

含冲击波流场干涉图图像处理方法的图像研究*

阎大鹏 朱兆清 鲁江陵 张健 贺安之

(南京理工大学应用物理系, 南京 210014)

提 要

本文研究了含冲击波流场干涉图的图像处理方法,它包括干涉条纹的快速细化算法,冲击波波阵面的提取算法和时间序列冲击波波阵面的配准算法.根据这些算法,在PC-VISION 100图像处理机上开发了应用软件.实验结果表明,该方法可用于定量计算冲击波的传播速度和压力分布,增加了流场干涉图的用途.

关键词 图像处理, 冲击波, 干涉图

1 引 言

激光干涉法和莫尔偏折法在流场显示中占有重要的地位^[1,2],因为它们对流场无干扰,不但可用于定性观察流场中的冲击波结构,而且可用于定量计算同一瞬间整个流场的参量分布.

随着计算机技术的迅速发展,计算机数字图像处理技术在流场干涉图的处理中得到广泛的应用^[3,4].但主要是用于干涉条纹的细化,条纹位移量的自动判读以及流场参数的定量计算.

本文详细地讨论了由激光干涉法或莫尔偏折法获取的含冲击波流场干涉图的图像处理问题,成功地把这种图像处理技术应用于激波风洞中流场莫尔偏折图的处理,应用于激光诱导空气击穿时间序列干涉图和爆轰流场时间序列干涉图的冲击波波阵面的提取和配准,文中定量计算了冲击波的传播速度和压力分布.结果表明,这种方法是相当有效的,它增加了流场干涉图的定量测试功能.

2 干涉条纹的快速细化算法

干涉条纹的细化可以减少数据存贮量,提高处理速度和条纹位移量的自动判读精度.因此,细化问题受到普遍重视,出现了大量的算法^[5,6].然而含有噪声的条纹快速细化算法一直是人们致力寻求的目标.本文所提出的条纹快速细化算法是由条纹平滑和骨架抽取两个过程组成.

设 X 和 O_i 为 3×3 窗口内中点和其它各点的像素, 3×3 窗口如图 1 所示. 条纹平滑过程是由填充和删除两个子过程组成. 填充过程把 X 为 0 的像素和 X 的四邻域中有三个以上的邻点为 1 的像素置为 1 像素. 删除过程是把 X 为 1 像素, $(O_1 + O_2 + O_3) \cdot (O_5 + O_6 + O_7) + (O_3 + O_4 + O_5) \cdot (O_7 + O_8 + O_1) = 0$ 的像素以及 X 不是端点的像素置为 0 像素. 图 2 分别表示了

收稿日期:1992年11月19日;收到修改稿日期:1993年2月12日

* 本文工作为霍英东教育基金会青年教师基金项目的部分内容.

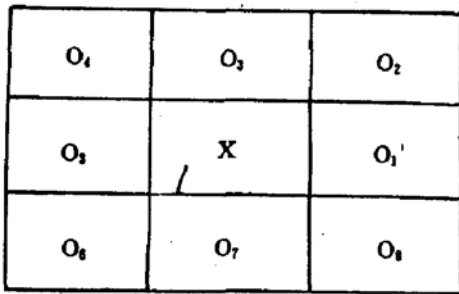


Fig. 1 3×3 window

填充和删除过程的例子.

骨架抽取过程是从左到右,自顶向下对干涉条纹扫描,在扫描中根据某种条件,将条纹上的 1 像素或删除、或标记为骨架点,或标记为候选点. 第一次遍历时,条纹上所有的 1 像素均为候选点. 第二次遍历时,只对经第一次遍历后标记为候选点的像素进行处理. 经过多次迭代,直到形成单像素宽度的线形为止. 如 1 像素 X 满足以下条件,则将之删除: 1) 逻辑运算式 $\sum_{i=1}^4 O_{2i-1}(O_{2i} + O_{2i+1}) = 1$, 这里 $O_9 = O_1$; 2) $BN > 1$; 3) $BN < T$; 4) 在前一次遍历时, X 没有被标记为骨架点. 如果上述条件(1)或条件(2)为假,则将 X 标记为骨架点. 如果条件(3)为假,则将 X 标记为候选点,供下一次遍历时处理. 条件(1)确保条纹细化后的连通性; 条件(2)和(4)防止过度删除; 条件(3)防止条纹上产生断口.

逻辑运算式 $\sum_{i=1}^4 O_{2i-1}(O_{2i} + O_{2i+1}) = 1$, 这里 $O_9 = O_1$; 2) $BN > 1$; 3) $BN < T$; 4) 在前一次遍历时, X 没有被标记为骨架点. 如果上述条件(1)或条件(2)为假,则将 X 标记为骨架点. 如果条件(3)为假,则将 X 标记为候选点,供下一次遍历时处理. 条件(1)确保条纹细化后的连通性; 条件(2)和(4)防止过度删除; 条件(3)防止条纹上产生断口.

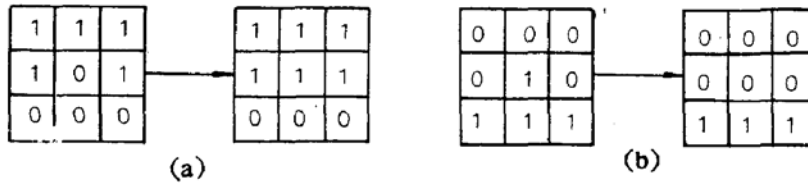


Fig. 2 The examples of padding and deleting process
(a) padding process (b) deleting process

3 冲击波波阵面的提取算法

对于含冲击波的流场,由于冲击波的存在,造成流场中折射率梯度的跃变,反映在干涉图上是干涉条纹的突变,如图 3 所示. 通常是借助条纹的突变形状来定性观察冲击波的结构.

为了从含冲击波结构的流场干涉图中提取冲击波波阵面,作者设计了一种冲击波波阵面的提取算法. 由图 3 可见,由于冲击波的存在,条纹突变并形成一角点. 可以设计一种条纹追踪算法来确定这个角点,该追踪算法按图 4 所示的扇形区搜索,扇形区参数由 W 、 β 确定,这里 W 的值较小,一般取几个像素长. 当沿某一曲线追踪到角点处时,在指定的扇形区域搜索,若有另一曲线存在,则这两曲线的交点就是冲击波引起干涉条纹的突变点.

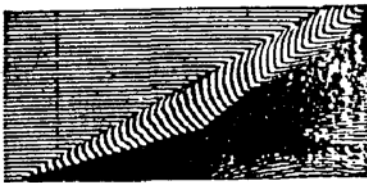


Fig. 3 The interferogram of flow field with shock wave

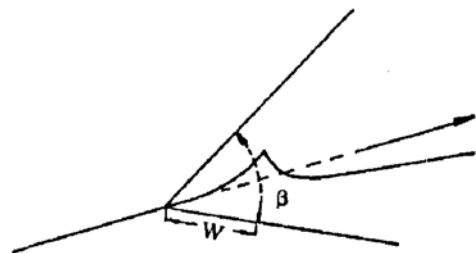


Fig. 4 Sectorial search area

找到冲击波引起干涉条纹的突变点后,就是保留该点,而删除其余的干涉条纹. 该算法是

这样设计的,由于细化后的干涉条纹为一族曲线,当每一条纹上冲击波引起的条纹突变点 x_1, x_2, \dots, x_N 确定之后,设 x_n 为这些突变点的最小值,计算

$$y_i = f(x_i) \quad (1)$$

若 $y_i > y_n$,则保留;若 $y_i < y_n$,则删除.这样就可以获得冲击波引起干涉条纹突变点的离散数值.然后利用分段最小二乘法拟合这些离散数值,就可以重建冲击波波阵面.

4 时间序列冲击波波阵面的配准算法

利用高速干涉摄影方法可得到含冲击波发展过程的流场时间序列干涉图.通过冲击波波阵面的提取算法,能够获得时间序列冲击波波阵面.为了精确地计算冲击波的传播速度及其压力分布,必须研究一种时间序列冲击波波阵面的配准算法,把同一过程中不同时刻的冲击波波阵面以某一静止物体为基准,精确地配准在同一幅画面上.这样就比人工配准方法省时且保证精度.

时间序列冲击波波阵面是从时间序列干涉图中提取的,由于成象放大、图像处理等过程产生二维平移、旋转变化以及二维旋转所产生的透视畸变.例如,对于二维平移、旋转变化的两幅需配准的图像,其运动前后坐标之间满足关系

$$\begin{cases} x = x_1 \cos\theta + y_1 \sin\theta + \Delta x \\ y = y_1 \cos\theta - x_1 \sin\theta + \Delta y \end{cases} \quad (2)$$

式中, $\Delta x, \Delta y$ 为平移参数, θ 为旋转角度.对需配准的两幅图像,只要用特征匹配方法,在其静止物体的图像上找出两个或两个以上的对应点,使可按(2)式求出 $\Delta x, \Delta y$ 和 θ .然后按(2)式对第二幅图像上的冲击波波阵面曲线逐点校对,再将校正过的图像与第一幅图像叠加,就可以得到配准的结果.

5 应 用

根据本文所提出的干涉条纹快速细化算法,冲击波波阵面提取算法和时间序列冲击波波阵面的配准算法,作者在 PC-VISION 100 图像处理机上开发了应用软件,并用于激波风洞中流场的莫尔偏折图,激光击穿空气的时间序列干涉图等的处理,取得了满意的效果.

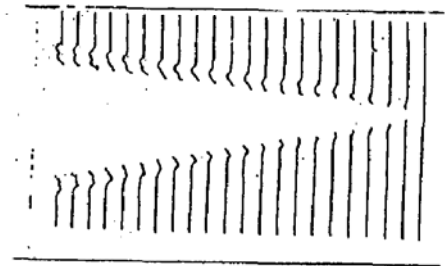
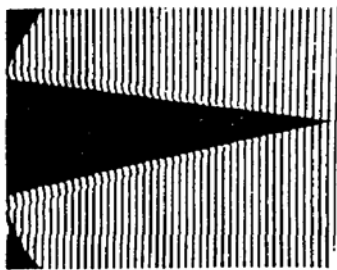


Fig. 5 Moire deflectogram of flow field in shock wave tunnel Fig. 6 The result of Fig. 5 after fringe thinning

图5为激波风洞中尖锥模型边界层转捩区流场 ($M = 10.29$) 的莫尔偏折图,利用上述条纹快速细化算法,获得条纹细化后的结果如图6所示.显然,该算法对于干涉图上的噪声和条纹上的“毛刺”有较强的抑制作用.同时,条纹平滑过程消除了条纹上的微小孔洞,避免了细化后的条纹出现断线的现象.若细化后的条纹仍出现断线的现象,则根据图4所示的扇形搜索区搜

索断点,这时 W 和 β 的值可以取得大些. 如果在扇开区域搜索到断点,则在这两个断点之间以及这两点位置及切向为边界条件进行二阶多项式补插,就可得到连通的条纹曲线,无需人工参与. 若流场干涉图在冲击波位置出现条纹的粘连现象,则采用鼠标键盘进行交互式处理. 由于该算法简单,所以处理速度比较快,为 0.5 s/frame.

图 7 为激光击穿空气的时间序列干涉图. 通过上述图像处理,提取和配准后的时间序列冲击波波阵面如图 8 所示. 由图 8 并根据两个冲击波波阵面的传播时间及距离得到冲击波沿径向的传播速度如图 9 所示. 同时根据公式^[7]

$$\frac{P}{P_0} = \left(1 + \frac{K-1}{2} \frac{V}{C_0} \right)^{2K/(K-1)} \quad (3)$$

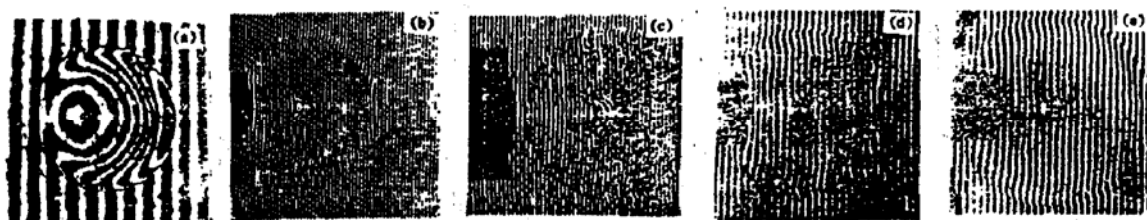


Fig. 7 The time-serial interferograms of laser breakdown air

(a) $t = 4.77 \mu\text{s}$; (b) $t = 35.53 \mu\text{s}$; (c) $t = 61.25 \mu\text{s}$; (d) $t = 73.83 \mu\text{s}$; (e) $t = 93.51 \mu\text{s}$

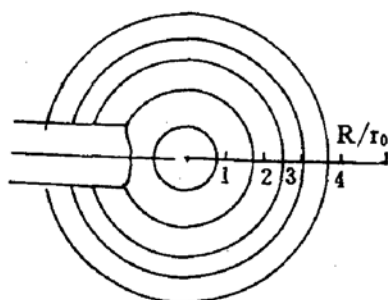


Fig. 8 Time-serial shock wave-front extracting and registering from Fig. 7

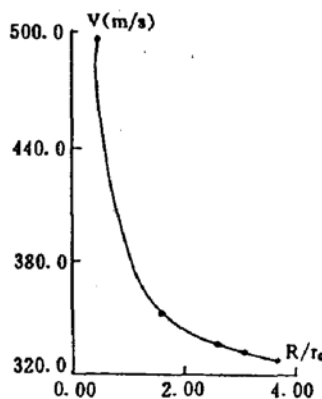


Fig. 9 Dependence of shock wave-front velocity on the dimensionless shock wave-front radius (R is the radius of calculated cross-section, r_0 is the dynamic radius of explosion)

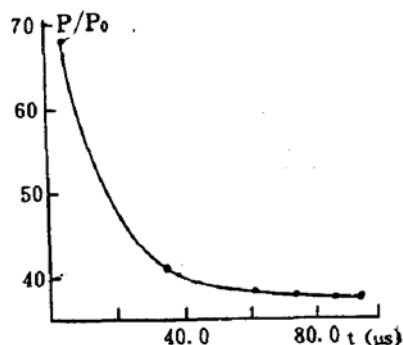


Fig. 10 distribution of pressure for shock wave-front with time change

式中, P 为压力, P_0 为静压, C_0 为未扰动区的音速, V 为冲击波速度, K 为比热比. 由于激光击穿空气所形成的冲击波是在空气中传播, 故取 $K = 1.4$, $C_0 = 320 \text{ m/s}$, 则(3)式改写成

$$(P/P_0) = (1 + 0.000625)^7 \quad (4)$$

由(4)式就可以定量计算冲击波的压力. 图 10 为激光击穿空气所形成的冲击波其压力随时间变化的曲线.

该图像处理方法还应用于激光引爆起爆药所产生的时间序列爆轰流场干涉图的处理,结果也是令人满意的^[8].

6 结 论

本文所研究的含冲击波流场干涉图的图像处理方法,与其他数字图像处理技术相比较,其细化算法的处理速度比较快,为 0.5 s/frame. 由于采用了条纹平滑过程对条纹进行预处理,一般在细化后的条纹上不会出现断线. 若还可能出现条纹断线现象,则由扇形搜索区搜索断点进行二阶补插. 整个过程无需人工参与. 对于可能出现的如干涉条纹在冲击波位置的粘连情况,则由鼠标键盘进行交互式处理. 同时,冲击波波阵面的提取和配准算法使人们能够直观地获得冲击波的结构,更重要的它们能够用于精确地定量计算冲击波的传播速度和压力分布,精度可达一个像素,增加了流场干涉图的定量测试用途.

参 考 文 献

- [1] He Anzhi, Yan Dapeng, Ni Xiaowu, Large-aperture and long-path interferometer for measuring transient thermal field. *Opt. Engineering*, 1988, 27(10): 841~844
- [2] Yan Dapeng, He Anzhi, New method of asymmetric flow field measurement in hypersonic shock tunnel. *Appl. Opt.*, 1991, 31(7): 770~774
- [3] M. Servin, R. Rodriguez-Vera, M. Carpio *et al.*, Automatic fringe detection algorithm used for moire deflectometry. *Appl. Opt.*, 1990, 29(22): 3266~3270
- [4] Amar Choudry, Automated fringe reduction techniques. *Proc. SPIE*, 1987, 816: 49~55
- [5] A. Rosenfeld, *Digital picture process*. Second Edition, New York, Academic Press, 1982
- [6] N. J. Naccache, R. Shinghal, An investigation into the skeletonization approach of Hilditch. *Pattern recognition*, 1984, 17: 279~286
- [7] 徐华航, 空气动力学基础. 北京: 北京航空学院出版社, 1987: 15
- [8] 阎大鹏, 苗鹏程, 王海林等, 起爆药爆轰场和燃烧场的干涉法显示及其图像处理. *光学学报*, 1992, 12(6): 560~565

The investigation of the image processing method for flow field interferograms containing shock wave

YAN Dapeng ZHU Zhaoqing LU Jianlin Zhang Jian He Anzhi

(Department of Applied Physics, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210014)

(Received 19 November 1992; revised 12 February 1993)

Abstract

In this paper, the image processing method of flow field interferograms containing shock wave has been investigated. The method includes an algorithm of rapid fringes thinning, an algorithm of extracting shock wave-fronts and an algorithm of registering time-serial shock wave-fronts. An application software based on these algorithms is developed for use with the PC-VISION 100 image processing system. The experimental results show that this method can be used to calculate the propagation velocity and pressure distribution of shock wave-fronts and the functions of flow field interferogram are increased.

Key words image processing, shock wave, interferogram.