

电子散斑干涉位移场分离技术及其在 三维测量中的应用*

孙 平 张 丽 陶春先

(山东师范大学 物理与电子科学学院, 济南 250014)

摘 要 提供了一种可将离面位移与面内位移分离的三维位移场测量方法. 在双光束电子散斑干涉中增加参考光, 使这一路参考光为两光束所共用. 两束光各自独立地对变形物体进行测量, 结合相移技术, 可分别得到包含离面和面内位移信息的二幅位相图. 只需简单的位相运算就能够将面内位移场与离面位移场分离. 在竖直方向上, 采用两光束对称照明被测物, 直接测量面内位移竖直方向分量. 本文将该技术应用到柴油机油泵测量上, 得到了油泵的三维位移场. 该技术为三维位移场的测量提供了一种新的有效途径, 也为柴油机零部件的强度和刚度分析评价提供了新的方法.

关键词 物理光学; 电子散斑干涉; 相移; 位移场测量; 油泵

中图分类号 O348; TN247 **文献标识码** A

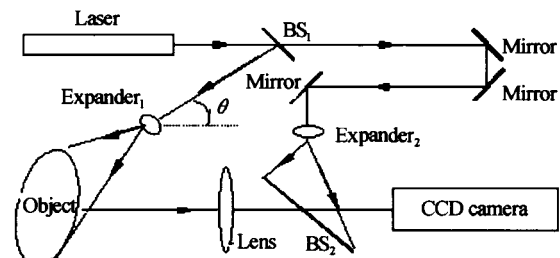
0 引言

在变形场测量的基础上, 可以对试件进行应变、应力分析以及强度和刚度分析. 因此, 变形场的测量倍受关注^[1~4]. 由于物体的变形是三维的, 故三维变形测量更具有实际意义. 三维相移电子散斑干涉技术^[5~8]是电子散斑干涉技术结合相移技术^[9]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、非接触等优点. 三维位移场的测量可通过参考型电子散斑干涉光路与双光束型电子散斑干涉光路的组合来实现^[10], 可无需计算, 直接得到位移场, 但光路设置复杂, 需要参考型与双光束型二套干涉光路系统. 大剪切电子散斑干涉的方法^[7,8]测量三维位移, 光路简单, 但适合于被测物附近可以放置参考物的环境. 本文在双光束型电子散斑干涉光路系统中增加参考光系统, 图像采集时采用两光束分别照明被测物, 结合四步相移技术, 分别求得两光束分别照明时的位相图, 经进一步计算, 可从二幅位相图中分离出离面位移场分量与面内位移场分量. 将该技术应用到柴油机部件的变形场的测量上, 方便地测量了柴油机油泵的三维变形分量.

1 电子散斑干涉三维位移场测量原理

图 1 为一典型的 ESPI 光路系统. 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, 经透镜成像后,

在像平面上形成物光.



· 图 1 典型的电子散斑干涉系统
Fig. 1 Typical ESPI system

该系统将分光镜 BS₁ 分出的一小部分激光经扩束后照射在一半透半反镜 BS₂ 后与物光相汇合而在 CCD 靶面干涉. 将变形前后所采集得到的二强度图像相减并取平方后得到^[9]

$$\bar{I} = \left| 4u_0(r)u_R(r) \sin \left[[\phi_0(r) - \phi_R(r)] + \frac{\Delta\phi(r)}{2} \right] \sin \frac{\Delta\phi(r)}{2} \right|^2 \quad (1)$$

式中 $u_0(r)$ 和 $\phi_0(r)$ 分别是物光波的振幅与相位, $u_R(r)$ 和 $\phi_R(r)$ 分别是参考光波的振幅与相位, $\Delta\phi(r)$ 是物体变形引起的相位变化. 由式(1)可见, 相减处理之后的光强是包含高频载波项 $[\phi_0(r) - \phi_R(r)] + \Delta\phi(r)/2$ 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. 对于图 1 所示光路系统, 光波相位变化与物体变形关系为^[11]

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

式中, λ 是所用激光的波长, θ 是照明光与物体表面法线的夹角, w 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. 由式(2)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

* 山东省教育厅科技计划项目(编号:01901)的资助
Tel: 0531-6182521 Email: sunpingmail@sohu.com
收稿日期: 2004-11-17

离面位移有关. 但是当入射角较大时, 光程变化也与面内位移有关.

在图 1 所示的光路中, 在原照明光的对称位置上再增加一路照明光, 形成双光束型电子散斑干涉光路, 并使这两束照明光共同使用一路参考光. 这样就形成了具有同一参考光路的双光束电子散斑干涉系统, 如图 2.

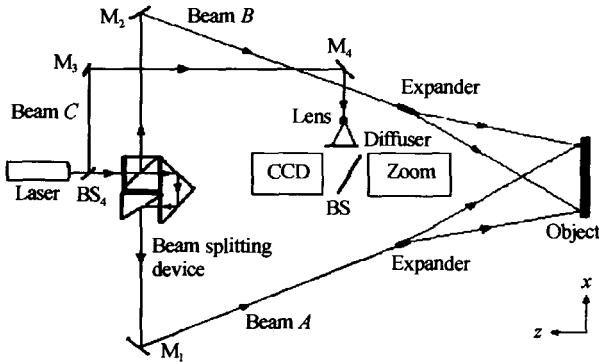


图 2 具有同一参考光的双光束电子散斑干涉光路图
Fig. 2 Schematic for dual beam symmetrical illuminations (Beam A and Beam B) in horizontal shared one reference (Beam C)

Beam A 和 Beam B 分别经反射镜 M_1 和 M_2 反射, 经扩束镜扩束后照射到被测物上, 形成测量面内位移的双光束型 ESPI, 可直接测量物体变形的面内位移场. 而 Beam C 则经反射镜 M_3 、 M_4 反射后, 经扩束镜照射到毛玻璃上, 形成散斑场, 再经半透半反光楔 BS 的反射, 形成参考光场.

该光路包含了二套电子散斑干涉光路, 当关闭 Beam C 时, Beam A 和 Beam B 同时照射物体, 可直接得到 x 轴方向的变形场 (u 场). 即

$$\Delta\phi(r) = \frac{4\pi}{\lambda} u \sin \theta \quad (3)$$

当开启 Beam C, Beam A 照射物体时, 得到的是 z 轴方向上的离面位移场 (w 场) 与 x 轴方向上的面内位移场 (u 场) 的混合场, 即

$$\Delta\phi_{C+A}(r) = \frac{2\pi}{\lambda} [w(1 + \cos \theta) + u \sin \theta] \quad (4)$$

当开启 Beam C 和 Beam B 照射物体时, 得到的同样是离面位移场 (w 场) 与面内位移场 (u 场) 的混合场, 只是相对 Beam A 来讲, 入射角 θ 变为 $-\theta$, 即

$$\Delta\phi_{C+B}(r) = \frac{2\pi}{\lambda} [w(1 + \cos \theta) - u \sin \theta] \quad (5)$$

将式(4)与式(5)相加, 可得 z 轴方向上的离面位移场.

$$\Delta\phi_{C+A}(r) + \Delta\phi_{C+B}(r) = \frac{4\pi}{\lambda} (1 + \cos \theta) w \quad (6)$$

将式(4)与式(5)相减, 可得面内位移场.

$$\Delta\phi_{C+A}(r) - \Delta\phi_{C+B}(r) = \frac{4\pi}{\lambda} \sin \theta u. \quad (7)$$

由式(6)和式(7)可见, 只要分别求出 Beam A 和 Beam B 照射时物体变形的位相变化, 然后对这两幅位相场进行简单的加减运算, 就可以将离面位移场与面内位移场分离开来. 竖直 y 方向上的面内位移分量 v 场的测量, 则需要在竖直方向设置另一双光束型 ESPI 光路进行测量.

2 位移场分离技术在油泵测量中的应用

2.1 实验过程

用有机玻璃做成油泵模型, 尺寸如图 3, 材料的弹性模量为 $E = 3.4 \times 10^9$ Pa, 泊松比为 $\nu = 0.34$. 在油泵模型表面涂银粉以增强反射率, 采用加载气压模拟油泵的加载, 加载气压为 4300 Pa.

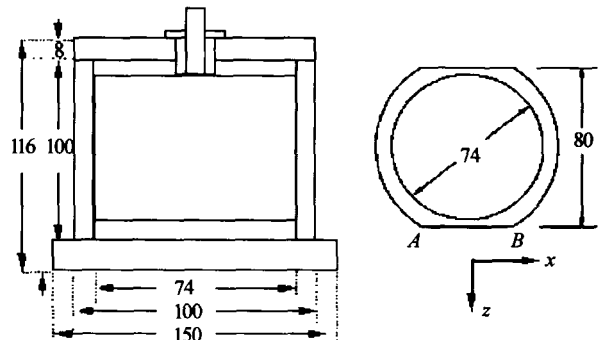


图 3 泵体模型 (单位: mm)

Fig. 3 The model of oil pump made of polymethyl

用如图 2 的双光束型加参考光的复合光路对油泵模型的前表面 AB 部分进行测试, 两光束的入射角为 40° , 实验在防震台上进行. Beam A 单独照射油泵时得到的干涉条纹图, 采用等四步相移技术, 得到其位相图. 然后, Beam B 单独照射, 同样得到其位相图, 分别对位相图进行解包络得到连续的位相图, 二连续位相图相加减后可分离出 x 轴方向位移分量 u 场的位相图和 z 轴方向上的离面位移 w 场位相图. 在垂直方向上 (y 方向) 的面内位移分量 v 场是在垂直方向上设置对称入射的双光束, 两光束的入射角为 40° , 由于可直接观测到面内位移条纹, 故可直接实施四步相移, 求得在垂直方向上的面内位移分量.

2.2 实验结果

图 4 为 Beam A 和 Beam B 分别照射油泵时得到的包络位相图. 进行位相运算后, 可分离出的离面位移的位相, 如图 4(c). 将分离出的离面位移分量位相图和水平位移位相图按照式(6)和式(7)转换成被测物体的变形量. 竖直方向上的面内位移位相则按照式(3)转换成位移值. 为直观起见, 将分离出的位移场, 仍重建为条纹的形式. 图 5 为重建的三维位移场条纹图.

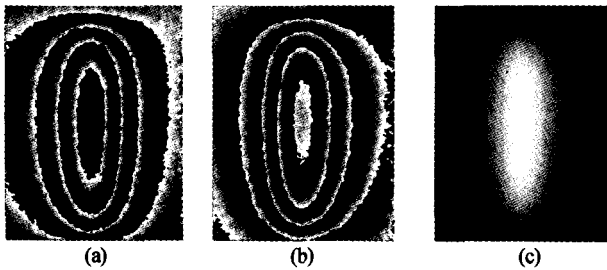


图4 Beam A 和 Beam B 分别照射油泵时可得到的包络位相图(a)和(b);图(c)为由图(a)和(b)分离出的油泵 w 场解包络位相图

Fig. 4 The wrapped phase map (a) and (b) can be obtained when the oil pump is illuminated by Beam A and Beam B respectively. And the unwrapped phase map (c) of out-of plane displacement of oil pump can be separated from the map (a) and (b)

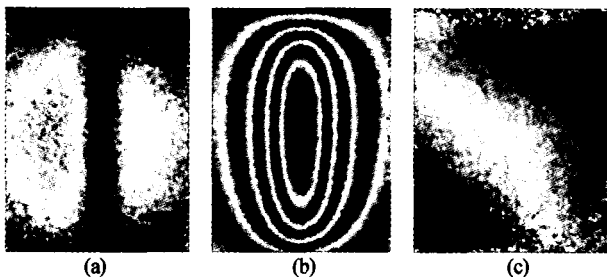


图5 根据分离出的相位场重建的 u 场(a)和 w 场(b)以及直接测量得到的 v 场条纹图

Fig. 5 The reconstructed fringe pattern of field u (a) and w (b). The field v is reconstructed from the measured phase of oil pump

3 油泵的有限元计算

为方便计算,油泵模型采用整体三维刚体结构,忽略圆筒部分与底座及上方密封盖的非刚性连接.选用空间 8 节点六面体单元进行划分,共划分 58240 个单元、14175 节点.将位移边界条件引入总刚度阵的办法是常规的“对角线元素乘大数法”.当油泵底面约束、内腔均匀受气压 4300 Pa 时,油泵三维位移场见图 6.对照图 5 可以看出 x 方向上的 u 场和 z 方向的 w 场同光测结果吻合较好,由于实际模型的二端为硅胶密封连接,故 y 方向的 v 场与计算结果有一定差距.

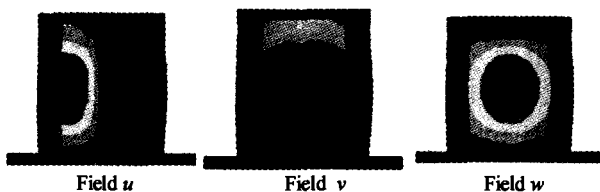


图6 油泵的三维位移场有限元计算结果

Fig. 6 FEM calculation results of oil pump

4 结论

具有相同参考光路的双光束电子散斑干涉技

术,通过位相运算能够将面内位移场与离面位移场分离.将该技术应用到柴油机油泵的三维位移测量上,成功测量了油泵的三维位移场,且与有限元计算结果吻合较好.该技术为三维位移场的测量和三维电子散斑干涉仪器的研制提供了新的途径,也为柴油机零部件的强度和刚度分析评价提供了新的方法.

参考文献

- 周灿林, 亢一澜. 数字全息干涉法用于变形测量. 光子学报, 2004, 33(2): 171~173
Zhou C L, Kang Y L. *Acta Photonica Sinica*, 2004, 33(2): 171~173
- 周灿林, 亢一澜. 网格频域分析法在变形测量中的应用. 光子学报, 2004, 33(1): 93~96
Zhou C L, Kang Y L. *Acta Photonica Sinica*, 2004, 33(1): 93~96
- 王勤, 黄丽清, 王永昌. 利用散斑照相检测微小位移的实时方法. 光子学报, 2003, 32(8): 1010~1012
Wang Q, Huang L Q, Wang Y C. *Acta Photonica Sinica*, 2003, 32(8): 1010~1012
- 戴旭涵, 米凤文, 沈亦兵, 等. 复杂工况下光学元件变形及应力的有限元研究. 光子学报, 1999, 28(2): 180~184
Dai X H, Mi F W, Shen Y B, et al. *Acta Photonica Sinica*, 1999, 28(2): 180~184
- 张熹, 孙平, 王海锋. 三维相移电子散斑干涉法在柴油机机身中的应用. 实验力学, 2002, 17(4): 393~397
Zhang X, Sun P, Wang H F. *J of Experimental Mechanics*, 2002, 17(4): 393~397
- 张熹, 孙平, 金华. 三维电子散斑干涉法在检测残余应力中的应用. 实验力学, 2000, 15(2): 125~131
Zhang X, Sun P, Jin H. *J of Experimental Mechanics*, 2000, 15(2): 125~131
- 孙平, 王海锋, 张熹, 等. 三维电子散斑干涉技术及其应用研究. 光学学报, 2003, 23(7): 840~844
Sun P, Wang H F, Zhang X, et al. *Acta Optica Sinica*, 2003, 23(7): 840~844
- Sun Ping, Zhang Xi, Wang Haifeng. Study on combined method based on 3-D ESPI. *Chinese Journal of Lasers*, 2002, B11(3): 189~192
- 孙平, 张熹. 电子散斑干涉中相移技术研究. 光电子激光, 2001, 12(11): 1174~1176
Sun P, Zhang X. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2001, 12(11): 1174~1176
- Jingwei Tong. Automatic analysis of three-dimensional displacement field using ESPI. *Optical and Lasers in Engineering*, 1997, 26(6): 515~529
- Petzing J N, Tyrer J R. Recent development and applications in electronic speckle pattern interferometry. *J of Strain Analysis*, 1998, 33(2): 153~169

The Technique of Displacement Separation in ESPI and Its Application in 3-D Displacement Measurement

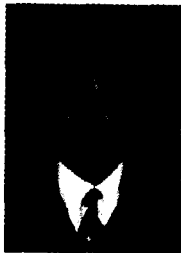
Sun Ping, Zhang Li, Tao Chunxian

College of Physics and Electronics, Shandong Normal University, Jinan 250014

Received date: 2004-11-17

Abstract A novel method for 3-D displacement measurement is presented in the paper by using isolating out-of-plane displacement from in-plane displacement. A reference is added to the dual-beam symmetrical illumination system and shared by the two illumination beams, which are separately used to illuminate the test object. With the help of phase-shifting techniques, two phase maps that include out-of-plane and in-plane displacement can be obtained. Theoretical analysis shows that out-of-plane displacement can be separated from in-plane displacement only by simple calculation of phase. In perpendicular the in-plane displacement can be measured directly by dual-beam symmetrical illumination system. When the technique is applied to an oil pump in diesel engine, 3-D displacement fields of the pump are successfully measured. It shows that this technique provides a new effective approach to 3-D displacement measurement and a new method for intensity and rigid of diesel engine elements analysis.

Keywords Physics optics; Electronic Speckle Pattern Interferometry (ESPI); Phase-shifts; Displacement measurement; Oil pump



Sun Ping received his B. S. degree in 1984 and M. S. degree in 1992. Then he received his Ph. D. degree in 2003. His research interests are digital image processing, shape measurement of thin shells, nondestructive testing, and experimental stress analysis.