

像差在临界角方法探焦技术中的影响

侯 澍

(中国科学院长春光学精密机械研究所 长春 130022)

摘要 分析了在临界角方法探焦技术中像差对测量灵敏度的影响。并给出了对两个显微镜测量的结果。焦点探测试验精度为 $\pm 1 \times 10^{-2} \mu\text{m}$ 。

关键词 临界角方法 焦点误差测量 像差 测量灵敏度

1 测量基本原理概述

在焦点探测技术中,所采用的临界角探测方法,是一种具有较高探测精度的方法,它对焦点的探测精度可达 $1 \times 10^{-2} \mu\text{m}$ 以上,是目前自动调焦光学方法中较为简单且易于实现的方法。在此种方法中,对于微小的焦点偏离量所引起的光线偏离平行光线的角度变化,通过折射棱镜,在临界角附近变成了相对明暗的光强变化,其基本测量原理如图1所示。如果在焦点 *B* 处将入射的平行光束反回,将得到反回的平行光束。当平行光束的光轴方向刚好在临界角棱镜的临界角度的方向时,入射在棱镜上的光将发生全反射。此时,如果入射的平行光束是均匀的,当它通过棱镜全反射出射时,光轴两侧光的强度不发生变化,仍然是均匀的。如果偏离 *B* 点,在 *A* 点或者 *C* 点把光束反回,平行光束将变成发散或会聚的。如果光轴方向保持在临界角度的方向不变,在光轴一侧的光将大于临界角入射到棱镜上,而另一侧的光则小于临界角入射到棱镜上。小于临界角的光将产生透射,使通过棱镜反射出来的光强度不再是均匀的,其一半面积的光强将逐渐减弱。如图1所示,随离焦方向的不同,将得到不同亮暗方向的光

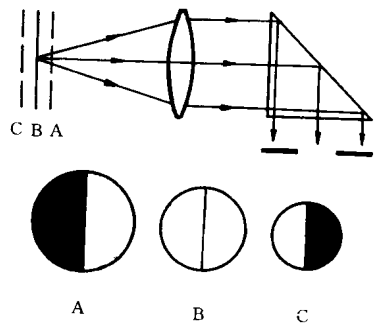


Fig. 1 Principle of critical angle of total reflection

束。并且,离焦量越大,产生的亮暗差别也越大;反之,离焦量越小,亮暗的差别也越微弱。当离焦量非常小,差别变得用眼睛分辨不清时,在光路的输出端用光电探测器接收这个微弱的差别信号,加以放大处理,即可得知并控制焦点的位置。

2 测量灵敏度与像差的影响

此种测量方法中,在有一定离焦量的情况下,光路输出端所能得到的明暗光强差别变化越大,就越有益于位于光学系统之后的电学处理系统对信号的提取处理。由这种方法的测量原理可知,在有一定的离焦量的情况下,使用短波长光、高折射率临界角棱镜、大相对孔径的测量物镜和多块临界角棱镜,并选用能得到较低反射系数的偏振方向等,才能获得较高的测量灵敏度。在理想的情况下,当物镜的相对孔径和离焦量一定时进行测量,光线偏离平行光束的微小角度及所能获得的亮暗对比差别,可由高斯公式及菲涅耳公式计算。例如:在此种检测方法中,当被测物镜的相对孔径为0.65,离焦量为 $\pm 0.2\mu\text{m}$ 时,代入高斯公式:

$$\frac{1}{l} - \frac{1}{l} = \frac{1}{f} \quad (1)$$

计算:假设物镜的口径为6.5mm,则 f 为10mm,如果 $\Delta f = + 0.2\mu\text{m}$,由图2得:

$$l = f + 2\Delta f = 10.0004(\text{mm})$$

$$\frac{1}{l} = \frac{1}{10} - \frac{1}{10.0004}$$

$$l = 250001(\text{mm})$$

当临界角棱镜距离检测物镜较近时,入射到棱镜上的最大张角

$$\text{tg}\theta = \frac{3.25}{250001} = 0.0000129$$

$$\theta = 0.0007448^\circ = 2.68$$

如果临界角棱镜的折射率为1.5168,则临界角为 41.25° ;在检测时,如选激光束的偏振方向与临界角棱镜的入射面相平行,则反射系数可由菲涅耳公式计算:

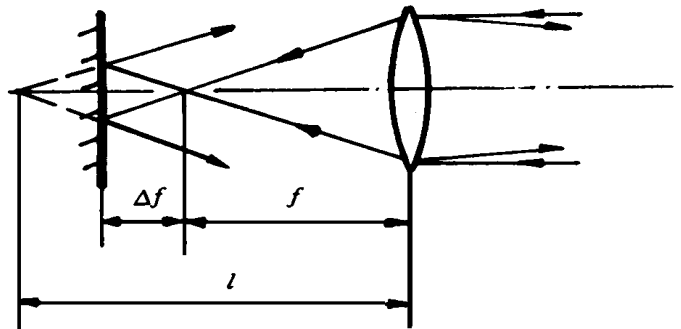


Fig. 2 Calculation of l

$$R_p = \frac{n_2 \cos \theta_i - n_1 \cos \theta}{n_2 \cos \theta + n_1 \cos \theta} \quad (2)$$

式中, n_2 为空气的折射率, n_1 为临界角棱镜的折射率, θ_1 为入射角, θ_2 为折射角。由前面的计算得知, 此时能得到的最大张角 $\theta_1 = 0.0007448^\circ$; 它在临界角棱镜上的入射角 $\theta_2 = 41.24519^\circ - 0.0007448^\circ = 41.24445^\circ$ 。由公式 $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$ 进一步算出 $\theta_2 = 89.68793^\circ$; 代入公式(2) 算得 $R_F = 0.97826$ 。此时系统最后输出两半光强亮暗差别最大光强比为 $1 \cdot 0.978$ 。如果光经过三块这样的临界角棱镜, 那么, 系统最后输出最大光强比为 $1 \cdot 0.936$; 但在实际测量时, 被测物镜不能达到理想成像, 在进行高精度测量时, 被测物镜本身会带有一定的像差, 这种像差的影响会综合到测量结果中。由光学基本原理可知, 当用单色光测量时, 轴上会聚点的像差主要为球差, 如果在焦点附近微小范围内存在一定的球差, 测量时, 当反射镜在一个带的焦点反射光时, 对于其它带的焦点, 将是处在离焦状态, 如图3所示。在图3中所示出的亮暗边界为渐变的。由此可知, 当反射镜对准某一位置的焦点反射, 光再次经过被测物镜变成平行光时, 对应被测物镜的其它带的焦点, 光被反射镜反射后, 将成为会聚或发散的。在测量光路的输出端, 对应被测物镜不同的带, 将产生不同亮暗方向的光。最终得到的结果, 将是这些左右不同亮暗方向的光的综合结果。由图3进一步可知, 这种影响, 将造成在一定条件下所具有的测量灵敏度大为降低。

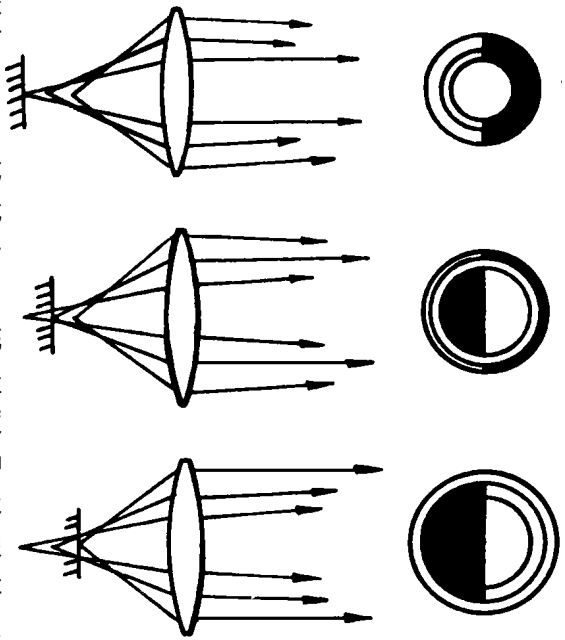


Fig. 3 The influence of aberration

3 测量结果分析

本文试验结果所采用的测量光路如图4。

图中, 1 氦氖激光器, 2 偏振分束器, 3 被测显微物镜, 4 四分之一波片, 5 压电装置, 6 临界角棱镜, 7 四象限探测器。为了提高测量灵敏度, 本文试验采用了四块临界角棱镜。同时, 为了对结果进行对比分析, 采用了两个具有相同数值孔径的显微物镜进行测量, 其测量结果如图5, 其试验结果曲线横轴坐标为离焦变化量。其步长在图5A 中为 $0.08\mu\text{m}$, 在图5B 中为 $0.008\mu\text{m}$ 。纵轴为四象限探测量在

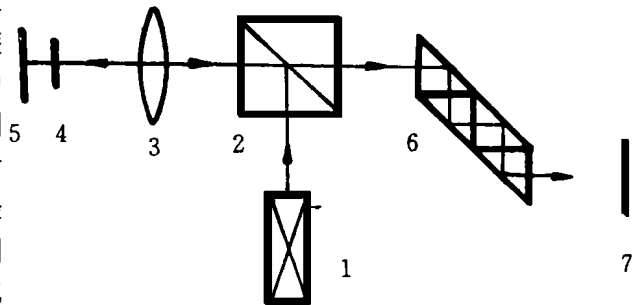


Fig. 4 Optical layout of measurement

测量时所接收到放大200倍后的光强差值电压。由图5的实际试验曲线可看出, 虽然两被测物镜具有相同的数值孔径, 其它实验参数也相同, 但它们所具有的测量灵敏度是不同的。在焦面上,

用读数显微镜观察所测的物镜对入射 6328\AA 波长的平行光束的会聚情况发现, 显微物镜1(日本镜头)所具有的球差要远小于显微物镜2(西德镜头)所具有的球差。这种球差的不同导致了最终得到的测量灵敏度的不同。从图5的试验结果曲线也可看出, 如果 $\Delta V = 0$ 的点为焦点所在位置, 由于球差或物镜对某一带在工作距离上消像差的结果, 也导致了同一显微物镜焦前焦后的试验结果曲线具有明显可见的不同的斜率, 即不同的测量灵敏度。

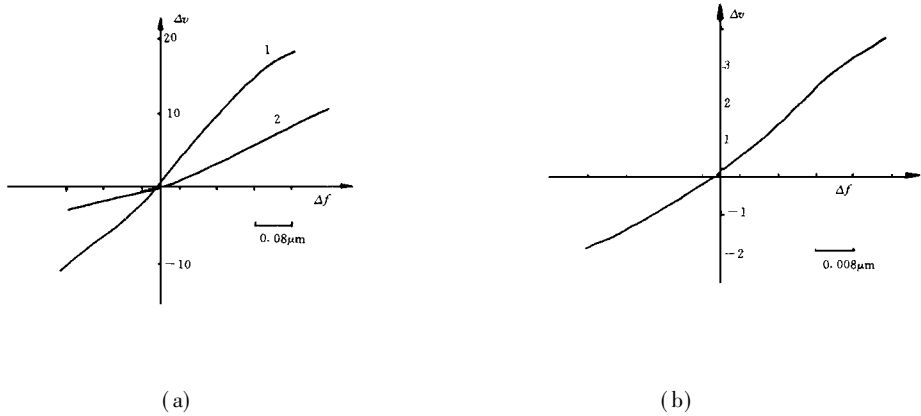


Fig. 5 Circuit diagram of measuring results

4 减少像差对测量灵敏度影响的探讨

为了减少像差对测量灵敏度的影响, 获得相对高的测量灵敏度, 应要求物镜的球差(在焦点上使用)为零或在测量精度要求范围内。但这有时会引起物镜的复杂化, 使其所具有的成本过高。当使用较大孔径的测量物镜进行高精度测量时, 怎样才能保留一定的球差的同时获得较高测量灵敏度, 是在不太理想的情况下进行高精度测量所要解决的问题之一。分析这种方法的测量原理可知, 在一定离焦量的情况下, 光线偏离平行光线的张角是由零逐渐变大的, 如图6, 越接近光轴, 光线偏离的角度越小。如果使物镜的光轴位于折射棱镜的临界角度上, 在物镜的一侧, 越接近边缘光束, 光线偏离临界角的变化越大, 由菲涅

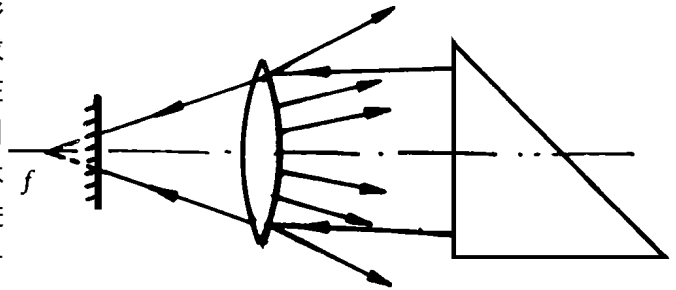


Fig. 6 Variance of light angles

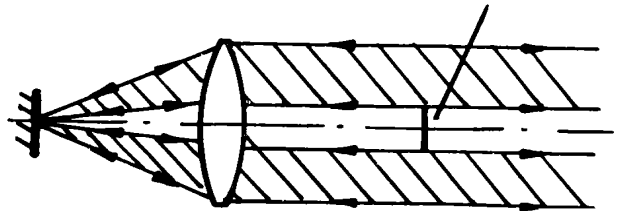


Fig. 7 Diaphragm interception of light

耳公式计算所得到的反射系数越小, 获得的亮暗差别越大。由此可知, 对于相对孔径较大的物

镜,如不能使它整个带的球差为零,为了在保留一定的球差的同时,获得较高的测量灵敏度,则对物镜边缘部分的光消球差,使边缘带的光会聚在轴上一点,成为理想的几何像点,而人为地挡去小部分近轴带光束,如图7,是能够在保留一定球差的同时,获得相对高的测量灵敏度。

5 结 束 语

分析此种方法的测量原理也可知,除了被测物镜本身所具有的球差影响测量的灵敏度外,物镜的面形差,偏心差等都会影响测量的精度与灵敏度,为了得到较高的测量精度与灵敏度就必须消除它们的影响。

本文分析是在廖江红、卢振武、随永新、付永启等所做的原理试验基础上,并同杨慧峰、邹振书、肖文礼等合作试验完成的。

参 考 文 献

- 1 Tsuguo Kohno·et al·High Precision Optical Sensor·Appl Opt, 1988, 27(1): 103 ~ 108
- 2 袁君毅,王 汀等。DSW 投影光刻的自动调焦理论及装置。LSI 制造与测试, 1987, (2): 39 ~ 44

The Influence of Aberration on Measuring Sensitivity in Critical-angle Method of Total Reflection for Focus Error Detection

HOU Shu

(Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022)

Abstract

The influence of aberration on measuring sensitivity in critical-angle method of total reflection for focus error detection was described. Measuring results of two microscope objectives were also given. The accuracy of measurement was $\pm 1 \times 10^{-2} \mu\text{m}$.

Key words: Critical angle method, Focus error detection, Aberration, Measuring sensity

侯 澍 女, 1954年生, 1978年毕业于天津南开大学物理系, 光学专业。现在长春光学精密机械研究所从事光学试验与检测工作。