

# 位移式莫尔偏折测量方法的研究

陶景光 杨坤涛 廖兆曙

(华中理工大学光学系, 武汉 430074)

**摘要** 本文讨论一种测量位相同步变化的物体信息的莫尔偏折法——位移式莫尔偏折法。通过试件的旋转或摆动用条纹的移动来反映光束的倾斜,用条纹的稳定性来判断光轴的重合。该法简单、精度高且易于实现自动测量。文章论证了其原理,分析了测量精度并阐述了几种典型的应用。

**关键词** Talbot 效应,莫尔偏折术,位移

## Research on displacement-Moire deflectometry

Tao Jingguang, Yang Kuntao, Liao Zhaoshu

(Department of Optical Engineering, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan)

**Abstract** We suggest a Moire deflectometry for measuring the object with synchronous change of phase, displacement-Moire deflectometry. When the object is rotating or wiggling, the displacement of Moire fringe indicates the angle of axis, and the stability of fringe indicates coincidence of the beam axis. This method is simple and the automeasurment is easy with high accuracy. In this paper the theory, measuring accuracy and some applications of this method are introduced.

**Key words** Talbot effect, Moire deflectometry, displacement

## 1 引 言

相干光波通过位相物体后波阵面产生了变化。该带有位相物体信息的光波照明 Ronchi 光栅时,光栅的 Talbot 像发生了变形,形成的莫尔条纹也随之变形,或者方向和间隔产生了变化。因此,通常根据条纹方向的变化来测量物体位相。然而,有些物体,如光楔,准直光束通过后发散度并不改变,莫尔偏折条纹形状、方向、间隔都不变化,无法根据条纹的方向反映物体的信息。据此,本文提出位移式莫尔偏折法,它不测量条纹方向和间隔的变化,而是通过试件的变位,用条纹的移动量来测量准直光束的倾斜,用条纹的稳定性来判断光束的垂直。

## 2 原 理

设 Ronchi 光栅  $G_1$  的振幅透过率为

$$G_1(x) = \sum a_n \exp[i(2\pi/P)nx] \quad n = 0, \pm 1, \pm 2 \dots \quad (1)$$

式中,  $P$  为光栅  $G_1$  的周期。

单色点光源  $S$  位于透镜  $L$  的前焦点  $F$  上, 出射平面波垂直照明光栅  $G_1$ 。由 Talbot 效应<sup>[1]</sup> 得知, 在  $G_1$  后相距  $G_1$  为  $z$  的 Talbot 像面上, 将出现和  $G_1$  完全相同的像  $G_1'$ 。即

$$\begin{aligned} \text{当} \quad Z &= m(2P^2/\lambda) \quad m = 1, 2, 3, \dots \\ G_1'(x) &= G_1(x) \end{aligned} \quad (2)$$

在  $z$  处放上与  $G_1$  周期相同的 Ronchi 光栅  $G_2$ , 其刻线与  $G_1$  倾斜成一小角度  $\theta$ , 则在  $G_2$  后可看到莫尔条纹。其方向与  $x$  轴相交成  $\theta/2$  角, 其周期  $B = P/\theta$ 。

若光源  $S$  对透镜  $L$  的光轴有微小偏置  $\overline{SF} = h$ , 在  $x$  方向偏置量为  $h_x$ , 在  $y$  方向偏置量为  $h_y$ , 如图 1 所示。则经过透镜后出射倾斜平面波, 方向余弦为  $(\cos\alpha, \cos\beta, \cos\gamma)$ , 满足

$$\cos\alpha = h_x/f' \quad (3)$$

$$\cos\beta = h_y/f' \quad (4)$$

$$\sin\gamma = \sqrt{h_x^2 + h_y^2}/f' = h/f' \quad (5)$$

则紧靠  $G_1$  后的光场分布为

$$f(x, y, 0^+) = \exp[i(2\pi/\lambda)(x\cos\alpha + y\cos\beta)] \sum a_n \exp[i(2\pi/P)nx] \quad (6)$$

当满足傍轴条件, 利用菲涅耳近似, 在 Talbot 像面处的场分布为

$$f(x, y, z) = \exp[i(2\pi/\lambda)(x\cos\alpha + y\cos\beta + z\cos\gamma)] \sum a_n \exp\{i(2\pi/P)n[x - (\cos\alpha/\cos\gamma)z]\} \quad (7)$$

当  $\gamma$  很小, 其强度分布为

$$I_1(x) = \left| \sum a_n \exp[i(2\pi/P)n(x - z\cos\alpha)] \right|^2 = |G_1(x - z\cos\alpha)|^2 \quad (8)$$

即光栅  $G_1$  的 Talbot 像  $G_1'$  为  $G_1$  沿  $x$  方向移动  $\Delta x$

$$\Delta x = z\cos\alpha \quad (9)$$

故  $G_1'$  与  $G_2$  形成的莫尔条纹和  $G_1$  和  $G_2$  形成的莫尔条纹方向、周期相同, 仅位置不同, 在垂直于莫尔条纹方向上移动了一段距离  $d$

$$d = (\Delta x)/\theta = (\Delta x)/(P/B) \quad (10)$$

将式(9)代入式(10)得

$$d = z \cdot \cos\alpha \cdot (B/P) \quad (11)$$

绕  $z$  轴转动  $S$ ,  $h_x, h_y$  周期地变化,  $\cos\alpha, \cos\beta$  变化, 由式(11)知, 莫尔条纹反复摆动。条纹摆动最大时, 对应  $\cos\alpha$  取最大值  $h_{\max} = h$ 。一个周期中相对条纹最大移动量  $D$  为  $2d_{\max}$ 。

$$D = 2(hB/f'P)z \quad (12)$$

由  $D$  可求出偏置量  $h$ , 或者表示出倾斜平面波与  $z$  轴的夹角。

若条纹不动,  $D = 0$ , 光源  $S$  在光轴上。

### 3 实 验

实验系统如图 2 所示。He-Ne 激光器  $\lambda = 0.6328 \times 10^{-3} \text{ mm}$ , Ronchi 光栅  $G_1, G_2$  周期  $P = 0.$

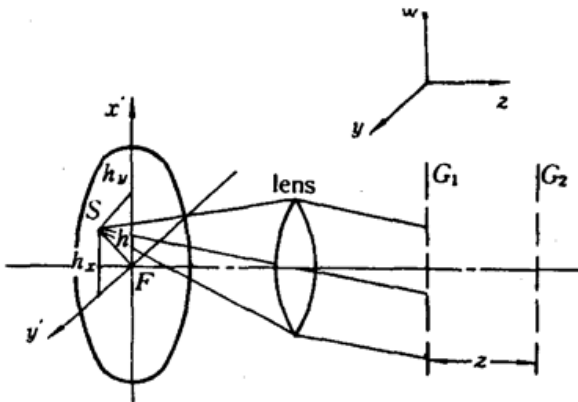


Fig. 1

0.025 mm, 间隔  $z = 199.5 \text{ mm}$ , 通光面积为  $20 \times 15 \text{ mm}^2$ , 透镜  $L$  焦距  $f' = 98 \text{ mm}$ , 透镜  $L_1$  和  $L$  焦面重合, 中心偏为  $h$ 。使  $L_1$  绕  $L$  光轴转动。

表 1 为测量数值。图 3 为紧靠  $G_2$  后的视场。采用分区域曝光法, 左边为  $h = 0$  时的条纹, 右边为  $h \neq 0$  时的条纹。

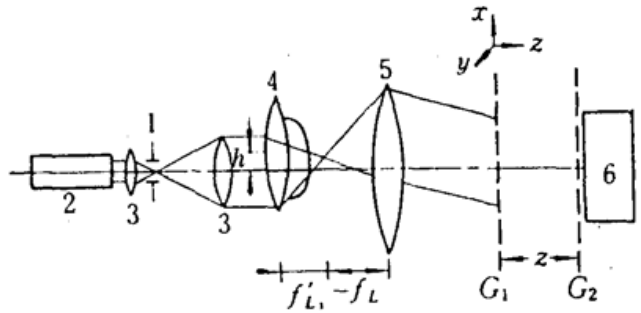


Fig. 2

Table 1

$h_a$	$2d_{max}$	$h_m$	$h_m - h_a$
0	0.1 B	0	
0.010	1.8 B	0.011	0.001
0.050	8.4 B	0.052	0.002
0.1	16.8 B	0.103	0.003

- 1—Diaphragm;                         2—He-Ne laser;
- 3—Expanding lenses;                 4—Lens  $L_1$ ;
- 5—Movable lens  $L$ ;                   6—Photodetector

### 4 精度分析

由文献[2, 3], Talbot 像面的空间分辨率  $\delta_x = mP$ , 角分辨率  $\delta_\varphi = (\lambda/mP) \cdot q$ , 其中  $q$  为每一条纹分辨率的小数部分。根据测不准原理,  $\delta_x \cdot \delta_\varphi = \lambda/2\pi$ , 即最小可测偏转角  $q$  (或瞄准精度  $\delta_M$ ) 为  $1/2\pi$  个条纹宽度。显然, 位移莫尔偏折法的精度  $\Delta h$  主要取决于接收器的细分数或瞄准精度  $\delta_M, \delta_M = B/2\pi$ 。

由式(12) 微分可得

$$\Delta h = f' P / 4\pi z \tag{13}$$

对应的角度误差

$$\Delta \gamma = (1/4\pi) \cdot (P/z) \tag{14}$$

对本文实验, 可计算得  $\Delta h = 0.001 \text{ mm}$ ,  $\gamma = 2''$ 。

由以上分析可得出以下结论: (1) 由条纹最大移动量可测出光轴重合度、偏置量及光轴倾斜量, 且精度较高; (2) 在一级衍射孔径范围内, 减小栅距  $P$  或增加光栅间隔  $z$  可提高测量精度, 而本方法不考虑空间分辨率, 可取小栅距、大间隔 (如本文实验取  $P = 0.025$ ,  $m = 101$ ); (3) 过高地增加电子线路细分数是没有必要的; (4) 由于观察为条纹相对移动量, 光路调整精度要求不很高。

### 5 应 用

#### 5.1 光轴重合性的调整

在光学测试、光学信息处理、光学仪器的装配以及光学零件的加工中, 常常要调整光轴的重合性, 如透镜的定心磨边、透镜的胶合。前者要保证透镜外圆的几何中心与透镜光轴重合, 后者要保证两块透镜光轴重合, 用位移莫尔术可解决上述问题。

位移式莫尔术进行透镜胶合定中方法如下: 将图 2 中的透镜  $L_1$  用待胶合透镜组代替, 负透镜在左边, 正透镜在右边。可动物镜  $L$  光轴与负透镜光轴 (仪器工作台卡盘中心) 重合, 可动物镜焦面与待胶透镜组焦面重合, 将正透镜相对于负透镜转动、移动, 直到观察到条纹稳定。

条纹相对移动量与透镜中心偏  $h$  的关系为



$$h = \frac{1}{2} \left( \frac{f_0}{f_d} \cdot f \cdot \frac{P}{z} \cdot \frac{D}{B} \right) \quad (15)$$

式中,  $f_0, f_d, f$  分别为待胶正透镜的焦距、胶合透镜的组合焦距、可动物镜焦距。

### 5.2 反射光学元件角位移的检测

反射元件反射面的角位移将引起光轴的晃动,用位移莫尔术可检测诸类信息。如旋转反射面的端面跳动、导轨的不直度等。

图 4 为导轨不直度的检测装置。

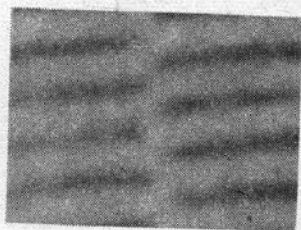


Fig. 3

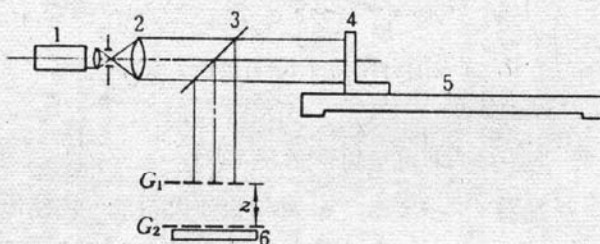


Fig. 4

- |                         |                     |
|-------------------------|---------------------|
| 1—He-Ne laser;          | 2—Expanding lenses; |
| 3—Beam splitter mirror; | 4—mirror;           |
| 5—Guide;                | 6—Photodetector     |

光栅  $G_1$  的栅线方向与导轨待测方向一致。将反射镜沿着导轨移动,记录莫尔条纹移动量即可。

### 5.3 光轴倾斜量的测量

光学平板、激光棒、楔块等微小楔角将使准直光方向发生改变。用位移莫尔法可测出其波阵面方向的改变而计算出这些元件的楔角、折射率等信息。

将图 2 中的透镜  $L$  和  $L_1$  用激光棒等代替,旋转试件,读出莫尔条纹相对移动的最大量  $D$ , 则

$$(n - 1)\psi = (D/2B) \cdot (P/z) \quad (16)$$

式中,  $n, \psi$  为试件的折射率和楔角。

位移式莫尔偏折术与几何量计量中的莫尔条纹技术有相似之处。后者用相距“零”间隙或小间隙的标尺光栅及指示光栅形成莫尔条纹,当标尺光栅移动(或转动)时,其莫尔条纹移动。它们的共同优点是莫尔条纹方向、间隔均不变化,仅仅条纹移动。用光电探测器接收光强信号,自动显示十分容易。

### 参 考 文 献

- 1 J. T. Winthrop *et al.*, *J. Opt. Soc. Am.*, **55**, 373(1965)
- 2 E. Keren *et al.*, *J. Opt. Soc. Am.*, **A2**(2), 111(1985)
- 3 K. Keren *et al.*, *Laser & Optronics*, **10**, 63(1988)
- 4 廖兆曙 *et al.*, *光学学报*, **10**(6), 500(1990)
- 5 吕乃光, *傅里叶光学*, 机械工业出版社, 1988, 72