

长焦距测量系统的像差误差校正方法研究

江 瑶¹ 白 剑¹ 罗 佳¹ 李 强²

(¹ 浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)
² 精密光学工程研究中心, 四川 成都 610041

摘要 针对长焦距测量中被测透镜像差引入的焦距测量误差提出了一种校正方法。传统长焦距测量中使用高斯公式来计算被测透镜的焦距值, 未考虑被测透镜像差引入的误差。在采用发散光作为测量光束的大口径光学元件焦距测量中, 该误差成为了影响测量精度的重要因素。详细分析了基于发散光和泰伯效应的长焦距测量法, 利用数值方法获得了误差修正值, 并与 Zemax 的仿真结果进行了对比。利用 Visual C++ 编程, 实现了测量结果的自动校正功能。对名义焦距值为 13500 mm 和 31251 mm 透镜的测量数据分别进行校正后, 其相对于名义焦距值的测量精度分别优于 0.007% 和 0.022%。将校正后的测量精度与干涉仪法的测量精度进行了对比, 结果充分说明了该方法是可靠和有效的。

关键词 测量; 误差校正; 像差; 长焦距

中图分类号 TH741 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.1222002

An Error Calibration Method against Aberration in Long Focal Length Measurement

Jiang Yao¹ Bai Jian¹ Luo Jia¹ Li Qiang²

(¹ State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)
² Fine Optical Engineering Research Center, Chengdu, Sichuan 610041, China)

Abstract A high accuracy calibration method for errors resulted from aberration in long focal length measurement, is presented. Generally, Gaussian equation is used for calculation without consideration of the errors caused by aberration. However, the errors become the key factor affecting the accuracy in the measurement system, based on divergent light, of a large aperture and long focal length lens. An effective way is proposed to calibrate the errors, with detailed analysis of the long focal length measurement based on divergent light and Talbot interferometry. Aberration errors are obtained by numerical method and compared with results simulated by Zemax. Then, auto-correction is achieved with the help of Visual C++ software and the modified measurement results of 13500 mm focal length lens and 31251 mm focal length lens reveal that the relative accuracy is better than 0.007% and 0.022%, respectively. By comparing the modified relative accuracy with relative accuracy obtained in interferometer measurement, the proposed method is proved to be highly effective and reliable.

Key words measurement; calibration for errors; aberration; long focal length measurement

OCIS codes 220.1010; 220.3630; 220.4840

1 引 言

长焦距透镜被广泛应用于空间光学系统、高能激光器、激光核聚变等大型光学系统中。焦距是透

镜最重要的参数之一。但是长焦距测量是光学测量领域的一个难点,其原因主要有两点:1)大口径长焦距透镜数值孔径小、焦深长,难以实现精确定焦;2)

收稿日期: 2014-06-10; **收到修改稿日期**: 2014-07-08

基金项目: 国家自然科学基金(61007001)

作者简介: 江 瑶(1991—),女,硕士研究生,主要从事光学测量方面的研究。E-mail: tuntun1991@126.com

导师简介: 白 剑(1967—),男,教授,博士生导师,主要从事二元光学、微光学、光电检测和全景成像等方面的研究。

E-mail: bai@zju.edu.cn

焦距测量路径长,容易受到空气扰动、振动等外界因素的影响,测量精度低^[1-2]。目前测量长焦距的方法有很多种。Meshcheryakov等^[3]提出利用楔角很小的高精度光楔来测量长焦距光学系统的焦距值,该方法在测量25 m的长焦距时精度可达0.1%。Deboo等^[4-5]利用反射型菲涅耳全息片来测量长焦距,这种方法的测量结果精度优于0.01%,但对全息片要求很高。Zhao等^[1,6]利用差动共焦定焦的方法通过两次定焦来测量长焦距透镜的焦距值,该方法测量误差小于0.013%,但这种方法的测量精度依赖于标准参考透镜。朱成昌等^[7]提出了基于光栅多缝衍射的转角法测量微透镜焦距,对于相对口径较小的微透镜焦距测量具有较高的测量精度和测量效率。段亚轩等^[8]提出了一种基于自准直原理的长焦距测量方法,该方法在测量焦距值为7171 mm的透镜时精度可达0.03%。

上述方法在长焦距测量中已经达到较高的测量精度,但是它们对测量环境的要求比较高,受空气扰动或者振动等影响较大,而且测量精度依赖于一些关键性的光学部件。Nakano等^[9-10]早在1986年提出了基于Ronchi光栅和泰伯效应的高精度长焦距测量方法,该方法是通过Ronchi光栅的泰伯像与Ronchi光栅所产生的叠栅条纹角度的计量来测量长焦距。这种测量方法可有效减小空气扰动和振动对测量精度带来的影响,测量精度优于0.1%。为了实现大口径长焦距透镜的焦距测量,本课题组基于该测量原理提出了扫描测量法^[11-14]。但扫描过程耗时长且会引入扫描误差,影响测量精度。为了克服这一难题,实现全口径测量,又提出了基于发散光和不等周期光栅的长焦距测量方法。发散光的引入大大缩短了测量光路,同时不等周期光栅的使用

也有效提高了测量精度,且该方法有效抑制了空气扰动对测量精度的影响。

传统长焦距测量中使用高斯公式来计算被测透镜的焦距值,未考虑被测透镜像差引入的误差。在采用发散光作为测量光束的大口径光学元件焦距测量中,该误差成为了影响测量精度的重要因素。本文详细分析了在基于发散光和泰伯效应的长焦距系统中由被测透镜像差引入的误差大小,并利用数值计算得到该误差值,此误差值与Zemax仿真结果高度吻合。利用Visual C++编程改进了系统的测量软件,实现了测量数据的自动校正功能。将修正后的测量精度与干涉仪法的测量精度进行了对比,结果证明了该校正方法是可靠和有效的。

2 长焦距测量系统实验原理

基于发散光和泰伯效应的长焦距测量基本原理如图1所示,系统实物图如图2所示。波长为1053 nm的红外激光器出射的光束,经高倍显微物镜会聚形成理想的发散球面波,在距离显微物镜焦面4 m处获得口径 $\Phi=610$ mm,焦距为-4000 mm的均匀发散光,在该位置处放置430 mm×430 mm的方形被测透镜,可实现全口径测量。为获得叠栅条纹,在距离被测透镜后方100 mm处放置尺寸大小为430 mm×430 mm,周期为200 μm 的Ronchi光栅一;在距离被测透镜后方光栅一泰伯自成像位置处放置尺寸大小为592 mm×592 mm,周期为275 μm 的Ronchi光栅二;592 mm×592 mm的毛玻璃板紧贴光栅二放置,即可在毛玻璃表面观测到叠栅条纹。光栅二后方3 m处放置成像CCD,反映全口径被测透镜焦距的叠栅条纹经图像卡采集到计算机,通过图像处理求得叠栅条纹的角

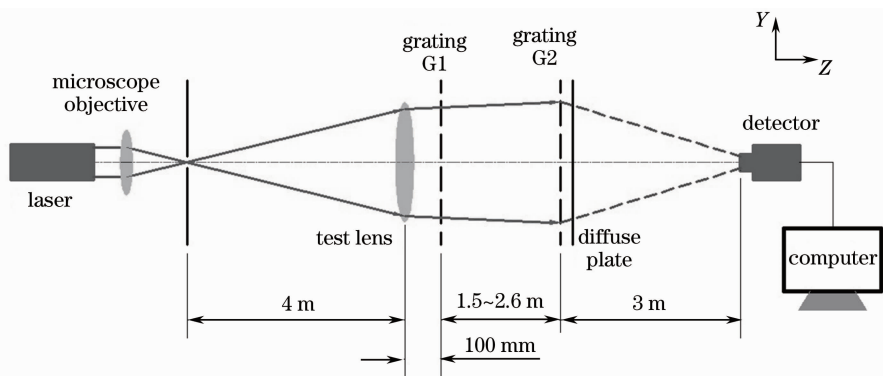


图1 系统原理图

Fig. 1 Schematic representation of the experimental arrangement

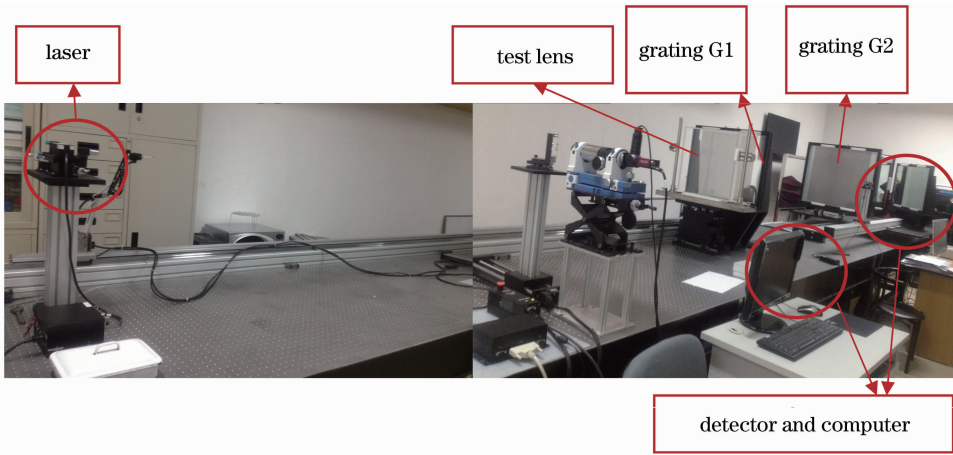


图 2 系统实物图

Fig. 2 Prototype of the system

度,进而得到被测透镜的焦距。为满足不同焦距透镜的高精度测量要求,光栅二与成像 CCD 图像探测系统需要沿光轴实现整体精密移动,导轨的移动精度为 0.01 mm。

测量系统中被测透镜放置于发散光路,如图 3

所示。利用叠栅条纹的角度可推算得到系统的组合焦距值。根据近轴成像公式,结合透镜的曲率半径、折射率、厚度等各项参数可得到被测透镜的焦距值。但这种计算方法未考虑被测透镜像差引入的误差,会影响系统的测量精度。

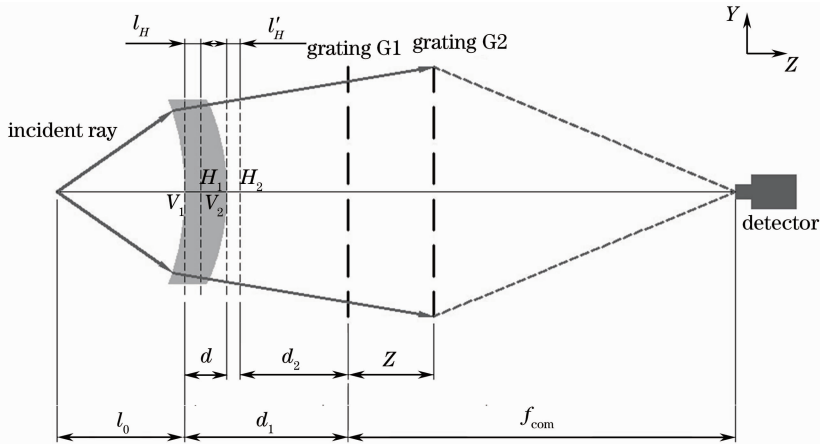


图 3 成像光路示意图

Fig. 3 Schematic representation of the optical system

(1)式为根据叠栅条纹的角度计算得到的被测透镜和发散光的组合焦距值 f_{com} 。式中 $Z = \frac{kp_1^2}{\lambda}$ 为泰伯距, $k = 1, 2, 3, \dots$ 为泰伯系数, δ 为两光栅之间夹角, α 为叠栅条纹角度, $\beta = \frac{p_1}{p_2}$ 为光栅一和光栅二的周期比,

$$f_{com} = Z + \frac{Z}{\beta(\sin \delta \tan \alpha + \cos \delta) - 1}. \quad (1)$$

设被测透镜前表面半径为 r_1 , 后表面半径为 r_2 , 透镜厚度为 d , 透镜折射率为 n 。图 3 中, l_0 为光源至被测透镜前表面顶点 V_1 的距离, d_1 为被测透镜前表面顶点 V_1 到光栅一前表面的距离, d_2 为被测透镜

像方主面 H_2 到光栅一前表面距离, l_H 为被测透镜前表面顶点 V_1 至物方主面 H_1 之间的距离, l'_H 为被测透镜后表面顶点 V_2 至像方主面 H_2 之间的距离。根据近轴成像公式可得^[15]

$$\begin{cases} l_H = \frac{-dr_1}{n(r_2 - r_1) + (n - 1)d} \\ l'_H = \frac{-dr_2}{n(r_2 - r_1) + (n - 1)d}, \\ d_2 = d_1 - d - l'_H \\ \frac{1}{f_l} = \frac{1}{f_{com} + d_2} + \frac{1}{l_0 + l_H} \end{cases} \quad (2)$$

结合(1)式和(2)式可求得被测透镜焦距 f_l 。

3 系统中的像差分析与校正

3.1 系统中的像差分析

由于被测透镜本身存在球差,所以均方根(RMS)值最小点与理想高斯像点之间会出现偏差,如图4所示。图中 l_0 为光源A至透镜前表面顶点 V_1 之间的距离, l 为高斯像点B至透镜后表面顶点 V_2 之间的距离, l' 为RMS值最小点C至透镜后表面顶点 V_2 之间的距离, l'' 为最外侧光线的轴上成像点E至透镜后表面顶点 V_2 之间的距离。孔径角为 θ 的光线在轴上成像于D点, l_θ 为D至透镜后表面顶点 V_2 之间的距离, d 为D与高斯像点B之间的距离。 Δ 为RMS值最小点C与高斯像点B之间的距离,即所求的误差校正值。

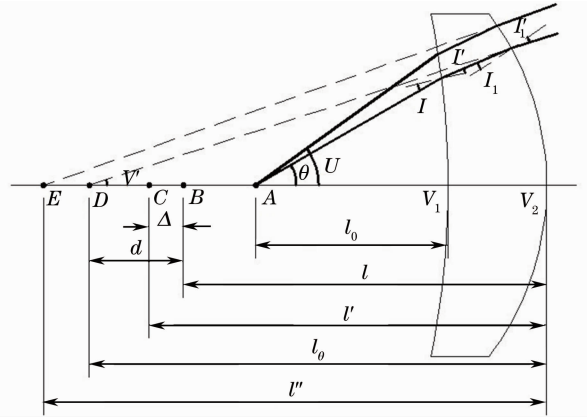


图4 像差分析图

Fig. 4 Analysis diagram of aberration

算可得理想高斯像点B与透镜后表面顶点 V_2 之间的距离 $l=6175.08$ mm。通过Zemax仿真可以得到不同入瞳口径对应的RMS值最小点C的位置,结果如表1所示。其中 $D=430$ mm对应的 Δ 值,即系统中实现全口径测量时的误差校正值。从表1中数据可以推断出,被测透镜置于发散光情况下的球差明显大于置于平行光情况下的球差。

表1 不同入瞳口径对应的RMS值最小点位置及其与高斯像点间的距离

Table 1 Values of l' and Δ under different pupil apertures

Parameter	Value									
D /mm	10	60	110	160	210	260	310	360	410	430
l' /mm	6175.09	6175.12	6175.18	6175.27	6175.40	6175.57	6175.77	6176.01	6176.28	6176.39
Δ /mm	0.01	0.04	0.10	0.19	0.32	0.49	0.69	0.93	1.20	1.31

3.2 像差带来的误差对被测透镜焦距值的测量的影响

利用Zemax仿真可以得到光源至透镜前表面

距离 l_0 与误差校正值 Δ 之间的关系,如图5所示。从图中关系可以看出,当光源离透镜越近,误差校正值就越大。

$$\begin{cases} f'_i = \frac{(f_{com} + \Delta + d_2)(l_0 + l_H)}{(f_{com} + \Delta + d_2) + (l_0 + l_H)} \\ \Delta f_L = f'_i - f_i = \frac{(f_{com} + \Delta + d_2)(l_0 + l_H)}{(f_{com} + \Delta + d_2) + (l_0 + l_H)} - \frac{(f_{com} + d_2)(l_0 + l_H)}{(f_{com} + d_2) + (l_0 + l_H)} \end{cases}, \quad (3)$$

$$S = (f'_i - f_n) / f_n, \quad (4)$$

由(3)式和(4)式计算可分别得到校正后的被测透镜的焦距值 f'_i 以及 f'_i 相对于名义焦距值 f_n 的测量精度 S 。图6为通过计算得到的 Δ 与 S 之间的关系图。当 Δ 仅为0.5 mm时,对于测量精度的影响就达到0.018%。并且当光源离透镜越近时, Δ 就越大,这种影响也会变得更显著。因此为了提高长焦距测量系统的测量精度必须对像差引入的误差进行校正。

3.3 系统中实际成像光线的光路分析

可以通过Zemax仿真得到 Δ 的值,也可以通过

数值方法计算得到。对孔径角为 θ 的光线进行详细分析,该光线成像过程如图7所示。被测透镜前表面半径为 r_1 ,圆心位于 O_1 。后表面半径为 r_2 ,圆心位于 O_2 。 r_1, r_2 均为负值。被测透镜折射率为 n ,厚度为 d 。成像光线与透镜前表面交于X点,与透镜后表面交于Y点。 S_1 为A点与X点之间的轴向距离, S_2 为Y点与透镜后表面顶点之间的轴向距离。以 O_2 为原点建立坐标系,令X点坐标为 (y_1, z_1) ,Y点坐标为 (y_2, z_2) 。根据图中关系以及成像法则可得以下

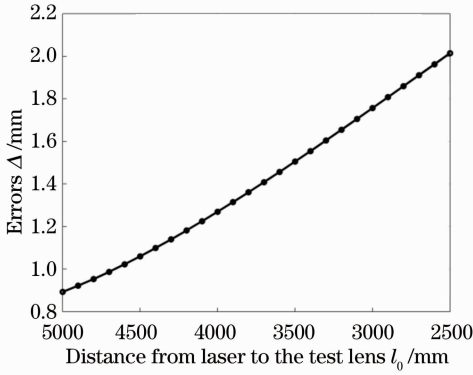

 图 5 l_0 与 Δ 关系图

Fig. 5 Errors obtained under different distances between laser and the front surface of the test lens

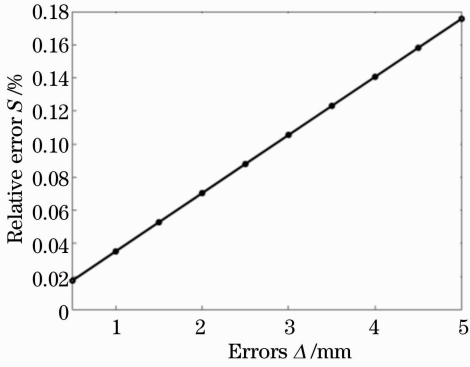

 图 6 Δ 对系统测量精度的影响

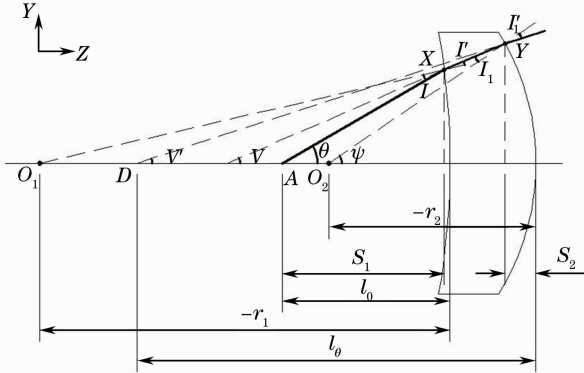
 Fig. 6 Influence of Δ in measurement accuracy


图 7 实际成像光路图

Fig. 7 Actual imaging optical path

公式：

$$S_1 = l_0 - (-r_1 - \sqrt{r_1^2 - y_1^2}), \quad (5)$$

$$\tan \theta = \frac{y_1}{S_1}, \quad (6)$$

$$\frac{\sin \theta}{-r_1} = \frac{\sin I}{-r_1 - l_0}, \quad (7)$$

$$\sin I' = \frac{\sin I}{n}. \quad (8)$$

光线经过透镜前表面后发生偏转，第二段光线与光

轴的夹角为 V ：

$$V = \theta + I' - I, \quad (9)$$

在以 O_2 为原点的坐标系中建立这段光线的方程，设方程表达式为

$$y = kz + b, \quad (10)$$

由于 X, Y 均在直线上，且 X 点坐标 y_1 和 z_1 的值可由图中关系求得

$$\begin{cases} y_1 = S_1 \times \tan \theta \\ z_1 = -r_2 + S_1 - l_0 - d' \end{cases}, \quad (11)$$

$$\begin{cases} k = \tan V \\ b = y_1 - kz_1 \end{cases}, \quad (12)$$

故透镜后表面的曲线方程可表示为

$$y^2 + z^2 = r_2^2, \quad (13)$$

结合(10)、(12)、(13)式可以计算得到 Y 点的坐标值。

光线经过透镜后表面后出射，出射光线与光轴成 ψ 角。由图中关系可得

$$\sin \psi = \frac{y_2}{-r_2}, \quad (14)$$

$$I_1 = \psi - V, \quad (15)$$

$$\sin I'_1 = n \sin I_1, \quad (16)$$

$$V' = \psi - I'_1, \quad (17)$$

$$S_2 = -r_2 - \sqrt{r_2^2 - y_2^2}, \quad (18)$$

最终可以得到该光线的像点与被测透镜后表面之间的距离为

$$l_0 = \frac{y_2}{\tan V'} + S_2. \quad (19)$$

仍假设光源放置在被测透镜前 4200 mm 处，利用(2)式计算可得理想高斯像点 B 与透镜后表面顶点 V_2 之间的距离 $l = 6175.08$ mm。取 10 个不同的 θ ，利用上述推导过程计算其对应光线的像点 D 的位置及 D 与高斯像点 B 之间的距离 d ，结果如表 2 所示。式中 $\theta = 0.0512$ rad 时，对应的光线为入瞳孔径 $D = 430$ mm 时的最外侧光线，即实现全口径测量时的最外侧光线。从表 2 中数据可以看出， θ 越大，对应光线的像点越偏离高斯像点。

3.4 系统中由像差引入误差的数值计算方法

计算得到不同孔径角对应光线的成像位置后，便可确定 RMS 值最小点 C 的位置。根据物距及透镜的各项参数，由(2)式计算得到高斯像点 B 的位置。在以 B 点前 5 mm 的位置至 B 点后 5 mm 的位置为区间，每隔 0.01 mm 取一个点，过这 1000 个点分别做垂直于光轴的平面。将孔径角划分为 10 等份，得到 10 条对应的成像光线。求出这 10 条成像

表 2 不同孔径角对应光线的像点位置及其与高斯像点的距离

Table 2 Values of l_θ and d under different aperture angles

Parameter	Value									
θ /rad	0.0012	0.0071	0.0131	0.0190	0.0250	0.0309	0.0369	0.0428	0.0488	0.0512
l_θ /mm	6174.98	6175.04	6175.16	6175.35	6175.62	6175.95	6176.36	6176.84	6177.39	6177.63
d /mm	-0.12	-0.04	0.08	0.27	0.54	0.87	1.28	1.76	2.31	2.55

光线与各个平面的交点,并分别计算每个平面上各交点到光轴距离的 RMS 值。比较这 1000 个 RMS 值,最小值对应的轴上点即 C 点。从而也求得了 C 点与高斯像点 B 之间的距离,即误差校正值 Δ 。

4 实验及结果

4.1 校正结果

为了实现对测量结果的智能化控制,基于 Visual C++ 对之前的系统软件进行了改进,使得可以直接得到修正后的焦距值,使用的编程语言为 Visual C/C++。编程思想如下所述:输入实际测量的各项参数,包括光源至透镜前表面的距离、光源

发出激光的波长、入瞳孔径和透镜的各项参数,并利用近轴公式得到高斯像点的位置。建立实际光线的成像模型,根据上述推导过程求出系统 RMS 值最小点的位置以及误差校正值。最后将误差校正值 Δ 代入(3)式便可以得到校正后的焦距值。利用编写的程序对被测透镜进行仿真,并将所得误差校正差值与 Zemax 软件仿真得到的结果进行对比,结果如表 3 所示。其中 l_0 为光源到透镜前表面的距离, Δ_1 为 Zemax 仿真得到的误差校正值, Δ_2 为程序仿真得到的误差校正值。两组数据的高度一致说明了该程序的准确性。

表 3 软件仿真结果与 Zemax 仿真结果的对比

Table 3 Comparison between results obtained by software we write and Zemax

Parameter	Value								
l_0 /mm	4200	3755	3624	3520	3464	3390	2849	2768	
Δ_1 /mm	1.308	1.520	1.585	1.637	1.666	1.703	1.982	2.023	
Δ_2 /mm	1.31	1.52	1.59	1.64	1.67	1.70	1.98	2.02	

利用改进的软件对光源放置于被测透镜前不同位置处所得的测量数据进行了校正。测量数据和校正结果如表 4 所示,校正前后焦距值的关系如图 8 所示。随着光源与透镜之间距离的减小,像差引入

的误差增大,导致透镜测量焦距值与透镜名义焦距值之间的误差也增大。经过校正后,光源放置在透镜前不同位置的测量结果都接近名义焦距值,系统的测量精度明显提高。

表 4 校正前与校正后的测量结果对比

Table 4 Comparison of focal lengths with and without calibration

Number	l_0 /mm	f_i /mm	f'_i /mm	Relative error /%
1	3914.85	13490.15152	13497.74073	-0.0167
2	3469.24	13487.83094	13500.09937	0.0007
3	3338.36	13484.60587	13498.76460	-0.0092
4	3234.52	13480.95579	13496.83356	-0.0235
5	3178.42	13481.10013	13498.00603	-0.0148
6	3104.77	13481.99233	13500.36496	0.0027
7	2563.38	13467.49823	13501.97729	0.0146
8	2482.47	13463.34391	13501.38509	0.0103

分别对四块名义焦距值均为 13500 mm 的透镜进行测量,四块透镜的各项参数均与之前的被测透镜完全一致。测量过程中,光源与透镜之间的距离保持不变,每块透镜分别测量了 12 次。48 组测量数据及其校正结果如图 9 所示。

校正前与校正后的测量精度。结果表明,与名义值相比,校正前的测量精度仅优于 0.063%,而校正后的测量精度优于 0.007%。

为了验证该校正方法也适用于焦距值在 30 m 以上的透镜,对一块名义焦距值为 31251 mm 的透镜进行了测量。该透镜的前表面半径 $r_1 =$

将测量数据以及校正结果代入(4)式计算得到

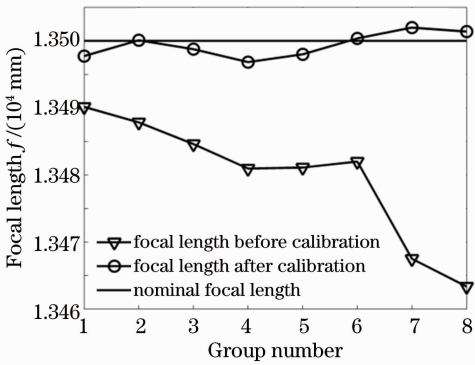


图 8 校正前与校正后的测量结果对比
Fig. 8 Comparison of focal lengths with and without calibration

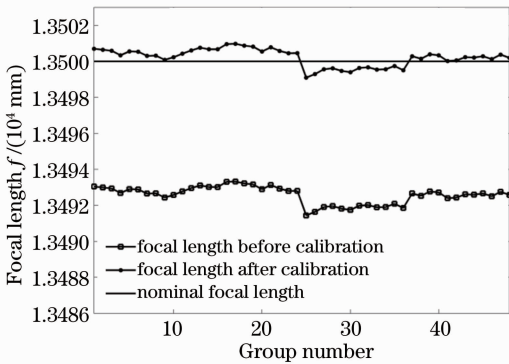


图 9 四块 13500 mm 透镜的测量结果
Fig. 9 Experimental results of four 13500 mm focal length lenses

—28133.886 mm, 后表面半径 $r_2 = -9377.868$ mm, 透镜厚度 $d = 46.5$ mm, 透镜折射率 $n = 1.4498$, 入瞳孔径 $D = 430$ mm。波长 $\lambda = 1053$ nm 的激光器放置 在被测透镜前 4200 mm 处。12 组测量数据以及校正结果如图 10 所示。利用(4)式计算得到校正前与校正后的测量精度。结果表明,与名义值相比,测量精度由校正前的 0.061% 提高到 0.022%。

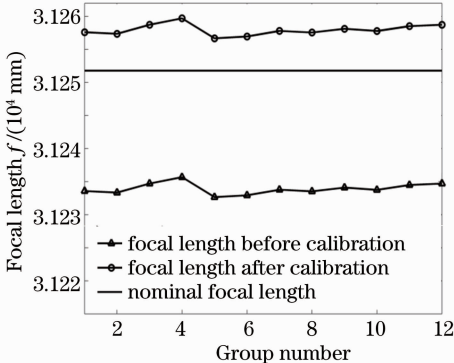


图 10 31251 mm 透镜的测量结果

Fig. 10 Experimental results of 31251 mm focal length lens

4.2 与干涉法测量结果的对比

为了进一步验证校正结果的可靠性,将校正后的测量精度与干涉仪法的测量精度进行了对比。干涉仪测量透镜焦距的原理如图 11 所示。干涉仪发出的平行光($\lambda = 589.7$ nm)经过标准透镜和被测透镜,最后到达平面反射镜。当标准透镜的焦点与被测透镜的焦点位置重合于 O 点,会出现干涉条纹。利用光栅尺精确测量 O 点与透镜前表面顶点 V 的距离 l_v , 即被测透镜的后截距,其中光栅尺的精度可达 0.01 mm。干涉仪测量法的测量精度较高,但用于测量长焦距透镜需要很大的测量空间。而且测量过程中不易对焦,耗时较长。

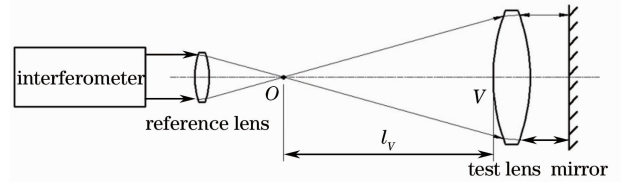


图 11 干涉仪法测量原理

Fig. 11 Schematic representation of the interferometer measurement

分别用长焦距测量系统和干涉仪测量系统对 10 块不同透镜(其中包括 7 块名义焦距值为 12000 mm 的透镜和 3 块名义焦距值为 31250 mm 的透镜)进行了测量,并对长焦距测量系统的测量数据进行了校正。利用(4)式分别计算出校正后的测量精度与干涉仪法的测量精度,并将两组测量精度进行了比较,结果如图 12 所示。其中 LFST 是指长焦距测量系统。结果表明两种测量方法的测量精度之间的相对误差优于 0.06%,充分说明了校正方法的可靠性和有效性。

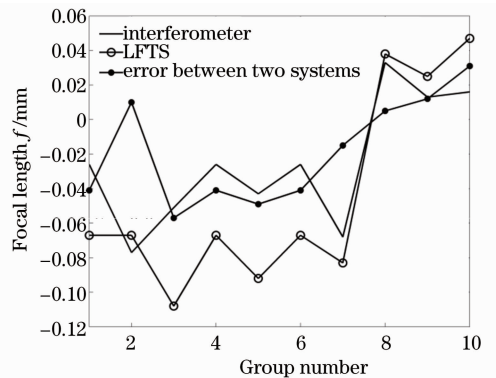


图 12 校正结果与干涉仪测量结果的对比

Fig. 12 Comparison of the modified values with the interferometer measurement values

5 结 论

详细介绍了基于发散光和泰伯效应的长焦距测量方法,并针对系统中由被测透镜像差引入的误差进行了分析和校正。该测量系统之前采用高斯公式计算被测透镜的焦距,没有考虑被测透镜像差引入的误差对测量精度带来的影响。利用数值方法计算得到像差引入的误差值并与 Zemax 仿真得到的误差值进行了对比,结果表明两组数据高度一致。并利用 Visual C++ 改进了原有的系统软件,实现了测量结果自动校正的功能。实验结果和分析表明,名义焦距值为 13500 mm 和 31251 mm 透镜的测量结果经过校正后,与名义焦距值相比的测量精度分别优于 0.007% 和 0.022%。最后将 10 块不同透镜校正后的测量精度与干涉仪法的测量精度进行了对比,两者之间的相对误差优于 0.06%。实验结果充分说明了这种校正方法有效提高了长焦距测量系统的测量精度,该方法还可应用于复合透镜焦距值的测量。

参 考 文 献

- 1 W Zhao, R Sun, L Qiu, *et al.*. Laser differential confocal ultra-long focal-length measurement [J]. *Opt Express*, 2009, 17(22): 20051–20062.
- 2 P Singh, M S Faridi, C Shakher, *et al.*. Measurement of focal-length with phase-shifting Talbot interferometry [J]. *Appl Opt*, 2005, 44(9): 1572–1576.
- 3 V I Meshcheryakov, M I Sinel'nikov, O K Filippov. Measuring the focal-lengths of long-focus optical systems [J]. *J Opt Technol*, 1991, 66(5): 458–459.
- 4 B Deboo, J Sasian. Precision focal-length measurement technique with a relative Fresnel-zone hologram [J]. *Appl Opt*, 2003, 42(19): 3903–3909.
- 5 B Deboo, J Sasian. Novel method for precise focal-length measurement [C]. *International Optical Design Conference*, 2002. IMCS5.
- 6 W Zhao, R Sun, L Qiu, *et al.*. Laser differential confocal radius measurement [J]. *Opt Express*, 2010, 18(3): 2345–2360.
- 7 Zhu Xiangchang, Cao Xuedong, Wu Shibin, *et al.*. Focal length of mirrlens by rotation method based on grating multislit diffraction [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(5): 0523001.
朱咸昌, 曹学东, 吴时彬, 等. 基于光栅多缝衍射的转角法测量微透镜[J]. *光学学报*, 2011, 31(5): 0523001.
- 8 Duan Yaxuan, Chen Yongquan, Zhao Jianke, *et al.*. Focal length testing method of long focal length laser optical system [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(4): 0408005.
段亚轩, 陈永权, 赵建科, 等. 长焦距激光光学系统焦距测试方法[J]. *中国激光*, 2013, 40(4): 0408005.
- 9 Y Nakano, K Murate. Talbot interferometry for measuring the small tilt angle variation of an object surface [J]. *Appl Opt*, 1986, 25(15): 2475–2477.
- 10 Y Nakano. Measurements of the small tilt-angle variation of an object surface using moire interferometry and digital image processing [J]. *Appl Opt*, 1987, 26(8): 3911–3914.
- 11 Hou Changlun, Sun Chen, Bai Jian, *et al.*. Scanning method for focal length measurement of large aperture long focal mirror and lens [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2004, 25(3): 219–222.
侯昌伦, 孙琛, 白剑, 等. 大口径长焦距镜面和透镜的扫描法焦距测量技术[J]. *计量学报*, 2004, 25(3): 219–222.
- 12 Hou Changlun, Sun Chen, Bai Jian, *et al.*. Long-focal length measurement based on Ronchi grating and Talbot interferometry [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, 22(11): 1328–1330.
侯昌伦, 孙琛, 白剑, 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.
- 13 Li Yao, Bai Jian, Deng Yan, *et al.*. Study on a wavefront detection system for long-focus lens by sun-wavefront scanning [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(9): 2590–2595.
李遥, 白剑, 邓燕, 等. 子波面扫描法长焦距透镜波面检测系统研究[J]. *光学学报*, 2010, 30(9): 2590–2595.
- 14 Xiaorong Jin, Jinchun Zhang, Jian Bai, *et al.*. Calibration method for high-accuracy measurement of long focal length with Talbot interferometry [J]. *Appl Opt*, 2012, 51(13): 2407–2413.
- 15 Li Xiaotong, Cen Zhaofeng. *Geometrical Optics, Aberrations and Optical Design* [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2003. 6–7.
李晓彤, 岑兆丰. *几何光学·相差·光学设计*[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2003. 6–7.

栏目编辑: 何卓铭