

空间同轴三反相机 $\Phi 520$ mm 次镜的加工与检测

孟晓辉,王永刚,马仙梅,李文卿,李昂,张继友

(北京空间机电研究所,北京 100094)

摘要: 为了满足空间同轴三反相机对大口径凸非球面高精度的面形质量和精确的几何参数控制要求,提出以计算机控制确定性研抛工艺为核心的多工序组合加工及检测技术。在加工阶段,首先利用超声振动磨削技术对非球面进行面形铣磨,其次应用机器人对非球面面形进行快速研磨和粗抛,最后采用离子束修形技术实现非球面的高精度加工;在检测阶段,首先利用三坐标测量机对铣磨和研磨过程中非球面的面形及几何参数进行控制,进入干涉仪测量范围后,再采用 Hindle 球法对非球面光学参数进行干涉检测。结合工程实例,对一口径 520 mm 的凸双曲面次镜进行了加工及检测,其面形精度 RMS 为 0.015λ ($\lambda=632.8$ nm),几何参数控制精度 ΔR 误差为 0.1 mm、 ΔK 优于 0.1%,满足光学设计技术指标要求。

关键词: 光学加工; 机器人; 离子束修形; 次镜

中图分类号: TH706 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0818002

Fabrication and test for $\Phi 520$ mm secondary mirror of on-axis three mirror space camera

Meng Xiaohui, Wang Yonggang, Ma Xianmei, Li Wenqing, Li Ang, Zhang Jiyou

(Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100094, China)

Abstract: In order to satisfy the requirements of high-precision surface figure error quality and geometry parameters controlling in the on-axis three mirror space camera of large-aperture convex aspheric, multiply process combination and test technique based on the foundation of deterministic lapping and polishing were proposed. In the process stage, ultrasonic milling was firstly introduced to form the aspherical surface form, then robot lapping and polishing were used to rapidly grind and polish, at last, ion beam figuring was used to finish the aspheric fabrication. In the test stage, the geometry parameters and surface figure error of aspheric were firstly controlled by using the coordinate measuring machine (CMM) and then tested by using Hindle sphere testing after the aspheric surface accuracy in interferometric test range. An example for fabricating and testing a convex hyperbolic secondary mirror with diameter of 520 mm was given, the surface figure error of mirror was 0.015λ ($\lambda=632.8$ nm), the geometry parameters control accuracy of ΔR and ΔK are 0.1 mm and 0.1%, respectively, all the fabrication results of aspheric satisfy the specifications requirements of the optical design.

Key words: optical fabrication; robot; ion beam figuring; secondary mirror

收稿日期:2016-12-07; 修订日期:2017-01-11

基金项目:国家科技重大专项(2011ZX04004-061)

作者简介:孟晓辉(1985-),男,高级工程师,硕士,主要从事光学超精密加工及检测方面的研究。Email:mrmeng_508@163.com

0 引言

凸非球面反射镜常常作为次镜,应用于以卡塞格林、R-C 系统为代表的空间相机光学系统中,次镜的镜面误差直接影响着相机最终的成像质量,且随着未来相机对地观测分辨率的提高,其次镜口径逐渐朝米级方向发展;而为了节约运载火箭的发射成本,光学载荷朝轻型化发展,次镜的轻量化程度变得越来越高,这些特点都给凸非球面的加工及检测带来了巨大的挑战。

大口径凸非球面面形的加工要由非球面成型、研抛、精抛等几个主要加工工序组成,其中在非球面成形阶段,多采用超精密铣磨、超声振动磨削等技术手段来实现;在非球面研抛阶段,有计算机数控小磨头(CCOS)、气囊抛光、应力盘抛光及机器人研抛等多种现代化数控加工方法;在精抛阶段,以磁流变抛光、离子束抛光为代表的精细加工技术应用较多^[1]。相比于古典加工工艺中以单轴机结合手修,侧重于加工经验的方法,现代数控光学加工技术则通过工艺可控,去除特性稳定等确定性加工技术特点,有效保证了非球面的加工精度和周期。长期以来,大口径凸非球面的检测一直是个难点,子孔径拼接检测精度较低;背部透射法则需要在完成检测后再进行镜坯轻量化加工,易造成镜面面形的下降;计算全息检测则需要制作高精度的全息片,未在国内广泛应用;非球面样板法和改进 Hinde 球法则都需要加工出与待检凸非球面口径相当的高精度透镜,加工难度较大^[2];Hindle 球法仅需要制作一块标准球面反射镜就可以实现凸非球面的无像差检测,虽然其标准镜的口径较大,但误差来源少,检测精度高,便于实际工程应用^[3]。

在美国预计 2018 年发射升空的 JWST 望远镜中次镜口径为 $\Phi 740\text{ mm}$,而目前国内的在轨遥感相机,其所应用的凸非球面次镜最大口径约 $\Phi 300\text{ mm}$ 左右,距国外有较大差距,所以在空间大口径凸非球面研制方面不仅难度极大,且无可借鉴的技术工艺。文中以某空间型号相机中 $\Phi 520\text{ mm}$ 微晶凸非球面次镜的研制试验为例,确立了以超声振动磨削技术进行非球面成型、机器人研抛技术进行非球面研磨和抛光、离子束修形技术进行非球面精细加工的组合加工工艺;加工过程中,采用三坐标测量机对铣

磨/研磨阶段的非球面轮廓及几何参数进行测量,利用自编的数据处理程序对三坐标数据进行拟合,作为迭代加工的输入;在非球面面形进入干涉仪检测范围后,采用 Hindle 球检测。加工结果证明,文中所确定的加工检测工艺在大口径凸非球面加工效率和加工精度方面均有了显著的提高,有效保障了空间遥感相机的研制进度。

1 空间相机光学系统及次镜

1.1 空间相机光学系统简介

图 1 所示为典型的同轴三反光学系统结构,由凹非球面主镜、凸非球面次镜、凹非球面三镜及折转镜、扫描镜、分光片及切换镜等光学元件组成。与空间光学相机两镜系统、透射系统相比,同轴三反光学系统以其良好的轴对称型、结构紧凑、质量轻等优势在高分辨率长焦距相机中得到了广泛应用^[4]。

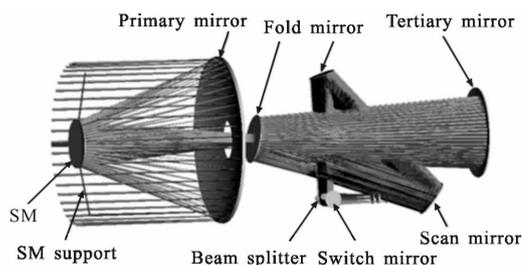


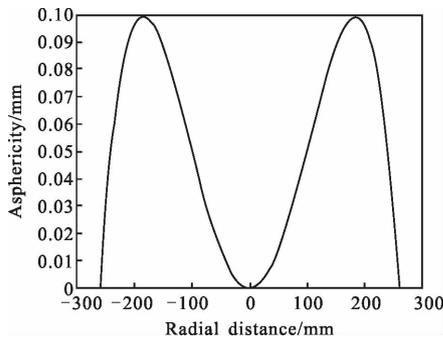
图 1 空间相机光学系统

Fig.1 Optical system of space camera

1.2 次镜

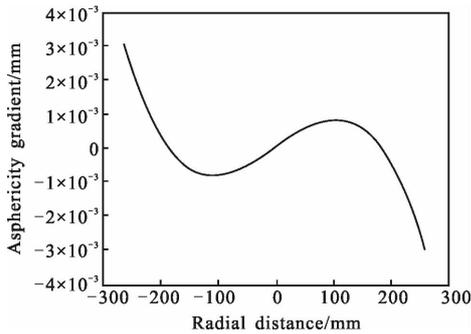
某项目空间相机光学系统中的次镜被设计成二次双曲面微晶材料反射镜,其光学参数为:口径 $D=520\text{ mm}$,有效通光口径 $D_0=507\text{ mm}$,中心盲区要求小于 90 mm ,顶点曲率半径 $R=1667.6\pm 1\text{ mm}$,二次非球面系数 $K=-3.215\pm 0.001$,面形精度要求 RMS 优于 $\lambda/60(\lambda=632.8\text{ nm})$ 。

选择镜面的顶点与边缘相接的球面作为最佳比较球面,对次镜的非球面度和非球面梯度进行计算。其中,非球面度最大量值出现在镜面的 0.707 带区附近,最大非球面度为 0.099 mm ,约 $156\lambda, \lambda=632.8\text{ nm}$;沿径向的每厘米最大非球面度即非球面梯度为 0.0287 mm ,约 $45.4\lambda, \lambda=632.8\text{ nm}$,图 2(a)为非球面度随镜面径向位置的变化情况,图 2(b)为非球面梯度随镜面径向位置的变化情况,它决定着非球面加工的整体难易程度。



(a) 非球面度曲线

(a) Asphericity curves



(b) 非球面度梯度曲线

(b) Asphericity gradient curves

图 2 非球面度与非球面梯度曲线

Fig.2 Curves of asphericity and asphericity gradient

2 大口径凸双曲面次镜加工及检测工艺

2.1 多工序组合加工原理

与传统光学加工中采用一台设备、完成多道工序加工的方法不同，多工序组合加工原理是以多种设备为加工载体，综合运用多种加工技术来完成非球面不同工序的加工。研制过程中，充分发挥各技术的非球面误差去除优势，兼顾加工效率和面形质量，实现非球面的全链路加工。

为此，制定了计算机控制确定性研抛工艺流程，对各个分工序的预期加工指标进行了分配，如图 3 所示。

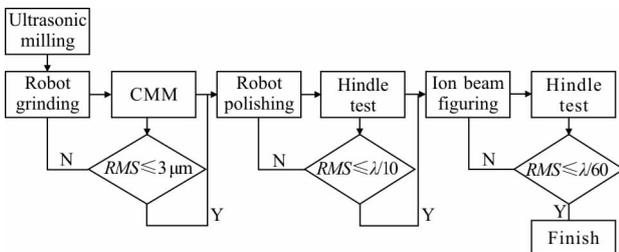


图 3 凸双曲面次镜的组合加工流程

Fig.3 Flow chart of combination fabricating convex hyperbolic secondary mirror

2.2 加工工艺介绍

次镜的加工工艺主要由三个加工工序所组成。

(1) 非球面面形铣磨

采用超声振动复合铣磨技术，通过超声发生装置驱动面形铣磨砂轮做轴向高频振动，加速镜坯表面材料的去除，从而实现非球面面形的快速铣削。在非球面面形铣磨工艺上，需要首先加工出非球面的最接近球面，然后计算各环带上的铣磨量，最后完成非球面面形的铣磨加工。

(2) 机器人研磨和抛光

机器人研抛技术是计算机控制小磨头研抛技术的另一分支，其运动方式更为灵活^[5]，如图 4 所示，机器人通过仿人工臂结构，依托于精密运动控制系统，可以实现 6 轴运动，在非球面加工过程中，工具头按照行星运动方式，可以实时与镜面法线方向保持垂直，与非球面表面贴合更为严密。通过工艺试验，可以获取较为理想和去除特性相对稳定的去除函数，实现确定性加工。

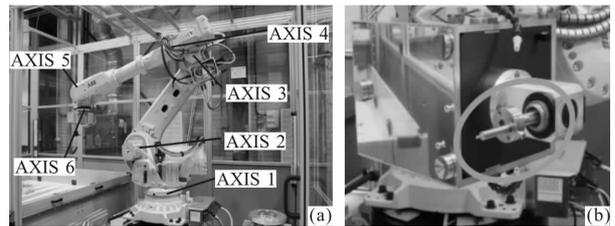


图 4 机器人研抛设备

Fig.4 Robotic lapping and polishing machine

(3) 离子束抛光

离子束抛光是在真空环境下，以低能 Ar⁺ 离子束流对非球面表面进行轰击的一种非接触式加工技术。其具体工艺流程如图 5 所示，当待加工光学元件确定后，首先要选取合适的去除函数，确定离子源工作参数；然后进行加工路径规划，在规划好的路径上求解并优化驻留时间，假设离子束在整个抛光区域的任意单位时间内具有相同的去除函数 $R(x, y)$ 时，工件的材料去除量为：

$$\Delta Z(x, y) = R(x, y) ** D(x, y) \quad (1)$$

式中： $D(x, y)$ 为抛光盘在位置 (x, y) 处的驻留时间；** 表示二维空间卷积。作为输入控制量的驻留时间是决定加工后残留误差的关键因素，通过傅里叶(Fourier)变换法、迭代法或线性方程组法对驻留时间进行求解，找出

最优化的 $D(x,y)$ 。最后,生成离子束抛光机床可识别的计算机数控(CNC)加工程序,进行加工^[6-8]。

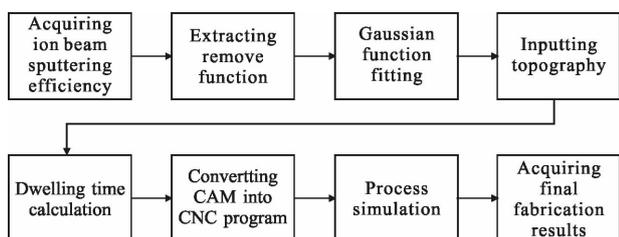


图 5 离子束修形工艺流程

Fig.5 Flow chart of ion beam figuring

2.3 检测工艺介绍

次镜的检测工艺主要涉及非球面顶点曲率半径 R 和非球面系数 K 的检测、非球面面形的检测,若按照加工阶段来进行简化区分的话,可以分为研磨阶段的光学参数检测和抛光阶段的光学参数检测。

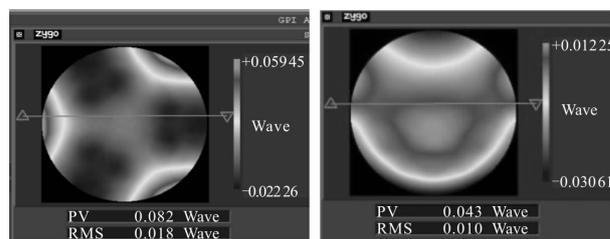
(1) 研磨阶段的光学参数检测

在次镜的铣磨及研磨阶段,由于非球面精度低、表面反射率低,无法采用干涉法进行检测,在传统非球面加工工艺中,通常使用千分表加测环、刀口仪等工具进行定性检测,效率低、精度差^[9]。而利用三坐标测量机 CMM 对非球面进行打点测量,再利用最小二乘法等算法进行数据拟合的方法可以实现对非球面的面形及几何参数的量化控制。

在光学面形控制方面,通过对三坐标数据进行非球面拟合,面形精度 PV 能达到优于 $3\ \mu\text{m}$ 的精度,而商用干涉仪的测量范围为面形精度 $PV \leq 5\ \mu\text{m}$,所以次镜面形可以直接进入干涉仪测量范围内,但由于在接触式数控加工工艺中,受边缘效应的影响,非球面边缘易出现塌边或翘边的问题,且这些局部碎带的陡度较大,往往会超出干涉仪的测量范围,使得镜面无法实现全口径干涉仪检测。这里通过采用超声切削的方式,在保证有效通光口径的前提下,对边缘误差进行切除来弥补这一检测工艺短板,于是实现了研磨和抛光的检测衔接,解决了其他工艺中需要引入红外干涉仪、波前分析仪等检测设备来对这一“盲区”进行检测的问题^[10],提高了加工效率。

(2) 抛光阶段的光学参数检测

在次镜进入干涉仪测量范围后,结合次镜的最终使用状态,对次镜的检测状态进行了力学分析,次镜在光轴竖直和光轴水平下的重力变形结果分别如图 6(a)和(b)所示。



(a) 光轴竖直状态

(b) 光轴水平状态

(a) Optical axis vertical state

(b) Optical axis horizontal state

图 6 次镜不同检测状态下的重力变形

Fig.6 Distortion caused by gravity in different test status of secondary mirror

根据仿真结果,次镜在竖直状态下的力学性能较差,面形误差 RMS 变化量高达 0.018λ ,无法满足次镜的加工精度要求,于是选取光轴水平状态下对次镜进行检测。但是根据光学设计结果, Hindle 球检测 $\Phi 520\ \text{mm}$ 次镜所需的标准球面镜口径约 $1\ 500\ \text{mm}$,曲率半径 R 为 $1\ 721.6\ \text{mm}$,中心矢高 $171.9\ \text{mm}$ 。如此大口径、高陡度的球面镜在光轴水平状态下保持长期稳定的面形精度是检测过程需要解决的关键技术问题,于是,对 $\Phi 1\ 500\ \text{mm}$ 球面镜设计了专用的重力卸载工装,如图 7 所示,通过在球面镜背部开槽、预埋重力卸载调节金属件的方式来实现对球面镜光轴水平状态下的重力卸载,卸载结果如图 8 所示,标准

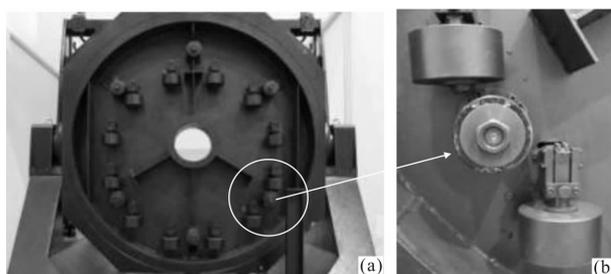


图 7 $\Phi 1\ 500\ \text{mm}$ 球面镜重力卸载工装

Fig.7 Gravity unloading of $\Phi 1\ 500\ \text{mm}$ sphere mirror

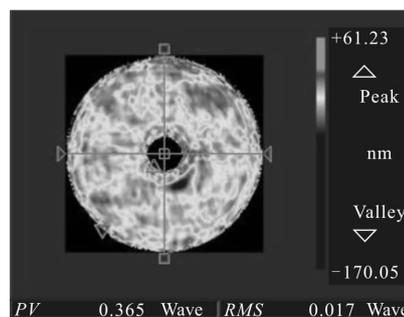


图 8 $\Phi 1\ 500\ \text{mm}$ 球面镜检测结果

Fig.8 Testing results of $\Phi 1\ 500\ \text{mm}$ sphere mirror

球面镜的面形精度 RMS 达到 0.017λ , 由于在 Hindle 球检测光路中, 光线在 Hindle 球上反射一次, 在次镜上反射两次, 理论上次镜的检测精度 RMS 为 0.085λ , 即使考虑上检测过程中的各误差因素, 也能满足次镜加工精度 RMS 优于 $\lambda/60$ 的要求。

3 加工实验

3.1 加工检测结果

按照前文所制定的工艺流程进行了次镜的加工及检测, 实验过程如图 9 所示。

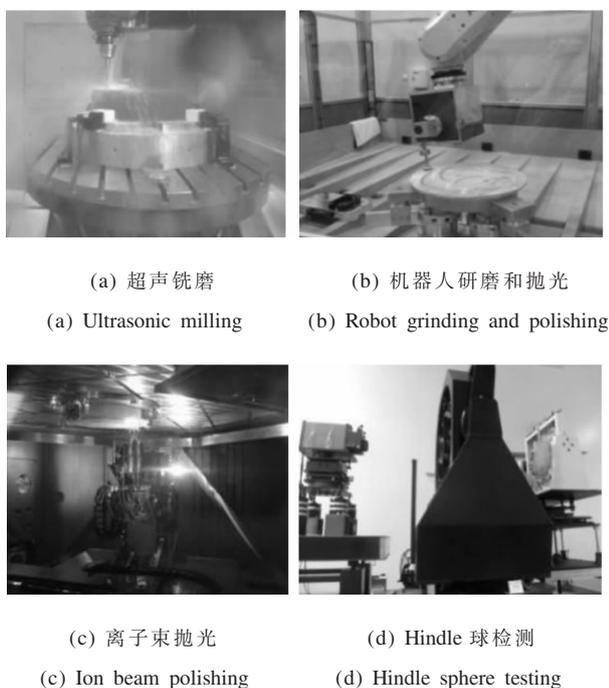


图 9 次镜加工过程

Fig.9 Fabricating process of secondary mirror

首先是在铣磨机床上, 利用超声铣削技术对次镜微晶镜坯的外形尺寸等几何结构参数进行加工; 达到图纸设计要求后, 继续对次镜进行机械减重轻量化加工, 当各轻量化孔加工到一定程度后, 进行后续酸洗处理, 进一步降低轻量化孔筋的厚度, 同时消除镜坯加工过程中产生的残余应力。在完成对镜坯的处理后, 开始进行光学面的非球面面型铣磨, 同轴凸非球面次镜在超声铣磨结束后, 面形分布呈现典型的环带误差, 如图 10(a)所示, 此时面形精度 $PV=30\ \mu\text{m}$ 、 $RMS=7\ \mu\text{m}$ 。

在后续机器人研磨环节不仅要消除镜面残留的刀痕, 还要对这些呈现轴对称性的环带误差进行进

一步去除。于是可以通过控制机器人的运行轨迹来达到对镜面进行均匀去除的目的, 加工后面形精度 $PV=2.634\ \mu\text{m}$ 、 $RMS=0.295\ \mu\text{m}$, 此时的面形精度已有大幅提升, 而从图 10(b)的面形分布上可以看出, 镜面整体呈现出较为明显的中高频误差, 局部存在非对称性环带误差, 针对这些问题, 需要对机器人抛光工序进行改善。对于非对称性的环带误差, 通过控制机器人进行往复运动来消除; 对于中高频误差的去除, 通过加大机器人末端的抛光垫尺寸的方式来进行镜面整体的光顺加工, 加工完毕后的面形精度如图 10(c)所示, 此时面形精度 $PV=648.49\ \text{nm}$ 、 $RMS=79.997\ \text{nm}$ 。

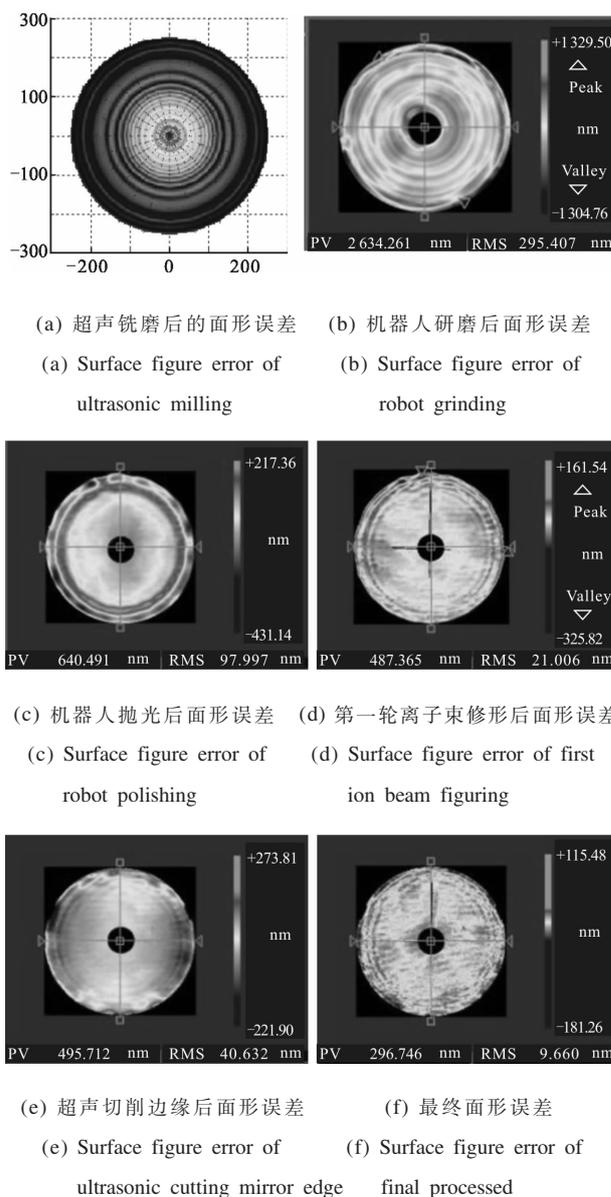


图 10 次镜加工检测结果

Fig.10 Test results of secondary mirror process

其次, 可以尝试应用离子束修形技术进行抛光加工, 离子束抛光所用的去除函数呈高斯分布, 其束径大小直接关系到面形的收敛效率, 束径越大, 加工效率越高, 但是局部误差修形能力较低; 束径越小, 局部误差可以实现精细去除, 但是加工率较低。实验中, 离子源束径全宽半高(FWHM)在 5~30 mm 范围内可调, 可以对特征尺寸 10~90 mm 范围的镜面局部误差进行定向加工, 为了选取合适尺寸的束径, 通常采用仿真软件对实际提取的去除函数进行加工仿真分析, 然后确定最佳的去除函数, 这种通过试验来提取一系列去除函数、构成工艺数据库、再进行仿真的方法较为费时费力, 这里采用空间滤波的方法对迭代结果进行快速分析, 作为离子源束径选取的依据。其方法是在 Zygo 干涉仪分析软件 Metropro 中设定高斯高通滤波, 然后以图 10(c)为入口面形误差分布进行分析, 分析结果如图 11 所示。

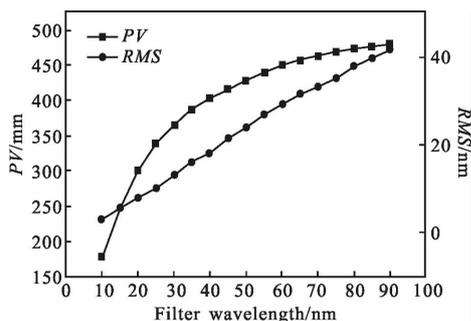


图 11 空间滤波分析结果

Fig.11 Results of highpass filter

在 10~25 mm 滤波范围内, 面形精度 PV 具有很大的收敛效率, 且 RMS 优于 10 nm, 于是选用射频性 RF40 离子源, 将束径 FWHM 优化到合适尺寸内对次镜进行加工, 加工结果如图 10(d)所示, 其面形精度 PV=487 nm、RMS=21 nm, 表明了离子束修形技术较强的收敛效率。

由于此时次镜的边缘效应较为明显, 且在加工之前, 次镜预留了 15 mm 的单边余量, 下面采用超声切削技术对这一边缘进行切除, 切除后, 次镜有效通光口径范围内的面形误差如图 10(e)所示, 出现了明显的像散, X 方向和 Y 方向的泽尼克系数分别为 -0.155λ 、 0.035λ , 在进行次镜多角度旋转测试后, 确认像散为镜面本身的固有误差, 虽然此时次镜的面形精度下降至 PV=495.7 nm、RMS=48.6 nm。但面

形误差分布较为光滑, 且主要误差集中在边缘部分, 于是选取小束径的离子源对次镜进行第二轮离子束修形, 最终加工结果如图 10(f)所示, 面形精度为 PV=296.7 nm、RMS=9.66 nm ($\approx \lambda/65$, $\lambda=632.8$ nm), 达到了设计要求。

3.2 误差分析

3.2.1 研磨阶段的光学参数拟合误差

为了对研磨阶段采用的数据拟合程序进行精度评估, 将机器人研磨阶段的最后一次检测数据转化为 ASC 文件, 输入到 Zygo 干涉仪 Metropro 软件中, 结果如图 12 所示, 其拟合结果为 PV=2.536 μ m, RMS=0.318 μ m, 与经干涉仪直接检测所获取的结果相比, 面形精度偏差为 $\Delta_{pv}=0.098$ μ m、 $\Delta_{rms}=0.023$ μ m, 在面形误差分布上较为一致, 较好地验证了拟合程序的正确性。

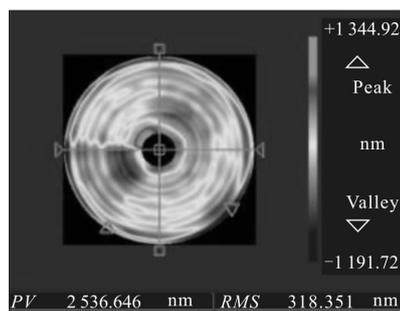


图 12 三坐标测量拟合结果

Fig.12 CMM fitting results

图 13 为次镜研磨加工过程中, 次镜顶点曲率半径 R 和非球面系数 K 的收敛过程, 其中经过 18 次迭代加工, 顶点曲率半径从初始的 -1 670.2 mm 收敛至 -1 667.5 mm、非球面系数 K 从初始的 -2.866 4 收敛至 -3.2157。与理论设计值相比, 几何参数偏差为 $\Delta R=0.1$ mm、 $\Delta K=0.0007$, 满足光学设计所提的公差要求。

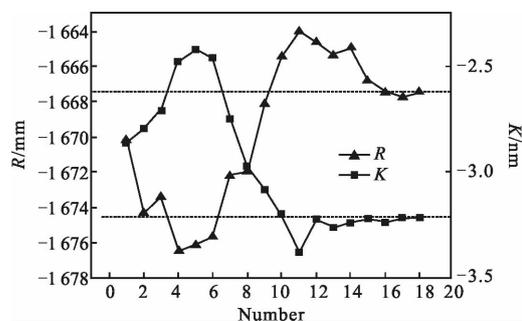


图 13 次镜光学参数 R 和 K 的收敛过程

Fig.13 Convergence process of secondary mirror parameter R and K

3.2.2 干涉检测阶段的测量误差

由于在研磨阶段已经对次镜的 R 和 K 进行了很好的控制,在干涉测量阶段,抛光量为亚微米级,几乎不会影响到次镜非球面参数的改变。这里,通过定做测量杆的方法对干涉仪至 Hindle 球和 Hindle 球至次镜中心的两段间距进行控制,用以实现抛光阶段的参数控制,其主要误差源有:

(1) 测量杆制作误差

检测光路的前后两段镜间距分别为 1 505.73 mm 和 597.06 mm,需要制作两根测量杆来对这两段镜间距进行控制。在制作方法上,选用中空的石英玻璃管,末端嵌入聚四氟乙烯尖头即可,同时借助千分尺、双频激光干涉仪等辅助测量仪器对测量杆的长度进行控制,可达到 ± 0.01 mm 的制作误差;

(2) 光轴引出误差

在检测光路调平过程中,以十字叉丝线的方式将 Hindle 球的虚拟光轴中心引到机械中心上,再利用三坐标严格标定次镜的实体中心,于是可以首先将 Hindle 球和次镜进行对心,然后再进行干涉仪与 Hindle 球对心,从而保证激光干涉仪和次镜严格按照光轴方向移动,但实际控制过程总是有偏差,实际的机械轴与理想光轴偏差角度大约有 $20'$,投影到轴向方向上的直线偏差约 ± 0.04 mm;

(3) 调整误差

测量杆在架设过程中需要借助辅助工装来进行支撑,测试人员在这一操作过程中不可避免地会引入一定的调整误差,约 ± 0.01 mm。

将三部分测量误差叠加,整个检测光路中引入的测量误差为 ± 0.06 mm。而按照光学设计要求,满足 $\Delta R = \pm 1$ mm、 $\Delta K = \pm 0.001$ 公差前提下,两个镜间距的分配公差分别为 ± 0.45 mm 和 ± 0.18 mm,所以这种测量杆控制几何参数精度的方法是切实可行的。

4 结 论

通过对 $\Phi 520$ mm 凸双曲面次镜的加工与检测试验,叙述了确定性研抛、多工序组合加工的现代化数控加工工艺方法,为非球面光学制造领域提供了一些新的加工思路,主要体现在:

(1) 以成熟的工业化机器人为加工载体,完成了大口径空间相机次镜的研磨和粗抛加工,取得了良好的加工收敛效果;

(2) 摒弃了传统工艺中采用刀口仪等定性检测方法,利用基于三坐标接触式的精准化测量手段,建立了与机器人研磨和抛光过程相匹配的接口,实现了非球面面形在研磨和抛光环节的顺利过渡;

(3) 在数控加工过程中,非球面的边缘效应不可避免,针对性去除较为费时费力,文中提出了预留镜坯单边余量,后采用超声切削的方案进行去除,并进行了相应的工艺试验。虽然会存在镜坯的浪费及面形精度下降的风险,但通过后续进一步的工艺试验进行切削参数固化,可以有效规避这一风险。同时,依靠全链路的确定性加工,可以保证非球面反射镜的整体加工质量和效率,成为一种有效的可选加工方案。

依靠文中所述工艺,顺利完成了次镜的高效加工,在几何参数、面形质量上均满足了某型号航天相机对次镜几何参数 R 和 K 的要求,公差分别优于 0.1 mm 和 0.001;面形精度 RMS 优于 $\lambda/60$ 的加工要求,保证了空间遥感相机的研制节点。

参 考 文 献:

- [1] Yuan Julong, Wu Zhe, Lv Binghai, et al. Review on ultra-precision polishing technology of aspheric surface[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2012, 48 (23): 167-177. (in Chinese)
袁巨龙, 吴喆, 吕冰海, 等. 非球面超精密抛光技术研究现状[J]. 机械工程学报, 2012, 48(23): 167-177.
- [2] Song Qiang, Yang Baoxi, Yuan Qiao, et al. Study on large convex aspherica lens testing[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(4): 0408003. (in Chinese)
宋强, 杨宝喜, 袁乔, 等. 大口径凸非球面面形检测方法研究[J]. 中国激光, 2014, 41(4): 0408003.
- [3] Smith W S, Jones G W. Comparison of metrology methods for large astronomical secondary mirrors [C]//SPIE, 1994, 2263: 243-252.
- [4] Liu Zhaojun, Zhou Feng, Hu Bin, et al. Study on coaxial three-mirror-anastigmat space camera with long focal length [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2011, 32(6): 46-52. (in Chinese)
刘兆军, 周峰, 胡斌, 等. 长焦距同轴三反空间相机光学系统研究[J]. 航天返回与遥感, 2011, 32(6): 46-52.
- [5] Andreas Kelma, Rainer Boerreta, Stefan Sinzinger. Modeling of the polishing process for aspheric optics [C]//SPIE, 2008, 7102: 71020H.

- [6] Li Yun, Xing Tingwen, Xu Jiajun, et al. Dwell time algorithm for the 3-axis ion beam figuring system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(5): 1300–1305. (in Chinese)
李云, 邢廷文, 许嘉俊, 等. 三轴离子束抛光系统驻留时间算法[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(5): 1300–1305.
- [7] Li Yun, Duan Guping, Xing Tingwen. Smoothly extending algorithm for the surface error of optics [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(2): 408–412. (in Chinese)
李云, 段洁坪, 邢廷文. 光学元件面形误差的光滑延展算法[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(2): 408–412.
- [8] Zhou L, Dai Y, Xie X, et al. Model and method to determine dwell time in ion beam figuring[J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2007, 5(2): 108–112.
- [9] Shi Tu, Yang Yongying, Zhang Lei, et al. Surface testing methods of aspheric optical elements [J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(1): 26–46. (in Chinese)
师途, 杨甬英, 张磊, 等. 非球面光学元件的面形检测技术[J]. 中国光学, 2014, 7(1): 26–46.
- [10] Lu Wenchuan, Zhang Jinping, Wang Xiaokun, et al. Shack-Hartmann wavefront sensor nonnull testing off-axis aspheric surface on axis[J]. *Optical Technique*, 2012, 38(4): 410–414. (in Chinese)
卢文川, 张金平, 王孝坤, 等. Shack-Hartmann 波前传感器非零位在轴检测离轴非球面反射镜 [J]. 光学技术, 2012, 38(4): 410–414.