

一种测试小视场短焦距光学系统焦距的方法

邵 晶^{1,2} 马冬梅¹

(¹中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)
²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 高倍率显微物镜具有小视场短焦距的特点,但利用常规测量方法难以准确测定其焦距。采用了一种基于放大率法多次基准传递的方法对高倍率显微物镜的焦距进行准确测定。该方法的原理是采用放大倍率法测试一枚远场共轭设计的低倍率显微物镜,获得该物镜的焦距,然后以此低倍率物镜测试高倍率显微物镜。利用该测试方法对一枚标称焦距为 4 mm Nikon 金相物镜进行了测试,并分析了测试误差,测试精度为 0.0266 mm,相对标准差为 0.664%。发现用于基准传递的物镜的选择会影响最终的测试精度,从理论上分析了选取合适基准物镜的标准。

关键词 几何光学;焦距测量;放大率法;显微物镜

中图分类号 TH70;TH74 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.s208003

A Method for Testing the Focal Length of Optical System with Small Field and Short Focal Length

Shao Jing^{1,2} Ma Dongmei¹

(¹ Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China
² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract The high-magnification microscope objective lens (HMOL) have small field and short focal length. Measurement of this short focal length is difficult in a conventional way. The focal length of high-magnification microscope objective can be measured using multiple reference transfer based on magnification method. This method is that an infinity design of low-magnification microscope objective lens (LMOL) is measured, the focal length of the LMOL is obtained, and then using the LMOL instead of collimator to measure the focal length of HMOL. This method is used to measure a Nikon metallographic objective lens (nominal focal length is 4 mm) and the errors are analyzed, testing accuracy is 0.0266 mm, and relative standard deviation is 0.664%. This fact that the choice of the objective lens used for reference transfer will affect the accuracy has been noticed, and a standard for choosing the appropriate benchmark objective is proposed.

Key words geometric optics; measurement of the focal length; magnification method; microscopic objective lens

OCIS codes 230.0230; 120.4800; 080.0080

1 引言

焦距是光学系统的重要参数之一,决定了显微物镜的放大倍率和数值孔径。这些参数在一些条件下具有重要的科研用途^[1,2],因此准确测量高倍率显微物镜的焦距成为获得这些重要参数的手段之

一。测试焦距的方法通常有四种^[3]:放大率法、附加透镜法、附加接筒法和精密测角法。其中放大率法是目前最常用的方法^[4~6],利用平行光管和被测光学系统组成测试光路,通过测量玻罗(Porro)分划板上刻线所成像的尺寸进而计算出待测光学系统的

收稿日期: 2012-06-10; **收到修改稿日期**: 2012-07-06

基金项目: 国家科技重大专项资助课题。

作者简介: 邵 晶(1984—),男,博士研究生,主要从事光学波前检测等方面的研究。E-mail: quying12@163.com

导师简介: 马冬梅(1963—),女,研究员,博士生导师,主要从事光学检测等方面的研究。

E-mail: dongmei_ma2002@yahoo.com.cn

焦距。高放大倍率显微物镜视场小、焦距短,若平行光管和高倍显微物镜直接组成测试光路,玻罗分划板上刻线所成像会很大,直接进行测试比较困难。附加透镜法用于测试负透镜的焦距,它是利用已知焦距的正透镜和待测负透镜组合形成一个伽利略望远镜,通过测试该望远镜的放大倍率来完成对负透镜焦距的测试。这种方法并不适用于高倍显微物镜的焦距测试。附加接筒法可以用于测量短焦距光学系统的焦距,它是通过测量改变成像像距前后成像放大率的变化来测试物镜的焦距。此种测试方法需要一个已知长度的附加镜筒,由于该镜筒需要加工或购买,也会增加测量的成本。精密测角法能够精确地测量长焦距的物镜^[7,8],它通过测量待测镜头焦面上两刻线对其主点的张角来测量焦距,一般需要精密测角仪或经纬仪。为了能够简便快速地测量小视场短焦距的高倍率放大显微物镜,本文利用低倍显微物镜具有较大视场的特点,先利用放大率法对该远场共轭设计的低倍率显微物镜的焦距进行标定,然后通过该低倍率显微物镜代替平行光管对放大倍率为 $50\times$ 、数值孔径 $NA=0.8$ 的高倍显微物镜的焦距进行准确测试,并对测试结果进行了误差分析。

2 放大率法基本原理

放大率法测量焦距的原理如图1所示,待测物镜放置于平行光管前,平行光管焦面处放置玻罗板,分划板上刻线的间距为 y ,在被测物镜焦面上对应的像间距为 y'' ,已知平行光管的焦距为 f_c ,待测物镜的焦距设为 f ,则有

$$f = \frac{y''}{y} f_c \quad (1)$$

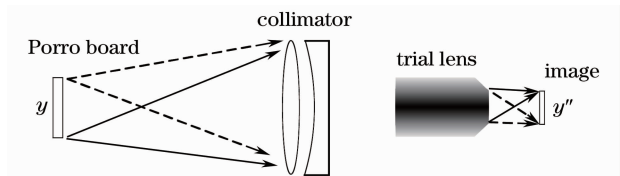


图1 利用放大率法测量光学焦距装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of adopting magnification method to measure the focal length

3 测试流程及结果

3.1 标定低倍显微物镜

现有一枚低倍显微物镜的设计出瞳距为无限远、 $NA=0.055$ 、放大倍率为 $2\times$ 、焦距标称值为

100 mm 、视场大小为 3 mm ,因此可以利用此低倍物镜代替平行光管对高倍显微物镜进行检测。利用Zygo干涉仪对低倍显微物镜的波像差进行检测,其波前像差小于 $\lambda/20$ ($\lambda=632.8\text{ nm}$),成像能够达到衍射极限,满足作为测试基准传递的使用要求。

然后通过平行光管对低倍显微物镜的焦距进行标定。该平行光管的焦距为 549.116 mm 。在平行光管焦面位置处放置玻罗板,将低倍显微物镜的无穷远端对准平行光管,搭建测试装置如图2(a)所示,选择视场中拥有最宽间距的刻线可以减小测试误差。选择玻罗板上间距为 4 mm 一对刻线进行成像,使用 $30\times$ 光学放大、最小刻度为 0.01 mm 的测微显微镜对成像间距进行测量,结果为 0.730 mm 。计算放大倍率为 $5.480\times$,获得低倍显微物镜的焦距为 100.213 mm 。

3.2 测试高倍显微物镜

把标定后的低倍显微物镜作为基准,然后利用它对一只 $NA=0.8$,放大倍率为 $50\times$ 的高倍显微物镜的焦距进行测试。首先在低倍显微物镜的焦面处放置玻罗板,将高倍显微物镜的无穷远端对准低倍显微物镜的无穷远端,搭建测试装置如图2(b)所示。

被测高倍显微物镜对玻罗板上间距为 4 mm 的刻线成像。测量成像间距为 0.160 mm ,光学放大倍率为 $25\times$ 。获得高倍显微物镜的焦距为 4.008 mm 。由此可以看出,此高倍率显微物镜拥有比较好的光学成像质量,能够实现标称的光学放大倍率。

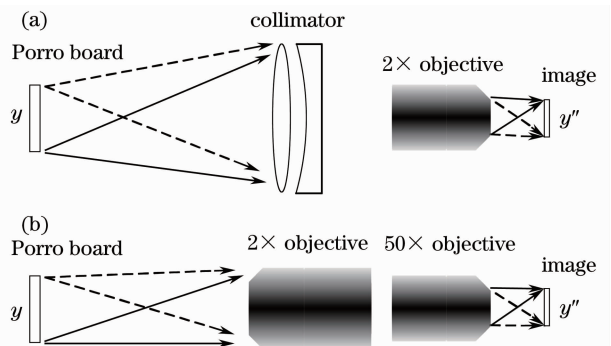


图2 实际测量中所使用的测试装置

Fig.2 Testing equipment during the practical measurement

4 测试误差分析

利用基准传递的方法进行焦距测量误差来源主要有以下几个方面:平行光管焦距的误差、玻罗板刻线间距的误差以及测微显微镜的读数误差^[4,9]。

测量 $2\times$ 显微物镜焦距的标准偏差为

$$\sigma_{f_c} = \sqrt{\left(\frac{y''}{y}\right)^2 \sigma_f^2 + \left(\frac{f}{y}\right)^2 \sigma_{y'}^2 + \left(\frac{fy''}{y^2}\right)^2 \sigma_y^2}, \quad (2)$$

式中 y 为分划板上对刻线的间距, y'' 为分划板在被测物镜焦面上对应的像间距, σ_f 为平行光管的标准偏差, $\sigma_{y'}$ 为玻罗板刻线间距的标准偏差, σ_y 为测微显微镜的读数误差, $\sigma_f = 0.001 \text{ mm}$, $\sigma_{y'} = 0.001 \text{ mm}$, $\sigma_y = 0.005 \text{ mm}$, 根据(2)式计算得到 $2\times$ 显微物镜的测试标准误差为 0.1860 mm , 相对标准偏差为 0.186% 。

同理, 根据(2)式计算得到 $50\times$ 显微物镜的标准误差为 0.0266 mm , 相对标准偏差为 0.664% 。

由以上分析结果可以看出经过基准传递的测量, 测试误差明显增大。这主要是由于测试所使用的 $2\times$ 物镜和 $50\times$ 物镜之间放大倍率相差过大引起的。

为了方便进行计算, 作如下假定: 前后两次利用放大率法测量焦距对玻罗板的相同的视场, 都能对 4 mm 间距的刻线成像测量; 前后两次测量中读数误差是一样的。

令平行光管的焦距为 f_1 , 低倍物镜的焦距为 f'' , 高倍放大物镜的焦距为 f_2 , 两次测量中被成像玻罗板上刻线的间距都为 y_1 , σ_{f_1} 为平行光管的标准偏差, $\sigma_{y'}$ 为玻罗板刻线间距的标准偏差, σ_y 为测微显微镜的读数误差, 将(1)式代入(2)式化简, 得到测量低倍物镜的测量误差

$$\sigma_{f''} = \sqrt{\left(\frac{f''}{f_1}\right)^2 \sigma_{f_1}^2 + \left(\frac{f_1}{y_1}\right)^2 \sigma_{y'}^2 + \left(\frac{f''}{y_1}\right)^2 \sigma_y^2}, \quad (3)$$

同样, 可以得到高倍物镜的测量误差

$$\sigma_{f_2} = \sqrt{\left(\frac{f_2}{f''}\right)^2 \sigma_{f''}^2 + \left(\frac{f''}{y_1}\right)^2 \sigma_{y'}^2 + \left(\frac{f_2}{y_1}\right)^2 \sigma_y^2}, \quad (4)$$

将(4)式代入(3)式中可以获得

$$\sigma_{f_2} = \sqrt{\left(\frac{f_2}{f_1}\right)^2 \sigma_{f_1}^2 + \left[\left(\frac{f_1 f_2}{y_1 f''}\right)^2 + \left(\frac{f''}{y_1}\right)^2\right] \sigma_{y'}^2 + 2\left(\frac{f_2}{y_1}\right)^2 \sigma_y^2}, \quad (5)$$

对(5)式取偏微分, 令 $\frac{\partial \sigma_{f_2}}{\partial f''} = 0$, 可以得到

$$(f_1 f_2)^2 = (f'')^4. \quad (6)$$

因此认为当 $f'' = \sqrt{f_1 f_2}$ 时, 测试误差能够达到最小。将上述参数代入, 可知 $f'' = 46.904 \text{ mm}$ 时误差较小。

由于显微物镜的焦距受到限制, 经过计算, 如果选用 $5\times$ 物镜, 焦距 f'' 为 40 mm , 测试 $50\times$ 物镜焦

距的误差为 0.0183 mm , 相对误差为 0.45% 。如果选用 $10\times$ 物镜, 焦距 f'' 为 20 mm , 测试 $50\times$ 物镜焦距的误差为 0.0288 mm , 相对误差为 0.71% 。因此可以选用 $5\times$ 的显微物镜提高测量精度, 这也证明了上述分析的正确性。

5 结 论

利用已具有的低倍显微物镜和平行光管, 对小视场、短焦距的高倍显微物镜焦距进行了准确测量。利用低倍物镜焦距介于平行光管和高倍显微物镜以及低倍物镜视场相对较大的特点, 通过采用基于放大率法多次进行基准传递的测量方式, 完成了对短焦距光学系统焦距的测试。这种测试方式具有测试设备简单、操作方便的优点。利用 $2\times$ 物镜和焦距为 550 mm 的平行光管测量了 $50\times$ 物镜的焦距, 测量精度为 0.0266 mm , 测量结果满足测试需要。但是能够看到, 由于测试所使用的 $2\times$ 物镜和 $50\times$ 物镜之间焦距相差过大导致测量精度下降。本文给出了通过选择焦距更为合适的物镜来提高测量精度的方法。认为当用于焦距测量基准传递的光学镜头的焦距 $f'' = \sqrt{f_1 f_2}$ 时, 测试精度最高。

参 考 文 献

- 1 Ma Dongmei, Chen Tuquan. Research on wavefront phase testing of point diffraction[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, **18**(11): 2390~2397
马冬梅, 陈土泉. 点衍射波前位相的测评[J]. *光学精密工程*, 2010, **18**(11): 2390~2397
- 2 Shao Jing, Ma Dongmei, Nie Zhenwei. Accurate test of optical wave front for optical system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, **19**(11): 2582~2587
邵晶, 马冬梅, 聂真威. 光学成像系统光学波前的高精度测试[J]. *光学精密工程*, 2011, **19**(11): 2582~2587
- 3 Yang Zhiwen. *Optical Measurement*[M]. 1st Edition. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1995. 147~154
杨志文. *光学测量*[M]. 第一版. 北京: 北京理工大学出版社, 1995. 147~154
- 4 Sun Junyue, Ma Dongmei, Huo Yubo. The focal length measurement of thermal imaging system by 4-bar targets[J]. *Infrared Technology*, 2006, **28**(4): 220~223
孙军月, 马冬梅, 霍玉波. 应用四杆靶图像测量热成像系统焦距[J]. *红外技术*, 2006, **28**(4): 220~223
- 5 Jing Wenbo, Wang Zhen, Duan Jin. Focus detection by image processing measurement based on Porro board in the optical system[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology*, 2011, **34**(4): 16~19
景文博, 王震, 段锦. 基于玻罗板的光学系统焦距图像检测方法[J]. *长春理工大学学报*, 2011, **34**(4): 16~19
- 6 Wang Shengyun, Zheng Xue, Yang Hong *et al.*. Explanation of calibration specification for IR optical focal length measuring equipment[J]. *Journal of Applied Optics*, 2007, **28**(6): 806~808
王生云, 郑雪, 杨红等. 红外光学系统焦距测量装置校准规

- 范说明[J]. 应用光学, 2007, **28**(6): 806~808
- 7 Guo Youban, Yang Pengli. Precision measurement of focal length of large optical system[J]. *Journal of Applied Optics*, 1999, **20**(2): 45~48
- 郭友寒, 杨朋利. 大型光学系统焦距的精确测量[J]. 应用光学, 1999, **20**(2): 45~48
- 8 Wu Guodong. A Method for Improving the Focal Length Testing Precision of the Collimator with Long Focal Length[P]. Chinese Patent, CN101852677A, [2010-5-24]
- 吴国栋. 一种提高长焦距平行光管焦距检测精度的方法[P]. 中国专利, CN101852677A, [2010-5-24]
- 9 Li Jun, Sha Dingguo, Lin Jiaming *et al.*. Experiment research on the error distribution of optical measurement [J]. *Optical Technique*, 2002, **28**(5): 442~446
- 李 筠, 沙定国, 林家明 等. 光学焦距测量误差分布的实验研究[J]. 光学技术, 2002, **28**(5): 442~446

栏目编辑:何卓铭