

# 激光散斑干涉条纹的 CCD 分析技术研究\*

俞晓磊, 赵志敏, 郭林峰

(南京航空航天大学 江苏 南京 210016)

**摘要** 本文提出了一种基于 CCD 技术测量激光散斑干涉条纹的有效方法。采用激光双曝光散斑干涉法记录复合材料试件形变的信息,利用 CCD 及自编的图像处理软硬件来测量干涉条纹间距,从而得出复合材料的微小形变量。与传统的测量方法相比,精度有了很大的提高。实验结果表明,本文提出的对于复合材料形变的测量方法是快速而有效的。

**关键词** CCD; 激光散斑双曝光; 复合材料; 微小形变

**中图分类号**: TN247 **文献标识码**: A

## Research on the Laser Speckle Interferometrial Fringes Based on CCD Analysis Technique

Yu Xiaolei, Zhao Zhimin, Guo Linfeng

(Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 210016, China)

**Abstract** This paper presents a new method to measure the deformation of composite material based on CCD technique. Firstly, double-exposure speckle interferometrial technique was used to record the micro-deformation information of composite material. Secondly, the fringe pictures were collected into computer by CCD. Thirdly, real space between fringes could be acquired. As a consequence, we could get the micro-deformation of the composite material. Compared with the traditional methods that space between fringes was measured artificially, the precision of the new method is developed greatly. The results of the experiment indicated that the new method of measuring the deformation of composite material was speedy and efficient.

**Key words** CCD; laser double-exposure speckle interferometry; composite material; micro-deformation

## 1 引言

激光散斑干涉测试技术是以光波干涉原理为基础进行测试的一门技术,与一般的测试技术相比,激光散斑干涉测试技术具有更高的测试灵敏度和精度,且属于非接触测试,不会对被测件带来表面损伤,由于散斑干涉测试技术的诸多优点,已广泛用于许多领域<sup>[1-5]</sup>。

在激光散斑干涉测试中经常要对条纹图像进行分析研究,传统的测量方法是通过人眼对明暗相间的条纹间距进行测量,人眼对条纹的间隔分辨能力较差,从而影响了测量精度,限制了散斑干涉测试技术的发展。因此,如何高效、准确地处理散斑条纹图已成为该领域研究的一大难题。随着 CCD 采集技术与计算机技术的迅速发展,为条纹图像的实时显示创造了条件,同时使条纹处理具有更高的精度和更快的速度。

电荷耦合器件 CCD 由于其高测量精度和高数据率而被广泛应用于工业测量、精密仪器等各个领域<sup>[6-10]</sup>。本文提出的激光散斑干涉条纹的 CCD 分析技术,采用激光双曝光散斑干涉测试光学系统制作复合材料试件变形的干涉条纹图,利用 CCD 及自编的图像处理软件来测量干涉条纹间距,从而得出复合材料试件的微小形变。系统中利用 CCD 摄像头、视频图像采集卡,以及计算机编程来对光学干涉条纹图进行采集与处理,实现光学图像数字化,以便更可靠迅速地分析光学干涉条纹图的数据,其关键在于通过自行编制的干涉条纹图处理软件,得出相应的干涉条纹强度分布图从而得出条纹间距,进一步计算出复合材料的位移量。本文提出的这种方法,大大提高了条纹间距的测量精度,能更精确地评定复合材料试件的变形程度。

\* 基金项目:国家自然科学基金(项目编号:10172043)、教育部博士点基金(项目编号:20040287012)和航空科学基金(05G52047)资助项目。

收稿日期:2007-08-09

2 测量原理

2.1 激光双曝光散斑干涉法

散斑图记录采用激光双曝光散斑干涉法<sup>[1]</sup>。  
双曝光散斑干涉法典型记录光路如图 1 所示，用激光照射复合材料试件，在像面(记录干版)上就形成了无规则的散斑图样，对其曝光一次后，将物体垂直光轴位移一微量  $d$ ，再等时曝光一次，这样，由于物体发生的位移很小，且只是整体位移，记录干版上就记录了两个完全相同的像面散斑图，只不过两幅散斑图之间有一相对位移。形成的是无数多个随机分布的散斑对，每一个散斑对可看成是一对双孔，双孔距与被测物体的微小位移相对应，所以二次(双)曝光散斑干涉图存储了物体位移的信息。将双曝光散斑图放入逐点分析光路(如图 2 所示)，用细

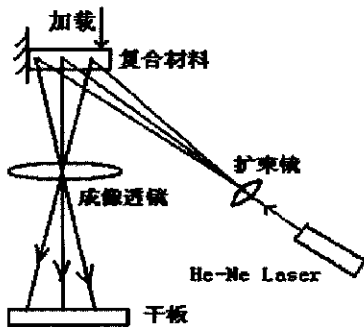


图 1 散斑记录光路图  
Fig. 1 The optical path of speckle record

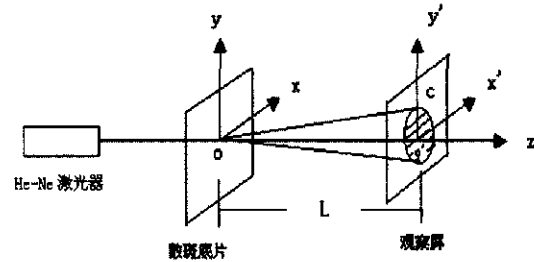


图 2 逐点分析光路  
Fig. 2 The optical path of the point-by-point analysis

激光束垂直照射双曝光散斑图(散斑底片)，考察双曝光散斑图上一点在频谱面 $(x', y')$ 上的频谱。假设与照射点对应的物体表面上的一个小区域是准平移区，则可在 $(x', y')$ 面(观察屏)上观察到位移  $d$  的杨氏干涉条纹。通过计算杨氏干涉条纹的间距就可间接求出物体的微小位移  $d$ ，它们之间的关系如式(1)所示。

$$d = \frac{\lambda L}{MS} \tag{1}$$

其中： $L$ —散斑图到屏幕距离， $M$ —散斑图放大倍数， $S$ —条纹间距， $\lambda$ —激光波长

2.2 CCD 测距

用 CCD 获取干涉条纹，测得的条纹间距  $S'$  与条纹间距  $S$  的关系为：

$$S = \alpha S' \tag{2}$$

其中  $\alpha$  为转换因子，与外加光学镜头、CCD 成像、软件处理等有关。为确定转换因子  $\alpha$ ，确定反映点与点间的长度，必须进行度量单位间的转换。如选用宽度为  $L_{\text{标}}$  的标准试件，通过 CCD 成像系统在 PC 机上测得的宽度为  $L_{\text{标}}'$ ，则转换因子的大小为：

$$\alpha = \frac{L_{\text{标}}}{L_{\text{标}}'} \tag{3}$$

将上述(2)式、(3)式代入(1)式，可得出激光照射对应的试件某位置的微小位移  $d$  为：

$$d = \frac{\lambda L L_{\text{标}}'}{MS' L_{\text{标}}} \tag{4}$$

由(4)式可知，只要测得式中的 5 个未知数，就可以计算出试件某位置微小位移量。

3 实验研究

3.1 条纹获取

按图 1 所示光路进行实验，制作激光双曝光激光散斑图。选用复合材料矩形薄板作为被测试件，材料的一端固定，另一端完全自由，形成一悬臂梁，对试件自由端加载后会产生形变。在加载前后分别对记录介质(全息干版)进行双曝光，记录试件形变前后的信息，经过常规处理，获得双曝光散斑图。

测量时刚体试件横向位移的大小用测微位移计控制，取放大率  $M=1$ ，则平移试件  $d$ ，像面散斑的平移量也为  $d$ ，激光散斑的平均直径为  $1.22\lambda F$  ( $F$  为透镜焦距与透镜孔径比)。为避免两次曝光散斑图发生重叠现象，应使：

$$d_{\min} \geq 1.22\lambda F \tag{5}$$

采用逐点分析法对散斑图条纹进行处理，建立如图 3 所示的图像采集系统。

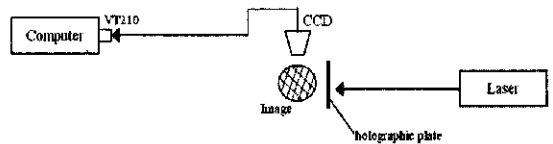


图 3 图像采集系统  
Fig. 3 Image collecting system

系统中的光源为 He-Ne 激光器,波长为 632.8nm。当用细激光束照明散斑图时,可以得到由被照明小区域散射产生的杨氏干涉条纹。用高灵敏度 CCD 摄像机为核心元件,其像素元为  $10.0\mu\text{m}(\text{H}) \times 10.8\mu\text{m}(\text{V})$ ,对 CCD 摄像头调整适当的角度,通过视频图像采集卡(VT210)在计算机上捕捉双曝光散斑干涉条纹光学图像,再经过计算机编程来处理采集到的图像,得到图像中的相应信息(条纹间距,光强相对值等)。用图 3 所示的图像采集系统采集到被照小区域散射产生的条纹图如图 4 所示。

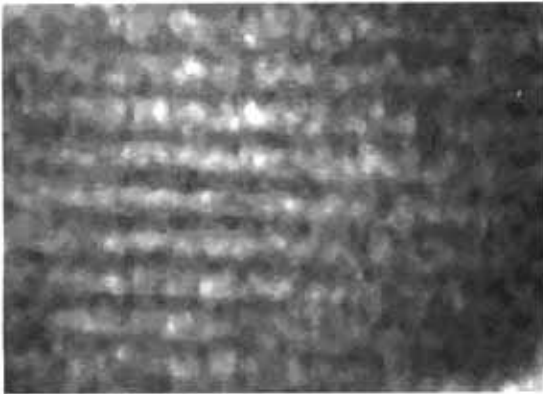


图 4 原始条纹图  
Fig. 4 Original fringe pictures

从图 4 可以看出,获取的杨氏条纹图光强不均匀,给条纹处理带来一定的难度。同时,在整幅图中,分散着很多的噪声,如果不消除这些噪声,就无法准确处理条纹图。因此,在分析条纹之前,需对条纹图进行预处理。

3.2 图像处理算法

3.2.1 图像增强

在条纹图像拍摄时,由于光源照明不均匀和条纹稀疏不同的影响,所拍摄的条纹图像有些区域亮些,有些区域暗些,很难定量区分图中的条纹,所以需要原始图进行增强操作。操作的时候,可以对整幅图进行增强;也可以选择局部灰暗的区域进行增强,直到整个图像明暗达到一致为止。

3.2.2 中值滤波

中值滤波是一种非线性平滑技术,它将每一像素点的灰度值,设置为该点某邻域窗口内的所有像素点灰度值的中值。在杨氏条纹图中,有很多的孤立点和胡椒面噪声。在实验中,为了使图像更好的反映条纹特征,需要通过中值滤波进行噪处理。一

般采取窗口不断扩大的方式,将中值滤波的领域大小取为 3、5、7……,直到效果满意为止。

3.2.3 图像平滑和锐化

为了在全局的二值化处理中消除高频噪音的影响,可以采用条纹图进行了局部直方图变换,小范围内的最高和最低灰度值为 255 和 0。高频颗粒噪音和条纹上毛刺周围的灰度值较高,而条纹中心像素周围点的灰度值与其相似。用平滑的方法,可以使高频颗粒噪音和条纹上毛刺的灰度值降低,而条纹中心像素的灰度值基本不变。此外为了突出边缘,还需进行锐化。

条纹图经过上述一系列图像处理算法后,如图 5 所示。

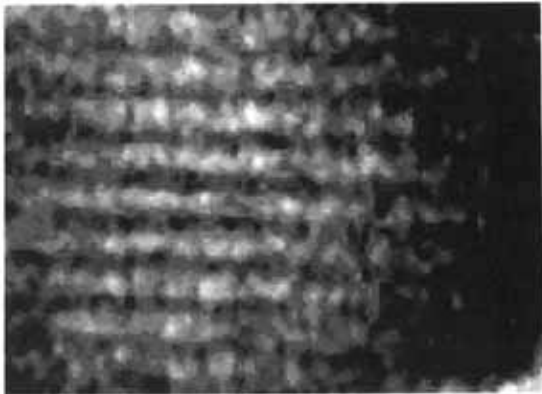


图 5 处理后的条纹图  
Fig. 5 The fringe pictures after processing

3.3 图像的定性分析

运用 VC 编程,直接读出 CCD 采集到的图像的灰度值,并画出条纹的强度分布图(图 6)。图中横坐标表示条纹间距,纵坐标表示条纹的光强。

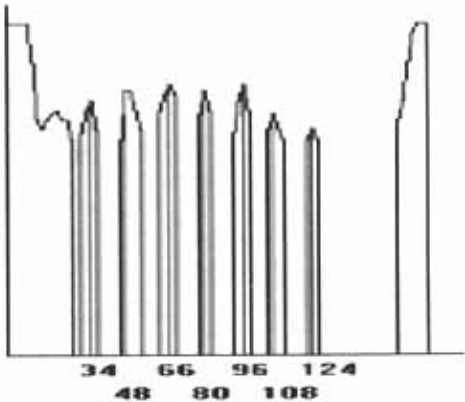


图 6 条纹光强分布图  
Fig. 6 The distribution of grey scale to the fringe

### 3.4 计算结果及分析

选用面内位移为  $50\mu\text{m}$  的散斑图来进行定量分析,采用 CCD 在条纹图的局部采集,并作预处理。为确定转换因子  $\alpha$ ,确定反映点与点间的长度,必须进行度量单位间的转换。选用一宽度为  $1\text{cm}$  的标准试件,用 CCD 采集,由条纹光强分布图(图 6)得出它的相邻最大灰度值的坐标差值为  $38\text{cm}$ ,因此转换因子为  $\alpha=38$ 。

通过 VC 编程画出条纹图的光强分布图,并计算条纹间的平均距离。依据前述的基本原理,利用编程直接算出微小位移量。算法主要步骤如下:

读取标准试件的灰度值,并算出其宽度在画板上的尺寸,结果作为参考数据放入存储区,作为下一步数据处理的准备。

画出条纹图的光强分布图,并根据标准试件的尺寸,算出条纹的实际间距。

实验中放大倍数  $M=1$ ,故只需输入屏与干板的距离  $L$ ( $L$  测量值为  $30\text{cm}$ ),在显示器上直接显示位移量。

位移量理论值为  $50\mu\text{m}$ ,根据如图 7 所示的计算界面和计算机结果,可知坐标差值平均为 15,实际条纹间距  $S$  为  $3947\mu\text{m}$ ,微位移  $d$  为  $48\mu\text{m}$ ,误差为  $4\%$ ,属正常范围之内。因此,这种方法是可行的,而且效果理想。

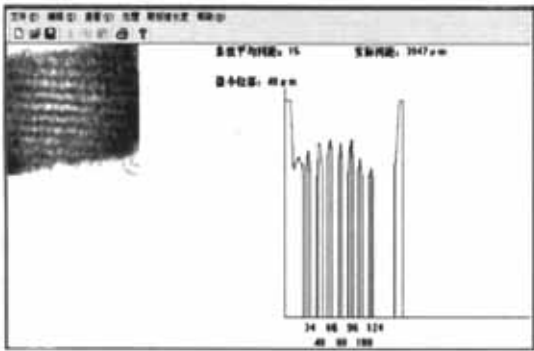


图 7 计算机显示界面及计算结果

Fig. 7 The computer interface and computation results

复合材料不同部位的形变量不同时,需采用逐点扫描法对条纹进行分析,将散斑图放在微位移架

上,每移动  $2\text{mm}$  采集一次,将每次采集处理后得到的数据存储起来,最后对所有数据进行分析可以得到复合材料的整体形变情况。

### 4 结论

本文采用激光双曝光散斑干涉法记录复合材料形变的信息,利用 CCD 为核心元件,用自编的图像处理软件以及与标准标准长度对比的方法通过 PC 机来获得复合材料某区域形变量,采用逐点法获得整个复合材料的形变情况。研究表明,本文提出的方法对测量复合材料的形变有效且精度高,能精确反映试件的变形情况,与已有方法相比,具有处理数据快速而准确的特点。本文研究表明,利用 CCD 技术可以实现对光学条纹图进行有效处理,可以直接计算条纹对应的位移量,从而使光学条纹的自动测量成为可能。

### 参考文献

- [1] 赵志敏. 旋转光楔散斑照相术研究[D]. 南京:南京航空航天大学,1992.
- [2] 赵志敏,林有义,俞洪敏. 一种新的多通道散斑照相术及其应用[J]. 光学学报,1997,17(3):304-307.
- [3] 蒲琪,代详俊. 聚乙烯材料应力强度因子的光学测试方法[J]. 机械科学与技术,2007,26(6):784-786.
- [4] 陈金龙,洪友仁. 基于液晶体的大错位量散斑相移技术研究[J]. 光学学报,2004,24(9):1292-1296.
- [5] 白锐,孙学伟,贾松良等. 激光散斑干涉法测量金属复合引线热膨胀系数的实验研究[J]. 实验力学,2004,19(2):156-162.
- [6] 宣扬,李为民. 用线阵 CCD 实现潜望镜筒弯曲的实时测量[J]. 计算机测量与控制,2007,15(5):580-581,598.
- [7] Liu Junyao, CH EN-Ming. On CCD measuring technology to SAW gyroscopic effect[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2007,20(4):800-804.
- [8] 高有堂,常本康,田思等. CCD 在微光夜视瞄准镜检测系统中的应用[J]. 应用光学,2007,28(2):125-128.
- [9] 雷剑波,杨洗陈,陈娟等. 激光熔池 CCD 测温系统的软件设计研究[J]. 应用激光,2007,27(1):5-8.
- [10] 居戡之,韦晓茹,朱亚一等. 一种基于 AVR 单片机的线阵 CCD 测量系统[J]. 苏州大学学报(自然科学版),2006,22(4):34-37.