

# 数字全息粒子图像测速技术应用于旋转流场测量的研究

李光勇 杨 岩

(重庆理工大学汽车零部件制造及检测技术教育部重点实验室, 重庆 400054)

**摘要** 将数字全息粒子图像测速(DHPIV)技术应用于旋转流场的三维空间速度测量当中。提出了一种新的焦平面定位方法,即综合灰度梯度法,对数字全息中粒子的焦平面进行精确定位,获得了粒子的空间坐标。针对数字全息粒子图像测速技术中的粒子匹配问题,采取三维互相关算法对流场中的示踪粒子进行空间匹配。将基于综合灰度梯度法和三维互相关算法的数字粒子图像测速技术运用到旋转流场全息图中,获得了局部的三维可视化速度场,与理论模型吻合很好。结果表明,该技术能够很好地应用于旋转流场的测量研究当中。

**关键词** 测量;数字全息术;粒子图像测速;综合灰度梯度法;三维互相关;粒子

**中图分类号** O438.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0609001

## Digital Holography Particle Image Velocimetry Applied for Measurement of the Rotating Flow Fields

Li Guangyong Yang Yan

(Key Laboratory of Manufacture and Test Techniques for Automobile Parts, Ministry of Education, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China)

**Abstract** To accurately obtain the three-dimension (3D) velocities fields of the rotating flow fields, digital holography particle image velocimetry (DHPIV) is presented. A new method, namely the integrated gray-level gradient, is used to locate the focal plane of the particle and to extract the 3D particle's coordinate. The 3D cross-correlation pairing algorithm is applied for the pairing of particles. The rotating flow fields' 3D visual velocities fields, corresponded to the theoretical modeling, are obtained by DHPIV based on the integrated gray-level gradient method and the three-dimension cross-correlation pairing algorithm. The experimental results demonstrate that this technology can be applied for measurement of the rotating flow fields effectively.

**Key words** measurement; digital holography; particle image velocimetry; integrated gray-level gradient method; three-dimensional cross-correlation; particles

**OCIS codes** 120.7250; 090.1995; 350.4990

## 1 引 言

数字全息是一种具有高空间分辨力的三维空间场信息采集技术。该技术起源于 20 世纪 80 年代,本质上是使用电荷耦合器件(CCD)替代传统的全息胶片或干板记录,将一个瞬时空间场的全息干涉条

纹直接记录在 CCD 的芯片上;记录的全息图像的再现不需要经光路再现,而是根据相应的反演公式,在计算机中实现空间场全部信息的再现。由于不像传统全息技术那样需要化学处理过程,由数字全息技术和图像粒子图像测速技术发展而来的数字全息粒

**收稿日期**: 2012-01-12; **收到修改稿日期**: 2012-03-15

**基金项目**: 重庆市自然科学基金(2010BB2087)、重庆市教委科学技术研究基金(KJ110822)重庆理工大学科研启动基金(2009zd29)、重庆理工大学研究生创新基金(YCX2011101)和重庆市理工大学青年基金(2010ZQ26)资助课题。

**作者简介**: 李光勇(1985—),男,硕士研究生,主要从事数字全息方面的研究。E-mail: lgyzimu@163.com

**导师简介**: 杨 岩(1975—),男,教授,硕士生导师,主要从事数字全息方面的研究。E-mail: yangyan@cqut.edu.cn (通信联系人)

子图像测速(DHPIV)技术可以简单方便地用于三维目标场的实时连续测量。对于该技术在测量方面的实际应用,目前国内外只有少数几个研究小组取得了一定程度上的验证观测结果。Malkiel等<sup>[1]</sup>对一种微小昆虫运动时产生的三维绕流场进行了测量,得到了三维流场结果;Meng等<sup>[2]</sup>利用该技术测量了小喷管喷流的三维瞬时流场。吕且妮等<sup>[3]</sup>将该技术应用到柴油机喷雾场的测量研究当中。利用该技术对各种流场如汽车、飞行器的三维空间流场,发动机燃烧室中的可压缩流动场,微机电系统中的微尺度复杂流动场等进行精确测量,研究流场的内部运动状态,对改善产品质量、提高能源利用率等有着重大的经济意义和现实意义。

目前对于流场,主要是利用传统测量方式进行测量,例如热线风速仪法、激光多普勒测速法(LDA)、粒子图像速度法(PIV)、数字粒子图像测速技术(DPIV)等<sup>[4~6]</sup>。这些传统测量技术分别存在着各自的局限性:热线风速仪法效率和精度低;LDA只是对空间单点进行测量;PIV和DPIV是以二维测量为主,不能实现实时的三维测量。数字全息粒子图像测速技术则完全可以弥补上述传统测量技术的缺陷。该技术不仅可以一次性采集三维流场的全部信息,还具有测量精度高、设备简单、测量效率高、可以实现实时测量等优点。因此本文利用该技术对旋转流场进行测量。首先利用综合灰度梯度法对粒子的焦平面(空间 $z$ 坐标)进行精确定位,进而确定粒子的空间坐标。然后通过三维互相关算法对流场中的示踪粒子进行空间匹配。最后将基于综合灰度法和三维互相关法的数字全息粒子图像测速技术运用到旋转流场全息图中,获得了局部的三维可视化速度场。实验结果表明该技术能够很好地应用于旋转流场的测量当中。

## 2 数字全息粒子图像测速技术原理

同轴数字全息的光路原理如图1所示。激光平面波穿过粒子场后投射到CCD表面,被粒子散射的

光作为物光,未被散射的直透光作为参考光,CCD记录得到物光和参考光的干涉图样即全息图。全息图通过CCD记录并存储于计算机当中,并且能在计算机中实现光学再现过程,如图2所示。该过程可以用菲涅耳-基尔霍夫积分公式表示<sup>[7]</sup>

$$R(\xi', \eta') = \frac{i}{\lambda} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h(x, y) E_R(x, y) \times \exp \left[ -i \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{(\xi' - x)^2 + (\eta' - y)^2 + d^2} \right] \frac{dx dy}{\sqrt{(\xi' - x)^2 + (\eta' - y)^2 + d^2}} \quad (1)$$

式中 $R(\xi', \eta')$ 和 $E_R(x, y)$ 分别为再现光光场的复振幅分布和参考光光场的复振幅分布, $h(x, y)$ 为全息图, $d$ 为目标到CCD的距离, $\lambda$ 为波长。

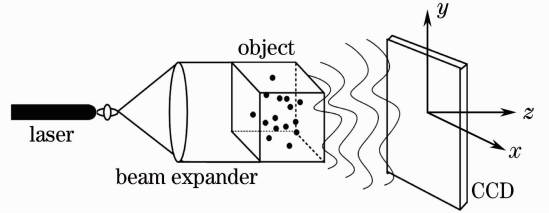


图1 同轴数字全息的原理

Fig. 1 Principle of in-line digital holography

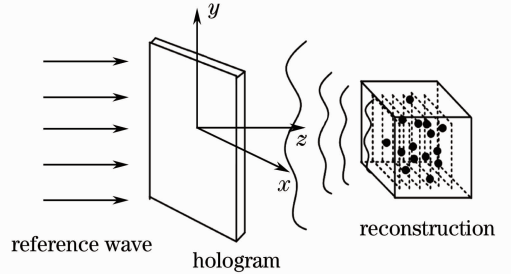


图2 全息图再现

Fig. 2 Reconstruction of hologram

重建图像 $R(\xi', \eta')$ 可以用菲涅耳法或者卷积法计算得到。由于卷积法要比菲涅耳法计算准确且该算法具有像平面采样间隔与再现距离无关的优点<sup>[7]</sup>,并可在重建中使用数字滤波的方法提高图像质量<sup>[8]</sup>,因此采用卷积法对全息图进行数值重建,即

$$R(\xi', \eta') = \mathcal{F}^{-1} \left\{ \mathcal{F}[h(x, y)] \cdot \mathcal{F} \left[ \frac{i}{\lambda} \frac{\exp \left[ -i \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{d^2 + (x - \xi')^2 + (y - \eta')^2} \right]}{\sqrt{d^2 + (x - \xi')^2 + (y - \eta')^2}} \right] \right\} \quad (2)$$

式中 $\mathcal{F}[\ ]$ 和 $\mathcal{F}^{-1}[\ ]$ 分别为傅里叶变换和逆傅里叶变换。

数字全息粒子图像测速技术可以用于三维流场的测量。首先在流场中均匀地布满示踪粒子(示踪

粒子的运动状态代表流场的运动状态),采集两帧时间间隔为  $\Delta t$  的目标场的数字全息图,然后重建两个目标场中粒子的三维空间信息。最后利用两重建场中粒子的空间坐标信息进行匹配,即可得到某一瞬时的三维速度向量场。如果利用数字 CCD 记录的帧对序列,则可以得到空间三维速度向量场的时间历程观测结果。不同时刻目标场数字全息图的重建示意图如图 3 所示。数字全息粒子图像测速技术用于三维流场测量的流程图如图 4 所示。

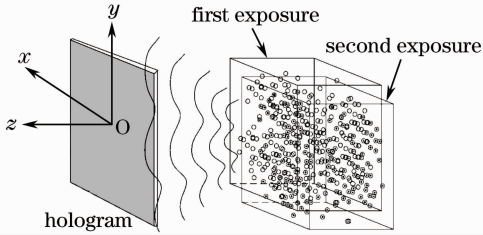


图 3 三维流场的重建

Fig. 3 Reconstruction of 3D flow fields

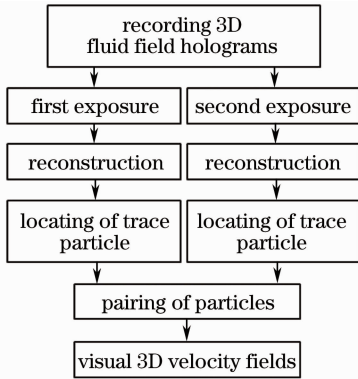


图 4 三维流场测量的流程图

Fig. 4 Flow chart of 3D flow fields measurement

## 3 粒子空间定位

### 3.1 综合灰度梯度法

如何能精确地对目标焦平面进行定位(粒子空间  $z$  坐标)是数字全息技术中的关键问题,尤其是在用于各种流场测定的粒子全息技术中。在过去的 10 年里很多学者提出了多种粒子焦平面的测定方法。刘长庚等<sup>[9]</sup>提出了导数对焦判据函数;Yang 等<sup>[10]</sup>阐述了相关系数法在数字全息中的应用;Kob 等<sup>[11]</sup>提出了梯度准则;而 Kim 等<sup>[12]</sup>则利用归一化比值法来检测粒子焦平面的位置。上述方法的适用条件及使用范围各不相同,为了更容易更方便地确定粒子的焦平面位置,利用综合灰度梯度法对粒子的焦平面(粒子空间  $z$  坐标)进行定位。综合灰度梯度法是在传统的边缘灰度梯度法基础上补充了全局

灰度梯度法得到的。基于边缘灰度梯度的第一种方法适用于直径比较大的粒子和比较小的物距,而对于以全局灰度梯度为基础的第二种方法则适用于小直径粒子和大距离物距。因此这两种方法综合而成的综合灰度梯度法能够适用的范围更加广泛,几乎适用于各种尺寸的粒子和任意大小的物距<sup>[13]</sup>。

图 5 显示了粒子再现图的二值图像边缘结构,边缘灰度梯度  $E_s$  和全局灰度梯度  $O_s$  分别可以定义为

$$E_s = \frac{1}{N_1} \sum_i^{N_1} F_{1i}(x, y) - \frac{1}{N_2} \sum_i^{N_2} F_{2i}(x, y), \quad (3)$$

$$O_s = \frac{1}{N_1} \sum_i^{N_1} F_{1i}(x, y) - \frac{1}{N_2 + N_3} \times \left[ \sum_i^{N_2} F_{2i}(x, y) + \sum_i^{N_3} F_{3i}(x, y) \right], \quad (4)$$

式中  $N_1, N_2$  和  $N_3$  分别为背景靠近粒子边界区域、粒子边界区域、中间区域的像素数,而  $F_{1i}(x, y)$ ,  $F_{2i}(x, y)$  和  $F_{3i}(x, y)$  分别为相应区域的像素点的灰度值。

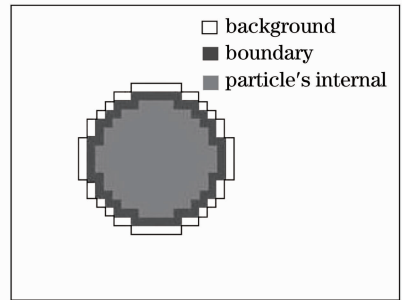


图 5 粒子重建图像

Fig. 5 Reconstruction image of particle

基于上述两种方法应用范围不同,利用模拟全息图<sup>[14]</sup>,对不同尺寸粒子在不同物距下的情况分别应用两种方法计算焦平面,进而找出两种方法各自的适用区间,最后总结出综合灰度梯度法的适用细则。以下分别为不同情况的计算实例。

同尺寸粒子与不同物距实例:对直径为  $66.6 \mu\text{m}$  的粒子在不同位置的全息图进行数字模拟,然后重建,分别用两种方法得到的焦平面位置误差如图 6(a) 所示。从图 6(a) 可以看出,当物距在  $50 \sim 175 \text{ mm}$  之间时,用边缘灰度梯度法得到的误差要比第二种小。而当物距大于  $175 \text{ mm}$  时,用全局灰度梯度法得到的误差要小得多。因此对于直径为  $66.6 \mu\text{m}$  的粒子而言,物距在  $50 \sim 175 \text{ mm}$  的范围内适合用边缘灰度梯度法定焦,在大于  $175 \text{ mm}$  的情况下适合用全局灰度梯度法定焦。

同物距与不同尺寸粒子实例:图 6(b)显示了不同尺寸粒子在物距为 150 mm 情况下焦平面的位置误差。从图 6(b)可以看出,当粒子直径小于或等于 22.2  $\mu\text{m}$  时,两种方法的误差基本相同。因为从(3)式和(4)式中可以看出当粒子直径小于一定值时,粒子的边缘灰度梯度值和全局灰度梯度值是相等的,所以它们的误差基本上一致。当粒子的直径大于

59.2  $\mu\text{m}$  时,用边缘灰度梯度法得到的误差要比全局灰度梯度法小。而当粒子直径在 22.2~59.2  $\mu\text{m}$  之间时,用全局灰度梯度法得到的误差要小得多。在分析两种方法的各自适用情况时,应当尽量使适用区域完整,因此在粒子直径小于 22.2  $\mu\text{m}$  情况下用全局灰度梯度法定焦。

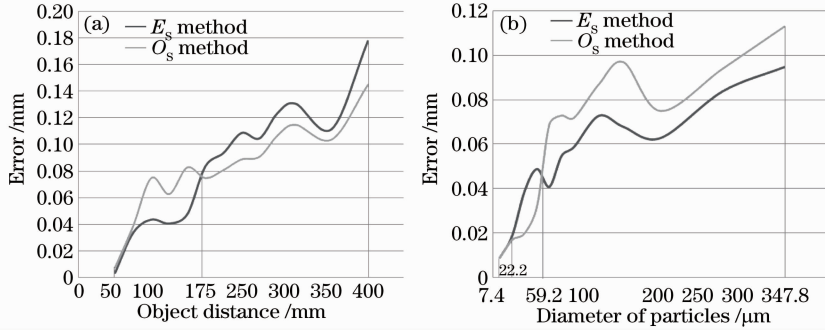


图 6 不同条件下焦平面位置误差趋势图。(a)直径为 66.6  $\mu\text{m}$ ; (b)物距为 150 mm

Fig. 6 Errors of focal plane of the particles under different conditions. (a) Diameter  $D=66.6 \mu\text{m}$ ; (b) object distance  $d=150 \text{ mm}$

利用上述方法对各种不同情况进行分析,最终得到综合灰度梯度法的适用区间细则如表 1 所示。边缘灰度梯度法适用于直径大于 125.8  $\mu\text{m}$  的大尺寸粒子,全局灰度梯度法在粒子直径小于 37  $\mu\text{m}$  的情况下会得到比较好的焦平面位置,而在两者之间时各自的适用范围视物距大小而定。利用表 1,可以很容易地通过编程对不同粒子在不同物距条件下适用的方法进行分配,进而精确地确定粒子焦平面的位置,即粒子空间  $z$  坐标。从而确定粒子的空间位置坐标  $(x, y, z)$ ,程序的流程图如图 7 所示。该程序可以分为以下几个步骤:

- 3) 用自适应阈值法对再现图进行二值化;
- 4) 不管粒子聚焦与否,近似的确定粒子参数即粒子物距  $d$ ,直径  $D$ ;
- 5) 根据粒子的近似物距和直径,从表 1 中选择合适的方法对粒子的焦平面进行定位,从而获得粒子的焦平面位置,即粒子空间  $z$  坐标;
- 6) 利用卷积法对粒子的焦平面进行重建并对重建像进行二值化,粒子的空间坐标  $C(x, y)$  可以通过公式获得,即

$$C(x, y) = \left( \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_k, \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N y_k \right), \quad (5)$$

式中  $N$  为粒子二值图像边界的像素数,  $x_k$  和  $y_k$  分别为粒子二值图像边界像素点的  $x$  坐标和  $y$  坐标。最后获得粒子的空间坐标  $(x, y, z)$ 。

- 1) 设置必要参数,例如波长,图像的尺寸,像素大小,然后输入全息图;
- 2) 用卷积法对全息图进行重建;

表 1 综合灰度梯度法的适用区间细则(√ 适用于全局灰度梯度法,其他情况适用于边缘灰度梯度法)

Table 1 Applicable conditions of the integrated gray-level gradient method (√ is adapted to the  $O_s$  method, the other condition is adapted to  $E_s$  method)

Size $D / \mu\text{m}$	Object distance $d / \text{mm}$												
	50	75	100	125	150	175	200	225	250	275	300	350	400
7.4	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
37.0	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
51.8			√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
59.2				√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
66.6					√	√	√	√	√	√	√	√	√
81.4						√	√	√	√	√	√	√	√
96.2							√	√	√	√	√	√	√
125.8									√	√	√	√	√
↓													
347.8													



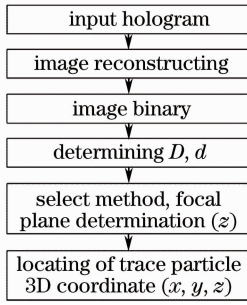


图7 程序流程图

Fig.7 Flow chart of the program

### 3.2 方法验证

为了有效地验证综合灰度梯度法,这里采用标

准靶面作为测试目标,如图8所示。其中包含了直径在 $12\sim 300\ \mu\text{m}$ 之间各种不同尺寸的圆点。对该标准靶面目标分别单独应用文献[10]中的梯度准直即边缘灰度梯度法和全局灰度梯度法,进而和综合灰度梯度法进行对比,结果如表2所示。从表2可以看出,不管是平均误差还是相对误差,综合灰度梯度法的误差值都要比其他两种方法小。表明综合灰度梯度法比单独应用边缘灰度梯度法和全局灰度梯度法中的一种定位精度要高。在 $197.131\ \text{mm}$ 处重建,可以得到清晰的标准靶面再现图,如图9所示,从而验证综合灰度梯度法的有效性。

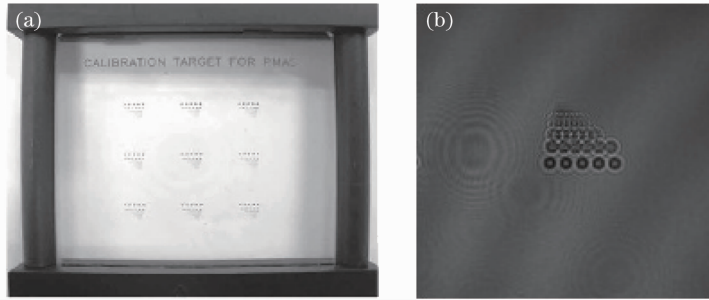


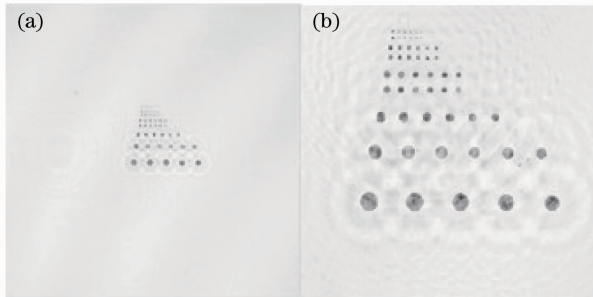
图8 标准靶面。(a)标准靶面;(b)全息图

Fig.8 Calibration target. (a) Calibration target; (b) hologram

表2 标准靶面的焦平面位置及误差

Table 2 Errors of focal plane determination using different methods

Object distance $d/\text{mm}$	Method	Mean of focal planes /mm	Mean of errors / mm	Stand deviation of errors /mm
197.131	$E_s$ method	197.100	0.068	0.032
	$O_s$ method	197.157	0.059	0.042
	Integrated method	197.131	0.032	0.020

图9 靶面在 $197.131\ \text{mm}$ 处的再现图。(a)再现图;(b)放大图Fig.9 Reconstruction image at  $197.131\ \text{mm}$ .

(a) Reconstruction image; (b) magnified image

## 4 三维互相关算法

### 4.1 三维互相关原理

在二维PIV互相关计算中,通过查找相关谱中极大值的位置获得粒子不同时刻的位移量,并通过快速傅里叶变换(FFT)技术提高计算速度。使用了全息技术后,可以一次得到不同位置切面的粒子图像,从而重构出整个空间中的粒子分布信息。利用互相关技术直接计算判读体中粒子的三维位移量,也就是数字全息粒子图像测速技术的三维互相关算法,同样可以使用FFT技术提高计算速度<sup>[15]</sup>。

两幅空间粒子图像之间粒子匹配示意图如图10所示。在第一幅空间粒子图像中,以 $(x_0, y_0, z_0)$ 为中心取一个边长为 $a$ 的正方形作为判读小区,该区域中的粒子空间分布为 $\mathbf{F}_R(x, y, z) = \{f(x, y, z) \mid x = x_0 - a/2, \dots, x_0 + a/2; y = y_0 - a/2, \dots, y_0 + a/2; z = z_0 - a/2, \dots, z_0 + a/2\}$ 。在第二幅空间粒子图像中,仍以 $(x_0, y_0, z_0)$ 为中心取一个边长为 $b$ 的正方形作为搜索小区,一般的做法是选用的第二幅搜索小区是第一幅判读小区的 $2\sim 3$ 倍,该区域中的粒子空间分布为 $\mathbf{G}_S(x, y, z) = \{g(x, y, z) \mid x = x_0 - b/2, \dots, x_0 + b/2; y = y_0 - b/2, \dots, y_0 + b/2; z = z_0 - b/2, \dots, z_0 + b/2\}$ 。

当判读小区  $F_R(x, y, z)$  在搜索小区  $G_S(x, y, z)$  中进行搜索时, 搜索到与其最为相似的子图像  $G_R(x, y, z) = \{g(x, y, z) \mid x = x_0 + \Delta x - a/2, \dots, x_0 + \Delta x + a/2; y = y_0 + \Delta y - a/2, \dots, y_0 + \Delta y + a/2; z = z_0 + \Delta z - a/2, \dots, z_0 + \Delta z + a/2\}$  时, 则可认为判读小区

$F_R(x, y, z)$  经过时间  $\Delta t$  的位移向量为  $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ , 则可以认为向量  $(\Delta x/\Delta t, \Delta y/\Delta t, \Delta z/\Delta t)$  为判读小区中心点  $(x_0, y_0, z_0)$  处的流体速度矢量。因此连续两幅空间粒子图像之间粒子匹配可以用三维互相关算法实现, 相关度定义为

$$R(m, n, p) = \frac{\sum_{x=x_0+a/2}^a \sum_{y=y_0+a/2}^a \sum_{z=z_0+a/2}^a f(x, y, z) g(x+m, y+n, z+p)}{\sqrt{\sum_{x=x_0+a/2}^a \sum_{y=y_0+a/2}^a \sum_{z=z_0+a/2}^a f(x, y, z) \cdot \sum_{x=x_0+a/2}^a \sum_{y=y_0+a/2}^a \sum_{z=z_0+a/2}^a g(x+m, y+n, z+p)}} \quad (6)$$

当相关度  $R(m, n, p)$  达到最大值时, 则可认为找到了与判读小区最相似的子图像, 判读体经过时间  $\Delta t$  的位移向量为  $(m, n, p)$ , 向量  $(m/\Delta t, n/\Delta t, p/\Delta t)$  为判读小区中心点  $(x_0, y_0, z_0)$  处的速度矢量。

#### 4.2 模拟验证

DHPIV 实验得到的主要是流体微团的平动和旋转速度。为了验证三维互相关算法的匹配适用性, 采用人工生成模拟空间粒子场, 如图 11 所示, 然后对空间粒子进行线性运动和旋转运动。通过三维互相关算法对模拟空间粒子场对进行匹配, 分别获得了粒子场线性运动和旋转运动后的空间速度场, 如图 12 所示。模拟结果与理论值一致, 表明三维互

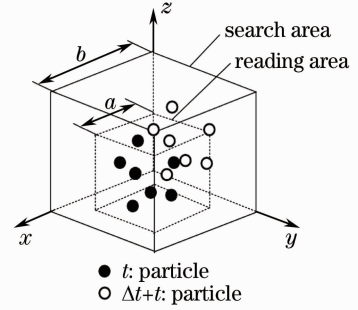


图 10 三维空间粒子的匹配

Fig. 10 Pairing of 3D spatial particles

相关算法能够很好应用到三维空间粒子的速度匹配当中。

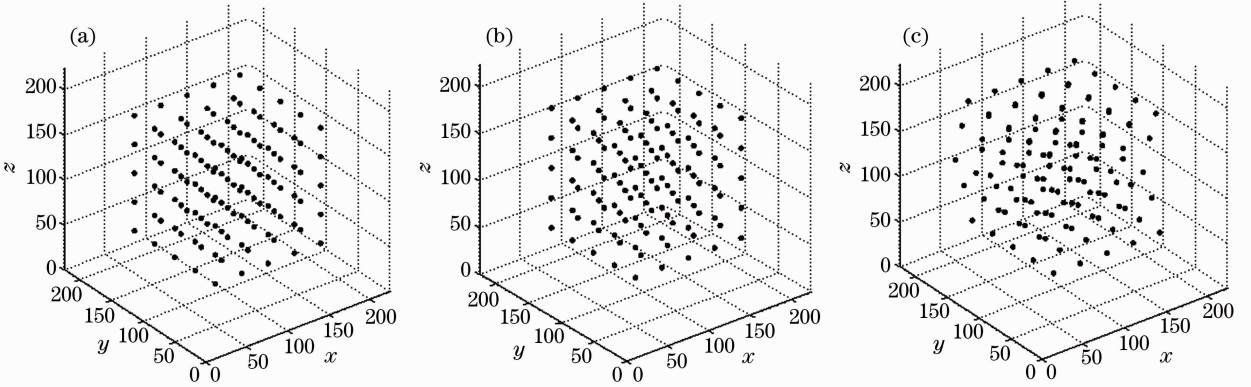


图 11 模拟空间粒子场。(a)原粒子场;(b)直线运动;(c)旋转运动

Fig. 11 Simulation particle fields. (a) Original particle fields; (b) linear motion; (c) rotary motion

### 5 实验分析

为了有效地验证 DHPIV 的可靠性及适用性, 将该技术应用到旋转流场的测量。图 13 为实验装置记录旋转流场的全息图, 其示意图和记录的布满示踪粒子的旋转流场全息图如图 14 和 15 所示。实验参数: 氩氦激光波长为 632.8 nm, CCD 像素大小为  $7.4 \mu\text{m} \times 7.4 \mu\text{m}$ , 像素数为 2048 pixel  $\times$

2048 pixel, 记录视场大小为  $15.2 \text{ mm} \times 15.2 \text{ mm}$ , 圆盘直径为 100 mm, 圆盘中心离 CCD 距离为 220 mm, 电机转速  $\omega$  为 20 r/min, 记录时间间隔  $\Delta t$  为  $2200 \mu\text{s}$ , 示踪粒子直径为  $50 \mu\text{m}$ 。首先利用综合灰度梯度法对旋转流场中的示踪粒子进行空间位置定位, 如图 16 所示, 并通过三维互相关算法对两幅布满示踪粒子的空间粒子场进行匹配, 从而获得旋

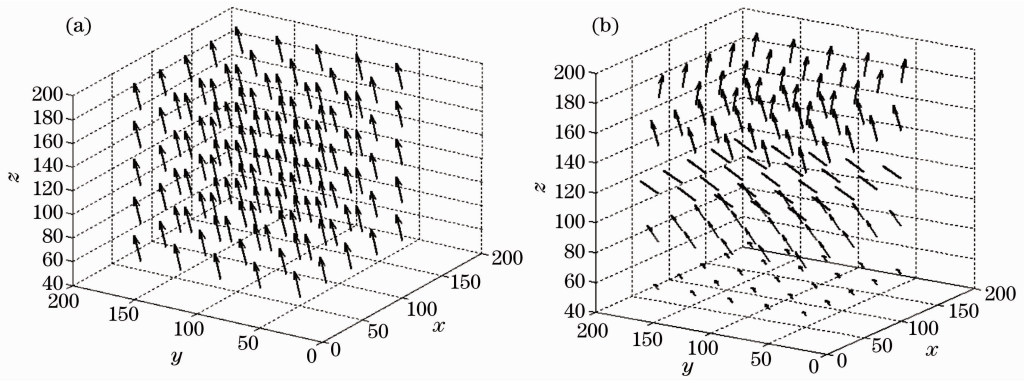


图 12 模拟空间粒子的速度向量场。(a)直线运动;(b)旋转运动

Fig. 12 Spatial velocity fields of simulation particle. (a) Linear motion; (b) rotary motion

转流场的局部三维可视化速度场,如图 17 所示。取水的运动粘度  $\nu$  为  $1 \text{ mm}^2/\text{s}$ ,根据边界层理论可以模拟出理想状态下的旋转流场的空间速度场模型,如图 18 所示<sup>[16]</sup>。与理想状态下的旋转流场空间速度场进行比较,其结果如图 19 所示。纵坐标表示径向、切向和轴向速度因子,横坐标表示流体单元相对于圆盘表面的高度级。因为圆盘转速和运动粘度为定值,即高度级  $\xi$  正比于流体单元离圆盘表面的高度  $y$ 。实验得到的径向、切向和轴向速度因子与理论值基本相一致,实验得到的空间旋转流场速度场

符合旋转流场理论。因此实验结果表明,DHPIV 能够有效地应用到旋转流场的测量当中。

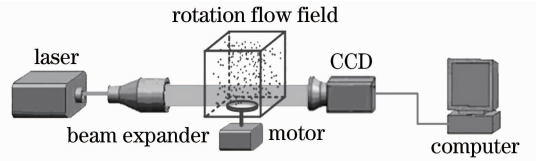


图 14 实验台示意图

Fig. 14 Sketch of experimental setup

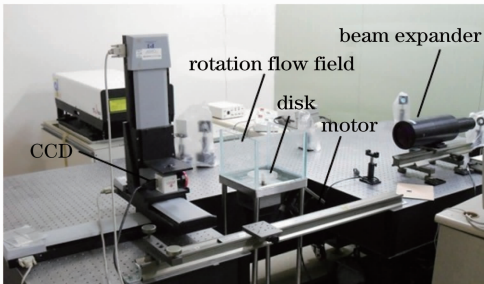


图 13 旋转流场测量实验台

Fig. 13 Experimental setup of rotating flow fields measurement

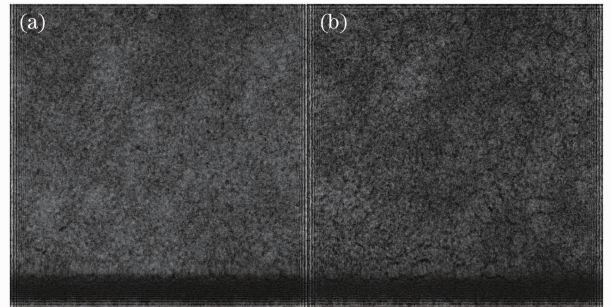


图 15 旋转流场全息图。(a)第一次曝光;(b)第二次曝光

Fig. 15 Holograms of rotating flow fields. (a) First exposure; (b) second exposure

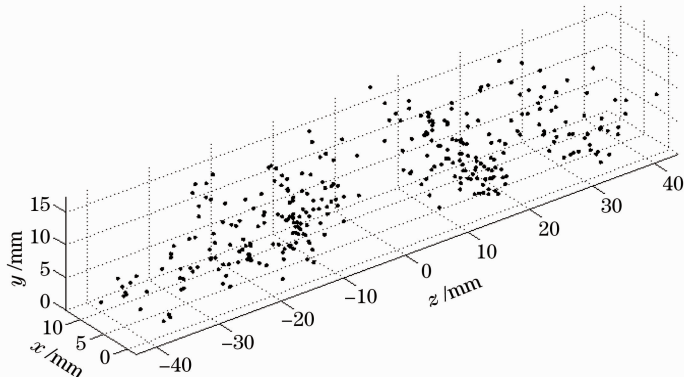


图 16 旋转流场粒子空间分布

Fig. 16 Partial space distribution of rotating flow fields



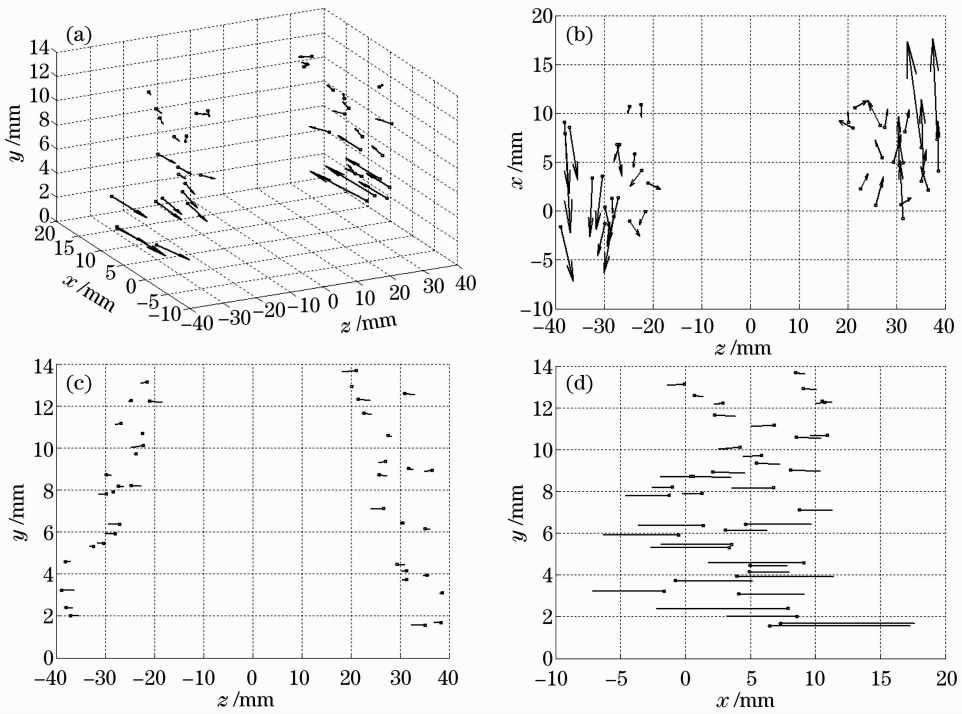


图 17 旋转流场局部速度场。(a)速度场;(b)  $y$  方向;(c)  $x$  方向;(d)  $z$  方向

Fig. 17 Partial velocity fields of rotating flow fields. (a) Velocity fields; (b)  $y$  direction; (c)  $x$  direction; (d)  $z$  direction

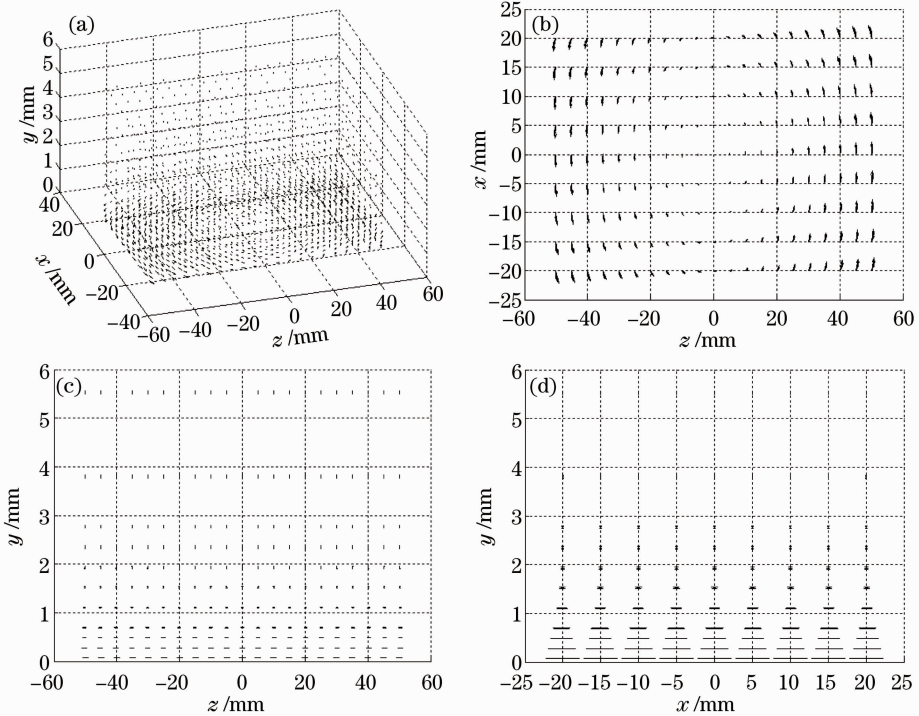


图 18 模拟旋转流场的空间速度场。(a)速度场;(b)  $y$  方向;(c)  $x$  方向;(d)  $z$  方向

Fig. 18 Simulated spatial velocity fields of rotating flow fields. (a) Velocity fields; (b)  $y$  direction; (c)  $x$  direction; (d)  $z$  direction

## 6 结 论

将基于综合灰度法和三维互相关算法的数字全

息粒子图像测速技术运用到旋转流场测量当中,首先提出了综合灰度梯度法对粒子的焦平面(空间  $z$

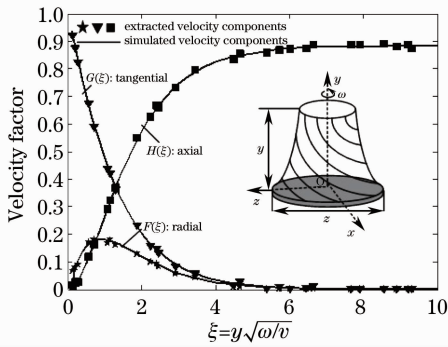


图 19 模拟旋转流场的空间速度因子与实验结果的比较  
Fig. 19 Simulated velocity components of rotating flow fields compared with experimental results

坐标)进行精确定位方法,该方法是在传统的边缘灰度梯度法基础上补充了全局灰度梯度法得到的。并通过模拟全息图,对不同尺寸粒子在不同物距下的情况分别应用两种方法计算焦平面,找出了两种方法各自的适用区间,最后总结出综合灰度梯度法的适用细则。进而准确得到粒子的空间位置坐标 $(x, y, z)$ 。然后通过三维互相关算法对流场中的示踪粒子进行了空间匹配。类似于二维互相关计算中使用的判读区来计算这个小区中的二维位移量,三维互相关算法可以使用空间中的判读体,直接计算判读体中粒子的三维位移量。使用快速傅里叶变换技术提高了计算速度,并将三维互相关算法应用到模拟粒子场中。证明了该算法能够精确地获得空间粒子的三维速度向量场。最后将该技术运用到旋转流场全息图中,获得了局部的可视化旋转流场的速度向量场,并与理想状态下的旋转流场速度场进行比较,与理论模型具有很好的相符度。结果表明,该技术能够很好地应用于旋转流场的测量研究当中。

### 参 考 文 献

- 1 E. Malkiel, J. Sheng, J. Katz *et al.*. The three dimensional flow field generated by a feeding calanoid copepod measured using digital holography [J]. *J. Exp. Biol.*, 2003, **206** (20): 3657~3666
- 2 H. Meng, G. Pan, Y. Pu *et al.*. Holographic particle image velocimetry: from film to digital recording[J]. *Meas. Sci. & Technol.*, 2004, **15**(4): 673~685
- 3 Lü Qieni, Zhao Chen, Ma Zhibin *et al.*. Digital holography experiment on the measurement of particle size and size distribution of diesel spray[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(3): 779~783

- 吕且妮, 赵 晨, 马志彬 等. 柴油喷雾场粒子尺寸和粒度分布的数字全息实验[J]. *中国激光*, 2010, **37**(3): 779~783
- 4 Li Weifeng, Sun Zhigang, Sun Haifeng *et al.*. Stagnation point offset of two opposed jets[J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering*, 2008, **59**(1): 46~52
- 李伟峰, 孙志刚, 孙海峰 等. 两喷嘴对置撞击流驻点偏移规律[J]. *化工学报*, 2008, **59**(1): 46~52
- 5 Wang Jian, Lin Rongwen, Liu Dexin *et al.*. Studies on the LDA measurements of in-cylinder tumble motion in a 4-valve gasoline engine[J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2004, **10**(4): 350~353
- 王 健, 林荣文, 刘德新 等. 四气门汽油机缸内滚流运动的LDA实验研究[J]. *燃烧科学与技术*, 2004, **10**(4): 350~353
- 6 R. J. Wei, G. X. Shen. The RED and application for DPIV system[J]. *Tests and Measurements of Fluid Mechanics*, 2003, **17**(2): 88~92
- 7 U. Schnars, W. Jueptner. Digital recording and numerical reconstruction of holograms[J]. *J. Mech. Sci. & Technol.*, 2002, **13**(9): 85~101
- 8 Wang Cunshuai, Zhang Yinke, Hao Jimbo *et al.*. Improving reconstruction image quality of digital holography using median filter and intensity subtraction [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(12): 120901
- 王存帅, 张引科, 郝劲波 等. 用中值滤波和光强相减法改善数字全息再现像质量[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, **48**(12): 120901
- 9 Liu Changgeng, Wang Dayong, Zhang Yizhu *et al.*. Derivatives-based autofocus algorithms for the digital holographic imaging [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(11): 2989~2996
- 刘长庚, 王大勇, 张亦卓 等. 数字全息成像中基于导数的自动对焦算法[J]. *中国激光*, 2009, **36**(11): 2989~2996
- 10 Y. Yang, B. S. Kang. Application of digital holography to sprays[C]. East China Normal U. Press. 2007. 2050~2054
- 11 Kwang Uoong Kob, Joo Youn Kim, Sang Yong Lee. Determination of in-focus criteria and depth of field in image processing of spray particles[J]. *Atomization and Sprays*, 2001, **11**(4): 317~333
- 12 K. S. Kim, S. S. Kim. Drop sizing and depth-of-field correction in TV imaging[J]. *Atomization and Sprays*, 1994, **4**(1): 65~78
- 13 Li Guangyong, Huang Liang, Tang Lili *et al.*. Determination of focal plane in digital holography based on integrated gray-level gradient method[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(11): 110901
- 李光勇, 黄 亮, 唐丽丽 等. 基于综合灰度梯度法的数字全息焦平面定位研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, **48**(11): 110901
- 14 Y. Yang, B. S. Kang. Numerical simulation of in-line digital holograms[C]. East China Normal U. Press, 2007. 2055~2059
- 15 Pu Ye, Meng Hui. An advanced off-axis holographic particle image velocimetry (HPIV) system [J]. *Exp. Fluids*, 2000, **29**(2): 184~197
- 16 H. Schlichting. *Boundary-Layer Theory* (7th Edition)[M]. New York: McGraw Hill Inc., 1979. 102~105