异形口径离轴非球面光学加工与测试技术

王孝坤

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

摘 要: 针对离轴非球面制造的难点，研究分析了碳化硅非球面尤其是异形离轴非球面加工和检测的各项关键技术。首先利用加工中心 DMG 对离轴非球面进行了铣磨和表面成形,然后运用实验室自行研制的非球面加工中心 FSGJ-2 对离轴非球面进行了研磨和抛光，最后利用离子束对其进行了精抛光，并分别利用三坐标测量仪和激光跟踪仪对非球面进行面形轮廓测定和光学参数及几何量的精确控制。结合工程实践对一口径为 600 mm×270 mm 的类八角形离轴碳化硅非球面反射镜进行了超精加工与检测,并专门设计研制了光学补偿检测装置,对其进行了零位补偿干涉测量,其最终面形 PV 值为 0.219λ,RMS 值为 0.018λ。

关键词: 光学加工； 光学检测； 计算机控制光学表面成形； 异形口径； 离轴非球面

中图分类号: TQ171.65;O436.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)09-2959-05

Fabrication and testing of an off-axis aspheric surface with abnormal shape

Wang Xiaokun

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

Abstract: In order to overcome the difficulty of manufacturing off-axis aspheric surface, the key technologies of fabricating and testing SiC aspheric mirror especially for off-axis asphere with abnormal shape were studied. The off-axis SiC aspheric surface was grinded and polished by DMG, FSGJ-2 numerical control machine and IBF, the contour and optical parameters were measured and controlled by the coordinate measuring machine and laser tracker. Finally, an example for fabricating and measuring a similar eight-square off-axis aspheric mirror with the aperture of 600 mm×270 mm was given. For the purpose of testing the aspheric mirror by interferometry, a null lens compensator was specifically designed and developed. As results, the peak-to-valley (PV) and root mean square (RMS) values of the surface error are 0.219 and 0.018 (is 632.8 nm), respectively.

Key words: optical fabrication; optical testing; CCOS; abnormal shape; off-axis asphere

收稿日期: 2014-01-08； **修订日期:** 2014-02-12

基金项目: 国家 863 计划(O8663NJ090)；国家 973 计划(2011CB0132005)；国家自然科学基金重点项目(61036015)

作者简介: 王孝坤(1980-),男,副研究员,硕士生导师,博士,主要从事光学超精加工和检测技术方面的研究。Email:jimwxk@sohu.com

0 引 言

在空间光学领域，由于离轴三反消像散系统(TMA)具有组较少、长焦距、大视场、调制传递函数高、宽波段、抑制杂光能力强等优异特性，使得该光学系统在空间遥感中得到了广泛应用[1-4]。

TMA 光学系统一般由主镜、次镜、第三镜及平面调焦镜等组成，作为该系统核心部件的主镜和第三镜一般为离轴非球面元件，为了便于加工和装调其外形尺寸一般为圆形、圆角矩形和体育场形等规则形状，但有时为了减轻光学系统的整体重量、避免遮光、避免镜体与机械结构相互干涉等原因，离轴非球面外形轮廓可能为非规则形态(称之为异形)。

相对平面、球面和同轴非球面元件，离轴非球面尤其是异形大口径离轴非球面在加工和检测上（如加工轨迹的生成及优化、面形的准确测量、几何量的测定和精确控制等）存在着诸多困难[5-7]，文中针对上述难点并结合工程实际，对一口径为 600 mm×270 mm 的类八角形离轴非球面进行了加工和检验，最终面形精度优于 1/50λ(λ=632.8 nm)，满足了设计要求。

1 离轴非球面精密加工与检测技术

大口径离轴非球面加工与检测流程如图 1 所示，其主要分为 3 个过程。

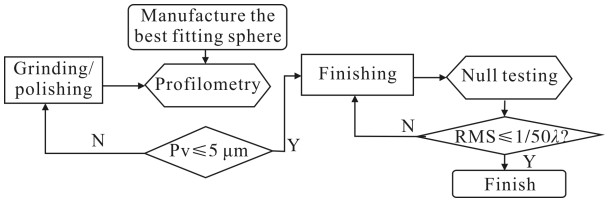


图 1 离轴非球面制造流程图

Fig.1 Flow chart of manufacturing aspheric surfaces

(1) 铣磨加工

首先，需要对大口径非球面进行最接近球面和铣磨成形加工，在精密成型阶段将采用数控加工中心 DMG 利用超声技术铣磨。铣磨后的表面属于机械加工表面，加工后使用高精度轮廓测量仪对表面进行接触式测量，该方法通过测量非球面表面相对某一测量基准的绝对矢高，然后通过计算机软件与理论值相比较，获得绝对矢高相对于理论矢高的偏差，通过计算机软件进行误差分析、数据拟合等计算可以获得非球面面形误差分布，其检测结果用于修正数控加工模型。

(2) 研磨和粗抛光

其次，利用实验室自行研制的非球面数控光学加工中心 FSGJ-2 采用 CCOS (computer controlled optical surfacing) 技术对非球面进行研磨和粗抛光[8-9]，CCOS 技术是根据定量的面形测量结果，在加工过程控制模型的基础上，用计算机控制尺寸相对较小的磨头对光学零件进行研磨或抛光，通过控制磨头在工件表面的驻留时间及磨头与工件间的相对压力来控制材料的去除量，按照一定的加工轨迹对光学表面进行加工，经多次迭代直到满足精度要求。

CCOS 控制模型是建立在 Preston 假说的基础上，Preston 在符合实际的前提下，对抛光过程做了一定的假设，即：在很大的数值范围内，抛光可以描述成一个线性方程，为公式(1)：

$$\Delta Z(x,y)=kP(x,y)V(x,y) \tag{1}$$

式中：$Z(x,y)$为抛光盘驻留某点(x,y)单位时间内的材料去除量；$P(x,y)$为抛光盘与工件间的相对压力；$V(x,y)$为抛光盘与工件间的相对运动速度；k 为与加工过程有关的比例常数(温度、磨头材料等)。

令磨头的去除函数(工作函数)是单位工作时间内工件和磨头相互作用区域内平均去除量的分布函数，用 $R(x,y)$表示，则：

$$R(x,y)=\frac{1}{T}\int_0^T \Delta Z(x,y)\mathrm{d}t=\frac{1}{T}\int_0^T kP(x,y)V(x,y)\mathrm{d}t \tag{2}$$

式中：T 为加工周期。假定 $D(x,y)$为磨头的驻留时间函数，它表示磨头中心在点(x,y)处的停留时间，如果磨头在工件表面上移动并且在表面各区域停留相应的时间，然后将每一区域材料的去除量进行叠加即可求解得到整个工件表面的材料去除量的分布函数 $E(x,y)$，即为公式(3)：

$$E(x,y)=\iint_{\text{path}} R(x,y)\cdot D(x-\xi)(y-\eta)\mathrm{d}\xi\mathrm{d}\eta \tag{3}$$

公式(3)表明在 CCOS 加工过程中，材料的去除量等于工作函数 $R(x,y)$与其驻留时间函数 $D(x,y)$沿其运动路径的卷积。$R(x,y)$与磨头的尺寸、材料、相对压力及速度等因素有关，可以通过计算机模拟及工艺实验求得，$E(x,y)$是面形误差分布函数，可以通过

检测测定。利用卷积迭代法通过反卷积运算求解得到磨头的驻留时间函数 $D(x,y)$,并在此基础上生成加工控制文件即可指导 CCOS 加工。

FSGJ-2 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,其可以加工口径为 1.8 m×1.2 m 以内的同轴、离轴非球面,设计加工精度为 1/50λ,粗糙度优于 2 nm[10-11]。图 2 为 FSGJ-2 非球面数控加工中心大口径离轴非球面反射镜的实物图，其主体采用龙门式结构,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,为了得到更好的去除函数模型，磨头采用平转动运动方式。为了满足不同的加工要求,FSGJ-2 采用了 6 自由度联动数控系统,并集成轮廓测量系统,实现了在线面形轮廓检测。

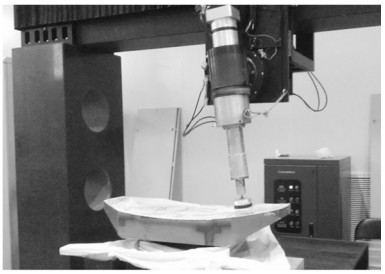


图 2 FSGJ-2 非球面数控加工中心加工离轴非球面装置图

Fig.2 Computer controlled machine(FSGJ-2) for manufacturing off-axis aspheric surface

由于加工的镜体为碳化硅材料,其硬度特别大,为此选用不同粒度的人造金刚石微粉对其进行研磨和粗抛光，利用 FSGJ-2 轮廓测试系统或三坐标测量仪对其表面进行面形轮廓检测，直至面形峰谷值小于 5 μm。然后,利用计算机控制沥青盘采用粒度为 1.5~3.5 μm 的金刚石微粉对非球面进行抛光加工，并利用零位补偿技术对其面形进行光学干涉检测[12-13],直至其面形的均方根值(Root Means Square, RMS)小于 1/20λ。在零位补偿干涉检验阶段,将利用 Faro 激光跟踪仪进行镜体光学几何参数的测试和控制。

(3) 精抛光

当非球面面形 RMS 值优于 1/20λ 时,利用离子束抛光技术对其进行精抛光，该技术是在真空状态下,由离子束对光学表面特定区域进行轰击,通过控制驻留时间实现工件材料分子级去除，最终完成超高精度的非球面光学表面面形加工[14-15]。

3 加工检测实验

结合工程实例对一口径为 600 mm×270 mm 的离轴碳化硅非球面进行了超精加工与检测，该非球面为离轴椭球面,其中二次曲面常数为-0.31,离轴量为 75.8 mm,顶点曲率半径为 1 225.8 mm。非球面外形示意图和实物图如图 3 所示，其外形轮廓近似为八角形,但是其长轴方向镜体边缘不是平面,而是柱面,此外为了便于加工与检测的定位,在两侧柱面上加工了基准平面。

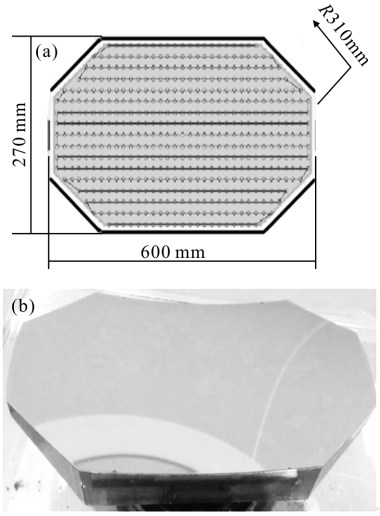
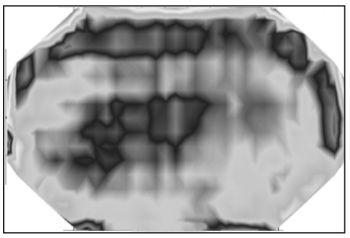


图 3 异形非球面外形轮廓图和实物图

Fig.3 Sketch and picture of off-axis aspheric surface with abnormal shape

首先利用加工中心 DMG 和 FSGJ-2 对该非球面元件进行了数控铣磨和研磨,利用 FSGJ-2 高精度轮廓检测系统和三坐标测量仪对其表面进行接触式测量，由于其外形轮廓为异形，为了精确加工和测试,设计并优化了加工和轮廓检测轨迹,轨迹分布如图 3 中所示,当其面形峰谷值小于 5 μm 后,对其表面进行抛光,粗抛光后三坐标面形检测结果如图 4(a)所示,设计并制作了光学补偿器件,对其进行零位补偿干涉检测，得到粗抛光后第一次干涉检测结果如图 4(b)所示,由于面形误差还是较大(见图 4(b1)),局部条纹很密,干涉面形数据有缺失(见图 4(b2)),尤其在镜体边缘最为明显，所以干涉检测结果数值相对

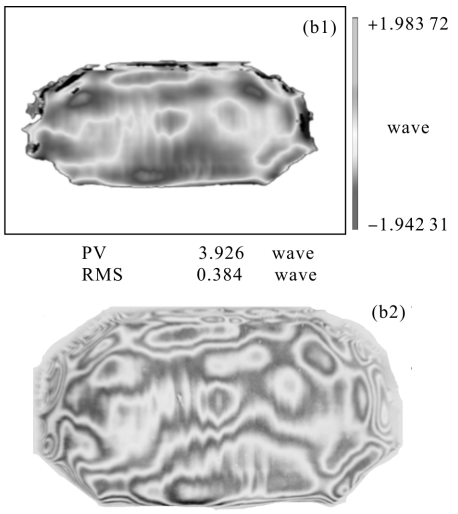
较小,但与轮廓检测面形误差分布基本是一致的。



PV:5.23 wave RMS:0.572 wave

(a) 三坐标测量结果

(a) Testing result by coordinate measuring machine



(b) 干涉检测结果

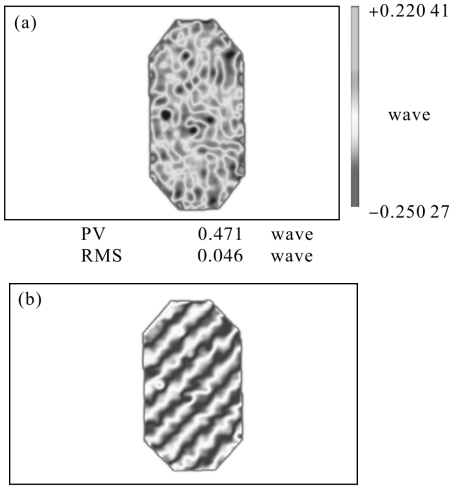
(b) Testing results by interferometry

图 4 非球面面形三坐标测量和干涉检测结果

Fig.4 Figure error testing by coordinate measuring machine and interferometer

依据检测结果，对非球面进行了多个周期的加工,直至全口径面形误差 RMS 值优于 1/20λ,其面形检测结果如图 5 所示，其间其面形一直利用零位补偿干涉测量,使用 Faro 激光跟踪仪测试和监控非球面几何参数(如光学间隔、离轴量、偏心量等),检测装置如图 6 所示，激光跟踪仪测量几何量的方法属于间接测量法，首先在三维测量软件中构建测试模型,然后对补偿元件上的特征点进行测量,再测试非球面镜上的特征点和镜面上若干点，在模型中解算获得顶点曲率半径、离轴量和偏心量等。

当非球面面形 RMS 值优于 1/20λ 时,利用离子束对其进行了两个周期的超精密加工，得到最终的面形检测结果如图 7 所示,其面形 PV 值为 0.219 λ,RMS 值为 0.018 λ,满足了设计要求。



Synthetic fringe map

图 5 超精抛光前非球面面形图和干涉图

Fig.5 Phase map and interferogram before super-precision polishing

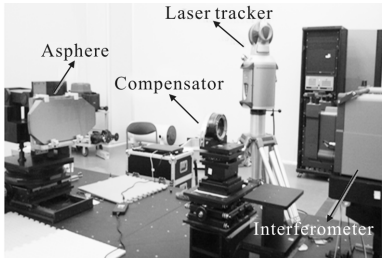


图 6 干涉补偿检测离轴非球面设备装置图

Fig.6 Setup of testing off-axis asphere by null compensation

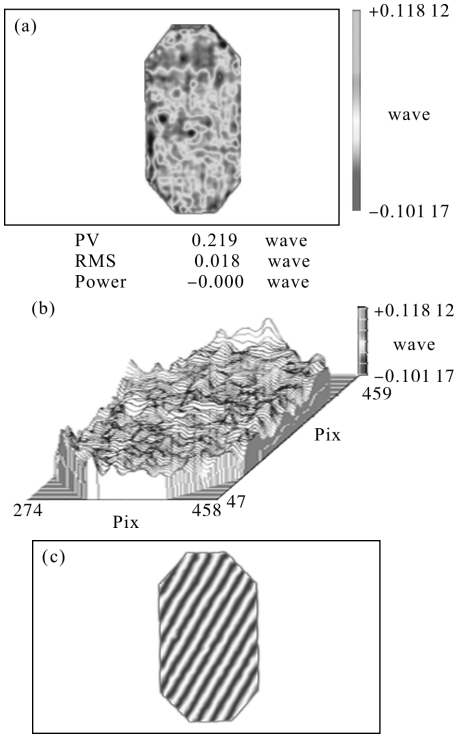


图 7 最终检测非球面面形图和干涉图

Fig.7 Phase map and interferogram of final testing

4 结 论

文中研究分析了离轴非球面制造的各项关键技术,规划了大口径离轴非球面加工和检测的步骤和流程。利用实验室自行研制的非球面数控光学加工中心 FSGJ-2 采用 CCOS 技术对离轴非球面进行了研磨和抛光,并设计研制了光学补偿器件对其进行了零位补偿干涉检验。结合工程实例,分别利用 DMG、FSGJ-2 和离子束加工中心对一口径为 600 mm×270 mm 的类八角形离轴碳化硅非球面进行了铣磨、研磨和抛光,并融合了轮廓测量仪、三坐标测量仪和补偿干涉检测等多种测试方法对其面形进行准确检验,加工最终全口径面形 RMS 值优于 1/50λ,满足了设计要求。

参考文献:

[1] Malacara D. Optical Shop Testing [M]. New York: J Wiley & Sons, 1992.

[2] Roger B Huxford. Wide FOV head mounted display using hybrid optics[C]//SPIE, 2004, 5249: 230-237.

[3] Burge J H, Benjamin S, Caywood D. Fabrication and testing of 1.4-m convex off-axis aspheric optical surfaces [C]// SPIE, 2009, 7426: 692-697.

[4] Zhang Xuejun. Manufacturing of a three mirror anastigmat telescope[C]//SPIE, 2003, 4829: 884-885.

[5] Chang Jun, Wang Yongtian, Zhang Tingcheng, et al. All reflective zoom systems for infrared optics [C]//SPIE, 2006, 6342: 63421Q-1-63421Q-9.

[6] Burge J H, Kot L B, Martin H M. Design and analysis for interferometric measurements of the GMT primary mirror segments[C]//SPIE, 2006, 6273: 361-367.

[7] Robichaud J, Schwartz J, Landry D, et al. Recent advances in reaction bonded silicon carbide optics and optical systems [C]//SPIE, 2005, 5868(2): 1-7.

[8] Jones R A. Computer simulation of smoothing during computer-controlled optical polishing [J]. ***Applied Optics***, 1995, 34(7): 1162-1169.

[9] Wang Yi, Ni Ying, Yu Jingchi. Study on computer controlled polishing machine with small air bag tool [C]//SPIE, 2007, 6722: 67224O1-67224O7.

[10] Zhang Feng. Fabrication and testing of precise off-axis convex aspheric mirror [J]. ***Optics and Precision Engineering***, 2010, 18(12): 2557-2563. (in Chinese)
张峰. 高精度离轴凸非球面反射镜的加工及检测[J]. 光学精密工程, 2010, 18(12): 2557-2563.

[11] Zhang Xuejun, Zhang Zhongyu, Li Zhilai. Manufacturing and testing of 1-m class SiC aspherical mirror [C]//SPIE, 2007, 6721: 672109-1-672109-5.

[12] Guo Peiji, Yu Jingchi. Design and certification of a null corrector to test hyperboloid convex mirror [C]//SPIE, 2006; 6150: 259-263.

[13] Xue Donglin, Zheng Ligong, Zhang Xuejun. Analysis of alignment error in asphere testing using a corrector[C]//SPIE, 2005, 5638: 752-757.

[14] Kathy W Hylton. Ion beam milling of silicon carbide optical components [C]//SPIE, 1994, 1994: 16 -27.

[15] Geyl Roland, Rinchet Andre, Rolland Emmanuel. Large optics ion figuring[C]//SPIE, 1999, 3739: 161-166.