三角机加工大口径离轴抛物面技术

张 鑫[1,2],罗 霄[1,2],闫力松[3],张 峰[1,2],张学军[1,2]

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033;
2. 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;
3. 中国航天科工集团第九总体设计部,湖北 武汉 430000)

摘 要:为了实现大口径非球面镜的加工,设计制作了三角机加工中心,该加工中心具有三工位设计。基于该加工中心提出了一套非球面镜加工模型,每个工位只需利用两个转动轴即可实现大口径非球面镜的遍历加工,同时加工工位与检测工位可以互换,节约成本的同时提升加工效率。为了验证加工模型的可行性,结合工程实例,利用该加工中心对一口径为1 450 mm 的离轴抛物面 SiC 反射镜进行了加工,实验结果表明,经过一轮迭代加工后,反射镜面形结果由 PV 4.653 μm、RMS 0.409 7 μm 收敛到 PV 3.585 μm、RMS 0.258 1 μm,RMS 收敛达 37%。验证了模型的精度及可行性。

关键词:大口径; 离轴非球面; 光学加工; 加工中心
中图分类号:O439 **文献标志码**:A **DOI**:10.3788/IRLA201645.0819001

Technology of large aperture off-axis parabolic mirror with tri-station processing center

Zhang Xin[1,2], Luo Xiao[1,2], Yan Lisong[3], Zhang Feng[1,2], Zhang Xuejun[1,2]

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
3. The 9th Overall Design Department, China Aerospace Science Industry Corporation, Wuhan 430000, China)

Abstract: To accomplish the processing to aspherical mirror with large aperture, the tri-station processing center was designed which has three work stations. Based on the processing center, an aspherical processing model was established. With two rotating axes, it could be used to accomplish the full aperture processing. To verify the practicability of the model, with actual project, the processing to a Φ1 450 mm off-axis parabolic mirror was finished. The result shows that after a cycle of processing, the map of the mirror restraint from PV 4.653 μm, RMS 0.409 7 μm to PV 3.585 μm, RMS 0.258 1 μm. The converging rate of RMS is 37%, which verifies the accuracy and practicability of the model.

Key words: large aperture; off-axis asphere; optical processing; processing center

收稿日期:2015-12-05; **修订日期**:2016-01-08
基金项目:国家 973 计划(2011CB013205)
作者简介:张鑫(1988-),助理研究员,博士,主要从事光学加工方面的研究。Email:zhangxin7013@sina.com

0 引 言

随着光学系统口径逐渐增大,分辨率逐渐提高,对大口径光学元件的需求越来越紧迫。世界范围内,有单镜口径 8.4 m 的 GMT[1]、接替哈勃望远镜工作的 JWST、30 m 望远镜 TMT、以及欧洲极大望远系统 EELT 等[2-5]。相比于小口径光学元件,此类需求对大口径光学元件的低成本、高效制造提出了一系列挑战。

对于大口径光学反射镜加工,传统的加工设备有分离器、单轴机等[6]。从 R.A.Jones 最早提出计算机控制光学加工技术至今,CCOS (Computer control optical surfacing processed)技术已经广泛应用于大口径光学元件加工中[7-10]。而作为 CCOS 技术载体的光学加工中心,主要以 *XYZ* 坐标系配合两旋转轴的龙门式物理结构为主,通过三至五轴进给实现平面、离轴非球面反射镜遍历加工,比较有代表性的如亚利桑那大学的 Giant Magellan Telescope(GMT),中国科学院光电技术研究所的 CCOS 抛光试验机,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所的 FSGJ 系列光学加工中心,以及使用六轴机械手实现光学加工的卡尔蔡司公司[11-15]。

然而在实际加工中,为了提高工程可靠性,期望在提高加工中心工位数量的同时减少进给轴数量,节约成本。

文中设计并制造了三角机加工中心,该加工中心具有三工位设计,最多承载十轴联动,每个工位基于两个转动轴实现了加工镜面的全口径遍历加工,工程上实现了对口径为 1 450 mm 离轴抛物面镜的全口径加工。

1 三角机加工中心工作原理

1.1 三角机工作数学模型

光学加工中心原理模型如图 1 所示。其主要由三部分组成,即加工臂(包括主加工臂及附加工臂)、主转台及测量臂。

对于主加工臂,由 *U* 轴、可伸缩悬臂、主轴构成;辅助臂部分提供多种接口,可以复制主加工臂自由度,为组合加工[16]提供硬件基础,同时也支持拥有独立完整自由度的机械手进行多加工中心级联加工。对于测量臂,配备已经成熟应用的高速、高精度在位摆臂轮廓测量仪。

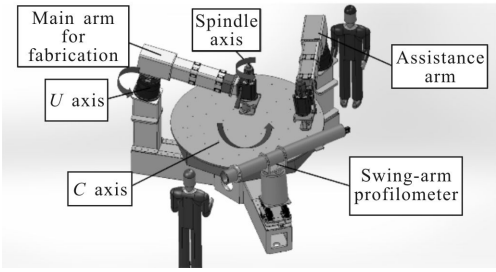

图 1 三角机光学加工中心工作示意图

Fig.1 Performance of tri-station processing center

在加工前,首先根据反射镜参数进行加工参数规划。

以主加工臂结合主转台工作为例,若进行组合加工时,辅助加工臂同主加工臂拥有相同自由度,原理同主加工臂加工原理。

对于镜面上任意一点,其在主转台极坐标系内可表示为:

$$\begin{cases} x=\rho_{\text{actual}}\times\cos\theta \\ y=\rho_{\text{actual}}\times\sin\theta \end{cases} \tag{1}$$

式中:(x,y)为主转台直角坐标系内坐标;ρ_{actual}、θ 为对应极坐标系内极径与极角。

在加工中心实际系统工作中,主加工臂位于转台中心,镜面已和主转台 *C* 对心,主轴的中线垂直于镜面中心。如图 2 所示,当 *U* 轴的延长线与镜面中

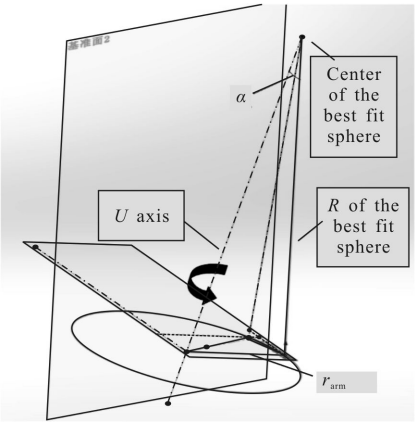

图 2 主加工臂工作示意图

Fig.2 Performance of main arm

心法线即主轴中线交于镜面最接近球心处时,根据直角三角形定理,*U* 轴转动过程中,即可保证加工臂

的末端点始终在镜面的最接近球面上运动,即

$$r_{arm}=R*\sin\alpha \tag{2}$$

式中:r_{arm} 为加工臂虚拟臂长;R 为反射镜最接近球面半径;α 为设计加工角度,臂长和反射镜最接近球半径的交点即为反射镜最接近球面上的点。为更清晰地表达各坐标系间的变换关系,给出图 2 的局部放大图,如图 3 所示。

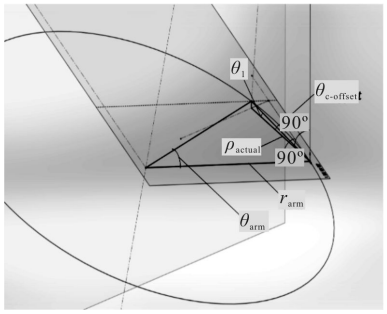

图 3 局部放大视图

Fig.3 Partial enlarged view

加工臂在运动过程中,为了保证始终与镜面最接近球面相交的运动轨迹,会产生一个主转台 C 运动方向的偏置 $\theta_{c-offset}$,这个偏置只与加工臂运动相关,结合图 2,图中角度 $\theta_1=\arcsin(\rho_{actual}/R)$,根据图中标注的角度关系,可以得到公式(3):

$$\begin{cases}\rho_{actual}=2\times r_{arm}^2(1-\cos\theta_{arm})\times\cos\theta_1\\ \theta_{c-offset}=\arcsin\left(\dfrac{r_{arm}\times(1-\cos(\theta_{arm}))}{\rho_{actual}\times R}\times 2\sqrt{R^2-r_{arm}^2}\right)\end{cases} \tag{3}$$

即可得到 ρ_{actual} 和 θ 的表达式,如公式(4)所示:

$$\begin{cases}\rho_{actual}=2\times r_{arm}^2(1-\cos\theta_{arm})\times\cos\theta_1\\ \theta=\theta_c-\arcsin\left(\dfrac{r_{arm}(1-\cos(\theta_{arm}))}{\rho_{actual}\times R}\times 2\sqrt{R^2-r_{arm}^2}\right)\end{cases} \tag{4}$$

式中:θ_c 为主转台 C 需要转动的角度,公式(4)中,只有 θ_c 和 θ_{arm} 为运动变量,分别代表主转台 C 和主加工臂转轴 U 的运动进给角度,因此,只需由此二轴的转动即可实现遍历整个反射镜的加工进给。在工作中,只需给出 θ_c 和 θ_{arm} 关于 ρ_{actual} 和 θ 的表达式,即可获得系统运动控制参量,如公式(5)所示:

$$\begin{cases}\theta_{arm}=\arccos\left(1-\dfrac{R^2}{r_{arm}}\times\left(1-\cos\dfrac{\rho_{actual}}{R}\right)\right)\\ \theta_c=\theta+\arcsin\left(\dfrac{r_{arm}\times(1-\cos(\theta_{arm}))}{\rho_{actual}\times R}\times 2\sqrt{R^2-r_{arm}^2}\right)\end{cases} \tag{5}$$

由图 1 的实际系统模型中可以看出,加工臂的臂长 r_{arm} 相对比较大,因此加工臂转动一个小角度即可实现末端主轴磨头部分的较大线速度,有效提高了系统的运动响应能力。

1.2 加工零位标定

为了保证机床加工时磨头能够准确到达路径规划驻留点位,需进行加工零位标定。零位标定分为两个步骤:垂向零位标定、径向零位标定。在标定前,将平转动偏心结构调至偏心为 0 处。

首先进行垂向零位标定,其原理示意图如图 4 所示,主转台 C 轴和加工臂配合运动,在加工臂磨头工装处通过预留接口换装光谱共焦位移传感器,将传感器调至量程范围内,即焦点处。工作台上有加工对心标记点 A,移动加工臂,将位移传感器光点与 A 点重合,记下此时加工臂角度 θ_{arm1};移动主转台 C,同时运动加工臂,使工作台上标记 A 与加工臂位移传感器光点在 A' 处再次重合,此时位移传感器读数应与在 θ_{arm1} 近似,记此时加工臂角度 θ_{arm2},此二者加工臂角度的中值即为主转台垂向零位处。

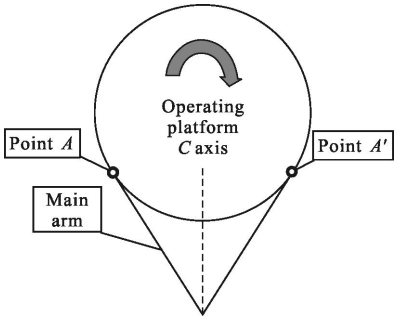

图 4 垂向零位标定示意图

Fig.4 Performance of vertical zero position calibration

径向标定的目的是确定与垂向正交方向的零位标定,通过加工臂上可伸缩悬臂轴和主转台共同进给完成,其原理如图 5 所示,图中加工臂上箭头所指深色区域即为嵌入加工臂中可伸缩悬臂轴,该轴可沿图中箭头方向进行沿轴伸缩运动,在调节完成后可进行抱死定位。将加工臂运动至已完成标定的垂向零位处,利用固定在主转台上千分表测量具有精度的主轴径向标准面,记下读数并旋转主转台 180°,再次记下千分表读数。运动伸缩悬臂轴使千分表示数至两次记录中值处,即完成径向零位标定,最后抱死可伸缩悬臂轴。

相比较于传统加工中心的对心零位标定过程,垂向零位标定方法有效提高了标定效率,节省了时

间和反复迭代收敛过程,通过与传统方法对比,该方法垂向零位标定精度可达到±0.04 mm，径向零位标定精度可达±0.01 mm。对于大口径光学元件和匹配的磨头,该精度满足加工要求。

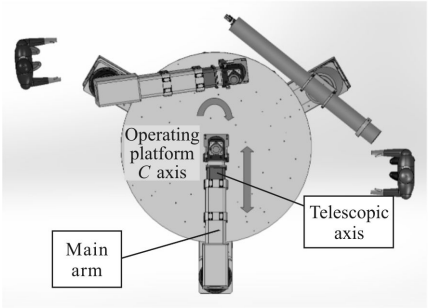

图 5 径向零位标定示意图

Fig.5 Performance of radital zero position calibration

2 加工实验

为了验证三角机加工中心对于大口径非球面反射镜加工的可行性,结合工程实例,对一口径为 1 450 mm 的离轴抛物面镜进行加工实验，如图 6 所示。

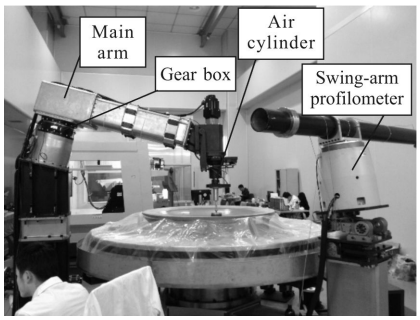

图 6 三角机加工中心加工实例

Fig.6 Actual processing in the tri-leg processing center

待加工非球面镜最接近球面曲率半径 R 为 7 546 mm,实测加工角为 15.97°。加工中以主加工臂 U 轴和主转台 C 轴矢量进给实现遍历全口径加工。虚拟加工臂长 r_{arm}=1 584 mm，加工中加工臂的线速度可以达到 1 650 mm/s，主转台在带载情况下最高转速为 10 r/min,满足以驻留时间计算为主的光学加工轨迹运动。通过自行开发的控制算法,配合直驱主转台和大减速比加工臂转轴，可以对运动轨迹实现高精度插补控制。

经过三角机加工中心加工前，离轴抛物面镜面形结果如图 7 所示。

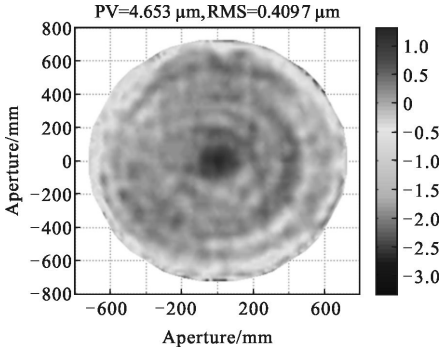

图 7 加工前的面形误差

Fig.7 Surface-profile error before fabrication

其 PV 与 RMS 分别为 4.653 μm、0.409 4 μm。结合三角机加工中心及文中所述算法,经过 3 h 一轮加工后,得到镜面面形检测结果如图 8 所示。

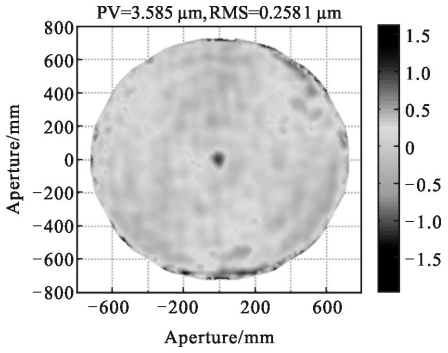

图 8 一轮加工后的面形误差

Fig.8 Surface-profile error after fabrication

由图 8 可以看出，其面形 PV 与 RMS 值收敛到 3.585 μm、0.258 1 μm。

加工收敛效率为：

$$\text{Converging Rate}=(RMS_1-RMS_2)/RMS_1\times100\%=37\% \quad (6)$$

由图 7 和图 8 的加工结果可以看出，结合三角机加工中心与文中所述算法可以实现大口径离轴抛物面镜的加工,其加工收敛效率约为 37%,为面形的最终收敛提供了技术保障。

3 结 论

文中基于多工位、多加工方式,低成本的设计理念设计制造了三角机加工中心，并基于该中心建立了一套非球面镜加工模型,提出了快速、高效的零位标定方法。相比较于传统五轴 XYZ 坐标系下数控加

工中心,文中所述三角机加工中心占位空间小,基于两个转轴即可实现五轴数控加工效果；同时在加工中,相比较于直角坐标系进给,其具有响应速度快,通过较小角速度即可在加工中获得较大线速度等优势。基于该三角机加工中心,结合工程实例,对一口径为 1 450 mm 的离轴抛物面镜进行了加工,由加工结果可以看出，该三角机加工中心可以实现对大口径非球面镜的数控加工，为大口径非球面镜的制造提供了支持。

参考文献：

[1] Martin H M, Burge J H, Cuerden B, et al. Manufacture of 8.4 -m off-axis segments: a 1/5 -scale demonstration [J]. ***Optical Fabrication Metrology & Material Advancements for Telescopes***, 2004, 5494: 62-70.

[2] Cole G C, Garfield R, Peters T, et al. An overview of optical fabrication of the JWST mirror segments at Tinsley [C]//Astronomical Telescopes +Instrumentation, International Society for Optics and Photonics, SPIE, 2006, 6265: 62650V.

[3] Lardiere O, Conan R, Bradley C, et al. A laser guide star wavefront sensor bench demonstrator for TMT [J]. ***Optics Express***, 2008, 16(8): 5527-5543.

[4] Gray C, Baker I, Davies G, et al. Fast manufacturing of E-ELT mirror segments using CNC polishing [C]//Optical Engineering +Applications, International Society for Optics and Photonics, SPIE, 2013, 8838: 88380K.

[5] Laslandes M, Rousselet N, Ferrari M, et al. Stress polishing of E-ELT segment at LAM: full -scale demonstrator status [C]//Optical Systems Design, International Society for Optics and Photonics, SPIE, 2011, 8169(1): 814-818.

[6] Pan Junhua. The Design, Manufacture and Test of the Aspherical Optical Surfaces[M]. Suzhou: Soochow University Press, 2004: 117-119. (in Chinese)
潘君骅. 光学非球面设计、加工与检验[M]. 苏州: 苏州大学出版社, 2004: 117-119.

[7] Jones R A. Computer control for grinding and polishing[J]. ***Photon Spectra***, 1983, 17: 34-39.

[8] Aspden R, Mcdonough R, Jr N F. Computer assisted optical surfacing[J]. ***Appl Opt***, 1972, 11(11): 2739-2747.

[9] Subrahmanyan P, Gardopee G, Verma Y, et al. Rapid fabrication of lightweight SiC aspheres using reactive atom plasma (RAP) processing [C]//Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, 2007, 6666: 66660A.

[10] Zhang X, Zhang Z, Li Z. Manufacturing and testing of 1-m class SiC aspherical mirror [C]//Proceedings of SPIE -The International Society for Optical Engineering, 2007, 6721: 672109.

[11] Johns M. The Giant Magellan Telescope (GMT) [C]//SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation, International Society for Optics and Photonics, 2008, 9145: 626729.

[12] Xu Q, Wu F, Wan Y, et al. Study on CCOS fabrication technology for super-smooth parabolic surface of light-weight SiC mirror [C]//International Symposium on Advanced Optical Manufacturing & Testing Technologies: Advanced Optical Manufacturing Technologies, International Society for Optics and Photonics, 2007: 672223-1-672223-7.

[13] Wan Yongjian, Yuan Jiahu, Fan Bin, et al. Methods of edge figuring in digital controlled fabrication of optical surface[J]. ***Infrared & Laser Engineering***, 2007, 36 (1): 92 -96. (in Chinese)
万勇建, 袁家虎, 范斌, 等. 光学加工中边缘问题的处理办法[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(1): 92-96.

[14] Zhang Feng. Fabrication and testing of precise off-axis convex aspheric mirror [J]. ***Optics & Precision Engineering***, 2010, 18(12): 2558-2563. (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): 2558-2563.

[15] Derst G, Giggel V. Fabrication technologies for large optical components at Carl Zeiss Jena GmbH [C]//Astronomical Telescopes +Instrumentation, International Society for Optics and Photonics, SPIE, 2010: 139-144.

[16] Liu Zhenyu, Luo Xiao, Deng Weijie, et al. Multi-mode optimization for large optical asphere mirror [J]. ***Optics & Precision Engineering***, 2013, 21(11): 2791-2797. (in Chinese)
刘振宇, 罗霄, 邓伟杰, 等. 大口径非球面的组合加工[J]. 光学 精密工程, 2013, 21(11): 2791-2797.