

支撑形变对高精度曲率半径测量的影响

李振兴

苏州市职业大学机电工程学院, 江苏 苏州 215104

摘要 在进行高精度曲率半径测量时,三点支撑方式会引入测量误差。对该误差进行了理论分析及有限元仿真,并通过实验对仿真结果进行了验证。结果表明,支撑形变中的旋转对称误差项导致测量结果失准。在特定实验条件下,得到的补偿量小于 70 nm,基于此对三点支撑下的曲率半径测量值进行补偿,可以提高测量精度。

关键词 测量; 曲率半径; 有限元仿真; 三点支撑

中图分类号 O439 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.091201

Influence of Support Deformation on High-Precision Curvature Radius Measurement

Li Zhenxing

Department of Mechano-Electronic Engineering, Suzhou Vocational University, Suzhou, Jiangsu 215104, China

Abstract When the high-precision measurement of the curvature radius is performed, the measurement error is introduced under three-point support. The theoretical analysis and the finite element simulation of the errors are carried out and the simulation results are verified by experiments. The results show that the rotationally symmetric error of support deformation leads to the inaccurate radius. The compensation is less than 70 nm under the specific experimental conditions. Based on this, the measurement accuracy can be increased when the measured value of the curvature radius under three-point support is compensated.

Key words measurement; radius of curvature; finite element simulation; three-point support

OCIS codes 120.3620; 200.4560; 080.3620

1 引言

曲率半径是高精度光学元件的重要参数之一,曲率半径的高精度测量不仅对高精度元件的制造尤为重要,更是整个光学系统装调的基础^[1-2]。精准测量物镜元件的曲率半径可以大大降低高精度光刻投影物镜的装调难度,这为后期系统波像差的测量提供了有力的保障。

随着高数值孔径光刻物镜精度的提高,元件曲率半径的测量精度往往需要达到亚微米甚至几十纳米量级,传统的球径仪法、样板法等无法满足要求^[3-4]。目前,测量曲率半径的方法包括三坐标测量和激光干涉测量法等^[5-6]。三坐标测量基于最小二乘法,对被测量部分的点或者线进行拟合;其属于接触式测量,易造成元件表面划痕。干涉测量法属于非接触式测量,理论上可以达到很高的测量精度,但实际操作中存在干扰因素,理论情况不易实现。国内外学者开展了很多相关的研究^[7-9]。Schmitz等^[10-11]通过建立矩阵模型,对待测光学元件表面的位置误差进行补偿,这种方法需要对每一项误差进行精确测量,因此难以高精度测量长曲率半径。彭石军等^[12-14]针对影响曲率半径测量的各种因素进行了系统分析,并提出了离焦补偿算法,以满足曲率半径的高精度测量要求。王孝坤等^[15]利用激光跟踪仪对共焦点与猫眼实现了精确定位,进而实现了曲

收稿日期: 2017-04-04; **收到修改稿日期:** 2017-04-17

基金项目: 国家自然科学基金(11372206)、苏州市工业科技攻关项目(SGZ2014002)、苏州市职业大学成果创新项目(SVU2016CGCX13)

作者简介: 李振兴(1983—),男,本科,实验师,工程师,主要从事数控技术、计算机辅助设计及制造等方面的研究。

E-mail: lizhenxing101@163.com

率半径的高精度测量。由于测量过程需要一个高质量的标定球,并且整个测量系统较为复杂,因此该方法无法实现高效检测。在高精度光学元件的制造和集成过程中,通常采用三点支撑的方式对元件进行检测,该支撑方式结构简单,且重复性较高,但会引入自重形变^[16-18]。目前,关于自重形变对曲率半径高精度测量的影响研究鲜有报道。

本文重点研究了在三点支撑下,自重形变对曲率半径测量的影响。根据理论分析,利用有限元仿真方法求出形变导致的曲率半径测量误差,并对误差进行了补偿,最终利用实验结果对仿真结果进行了验证,实现了对曲率半径的高精度测量。

2 理论分析

在三点支撑下,待测光学元件本身会因重力产生类似三叶性质的形变,这种形变包含了旋转对称项和旋转非对称项,前者为引入的类似圆环性质的误差项,后者为传统意义上的三叶项。误差项会导致拟合过程中曲率半径偏离真实值,一般情况下,误差项并不是很大,但是对于径厚比较大的光学元件,由于形变量较大,误差项不可被忽略。当曲率半径没有偏差时,其与被检表面的关系为

$$w(x, y) = \frac{x^2 + y^2}{2R}, \quad (1)$$

式中 $w(x, y)$ 为被测光学元件波面偏差量, x 为瞳内点的横坐标, y 为光瞳内点的纵坐标, R 为光学元件的曲率半径。当三点支撑引入微小量干扰时, z 轴的误差测量出现偏差,此时

$$w(x, y) = \frac{x^2 + y^2}{2(R + \epsilon_z)}, \quad (2)$$

式中 ϵ_z 为 z 轴误差。对(2)式提取公因式,则

$$w(x, y) = \frac{x^2 + y^2}{2R} \left(\frac{1}{1 + \epsilon_z/R} \right), \quad (3)$$

因为 ϵ_z 较小,与 R 值相比可以忽略不计,所以 ϵ_z/R 趋近于 0,对(3)式进行整理可得

$$\Delta w(x, y) = w(x, y) - \frac{x^2 + y^2}{2R} = -\epsilon_z \frac{x^2 + y^2}{2R^2}, \quad (4)$$

式中 $\Delta w(x, y)$ 为旋转对称项的形变偏差量。故曲率半径与引入的误差项的关系为

$$R = \sqrt{-\epsilon_z \frac{x^2 + y^2}{2\Delta w(x, y)}}. \quad (5)$$

误差项对曲率半径的测量会产生影响,影响的程度与元件曲率半径、入射光强等因素有关,由于无法定量计算,故通过有限元法对其进行理论模拟分析。

3 有限元仿真与分析

在理论设计中,待测光学元件为弯月透镜,其凸面的口径为 160 mm,曲率半径为 140 mm,凹面的口径为 140 mm,曲率半径 210 mm,中心厚度为 18.5 mm,材料为熔融石英。图 1 所示为该元件的示意图及仿真模型,该元件的材料参数见表 1。

表 1 光学元件的材料参数

Table 1 Material parameters of optical element

Material	Young modulus /GPa	Poisson ratio	Density /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
Fused silica	72.7	0.16	2200

利用曲率半径多点拟合程序,分别在有三点支撑和無三点支撑的情况下,对光学表面进行曲率半径拟合,拟合后的结果分别为 138.845277 mm 和 138.845213 mm。可以看出,在三点支撑下,自重形变的确会对曲率半径的拟合结果产生影响,计算得出曲率半径测量值的补偿量为 64 nm。

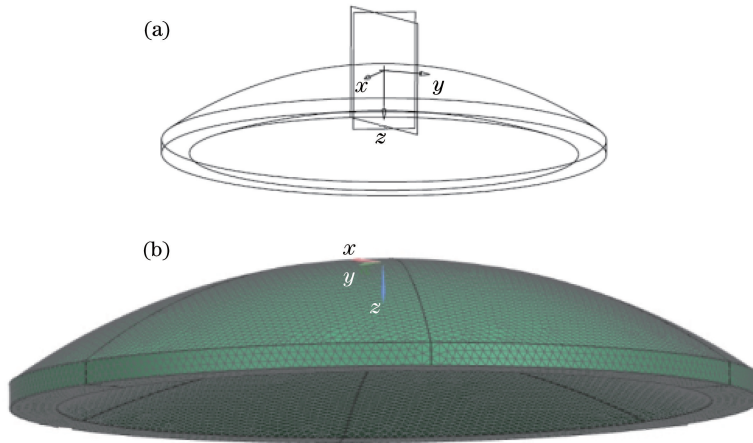


图 1 光学元件的(a)示意图及(b)仿真模型

Fig. 1 (a) Schematic and (b) simulation model of optical element

4 实验与分析

实验采用激光干涉仪测量几十纳米量级精度的曲率半径,并检测亚纳米量级精度的面形;采用激光测长干涉仪测量猫眼和共焦位置的相对距离,其光源为由俄罗斯 PLASMA 公司生产的 GNIK-5 型号的 He-Ne 激光器,该激光波长为 623.8 nm;采用的运动台 Z 轴的分辨率为 20 nm;通过精确控制温度、湿度、压强等对实验环境进行实时补偿,其中,令温度保持在 $(22 \pm 0.1)^\circ\text{C}$,压强保持稳定。

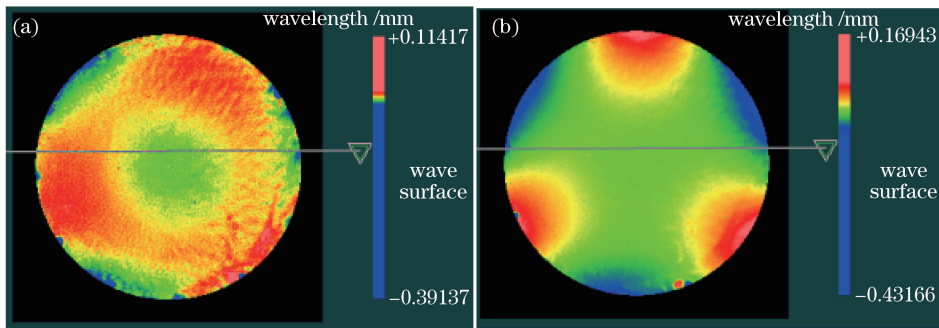


图 2 不同支撑下的光学元件面型。(a)平板支撑;(b)三点支撑

Fig. 2 Surface shapes of optical elements under different supports. (a) Plate support; (b) three-point support

首先,在平板支撑和三点支撑两种情况下,进行长时间的稳定面形测试,其中前者使用标准平晶平板,其口径为 300 mm,平面度优于 100 nm,结果如图 2 所示,可以看出,光学元件的表面整体形貌良好。因此认为,在曲率半径测量过程中,面形误差引入的猫眼和共焦位置的对准误差可以忽略不计。同时,猫眼误差、死区误差、阿贝误差、温度及压强误差等均可以认为是在相同情况下测量的,实验符合单一变量原则。针对平晶平板不同位置进行反复测量,结果见表 2,其中 λ 为波长,DMI 表示位移测量干涉仪。可以看出,不同位置测量的曲率半径结果都很接近,因此认为,平板支撑引入的误差可以忽略不计。

表 2 不同位置处半径测量结果

Table 2 Radius measurement results at different positions

Peak-valley value /nm	Radius of curvature /mm	Catseye error /nm	Confocal error /nm	Confocal vector height	Catseye vector height	DMI position /mm
591.328	138.846124	-58.33	103.53	16.40 λ	-12.10 λ	-799.748228
591.364	138.846248	-62.36	26.32	4.17 λ	-12.93 λ	-660.902109
590.643	138.846121	-42.55	57.77	9.15 λ	-8.82 λ	-799.748130
592.217	138.846203	-33.13	-9.06	-1.44 λ	-6.87 λ	-660.901990
591.116	138.846185	-27.81	17.21	2.73 λ	-5.77 λ	-799.748169
590.286	138.846225	-44.50	40.40	6.40 λ	-9.23 λ	-660.901990

表3 平板支撑下半径测量结果

Table 3 Measurement results of radius under plate support

Experiment number	Peak-valley value /nm	Radius of curvature /mm	Catseye error /nm	Confocal error /nm	Confocal vector height	Catseye vector height	DMI position /mm
1	592.815	138.846211	-72.96	37.52	5.94 λ	-15.13 λ	-660.901832
2	592.420	138.846174	-77.62	36.17	5.73 λ	-16.10 λ	-799.747892
3	591.251	138.846252	-35.61	37.29	5.91 λ	-7.39 λ	-660.901713
4	591.338	138.846170	-87.93	80.54	12.76 λ	-18.24 λ	-799.747833
5	591.464	138.846176	-57.18	77.93	12.35 λ	-11.86 λ	-660.901792
6	592.053	138.846210	-74.38	15.64	2.48 λ	-15.43 λ	-799.747833
7	591.734	138.846170	-71.03	57.87	9.17 λ	-14.73 λ	-660.901792
8	591.522	138.846349	-74.84	55.15	8.74 λ	-15.52 λ	-799.747932
9	591.744	138.846201	-69.84	50.32	7.97 λ	-14.49 λ	-660.901713
10	591.290	138.846311	-82.45	49.13	7.78 λ	-17.10 λ	-799.747892
Mean value	592.298	138.846180	-47.76	40.76	6.46 λ	-9.91 λ	-730.325253
Root-mean-square value	5.614	0.000070	21.26	21.61	3.42 λ	4.41 λ	70.127853

表4 三点支撑下半径测量结果

Table 4 Measurement results of radius under three-point support

Experiment number	Peak-valley value /nm	Radius of curvature /mm	Catseye error /nm	Confocal error /nm	Confocal vector height	Catseye vector height	DMI position /mm
1	470.767	138.846421	-55.82	47.52	7.53 λ	-11.58 λ	-640.056873
2	470.545	138.846399	-36.76	-14.97	-2.37 λ	-7.62 λ	-778.903250
3	523.458	138.846334	-65.94	29.68	4.70 λ	-13.68 λ	-640.056952
4	471.259	138.846266	-65.06	61.37	9.72 λ	-13.49 λ	-778.903092
5	470.863	138.846291	-72.38	19.24	3.05 λ	-15.01 λ	-640.056952
6	534.340	138.846418	-61.21	39.18	6.21 λ	-12.69 λ	-778.903191
7	476.966	138.846499	-63.77	38.63	6.12 λ	-13.23 λ	-640.056794
8	474.851	138.846253	-44.52	9.22	1.46 λ	-9.23 λ	-778.903053
9	470.766	138.846375	-86.84	10.39	1.65 λ	-18.01 λ	-640.056873
10	471.288	138.846403	-74.70	30.66	4.86 λ	-15.49 λ	-778.903151
Mean value	479.814	138.846376	-46.98	33.75	5.35 λ	-9.74 λ	-709.480347
Root-mean-square value	17.991	0.000068	24.08	27.03	4.28 λ	4.99 λ	70.127961

然后,在平板支撑和三点支撑两种情况下,分别对元件曲率半径进行测量,结果见表3、4,可以看出,均方根值小于70 nm,认为平均后的曲率半径值真实有效,可以作为对比数据。通过对比发现,三点支撑下测量的曲率半径值(138.846376 mm)较平板支撑下测量的曲率半径值(138.846180 mm)偏大,这与有限元拟合的结果一致。对有限元拟合结果进行补偿,最终得到三点支撑下的曲率半径值为138.846312 mm,更加接近平板支撑下得到的曲率半径测量值。

根据结果对比可知,支撑形变的确会引入误差,对曲率半径的测量产生影响;有限元法仿真得到的三点支撑下的曲率半径补偿量真实可靠。

5 结 论

针对三点支撑下自重形变对曲率半径测量的影响进行了理论分析,结果表明,支撑形变中的旋转对称误差项在一定程度上会影响曲率半径的拟合,导致测量结果偏大或者偏小。在特定的实验件下,进行了有限元仿真拟合,得到三点支撑下的曲率半径补偿量值,并进行了实验,验证了其可靠性。该工作为高精度曲率半径的测量提供了理论指导,在一定程度上,减少了支撑方式引入的测量误差,提高了曲率半径的检测精度。

参 考 文 献

- [1] Gardner N, Randolph T, Davies A. Self-calibration for micro-refractive lens measurements[C]. SPIE, 2003, 5180: 244-252.
- [2] Hu Dawei, Li Yanqiu, Liu Xiaolin. Optical design of hyper numerical-aperture Schwarzschild projection lithographic lens [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(1): 0122004.
胡大伟, 李艳秋, 刘晓林. 超高数值孔径 Schwarzschild 投影光刻物镜的光学设计 [J]. 光学学报, 2013, 33(1): 0122004.
- [3] Zhang Dejiang, Liu Liren, Xu Rongwei, *et al.* Finite element analysis for wavefront error of lenses induced by gravity [J]. Acta Optica Sinica, 2005, 25(4): 538-541.
张德江, 刘立人, 徐荣伟, 等. 透镜自重变形引起波像差的有限元分析 [J]. 光学学报, 2005, 25(4): 538-541.
- [4] Yoder P R. Opto-mechanical systems design[M]. 3rd ed. Boca Raton: CRC press, 2005: 460-461.
- [5] Zhao W Q, Sun R D, Qiu L R, *et al.* Laser differential confocal radius measurement [J]. Optics Express, 2010, 18(3): 2345-2360.
- [6] Davies A, Schmitz T L. Correcting for stage error motions in radius measurements [J]. Applied Optics, 2005, 44(28): 5884-5893.
- [7] Cai X Y, Chang S D, Fluerau C. Compact system for measurement of optical surfaces having a large radius of curvature [J]. Optical Engineering, 2006, 45(7): 073603.
- [8] Selberg L A. Radius measurement by interferometry [J]. Optical Engineering, 1992, 31(9): 1961-1966.
- [9] Xu Yongxiang, Chen Lei, Zhu Rihong, *et al.* Study on the measurement of radii of curvature of mini-spheres [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27(9): 1159-1162.
徐永祥, 陈磊, 朱日宏, 等. 微小球面曲率半径的测量研究 [J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(9): 1159-1162.
- [10] Schmitz T L, Davies A, Evans C. Uncertainties in interferometric measurements of radius of curvature [C]. SPIE, 2001, 4451: 432-447.
- [11] Schmitz T L, Gardener N, Vaughn M, *et al.* Improving optical bench radius measurements using stage error motion data [J]. Applied Optics, 2008, 47(36): 6692-6700.
- [12] Peng Shijun, Miao Erlong. Sub-micron precision measurement of radius of curvature and uncertainties analysis [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(5): 0512001.
彭石军, 苗二龙. 亚微米高精度曲率半径测量及其不确定度分析 [J]. 光学学报, 2014, 34(5): 0512001.
- [13] Peng Shijun, Su Dongqi, Miao Erlong. Study of defocus compensation algorithm to improve the accuracy of measuring the radius of curvature [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(5): 051204.
彭石军, 苏东奇, 苗二龙. 离焦补偿算法提高曲率半径测量精度的研究 [J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(5): 051204.
- [14] Peng Shijun, Miao Erlong, Shi Zhenguang, *et al.* Research on high-precision measurement of radius of curvature [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(1): 011201.
彭石军, 苗二龙, 史振广, 等. 高精度曲率半径测量研究 [J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(1): 011201.
- [15] Wang Xiaokun, Zheng Ligong. A method for testing radius of curvature of optical spheric surface [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(8): 0812010.
王孝坤, 郑立功. 一种精确测量光学球面曲率半径的方法 [J]. 光学学报, 2011, 31(8): 0812010.
- [16] Wu Dongcheng, Gao Songtao, Wu Zhihui, *et al.* Gravity deformation of high-precision optical flat under three-point support [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(12): 1212001.
武东城, 高松涛, 吴志会, 等. 高精度光学平板在三点支撑下自重变形的研究 [J]. 光学学报, 2015, 35(12): 1212001.
- [17] Wang Ping, Tian Wei, Wang Rudong, *et al.* Rotating chuck test for removing chuck error of optical surface [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(8): 0812004.
王平, 田伟, 王汝冬, 等. 旋转支撑法去除元件面形测量的夹持误差 [J]. 光学学报, 2011, 31(8): 0812004.
- [18] Tian Wei, Wang Ping, Wang Rudong, *et al.* Simulation and experimental research of 193 nm projection lithography lens supporting [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(8): 0816002.
田伟, 王平, 王汝冬, 等. 193 nm 光刻投影物镜单镜支撑仿真分析及实验研究 [J]. 中国激光, 2012, 39(8): 0816002.