

大口径凸非球面反射镜检测补偿器的误差标定

张斌智 王旭

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所光学系统先进制造技术重点实验室, 吉林 长春 130033)

摘要 大口径凸非球面反射镜的检测是非球面检测中的难题,而零位补偿检测方法是精确检测大口径凸非球面反射镜的有效检测方法之一,但是随着补偿器口径的增大,在补偿器的加工和装调中难免引入误差。文章针对与球面偏差不大的凸非球面反射镜补偿检测,提出了一种用标准球面在线标定补偿器误差的方法,并对一凸非球面补偿检测中的误差进行了标定,使用标定后的补偿器对该凸非球面反射镜进行了补偿检测,并对标定误差进行了分析,标定前补偿器误差方均根值(RMS)为 0.097λ (波长 $\lambda = 632.8 \text{ nm}$),标定后综合检测误差 RMS 值小于 0.0046λ ,满足该凸非球面反射镜设计精度要求。

关键词 测量;凸非球面反射镜检测;误差标定;标准球面;零位补偿

中图分类号 TN216 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201340.s108004

Error Calibration of Compensator in Large Aperture Convex Aspheric Mirror Testing

Zhang Binzhi Wang Xu

(Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China)

Abstract Testing of the large-aperture convex aspheric mirror is a very difficult task in the aspherical testing. The null lens compensator is one of the efficient methods for testing the large-aperture convex aspheric mirrors. However, with the aperture increasing, some unavoidable errors are induced in the fabrication and adjustment of the compensator. In this paper, a method using a standard sphere mirror is proposed to calibrate the error of the compensator. The system error in the compensator is tested and calibrated. The calibrated compensator is used to measure the large-aperture aspheric mirror. The calibration error is also analyzed. The root-mean-square (RMS) error before calibration is 0.097λ (wavelength $\lambda = 632.8 \text{ nm}$), which significantly deteriorates the testing accuracy in the null lens testing. The final testing RMS error after calibration is smaller than 0.0046λ , which satisfies the designed precision requirement of the large-aperture convex aspheric mirror.

Key words measurement; convex aspheric mirror testing; error calibration; standard spherical surface; null compensator

OCIS codes 010.0280; 220.4840; 220.1250; 120.6650

1 引 言

非球面元件应用到光学系统中可以简化系统结构,提高系统的性能,因此现代光学系统中大量采用非球面元件^[1]。而非球面检测技术的发展成为非球面应用的关键,对于不同类型的非球面往往采用不同的检测技术。由于全口径检测凸非球面时需要有一束口径不小于镜面的会聚光束^[2],所以对一些口

径比较大的凸非球面镜面形的检测要比凹非球面反射镜困难得多。凸非球面的检测有多种不同的方法,从检验原理上看,对凸非球面的检验方法主要有无像差点法和补偿法。无像差点法借助 Hindle 球实现凸非球面检测;补偿法包括背透式补偿检验和利用计算全息(CGH)元件或补偿器的零位补偿检测。零位补偿器检测方法的优点是适用面广、不会

收稿日期: 2013-06-16; 收到修改稿日期: 2013-09-20

基金项目: 国家 973 计划(2011CB0132005)、国家自然科学基金重点项目(61036015)

作者简介: 张斌智(1979—),男,博士,副研究员,主要从事光学加工和检测等方面的研究。E-mail: binzh123@163.com

受到凸非球面材料和形状限制;缺点是这种方法需要制作口径大于被检凸非球面反射镜的补偿器。所谓的补偿器就是球差曲线与被检验非球面法线像差完全重合的光学系统^[3]。为了降低补偿器的加工难度,保证其检测凸非球面反射镜的精度,补偿器的光学元件一般为球面透镜。所以,本文采用补偿法检测凸非球面反射镜,能够保证准确全面地评价面形偏差。

2 零位补偿检测凸非球面技术

零位补偿法作为一种精密测量技术,主要分为反射式补偿法和折射式补偿法^[4]。零位补偿检验的原理,就是根据非球面光学元件的参数,设计并制造光学补偿器,将干涉仪产生的球面或平面波前转变为非球面波前,该波前经被检非球面表面反射后,再次通过光学补偿器还原为包含有非球面表面误差信息的球面或平面波前,与干涉仪的参考波面相干涉,对于干涉条纹进行分析、处理就可得到非球面的面形误差。零位补偿法有许多种光路安排,其中一种是点光源位于无限远,准直透镜将其准直为平行光束,平行光通过补偿器后变成非球面波,当其到达被测非球面就成为一个与被测理想非球面镜准确吻合的非球面波,如被测镜是完善的时候,光波反射后就原路返回,当其与参考准直光干涉时就得到理想干涉条纹,实际条纹与理想干涉条纹的差异就反映了非球面的表面误差^[5]。由于补偿器的误差直接影响被测非球面的测量精度,所以对补偿器材料的光学均匀性、补偿器每个元件的表面质量及其装配要求都非常严格。

正如前文所述,对大口径凸非球面反射镜的全口径补偿检测就需要更大口径的补偿器,严格保证各个元件的精度和装配误差尤其是装配应力有时会比较困难,需要寻找一种方法对装配完成的补偿器进行误差标定,然后在非球面检测过程中去除补偿器误差的影响,从而得到非球面反射镜的真实面形。对于大口径补偿器可能出现误差的标定,Stahl等^[6]提出了一种校正补偿器非圆对称误差的技术,该方法通过使补偿器或被测非球面绕系统光轴旋转到多个不同的角度,得到多个测量结果,根据这些测量结果,计算得到由补偿器误差带来的波面误差的非圆对称项泽尼克圆多项式系数,接着根据这些非圆对称项泽尼克圆多项式系数制作一个校正文件对非球面的测量结果进行校正,利用该技术可有效减少对补偿器材料、加工及装校的苛刻要求,提高测量精度。但该方法无法分离补偿器转动过程中补偿器应力变化的影响,无法对补偿器的对称误差进行标定。

针对工程项目中与球面偏差不大的凸非球面反射镜的补偿检测,使用标准球面反射镜标定补偿器,然后将补偿器误差在非球面检测中去除。具体操作方法如图1所示,首先在待检非球面反射镜检测光路中放置一口径小于非球面反射镜的球面反射镜,并使用非球面补偿器非零位检测该球面,检测结果包含了补偿器的加工误差^[7],将分离出补偿器的误差制作成校正文件,最后把待检凸非球面反射镜移入,实现对非球面补偿检测。该方法可以实现补偿器的标定和凸非球面反射镜检测的共光路进行,减小由于调整和对准带来的误差影响,从而实现大口径补偿器的精确标定检测。

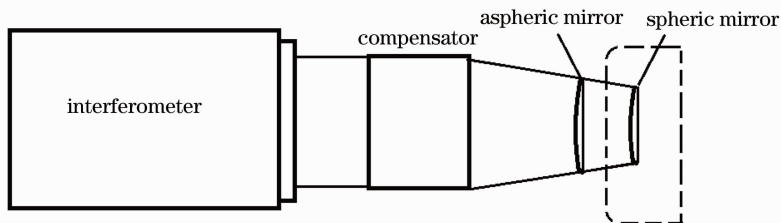


图1 凸非球面镜检测系统光路示意图

Fig.1 Optical path of convex aspheric mirror compensator testing system

3 检测实例

待检凸非球面反射镜参数:顶点曲率半径 $R = 2027.512 \text{ mm}$,二次常数 $k = -1.110954$,口径 $D = 225 \text{ mm}$,与最接近球面($R = 2028.810 \text{ mm}$)偏差峰谷(PV)值 $0.903 \mu\text{m}$,均方根(RMS)值 $0.274 \mu\text{m}$,

图2给出了该凸非球面与最接近球面的偏差分布,选用补偿检验方案检测该凸非球面,并专门设计了高精度大口径非球面补偿器。图3给出了凸非球面补偿器检测设计结果,设计精度为PV值 0.005λ ,RMS值 0.0018λ (波长 $\lambda = 632.8 \text{ nm}$)。在对该凸

非球面反射镜的加工开始阶段,凸非球面反射镜保持固定方向检测,当面形收敛到 RMS 值 0.12λ 时,将反射镜旋转不同的角度进行检测,发现不同方向的检测结果相差较大,并且呈现一定的规律,旋转 180° 时误差大小与 0° 相当,检测结果都是 RMS 值 0.12λ 左右;旋转 90° 与 270° 时误差大小较大,检测结果都达到了 0.16λ 左右。反射镜与补偿器的误差中都以像散误差为主,因为这种误差具有旋转 180° 相等,旋转 90° 大小相反的特征,所以反射镜与补偿器的误差耦合时产生这种现象。

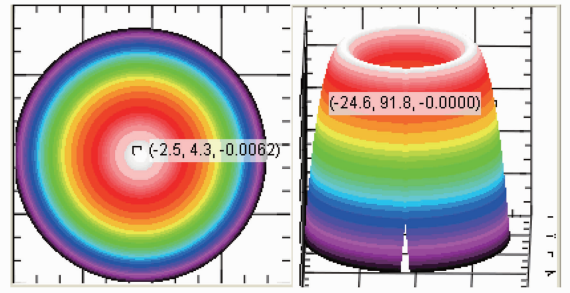


图 2 凸非球面与球面偏差分布

Fig. 2 Error distribution of the convex aspheric mirror and spherical mirror

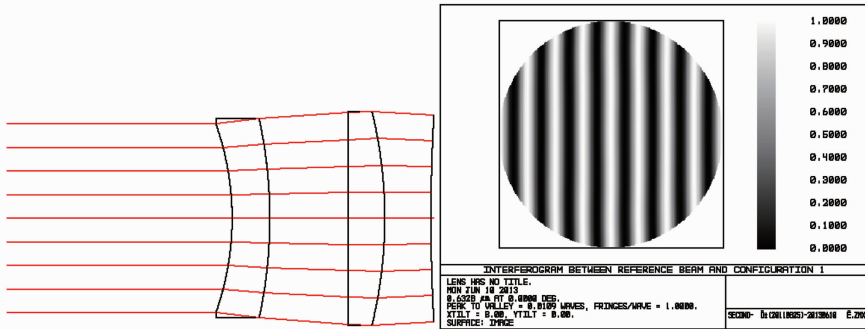


图 3 凸非球面补偿器检测设计结果

Fig. 3 Design results of the convex aspheric mirror compensator test

图 4 是搭建的补偿器标定和凸非球面反射镜检测的光路,检测光路与标定光路通过导轨将反射镜及其调整架水平移动进行切换,在同一光路中进行标定和检测,可以减小调整误差,避免由于补偿器挪动产生的补偿器误差的变化^[8]。同时由于干涉仪不需要缩放调整,减小标定和检测的对准误差。检测系统包括 $12''$ Zygo 干涉仪、大口径补偿器、待检凸非球面反射镜、标准球面样板以及补偿器调整架、反射镜调整架和标准球面样板调整架,还包含可以实现反射镜调整架平移的高精度长导轨。为了便于非球面反射镜检测状态的快速复位,在检测位置安装了

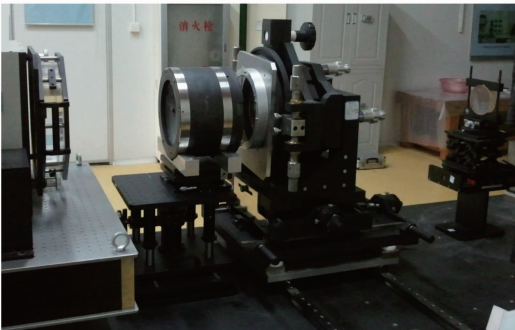


图 4 凸非球面检测装置图

Fig. 4 Setup of the convex aspheric mirror testing

定位块。

补偿器标定时先将凸非球面反射镜调整架沿切线导轨移出,用补偿器对标准球面反射镜进行标定检测;非球面反射镜检测时将反射镜调整架移入,通过定位块限位,再精细调整对非球面反射镜进行检测。用标准球面标定补偿器误差,结果去除球差项后 RMS 值为 0.093λ 。

图 5 为用补偿器检测标准球面的光路和理论波面误差,将检测结果去除标准样板误差作为系统文件,移入凸非球面反射镜调整架对反射镜进行检测。此过程中干涉仪不进行缩放操作,从而实现补偿器的检测和标定共光路,像素对像素标定检测^[9]。在对凸非球面反射镜检测时只需要把 Metropro 软件的检测选项中的 Subtract Sys Error 设置为 on,在系统误差文件名称中输入制作的补偿文件名称,再次进行测量时,软件会自动按像素减去系统文件,得到去除补偿器误差的结果。然后再转动凸非球面反射镜分别进行再测量,4 个不同角度的测量结果的 RMS 值相差只有 0.001λ ,这说明通过对补偿器误差的标定,凸非球面反射镜检测精度有很大提高。

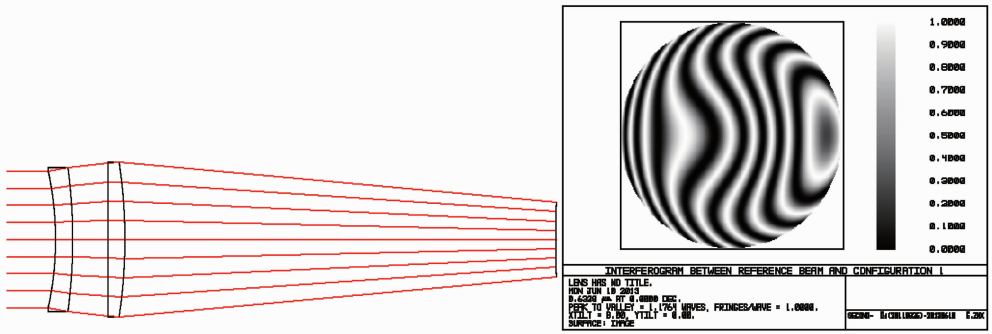


图 5 补偿器检测标准球面光路和理论波面误差

Fig. 5 Standard spheric mirror testing and the theoretical error of compensator

4 精度分析

补偿器光学元件加工完成后,对各元件的半径和中心厚度进行精确检测,将检测数据重新输入光学设计软件中进行计算,进一步优化设计,最终获取补偿器装配参数^[10]。在补偿器装配过程中,精确控制补偿器光学元件间隔并对各元件进行超高精度定心,实现光学元件装校定位,同心误差和间隔误差均小于 0.003 mm,从而保证补偿器对该凸非球面反射镜球差的准确补偿^[11];在补偿器的标定文件中去除了标准球面误差,使用 6"干涉仪精确检测标准球面,面形误差 RMS 值小于 0.015 λ,重复检测偏差小于 0.002 λ;在用补偿器对标准球面非共路检测时非共路引起的误差 RMS 值小于 0.001 λ,对补偿器进行标定检测,RMS 值重复性小于 0.003 λ;经过计算综合各项误差 RMS 值小于 0.0046 λ。

5 结 论

在凸非球面反射镜补偿检测中,补偿器加工和装调时引入的各种误差会影响凸非球面反射镜的检测精度。针对与球面偏差不大的凸非球面反射镜补偿检测,提出了一种用标准球面在线标定补偿器误差的方法,并对一凸非球面补偿检测中的误差进行了标定,使用标定后的补偿器对该凸非球面反射镜进行了检测。最后对标定误差进行了分析,标定前补偿器误差 RMS 值为 0.097 λ(λ=632.8 nm),标定后综合检测误差 RMS 值小于 0.0046 λ,满足该凸非球面反射镜检测精度要求。结果证明,该方法可以实现大口径凸非球面反射镜补偿检测中补偿器的标定,从而提高补偿检测凸非球面的检测精度。

参 考 文 献

- Pan Baozhu, Cheng Haobo, Wen Yongfu, *et al.*. Establishment of an equation of Schmidt corrector plate with large aperture based on wavefront aberration functions[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(2): 0222001.
潘宝珠,程灏波,王永富,等.基于波像差函数建立大口径施密特校正板方程[J].*光学学报*, 2012, 32(2): 0222001.
- Zhang Xuemin, Han Juan, Duan Jiayou, *et al.*. Alignment method of coaxial eccentric-pupil three-mirror system[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(4): 0416003.
张学敏,韩娟,段嘉友,等.共轴偏光瞳折轴三反射光学系统装调方法[J].*中国激光*, 2012, 39(4): 0416003.
- Wang Xiaokun, Zheng Ligong, Zhang Xuejun. Testing convex aspheres by subaperture stitching interferometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(7): 2022-2026.
王孝坤,郑立功,张学军.子孔径拼接干涉检测凸非球面的研究[J].*光学学报*, 2010, 30(7): 2022-2026.
- Shen Zhengxiang, Hao Peiming, Zhao Wencai, *et al.*. Autocolimating testing of convex conic aspheric surface [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2005, 34(1): 46-50.
沈正祥,郝沛明,赵文才,等.凸二次非球面反射镜的自准法检验[J].*红外与激光工程*, 2005, 34(1): 46-50.
- Wu Fan. Design of reflective Offner compensator for null testing of aspherical surface[J]. *Applied Optics*, 1993, 14(3): 12-17.
伍凡.非球面零检验的 Offner 补偿器设计[J].*应用光学*, 1993, 14(3): 12-17.
- Stahl P. Aspheric surface testing techniques[C]. *SPIE*, 1996, 1332: 66-76.
- Lu Zhengwu, Liu Hua, Li Fengyou. Aspheric surface testing with CGH on curved surface[J]. *Opt Precision Eng*, 2004, 12(6): 555-559.
卢振武,刘华,李凤有.利用曲面计算全息图进行非球面检测[J].*光学精密工程*, 2004, 12(6): 555-559.
- J C Wyant, K Creath. *Applied Optics and Optical Engineering* [M]. New York: Academic Press, 1986.
- H Medeck, E Tejnil, K A Goldberg, *et al.*. Phase-shifting point diffraction interferometer[J]. *Opt Lett*, 1996, 21(19): 1526-1528.
- Marlacara D. *Optical Shop Testing* [M]. 2nd ed. New York: Wiley-Interscience Publication, 1992.
- Fischer R E. *Optical System Design* [M]. Washington: SPIE Press, 2008.

栏目编辑:张 腾