

文章编号: 0253-2239(2003)07-0840-5

三维电子散斑干涉技术及其应用研究*

孙 平 王海峰 张 熹
(上海船用柴油机研究所, 上海 200090)

杨福俊
(东南大学工程力学系, 南京 210096)

摘要: 通过大错位剪切镜和一作为参考物的压电陶瓷相移器将三个电子散斑干涉系统组成一新的三维电子散斑干涉系统。利用该系统, 结合相移技术和图像处理技术, 可得到独立的位移场(u 、 v 和 w 场)。该技术的特点是用三个激光器作为光源, 一个压电陶瓷相移器产生参考光并实现相移, CCD 摄像机前放置大错位剪切镜以使物光和参考光产生干涉。将该技术应用到柴油发动机零部件测量上, 得到了主轴承孔周的三维位移场。

关键词: 物理光学; 电子散斑干涉; 相移; 三维位移场; 柴油发动机

中图分类号: TN249 文献标识码: A

1 引 言

传统的散斑干涉计量技术具有精度高、非接触、对隔震要求低等优点, 被应用于物体的静、动态测量^[1], 但是, 手工操作, 费时费力。随着计算机以及数字图像处理技术的发展, 传统的散斑干涉技术与计算机技术相结合, 发展成为电子散斑干涉^[2~4]。三维电子散斑干涉技术是电子散斑干涉技术配合相移技术^[5]向三维、高精度和自动化方向的发展, 具有灵敏度高、可同时获得全场三维位移、非接触测量等优点^[6~9]。这一方法对柴油机零部件的强度分析有重要意义。

本文介绍如何用这一方法测量柴油机机身的位移场, 并将这一结果作为有限元计算的边界条件, 从而全面科学地获得柴油机机身各种强度和刚度信息, 为柴油机可靠性分析提供了资料。

2 三维电子散斑干涉技术原理

2.1 电子散斑干涉技术原理

当一束激光照射在光学粗糙表面上, 由于漫射表面散射光的干涉将产生许多随机分布的亮暗斑点, 用透镜成像后, 在像平面上物光的复振幅分布为

$$U_0(r) = u_0(r) \exp \phi_0(r),$$

其中 $u_0(r)$ 是物光波振幅, $\phi_0(r)$ 是物光波的相位。

除了物光波之外还需要有一个参考光波与其合成。图 1 为其一典型的对离面位移敏感的电子散斑干涉 (ESPI) 光路系统。

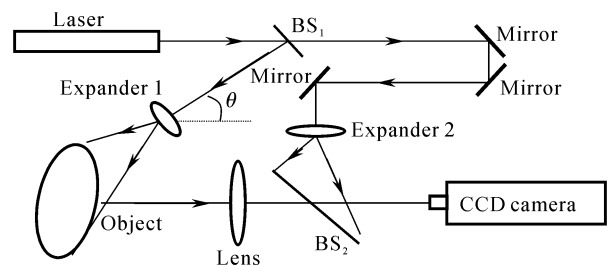


Fig. 1 ESPI system sensitive to out-of-plane displacement

该系统将分光镜 BS_1 分出的一小部分激光经扩束后照射在一半透半反镜 BS_2 后与物体漫反射光相汇合而在 CCD 靶面干涉。其参考光波的复振幅分布为

$$U_R = u_R(r) \exp \phi_R(r),$$

其中 $u_R(r)$ 和 $\phi_R(r)$ 分别是参考光波的振幅与相位。

物光和参考光在 CCD 靶面上形成的光强 $I(r)$ 为

$$I(r) = u_0^2 + u_R^2 + 2u_0 u_R \cos(\phi_0 - \phi_R), \quad (1)$$

当被测物体发生变形之后, 表面各点的散斑场振幅 $u_0(r)$ 基本不变, 而相位 ϕ_0 将改变为 $\phi_0 - \Delta\phi(r)$, 即 $U'_0(r) = u_0(r) \exp[\phi_0(r) - \Delta\phi(r)]$ 。由于变形前后参考光波维持不变, 因此位移后的合成光

* 上海市科技发展基金(995314015, 科技攻关类)资助课题。

E-mail: ljsp2002@sohu.com

收稿日期: 2002-09-17

强 $I'(r)$ 为

$$I'(r) = u_0^2 + u_R^2 + 2u_0 u_R \cos [\phi_0 - \phi_R - \Delta\phi(r)], \quad (2)$$

将变形前后的所采集得到的图像相减并取平方后得到

$$\bar{I} = |I'(r) - I(r)|^2 = \left| 4u_0 u_R \sin \left[(\phi_0 - \phi_R) + \frac{\Delta\phi(r)}{2} \right] \sin \frac{\Delta\phi(r)}{2} \right|^2. \quad (3)$$

由(3)式可见,相减处理之后的光强是包含有高频载波项 $(\phi_0 - \phi_R) + \Delta\phi(r)/2$ 的低频条纹 $\{\sin[\Delta\phi(r)/2]\}$ 。该低频条纹取决于物体变形引起的光波相位变化。这个光波相位变化与物体变形关系可以从光波传播的理论中推导出来。对于图 1 所示光路系统,光波相位变化与物体变形关系为^[10]

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} [\omega(1 + \cos\theta) + u \sin\theta], \quad (4)$$

其中, λ 是所用激光的波长, θ 是照明光与物体表面法线的夹角, ω 是物体变形的离面位移, u 是物体变形的面内水平方向位移。

由(4)式可知,当入射光与成像系统的夹角较小,可以近似看成光程变化仅与离面位移有关。但是当入射角较大时,光程变化与面内位移有关。

2.2 三维电子散斑干涉系统

图 2 所示为三维电子散斑干涉系统,激光器 A 和 B 布置在 xoz 面上,而激光器 C 则布置在 $yo z$ 面上。激光器 A、B 和 C 发出的激光束与物体表面的法线(z 轴)分别成 θ_A 、 θ_B 和 θ_C 。对只有激光器 A 组成的干涉系统,被测物体变形前后的相位变化由(4)式可知

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} [\omega(1 + \cos\theta_A) + u \sin\theta_A]. \quad (5)$$

同样,只有激光器 B 或 C 组成的干涉系统,被测物变形前后的相位变化分别为

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} [\omega(1 + \cos\theta_B) + u \sin\theta_B]. \quad (6)$$

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} [\omega(1 + \cos\theta_C) + u \sin\theta_C]. \quad (7)$$

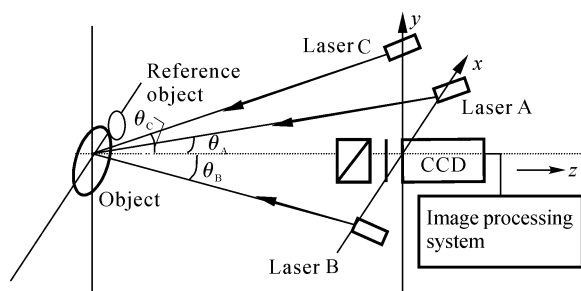


Fig. 2 3D-ESPI system

(7) 式中, v 表示物体变形的面内竖直方向位移。联立(5)式~(7)式,可解得 u 、 v 、 w 场。

2.3 大错位棱镜散斑干涉原理

渥拉斯顿棱镜(Wollaston prism),它产生的两个错位像的光场均匀。与需要小错位角的渥拉斯顿棱镜不同,大错位的渥拉斯顿棱镜一般用方解石晶体制作,它由两个直角光楔组成(图 3),两光楔的光轴相互垂直。正入射的光束进入棱镜,可分为垂直于光轴的 o 光折射率为 n_o ,平行于光轴的 e 光,折射率为 n_e 。两束光在第二块光楔中分离,形成错位角。当光楔顶部角为 β 时,这两束折射光出射的错位角 φ 为

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 = 2\sin^{-1}[(n_o - n_e)\tan\beta], \quad (8)$$

将渥拉斯顿棱镜和偏振片置于 CCD 摄像机镜头前面时(见图 2),若渥拉斯顿棱镜的错位角很大,则物体自身由于错位而在 CCD 靶面形成的两个像可完全分离,而与放在物体旁边的参考物的一个像相叠加。这样,当入射光同时照射在被测物体和参考物体上,用大错位棱镜可以使 CCD 摄像机同时接受物光和参考光的信息,但物光和参考光的偏振方向相互垂直,为使这两束振动方向不同的偏振光干涉,在错位棱镜后还要布置一偏振片,其偏振方向与错位棱镜的两光轴成 45° 。这样使物光和参考光信息在 CCD 摄像机的靶面上实现同轴偏振相干,而且光强几乎相等,从而有好的干涉结果。将加载前后的图像相减,可以得到与位移有关的干涉条纹。

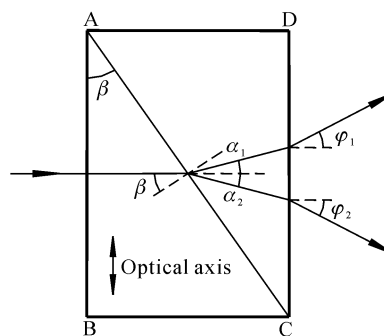


Fig. 3 Schematic of laser beam transmitting in Wollaston prism

利用大错位棱镜散斑干涉,可以使激光束 A、B 和 C 共同使用一组参考光系统,从而使三维电子散斑干涉系统大大简化。

2.4 压电陶瓷相移器

图 4 所示的压电陶瓷(PZT)相移器是在图 2 中的参考物。当压电陶瓷管接上电源后会膨胀,从而推动漫反射面施加附加相位^[5]。试验中采用卡雷

(Carré)相移算法^[11],相移四次,每次改变相同的任意相位 2α ,四幅图像的光强分别为 $I_1(x,y)$ 、

$I_2(x,y)$ 、 $I_3(x,y)$ 和 $I_4(x,y)$,可以推导出点 (x,y) 处的相位计算公式为

$$\phi(x,y) = \arctan \frac{\sqrt{[(I_1 - I_4) + (I_2 - I_3)][3(I_2 - I_3) - (I_1 - I_4)]}}{|(I_2 + I_3) - (I_1 + I_4)|}, \quad (9)$$

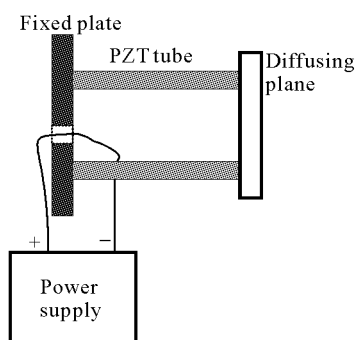


Fig. 4 Scheme of PZT phase shifter

其中 $\phi(x,y) \in [0, \pi/2]$, 可通过相位解包络将其扩展到 $0 \sim 2\pi$ 的区间上。由于卡雷法不需要精确知道每一次相移角度,只需要每一次相移角度相同,所以只要相移器的线性曲线好,标定误差就可以不考虑。

3 三维电子散斑干涉技术在柴油机机身测量中的应用

3.1 实验过程

用有机玻璃做成机身模型,在机身模型表面涂银粉以增强反射率,用图 2 所示的三维电子散斑干涉光路对机身受力较大的轴承孔周边部位进行测试,实验在防震台上进行。三个激光器分别照射被

测物体和参考物,在 CCD 摄像机前放置大错位棱镜和偏振片,三个激光器三次分别照射试件,结合改进的四步相移技术^[5],分别采得四幅散斑图,试件加载后,再重复上述过程。然后对每一激光器照射时变形前和后对应的具有相同相移量的四幅散斑图分别相减,得到这一激光器照射时的四幅相减的散斑图。这四幅相减的散斑图经运算可得到一幅全场的含有相位信息的散斑图。这样,三个激光器分别得到三幅全场的相位图,由这三幅全场相位散斑条纹图,可以解得联立方程式。

3.2 实验结果

先分离三个位移分量,然后将相位条纹转换成被测物体的变形量,获得截面或全场的变形,再将变形以图像形式表现,直观地输出。两次加载的荷载差为 57 N,在加载前后分别施加反向的相移,得到如图 5 所示的相位图,经计算分离和滤波处理可以获得如图 6 所示的三维位移场。取三维位移场的边界点的位移值作为有限元计算的边界条件,对机身模型进行混合法有限元计算^[6],结果如图 7 所示。对照图 6 与图 7 可见试验结果与有限元计算结果吻合的很好,说明有限元计算在采用了电子散斑测量的位移场作为边界条件后,计算精度进一步提高。

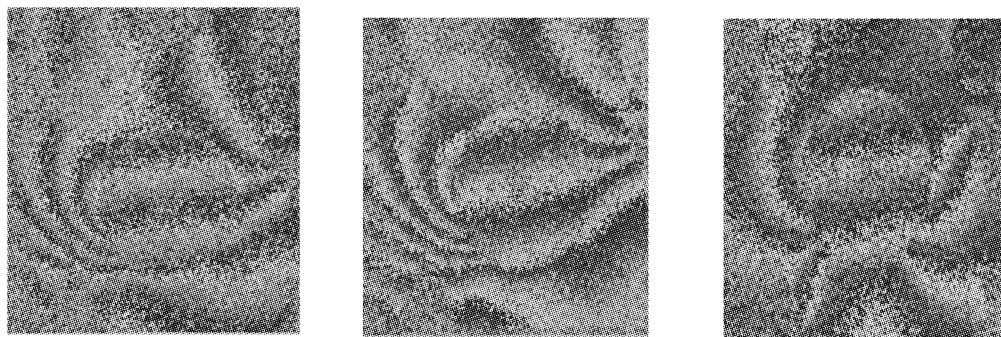


Fig. 5 Three speckle pattern interference phase map is obtained from laboratory

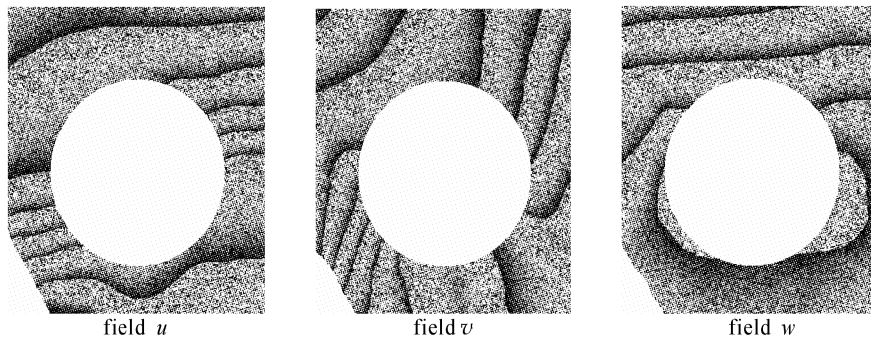


Fig. 6 Three-dimensional displacement phase map of hole of the main axle

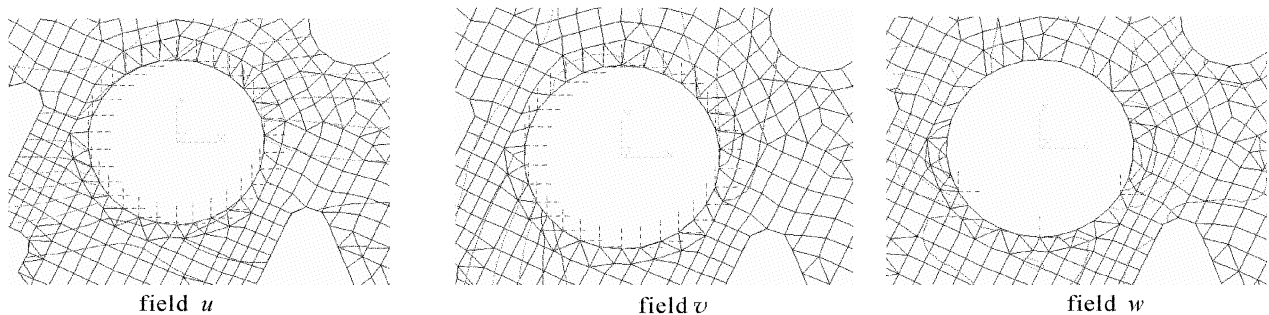


Fig. 7 Calculation of three-dimensional displacement field by finite element

结论

1) 利用三支激光器依次从水平或竖直不同的方向照射被测物和参考物,带有漫反射面的 PZT 相移器以及在 CCD 镜头前放置的大错位渥拉斯顿棱镜,这样组成的三维电子散斑干涉系统,可以得到反映 u 场、 v 场和 w 场位移的干涉条纹。

2) 该系统中利用在 CCD 镜头前放置的大错位渥拉斯顿棱镜来同时接收物光和参考光的信息,避免了电子散斑光路中一束照明光需要一束参考光,三束照明激光需用三束参考光的问题。而使三束照明激光共用一套参考光路,简化了系统。

3) 利用带有漫反射面的 PZT 相移器作为参考物,即提供了参考光又可实现相移,光路进一步简化。

4) 用三维电子散斑干涉技术可以获得柴油机机身全场三维位移场,方法直观,可以使柴油机设计者直接了解变形趋势,也可以作为有限元计算的边界条件,使有限元计算更精确,有效地应用于柴油机强度分析上。

参 考 文 献

- 1 Sun Ping, Wang Yunshan, Gong Yandi. On-line measurement for deformation of tool using speckle pattern interferometry. *J. Exp. Mech.* (实验力学), 1997, **12** (1):157~161 (in Chinese)
- 2 Petzing J N, Tyrer J R. Recent development and applications in electronic speckle pattern interferometry. *J. Strain Analysis*, 1998, **33**(2):153~169
- 3 Tao Gang, Li Xide. Phase map retrieve with temporal speckle pattern interferometry. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2001, **21**(10):1203~1207 (in Chinese)
- 4 Xie Mengmeng, Jiang Jinhui, Yang Yong *et al.*. Grating big shearing digital speckle pattern interferometry. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2001, **21**(1):125~128 (in Chinese)
- 5 Sun Ping, Zhang Xi. Study on phase-shifting techniques in ESPI. *J. Optoelectronics • Laser* (光电子 • 激光), 2001, **12**(11):1174~1176. (in Chinese)
- 6 Sun Ping, Zhang Xi, Wang Haifeng. Study on combined method based on 3-D ESPI. *Chinese J. Lasers*, 2002, **B11** (3):189~192
- 7 Tong Jingwei. Automatic analysis of three-dimensional displacement field using ESPI. *Opt. and Lasers in Engng.*, 1997, **26**(6):515~529
- 8 Leopold J, Hertwig M, Gunther H *et al.*. Three-dimensional measurement of macro- and microdomains using optical methods. *Opt. and Lasers in Engng.*, 1997, **28**(1):1~16
- 9 Ritter R, Galanulis K *et al.*. Notes on the application of electronic speckle pattern interferometry. *Opt. and Lasers in Engng.*, 1997, **26**(6):283~299
- 10 Jin Guanchang. *Computer-Aided Optical Metrology* (计算机辅助光学测量). Beijing: Qinghua University Press, 1997. 98~104 (in Chinese)
- 11 Carré P. Installation et utilisation du comparateur photoélectrique et interférentiel du Bureau International des Poids et Mesures. *Metrologia*, 1966, **2**(1):13~23

Study on Three-Dimensional ESPI and Its Application

Sun Ping Wang Haifeng Zhang Xi

(*Shanghai Marine Diesel Engine Research Institute, Shanghai 200090*)

Yang Fujun

(*Department of Engineering Mechanics, Southeast University, Nanjing 210096*)

(Received 17 September 2002)

Abstract: A new three-dimensional electronic speckle pattern interferometry (ESPI) system is constructed by three ESPIs through a large shearing device and a PZT phase shifter used as reference. Independent displacement fields (i. e. field u , v and w) can be obtained through the system with phase shifting technique and image processing. This new technique includes three lasers as light source, a PZT phase shifter which can push reference plane to change optical path of reference light. A large shearing Wollaston prism is placed in front of CCD camera to make interference between object wave and reference wave. This system is used in measuring parts of diesel engine. Three dimensional displacement fields around the hole of the main axle are obtained.

Key words: physical optics; ESPI; phase shifting; three-dimensional displacement fields; diesel engine