

## 碳化硅凸非球面反射镜的加工与检测

李俊峰

(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:** 为了满足凸非球面反射镜加工中的全频段质量控制及光学参数的高精度检验, 提出了应用双摆轴极坐标快速非球面加工技术及测杆法控制 Hindle 法检测光学参数。首先, 描述了双摆轴极坐标快速非球面加工技术及设备; 然后, 介绍了应用测杆法控制 Hindle 检测法中标准球面镜顶点分别与被检非球面镜顶点及其焦点的光学间隔, 并对其控制精度进行了分析; 最后, 针对  $\Phi 158\text{mm}$  的凸非球面, 给出了双摆轴加工的检验结果, 并对检测精度进行了分析。实验结果表明: 应用双摆轴加工工艺在使低频误差快速收敛的同时, 可以有效抑制中频误差, 其低频误差的控制精度可以稳定地达到  $\lambda/30$  ( $\lambda = 633\text{ nm}$ ); 应用测杆装调 Hindle 检测光路的控制极限误差为  $\pm 0.065\text{ mm}$ , 两个光学间隔参数的公差分别为  $\pm 0.22\text{ mm}$  和  $\pm 0.30\text{ mm}$ 。应用双摆轴加工技术实现了凸非球面的快速加工与全频段质量控制, 采用 Hindle 检测凸非球面得到面形精度为  $0.022\lambda$  (RMS, @  $633\text{ nm}$ ), 满足光学设计技术指标要求。

**关键词:** 双摆轴; 非球面; Hindle 检测; 测杆

**中图分类号:** TH706 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/CO.20140702.0287

## Fabrication and test of SiC convex aspheric mirror

LI Jun-feng

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

\* Corresponding author, E-mail: ljf220@sohu.com

**Abstract:** In order to satisfy all-frequency error quality controlling and high-precision test during the process of the convex asphere, double laps with polar coordinate polishing technique and the measuring poles method used for the alignment of Hindle test are proposed. Firstly, the double laps with polar coordinate polishing technique for manufacturing the aspheric mirror and the numerical control machine for processing aspheric surface are presented. Then, the measuring poles method used to control the distances between vertex of the standard sphere and the vertex and focus of the tested asphere is introduced, and the controlling precision is analyzed. Finally, for a convex asphere with the aperture of  $\Phi 158\text{ mm}$ , the test results and precision of the Hindle test are described. The results indicate that the double laps polishing technique can make the low-frequency surface error convergence quickly, and the mid-frequency surface error is restrained at the same time. The controlling precision of the low-frequency surface error is about  $\lambda/30$  ( $\lambda = 633\text{ nm}$ ). The limit error using the measuring poles to control the distance is  $\pm 0.065\text{ mm}$ , and the tolerances of the two space parameters are  $\pm 0.22\text{ mm}$  and  $\pm 0.30\text{ mm}$ , respectively. The fast manufacture and all-frequency controlling of the convex

收稿日期: 2013-11-18; 修订日期: 2014-02-15

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目

asphere are realized by the double laps with polar coordinate polishing technique, and the test result of low-frequency surface error is  $0.022\lambda$  (RMS, @633 nm) in the Hindle test, which satisfies the specification requirements of the optical design.

**Key words:** double laps; asphere; Hindle test; measuring pole

## 1 引言

碳化硅(SiC)材料刚度大、密度适中,同样质量的SiC镜面不易变形;且SiC材料的热膨胀系数低、热导率高,由于其优异的机械性能和热物理性能,越来越多的被用作航空、航天相机光学系统中反射镜材料。凸二次非球面反射镜经常被用作两镜系统、三反系统中的次反射镜,例如卡塞格林系统、离轴三反散像系统(TMA)中的凸非球面次反射镜等。然而,凸非球面反射镜的加工、检验一直是非球面领域的一个难点<sup>[1]</sup>。

中等口径凸非球面的加工技术主要包括小工具抛光技术、应力盘抛光技术、气囊抛光、离子束及磁流变抛光技术等,它们都是通过高精度计算机数控机床完成对各种非球面光学元件的加工,但是也存在着设备复杂、成本高等问题<sup>[2-3]</sup>。凸非球面的检测最常用的方法有经典的Hindle检测、透射/反射式自准直检验以及计算全息法等。经典的Hindle检测方法使用高精度大口径球面标准镜进行无像差点法检验,存在被检反射镜中心遮挡的缺陷,辅助标准球面反射镜口径过大导致光学加工、装调比较困难;透射/反射式自准直检验方法能够实现全口径检验,但要求镜面材料具有良好的透过性和均匀性,同时需要一个特定的高精度辅助平面或球面进行自准,或是设计制作补偿器进行背部补偿检验,而对于像SiC等不透明材料则不能够使用该方法;计算全息法检验非球面是现今非球面检验领域的一个热点,但是该方法光路相对复杂,全息图的制作需要昂贵的专业设备,大口径、高精度全息图的制作只被少数国家的一些实验室所掌握,并未广泛应用<sup>[4-9]</sup>。

现有一些光学系统要求对系统快速集成,对光学元件表面误差进行全频段质量控制。因此,提出了应用双摆轴极坐标快速非球面数控加工技术对R-C光学系统中SiC凸次反射镜进行加工。

由于材料的不透明性,在加工过程中采用Hindle检测方法对该凸非球面进行面形检测。本文给出了双摆轴极坐标快速非球面数控加工工艺分析、Hindle检测参数的控制方法及检测误差分析。

## 2 凸非球面反射镜的加工

某卡塞格林光学成像系统中SiC凸非球面反射镜尺寸为 $\Phi 158$  mm,中心曲率半径 $R = 647.58$  mm,二次项系数 $k = -6.2$ ,中心盲区为 $\Phi 48$  mm,面形精度要求为RMS值优于 $\lambda/40$ ( $\lambda = 633$  nm)。最大非球面度为0.026 mm,其非球面度分布曲线如图1所示。

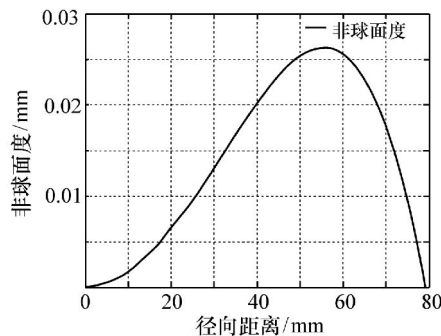


图1 非球面度分布曲线

Fig. 1 Asphericity distribution curves

### 2.1 凸非球面反射镜加工方法

双摆轴极坐标快速非球面加工技术是应对光学系统快速集成及全频段表面质量控制而提出的针对中小口径非球面加工的工艺方法。与传统的单模式加工不同,该技术应用具有不同运动模式的双抛光头在工件的表面同时加工,其中一个抛光头做环带修抛,另一个抛光头带动较大尺寸的抛光盘做各环带之间的光顺作用,使得各环带之间更为平滑,这样的加工模式可以有效抑制加工中产生的中频误差,特别是对于大非球面度梯度的非球面,并且可以缩短加工周期。本文正是采用这种技术对凸非球面反射镜进行加工。

## 2.2 非球面加工设备简介

为了实现对中等口径非球面的加工,本课题组自行研制了双摆轴极坐标快速非球面数控加工机床,可以完成  $\Phi 400$  mm 以内光学元件的加工,图2为机床结构原理图。

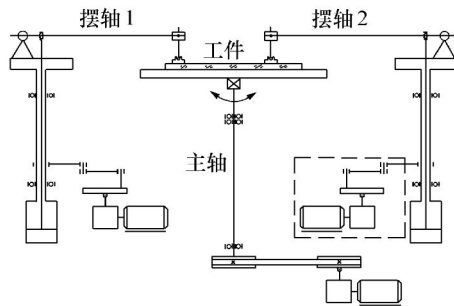


图2 机床结构图

Fig. 2 Configuration of the machine

该机床主要由工作台和两个摆轴机构组成。主轴采用数控系统控制,伺服电机驱动,可通过编程方式实现定角度的往复摆动或者单方向连续转动两种运动模式,以满足不同的加工工艺需要;两摆轴采用曲柄摆杆结构带动抛光盘实现摆臂的往复摆动,抛光盘压力采用气动加压方式。该机床可实现同轴光学元件的修带加工,也可以通过将主轴带动被加工非球面的往复摆动配合两工位抛光盘的小摆幅摆动来实现局部误差的修正。该机床应用两个具有极坐标系的加工工具以不同的运动模式和路径在工件的不同的工位并行工作,这种双工位加工机床结构简单、经济实用,加工工艺灵活,效率高。

## 2.3 凸非球面反射镜加工工艺

对于这种同轴非球面的加工,由于各个环带上的曲率半径不同,特别是对于非球面度梯度比较大的非球面,在加工中最容易出现的面形误差就是环带误差和局部非对称性误差。

在对同轴非球面进行修带抛光时,容易出现环带状低频误差,其产生的主要原因是实际的误差形态与抛光盘的理论的材料去除特性不能够完全吻合,这样容易使得抛光盘在所要去掉的环带的中心或者边缘材料去除量与理论的计算量存在偏差,表面出现更高空间频率的细带,该种误差产生的图形解释如图3所示。然而,这种更高空

间频率表面误差对高分辨率成像系统或能量系统都是有害的。

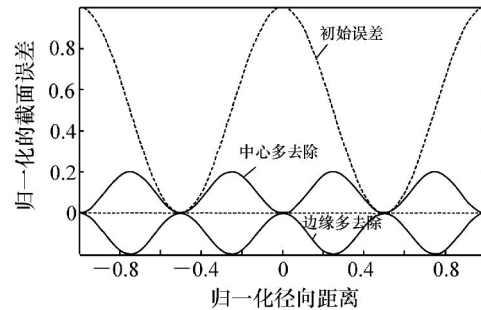


图3 截面误差曲线

Fig. 3 Profile errors curves

为了抑制更高空间频率表面误差的产生,双摆轴极坐标数控加工技术应用与环带误差宽度相匹配的抛光盘修带的同时,利用一个更大尺寸的抛光盘在被加工反射镜表面做径向的往复运动,这种大、小抛光盘结合组合加工技术在使低频误差收敛的同时,抑制了中频误差的产生。

由于非球面加工中,存在装卡误差、装卡应力等因素,容易出现局部非对称性误差。由于误差的非回转对称性,误差分布基本上还在一个环带区域上,对局部误差的处理时工件定角度往复摆动,抛光盘沿误差带的径向方向往复摆动,并采用大、小抛光盘串联加工的方式对误差进行修正。抛光盘的运动路径、摆幅、尺寸等参数视误差形态的分布而定。

## 3 凸非球面反射镜的检测

### 3.1 检测原理

对于凸二次双曲面 Hindle 检测,使用一个辅助标准球面镜,令其曲率中心与虚焦点重合,如图4所示,则在其实焦点就可以得到星点的自准直像。同时应注意到,球面镜的中心孔尺寸导致被检凸双曲面出现一定范围的中心遮拦区域,像卡塞格林系统中的次反射镜就存在中心盲区。在设计辅助球面镜时,希望焦点引出到辅助球面镜的背后以使检测方便,并考虑检测中的中心遮拦区域要小于次反射镜的中心盲区的原则进行设计。

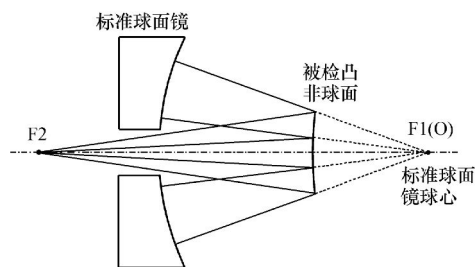


图4 Hindle 检测光路

Fig.4 Schematic of Hindle test

### 3.2 检测参数的控制

在Hindle检测中,为确保凸双曲面的顶点曲率半径  $R$  及二次项系数  $k$  的误差在设计的公差范围内,需要控制辅助球面镜顶点到非球面的实焦点和顶点的距离  $L_1$  和  $L_2$ ,如图5所示。在这里,

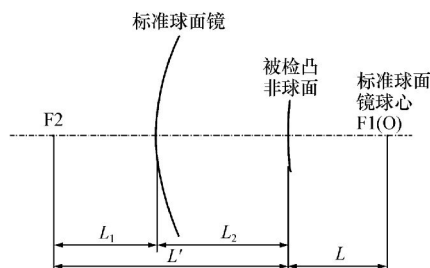


图5 Hindle 检测参数

Fig.5 Parameters of Hindle test

设计了应用测杆的方法对以上两个参数进行控制<sup>[10]</sup>。通过非球面的参数,计算可以得到:

$$\begin{cases} L = \frac{R}{\sqrt{k+1}} \\ L' = \frac{R}{\sqrt{k-1}} \end{cases}, \quad (1)$$

$$\begin{cases} L_1 = L' + L - R \\ L_2 = R - L \end{cases}. \quad (2)$$

在应用测杆方法对检测参数进行控制中,由于辅助球面的顶点为虚顶点而无法测量,则选择设计了与辅助球面的中心孔相吻合的顶盘把球面的顶点引出,如图6所示。顶盘的尺寸为已知数值,通过设计的参数数据就可以算出理想的一组光学间隔数据,即测杆1和测杆2的理想长度。根据计算的测杆数据来制作测杆,从而对检测光

路中的参数进行控制,制作的测杆及顶盘实物图如图7所示。

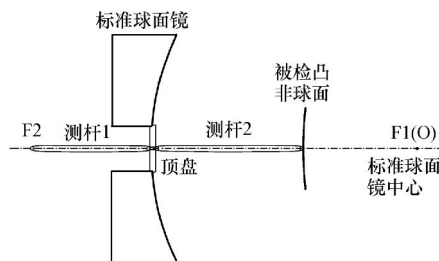


图6 测杆法控制参数

Fig.6 Controlling parameters of measuring poles method



图7 测杆与顶盘

Fig.7 Measuring poles and the lap

### 3.3 测杆法误差分析

应用测杆法控制间隔参数时存在着一定的测量误差,若检测光轴与辅助球面的几何轴不重合时,此时测杆测定的间隔与实际的间隔存在着测量误差,如图8所示。以  $O$  点为坐标原点,理论

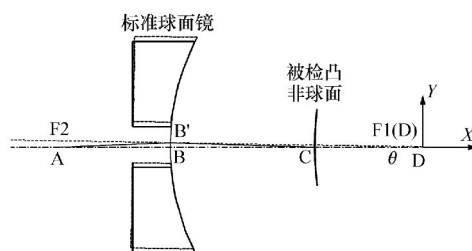


图8 光路调整误差

Fig.8 Alignment error of Hindle test

光轴方向为  $X$  轴方向,垂直光轴为  $Y$  方向建立直角坐标系,设检测光轴与辅助球面的几何轴之间的角度偏差为  $\theta$ ,检测时控制的间隔距离为  $L_{AB'}$  =  $L_{MB1}$  和  $L_{B'C}$  =  $L_{MB2}$  ( $L_{MB1}$ ,  $L_{MB2}$  分别为测杆1、2的长

度),而实际的距离则为  $L_{AB}$  和  $L_{BC}, L_{CD}$  长度已知,  $L_{BD} = L_{B'D}$ , 则有检测光路调整误差:

$$\begin{cases} \sigma_{L_1} = L_{AB'} - L_{AB} \\ \sigma_{L_2} = L_{B'C} - L_{BC} \end{cases}, \quad (3)$$

又有

$$\begin{cases} L_{AB'}^2 = L_{AD}^2 + L_{B'D}^2 - 2 \times L_{AD} \times L_{B'D} \times \cos\theta \\ L_{B'C}^2 = L_{CD}^2 + L_{B'D}^2 - 2 \times L_{CD} \times L_{B'D} \times \cos\theta \end{cases}. \quad (4)$$

通过式(4)可以计算出  $A, B$  点坐标,从而计算出  $L_{AB}$  和  $L_{BC}$ , 带入式(3)中可以计算出光路的调整误差  $\sigma_{L_1}$  和  $\sigma_{L_2}$ 。

## 4 凸非球面的检测结果分析

### 4.1 检测误差分析

在应用测杆法控制非球面参数时存在测量误差,其误差包括 3 个部分:测杆的制作误差  $\sigma_1 = \pm 0.005 \text{ mm}$ ;检测光路的调整误差,检测光路的光轴与标准球面镜的几何轴之间的偏轴误差约为  $30'$ ,转化到光轴上的直线偏差  $\sigma_2 = \pm 0.05 \text{ mm}$ ;检测人员的操作误差  $\sigma_3 = \pm 0.01 \text{ mm}$ 。

在整个检测光路中的极限测量误差为  $\sigma = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = \pm 0.065 \text{ mm}$ 。该次镜检测中两个间距参数的公差分别为  $\pm 0.22 \text{ mm}$  和  $\pm 0.30 \text{ mm}$ ,因此,应用测杆方法控制非球面参数的精度满足参数设计公差要求,为该凸双曲面的加工提供了可靠的保障。

### 4.2 检测结果

应用双摆轴快速非球面数控加工工艺对该凸非球面加工能够达到的精度约为  $\lambda/30$  ( $\lambda = 633\text{nm}$ ),图 9 为应用该技术能够达到的阶段性检测结果,然后通过手工修抛的方式完成非球面的加工。从检测得到的误差分布图及 PSD 结果可以看出:应用双摆轴加工技术可以得到比较光滑的光学表面,且对中频误差有较好的控制作用。

应用 Hindle 法对凸双曲面次镜进行检测,检测实际光路图如图 10 所示。最终的面形精度达到  $0.022\lambda$  ( $\lambda = 633 \text{ nm}$ ),如图 11 所示,满足设计要求。

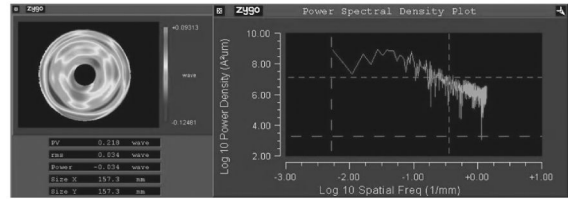


图 9 双摆轴加工的面形检测结果

Fig. 9 Test result of surface shape obtained by double laps technique

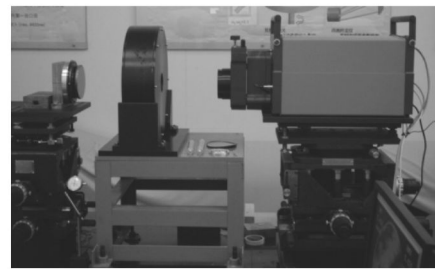


图 10 实际 Hindle 检测光路

Fig. 10 Actual Hindle test for the convex aspheric mirror

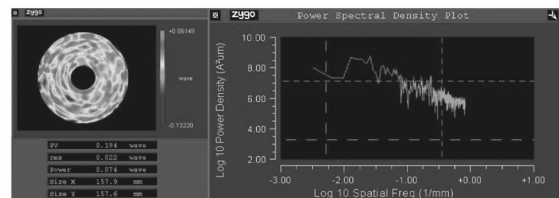


图 11 面形检测结果

Fig. 11 Surface shape test result by Hindle test

## 5 结 论

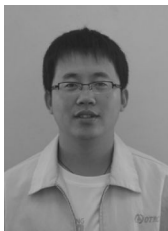
本文介绍了凸二次曲面双摆轴极坐标快速非球面数控加工技术,由于被加工 SiC 材料的不透明性,选择 Hindle 自准直检验法对非球面进行检测。分析了双摆轴极坐标快速非球面数控加工处理典型的环带误差和非对称性局部误差工艺,应用该技术加工中小口径的凸非球面,其精度可以稳定地达到  $\lambda/30$  ( $\lambda = 633 \text{ nm}$ ) 左右。凸非球面加工完成后,应用 Hindle 自准直法检测得到的面形精度为  $0.022\lambda$  (RMS, @ 633 nm),满足光学设

计提出的面形精度 RMS 值优于  $\lambda/40$  ( $\lambda = 633 \text{ nm}$ ) 的要求;应用测杆法对 Hindle 法检测光路进行装调,测杆法定位的极限误差为  $\pm 0.065 \text{ mm}$ ,检测光路中设计的检测误差分别为  $\pm 0.22 \text{ mm}$  和  $\pm 0.30 \text{ mm}$ ,测杆方法控制 Hindle 检测中的参数切实可行,且其检测精度满足公差设计要求。

#### 参考文献:

- [1] 张景旭. 地基大口径望远镜系统结构技术综述[J]. 中国光学, 2012, 5(4): 327-336.  
ZHANG J X. Overview of structure technologies of large aperture ground-based telescopes[J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(4): 327-336. (in Chinese)
- [2] 张峰. 高精度离轴凸非球面的加工与检测[J]. 光学精密工程, 2010, 18(12): 2557-2563.  
ZHANG F. Fabrication and testing of precise off-axis convex aspheric mirror[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(12): 2557-2563. (in Chinese)
- [3] 薛栋林, 张忠玉, 郑立功, 等. 大口径碳化硅材料凸非球面反射镜的检验[J]. 光学精密工程, 2008, 16(12): 2491-2496.  
XUE D L, ZHANG ZH Y, ZHENG L G, et al.. Testing methods for large aperture convex SiC asphere mirror[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(12): 2491-2496. (in Chinese)
- [4] 王孝坤. 大口径凸非球面反射镜子孔径拼接检测[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(3): 716-722.  
WANG X K. Test on large convex aspherical mirror by subaperture stitching interferometry[J]. *Infrared and Laser Eng.*, 2013, 42(3): 716-722. (in Chinese)
- [5] 王孝坤. 非零位检测凸非球面反射镜的研究[J]. 应用光学, 2012, 33(1): 124-128.  
WANG X K. Measurement of convex aspheric mirror by non-null testing[J]. *J. Appl. Optics*, 2012, 33(1): 124-128. (in Chinese)
- [6] 马杰, 朱政. 改进的 Hindle 方法检测凸非球面的研究[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(2): 277-281.  
MA J, ZHU ZH. Testing convex aspherical surfaces with optimized modified Hindle arrangement[J]. *Infrared and Laser Eng.*, 2011, 40(2): 277-281. (in Chinese)
- [7] 李洋, 李新南. 极大口径光学望远镜凸非球面副镜的补偿检测法研究[J]. 应用光学, 2012, 33(3): 564-569.  
LI Y, LI X N. Null compensator for convex secondary asphere of very large optical telescope[J]. *J. Appl. Optics*, 2012, 33(3): 564-569. (in Chinese)
- [8] 王孝坤. 子孔径拼接检测非球面时调整误差的补偿[J]. 中国光学, 2013, 6(1): 88-95.  
WANG X K. Compensation of misalignment error on testing aspheric surface by subaperture stitching interferometry[J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(1): 88-95. (in Chinese)
- [9] 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.  
SHEN ZH X, HAO P M, ZHAO W C, et al.. Autocollimating testing of convex conic aspheric surface[J]. *Infrared and Laser Eng.*, 2005, 34(1): 46-50. (in Chinese)
- [10] XUAN B, CHEN X P, WANG P, et al.. Alignment of off-axis asphere and compensator with four poles[J]. *SPIE*, 2009, 7283: 7283A.

#### 作者简介:



李俊峰(1980—),男,吉林长春人,博士,副研究员,主要从事大口径非球面的加工与检测技术方面的研究。E-mail: ljf220@sohu.com