

小口径长焦透镜的焦距检测技术

赵磊, 白剑*, 方卫栋

浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027

摘要 基于朗奇-泰伯效应及莫尔条纹技术, 利用发散光和不等周期光栅的焦距测量方法被用于小口径长焦透镜的焦距测量。将一块曲率半径存在加工误差的平凹长焦透镜作为待测透镜进行焦距测量。在未知透镜真实曲率半径的情况下, 首先计算待测透镜曲率半径误差对焦距检测精度的影响, 并确定透镜在整个检测系统中的位置, 然后进行透镜焦距实际测量, 分别计算多组测量焦距值。通过对比发现, 在未知待测透镜曲率半径的情况下, 检测焦距的重复性、稳定性均一致, 所测焦距均为 33200~33270 mm, 且重复性精度高于±0.055%, 测量精度优于焦深的 1/5。结果充分说明, 所提方法对小口径长焦透镜的焦距检测是可靠、有效的。

关键词 测量; 发散光; 不等周期光栅; 小口径; 长焦距检测

中图分类号 TH741

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.0412002

Focal Length Measurement Method for Lenses with Small Aperture and Long Focal Length

Zhao Lei, Bai Jian*, Fang Weidong

State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China

Abstract Based on the Ronchi-Talbot effect and moire fringe technique, the focal length measurement method using divergent light and unequal-period grating is used for the measurement of the focal length of lens with a small aperture and long focal length. The long focal length of a plano-concave lens as a lens to be measured with a processing error in the curvature radius is measured. When the true curvature radius of the lens is unknown, first, the influence of the curvature radius error (of the lens to be measured) on the focal length detection accuracy is analyzed, and the position of the lens in the whole detection system is determined. Then, the focal length of the lens is measured, and multiple groups of measured focal length values are calculated separately. By comparison, it can be found that when the curvature radius remains unknown, the repeatability and stability of the focal length measurement are consistent. The measured focal lengths are in the range of 33200–33270 mm. The repeatability precision is greater than 0.055%, and measurement accuracy is better than one-fifth of the focal depth. These results prove that the proposed method is reliable and efficient in the focal length measurement of small-aperture lenses with long focal length.

Key words measurement; divergent beam; gratings with different periods; small aperture; long focal-length measurement

OCIS codes 120.4120; 050.1950; 050.1220; 220.4840

1 引 言

作为惯性约束核聚变等大功率激光系统中的重要组成部件, 长焦透镜的各种基本参数需要被精确测量, 其中透镜的焦距参数是否精确已知将直接影响激光聚焦的效果。长焦透镜也被广泛应用于各种光学系统中^[1]。由于小口径长焦透镜的数值孔径

小、焦深长并难以精确定焦, 焦距的精确测量成为一个巨大挑战。

由于传统的焦距检测方法, 如位移法^[2]、放大率法^[3], 难以实现长焦透镜焦距的精确测量, 国内外研究人员提出了很多种方法对长焦透镜的焦距进行测量。1999年, Meshcheryakov等^[4]提出在长焦透镜的焦距测量系统中加入一块高精度的光楔, 通过移

收稿日期: 2019-07-25; 修回日期: 2019-08-29; 录用日期: 2019-10-21

基金项目: 科学挑战专题(TZ2016006-0502-02)

* E-mail: bai@zju.edu.cn

入、移出光楔,测量像点的偏移距离来计算透镜焦距。该方法对 25 m 焦距的透镜焦距测量精度达到了 0.1%,但对入射平行光的准直性以及光楔的加工精度要求高,焦距检测精度难以进一步提高。2002 年,Parham 等^[5]提出利用移相干涉仪测量焦距,检测精度可以达到 0.02%,但对球面反射镜加工精度要求高,而且对不同焦距的待测透镜需要适配不同的球面反射镜。2009 年,国内的 Zhao 等^[6]提出使用差动共焦定焦的方法进行大口径透镜的焦距检测,通过两次定焦,计算出参考镜与待测镜的组合焦距值,进而计算出待测透镜的焦距值,此方法的焦距测量精度高于 0.013%,但测量精度依赖于标准参考透镜,且标准参考透镜加工难度大、价格昂贵。

上述长焦透镜的焦距检测方法虽有较高的精度,但是依赖于关键性部件的加工精度,而且对测量环境要求高。Yokozeki 等^[7-8]提出采用泰伯效应和莫尔条纹技术进行长焦透镜的焦距测量,此方法对测量环境要求不高,且精度高于 0.1%。基于此方法,本课题组对大口径长焦透镜的焦距测量进行了十多年的研究。2002 年,侯昌伦博士等^[9]提出基于朗奇光栅和泰伯效应结合平行光扫描及子孔径拼接的方法来检测大口径长焦透镜的焦距。2014 年, Luo 等^[10]提出基于发散光和不等周期光栅的长焦透镜测量法,该方法能够一次性全口径地进行透镜焦距测量,使用发散光代替平行光缩短了测量光路,使用不等周期光栅大大提高了检测精度。实验表明,该方法对焦距的检测精度优于 0.16%,重复性、稳定性、复现性均优于 0.002%^[11]。

基于发散光和不等周期光栅的焦距测量方法主要用于大口径长焦透镜的焦距检测,尚未考虑将其用于小口径长焦透镜的焦距检测。相对于口径为 430 mm×430 mm 的传统大口径长焦透镜,将口径仅为大口径透镜的 1/4,也就是 102 mm 的透镜称为小口径长焦透镜。小口径长焦透镜的数值孔径更小、焦深更长,相比大口径长焦透镜更难以检测。根据物理焦深计算公式,若待测透镜的口径为 102 mm,焦距名义值为 50 m,其物理焦深可以达到 ±349 mm。

基于发散光和不等周期光栅的长焦透镜焦距测量方法能够在有限空间内进行长焦透镜的焦距测量,避免了环境空气扰动的影响,利用莫尔条纹角度求取焦距,避免焦深对焦距测量精度的影响。通过实验验证本文方法对小口径长焦透镜焦距测量的有效性。推导出平凹透镜主平面的位置,然后计算曲

率半径的误差对焦距检测的影响,并理论分析了待测透镜在整个测量系统中的位置;最后对一块口径为 102 mm,焦距名义值为 50 m,带有曲率半径加工误差的平凹透镜进行检测。通过对比,在未知待测透镜曲率半径的情况下,检测焦距的重复性、稳定性均一致,充分说明本方法对于小口径长焦透镜焦距检测是可靠和有效的。

2 小口径长焦透镜的焦距测量原理

2.1 基于发散光和不等周期光栅的长焦透镜的焦距检测实验原理

基于发散光和不等周期光栅的长焦透镜焦距检测基本原理如图 1 所示。长焦透镜的焦距检测系统主要由 3 个模块组成,即光源模块、光栅模块和图像采集处理模块。光源模块中波长为 1053 nm 的红外激光器的出射光束经数值孔径为 0.65 的显微物镜会聚和小孔滤波后发散为理想球面波。光栅模块主要由 2 块周期分别为 200 μm 和 275 μm 的朗奇光栅和 1 块毛玻璃组成,通过控制 2 块朗奇光栅之间的距离使在紧贴光栅 G2 的毛玻璃上产生莫尔条纹图像。图像采集处理模块主要包括 2 块反射镜,用以转折光路。CCD 相机用以采集图像;计算机用以处理图像,计算待测透镜的焦距。

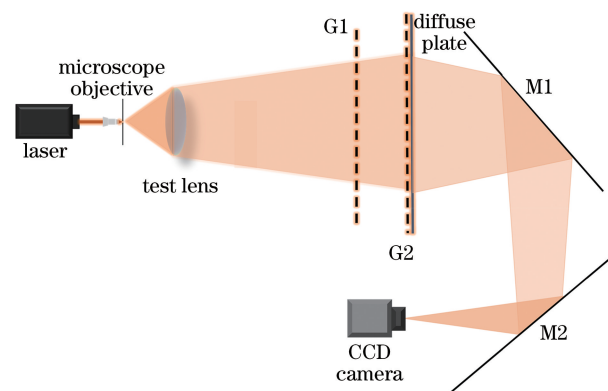


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic of experimental arrangement

在测量中,球面发散光经光栅 G1 后会形成一系列 G1 的泰伯像,在某一泰伯像距离处放置光栅 G2,则光栅 G1 的泰伯像会与光栅 G2 形成莫尔条纹,如图 2 所示。按照重叠线条交点的轨迹来表示莫尔条纹的亮度分布。在 XY 直角坐标系中,两光栅的栅线序数分别用 M、N 表示,则莫尔条纹的序数 K 值为 M-N。图 2 中的连线 I、II、III 的透光面积最大,形成亮条纹,它们的 K 值为 +2、+1 和 0;而在黑线与亮线交点的连线上,光线互相遮挡形成

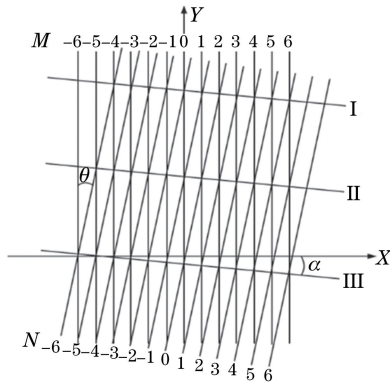


图2 莫尔条纹生成示意图
Fig. 2 Schematic of Moiré fringe generation

暗条纹。根据莫尔条纹的生成原理,莫尔条纹与水平面的角度可以表示为

$$\tan \alpha = \frac{\frac{p_2}{p_1} - \cos \theta}{\sin \theta}, \quad (1)$$

式中: p_2 和 p_1 分别是光栅 G2 和光栅 G1 泰伯像 G1' 的周期; θ 是两光栅之间的夹角。根据几何光学及相似三角原理,泰伯像 G1' 的放大率 η 可以表示为

$$\eta = \frac{p_1'}{p_1} = \frac{f_{\text{wave}} - Z}{f_{\text{wave}}}, \quad (2)$$

式中: f_{wave} 是负值,表示照射到光栅 G1 上的发散光的焦距; Z 是光栅 G1 与光栅 G2 的距离,即泰伯距。

根据(1)式和(2)式,可以求出发散光的焦距值 f_{wave} 为

$$f_{\text{wave}} = Z + \frac{Z}{\beta(\sin \theta \tan \alpha + \cos \theta) - 1}, \quad (3)$$

式中: α 是莫尔条纹与水平面之间的夹角; θ 是两光栅之间的夹角; β 是光栅 G1 与光栅 G2 的周期比。 β 可表示为

$$\beta = \frac{p_1}{p_2}. \quad (4)$$

将被测透镜放入光路中,此时照射到光栅 G1 上的光束的焦距为发散光源与透镜所组成的光学系统的组合焦距,将其定义为 f_{com} ,移动光栅 G2 来获得新的泰伯距离 Z' ,此时组合焦距的焦距公式可以表示为

$$f_{\text{com}} = Z' + \frac{Z'}{\beta(\sin \theta \tan \alpha + \cos \theta) - 1}, \quad (5)$$

式中: Z' 是光栅 G1 和光栅 G2 之间的距离,也就是放入被测透镜后的泰伯距离,如图 3 所示。此外,通过透镜组合公式可以得到被测透镜的焦距。前后表面 V1、V2 的主平面位置 H1 和 H2 可以表示为

$$\begin{cases} l_H = -d_0 r_1 / n(r_2 - r_1) + (n - 1)d_0 \\ l'_H = -d_0 r_2 / n(r_2 - r_1) + (n - 1)d_0, \\ d_2 = d_1 - d_0 - l'_H \end{cases} \quad (6)$$

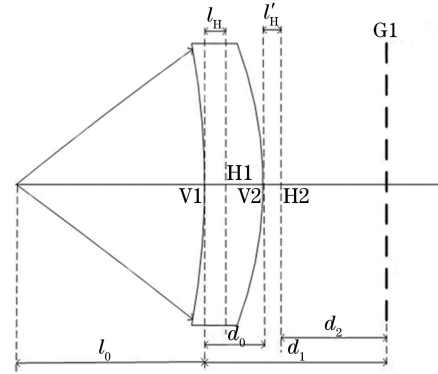


图3 光学系统示意图

Fig. 3 Schematic of optical system

式中: l_H 是物方主平面距离前表面的距离; l'_H 是像方主平面距离后表面的距离; d_0 是被测透镜的中心厚度; d_2 是被测透镜后表面与光栅 G1 之间的距离; r_1 、 r_2 分别是透镜前后表面的曲率半径; n 是透镜的折射率; d_1 是透镜前表面到光栅 G1 的距离。结合(5)式和(6)式,测量透镜的焦距可以表示为

$$f_{\text{lens}} = 1 / \left(\frac{1}{f_{\text{com}} + d_2} - \frac{1}{l_0 + d_1 - l_H} \right). \quad (7)$$

2.2 基于发散光和不等周期光栅的小口径长焦透镜的焦距测量原理

传统的基于发散光和不等周期朗奇光栅的焦距检测系统主要是针对于弯月形大口径透镜的焦距检测。针对小口径平凹透镜的焦距检测,需要重新计算确定主平面的位置以及透镜在整个测量系统中的合适位置。平凹透镜光学系统示意图如图 4 所示。

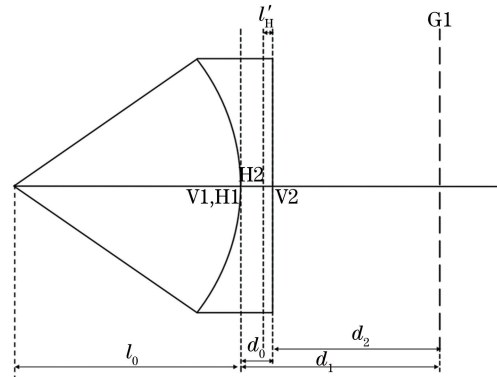


图4 平凹透镜光学系统示意图

Fig. 4 Schematic of optical system for plano-concave lens

针对平凹透镜,(6)式需要修改为

$$\begin{cases} l_H = 0 \\ l'_H = -\frac{d_0}{n} \\ d_2 = d_1 - d_0 - l'_H \end{cases} \quad (8)$$

从(8)式可以看出,平凹透镜主平面的位置与透镜的曲率半径无关。通过(7)式与(8)式可知,曲率半径的测量误差不会影响焦距的实际测量。

为了实现小口径光学透镜焦距的全口径测量以及提高采集图像中有效莫尔条纹的数量,需要将透镜放置于合适的位置。光源模块能够在距离点光源 4000 mm 处形成口径为 610 mm 的理想球面波,实现对口径为 430 mm×430 mm 的被测方形透镜的焦距检测。为了实现口径为 102 mm 的待测圆形透镜的小口径照明,根据相似三角形原理,需要使被测透镜与点光源之间的距离大于 671 mm。

在焦距测量系统中加入待测透镜后,泰伯像 G1 的放大率 η 可以表示为

$$\eta = \frac{p'_1}{p_1} = \frac{f_{com} - Z}{f_{com}}, \quad (9)$$

结合(7)式变形推导得知,当被测透镜焦距在 10~50 m 内时,待测透镜离光源越近,组合焦距越小,光栅 G1 的使用面积越大,泰伯像 G1' 的放大率越大,采集的图像中有效莫尔条纹数量越多,越有利于透镜焦距的精确测量。因此在保证能够实现全口径照明的情况下,应尽可能缩短点光源到待测透镜的距离。

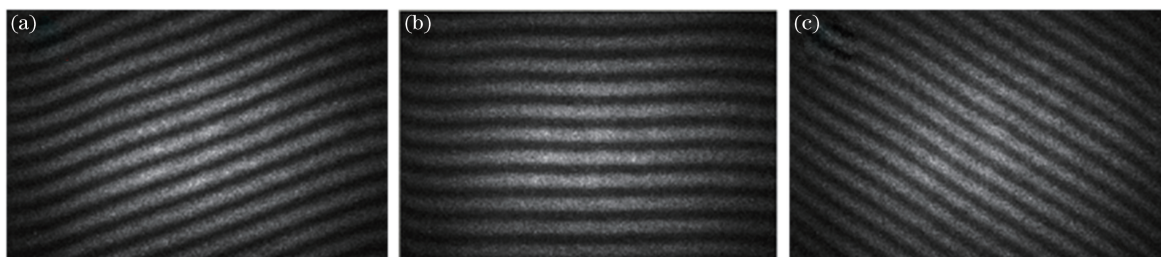


图 6 最佳测量位置附近的莫尔条纹。(a)最佳位置前;(b)最佳位置;(c)最佳位置后

Fig. 6 Moiré fringes near optimal measuring position. (a) Before optimal measuring position; (b) at optimal measuring position; (c) after optimal measuring position

3.2 实验结果

本次实验对一块焦距为 50 m,曲率半径带有加工误差的平凹透镜进行检测。透镜参数如表 1 所示。分别改变凹面的曲率半径值进行三次焦距检测,检测焦距具体值如表 2 所示,其中 f 为测量的焦距值, \bar{f} 为 8 次测量焦距值的平均值, Δf 为测量的焦距值与 8 次测量焦距值的平均值的差值。

3 实验及结果

3.1 小口径长焦透镜的焦距测量实验

搭建图 5 所示的实验系统,待测透镜使用夹具固定,通过电子自准直仪调整待测元件的姿态,使待测透镜与整个测量系统共轴并垂直于光轴,其中待测透镜距离点光源 820.5 mm。

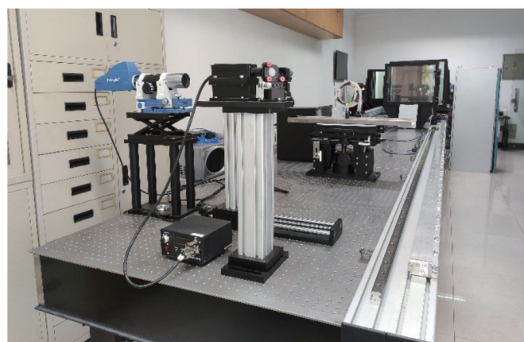


图 5 长焦距检测系统的装置图

Fig. 5 Photograph of long focal-length testing system

为了得到清晰的莫尔条纹图像,需要调整光栅 G2 的最佳测量位置,理论上光栅 G2 的最佳测量位置即光栅 G1 的泰伯自成像的某个周期位置处。在之前的研究中,当最佳测量位置处所形成的莫尔条纹倾角为光栅 G1 和光栅 G2 夹角的 1/2 时,焦距测量的精度最高^[12]。在移动光栅 G2 位置过程中,莫尔条纹先密集后稀疏,莫尔条纹的倾角从大变小,如图 6 所示。

从表 2 可知,焦距检测时,当输入不同的曲率半径时,测量的焦距值均一致,这也验证了平凹透镜曲率半径的测量误差不会影响焦距测量,这与理论推导结果一致。而且三次测量焦距的重复性都优于 $\pm 0.055\%$ 。

这里,以测量值的平均值为参考值,待测透镜的焦深为 ± 154.2 mm,测量精度优于焦深的 1/5,基于此,认为测量的结果是准确、可靠的。

表 1 待测透镜参数

Table 1 Parameters of lens to be tested

Refractive index	Central thickness d_0 /mm	r_1 /mm	r_2 /mm	Aperture D /mm
1.45	8.723	-25000	∞	102

表 2 不同曲率半径下焦距测量的对比

Table 2 Comparison of focal-length test with different curvature radiuses

No.	$r_1 = -16800$ mm		$r_1 = -17000$ mm		$r_1 = -25000$ mm	
	f /mm	$\Delta f/\bar{f}$	f /mm	$\Delta f/\bar{f}$	f /mm	$\Delta f/\bar{f}$
1	-33216.2	0.0080%	-33243.3	-0.0273%	-33212.4	-0.0531%
2	-33210.0	-0.0107%	-33262.9	0.0317%	-33240.6	0.0317%
3	-33219.9	0.0191%	-33262.8	0.0314%	-33221.6	-0.0254%
4	-33222.1	0.0257%	-33250.2	-0.0065%	-33247.2	0.0516%
5	-33203.8	-0.0294%	-33243.5	-0.0267%	-33212.3	-0.0534%
6	-33222.8	0.0279%	-33246.7	-0.0170%	-33228.3	-0.0053%
7	-33203.8	-0.0294%	-33268.9	0.0497%	-33237.5	0.0224%
8	-33209.8	-0.0113%	-33240.6	-0.0354%	-33240.5	0.0314%
\bar{f}		-33213.5		-33252.4		-33230.6

4 结 论

详细介绍了基于发散光和不等周期光栅的焦距测量方法,并将该方法用于小口径长焦透镜的焦距检测中。推导了平凹透镜主平面的位置,从理论上论证了曲率半径的测量误差不会影响平凹透镜焦距的测量,并通过实验验证了。此外,推导了小口径待测透镜在整个系统中的位置,并通过实验验证了本文方法对小口径长焦透镜焦距测量的有效性。对一块口径为 102 mm,焦距为 50 m,带有曲率加工误差的平凹透镜进行检测。通过对比可知,在未知待测透镜曲率半径情况下,检测焦距的重复性、稳定性均一致,所测焦距均为 33200~33270 mm,且单次测量的重复性精度优于±0.055%,测量精度优于焦深的 1/5。结果充分说明,本文方法对小口径长焦透镜的焦距检测是可靠、有效的。

参 考 文 献

[1] Chen W, Liang Z C, Ge L, et al. Micro-optics label system based on six-reflection fold annular aperture lens[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(6): 062201.
陈伟, 梁忠诚, 戈兰, 等. 基于 6 次反射环形孔径透镜的微光学标签系统[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(6): 062201.

[2] Ma X K. Error analysis of measuring focal length of

convex lens by object-image interchange method[J]. Physics Experimentation, 1989, 9(6): 258-260.

马兴坤. 物象互换法测凸透镜焦距的误差分析[J]. 物理实验, 1989, 9(6): 258-260.

[3] Mu G G, Zhan Y L. Optics[M]. Beijing: People's Education Press, 1978.

母国光, 战元令. 光学[M]. 北京: 人民教育出版社, 1978.

[4] Meshcheryakov V I, Sinelnikov M I, Filippov O K. Measuring the focal lengths of long-focus optical systems[J]. Journal of Optical Technology, 1999, 66(5): 458-459.

[5] Parham T, McCarville T J, Johnson M A, et al. Focal length measurements for the national ignition facility large lenses [C]//Optical Fabrication and Testing, June 3-5, 2002, Tucson, Arizona, United States. Washington, D.C.: OSA, 2002: OWD8.

[6] Zhao W Q, Sun R D, Qiu L R, et al. Laser differential confocal ultra-long focal length measurement[J]. Optics Express, 2009, 17(22): 20051-20062.

[7] Yokozeki S, Kusaka Y, Patorski K. Geometric parameters of moiré fringes [J]. Applied Optics, 1976, 15(9): 2223-2227.

[8] Nakano Y, Murata K. Measurements of phase objects using the Talbot effect and moiré techniques [J]. Applied Optics, 1984, 23(14): 2296-2299.

[9] Hou C L, Bai J, Hou X Y, et al. The measurement of long focal length based on Talbot effect of Ronchi grating

- [J]. Acta Optica Sinica, 2002, 22(11): 1328-1330.
侯昌伦, 白剑, 侯西云, 等. 基于龙基光栅塔尔博特效应的长焦距测量[J]. 光学学报, 2002, 22(11): 1328-1330.
- [10] Luo J, Bai J, Zhang J C, et al. Long focal-length measurement using divergent beam and two gratings of different periods [J]. Optics Express, 2014, 22(23): 27921-27931.
- [11] Luo J. Study on large-aperture lens detection techniques based on wavefront sensing [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016.
- 罗佳. 基于波前传感方法的大口径透镜检测技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
- [12] Jin X R. Calibration methods for long focal-length measurement with Talbot interferometry [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.
- 金晓荣. 基于 Talbot 效应的高精度长焦距检测系统的校准方法[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.