

文章编号 1004-924X(2017)04-0813-07

大口径非球面反射镜误差分离组合加工技术

刘振宇*, 李龙响, 曾雪峰, 罗 霄, 张学军

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 光学技术研究中心, 吉林 长春 130033)

摘要:为了解决大口径非球面反射镜材料去除效率与面形收敛效率之间的矛盾,提出了基于高低阶面形误差分离的组合加工技术。首先,分析了不同尺寸磨头对不同周期面形误差的控制能力。然后,比较了不同磨头的收敛效率与加工时间之间的关系。最后,根据大口径非球面反射镜加工过程中面形误差的特点,将大口径非球面反射镜的面形误差分离为低阶面形误差与高阶面形误差,使用不同加工方式分别对高、低阶面形误差驻留时间进行求解。通过多种加工方式组合加工的方法建立了具有针对性的加工策略,有效提高加工效率。结合工程实例,对一块口径为 2.04 m 的非球面 SiC 反射镜进行了加工试验,单个组合加工周期内面形收敛效率达到 61.2%。结果表明,高阶与低阶面形误差均得到较好的去除。材料去除效率与面形收敛效率均得到提高,达到了良好的效果,满足加工需求。

关键词:光学加工;误差分离;组合加工;高阶误差;低阶误差

中图分类号:TG74 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20172504.0813

Fabrication of large aspheric mirror using multi-mode polishing based on error separation

LIU Zhen-yu*, LI Long-xiang, ZENG Xue-feng, LUO Xiao, ZHANG Xue-jun

(Optical Technology Research Center, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

*Corresponding author, E-mail: lzyth1985@163.com

Abstract: In order to improve material removal efficiency and error map convergence efficiency of large aspheric mirror, a multi-mode technique was introduced based on the separation of high and low order errors. First, the effect of tool size on period of surface error was analyzed. Then the convergence efficiency and dwell time between small and big polishing heads were compared. According to the error features during the fabrication process of large aspheric mirror, the surface error map was divided to low-order and high-order frequency errors. The dwell time of different tools was calculated. Accordingly multi-mode polishing strategy was employed in terms of the low order and high order errors, thus improving the processing efficiency. A large aspheric mirror with the aperture of 2.04 m was polished by the multi-mode technique. The result shows that the convergence rate is 61.2% in a single polishing circle. The low-order and high-order frequency errors are well removed, and the material removal efficiency and error map convergence efficiency are improved. Good processing results are a-

收稿日期:2016-11-09;修订日期:2016-12-09.

基金项目:国家自然科学基金重点项目(No. 61036015);国家自然科学基金青年科学基金资助项目(No. 61605202)

chieved, which meet the demand of fabrication.

Key words: optical fabrication; error separation; multi-mode polishing; low order error; high order error

1 引言

非球面光学元件可以有效降低光学系统的复杂程度,提升光学系统性能,因此在现代光学系统中得到了广泛的应用。近年来,随着现代光学技术的不断发展,光学系统的性能要求越来越高,尤其在空间遥感与深空探测方面,光学系统的分辨率等性能指标的要求更高。为满足现代光学系统的性能要求,光学系统的核心器件——主反射镜的口径不断增大^[1],由数百毫米增至数米甚至达到数十米,这给大口径复杂曲面的光学加工带来了更大的挑战^[2-4]。

加工效率的提升是大口径非球面反射镜加工面临的主要困难之一。光学曲面面积与其半径是平方关系,随着光学曲面半径的增大,需要加工的光学表面积迅速增大,因此需要进一步提升大口径复杂曲面的加工效率。为提高大口径反射镜的加工效率,国内外同行对加工流程及加工工艺进行了优化^[5-7]。其中,为提高研抛阶段的加工效率,亚利桑那大学的 Kim 提出了非连续组合加工技术^[8],中国科学院长春光机所的宣斌提出了适用于环带误差去除的多工位组合加工技术^[9],本课题组对基于多去除函数的组合加工技术进行了研究^[10]。这些方法都是对 CCOS 小磨头技术的扩展,抛光效率得到了一定的提高。

增大磨头尺寸是有效提高材料去除效率的方法之一,然而磨头尺寸的增大会带来两方面问题。首先,大尺寸的磨头与工件表面吻合性变差。非球面光学元件的表面曲率不断变化,随着磨头尺寸的增大,磨头与非球面光学表面的吻合性变差,导致去除函数变形、材料去除不稳定,面形收敛效率降低。其次,大尺寸的磨头对尺度小于其口径的局部面形误差的控制能力较差,直接导致面形收敛效率降低甚至无法收敛。针对上述问题,本文提出了基于误差分离的大口径非球面反射镜组合加工技术。该方法的基本思想是:将大口径非球面的面形误差离散化为矩阵形式后分离为低阶面形误差与高阶面形误差;在误差分离后,通过多

种加工技术组合的方式解决材料去除效率与面形收敛效率的矛盾。具体地,使用应力盘或大磨头技术去除低阶面形误差;使用小磨头、磁流变^[11]与离子束抛光技术^[12]去除高阶面形误差。这些加工方式的驻留时间则可通过矩阵反卷积算法求解。将该技术应用于 2 m 口径非球面 SiC 反射镜的光学加工,获得了良好的加工结果。

2 基于误差分离的组合加工技术

2.1 磨头尺寸与面形收敛效率

非球面光学元件加工过程中,小磨头沿规划路径,通过控制速度、时间和压力实现光学表面的误差去除。如图 1 所示,磨头在去除小尺度面形误差时会对其全部覆盖区域产生材料去除,为去除局部面形误差可能会使其周边的面形误差变大。因此,使用大磨头收敛效率较低,而使用小磨头可以实现高收敛效率;但是其材料去除效率远低于大磨头,而且过多使用小磨头会使小尺度面形误差变为更小的中高频面形误差,影响成像质量^[13]。同时,由于磨头尺寸无法无限变小,所以光学表面误差更加难以去除。

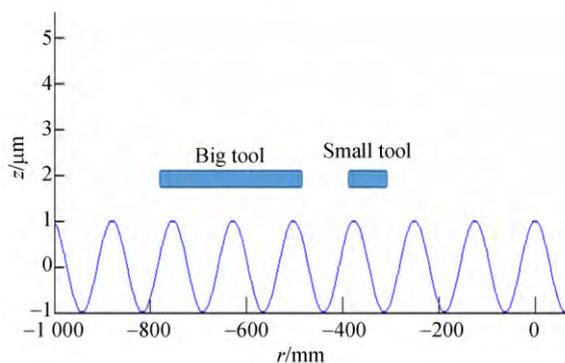


图 1 磨头尺寸与面形误差

Fig. 1 Tool sizes and fabrication error map on mirror

为验证磨头尺寸、面形误差尺寸和面形收敛效率之间的关系,使用正弦函数生成具有不同频率的面形误差,其频率为 50~1 000 mm,使用直径分别为 100,150,200,250,300 mm 的磨头进行仿真计算,获得各尺寸磨头在处理不同频率面形

误差时的收敛效率。为保证一致性,磨头采用平转动方式,偏心为磨头口径的 1/3。

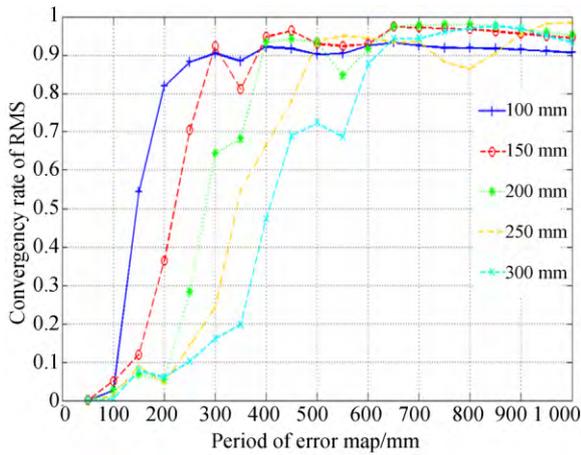


图 2 不同尺寸磨头的面形误差收敛率

Fig. 2 Convergence rates for different tool sizes

图 2 为各尺寸磨头去除不同周期面形误差的仿真结果。由仿真结果可以看出,对于周期大于 600 mm 的面形误差,直径为 100~300 mm 的磨头的收敛效率均可达到 90%;而随着面形误差周期的减小,大口径磨头的收敛效率迅速降低。

为比较不同尺寸磨头的加工时间,选择频率周期为 650 mm 的面形误差,该周期下各磨头的收敛效率接近,可以获得同样收敛效率下各磨头的加工时间。图 3 为仿真加工计算获得的总驻留时间与收敛效率,表 1 为具体数值。

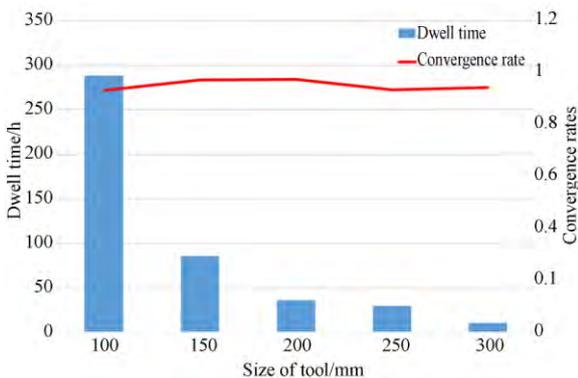


图 3 不同尺寸磨头的驻留时间与面形误差收敛率

Fig. 3 Dwell time and convergence rates for different tool sizes

由图 3 和表 1 可以看出,对于周期为 650 mm 的面形误差,在收敛效率接近的情况下,小磨头的驻留时间约为大磨头的 30 倍。在该情况下,使用大磨头可以有效提高加工效率。

表 1 驻留时间与面形收敛效率

Tab. 1 Dwell time and convergence rates

磨头尺寸/mm	收敛效率/%	驻留时间/h
100	93.35	288.8
150	97.35	85.7
200	97.46	36.2
250	93.43	29.2
300	94.33	10.8

实际加工过程中,光学元件表面的面形误差成分更为复杂,尤其对于大口径非球面反射镜而言,其误差周期会覆盖毫米量级至米量级。该情况下很难通过一种尺寸的磨头或加工手段来实现高效率高精度的加工,因此本文提出了基于误差分离的组合加工技术。

2.2 误差分离基本思想

基于误差分离的组合加工技术的基本思想是:将大口径光学元件的面形误差分离为低阶面形误差与高阶面形误差。低阶面形误差采用应力盘加工方式或大磨头加工方式进行去除,高阶面形误差则采用小磨头、磁流变、离子束等小口径加工方式进行去除。结合大小磨头建立有针对性的加工策略可以实现大小磨头的优势互补,具体实现流程如图 4 所示。

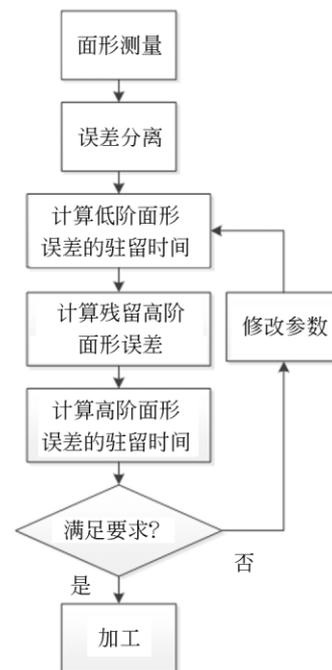


图 4 基于误差分离的组合加工技术流程

Fig. 4 Flow chart of multi-mode technique based on error separation

2.3 误差分离

光学表面的面形误差通常可用一系列离散的数据点表征。为计算方便,本文将面型误差表示为 $n \times 3$ 的矩阵形式:

$$\text{error}_{\text{map}} = [\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}_{\text{ini}}], \quad (1)$$

其中: $\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}$ 均为矢量; (x_i, y_i) 为第 i 个数据点的坐标; z_i 为第 i 个数据点的矢高,即第 i 个点处的面形误差。

Zernike 多项式是拟合光学表面面形的有效手段,本文采取该方法对面形误差的低阶部分进行拟合。其数学表达式为:

$$R_n^m(\rho) = \sum_{k=0}^{\frac{n-m}{2}} \frac{(-1)^k (n-k)!}{k! \left(\frac{n+m}{2} - k\right)! \left(\frac{n-m}{2} - k\right)!} \rho^{n-2k}. \quad (2)$$

本文使用 Zernike 前 36 项对面形进行拟合,第 i 个数据点 (x_i, y_i, z_i) 经 Zernike 多项式拟合获得数据点 $(x_i, y_i, z_{\text{zernike}_i})$,则面形误差的低阶部分可用矩阵 $[\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}_{\text{zernike}}]$ 表示。

2.4 驻留时间求解

经典计算机控制光学表面成型 (CCOS) 理论中,磨头在光学元件表面的材料去除等于磨头的去除函数与其驻留时间沿其运动轨迹的二维卷积,即有:

$$E(x, y) = R(x, y) * * D(x, y), \quad (3)$$

其中: $E(x, y)$ 为材料去除,通常用面形误差表示; $R(x, y)$ 为去除函数,根据磨头运动方式可以通过计算模拟或去除函数实验获得; $D(x, y)$ 为驻留时间分布; “* *” 表示空间二维卷积。一般情况下,通过控制驻留时间分布即可获得期望的材料去除量。

假设在研抛过程中磨头的去除函数线性移不变,则当磨头处于任一驻留点 $A(x_d, y_d)$ 时,在其覆盖范围内点 $B(x_i, y_i)$ 处单位时间的材料去除量为 $R(x_d - x_i, y_d - y_i)$,若磨头在驻留点 A 处的驻留时间为 $D(x_d, y_d)$,则对点 B 的材料去除量为:

$$e(x_i, y_i) = R(x_d - x_i, y_d - y_i) D(x_d, y_d). \quad (4)$$

若驻留点数量为 M ,表征面形的数据点数量为 N 。则当磨头遍历所有驻留点时对点 $B(x_i, y_i)$ 的总材料去除量为:

$$E(x_i, y_i) = \sum_{k=1}^M R(x_k - x_i, y_k - y_i) D(x_k, y_k). \quad (5)$$

则材料去除模型可由卷积计算转变为矩阵形式:

$$\begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \vdots \\ e_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1M} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{N1} & r_{N2} & \cdots & r_{NM} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ \vdots \\ t_M \end{bmatrix}, \quad (6)$$

其中: e_i 为第 i 个点处的材料去除量, r_{ij} 表示第 j 个驻留点对第 i 个数据点单位时间的材料去除量, t_j 表示第 j 个驻留点处的驻留时间。引入符号可表示为:

$$\mathbf{E} = \mathbf{R} \times \mathbf{T}. \quad (7)$$

材料去除的数学模型由卷积形式变为矩阵形式,则驻留时间求解问题可以转变为矩阵求解问题。因为驻留时间非负,因此可以通过正则化方法或非负最小二乘法求最优解^[14-15]。

令面形误差分离获得的低阶成分 $\mathbf{Z}_{\text{zernike}}$ 为目标材料去除 \mathbf{E} ; \mathbf{R} 为大磨头或应力盘的材料去除矩阵,可通过模拟计算或实验获得,则通过计算可获得大磨头去除低阶面形误差的驻留时间最优解 \mathbf{T}_{low} 。由于矩阵方程(6)为病态方程,并且要求驻留时间解非负,因此 \mathbf{T}_{low} 为非完美解,在该驻留时间下的材料去除量 $\mathbf{Z}_{\text{zernike}}$ 与目标材料去除量有一定偏差。理论计算的材料去除量 $\mathbf{z}_{\text{removal}}$ 可表示为:

$$\mathbf{z}_{\text{removal}} = \mathbf{R} \times \mathbf{T}_{\text{low}}. \quad (8)$$

则原始面形误差 \mathbf{z}_{ini} 与理论材料去除 $\mathbf{z}_{\text{removal}}$ 之差即为初始面形误差去除低阶面形误差后残留的高阶误差,即有:

$$\mathbf{z}_{\text{mid}} = \mathbf{z}_{\text{ini}} - \mathbf{z}_{\text{removal}}. \quad (9)$$

将高阶面形误差 \mathbf{z}_{mid} 作为目标面形,小磨头、磁流变、离子束等去除函数作为输入,再次计算小磨头的驻留时间 \mathbf{T}_{mid} 。通过上述方法即可获得面形误差分离后大小磨头的驻留时间分布。由于计算过程中已考虑大磨头材料去除对高阶面形误差的影响,因此通过该方式建立的组合加工策略可以实现优势互补,并且提高加工效率。

3 加工实验

为了验证该方法的有效性,本文使用基于误差分离的组合加工技术对一口径为 2 040 mm 的非球面碳化硅反射镜进行了抛光实验。组合的加工方式为 300 mm 直径大磨头与去除函数尺寸为 15 mm × 5 mm 的磁流变加工。驻留时间求解过

程中使用的去除函数均由实际去除函数实验获得。

本轮加工的初始面形如图 5 所示,面形误差 $RMS=0.077\lambda$ ($\lambda=632.8\text{ nm}$)。

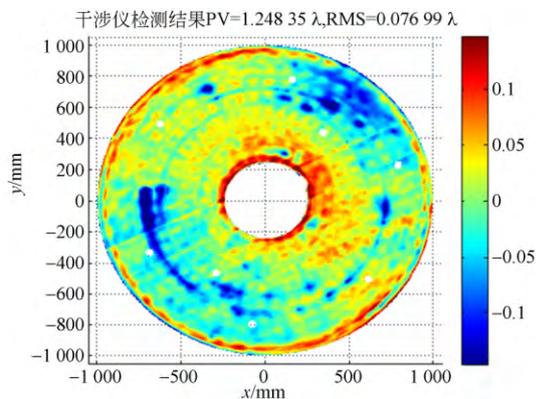


图 5 初始面形误差
Fig. 5 Initial error map

由图 5 可看出,面形误差由面积较大的低阶面形误差与分布于整个反射镜表面的高阶面形误差组成。使用 Zernike 前 36 项将误差分离,得到的低阶面形误差如图 6 所示。将低阶面形误差作为输入计算最佳驻留时间分布,然后获得低阶面形的理论材料去除量,如图 7 所示。

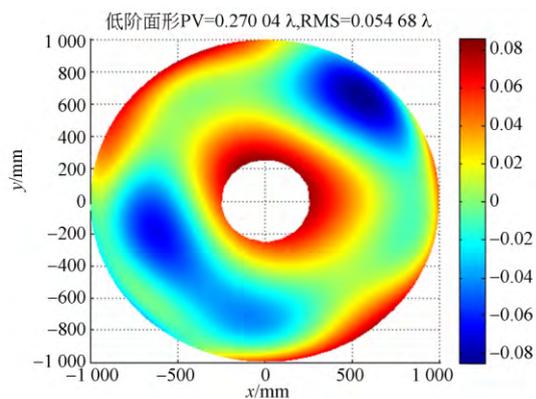


图 6 低阶面形误差成分
Fig. 6 Low order error of mirror

通过仿真计算可获得经过大磨头去除低阶面形误差后镜面残留的高阶面形误差,如图 8 所示。以高阶面形误差与磁流变去除函数作为输入计算驻留时间。根据上述两步分别获得了 300 mm 大磨头与磁流变加工的驻留时间分布,建立起组合加工策略。最后,经大磨头去除低阶面形误差、磁流变去除高阶面形误差后的加工结果如图 9 所示。

由图 9 可以看出,与初始面形误差相比,反射

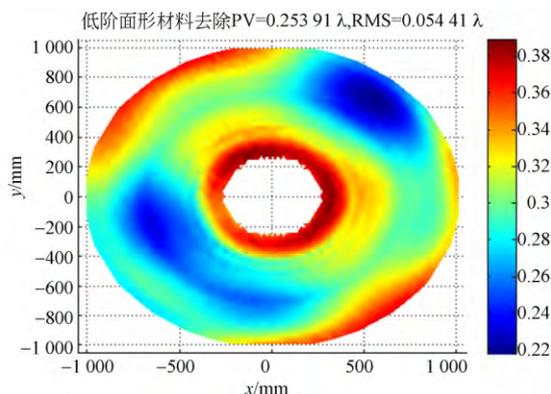


图 7 计算获得材料去除量
Fig. 7 Calculated material removal

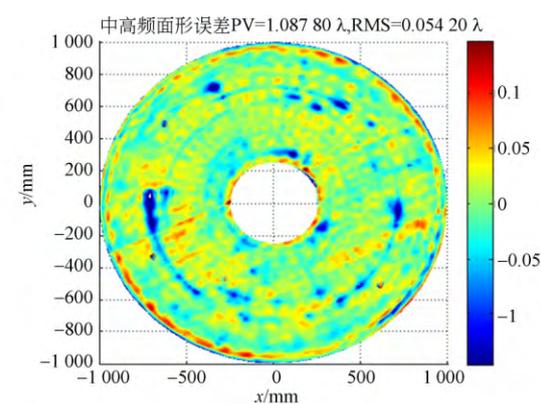


图 8 高阶面形误差成分
Fig. 8 High order error map

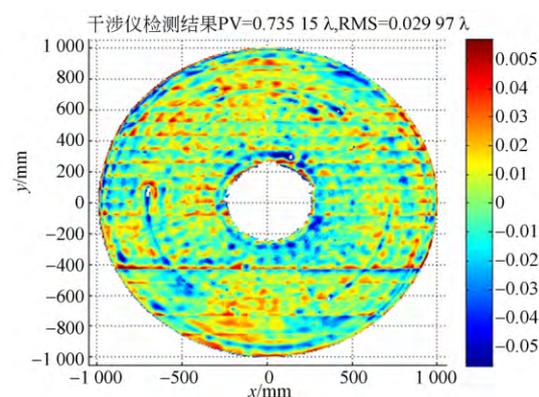


图 9 实际加工结果
Fig. 9 Error map after multi-mode polishing

镜表面的低阶面形得到有效去除,面形 RMS 由 0.077λ 收敛至 0.0299λ ,收敛效率为 61.2%。表 2 为各加工方式的仿真计算结果与实际加工结果的对比(组合加工时间为磁流变加工时间与大磨头加工时间之和)。

表 2 各加工方式的对比

Tab. 2 Contrast of fabrication properties among different methods

	初始面形(RMS/ λ)	加工结果(RMS/ λ)	RMS 收敛效率/%	加工时间/h
300 mm 磨头	0.077	0.046 0	40.0	11
磁流变	0.077	0.025 0	67.5	83
组合加工仿真	0.077	0.025 0	67.5	46(41+5)
实际组合加工	0.077	0.029 9	61.2	46(41+5)

由表 2 可以看出,与单独使用磁流变加工方式相比,使用基于误差分离的组合加工方法能够有效缩短加工时间,同时 RMS 收敛效率远大于 300 mm 磨头。由此表明,基于误差分离的组合加工技术用于大口径非球面反射镜加工能够获得良好的加工结果。

4 结 论

本文基于误差分离的概念提出了一种组合加工技术,将面形误差分离为低阶误差与高阶面形

误差,根据各自的面形误差特点选择不同的加工方式,建立具有针对性的加工策略。该方法克服了单一加工方法的局限性,尤其适合需要综合使用多种加工方式的大口径非球面反射镜加工。在实际工程项目中,使用误差分离组合加工技术对 2 040 mm 口径的非球面反射镜进行了加工实验。一个周期的面形 RMS 收敛效率达到 61.2%,加工时间由 83 h 缩短至 46 h,验证了该方法的有效性。组合加工能够在保证加工精度的情况下有效提高大口径非球面反射镜的加工效率。

参考文献:

- [1] 庞志海,樊学武,陈钦芳,等. 大口径反射镜面形误差对光学系统像差特性的影响[J]. 光学学报, 2013, 33(4):0422002.
PANG ZH H, FAN X W, CHEN Q F, *et al.*. Influence of surface-profile error of larger mirror on aberrations characteristics of optical system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(4):0422002. (in Chinese)
- [2] JOHNS M. The Giant Magellan Telescope(GMT) [J]. *SPIE*, 2008, 6986:698603.
- [3] YANG F, LIU G J, AN Q CH, *et al.*. Method of evaluation of a mirror surface figure based on frequency domain and its application for the Giant Steerable Science Mirror of the Thirty Meter Telescope[J]. *Chinese Optics Letters*, 2015, 13(4):041201.
- [4] 张学军,樊延超,鲍赫,等. 超大口径空间光学遥感器的应用和发展[J]. 光学精密工程, 2016, 24(11):2613-2626.
ZHANG X J, FAN Y CH, BAO H, *et al.*. Applications and development of ultra large aperture space optical remote sensors [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(11):2613-2626. (in Chinese)
- [5] 李俊峰. 碳化硅凸非球面反射镜的加工与检测[J]. 中国光学. 2014, 7(2):287-292.
- [6] LI J F. Fabrication and test of SiC convex aspheric mirror[J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(2):287-292. (in Chinese)
- [7] 张毅,张学军,李锐钢,等. 具有公自转运动模式的高效轮式抛光工具设计[J]. 中国光学, 2016, 9(1):155-166.
ZHANG Y, ZHANG X J, LI R G, *et al.*. Design of an high-efficiency wheeled polishing tool combined with co-rotation and self-rotation movement [J]. *Chinese Optics*, 2016, 9(1):155-166. (in Chinese)
- [8] 徐乐,张春雷,代雷,等. 高精度非回转对称非球面加工方法研究[J]. 中国光学. 2016, 9(3):364-370.
XU L, ZHANG CH L, DAI L, *et al.*. Research on manufacturing method of non-rotationally symmetrical aspheric surface with high accuracy[J]. *Chinese Optics*, 2016, 9(3):364-370. (in Chinese)
- [9] KIM D W, KIM S W, BURGE J H. Non-sequential optimization technique for a computer controlled optical surfacing process using multiple tool influence functions[J]. *Optics Express*, 2009, 17(24):21850.
- [10] 李俊峰,谢京江,宋淑梅,等. 应用多模式组合加工技术修正大口径非球面环带误差[J]. 光学精密工程, 2010, 18(7):1460-1467.

- LI J F, XIE J J, SONG SH M, *et al.*. Zonal error removal for large aspheric with multi-mode combined manufacture technique [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(7): 1460-1467. (in Chinese)
- [10] 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.
- LIU ZH Y, LUO X, DENG W J, *et al.*. Multi-mode optimization for large optical aspheric mirror [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(11): 2791-2797. (in Chinese)
- [11] 白杨,张峰,李龙响,等. 碳化硅基底改性硅表面的磁流变抛光[J]. *光学学报*, 2015, 35(3): 316-323.
- BAI Y, ZHANG F, LI L X, *et al.*. Manufacture of silicon modification layer on silicon carbide surface by magnetorheological finishing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(3): 316-323. (in Chinese)
- [12] 唐瓦,邓伟杰,李锐钢,等. 离子束抛光高陡度离轴非球面的去除函数修正[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(6): 1572-1580.
- TANG W, DENG W J, LI R G, *et al.*. Correction of removal function of ion beam figuring highly steep off-axis asphere[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(6): 1572-1580. (in Chinese)
- [13] 曾雪锋,张学军. 光学制造中频残差对光学调制传递函数的影响[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(7): 072202.
- ZENG X F, ZHANG X J. Impact of mid-spatial frequency errors in optical manufacturing on modulation transfer function [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(7): 072202. (in Chinese)
- [14] 邓伟杰,郑立功,史亚莉. 基于线性代数和正则化方法的驻留时间算法[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(7): 1009-1015.
- DENG W J, ZHENG L G, SHI Y L. Dwell time algorithm based on matrix algebra and regularization method [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(7): 1009-1015. (in Chinese)
- [15] 李龙响,邓伟杰,张斌智,等. 大口径光学元件磁流变加工驻留时间求解算法[J]. *光学学报*, 2014, 34(5): 0522001.
- LI L X, DENG W J, ZHANG B ZH, *et al.*. Dwell time algorithm for large aperture optical element in magnetorheological finishing [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(5): 0522001. (in Chinese)

作者简介:



刘振宇(1985-)男,吉林通化人,博士,助理研究员,2008年于吉林大学获得学士学位,2013年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事大口径光学非球面超精密加工技术的研究。E-mail: lztyh1985@163.com



李龙响(1987-)男,安徽宿州人,2011年于哈尔滨工业大学获得学士学位,2016年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事光学磁流变加工和检测方面的研究。E-mail: lellxhit@126.com