

散斑图信息自动处理

邹运庐 徐大雄
(北京邮电学院应用物理系)

宋菲君
(北京信息光学仪器研究所)

陶蕙英
(廊坊师范专科学校物理系)

摘 要

散斑场用于无损检测 (NDT) 中, 具有许多优点, 尤其是散斑图信息的自动处理在工业上具有实用价值。我们基于散斑图的特点, 分析了各类散斑图自动处理系统的基本原理、处理方法以及它们之间的差别, 特别讨论了实际应用中可能遇到的问题。

一、激光散斑效应

当相干光(例如激光)从光学粗糙表面(起伏度大于波长的表面)反射, 或通过折射率无规则涨落的介质传播时, 由于介质表面或内部大量无规则分布的面元或体积元散射子波相干叠加的结果, 形成具有稳定的随机光强分布的反射或透射光场。该分布具有颗粒状结构, 称为散斑。目前, 散斑场作为信息载体, 已广泛运用于表面粗糙度的研究、光学图象处理、流场显示和无损检测 (NDT) 中。

激光散斑效应最成熟、最有前途的应用, 是二维位移(或形变)场的记录和分析。设被分析表面被扩束的激光照亮, $D(\mathbf{x})$ 和 $D(\mathbf{x} + \Delta\mathbf{x})$ 分别为位移(或形变)前、后表面光强分布, 在同一记录介质(一般是感光胶片)上记录 $D(\mathbf{x})$ 和 $D(\mathbf{x} + \Delta\mathbf{x})$, 则经线性处理后的介质透过率为

$$I(\mathbf{x}) = a - b[D(\mathbf{x}) + D(\mathbf{x} + \Delta\mathbf{x})], \quad (1)$$

式中 a, b 为常数, $I(\mathbf{x})$ 中包含了位移(或形变)信息, 称为位移散斑图。

若用细激光束照射散斑图, 并在后面距离为 L 处用屏幕观察, 就会看到一组杨氏条纹(图 1), 其光强分布为

$$I(\xi) = K(\xi)\delta(\xi) + 4b^2|\tilde{D}(\xi)|^2 \cos^2 \left(\frac{\pi}{\lambda L} \xi \cdot \Delta\mathbf{x} \right), \quad (2)$$

式中 \tilde{D} 为 D 的傅里叶变换, λ 为激光波长, ξ 为观察屏上的空间坐标矢量。 $K(\xi)$ 为 ξ 的实函

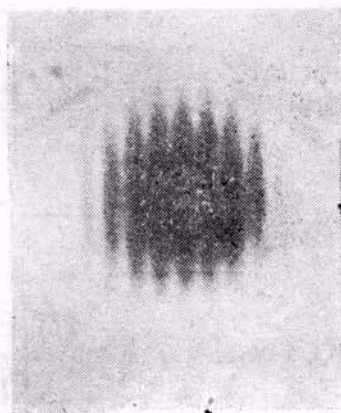


图 1 杨氏条纹

数。等号右边第一项为激光透过散斑图的直接衍射象, 称为零级光斑; 第二项中 $|\tilde{D}|^2$ 为一次曝光散斑场的谱, 其截面是高斯分布, 构成散斑图的衍射晕, 而余弦函数表示周期性条纹(即杨氏条纹)。因而, $I(\xi)$ 为散斑图衍射晕对杨氏条纹的调制。

测出条纹的空间周期 δ 和方位角 θ , 就可以求出被测点的位移(位移矢量方向与条纹方向正交)

$$d = |\Delta\mathbf{x}| = \lambda L / \delta m, \quad (3)$$

m 为拍摄散斑图时的放大率。逐点测量 δ 和 θ , 就可以确定整个散斑场, 进而进行平面形变分析。

用人工判读法测量 δ 和 θ , 测量结果依赖于操作人员的技能, 而且测量速度很慢, 不可能准确地进行大范围的抽样, 难以将该效应应用于工程之中。为了准确、有效地对散斑图进行逐点分析, 各种自动和半自动的散斑图信息处

理系统正在研制开发之中。

二、条纹信息的自动分析

1. 自动分析系统框图 散斑图的谱——杨氏条纹的自动分析系统综合了近代光学、实验力学和微电子学三方面的最新技术。这类系统典型的框图如图 2 所示。

2. 工作原理 把二次曝光散斑图固定在一个由步进电机驱动的 xy 平移台上, 由计算机控制按用户要求进行二维扫描。在给定位置 (x, y) 处, 细激光束通过散斑图发生衍射, 在距离 L 处形成杨氏条纹。

用电视摄像机或 CCD 阵列扫描杨氏条纹, 并进行逐点采样, 经 A/D 转换后将采样结

果存入存储器或直接送入计算机内存, 形成一个扫描波形的采样点阵。计算机对这些数据进行分析计算, 求出 δ 和 θ 作为 (x, y) 坐标的函数。当一个周期结束后, 散斑图平移到新的采样点 (x_1, y_1) , 再重复以上操作。

全部点阵分析完毕后, 再根据数据向量矩阵

$$\begin{pmatrix} (\delta, \theta)_{11} & (\delta, \theta)_{12} & \cdots & (\delta, \theta)_{1M} \\ (\delta, \theta)_{21} & (\delta, \theta)_{22} & \cdots & (\delta, \theta)_{2M} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ (\delta, \theta)_{N1} & (\delta, \theta)_{N2} & \cdots & (\delta, \theta)_{NM} \end{pmatrix},$$

进行平面形变分析。

各类自动处理系统的区别主要有两方面。一是采样方法和器件不同。目前所用的器件有

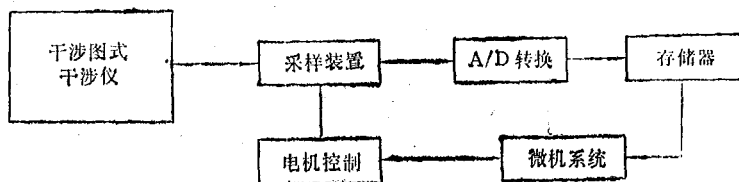


图 2 自动分析系统框图

线性光电管阵列^[1]、CCD 阵列^[2]、单个光电管^[3]和电视摄像机^[4]。图 3 是一个典型的采样装置。散斑图 H 经过透镜 L 和柱面镜 C 构成的变

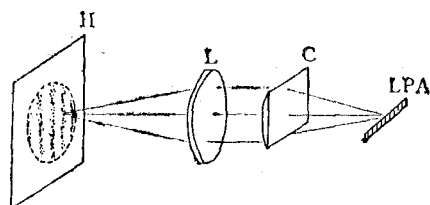


图 3 采样装置

形成象系统后压缩成一条直线, 由线性光电管阵列 (LPA) 接收后转换成分立的采样波形, 送入计算机的 A/D 接口。如果用电视摄像机代替 LPA, 可以省掉柱面镜 C, 直接对散斑图杨氏条纹的象进行二维扫描采样。

第二个主要区别在于数据处理的方法不同, 下一节专门讨论这一问题。

3. 数据处理 杨氏条纹的间距 δ 和方位角 θ 的定量分析是通过计算机的数值计算完成的。目

前采用的数据处理方法有以下几种。

第一种方法是直接根据条纹的强度分布来确定 δ 和 θ ^[3]。这个貌似简单的工作由于衍射晕的存在而复杂化了 [见图 4 (a)]。衍射晕的高斯包络使杨氏条纹的极大值发生偏移, 从而给 δ 的测量带来显著的误差^[5]。如改用测极小值的方法, 测量误差可减小一半。为了进一步减小误差, 这类系统必须记录两个函数, 其一为垂直于条纹的扫描波形 $F_1(n)$ [如图 4 (a)], 其二为对应于条纹旋转 90° 后对衍射晕的扫描波形 $F_2(n)$ [图 4 (b)], 它构成了背景信号。函数 $F_1(n) - F_2(n)$ [图 4 (c)] 和 $F_1(n) \div F_2(n)$ [图 4 (d)] 能够有效地消除上述误差^[1]。但额外的旋转既花费时间, 又增加了实验装置的难度。

第二种方法是利用傅里叶变换确定 δ 和 θ 。在这一方法中, 衍射晕的影响不复存在, 因为杨氏条纹信号为高频分量, 而衍射晕为低频分量, 在频域中它们是分开的, 分别为 ± 1 级谱

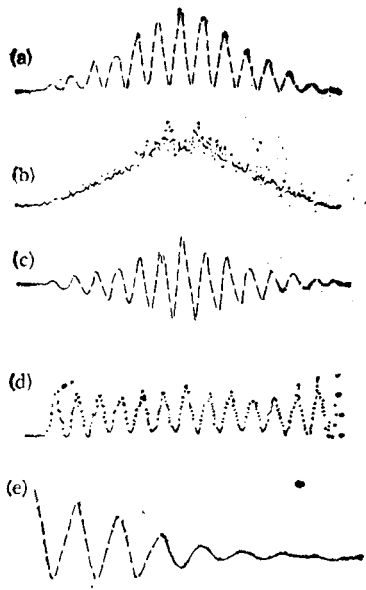


图4 采样数据的数值分析

和零级谱, 因此条纹间隔 δ 可以通过测定两个一级谱的峰值间隔而精确地求出。

4. 离散噪声的消除和曲线平滑

从散斑图中提取信息伴随着一个固有的问题, 就是高散噪声。它使输入波形呈现不规则

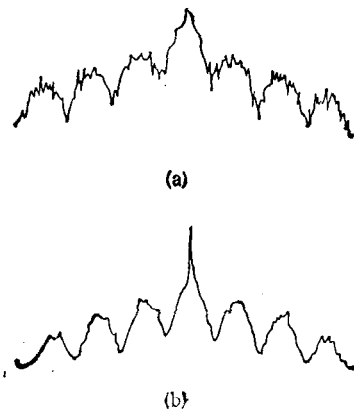


图5 平滑处理前后的输入波形

的锯齿状 [图 5 (a)], 从而给条纹测量带来误差。目前存在几种使条纹平滑的技术。在图 3 所示的采样装置中, 利用柱面镜将杨氏条纹沿它自身的方向压缩成一线象, 并聚焦到 LPA 上, 这一过程相当于沿条纹方向的积分, 它使输入波形平滑化 [图 5 (b)]。此外, 在计算 δ 前,

利用抽样函数的自相关也可以提高信噪比, 自相关的结果见图 4 (e)。设 $f(n) = F_1(n) - F_2(n)$, 则自相关函数为

$$A(k) = \frac{1}{M} \sum_{n=0}^M f(n)f(n+k), \quad (4)$$

式中 $M = N - k$, N 为样点数, $k \leq N^{[4]}$ 。

三、实际应用中的问题

散斑图的自动分析技术在工业上有很大的实用价值, 但也存在一些问题有待解决。

首先, 逐点分析方法应当有足够高的空间分辨率和准确的测量结果。为了提高空间分辨率, 就应当使照射到散斑图上的光斑尺寸 ω 尽可能小。然而, 随着 ω 变小, 在它所定义的范围散斑点的数量也随之减小, 其结果使杨氏条纹的离散噪声更加严重, 使测量 δ 和 θ 的误差变大。这一相互制约的关系决定了散斑测量的极限误差。一个较理想而且实用的分析系统, 给出位移矢量振幅的误差为 1%, 方向误差小于 0.5° 。

其次是测量的范围。当整个衍射晕内可见的条纹数少于三条时, 条纹方向的测量灵敏度显著下降; 当测量条纹数多于 40 条时, 条纹的间隔 δ 变得与散斑的横向尺寸 σ 可比, 离散噪声相当显著, 同时由于 δ 变小, 又引起对每条条纹的采样数下降, 带来了测量误差。因此, 位移矢量的振幅测量范围大约从 $5 \mu\text{m}$ 到 $100 \mu\text{m}$ 。

第三是速度问题。在某些已经报道的半自动分析系统中, 由于使用了机械扫描装置而降低了测量速度。一个典型的系统采样时间为 7 s, 数据存放到磁盘需 6 s, 计算机数据处理还需 30 s^[6]。在一块 $100 \text{ mm} \times 120 \text{ mm}$ 的散斑图上, 若每隔 1 mm 采一个样, 整个阵列共 1.2×10^4 个采样点, 若每个点的处理时间为 10—30 s, 那么全部处理完毕需要 33—100 h! 某些全自动处理系统利用数字图象处理技术^[3,6], 使每一测点的处理时间压缩到 250 ms, 则上述散斑图的处理时间只需 50 min。

(下转第 150 页)