

# 基于单曝光激光层析图像的粒子速度测量系统

杨宏<sup>1</sup>, 顾<sup>2</sup>, 刘勇<sup>2</sup>, 徐益谦<sup>2</sup>

(1. 南京师范大学动力工程学院, 210042, 南京; 2. 东南大学动力工程系, 210096, 南京)

[摘要] 首先对目前的 PIV (Particle Imaging Velocimetry) 技术进行了总结, 针对该系统设备复杂、价格昂贵的现实, 提出了一种利用对单次曝光的流场空间域激光层析图像进行两次傅立叶变换后获得的频域图像求得最大互相关系数的二维速度场测量的新思路. 实验表明: 利用该方案有可能开发出针对小速度测量范围的实用粒子图像测速仪.

[关键词] 激光层析, 单帧, 粒子图像测速

[中图分类号] TK11; [文献标识码] A; [文章编号] 1672-1292(2002)02-0056-05

## 0 引言

速度测量是热工研究重要的实验测试手段, 粒子图像测速技术(PIV)基于粒子示踪流场可视化技术, 并结合了激光技术、图像处理技术, 是目前常用的高精度二维速度场测量技术. 与其它的速度测量技术, 如热线、LDV、纹影方法相比较, 实现了无干涉、瞬态实时全流场的目标, 现在广泛应用于湍流流动、燃烧研究领域.

PIV 技术的关键技术有 3 点, 首先, 必须解决激光片层照明技术; 其次, 解决示踪粒子的均匀添加和浓度控制; 第三, 利用图像处理技术和相关分析方法对数字图像进行后处理, 从其中提取二维速度场信息. 粒子图像测速系统的关键在于后端的图像处理和速度提取算法的软件设计. 对此的研究已开展了很多, 笔者将 PIV 的发展和现状进行了以下的总结和分类, 参见表 1 所示.

表 1 PIV 技术研究发展及现状

分类名称	原理	特点	研究者
激光光斑测速 <sup>[1]</sup> 亮度分布模式 <sup>[2]</sup>	杨氏干涉边缘条纹 寻找连续两帧图像在查询域中 互相关系数的最大值	计算量小, 可用于高速流场 两帧, 高图像密度	Simpkins, P G Adrian, R J
Delanuay 镶嵌技术 <sup>[3]</sup>	利用颗粒组成的 Delanuay 三角 域计算相似系数	两帧, 高速算法, 高图像密度	Song, X Q
弹簧模型 <sup>[4]</sup>	计算颗粒间虚拟弹簧系统的应 力相似度	两帧, 高图像密度	Okamoto, K
速度梯度张量方法 <sup>[5]</sup>	计算连续两帧图像叠加后粒子 距离平方和的最小值	两帧, 二维和三维	Ishikawa, M
粒子轨迹跟踪法 <sup>[6]</sup>	对粒子轨迹光顺度的评估	四帧, 二维和三维	Nishino, N

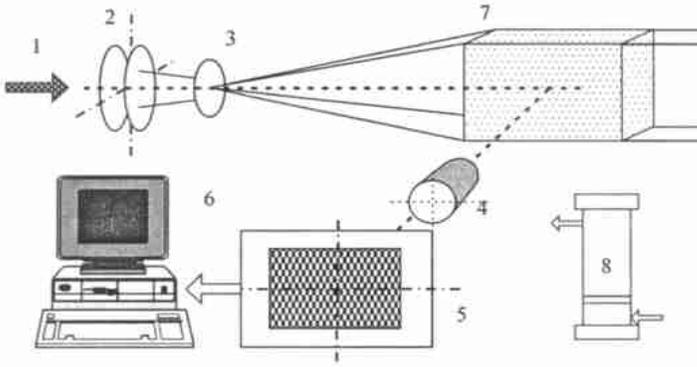
Lourence 和 Krothapalli<sup>[7]</sup> 利用该技术研究了湍流尾流对机翼的影响, Landreth<sup>[8]</sup> 研究了湍流射流与壁面的相互作用, PIV 技术已成为当代流体力学不可缺少的诊断工具. 未来的 PIV 技术向着高速流场、高空间分辨率和三维速度场方向发展. 目前局限该技术应用的主要因素是设备复杂和价格昂贵, 本文采用激光层析技术, 利用改变摄像机的曝光时间, 提取粒子尾迹层析图像, 并对单帧图像进行两次傅

收稿日期: 2002-08-10

基金项目: 973 国家重点基础研究专项经费资助项目(G1999022206), 南京师范大学高层次人才启动基金资助

作者简介: 杨宏, 1972-, 工学博士, 南京师范大学动力工程学院副教授, 主要从事湍流燃烧和污染物控制等方面的研究

立叶变换求得最大互相关系数, 获得二维速度场测量的新思路, 实验表明: 利用该方案有可能开发出针对小速度测量范围的实用粒子图像测速仪。



1. 激光光束 2. 聚焦透镜 3. 扩束光路 4. 成像镜头  
5. 成像靶片 6. 计算机 7. 试验流场 8. 示踪粒子添加器  
图 1 激光层析粒子图像系统

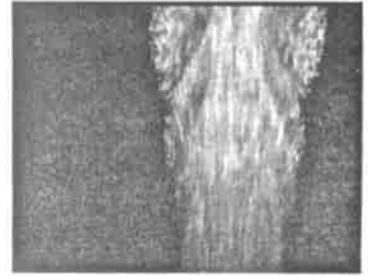


图 2 射流流场结构显示

## 1 实验方法

Boyer<sup>[9]</sup>在 1980 年首次提出了利用激光诱导 Mie 散射方法去测量火焰锋面结构的思想, 其中的关键技术是雾化粒子示踪技术, 常用的方法有硅油雾化 M SOD( Mie-Scattering-from-Oil-Droplets) 方案和 TiCl<sub>4</sub> 方案. Roquemore<sup>[10]</sup>和 Chen<sup>[11]</sup>分别在 1982 和 1986 年利用 TiCl<sub>4</sub> 的化学反应特性对火焰结构进行了测量, 他们的工作奠定了激光层析技术的理论基础。

本文开发的激光层析技术的原理如图 1 所示. 采用固态微粒子示踪方案, 白色的轻质 MgO 粉末(标识直径 3.0~ 5.0 μm), 在小型流化床给粉器中被流化风气流输送至预混室, 均匀弥散在射流混合物之中, 加入的颗粒浓度可以由流化风的大小调节. 由于白色 MgO 颗粒在激光片层光源的照射下会产生 Mie 散射, 从而标志出断面流场的层析图像. 这种方案的优点在于流化给粉试验设备简单, 粒子的添加稳定、均匀, 便于调节. 轻质氧化镁的悬浮特性很好, 因此对流场的跟随性好。

试验所采用的激光器为西南技术物理所生产的倍频式 Nd-YAG 激光器, 该激光器为连续输出式, 激光功率在 1~ 10W 内连续可调, 激光的输出波段为 532 nm 的绿光, 出口输出光束直径为 4 mm, 前端安装有聚焦光路, 使得在试验段光束直径达到 0.5~ 1.0 mm. 激光片层光源由一组扩束光路实现, 在其后部可以产生一个扇状的光片. 由于柱面镜的边缘效应, 在展开的扇形片层光面上光强不均匀, 但试验图像的测量范围为 50 mm × 80 mm, 在此范围内基本上对成像质量没有影响。

## 2 速度提取方法与结果

对于低速流场, 通过双脉冲曝光方案对两帧时间上连续的粒子图像进行相关性分析是合适的, 但对于高速流场, 两次脉冲曝光的时间间隔必须很短, 摄像系统的采样速度必须与之相适应. 在没有昂贵的高速摄影仪器的条件下, 运用二次曝光方法就不可行了. 为此, 作者提出了运用单帧快速曝光图像的两帧 FFT 变换的自相关速度算法. 该算法无需添置价格高昂的高速摄影仪器和脉冲同步发生器. 只需在上节所述的激光层析设备基础上, 对图像处理软件进行改进, 结合二维频域分析做一些标定工作。

一幅图像的成像过程可以看作是点光源  $f(x, y)$  在整个曝光时间  $T$  内的连续累加, 正如方程(1)所描述的。

$$g(x, y) = \int_0^T f[x + x_0(t), y + y_0(t)] dt \tag{1}$$

其中  $x_0(t)$  和  $y_0(t)$  分别是  $t$  时刻光点相对于初始点  $(x, y)$  的位移.  $g(x, y)$  为图像灰度. 由于点光源的相对位移, 结果成象后就不再是一个点了, 而是一个带拖尾的模糊像段.

对方程(1) 进行二维傅立叶变换, 利用傅立叶变换的空域频移特性, 在频域  $\mathcal{R}(u, v)$  上有以下关系:

$$G(u, v) = \int \int g(x, y) \exp[-j2(\pi ux + \pi vy)] dx dy = \int_0^T \exp[j2(\pi ux_0(t) + \pi vy_0(t))] dt F(u, v) \tag{2}$$

其中,  $F(u, v)$  为光点  $f(x, y)$  的傅立叶变换.

假设颗粒的运动轨迹是一条短直线, 而且速度是一定值, 可以得到:

$$x_0(t) = at/T; \quad y_0(t) = bt/T \tag{3}$$

其中,  $a$  和  $b$  分别为颗粒在曝光时间  $T$  内水平、垂直方向的位移.

将式(3) 代入方程(2) 后积分方程, 得到:

$$|G(u, v)| = \begin{cases} \left\{ \frac{T}{(ua + vb)} \sin[(au + vb)] \right\}^2 |F(u, v)| \\ \left\{ T \cos\left[\frac{1}{2}(au + ub)\right] \right\}^2 |F(u, v)| \end{cases} \tag{4}$$

对方程(4) 再进行一次傅立叶变换后提取模,

$$GG(m, n) = \frac{T^2}{4} \left[ FF\left[m + \frac{a}{2}, n + \frac{b}{2}\right] + 2FF(m, n) + FF\left[m - \frac{a}{2}, n - \frac{b}{2}\right] \right] \tag{5}$$

其中,  $GG(m, n)$  为第二次傅立叶变换后的模. 模的主轴方向位于点  $(a/2, b/2)$  和  $(-a/2, -b/2)$  的连线上, 即模的主轴方向与拖尾运动的线段方向一致. 如图 3 所示左侧的图像表示在  $1/30$  s 的曝光时间内实际测量的粒子运动的轨迹, 中间的十字线为进行 FFT 变换的中心坐标. 右侧的图像为对单个颗粒运动进行的两次傅立叶变换后的模(用灰度图像显示的结果). 两次 FFT 变换后的幅值的等值线图如图 4 所示. 可以发现: 首先, 经过两次 FFT 变换后的图像具有中心对称性; 其次, 变换后的图像主轴方向与实际粒子运动方向是一致的. 这两点对利用图像处理的方法自动判断粒子的运动方向非常重要, 对称性的存在为实际的图像分析创造了有利条件.

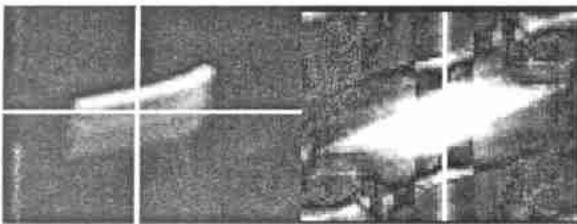


图 3 灰度图像显示的 FFT 模值

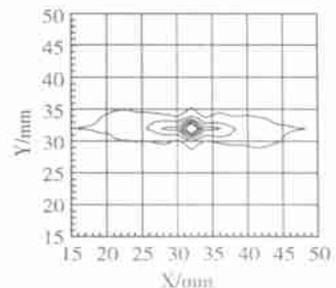


图 4 双 FFT 等值线分布

灰度图像主轴方向的确定采用图像处理当中的矩方法:

对于灰度图像  $f(x, y)$ , 图像的  $(p + q)$  阶矩的定义式为:

$$M_{pq} = \int \int x^p y^q f(x, y) dx dy \tag{6}$$

离散形式为:

$$M_{pq} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} x^p y^q f(x, y) dx dy \quad (7)$$

矩  $M_{pq}$  可以作为反映图像区域中的白区相对于重心是如何分布的度量.  $M_{20}$  和  $M_{02}$  分别表示围绕通过重心的垂直和水平轴线的惯性矩, 若  $M_{20} > M_{02}$ , 则表明计算区域为一个在水平方向拉长的区域, 图像的惯性主轴方向即可通过这两个参数和中心矩的组合得到.

$$= (1/2) \tan^{-1} [2M_{11} / (M_{02} - M_{20})] \quad (180^\circ) \quad (8)$$

前面曾经描述过在整个曝光时间  $T$  内的成象应该为光点的连续累加, 所以成象系统的拖尾现象不可避免, 这为以往的图像处理造成了很大困难. 但是, 作者对速度方向的确定正是利用了这一特性, 有时还要人为地适当延长摄像机的曝光时间来使得图像出现这种拖尾效果.

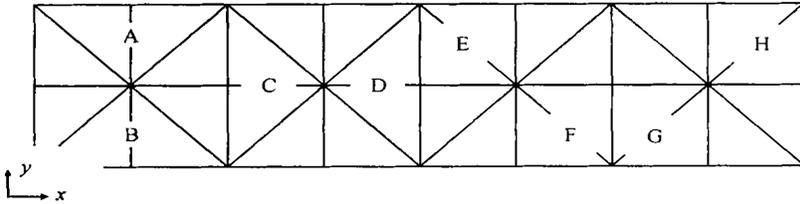


图 5 速度方向的确定

不论是线型 CCD, 还是面型 CCD, 工作原理都是将照在像敏单元上的照度信号转变为载流子数密度信号存储于(MOS 电容)中, 再转移到 CCD 的移位寄存器中, 在驱动脉冲的作用下顺序地移出器件. 这一过程可以细化为以下步骤: 关闭传送门, 加电压到感光部分的电极上以形成耗尽层, 存储由于光激励产生的电荷, 然后, 与打开传送门的同时, 在传送电极下面形成耗尽层, 把感光部分的存储电荷向 CCD 移位寄存器传送, 接着在关闭传送门, 一边由 CCD 寄存器顺次传送电荷, 一边就在输出部分执行读出操作. 可见, 设定的电子快门速度决定了传送门从关闭到开启的这个过程, 加电压到感光部分的电极上形成耗尽层的过程与之同步完成, 加压脉冲电平并不是一个完整无缺的标准方波, 耗尽层必须逐渐形成, 最后达到饱和. 因此, 对 CCD 靶片上的光激励电荷的积累会产生影响. 起点处颗粒的成象点由于耗尽层较薄弱, 像点较模糊而且亮度灰暗, 随着时间的延续, 耗尽层的不断完满, 后续颗粒的成象点变得清晰、光亮. 运动的物体形成的模糊图像在起点和终点灰度上的差别, 对于数字化图像进行这样的分析是十分合适的, 利用这一特性, 可以沿求取的查询域惯性主轴方向, 对原始图像的在查询点范围内的灰度进行累积比较, 从而根据两端的灰度累积值来确定最后的粒子运动方向.

综上所述, 确定速度方向的具体方法是将查询域分解成如图 5 所示的 8 个区域, 其中心为查询点自身. 根据求得的惯性主轴方向 (其值为  $[-1/2, 1/2]$ ), 将其按照划分成 4 个区域, 即  $[-1/2, -3/8]$ ,  $[-3/8, -1/8]$ ,  $[-1/8, 3/8]$ ,  $[3/8, 1/2]$ , 按照图示的 4 组区域, 分别计算两个区域的灰度累积, 从而获得粒子的运动方向. 由于粒子分布的不均匀性, 可能在查询空间的某些位置出现了空白, 该点的速度采用邻近 4 点的平均值.

图 6 为射流局部流场在激光照射下示踪粒子运动情况, 分别为高速射流的边界附近的粒子运动和低速射流时颗粒的运动.

至于颗粒速度的大小, 对于较低运动速度的流场来说, 因为颗粒运动速度影响到图像平面颗粒的轨迹, 利用上面求得的速度方向, 可以在该方向上查询颗粒的拖尾, 通过图像处理可以清晰地获得在曝光时间内颗粒的运动距离. 对于较高速度的流场, 可根据两次傅立叶变换后模值的平均量值来相对确定. 通过在相同照射强度下图像的比较, 高速运动的颗粒形成的图像进行两次 FFT 变换后的平均模值与之成正比, 实际量值则必须由标定来完成.

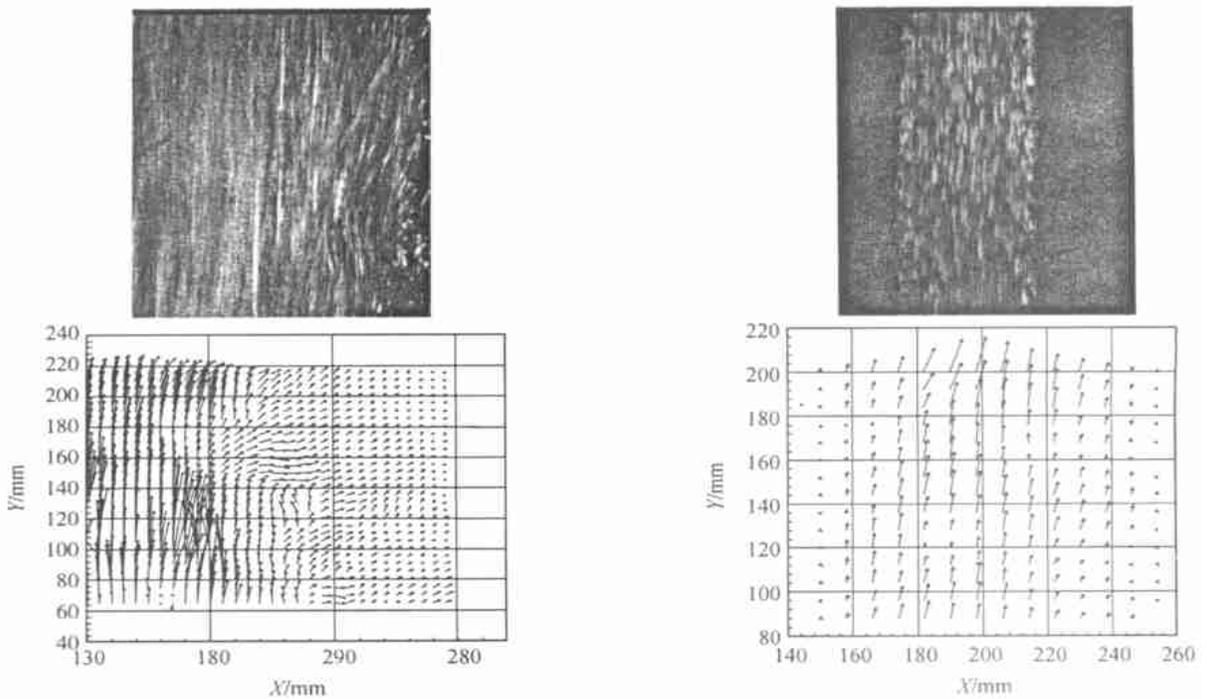


图 6 原始层析图像与速度矢量图

### 3 结论

本文归纳现有粒子图像测速系统的原理,在此基础上,提出一种新的激光粒子图像速度测量方案,即利用对单次曝光的流场空间域图像进行两次傅立叶变换后获得的频域图像来确定粒子运动速度.该方案实验结果表明:对 20 m/s 范围内的中低速流场效果良好,具有设备简单,实用性高的特点,有望进一步地开发出成熟的 PIV 系统.

#### [参考文献]

- [1] Simpkins P G. Laser speckle measurement of transient Benard convection[J]. J Fluid Mech, 1978, 89(3): 665~ 671.
- [2] Adrian R J. Particle imaging techniques for experimental fluid mechanics[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, ASME, 1991, 23(2): 261~ 304.
- [3] Song X Q, Yamamoto F. Cross-correlation algorithm for PIV by Delaunary tessellation[C]. Proceeding of the Second International Workshop on PIV 97 Fukui[J]. VSJ, 1997: 109~ 115.
- [4] Okamoto K. Three-dimensional particle tracking algorithm: velocity vector histogram and spring model[C]. In: Kobayashi T. Proceeding of the second International Workshop on PIV 97. Fukui, VSJ, 1997: 21~ 32.
- [5] Ishikawa, M., Yamamoto, F., A novel PIV algorithm using velocity gradient tensor[C]. In: Proceeding of the Second International Workshop on PIV 97 Fukui, VSJ, 1997: 51~ 56.
- [6] Nishino N, Kasagi N. Three-dimensional particles tracking velocimetry based on automated digital image processing[J]. J of Fluids Engineering, 1989, 111(2): 384~ 391.
- [7] Lourence L, Krothapalli A. Application of PIDV to the study of the temporal evolution of the flow past a circular cylinder [J]. Laser Anemometry in the Fluid Mechanics-III, 1988, 32(1): 161~ 178.
- [8] Landreth C C. Impingement of a low Reynolds number turbulent circular jet onto a flat at normal incidence[J]. Exp Fluids, 1990, 9(1): 74~ 84.

(下转第 83 页)

[参考文献]

- [1] 王子介. 地板供暖及其发展动向[J]. 暖通空调, 1999, 6: 35~ 38.
- [2] 王子介. 地板辐射供冷及地热空气源热泵可行性研究分析[C]. 全国热泵和空调技术交流会论文集, 2001, 10: 258~ 265.
- [3] 张建忠, 龚延风. 空气源热泵冷热水机组在南京的应用[J]. 现代空调, 2001, 3: 141~ 156.
- [4] B W Olesen, E Michel. Heat Exchange Coefficient Between Floor Surface and Space by Floor Cooling-Theory or a Question of Definition[J]. ASHRAE Transactions: Symposia, DA- 00- 8- 2: 684~ 694.
- [5] B W Olsen. Possibilities and Limitations of Radiant Floor Cooling[J]. ASHRAE Transactions 1997(103), 1: 42~ 48.
- [6] 1999 ASHRAE Applications Handbook, Chapter 52[Z].

## Energy Consumption and Operating Temperature of Residential Building by Using Radiant Heating

Wang Zijie

(College of Power Engineering, Nanjing Normal University, 210042, Nanjing, PRC)

**Abstract:** The air temperature, inner surface temperature and heating equipment energy consumption in winter season were measured for an apartment equipped with radiant heating system. Based on the measured results, the average radiant temperature and operating temperature of different rooms with different outside walls were calculated and compared. The results show that the operating temperature of rooms with two sides of outside walls is more than 1 °C higher than that with one side of outside wall. The range of the energy consumptions of the heating system varies from 7.3 kWh/m<sup>2</sup> to 52 kWh/m<sup>2</sup> for a heating season, depending on the equipment operating models and room design temperatures.

**Key words:** radiant heating, residential building, operating temperature, building energy consumption, energy efficiency

[责任编辑: 刘健]

(上接第 60 页)

- [9] Boyer J P. Laser tomography method of flame fronts[J]. Combustion and Flame, 1980, 39(1): 3~ 14.
- [10] Roquemore W M. Influence of vortex shedding process on a bluff body diffusion flame[J]. AIAA, 1983, 83(2): 335~ 339.
- [11] Chen L D. Visualization of jet flame[J]. Combustion and Flame, 1986, 66(1): 81~ 90.

## The Experimental Study on the Particle Imaging Velocimetry Based on Single Exposal Image.

Yang Hongmin<sup>1</sup>, Gu Fan<sup>2</sup>, Liu Yong<sup>2</sup>, Xu Yiqian<sup>2</sup>

(1. College of Power Engineering, Nanjing Normal University, 210042, Nanjing, PRC;

2. Department of Power Engineering, Southeast University, 210096, Nanjing, PRC)

**Abstract:** The characteristics of different PIV (Particle Imaging Velocimetry) technologies were generalized in this paper. In view of the complexity and high expense of these systems, a new approach to obtain the 2-D velocity field based on the two FFT to the single spatial laser tomography images is proposed and a simple system based on this method is also developed. The experimental results show that good effect was achieved for the measuring range of low velocity and the PIV with lower expense can be expected.

**Key words:** laser tomography image, single exposal image, Particle Imaging Velocimetry

[责任编辑: 刘健]