

·测试、试验与仿真·

数字剪切散斑干涉技术的应用

景 敏

(陕西理工学院 机械工程学院, 陕西 汉中 723003)

摘要:介绍了剪切散斑的测量原理及成像方式,详细讨论了剪切成像的常见方式并总结了各种方式的优缺点及适用场合,探讨分析了几种常用加载方式的特点。由于数字剪切散斑干涉技术具有高精度、非接触、可直接测量应变并且抗干扰能力强等优点,已经广泛应用于应变分析、无损检测和振动检测等领域。重点分析了它在无损检测方面的应用以及特点及优点。

关键词:光学测量;数字剪切散斑干涉;无损检测

中图分类号:O348.12

文献标识码:A

文章编号:1673-1255(2012)04-0071-04

Application on Digital Shearing Speckle Pattern Interference Technology

JING Min

(College of Mechanical engineering, Shanxi College of Science and Technology, Hanzhong 723003, China)

Abstract : The measurement principles and imaging methods of shearing speckles are introduced in detail. The common shearing imaging modes are discussed in detail and the characteristics of several basic loading methods are discussed and analyzed. The technology has been used in the areas of strain analysis, non-destructive testing and vibration testing etc. widely for the merits of high precision, non-contact, directly measuring strain and insensitivity against ambient noise. The application in the area of non-destructive testing and relative characteristics and advantages of DSSPI are emphasized.

Keywords: optical measurement, DSSPI, non-destructive testing

激光散斑是激光照射在粗糙表面上而形成的,因此,散斑图样的分布必然依赖于被照表面的细微结构,从而可以利用它来测量表面粗糙度。散斑是由大量细微的高反差亮斑构成,根据“测不准关系”,它的频谱必然很宽,因此可利用它对图像信息编码,进行图像的加减和信息存储。

物体的位移或变形将引起散斑场的变化,因此通过测量散斑场的变化就可以获取物体的形变信息,这就是散斑计量技术的研究内容。现代光测力学对高灵敏度的变形、位移测量常用全息、散斑等测量方法,但这些方法都具有一定的局限性,比如要求生产现场防震、避光、对图像要进行后期处理等,这些局限性降低了这些方法在工业现场的使用价值。

在20世纪60年代由Hung和Liang^[1]提出的散斑剪切干涉技术则不要求特别的防震措施,而且装置简单,这就为工业现场进行测量提供了基础。如果将散斑剪切干涉技术与电子散斑技术相结合,就可获得一种不需特殊防震、不需避光、不需全息干板的实时干涉技术。这项技术的特点是,干涉条纹的获取完全不同于传统光测力学方法,而且由于摄像视频技术和计算机技术的引入,使得干涉条纹的获取过程变得简单、快速。

1 数字剪切散斑原理

数字剪切散斑(DSSPI---digital shearing speckle

收稿日期:2012-06-07

基金项目:陕西理工学院科研基金资助项目(SLGKY11-04)

作者简介:景敏(1978-)女,陕西汉中人,硕士,讲师,主要研究方向为几何量精密测量、图像检测。

pattern interferometry)是散斑技术中一种先进的测量技术,它可以直接测量物体离面位移的一阶微分。数字剪切散斑干涉技术(DSSPI)把剪切散斑干涉技术与数字散斑相结合而形成数字光电测量技术,它所测量的主要是物体表面变形的位移导数值。正因为如此,数字剪切散斑干涉就是在数字摄像机前放置一个小角度的玻璃楔块,激光的光线在通过此玻璃楔块时将产生偏折,在像平面上产生与楔块的楔角相同方向的两个错位的像,它们将在像平面上互相干涉而形成散斑干涉图像,然后将其采集到计算机中。将变形前后两幅散斑干涉图像在计算机中进行相应的运算和处理,在计算机屏幕上将出现一个表示物体位移偏导数的条纹图^[2,3]。

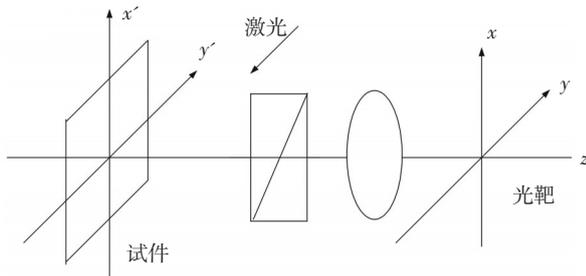


图1 数字剪切散斑原理图

图1中试件表面被均匀平行激光束照明,摄像机的光靶则置于系统的像平面 xy 上,观察方向平行于 z 轴表示。剪切镜置于镜头之前。设物体表面反射光经剪切镜产生在 x 方向的切变量 δ_x ,使物体表面上两点 $P_0(x, y)$ 和 $P_1(x + \delta, y)$ 在像平面上成像于一点。在物体变形前该点光强 I_x 为

$$I_x = 2A^2 \{1 + \cos[\theta(x - \delta_x, y) - \theta(x, y)]\} \quad (1)$$

式中, A 为振幅, 假设两点振幅相等, $\theta(x + \delta_x, y)$ 和 $\theta(x, y)$ 分别为 P_1 和 P_0 点的初相位, 并令 $\varphi_x = \theta(x + \delta_x, y) - \theta(x, y)$ 。将此散斑场经图像卡采集下来存储在微机中。物体发生变形时, $P_0(x, y)$ 和 $P_1(x + \delta, y)$ 沿 x 方向产生的位相差为 Δx , 此时光强为

$$I_x = 2A^2 [1 + \cos(j_x + \Delta x)] \quad (2)$$

将实时变化的散斑场与先前存储在微机中的散斑场相减, 得到实时输出光强为

$$I = 4A^2 \sin(\varphi_x + \Delta x/2) \sin(\Delta x/2) \quad (3)$$

等式右端由两个正弦项组成: 第一个正弦项包

含了随机散斑信息, 反映了剪切散斑干涉图受散斑噪声调制的特点, 第二个正弦项表示与物体变形有关的项, 运用图像处理手段, 在像平面上 $\sin(\frac{\Delta x}{2}) = 0$ 的地方就会出现暗条纹, 因此散斑干涉条纹图中的暗条纹为

$$\Delta x = N\pi \quad N = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots \quad (4)$$

条纹图中的明条纹为

$$\Delta x = (2N + 1)\pi/2 \quad N = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots \quad (5)$$

在只考虑挠度的情况下 Δx 可写成

$$\Delta x = \frac{2\pi}{\lambda} \delta_x (\cos \beta_1 + \cos \beta_2) \frac{\partial w}{\partial x} \quad (6)$$

式中, $\frac{\partial w}{\partial x}$ 为物体表面离面位移导数; λ 为照明光波长; β_1 为入射光与物体表面法向夹角; β_2 为观察方向与物体表面法向夹角。将 $\Delta x/2 = N\pi$, ($N = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$) 代入式(6)得

$$\frac{\partial w}{\partial x} = \frac{\lambda N}{[(\cos \beta_1 + \cos \beta_2) \delta_x]} \quad (7)$$

同理得

$$\frac{\partial w}{\partial y} = \frac{\lambda N}{[(\cos \beta_1 + \cos \beta_2) \delta_y]} \quad (8)$$

从而得到被测物体表面沿 z 方向位移偏导数的表达式。

2 剪切成像方式^[4]

剪切成像方式主要有三种:

(1) 偏振剪切成像

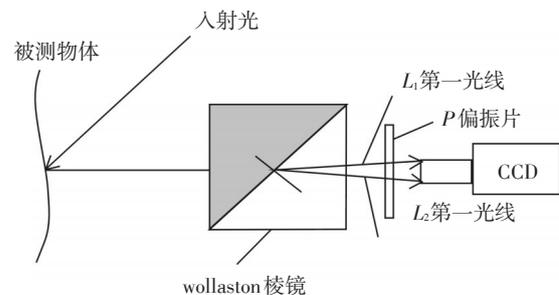


图2 偏振剪切的成像结构

这种剪切成像方式的基本光路结构如图2所示。物体错位采用渥拉斯顿剪切棱镜(Wallaston prism)形成。当光线垂直射到棱镜的前表面时, 在后表面将形成两束分开且振动方向相互垂直的平面偏振光。偏振片 P 使两个剪切像相干涉。出射光的近似夹角为

$$\varphi = 2 \sin^{-1}[(n_o - n_e) \tan \beta] \quad (9)$$

其中, n_o, n_e 分别为棱镜材料的寻常光和非寻常光折射率; β 为棱镜的顶角, 则剪切量近似为夹角与物(像)距的乘积。

(2) 楔镜剪切方式

楔镜剪切方式也有多种, 其中以 Y.Y.Hung 提出的楔镜剪切方式最为简单实用。原理如图 3。

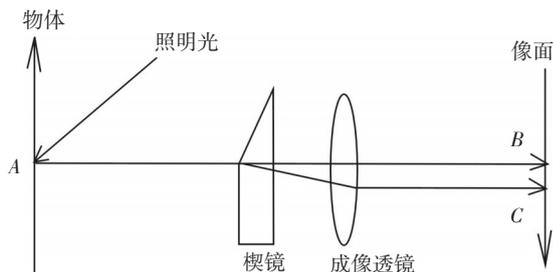


图3 楔镜剪切成像

用一块圆形透明玻璃板盖住整个光瞳, 该玻璃板以直径为分界, 一半是平行平板, 另一半是光楔。这种一半是平透镜, 一半是楔透镜的光学元件被称为剪切镜。从物面上A点发出的光分别经过平透镜和楔透镜, 在像面上形成两个像点B和C, 从而产生两个剪切像。剪切方向与剪切镜的楔-板分界线相垂直, B、C间的距离为像面上的剪切量。光楔的楔角很小, 通常在 1° 以内, 光线通过光楔时的偏向角为

$$a = (n - 1)\beta \quad (10)$$

其中, b 为楔角; n 为剪切镜所用材料的折射率。

若剪切镜贴近镜头, 物方剪切量可近似为

$$S_0 \approx d_0 \cdot a = d_0(n - 1)\beta \quad (11)$$

其中, d_0 为剪切镜到物体的距离。

(3) Michelson型剪切成像

图4是 Michelson型剪切成像光路结构。物体的反射光通过半透半反棱镜分成两束, 经过两平面反射镜 M_1, M_2 反射后, 再次经过半透半反棱镜, 在 CCD 像面上形成两个重叠的物体像, 由于两个平面反射中一个与光轴垂直, 另一个与光轴有一微小夹角 α , 所以物体的两个像有一定的错位, 即实现剪切成像。CCD 靶面上的散斑干涉场是物光场两个剪切像之间干涉叠加的结果, 这两个干涉场之间的关系为

$$\bar{A}(\bar{r}) = k\bar{A}(\bar{r} - \bar{s}_0) \quad (12)$$

其中, \bar{A} 为光复振幅; k 为两光束振幅比; \bar{s}_0 为剪切量。

在图4所示的光路中, 物方剪切量近似为

$$\bar{s}_0 \approx d_0 \cdot 2\alpha \quad (13)$$

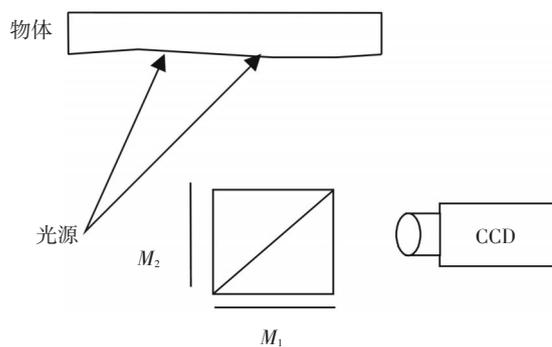


图4 Michelson剪切成像

其中, d_0 为物距。

综合比较这三种典型的剪切成像方式, 可以发现, 对于偏振剪切成像及楔镜剪切成像存在应用相移和正弦相位调制技术的困难。在调整剪切量是否方便方面, 偏振剪切成像需要移动棱镜的前后位置, 改变剪切量。楔镜剪切成像方式, 当楔镜一旦做好后, 其剪切量是固定的, 不能调节。若需要不同的剪切量, 则需要制作不同楔角的剪切镜。这样限制了其使用的灵活性, 并且当物镜的焦距较小时, 楔镜成像还会发生大的像差, 在视场中心, 物镜两部分的像差是相等的, 但在视场的边缘, 物镜中经过光楔与不经过光楔的光束的像差很大。

反观 Michelson型剪切成像方式, 结构非常简单, 一个平面镜不动, 通过调整另一个平面镜来改变两个反射镜之间的夹角及方向, 就可以实现剪切量和剪切方向的调整。调整剪切量很容易, 易于实现变精度测量。将两反射镜均固定在压电陶瓷晶体上, 分别作为光学相移器和正弦相位调制器, 就可以方便地实现光学相移和正弦相位调制, 满足振动定量分析的要求。但 Michelson 剪切光路中的半透半反棱镜, 浪费了 50% 的激光能量, 从而提高了对激光器功率的要求。

这三个成像方式各有自己的优点, 因此应该根据测量的要求来选择适当的成像方式来组成测量系统。

3 散斑技术在无损检测中的应用

数字剪切散斑是一种先进的测量技术, 它可以直接测量物体离面位移的一阶微分。在物体检测中, 人们往往关心的并不是物体表面的变形, 而是物体表面的应变应力, 而应变应力直接和物体变形的二阶微分有关。因此要获得物体表面的应变应力分布, 就需要对普通数字散斑测得的表面变形数据进

行两次数值微分。对实验数据的数值微分会导致较大的误差,因此应尽可能少用或不用。而数字剪切散斑可以直接测量位移的一阶导数,减少了一次数值微分计算误差,从而可以提高应变应力分析的精度^[5]。

材料的损伤程度可以通过检测材料的某些物理性能的改变表示出来如:弹性模量法、弹性应变法等。通过对这些物理方法的数学表达式的研究可以发现,它们都跟一个相同的因素有关,就是材料的弹性模量。而材料加载形变的程度又跟材料的弹性模量有关系。当材料内部没有发生损伤时,材料的弹性模量可以看作是一个连续变化的参数,因此材料加载后发生的形变的梯度也可以看作是连续的。这个可以在剪切散斑图上表现出来——散斑的条纹是圆滑的。

当材料的内部存在缺陷时,则弹性模量在缺陷处发生了变化,使弹性模量在缺陷处表现为不连续。因此当材料加载发生形变时,缺陷处的形变梯度也会发生比较大的变化,在剪切散斑图上则表现为条纹的突变。

由剪切散斑的原理可以知道条纹的级数跟被测物体的形变的梯度存在着对应的关系,因此可以通过对条纹相位的计算而对被测物的形变梯度,也就是对被测物的弹性模量进行计算,通过对弹性模量的分析而得出物体的损伤程度^[6-8]。

要使被测物发生形变则必须对被测物进行加载,常用的有三种加载方式。

(1) 真空加载

为了要使缺陷处产生变形,需要对测试件加载,最常用的加载是真空加载,即把试件放入一有玻璃观察窗的真空容器中,在抽真空前后两次记录物体的变形剪切散斑图。

(2) 热加载

热加载用于缺陷的无损检测从原理上可以考虑两个因素:(1)由于温度差别引起膨胀位移不同;(2)加热缺陷中气体而产生不同的压强形成位移。前者对于传热较差,缺陷面积较大时可以成立。而对于易传热,薄板中的缺陷则由后者引起。

(3) 振动加载

电子剪切散斑干涉除了可以测量位移梯度外,还可以通过时间平均技术测量振幅梯度,因此也是一种测量和显示振动的有效方法。

对振动物体的分析可以得出其固有频率与试件

尺寸、厚度及材料性能有关。试件尺寸越大,频率越低;厚度减小,频率也减小。

从几种加载方式总结出真空加载比较成熟,易于定量;热加载方法装置简单,载荷变化范围可大可小;振动加载是一种较易在现场测试的方法。

在进行无损检测时,由于剪切散斑测量的是位移的一阶微分,刚体位移并不改变物体变形的一阶微分,因此剪切散斑对物体的刚性位移不敏感。并且由于应变常集中于物体缺陷处,所以剪切散斑对物体缺陷的分辨能力优于普通的数字散斑。剪切散斑光路中,两个干涉场基本上是共光路的,实际应用中和离面位移测量光路相比,具有较好的抗干扰能力,对热变形、空气扰动和环境振动的敏感性远小于离面位移测量光路,不需要特殊的隔振措施,就可以得到较好的效果,可以在工业现场,流水线上应用。由于剪切散斑中两个干涉光场的光程始终是一样的,因此剪切散斑对激光器的相干性要求低,测量时对物体位置没有严格要求,并且剪切散斑具有光路结构简单,调整容易的优点,所以广泛应用在工业无损检测技术中,比如对轮胎、容器、蜂窝粘接结构航空复合材料等的缺陷检测。因为剪切散斑技术对被测物体表面位移梯度比较敏感,通过采用真空加载,振动加载,热加载等适当的方式使被检测物体表面产生微小变形,根据干涉条纹有无异常变化判断被检测物体内是否有缺陷。当材料在单调加载或重复加载条件下,在材料内部产生微缺陷(缺陷是多种多样的,如微空洞,微裂纹等),而导致其内部粘聚力逐渐减弱,并导致材料破坏的现象。

参考文献

- [1] Y Y Hung, C E Taylor. Speckle shearing interferometric camera: a tool for measurement of derivatives of surface displacement[J]. Proc. SPIE, 1973, 41: 169-175.
- [2] 郑光昭.电子散斑干涉术[J]. 广东工业大学学报, 2002, 19(3):11-13.
- [3] 孙锡环,陈川宁.电子剪切散斑测试系统在热变形测量中的应用[J]. 北京理工大学学报, 1995, 15(4):381-386.
- [4] 贾书海.数字散斑振动定量分析新技术研究与应用[D]. 西安:西安交通大学, 2000.
- [5] 范华,赵明涛,谭玉山.电子散斑测量仪及其在无损检测中的应用[J]. 半导体光电, 1998, 19(1):31-34.
- [6] 陆福一,张朝晖.剪切散斑干涉术的无损检测研究[J]. 光子学报, 1993, 22(1):70-76.

(下转第82页)

参考文献

- [1] 袁任光,林由娟.柴油发电机组选用与安装维护[M].北京:机械工业出版社,2009.
- [2] 魏存海.系统配装小功率低噪声电站的结构分析[J].移动电源与车辆,2011(1):8-10.
- [3] 邱成梯,赵惇旻,蒋全兴.电子设备结构设计原理[M].南京:东南大学出版社,2001.
- [4] 容江峰,魏存海,汪雅红.低噪声风冷小功率电站风道设计[J].移动电源与车辆,2007(1):15-16.
- [5] 张芳,达棣.低噪声双机组电站风道设计[J].移动电源与车辆,2010(2):6-8.
- [6] 王中华,孙亚平,贾一兵.厢式风冷型电站的散热结构设计[J].移动电源与车辆,2009(3):12-15.
- [7] 韩恺,赵长禄,张付军.装甲车辆冷却风道的一维CFD仿真[J].车辆与动力技术,2010(1):46-50.

(上接第74页)

- [7] Y Y Hung, W D Luo, et al. NDT of joined surfaces using digital time-integrated shearography with multiple-frequency sweep[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2000,33:369-382.
- [8] 陈华平.散斑干涉技术及其图像处理系统的研究[D].广州:广东工业大学,2004.
- [9] 郑文.相移数字散斑干涉计量及其在热变形测量中的应用[J].光子学报,1993,22(2):172-177.
- [10] 金观昌.电子散斑错位散斑干涉术用于无损检测的探讨[J].实验力学,1992,7(2):181-187.
- [11] 吴震.光干涉测量技术[M].北京:中国计量出版社,1995.
- [12] 何玉明.线性相关算法形成数字剪切散斑相关条纹图[J].光子学报,1995,25(1):12-17.
- [13] 陈家璧,周维祯.剪切散斑干涉术的统计分析[J].光学学报,1989,9(4):333-340.
- [14] 朱中儒,张国平.数字散斑剪切干涉光学测距[J].华中师范大学学报(自然科学版),2001,8(3):177-179.
- [15] 刘龙.混凝土结构无损检测中的激光散斑干涉计量术[D].南京:东南大学,2003.
- [16] 于光,王树国.数字散斑干涉技术及应用[J].激光技术,2002,26(3):237-240.
- [17] B H Liu, Y W Qin, et al. Non-Destructive test of multiply plywood using ESSPI with wide audio-frequency driving vibration[C]// Optical Technology and Processing For Fluids and Solids Diagnostics, (Proceeding of SPIE-The International Society for Optical Engineering), Beijing, CHINA, 2002,5058:307-311.

(上接第78页)

- [6] 周治洲.石英-钨封接玻璃制备工艺研究[J].中国建材科技,1998(6).
- [7] 莫纯昌,陈国平.电真空工艺[M].北京:国防工业出版社,1980.
- [8] 邵力为.耐超高气压钨杆与石英的封接技术[J].中国照明电器,1997(5):13-14.
- [9] 向在奎,王玉芬,隋梅,等.石英-钨过渡封接玻璃的改进及封接工艺研究[J].灯与照明,2006,3(1):54-56.
- [10] 赵书华,宋春玲.金属与玻璃封接工艺的研究[J].吉林师范大学学报,2005,2(1):85-87.
- [11] 张永爱,刘浩,袁坚,等.玻璃焊料与金属封接技术[J].玻璃与搪瓷,2004,12(6):35-37.
- [12] 严增翟.石英玻璃与金属封接技术进展[J].光源与照明,2005,12(4):14-18.
- [13] 杨宇锋,唐元春.特种光源用封接钨窄带的研究[J].中国照明电器,2006(11):4-6.
- [14] 李朝木,王奇,朱宝元,等.石英玻璃与金属封接工艺的研究[J].真空与低温,1993,3(1):4-7.