

文章编号 1004-924X(2010)12-2557-07

高精度离轴凸非球面反射镜的加工及检测

张 峰

(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中国科学院重点实验室,吉林 长春 130033)

摘要: 为了提高离轴凸非球面反射镜的面形精度和光轴精度,研究了离轴凸非球面反射镜的加工与检测技术。首先,描述了离轴三反消像散(TMA)光学系统以及作为该光学系统次镜的离轴凸非球面反射镜的光学参数和技术指标。然后,介绍了非球面计算机控制光学表面成型(CCOS)技术及FSGJ非球面数控加工设备。最后,给出了非球面研磨阶段检测用的轮廓测量法和离轴凸非球面抛光阶段检测用的背部透射零位补偿检测法,并对背部透射零位补偿检测中离轴凸非球面反射镜光轴精度的控制技术进行了研究。检测结果表明:采用背部透射零位补偿检测法检测得到的离轴凸非球面反射镜的面形精度为 0.017λ (均方根值, $\lambda=0.6328\ \mu\text{m}$);用Leica经纬仪测量反射镜的光轴精度其结果达到 $9.4''$,满足光学设计技术指标要求。

关键词: 凸离轴非球面;计算机控制光学表面成型;轮廓测量;背部透射零位补偿检测;光轴精度

中图分类号: TH703;TQ171.68 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20101812.2557

Fabrication and testing of precise off-axis convex aspheric mirror

ZHANG Feng

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

Abstract: To improve the fine surface figure accuracy and optical axis accuracy of an off-axis convex aspheric mirror, the fabrication and testing technologies of the off-axis convex aspheric mirror were studied. Firstly, a Three Mirror Anastigmat (TMA) optical system and the specification requirements of the second off-axis convex aspheric mirror in the TMA optical system were presented. Then, the technique of Computer-controlled Optical Surfacing(CCOS)for manufacturing the aspheric mirror and the FSGJ numerical control machine for processing aspheric surface were introduced. Finally, the contour testing in a lapping stage and the back transmission null testing in a polishing stage for the convex aspheric mirror were described, and the controlling technology for the optical axis accuracy of off-axis convex aspheric mirror was studied. The testing results indicate that the surface figure accuracy and the optical axis accuracy of the off-axis convex aspheric mirror are 0.017λ RMS and $9.4''$, respectively. All the specifications of the off-axis convex aspheric mirror can meet the requirements of the optical design.

Key words: off-axis convex aspheric surface; Computer-controlled Optical Surfacing(CCOS); contour testing; back transmission null testing; optical axis accuracy

收稿日期:2010-09-25;修订日期:2010-10-27.

基金项目:国家自然科学基金重点资助项目(No. 61036015)

1 引言

采用非球面光学元件可以使光学系统的结构简化、尺寸小、重量轻,并能有效地改善成像质量。因此,非球面的应用越来越广泛。然而,非球面(特别是凸非球面)的加工和检测难度要比球面大得多。

常用的非球面加工技术包括:光学玻璃模压技术、光学塑料成型技术、单点金刚石车削技术、ELID 磨削技术^[1-2]、古典法修带技术^[3]、计算机控制光学表面成型技术^[4-6]、磁流变抛光技术^[7-8]以及离子束抛光技术^[9]等。前 4 种技术适合于中等精度非球面的加工,并可实现非球面的量产化,但还不能用来满足空间光学系统中的高精度非球面反射镜的加工要求。古典法修带技术适合于回转对称的非球面的加工,不能用来加工离轴非球面。磁流变抛光是利用磁流变抛光液在磁场中发生流变而形成的柔性“小磨头”进行光学加工,是一种不错的加工方法,但这项研究成果在国内还没有成熟到可应用于工程中的高精度非球面的加工^[10-11]。离子束抛光技术是一种高精度抛光方法,是在原子量级上实现对材料轰击去除的,但这种抛光方法效率较低,一般用这种方法加工的非球面预先应具备一定精度,且设备昂贵。因此,本文提出采用目前已较为成熟的计算机控制光学表面成型技术来实现空间光学系统中高精度非球面反射镜的加工。

非球面的主要检测方法有:轮廓测量法^[12]、无像差点检测法^[3,13]、计算全息法^[14-15]、子口径拼接法^[16-18]、零位补偿检测法^[3,19]等。轮廓测量法是检测非球面面形常用的一种检测方法,特别适合非球面在研磨阶段的面形测量,常用的仪器有三坐标测量机、摆臂式轮廓仪等。二次曲面有一对无像差点,利用二次曲面的这一特性可实现对二次曲面面形的检测。测量凸二次曲面时,辅助镜的尺寸一般要比被检凸非球面尺寸大得多。计算全息图(Computer Generated Hologram, CGH)最大的特点是只要物波的数学模型已知,就能产生实际上并不存在物体的衍射,精确提供非球面检测所需的“标准零位补偿样板”。检测凸非球面的 CGH 尺寸要大于凸非球面。因此,用于大尺寸凸非球面检测的 CGH 制作困难。子孔

径拼接法是利用标准球面波前作为参考波面,用干涉法依次测量非球面各个区域的相位分布,然后通过子孔径拼接算法重构非球面全口径面形分布。这种方法对调整机构精度和拼接算法要求较高,且对于陡度大的非球面拼接困难。零位补偿检测法通过特定的非球面光学补偿器,将干涉仪发出的平面波或球面波转换成非球面波,经被检非球面反射后,再次通过光学补偿器与干涉仪参考光干涉,从而获取被检非球面面形误差及其分布。对于凸非球面检测,补偿器的口径要大于被检凸非球面的口径。为了能用小口径光学补偿器检测大口径非球面,可以采用背部透射零位补偿检测法。这种方法适用于透明光学材料的非球面检测,对光学材料折射率均匀性和背部辅助面的加工精度要求较高。针对离轴三反消像散光学系统中非球面次镜为高陡度凸非球面、材料为折射率均匀性非常好的熔石英等特点,本文采用背部透射零位补偿检测法对离轴凸非球面进行检测。

2 离轴三反消像散光学系统及凸非球面次镜

2.1 离轴三反消像散光学系统简介

20 世纪 80 年代,国外有人提出将离轴三反消像散光学系统(TMA)应用于空间相机中。20 世纪 90 年代,随着大型光学设计软件功能的不断增强以及计算机控制光学加工技术的逐步成熟,这种光学系统逐渐被人们所接受。目前,TMA 光学系统已广泛应用于空间相机中^[20]。

图 1 为典型的离轴三反消像散光学系统光路图,它由主镜、次镜、三镜以及折叠镜组成。主镜和三镜通常为凹的离轴非球面反射镜,次镜为凸

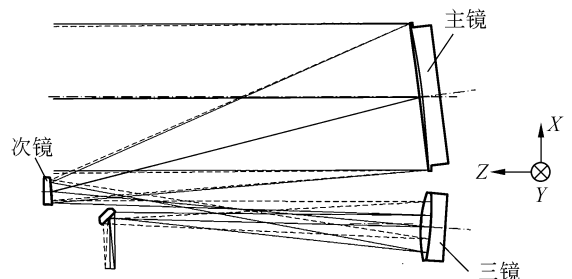


图 1 离轴三反消像散光学系统光路图
Fig. 1 Beam path of TMA optical system

非球面反射镜,折叠镜为高精度平面反射镜。光线依次通过主镜、次镜、三镜,再经过折叠镜到达像面成像。与两镜同轴非球面光学系统相比,离轴三反消像散光学系统具有大视场、无中心遮拦、筒长与焦距的比值一般较小等优点,能够满足空间相机大视场、高分辨力、体积小和重量轻等性能的要求。

2.2 离轴凸非球面反射镜

某离轴三反消像散光学系统中的次镜是尺寸为 $176\text{ mm} \times 110\text{ mm}$ 矩形口径的离轴凸双曲面反射镜,反射镜的背面是一个高精度平面。离轴凸双曲面反射镜的光学参数为:顶点曲率半径 $R = 895.27\text{ mm}$;二次曲面系数 $K = -4.256$;离轴量为 69.5 mm 。离轴凸双曲面反射镜的技术指标为:有效口径内的面形精度 RMS 值优于 0.02λ ($\lambda = 0.6328\text{ }\mu\text{m}$);实际加工光轴与理论设计光轴的偏差小于 $10''$ 。

3 离轴凸非球面反射镜的加工

3.1 离轴凸非球面反射镜加工方法

由于非球面表面各个带区的曲率半径各不相同,因此非球面的加工不可能象平面或球面的加工那样采用与被加工工件尺寸相当的磨盘以古典法加工来实现。非球面有多种加工方法,目前较为成熟的是计算机控制光学表面成型(Computer Controlled Optical Surfacing, CCOS)技术,其加工原理是以定量的检测数据为依据,通过计算机控制运动着的小磨头在非球面表面不同位置的驻留时间、转速等工艺参数来实现对非球面面形的修正。本文正是采用这种技术来实现对离轴凸非球面反射镜的加工的。

3.2 非球面数控加工设备简介

为了实现对非球面反射镜的加工,本研究小组自行研制了 FSGJ 系列非球面数控加工机床。比较有代表性的是 FSGJ-2 非球面数控加工中心,它是一台建立在 CCOS 基础上,集研磨、研磨阶段的在线检测以及抛光于一体的非球面自动制造机床,其加工非球面的最大尺寸为 $\Phi 1\ 000\text{ mm}$ 。



图 2 FSGJ-2 非球面数控加工中心

Fig. 2 Computer-controlled machine for manufacturing asphere

图 2 为 FSGJ-2 非球面数控加工中心的实物照片。FSGJ-2 非球面数控加工中心主体结构采用龙门式结构,基座和龙门均采用了花岗岩材料。磨头是依靠气缸内的气压来与工件接触的,可以通过调节气缸内气体的压强来改变磨头与工件间的相对压力。为了满足不同的加工要求,FSGJ-2 采用了 6 个自由度联动数控系统,6 个自由度分别表示为 X, Y, Z, U, V, W 。其中 X, Y, Z 为平动自由度; U, V, W 为转动自由度。这 6 个自由度相互配合使用确保了离轴凸非球面反射镜的研磨、研磨阶段的在线检测以及抛光能顺利实现。

3.3 离轴凸非球面反射镜加工工艺

在加工工艺上,离轴非球面的制造方法主要有两种:一种是“拼盘法”,就是将离轴非球面拼盘成一个同轴非球面,对这个同轴非球面进行光学加工,加工完成后再将工件分离,获得所需的非球面元件;另一种方法是对离轴非球面元件直接进行加工,获得所需表面。

对镜面尺寸和离轴量都比较小的离轴凸非球面次镜采用“拼盘法”进行加工,拼盘后母镜面尺寸只有 $\Phi 310\text{ mm}$,适合数控加工,且可同时加工出两块次镜,加工完毕拆盘后,只需对单镜略加修抛即可达到技术指标要求。

使用本研究小组编制的离轴非球面最接近球面半径求解的通用程序对拼盘后的非球面母镜进行计算求解,得到如图 3 所示的结果。从图 3 中可以看到,最接近球面的半径为 916.11 mm ,非球面与最接近球面的最大偏差为 $158.273\text{ }\mu\text{m}$ 。

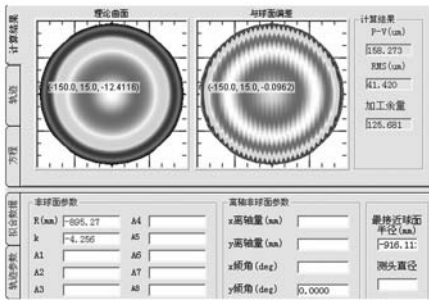


图 3 拼盘后非球面的最接近球面半径

Fig. 3 Radius of the best fit sphere

4 离轴凸非球面反射镜的检测

4.1 离轴凸非球面的轮廓检测

研磨阶段非球面的面形误差较大,一般在数百个微米,有的甚至到毫米量级,此时一般采用轮廓测量法进行检测。通过上面的计算可知,拼盘非球面母镜的面形误差 PV 值为 $158.273 \mu\text{m}$ 。

离轴凸非球面反射镜采用“拼盘法”进行加工,拼盘非球面母镜的研磨与轮廓检测是在 FS-GJ-2 非球面数控加工中心进行的。FSGJ-2 非球面数控加工中心同时具有小磨头加工功能和反射镜面轮廓检测功能,并可实现这两个坐标系的自动切换。当完成对非球面反射镜面形的轮廓检测后,将定量的检测数据转换成加工文件,同时将检测坐标系切换成加工坐标系,对非球面反射镜进行数控加工,完成一个加工周期再切换成检测坐标系对反射镜进行检测。

拼盘非球面母镜的轮廓检测是通过测头传感器对非球面表面进行极坐标系下或直角坐标系下的离散点采样测量^[12]。测量完成后,以采样点的测量数据为依据重构非球面的面形,并将其与理论设计的理想非球面进行比较,得到被检测非球面的面形误差,进而指导对非球面的加工,实现对其面形误差的修正。

经过多个研磨周期后,拼盘非球面母镜的面形精度 RMS 值低于 $1 \mu\text{m}$ 便可以转到抛光工序。

4.2 离轴凸非球面的背部透射零位补偿检测

在 FSGJ-2 非球面数控加工中心对拼盘非球面母镜进行几个周期的抛光,表面即可达到激光干涉仪检验的条件。由于激光干涉仪只能发出平面波或者球面波,必须经过波前波面的转换,才能实现非球面的测量。理论分析和大量的工程实

践显示,Offner 补偿器能够对大相对孔径非球面提供很好的补偿。因此,对于空间相机光学系统中的大相对孔径的离轴非球面的检验,Offner 补偿器是最佳选择。

拼盘非球面母镜是口径为 $\Phi 310 \text{ mm}$ 的凸双曲面,若采用普通的零位补偿法检测就必须制作口径大于 $\Phi 310 \text{ mm}$ 的 Offner 补偿器,难度相当大。因此,本文提出采用背部透射零位补偿检测方法对这块非球面反射镜进行检测。

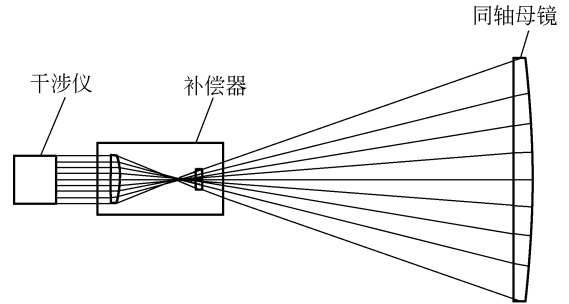


图 4 背部透射零位补偿检测同轴非球面母镜光路图

Fig. 4 Back transmission null testing of co-axis convex aspheric mirror

图 4 是背部透射零位补偿检测同轴非球面母镜的光路图,其检测原理是:由干涉仪发出的平行光束经过 Offner 补偿器后,转变为非球面波,然后透过非球面反射镜的背部平面,折射到被检测的非球面上,由非球面反射后,再依次通过非球面反射镜的背部平面和 Offner 补偿器回到干涉仪,与参考光进行干涉形成干涉条纹。在背部透射零位补偿检测中非球面背部表面也作为补偿器的一部分。因此,背部透射零位补偿检测除了要考虑 Offner 补偿器制造精度外,还要保证非球面反射镜背部平面精度以及反射镜材料均匀性,并在加工过程中严格控制非球面反射镜的厚度和平面与非球面的偏心。加工完毕后,应给出各项技术指标实测值与设计值的符合程度。

拼盘非球面反射镜加工到约 $\lambda/20\text{RMS}$ 值时,须对反射镜拆盘,再对单块离轴凸非球面反射镜进行单独数控加工。图 5 为拆盘后用背部透射零位补偿检测离轴凸非球面反射镜的光路图。

经过几个周期的抛光,得到如图 6 所示的离轴凸非球面反射镜最终的面形检测结果。从图 6 可知反射镜有效口径内面形精度均方根值为 0.017λ ($\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$),满足光学设计提出的 $\lambda/$

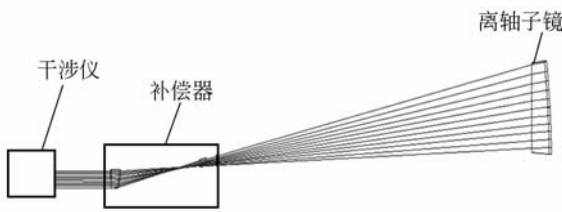


图 5 背部透射零位补偿检测离轴非球面子镜光路图
Fig. 5 Back transmission null testing of off-axis convex aspheric mirror

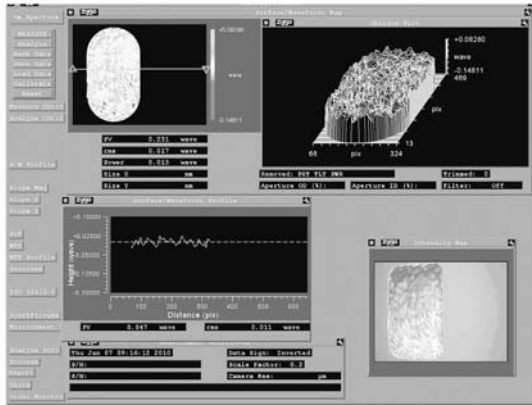


图 6 离轴凸非球面最终的面形检测结果
Fig. 6 Test result of off-axis convex aspheric surface

50 的技术指标。

在离轴凸非球面反射镜背部透射零位补偿检测中,反射镜本身就是零位补偿器的一部分。因此,仅仅离轴凸非球面反射镜的面形精度符合要求还不够,还要考查反射镜的其它指标是否符合设计要求。表 1 给出了离轴凸非球面反射镜材料的不均匀性、厚度、偏心、背部平面面形精度和非

球面面形精度实测值与设计公差对比情况,各项指标实测值均符合设计要求。因此,所加工的离轴凸非球面完全符合设计要求。

4.3 离轴凸非球面加工过程中光轴精度的控制

离轴凸非球面反射镜是离轴三反消像散光学系统(TMA)中的次镜,整个光学系统的装调是以次镜为基准的。同时,离轴凸非球面反射镜的检测采用的是背部透射零位补偿检测,反射镜光轴精度误差会引入像差(主要是彗差),从而引起离轴凸非球面加工误差。因此,在加工过程中控制离轴凸非球面反射镜的光轴精度十分必要。

非球面的加工是以检测数据为依据的数控加工。因此,控制好检测过程中的离轴凸非球面反射镜的光轴精度,就可以在加工过程中有效地控制非球面反射镜的光轴精度。

图 4 是背部透射零位补偿检测非球面的光路图。从图 4 可以看到由干涉仪发出的是平面波,利用这一基本特性,当检测光路基本调好后,撤去 Offner 补偿器,用干涉仪直接检测离轴凸非球面反射镜的背部平面,调节非球面使干涉仪的视场内出现零条纹,这说明离轴凸非球面反射镜的背部平面与干涉仪标准平面镜严格平行。然后将补偿器移入,调节补偿器,使补偿器的光轴与干涉仪的标准平面垂直,并用激光测距仪监视补偿器与非球面反射镜的相对位置,将位置误差控制在设计允差范围内。这样,就可以确保补偿器的光轴与非球面反射镜光轴的同轴度。

离轴凸非球面反射镜加工完成后,用 Leica 经纬仪检测其光轴精度为 $9.4''$,满足理论设计光轴偏差小于 $10''$ 的要求。

5 结 论

本文对离轴凸非球面反射镜的加工与检测技术进行了研究。介绍了离轴凸非球面反射镜所在的离轴三反消像散光学系统以及离轴凸非球面反射镜的光学参数和技术要求。描述了非球面 CCOS 技术及 FSGJ 非球面数控加工设备。最后,阐述了适合非球面研磨阶段检测的轮廓测量方法和适合离轴凸非球面抛光阶段检测的背部透射零位补偿检测方法,并对背部透射零位补偿检测中离轴凸非球面反射镜光轴精度的控制技术进行了研究。离轴凸非球面反射镜加工完成后,采

表 1 非球面加工检验结果与设计公差对比

Tab. 1 Comparison of asphere testing result and optical design tolerance

	设计公差	实测值
透镜材料		
不均匀性 Δn_1 (RMS)	$\leq 0.5 \times 10^{-6}$	0.1×10^{-6}
厚度 d/mm	33.18 ± 0.02	33.19
偏心/ $''$	≤ 10	9.4
镜面 1 面形 (背部平面) λ (RMS)	≤ 0.015	0.012
镜面 2 面形 (非球面) λ (RMS)	≤ 0.020	0.017

用背部透射零位补偿检测法检测得到的反射镜面形精度为 0.017λ (均方根值, $\lambda=0.6328\ \mu\text{m}$), 满足光学设计提出的面形精度 RMS 值优于 0.02λ

的技术要求; 用 Leica 经纬仪检测了反射镜光轴精度, 结果为 $9.4''$, 满足光学设计提出的光轴偏差小于 $10''$ 的技术要求。

参考文献:

- [1] OHMORI H. Electrolytic in-process dressing (ELID) grinding method for ultra-precision mirror surface grinding[J]. *Journal of Japan Society for Precision Engineering*, 1993, 59(9):1451.
- [2] 尹韶辉, 曾宪良, 范玉峰, 等. ELID 镜面磨削加工技术研究进展[J]. *中国机械工程*, 2010, 21(6):750-755.
YIN SH H, ZENG X L, FAN Y F, *et al.*. Research progresses of ELID mirror grinding technology[J]. *China Mechanical Engineering*, 2010, 21(6):750-755. (in Chinese)
- [3] 潘君骅. 光学非球面的设计、加工与检测[M]. 苏州: 苏州大学出版社, 1994.
PAN J H. *The Design, Manufacture and Test of the Aspherical Optical Surfaces* [M]. Suzhou: Soochow University Press, 1994. (in Chinese)
- [4] JONES R A. Optimization of computer controlled polishing [J]. *Applied Optics*, 1977, 16(1):218-224.
- [5] 李洪玉, 张伟, 于国彧. 计算机控制光学表面成形中加权空间反卷积算法研究[J]. *中国光学快报(英文版)*, 2009, 7(7):627-631.
LI H Y, ZHANG W, YU G Y. Study of weighted space deconvolution algorithm in computer controlled optical surfacing formation [J]. *Chinese Optics Letters*, 2009, 7(7):627-631.
- [6] 张峰, 徐领娣, 范镭, 等. 表面改性非球面碳化硅反射镜的加工[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(12):2479-2484.
ZHANG F, XU L D, FAN D, *et al.*. Fabrication of surface modification aspheric SiC mirror [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(12):2479-2484. (in Chinese)
- [7] PROKHOROV I V, KORDONSKY W I, GLEB L K, *et al.*. New high-precision magnetorheological instrument-based method of polishing optics [J]. *OSA OF&T Workshop Digest*, 1992, 24:134-136.
- [8] 石峰, 戴一帆, 彭小强, 等. 磁流变抛光消除磨削亚表面损伤层工艺研究[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(1):162-168.
SHI F, DAI Y F, PENG X Q, *et al.*. Study on the novel process of reducing subsurface damage in grinding by Magnetorheological Finishing [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(1):162-168. (in Chinese)
- [9] ALLEN, L N, HANNON J J, WAMBACH R W. Final surface error correction of an off-axis aspheric petal by ion figuring [J]. *SPIE*, 1992, 1543:190-200.
- [10] 张峰, 张学军, 余景池, 等. 磁流变抛光数学模型的建立[J]. *光学技术*, 2000, 26(2):190-192.
ZHANG F, ZHANG X J, YU J C, *et al.*. Foundation of mathematics model of magnetorheological finishing [J]. *Optical Technique*, 2000, 26(2):190-192.
- [11] 张峰, 张斌智. 磁流体辅助抛光工件表面粗糙度研究[J]. *光学精密工程*, 2005, 13(1):34-39.
ZHANG F, ZHANG B Z. Surface roughness of optical elements fabricated by magnetic fluid-assisted polishing [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(1):34-39. (in Chinese)
- [12] 张峰, 范镭, 李锐钢, 等. 非球面碳化硅反射镜的加工与检测[J]. *应用光学*, 2008, 29(6):1004-1008.
ZHANG F, FAN D, LI R G, *et al.*. Fabrication and testing of aspheric silicon carbide mirror [J]. *Journal of Applied Optics*, 2008, 29(6):1004-1008. (in Chinese)
- [13] 王鹏, 赵文才, 胡明勇, 等. 离轴非球面的 Hindle 检测[J]. *光学精密工程*, 2002, 10(2):139-142.
WANG P, ZHAO W C, HU M Y, *et al.*. Hindle testing of the off-axis convex asphere surface [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2002, 10(2):139-142. (in Chinese)
- [14] BURGE J H, ANDERSON D S. Full-aperture interferometric test of convex secondary mirrors using holographic test plates [J]. *SPIE*, 1994, 2199:181-190.
- [15] 谢意, 陈强, 伍凡, 等. 凹非球面检测的双计算全息图设计及制作[J]. *光电工程*, 2010, 6(35):59-62.
XIE Y, CHEN Q, WU F, *et al.*. Design and fabrication of twin computer-generated holograms for

- testing concave aspherical surfaces [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2010, 6(35): 59-62. (in Chinese)
- [16] LIU Y M, GEORGE N L. Subaperture testing of aspheres with annular zones[J]. *Applied Optics*, 1988, 27(21): 4504-4513.
- [17] 张伟, 王墨, 任智斌, 等. 大口径凸非球面反射镜的拼接检测算法研究[J]. *光学技术*, 2010, 2(36): 182-186.
ZHANG W, WANG Z, REN ZH B, et al.. Stitching arithmetic of the sub-aperture testing of large convex aspheric surface [J]. *Optical Technique*, 2010, 2(36): 182-186. (in Chinese)
- [18] 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.
- WANG X K, ZHENG L G, ZHANG X J. Testing convex aspheres by subaperture stitching interferometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(7): 2022-2026. (in Chinese)
- [19] 陈旭, 刘伟奇, 康玉思, 等. Offner 补偿器的结构设计及装调[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(1): 88-93.
CHEN X, LIU W Q, KANG Y S, et al. Design and tolerance analysis of Offner compensator[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(1): 88-93. (in Chinese)
- [20] 李欢, 向阳. 10°远心离轴三反消像散望远系统的光学设计[J]. *光子学报*, 2009, 38(9): 2256-2260.
LI H, XIANG Y. Design of 10° FOV telecentric off-axis three-mirror anastigmatic telescope [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(9): 2256-2260. (in Chinese)

作者简介:



张 峰(1969—),男,吉林人,博士,研究员,博士生导师,1991年、1997年于长春理工大学分别获得学士、硕士学位,2000年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事光学加工与检测方面的研究,主要研究领域有:非球面先进制造技术、磁流变抛光等。E-mail: zhangfjy@yahoo.com.cn