

文章编号 1004-924X(2009)11-2678-06

光学非球面离子束加工模型及误差控制

武建芬^{1,2}, 卢振武¹, 张红鑫¹, 王泰升^{1,2}

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要: 为了实现光学非球面元件的高精度加工, 对先进的离子束加工系统进行了研究。通过对离子束加工系统的分析, 给出了加工非球面光学元件的离子源子系统运动模型公式, 并将求解驻留时间的反卷积过程转化为求解线性矩阵方程过程以便优化求解。分析了加工过程中出现的离子源定位误差, 指出其对最终面形精度的影响可归结为一个系数因子的控制上, 并提出了综合考虑离子束材料去除函数和定位误差的方法来控制系统精度以降低对定位系统精度的苛刻要求。仿真验证表明, 该模型计算出的驻留时间函数可以有效地保证光学元件的面形精度达 0.0381λ ; 离子束定位误差引起的面形精度的变化量满足最大变化量公式的限制。该模型可用于各种非球面光学元件离子束加工过程驻留时间的求解和设备的定位误差设计, 在保证过程稳定的同时降低了设备成本。

关键词: 离子束加工; 非球面; 定位误差分析; 驻留时间矩阵方程

中图分类号: TQ171.68 **文献标识码:** A

Model of ion beam figuring in aspheric optics and its error control

WU Jian-fen^{1,2}, LU Zhen-wu¹, ZHANG Hong-xin¹, WANG Tai-sheng^{1,2}

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,*
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

Abstract: Ion Beam Figuring (IBF) technology was investigated for application to a high-precision optical aspheric. With the analysis of the IBF system, the motion model formulas of an ion source subsystem were presented for figuring aspheric optics and other optics by the IBF facility. The de-convolved process of the dwell time function was transferred to a linear matrix equation, which could be easily optimized to get the optimized dwell time solution. Using an analysis of the location errors, this paper proposes that the final figure errors caused by the location errors of the ion source five-axis motion subsystem could be attributed to a coefficient factor. The best way to avoid the location precision requirements is to take both the ion beam material removal function and the location errors into account in designing the five-axis system accurately. The simulation example proves that the dwell time function obtained from this model is effective in assuring the final optical element figure precision (0.0381λ). The final optical element figure errors from the location errors of the ion source five-axis motion subsystem are bound by the range of maximum difference. So this model can be used for all kind of optics to determine the dwell time function and to design the location subsystem error preci-

收稿日期: 2008-10-15; 修订日期: 2008-12-02.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 60577004)

sion, and also to assure that the IBF process is stable and feasible at the minimal cost.

Key words: ion beam figuring; aspheric optics; located errors analysis; dwell time matrix equation

1 引 言

离子束加工技术是一种非接触加工方式,不存在其它加工方法中的工具磨损,边缘效应,工件负载应力等一系列问题^[1-2],亦不存在磁流变加工中要求抛光模与镜面法向间隙精度很高的问题^[3],所以该技术作为一种有效灵活,高度可控的光学元件最终面形加工手段受到了世界各国的广泛关注^[4-11]。离子束加工的基本原理是由计算机控制 5 轴精确定位系统控制离子束在待加工光学元件表面的运动轨迹和驻留时间,在离子束相对于待加工光学元件移动过程中,惰性离子束气体与光学元件表面的原子发生物理溅射作用,使部分光学材料从光学元件表面移除,按照合理的加工路径和优化计算的驻留时间函数,即可以加工出期望的面形。期望的面形材料去除量可表示为离子束单位时间材料去除量函数和驻留时间函数的卷积^[4-5],其中驻留时间函数的求解是离子束加工过程的关键步骤。本文通过对实际离子束加工过程的分析,给出了非球面离子束加工系统中的驻留时间矩阵方程求解模型(该模型同样适用于平面和球面光学元件),并进一步分析了离子束加工过程中的离子源动态定位误差,给出了定位误差对最终面形精度的影响公式,分析了误差的影响规律,提出了定位系统的误差设计方案,在保证精度的情况下降低了定位系统的成本。

2 模型的建立

2.1 系统结构分析

为保证离子束驻留光学元件表面各点时的单位时间材料去除量函数不变,必须使光学元件在离子束中心驻留点处的曲率半径远大于离子束的半径,同时离子束中心轴线和该点处的法线向量重合且离子源中心到该点的垂直距离为常量。由此要求离子源在整个非球面光学元件的加工过程中不断调整姿态,保证离子束始终以恒定距离垂直作用于光学元件表面。离子源的姿态有 6 个自由度,但出射离子束关于中心轴线对称,因此,实

际离子束光学加工系统只需要 5 个自由度即可满足工程要求。图 1 所示为离子束五轴定位系统初始结构及运动示意图,这里 x, y, z 为工件静态坐标系, x', y', z' 为离子源动态坐标系。以工件静态坐标系为参考,离子源动态坐标系的 5 个自由度分别为 x, y, z 方向的平移运动和绕 x' 轴, y' 轴的旋转运动 θ_x, θ_y 。

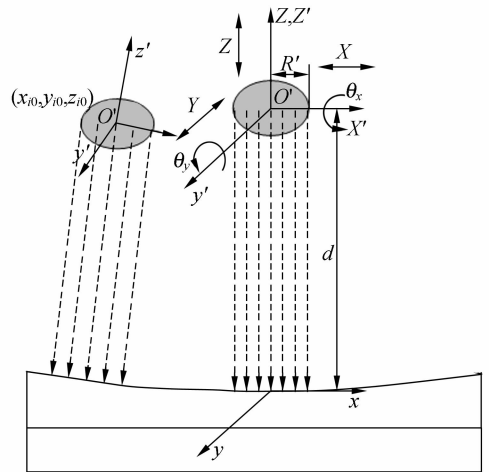


图 1 离子束 5 轴定位系统初始结构及运动示意图
Fig. 1 Structure and motion diagram of IBF five-axis location system

2.2 离子源运动子模型

在工件静态坐标系中,设待加工光学元件的曲面方程为 $z=f(x, y)$ 。 (x_i, y_i, z_i) 为其表面上任意一点的坐标,则该点处的单位法线朝内向量为^[12]:

$$\mathbf{n} = (\cos \alpha, \cos \beta, \cos \gamma), \quad (1)$$

这里 α, β, γ 分别为单位法线向量 \mathbf{n} 与 x, y, z 轴正方向的夹角,且有:

$$\begin{aligned} \cos \alpha &= \frac{-f_{x_i}}{\sqrt{1+f_{x_i}^2+f_{y_i}^2}} \\ \cos \beta &= \frac{-f_{y_i}}{\sqrt{1+f_{x_i}^2+f_{y_i}^2}} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \cos \gamma &= \frac{1}{\sqrt{1+f_{x_i}^2+f_{y_i}^2}}, \\ f_{\xi} &= \left. \frac{\partial f(x, y)}{\partial \xi} \right|_{\xi=\xi_i} \quad (\xi=x, y). \end{aligned} \quad (3)$$

由于离子束的单位时间材料去除量函数对镜

面法向间距不敏感,可以忽略 z' 轴方向的较小变化,所以当离子束中心以恒定距离垂直作用于光学元件表面 (x_i, y_i, z_i) 点时,在离子束动态坐标系中,离子束的单位时间材料去除量函数近似为高斯函数形式^[4-6],可描述为:

$$A_i(x', y') \Big|_{z'_i \approx -d} = \begin{cases} A_0 e^{-\frac{x'^2 + y'^2}{\sigma^2}}, \sqrt{x'^2 + y'^2} \leq R' \\ 0, \text{others} \end{cases} \quad (4)$$

为保证加工过程中离子束始终以恒定距离垂直作用于光学元件表面,需对动态离子源坐标系做平移和旋转变换。如图 1 所示,将工件静态坐标系作为整个系统的初始参考,则当离子源位于工件静态坐标系原点正上方距离为 d 的状态可表示为 $x_{i_0} = y_{i_0} = \theta_x = \theta_y = 0, z_{i_0} = d$; 因此要使离子束垂直作用于光学元件表面某点 (x_i, y_i, z_i) , 首先需将离子源动态坐标系原点平移到工件静态坐标系中的坐标点 $(x_{i_0}, y_{i_0}, z_{i_0})$ 处,再将该坐标系绕 x' 轴旋转 θ_x , 再绕 y' 轴旋转 θ_y , 即可得到离子束中心垂直作用于光学元件表面点 (x_i, y_i, z_i) 时的离子源动态坐标系。通过这 5 个自由度坐标编写控制程序来调整离子源动态坐标系的姿态,由式 (1)~(3) 和坐标旋转公式通过推导可得 5 个自由度的坐标为:

$$\begin{pmatrix} x_{i_0} \\ y_{i_0} \\ z_{i_0} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_i + d \cos \alpha \\ y_i + d \cos \beta \\ z_i + d \cos \gamma \end{pmatrix}, \quad (5)$$

$$\begin{cases} \sin \theta_x = \frac{-\cos \beta}{\sin \alpha}, \cos \theta_x = \frac{\cos \gamma}{\sin \alpha} \\ \sin \theta_y = -\cos \alpha, \cos \theta_y = \sin \alpha \end{cases} \quad (6)$$

2.3 驻留时间矩阵方程模型

为得到离子束对光学元件某点的材料去除量,本文引入齐次坐标系来得到工件静态坐标系中任一点 (x_k, y_k, z_k) 在离子源动态坐标系中的坐标^[13]:

$$\begin{pmatrix} x_k' \\ y_k' \\ z_k' \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta_y & -\sin \theta_x \sin \theta_y & \sin \theta_y \cos \theta_x & 0 \\ 0 & \cos \theta_x & \sin \theta_x & 0 \\ -\sin \theta_y & -\sin \theta_x \cos \theta_y & \cos \theta_x \cos \theta_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & -x_{i_0} \\ 0 & 1 & 0 & -y_{i_0} \\ 0 & 0 & 1 & -z_{i_0} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_k \\ y_k \\ z_k \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (7)$$

联合式 (1)~(7) 可得当离子束以恒定距离 d 垂直作用于光学元件表面点 (x_i, y_i, z_i) 处时,离子束在 (x_k, y_k, z_k) 点处的单位时间材料去除量,记为:

$$A_i(x_k, y_k) \Big|_{z'_i \approx -d} = \begin{cases} A_0 e^{-\frac{x_k'^2 + y_k'^2}{\sigma^2}}, \sqrt{x_k'^2 + y_k'^2} \leq R' \\ 0, \text{others} \end{cases} \quad (8)$$

当离子束按路径扫描整个光学元件表面驻留采样点后,光学元件某点的实际材料去除量为:

$$R_u(x_k, y_k) = \sum_{i=1}^{N_i} A_i(x_k, y_k) t(x_i, y_i, z_i), \quad (9)$$

这里 $i=1, 2, \dots, N_i, k=1, 2, \dots, N_r, N_i$ 为离子束驻留采样点总数, N_r 为光学元件表面面形采样点总数; $t(x_i, y_i, z_i)$ 为离子束中心在点 (x_i, y_i, z_i) 处的驻留时间。引入符号表示: $R_u(x_k, y_k) = r_{a_1}, A_i(x_k, y_k) = a_{ki}, t(x_i, y_i, z_i) = t_i$, 则式 (9) 可写为矩阵形式^[14]:

$$\begin{pmatrix} r_{a_1} \\ r_{a_2} \\ \vdots \\ r_{a_{N_r}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1N_i} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2N_i} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{N_r 1} & a_{N_r 2} & \cdots & a_{N_r N_i} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t_1 \\ t_2 \\ \vdots \\ t_{N_i} \end{pmatrix}. \quad (10)$$

令式 (10) 左边等于期望的材料去除量,即成为非球面离子束驻留时间矩阵方程求解模型。基于优化的矩阵求解方法(另文讨论),可得到驻留时间函数 $t = [t_1, t_2, \dots, t_{N_i}]^T$ 。

3 定位误差分析

在不考虑其它不确定因素的情况下,由图 1 可见离子束加工系统中定位误差主要由两部分组成,一是两坐标系初始安装后的相对误差,称为静态误差。这是在整个离子束加工过程中都存在的固有误差,可以通过测量后补偿消除。二是动态离子束坐标系 5 个自由度的定位误差,称为动态误差,包括 x, y, z 轴和 θ_x, θ_y 两个旋转轴。第二种误差是实际加工过程中不可避免的,取决于离子源五轴定位系统的精度,其大小决定了加工过程的稳定性。本节将主要分析这种误差对光学元件最终面形精度的影响情况,给出最终实际面形材料去除量与定位误差的关系式,为实际设备的设计、制造提出合理的误差容限提供了理论依据,保证系统加工精度,并节约成本。

3.1 误差模型

有误差存在时的离子源五轴定位系统的 5 个自由度坐标为 $x_{i_0} + \Delta x_{i_0}, y_{i_0} + \Delta y_{i_0}, z_{i_0} + \Delta z_{i_0}, \theta_x + \Delta \theta_x, \theta_y + \Delta \theta_y$ 。一般情况下 $\Delta x_{i_0}, \Delta y_{i_0}, \Delta z_{i_0}$ 服从同一正态分布, $\Delta \theta_x, \Delta \theta_y$ 服从另一正态分布。这里取最大误差 $\Delta r = \max(\Delta x_{i_0}, \Delta y_{i_0}, \Delta z_{i_0}), \Delta \theta = \max(\Delta \theta_x, \Delta \theta_y)$, 将其代入式(7)中的平移旋转变换矩阵并忽略高阶无穷小量, 可得静态坐标系中任一点 (x_i, y_k, z_k) 在有、无定位误差存在时离子源动态坐标系中的坐标差值:

$$\begin{pmatrix} \Delta x_{ik}' \\ \Delta y_{ik}' \\ \Delta z_{ik}' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\Delta r \sin \alpha - \Delta \theta d \\ -\Delta r \frac{\cos \gamma}{\sin \alpha} - \Delta \theta d \sin \alpha \\ -\Delta r \cos \gamma \end{pmatrix}. \quad (11)$$

由于离子束单位时间材料去除量函数对离子束垂直作用方向上的微小位移不敏感, 所以 $\Delta z_{ik}'$ 可以忽略。由式(11)可见五轴定位系统误差引起的两次坐标系中的差值不仅与 $\Delta r, \Delta \theta$ 的大小有关, 而且还与待加工光学元件表面面形和加工点位置有关, 在相对静态坐标系原点较远的边缘处误差减小, 在原点处 ($\alpha = \frac{\pi}{2}, \gamma = 0$) 处最大, 且垂直作用距离的大小对角度精度的影响很大, 保持同样角度误差时 d 大则要求 $\Delta \theta$ 高, 反之低些。这里可以取最大值使 $\Delta x_{ik}' = \Delta y_{ik}' = |\Delta r| + |\Delta \theta d|$, 这样对给定的坐标差值只要使 $|\Delta r| + |\Delta \theta d| < \delta$ 即可。这里 d 的确定很关键, 既要保证要求的材料去除量函数, 又不能使角度精度要求太苛刻。

3.2 定位误差对最终面形精度的影响

在极端情况下, 可设整个光学元件表面各点由于定位误差引起的坐标差值均为 δ , 则工件静态坐标系中任一点 (x_i, y_k, z_k) 在离子源动态坐标系中的坐标为 $(x_k' + \delta, y_k' + \delta, z_k' + \delta)$, 将其代入离子源动态坐标系中的离子束材料去除量函数表达式(8), 并忽略高阶无穷小量, 可得定位误差存在时, 离子束中心以恒定距离 d 垂直作用于光学元件表面点 (x_i, y_i, z_i) 处时在光学元件表面点 (x_k, y_k, z_k) 的单位时间材料去除量为:

$$A_i(x_k, y_k) \Big|_{z_i' \approx -d} = \begin{cases} A_0 e^{-\frac{x_k'^2 + y_k'^2}{\sigma^2}} - A_0 e^{-\frac{x_k'^2 + y_k'^2}{\sigma^2}} \frac{2\delta(x_k' + y_k')}{\sigma^2}, & \sqrt{x_k'^2 + y_k'^2} \leq R' \\ 0, & \text{others} \end{cases}, \quad (12)$$

这里令 $x_k' = r_k' \cos \phi, y_k' = r_k' \sin \phi$, 则有 $|x_k' + y_k'| \leq \sqrt{2} r_k' < 2R'$, 这样可得该点处的单位时间离子束材料去除量函数的最大变化量为:

$$\Delta A_i(x_k, y_k) \Big|_{z_i' \approx -d} = \begin{cases} \left| \frac{4\delta R'}{\sigma^2} \right| A_0 e^{-\frac{x_k'^2 + y_k'^2}{\sigma^2}}, & \sqrt{x_k'^2 + y_k'^2} \leq R' \\ 0, & \text{others} \end{cases}. \quad (13)$$

将其代入式(10)可得有定位误差存在时的极端实际材料去除量为:

$$\begin{pmatrix} r_{a_1} \\ r_{a_2} \\ \vdots \\ r_{a_{N_r}} \end{pmatrix} = (1 \pm F) \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1N_t} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2N_t} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{N_r 1} & a_{N_r 2} & \cdots & a_{N_r N_t} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t_1 \\ t_2 \\ \vdots \\ t_{N_t} \end{pmatrix}, \quad (14)$$

这里 $F = \left[\frac{4\delta R'}{\sigma^2} \right], t = (t_1, t_2, \dots, t_{N_t})^T$ 为式(10)的驻留时间解, 由式(14)可见定位误差引起的最终加工面形的变化范围落在 $(1 - F)r_a \sim (1 + F)r_a$ 之间, 即最大变化量为 $2F \cdot r_a$, 这样定位误差对最终面形精度的影响就可以归结为一个系数 F 因子的控制上。 F 的大小与定位误差引起的坐标差值 δ 和离子束半径 R' 的乘积成正比, 与单位时间离子束材料去除量函数的方差 σ^2 成反比。从保证最终面形精度的角度出发, 实际工程中需根据单位时间离子束材料去除量函数的参数 R' 和 σ^2 及坐标差值 δ 合理分配三者的关系, 不能一味地对定位误差引起的坐标差值 $|\Delta r| + |\Delta \theta d| < \delta$ 提苛刻要求, 这样既节约成本又能保证符合实际工程要求。

4 仿真实验

本节选择一个抛物面干涉图数据作为待加工光学元件表面数据, 其非球面参数为顶点半径 $R = 600 \text{ mm}$, 非球面系数 $K = -1$, 光学元件口径 $D = 50 \text{ mm}$ 。仿真用离子束材料去除函数半径 $R' = 10 \text{ mm}$, 方差 $\sigma = 10/3 \text{ mm}$, 其 FWHM = 5.6 mm, 顶点峰值材料去除量为 $0.158 \lambda/\text{min}$ ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$), 采用线性扫描路径方式。图 2 为加工前的光学元件的面形干涉图和离子束材料去除函数三维图。基于上述的模型, 本文计算了加工该光学元件的驻留时间函数和面形仿真加工结

果,图 3 为仿真加工后的面形干涉图和该光学元件离子束加工过程所需的驻留时间函数图,这里驻留时间函数沿实际光学元件边缘延拓了半个离子束直径,以保证全孔径范围内的面形精度一致。由图 3 可见由上述模型求解出的驻留时间函数值可以有效地保证面形的加工精度。

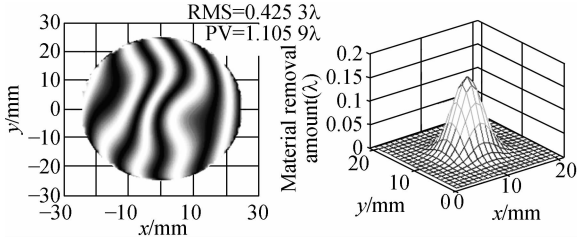


图 2 加工前的面形干涉图和离子束材料去除函数
Fig. 2 Interferogram of optical figure before IBF and material removal function of ion beam

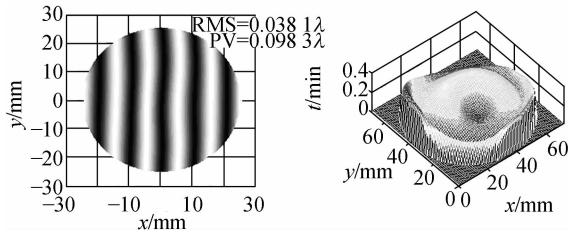


图 3 仿真加工后的面形干涉图和驻留时间函数
Fig. 3 Interferogram of optical figure after stimulated fabrication and dwell time function

为了验证离子束定位误差的影响,本文在离子束驻留光学元件表面的每个驻留点处都随机引入 5 个正态分布量 $N(0, 0.01/3)$ 的误差,也即定位精度为 ± 0.01 mm,作为 5 个自由度的误差带入式(10),图 4 为引入离子束随机定位误差后实际计算的面形精度的变化量。

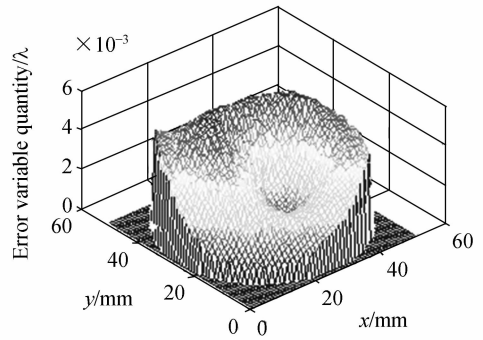


图 4 离子束定位误差引起的面形精度的变化量
Fig. 4 Figure differences from ion beam location errors

这里 $\delta = 0.01$ mm, $\sigma^2 = (10/3)^2$, $R' = 10$ mm, $F = \left| \frac{4\delta R'}{\sigma^2} \right| = 0.036$,实际计算的面形精度的变化量满足最终面形最大变化量 $2F \cdot r_a$ 公式的限制。

5 结 论

本文通过对离子束加工系统的分析,给出了离子束加工系统中的离子源子系统运动模型公式和驻留时间求解的线性矩阵方程模型,同时给出了离子源定位误差对最终面形精度的影响公式,并提出了综合考虑离子束材料去除函数和定位误差的方法来设计五轴定位系统精度。仿真实例计算表明,最终面形精度可达 $0.038 1\lambda$,离子束定位误差引起的面形精度的变化量满足最大变化量的公式限制。本文提出的模型和误差分析方法对实际离子束加工设备的研制和光学元件的加工有一定的指导意义。

参考文献:

- [1] 倪颖,李建强,王毅,等. 一种高效率小口径非球面数控抛光方法[J]. 光学技术,2008,34(1):33-36.
NI Y, LI J Q, WANG Y, et al.. An efficient method of computer controlled polishing for small aspheric lens [J]. *Opt. Tec.*, 2008,34(1):33-36. (in Chinese)
- [2] 牛海燕,张学军. $\phi 124$ mm 口径碳化硅质非球面镜面数控研抛技术研究[J]. 光学精密工程,2006,14(4):539-544.

- NIU H Y, ZHANG X J. Research on computer controlled polishing technology of $\phi 124$ mm aspheric reaction-burned silicon carbide mirror [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(4): 539-544. (in Chinese)
- [3] 张峰,余景池,张学军. 磁流变抛光技术[J]. 光学精密工程,1999,7(5):1-7.
ZHANG F, YU J C, ZHANG X J. Magnetorheological finishing technology [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1999,7(5):1-7. (in Chinese)
- [4] WILSON S R, MCNEIL J R. Neutral ion beam figuring of large optical surfaces [J]. *SPIE*, 1987,

818;320-322.

- [5] WILSON S R, REICHER D W, KRANENBERG C F, *et al.*. Ion beam milling of fused silica for windows fabrication [J]. *SPIE*, 1990,1441:82-85.
- [6] LYNN N A, ROBERT E K, TIMOTHY S L. Surface error correction of a Keck 10 m telescope primary mirror segment by ion figuring [J]. *SPIE*, 1991,1531:195-204.
- [7] PRASHANT M S, MICHAEL R F, GUIDO S, *et al.*. Ion-beam machining of millimeter scale optics [J]. *Appl. Opt.*, 2000,39(4):599-611.
- [8] LUTZ A, FREDI S, JOERG K, *et al.*. Flatness correction of NZTE mask blank substrates [J]. *SPIE*, 2001,4343:646-653.
- [9] MAURO G, PAOLO C, MARCO S, *et al.*. Field corrector for the ultraviolet italian sky surveyor on the international space station (UVISS): ion beam figuring and application of the multilayer filters [J]. *SPIE*, 2004,5488:475-480.
- [10] ZHOU L, XIE X H, DAI Y F, *et al.*. Ion beam figuring system in NUDT[J]. *SPIE*, 2007,6722:6722A1-6722A6.
- [11] 周林,戴一帆,解旭辉,等.光学镜面离子束加工的可达性[J]. *光学精密工程*, 2007,15(21):160-166.
- ZHOU L, DAI Y F, XIE X H, *et al.*. Machining reachability in ion beam figuring[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007,15(21):160-166. (in Chinese)
- [12] 同济大学数学教研室. 高等数学[M]. 北京:高等教育出版社,1988.
- Mathematics Teaching Research Office of Tongji University. *Higher Mathematics* [M]. Beijing: Higher Education Press, 1988. (in Chinese).
- [13] 柳洪义. 机器人技术基础[M]. 北京:冶金工业出版社,2002.
- LIU H Y. *The Basis of Robot Technology* [M]. Beijing: Metallurgy Industry Press, 2002. (in Chinese)
- [14] CHARLES L C, EGERT C M, KATHY W H, *et al.*. Advanced matrix-based algorithm for ion beam milling of optical components [J]. *SPIE*, 1992,1752:54-62.

作者简介:



武建芬(1975—),男,山西大同人,博士研究生,主要从事光学元件加工和检测等方面的研究。E-mail: wjf_85@163.com



张红鑫(1978—),男,河北邯郸人,助理,主要研究方向为微光学加工。E-mail: firsthongxin@163.com

导师简介:



卢振武(1955—),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,主要方向为衍射光学、微光学加工等。E-mail: luzw@ciomp.ac.cn



王泰生(1979—),男,辽宁营口人,博士研究生,主要研究方向为衍射光学。E-mail: wangtaisheng@sina.com