

文章编号: 1001-3806(2014)01-0049-05

## 反远距成像相移剪切散斑干涉检测系统

朱 猛, 李翔宇, 李秀明, 黄战华

(天津大学 精密仪器与光电子工程学院 光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072)

**摘要:** 为了扩大传统剪切散斑干涉仪的检测视场,设计了一种反远距成像迈克尔逊式剪切散斑干涉系统。采用负透镜组与标准成像镜头组成反远距成像系统,分析了光路的成像参量,并利用 ZEMAX 软件进行了模拟;讨论了发散光路时间相移的非均匀性,采用等步长相移算法进行相位解算可以弥补非均匀误差;并对中心加载的橡胶平板进行了测量。结果表明,该系统能有效地扩大成像视场,采用3片焦距为-75mm的平凹镜片可以实现70°视场角的散斑干涉检测,通过调整平凹镜片的焦距和数量可以实时调整成像视场。

**关键词:** 激光技术;散斑干涉;反远距成像;视场

中图分类号: TN247

文献标志码: A

doi:10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2014.01.011

## Phase shifting and shearing speckle interferometry system with retro-focus imaging

ZHU Meng, LI Xiangyu, LI Xiuming, HUANG Zhanhua

(Key Laboratory of Opto-electronics Information Technology of Ministry of Education, College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** A retro-focus Michelson type shearing speckle interferometry imaging system was proposed to extend the field of view (FOV) for a speckle shearing interferometer. The retro-focus imaging system includes negative lens group and television lens. Analysis of the optical setup was taken out and the simulation was demonstrated by ZEMAX software. The phase shifting unit was a plane mirror attached with a piezo, the non-uniform phase difference caused by the tilted mirror was discussed. The equal-step Carre algorithm was used to calculate the phase map so that the non-uniform phase error was avoided. The experiment results of center loaded metal plane show this method can achieve large FOV detection system. A 70° FOV imaging system can be implemented by using three plano-concave lenses with -75mm focus length and the FOV can be adjusted by changing the focus length and number of lenses.

**Key words:** laser technique; speckle interferometry; retro-focus imaging; field of view

### 引言

在激光无损检测领域中常采用剪切散斑干涉法进行形变和振动的检测,被相干光照明的物面发生形变,形变转化为像面上散斑的变化,通过二次曝光进行相减或相关运算测量变形物理量<sup>[1-5]</sup>。按照干涉形成过程将剪切散斑干涉技术分为散斑参考光和

平面参考光两种。散斑参考光是一种自参考的干涉方式,具有照明光路和干涉光路可以分离的优点,在实际中应用较为广泛。为了计算出相位分布,常采用相移技术与剪切干涉相结合,其中最常用的光路就是迈克尔逊式时间相移干涉光路。将迈克尔逊干涉仪中一个平面镜转动微小角度实现剪切干涉,而另一个平面镜则用来做相移元件,将压电陶瓷与平面镜绑定,通过改变参考光的光程实现步进相移。传统的迈克尔逊干涉形式受光路结构的影响,其检测视场有限<sup>[6]</sup>。为了满足检测的需要,特别是大尺寸全场测量,研究大视场检测成像光路有重要意义。一种基于4f系统所设计的大视场散斑成像系统采用广角镜头与4f中继成像的方式扩大检测视场<sup>[7-8]</sup>,但其结构较复杂、成本较高,且整机封装尺寸

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61275009);国家科技支撑计划资助项目(2007BA000013);教育部博士点基金资助项目(20110032120059)

作者简介:朱 猛(1984-),男,博士后,现主要从事全息与散斑检测技术的研究。

E-mail: zhumeng@tju.edu.cn

收稿日期:2013-03-25;收到修改稿日期:2013-04-10

也较大。

作者综合考虑检测视场和检测精度的要求,设计了一种反远距成像的迈克尔逊剪切散斑干涉系统,采用负透镜组和成像透镜作为成像组合,在二者中插入迈克尔逊剪切干涉光路。这种结构封装尺寸小、结构简单。利用软件模拟计算了反远距大视场成像系统的参量,分析了大视场发散光经过迈克尔逊干涉仪带来的相移非均匀性误差,采用等步长相移算法可有效地抑制相移非均匀性带来的影响。最后给出了大视场检测与传统检测的结果对比。

### 1 光路结构

采用迈克尔逊式光路作为相移剪切散斑干涉系统的基本原型,其光路变换灵活、结构紧凑,适于集成化。如图 1 所示的迈克尔逊式的相移剪切散斑干涉光路,两个平面镜  $M_1$  和  $M_2$  分别作为相移镜和剪切镜使用,由物面散射的散斑光场中  $A$  点出射光线经过负透镜组入射到分束镜 (beam splitter, BS) 上,光束分为参考光和物光两束并经过成像镜头  $L_2$  错位成像于  $A_1$  和  $A_2$  两点。从几何光学角度考虑,传统的迈克尔逊式光路没有前组镜头,成像视场角受分光棱镜的孔径限制,后组镜头不适合用短焦成像镜头,从而限制了检测面积。

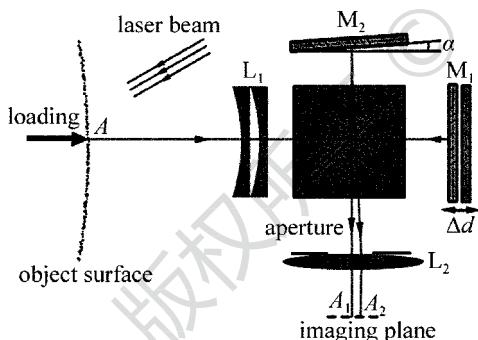


Fig. 1 Optical path of retro-focus imaging Michelson interferometry

采用反远距成像光路是获得广角成像的常用方法,也称为广角长工作距系统。其特点是后截距大于焦距,分为前组和后组两部分,前组一般为负透镜组,后组一般为正透镜组。前后组之间的距离应满足插入迈克尔逊光路的尺寸要求,因此光路较长,后组成像物镜适合采用长焦距,一般 25mm ~ 35mm 的成像物镜视场角在 20° 左右,前组为多片负透镜的组合,要实现整体视场角为 70°,前组组合的角放大率至少为 3。一般单负透镜的角放大率在 1.3 ~ 1.5 之间,所以至少需要两片负透镜,要实现更大视场角可以增加负透镜的数量。

前组采用 3 片焦距为 -75mm 的平凹镜片,成像物镜焦距为 25mm,分光棱镜和平面反射镜的孔径为 25.4mm,所有玻璃材料均为 BK7。将分光棱镜展开并忽略反射镜,在 ZEMAX 软件中模拟光路结构,如图 2 所示。前组镜片和分光棱镜之间的距离为 10mm,分光棱镜与平面反射镜之间的距离均为 2mm。后组成像镜头的孔径光阑用于控制散斑尺寸,实现灵敏度和检测精度可调。

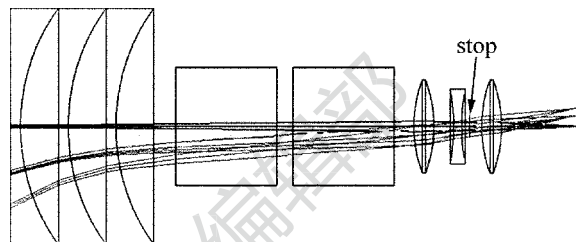


Fig. 2 Simulation optical setup results by ZEMAX

图 3 中模拟了 2 片 ~ 4 片成像系统的点列图输出,使用 6.4mm × 8.53mm CCD 作为图像采集单元。从模拟结果中可以看出,采用 3 片平凹镜片的半视场角达到 35°,采用 4 片镜片可以达到 50° 以上。视场角过大会使成像亮度不均匀,导致散斑检测结果的对比度下降。综合考虑,作者采用 3 片式结构作为大视场检测的实验方案。

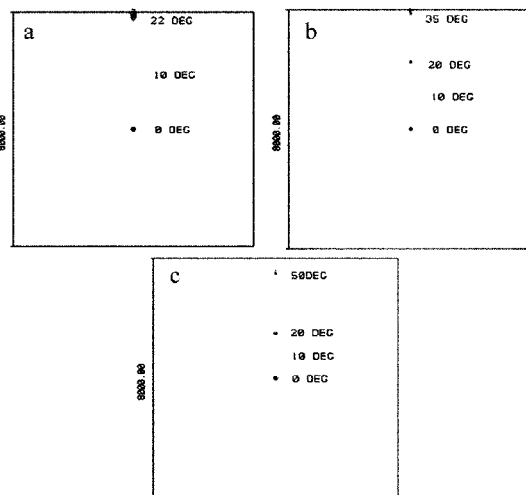


Fig. 3 Simulation spot diagram results by ZEMAX

a—two plano-concave lens b—three plano-concave lens c—four plano-concave lens

### 2 相位计算与误差

相移误差的来源包括了线性关系的误判、非线性灵敏度和相移非均匀性<sup>[9]</sup>。压电陶瓷驱动的平面镜相移的方法在平面镜位移的同时伴随着倾斜效应,相移误差有两种来源:即光线平行度误差与平面

镜倾斜误差。由于采用了反远距成像,光线将发散入射至平面镜,所以矫正平面镜的倾斜角也无法弥补相移的非均匀性。

如图 4a 所示的平面镜反射光路,光线  $I$  以  $\alpha$  角入射至平面镜,  $I_1$  和  $I_2$  为平面镜位移距离  $d$  前后的反射光线。光线移动前后的相位差为:

$$\varphi' = \frac{2\pi}{\lambda} \left( 2 \frac{d}{\cos\alpha} - 2d \tan\alpha \sin\alpha \right) = \frac{4\pi d}{\lambda} \cos\alpha \quad (1)$$

式中,  $\lambda$  为入射光波长。

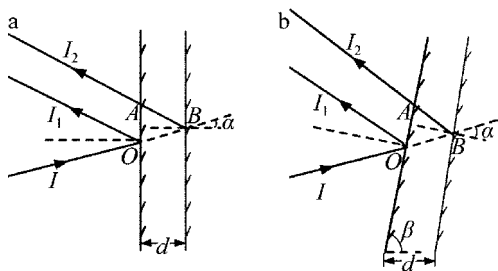


Fig. 4 Schematic of phase shift error  
a—vertical plane mirror b—tilted plane mirror

可见当光线入射到平面镜上且有一定的发散角时,产生的相移非均匀性与  $\cos\alpha$  成正比,若采用标准的 3 步或 4 步相移的方法会导致很大的计算误差。考虑更一般的情况(如图 4b 所示),当平面镜有一倾角  $\beta$  时,修改后的相移公式为  $\varphi' = 4\pi d \lambda^{-1} \times \cos\alpha \sin\beta$ 。可以通过调整孔径的大小限制发散角度,但非均匀性仍存在,且对相位计算影响较大。当倾斜角  $\beta$  和光线与平面镜夹角  $\alpha$  固定后,相移量是随着  $d$  线性变化的。虽然像面上各点的相移量不同,但每一点随平面镜位移产生的相移是固定的,采用均匀性误差补偿的相位解算方法可以弥补光路结构的不足<sup>[10-11]</sup>,其中运算速度快、解法简单的就是 Carre 算法。采用 Carre 算法能够有效地抑制光线不平行带来的相移不均。只要平面镜角度固定,相位与位移是线性关系,这样就保证了相移量的固定。但不同点处的相移量不同会导致非线性误差抑制能力的不同。

将相移量看作是未知量,如果认为每个相移点之间的间隔是相等的,某一时刻像面上任意一点的光强表示为:

$$I_k(i, j) = I_0(i, j) \{ 1 + v(i, j) \cos[\varphi(i, j) + k\delta(i, j)] \} \quad (2)$$

式中,  $I_0$  和  $v(i, j)$  分别为平均光强和调制系数,  $\varphi(i, j)$  为待求相位,  $\delta(i, j)$  为相移量。可以将相位项看作是以  $k$  为离散时间变量、且以  $\delta(i, j)$  为周期的

余弦函数序列,上式进一步写为:

$$I_k(i, j) = A_1(i, j) + A_2(i, j) \cos[k\delta(i, j)] + A_3(i, j) \sin[k\delta(i, j)] \quad (3)$$

其中:

$$\begin{cases} A_1(i, j) = I_0(i, j) \\ A_2 = -I_0(i, j) v(i, j) \cos\varphi(i, j) \\ A_3 = I_0(i, j) v(i, j) \sin\varphi(i, j) \end{cases} \quad (4)$$

由(4)式得知所求相位的正弦  $\tan\varphi(i, j) = -A_3/A_2$ ,当  $k$  分别为 1, 2, 3, 4, 且  $\delta(i, j)$  为一常量时,可以得到测量时刻  $t$  的散斑场相位分布为:

$$\varphi + \frac{3\delta_k}{2} = \arctan \left[ \text{sign}(I_1 - I_2) \times \frac{\sqrt{(I_1 + I_2 - I_0 - I_3)(3I_1 - 3I_2 - I_0 - I_3)}}{I_1 + I_2 - I_0 - I_3} \right] \quad (5)$$

当形变发生前后,由(5)式计算形变导致的相位差可以消去  $3\delta_k/2$  项,两次测量时刻  $t_1$  和  $t_2$  之间的相位差  $\Delta\varphi = \varphi_{t_1} - \varphi_{t_2}$ ,其中  $\varphi_{t_1}$  为初始状态相位分布,  $\varphi_{t_2}$  为形变后相位分布。

### 3 实验

#### 3.1 标定实验

准确地标定压电陶瓷线性区间是采用 Carre 算法的必要前提<sup>[11]</sup>,常用的压电陶瓷位移测量分为接触式和非接触式两种,非接触的光学方法有激光干涉法和图像相关成像法<sup>[12-13]</sup>,由于压电陶瓷的位移与机械安装方式有直接关系,所以作者直接采用迈克尔逊干涉光路进行标定。将前组和后组镜头去

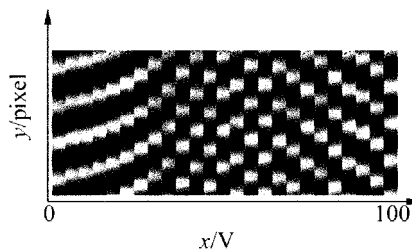


Fig. 5 Interferogram serials with voltage varies from 0V to 100V

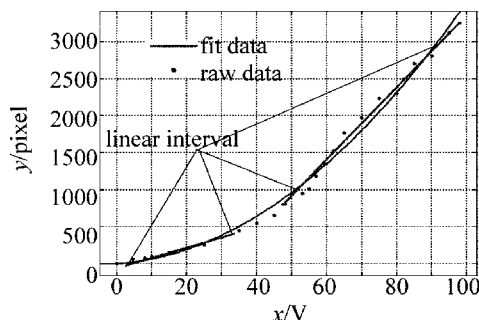


Fig. 6 Displacement curves with voltage varies from 0V to 100V



掉,用波长为 532nm 准直激光照明,连续变换驱动电压得到不同电压驱动条件下的干涉图样序列如图 5 所示。因为只标定线性区间,可以直接采用位移像素数作为衡量标准,对干涉图序列抽取 1 维正弦曲线,通过拟合求出条纹位移得到位移像素数与电压之间的关系,如图 6 所示。

图 6 表明位移存在分界区域,0V ~ 40V 和 50V ~ 100V 的位移曲率不同。条纹周期为 276 像素,考虑位移较大带来的回程误差增大,Carre 算法在相移  $\pi/2$  以上精度较高,选择 50V ~ 70V 区间作为压电陶瓷电压驱动范围。

### 3.2 测量实验

采用了传统迈克尔逊干涉光路和大视场成像光

路分别进行实验对比,如图 1 中的光路结构,去掉前置镜组,单独使用后组成成像镜头进行测量。对四周固紧的橡胶板进行加载,橡胶板直径为 5cm。释放应力后测量橡胶板恢复形变。成像单元采用 1280pixel × 960pixel,6.4mm × 8.53mm 的 CCD。成像距离为 320mm。

物面形变过程中实时采集 4 幅光强图计算相位分布,不同时刻所测量的形变包裹相位如图 7a 所示;加入前置镜组,准确调焦后,得到的大视场检测结果如图 7b 所示。图 7b 中所测量 5cm 的物面形变清晰可见,但如果视场过大会降低检测分辨率,导致解包裹误差增大。本文中所采用的方法适合大面积的检测情况,检测时需综合考虑分辨率和检测面积。所测结果中噪声较大,这是由物面动态形变导致的。时间相移过程中物面发生了变化,这也是时间相移在动态测量中使用的局限。作者下一步工作将研究用于动态测量使用的大视场检测方法。

### 4 结 论

利用反远距成像原理,采用迈克尔逊式干涉光路,设计了大视场相移剪切散斑干涉位移检测系统。分析了发散光路带来的相移误差,检测过程中采用等步长相移算法克服了相位非均匀误差。采用干涉法标定压电陶瓷的线性区间并给出了电压区间选择的标准。对比了传统检测光路和大视场成像光路的检测结果。需要更大视场角的条件下可以增加前组镜片的数量或进一步减小单个负透镜的焦距。在满足分辨率要求的前提下,使用大视场成像光路可以有效地扩大检测面积,实现全场、快速的缺陷检测。

### 参 考 文 献

- [1] SUN P, HAN Q, WANG X F, *et al.* Technique of 3-D carrier modulation in ESPI and its Application in displacement measurement of diesel engine [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, 36(7): 1326-1330 (in Chinese).
- [2] XU X, WANG K F, GU G Q, *et al.* Measurement of internal material flaws based on out-of-plane displacement digital speckle pattern interferometry [J]. *Laser Technology*, 2012, 36(4): 548-552 (in Chinese).
- [3] YU G, WANG Sh G, YU J H. Technology of digital speckle pattern interferometry and its applications [J]. *Laser Technology*, 2002, 26(3): 234-240 (in Chinese).
- [4] SUN X, ZHAO Zh M. Researching of the influence on metal material strain after embedding SMA by using a speckle shearing photography [J]. *Laser Technology*, 2000, 26(3): 82-84 (in Chinese).

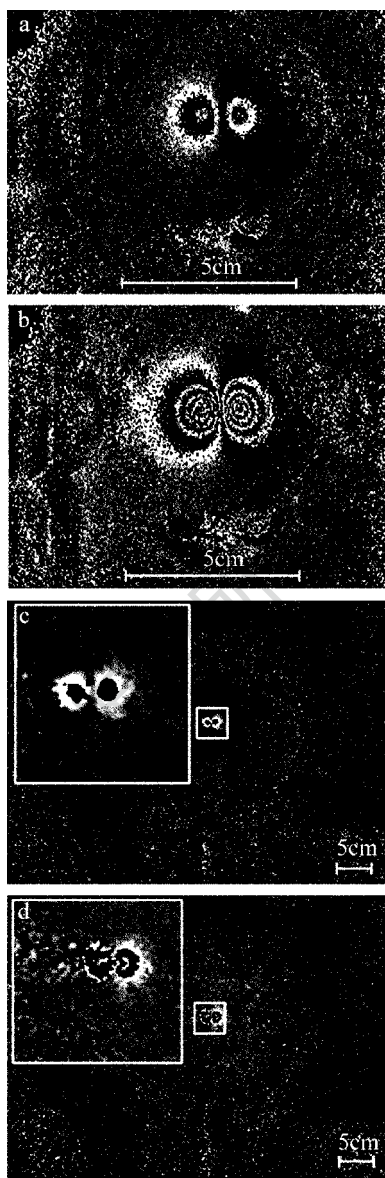


Fig. 7 Wrapped phase map of centre loaded  
a—traditional method b—large viewing field method

- [5] SERVIN M, CUEVAS F J. A novel technique for spatial phase-shifting interferometry [J]. *Journal of Modern Optics*, 1995, 42(9): 1853-1862.
- [6] DESPAIN A M, BAKER D J, STEED A J, *et al.* Extended-field large-aperture interferometer-spectrometer for airglow surveys[J]. *Applied Optics*, 1971, 10(8): 1870-1876.
- [7] WU S J, HE X Y, YANG L X. Enlarging the angle of view in Michelson interferometer-based shearography by embedding a  $4f$  system[J]. *Applied Optics*, 2011, 50(21): 3789-3794.
- [8] CAI Ch Q, HE L F. Improved Mach-Zehnder interferometer based shearography [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2012, 50(12): 1699-1705.
- [9] KAUFMANN G H, GALIZZI G E. Phase measurement in temporal speckle pattern interferometry: comparison between the phase-shifting and the Fourier transform methods [J]. *Applied Optics*, 2002, 41(34): 7254-7263.
- [10] CARRÉ P. Installation et utilisation du comparateur photo-électrique et interférentiel du Bureau International des Poids et Mesures [J]. *Metrologia*, 1966, 2(1):13-23 (in French).
- [11] HIBINO K, OREB B F, FARRANT D I. Phase-shifting algorithms for nonlinear and spatially nonuniform phase shifts [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1997, A14(4): 918-930.
- [12] ZHU M, HUANG Zh H, WANG X J, *et al.* Piezoelectric displacement characteristic curve measurement using dynamic speckle correlation[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(4):844-849(in Chinese).
- [13] DAVILA A, LANDGRAVE J E A, GARNICA G. In situ calibration of a Michelson type, speckle shearing interferometer; wobbling mirror effect[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2007, 45(1):70-76.

《激光技术》编辑部

版权所有 ©