



干涉图计算机处理*

杨仕润 俞刚

(中国科学院力学研究所)

提要 本文描述了图像处理技术在干涉图判读中的应用。通过对各种干涉图条纹骨架的提取和剖面灰度级的分析比较,得出了一种简便迅速同时保持较高精度的条纹骨架坐标提取法。适用于变化范围较宽的各类干涉图的计算机判读需要。

关键词 图象处理,干涉图,判读

1. 前言

在气体动力学实验中,M-Z干涉和全息干涉法是常用的流场测量手段,实验结果以干涉图的形式给出。对一幅条纹有复杂变化的干涉图,人工判读不仅十分耗时,而且不准确。

八十年代以来,由于微机、图像处理技术的发展,使得干涉图的自动或半自动计算机处理得以实现。具代表性的有 F. Becker 等人的工作^[1],国内也见到有张爱雷利用灰度值与条纹位移数的关系判读法^[2]。

作者在上述研究的启发下,将图像处理和有关技术应用用于干涉图的判读,通过对各种干涉图灰度级分布剖面的分析与比较,得出一种更简便实用,迅速同时保持较高精度的条纹骨架坐标提取法,适用于变化范围较宽的各类干涉图的计算机判读需要。

2. 基本原理

干涉条纹代表的是一种等相位差 $\Delta\phi$ 或等光程差 OPD 分布,如果 $n(x, y, z)$ 和 n_0 分别为实际的和参考的折射率场,则

$$OPD = \frac{\Delta\phi\lambda}{2\pi} = \int_L (n - n_0) ds = N\lambda \quad (1)$$

λ 为光波波长, N 为条纹移动级数, L 是光的轨迹。

因此,对于干涉图的判读工作来说,首先是要从有一定灰度分布的干涉条纹中提取等相位线,由干涉原理,条纹的灰度分布是周期性的,一般情形表示为

$$I(x, y) = I_0(x, y) + I_1(x, y) \cos(\Delta\phi(x, y)) \quad (2)$$

其中 $I_0(x, y)$ 是基底灰度, $I_1(x, y)$ 是调制项,通常 I_0, I_1 都可能变化。于是,提取干涉图中等相位线的工作可转化为确定等灰度值线的工作,通常,灰度值的极大、极小或边缘是比较容易区别的位置。这样,图像处理的相关技术可用于干涉图的处理。

3. 判读装置

判读装置由摄像机、图像板、微机和输出设备等组成(图 1),干涉图可通过摄像机或录像机输入,使用的摄像机为 S932 型高灵敏度高分辨率 CCD 摄像机,其靶面由 604×588 个像素组成。虚线内所示为图像板系统,本装置采用了 PIP-1024B 伪彩色图像板,外部输入的视频讯号,通过 A/D 转换器和一组输入 LUT 将干涉图数值化后存入帧存储器中,帧存储器中的干涉图可以通过微机或数字化仪控制,处理后的干涉图通过输出端红、绿、蓝三色输出 LUT 和 D/A 转换器将数字讯号变为视频讯

* 本课题系国家自然科学基金委资助项目。

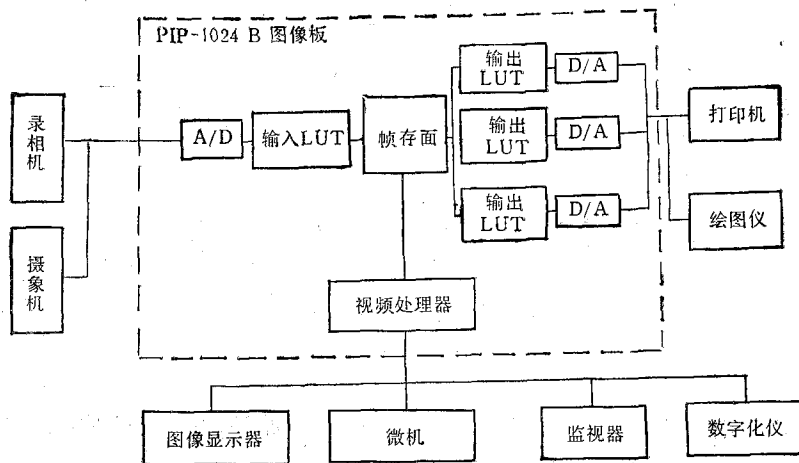


图1 判读装置方框图

号输出。帧存具有 $1M(1024 \times 1024 \times 8\text{bit})$ 容量,在具体使用时可分为四个工作区。因此,可以同时存储四幅具有 256 个灰度等级的 512×512 像素元的图像,这对干涉图的运算处理带来许多方便。

微机先后使用过 IBM-286 和 AST-386 两种,它们除了运算速度和容量有差别之外,对干涉图的处理都同样好用。

使用两台显示器,一台为高分辨彩显作为图像显示,另一台为普通微机显示器。

4. 干涉图处理及条纹骨架提取方法

干涉图处理中最关键的一步是如何根据灰度分布准确地确定等相位线,或称干涉条纹细化,骨架提取等。因为有了等相位线之后剩下的问题,特别是二维的情形就仅是简单的代数运算了。

对一幅在实验过程中获得的干涉图,由于光源不可能完全均匀,光学和电路等其他环节也不可能完全理想,这些因素要引起灰度的规则与不规则变化,高频噪音等。所以,实际的干涉图灰度分布不是理想的余弦(或正弦)分布,难以用一个统一的灰度阈值来确定等相位线。

本文从消除干涉图的高频噪音等不规则变化入手,然后利用浮动阈值法将干涉条纹二值化,最后,再试用极小值、极大值、边界值等五种

条纹骨架提取法。其步骤如下:

(1) 干涉图平均化消除高频噪音

将干涉图中的每个像素点作 3×3 点阵的平均值,然后用平均值代替原来的灰度值,平均化的处理不仅可以消除高频噪音,而且对局部的不规则干扰也自动地作了修正与补偿,便于骨架坐标的提取。

(2) 浮动阈值二值化

将平均化后的干涉图与原始干涉图灰度值作减法运算,相减后的图可分为正负两种灰度值的分布,令灰度值大于零的像素元灰度值为 255(白),小于零的像素元的灰度值为零(黑),这样,干涉图就变成只有黑白两种灰度值分布的二值化图。

(3) 骨架提取

共试用五种方法来提取条纹骨架:边界值法、极大值法、极小值法,其中极小值法又分为三种。

a. 边界值法: 将二值化后矩形脉冲的左(或右)边界值作为条纹骨架。

b. 极大值法: 将平均化后灰度值极大的条纹坐标值作为条纹的骨架。

c. 极小值法: 从平均化后条纹的九个连续序列点中取出极小值作为条纹的骨架。

d. 极小值法: 条纹平均化后,比较相邻两

表 1

干涉图 剖面	骨架坐标的均方偏差 (pixel λ)					
	C		E		D	
No. 1 (140)	0.4128	1/50	0.2887	1/75	0.5773	1/37
No. 2 (220)	0.3420	1/68	0.5567	1/41	0.6165	1/39
No. 3 (239)	0.3227	1/77	0.4364	1/54	0.5596	1/44

组连续序列点组的灰度值的平均值，确定极小值可能所在的序列点组，然后在该序列点组中确定极小值的位置作为条纹骨架的位置。

e. 极小值法：由二值化后的黑条纹向中心均匀收缩，得到条纹骨架坐标。

5. 结果与讨论

为了对提取条纹骨架的五种方法进行比较，选取了两张典型的干涉图，图 2 为平面射流时间平均干涉图，由 M-Z 干涉仪，He-Ne 激光束为光源获得，图 3 为二维剪切层瞬间干涉图，由红宝石脉冲激光器为光源获得，干涉图由 Polaroid 照片记录。图中坐标单位为像素元 (pixel)，坐标原点在左上角。可见到明显的高频噪音和背景亮度不均匀，图 4 为图 2 的典型灰度值剖面，剖面位置由图中的水平黑线标志，纵坐标代表灰度值，A 代表原始灰度值分布，B 代表经过十次平均化处理后的分布，可以看出不规则变化现象大大缓和，灰度值变为较规则的分布，图 5 给出经过上述五种骨架提取法所得的图示结果，在监视器上可用红、黄、蓝、绿、白五种垂直线段表示五种方法所得的条纹骨架位置。可以看出由三种取极小值得到的骨架坐

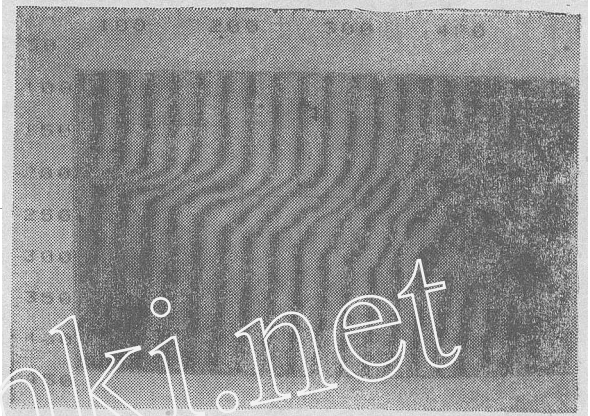


图 3 平面剪切层干涉图(瞬时)，气流从左向右，下部为非扰动区
x = 95 - 195, y = 140, Unit: pixel

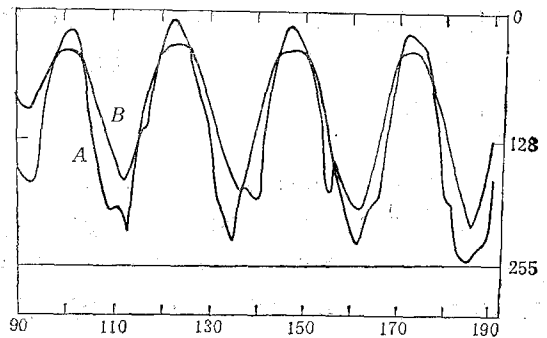


图 4 典型剖面灰度值分布图。剖面位置如图 2 中的水平黑线所示垂直坐标代表灰度值，A 为原始灰度剖面，B 为平均化后灰度剖面

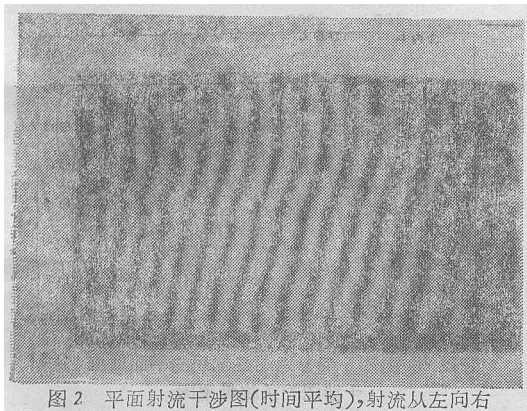


图 2 平面射流干涉图(时间平均)，射流从左向右
x = 90 - 190, y = 239, Unit: pixel

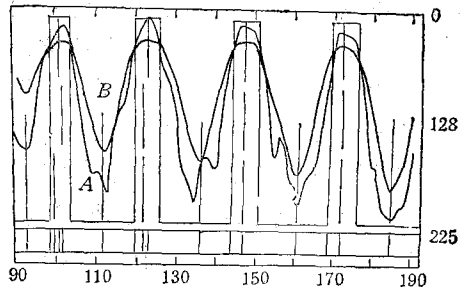


图 5 骨架坐标显示图

A 为原始强度剖面分布，B 为消除噪音后强度剖面分布

表 2

条纹图 剖面	条纹宽度 $d(\text{pixel})$						均方偏差	
	A	B	C	D	E	平均值	(pixel)	λ
No. 1 (140)	21.3	21.7	21.6	21.3	21.7	21.7	0.07	1/292
No. 2 (220)	23.4	23.3	23.3	23.4	23.3	23.4	0.05	1/430
No. 3 (239)	25.0	24.7	25.1	25.1	25.1	25.0	0.14	1/179

标十分接近, 如果认为由三种极小值方法得到的骨架坐标的平均值最接近真实值, 那么, 就可以用均方根偏差来表示这三种方法取骨架坐标的离散程度。表 1 列出了三种极小值方法对两种干涉图三个典型剖面(自由区和扰动区)所得到的条纹骨架坐标位置的均方根偏差, 结果说明三种方法均达到较高的精度, 特别是方法 C 和 E, 不管是对自由流区的条纹, 还是对扰动区的条纹, 所得到的条纹骨架坐标的精度均高于 $\lambda/50$ 。

此外, 还对上述三种剖面, 用五种提取条纹骨架的方法所得的条纹宽度进行了比较, 见表 2, 所得到的精度更高, 达到 $\lambda/180$ — $\lambda/430$ 。说明上述五种方法对各种典型剖面所得的条纹宽度都十分接近, 相互之间的差别只有几百分之一一个波长。这对一般分析来说已是足够精确的了。

在五种方法中, 特别要指出的方法 C 和 E, 他们的精度最好, 在具体进行条纹骨架提取时发现, 当条纹角度变化接近 90° 时, 如果用方法 C, 会出现条纹骨架不连续的现象, 用方法 E, 可以解决骨架不连续的问题, 得到满意的结果, 但处理时间较长, 一般一幅干涉图处理需要近 15 分钟。对于条纹角度变化不是非常接近 90° 的干涉图, 可以使用方法 C, 其处理时间大大缩短, 仅 30 秒左右, 要比方法 E 快近 30 倍。

图 6 为使用方法 C 所得到的干涉条纹骨架图。图 7 为使用方法 E 所得到的条纹骨架图。图 8 为图 6 和相应的无扰动气流时的参考图的叠加, 可以看到在自由流区, 条纹很好地重合, 在扰动区, 即便是在下游只有十分细小的变化, 也分辨得很清楚。这就说明了所用的条纹骨架提取方法的高度精确性。

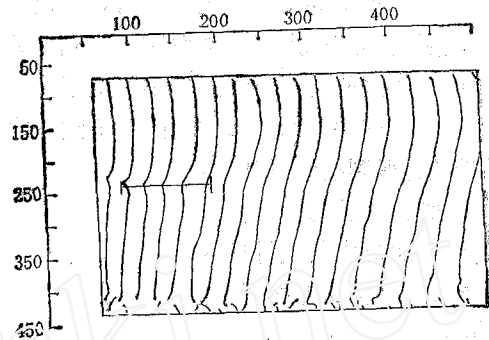


图 6 平面射流干涉图的条纹骨架图(方法 C 提取)
 $x = 90 - 190, y = 239, \text{Unit: pixel}$

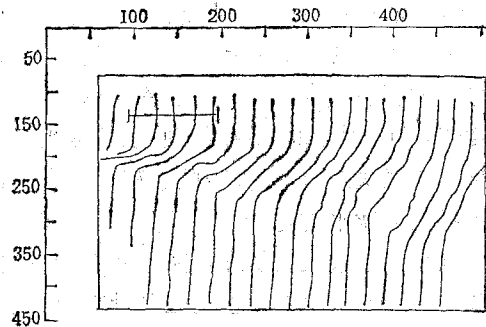


图 7 平面剪切层干涉图的条纹骨架图(方法 E 提取)
 $x = 95 - 195, y = 140, \text{Unit: pixel}$

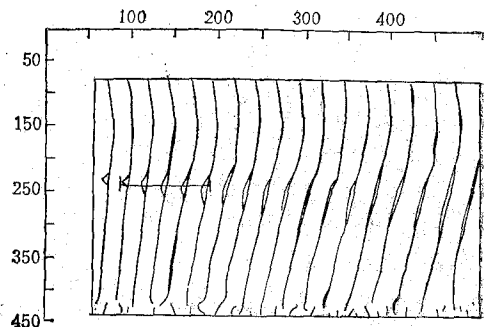


图 8 由图 6 与参考图叠加后的平面射流干涉图的条纹骨架图
 $x = 90 - 190, y = 239, \text{Unit: pixel}$

6. 结论

利用计算机图像处理技术来处理干涉图是一种非常理想的方法,它的特点是自动化、速度快、精度高。本文所述的五种条纹骨架提取方法,对不同的干涉图和剖面均得到比较一致的结果,其中尤以极小值法可适用于变化范围更宽的干涉图,三种极小值方法各有所长,方法C处理时间短,对于条纹角度变化接近 90° 的干涉图,利用方法E可得到满意的结果,但处理时间要比方法C长。

感谢参加本研究的还有李建国和刘文杰同志很好合作及纪卫东和杨自强同志在图像处理软件设计工作上的帮助。

参 考 文 献

- [1] Becker, F., Yung H. Y., Application of digital Interferogram Evaluation Techniques, AIAA 23rd Aerospace Sciences Meeting, January 14-17, 1985/Reno Nevada.
- [2] 张爱雷,风洞流场激光全息干涉图的计量机判读,中国航空科技文献, HJB870517 (1987).

温升速率对高温应变计性能的影响

尹 福 炎

(航空航天部七〇二所)

提要 本文介绍了高温应变计在温度变化下热输出特性变化的理论公式,用实验方法测定了应变计敏感栅和试件表面温度之间的温差,找出了用两种不同胶粘剂(无机胶粘剂 u_{52} ,及有机胶粘剂J06-2)粘贴的应变计在试件正面加热与反面加热条件下,热输出的变化规律。

关键词 温升速率、热输出、高温应变计

1. 前言

随着航空、宇航事业的发展,测量结构或部件在高温条件下的热应力始终是人们关心的一个重要问题。特别是航天飞机的出现,对在高温升率(即瞬态温升)条件下的热应力测量精度提出了更高的要求。通常为了获得较高的热应力测量精度,往往采用各种形式的自补偿式高温应变计,在测量中修正应变计的热输出。对于在高温升速率条件下(温升率为 $10^\circ\text{C}/\text{s}$ 以上)应变计热输出的研究,虽然人们曾作过不少工作^[1,2],但就其规律和变化的本质尚未进行仔细的试验研究。

各种高温应变计的热输出特性随着温升速率不同而有明显的变化,其实质是由于在不同的温升速率条件下,应变计敏感栅和被粘贴试

件之间存在温差的缘故。它的变化规律不仅与应变计本身性能有关,而且还与所用试件材料的热传导系数、表面黑度系数、胶粘剂种类、胶层厚度以及周围的散热条件等因素有关。因此,通常不能用计算的方法获取,而必须借助于模拟实际使用条件的试验来测定。

本文主要简述高温应变计的温度特性(热输出),着重介绍温升率对高温应变计温度特性影响的本质,以及用实验方法测定应变计敏感栅和试件表面温度之间温差的方法。

2. 高温应变计的温度特性

温度条件对应变计的所有性能都有影响,这里只讨论应变计的热输出特性。

通常,应变计的输出不仅与被测试件的应变有关,而且还与所经受的温度变化有关,也就是说,应变计的电阻变化是应变和温度的函数,即

$$R = f(T, \epsilon) \quad (1)$$

因此当被粘贴试件同时受到应变和温度作用时,则应变计的电阻变化为

$$\Delta R = \left(\frac{\partial R}{\partial T} \right)_\epsilon \Delta T + \left(\frac{\partial R}{\partial \epsilon} \right)_T \Delta \epsilon \quad (2)$$