

大口径球面反射镜曲率半径的精确测量

陈宝刚*, 明 名, 吕天宇

(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:介绍了大口径球面反射镜曲率半径的传统测量方法,提出了利用组合测杆结合激光干涉仪测量球面反射镜曲率半径的新方法。首先利用激光干涉仪检测球面反射镜的面型,调整干涉仪与被测镜的位置,使被测镜达到零条纹干涉状态,然后架设合理长度组合测杆,调整组合测杆靠近干涉仪端测量球头的位置,使之达到零条纹干涉状态,再使组合测杆另一端测头与镜面接触完成测量,通过计算分析即可得到被测球面镜的曲率半径。对该方法的基本测量原理进行了研究分析,并对口径为600 mm的望远镜球面主镜的曲率半径进行了多次测量,测得其曲率半径均值为2 836.774 mm,标准偏差为0.071 mm。最后对该方法的测量不确定度进行了分析,找出了影响测量精度的主要因素,合成标准不确定度为0.061 mm。

关键词:光学测量;球面反射镜;曲率半径;组合测杆;大口径

中图分类号: O436.1; TH744 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/CO.20140701.0163

Precise measurement of curvature radius for spherical mirror with large aperture

CHEN Bao-gang*, MING Ming, LYU Tian-yu

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

* Corresponding author, E-mail: cbg0813@163.com

Abstract: Conventional testing methods for the curvature radius of spherical mirror with large aperture are introduced briefly, and a novel method using combined rods and laser interferometer is proposed. Firstly, the surface figure of spherical mirror is tested with laser interferometer. The position of interferometer and tested mirror is adjusted to make the focus of the exit wave front and the center of curvature of tested mirror to be confocal. Then the suitable combined rods are setup, and the position of probe spheric head which is close to interferometer is adjusted to make the focus of the exit wave front and the center of the probe spheric head confocal. Next, another probe spheric head is adjusted to contact the surface of the tested mirror. The curvature radius of the spheric mirror can be calculated by the data. The basic principle of the testing method is analyzed. A telescope spheric primary mirror with a aperture of 600 mm is tested many times with this method. The average radius of curvature is calculated to be 2 836.774 mm, and the root mean square is 0.071 mm. Finally, the measurement uncertainty of this method is analyzed, and the main factors affecting the measurement

收稿日期:2013-10-14;修订日期:2013-12-16

基金项目:中国科学院三期创新重大研究资助项目(No. O65X32C060)

accuracy are found out, and the composed standard uncertainty is 0.061 mm.

Key words: optical testing; spherical mirror; radius of curvature; combined rods; large aperture

1 引言

光学球面曲率半径的精密测量是光学加工检测过程中的重要环节,作为大口径球面反射镜的一个重要参数,其曲率半径的高精度测量是一个急待解决的关键技术。大口径球面反射镜曲率半径一般都在数米量级,目前测量球面镜曲率半径的方法有球径仪法、样板法、刀口仪定焦米尺测量法、干涉仪结合光栅尺、激光跟踪仪等,这些方法可以对一定范围的曲率半径进行测量,且使用方便,具有一定精度,但都有很多局限性^[1-2]。

球径仪是测量小曲率半径光学元件的首选,精度较高^[3-4],但随着曲率半径的增大,精度迅速降低。样板法对测量人员的操作经验要求很高,属于定性测量,从标准样板复制精度,使用时样板与被测镜紧密接触往往导致样板受压,曲率半径发生变化,精度较低。刀口仪定焦精度很高,属于非接触测量,但是米尺测量精度很低,只能满足毫米级精度的测量要求^[5]。干涉仪结合测长系统可以精确测量光学元件的曲率半径,干涉仪标准镜头焦点在被测镜球心和表面两个位置会产生齐焦和猫眼干涉条纹,利用测长系统精确测量这两个位置的距离即可得到被测镜的曲率半径^[6-8]。若使用光栅尺测量这两个位置的距离,则需要长于曲率半径的高精度光栅尺和导轨,不但成本昂贵,且配置复杂,长导轨占用空间,使用不方便。激光跟踪仪^[9]是测量这两个位置距离的理想仪器,但其价格昂贵,增加了检测成本。

本文提出一种适用于测量大口径球面反射镜中长曲率半径的新方法^[10],该方法利用组合测杆结合激光干涉仪,在进行面型测量时使用,不增加过多的硬件成本、体积小,测量精度高,数据处理简单,操作方便。

2 测量原理

测量大口径球面反射镜的装置包括激光干涉

仪、组合测杆、两个测微球头和支撑调整架等。

激光干涉仪是一种高精度测量光学镜面面型的精密仪器,本文利用干涉仪出射波前焦点在被测球面球心会产生齐焦干涉条纹的特点来瞄准球心位置,因此也可以采用其它具有这种特点的仪器来瞄准,如夏克-哈特曼波前传感器、自准直显微镜等。组合测杆采用国标产品两点内径千分尺的接长杆,如图1所示,其测量范围大,精度高,成本低,组合测杆的可组合长度为150~6 000 mm,最大允许误差为90 μm^[11]。测微球头是在精密测微千分尺的末端粘接一高精度钢球,结构如图2所示,钢球表面光洁度较好,可以反射光线。



图1 接长杆

Fig. 1 Combined rods

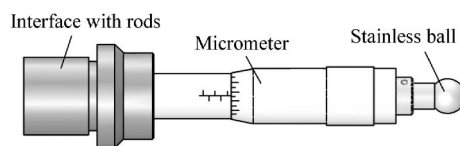


图2 测微球头

Fig. 2 Probe spheric head

激光干涉仪可以精确瞄准球面的球心位置,组合测杆可以精确测量长度,二者均不能单独进行球面反射镜曲率半径的测量,本文正是通过测微头上的球头作为基准传递的“桥梁”,把它们组合起来实现对大口径球面反射镜的高精度测量。

测量方法流程如图3所示。首先,根据被测球面反射镜的曲率半径和口径为干涉仪选择匹配 F ($F=f/D$, 其中 f 为焦距, D 为口径)的标准镜头,标准镜头的 F 应该小于或等于被测镜的 F ^[12]。根据被测镜曲率半径选择合适的接长杆,并组装好测微球头,用测杆支撑架支撑待用。然

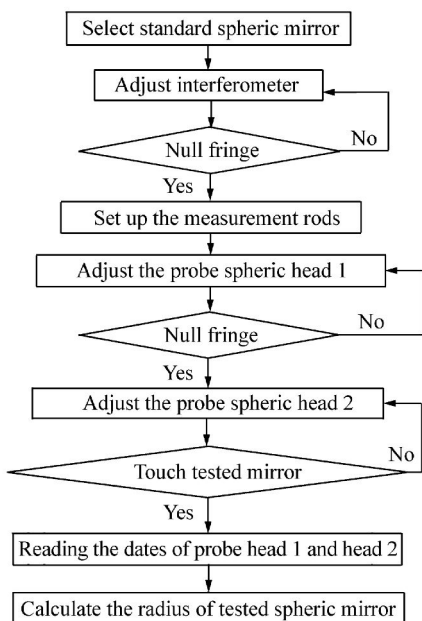


图 3 测量流程图

Fig. 3 Flow chart of testing

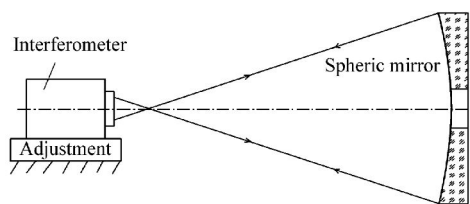


图 4 干涉仪位置调整示意图

Fig. 4 Sketch diagram of adjusting interferometer

后为干涉仪安装好标准镜头,搭建好测试光路,如图 4 所示,仔细调整干涉仪的位置,使干涉仪出射波前的焦点与被测镜的球心重合,即干涉仪接收经被测镜反射回来的波前与参考波前干涉后的条纹达到零状态条纹,此时也可以测量球面镜的面型误差。然后保持干涉仪及被测镜的空间位置不动,把组合测杆移到干涉仪与被测镜之间,如图 5 所示,仔细调整靠近干涉仪端测微球头的位置,使干涉仪出射波前的焦点与测微球头的球心重合,即干涉条纹达到零条纹状态。然后伸长靠近被测镜面端测微球头,使之与镜面刚好接触。最后读取两个测微头的数值,通过数学运算就可以精确得知被测镜的曲率半径 R 。

$$R = L + D + d_1 + d_2 - r, \quad (1)$$

式中: L 为测量时所用的组合测杆的长度, D 为两测微球头安装后的零点间未知长度, d_1 为测微球头 1 的读数, d_2 为测微球头 2 的读数, r 为测微球头钢球的半径。

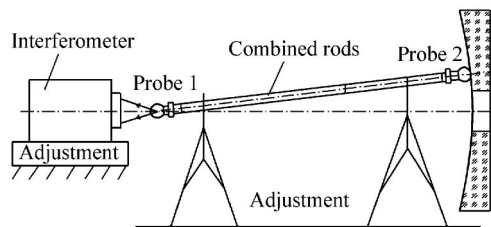


图 5 组合测杆调整示意图

Fig. 5 Sketch diagram of adjusting combined rods

两测微球头安装后的零点间未知长度 D 是指两端测头不安装测杆且都在零点时的两测微球头球面上点的最大距离,可以精确标定^[13],标定方法如图 6 所示。使用两点内径千分尺自带的标准长度尺,为组合测杆选择合适的接长杆,延长两端的测微头使之与标准长度尺内侧接触,且测量轴线垂直于标准尺内端面。读取两个测微头的数值,计算即可精确得出两测微球头安装后的零点间未知长度 D 。

$$L_1 = L_0 + D + d'_1 + d'_2, \quad (2)$$

$$D = L_1 - L_0 - d'_1 - d'_2, \quad (3)$$

式中: L_1 为标准尺长度, L_0 为标定时所用接长杆的长度, d'_1 为测微球头 1 的读数, d'_2 为测微球头 2 的读数。

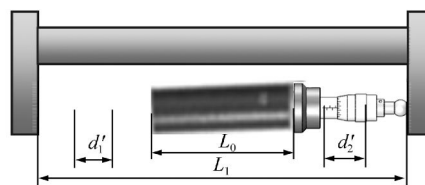


图 6 未知长度 D 标定示意图

Fig. 6 Sketch diagram of measuring unknown length D

3 实验与测量不确定度分析

3.1 测量实验

对一理论设计曲率半径为 2 841 mm 的球面主镜进行曲率半径的精确测量实验,该镜口径为

400 mm, 计算其 F 约为 4.7。使用 Zygo 公司生产的 4 inch 干涉仪, 理论上使用标准镜的 F 要小于 4.7, 干涉仪的出射光束才能照全被测镜面, 但仅有标配的 F 为 1.5 和 5 的标准镜, 若选用 F 为 1.5 的标准镜, 探测器只能接收约为 10% 的出射光, 且显示器上干涉条纹的面积很小, 不利于观察调整, 若选用 F 为 5 的标准镜, 出射光束只能照满被测镜面积的 90%, 但不会影响出射波前焦点与被测镜球心的对准。

首次使用前要对两测微球头安装后的零点间未知长度 D 进行精确标定, 使用标准尺长度 L_1 为 150 mm, 选用的接长杆长度 L_0 为 25 mm, 两端安装好测微球头, 仔细调整测微头伸长, 使之与标准尺内测接触, 并保证测量轴线垂直于标准尺端面。记录两个测微头读数 d'_1 、 d'_2 分别为 3.000 mm 及 2.255 mm, 则:

$$D = L_1 - L_0 - d'_1 - d'_2 = 119.745 \text{ mm} . \quad (4)$$

根据被测镜的设计曲率半径及标定出的两测微球头安装后的零点间未知长度, 选取组合测杆的接长杆总长为 2 700 mm, 把组合测杆组装好并用 2 台精密三脚架支撑待用, 为降低支撑变形对测杆测量精度的影响, 支撑点的位置距测杆末端约为测杆总长的 0.22 倍。

测微球头选用千分尺的量程为 13 mm, 故组装好的测杆量程为 2 819.745 ~ 2 845.745 mm, 选用的 00 级钢球直径为 9 mm。

然后给干涉仪安装 F 为 5 的标准镜头, 仔细调整干涉仪的位置, 使出射波前焦点与被测镜曲率中心重合, 固定干涉仪及被测镜的位置不动, 把组装好的测杆移到干涉仪与被测镜之间, 如图 7

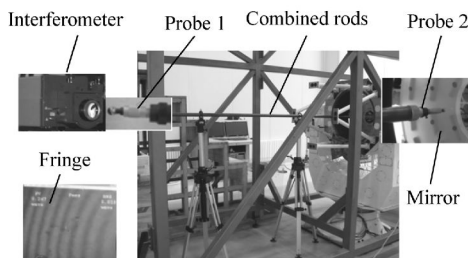


图7 主镜曲率半径测试图

Fig. 7 Testing diagram of curvature radius of a primary mirror

所示, 仔细调整靠近干涉仪端测微球头的位置, 使出射波前的焦点与测微球头的球心重合, 然后伸长靠近被测镜面端测微球头, 使之与镜面刚好接触。最后读取两个测微头的数值, $d_1 = 8.245 \text{ mm}$ 、 $d_2 = 13.348 \text{ mm}$, 计算被测镜的曲率半径 R 。

$$R = L + D + d_1 + d_2 - r = 2836.838 \text{ mm} . \quad (5)$$

根据测量流程图, 重复测量 10 次, 各次曲率半径测量值分布如图 8 所示, 计算其标准差:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (R_i - \bar{R})^2}{n - 1}} = 0.071 \text{ mm} . \quad (6)$$

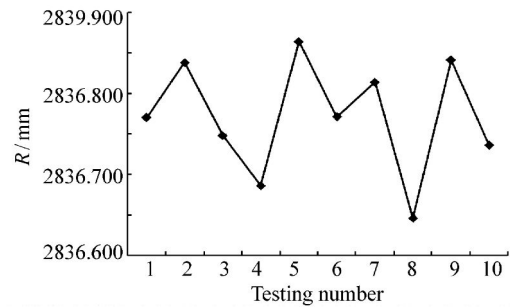


图8 10次测量曲率半径分布图

Fig. 8 Distribution diagram of curvature ten-times tested radius

3.2 测量不确定度分析

分析测量方法可知, 对曲率半径 R 的测量不确定度产生的主要因素有: 测微球头 1 球心与出射波前焦点重合重复性引起的不确定度 μ_1 ; 测微球头 2 与被测镜面接触重复性引起的不确定度 μ_2 ; 测微球头钢球半径测量误差引起的不确定度 μ_3 ; 两个测微球头示值误差引起的不确定度 μ_4 、 μ_5 ; 组合测杆检定时测量误差引起的不确定度 μ_6 ; 干涉仪出射波前焦点与被测镜曲率中心重合重复性引起的不确定度 μ_7 ; 温度及振动等因素引起的不确定度 μ_8 。

分析这些不确定度的特点可知, μ_1 、 μ_2 采用 A 类评定, μ_3 、 μ_4 、 μ_5 、 μ_6 、 μ_7 、 μ_8 采用 B 类评定方法^[14]。

(1) 测微球头 1 球心与出射波前焦点重合重复性引起的标准不确定度分量 μ_1 : 调整测头伸

缩,使球头球心多次与干涉仪出射波前焦点重合,读取各次测头的数值,计算其标准差为0.005 mm,则 $\mu_1 = 0.005$ mm。

(2)测微球头2与被测镜面接触重复性引起的标准不确定度分量 μ_2 :调整测头伸缩,使球头多次与被测镜面刚好接触,读取各次测头的数值,计算其标准差为0.023 mm,则 $\mu_2 = 0.023$ mm。

(3)测微球头钢球半径测量误差引起的标准不确定度分量 μ_3 :由于选用的是00级钢球,故 $\mu_3 = 0.0002$ mm。

(4)两个测微球头示值误差引起的标准不确定度分量 μ_4 、 μ_5 :根据测微千分尺的检定报告,取 $\mu_4 = \mu_5 = 0.003$ mm。

(5)组合测杆检定时测量误差引起的标准不确定度分量 μ_6 :根据内径千分尺检定时使用的计量仪器测长机的不确定度,取 $\mu_6 = 0.024$ mm。

(6)干涉仪出射波前焦点与被测镜曲率中心重合重复性引起的标准不确定度分量 μ_7 :由于采用零级干涉条纹来判定焦点与球心重合,故 $\mu_7 = 0.0005$ mm。

(7)温度及振动等因素引起的标准不确定度分量 μ_8 :根据测量时环境条件判定,取 $\mu_8 = 0.005$ mm。

各项误差引起的不确定度分量相互独立,则相关系数为零,测量曲率半径 R 的合成标准不确

定度为:

$$\mu = \sqrt{\sum_{i=1}^8 \mu_i^2} = 0.061 \text{ mm} . \quad (7)$$

合成标准不确定度与通过10次重复测量计算的标准差较为吻合,通过不确定度分析可知,对测量结果影响较大的是温度及振动等环境因素,其次是测头2与被测镜面接触测量的瞄准重复性误差。因此,测量过程要尽量保证环境温度与组合测杆标定时的温度一致,减小外界振动,另外,实现测头2与被测镜面的非接触测量瞄准,消除人手对接触力判断不准的影响,以进一步提高测量精度。

4 结 论

本文提出了利用组合测杆结合激光干涉仪测量球面反射镜曲率半径的新方法,研究和分析了该方法的基本测量原理,并结合实例对理论设计曲率半径为2841 mm的球面主镜进行测量,测得其标准偏差为0.071 mm。最后通过对该方法的测量不确定度分析,找出了对测量结果影响较大的因素,为进一步提高该方法的测量精度提供了理论指导。该方法基本原理明确,数据处理简单,测量精度高,操作方便,体积小,成本低。

参考文献:

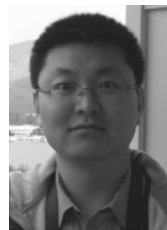
- [1] 杨李茗,叶海仙.大口径大曲率半径光学元件的高精度检测[J].光学精密工程,2011,19(6):1207-1212.
YANG L M, YE H X. High-precision metrology for optical components with large-apertures and large radii of curvature [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(6):1207-1212. (in Chinese)
- [2] YE H X, YANG L M. Accuracy and analysis of long-radius measurement with long trace profiler[J]. *Chinese Optics Lett.*, 2011, 9(10):102301.
- [3] 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.
LIN X D, CHEN T, MING M, et al. Measurement of relative curvature radius for spherical segmented mirrors[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(1):75-82. (in Chinese)
- [4] 贾立德,王家伍,郑子文,等.光学非球面形摆臂式轮廓法测量顶点曲率半径优化算法研究[J].仪器仪表学报,2009,30(9):1996-2000.
JIA L D, WANG J W, ZHENG Z W, et al. Optimization algorithm for the measurement of vertex radius of aspherics with a swing-arm profilometer[J]. *Chinese J. Scientific Instrument*, 2009, 30(9):1996-2000. (in Chinese)
- [5] MALACARA D. *Optical Shop Testing*[M]. New York:John Wiley&Sons,1992.
- [6] 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.
WANG Q, XU X H. Precision analysis of measurement radius of curvature by interferometer[J]. *J. Southeast University*, 2009, 39(11):55-59. (in Chinese)

- [7] 孙若端,邱丽荣,杨佳苗,等. 激光差动共焦曲率半径测量系统的研制[J]. 仪器仪表学报,2011,32(12):2833-2838.
SUN R D, QIU L R, YANG J M, *et al.*. Development of laser differential confocal radius measurement system[J]. *Chinese J. Scientific Instrument*, 2011, 32(12): 2833-2838 (in Chinese).
- [8] ZHAO W, SHU R, QIU R, *et al.*. Laser differential confocal radius measurement[J]. *Optics Express*, 2010, 18(3): 2345-2360.
- [9] 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.
WANG X K, ZHENG L G. A method for testing radius of curvature of optical spheric surface[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(8): 0812010. (in Chinese)
- [10] 陈宝刚,王建立,杨飞,等. 一种测量球面反射镜曲率半径的装置与方法:中国, CN 101825446 B[P], 2011-12-28.
CHEN B G, WANG J L, YANG F. An equipment and method for measuring radius of curvature of spheric reflected mirror: China, CN 101825446 B[P], 2011-12-28. (in Chinese)
- [11] 中国机械工业联合会. GB/T 8177-2004 两点内径千分尺[S]. 北京:中国标准出版社,2004.
China Machinery Industry Federation. GB/T 8177-2004. Internal micrometers with two-point contact[S]. Beijing: China Standards Press, 2004. (in Chinese)
- [12] 明名,吕天宇,邵亮,等. 利用 Offner 光学系统进行图像恢复和光学检测[J]. 中国光学,2012,5(6):646-651.
MING M, LV T Y, SHAO L, *et al.*. Image restoration and optical test by using Offner optical system[J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(6): 646-651. (in Chinese)
- [13] 国家质量监督检验检疫总局. JJG 22-2003 内径千分尺检定规程[S]. 北京:中国计量出版社,2003.
State Administration for Quality Supervision and Inspection and Quarantine. JJG 22-2003 Verification regulation of internal micrometers[S]. Beijing: China Metrology Press, 2003. (in Chinese)
- [14] 费业泰. 误差理论与数据处理[M]. 北京:机械工业出版社,2005:82-93.
FEI Y T. *Error theory and Data Processing*[M]. Beijing: China Machine Press, 2005: 82-93. (in Chinese)

作者简介:



陈宝刚(1982—),男,河北衡水人,助理研究员,2008年于合肥工业大学获得硕士学位,主要从事大型光电望远镜装调准直和检测技术等方面的研究工作。
E-mail: cbg0813@163.com



吕天宇(1984—),男,吉林长春人,助理研究员,2010年于哈尔滨工业大学获得硕士学位,主要从事光学系统设计、检测等方面的研究。E-mail: lty0414@126.com



明名(1983—),男,湖南临澧人,助理研究员,2007年于大连理工大学获得硕士学位,主要从事光学系统设计、检测以及装调方面的研究。E-mail: mingml118@yahoo.com.cn