

数字图像处理技术在风洞试验中的应用

苑朝凯, 孙英英, 姜宗林

中国科学院力学研究所, 高温气体动力学国家重点实验室(筹), 北京海淀区 100190

摘要 光学成像测量技术具有非接触、对流场无干扰的特点, 在风洞试验中得到了广泛的应用, 而数字图像处理技术与光学测量技术密不可分。利用图像处理技术来提取和反演试验结果是整个试验的关键环节, 避免了人为因素的影响, 试验精度得到进一步提高。本文介绍了图像处理技术在风洞流场 PIV 粒子测速、动压测量和气动热相变热图试验中的应用, 并对数字图像处理中的噪声抑制、图像增强、目标识别和提取等技术的处理方法进行了详细介绍。

关键词 光学测量, 风洞试验, 数字图像处理, 目标识别

引言

近年来, 虽然 CFD 取得了长足进步, 但 CFD 并不能处理所有的流动机理现象。科研人员要真正弄清每一种流动现象对飞行器性能产生的影响, 还必须借助实验手段。风洞试验是开展飞行器空气动力性能研究的三大手段之一, 对先进飞行器的研制与发展起着举足轻重的作用。高超声速流动现象十分复杂, 有许多基础研究领域和工程问题需要开展风洞试验, 验证和回答数值模拟不能解决的问题, 高超声速飞行器的研制更是离不开风洞试验^[1]。

光学成像测量技术具有非接触、对流场无干扰的特点, 在风洞试验中得到了广泛的应用, 在气动力、气动热、流场状态测量等方面均有应用。对于获取的图像数据如何进一步提取有用信息反演流场信息是风洞试验最关键的环节。数字图像处理技术是与光学成像测量技术密不可分的。数字图像处理技术已广泛应用于科研生产等各领域, 易于实现非线性处理, 处理程序和处理参数可变, 是一项通用性强, 精度高, 处理方法灵活的技术。利用数字图像处理技术提取气动参数具有判断依据准确客观, 数据准确可靠, 精度高等特点。

1 数字图像处理

数字图像处理, 它是指将图像信号转换成数字信号并利用计算机对其进行处理的过程。

这一过程包括对图像进行增强、除噪、分割、复原、编码、压缩、提取特征等内容^[2]。

2 数字图像处理技术的应用

数字图像处理技术与光学成像测量技术密不可分, 目前在风洞流场 PIV 测速、动压测量、气动热相变热图试验技术中得到广泛应用。

2.1 流场 PIV 测速试验

拉格朗日法是研究流体运动的一种基本方法, 采用“质点观点”研究流体运动。跟随一个选定的流体质点, 观察它在运动过程中空间位置的变化情况, 逐次改变选定的质点, 就可以获得流场内部的运动情况。流体质点的空间位置 x 、 y 是独立变量 x_0 、 y_0 和 t 的函数, 可以用下式表示:

$$\begin{cases} x = x(x_0, y_0, t) \\ y = y(x_0, y_0, t) \end{cases}$$

式中: x_0 与 y_0 是初始位置; t 为时间变量。根据速度的定义, 可以由位置函数求出速度函数:

$$\begin{cases} v_x = v_x(x_0, y_0, t) \approx \frac{x(x_0, y_0, t+dt) - x(x_0, y_0, t)}{dt} \\ v_y = v_y(x_0, y_0, t) \approx \frac{y(x_0, y_0, t+dt) - y(x_0, y_0, t)}{dt} \end{cases}$$

PIV 技术是拉格朗日法的一种具体实现。实验人员在流场中均匀散播跟随特性良好的示踪粒子, 把示踪粒子作为流体质点进行的研究。使用脉冲片光源照射或线光源扫描流场, 并用照相

机或 CCD 设备以采样间隔 dt 采集流场中示踪粒子的瞬时图像，通过测量某一粒子的影像在两幅图像上的位置变化，并考虑图像与被测流场的几何比例系数，根据速度函数，就可以计算出流场内部该示踪粒子处的流体质点在采样时刻的瞬时速度。对所有示踪粒子进行相同的处理，就得到流场在采样时刻的速度分布。速度函数中的约等号说明，PIV 技术是一种用平均速度代替瞬时速度的方法，在 dt 足够小的前提下，实验结果能够很好地反映流场的瞬时运动状态^[3,4]。

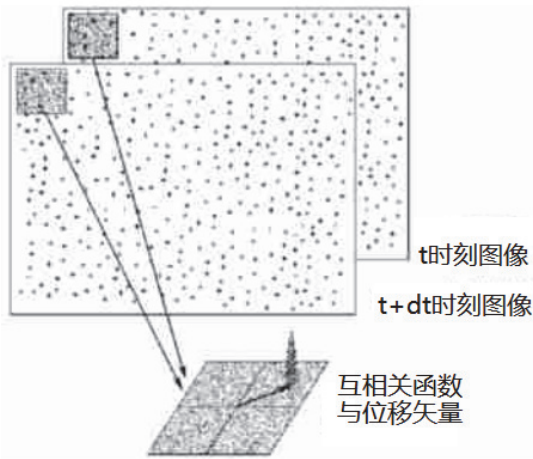


图 1 PIV 粒子测速原理示意图

如果 t_1 时刻的流场图像表示为：

$$I_1(x, y) = I(x, y) + n_1(x, y)$$

$t_2 = t_1 + dt$ 时刻的流场图像就可表示为：

$$I_2(x, y) = I(x + \Delta x, y + \Delta y) + n_2(x, y)$$

其中 $n_1(x, y)$ 和 $n_2(x, y)$ 为随机噪声，且与有效图像函数 $I(x, y)$ 不相关。计算 $I_1(x, y)$ 、 $I_2(x, y)$ 的互相关函数 r_{12} ，结合相关函数在原点取得最大值的特性，可以得到如下公式：

$$r_{12}(\tau_x, \tau_y) \leq r_{12}(-\Delta x, -\Delta y)$$

由此可知，互相关函数的最大值所在的位置对应流场间的相对位移。即质点在时刻 t_1 和 t_2 之间的位移，进而可以计算出流场的速度^[5]。

2.2 热流率测量实验

相变热图实验技术的理论基础是厚壁量热原理^[6]。若模型用绝热材料制成，在一定的假设条件下，有厚壁的非定常瞬态热传导问题可归结为一端加热，侧壁绝热的半无限长平板一维非定常热传导问题，其微分方程为：

给定一定的边界条件和初始条件，可以得

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{\rho c}{k} \frac{\partial T}{\partial t}$$

到一维非定常热传导方程的解为：

$$T = 1 - e^{-\beta^2} \operatorname{erfc}(\beta)$$

其中温度比：

$$T = (T_w - T_i) / (T_{aw} - T_i)$$

无因次参数：

$$\beta = h\sqrt{t} / \sqrt{\rho c k}$$

互补误差函数：

$$\operatorname{erfc}(\beta) = 1 - \operatorname{erf}(\beta) = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^\beta e^{-\lambda^2} d\lambda$$

式中， T_w 为模型表面温度， T_i 为模型的初始温度， T_{aw} 为模型绝热壁温。由于 $\rho c k$ 均为已知系数，从热图中测得模型表面温度 T_w 即可得表面热交换系数 h 。

试验时，用固定融熔温度 T_{pc} (即相变温度) 的相变涂料来显示模型的壁面温度 T_w 。由于相变涂料涂层很薄，可以近似地认为 $T_{pc} = T_w$ 。它在未熔化前呈白色不透明晶体，碾磨后均匀地喷涂在用黑色衬底(为了加大反差)绝热材料制成的模型表面上。当热空气流过模型表面，热传导使模型表面温度逐渐升高，到达相变温度发生相变，涂料变成无色透明，露出模型底色，两边黑白颜色的对比形成一条相变线。记录下模型表面的相变图像，如图 2 所示。利用数字图像处理获得不同时刻 t 的相变线位置等参数，最后得出模型表面的热流分布^[7]。

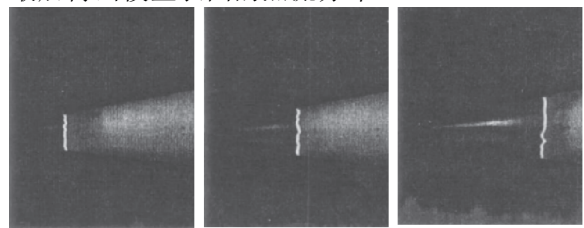


图 2 不同时刻模型表面的相变图像

2.3 流场动压测量实验

来流动压值是风洞试验气流的重要参数之一。标定球的自由飞动压测量就是以球为标体让其其在风洞待测流场中作自由飞运动，由于其受力与来流动压直接相关，因此记录下来相应于准定常试验时间段中的运动轨迹就可以确定出来流动压。

球的自由飞方程为：

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = C_D \cdot q \cdot S \cdot \cos \alpha$$

$$m \frac{d^2y}{dt^2} = C_D \cdot q \cdot S \cdot \sin \alpha - mg$$

式中 m 、 S 分别为球的质量和特征面积（大圆面积）， g 为重力加速度。 C_D 则为球的阻力系数，其值根据大量试验测定结果表明在连续流范围中，几乎为一常值，而在高马赫的稀薄气体中，考虑主要粘性干扰的影响，可采用下面公式确定^[8]。

$$C_D = 0.9 + \frac{1}{2} \frac{M_\infty}{\sqrt{\text{Re}D}}$$

利用高速相机记录球的飞行历程，利用图像处理技术辨识球的运动轨迹随时间的变化，根据球的自由飞方程便可求的来流动压值。图3为动压测量试验圆球在流场中的图像。

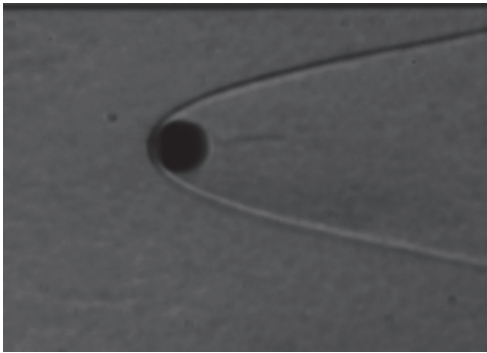


图3 动压测量试验圆球在流场中的图像

3 流场信息提取关键技术

3.1 图像互相关运算

给定一幅图像 $f(x,y)$ ，相关问题就是在图像中寻找与事先给定的子图像（也称掩膜或模板） $w(x,y)$ 的相匹配的所有位置。一般情况下，掩膜比图像本身小的多。寻找匹配的方法是，将掩膜作为一个空间滤波器来在 $f(x,y)$ 中的每个位置计算掩膜与图像的乘积和，最佳匹配是在图像中出现最大值的位置。除非 $w(x,y)$ 很小，否则上述方法计算量非常大，一种变通的方法是在频率域实现相关，即空间相关可以用一个函数的傅里叶变换与另一个函数的傅里叶变换的复共轭的乘积的傅里叶逆变换得到。

图像 $f(x,y)$ 的大小为 $M \times N$ ，其中 $x=0,1,2,\dots,M-1$ 和 $y=0,1,2,\dots,N-1$ 。 $f(x,y)$ 的二维离散傅里叶变换可以表示为 $F(u,v)$;

$$F(u,v) = \sum_{u=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{N-1} f(x,y) e^{-j2\pi(ux/M+vy/N)}$$

其中 u, v 为频率变量。离散傅里叶逆变换可以表示为：

$$f(x,y) = \frac{1}{MN} \sum_{u=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{N-1} F(u,v) e^{j2\pi(ux/M+vy/N)}$$

用“ \circ ”表示相关，用“ $*$ ”表示复共轭，则相关定理陈述为：

$$f(x,y) \circ w(x,y) \Leftrightarrow F(u,v) H^*(u,v)$$

图4(a)为利用PIV技术获取的 t 时刻流场图像，(b)为 $t+dt$ 时刻的流场图像。(a)图中蓝色方框的区域为计算相关函数所使用的掩膜 $w(x,y)$ 。掩膜的大小决定了流场测量的精细程度。(b)图中黄色方框为计算相关函数的区域，计算区域根据流场速度预估设定范围可以减小计算量。红色方框区域为检测得到的 $t+dt$ 时刻掩膜的位置。利用频率域傅里叶变换计算得到的相关函数如图5所示。

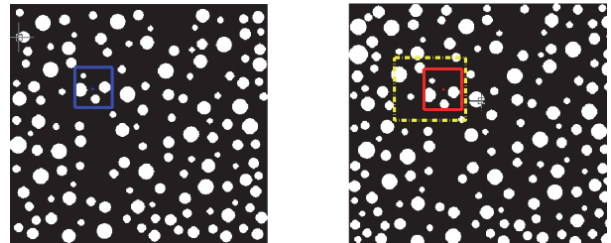


图4 时刻 t 和 $t+dt$ 时的流场 PIV 图像

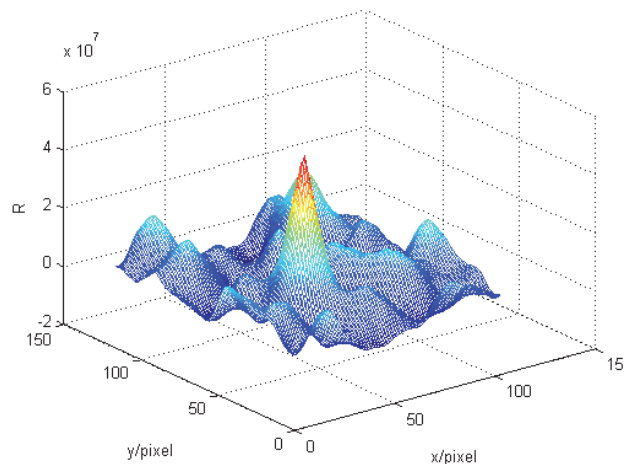


图5 傅里叶变换计算得到的相关函数

找到相关函数最大值所在的位置即可计算出流场局部的速度矢量大小和方向。改变选取掩膜的图像区域并依次进行相关运算即可获取整个流场的速度场。

3.2 边缘检测

边缘检测的基本意思是使用如下两个基本准则之一在图像中找到亮度快速变化的地方：

1、找到亮度的一阶导数在幅值上比指定的阈值大的地方。

2、找到亮度的二阶导数有零交叉的地方。

二维函数 $f(x,y)$ 的梯度定义为向量

$$\nabla f = \begin{bmatrix} G_x \\ G_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial x} \\ \frac{\partial f}{\partial y} \end{bmatrix}$$

该向量的幅值为：

$$g = [G_x^2 + G_y^2]^{1/2} \\ = [(\partial f / \partial x)^2 + (\partial f / \partial y)^2]^{1/2}$$

为了简化计算，该数值有时通过省略掉平方根或取绝对值的计算来近似。这些近似值仍然具有导数性质；换言之，他们在不变亮度区中的值为零，而且它们的值与像素值可变区域中的亮度变化的程度成比例。

常用的边缘检测方法有 Soble、Prewitt、Roberts 和 Canny 算子。其中 canny 算子是最有效的边缘检测方法。该方法总结如下：

1、图像使用带有指定标准差的高斯滤波函数来平滑，从而可以减少噪声。

2、在每一点处计算局部梯度和边缘方向。边缘点定义为梯度方向上其强度最大的点。

3、第 2 条中确定的边缘点会导致梯度幅度图像中出现脊。然后，算法追踪所有脊的顶部，并将所有不在脊的顶部像素设定为零，以便在输出中给出一条细线，这就是众所周知的非最大值抑制处理。脊像素使用两个阈值 T_1 和 T_2 作阈值处理，其中 T_1 小于 T_2 。值大于 T_2 的脊像素称为强边缘像素， T_1 和 T_2 之间的脊像素称为弱边缘像素。

4、最后，算法通过将 8 连接的弱像素集成到强像素，执行边缘连接^[9]。



图 6 Canny 算子提取的相变线边缘

利用 canny 算子对相变热图图像进行提取可以获得相变线的位置，如图 6 所示。

3.3 目标特征提取

为了便于图像处理，图像一般为暗背景亮目标，有时需要转换以便处理。对于目标物体比较简单的灰度图像，灰度值可以当做提取目标的判据。阈值处理在目标提取中占有重要的地位。其原理为：任何图像 f 中满足 $f(x,y) \geq T$ 的点 (x,y) 称为对象点，其它点称为背景点。换言之，阈值处理后的图像 $g(x,y)$ 定义为：

$$g(x,y) = \begin{cases} 1 & f(x,y) \geq T \\ 0 & f(x,y) < T \end{cases}$$

标注为 1 的图像对应于对象，而标注为 0 的像素则对应于背景， T 为阈值。阈值的确定可以使用 Otsu 方法来计算。Otsu 方法为选择最大化类间方法为阈值。

对于图像 $f(x,y)$ 的归一化直方图有：

$$P_r(r_q) = \frac{n_q}{n} \quad q = 0, 1, 2, \dots, L-1$$

其中， n 是图像中的像素总数， n_q 是灰度级为 r_q 的像素数目， L 是图像中所有可能的灰度级数。假设选定一个阈值 T ， C_0 是一组灰度级为 $[0, 1, \dots, T-1]$ 的像素， C_1 是一组灰度级为 $[T, T+1, \dots, L-1]$ 的像素。类间方差为：

$$\sigma_B^2 = w_0(u_0 - u_T)^2 + w_1(u_1 - u_T)^2$$

上式中：

$$w_0 = \sum_{q=0}^{T-1} P_q(r_q) \quad u_0 = \sum_{q=0}^{T-1} qP_q(r_q) / w_0$$

$$w_1 = \sum_{q=T}^{L-1} P_q(r_q) \quad u_1 = \sum_{q=T}^{L-1} qP_q(r_q) / w_1$$

$$u_T = \sum_{q=0}^{L-1} qP_q(r_q)$$

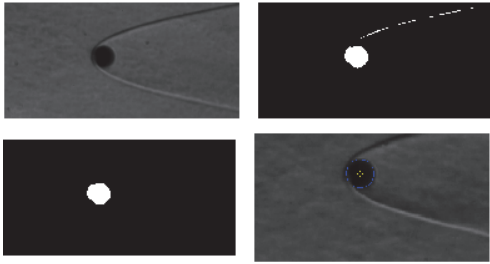


图 7 (a)原始图像(b)阈值处理结果
(c)形态学开运算结果(d)辨识结果

迭代计算找到最大类间方差。图 7 (a)为流场动压测量实验中拍摄的圆球图像;(b)为经过阈值处理后的结果。在图中可以看到除了目标圆球的图像外还存在一些噪声信息。去除噪声可以利用形态学开运算算法来实现。结构元素 b 对图像 f 的开运算可以解释为结构元素 b 沿表面 f 的下沿向上移动,并移过 f 的整个定义域。在结构元素沿 f 的底面滑动时,通过找到结构元素的任何部分所能到达的最高点,就可以构建开运算。图 7 (c)为(b)再经过开运算后的结果。获取目标图像后通过求取目标中心矩可以获取目标的质心。图 7 (d)为最终求得的结果,图中黄色“*”代表圆球的质心,蓝色曲线为圆球的边界。图 8、9 为对一组实验拍摄图像的处理结果,图 8 为圆球的水平运动轨迹随时间的变化关系;图 9 为圆球的垂直运动轨迹随时间的变化关系。

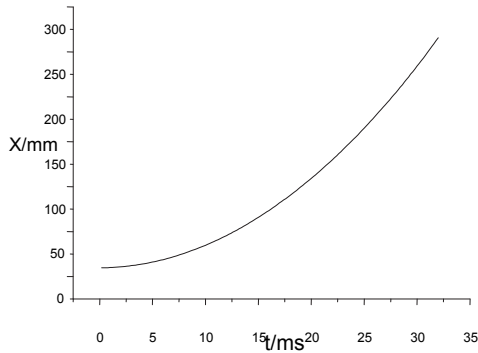


图 8 圆球水平运动轨迹随时间变化

3 结论

数字图像处理技术完全能够满足风洞试验的要求,与人工处理相比数字图像处理技术提取气动参数具有判断依据准确客观,数据准确可靠,精度高等特点。随着数字图像技术的发展必将与光学成像测量技术一起在风洞试验测量中发挥越来越重要的作用。

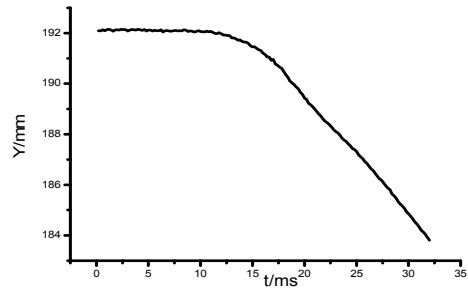


图 9 圆球垂直运动轨迹随时间变化

参考文献

- 1 钟萍等.高超声速流动模拟需求及地面试验能力分析,飞航导弹,2012(3):20~26
- 2 张玮雄等.数字图像处理技术的发展现状及趋势,科学之友,2012,3:153~154
- 3 孙鹤泉等. DPIV 流场测试技术中的数据处理的,2000,40(3):364~367
- 4 WESTERWEEEL J. Fundamentals of digital particle image velocimetry. Electr J: Measurement Science and Technology, 1997, 8(12): 1379~1392
- 5 孙鹤泉等. 波流实验中的图像处理技术,2004(4):37~39
- 6 SCHULTZ D L, JONES T V. Heat transfer measurements in short duration hypersonic facilities [J]. AGARD-AG-165, 1973; 12~19.
- 7 唐巧琪等. 相变热图试验技术研究与应用,2003,17(1):15~17
- 8 马家欢. 高超声速稀薄气流中球阻尼系数的一种简单公式. 空气动力学报,1985(1):32~27
- 9 Rafael C. Gonzalez. 数字图像处理技术,电子工业出版社,2009