

# 双反射技术对自由射流三维速度场的测量及显示<sup>1)</sup>

索 瑾 贺正辉 申功忻\* 张宏民

(太原工业大学应用数理力学系, 太原 030024)

\*(北京航空航天大学, 北京 100083)

**摘要** 应用摄影测量和图像处理技术对自由射流的三维速度场进行了 PIV 测量. 构造了一种全新的双反射测量技术, 使得三维测量中的多点同步和空间定位得到解决和提高. 在精确计算了水与空气的折射关系之后, 两幅像片间的同名点寻找更加可靠. 重建和再现了 PIV 中射流的连续三维瞬态粒子分布场和速度矢量场.

**关键词** 自由射流, 粒子图像测速法, 粒子迹线测速法, 双介质摄影测量

## 引 言

自由射流的研究所涉及的应用范围相当广泛, 但实际中射流均以湍流形式出现. 湍流的最大特点即是其流动的三维性. 因此理想地研究与测试射流的实验应该是基于能获得一个三维的、高分辨的、连续的瞬态流速场.

70 年代以前, 流体测试技术以热线测速和激光多普勒测速技术最为广泛使用, 但是这两项技术都只限于单点测式. 80 年代以来, 发展了整个流场的瞬态测量技术. 其中粒子迹线测速法 PTV (particle-tracking velocimetry) 和粒子图像测速法 PIV (particle-imaging velocimetry) 发展最为迅速和突出. 但是, 目前 PTV 和 PIV 最成熟的部分仍然只限于二维平面测量. Chang(1984, 1985a, 1986b)<sup>[1]</sup>, Koichi Nishino, Nobuhide Kasagi(1989)<sup>[2]</sup> 等先后对三维测试和消除水的折射问题作过研究, 完整的三维空间测试正经历着测试方法和技术的改善.

三维 PIV 技术, 至少要使用两幅不同角度的同一流场的照片. 这就存在一个两幅照片必须取自同一时刻的问题, 即所谓同步问题; 其次精确知道两照片的空间位置是测量的前提; 最后计及有双介质情况下的折射是求得粒子空间位置的关键. 本文设计了双反射法巧妙地解决了这些问题.

## 1 实验系统

图 1 给出实验系统全貌. 摄影机从水箱后下方通过镜子取得了喷射流的反射图像. 调整两镜子和摄影机的角度, 可在一底片上形成左右两幅同一喷射流的对称图像. 这相当于用一部摄影机代替了不同视角的两部摄影机来拍摄. 两镜子可在一定范围内任意放置以取得最佳摄影位置, 同步问题也不再存在.

<sup>1)</sup> 山西省自然科学基金资助项目.

1993-09-17 收到第一稿, 1994-03-21 收到修改稿.

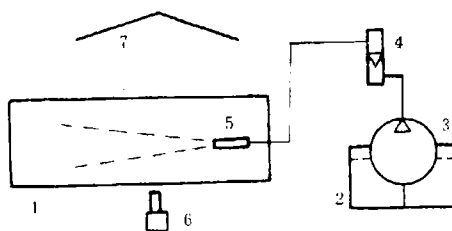
16mm 高速摄影机拍摄速度范围：100—8500fps；配有可变焦镜头。本实验设定速度 200fps。

两镜面经过仔细筛选，镜面起伏误差小于 0.005mm/100mm。

喷嘴直径 5mm，粒子采用白色尼龙小球，直径 0.3mm 左右，比重 1.04，在水中具有较好的反光性和跟随性。本实验中喷嘴流速 1.8m/s， $Re$  约为 8900。

要求得粒子的空间坐标，首先要知道像在绝对坐标系中的坐标，为此，我们

设计一模块放在水箱中，模块上用坐标镗床均匀雕刻了 110 圆点，这些点的空间坐标是精确已知的，将模块放在水箱中要测量的地方。运用摄影测量方程，便可从模块上点的像片坐标反算出摄影机各方位参数。



1. 主水箱, 2. 小水箱, 3. 水泵, 4. 流量计, 5. 喷嘴, 6. 摄影机, 7. 镜面

图 1 实验系统全貌

1. water tank, 2. small tank, 3. pump,

4. flowmeter, 5. jet nozzle, 6. camera, 7. mirrors

Fig.1 The view of the experimental system

## 2 计算基础

1) 双反射原理 图 2 所示即是双反射三维摄影测量原理图。图中  $F_0$  为摄影机物镜中心也是摄影测量的投影中心， $F_1, F_2$  为在镜中形成的两个虚拟投影中心， $M_1$  为镜面 1， $M_2$  为镜面 2。由物体上点  $P_1$  和  $P_2$  发出的光线经两镜面反射后进入摄影机，在同一张底片上形成了两个对称物像  $p'_1, p'_2$  和  $p''_1, p''_2$ 。这两个物像就好像是从投影中心在  $F_1$  和  $F_2$  的两架摄影机从两个不同角度拍摄得到的一样。

图中  $X, Y, Z$  是建于物方空间的绝对坐标系； $U', V', W', U'', V'', W''$  是建于投影中心  $F_1$  和  $F_2$  上的摄影坐标系； $x', y'$  和  $x'', y''$  是基于  $F_1$  和  $F_2$  的像片坐标系。

根据投影几何原理，可以分别建立基于投影中心  $F_1$  和  $F_2$  的摄影测量方程<sup>[3]</sup>。该方程用来作摄影机定位。定位在没有水的情况下进行。

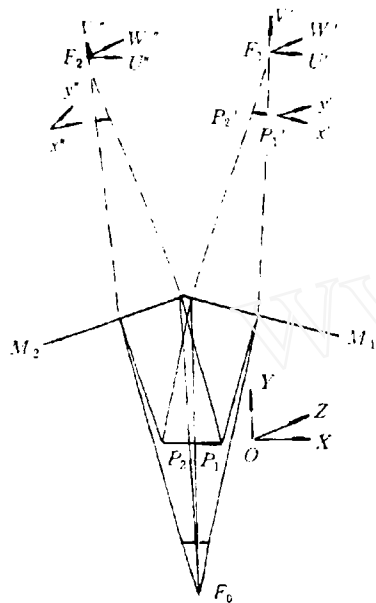


图 2 双反射摄影测量原理图

Fig.2 The principle of two reflection photogrammetry

2) 双介质摄影测量公式 图 3 即双介质投影原理图。

图中  $M$  是折射面， $P$  点发出的光线在  $A$  点穿过折射面，到达投影中心  $F_1$ 。  $\mathbf{a}$  是折射面在  $A$  点的单位法向矢量。  $O-XYZ$  即物方绝对空间坐标系，  $\mathbf{X}$  是  $P$  点的坐标矢量，  $\mathbf{A}$  是折射点  $A$  的坐标矢量，  $\mathbf{S}$  是投影中心  $F_1$  的坐标矢量，  $\mathbf{P}$  是物点

$P$  与  $A$  间的矢量,  $B$  是投影中心  $F_1$  与  $A$  间的矢量.

设  $\mathbf{p} = (p_1, p_2, p_3)$  是  $\mathbf{P}$  的单位矢量, 则有

$$p_1^2 + p_2^2 + p_3^2 = 1 \quad (1)$$

由折射定理中的共面条件可得

$$(\mathbf{a} \times \mathbf{b}) \cdot \mathbf{p} = 0$$

即

$$\begin{vmatrix} p_1 & p_2 & p_3 \\ a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \end{vmatrix} = 0 \quad (2)$$

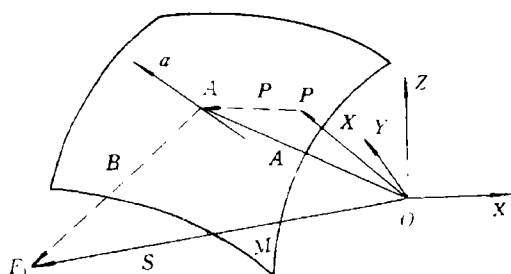


图 3 双介质投影图

Fig.3 Projection of two-media

又由折射第二定理

$$n = \frac{\sin \alpha}{\sin i} = \frac{|\mathbf{a} \times \mathbf{B}| \cdot |\mathbf{p}|}{|\mathbf{a} \times \mathbf{p}| \cdot |\mathbf{B}|} = \frac{|\mathbf{a} \times \mathbf{b}|}{|\mathbf{a} \times \mathbf{p}|}$$

可得

$$\begin{aligned} & (a_2 b_3 - a_3 b_2)^2 + (a_3 b_1 - a_1 b_3)^2 + (a_1 b_2 - a_2 b_1)^2 \\ & = n^2 [(a_2 p_3 - a_3 p_2)^2 + (a_3 p_1 - a_1 p_3)^2 + (a_1 p_2 - a_2 p_1)^2] \end{aligned} \quad (3)$$

式中:  $n$ : 折射率;  $20^\circ\text{C}$  时水的折射率为 1.33,  $\alpha$ :  $\mathbf{p}$  与  $\mathbf{a}$  的夹角,  $i$ :  $\mathbf{B}$  与  $\mathbf{a}$  的夹角.

联立以上 (1), (2), (3) 三个方程可解出  $p_1, p_2, p_3$ .

对应两个投影中心  $F_1$  和  $F_2$  可得两个  $\mathbf{p}$ , 记为  $\mathbf{p}_1$  和  $\mathbf{p}_2$ . 即:  $\mathbf{P}_1 = \lambda_1 \mathbf{p}_1$ ,  $\mathbf{P}_2 = \lambda_2 \mathbf{p}_2$ . 因为  $\mathbf{X}$  是唯一的. 当折射面可用解析式表达, 例如本实验是简单平面时, 可以方便地求出  $\mathbf{B}$  射线与折射面交点, 即两个矢量  $\mathbf{A}_1$  和  $\mathbf{A}_2$ .

显然

$$\mathbf{X} = \mathbf{A}_1 - \lambda_1 \mathbf{p}_1, \quad \text{和} \quad \mathbf{X} = \mathbf{A}_2 - \lambda_2 \mathbf{p}_2 \quad (4)$$

式中系数  $\lambda_1, \lambda_2$  可由共面条件

$$0 = (\mathbf{A}_1 \times \lambda_1 \mathbf{p}_1) \cdot \mathbf{X} = (\mathbf{A}_1 \times \lambda_1 \mathbf{p}_1) \cdot (\mathbf{A}_2 - \lambda_2 \mathbf{p}_2)$$

给出.

### 3 图像处理

图像处理在配有图像板和扫描仪的微机内进行. 摄影机拍到的底片被放大 8 倍后投影在扫描仪上, 形成两幅  $512 \times 512 \times 8$  的数字图像进入微机内. 先分别作两幅图像的预处理: 确定每个粒子像点的质心坐标. 其次, 最重要的也是最困难的是寻找两幅图像上的同名点. 此过程由一相关程序来完成. 有了同名点, 可从公式 (3) 算

得这一点的绝对空间坐标. 最后, 连续两幅三维点状分布图间相关, 以合成一幅空间速度矢量图.

#### 4 结果与结论

本实验中, 观测空间为  $220 \times 180 \times 100 \text{mm}$ . 经预处理后每一幅图像上平均有  $2 \times 120$  个粒子像点, 两幅图像点作相关处理后大约只有 80 对同名点被找到.

图 4 是连续两幅点图像得到的一幅速度矢量场分布图.

使用高速摄影机和双反射法, 是研究、测试、显示三维实时喷射流场的有效手段. 这一方法将可能为揭示湍流场的空间拟序结构作出新贡献.

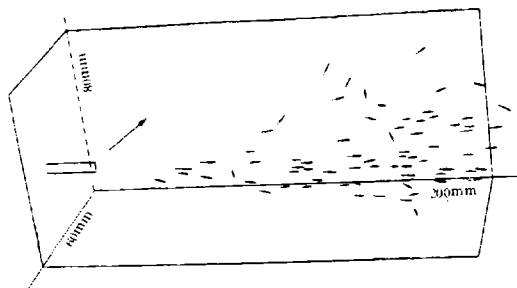


图 4  
Fig.4

#### 参 考 文 献

- 1 Chang TP, Wilcox NA, Tatterson GB. Application of image processing to the analysis of three-dimensional flow fields. *Opt. Eng.*, 1984, 23: 283-287
- 2 Nishino K, Kasagi N, Hirats M. Three-dimensional particle tracking velocimetry based on automated digital image processing. *J Fluid Eng.*, 1989, 111: 384-391
- 3 王之卓. 摄影测量原理, 北京: 测绘出版社, 1979

### THREE-DIMENSIONAL MEASURING AND VISULIZATION OF A FREE JET BY MEANS OF TWO-RELECTION

Suo Jing He Zhenghui Sheng Gongxin\* Zhang Hongming

(Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

\*(Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

**Abstract** Three-dimensional PIV of a free jet is given by means of the photogrammetry and image processing. In this paper, a new double-reflection method is being used to solve the problems of synchronism and precision in the three-dimensional measuring of a high speed jet. The indices of refraction in water and air are considered, so the calculation of particle's 3-D position is correct. A succession of 3-D, global, instantaneous fields of particles and their velocity vectors have been reconstructed by means of microcomputer.

**Key words** free-jet, PIV, PTV, two-media photogrammetry