

〈系统与amp;设计〉

大口径非球面铝反射镜三轴联动加工技术研究

肖建国¹, 姚同², 张万清¹, 刘尧¹, 罗宏¹,
李茂忠¹, 黄攀¹, 康杰¹, 张若寅¹

(1. 云南北方光学科技有限公司, 云南 昆明 650200; 2. 昆明理工大学 机电工程学院, 云南 昆明 650500)

摘要: 为解决单点金刚石车削技术 (single-point diamond turning, SPDT) 应用于大口径大弦高非球面铝反射镜加工中遇到的车床导轨行程、工作台回转容积受限和加工质量较低的问题, 针对 $\phi 682$ mm 口径、弦高 220 mm 的凹非球面铝反射镜加工, 首先, 提出基于 SPDT 的三轴联动加工方法, 在两轴加工基础上加入旋转 B 轴进行协同加工, 使得导轨行程和工作台回转容积能够满足加工需求。然后, 设计专用笼状夹具, 并通过有限元法研究支撑杆数量、杆径、上下连接板厚度参数对夹具-工件形变特征的影响, 通过极差和方差分析研究不同因素对夹具-工件最大变形量影响的显著性, 得到一组最佳夹具设计参数组合, 即夹具支撑杆数量为 24, 杆径为 22 mm, 上下连接板厚度为 25 mm。最后, 将铝反射镜固定在优化后的笼状夹具上, 通过三轴联动加工实现了对 $\phi 682$ mm 口径非球面铝反射镜的加工。对调刀件的检测结果表明: 调刀件面形精度 P_v 值为 $0.6 \mu\text{m}$, 表面粗糙度 R_a 约为 10.1 nm, 可认为 $\phi 682$ mm 口径非球面铝反射镜的面形精度和表面粗糙度均达到使用要求。本研究能够为同类大口径大弦高非球面反射镜的加工提供一定的理论基础和加工工艺技术参考。

关键词: 大口径反射镜; 单点金刚石车削; 三轴联动加工; 表面质量

中图分类号: TH706 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-8891(2021)09-0829-07

Study on Machining Technology of Large Aspheric Aluminum Reflector with Three Axis Linkage

XIAO Jiaoguo¹, YAO Tong², ZHANG Wanqing¹, LIU Yao¹, LUO Hong¹, LI Maozhong¹,
HUANG Pan¹, KANG Jie¹, ZHANG Ruoyin¹

(1. Yunnan KIRO Photonics Co., Ltd, Kunming 650200, China;

2. Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: To solve the problem of single point diamond turning(SPDT), technology was used for the processing of large diameter and chord height aspheric aluminum mirrors, which have the problems of limited lathe guide stroke, limited rotary volume of worktable, and low processing quality. To process a concave aspheric aluminum mirror with a diameter of $\phi 682$ mm and a chord height of 220 mm, first, a three-axis linkage processing method based on SPDT was proposed, which adds rotary b-axis on the basis of two-axis processing, such that the guide rail travel and table rotation volume can meet the processing requirements. Then, the special cage fixture was designed, and the influence of the number of supporting rods, the diameter of supporting rods, and the thickness of upper and lower connecting plates on the jig-work piece deformation characteristics were examined using the finite element method. The influence of different factors on the maximum deformation of jig and work piece was evaluated via range and variance analysis. A set of optimal jig design parameters was obtained, that is, the number of jig support rods was 24, the diameter of the rods was 22 mm, and the thickness of the upper and lower connecting plates was 25 mm. Finally, the aluminum mirror was fixed on the optimized cage clamp, and the processing of the $\phi 682$ mm

aspheric aluminum mirror was realized through three-axis linkage processing. The test results show that the surface accuracy P_v of the tool adjusting part was $0.6 \mu\text{m}$, and the surface roughness Ra was approximately 10.1 nm . It can be considered that the surface accuracy and surface roughness of the $\phi 682 \text{ mm}$ aspheric aluminum mirror can meet the requirements. This study can provide a theoretical basis and technological reference for the processing of the same type of large aperture and high chord aspheric mirror.

Key words: large aperture mirror, single point diamond turning, three axis linkage machining, surface quality

0 引言

金属反射镜广泛应用于空间光学、天文观测、高能激光以及太阳模拟器光学系统等领域。随着大型空间光学遥感技术的快速发展,对光学系统中反射镜分辨率的要求不断提高,导致其焦距、视场角、口径不断增大,对其面形精度和表面质量的要求也越来越高,使得大口径反射镜的加工难度日益增加^[1-3]。

针对大口径反射镜加工技术的研究,许多学者提出多种加工方法。Horst 等人^[4]通过直接抛光法对超精密加工后的铝反射镜进行抛光,可获得较低的表面粗糙度和更高的面形精度,但加工效率低,对复杂面形光学反射镜加工精度难以保证。姜伟等人^[5]研究大口径反射镜化学镀镍-磷合金工艺及质量控制方法,但该方法容易引起镀层变形、起皮、开裂等现象。孟晓辉等人^[6]提出应用旋转法实现大口径反射镜零重力面形加工,提出基于重力卸载的高精度旋转检测工艺。孙熠璇等人^[7]提出适应于大口径反射镜高精度光学加工的重力卸载优化方法,并通过有限元法对多点主动支撑式重力卸载进行参数优化。马文静等人^[8]采用有限元方法对大口径反射镜的夹持力进行优化,以避免由装夹变形引起附加变形,实现反射镜低应力夹持。随着单点金刚石切削技术迅速发展,工件可以获得亚微米级的面形精度和纳米级的表面粗糙度,还可对铜、铝、硅、锗等材料加工出“镜面”级表面质量,因此广泛应用于大口径反射镜加工^[2]。

单点金刚石车床加工大口径非球面反射镜时,若工件凹面深度超过车床 Z 轴导轨行程的一半,基于车床导轨位置配置的关系,加工中刀具工作台就容易与工件发生干涉,若工件口径过大就会受到工作台台面回转容积的限制。在这两种情况下,常规的两轴加工模式不能对大口径非球面反射镜进行加工。此外,合适的装夹方式及夹具是保证反射镜加工精度和加工质量的重要前提条件。目前,常用的大口径反射镜的夹具为筒状夹具,即反射镜通过螺栓连接固定于筒状夹具内进行切削加工,但由于反射镜的口径不断增大,所需夹具尺寸也随之增大,筒状夹具自身重量增加、装夹不牢固,使得工件加工变形增大。

针对单点金刚石车削技术应用于大口径非球面铝反射镜加工过程中遇到的车床导轨行程和工作台面回转容积受限以及加工质量较低的问题,本文提出适用于大口径非球面反射镜三轴联动加工方法,通过坐标变换原理将常规两轴联动加工坐标转换为三轴加工坐标,并编制数控程序,以解决车床导轨行程和工作台面回转容积受限问题;然后为提高大口径铝反射镜加工表面质量,通过三维软件 UG 设计专用笼状夹具,结合有限元法,研究夹具参数(支撑杆数量、杆径、上下连接板厚度)对夹具-工件变形的影响,通过极差和方差分析得到最优夹具参数组合,实现低应力夹持。最后,利用三轴联动加工方法对口径为 $\phi 682 \text{ mm}$ 的非球面铝反射镜进行加工。

1 大口径非球面铝反射镜加工过程

本文对大口径非球面铝反射镜的加工技术进行研究。首先提出单点金刚石车床三轴联动加工方法,以满足大口径、大弦高金属反射镜的加工需求。然后对夹具进行设计并优化,使得夹具在满足装夹条件的前提下,减小整体变形,从而降低由于装夹变形对加工后工件面形精度和表面粗糙度产生的影响。

1.1 非球面方程

本研究对大口径非球面铝反射镜进行单点金刚石切削,工件口径为 $\phi 682 \text{ mm}$,非球面参数透镜顶点处曲率 c 为 0.0043 ,非球面圆锥曲线系数 k 为 -0.8751 。反射镜尺寸示意图如图 1 所示。

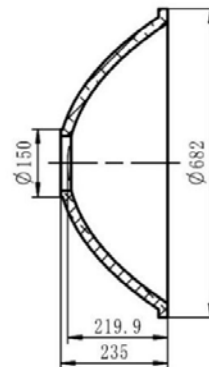


图1 非球面铝反射镜几何参数图

Fig.1 Geometric parameter diagram of an aspheric aluminum mirror

反射镜非球面方程为:

$$Z(x) = \frac{cx^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2x^2}} + \sum_{i=2}^n A_{2i}x^{2i} \quad (1)$$

式中: c 为透镜顶点处曲率; k 为非球面圆锥曲线系数; Z 轴为非球面旋转轴, 即光轴; x 为垂直于光轴方向长度; $A_{2i}x^{2i}$ 为非球面方程的高次项。

1.2 三轴联动加工方法

单点金刚石加工是目前常用的高精度金属反射镜的加工方法。通常情况下, 采用两轴联动加工方式即可实现对铝反射镜凹面的加工。然而, 本次研究对象为口径为 $\phi 682$ mm 的大口径铝反射镜, 反射镜凹面深度为 219.9 mm, 加工使用大型 MTC410 型单点金刚石车床, 机床结构示意图如图 2 所示, 机床采用 X/Z/B 三轴配置, 其 X/Z 轴行程均为 400 mm, 最大加工直径达到 $\phi 800$ mm, B 轴台面回转容积达到 $\phi 550$ mm。即便使用此大型单点金刚石车床, 受凹面深度、机床导轨行程及 B 轴台面回转容积等多方面的限制,

两轴联动加工方法不能对此大口径、大弦高铝反射镜进行加工。

因此, 为了实现此类非球面反射镜加工, 提出大口径、大弦高金属反射镜的三轴联动的加工方法, 将金属反射镜面形加工坐标从两轴联动加工的 X-Z 平面坐标转换为 X-Z-B 三轴联动加工坐标, 其中 β 为刀具旋转 B 轴的转动角度。加工示意图如图 3 所示。该方法通过 B 轴旋转, 可有效解决机床导轨行程及可旋转工作台台面回转容积受限的问题, 可实现对超出导轨行程的大口径工件进行加工, 同时能够提高加工效率, 降低加工成本。该三轴联动的加工方法已申请发明专利^[9]。

三轴联动加工方式的关键技术之一是实现 X-Z 坐标到 X-Z-B 坐标的变换。本文对坐标变换的原理进行了数学建模, 并编制了坐标变换程序。

坐标变换的基本原理如下: 首先基于给定的非球面方程相关参数, 计算出非球面加工表面的 X-Z 坐标, 即得到图 4 中 A_1 、 A_2 点坐标 (x_1, z_1) 、 (x_2, z_2) 。

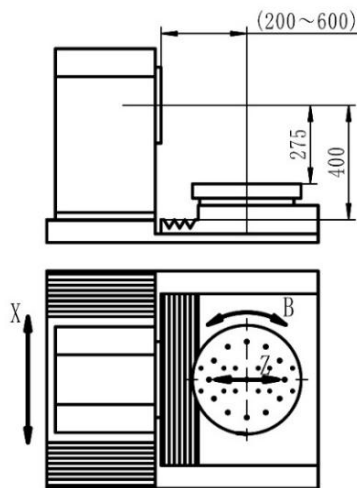


图2 机床结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of machine tool structure

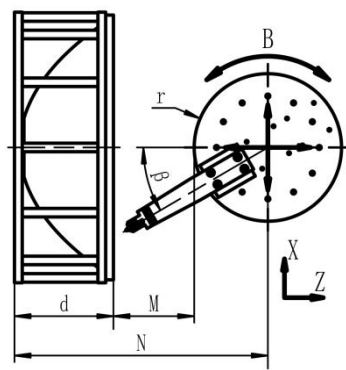


图3 三轴联动加工示意图

Fig.3 Schematic diagram of three axis linkage machining

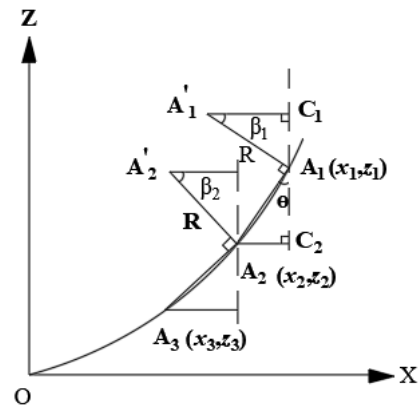


图4 坐标变换原理

Fig.4 Principle of coordinate transformation

由公式(2)可得 $\angle A_2A_1C_2$ 大小:

$$\theta = \arctan\left(\frac{x_1 - x_2}{z_1 - z_2}\right) \quad (2)$$

式中: θ 为 $\angle A_2A_1C_2$ 大小。

由三角形性质可知 $\angle A_1A_1'C_1 = \angle A_2A_1C_2$, 即 $\beta_1 = \theta$, 由公式(3)可得刀尖圆弧中心点 A_1' 的三轴加工坐标 $[X_1, Z_1, B_1]$ 。

$$\begin{aligned} X_1 &= x_1 - R \cdot \sin \beta_1 \\ Z_1 &= z_1 + R \cdot \cos \beta_1 \end{aligned} \quad (3)$$

式中: R 为刀尖圆弧半径。

由公式(4)可得刀具圆弧中心点在 A_1' 时, 刀具工

作台与工件上端面间的距离 M 。当 $M > 10$ mm 时, 夹具与刀具旋转台之间不会发生干涉。

$$M = L \cdot \cos \beta_1 + z_1 - r - d \quad (4)$$

式中: L 为刀具工作台中心点到刀尖的距离; r 为刀具工作台半径; d 为工件凹面深度。

由公式(5)可得刀具工作台中心点到工件中心的距离 N , 当 200 mm $< N < 600$ mm 时, 刀具工作台移动在机床行程内。

$$N = L \cdot \cos \beta_1 + z_1 \quad (5)$$

根据上述原理, 通过 MATLAB 编程软件可得全部刀尖圆弧中心点的三轴坐标以及各点处的 M 和 N 值。当 M 值大于安全距离, 且 N 值处于导轨行程,

则坐标变换成立。可根据铝反射镜的最佳拟合半径和刀具尺寸设定坐标系原点及随动变量参数值,将包含三轴加工坐标 $[X,Z,B]$ 的加工程序输入到单点金刚石车床数控系统进行加工。

1.3 夹具优化

由于工件和夹具尺寸过大,整体自重对加工变形的影响显著,因此需对夹具进行优化。首先,设计出针对大口径反射镜的专用笼状夹具,几何模型如图5所示,夹具由上下连接板和支撑杆组成,工件上下端面与夹具上下板使用螺栓连接,上下板之间由支撑杆连接。笼状夹具与筒状夹具相比,筒壁结构用支撑杆来代替,既能满足对工件的装夹要求,又减少了夹具自身重量,实现夹具轻量化。然后,基于有限元分析和正交试验方法,对笼状夹具进行参数优化,研究夹具支撑杆数量、直径以及上下连接板的厚度对工件变形的影响,通过方差分析和极差分析确定最佳夹具参数组合。

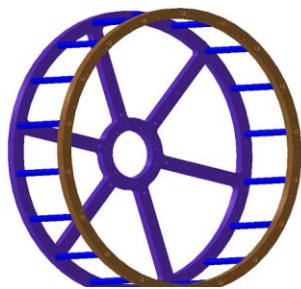


图5 夹具几何模型

Fig.5 Geometric model of fixture

采用 ANSYS Workbench 软件对夹具-工件几何模型进行前处理。首先,将几何模型进行简化,使用 sweep 划分网格,其网格质量为 0.77,网格划分后的满足有限元分析要求,夹具-工件有限元模型如图6所示。其次设置材料属性,定义夹具为不锈钢,工件为铝合金,材料参数如表1所示。再定义边界条件,固定主轴圆盘后端面,添加重力加速度,施加转速。最后,输出夹具-工件的应变云图。

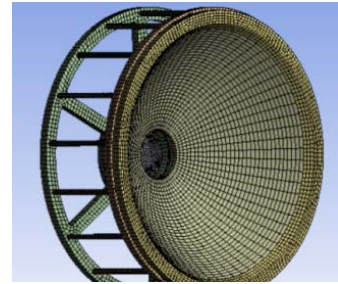


图6 夹具-工件有限元模型

Fig.6 Finite element model of fixture work piece

2 结果与讨论

2.1 坐标变换

通过非球面方程参数计算出非球面上等步距点的坐标,即得到加工铝反射镜两轴加工坐标 $[X,Z]$,通过上述坐标变换原理,将坐标 $[X,Z]$ 转换为三轴加工坐标 $[X,Z,B]$,坐标变换结果如表2所示。经计算, M 最小值为 12.74 mm, N 最大值为 468.79 mm,均满足机床加工要求。

表1 材料参数

Table 1 Material parameters

Material	Density/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	Young modulus/(GPa)	Poisson ratio	Coefficient of thermal expansion
Aluminum alloy	2770	71	0.33	23
Stainless steel	7750	193	0.31	17

表2 坐标变换结果

Table 2 Coordinate transformation results

Coordinate point	X-coordinate/mm	Z-coordinate/mm	Tool rotation angle- β /°
A_1	310	219.878377	
A_1'	308.75	220.71	56.54
A_2	309.9	219.727043	
A_2'	308.65	220.55	56.53
A_3	309.8	219.575771	
A_3'	308.55	220.40	56.52
A_4	309.7	219.424562	
A_4'	308.45	220.25	56.51
A_5	309.6	219.273416	
A_5'	308.35	220.10	56.50
...	

2.2 夹具优化结果

本研究采用 $L_9(3^4)$ 正交表进行夹具优化实验, 夹具参数如表 3 所示。分析结果如表 4 所示。

表 3 夹具参数

Factors	Code	Level		
		1	2	3
Support rod number N	A	12	18	24
Support rod diameter R /(mm)	B	12	22	26
Plate thickness T /(mm)	C	15	20	25
Spindle speed n /(r/min)		200		

表 4 正交实验方案及结果

NO.	Support rod	Support rod	Plate	Max total
	number	diameter	thickness	deformation
	N	R /mm	T /mm	D /mm
1	12	12	15	0.49531
2	12	22	20	0.31924
3	12	26	25	0.28334
4	18	12	20	0.42477
5	18	22	25	0.30412
6	18	26	15	0.35454
7	24	12	25	0.39917
8	24	22	15	0.41238
9	24	26	20	0.36372

最大变形量随支撑杆数量、直径以及上下连接板厚度的变化趋势如图 7 所示, 最大变形量随支撑杆数量的增加先增大后减小。这是由于杆数过少会使工件固定不稳定, 整体强度较弱, 导致变形量增大; 杆数过多将增加整体重量, 在加工过程中, 自重引起的加工变形将成为主要因素。最大变形量随支撑杆直径和连接板厚度的增加而减小, 杆径和壁厚的增加使得夹具强度增加, 固定工件更加牢固, 使得变形量减小。由图 7 可知, 当杆径由 22 mm 增加到 26 mm 时, 最大变形量仅发生微弱的变化, 这是由于杆径的增加在使夹具强度增加的同时增加了自身的重量。因此最终选择支撑杆直径为 22 mm。最大变形量随连接板厚度的增加显著减小, 因此, 应选择板厚为 25mm。

对正交实验中最大变形量进行方差分析, 探究各夹具参数对最大变形量的影响程度, 表 5 为离差平方和 SS 、自由度 df 、均方 MS 、显著性 F 以及贡献度 (Contribution) 的统计量结果。可以看出, 影响因素 B 、 C 的显著值 F 较大, 并且贡献率分别到 52.6% 和

31.6%, 说明杆径和连接板厚度对装夹变形的影响最大; 支撑杆的数量对变形量的影响最小, 其贡献率为 0.7%。这表明支撑杆的数量在 12~24 之间时, 其对变形量的影响最小。

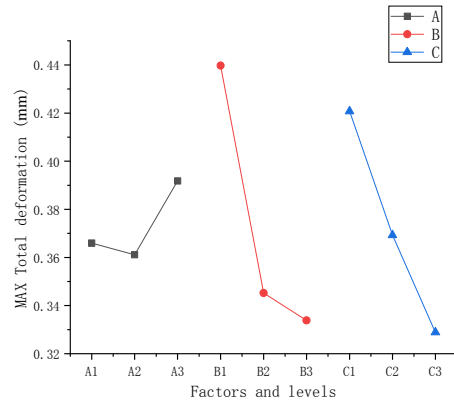


图 7 最大变形量随各参数变化趋势

Fig.7 The variation trend of maximum deformation with various parameters

表 5 表面粗糙度的方差分析

Variation source	SS	df	MS	F	Contribution/%
A	0.002	2	0.001	1.198	0.7
B	0.020	2	0.010	14.935	52.6
C	0.013	2	0.006	9.372	31.6
Error	0.001	2	0.001		15.1
Sum	0.036	8	0.018		100

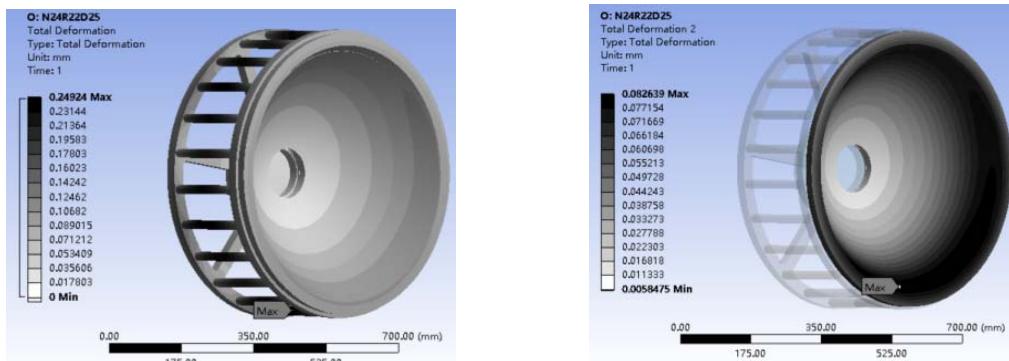
根据方差分析和极差分析最终确定最佳夹具参数组合, 即夹具支撑杆的数量为 24, 支撑杆的直径为 22 mm, 上下连接板的厚度为 25 mm。图 8 为最佳夹具参数下, 夹具-工件的应变云图, 夹具和工件的变形最小。

2.3 加工实验结果

实验在 MTC410 单点金刚石车床上进行, 加工设备如图 9 所示, 首先将铝反射镜安装于设计好的夹具中, 将反射镜通过螺钉连接固定于顶板, 并使其底部与夹具底板抵靠连接。再将整体通过螺栓连接固定于机床主轴。其次, 将变换后的 $[X,Z,B]$ 三轴加工坐标程序导入机床程序系统, 根据铝反射镜安装位置以及最佳拟合半径和刀具尺寸, 设定加工坐标系原点。根据加工经验采用工件转速 200 r/min, 进给率 4 mm/min, 设定刀具工作台能够进行实时的平面移动和旋转, 对工件进行加工。在单点金刚石非球面车削加工领域, 最常用的加工面形精度 P_v 及表面粗糙度 R_a 检测设备

为英国 Taylor Hobson 公司生产的 PGI 系列接触式轮廓检测仪。在本次加工中,使用该系列 PGI1240 型轮廓检测仪进行 P_v 及 R_a 测量。此轮廓仪最大测量口径 $\phi 200$ mm、最大测量弦高 12.4 mm,属于此型轮廓仪标准配置。由于工件尺寸过大(口径 $\phi 682$ mm,弦高 220 mm),不能用该轮廓仪对工件进行直接检测。在我们加工实践中,对于工件直径或表面弦高超出轮廓仪测量范围的情形,通常采取局部测量外加可控的加工工艺过程来对工件最终加工精度进行控制,用此法加工出的产品多次在工程应用中得以成功验证,取得预期效果。对于能够直接测量工件局部的情形,在轮

廓仪测量范围内对工件进行直接的局部加工精度测量,来对工件整体加工精度进行预测、控制;对于不能进行直接测量的工件,在轮廓仪测量范围内设计一个面形相同但口径小的调刀件,通过加工、测量和控制调刀件加工精度,来对实际工件加工精度进行预测、控制。在本次加工中,即是通过一个 $\phi 82$ mm 的调刀件对实际工件进行加工精度控制。对口径为 $\phi 82$ mm 的调刀件进行加工、检测,表面粗糙度值 R_a 约为 10.1 nm,面形精度 P_v 约为 0.6 μm 。检测结果如图 10 所示。



(a) 夹具应变云图 (b) 工件应变云图
(a) Fixture strain nephogram (b) Work piece strain nephogram

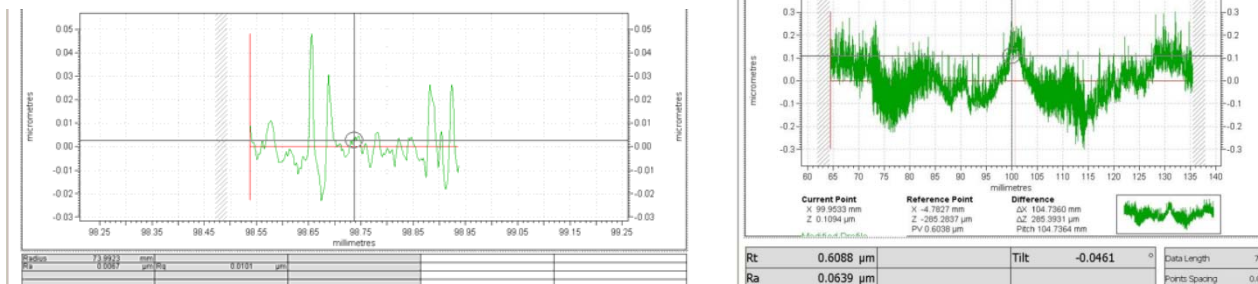
图 8 夹具和工件应变云图

Fig.8 Strain nephogram of fixture and work piece



图 9 $\phi 682$ mm 非球面铝反射镜加工设备

Fig.9 $\phi 682$ mm aspheric aluminum mirror processing equipment



(a) 工件表面粗糙度 $R_a=10.1$ nm (b) 工件面形精度 $P_v=0.6088$ μm
(a) Surface roughness $R_a=10.1$ nm (b) Surface accuracy $P_v=0.6088$ μm

图 10 非球面铝反射镜加工精度检测

Fig.10 Machining accuracy test of aspheric aluminum mirror

3 结论

本文通过三轴联动加工方法对大口径非球面铝反射镜进行了单点金刚石车削,并对工件夹具进行了设计及参数优化。论文主要结论如下:

1) 提出三轴联动加工方法,根据坐标变换原理,将水平 $X-Z$ 两轴加工坐标转换为水平 $X-Z$ 两轴以及刀具旋转的 B 轴的三轴加工坐标 $[X,Z,B]$,解决了车床导轨行程和工作台台面回转容积受限问题,突破了单点金刚石车床加工大口径、大凹深非球面金属反射镜的难题。

2) 设计大口径反射镜笼状夹具并分析夹具参数对整体变形的影响,结果表明,杆数对夹具最大变形量的影响最小,贡献率为 0.7%;杆径和连接板厚度的贡献率分别为 52.6% 和 31.6%。经过优化后的夹具参数组合为支撑杆的数量为 24,支撑杆的直径为 22 mm,上下连接板的厚度为 25 mm。夹具最大变形量约为 0.249 mm,工件最大变形量约为 0.083 mm。

3) 利用三轴联动加工方法对口径为 $\phi 682$ mm 的非球面铝反射镜进行加工,对于 $\phi 82$ mm 的调刀件,表面粗糙度 R_a 可达到 10.1 nm,面形精度 P_v 可达到 0.6 μm 。所加工的 $\phi 682$ mm 非球面铝反射镜产品达到用户使用要求。

参考文献:

[1] 陈达任,李占杰,靳刚,等.金属反射镜超精密加工研究进展[J].机械研究与应用,2018,31(1):159-163.
CHEN Daren, LI Zhanjie, JIN Gang, et al. Review on Ultra-Precision machining of metal reflector[J]. *Mechanical Research & Application*, 2018, 31(1): 159-163.

[2] 谢启明,杨静,徐放,等.金属非球面反射镜的加工和检测技术[J].红外技术,2015,37(2):119-123.
XIE Qiming, YANG Jing, XU Fang, et al. Manufacturing and test technology for metal aspherical reflector[J]. *Infrared Technology*, 2015, 37(2): 119-123.

[3] 李全超,李蕾,谭淞年,等.大口径铝合金主反射镜设计与分析[J].应用光学,2016,37(3):337-341.
LI Quanchao, LI Lei, TAN Songnian, et al. Design and analysis for large aperture primary aluminum mirrors[J]. *Journal of Applied Optics*, 2016, 37(3): 337-341.

[4] Horst R T, Tromp N, MD Haan, et al. Directly polished lightweight aluminum mirror[C]//*Advanced Optical & Mechanical Technologies in Telescopes & Instrumentation. International Society for Optics and Photonics*, 2008: 701808-701808-10.

[5] 姜伟,申德新,王立波,等.大口径光学反射镜化学镀镍工艺及质量管理[J].电镀与涂饰,2008(10):13-16.
JIANG Wei, SHEN Dexin, WANG Libo, et al. Process and quality management of electroless nickel-phosphorus alloy plating on large-aperture optical reflection mirror[J]. *Electroplating & Finishing*, 2008(10): 13-16.

[6] 孟晓辉,王永刚,李文卿,等.应用旋转法实现大口径非球面反射镜零重力面形加工[J].光学精密工程,2019,27(12):2517-2524.
MENG Xiaohui, WANG Yonggang, LI Wenqing, et al. Fabrication of zero-gravity surface for large-aperture aspherical mirror by using rotationally method[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2019, 27(12): 2517-2524.

[7] 孙熠璇,罗世魁,高超,等.大口径空间反射镜的重力卸载优化方法[J].红外与激光工程,2021,50(1):279-287.
SUN Yixuan, LUO Shikui, GAO Chao, et al. Optimization method for large-aperture space mirror's gravity unload[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(1): 279-287.

[8] 马文静,徐振源,曹庭分,等.大口径反射镜低应力夹持优化设计[J].中国激光,2020,47(11):187-192.
MA Wenjing, XU Zhenyuan, CAO Tingfen, et al. Optimal design of low-stress mounting for large aperture mirror[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(11): 187-192.

[9] 肖建国,张万清,刘尧,等.金属反射镜的三轴联动加工方法[P].中国,20171460886.8,2020.
XIAO Jianguo, ZHANG Wanqing, LIU Yao, et al. Three-axis linkage processing method of metal reflector[P]. China, 20171460886.8, 2020.