

电子散斑干涉仪的设计及应用

俞 蕾 冀 平 宋建力 胡正国 宋菲君

陆伯祥 Eggers H A

(中国科学院大恒公司光电子实验室)

(联邦德国JURID公司光电子实验室)

摘要: 本文介绍了具有动态范围大、可见条纹级别高等特点的新一代电子散斑干涉仪(ESPI)的设计原理、特点,并给出了实时相减法振动测量和变形测量的结果。

Design and application of electronic speckle pattern interferometer

Yu Lei, Ji Ping, Song Jianli, Hu Zhengguo, Song Feijun

(Optoelectronics Laboratory of China Da Heng Corporation)

Lu Boxiang, Eggers H A

(Optoelectronics Laboratory of JURID GmbH of Germany)

Abstract: A new type of electronic speckle pattern interferometer (ESPI) is described in this paper which has the characteristics of large dynamic range and high order of visible fringes. The experiment results of vibration and deformation test by use of real-time subtraction are given.

一、引 言

电子散斑干涉仪(Electrical Speckle Pattern Interferometer)的发展已有近20年的历史^[1],它的主要应用在于变形分析,振动振型测定等方面^[2,3]。时间平均法则是振动分析的主要方法,与全息法相比,它具有准实时分析的优点,而且免除了全息干板的处理。然而传统的电子散斑干涉仪具有严重的缺陷,条纹可见度极低,通常只能看见2~4条,有报道说最高可见条纹数为7条。

近年来,一些先进的光电子器件先后引入电子散斑干涉仪,包括大功率半导体激光器、二维电荷耦合器件、光纤、自聚焦透镜、线性压电位相调制器等。微机数字图象处理技术的最新发展,也给散斑图象信号的处理提供了强有力的支持。与此同时,一些新的处理方案,例如,时间平均相减^[5,6],相移补偿^[7]等被开发出来,形成了新一代的光电混合处理系统。除了准实时处理的特点以外,还具有动态范围大,条纹清晰,可见级别高,空间带宽积大等优越性。特别是电子散斑干涉仪几乎不要求特别的隔振设备,因此具有很大的实用价值。

本文介绍了电子散斑干涉仪的设计特点,并根据时间平均相减法给出了典型的测量结果。

二、系统总体结构和特点

电子散斑干涉仪的光学系统如图1a所示。从半导体激光器LA辐射的具有椭圆截面的激光束,经柱面镜 C_1 、 C_2 后形成圆形截面光束,经分光镜BS分为两束,其中物光经连续可调扩束镜 L_1 、 L_2 及反射镜 M_2 、 M_3 照亮物平面D,形成散斑场,再通过连续变焦物镜ZOOM成象在电荷耦合器件CCD表面,形成象面散斑。参考光经过线性压电陶瓷器件P进行相移后,再由连续可变中性减光板A衰减,经自聚焦透镜SF进入单模保偏光纤OF,物光和参考光经棱镜BC合成后照亮电荷耦合器件CCD器件,形成干涉场。外光源(Ar^+ , YAG, He-Ne, 红宝石激光器)则可通过孔径光阑S进入系统。反射镜 M_1 用于内、外光源转换。

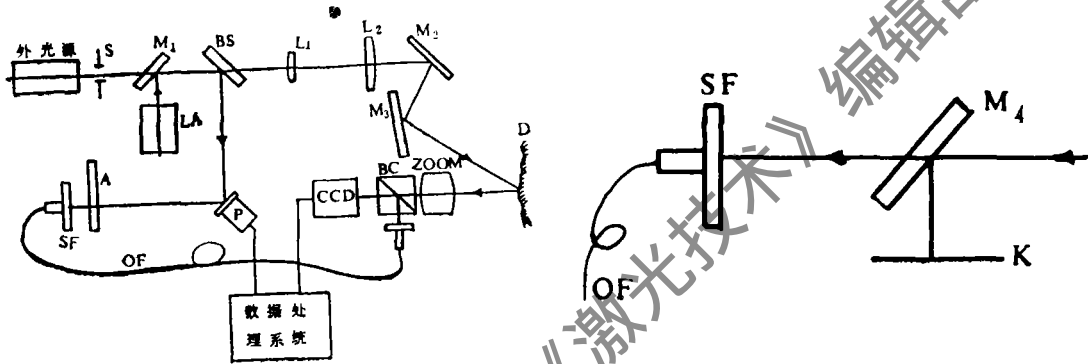


图1 系统总体结构

a—电子散斑干涉仪的光学系统 b—光电对准机构

这样的光路设计具有以下特点

1. 使用半导体激光器作为内光源,不但体积小,而且具有很长的相干长度,特别适于对处于不同距离的物体进行测量。利用转换装置,很容易使系统在外光源下工作。除了使用氩离子激光器外,还可用YAG、红宝石等脉冲激光器,可进行动态测试。

2. 物光光路中由于采用了连续变化的扩束机构,所以,被照明范围可在 $\phi 1\text{mm} \sim \phi 180\text{mm}$ 内连续变化。

3. 采用自聚焦透镜及保偏振光纤系统导引参考光,不但给调节带来方便,而且确保了参考光的偏振度。当它与物光合成后,形成的干涉条纹反差度明显高于采用普通单模光纤的系统。

4. 在参考光路中还有光电对准机构,如图1b所示,当反射镜 M_4 处于工作位置时,参考光反射到四象限探测器K上,它的中心与自聚焦透镜关于 M_4 共轭。K的输出指示了参考光偏离自聚焦透镜光轴的程度。

5. 采用高分辨率的电荷耦合器件来探测干涉图象,具有灵敏度高,空间带宽积高的优点。数字图象处理系统,能实时处理动态过程的干涉条纹。进一步的处理可在微机中实现,实验结果用激光打印机输出。

三、时间平均相减法测振原理

照射到电荷耦合器件CCD表面的物光 E_0 和参考光 E_r 可分别表示为

$$E_0(x, y, t) = u_0(x, y, t) \exp(-i2\pi\gamma_0 t) \quad (1)$$

$$E_r(x, y, t) = u_r(x, y) \exp(-i2\pi\gamma_0 t) \quad (2)$$

式中, $u_r(x, y)$ 可进一步表示为

$$u_r(x, y) = A_r \exp[i\varphi_r(x, y)] \quad (3)$$

A_r 为参考光振幅, $\varphi_r(x, y)$ 是参考光的规则位相分布。 $u_0(x, y, t)$ 则可表示为

$$u_0(x, y, t) = A_0(x, y) \exp[i\varphi(x, y, t)] \quad (4)$$

式中, A_0 和 φ 是物光的振幅和位相, 均具有随机性。 $\varphi(x, y, t)$ 可表示为

$$\varphi(x, y, t) = 2\pi/\lambda qa(x, y, t) + \varphi_0(x, y) \quad (5)$$

式中, a 为物体的离面位移, q 为光束的几何参数, 当垂直照射时 $q=2$ 。 φ_0 是散斑场中与时间无关的部分。

在探测过程中, 所能获得的只是 E_0 和 E_r 的系综平均值 $\langle |E_0|^2 \rangle$ 和 $\langle |E_r|^2 \rangle$ 快速变化的时间因子 $\exp(i2\pi\gamma_0 t)$ 在平均值中不出现。其次, 电荷耦合器件CCD是平方律光强探测器, 它的输出信号正比于光强

$$I(x, y, t) = A_0^2 + A_r^2 + 2A_0 A_r \cos[(2\pi/\lambda)qa(x, y, t) + \varphi_0 - \varphi_r] \quad (6)$$

设物体作简谐振动, 一般说来振动周期总是远小于CCD的帧扫描时间周期 τ , 因此在CRT上出现的是在 τ 内的积分平均值。

$$I(x, y) = A_0^2 + A_r^2 + (2A_0 A_r / \tau) \int_{(t)} \cos[(2\pi/\lambda)qa(x, y, t) + \varphi_0 - \varphi_r] dt \quad (7)$$

在简谐振动的假设下, 离面位移

$$a(x, y, t) = a_0(x, y) \sin(\omega t + \varphi_0) \quad (8)$$

代入(5)式得到

$$I(x, y) = A_0^2 + A_r^2 + 2A_0 A_r \cos(\varphi_0 - \varphi_r) J_0[(2\pi/\lambda)qa_0(x, y)] \quad (9)$$

式中, J_0 为零阶贝塞尔函数。经滤波和检波后, 在CRT上出现。

$$I(x, y) = A_0^2 + A_r^2 + 2A_0 A_r |\cos(\varphi_0 - \varphi_r)| \cdot |J_0[(2\pi/\lambda)qa_0(x, y)]| \quad (10)$$

式中, $|\cos(\varphi_0 - \varphi_r)|$ 为随机散斑场的表现, $|J_0|$ 则是随 x, y 缓变的函数, 正是它调制了散斑场。由(8)式表示的振幅等值线条纹常常淹没在本底 $A_0^2 + A_r^2$ 中, 大大降低了条纹的能见度。

运用时间平均相减技术, 两次采样, 并在其间参考光中引入一个常数位相差 $\Delta\varphi$, 则有

$$I_1 = A_0^2 + A_r^2 + 2A_0 A_r |\cos(\varphi_0 - \varphi_r)| |J_0[(2\pi/\lambda)qa_0(x, y)]| \quad (11)$$

$$I_2 = A_0^2 + A_r^2 + 2A_0 A_r |\cos(\varphi_0 - \varphi_r - \Delta\varphi)| |J_0[(2\pi/\lambda)qa_0(x, y)]| \quad (12)$$

再将两次采样的数据相减, 当 $\Delta\varphi = (2m+1) \cdot \pi/2$, $m=0, \pm 1, \pm 2 \dots$ 时, 结果为

$$I = I_1 - I_2 = 2A_0 A_r |\cos 2(\varphi_0 - \varphi_r)| |J_0[(2\pi/\lambda)qa_0(x, y)]| \quad (13)$$

在运算中用到近似: $|\cos \alpha| \approx \cos^2 \alpha$ 。直流本底完全消除, 从而获得很高的条纹反差, 提高了可见条纹的级别。上式还表明相减的结果使散斑场的空频提高了一倍, 使颗粒度变细, 从另一方面提高了条纹的可见度。

四、实验结果

图2为实时法干涉条纹。物光照在一个刚性圆盘(汽车刹车盘)上。先采集一幅干涉图,存在图象处理系统中,然后连续采样,与第一幅干涉图相减,同时在物光下放一个热源(手掌)。由该热源引起的空气折射率的扰动形成不规则的干涉条纹。可在CRT上实时观察并记录。

图3、图4为两次采样相减干涉条纹图,在两次采样之间在刹车盘上加一个很小的负载,记录下刹车盘变形的干涉条纹。

图5~图7为刹车盘激振时记录的用时间平均相减法得到的振动条纹图。可以看到十分清晰的振动模式。

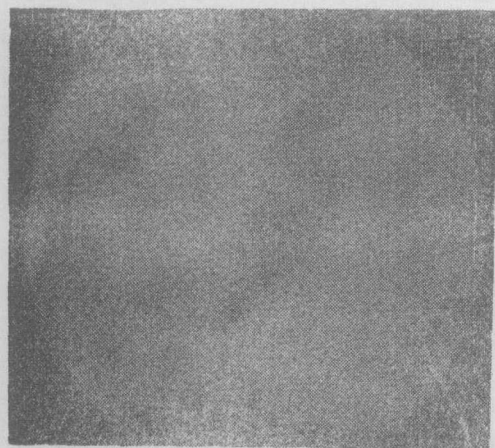


图2 实时法干涉条纹

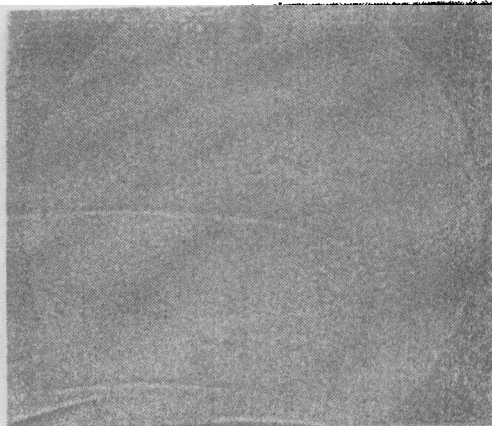


图3 采样相减干涉条纹



图4 采样相减干涉条纹



图5 振动条纹图

以上实验结果表明,系统的灵敏度很高。由于采用相减技术,背景光的影响大大减弱,又因散斑的横向颗粒度变细,离散效应明显减弱。结果干涉条纹的反差度和可见条纹级别大大提高,干涉图样相当清晰。

本产品是由联邦德国JURID公司委托开发的,并得到中国科学院的支持。在此表示感谢!

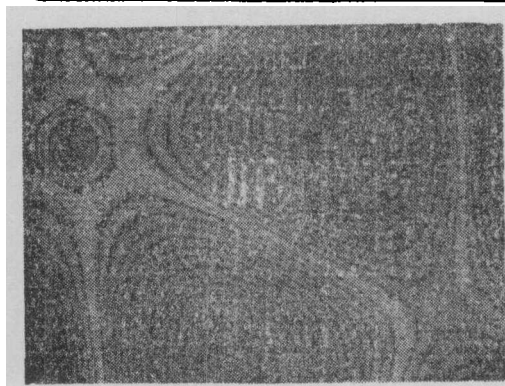


图6 振动条纹图

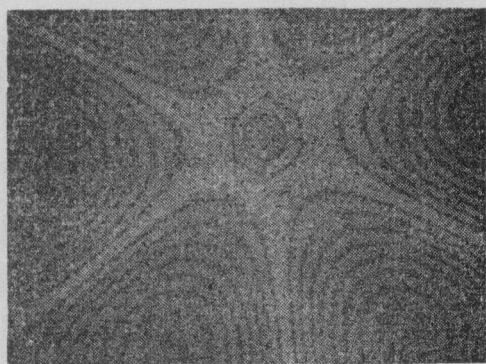


图7 振动条纹图

参 考 文 献

- [1] Butters J N, Leendertz J A. Speckle pattern and holographic techniques in engineering. *Opt & Laser Technol*, 1971; 3 (1):26
- [2] Jones R, Wykes C. *Holographic and speckle interferometry*. London: Cambridge University Press, 1983
- [3] Lokberg O J. The present and future importance of ESPI. *Proceedings SPIE*, 1987; 746: 86
- [4] Butters J N, Jones R, Wykes C. *Speckle metrology*. New York: Academic Press, 1978: 111
- [5] Lu Boxing, Yang Xiangyang, Abendroth H *et al.* Time-average subtraction method in electronic speckle pattern interferometry. *Optics Commun*, 1989; 70 (3): 177
- [6] Davies J C, Buckberry C H, Jones D C *et al.* Development and application of a fibre optic electronic speckle pattern interferometer (ESPI). *Proceedings SPIE*, 1987; 863: 194
- [7] Creath K. Phase-shifting speckle interferometry. *Appl Opt*, 1985; 24 (18) : 3053

*

*

*

作者简介: 俞 蕾, 女, 1961年6月出生。工程师。现从事激光技术和光学仪器的应用研究。

冀 平, 女, 1961年12月出生。工程师。现从事激光信息处理研究。

宋建力, 男, 1953年5月出生。工程师。现从事电子技术和微机图象处理应用研究。

胡正国, 男, 1962年出生。硕士生。现从事激光技术的应用研究。

宋菲君, 男, 1942年出生。高工, 国家级专家。现从事近代光学科学研究。

收稿日期: 1991年5月14日。 收到修改稿日期: 1991年7月16日。