

莫尔条纹同向法测量透镜焦距

吴长发** 陶景光* 廖兆曙** 杨坤涛**

(华中理工大学微观分析中心*, 光学系**, 武汉 430074)

提要 本文利用干涉条纹和 Ronchi 光栅形成的莫尔条纹在离透镜 2 倍焦距方向不变的原理测量凸透镜焦距。该法精度高,操作极其简单。

关键词 Moire 条纹,光栅,干涉条纹

Measuring focal length of a lens by identical direction Moire fringe

Wu Changfa** Tao Jingguang*, Liao Zhaoshu**, Yang Kuntao**

(* Microscopic Analysis Center; ** Optical Engineering Dept.,

Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

Abstract This paper describes the measuring of focal length of a convex lens using Moire fringes in identical direction at a distance of $2f'$ from the lens, which is formed by interference fringe and a Ronchi grating. This method has high accuracy and the operating is simple.

Key words Moire fringes, grating, interference fringe

1 引言

文献[1~4]介绍了用莫尔偏折术测量透镜的焦距,是利用光栅面上莫尔条纹方向(或间隔)的变化来反映透镜的焦距值。

为了测量方便和保证精度,根据 Talbot 效应,相干光波通过光栅衍射的 $0, \pm 1$ 级等干涉迭加而得到光强周期性分布,我们建议用两单色相干平面波干涉得到的干涉条纹代替一般莫尔偏折术中的第一块光栅,它与第二块光栅形成莫尔条纹,用这种条纹的方向变化与否测量凸透镜焦距。

2 莫尔条纹同向法测量原理

2.1 薄透镜焦距测量原理

图 1 为莫尔条纹同向法测凸透镜焦距系统。设由干涉仪出来的两束单色相干平面波的复振幅分布为

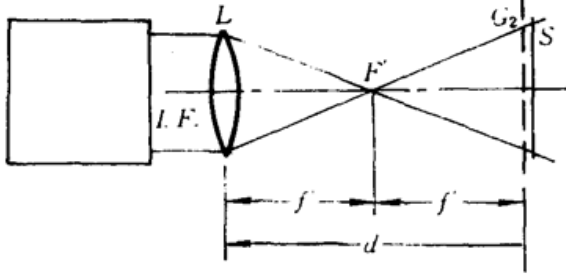


Fig. 1

I — interferometer; L — measured lens;
 G_2 — reference Ronchi grating; S — screen;
 f' — interference fringe

振幅分布为

$$U_1 = \exp[jK(x\sin\gamma + Z\cos\gamma)] \quad (1)$$

$$U_2 = \exp[jK(-x\sin\gamma + Z\cos\gamma)] \quad (2)$$

γ 为波矢方向与 Z 轴的夹角。

其光强分布为

$$I = 2 + 2\cos[(4\pi/\lambda)\sin\gamma \cdot x] \quad (3)$$

$$\text{周期 } P = \lambda/2\sin\gamma \quad (4)$$

U_1 经过焦距为 f' 的透镜变换后, 焦面上有它的频谱^[5]

$$U_{1(f', f')} = \delta\{[f_x - (\sin\gamma/\lambda)], f_y\} \quad (5)$$

在焦面上谱点坐标为 $(f'\sin\gamma, 0)$, 光由焦平面传播到离此平面距离为 Z' 的平面上时, 光场的复振幅分布为

$$U_{1(f'+z')} = \exp\{J(K/2Z')[(x - f'\sin\gamma)^2 + y^2]\} \quad (6)$$

同样, U_2 在 Z' 平面上的复振幅分布为

$$U_{2(f'+z')} = \exp\{J(K/2Z')[(x - f'\sin\gamma)^2 + y^2]\} \quad (7)$$

则在 Z' 平面上的光强分布为

$$I_{f'+z'} = 2 + 2\cos\left(\frac{4\pi}{\lambda}\sin\gamma \frac{f'}{Z'}x\right) \quad (8)$$

其周期

$$P' = \frac{\lambda}{2\sin\gamma} \cdot \frac{Z'}{f'} = P \cdot \frac{Z'}{f'} \quad (9)$$

当 $Z' = f'$ 时,

$$I_{2f'} = 2 + 2\cos[(4\pi/\lambda)\sin\gamma \cdot x] \quad (10)$$

式(10)和式(3)形式完全相同。即在 $2f'$ 面上, 透镜的加入没有改变光强的周期性分布。在此处若有一块周期亦为 P 的 Ronchi 光栅 G_2 , 栅线方向与干涉条纹方向有一小夹角 θ , 则透镜加入前后, 该面上的莫尔条纹方向相同。此时透镜到 G_2 面的距离 $d = 2f'$ 。

2.2 厚透镜焦距测量原理

2.2.1 焦面找正方法

图 2 中, 设在 A, B 两处, $Z_1' < 0, Z_2' = -Z_1' = d_0/2$, 代入式(8), 有

$$I_{f'+z_2'} = I_{f'-z_1'} = I_{f'+z_1'} \quad (11)$$

当光栅位于 $(f' + Z_1')$, $(f' + Z_2')$ 面时, 其莫尔条纹方向是相同的, 即焦面位于此两面的中点。

2.2.2 厚透镜的焦距测量原理

基于用莫尔条纹同向法找正的 $2f'$ 面是与透镜的后主面 H' 关于焦点 F' 对称的。故找正 $2f'$ 面后, 再找正 f' 面, 只须测量 d_0, d_1 , 如图 3。有

$$f' = d_1 + d_0/2$$

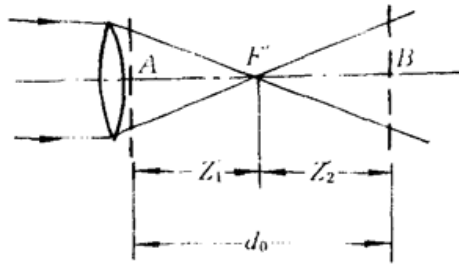


Fig. 2

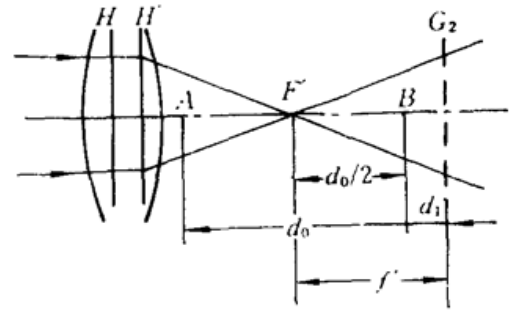


Fig. 3

3 实验与讨论

用 $\lambda = 633 \text{ nm}$ 的 He-Ne 激光作光源,扩束准直后,由标准光学楔块形成剪切干涉条纹作测量光栅,参考光栅 G_2 为 Ronchi 光栅, $P_2 = 0.2 \text{ mm}$ 。未加入透镜时调整接收屏 S 上双丝方向与莫尔条纹方向重合。加入被测透镜且沿轴向前后移动,至莫尔条纹又与双丝方向重合。以此位置为起点,将透镜靠近光栅移动一小距离 d_1 且调整双丝方向。继续移动透镜至莫尔条纹方向再度与双丝重合,测出第二次移动量为 d_0 。

由于薄透镜是厚透镜的特例,我们用厚透镜的测量方法测量了三个透镜,同时又用精度为 0.3% 的焦距仪进行了测量,其结果如表 1。

Table 1 Measured value of the lens

Measuring method	f' (mm)		
	Lens I	Lens II	Lens III
Same Moire fringe method	$f_M' = 94.4$	141.0	231.8
Focal lengths method	$f_C' = 94.1$	140.6	231.3

在这种测量方法中,由于采用透镜移动,导轨的不直度和扭摆对莫尔条纹方向无影响。忽略由于干涉仪出来的平面波的不准直度带来的误差,莫尔条纹同向法的误差源主要是判断莫尔条纹和双丝方向重合的瞄准误差及长度测量误差。

设单次瞄准误差为 $\Delta\alpha$,它对 d 的影响为 Δd_a ,如图 4 所示。

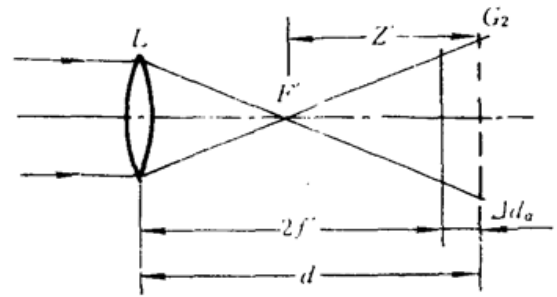


Fig. 4

当 $d = 2f' + \Delta d_a$,即 $Z' = f' + \Delta d_a$,由式(9)得

$$P' = P \cdot \frac{f' + \Delta d_a}{f'} \tag{13}$$

将式(13)代入莫尔条纹方程式 $\text{tg}(\alpha + \Delta\alpha) = (P\cos\theta - P')/P\sin\theta$ 中,当 θ 很小, $P' \approx P$,有 $\text{tg}(\alpha + \Delta\alpha) \approx \text{tg}\alpha + \Delta\alpha$,则

$$(\Delta d_a)/f' = \sin\theta \cdot \Delta\alpha \tag{14}$$

所以

$$(\Delta f')/f' = \frac{1}{2}\theta \cdot \Delta\alpha \tag{15}$$

当 $\theta = 2^\circ$, $\Delta\alpha = \pm 1^\circ$, $|\Delta f'/f'| = 0.03\%$

上式表明,由瞄准误差引起的测量误差很小,且相对测量误差与 f' 无关。

设长度测量误差 $\Delta d_1 = \pm 0.2 \text{ mm}$, $\Delta d_0 = \pm 0.2 \text{ mm}$, 则 $\Delta f_{s_1}' = \pm 0.2 \text{ mm}$, $\Delta f_{s_0}' = \pm 0.1 \text{ mm}$ 。

此方法中, 有四次瞄准, 故

$$\Delta f' = \pm \sqrt{4(\Delta f_{s_0}')^2 + \Delta f_{s_1}'^2 + \Delta f_{s_0}'^2} = \pm \sqrt{4 \times 10^{-5} f'^2 + 0.05} \text{ mm} \quad (16)$$

$$\text{相对误差} \quad \frac{\Delta f'}{f'} = \pm \frac{1}{f'} \sqrt{4 \times 10^{-5} f'^2 + 0.05} \quad (17)$$

透镜 I、II、III 的相对误差如表 2。

Table 2 Measurement error with the same Moire fringe

	Lens I	Lens II	Lens III
Error from theory analysis $ \Delta f_M' / f_M' $	0.24%	0.17%	0.11%
Measured error $ (f_M' - f_c') / f_c' $	0.30%	0.40%	0.20%

综上所述, 莫尔条纹同向法只需瞄准条纹和测量透镜移动量, 不仅精度高, 操作也十分简单。但对长焦距透镜, 由于 $2f'$ 太大, 光路长, 不方便; 且受噪声影响, 条纹易变形。对凹透镜不适用。这种方法要求被测透镜像差要小。

参 考 文 献

- 1 Y. Nakano, K. Murata, *Appl. Opt.*, **23**(14), 2296(1984)
- 2 I. Glatt, A. Livat, *Appl. Opt.*, **23**(14), 2241(1984)
- 3 Z. Karng, O. Kafri, *Appl. Opt.*, **21**(18), 3326(1982)
- 4 姜锦虎 *et al.*, 光学学报, **7**(2), 67(1987)
- 5 吕乃光, 傅里叶光学, 机械工业出版社, 北京, 1988, 96~100