

基于四分之一波片的菲佐型同步移相干涉测量方法

蒋超 郭仁慧 张辉钦 周翔 郑东晖 陈磊

南京理工大学电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094

摘要 为了实现干涉测量平面的抗振,提出了一种同步移相干涉测量方案并搭建了实验装置。整个测量系统在菲佐移相干涉仪的基础上,利用四分之一波片作为参考镜,获得一对正交偏振光,经过棋盘相位光栅分光,利用光阑选取对于理想光栅衍射效率一致的 $(\pm 1, \pm 1)$ 级衍射光作为测量分光路,使之先后通过相位延迟阵列和偏振片获得4幅移相量依次为 $\pi/2$ 的干涉图。按照传统的4步移相算法,对被测波面进行了复原。分析了光强畸变和移相误差对系统测量误差的影响。与泰曼型同步移相干涉测量相比,该方案可以简化系统结构,减小系统误差,并且更易装校,更适合用于平面的测量。

关键词 测量; 光学测量; 菲佐干涉仪; 同步移相; 四分之一波片; 光栅

中图分类号 TH741 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP53.101203

Method of Fizeau Simultaneous Phase-Shifting Interferometry Based on Quarter-Wave Plate

Jiang Chao Guo Renhui Zhang Huiqin Zhou Xiang Zheng Donghui Chen Lei

School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing,

Jiangsu 210094, China

Abstract For the purpose of anti-vibration for interference measurement of flat surface, a method of simultaneous phase shifting interferometry is proposed in this paper, and the experimental device is set up. Based on Fizeau phase-shifting interferometer and using quarter-wave plate as reference mirror, the whole measurement system acquires a pair of orthogonal polarized light. By using beam splitting of the chessboard phase grating, diffracted beams of $(\pm 1, \pm 1)$ orders are selected by the aperture for the same ideal grating diffracting efficiency as measured beams. The four diffracted beams pass through a phase delay array and a polarizing plate to obtain four interference patterns with phase-shifting of $\pi/2$ respectively. According to the traditional four step phase shifting algorithm, the measured wave front is restored. The influence of light intensity distortion and phase shift error on the system measuring error is analyzed. It can simplify the structure of the system, reduce the system error, make installation the easier and the measurement more suitable for the plane, by comparing to the Twyman simultaneous phase shifting interferometry.

Key words measurement; optical measurement; Fizeau interferometer; simultaneous phase shift; quarter-wave plate; grating

OCIS codes 120.3180; 120.4820; 120.6650

1 引言

移相干涉测量技术在光学测量中占有重要地位,并得到了广泛的应用。目前的移相方式主要有时域移相和同步移相。同步移相干涉技术能够在同一时刻、不同的空间位置得到多幅移相干涉图,因此能够避免振

收稿日期: 2016-06-16; 收到修改稿日期: 2016-06-29; 网络出版日期: 2016-09-20

基金项目: 国家自然科学基金(61405092)

作者简介: 蒋超(1991—),男,硕士研究生,主要从事光干涉测量方面的研究。E-mail: 364323815@qq.com

导师简介: 郭仁慧(1979—),女,博士,副教授,硕士生导师,主要从事光学仪器和光学测试等方面的研究。

E-mail: grhjj@163.com(通信联系人)

动等环境因素带来的影响。Smythe 等^[1]提出了基于棱镜分光,多个电荷耦合器件(CCD)接收的同步移相方案。钱克矛等^[2]与 Kranz 等^[3]提出了各自的光栅分光、偏振移相的同步移相方案,前者使用了一种特殊的二维 Ronchi 光栅分光、偏振片组进行移相;后者将一维光栅分光、四分之一波片(OWP)引入移相。Millerd 等^[4]将全息衍射元件、相位掩模板和微偏振移相阵列运用到同步移相干涉术中。Yoneyama 等^[5]实现了基于微位相延迟阵列的同步移相方案。左芬等^[6]搭建了基于二维光栅分光的同步移相干涉仪,Abdelsalam 等^[7]提出了一种用二维光栅分光和偏振阵列移相的方法。

上述的同步移相方案都使用了泰曼型干涉仪结构,这是因为泰曼型结构中参考光与测试光非共光路部分较多,易获得一对偏振方向正交的参考光与测试光从而实现偏振移相。而非菲佐型干涉仪由于共光路的特点,其参考光和测试光不易分离,如何引入偏振移相成为难点。但菲佐型干涉仪适用于检测平面元件,因此相应的同步移相方案也受到关注。

徐晨等^[8]提出一种基于电流调制半导体激光器的短相干光源、使用光栅分光的菲佐型同步移相干涉仪。曾爱军等^[9]在参考镜外侧镀上双折射薄膜,使得参考光与测试光正交。Millerd 等^[10]利用短相干光源,通过光程匹配得到一对偏振方向正交的相干光作为参考光与测试光,而其他无效光则由于相干长度的限制只是作为背景光进行叠加。Kimbrough 等^[11]提出了一种频移匹配菲佐干涉仪方案。Toyohiko 等^[12]提出一种用高速相机瞬间捕捉几幅不同移相干涉图的方法。

目前的菲佐型同步移相干涉方案都是让共光路状态下的参考光和测试光不满足干涉条件,有短相干光源法和产生正交偏振光等方法,这些方案大多结构复杂,成本较高,有无效的背景光叠加导致干涉图的对比度下降,且有效口径都在 10 mm 以内,对于平面测量还是有很大的局限性。本文提出了一种低成本、易装调、基于菲佐干涉测量系统的同步移相干涉测量方案,并搭建了实验装置,该方案的测量口径可以达到 25 mm,干涉图的对比度好,光能利用率高,系统误差小。本文对实验系统的误差进行了分析,得到了相应的实验数据并对数据进行了处理,恢复了被测波面。

2 原 理

采用的菲佐型同步移相系统如图 1 所示。He-Ne 激光器发出的线偏振光先后经过准直扩束系统(BE)和非偏振分光棱镜(NPBS)入射到四分之一波片上,在四分之一波片面形峰谷值(PV)为 $\lambda/10$ 的前表面反射形成参考光,经过四分之一波片的透射光为测试光。波片快轴方向与激光器出射光的偏振方向夹角为 45° 。测试光入射到被测镜上获取被测面信息并反射,再次经过四分之一波片时振动方向旋转 90° ,与参考光形成一对正交的线偏振光。参考光与测试光经由 NPBS 反射后由相位棋盘光栅分光形成 $(\pm x, \pm y)$ 级次的衍射光,其中 x, y 分别为非负整数。透镜组为一个缩束系统,由 2 片正透镜组成,焦点重合。在透镜的焦平面上设置一个带有 4 个小孔的光阑,仅让 $(\pm 1, \pm 1)$ 级衍射光通过。4 组衍射光经过相位延迟阵列分别获得 $\pi/2, \pi, 3\pi/2, 2\pi$ 的相位延迟量,最后经过与正交线偏振光成 45° 放置的偏振片产生干涉,由 CCD 获取 4 幅干涉条纹图。

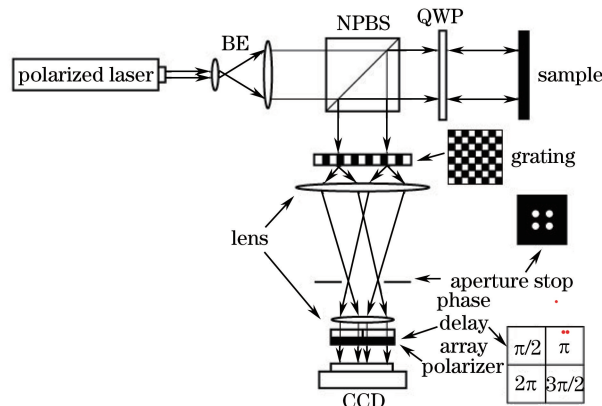


图 1 菲佐型同步移相干涉系统

Fig. 1 Fizeau simultaneous phase-shifting interferometer system

光阑的 4 个小孔呈正方形排列,孔间距 L 为

$$L = 2f' \frac{\lambda}{d}, \quad (1)$$

式中 f' 为光栅后面透镜的焦距, λ 为光源的波长, d 为棋盘光栅的光栅常数。对于理想的相位棋盘光栅可以知道每一组衍射光的衍射效率为 16.43%, ($\pm 1, \pm 1$) 级衍射光的总衍射效率为 65.72%。假设入射光为 $\mathbf{E}_0 = [1 \ 0]^T$, 则参考光 \mathbf{E}_r 与测试光 \mathbf{E}_t 分别为

$$\mathbf{E}_r = \mathbf{R} \cdot \mathbf{E}_0 = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$\mathbf{E}_t = \mathbf{G}_{\lambda/4} \cdot \mathbf{T} \cdot \mathbf{G}_{\lambda/4} \cdot \mathbf{E}_0 = \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{bmatrix} 1 & -i \\ -i & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \exp(i\varphi) \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{bmatrix} 1 & -i \\ -i & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ i \end{bmatrix} \cdot \exp(i\varphi), \quad (3)$$

式中 $\mathbf{G}_{\lambda/4}$ 为 45° 放置的四分之一波片的琼斯矩阵, \mathbf{R} 和 \mathbf{T} 分别是前后表面反射的矩阵, φ 为待测相位信息。正交偏振光先后经过延迟片和偏振片后, 其出射光矢量为

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} \cos^2\theta & \frac{1}{2}\sin 2\theta \\ \frac{1}{2}\sin 2\theta & \sin^2\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \exp(i\delta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ i\exp(i\varphi) \end{bmatrix} = \{\cos\theta + i\sin\theta\exp[i(\delta + \varphi)]\} \begin{bmatrix} \cos\theta \\ \sin\theta \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中 δ 是延迟片的延迟量, θ 是偏振片偏振方向与水平方向所成的夹角。当 θ 为 45° 时 CCD 接收到的光强为

$$I = \tilde{\mathbf{E}} \cdot \mathbf{E} = 1 - \sin(\delta + \varphi), \quad (5)$$

δ 依次取 $\frac{\pi}{2}, \pi, \frac{3\pi}{2}, 2\pi$ 得到

$$\begin{cases} I_1(x, y) = 1 - \cos\varphi(x, y) \\ I_2(x, y) = 1 + \sin\varphi(x, y) \\ I_3(x, y) = 1 + \cos\varphi(x, y) \\ I_4(x, y) = 1 - \sin\varphi(x, y) \end{cases}, \quad (6)$$

可得到待测相位为

$$\varphi(x, y) = \arctan \frac{I_2(x, y) - I_4(x, y)}{I_3(x, y) - I_1(x, y)}. \quad (7)$$

3 实验与结果

在光学平台上搭建了一个实验光路, 光源采用线偏振的 He-Ne 稳频激光器, 工作波长 633 nm, 经扩束准直后的有效光束直径为 30 mm。四分之一波片前表面面形为 $\lambda/10$, 后表面镀增透膜。该系统对于偏振态的要求较高, 所以并没有采用分束器(BS)进行分光, 而是选用了 NPBS, 该 NPBS 对偏振态的影响小于 6%, 选用了全局快门、快门可达 10 μ s 的黑白 CCD, 所用相位棋盘光栅的光栅常数 $d = 40 \mu$ m, 光栅后的透镜焦距分别为 200 mm 和 40 mm, 光阑孔间距约为 6.5 mm, 孔径 1 mm, 相位延迟阵列由四分之一波片、半波片、四

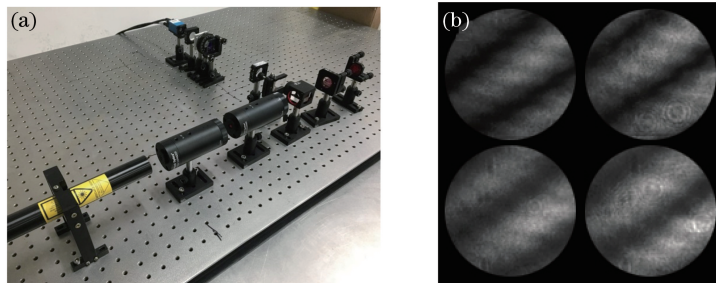


图 2 (a) 实验装置图; (b) CCD 采集的结果图

Fig. 2 (a) Experimental device drawing; (b) result image collected from CCD

分之三波片和全波片组成,实验装置如图 2(a)所示。利用该系统测量一个直径为 25 mm 的待测平面,拍得一幅同时包含 4 个移相干涉图的图像,如图 2(b)所示,可以明显看到移相效果。使用傅里叶变换的方法计算背景图的移相量,并将 4 幅干涉图进行配准,再对干涉图进行移相计算和相位解包,得到被测件的面形误差,结果如图 3(a)、(b)所示。经过计算得出该被测波面的峰谷值为 0.109λ ,均方根误差为 0.014λ 。使用 ZYGO DynaFiz™ 干涉仪测量同一被测平面,结果如图 3(c)所示,得到波面的峰谷值为 0.113λ ,均方根误差为 0.015λ ,结果吻合,从而验证了系统的测量精度。

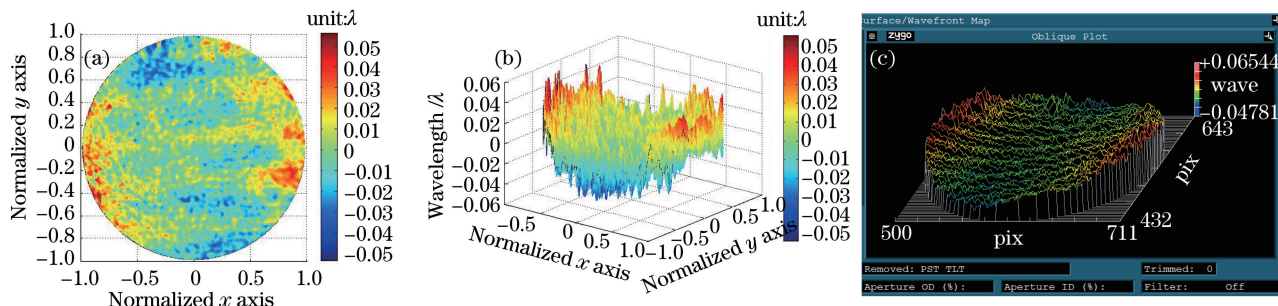


图 3 (a) 实验所得波面结果; (b) 三维效果图; (c) ZYGO 干涉仪所得结果

Fig. 3 (a) Experimental results of wave front; (b) 3D effect graph; (c) result of ZYGO interferometer

4 分析与讨论

研究可知同步移相干涉系统的误差主要由光强畸变和移相误差两大类构成^[13]。光强畸变主要受光栅的质量以及分光路吸收不同的影响,光栅的质量直接影响了 4 个衍射级上的衍射效率,导致光强分布不均,可以由高质量的光栅解决这一问题;4 个分光路经过了不同的路径,对光的吸收情况都不相同,但对于结果的影响很小,可以忽略不计。文献[14]利用基于相位相关算法(PCA)的干涉图空间位置配准方法建立了图像在空域的平移运动和频域线性相位差变化的对应关系,可以将位置匹配误差控制在 1 个像素以内,因此配准带来的移相误差可以忽略不计。在本实验系统中,产生移相误差的主要原因有以下 3 点:四分之一波片的快轴位置没有准确位于 45° 的位置、偏振片的方位角、相位延迟阵列的移相误差,下面对这些误差进行分析。

4.1 四分之一波片的快轴位置误差

已知快轴与 x 轴成 θ 角的四分之一波片矩阵为

$$\mathbf{G}_{\lambda/4} = \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{bmatrix} 1 - i \cos 2\theta & -i \sin 2\theta \\ -i \sin 2\theta & 1 + i \cos 2\theta \end{bmatrix}, \quad (8)$$

得到的参考光为

$$\mathbf{E}_r = \mathbf{G}_{\lambda/4} \cdot \mathbf{T} \cdot \mathbf{G}_{\lambda/4} \cdot \mathbf{E}_0 = \begin{bmatrix} \cos 2\theta \\ \sin 2\theta \end{bmatrix} \cdot i \exp(i\varphi). \quad (9)$$

假设偏振片的方位角为 45° ,两束光强的振幅相同,可以得到振幅和光强的表达式

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \exp(i\delta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i \exp(i\varphi) \cos 2\theta + 1 \\ i \exp(i\varphi) \sin 2\theta \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \{ i \exp(i\varphi) \cos 2\theta + i \sin 2\theta \exp[i(\delta + \varphi)] \} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (10)$$

$$I = \tilde{\mathbf{E}} \cdot \mathbf{E} = 1 - \cos 2\theta \sin \varphi - \sin 2\theta \sin(\delta + \varphi) + \sin 2\theta \cos 2\theta \cos \delta, \quad (11)$$

δ 依次取 $\frac{\pi}{2}$ 、 π 、 $\frac{3\pi}{2}$ 、 2π 得到

$$\frac{I_2(x, y) - I_4(x, y)}{I_3(x, y) - I_1(x, y)} = \frac{\sin \varphi(x, y) - \cos 2\theta}{\cos \varphi(x, y)}. \quad (12)$$

图 4 显示了波片方位角与移相误差的关系,可以看出移相误差随波片的方位角呈周期性变化。当波片

的方位角为 45° 时, 移相误差为 0。

令

$$\alpha(x, y) = \frac{I_2(x, y) - I_4(x, y)}{I_3(x, y) - I_1(x, y)}, \quad (13)$$

$$\varphi = \arccos\left(\frac{\cos 2\theta}{\sqrt{1 + \alpha^2}}\right) - \beta - \pi, \tan \beta = \frac{1}{\alpha}, \quad (14)$$

手动调节波片的快轴精度在 1° 左右, 对(14)式两边求微分, 并且令 $\theta = \pi/4$, $d\theta = \pi/180$, 有

$$d\varphi = \frac{2\sin 2\theta}{\sqrt{1 + \alpha^2} - \cos^2 2\theta} d\theta, \alpha \in (-\pi, \pi), \quad (15)$$

得出测量的面形误差范围在 $0.0008 \lambda \sim 0.0028 \lambda$ 之间, 所以快轴位置的微小偏移对面形结果的影响可以忽略。

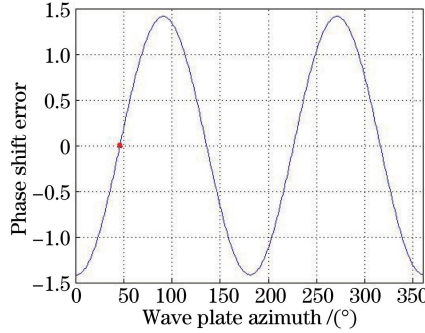


图 4 波片的方位角与移相误差的关系

Fig. 4 Relationship between wave plate azimuth and phase shift error

4.2 偏振片的方位角误差

当偏振片安装时, 方位角有一定的偏差, 令 $\theta = \pi/4 + \Delta\theta$, 此时的光强可以表示为

$$I = \cos^2\left(\frac{\pi}{4} + \Delta\theta\right) + \sin^2\left(\frac{\pi}{4} + \Delta\theta\right) - \sin 2\left(\frac{\pi}{4} + \Delta\theta\right) \sin(\delta + \varphi) = 1 + \cos 2\Delta\theta \sin(\delta + \varphi), \quad (16)$$

由上式可以看出偏振片的方位角误差不会引入移相误差, 只会改变干涉条纹的对比度。由对比度公式可知

$$K = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} = \cos 2\Delta\theta, \quad (17)$$

式中 K 表示干涉条纹的对比度。图 5 展示了在不同 $\Delta\theta$ 偏差下条纹的对比度曲线。

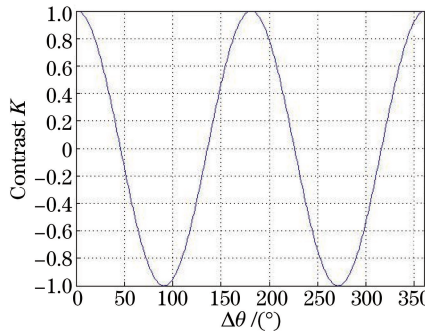


图 5 对比度 K 与 $\Delta\theta$ 的关系

Fig. 5 Relationship between contrast K and $\Delta\theta$

4.3 相位延迟阵列的移相误差

文献[15]分析得出延迟片的移相量与快轴方位角的关系函数为

$$\Delta\delta = \theta \cdot \cos \delta \sqrt{2 - 2\cos \delta} \cdot \left\{ \sin \left[\arctan \left(\frac{\sin \delta}{\cos \delta - 1} \right) - \sin \delta \right] \right\}, \quad (18)$$

由(18)式可以看出延迟量误差由方位角 θ 和一个与延迟量 δ 有关的函数共同决定。图 6 显示了该系数随 δ

的变化情况,所采用的延迟阵列4个子延迟片的延迟量依次为 $\pi/2$ 、 π 、 $3\pi/2$ 、 2π ,可以看到对应的误差传递系数均为0。这表明延迟阵列的实际移相量对快轴方位角的小幅度误差不敏感,使用延迟阵列作为移相器件,实际上用延迟量这种容易标定的固有器件误差替代了偏振片透振角这种不宜标定的装调误差。

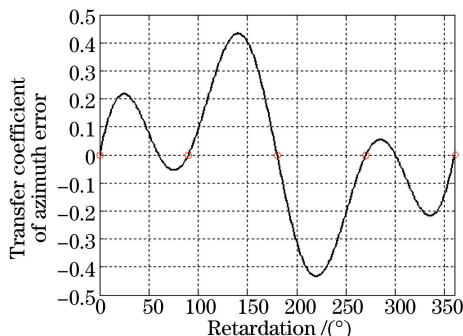


图6 延迟阵列的方位角误差传递系数与延迟量的关系

Fig. 6 Relationship between transfer coefficient of azimuth error and retardation

5 结 论

提出了一种基于四分之一波片的菲佐型同步移相干涉测量系统,并且搭建了实验系统,在共光路的结构下同时获得了4幅移相步长为 $\pi/2$ 的干涉图并恢复了待测波面。相对于泰曼型的同步移相干涉系统,该系统更易装调,系统误差更小,适合用于平面的动态测量,并且能够避免在时域移相干涉测量系统的数据采集过程中振动的影响。分析了菲佐型同步移相干涉系统的各个器件带来的误差,并对实际测量结果进行对比,结果表明该系统可以实现平面的高精度测量。

参 考 文 献

- 1 Smythe R A, Moore R. Instantaneous phase measuring interferometry[C]. SPIE, 1983, 0429: 16-21.
- 2 钱克矛, 缪 泓, 伍小平. 利用干涉云纹偏振相移技术进行动态变形实时测量的方法研究[C]. 第九届全国力学学术会议, 2000.
- 3 Kranz J, Lamprecht J, Hettwer A. *et al.* Fiber optical single-frame speckle interferometer for measuring industrial surfaces[C]. SPIE, 1998, 3407: 328-331.
- 4 Millerd J E, Brock N J. Methods and apparatus for splitting, imaging, and measuring wavefronts in interferometry: US7298497B2[P]. 2007-11-20.
- 5 Yoneyama S, Kikutaa H, Moriwaki K. Simultaneous observation of phase-stepped photoelastic fringes using a pixilated microretarder array[J]. Opt Eng, 2006, 45(8): 083604.
- 6 Zuo Fen, Chen Lei, Xu Chunsheng. Simultaneous phase-shifting interferometry based on two-dimension grating[J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(4): 663-667.
左 芬, 陈 磊, 徐春生. 基于二维光栅分光的同步移相干涉测量技术[J]. 光学学报, 2007, 27(4): 663-667.
- 7 Abdelsalam D G, Yao B L, Gao P, *et al.* Single-shot parallel four-step phase shifting using on-axis Fizeau interferometry [J]. Applied Optics, 2012, 51(20): 4891-4895.
- 8 Xu Chen. Study of dynamic interferometry technology and application[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2009.
徐 晨. 动态干涉测试的理论与技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2009.
- 9 曾爱军, 郭小嫻, 江晓军, 等. 同步移相菲索干涉仪: CN101324421[P]. 2008-12-17.
- 10 Millerd J E, Wyant J C. Simultaneous phase-shifting Fizeau interferometer: US7230718B2[P]. 2007-06-12.
- 11 Kimbrough B, Millerd J, Wyant J, *et al.* Low-coherence vibration insensitive Fizeau interferometer[C]. SPIE, 2006, 6292: 62920F.
- 12 Yatagai T, Jackin B J, Ono A, *et al.* Instantaneous phase-shifting Fizeau interferometry with high-speed pixelated phase-mask camera[C]. SPIE, 2015, 9660: 966018.

- 13 Zuo Fen, Chen Lei. Errors researching for a simultaneous phase shifting interferometer[J]. Optical Technique, 2009, 35(4): 536-540.
左 芬, 陈 磊. 一种同步移相干涉测量系统的误差研究[J]. 光学技术, 2009, 35(4): 536-540.
- 14 Zheng Donghui, Chen Lei, Li Jinpeng, *et al.* Position registration for interferograms and phase-shifting error calibration in dynamic interferometer[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(2): 0226002.
郑东晖, 陈 磊, 李金鹏, 等. 动态干涉仪干涉图位置配准及移相误差校正[J]. 光学学报, 2016, 36(2): 0226002.
- 15 Zheng Donghui, Chen Lei, Li Bo, *et al.* Research on phase-shifting characteristic of retarder array in simultaneous phase-shifting interferometer[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(4): 0412004.
郑东晖, 陈 磊, 李 博, 等. 同步移相干涉仪中的延迟阵列移相特性研究[J]. 光学学报, 2015, 35(4): 0412004.