

激光散斑干涉法测量力学参数

赵 晔 英

(上海市激光技术研究所)

梅家福 奚伟杰 姚达同

(交通部上海船舶研究所)

提 要

本文阐述了激光散斑干涉法测量平面位移、转角及振动等力学参数的基本原理、试验技术,并对灵敏度进行了讨论,以实验进行了验证。

Measurement of mechanical parameters with laser speckle interferometry

Zhao Yeying

(Institute of Laser Technology, Shanghai)

Mei Jiafu Xi Weijie Yao Datong

(Shanghai Institute of Ship Research, Ministry of Communications)

Abstract

The basic principles and testing methods are described concerning laser speckle interferometry of such mechanical parameters as plane displacement, rotating angle and vibration, and the problems of sensitivity are discussed. Demonstrations are given.

一、散斑干涉法原理

当一个漫反射表面的物体被相干光照明时,所反射的光相互间会产生干涉,在物体表面前的空间就形成了无数随机分布的明暗相间的干涉点,这些干涉点称为散斑(Speckle)。

由于散斑的运动是随着物体的变化而变化的,因此就形成了散斑干涉计量术。用同一张底片对物体变形前后的两种状态作两次曝光,在底片上就得到了物体在变形前后的

两个散斑图象的迭加。为简单起见,只考虑散斑图上的某一个暗斑点,由于散斑的运动是跟随物体的,所以物体的位移也引起了散斑的位移。因此位移的暗斑与原来的暗斑在底片上形成了两个亮的光孔,当位移量适当时(即两个光孔的距离符合双孔衍射的要求),这两个光孔是相关的。若用一束相干光垂直照射这对小孔时,就会产生双孔衍射,屏幕上呈现出一个衍射晕内一组等间距的杨氏干涉条纹,如图1所示。根据双孔衍射的原

收稿日期: 1979年11月15日。

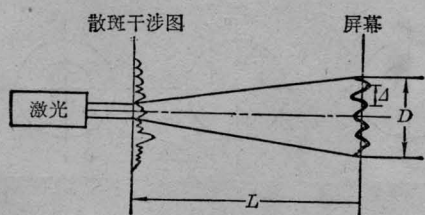


图1 逐点分析法

Δ —条纹间距; D —衍射光晕直径

理, 其干涉条纹的方向与暗斑的移动方向垂直, 条纹间距与暗斑的位移量 d 有如下关系:

$$d = \frac{\lambda L}{\Delta M} \quad (1)$$

式中 λ 为激光波长, L 为底片和屏幕间的距离, M 为象放大系数。

在两次曝光的散斑图底片上, 随机分布了许多这样成对的小孔, 用上述的方法(亦称逐点法)可以测得物体各点的形变大小和方向, 并以不同的 L 值可以调节其灵敏度。

散斑干涉图除了用逐点法分析外, 还可以用傅里叶变换进行全场分析。当 d 为均匀位移场时, 所得干涉条纹垂直于位移矢量 \mathbf{a} , 条纹间距 Δ 与位移量的关系为:

$$\Delta = \frac{L\lambda}{|d|} \quad (2)$$

当 d 为不均匀位移场时, 在变换平面上, d 在不同位置时的大小和方向都在改变。这时, 变换平面上应加滤波孔, 通过滤波孔可以观察到沿滤波孔方向的位移分量场。若滤波孔的位置矢量是 \mathbf{u} , 它与位移场 d 的夹角为 θ , 则当:

$$|d| \cos \theta = \frac{n\lambda L}{|u|} \text{ 时, } n=0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (3)$$

出现亮条纹;

当

$$|d| \cos \theta = \frac{\left(n + \frac{1}{2}\right) \lambda L}{|u|} \text{ 时, } n=0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (4)$$

出现暗条纹。

这些条纹的间距, 由滤波孔位置的改变

而连续变化, 因而在观察时, 改变 \mathbf{u} 的位置可调节测量灵敏度。

二、面内位移的测量

散斑图是由一束发散的 He-Ne 激光束照明一圆盘而形成的。圆盘的直径为 $\phi 60$ 毫米, 前表面涂白粉。散斑图用焦距 450 毫米, 相对孔径 1:9 的透镜进行记录, 象放大系数为 1。第一次曝光以后, 使圆盘绕中心转动 2 毫弧度, 然后进行第二次曝光, 形成散斑干涉图, 这时分别可用逐点和傅里叶全场两种方法进行分析。图 2 (a) 所示为用逐点法分析时圆盘在不同位置上所得到的杨氏干涉条纹图。根据公式(1)可以计算出该点的面内位移量。测量结果与所给位移量是符合的。

图 2 (c) 所示为由傅里叶全场分析得到的一组条纹, 当滤波孔位置不同时, 条纹的方向和灵敏度也随之而改变。由公式 (3)、(4) 可算出所测得的位移量。

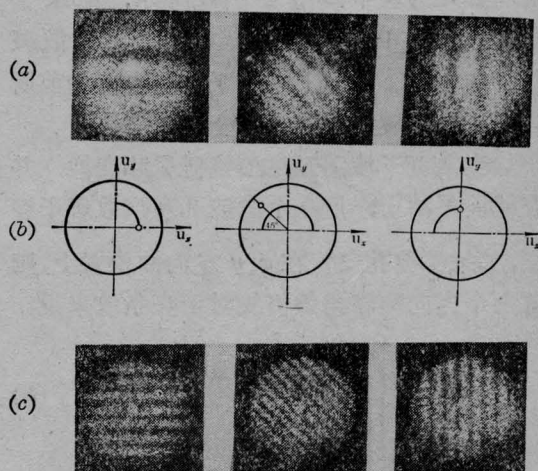


图2 中心转动圆盘散斑图逐点分析图解及傅里叶全场图解

三、离面位移及转角的测量

图 3 表示, 当物体 S 的位置改变到 S' 时, 在散斑空间任一 PP 平面上, 散斑的位移 d 则由转角 ϕ 引起, 其性质类似于镜面的倾斜

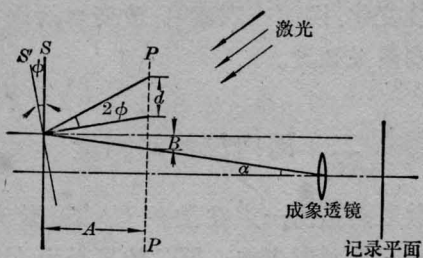


图3 转角测量的记录装置

光线。从图中的几何关系不难看出， d 与 ϕ 有如下关系：

$$d = A[\operatorname{tg}(2\phi + \alpha) - \operatorname{tg}\alpha] \quad (5)$$

式中 α 为观察角。

如果当 ϕ 很小时，则 $\operatorname{tg} 2\phi \ll 1$ ，上式可以简化为：

$$d = 2A\phi(1 + \operatorname{tg}^2\alpha) \quad (6)$$

又因 $\operatorname{tg}\alpha = \frac{B}{A}$ ，一般情况下，当观察角很小时，则 $\frac{B}{A} \ll 1$ ，上式又可近似为：

$$d = 2A\phi \quad (7)$$

如果散斑干涉图如图3所示，记录了 PP 平面上由于物体离面运动而产生的散斑位移的情况。这样，散斑干涉图也能如前所述可以进行逐点或傅里叶全场方法分析。

当散斑干涉图经过透镜傅里叶变换，并在滤波平面上，用一个滤波孔观察散斑干涉图，如果滤波孔安置在 x, y 方向的位置上，则这两个方向的转角等值线对于亮条纹来说：

$$\begin{cases} \frac{\partial\omega}{\partial x} = \phi_x = \frac{n\lambda L}{2Au_x} \\ \frac{\partial\omega}{\partial y} = \phi_y = \frac{n\lambda L}{2Au_y} \end{cases} \quad (8)$$

式中 ω 是物体的偏转量。

我们对中心受集中载荷的方板进行试验，方板尺寸为 50 厘米 \times 50 厘米 \times 1.6 毫米，表面涂以白粉，中心加载，位移量 0.03 毫米，在离焦 20 毫米处进行记录，方板受载荷前、后两次曝光的散斑干涉图由傅里叶透镜进行全场分析，条纹图见图4所示。变换平面 u 上，滤波孔在不同位置时，图4给出了倾斜等

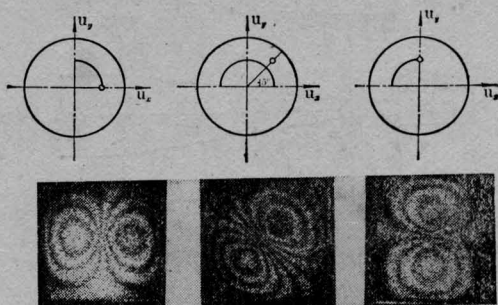
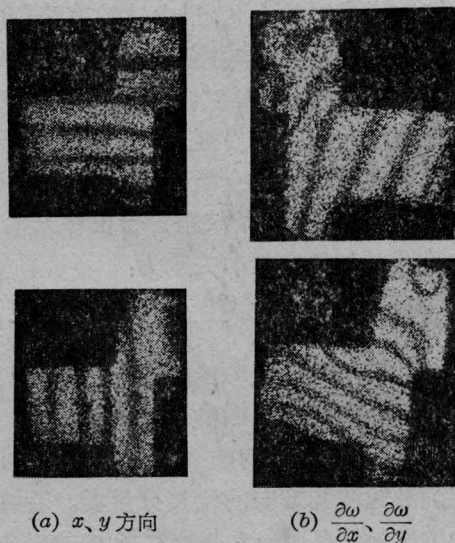


图4 方板中心受载散斑图的全场分析图解

值线的比较图。

图5为柴油机曲轴的变形图。图5(a)显示为沿 x 和 y 方向的面内位移场；图5(b)为用散焦散斑法得到的 $\frac{\partial\omega}{\partial x}$ 和 $\frac{\partial\omega}{\partial y}$ 的等值线图。为曲轴设计提供了依据。



(a) x, y 方向 (b) $\frac{\partial\omega}{\partial x}, \frac{\partial\omega}{\partial y}$

图5 柴油机曲轴形变全场分析图

四、振动测量

振动测量的原理和光路系统与测量转角的相同，只是它不需要两次曝光，采用时间平均法，可以记录振动物体两个极值端面及所有连续过渡表面的散斑运动情况。测量结果与全息干涉法相似，可以得到振动物体的节线及转角分布线。设转角 Φ 随时间作正弦变化：
(下转第 38 页)

总 疗 效

| | 功能改善 | 肌力提高 | 感觉进步 | 大便好转 | 小便好转 | 前五者均进步 |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 不完全性截瘫 | 100% | 100% | 100% | 84.21% | 89.47% | 84.21% |
| 完全性截瘫 | 92.81% | 61.54% | 65.38% | 53.85% | 57.69% | 38.46% |

表 1 氩激光治疗后症状变化情况(45例)

| 临床症状分型 | 功 能 | | | | | | | | | 肌 力 | | 感 觉 | | 大 便 | | 小 便 | | | | |
|-----------------|--------|--------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|----------------------------|----------------------------|------------------|-------------|------------------|-------------|------------------|-------------|--------|-------------|-------------|
| | 卧 | | | 坐 | | 辅 助 站 | | 辅 助 走 | | 接 近 正 常 4 级 | 恢 复 正 常 5 级 | 下 降 节 段 | 无 变 化 | 好 转 人 数 | 无 变 化 | 好 转 人 数 | 无 变 化 | | | |
| | 靠 坐 | 独 坐 | 辅 助 站 | 辅 助 走 | 辅 助 站 | 辅 助 走 | 辅 助 走 | 双 拐 走 | 手 杖 走 | | | | | | | | | 独 走 | 扶 拐 走 | 无 变 化 |
| A:不完全性截瘫 19例 | | 1 | | 3 | 3 | | 2 | 2 | | 3 | 2 | 3 | 30 | 56 | 67 | 0 | 16 | 3 | 17 | 2 |
| B:完全性截瘫 26例 | 3 | 1 | 4 | 1 | 10 | 2 | 1 | | 1 | | | 3 | 4 | 23 | 36 | 9 | 14 | 12 | 15 | 11 |

A: 指功能、肌力、大小便部分丧失; B: 指功能、肌力、感觉、大小便反射完全丧失, 病理包括脊髓神经萎缩、缺血、疤痕、变性、断裂、血肿。

氩激光穴位照射治疗不完全性和完全性外伤性截瘫均有一定的疗效, 并优于其他方法。不完全性截瘫效果优于完全性截瘫, 这显示了激光医学的优越性, 为脊髓损伤病员

提供了有利条件, 为临床医疗提供了新内容, 但距离肢体完全恢复正常功能还非常远。具体机理还须作进一步探讨。

(上接第 34 页)

$$\Phi = \phi(x_1, x_2) \sin \omega t$$

如对底片作长时间的曝光, 在变换平面上时间平均散斑干涉图的强度分布为:

$$I(u_1, u_2) = K J_0^2 \left(2Ak \frac{u \cdot \phi}{L} \right) I_s(u_1, u_2) \quad (9)$$

式中 J_0 为零阶贝塞尔函数。

$$\text{当 } J_0 \left(2Ak \frac{u\phi}{L} \right) = 0 \text{ 时, 获暗条纹; } \quad (10)$$

$$\text{当 } J_0 \left(2Ak \frac{u\phi}{L} \right) = \text{极值时, 获亮条纹。} \quad (11)$$

如设:

$$N = 2Ak \frac{u\phi}{L}$$

在滤波平面上, x, y 方向上滤波孔所得的条纹分别可写成:

$$\begin{cases} \frac{\partial \omega}{\partial x} = \phi_x = \frac{NL}{2Ak u_x} \\ \frac{\partial \omega}{\partial y} = \phi_y = \frac{NL}{2Ak u_y} \end{cases} \quad (12)$$

在 $N=0, 3.84, 7.015, \dots$ 处出现亮条纹。

显然, $N=0$ 时,

$$J_0(0) = 1, \quad \frac{\partial \omega}{\partial x} = \frac{\partial \omega}{\partial y} = 0,$$

表示转角为零的节线, 光强按贝塞尔函数衰减的干涉条纹是等转角分布线。图 6 所示为方板在各种频率时的振动分布图。



图 6 方板在各种频率时的散斑干涉图解