

文章编号: 1000-4874 (2001) 02-0209-07

# DPV 系统在河工模型试验中的应用研究\*

田文栋, 魏小林, 盛宏至  
(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

**摘要:** 河工模型有同其它模型不同的特点, 给流场的测量带来一定的困难, 而 DPV 系统是一种适合于河工模型的快速的流场测量方法。本文根据河工模型流场测量的特点建立了一套 DPV 系统, 可以对近千平方米区域内的流体表面流场进行快速测量, 并且根据河工模型中示踪粒子分布的特点, 提出了 DPV 速度计算的改进算法, 提高了速度计算的效率, 达到了对河工模型流场的实时测量和记录的要求。

**关键词:** 河工模型; 速度测量; 粒子图像测速  
**中图分类号:** TV 83 **文献标识码:** A

## 1 引言

河工模型中流场的测量与其它的流动现象模型试验中的测量之间有许多不同: 河工模型的尺寸一般比较大, 有的超过数千平方米, 测量时通常需要仪器作长距离的移动, 不仅测量精度较低而且测量时间很长; 进行试验时模型的形状(河岸河床等)随着时间而变迁, 流动过程不仅是非定常的而且流动有时也会破坏了河工模型的土质河岸河床, 再次试验需要重新修整模型; 并且流体处于河工模型的河床之内, 受河岸的影响难以布置非接触式的光学测量方法的光通路; 模型试验历时较短, 需要快速测量得到整个流场的流态, 并通过连续的测量取得足够多的数据, 才能完全描述流体随时间变化的非定常流动。因此, 将全场测速技术应用到河工模型流场的测量中有很大的科研和经济价值。

全场测速技术主要包括激光诱导磷光(LIP)、激光诱导荧光(LIF)、相干反斯托克斯喇曼散射(CARS)、粒子跟踪测速(Particle Tracking Velocimetry—PTV)和粒子图像测速(Particle Image Velocimetry—PIV)等, 它们均是多学科的研究结合点, 充分利用了计算机技术、图像处理技术、激光技术、半导体技术和近代光学技术的最新进展。以上测量技术都采用非接触式的光学检测方法, 避免了机械探头对流场的扰动, 可得到真实的流动现象。其中粒子示踪的全场测速技术(PTV、PIV<sup>[1,2]</sup>)因其自身优点得到了广泛的应用。粒子示踪全场测速是利用单次或多次曝光的底片或 CCD 像机记录的序列图像, 经过相关、傅立叶变换等处理

\* 收稿日期: 1998-05-07  
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(59776023)  
作者简介: 田文栋(1969~), 男, 助理研究员, 硕士。

手段, 计算出速度矢量大小和方向的一种速度测量方法。利用 CCD 像机进行记录的 DPTV (Digital PTV) 和 DPM (Digital PM) 技术, 简化了整个测量系统, 免去了底片的湿法处理, 增加了图像的信息量, 方便了速度求解, 而且提高了处理的效率。

目前, 经过国内研究者的努力, 数字化的粒子示踪全场测速已经成功应用于大型河工模型的试验过程, 例如清华大学水利水电工程系研制的 DPTV 系统<sup>[3]</sup>、中国科学院力学研究所研制的 DPM 系统。

通常的 DPM 速度求解采用相关算法和傅立叶变换的幅度谱分析进行, 要达到实时测量的要求, 需要浮点运算加速器件和好的计算设备。本文根据河工模型的特点在 DPM 速度求解算法上进行改进, 给出了三种新的速度求解算法, 可提高求解的速度, 仅利用普通 Pentium 系列微机就能够由软件实现河工模型试验流场的实时测量。本文介绍了适用于河工模型的 DPM 系统的结构、性能参数以及 DPM 改进算法在河工模型上的应用。

## 2 测速设备及系统性能指标

如图 1 所示, 用于河工模型表面流场测量的 DPM 系统包括数十套 CCD 摄像头、图像卡 (置于计算机内)、Pentium 系列微型计算机、操作软件以及其它辅助设备, 不需要特殊光源, 利用自然光在水面的反射进行测量。配置了标准镜头的摄像机悬挂于模型的上方, 高度为 5~7m, 那么每台摄像头可以覆盖  $30\text{m}^2$  左右的流动区域, 可测最高流速  $20\text{m/s}$ , 由于河工模型尺寸较大, 因此系统配备可以多达三十台工业 CCD 摄像机, 设备不需要任何移动便可以对近千平方米的流动区域的流场进行实时测量。

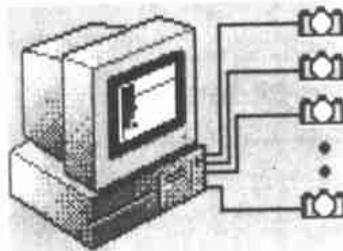


图 1 DPM 系统的组成

通过计算机依次选择每个摄像头, 依据一定的时间间隔拍摄两幅流体携带颗粒运动的图像, 并将图像转变为便于处理的数字图像, 再用 DPM 算法求解两幅图像中相对应的各求解小区中粒子的平均位移, 最终得到全视场的速度场矢量图。软件可以将所有摄像头的速度矢量图拼接为全场流场图。

本文介绍的 DPM 河工模型表面流场测量系统的性能参数如下:

|             |                                       |
|-------------|---------------------------------------|
| CCD 镜头个数:   | 6~ 30                                 |
| 图像采集时间:     | 3~ 5s (30 个摄像头)                       |
| 速度矢量数目:     | 48~ 6417 (每个摄像头)                      |
| 单根速度矢量计算时间: | < 0.01s, 计算区域 $96 \times 96$ 像素, 软件实现 |
| 示踪粒子直径:     | > $L/480$ ( $L$ 为单个摄像头视场对角线长度)        |
| 测量的速度范围:    | < $3L/s$                              |
| 系统误差:       | < 3.3%, 与计算区域的大小有关                    |

### 3 DPM 系统常用的速度求解方法

DPM 技术是利用 CCD 相机或其它手段直接记录粒子运动的图像序列, 在具有一定时间间隔的两幅数字图像中依次选取相应的区域作为速度求解区域, 并假定在该区域内各粒子速度相等, 方向相同。通过计算求得求解区域内粒子位移的大小和方向, 从而得到整个视场内的速度分布矢量图。

利用图像函数  $I_1(i, j)$  和  $I_2(i, j)$  分别表示前后两幅具有一定时间间隔的图像中相对应的求解区域 (如 32 像素  $\times$  32 像素), 如果该求解区域内颗粒在  $x$  和  $y$  方向上相应时间间隔内的位移分别为  $\Delta x$  和  $\Delta y$ , 根据粒子位移均匀性的假设有:

$$I_2(i, j) = I_1(i - \Delta x, j - \Delta y) \quad (1)$$

速度求解就是根据图像函数  $I_1(i, j)$  和  $I_2(i, j)$  求解  $\Delta x$  和  $\Delta y$  的过程。

利用 DPM 图像求解速度主要采用互相关算法<sup>[4]</sup>, 可以同时求得各个求解区域内粒子图像平均的位移大小和方向。若将  $I_1(i, j)$  与  $I_2(i, j)$  叠加, 得到与双曝光 PM 底片类似的图像, 因此可以用类似处理 PM 底片的办法得到每个求解区域内颗粒平均位移的大小, 速度的方向可以通过沿位移方向的相关性来判断。处理 PM 底片进行速度计算主要有图像自相关法和两次傅立叶变换法<sup>[5,6]</sup>。

#### 3.1 互相关和自相关算法

相关算法是 DPM 技术中速度计算的基本方法, 对图像函数  $I_1(i, j)$  和  $I_2(i, j)$  的互相关计算利用下式进行:

$$X(m, n) = \sum_{i=0}^{N-1-N-1} \sum_{j=0}^{N-1-N-1} I_1(i, j) I_2(i+m, j+n) \quad m, n \in [-N+1, N-1] \quad (2)$$

将公式 (1) 带入上式, 可以发现, 当  $m = \Delta x$  并且  $n = \Delta y$  时,  $X(m, n)$  为最大值, 即  $X(\Delta x, \Delta y) = \text{Max}(X(m, n))$ , 其中  $m, n \in [-N+1, N-1]$ , 因此求解  $\Delta x, \Delta y$  转化成查找  $X(m, n)$  最大值的问题。图 2 给出了采用互相关的算例, 图 2.1 和图 2.2 为具有一定时间间隔的两幅图像, 图 2.3 为进行互相关后的结果 (只给出了  $m, n \in [0, N-1]$  的互相关结果), 图 2.4 为计算出的速度的大小和方向。(上两幅图左为 2.1, 右为 2.2, 下两幅图左为 2.3, 以下同样)

对叠加图像进行自相关, 结果在  $(0, 0)$  处形成最大值, 在  $(\Delta x, \Delta y)$  和  $(-\Delta x, -\Delta y)$  处形成次大值。通过寻找最大值和次大值的距离得到速度的大小和两个相差  $180^\circ$  的方向; 若两次曝光强度不同, 根据  $X(\Delta x, \Delta y)$  和  $X(-\Delta x, -\Delta y)$  的大小可确定该速度矢量的唯一方向。

求解大小为  $N \times N$  图像的互相关或自相关, 为得到一个速度矢量, 按照式 (2) 需要进行  $4N^4$  次整数乘法和加法。若相关运算单纯由软件完成, 进行速度求解的时间相当长, 当摄像头数量较多时, 难以实现实时测量。

#### 3.2 傅立叶变换幅度谱分析 (双傅立叶变换法)

对两次或多次曝光的 PM 底片进行速度矢量计算时, 最常用的是傅立叶变换法。二维图像的傅立叶变换的结果为复数矩阵, 用图像来显示一般分为幅度和相位图像, 分别代表原始图像的幅度谱和相位谱。虽然相位在图像处理中的作用很大, 但习惯上大多以幅度谱作为图像分析的工具, PM 底片的速度矢量计算就采用了图像的幅度谱的分析。

对叠加图像进行二维离散傅立叶变换, 即:

$$F(m, n) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} I(i, j) \exp(-2j\pi \frac{m \times i + n \times j}{N}) \quad m, n \in [0, N) \quad (3)$$

对上式求模得到的傅立叶变换的幅度谱, 再次进行傅立叶变换并求模得:

$$|G(k, l)| = |g_1(k - \Delta x, l - \Delta y)| + 2^* |g_1(k, l)| + |g_1(k + \Delta x, l + \Delta y)| \quad (4)$$

其中  $G(k, l)$  和  $g_1(k, l)$  分别为  $|F(m, n)|$  和  $|f_1(m, n)|$  的傅立叶变换, 而  $f_1(m, n)$  是  $I_1(i, j)$  的傅立叶变换, 从上式可知,  $G(k, l)$  这个复数矩阵的幅度谱在  $(0, 0)$  处出现一个最大值, 在  $(\Delta x, \Delta y)$  和  $(-\Delta x, -\Delta y)$  处出现两个次大值。利用最大值和次大值之间的距离可以求得粒子运动的位移。粒子运动的方向可以利用和自相关类似的方法得到。

图 3 给出了按傅立叶变换方法求解速度的过程, 图 3 1 和图 3 2 为不同时刻的两幅图像, 图 3 3 为叠加图像经过两次傅立叶变换之后的幅度谱, 图 3 4 为获得的速度大小和方向。

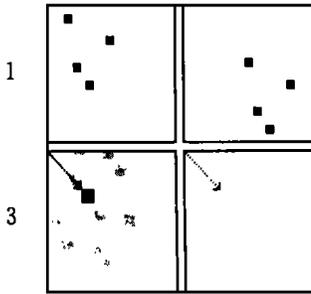


图 2 互相关计算速度过程

- 1- 2 粒子图像 3 互相关的结果
- 4 计算的速度矢量

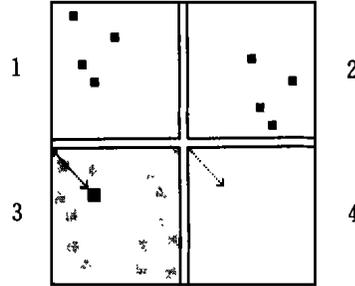


图 3 傅立叶变换速度计算过程

- 1- 2 粒子图像 3 傅立叶变换的幅度谱
- 4 计算的速度矢量

进行傅立叶变换 (DFT) 的需要的浮点运算次数和相关计算的整型运算次数相当, 因此利用进行两次傅立叶变换 (DFT) 求解速度矢量的计算量比进行相关计算的计算量要大, 但考虑到若将计算区域的大小选择为  $2^N$ , 便可以利用快速二维傅立叶变换 (FFT) 使计算量大大降低。但此时的浮点运算量利用普通微型计算机仍不能在短时间内完成, 距离实时测量的要求有一定的差距。

### 4 三种改进后的速度求解算法

为了达到实时测量并显示的要求, 根据河工模型 DPM 系统采集的图像的特点, 对上述的相关算法和傅立叶变换幅度谱分析进行了简化和改进, 提出了三种算法, 大幅度提高了速度计算的效率, 同时也可以改善粒子进出边界带来的误差。

#### 4.1 区域内图像块相关

区域内图像块相关是互相关算法的改进, 连续多次在第一幅图像的求解区域内选择一块尺寸小于求解区域的大小合适的块图像 (图 4 1), 并在第二幅图像的该求解区域内通过相关计算寻找和所选择的小块相关性最好的大小完全相同的块图像 (图 4 2), 利用这两个块之间的位移确定该求解区域内平均速度的大小和方向 (图 4 3)。

图像块相关方法的关键是图像块的选择: 大小要合适, 小了不能代表该求解区域的速度信息, 大了并不能减小速度的计算的时间。

#### 4.2 一维平均 (压缩) 法

由于使用的 DPM 系统受试验条件限制, 不可能使用激光光源, 而是采用自然光照明, 由于存在许多干扰, 图像质量较差, 主要的干扰有照明灯、窗户以及其它亮物体在水体中的投影、水波的传播和变化等, 这些信息会给图像直接相关或傅立叶变换的结果带来一定的影响, 使得计算结果与实际的流动有较大的偏差。因此, 在进行速度计算之前, 对数字图像进行了

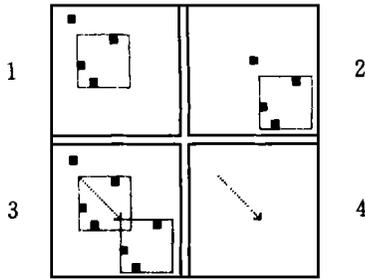


图4 区域内图像块相关计算速度过程

- 1- 2 粒子图像 3 块比较的结果  
4 计算的速度矢量

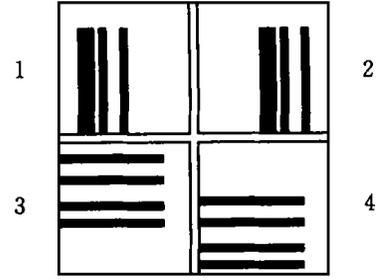


图5 一维压缩法速度计算

- 1  $I_1^x(i)$  2  $I_2^x(i)$  3  $I_1^y(j)$  4  $I_2^y(j)$

预处理——二制化，突出了背景和粒子的反差，滤掉了其它的噪声干扰，并且对粒子密度的不均匀性进行了一定的处理，使得图像更均匀，利用经处理的二制化图像进行相关和傅立叶分析，结果的可靠性提高，速度计算更快。

由于采用了二制化，使粒子数减少，将二维图像压缩为一维时不会丢失太多的信息，因此给采用一维平均（压缩）法带来了可能。首先将  $N \times N$  的二维图像  $I(i, j)$  压缩为两个一维图像  $I^x(i)$  和  $I^y(i)$ ：

$$I_1^x(i) = \sum_{j=0}^{N-1} I_1(i, j) \quad I_1^y(j) = \sum_{i=0}^{N-1} I_1(i, j) \quad (5)$$

$$I_2^x(i) = \sum_{j=0}^{N-1} I_2(i, j) \quad I_2^y(j) = \sum_{i=0}^{N-1} I_2(i, j) \quad (6)$$

然后由  $I_1^x(i)$  和  $I_2^x(i)$  利用相关或傅立叶变换相位谱分析方法求得  $x$  方向位移  $\Delta x$ ，由  $I_1^y(j)$  和  $I_2^y(j)$  求得  $y$  方向位移  $\Delta y$ 。图 5 分别给出了  $I_1^x(i)$ 、 $I_2^x(i)$ 、 $I_1^y(j)$  和  $I_2^y(j)$  的分布，图 5.1 和图 5.2 的横坐标为  $x$ ，纵坐标为  $I^x(i)$ ，图 5.3 和图 5.4 的纵坐标为  $y$ ，横坐标为  $I^y(j)$ 。

#### 4.3 傅立叶变换相位谱分析

若图像函数  $I_1(i, j)$  和  $I_2(i, j)$  满足粒子位移均匀性的假设，即每一个示踪粒子和其周围示踪粒子的相对位置在图像函数  $I_1(i, j)$  和  $I_2(i, j)$  中一致的，并且任意一幅图像中的示踪粒子在另一幅图中有相对应的示踪粒子。对图像函数  $I_1(i, j)$  和  $I_2(i, j)$  分别进行傅立叶变换：

$$F_1(m, n) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} I_1(i, j) \exp(-2j\pi \frac{m \times i + n \times j}{N}) \quad (7)$$

$$F_2(m, n) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} I_2(i, j) \exp(-2j\pi \frac{m \times i + n \times j}{N}) \quad (8)$$

将式 (1) 代入式 (8)，利用傅立叶变换的位移定律可以得到：

$$F_2(m, n) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} I_1(i, j) \exp(-2j\pi \frac{m \times (i + \Delta x) + n \times (j + \Delta y)}{N}) \quad (9)$$

以  $R_1(m, n)$  和  $\theta_1(m, n)$  表示  $I_1(i, j)$  经傅立叶变换之后的幅度谱和连续相位谱，以  $R_2(m, n)$  和  $\theta_2(m, n)$  表示  $I_2(i, j)$  经傅立叶变换之后的幅度谱和连续相位谱，通过式 (7) 和式 (9) 的比较，有  $R_1(m, n) = R_2(m, n)$ ，也就是两幅图像的傅立叶变换的幅度谱是完全一致的，根据两幅度谱的相关性可以判断颗粒图像的相关性。而粒子的位移信息用连续相位谱之差

$\theta(m, n) - \theta(m, n)$  来表示。

傅立叶变换得到的相位谱通常是缠绕相位 (在  $-\pi \sim \pi$  之间), 需要经过相位展开计算得到连续相位谱, 才能用于粒子位移的计算。

## 5 各种 DPM 算法的应用分析和比较

本文利用 DPM 系统中一只 CCD 摄像机在水槽内拍摄了一个旋涡运动中心的图像, 利用上述方法均可以得到如图 6 所示的速度矢量, 图 7 给出了利用自编程序进行计算所用的时间 (包括从硬盘上读取图像文件的时间)。

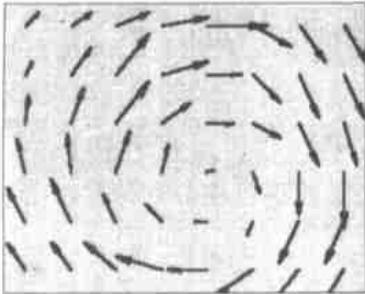


图 6 旋涡运动的速度场

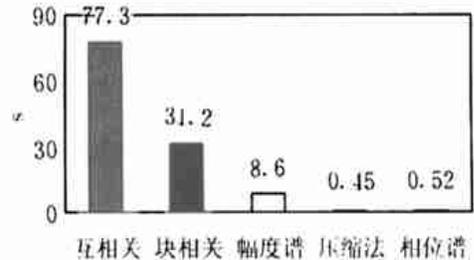


图 7 五种求解方式的比较

区域内图像块相关和一维平均 (压缩) 法的使用范围有一定的限制, 区域内图像块相关对二制化图的处理优于灰度图的处理, 一维平均 (压缩) 法只能处理河工模型下的二制化图像, 对于灰度图和其它粒子数目较多的二制化图处理的误差较大; 而相关算法和傅立叶变换分析 (幅度谱分析和相位谱分析) 均为较精确的分析手段, 不仅可以处理二制化后的黑白图像而且可以处理灰度图和彩色图。

上述若干方法均建立在粒子位移均匀性假设之上。但是, 即使完全不包括外在的干扰 (照明灯的投影、水波的传播和变化、亮度的变化等), 实际的图像也可能不完全符合粒子位移均匀性的假设, 采用上述各种速度求解算法均存在一定的误差, 误差源主要来自求解区域内的示踪粒子经过一段时间间隔部分已经离开了该区域, 并且又有部分新的示踪粒子进入了该区域, 这些粒子会给速度求解带来一定的误差, 影响计算的准确性, 严重时不能得到真正的速度矢量。原有的速度计算方法 (相关和傅立叶变换幅度谱分析) 可以通过次大值及其后的大值修正速度矢量, 但带来了许多人为的因素; 由块相关计算过程可知, 该算法可以基本避免上述误差; 傅立叶变换相位谱分析则必须通过迭代方式解决。

## 6 结论

利用普通 CCD 摄像机镜头配合图像卡以及 Pentium 系列微型计算机构成的 DPM 系统, 可以实现河工模型无接触快速测量速度的需要。

根据河工模型中粒子分布的特点, 提出了三种 DPM 速度计算的改进算法, 提高了速度计算的效率, 达到了对河工模型流场的实时测量和记录的要求。

## 参 考 文 献:

- [1] ADRIAN R J. Multi-point optical measurements of simultaneous vectors in unsteady flow—a review [J]. *Int. J. Heat & Fluid Flow*, 1986, 127 (7): 127-145.
- [2] ADRIAN R J. Particle-imaging techniques for experimental fluid mechanics [J]. *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 1991, 23: 261-304.
- [3] 王兴奎等. 图像处理技术在河工模型试验流场量测中的应用 [J]. *泥沙研究*, 1996, 17 (4): 21-26.
- [4] WILLERT C E, CHARRB M. Digital particle velocimetry [J]. *Experiments in Fluids*, 1991, 8 (10): 181-193.
- [5] MENHART C D, ADRIAN R J, et al. A parallel digital processor system for PIV [J]. *Meas. Sci. Tech.*, 1993, 4 (4): 619-632.
- [6] 许宏庆等. 应用 PIV 技术测量二维瞬时流场 [J]. *空气动力学报*, 1993, 11 (4): 409-414.

## Application of DP IV measurement system in physical model tests

TIAN Wen-dong, WEI Xiao-lin, SHEN G Hong-zhi  
(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

**Abstract** Because the physical model is different from other flow models in size, the velocity field measurement is rather difficult. DPM (Digital Particle Image Velocimetry) system can be used to determine quickly the flow field of the physical model. In this paper, a DPM system is developed according to measurement characteristics of the physical model, and used to swiftly measure the flow field surface with the area of one thousand square meters. According to the particle distribution characteristics of the physical model, three improved methods of DPM are proposed to increase the efficiency of the velocity calculation, and these methods can be applied to the instantaneous measurement and recording.

**Key words** physical model; velocity measurement; particle image velocimetry