

# 投影型莫尔条纹中的相移技术

王成 武晓东 韩昌元

(中国科学院长春光机所 国家光学机械质量监督检测中心, 长春 130022)

**提要** 提出一种使用偏振手段实现相移的方法, 该方法应用于投影型莫尔术中的条纹判读过程, 该方法的相移量可任意选择, 易于自动控制。给出了理论分析和实验结果。

**关键词** 莫尔术, 相移, 偏振

## 1 引言

近年来, 使用相移技术判读条纹的方法在许多光学领域中得到应用和发展。甚至在散斑干涉<sup>[1]</sup>和全息干涉<sup>[2]</sup>度量中也使用了这种先进的判读方法<sup>[3~6]</sup>。当然在莫尔条纹的判读中也常常使用这种方法。相移技术是通过改变光场的位相从而达到判读条纹目的的方法。设一般的条纹光强分布为

$$I = A + B \cos\left(\phi + m \frac{2\pi}{n}\right) \quad m = 1, 2, 3 \dots n \quad (1)$$

其中  $A, B, \phi$  为原光强的物理参数, 而  $m(2\pi/n)$  项是我们进行项移的运作项。通过对不同的  $n$  值时光强的测量(最少为三次)便可得到包括  $\phi$  在内的各物理参数, 为计算方便, 通常进行四次测量, 此时有<sup>[5]</sup>

$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3}\right) \quad (2)$$

较之普通判读技术, 相移技术所需采集的数据少得多, 运算简单, 因无需啮合计算, 从而精度大大提高, 并适用于实时计算和微机控制<sup>[7,8]</sup>。

莫尔条纹度量术是光学度量中的一个应用极为广泛的手段。本文讨论的是投影型中的相移方法。文献[7]通过改变光束方向的方法在投影型莫尔条纹中实现相移, 但该方法在条纹相移的同时也改变了条纹的宽度和光场区域。而本文是利用偏振原理在投影型莫尔条纹中实现相移<sup>[8]</sup>。

## 2 理论分析

### 2.1 莫尔条纹的相移

我们的莫尔条纹的实现是采用马赫—陈德尔干涉仪来完成的, 为了使条纹产生相移, 使用

一些偏振器件,见图 1。

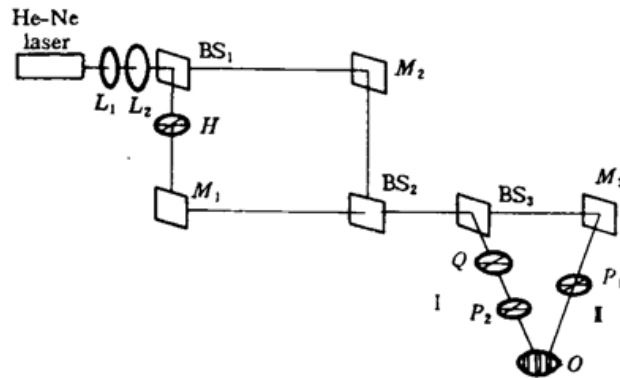


Fig. 1 Experimental setup of phase-shifting Moiré fringes

由 He-Ne 激光器发出的光经  $L_1$  和  $L_2$  扩束准直后投射至二个分束镜  $BS_1$  和  $BS_2$  以及二个平面反射镜  $M_1$  和  $M_2$  构成的马赫-陈德尔干涉仪上。光路中加入了半波片  $H$ ; 四分之一波片  $Q$  和偏振片  $P_1$  和  $P_2$ 。设原光束的振动方向为  $X$  方向,  $H$  的快轴与  $X$  方向成  $\pi/4$ , 这样加  $H$  片的光路中光的振动方向为  $Y$  方向。在马赫-陈德尔干涉光路外的光路  $\text{I}$  中加入偏振片  $P_1$ , 它的透光轴与  $H$  的快轴同向, 即与  $X$  轴成  $\pi/4$ , 从而这路光将一稳定的正弦条纹投射在  $O$  上。在另一光路  $\text{I}$  中加入  $1/4$  波片  $Q$  和偏振片  $P_2$ , 其中  $Q$  的快轴与  $H$  的快轴同向, 即与  $X$  轴成  $\pi/4$ , 而  $P_2$  是可旋转的, 其透光轴的初始位置为  $X$  方向。但不论其方向如何, 光路  $\text{I}$  都将有一稳定的正弦条纹像投射在物体  $O$  上, 从而  $O$  上有稳定的莫尔条纹(光路  $\text{I}$  和光路  $\text{II}$  的光强迭加)。当偏振片  $P_2$  旋转时, 光路  $\text{II}$  中所产生的正弦光栅像将产生相移, 从而达到莫尔条纹相移的目的。

## 2.2 理论计算

因为插入偏振片  $P_1$  的光路  $\text{II}$  所出射的光强分布是空间固定的条纹, 从而我们仅讨论光路  $\text{I}$  的光场特性。设由马赫-陈德尔干涉仪出射的光场为

$$u_1 = \begin{pmatrix} u_0 \exp[i\varphi] \\ 0 \end{pmatrix} \quad u_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ u_0 \exp[i(\varphi + \delta)] \end{pmatrix} \quad (3)$$

$1/4$  波片  $Q$  的方程为(快轴方向与  $X$  方向成  $\pi/4$ )

$$Q = \begin{pmatrix} 1 & i \\ i & 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

偏振片  $P_2$  的方程为(透光方向与  $X$  轴成  $\theta$  角)

$$P_2 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} \cos^2\theta & \cos\theta \sin\theta \\ \cos\theta \sin\theta & \sin^2\theta \end{pmatrix} \quad (5)$$

出射的光场则为

$$u = PQ(u_1 + u_2) = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} u_0 \cos\theta \exp i(\theta + \varphi) + u_0 \cos\theta \exp i(\pi/2 - \theta + \varphi + \delta) \\ u_0 \sin\theta \exp i(\theta + \varphi) + u_0 \sin\theta \exp i(\pi/2 - \theta + \varphi + \delta) \end{pmatrix} \quad (6)$$

则光强的分布为

$$I = u_x u_x^* + u_y u_y^* \quad (7)$$

其中由  $u = \begin{pmatrix} u_x \\ u_y \end{pmatrix}$  定义  $u_x$  及  $u_y$ 。经计算得到

$$I = 2u_0^2 \{ \cos^2(\pi/4 + \delta/2 - \theta) \} \quad (8)$$

令  $I_0 = 2u_0^2$ , 则

$$I = I_0 \cos^2(\pi/4 + \delta/2 - \theta) \quad (9)$$

从而通过改变偏振片  $P_2$  的角度便可改变这一光路的位相。当这一光路的位相改变时, 莫尔条纹的位相也将改变相同的量。从而达到了使莫尔条纹相移的目的。

若取  $\theta = \pi/4 - \theta$  和  $\theta = 0, \pi/4, \pi/2, 3\pi/4$ , 从而可依(2)式计算莫尔条纹的各物理参数。

### 3 实验结果

本实验是依照图 2 的光路进行实验的。其中用毛玻璃在  $O$  处得到莫尔条纹, 实验所得到的相移图见图 2。图 2 中, (a) 的相移量为  $0^\circ$ , (b) 为  $90^\circ$ , (c) 为  $180^\circ$ , (d) 为  $270^\circ$ 。

实验中采用机械度盘控制偏振片  $P_2$  的旋转, 其误差精度为  $0.1^\circ$ 。若不考虑各偏振元件的误差则误差的另一个来源是相移计算的精度, 在不进行校正时, 相移计算误差为  $0.01^{[4]}$ , 从而在相移量为  $45^\circ$  时相移的误差为

$$\sigma = \sqrt{(0.1/45)^2 + 0.01^2} \approx 1\% \quad (10)$$

若采用计算机控制的电控制且校准计算误差该精度可以提高<sup>[4]</sup>。

实验中为了使形成莫尔条纹的二束光的光程在光的相干长度以外, 图 1 光路中  $M_3$  前加入数个平板玻璃。因为激光的相干长度是周期变化的, 以此方法改变光程差使得莫尔条纹的对比度最好。

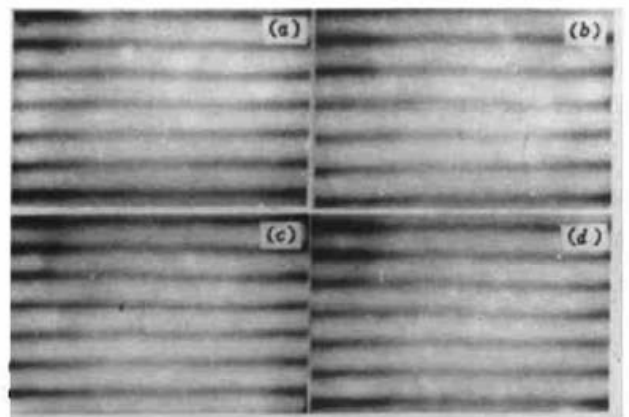


Fig. 2 Pictures of phase-shifting fringes  
(a)  $0^\circ$ ; (b)  $90^\circ$ ; (c)  $180^\circ$ ; (d)  $270^\circ$

### 4 讨 论

投影型莫尔条纹由于其大视场和高精度测量比起透射式莫尔条纹更受到人们的欢迎。本文提出的相移方法具有相移精确且相移量连续可调的优点, 整个实验无需特殊环境。此外, 除  $P_2$  的透过轴在特殊方向 ( $\pi/4$  方向) 外, 莫尔条纹是二套振动方向不同的正弦光栅像相互迭加而成, 从而消除了普通光路因相干而产生的伴线和像质低下的问题, 普通的方法是依靠于移整个光路而提高像质<sup>[8]</sup>, 但本方法从根本上解决了这一问题, 这是本方法的另一优点。

**致谢** 本文在实验及撰写过程中得到了吉林大学物理系郑树梓教授的指导, 在此表示感谢。

### 参 考 文 献

- 1 Katherine Creath. Phase-shifting Speckle Interferometry. *Appl. Opt.*, 1985, 24(18): 3053~3058
- 2 P. Hariharan. Quasi-geterodyne Hologram Interferometry. *Opt. Eng.*, 1985, 24(4): 632~638
- 3 J. L. Sullivan. Computer Aided Geometric Moire. in Proc. 1991 SEM Spring Conference on Experimental Mechanics. 1991. 505~512
- 4 K. H. Womack. Interferometric Phase Measurement Using Spatial Synchronous Detection. *Opt. Eng.*, 1984, 23(4): 391~395

- 5 Toru Yoshizawa. Shadow Moire Topography by means of the Phase-shift Method. *Opt. Eng.*, 1993, 32(7): 1668~1674
- 6 Itzhak Shapira. Fraction Moire Fringe Analysis by Optimization. *Opt. Eng.*, 1992, 31(4): 838~845
- 7 Tetsuya Matsumoto. Moire topography for three-dimensional profile measurement using the interference fringe of a laser. *Opt. Eng.*, 1991, 31(12): 2668~2673
- 8 Guanchang Jin. Applications of a novel phase-shift method using a computer-controlled polarization mechanism. *Opt. Eng.*, 1994, 33(8): 2733~2737

## A Phase-shifting Method for Moire Technique

Wang Cheng Wu Xiaodong Han Chengyan

(Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Changchun 130022)

**Abstract** A novel phase-shifting method is introduced. This method, with polarization theory and elements, is applied for Moire technique and has advantages because the amount of phase-shifting is flexible and suitable to be controlled by computer. The theory and experiment of this method are also presented.

**Key words** Moire, phase-shifting, polarization