

基于光栅大错位数字散斑干涉的无损检测技术

谢蒙蒙 陶宝祺

姜锦虎

(南京航空航天大学智能材料与结构研究所, 南京, 210016) (苏州大学物理学院, 苏州, 215006)

摘要: 提出一种新的无损检测技术, 它利用光栅实现大错位。详细讨论了该技术的原理, 并给出相应的实验结果表明这一技术的可行性。

关键词: 光栅 大错位 散斑 无损检测

Nondestructive inspection technology based on grating big shearing digital speckle interference

Xie Mengmeng, Tao Baoqi, Jiang Jinghu^a

(The Key Lab. for Smart Materials & Structures, Nanjing University of Aero. & Astro, Nanjing, 210016)

(^aDepartment of Physics, Suzhou University, Suzhou, 215006)

Abstract: With a grating as the shearing part, a nondestructive inspection technique is presented in the paper. Its principle is discussed in detail and the experimental results show that it is feasible.

Key words: grating big shearing speckle nondestructive inspection

引 言

随着现代工业的迅速发展,精密测试计量和无损检测技术的应用愈来愈广泛和重要。在现有的检测技术中,数字散斑干涉计量术(DSPI)以其全场、非接触性、实时的特点,成为最有前途的检测手段之一,是振动分析、变形场测量及无损探伤的一种重要手段^[1, 2],目前已发展成多种测量方法。但是这些方法在工程实际应用中存在一些困难:对测量环境要求高、自动识别困难、体积过大等。我们针对 DSPI 存在的不足和局限性,利用 DSPI 的最新成果,从工业测量工程实际需要出发,将常规 DSPI、错位 DSPI^[3, 4]、图像处理技术、计算机系统等结合起来,提出了一种全新的无损检测技术——光栅大错位数字散斑干涉无损检测技术,介绍该检测技术的原理,并通过实验对此进行验证。

1 光栅大错位散斑干涉原理

图 1 为光栅大错位散斑干涉原理示意图。被测物 S 和参考物 S' 经成像物镜和光栅在像平面上衍射成像,分别获得 S 和 S' 的 0 级, ±1 级, ±2 级衍射像。适当调节光栅到 CCD 靶面的距离 d, 将待测的 0 级物像与参考物的 +1 级参考物像重合, 则 0 级物像 $U_{o,0}$ 和 +1 级参考物像 $U_{r,1}$ 形成大错位干涉。

光栅大错位散斑干涉原理为: 设被测物 S 和参考物 S' 中心的距离为 a, S 和 S' 表面的漫射光场分别为 $U_o(x_0, y_0)$ 和 $U_r(x_0 - a, y_0)$, 像面上理想像光场为:

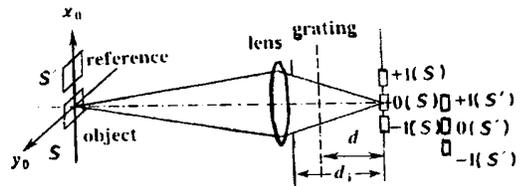


Fig. 1 The principle of grating big shearing speckle interferometry

$$U_g(x_i, y_i) = U_{og}(x_i, y_i) + U_{rg}(x_i + Ma, y_i) \quad (1)$$

式中, M 为系统的放大率。

$$\text{由傅里叶光学知, 像面光场为: } U_i(x_i, y_i) = U_g(x_i, y_i) * h(x_i, y_i) \quad (2)$$

式中, $*$ 为卷积符号, $h(x_i, y_i)$ 为由成像物镜、光阑和正弦位相光栅构成相干成像系统的点扩展函数, 它为出射光瞳 $\varphi(x, y)$ 的傅里叶变换。于是像面光波复振幅为:

$$U_i(x_i, y_i) = U_g(x_i, y_i) * \mathbf{F}\{\varphi(x, y)\} = \\ [U_{oi}(x_i, y_i) + U_{ri}(x_i + Ma, y_i)] * \left[\sum_{q=-\infty}^{\infty} J_q \left(\frac{m}{2} \right) \delta(f_x - qf_0, f_y) \right] = \\ \sum_q \lambda^2 f^2 J_q \left(\frac{m}{2} \right) U_{oi}(x_i - \lambda d q f_0, y_i) + \sum_q \lambda^2 f^2 J_q \left(\frac{m}{2} \right) U_{oi}(x_i + Ma - \lambda d q f_0, y_i) \quad (3)$$

$U_{oi}(x_i, y_i)$ 和 $U_{ri}(x_i + Ma, y_i)$ 分别为无光栅时, S 和 S' 在像面上实际像的光波复振幅。 $\sum_q \lambda^2 f^2 J_q(m/2) U_{oi}(x_i - \lambda d q f_0, y_i)$ 和 $\sum_q \lambda^2 f^2 J_q(m/2) U_{oi}(x_i + Ma - \lambda d q f_0, y_i)$ 分别表示有光栅时 S 和 S' 的实际衍射像, q 表示第 q 级的衍射像。为获得完整的干涉像要求 S' 的线度不小于 S 的。为使 S' 的实际像无混叠, 要求其像在 x_i 方向的线度 $b < \lambda d f_0$ 。

当调节 d 满足 $d = Ma / \lambda f_0$ 时, S 点的 0 级像与 S' 点的 +1 级衍射像中心重合, 发生干涉。将 CCD 靶面置 S 的 0 级衍射像处, 又因 $J_0(m/2) = J_1(m/2)$, 于是, CCD 靶面上光波复振幅分步(忽略常系数)可表示为:

$$U_{ic}(x_i, y_i) = U_{oi}(x_i, y_i) + U_{ri}(x_i, y_i) \quad (4)$$

变形前 CCD 靶面光场如(4)式所示, 为下面讨论方便改写为:

$$U_i(x_i, y_i) = U_{oi}(x_i, y_i) + U_{ri}(x_i, y_i)$$

$$\text{物变形后像面光场为 } U_i(x_i, y_i) = U_{o2}(x_i - Mu, y_i - Mv) e^{-j\Delta\varphi} + U_{ri}(x_i, y_i)$$

$\Delta\varphi$ 是由于物上 $P(x_0, y_0)$ 位移至 $P(x_0 - u, y_0 - v, w)$ 引起的相对位相。对于本实验所采用的光路而言, $\Delta\varphi = 4\pi w / \lambda$, 变形前后像面光强分布分别为 $I_1 = |U_i(x_i, y_i)|^2$, $I_2 = |U'_i(x_i, y_i)|^2$ 。

CCD 将光强信号转换为视频信号, 再经 A/D 转换为数字散斑信号, 它正比于光强。分别采集变形前后的数字散斑, 并将两者相减平方后再由 D/A 转换为模拟信号, 给显示器进行视频显示, 显示的相关条纹亮度经散斑统计理论推导(由于篇幅略)得:

$$E = 2K \langle I \rangle^2 [K + 2 - K |h_i(u, v)|^2 - 2h_i(u, v) \cos(4\pi w / \lambda)] \quad (5)$$

式中, $K = \langle I_o \rangle / \langle I_r \rangle$, $h_i(u, v) = \iint P(x, y) e^{j2\pi(\lambda d_i)(ux + vy)} dx dy$, $P(x, y)$ 为成像系统的出射光瞳函数。(5)式将引出很多有意义的结果。例如, 物参考光强比、面内位移 u, v 和光圈大小与条纹可见度的关系。

对于特殊情况, 若 $\langle I_o \rangle = \langle I_r \rangle$, 即 $K = 1$, 而面内位移很小, 即 $h_i(u, v) \approx 1$, 则(5)式简化为

$$E = 4 \langle I_o \rangle^2 [1 - \cos(4\pi w / \lambda)] \quad (6)$$

(6)式表明干涉条纹的明暗随 $4\pi w / \lambda$ 变化, 即干涉条纹是离面位移 w 的等值线。其测量灵敏度为 $\lambda/4$ 。

2 光栅大错位散斑干涉无损检测原理

光栅大错位散斑干涉无损检测原理是建立在判断散斑干涉条纹与结构变形量之间关系的基础上。结构在外力作用下, 将产生表面变形。应用散斑干涉计量的方法, 将这种不同表面的

变形转换成光强表示的干涉条纹经光学系统由 CCD(电荷耦合器)转换成电信号输入计算机采集卡存储起来。若结构不存在缺陷,则这种干涉条纹只与外加载荷有关,且干涉条纹是有规律的,每一根条纹都表示结构变形的等位移线。若结构存在缺陷,则缺陷部位的刚度、强度、热传导系数等物理量均发生变化,缺陷部位的条纹变化不仅取决于外加载荷,还取决于缺陷对结构的影响,因而在缺陷处产生的干涉条纹,是结构在外加载荷作用下产生的等位移线与缺陷引起的变形干涉条纹叠加的结果。这种叠加将引起缺陷部位的表面干涉条纹畸变。根据这种畸变则可以确定结构是否存在缺陷。对两个物体(其中一个为标准试件,另一物体为待测件)同时加一定量的预载荷,用光栅大错位的方法可以得到它们重叠的像,对待测件继续加压,从加压前后相减的干涉条纹图的均匀性可以断定待测件是否材质均匀、无缺陷。若出现的干涉条纹中有不均匀变形,则说明待测件在变形处有缺陷存在。

3 实验装置与结果

实验装置如图 2 所示。He-Ne 激光扩束照明标准件和待测件,而它们漫射的光波经大错位元件在 CCD 靶面上干涉产生散斑图。其光强被转换成电视信号送到 A/D 转换器并抽样建立 512×512 的数字图像。每个抽样被量化成 256 个独立的灰度级。数字图像储存至数字帧存储器中。在物体变形前后各采集一幅散斑图,数字化后存储于数字帧存储器中。然后计算机对这两幅数字散斑图相减处理进行视频显示。

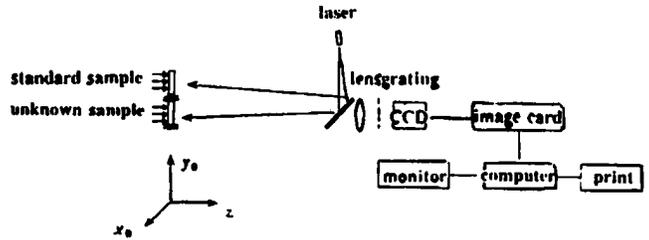


Fig. 2 The system of grating big shearing digital speckle interferometry NDT

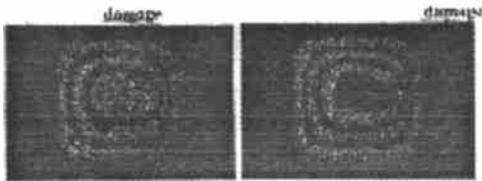


Fig. 3 The speckle strip figure of the sample having damage

件同时加一定压差,采集图像;后对待测件单独加压,再采集图像,将两幅图像相减,干涉条纹出现畸变,图 3 所示为在不同的载荷下的条纹畸变情况。根据弹性理论,缺陷变形位移与载荷的关系为: $w_{\max} = 3a^4 \Delta q / (16Et^3)$, 式中, Δq 为压力差, E 为材料的弹性模量, a 是缺陷的半径, t 为缺陷离开表面的深度。这样,根据上式可见,缺陷产生的变形与 $a^4 t^{-3}$ 成比例。当 Δq 一定时,最小可测变形为 $0.3 \mu\text{m}$ 。在本实验中采用的铜板的模量为 $110 \times 10^3 \text{N/mm}^2$; 缺陷半径为 10.3mm ; 每一根亮(或暗)条纹表示半个 He-Ne 光波波长的位移。采用加载量为 0.017N/mm^2 和 0.024N/mm^2 , 得到如图 3 所示条纹,计算得缺陷离开表面的深度为 0.5915mm , 即缺陷深度为 0.0885mm 。与用 H2.835 型涡流探伤仪测出的缺陷深度 0.09mm 结果基本吻合。

4 结 论

用光栅大错位数字散斑干涉法进行检测物体的内部缺陷位置和大小检测是切实可行

的。它不仅可以提高检测精度,而且可以实现在线自动检测,同时,该技术具有光路布置及其装置简单,并且容易实现,采用单光臂记录,还可脱离隔振工作台进行检测,有望解决大型机件可靠性分析中的深层缺陷、细微裂纹、残余应力、疲劳损伤以及安全寿命的估算。这一技术在国内尚属首次提出,该方法在仪器化后进入生产实践是有广泛的应用前景的。

参 考 文 献

- 1 阿雷克 F T, 舒尔茨-杜波依斯 E O 主编. 激光的技术应用. 北京: 科学出版社, 1983
- 2 斯蒂斯 M L 主编. 激光技术和应用的进展. 北京: 科学出版社, 1986
- 3 张 熹, 王海峰. 现代力学测试技术. 广州: 华南理工大学出版社, 1998
- 4 姜锦虎, 王海峰. 现代力学测试技术. 广州: 华南理工大学出版社, 1998

作者简介: 谢蒙蒙, 女, 1975年8月出生。助教。现从事智能材料与结构的研究工作。

收稿日期: 2000-03-27 收到修改稿日期: 2000-05-30

金帛

重庆金帛科技有限公司

地址: 重庆市渝北区龙溪镇花卉东路 36 号富贵花园二楼 邮编: 401147
电话: 023-67911780 67904964 传真: 023-67909717 Email: shulijb@cta.cq.cn

连续 YAG 激光系统的钻石组合

香蕉圆镀膜聚光腔

换灯棒无须重调光
带精密调整膜片架



连续 YAG 激光电源

日本 IGBT 模块
美国自适应一次点燃技术
输入电压: 160~250V AC
输出电流: 0~30A DC
控制方式: PWM
电流纹波: <0.3%
引燃方式: 自动



声光 Q 开关电源

工作频率: 25MHz
调制频率: 1~35kHz
脉冲宽度: 1~10μs
关断激光功率: 80W



声光 Q 开关

俄罗斯熔石英;
日本快换水冷接头;
表面反射率: <0.1%;
破坏阈值: >500MW/cm²;
插入损耗: <5%;
驻波比: <1.2:1;
驱动功率: 100W;
关断激光功率: >80W(多模)

100W YAG

激光器水冷机

日本压缩机, 快换接头
意大利不锈钢水泵
水温控制范围: 5~30 度
温度飘移: 0.5 度
流量: 35 升/分
扬程: 48 米

