

利用激光偏振特性的电子散斑面内 全场位移测量技术的研究

范 华 宋元鹤 谭玉山

(西安交通大学机械学院激光红外应用研究所 西安 710049)

提要 提出一种能够同时测量面内全场位移的电子散斑测量光路结构,解决了面内全场位移在瞬态和不可重复情况下无法测量的问题。将激光束分成四路照明光,分别安排在水平和垂直平面内,利用激光器的偏振特性安排光路,使水平平面内两束光的偏振方向相同,垂直平面内两束光的偏振方向相同,但这两个平面中的偏振方向又互相垂直。对转动圆盘内位移测量,取得了满意的结果,用一幅散斑图同时得到了表示水平和垂直分量的散斑条纹。

关键词 面内位移,电子散斑,偏振

1 引 言

电子散斑(ESPI)测量技术在微变形测量^[1]、无损检测^[2]、应力应变分析^[3]以及振动测量^[4]等领域已得到广泛的应用。根据光路结构不同可分为对离面位移敏感和对面内位移敏感的电子散斑技术。用电子散斑进行三维变形测量就是分别测出离面和面内三个敏感矢量方向的位移然后把它们合成得到。实际上很大一部分是纯面内位移的测量问题,Lenderz 首先用两束相干光照明被测物体表面,得到表示物体变形的散斑图^[5],这种方法只能得到物体位移在敏感矢量方向的分量,全场面内位移情况是得不到的,可以用两套这样的光路系统互相垂直布置,顺序记录水平和垂直两个方向的变形量,然后把它们合成而得到全场位移情况,这在静态和可重复情况下是可行的,但在瞬态和不可重复的情况下却不适用,因为在这种情况下需要同时测出两个敏感矢量方向的分量,这一问题引起了人们的关注;A. J. Moore 和 J. R. Tyrer^[6]提出用对称的两偏振方向正交的相干光照明被测物体表面,通过偏振立方棱镜将两组偏振状态互相垂直的散斑场分开到两个摄像机,同时对两个摄像机的图像进行处理得到两组分别表示水平和垂直分量的条纹图,这种方法能有效地进行全场同时测量,但是成本高,光路复杂,尤其是两个摄像机对物体成像位置要严格一致,这给光路调整带来很大困难。本文提出一种能同时测量面内全场位移的测量系统,该系统用分光镜将激光器发出的相干光分成强度相等的四束,把这四束光分成两组,每组中的两束光偏振状态相同,组与组之间偏振状态互相垂直,用一套摄像机及图像处理系统对物体表面散斑场同时记录和处理,获得物体表面两个位移的条纹图,从而得到面内位移的两个分量。

2 全场面内位移测量原理

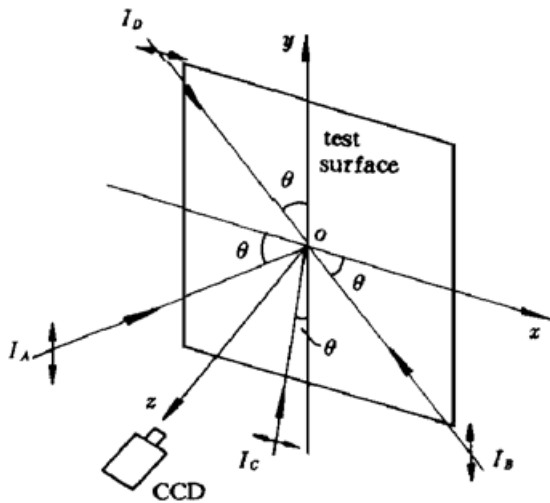


图 1 全场面内位移测量电子散斑
Fig.1 Schematic diagram of whole in-plane displacement ESPI

图 1 为全场面内位移测量电子散斑光路结构原理示意图,位于 xoz 平面内的相干光 I_A 和 I_B 具有相同的偏振状态,以与 x 轴夹角 θ 入射到被测表面,相干光 I_C 和 I_D 具有相同的偏振状态,光路布置成与 I_A 和 I_B 垂直,对保偏物体表面, I_A 和 I_B , I_C 和 I_D 所产生的散斑场分别各自相干,因此当考虑 I_A 和 I_B 产生的散斑场的干涉时,可以把 I_C 和 I_D 所产生的散斑场看作背景光,反之当考虑 I_C 和 I_D 所产生的散斑场时,可以把 I_A 和 I_B 产生的散斑场看作是背景光。散斑场经透镜成像到 CCD 摄像机的靶面转换成视频信号,被图像板量化成数字图像信号并存储于帧存中,由计算机进行图像处理。

考虑 I_A 和 I_B 产生的散斑场的干涉,变形前任意一点 (x, y) 处的光强为

$$I_{bf}(x, y) = I_A + I_B + 2 \sqrt{I_A I_B} \cos(\varphi) \quad (1)$$

I_A 和 I_B 为两束光的强度, φ 为一个随机相位。

当物体发生变形并沿 x 方向有一个分量 u , 则将产生一个位相变化

$$\phi(x, y) = \frac{4\pi \cos \theta}{\lambda} u \quad (2)$$

λ 为激光器的波长。

变形后 (x, y) 处的光强为

$$I_{af}(x, y) = I_A + I_B + 2 \sqrt{I_A I_B} \cos(\varphi + \phi) \quad (3)$$

变形前的散斑图存储在图像板帧存中,与变形后的物体散斑图相减将产生散斑条纹图,该条纹图表示物体的变形情况,减模式的条纹图表示为

$$I(x, y) = |I_{bf} - I_{af}| = 4 \sqrt{I_A I_B} \left| \sin \frac{1}{2}(2\varphi + \phi) \right| \left| \sin \frac{1}{2}(\phi) \right| \quad (4)$$

ϕ 为物体变形引起的位相变化,实际情况, ϕ 变化相对 φ 来说是非常缓慢的,由(4)式可看出一个高频项和一个低频项互相调制,高频项表示散斑点,低频项表示散斑条纹。

当

$$\sin \frac{\phi(x, y)}{2} = 0 \quad (5)$$

时,将出现黑条纹 $\phi(x, y) = 2k\pi \quad k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$

当

$$\sin \frac{\phi(x, y)}{2} = 1 \quad (6)$$

时,将出现亮条纹 $\phi(x, y) = (2k + 1)\pi \quad k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$

同样位于 yoz 平面内的 I_C 和 I_D 可测量出沿 y 轴的位移分量 v

$$\phi(x, y) = \frac{4\pi \cos \theta}{\lambda} v \quad (7)$$

3 实验系统

实验系统如图 2 所示, 采用输出功率为 10 mW, 波长为 635 nm 的半导体激光器作光源, 其发出的光为线偏振光, 被分束镜 S_1 (透反比为 80·20), S_2 (透反比为 70·30), S_3 (透反比为 50·50) 和全反射镜 F 分成光强相等的四束光 L_1, L_2, L_3 和 L_4 , L_1, L_2 位于水平平面内, L_3, L_4 位于垂直平面内, L_1, L_2 组成的光路对面内位移的垂直分量敏感, L_3, L_4 组成的光路对面内位移的水平分量敏感, W 为 $\lambda/4$ 波片, 使 L_3, L_4 的偏振方向旋转 90° , 使 L_1, L_2 与 L_3, L_4 的偏振方向互相垂直, R_1, R_2, R_3 和 R_4 是四个曲率半径为 6 mm 的球面反射镜, 用于将光束扩大照明被测物体。四束照明光 L_1, L_2, L_3 和 L_4 的入射角均为 45° , 因此对该光路结构每级条纹对应的位移量均为 $0.45 \mu\text{m}$ 。对保偏物体表面, 两组照明光 L_1, L_2 和 L_3, L_4 所产生的散斑场分别各自相干, 当我们考虑 L_1 和 L_2 产生的散斑场的干涉时, 可以把 L_3 和 L_4 所产生的散斑场看作背景光, 反之当考虑 L_3 和 L_4 所产生的散斑场时, 可以把 L_1 和 L_2 产生的散斑场看作是背景光。散斑场经成像透镜成像到 CCD 摄像机的靶面转换成视频信号, 被图像板量化成数字图像信号并存储于帧存中, 由计算机进行图像处理, 从而同时测量出物体全场面内位移。

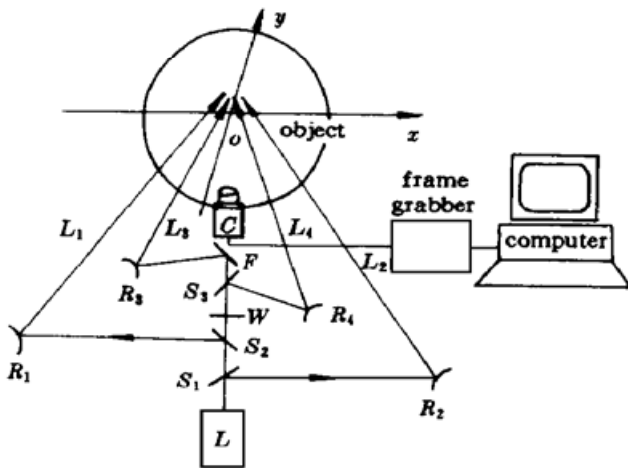


图 2 实验系统结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the experimental system

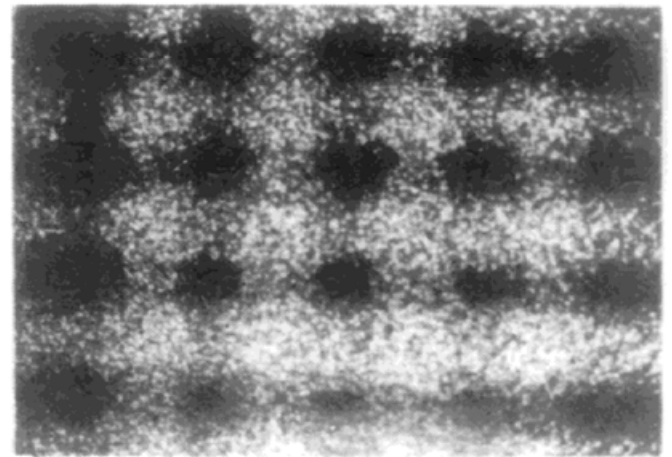


图 3 实验结果

Fig. 3 Experimental result

4 实验结果

为验证本文所提出的方法, 进行了如下实验。被测物体是直径为 100 mm 的铝圆盘, 其表面涂回向反射玻璃微珠使其表面具有保偏特性, 当铝圆盘绕中心轴转动时将同时产生水平和垂直两个分量的面内位移, 用上述测量系统对这两个面内位移同时进行测量, 图 3 为测量结果。由图可见同时有垂直和水平两组散斑条纹, 它们相互独立, 互不相干, 垂直散斑条纹图由公式(4)表示, 表示面内位移沿水平方向的位移分量 u ; 水平散斑条纹图表示面内位移沿垂直方向的位移分量 v 。由公式(2)和(7)可知, 一级条纹即 2π 相位对应的位移为 $\frac{\lambda}{2\cos\theta}$, 由于四束照明光 L_1, L_2, L_3 和 L_4 的入射角均为 45° , 因此每级条纹对应的位移量为 $0.45 \mu\text{m}$ 。可用计数沿垂直和水平方向的减模式散斑条纹的方法定量计算出沿水平和垂直方向的位移分量 u 和 v , 由于计数条纹, 测量精度为 $0.45 \mu\text{m}$ 。

相移技术^[7]可自动定量计算位移量, 且测量精度可大大提高, 达到 $\lambda/30$ 甚至更高, 下一步

的研究工作就是采用相移技术将水平和垂直两个方向上的位移分量分离,自动定量测量出沿水平和垂直两个方向的位移分量 u 和 v ,同时使测量精度也大大提高。

参 考 文 献

- 1 Jun-ichi Kato, Ichirou Yamaguchi, Qi Ping. Automatic deformation analysis by a TV speckle interferometer using a laser diode. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(1):77~ 83
- 2 Eiof Vikhagen. Nondestructive testing by use of TV holography and deformation phase gradient calculation. *Appl. Opt.*, 1990, **29**(1):137~ 144
- 3 A. J. Moore, J. R. Tyrer. Two-dimension strain measurement with ESPI. *Opt. Lasers Eng.*, 1995, **23**(5):381~ 402
- 4 F. M. Santoyo, M. C. Shellabear, J. R. Tyrer. Whole field in-plane vibration analysis using pulsed phase-stepped ESPI. *Appl. Opt.*, 1991, **30**(7):717~ 721
- 5 J. A. Leendertz. Interferometric displacement measurement on scattering surfaces utilizing speckle effect. *J. Phys. E*, 1970, **3**(3):214~ 218
- 6 A. J. Moore, J. R. Tyrer. An electronic speckle pattern interferometer for complete in-plane displacement measurement. *Meas. Sci. Technol.*, 1990, **1**(10):1024~ 1030
- 7 K. Creath. Phase-shifting speckle interferometry. *Appl. Opt.*, 1985, **24**(18):3053~ 3058

Study on ESPI Technique for Simultaneous Measurement of Whole in-Plane Displacement with the Polarization of Laser

Fan Hua Song Yuanhe Tan Yushan

(*Institute of Laser & Infrared Applications, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049*)

Abstract A novel ESPI optical set-up is presented for the measurement of the whole field in-plane displacement. The problem of the whole in-plane displacement measurement in the transient or non-repeatable situation can be solved with this technique. The laser beam is splitted into four beams that are arranged in the horizontal and vertical planes, respectively. The optical set-up is arranged according to the laser's polarization. The polarization directions of the lights in the horizontal plane are the same and so do the lights in the vertical plane. However, the polarization directions in the two planes are orthogonal. The whole field in-plane displacement of a rotating plate is measured with this technique and a satisfactory result has been obtained. The speckle fringes corresponding to horizontal and vertical components are obtained with the same speckle pattern.

Key words in-plane displacement, electronic speckle pattern interferometry (ESPI), polarization