

文章编号: 0253-2239(2001)01-0125-04

光栅大错位数字散斑干涉术的研究*

谢蒙蒙** 姜锦虎 杨 勇 陈大庆 龚浩瀚
(苏州大学理学院物理系, 苏州 215006)

摘要: 提出一种新的大错位数字散斑干涉术。它在成像物镜的像方空间放置光栅, 利用光栅的衍射原理, 使来自参考物和被测物的光波在像面发生干涉。用傅里叶光学原理详细讨论了该方法的基本原理, 并对受均布载荷的周界固定方板这一典型试件的离面位移场进行了实测。结果表明, 实验值和理论解吻合。报导了一些应用实例。理论和实验表明, 该方法不仅具有全息干涉计量术达 $M/4$ 的高灵敏度, 还具有防震要求低和能在明场环境下进行现场测量的显著优点。

关键词: 大错位; 数字散斑; 光栅

中图分类号: O436.1 文献标识码: A

1 引 言

文献[1, 2]提出了采用渥拉斯顿棱镜作为错位元件的大错位数字散斑干涉术, 它利用渥拉斯顿棱镜的双折射现象产生大错位, 使物光波和参考光波干涉。它所研测的量与传统的数字散斑干涉术相同, 其优点是: 1) 光路和结构简单; 2) 防震要求低。由于这一方法所需的渥拉斯顿棱镜材料为天然方解石, 体积较大, 故成本较高; 同时光学质量难以保证均匀一致, 波像差较大, 从而影响干涉系统的质量。

本文对此不足之处提出在像方空间放置光栅, 取代渥拉斯顿棱镜, 实现大错位数字散斑干涉术。讨论了光栅实现大错位数字散斑干涉的基本原理, 并对受均布载荷的周界固定方板这一典型试件的离面位移场进行了实测, 用以验证该方法的正确性。结果表明实验和理论解吻合得相当好, 其位移测量

灵敏度和精度为 $M/4$ 。最后还介绍了实际应用。

2 方法和仪器描述

光栅大错位数字散斑干涉系统如图 1 所示。半导体激光照明被测物和参考物, 由它们漫射的光波经光学成像系统和光栅衍射, 在 CCD 靶面上干涉产生散斑图。其光强信号转换成电视信号送到模/数 (A/D) 转换器并抽样建立 512×512 的数字图像。每个抽样点被量化成 256 个独立的灰度级。数字图像储存至数字帧存储器中。为测量位移场, 在物体变形前后各采集一幅数字散斑图, 然后用计算机对这两幅数字散斑图相减和进行非线性处理, 然后经数/模 (D/A) 转换为视频信号, 显示相关条纹-位移的等值条纹图。计算机还可以对条纹图进行增强、平滑滤波、细化等处理。

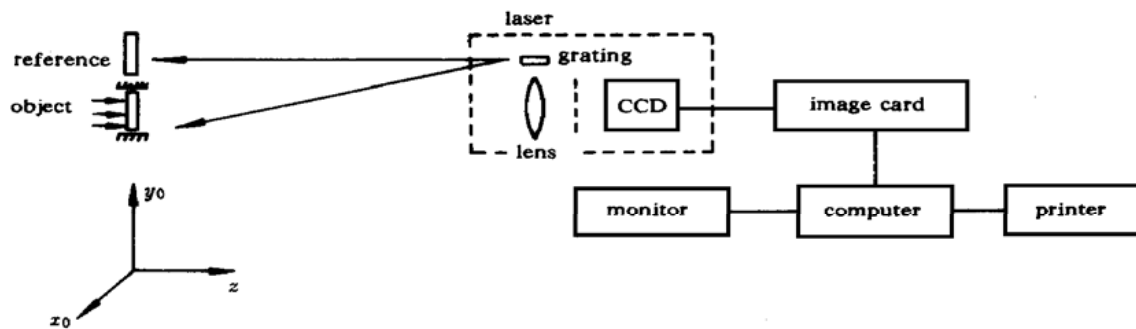


Fig. 1 An schematic of grating big shearing DSPI

* 江苏省教委自然科学基金资助课题。
** 现通信地址: 南京栖霞区马群街 238 号江苏交通控股有限公司, 南京 210049
收稿日期: 1999-01-26; 收到修改稿日期: 1999-10-08

光源为半导体激光器, 输出功率为 6 mW。因其输出光束为发散光束, 且光斑呈椭圆型, 与物、参考物并列放置的情况相匹配, 使光能被充分利用。从而省去了扩束、针孔滤波等机构, 使光路极为简单, 实现测量系统便携式。图 1 中虚线方框为光学系

统,它将照明系统、大错位成像系统、CCD 和必要的调节机构组装在一起,体积仅为 12 cm × 13.5 cm × 12 cm。

CCD 为工业用低照度器件。在 CCD 面阵前安装了滤光片,以及在软件上采取了一些特殊措施,使测量能在明场环境下进行。

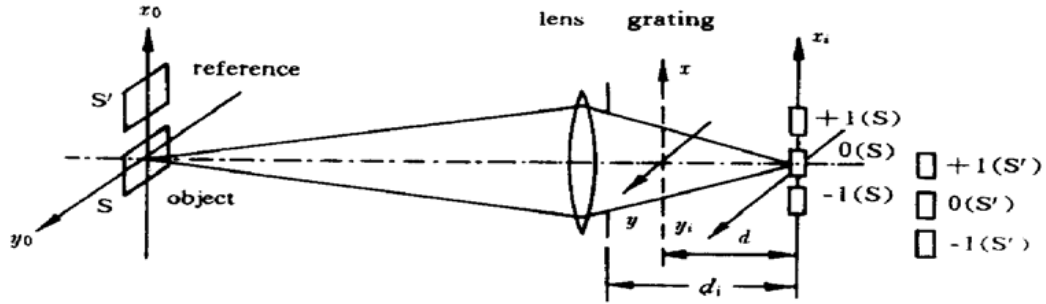


Fig. 2 Theory of grating big shearing speckle pattern interferometry

大错位散斑干涉原理如下:

设 S 和 S' 中心的距离为 a, S 和 S' 表面漫射光场分别为 $U_o(x_o, y_o)$ 和 $U_r(x_o - a, y_o)$, 像面上理想像光场为

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

式中 M 为系统的放大率, x_i, y_i 为像面坐标, U_{og} 和 U_{rg} 分别为被测物和参考物理理想像的光波复振幅。由傅里叶光学可知, 像面上实际像的光波复振幅为

$$U_i(x_i, y_i) = U_g(x_i, y_i) \circledast h(x_i, y_i), \quad (2)$$

式中 \circledast 为卷积符号, $h(x_i, y_i)$ 为由成像物镜、光阑和正弦相位光栅构成相干成像系统的点扩展函数,

$$U_i(x_i, y_i) = U_g(x_i, y_i) \circledast F\{\phi(x, y)\} = U_g(x_i, y_i) \circledast \left[F\left\{ \text{circ}\left[\frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{r} \right] \right\} \circledast F\left\{ \exp j \frac{m}{2} \sin(2\pi f_0 x) \right\} \right] = \\ [U_{oi}(x_i, y_i) + U_{ri}(x_i, y_i)] \circledast F\left\{ \exp j \frac{m}{2} \sin(2\pi f_0 x) \right\} = \\ \sum_q \lambda^2 d^2 J_q\left[\frac{m}{2} \right] U_{oi}(x_i - \lambda d f_0, y_i) + \sum_q \lambda^2 d^2 J_q\left[\frac{m}{2} \right] U_{ri}(x_i + Ma - \lambda d f_0, y_i), \quad (4)$$

式中

$$U_{oi}(x_i, y_i) = U_{og}(x_i, y_i) \circledast F[\phi(x, y)],$$

$$U_{ri}(x_i, y_i) = U_{rg}(x_i, y_i) \circledast F[\phi(x, y)]$$

分别为无光栅时 S 和 S' 的实际像的光波复振幅。

$$\sum_q \lambda^2 d^2 J_q\left[\frac{m}{2} \right] U_{oi}(x_i - \lambda d f_0, y_i)$$

$$\text{和} \quad \sum_q \lambda^2 d^2 J_q\left[\frac{m}{2} \right] U_{ri}(x_i + Ma - \lambda d f_0, y_i)$$

分别表示有光栅时 S 和 S' 的一系列实际衍射像的光波复振幅。

$$\lambda^2 f^2 J_q\left[\frac{m}{2} \right] U_{oi}(x_i - \lambda d f_0, y_i)$$

$$\text{和} \quad \lambda^2 f^2 J_q\left[\frac{m}{2} \right] U_{ri}(x_i + Ma - \lambda d f_0, y_i)$$

3 基本原理

图 2 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, 使 0 级物像与 ±1 级参考物像重合, 两者大错位干涉。

它是出射光瞳函数 $\phi(x, y)$ 的傅里叶变换。

出射光瞳函数为

$$\phi(x, y) = \text{circ}\left[\frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{r} \right] \times \exp\left[j \left(\frac{m}{2} \right) \sin(2\pi f_0 x) \right], \quad (3)$$

式中 $r = (d/d_i)R$ (R 为光阑的半径), $\exp\left[j \left(\frac{m}{2} \right) \sin(2\pi f_0 x) \right]$ 为正弦相位光栅的复振幅透过率函数, m 为相位延迟的峰-峰幅度, f_0 为光栅的空间频率, d_i 为光栅至像面的距离。

光学系统的点扩展函数为

$$h(x_i, y_i) = F\{\phi(x, y)\}.$$

于是像面光波复振幅为

分别为物和参考物的第 q 级的实际衍射像的光波复振幅。 $J_q(m/2)$ 是 q 阶第一贝塞尔函数, λ 为光波波长。为获得完整的 S 的干涉像, 要求 S' 的线度不小于 S 的线度。

为使 S 或 S' 的相邻两衍射像(例如 0 级和 +1 级衍射像)不发生混叠, 要求物像在 x_i 方向的线度 b 小于 $\lambda d f_0$ 。当调节 d, 使满足 $d = Ma/\lambda f_0$ 时, S 的 0 级像与 S' 的 +1 级衍射像中心重合, 两像发生干涉。将 CCD 靶面置于 S 的 0 级衍射像处, 同时计及所采用的光栅的 0 级、+1 级和 -1 级衍射光强相等, 即 $J_0(m/2) = J_1(m/2)$, 于是, CCD 靶面上的光波复振幅分布(忽略常系数)可表示为

$$U_{ic}(x_i, y_i) = U_{oi}(x_i, y_i) + U_{ri}(x_i + Ma + \lambda f_0, y_i). \quad (5)$$

分别采集记录变形前后的数字散斑图, 并将两者相减和非线性处理后由数/模(D/A)转换为模拟信号, 用显示器进行视频显示, 在物光光强与参考光强之比为 1:1、面内位移较小的情况下, 显示的相关条纹可见度最大为 1, 其亮度函数可以简化为(忽略常数)

$$E = \langle I_0 \rangle^2 (1 - \cos \Delta \varphi), \quad (6)$$

式中 $\langle I_0 \rangle$ 表示物的散斑像, $\Delta \varphi$ 是物体变形引起的光波相位变化:

$$\Delta \varphi = (2\pi/\lambda)(Au + Bv + Cw),$$

u 、 v 、 w 分别为位移在 x_0 、 y_0 和 z 轴上的三个位移分量。当光路如图 1 布置时, 有 $A = B = 0, C = 1$, 所以相位变化仅与离面位移 w 有关^[3]。干涉条纹是离面位移 w 的等值线。暗条纹的条件为

$$w(x, y) = n(\lambda/2) \quad (n = 0, 1, 2, \dots), \quad (7)$$

亮条纹的条件为

$$w(x, y) = (n + 1)(\lambda/2) \quad (n = 0, 1, 2, \dots), \quad (8)$$

于是根据暗条纹序号 n 就可以方便地对离面位移进行计量。测量灵敏度和精度由相邻的亮条纹和暗条纹所代表的离面位移差值决定, 即该方法的测量灵敏度和精度为 $\lambda/4$ 。如果结合文献[4]的相位调制技

术, 则可用于微小离面位移场(例如 $w \approx \lambda$) 的测量, 测量精度达 $\lambda/20$ 。如果将激光以一定的角度照明被测物, 则可用于面内位移场测量。

4 典型试验

为验证该方法的可行性, 采用典型试件进行实验。典型试件的离面位移条纹图的理论解及用全息干涉法和其他方法获得的条纹图是众所周知的, 因此只需将用光栅大错位散斑干涉术所得到的离面位移条纹图与其比较, 便可断定该方法的正确性。实验采用的典型试件为受均布载荷的周界固定方板, 板材为有机玻璃, 边长为 45 mm, 厚度为 1.68 mm。半导体激光器功率为 6 mW, 光栅的空间频率 $f_0 = 300 \text{ l/mm}$, -1 级、0 级和 +1 级衍射光强之比 $I_{-1} : I_0 : I_{+1}$ 接近于 1。图 3 给出了不同载荷下方板的全场离面位移场 $w(x, y)$ 条纹图, 实验是在普通木质实验桌和环境光照度为 65 lx 条件下进行的。

根据弹性力学理论, 我们作出对于 4 边刚性固支的矩形板 ($0 \leq x \leq a, 0 \leq y \leq b$) 在均布载荷 q_0 作用下过板中心, 沿 x 方向的离面位移理论曲线如图 4 所示, 并将第 4 幅条纹图上过中心的 x 轴与暗条纹交点所代表的离面位移值也作在图线上, 用 * 表示。理论值与实验值吻合得较好。

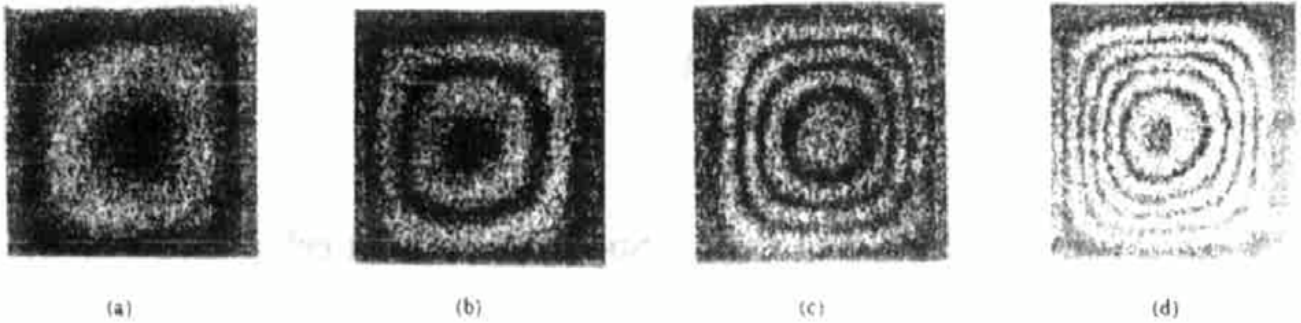


Fig. 3 The strip figure of out of plane displacement field $w(x, y)$ of square plate under different load (water column pressure): (a) $p = 3 \text{ mm}$; (b) $p = 6 \text{ mm}$; (c) $p = 8 \text{ mm}$; (d) $p = 10 \text{ mm}$

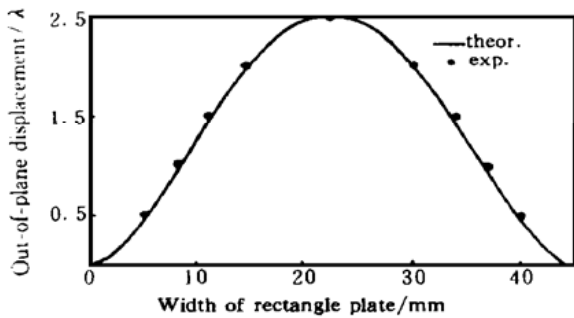


Fig. 4 The theoretical curve of rectangle plate's out-of-plane displacement and the experimentally measured value

5 应用

应用 1: 柴油机的排气阀。它在均匀气压载荷下的离面位移条纹图如图 5 所示。

应用 2: 对同济大学工程力学与技术系实验力学与工程测试研究室所提供的用两种不同弹模材料粘结而成的组合梁, 在三点弯曲情况下的界面附近的 u 位移场进行了测量, 如图 6 所示。这一工作为界面力学基础研究提供了有效的方法。

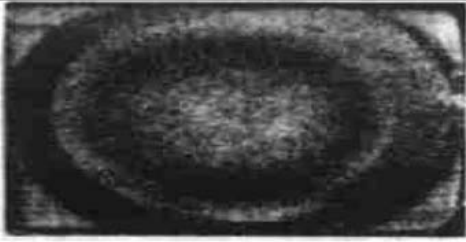


Fig. 5 Out of displacement strip figure of Diesel engine's air release valve

应用 3: 对中国船舶工业总公司舰船研究院的柴油机机身主轴承的孔周在载荷下的位移场进行了测量。其位移场条纹如图 7 所示。它为柴油机设计提供了一种有效的位移测量方法。其测量结果可为有限元计算提供可靠的边界条件。



Fig. 7 Displacement field strip figure round main bearing of Diesel engine

结束语 给出一种新的大错位数字散斑干涉术, 采用光栅错位干涉使两干涉光束间夹角很小, 从而使其对防震的要求较传统的双光束数字散斑干涉法和全息干涉计量术低得多, 而其测量灵敏度和精度则与全息干涉计量法相同。用光栅代替渥拉斯



Fig. 6 The strip figure of u direction displacement field around boundary surface of two kinds of material

顿棱镜和偏振片的组合, 不仅可降低成本, 而且波像差小, 干涉条纹图质量较好。用该方法所设计的光栅大错位数字散斑干涉系统结构简单, 体积小, 功能全, 抗震性能高, 可制成便携式的测量仪器满足不同测量的需要。该技术实现了散斑干涉计量术长期以来所追求的目标: 全场、高灵敏度、无处理、无特殊防震要求和能在明场环境下进行现场测量。初步的应用表明, 该技术在航空航天、轮机工程、土木、电子及生物医学等领域的测试中有广泛的应用前景。

参 考 文 献

- [1] 张 熹, 王海峰. 新的大错位三维电子散斑干涉法研究. 见: 戴福隆. 现代力学测试技术. 广州: 华南理工大学出版社, 1998, 328~ 331
- [2] 姜锦虎, 张 熹, 陈大庆等. 大错位数字散斑干涉术. 见: 戴福隆. 现代力学测试技术. 广州: 华南理工大学出版社, 1998, 332~ 335
- [3] 王海峰. 三维相移电子散斑干涉技术及其在柴油机中的应用研究. [博士论文] 上海中国船舶工业总公司舰船研究院, 1998
- [4] 刘 诚, 姜锦虎, 肖全标等. 相位调制数字散斑干涉术. 光学学报, 1997, 17(6): 741~ 744

Grating Big Shearing Digital Speckle Pattern Interferometry

Xie Mengmeng Jiang Jinhu Yang Yong Cheng Daqing Gong Haohang
(Physical Department, College of Science, Suzhou University, Suzhou 215006)

(Received 26 January 1999; revised 8 October 1999)

Abstract: A new method of big shearing digital speckle interferometry is presented. Grating is placed in image space of objective lens, and used as the shearing part. Light wave from reference object and measured object interfered at the image space. The principle of this method is discussed in detail based on Fourier optics, and plane displacement of typical specimen is measured which is a peripheral region fixed block board having symmetrical load. The results show that experimental value and theoretical value are fit well. Some applied example are given. Theory and experience are shown that this method not only have the high sensitivity of holographic interferometry ($\lambda/4$), but also have merit of low shockproof demand and in-site measurement.

Key words: bit shearing; digital speckle; grating