

HPIV 及其初步应用研究

段 俐

(北京航空航天大学 飞行器设计与应用力学系)

丁汉泉

(北京航空航天大学 理学院)

康 琦

(中国科学院 力学研究所国家微重力实验室)

申功

(北京航空航天大学 飞行器设计与应用力学系)

摘 要: 全息粒子图像测速技术(HPIV)为一种对流体容积(三维空间)进行瞬时三维(u, v, w)速度场测量的技术. 本项研究采用了双 YAG 脉冲激光器二次曝光、漫射照明、参考光对称布置全息术记录三维空间的粒子三维位移场,再现粒子空间场又采用了体视粒子图像测速技术分别截取各切面上的粒子三维位移场,其中由于采用了不同方向的参考光分别再现不同曝光时刻的粒子图像,可以用互相关技术,实行位移方向的自动判别. 本项技术用于立方体对角水流中的三维旋涡流动的瞬态三维速度场的初步测量. 本文给出了瞬时复杂的三维旋涡部分空间结构和速度场分布图.

关键词: 流动测量; 数字图像处理; 脉冲全息照相; 互相关; 三维重建

中图分类号: V 211.7

文献标识码: A

文章编号: 1001-5965(2000)01-0083-04

近年以 PIV、SPIV(粒子图像测速,体视粒子图像测速)等技术的研究和发展,提供了观测复杂流动的瞬态流动切面结构和速度场的途径. 目前已开始大量用于非正常复杂流动研究. 但三维空间(容积)的三维速度(u, v, w)场的瞬态观测的方法和途径至今仍在探索中^[1].

在体视粒子图像测速技术(SPIV)中采用片光源,测量一次仅能获得流场内一个二维切面的三维速度(u, v, w)矢量. 因而 PIV 技术的下一个目标必然是希望一次得到三维空间流场内所有切面的三维速度(u, v, w)矢量. 由于全息技术有瞬时冻结三维流场和永久保存的特点,因此,把全息技术引入到 PIV 技术的研究中,是科技进步与发展的必然趋势. 目前在国际上有些课题小组正在对该项技术进行探索^[2].

本论文主要是研究全息粒子图像测速技术——HPIV,并将这一技术用于全场测试.

1 HPIV 实验研究

1.1 三维旋涡流场设备简介

本课题采用立方体盒对角水流循环系统作

HPIV 系统测速对象,如图 1 所示,瞬时测量流场三维空间的三维速度场分布. 示踪粒子用 $100\mu\text{m}$ 的聚乙烯粒子. 实验段是一个 $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 100\text{mm}$ 的立方体盒,进水口与出水口位于立方体盒的两对角上. 水流穿过实验模型时,将会形成一种复杂的三维流动. 进水口与出水口都是 $20\text{mm} \times 20\text{mm}$ 的矩形截面. 系统的上下水面高度恒定不变,水仅依靠重力的作用向下流动,水流通过流量计和实验段,自上而下流入水箱,再由管道泵抽回到上水箱形成循环. 实验段试验用体积流量为 $Q = 90\text{L/h}$,入口流速 $v = 63\text{mm/s}$,入口雷诺数约为 $Re = 1250$.

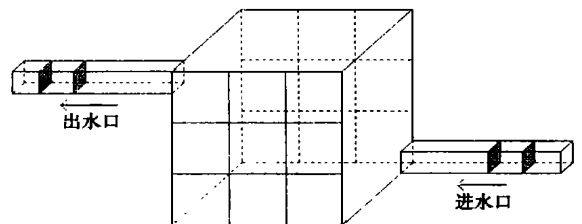


图 1 立方体对角水流实验段示意图

1.2 HPIV 全息光路系统

为获取清晰均匀的粒子群场的全息图,采用

收稿日期: 1998-08-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(193900-1-3)

作者简介: 段俐(1966-),女,四川广安人,博士生,100083,北京.

漫射照明离轴全息技术.为解决所测速度的方向问题,采用两束不同方向参考光,实验光路如图2所示.

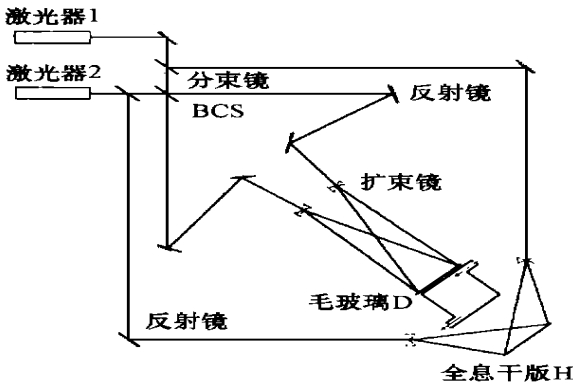


图2 HPIV光路系统

两台Nd:YAG脉冲激光器的两束激光垂直相交,经一个合束-分束器件BCS,即一个50%半透半反镜放在它们交点处,两束激光均以45°方向入射,分别反射和透射.

将每束入射激光分束为两束,同时激光器1的反射光和激光器2的透射光合束,激光器1的透射光和激光器2的反射光合束.再分别经各自的凹透镜扩束,投射到毛玻璃上,利用漫散射的光照明实验段.两束参考光分别从两台激光器的两束激光在它们合束之前分束得到,再从不同的方向射向全息干版.

当激光器1发射激光脉冲时,照明光从两个方向射向毛玻璃D,参考光1从全息干版H法线的左侧射向全息干版,记录第1次曝光的全息图.经过斯坦福延时器延时一段时间 t 后,这里 $t=30\text{ms}$,第2台激光器发射激光脉冲,照明光也从两个方向照亮D,再射向全息干版,参考光2从H法线的右侧射向全息干版,记录第2次曝光的全息图.

采用该方法记录全息图,两个不同方向参考光的两次曝光在同一块全息干版上的两个全息图可以同时再现,也可以分别再现.

用CCD摄像机把两个有一定延时的图像分别切取,用互相关的方法处理速度矢量,解决方向二义性问题,也能用来校正两个不同瞬时全息图再现的几何匹配问题;照明光来自于两个方向,所拍摄的全息图的视场范围较大,再现时具有较大的视场角,有利于粒子位移矢量的三维拍摄和计算.

1.3 全息图的再现及判读技术

全息图的再现及判读系统如图3所示.图中

上半部分为全息图再现系统,下半部分为CCD相机的摄像系统和图像处理系统.

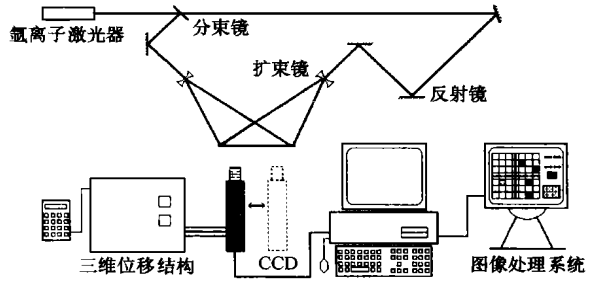


图3 全息图的再现及判读系统

全息图再现时,能否使存在于同一块全息干版的两个全息图清晰地再现且再现在同一几何位置,达到完全重合,是本HPIV技术的关键之一.全息图的再现中照明光源的波长要与照相光源的波长一致.否则图像会产生畸变,且粒子图像的位置也发生变化.

照相光源是Nd:YAG脉冲激光器,200mJ/脉冲,脉宽6ns,其激光波长为532nm,当然最好采用同波长的YAG连续激光器再现.但是由于条件所限,选用连续的氦离子激光器,其激光波长为514nm,接近于原波长.

在实验段立方体盒的前后表面外放置“井”字形的标线,以便于再现时调节光路,作为两个全息图再现是否重合的依据.重建全息场按一定次序,用两个方向的照明光照明全息图,分别得到包含两次曝光的重建粒子群场.对每一个全息粒子场的某一切面,均采用体视记录方式,对同一切面均有左右两幅记录图像.

用CCD相机拍摄全息图再现现象时,为得到具有一定景深的切面图像信息,在CCD相机前加装了一个焦距为250mm的透镜,景深为9mm.其安装在高精度的三维位移机构上.首先聚焦在再现现象的某一切面上,每一次拍摄24mm×35mm范围内的图像,其数字化图像为512×512个像元,再通过左右上下移动CCD相机,把这一个切面的所有图像全部采集到计算机中.

2 HPIV计算方法

为从全流场的两次曝光的粒子图像中得到速度信息,采用了下列计算方法.

2.1 二维互相关方法

速度向量的获取,主要是寻求经一定延时的两个图像的相互关系,第1次曝光的图像中的判读小区域在第2次曝光的图像中寻找其最大相关

的小区,求得粒子位移的方向和大小.

假设有 2 个离散的二维信号是 $x(m, n)$ 和 $y(m, n)$,把 $x(m, n)$ 在 $y(m, n)$ 上对每一个移动点 (k, l) 计算,则互相关函数为

$$R(k, l) = \sum_{m=-} \sum_{n=-} x(m, n) y(m+k, n+l)$$

式中, $R(k, l)$ 表示了 x 与 y 之间的相互关系, $R(k, l)$ 为最大的 k 和 l 就表示 x 与 y 的相对位移.

通常情况下,实验中所获得的两次曝光的全息图再现象亮度不均匀,所采用的又是图像互相关方法,所以在编制的 HPIV 二维计算软件中,使用了如下规格化的互相关方法作为匹配尺度:

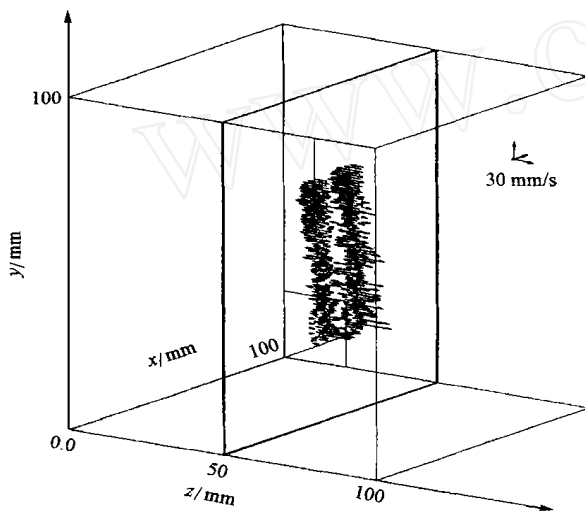
$$(k, l) = \frac{R(k, l)}{\sum_{m=-} \sum_{n=-} y^2(m+k, n+l)}$$

2.2 体视三维计算方法

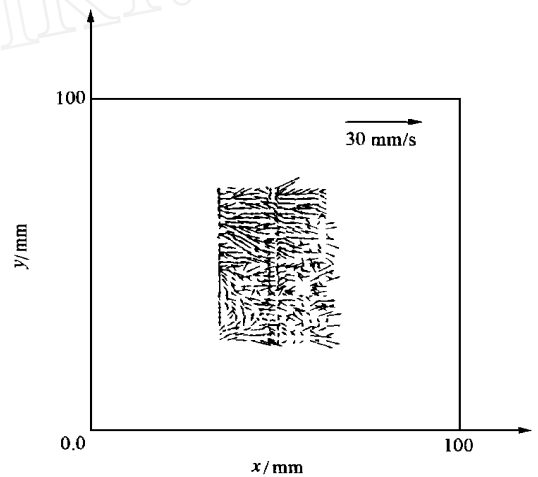
为取得三维速度场,可有多种途径,这里采用体视图像采集处理方法^{[3],[4]},对每一观测区需要从左右两个方位摄取图像,可以得到该观测区的左视二维速度场及右视二维速度场.再由同名点的体视计算公式^[3],根据左、右视同名点(判读小区)的速度,求得垂直切面的同名点的速度分量.然后再反算回来,求得真正的同名点的面内二维速度分量,即一个点的三维速度矢量.依此类推,得到整个观测区的三维速度矢量分布.

3 HPIV 实验结果

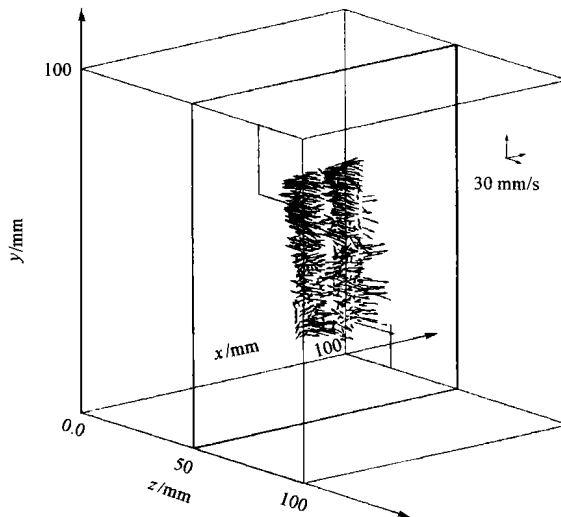
采用上述 HPIV 技术,经判读和处理,实验的结果目前给出了 $48\text{ mm} \times 35\text{ mm} \times 45\text{ mm}$ 容积内的 2800 个三维速度矢量,在这里由于篇幅有限,只给出一个切面的结果,如图 4 所示.



a $z = 50\text{ mm}$ 处轴向速度场分布



b $z = 50\text{ mm}$ 处面内速度场分布



c $z = 50\text{ mm}$ 处三维速度场分布

图 4 $z = 50\text{ mm}$ 处子图像及速度分布

4 结束语

本文对 HPIV 技术作了比较深入的研究,并对立方体盒对角复杂流动进行了初步的测量.设计研制及试验了一套比较完整和可行的 HPIV 光路系统,包括全息记录及全息图再现系统,采用了激光光束合束分束光路布置,采用规格化的互相关技术和体视三维重建方法,得到流场三维空间(48 mm ×35 mm ×45 mm)内 6 个切面的三维速度场分布,同时有效地解决了速度方向的自动判别问题.由于目前我们的图像处理系统和计算机所限,以及脉冲激光器能量的限制,仅给出了立方体内中心部位的三维速度向量分布.

参 考 文 献

- [1] Shen G X. On the approach to ideal observation & measurement techniques for the fluid Mechanics[J]. SPIE, 1997, 3172: 540 ~ 550.
- [2] Hui Meng, Fazle Hussain. Holographic particle velocimetry : a 3D measurement technique for vortex interactions , coherent structures and turbulence[J]. Fluid Dynamics Research , 1991 ,8 (8) :33 ~ 52.
- [3] 康 琦. 体视 3D-PIV 技术及其初步应用[D]. 北京:北京航空航天大学飞行器设计与应用力学系,1995.
- [4] Shen G X, Kang Q. Steroscopic PIV applied to 3D Vortex flow[A]. In: Crowder J P, ed. Proceedings of 7 th Int Symp on Flow Visualization[C]. New York :Begell House Lne , 1995. 733 ~ 738.

HPIV and its Application

DUAN Li

(Beijing University of Aeronautics and Astronautics ,Dept. of Flight Vehicle Design and Applied Mechanics)

KANG Qi

(Chinese Academy of Sciences ,Institute of Mechanics)

DING Han-quan

(Beijing University of Aeronautics and Astronautics ,School of Science)

SHEN Gong-xin

(Beijing University of Aeronautics and Astronautics ,Dept. of Flight Vehicle Design and Applied Mechanics)

Abstract : HPIV technology can realize the measurement of three-dimensional velocity (u, v, w) in a three-dimensional space. Using two Nd: YAG pulsed lasers , two exposures , two symmetry reference lights , and off-line holographic technique , three-dimensional particle flow field was recorded. Using SPIV technique 's photographic method , two directions ' particle images were obtained for three-dimensional calculation. Using cross correlation , the velocity direction was resolved. Using this HPIV system , the three-dimensional vortex flow passed diagonally through a cubic box was measured. The measurement of three component-velocity in three-dimensional flow field was realized.

Key words : flow measurement ; digital image processing ; pulse holography ; cross-correlation ; 3D-reconstruction