

离轴抛物面反射镜的投影畸变校正研究

罗志超, 何煜, 李瑶艳, 邵传强, 杨晓飞
(苏州大学 光电科学与工程学院, 江苏 苏州 215006)

摘要: 光学元件在使用基于计算机控制光学表面成形技术(Computer Controlled Optical Surfacing, CCOS)的设备进行迭代加工时,需要导入光学干涉测量的面形数据。而使用无像差点法的自准直检测光路测量离轴凹抛物面反射镜时,由光路产生的投影畸变会使检测的面形图发生变形,进而导致工件的面形质量难以快速收敛。针对此问题,本研究提出了一种基于自准直检测光路的离轴凹抛物面镜的畸变校正方法。通过确定干涉仪中 CCD 测量坐标系和镜面坐标系的投影坐标变换,结合少量标记点的标定,对整个面形进行重构,从而校正投影畸变。针对某大口径离轴四反光学系统的 $\Phi 430$ mm 等厚离轴凹抛物面主镜的自准直检测,以畸变校正后的检测数据作为磁流变设备的加工指导,表面面形精度 RMS 最终达到 $\lambda/80$ ($\lambda = 632.8$ nm)。该方法基于少量标记点实现高精度面形校正,能够有效缩短 CCOS 迭代加工过程中的畸变校正时间,在保证表面质量要求的情况下提升光学元件加工效率。

关键词: 光学测量; 无像差点法检测; 投影畸变; Fiducials 功能; 干涉图重构

中图分类号: TQ171.6⁺5; O436.1 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1001-5078.2024.11.015

Research on correction of projection distortion of off-axis parabolic mirror

LUO Zhi-chao, HE Yu, LI Yao-yan, SHAO Chuan-qiang, YANG Xiao-fei
(School of Optoelectronic Science and Engineering, Soochow University, Suzhou 215006, China)

Abstract: The surface shape data of optical interferometry are required when the optical components are iteratively machined using equipment based on Computer Controlled Optical Surfacing (CCOS). However, when the off-axis concave parabolic mirror is measured using the autocollimation detection optical path without image handicap method, the projection distortion caused by the optical path distorts the detected surface map, which makes it difficult to quickly converge on the surface quality of the workpiece. To address this problem, a distortion correction method for off-axis concave paraboloid mirror based on autocollimation detection optical path is proposed in this paper. By determining the projection coordinate transformation of CCD coordinate system and mirror coordinate system in the interferometer, and combining with the calibration of a few mark points, the whole surface shape is reconstructed to correct the projection distortion. According to the autocollimation detection of $\Phi 430$ mm off-axis concave parabolic main mirror of a large diameter off-axis quad-mirror optical system, the surface shape accuracy RMS reaches $\lambda/80$ ($\lambda = 632.8$ nm) by using the detection data after distortion correction as the machining guide of Mr Equipment. This method achieves high-precision surface shape correction based on a small number of marks, which can effectively shorten the distortion correc-

作者简介: 罗志超(1999-),男,硕士研究生,主要从事非球面的加工与检测方面的研究。E-mail:luo1660798236@163.com

通讯作者: 杨晓飞(1977-),男,博士,副研究员,硕士生导师,主要从事光学设计、光学加工与光学装调方面的研究。E-mail: yangxiaofei@suda.edu.cn

收稿日期:2024-02-02; 修订日期:2024-04-09

tion time in CCOS iterative machining, and improve the machining efficiency of optical components while ensuring the surface quality requirements.

Keywords: optical measurement; stigmatic null test; projection distortion; Fiducials function; interferogram reconstruction

1 引言

随着空间探测、空间激光通信和超精密光学元件的发展,大口径离轴非球面发挥着重要作用^[1],高精度加工和面形检测技术也得到迅速发展。其中离轴四反光学系统是引力波探测望远系统发展的主流方向^[2-3],其中的反射主镜有着高精度加工标准。离轴非球面反射镜可以有效避免光学系统中心遮挡并改善相应的衍射问题,提高成像质量^[4]。目前,高精度大口径非球面的加工方法一般采用基于CCOS原理^[5]的小磨头、磁流变和离子束抛光等技术。这些技术通过计算机确定去除函数来控制去除量,从而实现光学元件表面材料的定量去除。然而,要达到最佳的收敛效果,通常需要配合完善的检测数据。确保机床加工坐标与检测数据的坐标高精度对准,是实现超精密光学元件的抛光的关键所在^[6]。

光学元件的检测可以分为干涉法和非干涉法测量。在粗抛光阶段,由于光学元件表面反射率较低,通常采用非干涉法,如三坐标、轮廓仪等逐点扫描的方式进行接触式面形测量,然而,这种方法的检测精度一般较低。在对光学元件精度要求较高的情况下,通常需要使用光学干涉测量类方法。光学干涉测量通常可分为零位检测与非零位检测两种方式,常用的零位补偿器包括 offner 补偿器、计算全息图(Computer-Generated Hologram, CGH)等。然而,无论使用哪种补偿器进行测量,都可能导致一定程度的面形畸变^[7-8]。

当非球面为简单二次曲面,例如抛物面时,可以利用无像差点来实现零位检测。离轴抛物面反射镜的表面曲率随着镜面坐标的变化而变化,这导致被检测镜面坐标系与干涉仪 CCD 坐标系之间存在非线性关系,即投影畸变^[9]。在进行 CCOS 机床加工时,需要将检测结果导入其中。如果检测数据未完成畸变校正,将会导致机床加工坐标与镜面坐标位置产生偏差,这会造成镜面不同区域的去除量产生交错,去除量的改变会使面形难以收敛。特别是对于精度要求更高的工件,需要校正效果更好的数据。

为了校正零位补偿器检测光路中引起的离轴非球面的畸变,李锐钢等^[9]使用 Metropro 软件中的 Fiducials 标定功能,并结合正交算法进行面形重构,该方法需要足够数量的标记点才能满足高精度要求。Novak 等^[8]提出的畸变校正方法是通过控制移动平台,观测面形图中离焦和球差的变化来反解畸变,该方法需要实现对移动平台的精确控制。在 CGH 检测和补偿检测光路中,通过光线追迹求解仿射变换映射函数的畸变校正方法有较好的校正效果^[10-12],但数据处理过程比较复杂。郝三峰等^[13]对小 F 数高次非球面存在畸变的问题,利用零位补偿器的成像畸变曲线数据逆向求解实现了畸变校正。

本文提出了一种基于自准直检测光路的离轴凹抛物面反射镜畸变校正方法,该方法利用三坐标的精确定位功能在工件表面进行标定,结合投影坐标变换和 Fiducials 标定功能,编写校正函数对工件面形进行重构。实验证明,重构后的面形用于磁流变设备的加工指导,能够有效改善 RMS 表面质量、提升加工效率,是一种简单的基于少量标记点实现的校正方法。

2 检测方案及畸变

2.1 无像差点法

使用光学干涉测量方法测量镜面时,补偿器将干涉仪镜头标准球面波转变成与非球面法线像差对应的非球面波,当非球面为理想面时不应存在干涉条纹,这种方法称为零位检测法。使用无像差点法进行的零位检测主要用于二次曲面的检验。二次曲面利用其共轭点满足点物成点像的性质,即从其中一点发出的球面波,经二次曲面反射后可以无误差地汇聚到另一个点,例如抛物面的焦点与无穷远点、椭球面的两个焦点。在对这种曲面进行检测时,Hindle 球和平面反射镜补偿器在检验中经常用到。

凹抛物面的无像差点即是曲面的焦点。在焦点处放置一点光源,照射到凹抛物面反射镜的光将会以平行光出射,此时在光路上放置一平面反射镜,光线将会原路返回,并再次汇聚到焦点。如果被检抛物面

是理想面,则反射波面是一个无像差的理想球面。图1展示了离轴凹抛物面反射镜检测光路示意图。

2.2 离轴检测光路搭建

检测光路由4英寸Zygo干涉仪、球面标准镜头、辅助平面镜和被测镜四个部分以及对应的调整架组成。首先,根据测量光路选择合适的球面标准镜头,并将其安装至干涉仪上。确定标准镜头的焦点位置后,以该焦点为基准放置工件和平面镜的位置。根据工件的焦距、离轴量和离轴角的大小,大致摆放工件的位置。对于平面镜,需要确保其接收到工件反射的全部光。此时调整干涉仪的水平方向使干涉仪射出的光斑覆盖工件,使光斑中心与工件中心对应,确保工件边缘距光斑边缘距离的大小一致。在调整干涉仪的过程中,尽量保持焦点位置不变。随后,通过调整平移、扭摆、俯仰和旋转六个自由度来调整工件的位置和角度,使工件的反射光全部射向辅助平面镜。反射镜再反射光线到工件上形成一焦点,找到返回的焦点位置后再进行微调,使标准镜头的焦点与返回的焦点重合。最后降低离轴镜的自转偏差,使离轴镜上子午光线对和弧矢光线对的交点重合,通过观测干涉条纹将像散调整到最小。

采用无像差点法检测光路时,干涉仪发出的光束经过标准球面镜产生的球面波经过离轴凹抛物面的焦点,球面波前经被检抛物面反射后以平行光出射,再经平面反射补偿镜按原光路返回与干涉仪的参考光发生干涉,获得抛物面表面的误差分布^[14]。调整干涉仪的光路射向工件,在不考虑干涉仪内部畸变的情况下,则CCD相机坐标面与主光线垂直,如图1所示。抛物镜工件表面与主光线的垂面有偏差,于是造成了工件表面在该CCD上的非线性投影^[15]。尽管存在畸变,但畸变前后工件中心点的坐标不变,因此以它为检测数据的坐标原点。

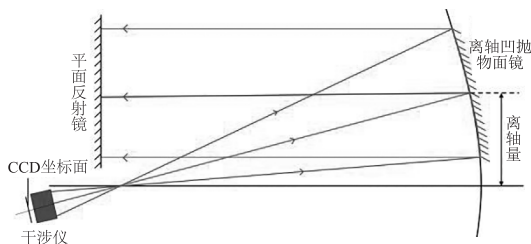


图1 离轴凹抛物面检测光路示意图

Fig. 1 Off-axis concave paraboloid detection optical path

在搭建检测光路之前,先在工件表面作十字线标记,这些标记点位置分别位于工件边缘位置和中

心位置处,如图2所示。标记点的精确位置由三坐标测量设备确定。当进行全口径坐标重构时,可能会出现边缘测量不完全导致的标定错误,因此,选择能够测量出的面形来实现精确标定。离轴工件镜面为面对称图形,根据检测光路的对称性,可以得出工件投影畸变也是面对称。

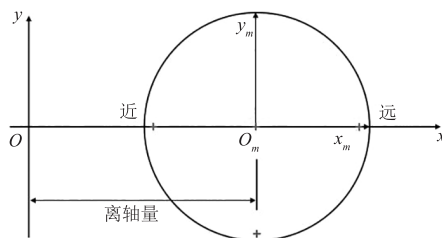


图2 标记点位置图

Fig. 2 Marker position

2.3 畸变校正

通过Metropro软件中的Fiducials功能,可以获取工件上十字线的像素坐标,如图3所示。每个像素坐标都代表一定的大小,通过像素个数可以准确标定工件的尺寸,横纵坐标像素分辨率是 1024×1024 。利用像素坐标定位功能,可以建立CCD坐标系和工件坐标系之间的对应关系,从而确定检测数据的空间位置,并进一步进行数据重构和分析。



图3 Metropro软件中的Fiducials功能

Fig. 3 Fiducials function in Metropro software

已知CCD面上的检测数据,根据已知信息,在垂直于主光线的面上,CCD的投影为线性变换。在分析CCD检测数据在离轴凹抛物面反射镜的坐标投影时,为了实现CCD坐标系与抛物面工件坐标系的统一,以抛物面焦点为原点,建立右手坐标系,如图4所示。

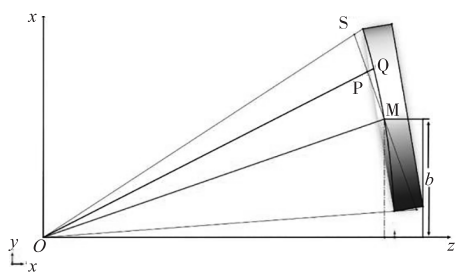


图4 坐标投影示意图

Fig.4 Coordinate projection

由几何关系知抛物面方程为:

$$z + \frac{1}{2R}(x^2 + y^2) - \frac{R}{2} = 0 \quad (1)$$

其中, R 是抛物面的顶点曲率半径, 离轴量为 b 。把工件中心点 M 点 $x = b, y = 0$ 代入上式可得:

$$z = \frac{R^2 - b^2}{2R} \quad (2)$$

即 M 点坐标 $(b, 0, \frac{R^2 - b^2}{2R})$, OM 即为主光线, CCD 面与该线垂直, 考虑 CCD 在该线垂直面上的投影为线性, 则以过 M 点垂直 OM 的面为投影面 S , CCD 进行线性变换到投影面 S , 再计算面 S 上到抛物面的坐标, 此时忽略干涉仪内部的畸变。通过两点直线公式:

$$\frac{x - x_1}{x_2 - x_1} = \frac{y - y_1}{y_2 - y_1} = \frac{z - z_1}{z_2 - z_1} \quad (3)$$

得出 OM 直线:

$$\begin{cases} y = 0 \\ x = \frac{2bR}{R^2 - b^2}z \end{cases} \quad (4)$$

于是过 M 点垂直于 OM 的面 S 为:

$$(x - b) = -\frac{R^2 - b^2}{2bR}(z - \frac{R^2 - b^2}{2R}) \quad (5)$$

取 S 面上一点 $P(x_0, y_0, z_0)$, 计算直线 OP :

$\frac{x}{y_0} = \frac{z}{z_0}$ 与抛物面的交点, 得出:

$$x = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \quad (6)$$

其中,

$$\begin{cases} A = \frac{1}{2R}(1 + \frac{y_0^2}{x_0^2}) \\ B = (\frac{2b^2R}{R^2 - b^2} + \frac{R^2 - b^2}{2R}) \frac{1}{x_0} - \frac{2bR}{R^2 - b^2} \\ C = -\frac{R}{2} \end{cases} \quad (7)$$

则:

$$y = \frac{y_0}{x_0} \cdot x = \frac{y_0}{x_0} \cdot \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \quad (8)$$

根据以上步骤, 可以得出面 S 上的点在离轴凹抛物面的投影坐标。通过 Metropro 中的 Fiducials 功能确定十字线的中心坐标。然后, 通过几何关系, 把检测数据的 xy 坐标通过几何关系线性变换到面 S , 使偏差达到最小。接着, 通过投影变换得出抛物面上的坐标, 并将其映射至等厚工件面。重构后的 xy 坐标值并不均匀, 而导入 Metropro 软件需要 xy 为像素坐标, 那么需要对 z 坐标进行插值处理, 插值后的 z 值处理完成实现畸变校正。通过对工件原始坐标系和校正后的标记点坐标进行对比, 可计算出校正的标记点的位置偏差。

3 离轴镜校正实例

在对口径 430 mm 的等厚离轴凹抛物面反射主镜(顶点曲率半径 1614 mm, 离轴量 275 mm)进行 Fiducials 标定十字线的工作时, 选择其中心和边缘向内 10 mm 位置处进行操作。接下来使用无像差点法对主镜进行检测, 得到主镜的面形检测数据。这些数据包括 xyz 三维坐标数据, 如图 5 所示。

Zygo XYZ Data File-Format 1	200 601 -0.27080549
1 10 0 3 Fri May 18 09:18:43 2018	201 601 -0.27110964
0 0 1024 1024 1 254	202 601 -0.27095032
62 129 874 882	203 601 -0.27116758
.	204 601 -0.27098412
.	205 601 -0.27154898
0 0.25 6.328e-007 0.5 1 0 0 1681452046	206 601 -0.27176141
1024 1024 0 0 659306 0	207 601 -0.26995578
0 0 1.35 0 1 0 78.48 0 0	208 601 -0.2702889
1 1 100 0 0 0 0 0	209 601 -0.27198349
0	210 601 -0.27314218
1 0.01	

(a)表头文件

(b)部分面形数据

图5 xyz 面形文件

Fig.5 xyz face shape file

表头文件包含了测量时的各项数据描述。其中, 第四行的四个数据分别代表 x 和 y 方向的像素起始数以及对应的像素个数。而第八行第七个数据代表像素分辨率的大小, 这对于标定工件的尺寸非常重要。这些数据在重构面形时将会被使用。

通过面形数据, 可以在 Matlab 中复现 Metropro 软件中的面形图, 如图 6 所示。此时工件的大小尚未进行标定, 也没有去除慧差、像散等像差。

此时利用 Metropro 软件的功能记录各标记点的像素坐标。然后, 通过几何关系, 利用标记的口径使干涉图贴合至图 4 的所示的面 S 上。接着, 采用上一节介绍的方法, 对 xy 坐标进行投影坐标变换, 得

到变换后的坐标。为了符合 xyz 数据文件类型,需要对变换后的坐标进行线性插值处理,以便于 Metropro 软件读取和处理。

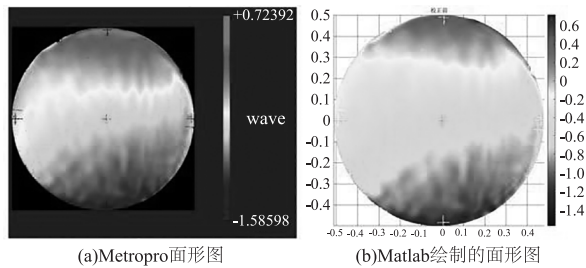


图 6 面形文件

Fig. 6 Surface shape file

畸变校正前数据如图 7 所示。左图显示了初始的面形图,右图显示了经过 Fiducials 功能标记后的图像。在初始面形图中,远近光轴出现了被压缩和拉伸的情况,与前文对光路图的描述一致。在经过畸变校正后的图 8 中,面形效果更加均匀。此外,校正后的 Fiducials 功能标记图也得到了相应的调整。

对四个标记点进行像素定位,以工件中心为原点,查看各个点的位置偏差,结果如表 1 所示。

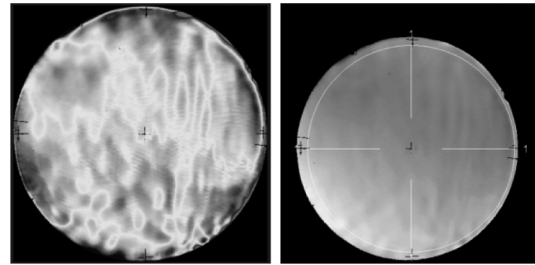


图 7 初始面形及 Fiducials 标记图

Fig. 7 Initial surface shape and Fiducials mark

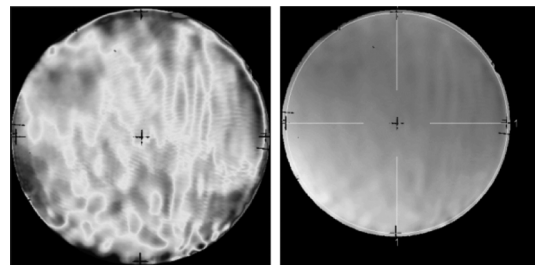


图 8 校正后的面形及 Fiducials 标记图

Fig. 8 Corrected face shape and Fiducials mark

表 1 标记点位置偏差

Tab. 1 Mark position deviation

标记点位置	中心	左	上	右	下
初始位置/mm	(0,0)	(-205,0)	(0,205)	(205,0)	(0,-205)
校正后的位置/pix	(0,0)	(-438,0.5)	(-2.75,436.75)	(431,1)	(-4.75,-432.75)

用像素标定工件大小后计算点的偏差,得到:

$$d = 1.8436(\text{mm})$$

使用磁流变设备进行主镜的抛光实验,旨在验证畸变校正的效果。抛光过程采用了光栅轨迹,同时结合了小磨头的光顺功能,以抑制刀痕误差。在抛光过程中,对磁流变机床上离轴主镜摆放带来的自转偏差进行了修正。在小磨头和磁流变迭代抛光过程中,记录主镜的面形数据。如图 9 所示,可以观察到主镜的收敛效果。从数据中可以看出,在抛光初期,收敛效果较好,但随着精度的提升,收敛速度逐渐变缓。

抛光过程中的面形如图 10 所示,在该图中面形去除了一定量的边缘,最终在有效口径内 RMS 面形精度达到 $\lambda/80$ ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$)。通过结合图 9 和图 10,可以观察到,随着中高频误差的增加,设备抛光区域与工件实际需要的抛光区域产生差异,畸变校正方法对面形的提升效果逐渐减弱,表面面形 RMS 值下降速度放缓直至停止。

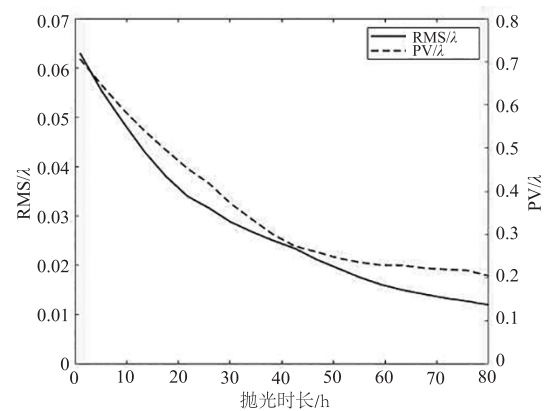


图 9 抛光收敛曲线图

Fig. 9 Polishing convergence diagram

以上结果说明结合投影坐标变换和标记点法的畸变校正方法,在一定精度范围内具有良好的校正效果。在 CCOS 设备的多次抛光迭代过程中,少量标记点的校正工作有效地提升了校正效率,并在保证精度的同时对 CCOS 设备的加工起到了指导作用。

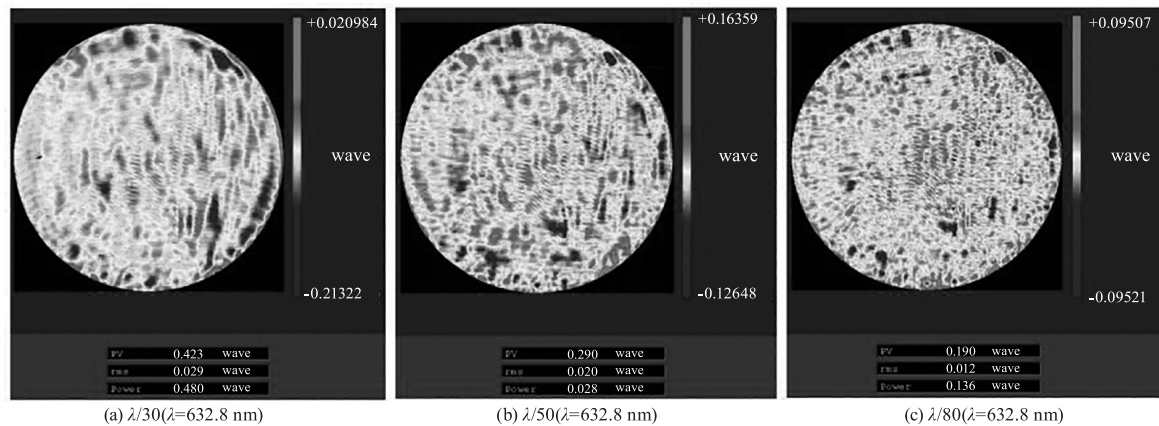


图 10 抛光过程 RMS 面形

Fig. 10 Polishing process RMS surface shape

4 结论

针对大口径离轴凹抛物面反射镜无像差点法自准直检测光路中,检测结果出现非线性投影畸变的问题,提出了一种基于投影坐标变换和标记点标定的畸变校正方法。首先计算抛物面光路的投影坐标变换,再利用像素坐标定位通过几何关系实现检测数据的线性变换,最后通过校正程序进行坐标重构插值以及工件大小标定。校正后的检测数据满足 CCOS 机床的加工精度要求,运用此方法对某离轴四反光学系统的 $\Phi 430$ mm 离轴凹抛物面主镜的测量面形进行畸变校正,并进行抛光实验,最终离轴凹抛物面主镜面形精度 RMS 值达到 $\lambda/80$ ($\lambda = 632.8$ nm)。

参考文献:

- [1] Pan Junhua. The design manufacture and test of the aspherical optical surfaces[M]. Suzhou:Soochow University Press,2004:145-152. (in Chinese)
潘君骅. 光学非球面的设计、加工与检验[M]. 苏州:苏州大学出版社,2004:145-152.
- [2] Fan Wentong,Zhao Hongchao,Fan Lei, et al. Preliminary analysis of space gravitational wave detection telescope system technology[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2021, 60(1-2):178-185. (in Chinese)
范纹彤,赵宏超,范磊,等. 空间引力波探测望远镜系统技术初步分析[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2021,60(1-2):178-185.
- [3] Li Jiancong, Lin Hongan, Luo Jiaxiong, et al. Optical design of space gravitational wave detection telescope[J]. Chinese Optics, 2022, 15(4):761-769. (in Chinese)
李建聪,林宏安,罗佳雄,等. 空间引力波探测望远镜光学系统设计[J]. 中国光学(中英文), 2022, 15(4):761-769.
- [4] Chen Wei, Wang Qing, Zhu Guibo. Contrastive measurement of off-axis paraboloids [J]. Optical Instruments, 2022, 44(1):15-21. (in Chinese)
陈巍,王青,朱贵博. 离轴抛物面的对比测量[J]. 光学仪器, 2022, 44(1):15-21.
- [5] Rupp, V. The development of optical surfaces during the grinding process[J]. Applied Optics, 1965, 4(6):743.
- [6] Jacob Lubliner, Jerry E. Nelson. Stressed mirror polishing. 1: A technique for producing nonaxisymmetric mirrors[J]. Appl. Opt., 1980, 19:2332-2340.
- [7] Wu Fan. Design of reflective offner compensator for null testing of aspherical surface [J]. Journal of Applied Optics, 1993, 14(3):8-12. (in Chinese)
伍凡. 非球面零检验的 offner 补偿器设计[J]. 应用光学, 1993, 14(3):8-12.
- [8] Novak M. Zhao C, Burge J H. Distortion mapping correction in aspheric null testing [J]. SPIE, 2008, 7063:706313.
- [9] Li Ruigang, Zheng Ligong, Xue Donglin, et al. Calibration method for projection distortion in interferometric testing high order and off-axis aspheric surface with big aperture [J]. Optics and Precision Engineering, 2006, (4):533-538. (in Chinese)
李锐钢,郑立功,薛栋林,等. 大口径高次、离轴非球面干涉测量中投影畸变的标定方法[J]. 光学精密工程, 2006, (4):533-538.
- [10] Zeng Xuefeng, Yan Feng, Xue Donglin, et al. Distortion correction in testing of off-axis asphere with computer-generated hologram[J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(11):1109003. (in Chinese)

- 曾雪峰,闫锋,薛栋林,等. 计算全息图补偿检测离轴非球面中的投影畸变校正技术[J]. 中国激光,2013,40(11):1109003.
- [11] Chen Zhe,Zhang Xingxiang,Chen Changzheng,et al. Distortion mapping correction in testing of large off-axis aspherical mirrors with null lens[J]. Chinese Journal of Lasers,2015,42(10):1008001. (in Chinese)
陈哲,张星祥,陈长征,等. 大口径离轴非球面补偿检测的畸变校正[J]. 中国激光,2015,42(10):1008001.
- [12] Li Honglan,Yuan Lyujun,Xu Jiesu,et al. Nonlinear distortion correction in off-axis aspheric null compensation tests[J]. Journal of Applied Optics,2019,40(4):638 - 643. (in Chinese)
厉宏兰,袁吕军,徐节速,等. 离轴非球面零位补偿检验的非线性畸变校正[J]. 应用光学,2019,40(4):638 - 643.
- [13] Hao Sanfeng,Zhang Jian,Yang Jianfeng. F/0.78 high order aspheric surface testing with null compensator and mapping distortion correction[J]. Acta Photonica Sinica,2023,52(2):0212004. (in Chinese)
郝三峰,张建,杨建峰. F/0.78 高次非球面零位补偿检测与投影畸变校正[J]. 光子学报,2023,52(2):0212004.
- [14] Malacarad. Optical shop testing[M]. New Jersey:John Wiley & Sons,2007.
- [15] Hou Jia. Design method for imaging freeform lens based on distortion correction[D]. Hangzhou:Zhejiang University,2013:24 - 26. (in Chinese)
侯佳. 基于畸变校正的成像自由曲面光学设计[D]. 杭州:浙江大学,2013:24 - 26.