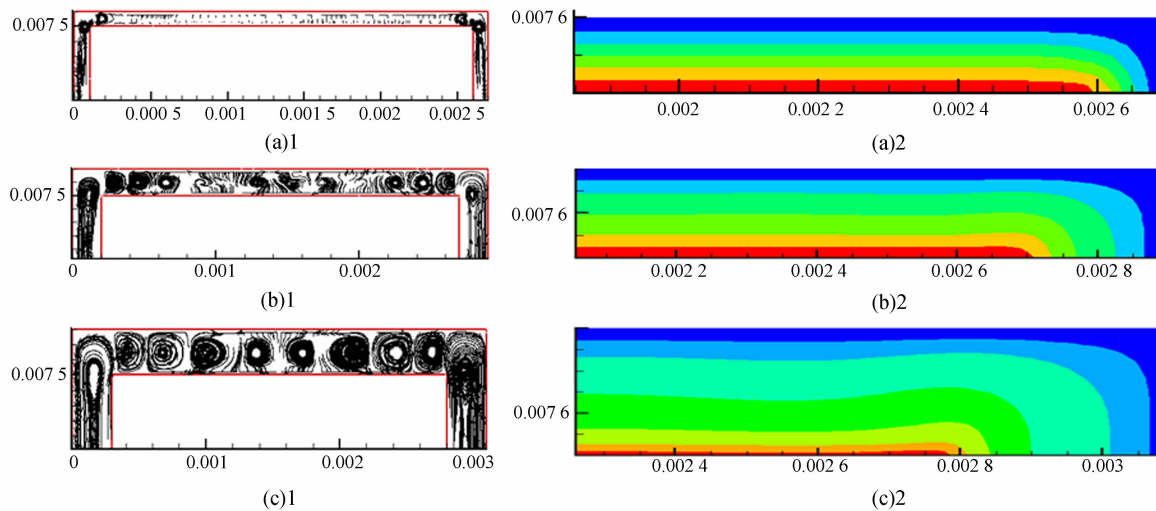


(a):  $\Delta L=0.15\ \text{mm}$ ; (b):  $\Delta L=0.3\ \text{mm}$ ;  
1: radial velocity; 2: axial velocity;

图 5 流场径向与轴向速度随间距变化图( $\omega=7\ 500\ \text{r/min}$ )

Fig. 5 Variations of radial and axial velocities of flow field with changes of spacial dimensions ( $\omega=7\ 500\ \text{r/min}$ )

图 6 为转子侧壁面附近流场的截面图(彩图见期刊电子版),从中也可看出空间尺寸对壁面二次流的影响。由图(a)1至(c)1可看出,当  $\Delta L$  较小时,转子侧壁面附件未出现明显的涡流。随着  $\Delta L$  的增大,由于靠近转子表面的流体在转子带动下转速比较快,受离心力作用,转子表面流体向定子面偏离,而定子表面的流体则向转子面流动,如此形成了径向的涡流。涡流形成的趋势是由侧壁面边缘指向中心,当  $\Delta L$  达到 0.3 mm 时,侧壁面完全形成了 4 对方向相反的涡流,并且从速度云图(c)2中也可看出明显的波动。



(a):  $\Delta L=0.1$  mm; (b):  $\Delta L=0.2$  mm; (c):  $\Delta L=0.3$  mm; 1: Flow chart; 2: Speed nephogram

图 6 不同间距下的侧壁面截面图( $\omega=7\ 500$  r/min)

Fig. 6 Schematic sections of flow field near sidewall surface with changes of spacial dimensions ( $\omega=7\ 500$  r/min)

### 3.3 压力场特征

压力场与速度场具有一定的相关性。图 7 显示流场压力随转速的变化(彩图见期刊电子版),可看出随转速升高,流场内部压力迅速增大,当  $\omega=500$  r/min 时,流场最大压力为 24 Pa,当转速  $\omega$  增大到 7 500 r/min 时,流场最大压力达到 3 800 Pa,

这里指的压力是相对于流场轴心处压力而言的相对压力。从图中还可看出,由于离心力的作用,在转子上下表面附近的流场域,压力沿径向增大,无论是在转子上下表面还是在转子侧壁面,流场中心处压力均大于近壁面处压力。

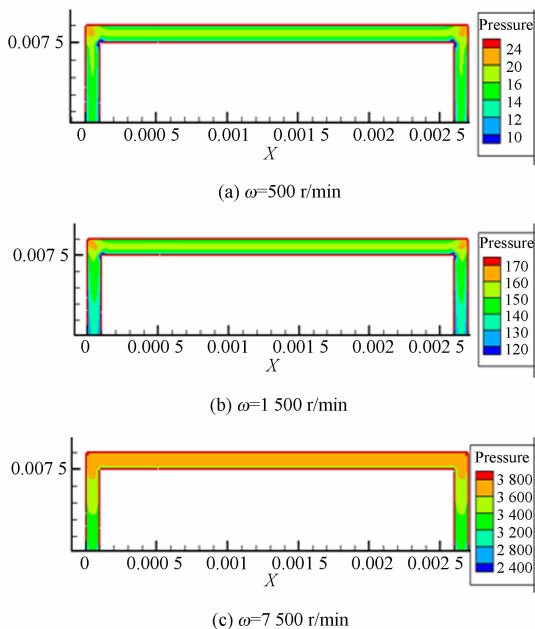


图 7 不同转速下流场压强梯度云图( $\Delta L=\Delta H=0.1$  mm)

Fig. 7 Pressure contours of flow field with the changes of rotation speeds ( $\Delta L=\Delta H=0.1$  mm)

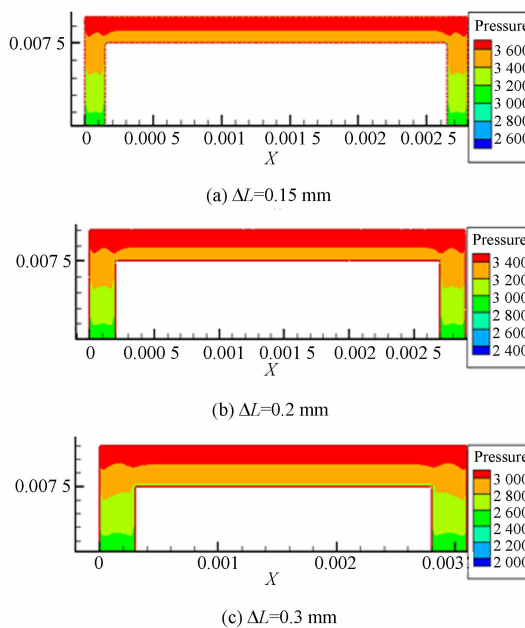


图 8 不同间距下的流场压力云图( $\omega=7\ 500$  r/min)

Fig. 8 Pressure contours of flow field with changes of spacial dimensions ( $\omega=7\ 500$  r/min)

图 8 显示随空间尺寸增大(彩图见期刊电子版),流场压力呈微小下降的趋势;当  $\Delta L=0.15$  mm 时,流场最大压力为 3 600 Pa,而当  $\Delta L=0.3$  mm,流场最大压力减小到 3 000 Pa;并且由于二次流的影响,转子上下表面处的流场压力云图呈现一定的波动。

### 4 实验

利用示踪粒子显示流动信息,然后以 CCD 相机成像,是非接触测试的常用技术手段<sup>[15]</sup>。运用粒子图像测速技术( $\mu$ PIV)可获得流场的速度矢量图,进而得到流场的流线分布,确定流场的结构,从而间接验证仿真的结果。

本文利用电机代替磁场力驱动转子转动来进行实验。图 9 为实验装置示意图(彩图见期刊电子版),由 Nd:YAG 激光器发出的激光经反光镜射入流场,激发荧光粒子发出荧光,经滤光后进入 CCD 相机成像,电机带动转子旋转,平移台控制相机的拍摄位置。

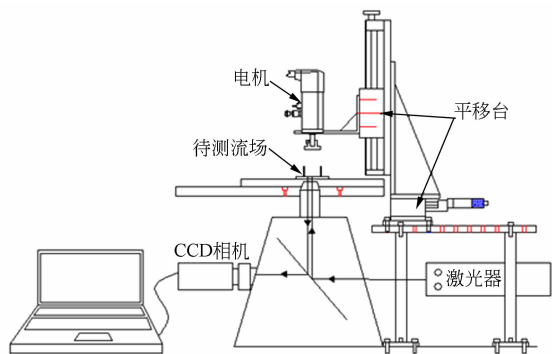


图 9 实验装置图  
Fig. 9 Image of experiment equipment

受到电机结构的影响,转子的尺寸与仿真模型略有不同。实验用的转子半径为 12 mm,测速为 0~1 000 r/min,故可知流场最大线速度发生在转子侧壁表面处,为 0.126 m/s。

拍摄采用双帧双曝光技术,以 2  $\mu$ m 直径的荧光粒子作为示踪物,如图 10 所示。在两次激光脉冲发射的时间间隔  $dt$  内,颗粒在诊断区域中有一个  $ds$  的位移,运动速度可简单表示为  $ds/dt$ 。对于位移颗粒的计算可通过基于傅里叶变换的互相关算法实现,经计算后可得到流场的速度矢量分布信息。

图像处理程序采用德国 Lavision 公司开发的 Davis7.2,软件可控的最小时间间隔为 0.4  $\mu$ s,可测量的最大流体流速为 15 m/s(宏观状态下)。

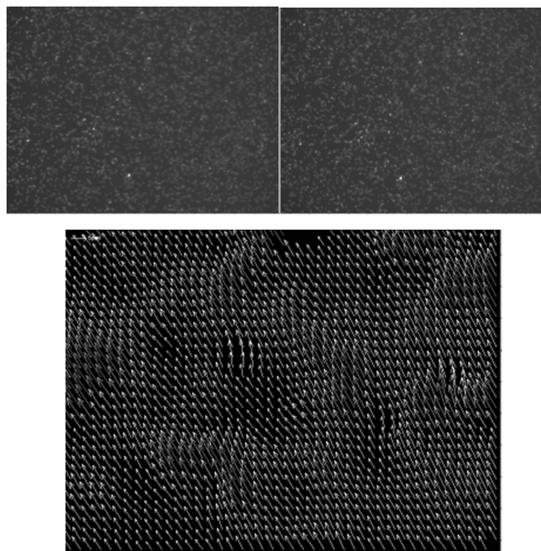
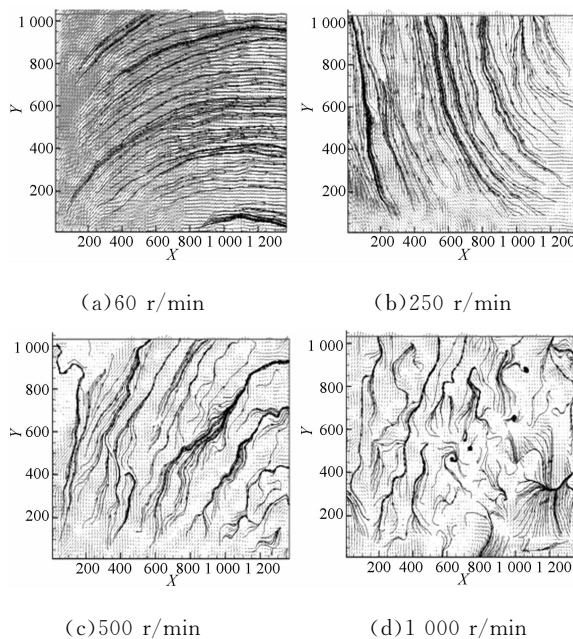


图 10 示踪粒子及速度矢量示意图  
Fig. 10 Image of tracer particles and speed vectors

对 PIV 获得的速度矢量分布图进行后处理,可得到如图 11 所示的流场流线分布。由图可知,在低转速时,流线呈现均匀的环形分布,随转子转速增大,受二次流影响及湍流现象的出现,流形呈现出无规律分布的特征。



(a)60 r/min (b)250 r/min  
(c)500 r/min (d)1 000 r/min  
图 11 不同转速下的流场流线图  
Fig. 11 Streamline charts of flow field with change of rotation speed

## 5 结 论

本文对液浮转子式陀螺仪的流场流动特性进行数值模拟,模型采用轴对称结构。仿真结果表明,流体运动主要有切向运动、轴向运动与径向运动这3种形式,其中切向运动为主运动方向。3种运动表现形式不同,切向运动速度在空间表现为由转子面到定子面逐渐减小的梯度分布,轴向

运动与径向运动分别在各自的流动方向上形成二次流动现象,该现象随转子转速及流场空间尺寸的增大相应增强,当转速增大到7 500 r/min时,二次流速度可达到0.3 m/s。同时给出了运用粒子成像测试技术(PIV)得到的流场矢量分布与流线分布图。实验表明,PIV测试技术可实现对转子转速0~1 000 r/min内流场速度的精确观测,完全满足限域空间内高速运动的流场的非接触测量要求。

### 参考文献:

- [1] 张洪润. 传感器技术大全[D]. 北京:北京航空航天大学出版社,2007.  
ZHANG H R. *The encyclopedia of sensor technology* [D]. Beijing: Beihang University Press, 2007. (in Chinese)
- [2] 江磊,钟智勇,仪德英,等. 磁悬浮转子陀螺的研究进展[J]. 仪器仪表学报,2008,29(5):1115-1119.  
JIANG L, ZHONG Z Y, HUAI D Y, *et al.*. Research progress of the maglev rotor gyroscope [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2008, 29(5):1115-1119. (in Chinese)
- [3] PONCET S, HADDADI S, VIAZZO S. Numerical modeling of fluid flow and heat transfer in a narrow Taylor-Couette-Poiseuille system[J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2011, 32: 128-144.
- [4] JACQUES R, LE QUERE P, DAUBE O. Axisymmetric numerical simulations of turbulent flow in rotor stator enclosures [J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2002, 23:381-397.
- [5] DAUBE O, LE QUERE P. Numerical investigation of the first bifurcation for the flow in a rotor-stator cavity of radial aspect ratio 10[J]. *Computers & Fluids*, 2002, 31:481-494.
- [6] SOONG C Y, WU C C, LIU T P, *et al.*. Flow structure between two co-axial disks rotating independently[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2003, 27:295-311.
- [7] 林建忠,包福兵,张凯,等. 微纳流动理论及应用[M]. 北京:科学出版社,2010.  
LIN J Z, BAO F B, ZHANG K, *et al.*. *The Theory and Applications of Micro-flow and Nano-flow* [M]. Beijing: Science Press, 2010. (in Chinese)
- [8] NASIBOV H, KHOLMATOV A, AKSELLI B, *et al.*. A PIV dynamic velocity range enhancement approach using ROI option of imaging sensors[J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2012, 28:35-44.
- [9] D. ANTONIOS A, MAKATSORIS C, GAVRIILIDIS A, *et al.*. Application of  $\mu$ -PIV for investigating liquid film characteristics in an open inclined microchannel [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2013, 44:9099.
- [10] SILVA G, LEAL N, SEMIAO V. Determination of microchannels geometric parameters using micro-PIV [J]. *Chemical engineering research and design*, 2009, 87:298-306.
- [11] SHAH M K, AGELINCHAAB M, TACHIE M F. Influence of PIV interrogation area on turbulent statistics up to 4th order moments in smooth and rough wall turbulent flows[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2008, 32:725-747.
- [12] SILVA G, LEAL N, SEMIAO V. Micro-PIV and CFD characterization of flows in a microchannel: Velocity profiles, surface roughness and Poiseuille numbers[J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2008, 29:1211-1220.
- [13] PARK J S, KIHM K D. Use of confocal laser scanning microscopy (CLSM) for depthwise resolved microscale—particle image velocimetry ( $\mu$ -PIV) [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2006, 44:208-223.
- [14] 江帆,黄鹏. Fluent 高级应用与实例分析[M]. 北京:清华大学出版社,2008.  
JIANG F, HUANG P. *Advanced application and*

*examples' analysis of Fluent*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008. (in Chinese)

- [15] 刘晶儒, 胡志云, 张振荣, 等. 激光光谱技术在燃烧流场诊断中的应用[J]. 光学精密工程, 2011, 19(2): 1004-924.

LIU J R, HU Z Y, ZHANG Z R, *et al.*. Laser spectroscopy applied to combustion diagnostics [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(2): 1004-924.

#### 作者简介:



唐飞(1973—),男,江苏镇江人,副教授,1995年、1997年分别于哈尔滨工业大学获得学士、硕士学位,2003年于清华大学获得博士学位,主要从事精密测量和控制技术、微系统设计和工艺等方面的研究。E-mail: tangf@mail. tsinghua. edu. cn



王晓浩(1971—),男,河北衡水人,教授,1994年于清华大学获得学士学位,1999年于清华大学获得博士学位,主要从事科学仪器、微型机电系统和微型飞行器方面的研究。E-mail: xhwang@mail. tsinghua. edu. cn



师玉鹏(1983—),男,内蒙古包头人,硕士研究生,从事微型液浮转子式陀螺的流场仿真和实验方向的研究。E-mail: 596280335@qq. com

(版权所有 未经许可 不得转载)