

两相流场粒子成像测速技术 (PTV - PIV) 初探¹⁾

王希麟 张大力* 常 轶 何 崧*

(清华大学工程力学系, 北京 100084)

* (清华大学自动化系, 北京 100084)

摘要 在单相 PTV - PIV 研究基础上, 研究液固两相流场粒子成像图像数字测速技术. 首次用 PTV 技术得到直槽道中液固两相流场二维瞬时全场两相流速分布. 初步探讨了两相 PTV - PIV 技术中与单相 PTV - PIV 测速技术的关键不同之处, 提出两相 PTV - PIV 测速采样的两相相容性准则. 为深入研究两相流场粒子成像测速技术奠定了基础.

关键词 两相流, 两相测量, 粒子成像测速

引 言

两相流的颗粒图像法测速技术是单相 PTV (particle tracing velocimetry) 与 PIV (particle image velocimetry) 技术的延伸与发展, 是指在两相流场中撒布能跟随不同相流体流动的示踪粒子, 用脉冲激光片光源照射所测流场区域, 通过在同一底片上连续两次 (或多次) 曝光或连续两次 (或多次) 在不同底片上曝光, 从而获得记录示踪粒子位移的底片, 采用光学杨氏条纹法或相关法逐点处理底片, 从而获得两相流场的速度分布. 由于其不仅能显示流场流动的物理形态, 而且能提供单点测量无法得到的瞬时全场流动的定量信息; 不仅能给出速度, 还能给出颗粒粒径与浓度分布. 为研究两相流动特性尤其是不定常流动提供了新的有力工具. 是随计算机, 光学, 信息图像等相关领域的发展而生长起来的最新测试手段. 单相 PTV - PIV 技术目前已在湍流, 分离涡和射流等实验研究的初步应用中取得重要成果, 某些实验中, 其空间分辨力已接近粘性尺度^[1], 测得的主要湍流数据如速度型, 湍流强度, 波数谱, 雷诺应力, 均方根速度值, 总剪切应力, 高阶量 (S 因子, F 因子) 等均与热线风速仪, LDV 和直接数值模拟 (DNS) 作了比较, 结果相当一致^[2]. 其不仅已应用于水流, 低速气流, 也已初步应用于跨音速风洞等试验中. 目前达到的水平已可在一个切面上测得瞬时 3 500 ~ 14 400 个速度向量, 其精度约为 1% ~ 0.1%, 与 LDV 相当, 其物理测量容积分辨力经特殊处理 (如采用显微镜头) 可比 LDV 更小, 数据处理时间目前因设备条件不同处理一个切面可由几分钟到几个小时. 现正向实用化, 规范化, 不需湿处理采用 CCD 直接记录图像 (DPIV) 技术^[3~5] 与三维 PIV (3DPIV) 技术^[6] 及全息粒子图像测速 (HPIV) 技术发展. 两相数字图像处理技术比单相困难得多, 其不仅要分辨代表同一相的颗粒在已知时间间隔里移动位移, 而且要将代表不同相的颗粒区分开来. 两相颗粒之间会发生碰撞, 遮挡, 甚至翻转. 代表两相流动的颗粒如果光学性能不同, 会给在同一底片上成像带来很大困难. 由于代表两相的颗粒密度不同, 其中一相的颗粒很容易跑出片光照射的区域使在观测区域找不到相关点. 颗粒的粒径与浓度要用特殊方法处理. 用一般的片光取不到相位信息, 故两相测量的图像数字处理技术尚处于起步与发展之中. 目前只有少数学者开始在气液、液固等低速简单流动中进行可行性研究. 本文只是该工作的初步探索.

¹⁾ 煤的清洁燃烧技术国家重点实验室、清华大学科学基金与国家自然科学基金资助项目.

1997 - 01 - 02 收到第一稿, 1997 - 04 - 02 收到修改稿.

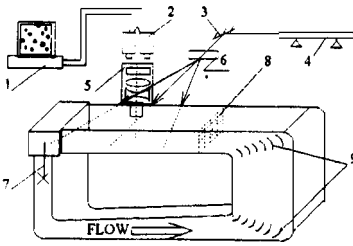


图1 实验系统示意图

1. 计算机, 2. CCD 摄像头, 3. 反射镜,
 4. He - Ne 激光器, 5. 透镜组, 6. 柱面镜,
 7. 电机, 8. 蜂窝器, 9. 导流片
- Fig. 1 Experimental setup
1. PC586, 2. CCD camera, 3. mirror,
 4. He - Ne laser, 5. lenses,
 6. cylindrical lens, 7. motor,
 8. honeycomb structure,
 9. flow guide vane

2 实验原理

其基本原理是在已知的时间内, 测量示踪粒子的位移, 从而确定出该点的速度大小和方向

$$V = \lim_{t_2 \rightarrow t_1} \frac{r_2 - r_1}{t_2 - t_1} = \lim_{t \rightarrow t_0} \frac{r}{t}$$

t 是两个 CCD 取景的起始时间间隔, 将 CCD 取得的 PIV 粒子图像首先通过常规和特殊图像预处理, 再用相关法确定出两个图像中同一粒子像斑的精确定位, 当 t 取得合适, r 能够分辨又足够小, 测出流场与取得的图像间的放大系数后, 便可通过上式计算出粒子的速度.

3 实验结果与讨论

3.1 实验结果

本实验中, 流场取景范围为 $32 \text{ mm} \times 32 \text{ mm}$, 对应 512×512 个像素点, 每个像素点对应 $6.25 \times 10^{-5} \text{ m}$. 设 N_x 与 N_y 为同一粒子在两幅图像中沿 x 方向与 y 方向移动的像素点数, 则

$$r = 6.25 \times 10^{-5} (N_x i + N_y j)$$

空间相关函数定义为

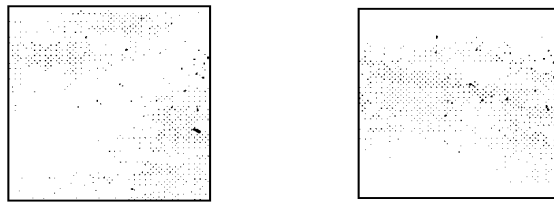
$$R(r) = \frac{\int G(x, y) G(x + r, y + r) dx dy}{\sqrt{\int G(x, y)^2 dx dy \int G(x + r, y + r)^2 dx dy}}$$

这里 $G(x, y)$ 是定义在矩形域上的灰度函数, 当 $R(r)$ 取最大值时, 相应的 r 即被认为是 $P(x_0, y_0)$ 的邻域 $O(P, r)$ 上的平均位移.

图 2 是间隔 50 ms 取到的两幅液相粒子图像, 图 3 是经相关处理得到的流动速度矢量图. 图 4 是间隔 10 ms 取到的两幅液固两相粒子图像, 图 5 是先通过分辨粒径大小将代表不同相的粒子图像区分开, 再经同样的相关处理得到的两相流动速度矢量图如图 6 所示. 液相速度精度经标定达 1% 以内. 固相测速精度尚未进行标定.

1 实验装置与系统

实验系统如图 1 所示. 分别由循环流动水槽、片光形成与照明系统、光学成像与 CCD 取像系统、计算机图像采集与数据处理系统等组成. 用筛选特殊处理的粒径约为 $5 \mu\text{m}$ 氧化铝粉示踪液相, 用粒径 1.5 mm 左右、比重约 1.265 的小米示踪固相, 撒布在循环水槽中形成两相流场. 用 45 mW 氦氖激光器通过反射镜与柱面镜形成片光照射流场测量区域. 用带外同步的两个 CCD 镜头通过光学镜头组对同一流场测量域取像, 两个 CCD 取景起始时间间隔精确可调. 用清华大学电子系生产的 915 与 925 图像卡进行图像采集与数模转换, 用 586/120 微机进行数据处理.



(a) $t = t_1$ 时刻液相粒子图像 (b) $t = t_1 + 50$ 时刻液相粒子图像
 (a) Frame at $t = t_1$ (B) Frame at $t = t_1 + 50$

图 2 间隔 50 ms 取到的两幅液相粒子图像

Fig. 2 Two frames of liquid - phase tracers at 50ms time interval

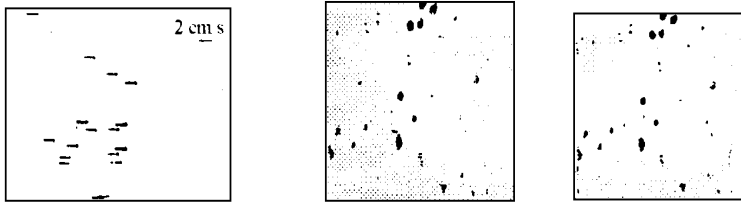


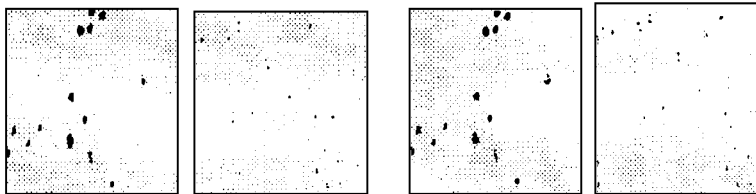
图 3 处理图 2 所示图像得到的液相流动速度矢量图

Fig. 3 Liquid velocity vectors obtained by processing the frames in Fig. 2

(a) $t = t_1$ 时刻图像 (b) $t = t_1 + 10$ 时刻图像
 (a) Frame at $t = t_1$ (b) Frame at $t = t_1 + 10$

图 4 间隔 10 ms 取到的两幅液固两相粒子图像

Fig. 4 Two frames of two - phase liquid - solid tracer particles at 10ms time interval



(a) 图 4 (a) 中的两相粒子分离图 (b) 图 4 (B) 中的两相粒子分离图
 (a) from Fig. 4 (a) (b) From Fig. 4 (b)

图 5 图 4 所示两幅图像的大小两相粒子分离图像

Fig. 5 Separated frames from Fig. 4 according to particle size

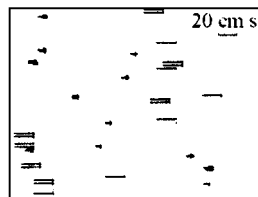


图 6 处理图 4 所示图像得到的两相流动速度矢量图

Fig. 6 Two - phase velocity vectors obtained by processing the frames in Fig. 4

3.2 两相示踪粒子的 PTV - PIV 成像采样技术

粒子成像测速技术分为粒子成像技术和图像（底片）判读技术两大部分，与单相 PIV 类似的问题这里不做讨论，只简要提出可行性研究中发现的两相粒子成像测速技术的几个关键问题。

(1) 两相速度滑移的相容性

粒子成像测速的基本原理是基于同一粒子成的两个像间距离可以分辨，而这距离又足够短，在这非常短的距离内，可以假设此时速度的大小与方向是不变的。距离越短，测量精度越高。

图像中可分辨的最小距离的取得取决于示踪粒子的粒径, 流动速度, 两次取像间隔时间及粒子的密度. 一般在其它参数选定后, 主要取决于取像的间隔时间. 这个间隔时间是作用于全流场的. 一般粒径大密度大的示踪粒子的取像间隔时间 t_2 必大于粒径小密度小的示踪粒子的取像间隔时间 t_1 . 理论上采用 t_1 为取像间隔时间. 连续 n 次取像 (或曝光) 以 $t_2 = n \cdot t_1$ 为一周期. 将第一幅和第 n 幅图像经处理可得到粒径大密度大的示踪粒子所代表的流体相的速度. 而每 t_1 间隔的两幅图像经处理可得到第一相流体较精确的瞬时速度. 若要两相速度比较对应, 对其中一相流体的速度只能取 t_2 时间的 n 个瞬时速度的平均. 故两相速度的滑移越大, 其中一相测得的瞬时效应越差. 因此, 两相粒子成像测速时, 受到两相速度滑移范围的限制.

(2) 示踪粒子密度的不同对两相粒子成像技术的影响

两相流体示踪粒子不同. 水平取像时, 重的相的粒子易跑出片光的照射区域. 从而很容易造成找不到示踪粒子的相关点. 故作两相测量时沿重力方向取像测量相对要容易得多. 用三维 PIV 测量可克服这一不足. 在沿水平方向照射片光取像时, 必须满足密度大的示踪粒子取像间隔下限时间 $t_2 <$ 粒子沿垂直方向跑出光片的下沉时间 t_3 .

(3) 示踪粒子的光学性能处理

示踪两相流体的示踪粒子若光学性能接近, 主要靠分辨粒径的大小来区分不同相的粒子. 这在成像上没有太大困难. 若示踪两相的示踪粒子光学性能不同, 则可通过灰度来区分示踪不同相的粒子. 反光强度差别大, 分辨容易. 但差别过大则不能在同一光学条件下取像. 对某一相示踪粒子取像清晰, 另一相示踪粒子的图像 (尤其边界) 会模糊不清. 必须通过特殊光学镜头处理调试. 分别取像再合成在一起. 日本 Fukui 大学的 Fuzio Yamamoto^[7] 曾用这种方法处理过气液两相流动的 PTV 取像. 示踪粒子的选择始终是粒子成像测速技术中的关键, 其规则性、跟随性和光学性能直接影响测试精度, 在两相测量中更为突出.

3.3 两相粒子成像测速的图像判读技术

(1) 在判读技术中, 与单相粒子成像技术不同的是首先要将代表不同相的粒子区别开来, 其关键在于分辨技术. 通常采用粒径分辨法或灰度分辨法. 这就要求在容许的范围内其差别尽量大且严格选择, 才能尽可能减少误判点. 阈值的选择也相对容易. 对浓度和粒径的测量, 由于通常片光取不到相位信息, 常需配合光学处理, 单靠软件处理往往不够.

(2) 两相分辨开后, 可单独按单相的方法处理. 其存在的问题和解决的方法与单相类似. 对不同的流场可采取不同的算法进行简化. 然后再将两幅图合成起来. 对复杂的两相流场的各种处理方法尚待进一步工作.

4 结 论

1) 首次用两个 CCD 镜头对同一被测流场域采样. 在直槽道简单流动的液固两相流场中用粒子成像测速法处理得到两相流场的速度分布.

2) 通过可行性研究, 提出两相 PTV - PIV 测量采样与单相 PTV - PIV 技术不同的两相相容性准则、密度差对测量的影响和示踪粒子光学性能的特殊处理方法.

3) 用两个或多个 CCD 可调取像间隔的两相 PTV - PIV 采样技术, 能在通常 40 mW 氦氖激光器产生的片光下取得高质量和较高速度的 PTV - PIV 图像. 可大大降低实验研究成本和提高测试精度与测速范围. 对单相 PTV - PIV 技术的发展和深入研究也有重要参考价值.

4) 对复杂两相流场的两相 PTV - PIV 测速判读技术与精度影响分析, 尚待进一步的

工作.

参 考 文 献

- 1 Liu ZC, Adrain RJ etc. High resolution measurement of turbulent structure in a channel with PIV, *Experiments in Fluids*, 1991, 10: 201 ~ 312
- 2 Eggels GM, Adrain RJ etc. Fully developed turbulent pipe flow: A comparison between direct numerical simulation and experiment, *JFM*, 1994, 268: 175 ~ 209
- 3 Dabiri D, Ghaib M. Digital particle image thermometry: The method and implementation, *Experiments in Fluids*, 1991, 11, 77 ~ 86
- 4 Hassan Y etc. Full - field bubbly flow velocity measurements by digital image pluse laser velocimetry, *Experiments in Fluids*, 1991, 11: 293 ~ 301
- 5 Dabiri D, Ghaib M. Digital PIV. *Experiments in Fluids*, 1991, 10: 181 ~ 193
- 6 Prasad AK, Adrian RJ. Stereoscopic particle image velocimetry applied to liquid flows, *Experiments in Fluids*, 1993, 15: 49 ~ 60
- 7 Yamamoto Fujio etc. Fundamentals and applicationa of particle - imaging velocimetry (Focussing on Binary Image Cross - Correlation Method for 3 - D PTV). Proceedings of International Conference on Fluids Engineering, Nov. 1 - 2, Kwangju, Korea. 1994

PRELIMINARY INVESTIGATION OF PARTICLE IMAGE VELOCIMETRY (PTV - PIV) TECHNIQUE IN TWO - PHASE FLOW¹⁾

Wang Xilin Zhang Dali * Chang Zhe He Song *

(*Department of Engineering Mechanics, Tsinghua University, Beijing 100084, China*)

* (*Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084, China*)

Abstract On the basis of the single phase PTV - PIV investigation, solid - liquid two phase flow field particle image velocimetry technique was studied in this paper. Specially processed Al_2O_3 powder of $5 \mu\text{m}$ was taken as liquid phase tracer, millet of 1.5 mm in diameter and 1.265 kg/m^3 of density was taken as particle tracer. They were scattered in the circulating water channel to form the experimental two phase flow field. Laser sheet was obtained by using a 45 mW He - Ne laser source and a series of mirrors and lenses to illuminate the flow field, two external synchronization CCD cameras were used to get the flow field frames through optical lenses. The starting time interval between the two CCD cameras from the same flow domain were collected into a PC586 through a frame grabber board. The two phase frames were discriminated and relative data was processed by software, and the two phase flow velocity distribution near the boundary layer was obtained. This paper emphasizes the study of the difference between two phase PTV - PIV sampling technique and single phase PIV - PTV technique, and discusses the effect of density difference between tracer particles, the effect of optical property difference to measurement, and the compatible criterion of the two - phase velocities in velocity sampling. These studies pave the way for the further study of two phase particle image velocimetry technique.

Key words two - phase flow, two - phase flow measurement, particle image velocimetry

¹⁾ The project supported by the Coal Clean - Burning Technology State Key Laboratory, Tsinghua University Science Foundation and by the National Natural Science Foundation of China.