

## 基于泰伯莫尔法的长焦距测量系统的装调技术

陆 衡<sup>1</sup>, 陈 好<sup>1</sup>, 何 勇<sup>1</sup>, 李建欣<sup>1</sup>, 胡绍云<sup>2</sup>, 张 浩<sup>2</sup>, 孟庆安<sup>2</sup>

(1. 南京理工大学 电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094;

2. 西南技术物理研究所, 四川 成都 610014)

**摘 要:** 为了实现长焦距的精确测量, 基于泰伯莫尔法测量长焦距的原理, 构建出了由准直波前发生器、泰伯干涉仪和成像采集系统组成的长焦距测量装置。分析了准直波前畸变对焦距测量精度的影响, 用数值分析的方法分析了待测样品到光栅 G1 的距离  $s$ , 光栅 G1、G2 的间距  $d$  以及栅线夹角  $\theta$  对焦距测量精度的影响。提出了具体的装调方法: 用五棱镜法检测波前, 保证准直波前质量 PV 值优于一个波长; 用光栅尺位移传感器测量  $s$ , 标定  $d$ , 使其精度达到 0.1 mm; 采用标准反射凹球面法标定光栅夹角, 使光栅夹角的装调精度达到 0.001°。对焦距为 5 436 mm 的透镜进行实验测量, 误差小于 0.35%。

**关键词:** Talbot-Moiré 效应; 长焦距测量; 精度分析; 装调

**中图分类号:** O439 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)10-2836-06

## Alignment method for measurement of long focal length based on Talbot-Moiré effect

Lu Heng<sup>1</sup>, Chen Hao<sup>1</sup>, He Yong<sup>1</sup>, Li Jianxin<sup>1</sup>, Hu Shaoyun<sup>2</sup>, Zhang Hao<sup>2</sup>, Meng Qing'an<sup>2</sup>

(1. Institute of Electronic Engineering and Optoelectronic Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 2. Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu 610041, China)

**Abstract:** In order to achieve high-accuracy measurement of the long focal length, a method of measuring long focal length based on Talbot-Moiré effect was studied in this paper, a long focal length test device was established, it included a collimated wavefront generator, a Talbot interferometer and a imaging system. The effect of wavefront aberration on accuracy of focal length was analyzed. Then the distance  $s$  from the sample to the grating G1, the space  $d$  between grating G1 and grating G2, and angle  $\theta$  of two grating lines as influencing factors on accuracy of focal length were analysed. The alignment method to improve the accuracy was proposed. Pentaprism method for the detection of wavefront was introduced, to ensure that the collimated wavefront quality better than a wavelength. The linear grating encoder was used to measure  $s$  and calibrate  $d$ , to make the accuracy of the distance better than 0.1 mm. A reference reflective concave sphere was used for angle calibration, to make the accuracy of angle better than 0.001°. The experimental results show that the relative error is less than 0.35% when measured focal length is 5 436 mm.

**Key words:** Talbot-Moiré effect; long focal length measurement; accuracy analysis; alignment

收稿日期: 2013-02-10; 修订日期: 2013-03-25

基金项目: 十二五国防基础科研项目

作者简介: 陆衡(1989-), 男, 硕士生, 主要从事光学测试原理及技术方面的研究。Email: lhchange@sina.com

导师简介: 何勇(1966-), 男, 研究员, 主要从事光学测试原理及技术方面的研究。Email: heyong@njjust.edu.cn

## 0 引言

近年来,国内外激光核聚变,大口径天文望远系统和空间遥感相机等技术发展迅速,所以对长焦距系统的测量方法提出了更高的要求,传统的测量方法包括放大率法、精密测角法、傅里叶频谱法等,因其空间局限性很难满足长焦距的测量<sup>[1]</sup>。基于泰伯莫尔条纹技术测长焦距具有可测量焦距范围广、精度高、测量光路短、装置简单等特点,因而被广泛研究。浙江大学侯昌伦提出了用泰伯莫尔法测量长焦距,并进行了理论上的详细讨论<sup>[2]</sup>;吴玲玲等分析了泰伯莫尔法测量焦距的极限精度<sup>[3]</sup>;云宇等提出了基于泰伯效应检测光束准直性<sup>[4]</sup>;王明佳等提出了精确识别莫尔条纹方向的方法<sup>[5]</sup>。焦距测量系统的装调关系到整个系统能否正常工作和焦距测量的精确度,因此测量系统装调技术的研究是长焦距测量的重要组成部分,但是还没有提出具体的装调方法。文中构建了由准直波前发生器、泰伯干涉仪和成像采集系统组成的长焦距测试装置,详细分析了被测样品到光栅 G1 的距离  $s$ , 光栅 G1、G2 的间距  $d$  以及栅线夹角  $\theta$  对焦距测量精度的影响,提出了测试装置关键部件的装调和标定方法,并利用构建的系统进行了实验验证。

## 1 测量原理及系统结构

文中采用泰伯莫尔法测量长焦距,系统结构如图 1 所示,主要包括准直波前发生器、泰伯干涉仪、成像采集系统。准直波前发生器包括激光器、扩束准直系统,可以发出准直平行光;泰伯干涉仪包括 Ronchi 光栅 G1 和光栅 G2、接收屏,用来形成莫尔条

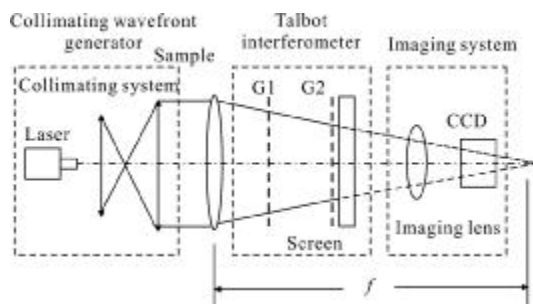


图 1 系统结构图

Fig.1 System structure

纹;成像采集系统包括成像物镜、CCD 相机,用来采集条纹。

准直波前发生器和 G1 之间的距离适中,保证待测样品能够方便地放入和取出,激光器的输出功率大小以在 CCD 靶面上所获得稳定的、正弦性和对比度好的莫尔条纹为准。G1 和 G2 平行放置且两光栅的栅线之间存在很小的角度。平行光入射时,在距离 G1 右侧某一个确定泰伯距离处,将存在一个和原光栅栅线方向相同的泰伯像,G2 放于此泰伯像处,与泰伯像叠加在接收屏上形成莫尔条纹。不同焦距的待测样品放入准直波前发生器和泰伯干涉仪之间,入射平面波则变成球面波,使得泰伯像周期发生变化,所以接收屏上的莫尔条纹角度也发生变化,通过傅里叶变换法得到莫尔条纹频谱图,由频谱图可以得到莫尔条纹偏转角度  $\varphi$ , 根据得到的  $\varphi$  角计算出待测样品的焦距。计算公式为:

$$f = s + \frac{d}{1 - \cos\theta + \sin\theta \tan\varphi} \quad (1)$$

式中: $s$  是待测样品与光栅的距离; $d$  为光栅间距; $\theta$  为光栅 G1、G2 的栅线夹角; $\varphi$  为条纹的偏转角。

## 2 系统的精度分析及几何参数设置

假设准直波前发生器发出的不是严格平行光,则存在准直波前畸变,影响焦距  $f$  测量精度;影响公式(1)中焦距测量精度的因素主要包括:系统参数  $s$ ,  $d$ ,  $\varphi$  的测量精度和  $\theta$  角的标定精度。用几何方法分析波前畸变对测量精度的影响;用数值分析的方法讨论系统参数对测量精度的影响。

### 2.1 准直波前畸变

假设由于准直波前畸变,准直波前发生器发出的是球面波,由图 2 所示的波前与焦距的关系,准直波前畸变的等价焦距为:

$$f_e = \frac{\phi^2}{8\Delta h} \quad (2)$$

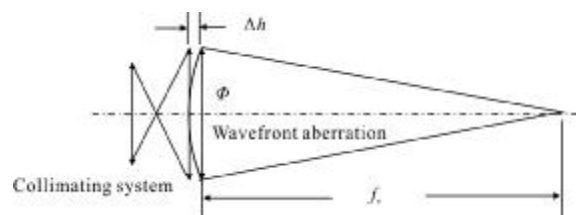


图 2 波前与焦距的关系

Fig.2 Relation between wavefront and focal length

图中,  $\Delta h$  是扩束准直系统波前畸变的 PV 值,  $\phi$  为出射波前口径。

待测样品的焦距为  $f$ , 结合组合焦距公式可得到:

$$f_c = \frac{ff_e}{f+f_e} \quad (3)$$

得到准直波前畸变引起的误差为:

$$\frac{\Delta f_e}{f} = \frac{f_c - f}{f} = 1 - \frac{\phi^2}{\phi^2 + 8\Delta hf} \quad (4)$$

在出射波前口径为  $\phi 200 \text{ mm}$ , 波长为  $632.8 \text{ nm}$  的条件下, 图 3 为待测样品焦距不同时,  $\Delta h = \lambda$  引起的误差曲线, 被测系统焦距为  $10 \text{ m}$  时的误差  $< 0.15\%$ , 对测量结果影响比较很小。所以当波前畸变  $\Delta h < \lambda$  时, 符合测量系统的要求。

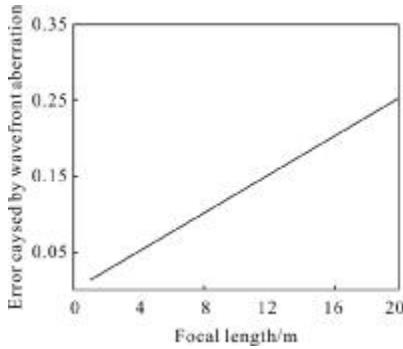


图 3 待测样品焦距不同时,  $\Delta h = \lambda$  引起的误差

Fig.3  $\Delta h = \lambda$ , error caused by samples of different focal lengths

### 2.2 系统几何参数分析与设置

待测样品的焦距测量精度由各参数  $s, d, \theta$  和  $\varphi$  决定。为了达到更高的测量精度, 上述的四个参数必须精确的测量和标定。因此分析了这几个参数引起的误差, 并提出精确的测量方法和标定方法。

在数值分析中, 输入量  $x$  的微小误差导致输出量  $y(x)$  的少量变化, 则说明这个问题是良置的, 反之则是非良置的。如果输入量  $x$  的干扰量为  $\Delta x = x - x^*$ , 则  $x$  和  $y(x)$  的相对误差分别为  $\Delta x/x$  和  $\frac{y(x) - y(x^*)}{y(x)}$ 。条件数可以表示为:

$$c = \left| \frac{y(x) - y(x^*)}{y(x)} \right| / \left| \frac{\Delta x}{x} \right| \approx \left| \frac{x}{y(x)} \frac{\partial y(x)}{\partial x} \right| \quad (5)$$

条件数  $c$  表示输入量  $x$  的误差对  $y(x)$  的影响程度,  $c$  的值越大, 影响程度越大。如果公式(1)中的参数  $s, d, \theta, \varphi$  的条件数比较大, 说明这个参数引起的问题是非良置的, 需要精确地测量或者标定。各个量

的误差传递系数可以通过求微分得到, 分别为:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial f}{\partial s} &= 1 \\ \frac{\partial f}{\partial d} &= \frac{1}{1 - \cos\theta + \sin\theta \tan\varphi} \\ \frac{\partial f}{\partial \theta} &= \frac{-d(\sin\theta + \cos\theta \tan\varphi)}{(1 - \cos\theta + \sin\theta \tan\varphi)^2} \\ \frac{\partial f}{\partial \varphi} &= \frac{-d \sin\theta \sec^2 \varphi}{(1 - \cos\theta + \sin\theta \tan\varphi)^2} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

假定  $s = 200 \text{ mm}, d = 200 \text{ mm}, \theta = 1^\circ, \varphi = 40^\circ$ , 可以得到  $f = 13\ 716.607 \text{ mm}$ , 带入公式(5), 可以得到  $c(s) = 0.015 \ll 1, c(d) = 0.985 < 1, c(\theta) = 0.995 < 1, c(\varphi) = 1.382 > 1$ ,  $s$  的微小变化引起的误差很小, 而  $\varphi$  的微小变化引起的误差最大, 而且测量的焦距越大,  $c(\varphi)$  越大。 $d, \theta$  的条件数都接近 1, 所以这两个值微小变化引起的误差也比较大,  $d, \theta, \varphi$  这三个参数要精确测量或标定<sup>[6]</sup>。

其中莫尔条纹的角度  $\varphi$  值可以通过软件得到精确值, 在此不做详细讨论。

假设测量焦距为  $10 \text{ m}$  的透镜, 考虑装调和使用方便, 待测系统与光栅距离设置为  $s = 100 \text{ mm}$ , 参数  $s$  对测量结果影响很小, 测量误差  $< 10 \text{ mm}$ , 其造成的焦距测量误差  $< 0.01\%$ , 满足系统要求; 图 4 为不同光栅间距条件下系统测量误差随栅线夹角的变化曲线, 系统的测量误差随光栅间距的增大而减小, 当光栅间距  $d = 100 \text{ mm}$  时测量误差减小变缓且已经包含足够的栅线夹角范围来满足系统测量精度要求, 由于光栅间距越大, 系统结构越大, 因此选择  $d \approx 100 \text{ mm}$ , 装调完成后微调至整数个泰伯距处可以得到清晰的条纹, 当测量误差  $\Delta d < 0.1 \text{ mm}$ , 造成的系统误差  $\Delta d/d < 0.1\%$ , 满足系统要求; 根据图 4 中  $d =$

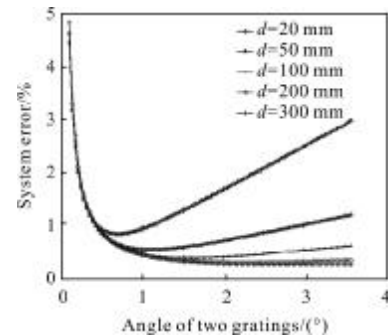


图 4 不同栅线夹角引起的误差

Fig.4. Error caused by different angle of two grating lines

100 mm 时的曲线图可以得到  $\theta=1.5^\circ$  时系统误差最小,所以设置栅线夹角  $\theta=1.5^\circ$ 。

图 5 为栅线夹角  $\theta$  的标定精度不同引起的系统误差,由图 5 可知当  $\theta$  的标定精度优于  $0.002^\circ$  时可以使  $\theta$  角造成的焦距测量误差  $<0.2\%$ , 满足测量系统要求。

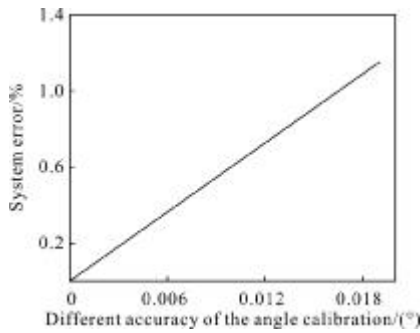


图 5 不同标定精度引起的误差

Fig.5 Error caused by different accuracy of angle calibration

### 3 系统的装调与标定

根据以上精度分析,采用五棱镜扫描法检测波前质量,保证出射波前 PV 值优于  $\lambda$ ;采用光栅尺位移传感器标定两光栅的间距  $d$ , 标定精度优于  $0.1 \text{ mm}$ ;采用标准反射凹球面法标定栅线夹角  $\theta$ , 使光栅夹角的标定精度达到  $0.001$ 。

#### 3.1 准直波前发生器的装调

装调过程中采用五棱镜扫描法对波前质量进行检测,理想五棱镜有一个光学特性,光线在五棱镜主截面内的转向角度只与两反射面的夹角有关,即使入射光线与入射面并非严格垂直,其出射光线亦可精确垂直转向。采用一个质量较好的五棱镜和直线度高的导轨,将被测区域划分成有限个子孔径,利用一个小口径的五棱镜依次地测量并计算出各子孔径的光斑质心,得到各子孔径的质心偏移后就可以计算出波面上各采样点的斜率,而这些斜率值就是待测波面在采样点的一阶导数值,再通过一重积分,就可求得待测波面。检测波前的简图如图 6 所示。

如果波面很理想,则平行光束经过五棱镜后,偏转  $90^\circ$  仍然以平行状态出射,在导轨末端处放置凸透镜,平行光束通过透镜后就会聚焦到该透镜的像方焦点上,在透镜像方焦点处放置 CCD 采集图像,能够得到一个明亮的光斑。然而若出射波面的各点波矢量是杂乱无章的,则经过五棱镜转向后出射的

光束的各点波矢量仍然是杂乱的,则波面经过透镜后,各光束便不能都聚焦到像方焦点处,通过 CCD 就能够观察到光斑随着五棱镜在导轨上的滑动而在视场中移动,用 CCD 记录五棱镜在导轨上每个采样点的光斑图像,通过程序处理计算出各采样光斑的质心位置,再由各质心位置得到波面各点的径向斜率,通过斜率多项式拟合出被测波面的斜率系数,由斜率系数可以重构出被测波面<sup>[7-8]</sup>。

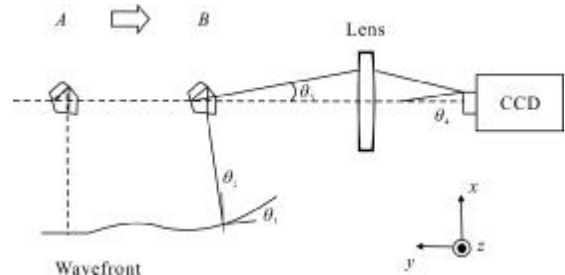


图 6 波前检测

Fig.6 Wavefront detection

文中系统以口径为  $\phi 200 \text{ mm}$  的波面作为测试对象,选择尺寸边长为  $8 \text{ mm}$  的五棱镜,精度为  $1 \text{ mm}$ ,长度为  $300 \text{ mm}$ ,平直度很好的导轨,CCD 和成像物镜。实验得到的被测波面如图 7 所示,PV 值为  $0.609\lambda < \lambda$ ,满足系统要求。

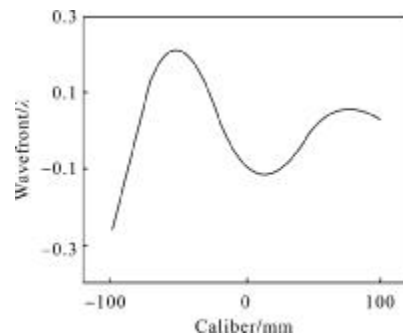


图 7 被测系统出射波前

Fig.7 Wavefront of system under test

#### 3.2 泰伯干涉仪的标定

泰伯干涉系统是整个测量系统的核心部分,其中包括两片 Ronchi 光栅和接收屏。

泰伯干涉仪的标定包括光栅间距  $d$  和栅线夹角  $\theta$  的标定。

##### 3.2.1 光栅间距标定

两光栅的间距标定采用光栅尺进行标定,标定精度优于  $0.1 \text{ mm}$ 。

### 3.2.2 栅线夹角的标定

栅线夹角  $\theta$  对焦距的测量精度影响很大, 为了提高焦距测量精度, 必须对  $\theta$  进行精确标定。

采用焦距  $f=2\ 015\ \text{mm}$  标准反射凹球面法标定  $\theta$ , 其原理为利用测量和计算得到的  $s$ 、 $d$ 、 $\varphi$  值以及精确测量的焦距  $f=2\ 015\ \text{mm}$  的标准反射凹球面, 根据公式(1)计算出  $\theta$ , 装调测试光路如图 8 所示, 包括准直波前发生器、标准反射凹球面、平面反射镜、泰伯干涉仪和成像采集系统。准直波前发生器发射出平行光, 经标准反射凹球面和平面反射镜反射至泰伯干涉仪, 在接收屏上形成莫尔条纹, 由成像采集系统采集。在  $\theta$  角标定过程中, 采集莫尔条纹并利用傅里叶变换法求出莫尔条纹的角度  $\varphi$ 。而标准反射凹球面的焦距可采用 Taylor Hobson 的轮廓仪精确测量, 因此利用已知的焦距值可以计算出当前状态的栅线夹角  $\theta$ 。通过多次调整和计算  $\theta$ , 使其调整到  $1.5^\circ$ 。由于轮廓仪的焦距测量精度可达到  $0.1\%$ , 根据公式(1)可以得到  $\theta$  的标定精度可优于  $0.001$ , 满足系统要求。

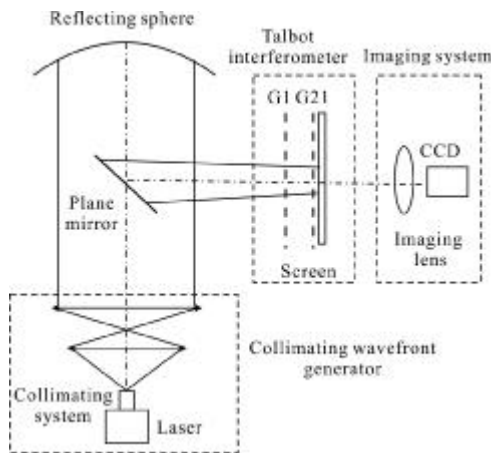


图 8 栅线夹角标定

Fig.8 Angle calibration of two grating lines

具体标定方法: 装调完毕系统正常工作以后, 开始采集条纹, 通过傅里叶变换得到莫尔条纹频谱图, 根据频谱图求出莫尔条纹偏转角度  $\varphi$ ; 测量标准反射凹球面到平面反射镜之间的距离, 记为  $s_1$ , 平面反射镜到 G1 的距离, 记为  $s_2$ ,  $s=s_1+s_2$ ; 测量 G1、G2 之间的距离  $d$ ; 而标准反射凹球面的焦距值  $f=2\ 015\ \text{mm}$  是已知的, 把  $s$ 、 $d$ 、 $\varphi$ 、 $f$  带入公式(1)计算出光栅的夹角  $\theta$ , 此时标定完成。

## 4 实验与结论

实验中对已经精确标定的焦距为  $5\ 436\ \text{mm}$  的单透镜进行测量。其中参数测量及标定值为:  $d=100\ \text{mm}$ ,  $s=100\ \text{mm}$ ,  $\theta=1.5^\circ$ 。

实验装置如图 9 所示。

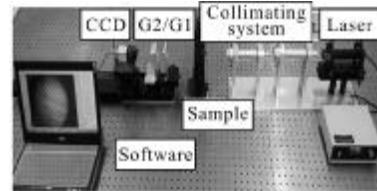


图 9 实验装置

Fig.9 Experimental device

实验采集到的条纹与对应的傅里叶变换如图 10~图 13 所示。

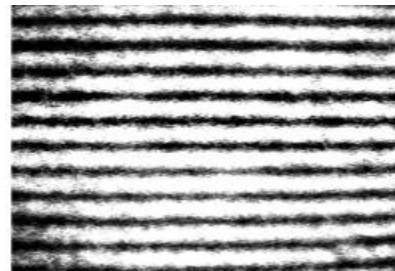


图 10 放入透镜前的条纹

Fig.10 Moiré fringe before placing in lens

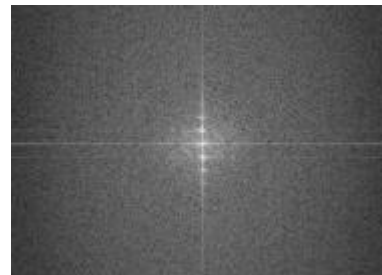


图 11 傅里叶变换频谱图

Fig.11 Fourier transform spectrogram



图 12 放入透镜后的条纹

Fig.12 Moiré fringe after placing in lens

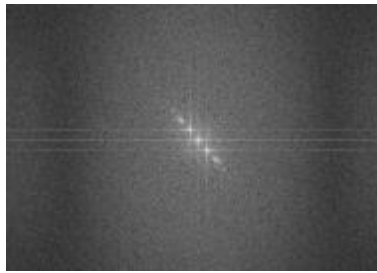


图 13 傅里叶变换频谱图

Fig.13 Fourier transform spectrogram

如表 1 所示,多次测量取平均值得到待测透镜的焦距值为 5 416.75 mm,而实际焦距值为 5 436 mm,误差为 0.35%。

表 1 每次测量的待测透镜焦距值

Tab.1 Corresponding focal lengths of each measurement

Serial number	Angle of Moiré fringes $\varphi(^{\circ})$	Focal lengths of samples
1	35.10	5 436.14
2	35.22	5 412.88
3	35.15	5 426.43
4	35.25	5 407.09
5	35.35	5 387.84
6	35.20	5 416.75
7	35.30	5 397.46
8	35.05	5 445.87
Average value	35.20	5 416.75

文中提出了基于泰伯莫尔效应的长焦距测量系统的装调方法,用数值分析的方法详细分析了待测样品到光栅 G1 的距离  $s$ 、光栅 G1、G2 的距离  $d$ 、栅线夹角  $\theta$  对焦距测量精度的影响,并在此基础上提出了具体的装调方法,可以使测量系统达到以下技术要求:准直波前质量 PV 值优于一个波长; $s$  的测量精度和  $d$  的标定精度达到 0.1mm,的标定精度达到 0.001°。实验中测量焦距 5 436mm 的透镜,误差为 0.35%。

#### 参考文献:

[1] Yuan Shidong. The measurement of large aperture and

long focal length mirrors [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008.

袁士东. 大口径长焦距反射镜焦距测量技术 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.

[2] Hou changlun. A method for mesurement of long focal length based on Talbot effect [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005.

侯昌伦. 基于 Talbot 效应的长焦距测量系统的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.

[3] Wu Lingling, Wang xing, Chen Jing, et al. Limit precision analysis of focal length measurement of lens based on Talbot-moire effect[J]. Applied Optics, 2011, 32(4): 693-697. (in Chinese)

吴玲玲, 王星, 陈靖, 等. 基于 Talbot-Moiré 法的长焦透镜焦距测量的极限精度分析[J].应用光学 2011, 32(4): 693-697.

[4] Yun Yu, Xie Ping, Peng Yong, et al. Method for testing light colimation based on Talbot effect [J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37: 267-269.

云宇, 解平, 彭勇, 等. 基于 Talbot 效应检测光束准直性方法的研究[J]. 红外与激光工程, 2008, 37: 267-269.

[5] Wang Mingjia, Wu Zhiguo, Xu Dapeng, et al. Accurate and automatic recognition of Moiré fringe angle [J]. China Optics, 2011, 4(5): 509-512.

王明佳, 武治国, 徐大鹏, 等. 精确自动识别莫尔条纹方向角的算法[J]. 中国光学, 2011, 4(5), 509-512.

[6] Jin Xiongrong, Zhang Jinchun, Bai Jian. Calibration method for high-accuracy measurement of long focal length with Talbot interferometry [J]. Appied Optics, 2012, 51 (13): 2407-2413.

[7] Wu Xuhua, Chen Lei, Xiao Shaorong. Wavefront testing of collimation beam in phase-shifting interferometer [J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(1): 106-111.

武旭华, 陈磊, 肖韶荣. 干涉仪准直系统波前质量检测 [J]. 红外与激光工程, 2008, 37(1): 106-110.

[8] Liu Zhaodong, Yu Lina, Han Zhigang, et al. Measurement of the wavefront of collimation of a large aperture near-infrared interferometer using a scanning pentaprism system [J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(4): 1082-1087. (in Chinese)

刘兆栋, 于丽娜, 韩志刚, 等. 五棱镜扫描法检测大口径近红外干涉仪准直波前 [J]. 中国激光, 2010, 37(4): 1082-1087.