

文章编号: 0253-2239(2007)04-0663-5

# 基于二维光栅分光的同步移相干涉测量技术\*

左 芬<sup>1,2</sup> 陈 磊<sup>1</sup> 徐春生<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 南京理工大学电光学院, 南京 210094)  
(<sup>2</sup> 淮阴师范学院, 淮阴 223001)

**摘要:** 为了干涉测量的抗振目的,提出了一种新的同步移相干涉测量方案并搭建了实验装置。整个测量系统在迈克耳孙偏振移相干涉仪的基础上,利用一个正交的二维光栅产生对称分光,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,使之分别通过偏振方向依次相差 $45^\circ$ 的一个偏振片组,从而分别形成 $0^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $180^\circ$ 和 $270^\circ$ 相移的四幅移相干涉图,按照传统的四步移相算法,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的测量误差的影响。利用该系统测量一球面系统,结果与在 ZYGO 干涉仪上相比较,球面系统的均方根误差相差 $0.012\lambda$ ,峰谷值相差 $0.051\lambda$ 。

**关键词:** 光学测量; 干涉; 抗振技术; 二维光栅; 同步移相

中图分类号: TH741.1<sup>+</sup>3; TB535<sup>+</sup>.1 文献标识码: A

## Simultaneous Phase-Shifting Interferometry Based on Two-Dimension Grating

Zuo Fen<sup>1,2</sup> Chen Lei<sup>1</sup> Xu Chunsheng<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> School of Photoelectric Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094)  
(<sup>2</sup> Huaiyin Teachers College, Huaiyin 223001)

**Abstract:** For the anti-vibration in interferometry, a new simultaneous phase-shifting method based on Michelson polarization phase-shifting technique, is presented. In the corresponding set-up, a 2-dimensional grating is used. Through the grating, 4 diffracted beams of  $(\pm 1, \pm 1)$  orders are formed for the same diffracting efficiency. Let each beam pass one of four polarizing plates, of which polarization directions differ in turn by  $45^\circ$ . So four interferograms which have  $90^\circ$  phase-shifting interval are obtained simultaneously. By using the 4-bucket algorithm, the wavefront of the test piece is derived. The intensity disuniform and phase shift error are analyzed. A spherical system of a sort is tested by the advanced system and ZYGO interferometer respectively. The results show that the difference of root-mean-square and peak to valley in the two experiments are  $0.012\lambda$  and  $0.051\lambda$  respectively.

**Key words:** optical measurement; interferometry; anti-vibration technique; two-dimensional grating; simultaneous phase-shifting

## 1 引 言

移相干涉测量技术是一种测量波像差的高精度的方法之一,但是环境扰动尤其是振动对移相干涉测量的影响是个不容忽视的难题<sup>[1,2]</sup>。关于移相干涉测量中的抗振技术问题一直是国内外研究的热门

课题<sup>[3~5]</sup>。同步移相干涉测量术又称瞬态干涉测量术,因为不需要检测环境振动并进行补偿,而是采用各种技术手段在瞬间采集三幅以上移相步长恒定(一般为 $90^\circ$ )的干涉图,使得整个系统结构简单,所以渐渐成为研究的主要方向。R. Smythe 等<sup>[6]</sup>和

\* 国防军工计量“十五”重点项目(60803134)资助课题。

作者简介: 左 芬(1974—),女,江苏淮安人,讲师,博士研究生,主要从事光学计量测试与光电智能化仪器方面的研究。  
E-mail: weile\_ni@163.com

导师简介: 陈 磊(1964—),男,江苏南京人,教授,博士生导师,主要从事光学计量测试与光电智能化仪器方面的研究。  
E-mail: chenleiy@126.com

收稿日期: 2006-05-24; 收到修改稿日期: 2006-07-13

Chris L. Kolipoulos 等<sup>[7]</sup>提出的同步移相测量系统采用多个 CCD 来分别采集多幅干涉图,而后者由 PhaseShift 公司制成了相应的产品,该类方法涉及到干涉图采集的同步性问题,且具有复杂的光学结构,实现起来难度大,同时价格比较昂贵; Andrea Kranz 等<sup>[8]</sup>提出的系统虽然采用了一个 CCD 同时采集几幅图,但是在几幅干涉图之间存在着分光不均匀的现象,给后面的波面复原算法带来一定的难度; J. E. Millerd 等<sup>[9,10]</sup>的基于全息分光、相位掩模动态干涉仪优化了同步移相干涉测量系统的光学结构,对光源的带宽要求低,可以实现白光干涉,且抗振性能好,现已形成 4D 公司生产的系列干涉仪。但是由于掩模板的专利技术难度高,使得该系统的成本较高;类似的系统还有 ESDI 公司生产的 Intellium<sup>TM</sup> H1000 系列菲佐型同步移相干涉仪,仍然具有昂贵的价格。因此,本文提出了一种低成本的、基于泰曼-格林干涉仪的同步移相干涉测量方案并搭建了实验装置,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

本文采用的同步移相系统如图 1 所示。He-Ne 激光器发出的线偏振光经过 1/2 波片(HWP)和扩束系统后进入偏振分束器(PBS),偏振分束器将光束分为振动方向相互垂直的两束偏振光,一束被反射另外一束被透射。前者经 1/4 波片(QWP)后再被参考镜反射后再次经过 1/4 波片;同理后者也经 1/4 波片后,通过一个标准镜头再被测试球面镜反射后再次经过 1/4 波片,两个 1/4 波片的快轴方向分别与经过它们的线偏振光振动方向成 45°,这样两束光分别两次通过一个 1/4 波片后振动方向都偏转了 90°,因而分别经过偏振分束器透射和反

射后再次会合在一起并一起通过一个快轴与两个振动方向夹角都为 45°的 1/4 波片后分别形成左旋、右旋圆偏振光,进而合成为一线偏振光,该线偏振光的方位角与两束光之间的相位差成正比。若转动 1/2 波片使得参考光和测试光振幅相等,则可以得到该线偏振光的琼斯矢量为<sup>[11]</sup>

$$\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \frac{2a}{\sqrt{2}} \exp \left[ i \left( \omega_0 t + \frac{\varphi}{2} - \frac{\pi}{4} \right) \right] \times \begin{bmatrix} -\sin \left( \frac{\varphi}{2} - \frac{\pi}{4} \right) \\ \cos \left( \frac{\varphi}{2} - \frac{\pi}{4} \right) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中  $a$  为参考光和测试光的振幅,  $\omega_0$  为光源的角频率,  $\varphi$  则为测试光和参考光之间的相位差,也就是要得到的被测量。将(1)式表示的偏振光通过一个与  $x$  轴成  $\alpha$  角的检偏器后的出射光为:

$$\begin{bmatrix} E'_x \\ E'_y \end{bmatrix} = \frac{2a}{\sqrt{2}} \sin \left( \alpha - \frac{\varphi}{2} + \frac{\pi}{4} \right) \times \exp \left[ i \left( \omega_0 t + \frac{\varphi}{2} - \frac{\pi}{4} \right) \right] \begin{bmatrix} \cos \alpha \\ \sin \alpha \end{bmatrix}, \quad (2)$$

可以发现当  $\alpha = \varphi/2 - \pi/4$  时出现了消光现象,当转动检偏器改变其方位角时,原来的暗点逐渐变亮,条纹出现移动,因此可以认为当转动检偏器时相当于实现了移相,移相的量等效于检偏器方位角改变量的两倍。

将该线偏振光垂直投射到一个二维正交光栅上,经过光栅后系统分别产生了  $(\pm m, \pm n)$  等级次的衍射光,其中  $m, n$  分别为非负整数。在光栅后方透镜的焦平面上设置一个特制的光阑,仅让  $(\pm 1, \pm 1)$  级衍射光通过,光阑的结构如图 1 中所示,4 个小孔理论上呈正方形排列,正方形的边长即孔间距为

$$L = 2f(\lambda/d), \quad (3)$$

其中  $f$  为光栅后镜头的焦距,  $\lambda$  为光源的波长,  $d$  为正交两个方向上光栅的栅距。由二维光栅矢量衍射理论可知,对于理想的二维光栅,这四组衍射光具有相同的光强分布。让这四组 1 级衍射光分别对应通过一个偏振阵列,该偏振阵列由四个检偏器组成,检偏器的透射方向依次旋转了 45°。取其中一个检偏器的偏振轴与  $x$  轴成 0°角,则四个检偏器的琼斯矩阵依次为  $\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$ ,  $\begin{bmatrix} 1/2 & 1/2 \\ -1/2 & 1/2 \end{bmatrix}$ ,  $\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ ,  $\begin{bmatrix} 1/2 & -1/2 \\ 1/2 & 1/2 \end{bmatrix}$ 。令  $\gamma = \varphi/2 - \pi/4$ ,  $A$  为  $(\pm 1, \pm 1)$  级衍射光矢量的振幅,因此可以依次得到四幅干涉图中对应点的光强表达式分别为

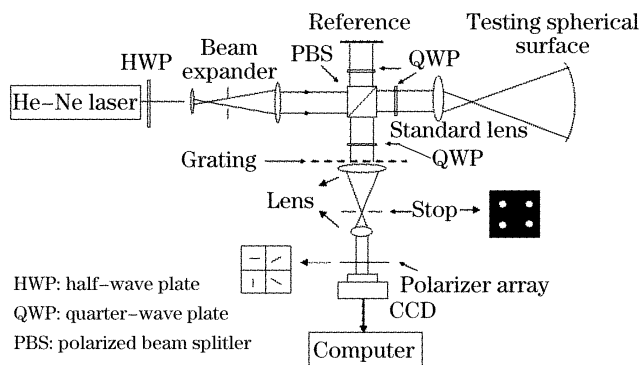


图 1 同步移相干涉系统

Fig. 1 Simultaneous phase-shifting interferometer

$$I_1(x, y) = A^2 \frac{1 - \cos(-2\gamma)}{2}, \quad (4)$$

$$I_2(x, y) = A^2 \frac{1 + \sin(-2\gamma)}{2}, \quad (5)$$

$$I_3(x, y) = A^2 \frac{1 + \cos(-2\gamma)}{2}, \quad (6)$$

$$I_4(x, y) = A^2 \frac{1 - \sin(-2\gamma)}{2}, \quad (7)$$

这样根据四步移相算法可以得到被测波面在对应点  $(x, y)$  的被测相位为

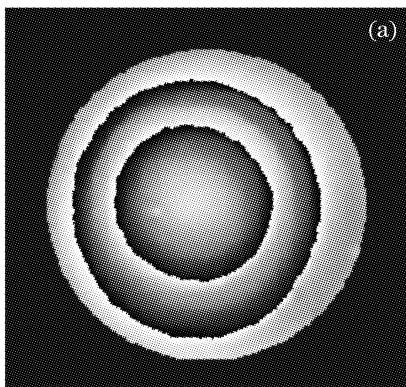
$$\varphi(x, y) = \arctan \frac{I_4(x, y) - I_2(x, y)}{I_3(x, y) - I_1(x, y)}, \quad (8)$$

按照一定的解包方法, 可以复原被测位相面, 进而求得被测面形偏差:

$$\Delta h = \frac{\varphi}{4\pi} \lambda. \quad (9)$$

### 3 实验与结果

我们在普通桌子上搭建了一个实验光路, 光源采用 He-Ne 稳频激光器, 工作波长  $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ , 经扩束后的有效光束直径为  $10 \text{ mm}$ , 选用了电子快门时间可调的黑白 CCD 摄像头, 所用光栅为  $25 \text{ 1/mm}$  的全息光栅, 及自制的偏振片阵列, 光栅后的透镜焦距为  $150 \text{ mm}$ , 定制的空间滤波光阑结构如图 1 中所示, 孔间距约为  $5 \text{ mm}$ , 孔径  $0.5 \text{ mm}$ 。



将三个波片调整到对应位置, 在环境存在振动的情况下, 选择电子快门时间为  $(1/10000) \text{ s}$ 。我们利用该系统测量一个待测球面的面形偏差, 于瞬间拍得一幅同时包含四个移相干涉图的图像, 如图 2 所示。从图中可以很明显的看出四幅图之间的移相效果, 然后使用位置标定程序分割出空间一致的四幅干涉图, 使用自编的移相干涉术处理软件, 分别得出被测波面的未解包相位图和复原的被测波面, 如图 3 所示。经过计算得出该被测波面的均方根误差为  $0.117\lambda$ , 波面的峰谷值为  $0.563\lambda$ 。使用 Zygo GPI xp 型干涉仪(时间移相干涉)测量同一被测球面, 得到均方根误差为  $0.105\lambda$ , 波面的峰谷值为  $0.512\lambda$ , 结果吻合得比较好, 从而验证系统的测量精度。

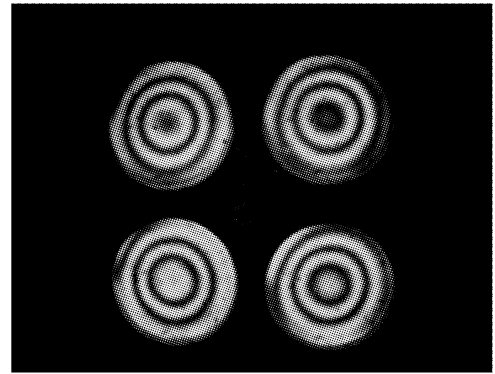


图 2 实验所得同步移相干涉图

Fig. 2 Simultaneous phase-shifting interference patterns

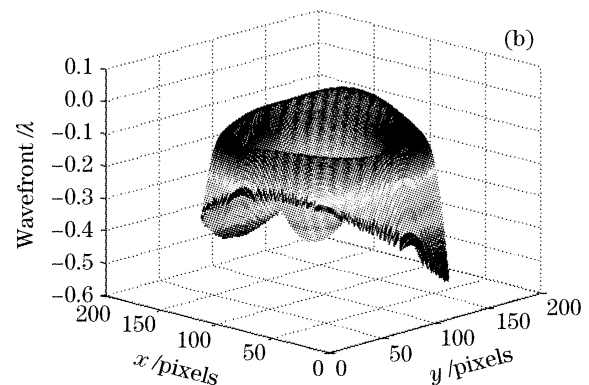


图 3 实验结果。(a) 未解包的测量相位图, (b) 复原的被测波面图

Fig. 3 Experimental result. (a) Wrapped phase map, (b) retrieved wavefront

### 4 误差分析

由于系统采用了空间分光移相的方法, 因此具有与分时采集时域移相干涉测量系统不同的误差源, 主要可以归结为两个方面<sup>[7,12,13]</sup>: 首先是干涉图上的光强发生了畸变, 其次是移相误差问题。这两个因素相互独立, 而且每个干涉图的情况可能各不相同。假设以  $M_i$  和  $N_i$  ( $i=1, 2, 3, 4$ ) 分别代表四步

移相干涉测量中每幅干涉图对应点的光强畸变和移相误差, 则各对应点的光强可以作如下的表示:

$$\begin{cases} I'_1 = I_0(1 + M_1)[1 + V\cos(\varphi + N_1)], \\ I'_2 = I_0(1 + M_2)[1 - V\cos(\varphi + N_2)], \\ I'_3 = I_0(1 + M_3)[1 - V\cos(\varphi + N_3)], \\ I'_4 = I_0(1 + M_4)[1 + V\cos(\varphi + N_4)], \end{cases} \quad (9)$$

其中  $I_0$  为理想的背景光强,  $V$  为干涉条纹衬比度,

$\varphi(x, y)$  为实际的待测相位, 因此实验所得到的测量相位为

$$\varphi'(x, y) = \arctan \frac{I'_4(x, y) - I'_2(x, y)}{I'_1(x, y) - I'_3(x, y)}, \quad (10)$$

相位测量误差为

$$\Delta\varphi = \varphi' - \varphi = \arctan \frac{I'_4 - I'_2}{I'_1 - I'_3} - \varphi, \quad (11)$$

一般情况下对于小的相位误差有

$$\Delta\varphi \approx \tan \Delta\varphi = \frac{\tan \varphi' - \tan \varphi}{1 + \tan \varphi' \tan \varphi} = \frac{(I'_4 - I'_2) \cos \varphi - (I'_1 - I'_3) \sin \varphi}{(I'_4 - I'_2) \sin \varphi + (I'_1 - I'_3) \cos \varphi}, \quad (12)$$

将(12)式按照泰勒级数展开, 在展开过程中, 由于假设上述两个误差因素相互独立, 因此分别单独考虑光强度畸变和移相误差对于测量结果的影响, 考虑其中一个因素时要假设另外的一个误差为零。

#### 4.1 光强畸变产生的测量误差

在(9)式中令  $N_i = 0$ , 然后将(12)式展开为泰勒级数为

$$\begin{aligned} \Delta\varphi_1 &= M_1 \left. \frac{\partial \Delta\varphi}{\partial M_1} \right|_{M_1=M_2=M_3=M_4=0} + \\ &M_2 \left. \frac{\partial \Delta\varphi}{\partial M_2} \right|_{M_1=M_2=M_3=M_4=0} + \\ &M_3 \left. \frac{\partial \Delta\varphi}{\partial M_3} \right|_{M_1=M_2=M_3=M_4=0} + \\ &M_4 \left. \frac{\partial \Delta\varphi}{\partial M_4} \right|_{M_1=M_2=M_3=M_4=0} + O(M_i^2), \quad (13) \end{aligned}$$

省略掉光强的高次项畸变, (13)式变为

$$\begin{aligned} \Delta\varphi \approx &M_1 \frac{(1 + V \cos \varphi) \sin \varphi}{2V} + \\ &M_2 \frac{(1 - V \sin \varphi) \cos \varphi}{2V} + \\ &M_3 \frac{(1 - V \cos \varphi) \sin \varphi}{2V} + \\ &M_4 \frac{(1 + V \sin \varphi) \cos \varphi}{2V} = \\ &\frac{1}{2V} [(M_3 - M_1) \sin \varphi + (M_4 - M_2) \cos \varphi + \\ &\frac{1}{2} V (M_4 + M_2 - M_3 - M_1) \sin 2\varphi], \quad (14) \end{aligned}$$

(14)式可以看出, 因为光强畸变引起的相位测量误差是一个以干涉条纹周期为周期的函数, 振幅与条纹衬比度  $V$  以及光强畸变量  $M_i$  有关。

光强产生畸变的原因主要是: 光栅的质量问题造成在所采用的四个衍射级上衍射效率不一致; 四个分光路经过了不同的路径对光的吸收不同。本系统中, 前者通过采用高质量的光栅, 且保证光垂直入

射光栅表面来弥补因光栅周期畸变、光栅表面不光滑以及光栅材料不均匀所导致的衍射效率不对称问题; 后者主要是通过四个光路绕主光轴对称分布来解决, 一般情况下这种误差很小, 可以忽略不计。

#### 4.2 移相误差产生的测量结果误差

在(9)式中令  $M_i = 0$ , 然后将(12)式展开为泰勒级数为

$$\begin{aligned} \Delta\varphi_2 &= N_1 \left. \frac{\partial \Delta\varphi}{\partial N_1} \right|_{N_1=N_2=N_3=N_4=0} + \\ &N_2 \left. \frac{\partial \Delta\varphi}{\partial N_2} \right|_{N_1=N_2=N_3=N_4=0} + \\ &N_3 \left. \frac{\partial \Delta\varphi}{\partial N_3} \right|_{N_1=N_2=N_3=N_4=0} + \\ &N_4 \left. \frac{\partial \Delta\varphi}{\partial N_4} \right|_{N_1=N_2=N_3=N_4=0} + O(N_i)^2, \quad (15) \end{aligned}$$

处理过程与上述相似, 我们得到

$$\begin{aligned} \Delta\varphi_2 \approx &\frac{1}{2} \sin^2 \varphi (N_1 + N_3) + \\ &\frac{1}{2} \cos^2 \varphi (N_2 + N_4) = \\ &\frac{1}{2} [N_1 + N_2 + N_3 + N_4 + \\ &(N_4 + N_2 - N_3 - N_1) \cos 2\varphi], \quad (16) \end{aligned}$$

由(16)式可以发现, 移相误差产生的测量结果误差也是一个周期函数, 且周期为干涉条纹周期的一半, 振幅则与移相的误差量  $N_i$  有关。

在本实验系统中, 产生移相误差的主要原因有以下两点: 偏振片组的方位角没有依次准确相差  $45^\circ$  产生的误差; 干涉图的位置匹配误差等效成的移相误差。前者可以通过实验进行标定, 本系统所采用的标定方法是在偏振阵列之后成像透镜之前放置一个大的偏振片, 通过旋转该偏振片使得四幅干涉图依次产生消光, 根据它们的消光位置之差来判定偏振片组之间的方位角之差, 用该方法可以将偏振片的平均方位角误差控制在  $1^\circ$  以内, 导致平均移相误差约  $2^\circ$ , 形成面形测量误差  $\lambda/180$ , 这一精度的测量误差对一般的干涉测量影响较小, 同时该标定的精度还可以进一步提高; 后者可以采用高分辨力的 CCD 来提高数据采集的精度, 且尽量将干涉条纹调得稀疏一点以降低单位像素位移误差产生的移相误差。

## 5 结 论

本文提出了一种基于二维光栅衍射分光的同步移相干涉测量系统, 应用该系统同时获得了四幅移相步长为  $\pi/2$  的干涉图, 避免了在普通移相干涉测

量系统的数据采集过程中振动的影响,因此可以实现真正意义上的抗振,并且系统结构非常紧凑,易于小型化,可以应用于各种动态测量场合。但同时该系统与普通的时域移相干涉系统比较起来也增加了一些影响精度的误差源,例如光栅分光的问题、分光路经过的不同路径吸收不同问题以及波面复原过程中的干涉图位置匹配问题等,在实际的应用中可以通过事先标定来给出一些定量的结果。

### 参 考 文 献

- 1 Peter J. de Groot . Vibration in phase-shifting interferometry [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1995, **12**(2): 354~365
- 2 Joanna Schmit, Florin Munteanu. Limitations of iterative least squares methods in phase shifting interferometry in the presence of vibrations[C]. *Proc SPIE*, 2005, **5965**: 0z\_1~0z\_11
- 3 James Wyant. Dynamic phase-shifting interferometry beats vibration[C]. *SPIE's Oemagazine*, 2005, **5**(8): 20~22
- 4 Wu Dong, Zhu Rihong, Chen Lei *et al.*. Advances in vibration-insensitive phase-shifting interferometric metrology[J]. *Optical Instruments*, 2004, **26**(5): 59~64 (in Chinese)  
吴 栋,朱日宏,陈 磊 等. 抗振型移相干涉测量术的进展[J]. *光学仪器*, 2004, **26**(5): 59~64
- 5 Zhao Weirui, Cao Genrui. Chopping adaptive phase-shifting interferometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(7): 858~862 (in Chinese)  
赵伟瑞,曹根瑞. 斩波式自适应移相干涉技术[J]. *光学学报*, 2002, **22**(7): 858~862
- 6 R. Smythe, R. Moore. Instantaneous phase measuring interferometry[J]. *Opt. Engng.*, 1984, **23**(4): 361~364
- 7 Chris L. Koliopoulos. Simultaneous phase shift interferometer [C]. *Proc. SPIE*, 1991, **1531**: 119~127
- 8 Andrea Hettwer, Jochen Kranz, Johannes Schwider. Three channel phase-shifting interferometer using polarization-optics and a diffraction grating[J]. *Opt. Engng.*, 2000, **39**(4): 960~966
- 9 J. E. Millerd, N. J. Brock. Methods and apparatus for splitting, imaging and measuring wavefronts in interferometry [P]. U. S. Patent, 6,304,330, 2001-10-16
- 10 J. E. Millerd, N. J. Brock, J. Hayes *et al.*. Pixelated phase-mask dynamic interferometer[C]. *Proc. SPIE*, 2004, **5531**: 304~314
- 11 Su Datu. *Optical Measuring Technology* [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1996. 188~190 (in Chinese)  
苏大图. *光学测试技术*[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1996. 188~190
- 12 Qian Kemaoy, Wu Xiaoping. A real-time polarization phase shifting method; error analysis[J]. *Laser Journal*, 2000, **21**(6): 17~20 (in Chinese)  
钱克矛,伍小平. 利用位相光栅实时偏振移相方法的误差分析[J]. *激光杂志*, 2000, **21**(6): 17~20
- 13 Qian Kemaoy, Miao Hong, Wu Xiaoping. A real-time polarization phase shifting technique for dynamic measurement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(1): 64~67 (in Chinese)  
钱克矛,缪 泓,伍小平. 一种用于动态过程测量的实时偏振相移方法[J]. *光学学报*, 2001, **21**(1): 64~67