

文章编号 1004-924X(2019)12-2564-07

微晶材质自由曲面反射镜精密超声铣磨加工技术

徐领娣*, 房安利, 于建海, 张继友, 李 昂

(北京空间机电研究所 国防科技工业光学超精密加工技术创新中心(先进制造类)、
中国航天科技集团有限公司光学部件制造工艺技术中心, 北京 100096)

摘要:自由曲面光学元件与球面和非球面光学元件相比能够提供更高的光学设计自由度,应用于成像光学系统有利于简化系统结构和改善系统质量,在新一代空间光学遥感领域具有广阔的应用前景。为了满足离轴反射式自由曲面空间光学遥感系统的快速、高精度研制需求,本文瞄准微晶材质、复杂连续曲面类自由曲面反射镜超声铣磨加工表面粗糙度和亚表面质量的提升目标,开展了主轴转速、切削深度、进给量等主要工艺参数的优化实验和研究,完成了 300 mm 口径自由曲面反射镜的建模分析和超声铣磨加工,最终铣磨加工表面的面形精度达 $8.89 \mu\text{m PV}$,亚表面损伤层深度低于 $18 \mu\text{m}$,实现了自由曲面光学反射镜的高精度、低损伤铣磨加工,能够有效降低后续研抛加工的材料去除总量,缩短整个加工周期。

关键词:光学加工;自由曲面;超声铣磨;工艺参数优化;表面粗糙度;微晶

中图分类号: TG580.67 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20192712.2564

Ultrasonic-vibration assisted grinding of a zeroed freeform optical mirror

XU Ling-di*, FANG An-li, YU Jian-hai, ZHANG Ji-you, LI Ang

(*Optical Ultraprecise Processing Technology Innovation Center for
Science and Technology Industry of National Defense(Advanced Manufacture),
Optical Elements Fabrication Technology Center of China Aerospace Science and Technology
Corporation, Beijing Institute of Space Mechanics and Electricity, Beijing 100096, China*)

* Corresponding author, E-mail: xuldi@126.com

Abstract: Freeform optics are greatly in demand for use in next-generation space cameras for achieving higher optical design freedom as compared with the commonly used spherical and aspherical elements. Freeform optics have the advantages of excellent optical performance and simplified system structure. The development of optical remote sensing technology imposes higher requirements on these optics. Therefore, a series of optimization procedures of grinding process parameters for zeroed mirrors were conducted, and the grinding of a 300 mm aperture freeform mirror was completed using the optimized process parameters. The results show that the surface figure of the mirror increases to $8.89 \mu\text{m PV}$, and the depth of the subsurface damage layer reduces to less than $18 \mu\text{m}$. Realizing high precision and low damage grinding of freeform optics is of great significance for reducing the workload of subsequent lapping and polishing.

收稿日期:2019-08-14;修订日期:2019-09-19.

基金项目:航天科技集团共性工艺研究项目(No. GXGY20190501);国家自然科学基金资助项目(No. 41423020216)

Key words: optical fabrication; freeform; ultrasonic-vibration assisted grinding; process parameters optimization; subsurface damage; zerodour

1 引言

随着光学设计理念的创新和光学加工检测工艺水平的不断提升,光学系统的综合性能不断提高。高端成像光学系统的主光学元件表面经历了球面、非球面、非球面子孔径及自由曲面的优化过程,这同时也是光学设计自由度不断放开的过程。其中,自由曲面具有非回转对称结构形式,设计自由度非常高,设计过程中能够根据需求灵活地设定控制表面每一条光线的出射角度和方向,从而有效提升光学系统的像差平衡能力,还可提供灵活的空间布局,利于简化光机系统结构^[1-4]。目前,自由曲面反射镜在高性能空间光学相机中的应用越来越多,基于自由曲面的离轴反射式光学系统可以获得更大的成像视场,提升遥感器的成像质量,避免采用多台相机视场拼接带来的制造成本和发射成本的剧增^[5-9]。然而,一般空间用自由曲面反射镜面形复杂,加工精度和加工效率要求高,导致其应用受到限制。

中、大口径脆性材质的自由曲面反射镜数控加工过程一般可分为精密铣磨成型、精密研磨、快速抛光和精抛光几个工序,在加工过程中加工表面面形和表面/亚表面质量逐步收敛。其中,精密铣磨成型是第一道工序,也是材料去除量最多的一道工序,其光学表面的成型精度、表面粗糙度和亚表面损伤层厚度直接决定了后续精密研磨工序的材料去除量,对整个反射镜产品的加工迭代次数和时间有很大影响。在精密铣磨成型工序引入超声辅助铣磨技术可以降低铣磨加工产生的切削力及砂轮的磨损速度,进而提高加工精度和效率。但是,复杂面形微晶反射镜的超声铣磨加工表面刀痕明显和亚表面损伤层深度较大,工艺参数依然存在较大的优化空间。

本文为了满足微晶材质自由曲面反射镜的高精度、快速光学加工需求,开展了一系列超声辅助铣磨工艺优化研究,进一步提高了自由曲面光学表面高精度铣磨成型时的表面粗糙度和亚表面质量,并完成了 300 mm 口径自由曲面反射镜的超声铣磨加工验证。

2 自由曲面概念及表征

光学自由曲面是非传统光学曲面,不具备全局的旋转对称性,没有统一的光轴,通常无法由球面或非球面系数来描述,广义上包括以下几类:(1)没有旋转对称轴的复杂非常规连续曲面;(2)非连续有面形突变的曲面;(3)非球面度很大的曲面^[9-10]。其中,没有旋转对称轴的复杂非常规连续自由曲面在空间光学成像领域中具有重要的应用价值,也是本文研究的主要对象。这类自由曲面的数学表达式并不唯一,常用的有基于二次曲面的 Zernike 多项式、XY 多项式和 Gauss 多项式等,分别如式(1)、(2)和(3)所示:

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + \sum_{i=1}^8 a_i r^{2i} + \sum_{i=1}^N A_i Z_i(\rho, \varphi), \quad (1)$$

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + \sum_{j=2}^{66} c_j x^m y^n$$

(其中 $j = [(m+n)^2 + m + 3n]/2 + 1$), (2)

$$z(x, y) = \frac{c(x^2 + y^2)}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2(x^2 + y^2)}} + \sum_i \varphi_i(x, y) \omega_i. \quad (3)$$

上述表达方式各有优缺点,Zernike 多项式在单位圆上正交,与 Seidal 像差具有对应关系,广泛应用于波前分析和系统像差评价等方面;XY 多项式具备较强的像差校正能力,常用于设计离轴非对称自由曲面光学系统,在空间成像光学系统中有较多应用。

相对接近的二次非球面来说,一般大视场空间光学遥感用自由曲面反射镜的表面曲率变化率相对较大,拐点更多,因此研抛加工过程中研抛盘和加工表面的吻合度会有所下降,导致面形收敛效率损失或需要采用更小的研抛盘来吻合加工表面。这种情况下,提高自由曲面的铣磨加工表面粗糙度和面形精度,降低亚表面损伤,对于实现高效研抛加工具有重要意义。

3 微晶材料曲面反射镜的高精度铣磨工艺优化

为了实现复杂光学表面的高精度、低损伤铣磨成型,在 1 m 级超声铣磨加工中心上进行了微晶反射镜的铣磨加工工艺优化实验。本次实验中,以加工表面粗糙度和磨削力作为工艺评价指标。其中,表面粗糙度是表征加工表面质量的关键指标,而磨削力是判定一个工件铣磨加工质量的重要指标,它决定了工件加工后的内应力,也与加工工件的亚表面损伤状况有直接关系。亚表面损伤层厚度的测试方法为损伤测试方法,而磨削力则是可以在产品加工过程中实时监测的指标。

3.1 铣磨工艺参数对加工表面粗糙度的影响

瞄准超声铣磨加工表面粗糙度提升目标开展了一系列铣磨加工工艺参数优化实验,重点研究了主轴转速、进给量、磨削深度三项主要工艺参数对于加工表面粗糙度的影响规律。

3.1.1 切削深度对加工表面粗糙度的影响

在 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 的实验室环境下,固定主轴转速 r 为 5 000 r/min,进给速度 f 为 250 mm/min,超声振幅 A 为 50%,分别采用不同的磨削深度参数(5, 10, 20, 30, 50, 100 μm)对一批小口径微晶材质反射镜进行超声铣磨加工,然后对这些反射镜的加工表面粗糙度 R_a 值进行检测。测量表面粗糙度所采用的设备为高精度轮廓仪(以下同)。实验结果如图 1 所示。

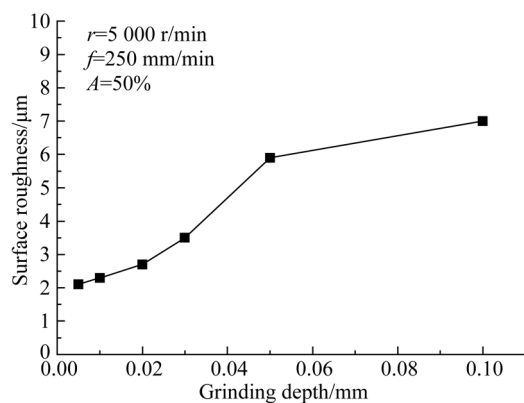


图 1 超声铣磨加工表面在不同磨削深度下的表面粗糙度
Fig. 1 Surface roughness of ultrasonic assisted grinding surface under different grinding depths

图 1 显示了在固定其它工艺参数的情况下不同磨削深度对加工表面粗糙度的影响规律。不难看到,随着磨削深度的增加,加工表面的粗糙度逐渐增大;在磨削深度小于 0.03 mm 时,表面粗糙度变化较为缓慢, R_a 值在 2~3 μm 之间,其后表面粗糙度的变化率迅速增大。所以,在铣磨加工效率可接受的情况下,为得到较好的加工表面质量,在进行工艺参数优选时应选取尽量小的磨削深度。

3.1.2 进给量对加工表面粗糙度的影响

在 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 的实验室环境下,固定主轴转速 r 为 5 000 r/min,切削深度为 5 μm ,超声振幅 A 为 50%,分别采用不同的进给量参数(60, 150, 250, 330, 420, 510 mm/min)对一批小口径微晶材质反射镜进行超声铣磨加工,然后对这些反射镜的加工表面粗糙度 R_a 值进行轮廓检测,其实验结果如图 2 所示。

从图 2 中可以看出,在切削深度比较小的情况下,铣磨加工表面粗糙度随着进给量的增加而变大,但幅度有限,也就是说进给量对加工表面粗糙度的影响不是很大。

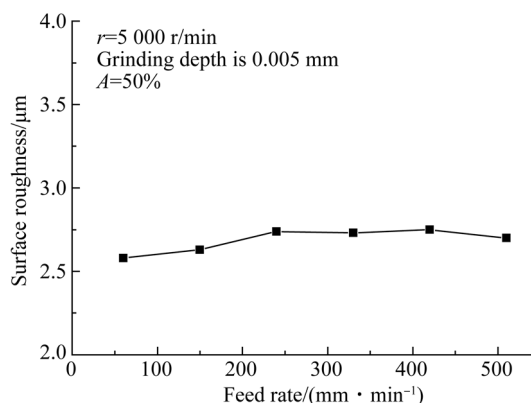


图 2 超声铣磨加工表面在不同进给量下的表面粗糙度
Fig. 2 Surface roughness of ultrasonic assisted grinding surface under different feed rates

3.1.3 主轴转速对加工表面粗糙度的影响

在 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 的实验室环境下,采用不同的主轴转速对微晶材质反射镜样品进行超声铣磨加工,并对加工表面粗糙度进行轮廓检测,主要加工工艺参数如下:磨削深度为 10 μm ;主轴转速为 1 500, 2 500, 3 500, 4 500, 5 500, 6 500 r/min;进给量为 250 mm/min;超声振幅为 50%。实验结

果如图 3 所示,主轴转速低于 5 000 r/min 时,加工表面的粗糙度随主轴转速的增大略有减小;在主轴转速为 6 500 r/min 时,加工表面粗糙度突然增大,这是因为当主轴转速增大到一定值时砂轮边缘的运动稳定性会降低。

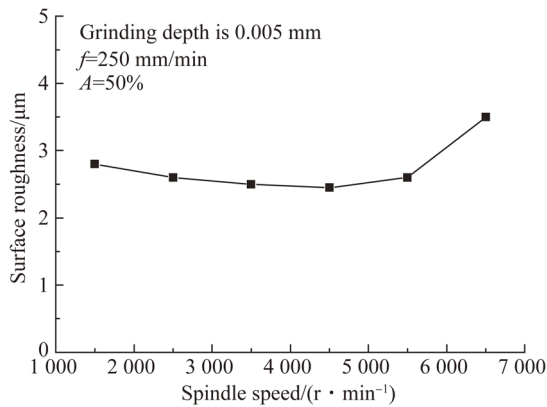


图 3 超声铣磨加工表面在不同主轴转速下的表面粗糙度

Fig. 3 Surface roughness of ultrasonic assisted grinding surface under different spindle speeds

3.2 铣磨工艺参数对切削力的影响

在 3.1 节实验基础上,开展了铣磨加工工艺参数的正交实验,获得了不同工艺参数组合情况下的切向磨削力(F_x 和 F_y)和垂直加工表面方向的磨削力(F_z),实验数据如表 1 所示。其中,测量磨削力所用到的仪器是压电陶瓷测力仪,超声振幅 A 设为 50%。

表 1 超声铣磨过程中切向和法向磨削力
Tab. 1 Cutting forces in grinding process

序号	磨削深度/mm	进给量/(mm · min ⁻¹)	主轴转速/(r · min ⁻¹)	F_x /N	F_y /N	F_z /N
1	0.005	50	4 500	1.3	0.9	292
2	0.005	150	5 500	1.6	0.4	361
3	0.005	250	6 500	1.8	0.3	341
4	0.010	50	5 500	1.3	0.3	350
5	0.010	150	6 500	2.5	0.9	342
6	0.010	250	4 500	3.2	1.1	352
7	0.015	50	6 500	3.2	0.5	370
8	0.015	150	5 500	4.8	0.8	341
9	0.015	250	4 500	4.1	1.0	366

根据表 1 对三个方向的磨削力检测结果进行分析,可以得出磨削深度、主轴转速这两个因素对磨削力的影响比较大,进给量在选取的工艺范围内对切削力的影响相对较小。

4 自由曲面反射镜加工

4.1 自由曲面反射镜

加工试验采用口径为 300 mm × 200 mm 的自由曲面微晶反射镜。该反射镜为 6 阶 XY 多项式曲面,表达式如式(4)所示:

$$z(x, y) = \frac{c(x^2 + y^2)}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2(x^2 + y^2)}} +$$

$$A_2 y + A_3 x^2 + A_5 y^2 + A_7 x^2 y + A_9 y^3 + A_{10} x^4 +$$

$$A_{12} x^2 y^2 + A_{14} y^4 + A_{16} x^4 y + A_{18} x^2 y^3 +$$

$$A_{20} y^5 + A_{21} x^6 + A_{23} x^4 y^2 + A_{25} x^2 y^4 + A_{27} y^6, \quad (4)$$

其中: z 为曲面矢高; $c = -1/800$,为曲面曲率; $k = 7.468\ 546\ 473\ 753\ 27 \times 10^{-2}$,为二次曲面系数; A_i 是多项式中第 i 项的系数,由于它所在光学系统关于子午面对称,因此有关 x 的奇次项系数为 0。

采用 matlab 软件对该自由曲面的最佳拟合非球面进行了计算,得到该自由曲面与最佳拟合非球面的偏离量最大为 0.32 mm,图 4 给出了该自由曲面与最佳拟合离轴非球面的偏离量。

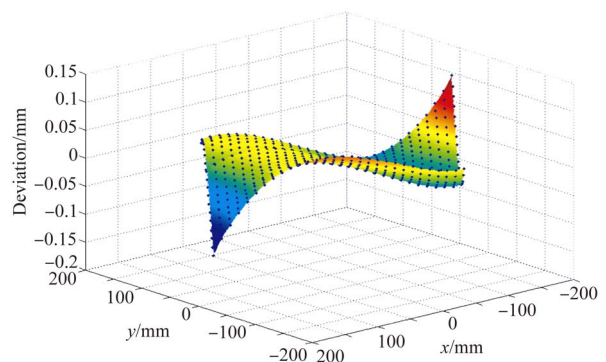


图 4 最接近二次离轴非球面的偏离量(0.32 mm PV)

Fig. 4 Deviation between measured figure and second off-axis aspherical surface

4.2 加工试验及结果

五轴连动超声铣磨加工中心完成了上述自由曲面反射镜的铣磨加工(如图 5 所示)。从优化超

声铣磨加工元件的表面和亚表面质量来说,最终铣磨加工表面的粗糙度和切削力越小越好,但根据工程生产需求,还要兼顾铣磨加工时间,越短越好。因此实际生产过程中,需要综合考虑铣磨加工的效率和质量,因此对 300 mm×200 mm 口径反射镜进行精密超声铣磨加工时,将铣磨工序分为粗铣和精密铣磨两个步骤。粗铣阶段以实现材料的快速去除为主,采用大的进给量和切削深度进行加工,目前此工艺非常成熟。

精密铣磨阶段采用五轴联动的超声铣磨加工中心,如图 5 所示。优选的工艺参数主要有:切削深度为 0.01 mm;主轴转速为 5 500 r/min;进给量为 250 mm/min;超声振幅为 50%。



图 5 自由曲面镜铣磨加工过程

Fig. 5 Grinding process of freeform mirror

加工完成后,采用计量级三坐标对自由曲面光学表面进行了面形检验,并应用 matlab 软件编写了专用程序对检验数据进行球头半径误差校正和面形误差的拟合,最终检测结果如图 7 所示,面形误差的 PV 值为 8.89 μm ,RMS 值为 1.35 μm 。



图 6 自由曲面镜三坐标面形检测过程

Fig. 6 Surface measurement of freeform mirror by CMM

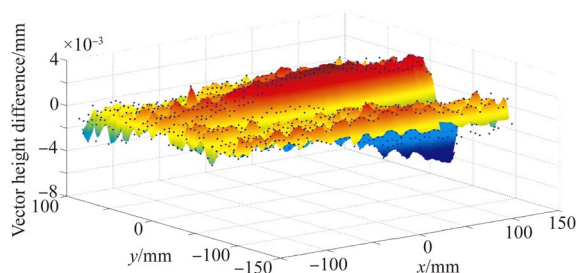


图 7 自由曲面镜加工面形检测结果

Fig. 7 Surface figure of freeform mirror after grinding

为了对自由曲面反射镜产品铣磨工序产生的亚表面损伤层深度进行评估,采用 N2 智能机械手研抛机对铣磨加工表面进行研抛加工,并应用 nanocam 工艺软件对每次研抛加工的表面去除深度(Floor 值)进行仿真计算。此表面去除深度参量指反射镜表面面形残差的最低点对应位置在研抛过程的去除深度。图 8 显示了该镜首轮研磨加工时的表面去除深度及仿真加工结果,图片左侧显示了加工后面形残差分布的仿真结果,右侧显示了表面去除深度为 -6 217.7 nm,该轮加工时间为 5 h 46 min 并且根据换班需要分 2 次加工完成。该仿真加工过程采用的研磨和抛光材料去除函数已经经过大量产品实际加工过程数据的修正,较为准确。

经过两轮研磨和三轮抛光后(表面去除深度 Floor 值分别为 -6.2, 2.0, 3.8, 2.6 和 2.3 μm),反射镜表面光洁度和表面粗糙度达到空间反射镜产品研制要求,此时理论上铣磨加工表面的亚表面损伤不大于研磨加工和抛光加工的表面去除深度的总和。通过每次加工去除深度相加结果得到,该镜实际铣磨加工的亚表面损伤层深度低于 18 μm 。

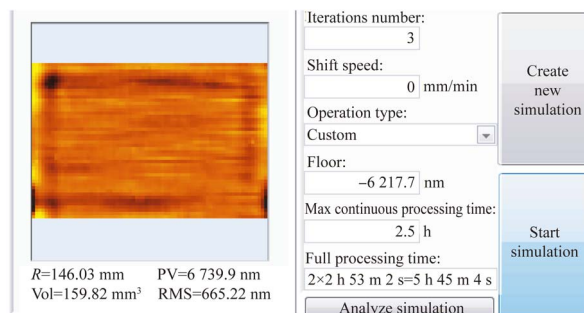
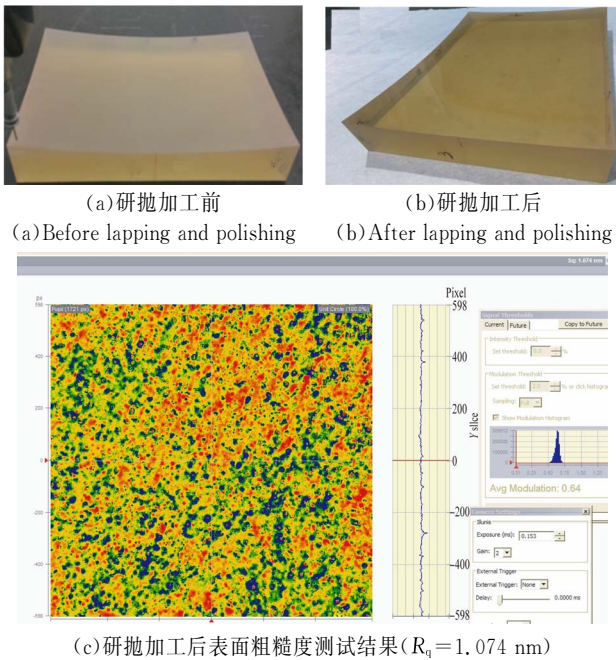


图 8 反射镜首轮研磨加工时的表面去除深度仿真结果

Fig. 8 Simulated floor depth during first round of lapping



(c) 研抛加工后表面粗糙度测试结果($R_q=1.074$ nm)
 (c) Surface roughness after lapping and polishing($R_q=1.074$ nm)
 图 9 自由曲面研抛加工前后的光学表面

Fig. 9 Optical surfaces of freeform mirror before and after lapping and polishing

参考文献:

- [1] YANG T, ZHU J, JIN G. Nodal aberration properties of coaxial imaging systems using zernike polynomial surfaces [J]. *JOSA A*, 2015, 32(5): 822-836.
- [2] JONATHAN C PAPA, JOSEPH M HOWARD, JAN-NICK P ROLLAND. Starting point designs for freeform four-mirror systems [J]. *Optic. Eng.*, 2018, 57(10): 101705.
- [3] 姚艳霞, 袁群, 陈露, 等. 结合面型和视场优化策略的自由曲面设计方法 [J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(10): 1018001-1.
- YAO Y X, YUAN Q, CHEN L, *et al.*. Freeform surface design method combined with surface and field-of-view optimization [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(10): 1018001-1. (in Chinese)
- [4] BRYAN D STONE, JOSEPH M HOWARD. Low-order aberration coefficients of systems with freeform surfaces [J]. *Optic. Eng.*, 2018, 57(10): 101702.
- [5] 刘振宇, 李龙响, 曾雪峰, 等. 大口径非球面反射镜误差分离组合加工技术 [J]. *光学精密工程*, 2017, 25(4): 814-816.
- LIU Z Y, LI L X, ZENG X F, *et al.*. Fabrication of large aspheric mirror using multi-mode polishing based on error separation [J]. *Opt. Precision*

5 结 论

本文针对微晶材质、没有旋转对称轴的复杂连续曲面类自由曲面反射镜,开展了部分铣磨工艺参数优化研究,并实现了 300 mm 口径自由曲面反射镜的高精度、低损伤铣磨加工,最终加工表面的面形精度达 $8.89 \mu\text{m PV}$,亚表面损伤层深度低于 $18 \mu\text{m}$,有效降低了研抛阶段的工作量。

本文提出的自由曲面反射镜铣磨加工亚表面损伤层深度的估算方法与剖面测试方法相比,绝对精度较低,但优势在于它属于非破坏性的测试方法,可应用于非球面和自由曲面产品铣磨加工工艺参数的比较,相对估测精度优于 $1 \mu\text{m}$ 。在实际工程生产过程中,通过此方法采集大量过程数据建立超声铣磨工艺知识库,能够有效优化铣磨加工工艺。

- Eng.*, 2017, 25(4): 814-816. (in Chinese)
- [6] 薛栋林, 郑立功, 张峰. 基于光学自由曲面的离轴三反光学系统 [J]. *光学精密工程*, 2011, 19(12): 2813-2818.
- XUE D L, ZHENG L G, ZHANG F. Off-axis three-mirror system based on freeform mirror [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(12): 2813-2818. (in Chinese)
- [7] 孙豪, 齐建立, 林泽钦, 等. 球面上微透镜阵列超精密慢伺服加工精度影响因素的研究 [J]. *光学精密工程*, 2018, 26(10): 2517-2518.
- SUN H, QI J L, LIN Z X, *et al.*. Factors affecting the machining precision of a micro-lens array on a spherical surface in slow tool servo machining [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(10): 2517-2518. (in Chinese)
- [8] ZHANG X, ZHENG L G, HE X, *et al.*. Design and fabrication of imaging optical systems with freeform surfaces [J]. *SPIE*, 2012, 8486: 848607.
- [9] 朱钧, 吴晓飞, 侯威, 等. 自由曲面在离轴反射式空间光学成像系统中的应用 [J]. *航天返回与遥感*, 2016, 37(3): 1-4.
- ZHU J, WU X F, HOU W, *et al.*. Application of freeform surfaces in designing off-axis reflective space optical imaging systems [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2016, 37(3): 1-4. (in Chinese)
- [10] 李荣彬, 杜雪, 张志辉. 超精密自由曲面光学设计、

加工及测量技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2014.

LI R B, DU X, ZHANG ZH H. *Design, Machi-*

ning and Measurement Technologies of Ultra-precision Freeform Optics [M]. Beijing: China Machine Press, 2014. (in Chinese)

作者简介:



徐领娣(1980—),女,河北保定人,博士,高级工程师,2009年于中国科学院长春精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事大口径空间光学元件的高精度加工检测等方面的研究。E-mail: xuldi@126.com



房安利(1986—),男,河北唐山人,工程师,2010年于北华航天工业学院获得学士学位,主要从事光学反射镜超精密铣磨加工方面的研究。E-mail: 396943856@qq.com

(本栏目编辑:曹 金)