

一种精确测量光学球面曲率半径的方法

王孝坤 郑立功

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要 在简要总结各种检测光学球面曲率半径方法优缺点的基础上,提出了利用激光跟踪仪和激光干涉仪测量光学球面曲率半径的新方法。首先,通过激光跟踪仪精确定位测量干涉仪出射球面波前的焦点和待测球面镜的曲率中心点坐标,再调整待测球面镜与干涉仪的相对位置,使待测球面镜达到零条纹干涉状态,用激光跟踪仪测定此时待测球面镜上多点的位置坐标,通过计算分析即可得到待测球面镜的曲率半径。研究和分析了这种测量光学球面曲率半径方法的基本原理,并提出了针对凸球面镜曲率半径的多区域测定平均综合优化的方法。结合实例对一口径为 400 mm 的球面透镜进行了曲率半径的测量,测量得到其两面曲率半径分别为 1022.283 mm(凸面)和 4069.568 mm(凹面),并将该透镜进行了轮廓法测量对比,其相对误差都小于 0.05%。

关键词 测量;光学测量;光学球面;曲率半径;激光跟踪仪;干涉仪

中图分类号 TQ171.65; O436.1 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201131.0812010

A Method for Testing Radius of Curvature of Optical Spheric Surface

Wang Xiaokun Zheng Ligong

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,
Changchun, Jilin 130033, China)

Abstract On the basis of summing up conventional testing methods for the radius of curvature of optical sphere, a novel method using laser tracker and interferometer is proposed. The focus of the exit spheric surface wave front and the coordinate of curvature center of the testing spheric surface are tested by a laser tracker. After adjusting the spheric surface and the interferometer, the coordinates of many points on the spheric surface are tested, and then the radius of curvature of the spheric surface can be calculated by the data. The basic principle and theory of the method are researched, and the synthetical optimization method for testing radius of convex spheric surface is proposed. An optical lens with the aperture of 400 mm is tested by the method. The radius of the convex surface is measured to be 1022.283 mm, and that of the concave surface is 4069.568 mm. For comparison and validation, the spheric surface is also tested by a profilometer, and the relative errors for both surfaces are less than 0.05%.

Key words measurement; optical testing; optical spheric surface; radius of curvature; laser tracker; interferometer

OCIS codes 120.3940; 120.4630; 120.4800; 240.6700

1 引言

光学球面镜包括球面透镜和球面反射镜,它是成像光学系统的主要元件,在其研制过程中保证其曲率半径的准确性是保证其质量的关键^[1~8]。当前,测量光学球面曲率半径的方法有很多种,传统的方法有球径仪法、样板法等。这些传统的方法设备简单,测试方便,适于现场检验,但存在主观、定量困

难和灵敏度不够高等缺点^[9,10]。牛顿环等厚干涉法一直是光学球面镜曲率半径测量中最为主要和广泛应用的方法之一。在分析牛顿环干涉条纹时,一般都是以透镜凸表面与平面玻璃相切于一点为条件来分析条纹性质,这在理论上无疑是正确的,但实际上,球面与平面玻璃接触处受到压力而导致表面磨损甚至变形,改变了球面的曲率半径;此外,球面与

收稿日期: 2011-03-02; 收到修改稿日期: 2011-04-20

基金项目: 国家 863 计划(O8663NJ090)和国家自然科学基金重点项目(61036015)资助课题。

作者简介: 王孝坤(1980—),男,博士,副研究员,主要从事光学超精加工和检测技术等方面的研究。

E-mail: jimwxk@sohu.com

平面接触不良或接触点变动,使测量时干涉条纹的位置发生变动,透镜凸表面与平面玻璃之间存在微小尘埃,这些都是实验中产生系统误差的主要原因;再则在调节时不能保证透镜凸表面与平面玻璃准确地相切,从而在接触处产生附加的光程差^[11]。

用干涉仪与光栅尺组成的测量设备可以精确实现对光学球面曲率半径的测量^[12~13]。基于干涉仪的直接测量方法需要给干涉仪配置光栅尺,并将被测镜头装夹在调整机构上。干涉仪的出射准直光通过标准镜头后变成会聚球面波,在齐焦和猫眼两个位置上,标准球面波前与被测曲面将产生干涉图。利用光栅尺测量这两个位置间的距离,即可得到球面的曲率半径。该方法对于曲率不是很大的球面镜曲率半径的测量很适用,但对于大曲率半径的球面镜,需要很长的光栅尺,而高精度、超长光栅尺的制作成本是非常高昂的。

本文提供一种适用于所有光学球面(凸球面、凹球面、球面透镜和球面反射镜)曲率半径检验的方法,该方法能够精确实现对球面曲率半径的测量,数据处理和数学运算简单,实验操作简单易行,测量时间短,测试成本低。

2 基本原理

测量光学球面曲率半径的装置主要包括激光干涉仪、激光跟踪仪、待测球面镜和调整结构等。首先调节好光路,使干涉仪出射球面波前的焦点和待测球面镜的曲率中心点重合,通过激光跟踪仪精确定位测量此时的位置坐标,再调整待测球面镜与干涉仪的相对位置,使待测球面镜达到零条纹干涉状态,通过激光跟踪仪测定此时待测球面镜面上多点的位置坐标,通过计算分析即可得到待测球面镜的曲率半径。

图 1 和图 2 分别是测量光学凹球面和凸球面曲率

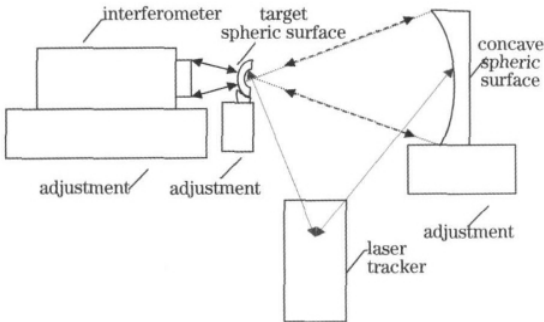


图 1 凹球面测量实验装置示意图

Fig. 1 Sketch of setup for testing concave spheric surface

半径的装置结构示意图。该装置主要包括激光干涉仪、激光跟踪仪、靶标球、调整机构和待测光学球面。

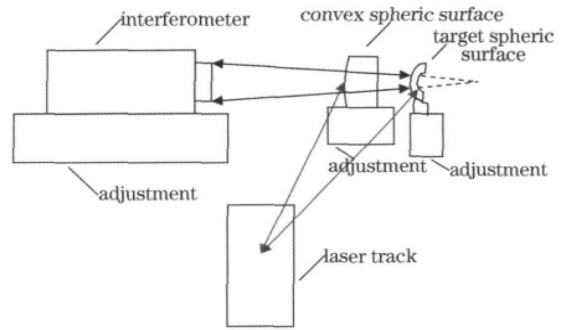


图 2 凸球面测量实验装置示意图

Fig. 2 Sketch of setup for testing convex spheric surface

激光干涉仪是一种高精度测量光学面形的装置。其内部的激光器发射出激光光束,经半透半反标准物镜后分成两束光,一部分光沿原路返回,称为参考光;另一部分光束经后面的待测球面镜反射后沿原路返回,称为测试光。测试光束和参考光束将发生干涉,形成干涉条纹,通过相位计算即可得到待测光学镜面的面形精度^[13,14]。激光干涉仪一般用来检测光学镜面的面形分布,并不能直接实现对球面元件曲率半径的测量。

激光跟踪仪是一种高精度、大容量的便携式三维设备,使用两个旋转角编码器和一个激光距离测量系统跟踪和测量靶标球的位置。靶标球是由 3 块互成直角的平面反射镜组成的角反射镜,且 3 个反射镜的交点为靶标球的球心,因此反射光束的方向平行于入射光束的方向。激光跟踪仪通过跟踪和调节使入射光点处于靶标球的球心上。角反射镜精确固定在加工球体内,球体外表面到中心的距离已知(即球体半径),激光跟踪仪测量软件利用球体半径测量偏移或进行补偿测量。激光跟踪仪发射并接收从靶标球返回的激光,其机械轴的方向会根据位置探测器的反馈不断进行调整。激光跟踪仪通过测量两个角度和一个距离来确定目标的坐标,角度安装在顶点角轴和方位角轴上的编码器来测量,而径向距离由条纹计数干涉仪或一种相位偏移绝对距离测量系统(XtremeADM)来测量。激光跟踪仪一般用来测量物体之间的相对位置关系,并不能实现对球面元件曲率半径的直接测量。

激光干涉仪和激光跟踪仪两者都不能单独实现对光学球面曲率半径的测量,但将两者组合起来却实现对光学球面曲率半径的精确测量。

本文提出的测量光学球面曲率半径方法的流程

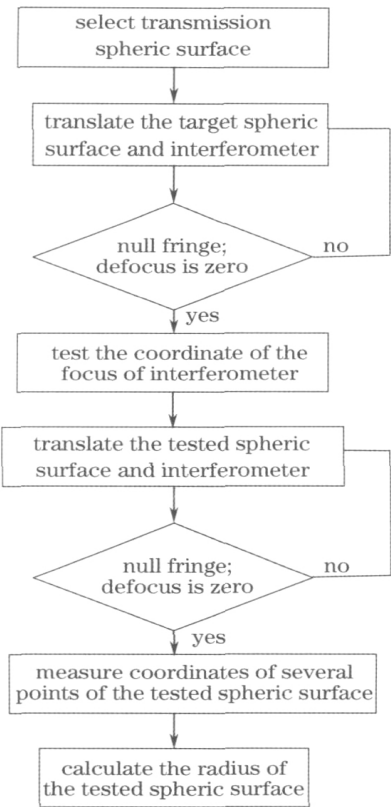


图 3 测试流程图

Fig. 3 Flow chart of testing

如图 3 所示。首先,根据待测球面镜的曲率半径和口径给干涉仪选择配备合适的标准镜头。测量凹球面镜时要求干涉仪标准镜的 $F \leq R$ ($F = f/D$, 其中 f 为标准镜的焦距、 D 为标准镜的口径; $R = r/d$, 其中 r 为待测球面镜的曲率半径、 d 为待测球面镜的口径)。测量凸球面镜时不仅要求干涉仪标准镜的 $F \leq R$, 而且要求 $f > r$ 。给干涉仪安装好标准镜头后,通过反复调整将激光跟踪仪的靶标球的曲率中心与干涉仪出射波前的焦点重合。判定的依据是:通过干涉仪观察并测定经靶标球表面反射回来的波前,此时,干涉条纹应为零条纹状态,且离焦量为零。通过激光跟踪仪精确测量此时靶标球的曲率中心坐标,即为干涉仪出射球面波前焦点的坐标。反复调整待测球面镜与干涉仪的相对位置,使待测球面镜达到零条纹干涉状态,且离焦量为零。通过激光跟踪仪测定此时待测球面镜面上多点的位置坐标。计算干涉仪出射球面波前焦点的坐标与待测球面上某点位置坐标之间的距离即可得到待测球面镜的曲率半径。测量镜面上多点的位置坐标,即可分析求解得到待测球面镜曲率半径的多个数值,将这些数据进行数值运算即可精确地得到待测光学球面镜的曲率半径。

3 测量实验

对一口径为 400 mm 的凹、凸透镜进行了曲率半径的测量。首先,对其凸面进行曲率半径的测量,该面曲率半径约为 1000 mm(参考设计值),估算得到其 R 约为 2.5,因此,按要求若需光束充满被检镜全口径,所选标准镜的 F 要小于 2.5,且焦距要大于 1000 mm。为了使出射光束尽可能充满全口径,选用了 Zygo 公司生产的 6 inch(1 inch=25.4 mm)数字干涉仪。由于要求标准镜焦距大于 1000 mm,仅有标配的 F 为 7.5 和 11 的标准镜能够满足,但若选 F 为 7.5 的标准镜,则标准镜距离待测球面镜非常近,不利于测试操作,因此,选用了 F 为 11 的标准镜。经计算,此时入射到球面镜上光束的口径仅为其全口径的 1/4 左右。为了更准确地测定该凸球面镜的曲率半径,采用了多个子孔径区域综合均化的测定方法,规划测定 5 个区域,如图 4 所示。

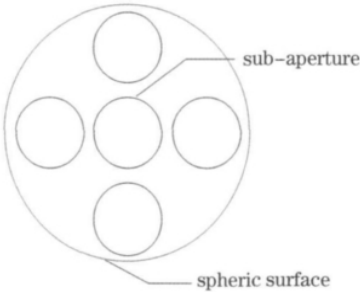


图 4 测试区域分布图

Fig. 4 Distribution of testing area

首先给干涉仪安装好标准镜,通过反复调整将激光跟踪仪的靶标球的曲率中心与干涉仪出射波前的焦点重合,通过激光跟踪仪精确测量此时靶标球的曲率中心坐标,测试设备如图 5 所示。反复调整待测球面镜与干涉仪的相对位置,使待测球面镜中心区域达到零条纹干涉状态,且离焦量为零,在中心区域上测定 10 组数据,通过平移和旋转待测球面镜,测定外圈 4 个子孔径区域的数据(每个子区域仍

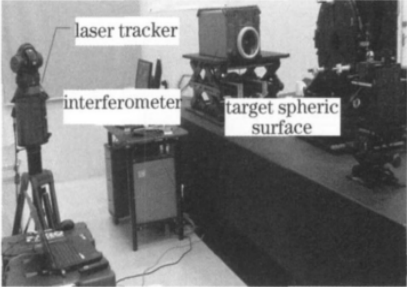


图 5 测试装备图

Fig. 5 Testing setup

为 10 组)。检测装置如图 6 所示,干涉仪和待测球面镜都安装在精密调整机构上,所有测试仪器都安放在防振气浮平台上。

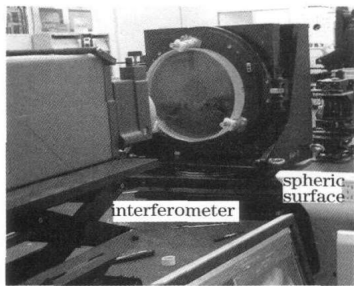


图 6 凸球面半径测量装置图

Fig. 6 Setup for testing radius of convex spheric surface

此时干涉仪出射波前的焦点与待测球面镜的曲率中心重合,设此点坐标为 $P_0(x_0, y_0, z_0)$,所测镜面上的点的坐标为 $P_i(x_i, y_i, z_i) (i = 1 \sim 50)$ 。根据空间两点之间的距离公式可以求解得到待测球面镜曲率半径

$$R_i = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2}. \tag{1}$$

测量均值和标准偏差的计算式分别为^[15]

$$\bar{R} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_i = 1022.283 \text{ mm}, \tag{2}$$

$$D_s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (R_i - \bar{R})^2} = 0.201 \text{ mm}, \tag{3}$$

式中 $n=50$ 。该凸球面曲率半径值为 $(1022.283 \pm 0.201) \text{ mm}$ 。

计算分析得到的 50 组球面镜曲率半径分布如图 7 所示。为了验证和对比,对该球面镜进行了轮廓测量,得到其母线矢高分布图如图 8 所示。

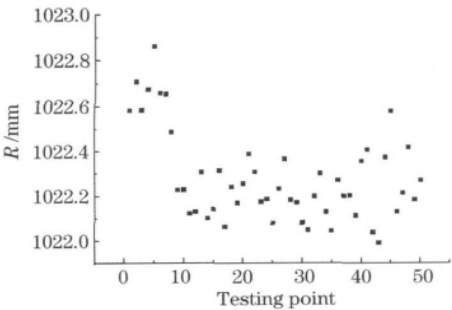


图 7 测试凸球面曲率半径分布图

Fig. 7 Measurement of distribution of radius of convex spheric surface

假定测定的母线矢高坐标为 $D_j(X_j, Y_j, Z_j)$ (其中 X_j 为待测凸球面口径分布, $Y_j = 0$, Z_j 为待测凸

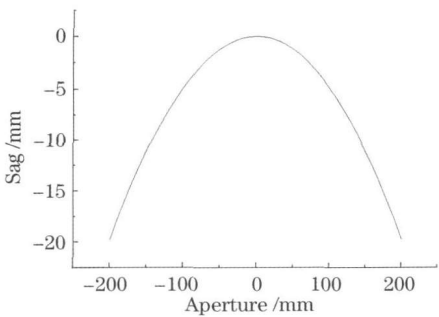


图 8 轮廓测量凸球面矢高图

Fig. 8 Sag map of convex spheric surface by profilometry
球面矢高值),轮廓测量待测凸球面曲率半径为 r_j , 则 r_j 与 X_j 和 Z_j 满足

$$r_j^2 = (r_j - Z_j)^2 + X_j^2. \tag{4}$$

通过分析可到 r_j 的求解公式为

$$r_j = \frac{X_j^2 + Z_j^2}{2Z_j}. \tag{5}$$

通过(5)式计算分析得到轮廓测量的曲率半径值为 $(1022.715 \pm 0.213) \text{ mm}$ 。比较可知,这两种方法测定的曲率半径值相差仅为 0.432 mm ,相对偏差仅为 0.042% 。

此外,对其凹面进行了曲率半径的测量,该面曲率半径约为 4000 mm (参考设计值),估算得到其 R 约为 10,因此,按要求若需光束充满被检面全口径,所选标准镜的 F 要小于 10,同时为了使光强尽可能地集中,选用了 F 为 7.5 的标准镜头。

重新调节和标定好光路,在其全口径镜面上测定 40 组曲率半径数据,其分布如图 9 所示。分析求解得到该凹球面曲率半径值为 $(4069.568 \pm 0.104) \text{ mm}$ 。对该凹球面镜进行了轮廓测量,得到其母线矢高分布图如图 10 所示。通过计算分析得到轮廓测量的曲率半径值为 $(4069.015 \pm 0.178) \text{ mm}$ 。比较可知,这两种方法测定的曲率半径值相差仅为 0.553 mm ,相对偏

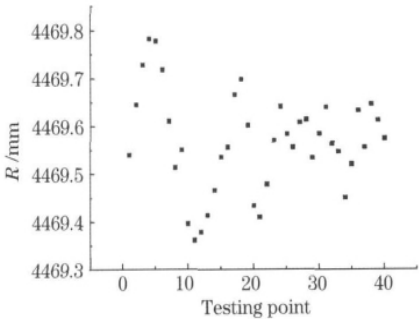


图 9 测试凹球面曲率半径分布图

Fig. 9 Measurement of distribution of radius of concave spheric surface

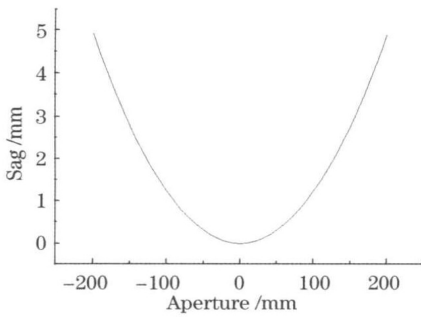


图 10 轮廓法测量凹球面矢高图

Fig. 10 Sag map of concave spherical surface by profilometry

差仅为 0.014%。

4 结 论

通过扩展激光干涉仪和激光跟踪仪的现有功能,提出了利用激光跟踪仪和激光干涉仪组合测量光学球面曲率半径的新方法,能够准确地实现对各种形状球面曲率半径的测量。研究和分析了该方法的基本原理,规划了合理的测试流程,提出了针对凸球面镜曲率半径的多区域平均优化测量方法。结合实例分别对凸、凹光学球面镜的曲率半径进行了测量,并将检测结果与轮廓测量结果进行对比,其相对误差都小于 0.05%。该方法物理概念明确,数据处理和数学运算简单,实验操作简单易行,检测成本很低,测试时间短,可用于精确测量光学球面曲率半径。

参 考 文 献

- 1 D. Malacara. Optical Shop Testing[M]. New York: John Wiley & Sons, 1992
- 2 Lin Xudong, Chen Tao, Ming Ming *et al.*. Measurement of relative curvature radius for spherical segmented mirrors [J]. *Opt. & Precision Engng.*, 2010, **18**(1): 75~82
林旭东, 陈涛, 明名等. 球面拼接镜的相对曲率半径测量[J]. *光学精密工程*, 2010, **18**(1): 75~82
- 3 Pan Junhua. The methodic design of the IR imaging system with large aperture [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(12): 1475~1478

- 潘君骅. 大口径红外成像系统的光学设计 [J]. *光学学报*, 2003, **23**(12): 1475~1478
- 4 Hao Peiming, Li Kexin, Yuan Liyin. Third order aberration correction of two mirror optical systems with zero optical power corrector [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(2): 0222004
郝沛明, 李可新, 袁立银. 带有无光焦度校正板两镜系统的三级像差校正 [J]. *光学学报*, 2011, **31**(2): 0222004
- 5 Zhu Xiangbing, Chen Jin, Deng Shanxi *et al.*. Aberrations in complex spectral instruments [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(1): 116~120
朱向冰, 陈瑾, 邓善熙等. 复杂分光仪器中的像差研究 [J]. *光学学报*, 2006, **26**(1): 116~120
- 6 D. W. Cheng, Y. T. Wang, A. M. M. Talh *et al.*. Effect of radius mismatch on performance of segmented telescopic systems [C]. *SPIE*, 2007, **6834**: 68341Y
- 7 A. S. Lars. Radius measurement by interferometry [J]. *Opt. Engng.*, 1992, **31**(9): 1961~1966
- 8 Xianyang Cai, Shoude Chang, Costel Fluerau. Compact system for measurement of optical surfaces having a large radius of curvature [J]. *Opt. Engng.*, 2006, **45**(7): 073603
- 9 Neil Gardner, Angela Davies. Self-calibration for microrefractive lens measurements [J]. *Opt. Engng.*, 2006, **45**(3): 033603
- 10 Xu Yongxiang, Chen Lei, Zhu Rihong *et al.*. Study on the measurement of radii of curvature of mini-spheres [J]. *Chinese J. 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
- 11 Wang Yahong. Methods depending precision in measuring the radius of a flat convex using Newton's ring [J]. *Physics and Engineering*, 2005, **15**(4): 36~38
王雅红. 不同数据采集方法对牛顿环测曲率半径准确度的影响 [J]. *物理与工程*, 2005, **15**(4): 36~38
- 12 Wang Qing, Xu Xinhua. Precision analysis of measurement of radius of curvature by interferometer [J]. *J. Southeast University*, 2009, **39**(11): 55~59
王青, 徐新华. 干涉仪测量球面曲率半径的精度分析 [J]. *东南大学学报*, 2009, **39**(11): 55~59
- 13 Wang Lijuan, Liu Liren, Luan Zhu *et al.*. Phase shifting Jamin lateral shearing interferometer [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(5): 1156~1159
王利娟, 刘立人, 栾竹等. 相移雅满横向剪切干涉仪 [J]. *中国激光*, 2009, **36**(5): 1156~1159
- 14 Yan Chengzhi, Li Shangyuan, Zheng Xiaoping *et al.*. Time delay error in optical low coherence interferometry [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(1): 204~208
闫成至, 李尚远, 郑小平等. 低相干光干涉法延时测量中的误差分析 [J]. *中国激光*, 2011, **38**(1): 204~208
- 15 Fei Yetai. Error Theory and Data Processing [M]. 5th ed.. Beijing: China Machine Press, 2005
费业泰. 误差理论与数据处理 [M]. 第 5 版. 北京: 机械工业出版社, 2005