

文章编号 1004-924X(2013)11-2791-07

大口径非球面的组合加工

刘振宇^{1,2*}, 罗 霄¹, 邓伟杰¹, 郑立功¹, 张学军¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所
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;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:为提高大口径非球面光学反射镜研磨与抛光阶段的加工效率,提出了一种采用多磨头组合方式同时提高材料去除效率和面形收敛率的加工方法。该方法基于矩阵运算,在一次优化过程中同时优化多个加工循环,并对传统的单去除函数驻留时间求解过程进行扩展,以实现多去除函数的综合优化求解。由于扩展了驻留时间求解范围,使大磨头和小磨头在加工过程中优势互补,实现了多个磨头多个加工循环的全局优化。最后,采用计算机虚拟加工的方法对等厚和实际加工中的面形误差进行加工模拟。结果表明:与传统的驻留时间求解算法相比,提出的方法使加工效率提高了 50%,RMS 收敛率与小磨头相当。实际面形仿真加工结果显示,RMS 由 0.011 5 变为 0.004 4,收敛率为 0.621 2,满足实际加工要求。该技术有效缩短了加工周期,具有很强的实用性。

关键词:大口径非球面;组合加工;研磨;抛光;矩阵方程;收敛效率

中图分类号:TH703;TQ171.68 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20132111.2791

Multi-mode optimization for large optical aspheric mirror

LIU Zhen-yu^{1,2*}, LUO Xiao¹, DENG Wei-jie¹, ZHENG Li-gong¹, ZHANG Xue-jun¹

(1. *Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*
2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)*
* *Corresponding author, E-mail: lzynth1985@gmail.com*

Abstract: To manufacture a large aspheric mirror in higher efficiency and higher precision, a new method by using multi-mode optimization is proposed to improve material removal efficiency and surface convergence rates. On the basis of matrix calculation, this method optimizes multi-processing cycle in one optimizing processing simultaneously and extends the calculating process of the dwell time for traditional Tool Influence Functions(TIF) to complete the integrating optimizing solution of multi TIF. As the solution area of dwell time is extended, the bigger grinding head and the small one have complementary advantages and obtain a global optimization for multi grinding heads and multi-processing cycles. In the end, an error map is simulated with actual parameters by using computer virtual multi-mode method. The simulation result shows that the multi-mode technique can improve the processing efficiency by 50% as compared with traditional method and its convergence rate(RMS value)

收稿日期:2012-05-11;修订日期:2012-06-18.

基金项目:国家自然科学基金重点资助项目(No. 61036015)

is the same as that of the smaller grinding head. When the simulation is on the real surface, the RMS changes from 0.011 5 to 0.004 4 and the convergence rate is 0.621 2, which satisfies the requirements of real manufacture. The multi-mode technique improves polishing efficiency in maintaining good precision and is an attractive solution for the large optical aspheric mirror fabrication.

Key words: large aspheric mirror; multi-mode optimization; grinding; polishing; matrix equation; convergence rate

1 引言

由于增加光学系统的有效口径是提高系统的能量收集能力和空间分辨能力的有效手段,因此近年来大口径非球面光学元件在空间光学、天文学等领域的需求不断增加^[1]。例如,美国国家航空航天局(NASA)研究的空间望远镜口径已由1990年的2.4 m(哈勃空间望远镜)到现在的6.5 m(James Webb 空间望远镜)。此外,国际上正在研抛或计划研抛的如 TMT、GMT、EELT^[2-4]等巨型望远镜口径已达到10 m量级,预计2020年将达到30 m量级。

自1963年美国 Itek 公司提出计算机控制光学表面成形技术以来^[5],各种新的光学表面加工技术得到了发展与应用,如磁流变抛光^[6-7]、应力盘抛光^[8]、离子束抛光^[9]等。这些技术已经成功地应用于加工大型非球面反射镜^[10]。然而,下一代巨型望远镜主镜的光学面积将达到数百平方米,而加工精度的要求基本不变^[11],因此传统的加工技术很难同时满足加工效率和加工精度的要求。美国 Arizona 大学光学加工中心提出了计算不同磨头组合抛光的方法^[12],并成功地对 GMT 主镜进行了加工,长春光学精密机械与物理研究所的李俊峰、宣斌等人提出了两个或多个磨头同时抛光的组合抛光方法^[13-14]。这些方法基于数控小磨头抛光技术,对传统方法进行了改进,使抛光效率得到了一定程度的提高。

本文基于矩阵求解算法对组合加工的驻留时间求解问题进行了研究,提出了多去除函数驻留时间分布一次求解的组合加工算法,即在一次优化过程中同时使用多个去除函数,以实现多工序、多个磨头加工的全局优化。本方法在综合各加工方法的去除函数优点的情况下建立了组合加工策略,用于指导抛光过程,以达到综合优化的目的。模拟抛光加工验证表明,与传统优化过程中每次

优化只使用一个去除函数的方法相比,该算法可有效提高大口径非球面的抛光效率及精度。

2 多去除函数组合加工模型建立

2.1 理论背景

现代各种数控光学表面成形技术均以 Preston 1927 年提出的假设为理论基础,即在很大数值范围内,材料的去除效率正比于抛光盘与被抛光元件之间的压力和速度^[14]。

$$\Delta Z(x, y) = kp(x, y)v(x, y), \quad (1)$$

其中: $\Delta Z(x, y)$ 为抛光盘在 (x, y) 位置处单位时间的材料去除量, k 是与工艺参数有关的常数项, $p(x, y)$ 是抛光盘与元件之间的压力, $v(x, y)$ 是抛光盘与元件之间的相对速度。定义单位时间 T 内工件表面材料的去除量 $R(x, y)$ 为磨头的去除函数,则:

$$R(x, y) = \frac{1}{T} \int_0^T \Delta Z(x, y) dt = \frac{1}{T} \int_0^T kp(x, y)v(x, y) dt. \quad (2)$$

假设去除函数 $R(x, y)$ 具有线性移不变的性质,则元件表面材料的去除量可表示为:

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

其中: $D(x, y)$ 为去除函数 $R(x, y)$ 在 (x, y) 处的驻留时间。由式(3)可知,材料去除量等于磨头去除函数 $R(x, y)$ 与其驻留时间 $D(x, y)$ 沿其运动路径的卷积。目前,数控加工方法通常采用该假设,经实际测量获得磨头的去除函数,通过改变驻留时间来控制光学表面的材料去除量。

2.1.1 去除函数

去除函数(Tool Influence Function, TIF)是磨头在单位时间内对元件表面的材料去除量。实际加工过程中,受加工方法、磨头尺寸、压强、运动方式等多种工艺参数的影响,多用实际测量的方式获得去除函数。去除函数的分布和稳定性是决

定加工效率的关键因素之一。

2.1.2 矩阵求解算法

非球面加工过程的优化是驻留时间分布的求解过程,本文选择基于线性代数和正则化方法的求解算法^[15]。该算法具有矩阵运算的特点,适合多个去除函数组合后求解。

传统测量方法的测量结果都是离散的,面形误差由一系列均匀分布的离散数据点(去除点)表征。本文在加工过程中根据非球面元件形状来规划加工路径,在路径上取均匀分布的一系列点称为驻留点来描述磨头运动的轨迹。通过磨头的数学模型或工艺试验,能够获得磨头在驻留点 $A(x_d, y_d)$ 处时,在去除范围内元件上点 $B(x_i, y_i)$ 处单位时间的去除量 $E(x'_i, y'_i)$ 。若磨头在驻留点 A 处的驻留时间为 $D(x_d, y_d)$,点 $B(x_i, y_i)$ 处的总材料去除量为:

$$E(x'_i, y'_i) = R(x_d, y_d; x'_i, y'_i)D(x_d, y_d). \tag{4}$$

令 M 为驻留点数量, N 为去除点数量,则所有驻留点对点 $B(x_i, y_i)$ 的材料去除量为:

$$E(x'_i, y'_i) = \sum_{k=1}^M R(x_k, y_k; x'_i, y'_i)D(x_k, y_k). \tag{5}$$

加工模型由卷积计算转变为矩阵形式:

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

引入符号式(6)表示为:

$$\mathbf{E} = \mathbf{R} \times \mathbf{D}, \tag{7}$$

其中: \mathbf{R} 为去除函数矩阵,其中每个元素代表着一个驻留点对一个去除点单位时间的去除量; \mathbf{E} 为面形误差的向量形式; \mathbf{D} 为驻留时间向量。由此将加工模型转变为矩阵方程的求解过程。

2.2 组合加工方法的基本思想

大口径非球面的加工优化过程的实质是求解去除函数的驻留时间分布,即通过优化寻找最佳的驻留时间分布使加工后镜面的残留误差最小。传统的方法是使用面形误差和一个去除函数进行优化,当一次抛光完成后对面形进行检测,然后再使用下一个去除函数进行优化,重复这个过程最终达到加工目标。

目前,常用的非球面元件抛光技术主要有应力盘、数控小磨头,磁流变(MRF),离子束(IBF)

等。这些方法都有其自身的特点与适用范围。考虑材料的去除效率与加工精度,这些方法的组合可以定性描述为图1。大口径非球面反射镜加工要求使用的加工方法不仅要具有很高的材料去除效率,还要有很高的面形收敛效率,而目前已有的加工手段均不能很好地兼顾这两方面的要求。

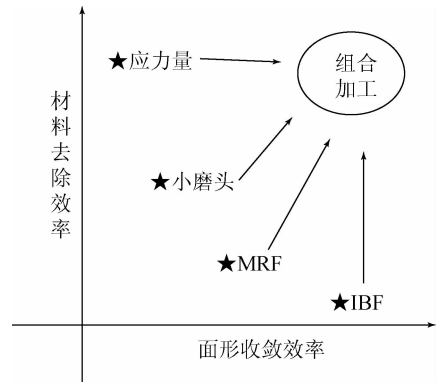


图 1 组合加工原理示意图

Fig. 1 Principle of multi-mode optimization technique

组合加工技术的基本思想是在一次优化过程中,同时使用不同加工手段的多个加工过程以对全局进行优化,求解出每个加工过程中去除函数的驻留时间分布。与传统的优化方法不同,组合加工技术在一次优化过程中考虑各加工方式与去除函数的优点,使各个去除函数在加工过程中达到互补,进而建立组合加工策略,得到高的材料去除效率和面形收敛效率。

针对某个大口径非球面元件的加工情况,组合加工优化算法将一个大口径的磨头和一个小口径的磨头或多个磨头进行组合。大磨头材料去除效率高而面形收敛效率低,小磨头材料去除效率低但面形收敛效率高。通过组合加工的方式,大磨头去除绝大部分的材料,小磨头控制大磨头不易控制的面形,特别是边缘区域的面形,从而实现高的材料去除效率和面形收敛效率。

2.3 多去除函数组合加工方法的数学模型

为实现多去除函数的组合加工,对方程(6)的去除函数矩阵 \mathbf{R} 和驻留时间向量 \mathbf{D} 进行扩展,即将多个去除函数矩阵组合后进行求解。假设两个去除函数的求解过程分别为式(8)、式(9),则组合后矩阵方程如式(10)所示。

$$\begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \vdots \\ e_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1M} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{N1} & r_{N2} & \cdots & r_{NM} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ \vdots \\ t_M \end{bmatrix}, \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \vdots \\ e_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r'_{11} & r'_{12} & \cdots & r'_{1M'} \\ r'_{21} & r'_{22} & \cdots & r'_{2M'} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r'_{N1} & r'_{N2} & \cdots & r'_{NM'} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ \vdots \\ t_{M'} \end{bmatrix}, \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \vdots \\ e_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1M} & r_{1(M+1)} & r_{1(M+2)} & \cdots & r_{1(M+M')} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2M} & r_{2(M+1)} & r_{2(M+2)} & \cdots & r_{2(M+M')} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{N1} & r_{N2} & \cdots & r_{NM} & r_{N(M+1)} & r_{N(M+2)} & \cdots & r_{N(M+M')} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ \vdots \\ t_M \\ t_{M+1} \\ t_{M+2} \\ \vdots \\ t_{M+M'} \end{bmatrix}. \quad (10)$$

用符号表示为:

$$\mathbf{E} = [\mathbf{R} \ \mathbf{R}'] \times [\mathbf{D}; \mathbf{D}']. \quad (11)$$

上述分析表明,可以将单个磨头的去除函数矩阵 \mathbf{R} 扩展为 2 个或多个去除函数矩阵的组合 $[\mathbf{R} \ \mathbf{R}_1 \ \mathbf{R}_2 \ \cdots]$,并计算出相应的驻留时间分布 $[\mathbf{D}_1; \mathbf{D}_2; \mathbf{D}_3; \cdots]$ 。在实际操作中,不能由式(10)直接计算出精确解,其原因是驻留时间取值应该满足非负;但方程(10)的求解是典型的病态不定问题,因此必须放弃精确求解,通过加入约束条件使解逼近最优,求得解的近似值。本文采用正则化方法对方程(10)进行求解^[13,15-16]。

3 仿真实验与数据分析

为验证本文算法的有效性,本文使用直径为 1 m 的元件,分别使用组合加工方法和传统的单去除函数优化方法对面形误差为 $1 \mu\text{m}$ 的等厚面形误差和实际面形误差进行虚拟加工。

3.1 工艺参数

本文首先选取直径为 300 mm 和 100 mm 的平转动磨头的去除函数对等厚面形进行加工,其去除函数在一个周期内的材料去除量的数学表达

式为:

$$R(r') = \begin{cases} 2eKP \arccos\left(\frac{r'^2 + e^2 - r^2}{2r'e}\right), & r - e < r' \leq r + e \\ 2\pi eKP, & 0 \leq r' \leq r - e \end{cases}, \quad (12)$$

其中: r 为磨头直径, e 为磨头偏心量。

图 2 表示的是通过去除函数模型计算得到的两个不同直径磨头的理论去除函数,由于实际加工中小磨头转速要高于大磨头,在建立去除函数时令去除函数 1 与去除函数 2 的转速比为 1 : 2。

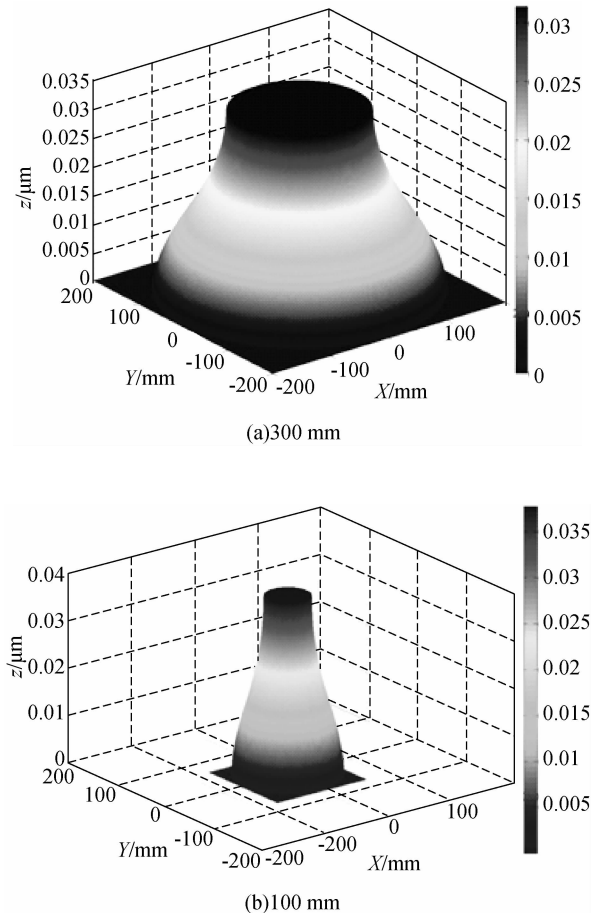


图 2 磨头去除函数示意图

Fig. 2 TIFs of polishing tool with different diameters

3.2 模拟加工及数据分析

使用相同的初始面形及理论去除函数,分别通过组合加工优化和传统大小磨头配合单独优化的方法对同一等厚面形进行仿真加工,其结果如图 3 及表 1 所示。

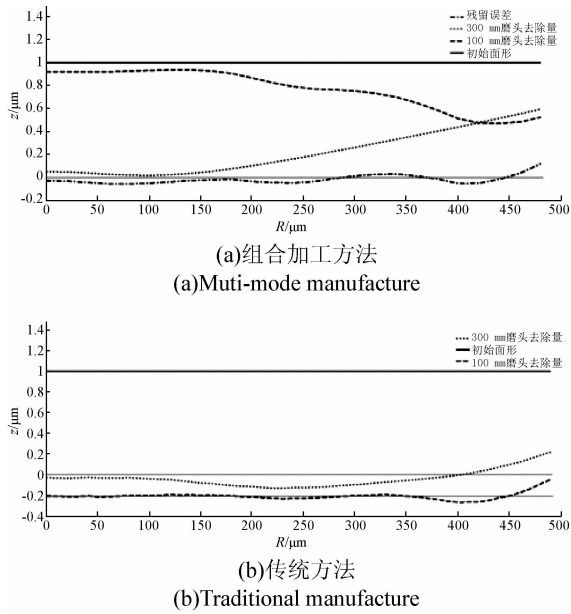


图 3 等厚面形误差模拟加工

Fig. 3 Manufacture simulation of flat surface error

表 1 不同加工方法进行面形模拟加工的比较

Tab. 1 Comparison of surface errors with different manufacturing methods

		去除函数 1	去除函数 2	组合加工
等厚面形误差	初始 RMS	1.000	0.211	1.000
	结束 RMS	0.211	0.051	0.057
	收敛率	0.789	0.758	0.942
	加工时间	108.219	480.945	147.613
实际面形误差	初始 RMS	0.011 5	0.007 3	0.011 5
	结束 RMS	0.007 3	0.004 7	0.004 4
	收敛率	0.363 8	0.359 5	0.621 2
	加工时间	298.363 0	512.135 5	427.456 0

图 3 是对等厚面形误差进行虚拟加工的示意图。3(a)为组合加工的残留误差示意图。由图可以看出,300 mm 磨头对整个面形实现材料去除的同时,在元件半径约 300 mm 外的部分留出一部分边缘误差交给 100 mm 的磨头进行去除,而 100 mm 小磨头对工件的主要材料去除集中在边缘部分。这证明在优化过程中,组合加工算法同时考虑了两个磨头去除函数的去除特性,因此 300 mm 磨头将边缘部分留给对边缘误差处理效率更高的 100 mm 磨头。两个磨头在光学表面的

材料去除形成互补,面形收敛效率能够达到 94%。图 3(b)为传统的按照大、小磨头配合,单独优化进行加工后的残留误差示意图。由图 3(b)和表 1 可以看出,传统的组合加工具有局限性,300 mm 磨头对面形边缘误差的控制能力较弱,为去除边缘部分材料对靠近边缘半径为 250 mm 的部分进行了多余的材料去除,其面形收敛效率较低。使用 100 mm 的小磨头加工后面形精度与组合加工方式相比精度仅提高了 0.6%;而在材料去除效率方面,使用组合加工技术相对于传统的单次优化组合提高了 75%。

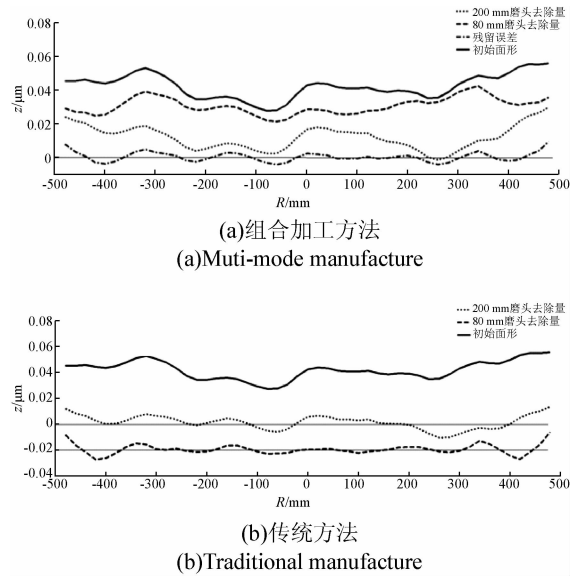


图 4 实际面形误差模拟加工

Fig. 4 Manufacture simulation of random surface error

为显示组合加工优化技术的有效性,本文对实际面形误差进行了虚拟加工实验。镜面直径为 1 m,由于实际面形误差尺度较小,因此选择 200 mm 磨头和 80 mm 磨头进行组合加工。图 4 是对面形误差进行虚拟加工的示意图。其中,4(a)为组合加工的残留误差示意图。由图中可以看出,200 mm 磨头与 80 mm 磨头的材料去除量形成互补,200 mm 磨头对元件表面大部分的低频误差进行了去除,将局部误差与边缘误差留给 80 mm 磨头处理,两个磨头材料去除的叠加实现了对大多数面形误差的有效去除,得到的面形残留误差,如图 4(a)所示。图 4(b)为传统大小磨头单独优化组合加工后的残留误差示意图。由图可以看出,200 mm 磨头加工时,为了去除局部面形误差会在其靠近边缘处形成较深的材料去除,因此

面形收敛效率较低。经 200 mm 磨头加工后使用 80 mm 磨头加工的面形收敛效率与组合加工相近(相差 0.03%),但在材料去除效率方面,使用组合加工技术相对于传统的单次优化组合提高了 50%。

相对于传统方法,组合加工技术建立的加工策略在材料去除效率方面比小磨头加工提高了 50%以上,同时面形收敛效率明显优于大磨头加工,能够接近甚至超过传统的小磨头加工精度。通过模拟加工实验可知,组合加工能够使不同去除函数互补,因此组合加工方法得到的光学表面与小磨头加工相比,环带面形误差得到了明显抑制。

4 结 论

为提高大口径非球面光学元件的加工效率和精度,本文提出了一种利用多去除函数综合优化

组合加工的技术。与传统加工技术中使用单个去除函数相比,该技术同时针对多个去除函数进行优化,可获得包括去除函数组合和与其对应的驻留时间分布的组合加工策略。仿真实验证明,该方法在获得与大尺寸去除函数相近的面形收敛效率的同时,保证了与小尺寸去除函数相近的加工精度。该技术可以综合不同加工方式的优点,显著提高加工效率,有效缩短加工周期,为进一步加工更大口径反射镜提供了有效的技术支持。

本文提出的多去除函数组合加工算法还具有进一步的发展空间。例如,将经工艺试验获得的磁流变、离子束或其它加工技术的去除函数加入组合加工去除函数库中,从而提高组合加工的修形能力;还可以通过改进优化参数来提高去除函数的选择能力。同时,随着加工经验的丰富,该方法会积累更多去除函数模型,从而进一步提高其修形能力。

参考文献:

- [1] 张景旭. 地基大口径望远镜系统结构技术综述[J]. 中国光学, 2012(4): 327-336.
ZHANG J X. Overview of structure technologies of large aperture ground-based telescopes [J]. *Chinese Optics*, 2012(4): 327-336. (in Chinese)
- [2] 戴一帆. 大中型光学非球面镜制造与测量新技术[M]. 北京:国防工业出版社, 2011.
DAI Y F. *New Technology for Manufacturing and Measurement of Large and Middle-scale Aspheric Surfaces* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011. (in Chinese)
- [3] JOHNS M. The Giant Magellan Telescope(GMT) [J]. *SPIE*, 2006, 6267: 6267291-14.
- [4] NELSON J, SANDERS G H. The status of the thirty meter telescope project[J]. *SPIE*, 2008, 7012: A1-18.
- [5] JONES R A. Optimization of computer controlled polishing[J]. *Appl. Opt.*, 1977, 16(1): 218-224.
- [6] 张峰, 余景池, 张学军, 等. 磁流变抛光技术[J]. 光学精密工程, 1999, 7(5): 1-7.
ZHANG F, YU J CH, ZHANG X J, *et al.*. Magnetorheological polishing technique[J]. *Opt. Precision Eng.*, 1999, 7(5): 1-7. (in Chinese)
- [7] 戴一帆, 石峰, 彭小强, 等. 光学镜面磁流变确定性修形的实现[J]. 光学学报, 2010, 30(1): 198-205.
DAI Y F, SHI F, PENG X Q, *et al.*. Deterministic figuring in optical machining by magnetorheological finishing [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(1): 198-205. (in Chinese)
- [8] 范斌, 万勇建, 陈伟, 等. 能动磨盘加工与数控加工特性分析[J]. 中国激光, 2006, 33(1): 128-132.
FAN B, WAN Y J, CHEN W, *et al.*. Manufacturing features comparing between compute control active-lap and computer control optical surface for large aspheric optics[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, 33(1): 128-132. (in Chinese)
- [9] 戴一帆, 周林, 解旭辉, 等. 应用离子束进行光学镜面确定性修形的实现[J]. 光学学报, 2008, 28(6): 1131-1135.
DAI Y F, ZHOU L, XIE X H, *et al.*. Deterministic figuring in optical machining by ion beam[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(6): 1131-1135. (in Chinese)
- [10] 杨力. 先进光学制造技术[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
YANG L. *Advanced Optical Manufacture Technology* [M]. Beijing: Science Press, 2001. (in Chinese)
- [11] ARNE A, TORBEN A, JACQUES B. From euro50 towards a european ELT[J]. *SPIE*, 2006, 6267: 6267251-10.

- [12] DAE W K, SUG W K, JAMES H B. Non-sequential optimization technique for a computer controlled optical surfacing process using multiple tool influence functions [J]. *Optics Express*, 2009, 17(9): 24/21850.
- [13] 宣斌,谢京江,宋淑梅. 多模式组合抛光技术在光学加工中的应用[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(1):41-50.
XUAN B, XIE J J, SONG SH M. Application of multi-mode combined polishing to optical manufacturing [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(1): 41-50. (in Chinese)
- [14] 李俊峰,谢京江,宋淑梅. 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. Zonal error removal for large aspheric with multi-mode combined manufacturing technique [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(7): 1460-1467. (in Chinese)
- [15] 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)
- [16] 武建芬,卢振武,张红鑫,等. 光学元件离子束加工驻留时间优化求解[J]. *光学学报*, 2010, 30(1): 192-197.
WU J F, LU ZH W, ZHANG H X, et al.. Optimized dwell time solution for optics in ion beam figuring[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(1): 192-197. (in Chinese)

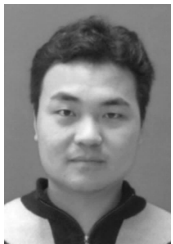
作者简介:



刘振宇(1985—),男,吉林通化人,博士研究生,2008年于吉林大学获得学士学位,主要从事光学表面数控加工方面的研究。E-mail: lzyth985@gmail.com



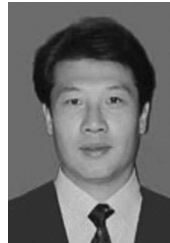
罗 霄(1983—),男,湖北宜昌人,博士,2006年于中国科学技术大学获得博士学位,主要从事光学加工和机械设计等方面的研究。E-mail: pb2009061@163.com



邓伟杰(1983—),男,安徽安庆人,博士,主要从事光学表面数控加工方面的研究。E-mail: mr-deng@163.com



郑立功(1969—),男,吉林长春人,博士,研究员,主要从事先进光学制造等方面的研究。E-mail: zhenglg@ciomp.ac.cn



张学军(1968—),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,中科院百人计划获得者,主要从事先进光学制造和空间光学系统等方面的研究。E-mail: zxj@ciomp.ac.cn